

Stefan Trautner

*Technische Umsetzung produkt-  
bezogener Instrumente der Umwelt-  
politik bei Elektro- und Elektronik-  
geräten*



Stefan Trautner

*Technische Umsetzung produkt-  
bezogener Instrumente der Umwelt-  
politik bei Elektro- und Elektronik-  
geräten*

Herausgegeben von

Professor Dr.-Ing. Klaus Feldmann,

Lehrstuhl für

Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik

**FAPS**



Meisenbach Verlag Bamberg

Als Dissertation genehmigt von der Technischen Fakultät  
der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Tag der Einreichung: 24. Januar 2002  
Tag der Promotion: 29. Mai 2002  
Dekan: Prof. Dr. rer. nat. A. Winnacker  
Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. K. Feldmann  
Prof. Dr.-Ing. H. Meerkamm

Die Deutsche Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme

**Trautner, Stefan:**

Technische Umsetzung produktbezogener Instrumente der  
Umweltpolitik bei Elektro- und Elektronikgeräten /

Stefan Trautner. - Bamberg : Meisenbach, 2002

(Fertigungstechnik - Erlangen ; 134)

Zugl.: Erlangen, Nürnberg, Univ., Diss., 2002

ISBN 3-87525-177-6

ISSN 1431-6226

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdrucks  
und der Vervielfältigung des Buches oder Teilen daraus,  
vorbehalten.

Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Genehmigung des  
Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder ein  
anderes Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichts-  
gestaltung - mit Ausnahme der in den §§ 53, 54 URG ausdrücklich  
genannten Sonderfälle -, reproduziert oder unter Verwendung  
elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder  
verbreitet werden.

© Meisenbach Verlag Bamberg 2002

Herstellung: Gruner Druck GmbH, Erlangen-Eltersdorf

Printed in Germany

*Para Lorena*



# Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Assistent am Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Klaus Feldmann, dem Leiter dieses Lehrstuhls am Institut für Maschinenbau und Fertigungstechnik, danke ich sehr für die Förderung meiner Arbeit, für den Freiraum bei der Bearbeitung des Aufgabenfeldes und insbesondere für das mir entgegengebrachte Vertrauen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Harald Meerkamm, dem Leiter des Lehrstuhl für Konstruktionstechnik am Institut für Maschinenbau und Fertigungstechnik, danke ich sehr herzlich für die Übernahme des Koreferates und für die jahrelange vertrauensvolle und konstruktive Zusammenarbeit in verschiedenen Forschungsvorhaben.

Teile der Arbeit beruhen auf den Ergebnissen aus zwei vom Bayerischen Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen geförderten Forschungsvorhaben. Mein Dank gilt den für diese Projekte verantwortlichen Mitarbeiter des Ministeriums und insbesondere den an den Projekten beteiligten wissenschaftlichen Mitarbeitern der Lehrstühle für Konstruktionstechnik, Kunststofftechnik, elektrische Antriebe und Steuerungen, Strömungsmechanik sowie für anorganische und analytische Chemie.

Einen besonderen Praxisbezug erhielt die Arbeit durch die hervorragende Zusammenarbeit mit dem Bereichsreferat für Umweltschutz, Arbeitssicherheit und Strahlenschutz der Firma Siemens Medical Solutions. Stellvertretend darf ich mich bei Herrn Rainer Görlitz und Herrn Dr. Freimut Schröder sehr herzlich für die wichtigen und aufschlussreichen Diskussionen und Arbeitsgespräche bedanken.

Weiterhin danke ich allen Kollegen am Lehrstuhl FAPS für die fachlichen Gespräche und die gute Zusammenarbeit. Besonders hervorzuheben sind dabei Herr Hartmut Lohrmann und dessen tatkräftige Unterstützung sowie Frau Andrea Brade.

Nicht zuletzt bedanke ich mich bei meinen Eltern und meinem Großvater, die mich stets auf meinem Weg und beim Definieren und Erreichen meiner Ziele gefördert haben. Meinem Bruder Jürgen danke ich sehr herzlich für die Unterstützung, die Diskussionen und für den Zusammenhalt auf meinem bisherigen Weg.

Mein herzlichster Dank gilt meiner Frau Margarita und meiner Tochter Lorena, die letztlich den Sinn meiner Bestrebungen darstellen und den erfolgreichen Abschluss dieser Arbeit erst ermöglicht haben.



# Technische Umsetzung produktbezogener Instrumente der Umweltpolitik bei Elektro- und Elektronikgeräten

## Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b> .....	<b>iii</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1 Ausgangslage – Produktbezogenes Umweltrecht.....	1
1.2 Kooperationsprinzip als Element der Umweltpolitik.....	4
1.3 Zielsetzung und Vorgehensweise.....	6
<b>2 Anforderungen an die technische Umsetzung produktbezogener Umweltgesetzgebung</b> .....	<b>7</b>
2.1 Europäische Richtlinie über Elektro- und Elektronik-Alt-Geräte.....	9
2.2 Europäische Richtlinie über Stoffverbote und -beschränkungen.....	13
2.3 Arbeitspapier zum Richtlinienentwurf über die Umweltwirkungen von Elektro- und Elektronikprodukten.....	14
<b>3 Entwicklungen zur Umsetzung produktbezogener Umweltgesetzgebung ..</b>	<b>16</b>
3.1 Methoden und Werkzeuge zur Produktanalyse.....	17
3.1.1 Werkzeuge zur umweltgerechten Produktentwicklung.....	18
3.1.2 Werkzeuge zur Demontageplanung.....	19
3.1.3 Abgleichen der Methoden mit dem Entwicklungsbedarf.....	24
3.2 Entwicklungsstand des Analysewerkzeugs ReGrEd/DisPlay.....	26
3.2.1 Gesamtstruktur des Produktanalyse-Werkzeugs.....	26
3.2.2 Produktstruktur-basierte Reduktion des Lösungsraums.....	31
3.2.3 Kennwert-basierte Reduktion des Lösungsraums.....	32
3.2.4 Schwachstellen-Analyse.....	34
3.2.5 Integration zusätzlicher ökologischer Analyse Kriterien.....	35
3.2.6 Defizite der bisher implementierten Ansätze und Ableiten von Entwicklungspotentialen.....	36

<b>4 Leistungsoptimierung des rechnergestützten Produktanalysewerkzeugs ReGrEd/DisPlay.....</b>	<b>41</b>
4.1 Transformation des Produktmodells in ein Datenmodell zur Demontageanalyse.....	42
4.1.1 Reduktion der Produktstruktur durch Topographieanalyse.....	42
4.1.2 Material- und Prozessdatenreduktion .....	45
4.1.3 Modifizierung des Datenmodells für Entsorgungsprozesse .....	48
4.1.4 Ergänzung der Datenmodelle zur Abbildung der Produktstruktur....	50
4.2 Rekursives Erstellen des AND/OR-Graphen .....	53
4.2.1 Generierung des AND/OR-Graphen .....	54
4.2.2 Reduktion der Teilprodukte durch Berücksichtigung von Demontagebaugruppen.....	58
4.2.3 Rückkonvertierung des Ergebnisses .....	59
4.3 Reduktion des AND/OR-Graphen durch Maximalwertabschätzung .....	60
4.3.1 Ermittlung potentieller Prozesse .....	60
4.3.2 Maximalwertabschätzung .....	65
4.3.3 Fixierung von Verbindungen.....	70
4.3.4 Implementierung der Reduktionsansätze .....	73
4.4 Ermittlung und Verifizierung der Reduktionsleistung .....	78
<b>5 Produktanalyse nach den europäischen Richtlinien zu Elektro- und Elektronikgeräten.....</b>	<b>81</b>
5.1 Berücksichtigung von Stoffverboten und -beschränkungen .....	82
5.2 Integration demontagepflichtiger Bauteile in die Analyse .....	84
5.3 Demontageanalyse bei vorgegebenen Verwertungs-/ Recyclingquoten .....	86
5.3.1 Klassifizierung von Entsorgungsprozessen .....	86
5.3.2 Integration von Zielquoten bei der Demontageanalyse .....	87
5.4 Ökologische Bewertung bei der Produktanalyse .....	91
<b>6 Herausforderungen durch innovative Ansätze der Umweltpolitik.....</b>	<b>95</b>
6.1 Standpunkte zu den europäischen Richtlinien über Elektro- und Elektronikgeräten.....	95
6.2 Konzept der Integrierten Produktpolitik (IPP) .....	101
6.2.1 Beitrag der Akteure im Produktlebenszyklus .....	104
6.2.2 Strategien zur Umsetzung des IPP-Konzepts .....	105
6.3 Kooperatives Gestalten Integrierter Produktpolitik .....	106
6.4 Aktuelle Ansätze zur Ausgestaltung Integrierter Produktpolitik .....	109

<b>7 Implementierung von Elementen Integrierter Produktpolitik am Beispiel eines Haushaltsgerätes</b> .....	<b>113</b>
7.1 Praxisnahe Bestimmung der Anforderungen .....	113
7.2 Bewertung konventioneller Lösungskonzepte .....	116
7.3 Entwicklung eines alternativen Gehäusekonzeptes .....	117
7.4 Umsetzung des Konzeptes in Prototypen .....	121
7.5 Verifizierung der Demontageeignung .....	122
7.6 Zusammenfassende Bewertung und Einordnung in die Integrierte Produktpolitik .....	124
<b>8 Umsetzung Integrierter Produktpolitik bei medizinischen Röntgendiagnosesysteme</b> .....	<b>128</b>
8.1 Lebenszyklusanalyse bei medizinischen Systemen .....	130
8.1.1 Eigenschaften medizinischer Röntgendiagnosesysteme .....	130
8.1.2 Qualitative Ermittlung von Umweltpotentialen .....	132
8.1.3 Quantifizierung der Umweltpotentiale .....	135
8.1.4 Qualitative Bewertung wirtschaftlicher Potentiale .....	136
8.2 Aufarbeitung medizinischer Röntgensysteme .....	138
8.2.1 Einordnung von Aufarbeitungsstrategien .....	139
8.2.2 Analyse bestehender Abläufe zur Aufarbeitung medizinischer Systeme .....	140
8.3 Entwicklung von Optimierungsmaßnahmen .....	142
8.3.1 Basisstrategie für die Implementierung von Maßnahmen Integrierter Produktpolitik .....	142
8.3.2 Entwicklung eines Grobkonzeptes zur Aufarbeitung medizinischer Röntgendiagnosesysteme .....	143
8.4 Einordnung der Aufarbeitung medizinischer Systeme in die Anforderungen einer Integrierten Produktpolitik .....	149
<b>9 Zusammenfassung</b> .....	<b>152</b>
<b>Literatur</b> .....	<b>155</b>
<b>Abkürzungen</b> .....	<b>172</b>



# 1 Einleitung

## 1.1 Ausgangslage – Produktbezogenes Umweltrecht

Umweltpolitische Instrumente waren in der Vergangenheit überwiegend in Form von Gesetzen und Vorschriften ausgeprägt, die sich auf Emissionen und Immissionen in die Umweltkompartimente Luft, Wasser und Boden und damit eher auf den betrieblichen bzw. nachsorgenden Umweltschutz bezogen (Bild 1) [187]. Durch entsprechende Auflagen, Grenzwerte und Verbote wurden wesentliche Umweltprobleme drastisch verringert. Dennoch kam es durch derartig statische Ansätze teilweise zur Problemverlagerungen zwischen einzelnen Produktlebensphasen oder Umweltmedien.

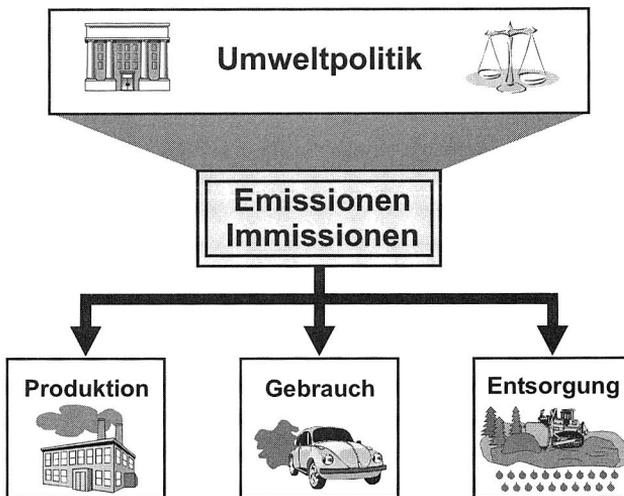


Bild 1: Emissionsminderung als bisheriger Fokus der Umweltpolitik

Weiterhin ist festzustellen, dass weniger die von der Herstellung ausgehenden Umweltbelastungen, sondern insbesondere die mit der Nutzung und Entsorgung von Produkten zusammenhängenden oder von diesen selbst ausgehenden Umweltwirkungen überproportional ansteigen. Den Effizienzsteigerungen bei einzelnen Prozessen durch den technischen Fortschritt, und damit den bisher geregelten standortbezogenen Emissionen, stehen immer häufiger höhere Stückzahlen, intensivere Nutzung oder kürzere Gebrauchsphasen und damit diffuse Emissionsquellen gegenüber. Ebenso sind der Wirksamkeit beispielsweise einer Filtertechnologie durch die ökonomische Effizienz Grenzen gesetzt, d.h. das Ausschöpfen noch vorhandener Potentiale ist nur mit einem unverhältnismäßig hohen Kostenaufwand zu erreichen [163].

Die verwaltungsrechtliche Vorgabe zunehmend strenger Grenzwerte bedingte den Einbau entsprechender Filter- und Reinigungsanlagen, die als wichtige Kostenfaktoren bei der Planung und Gestaltung von Produktionsstätten nach wie vor zu berücksichtigen sind. Die Kosten für Umweltbelastungen in Produktlebensphasen, die nicht im Handlungsfeld der Hersteller lagen, wurden jedoch von diesem eher als externe Kosten eingeordnet. Unter anderem aufgrund zurückgehender Fertigungstiefen in den Unternehmen und einer zunehmend globalen Verteilung der Produktion nehmen die Wirkungen der nationalen, **produktionsbezogenen** Regelungen beständig ab [187]. Um diesem Wirkungsverlust entgegenzutreten und gleichzeitig die mit den ansteigenden Stoffströmen verbundenen Umweltbelastungen einzudämmen, wird zukünftig in Ergänzung dazu die gesetzliche Normierung des **produktbezogenen** Umweltschutzes – oft mit präventivem Charakter – die bestimmende Größe umweltpolitischer Aktivitäten sein (Bild 2) [112].

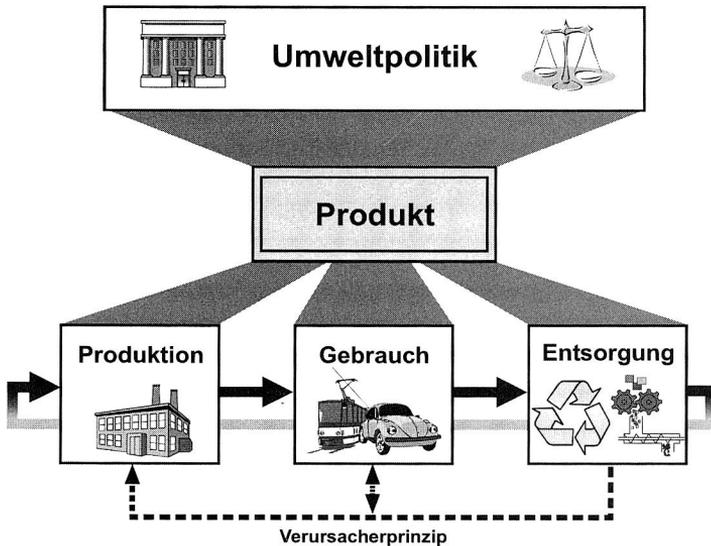


Bild 2: Handlungsfelder produktbezogener Umweltpolitik

Hierdurch soll im wesentlichen drei Aspekten Rechnung getragen werden:

- Schadstoffe, die nicht in den Stoffkreislauf eingebracht werden, brauchen auch nicht wieder herausgefiltert werden [112].
- Der Verursacher von Umweltbelastungen soll die (Kosten-)Verantwortung für diese übernehmen [78], [109], [113], [136].
- Umweltprobleme sind oft am effizientesten bei der technischen Auslegung von Produkten und Dienstleistungen durch den Hersteller zu lösen [36], [136], [141].

Aktuell im Fokus des Gesetzgebers steht dabei aufgrund der Massenströme, der damit verbundenen Kosten für die Gesellschaft und der einhergehenden Umweltwirkungen die Entsorgung von Produkten. So wurde mit dem Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz in Deutschland die Produktverantwortung zumindest bezüglich der Entsorgungsphase erstmals auf die Hersteller übertragen [132] und beispielsweise für Altöle und Batterien durch Verordnungen national konkretisiert.

Während der letzten Jahre ist allgemein eine Intensivierung der Exportwirtschaft festzustellen. Beispielsweise wurden im Jahr 2000 ca. 65 % der in Deutschland hergestellten Elektro(nik)geräte exportiert – davon ca. 73 % ins europäische Ausland [154]. Damit ist die Betrachtung internationaler, produktbezogener Regelungen als Instrument der Umweltpolitik zweckmäßig und zielführend. Besonders interessant sind dabei Elektro- und Elektronikprodukte. Ein Blick auf die Verbindungsstelle der europäischen Maschinenbau-, metallverarbeitenden und Elektro-Industrie *Orgalime* (*Organisme de Liaison des Industries Métalliques Européennes*) zeigt die Relevanz dieser Produktgruppe: Orgalime vertritt 28 Verbände und damit ca. 100.000 Unternehmen in 18 europäischen Ländern. Diese Industrie erwirtschaftete 1999 mit etwa 7,6 Mio. Beschäftigten rund 1.038 Mrd. Euro des Bruttoinlandsproduktes in Europa [41].

Unter anderem um eine Harmonisierung der Rechtsnormen im europäischen Wirtschaftsraum zu erreichen, wurden durch die Europäische Kommission Gesetzesvorhaben bezüglich der umweltschonenden Entsorgung von Elektro- und Elektronikaltgeräten aufgelegt (vgl. Abschnitt 2), mit dessen Abschluss bis Ende des Jahres 2002 zu rechnen ist [37], [112], [113]. Vor dem Hintergrund von 2,1 Mio. t Elektro(nik)-Schrott im Jahr 2000 alleine in Deutschland [168] und einer erwarteten, jährlichen Steigerungsrate von 3 - 5% [112] sind die geplanten Richtlinien dabei stark von direkt und indirekt präventiven Elementen geprägt.

Durch die Einsatzbeschränkung von gefährlichen Substanzen in einem entsprechenden, europäischen Richtlinienentwurf [113] wird der Hersteller direkt gezwungen, nach alternativen Materialien für betroffene Produkte zu suchen. Mit der Vorgabe konkreter Maßnahmen zur Rücknahme und Entsorgung, durch die Festlegung von ehrgeizigen Verwertungs- bzw. Recyclingquoten und vor allem durch die Zuweisung der Verantwortung für die Entsorgung an die Hersteller werden indirekt präventive Aktivitäten unter anderem hinsichtlich einer demontage- und verwertungsgerechten Produktgestaltung erforderlich [112].

Die Kosten für die Entsorgung von Produkten werden für den Hersteller damit zu einem unmittelbaren Preisfaktor, d.h. die bisher eher freiwillig ausgeprägte oder auch aus Marketinggründen durchgeführte Demontageanalyse mit Bestimmung der Verwertungs- und Recyclingquoten wird zum wichtigen Instrument für die Erhaltung oder Erschließung von Marktpotentialen [78]. Daraus lässt sich für die Industrie der dringende Bedarf nach effizienten Werkzeugen für die Produktanalyse bezüglich rechtlicher Vorgaben ableiten. Von besonderer Bedeutung ist demnach, dass ein Anwender z.B. in der Produktplanung und –gestaltung – neben den zahlreichen weiteren

Anforderungen – sehr schnell und nur mit geringem Zusatzaufwand die wesentlichen Indikatoren für die umweltrechtlichen Konsequenzen eines Produktes in der Entsorgungsphase erhält.

Die Demontageplanung mit der Berechnung einer wirtschaftlich optimalen Entsorgungsstrategie sowie der resultierenden Fraktionen ist bereits seit einigen Jahren Gegenstand wissenschaftlicher Entwicklungsarbeit (vgl. [7], [48], [80], [190]), die aufgrund der komplexen Problemstellung als noch nicht abgeschlossen gelten kann. Eine nähere Betrachtung der Aufgabenstellung führt zu einem diskreten, 4-dimensionalen Optimierungsproblem, bei dem eine Dimension durch die Bauteile eines Produktes und eine zweite durch die Verbindungen der Bauteile untereinander belegt sind. Als dritte Dimension können die geometrischen Restriktionen der Bauteile bezüglich der Demontagerihenfolge betrachtet werden, welche die möglichen Demontagezustände eines Produktes bestimmen. Die vierte Dimension wird letztlich durch die Entsorgungsprozesse aufgespannt, denen die abhängig vom Demontagezustand resultierenden Fraktionen zugeführt werden können. Ziel muss es sein, verbleibende und weitreichende Potentiale zur Effizienzsteigerung der methodisch äußerst komplexen Demontageanalyse zu erschließen und umzusetzen sowie deren Funktionalität um eine integrierte und umfassende Konformitätsanalyse hinsichtlich umweltrechtlicher Anforderungen zu erweitern.

## 1.2 Kooperationsprinzip als Element der Umweltpolitik

An einem Beispiel der produktbezogenen Gesetzgebung in Deutschland kann die Problematik nationaler, gesetzlicher Regelungen aufgezeigt werden. Bereits 1992 wurde ausgehend vom Arbeitspapier einer „Elektronikschratt-Verordnung“ eine entsprechende Diskussion im nationalen Gesetzgebungsverfahren begonnen [92]. Über mehrere Zwischenstufen – z.B. dem Entwurf einer reduzierten „Informationstechnik-Altgeräte-Verordnung“ [95] – wurde letztlich der „Entwurf einer Elektroaltgeräte-Verordnung“ [107] vom Umweltausschuss des Bundestags erarbeitet, der noch im April 1999 als kurz vor der Verabschiedung bewertet wurde [67], [198].

Aufgrund eines Rechtsgutachtens im Auftrag des ZVEI wurden massive Bedenken bezüglich der Verfassungsmäßigkeit der Verordnung deutlich, die insbesondere in der Übertragung der Kostenverantwortung für sog. „historischen Abfall“<sup>1</sup> und für Fremdprodukte an die Hersteller begründet sind [41]. Wegen der bestehenden Rechtsunsicherheit sowie der parallelen Anstrengungen auf europäischer Ebene ruht das diesbezügliche, nationale Gesetzgebungsverfahren seither [118], [186], [199]. In den Niederlanden, Dänemark, Schweden, Österreich, Belgien und Italien sind dagegen bereits Rechtsvorschriften aufgelegt, welche die Sammlung und Behandlung von Elektronikschratt regeln.

---

<sup>1</sup> Als „historischer Abfall“ werden Altgeräte bezeichnet, die von einer entsprechenden, gesetzlichen Regelung betroffen sind, sich zum Zeitpunkt des Inkrafttretens jedoch bereits auf dem Markt befinden [112].



tuell in der Diskussion zwischen Europäischer Kommission, Wirtschaft, Verbraucher- und Umweltverbänden steht [158]. Die Ausgestaltung der Integrierten Produktpolitik als umweltpolitischer Ansatz ist für Hersteller gleichermaßen Chance wie Herausforderung [150]. Durch die Möglichkeit zur aktiven Mitwirkung bei der Konzeption staatlicher Umweltpolitik erhalten Hersteller die Chance, sich im Sinne einer Eigensteuerung an Stelle ordnungsrechtlicher Regelungen mehr Freiräume zu schaffen und eine für alle Beteiligten vorteilhafte, höhere Effizienz des Umweltschutzes bei gleichzeitigen Kosteneinsparungen zu erreichen. Darüber hinaus besteht die Herausforderung für die Industrie im Aufzeigen der eigenen Leistungsfähigkeit zum produktbezogenen Umweltschutz und damit oftmals in der schwierigen Änderung der Denkweise sowie Unternehmenspolitik und –philosophie [187], [197].

### 1.3 Zielsetzung und Vorgehensweise

Aktuelle Gesetzgebungsvorhaben im Bereich der Elektronikindustrie nehmen unmittelbaren Einfluss auf die Produktplanung und –gestaltung. Daneben werden bei der Konzeption der Umweltpolitik zunehmend kooperative Elemente integriert, die den Herstellern Möglichkeiten zur freiwilligen Mitwirkung und zur Effizienzsteigerung des Umweltschutzsystems bieten. Das übergeordnete Ziel dieser Arbeit ist es, einen Beitrag zur technischen Umsetzung umweltpolitischer Instrumente im umfassenden Handlungsfeld der Elektro- und Elektronikindustrie zu leisten. Dies soll einerseits durch die Entwicklung von Werkzeugen erfolgen, die schnell und effizient eine Produktanalyse nach zukünftigen umweltrechtlichen Bestimmungen erlauben. Andererseits soll das derzeit diskutierte Konzept für eine Neugestaltung der Umweltpolitik durch eine Integrierte Produktpolitik erfasst und Möglichkeiten zu deren industriellen Ausgestaltung dargestellt werden.

Dazu werden die relevanten, europäischen Gesetzesvorhaben zu Elektro- und Elektronikgeräten hinsichtlich ihrer industriellen Anforderungen analysiert und die zu berücksichtigenden Einzelkriterien erarbeitet. Nach einem Abgleichen mit aktuell bestehenden Werkzeugen zur Produktanalyse bezüglich Umwelt- und Demontageeigenschaften werden Ansätze zur Effizienzsteigerung der Demontageanalyse und zur Integration der rechtlichen Kriterien in die Produktbewertung entwickelt.

Die bisher noch teilweise vielschichtig formulierten Aspekte der Integrierten Produktpolitik werden auf der Basis der aktuell in die Diskussion eingebrachten wissenschaftlichen und politischen Beiträge konkretisiert und der Handlungsbedarf der Industrie hinsichtlich dieses neuen Konzeptes abgeleitet. Anhand von Best-Practice-Beispielen in Kooperation zwischen Staat und Industrie muss die Leistungsfähigkeit freiwilliger Maßnahmen der Wirtschaft zum produktbezogenen Umweltschutz aufgezeigt werden, um die Freiräume und Chancen der Integrierten Produktpolitik auszugestalten. An zwei Praxisbeispielen aus der Elektronikindustrie werden Möglichkeiten industrieller Beiträge zur Integrierten Produktpolitik aufgezeigt.

## 2 Anforderungen an die technische Umsetzung produktbezogener Umweltgesetzgebung

Als repräsentative Beispiele für produktbezogene Umweltgesetzgebung mit durchwegs sehr tiefgreifender Wirkung und innovativem Charakter sind die europäischen Richtlinien zu Elektro- und Elektronikgeräten zu sehen [41], [112], [116], [139]. Die ursprünglich aus einem einzigen Entwurf entwickelten Richtlinien betreffen:

- Die Rücknahme und Behandlung von Elektro- und Elektronikaltgeräten (Waste of Electrical and Electronic Equipment – im weiteren als *WEEE* bezeichnet) [112], [160];
- Die Verwendung bestimmter, gefährlicher Substanzen in elektrischen und elektronischen Produkten (Restriction of the Use of Certain Hazardous Substances in Electrical and Electronic Equipment – im weiteren als *RoHS* bezeichnet) [113], [161];
- Die Umweltauswirkungen von elektrischen und elektronischen Geräten (Impact on the Environment of Electrical and Electronic Equipment – im weiteren als *EEE* bezeichnet) [141].

Wie im folgenden darzustellen ist, nehmen diese Richtlinien direkten Einfluss auf die Produktplanung und –gestaltung. Um den Hersteller elektrischer und elektronischer Geräte durch entsprechende Werkzeuge umfassend bei der technischen Umsetzung dieser produktbezogenen, gesetzlichen Anforderungen zu unterstützen sind daher die wesentlichen Aspekte der Richtlinien aus den bisherigen Entwürfen herauszuarbeiten und aufzuzeigen. Als Ausgangspunkt für die Richtlinien *WEEE* und *RoHS* dienen dafür die *Gemeinsamen Standpunkte des Rates der Europäischen Umweltminister* als bislang letzte und damit aktuelle Versionen der Richtlinienentwürfe [160], [161].

Mit Blick auf die unterschiedlich ausgeprägte, nationale Gesetzgebung und den europäischen Binnenmarkt ist eine einheitliche, europäische Regelung des produktbezogenen Umweltschutzes dringend geboten, weil durch die unterschiedliche Ausführung beispielsweise der Herstellerhaftung Handelshemmnisse und Wettbewerbsverzerrungen entstehen können [113]. Nach Artikel 95 des Vertrags zur Gründung der Europäischen Gemeinschaft (EG-Vertrag) erlässt der Rat Maßnahmen zur Angleichung der Rechts- und Verwaltungsvorschriften der Mitgliedsstaaten, welche die Errichtung und das Funktionieren des Binnenmarktes zum Gegenstand haben [109].

Nach Artikel 174 des EG-Vertrages besteht ein wesentliches Ziel der europäischen Umweltpolitik in der Sicherstellung eines hohen Schutzniveaus [109]. Dies soll durch die Grundsätze der Vorbeugung, der Ursachenbekämpfung und durch das Verursacherprinzip erfolgen. Gerade der Grundsatz der Herstellerhaftung führt zu weitreichenden Folgen für die Industrie [77], [78], [98], [164]. Ziel ist es dabei, durch das Übertragen der Verantwortung für die Entsorgung und durch die Beschränkung des

Einsatzes von gefährlichen Stoffen einen wirtschaftlichen Anreiz zu schaffen, bei der Entwicklung von Produkten den Voraussetzungen für eine sichere Entsorgung Rechnung zu tragen.

1998 fielen im Bereich der Europäischen Union etwa 6 Mio. Tonnen Elektronikschrott an. Ausgehend von einem jährlichen Wachstum um mindestens 3 - 5% dürfte sich diese Menge innerhalb von 12 Jahren verdoppeln [112]. Problematisch ist dabei, dass ca. 90% der Elektro- und Elektronikaltgeräte durch die kommunale Abfallsammlung erfasst und daher ohne spezielle Vorbehandlung verbrannt oder deponiert werden [94].

Metalle aus Elektro(nik)schrott haften nach einer Verbrennung entweder als Metalloxide am emittierten Staub, der im Filterkuchen als Sonderabfall entsorgt werden muss oder verbleiben in der Schlacke. Aufgrund der möglichen Metalleluation durch Umweltmedien bleibt dadurch deren weiterer Einsatz z.B. für den Straßenbau beschränkt. Darüber hinaus wirkt das in Elektro(nik)schrott enthaltene Kupfer als Katalysator bei der Bildung toxischer polychlorierter Dibenzo-Dioxine und -Furane (PCDD/PCDF), die sich mit dem Chlor aus dem ebenfalls in Elektro(nik)schrott vorhandenen PVC sehr leicht bilden können [112].

Diese Begründung steht interessanterweise im Widerspruch zu Untersuchungen der Association of Plastics Manufacturers in Europe (APME), die in einer Studie keinen signifikanten Anstieg von PCDD/PCDF-Emissionen durch die Mitverbrennung von Kunststoffen aus Elektro- und Elektronikaltgeräten in der thermischen Hausmüllbehandlung festgestellt hat [208]. Daneben ergeben sich negative Auswirkungen auf den Feuerungswirkungsgrad, weil beispielsweise mit dem Einspeisen von Glas aus Kathodenstrahlröhren in eine Verbrennungsanlage eine Energieminderung durch den niedrigeren Heizwert von ca. 400kJ/kg verbunden ist [113].

Bei der Deponierung von Elektro- und Elektronikaltgeräten kann es aufgrund der zahlreichen gefährlichen Stoffe zu schwerwiegenden Umweltschäden kommen. Aufgrund der Eluierung – ggf. auch in entsprechender chemischer Atmosphäre durch sonstige deponierte Stoffe – können Schwermetalle und halogenierte Kohlenwasserstoffe in das Grundwasser gelangen. Ebenso entstehen oft aufgrund z.B. unkontrollierter chemischer Reaktionen Brände auf Deponien, die Schadstoffe ohne Gasreinigung freisetzen [94]. Derartige Problemstellungen könnten gelöst werden, indem Deponien durch entsprechende, technische Standards abgesichert werden. Schätzungen zufolge sind jedoch beispielsweise etwa 70% der 5.000 Abfalldeponien in Griechenland unkontrolliert [113]. Zielführender erschien es hier eher, durch Verordnung präventiv dafür zu sorgen, dass die Substanzen mit dem wesentlichen Gefahrenpotential nicht auf Deponien gelangen. Bild 4 fasst die Motivation des Gesetzgebers für die aktuellen Gesetzgebungsverfahren zu Elektro- und Elektronikgeräten zusammen.

Nach etwa drei Jahren intensiver Diskussion hat die Europäische Kommission am 13.06.2000 dem Europäischen Parlament und Rat den Entwurf der WEEE und RoHS vorgelegt [112], [113]. Dazu nahmen bereits der Wirtschafts- und Sozialausschuss

sowie des Ausschuss der Regionen Stellung [128], [140]. Ebenso erfolgte eine erste Lesung im Europäischen Parlament und eine Berichterstattung des Ausschusses für Umweltfragen, Volksgesundheit und Verbraucherpolitik [36] sowie daraufhin die Vorlage eines geänderten Vorschlages durch die Europäische Kommission [149]. Die in Abschnitt 2.1 und 2.2 beschriebenen Inhalte beziehen sich auf den gemeinsamen Standpunkt der europäischen Umweltminister vom 14.11.2001 [160], [161].

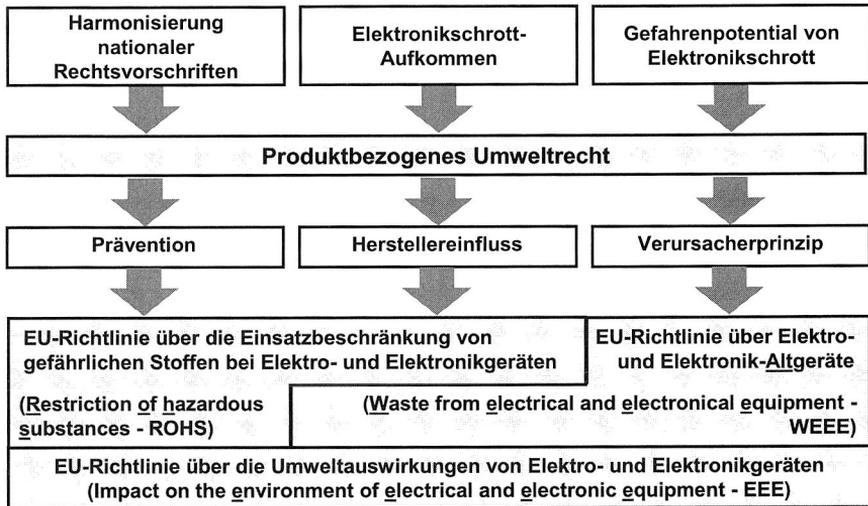


Bild 4: Motivation des Gesetzgebers für den Erlass der europäischen Elektro(nik)richtlinien

Mit einem endgültigen Erlass der Richtlinie nach einer zweiten Lesung im europäischen Parlament und der Behandlung im Vermittlungsausschuss ist frühestens im Sommer des Jahres 2002 zu rechnen [37]. Die Umsetzung der Richtlinie in nationales Recht hat dann innerhalb von 18 Monaten nach dem Erlass zu erfolgen. Die Richtlinie EEE existiert aktuell nur als Arbeitspapier der Generaldirektion Unternehmen [141] und wird aufgrund der noch zu erwartenden, tiefgreifenden Änderungen an dieser Stelle nur allgemein betrachtet (Abschnitt 2.3).

## 2.1 Europäische Richtlinie über Elektro- und Elektronik-Alt-Geräte

Ziel der europäischen Richtlinie über Elektro- und Elektronikaltgeräte ist vorrangig die Vermeidung von deren Abfällen sowie die Wiederverwendung, das Recycling und andere Formen der Verwertung. Dies soll durch Erhöhen der Umweltschutzleistung aller Beteiligten entlang des Produktlebensweges erreicht werden [160], d.h. diese Richtlinie wird aufgrund des Artikels 175 des EG-Vertrags [112] erlassen. Durch die Richtlinie sind alle Produkte nach Tabelle 1 erfasst.

1. Haushaltsgroßgeräte	6. Elektrische und elektronische Werkzeuge
2. Haushaltskleingeräte	7. Spielzeug sowie Sport- und Freizeitgeräte
3. IT- und Telekommunikationsgeräte	8. Medizinische Geräte
4. Geräte der Unterhaltungselektronik	9. Überwachungs- und Kontrollinstrumente
5. Beleuchtungskörper	10. Automatische Ausgabegeräte

Tabelle 1: Von der Richtlinie WEEE erfasste Produkte [160]

### **Begriffsbestimmungen**

Einige der in dem Richtlinienentwurf [160] definierten Begriffe sind wesentlich für den Geltungsbereich, die Bewertung von Verfahren und das Ableiten von Handlungsfeldern für die betroffenen Akteure. Zu beachten ist hierbei, dass die in der deutschen Übersetzung gewählten Begriffe zu Verfahren und Maßnahmen in der Entsorgungsphase von Produkten teilweise nicht mit denen übereinstimmen, die in der VDI-Richtlinie 2243 definiert sind.

Nach Artikel 3 der WEEE sind *Elektro- und Elektronik-AIT-Geräte* Abfälle derartiger Produkte nach der Richtlinie 75/442/EWG [96], [160]. Durch die direkte Kopplung mit dem Abfallbegriff sind Produkte, die vor einer Sammlung vollständig einer weiteren Verwendung zugeführt werden, ein Wirtschaftsgut und kein Abfall (vgl. KrW-/AbfG, § 3, Abs. 1-4 [132]) [5], [20]. Sie fallen deshalb nicht unter die Bestimmungen der WEEE. Dies bedeutet jedoch auch, dass die Wiederverwendung von kompletten Produkten keine Maßnahme im Sinne der Richtlinie darstellt und deshalb auch keinen Beitrag zu geforderten Verwertungs- und Recyclingquoten (s.u.) leistet.

Der Begriff *Recycling* nach der Richtlinie WEEE bezeichnet die „Wiederaufarbeitung“<sup>2</sup> von Abfällen ausschließlich der energetischen Verwertung und entspricht damit der stofflichen Verwertung nach dem KrW-/AbfG. Wesentliches Merkmal von Verfahren zur stofflichen Verwertung ist die Rückgewinnung von Stoffen zur Substitution von Rohstoffen oder die Nutzung der stofflichen Eigenschaften eines Abfalls mit Ausnahme der unmittelbaren Energierückgewinnung als Hauptzweck der Maßnahmen [65], [132]. Die *Recyclingquote* errechnet sich demnach aus der Masse der einer **stofflichen** Verwertung zugeführten Fraktionen bezogen auf die Gesamtmasse des Produktes.

Zur Konkretisierung von *Verwertung* und *Beseitigung* wird auf die in den Anhängen IIA und IIB der Richtlinie genannten Verfahren verwiesen. Ausschlaggebend für ein Verfahren zur Verwertung (einschließlich der energetischen) ist die behördliche Einstufung nach den festgelegten rechtlichen Kriterien (z.B. Richtlinie 75/442/EWG [96]

---

<sup>2</sup> Der in der WEEE beschriebene Begriff der „Wiederaufarbeitung“ unterscheidet sich wesentlich von der in der VDI-Richtlinie 2243 festgelegten Terminologie. Dort werden als „Aufarbeitung“ alle Maßnahmen im Sinne der Wiederverwendung von Produkten bezeichnet. Die Maßnahmen zur Abfallbehandlung für eine Verwertung sind dagegen als „Aufbereitung“ definiert [129].

und KrW-/AbfG [132]). Alle Verfahren die keine Verwertung sind, werden als Verfahren zur Beseitigung eingestuft. Die *Verwertungsquote* errechnet sich aus der Masse der Fraktionen, die einer **stofflichen** oder **energetischen** Verwertung zugeführt werden, bezogen auf die Gesamtmasse des Produktes.

### ***Sammlung von Elektro- und Elektronikaltgeräten***

Bis spätestens 30 Monate nach dem Inkrafttreten der Richtlinie sind in den Mitgliedsstaaten der Europäischen Gemeinschaften Sammelsysteme einzurichten, über die Elektro- und Elektronikaltgeräte aus privaten Haushalten zumindest kostenlos zurückgegeben werden können (Artikel 4 WEEE [160]). Dabei wird auch explizit der Einzelhandel einbezogen, der die Rücknahme von Altgeräten ermöglichen muss, wenn ein neues, gleichwertiges oder ein Gerät mit gleicher Funktion gekauft wird.

Als Sammelziel für diese Abfälle aus privaten Haushalten sind vier Kilogramm pro Einwohner und Jahr bis 36 Monate nach Inkrafttreten der Richtlinie vorgegeben. Dies entspricht jedoch nur ca. 25% des geschätzten Abfallaufkommens [36]. Die Verantwortung für die Einrichtung von Sammelsystemen für Elektro(nik)schrott aus privaten Haushalten wird nicht unmittelbar den Herstellern übertragen. Die Mitgliedsstaaten können diesen jedoch gestatten, eigene, individuelle oder kollektive Rücknahmesysteme zu installieren, wenn sie dadurch ihrer Herstellerverantwortung leichter nachkommen können und die Rückgabe von Altprodukten für den Verbraucher nicht erschwert wird.

Die Hersteller müssen nach Meinung des Ministerrates jedoch in jedem Fall die Finanzierung der Sammlung übernehmen. Elektro- und Elektronikaltgeräte, die nicht aus privaten Haushalten stammen, sind zwingend durch die Hersteller oder deren Beauftragte zu sammeln. Um auch die Sammlung sog. „Mülltonnen-gängiger“ Kleingeräte zu erleichtern, ist das Aufbringen eines entsprechenden Hinweissymbols auf dem Produkt oder ggf. der Verpackung vorgesehen.

### ***Behandlung und Verwertung von Elektro- und Elektronikaltgeräten***

Die Verantwortung für die Behandlung von Elektro(nik)schrott, also der Verwertung und Beseitigung einschließlich aller vorgeschalteten Aktivitäten wie z.B. Demontage, wird nach Artikel 5 der WEEE dem Hersteller auferlegt [160]. Diese müssen dazu individuell oder kollektiv entsprechende Verwertungssysteme einrichten und die Behandlung - zumindest für die aus privaten Haushalten stammenden Abfälle - insgesamt finanzieren.

Die Finanzierung der Behandlung von Elektro- und Elektronikaltgeräte, die nicht aus privaten Haushalten stammen, trägt zunächst grundsätzlich der Hersteller. Dieser kann jedoch mit dem Nutzer andere Finanzierungsmodalitäten vereinbaren. Ebenso können die Mitgliedsstaaten der EU bei der nationalen Umsetzung der Richtlinie die Beteiligung der nicht aus privaten Haushalten stammenden Nutzer vorsehen.

Produkte	Verwertungsquote	Wiederverwendung und Recycling
Haushaltsgroßgeräte	80 %	75 %
IT- und Telekommunikationsgeräte, Geräte der Unterhaltungselektronik	75 %	65 %
Haushaltskleingeräte, Beleuchtungskörper, elektrische und elektronische Werkzeuge, Spielzeug / Sport- und Freizeitgeräte, Überwachungs- und Kontrollinstrumente, Automatische Ausgabegeräte	70 %	50 %
Gasentladungslampen	--	80 %

Tabelle 2: Verwertungs- und Recyclingquoten für Elektro(nik)schrott nach der Richtlinie WEEE [160]

Bei der Behandlung der Elektro- und Elektronikaltgeräte sind die nach Artikel 6 der WEEE festgelegten Recycling- und Verwertungsquoten (Tabelle 2) bezogen auf die Gesamtmasse eines Produktes bis 46 Monate nach Inkrafttreten der Richtlinie mindestens zu erfüllen. Um eine effiziente und gefahrlose Behandlung zu erleichtern, haben die Hersteller Informationen bereitzustellen, welche Werkstoffe und insbesondere in welchen Bauteilen Gefahrstoffe enthalten sind (Artikel 10 WEEE).

### **Selektive Behandlung von Werkstoffen und Bauteilen**

Nach Artikel 5 und Anhang II der WEEE [160] müssen bestimmte Bauteile bzw. Bauteile, die bestimmte Stoffe enthalten, aus Elektro- und Elektronikaltgeräten entfernt werden. Dies betrifft unter anderem die in Tabelle 3 enthaltenen Komponenten.

PCB-haltige Kondensatoren	Quecksilberhaltige Bauteile (z.B. Schalter, Lampen)
Batterien	Leiterplatten (generell von Mobiltelefonen, sonst bei einer Oberfläche größer als 10 cm <sup>2</sup> )
Toner	Kunststoffe mit bromierten Flammschutzmittel
Asbestabfall	Kathodenstrahlröhren (Bildröhren)
FCKW, H-FCKW, FKW, KW	Gasentladungslampen
LCD (mit einer Oberfläche größer als 100 cm <sup>2</sup> )	Externe elektrische Leitungen (Kabel)
Elektrolytkondensatoren (Höhe > 25 mm; Durchmesser > 25 mm)	

Tabelle 3: Definition von Pflichtdemontagetteilen

Damit wird bei Geräten, die derartige Bauteile enthalten, eine Mindestdemontagetiefe vorgegeben, die durch die Entfernung der relevanten Komponenten bestimmt ist. Bild 5 fasst die wesentlichen Bestimmungen der WEEE im Überblick zusammen, die direkten Einfluss auf die Demontage von Elektro- und Elektronikaltgeräten haben.

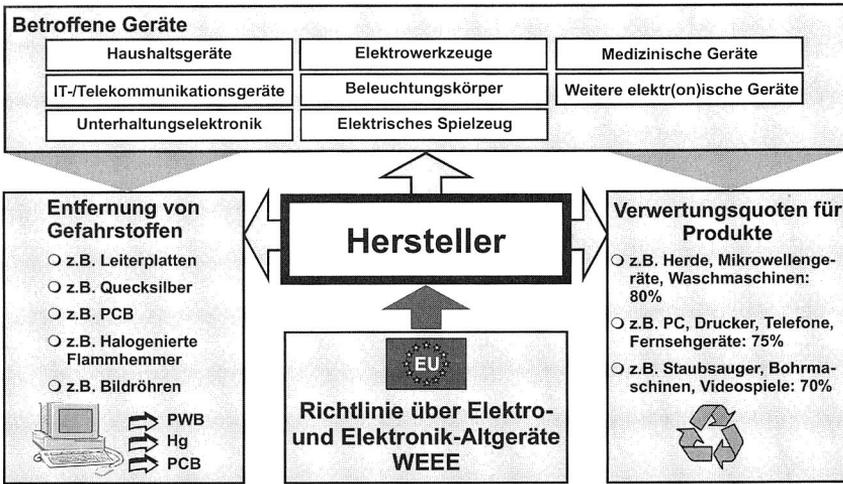


Bild 5: Demontagerelevante Bestimmungen der WEEE

## 2.2 Europäische Richtlinie über Stoffverbote und -beschränkungen

Über die Verwendung gefährlicher Stoffe wurden in den vergangenen Jahren verschiedene, nationale Gesetzgebungsverfahren angestoßen bzw. durchgeführt [113]. Um die vielfältig ausgeprägten Regelungen im Sinne des Binnenmarktes einheitlich zu gestalten, soll aufgrund des Artikels 95 des EG-Vertrags [109] die *Richtlinie zur Beschränkung der Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe in Elektro- und Elektronikaltgeräten* (RoHS) erlassen werden [161]. Darüber hinaus soll ein präventiver Beitrag zum Gesundheitsschutz und zur umweltgerechten Entsorgung von Elektro- und Elektronikaltgeräten geleistet werden (Artikel 1 RoHS [161]). Die Richtlinie gilt für alle Elektro(nik)geräte nach Tabelle 1 mit Ausnahme der medizinischen Geräte, der Überwachungs- und Kontrollinstrumente sowie elektrische Glühlampen und Leuchten im Haushalt (Artikel 2 RoHS [161]).

Nach Artikel 4 RoHS [161] ist bei der Umsetzung in nationale Rechtsvorschriften durch die Mitgliedsstaaten sicherzustellen, dass ab dem 01. Januar 2007 neu in Verkehr gebrachte Elektro(nik)geräte grundsätzlich kein Blei, Quecksilber, Cadmium, sechswertiges Chrom, polybromierte Biphenyle (PBB) sowie polybromierte Diphenylether (PBDE) enthalten. Für eine Reihe von Anwendungen sind zu diesen Werkstoffen keine technologisch einsetzbaren oder ökologisch sinnvollen Materialien zur Substitution verfügbar respektive ist der Einsatz von alternativen Werkstoffen wirtschaftlich nicht zumutbar [149]. Daher sind nach dem Anhang zur RoHS z.B. folgende Ausnahmen vorgesehen [161]:

- Quecksilber in Kompaktleuchtstofflampen mit einer Höchstmenge von 5 mg je Lampe
- Quecksilber in stabförmigen Leuchtstofflampen für allgemeine Verwendungszwecke in folgenden Höchstmengen:
  - Halophosphat 10 mg
  - Triphosphat mit normaler Lebensdauer 5 mg
  - Triphosphat mit langer Lebensdauer 8 mg
- Blei im Glas von Kathodenstrahlröhren (Bildröhren), elektronischen Bauteilen und Leuchtstoffröhren
- Blei als Legierungselement in Stahl mit einem Anteil max. 0,35 %, in Aluminium mit einem Anteil von max. 0,4 % und in Kupfer mit einem Anteil von max. 4 %
- Zinn-Blei-Lötlegierungen mit mehr als 85% Blei (hochschmelzende Lote) sowie Blei in Loten für verschiedene Anwendungen der Elektronikproduktion
- Cadmium-Beschichtungen, insofern sie nicht nach der Richtlinie 76/769/EWG verboten sind.

Produkte wie z.B. medizinischen Geräte, in denen bisher Blei aus Gründen des Strahlenschutzes eingesetzt wurde, sind prinzipiell von den Bestimmungen dieser Richtlinie ausgenommen. Insgesamt sind die Ausnahmeregelungen also funktionsbezogen vorgesehen, d.h. nach Produktgruppen, und nicht materialbezogen. Sie sollen nach Artikel 5 RoHS [161] im Abstand von mindestens vier Jahren überprüft und ggf. bei Verfügbarkeit von Ersatzstoffen geändert werden. Vorrangig erfolgt diese Evaluierung gemäß dem Anhang zur RoHS auch für bestimmte, polybromierte Diphenylether, Quecksilber in Leuchtstofflampen für besondere Verwendungszwecke, Blei als Lotwerkstoff in bestimmten elektronischen Anwendungen sowie für Glühlampen.

### **2.3 Arbeitspapier zum Richtlinienentwurf über die Umweltwirkungen von Elektro- und Elektronikprodukten**

Im Februar 2001 wurde von der Generaldirektion Unternehmen der Europäischen Kommission ein Arbeitspapier zum Richtlinienentwurf über die Umweltwirkungen von Elektro- und Elektronikgeräten (EEE) vorgelegt [141]. Ziel der Richtlinie wird es sein, auf der Basis des Artikels 95 des EG-Vertrages [109] die Anforderungen an eine umweltgerechte Entwicklung von Elektro(nik)geräten innerhalb der Europäischen Gemeinschaften zu harmonisieren und den freien Warenverkehr unter gleichen Randbedingungen zu sichern. Im Sinne eines kontinuierlichen Verbesserungsprozesses sollen dadurch die negativen Umweltwirkungen dieser Produkte reduziert und der Verbrauch an Ressourcen effizienter gestaltet werden [162]. Die Richtlinie EEE soll als Ergänzung zu den Richtlinien WEEE und RoHS die Hersteller veranlassen, die potentiellen Umweltwirkungen ihrer Produkte durch ein Life Cycle Assessment zu identifizieren und bei der Produktentwicklung zu berücksichtigen. Sie stellt damit ei-

nen übergreifenden und umfassenden Ansatz für produktbezogene Umweltgesetzgebung dar [141].

Die Richtlinie EEE ist vor allem an die Hersteller von Endprodukten adressiert. Zulieferer werden jedoch verpflichtet, alle notwendigen Daten und Informationen bereitzustellen, die zur Durchführung einer ökologischen Bewertung erforderlich sind. Dabei wird nicht die Durchführung einer formalen Ökobilanz nach ISO 14040 [100], sondern nur eine vereinfachte Lebenszyklusanalyse gefordert. Aufgrund der Unvollkommenheit der methodischen Ansätze auch unter Berücksichtigung der einschlägigen Normen würde die gesetzliche Verankerung der formalen Ökobilanz beispielsweise in Deutschland zu verfassungsrechtlichen Problemen führen [184].

Ein wesentlicher Aspekt ist der Nachweis der Erfüllung von Anforderungen aus der Richtlinie EEE durch anerkannte Umweltzeichen, deren Bewertungsschemata mit den Anforderungen aus der Richtlinie EEE harmonisieren [162], oder durch zertifizierte Umweltmanagementsysteme nach EMAS II [143], [152]. Darüber hinaus ist die Richtlinie EEE als Rahmen zu sehen, der durch entsprechende, produktbezogene Normen ausgestaltet werden soll. Dazu sollen auch Expertenkomitees – zusammengesetzt aus Vertretern von Herstellern, Verbrauchern und Umweltverbänden – eingerichtet werden, die beratend vor dem Start und während entsprechender Standardisierungsverfahren tätig sind. Die Richtlinie EEE soll fünf Jahre nach dem Inkrafttreten hinsichtlich ihrer Vollziehbarkeit und Wirksamkeit überprüft werden [141].

Die Richtlinie EEE wird also eine zumindest grobe ökologische Bewertung von Produkten in der Entwicklungsphase fordern, die zwar nicht zwingend nach den einschlägigen ISO-Normen 14040 ff. [100], [104], [130], [131] durchzuführen ist, jedoch zumindest in einem systematischen Ansatz nach wissenschaftlich anerkannten Methoden entlang des gesamten Produktlebenszyklus zu erfolgen hat [141].

### 3 Entwicklungen zur Umsetzung produktbezogener Umweltgesetzgebung

Bereits in den frühen Phasen der Produktentstehung sind vielfältige Aspekte und Randbedingungen wie z.B. die Befriedigung von Kundenwünschen, Qualität, Marktgeschehen, Wirtschaftlichkeit oder Herstellung zu berücksichtigen [2], [7], [72], [176], [195]. Daneben wird nun als zwingende, zusätzliche Randbedingung die Einhaltung detaillierter, gesetzlicher Vorgaben hinsichtlich der Umweltverträglichkeit von Produkten v.a. in der Entsorgungsphase gefordert. Daraus lässt sich der Bedarf an Methoden und Werkzeuge z.B. für den Hersteller von Elektro- und Elektronikgeräten ableiten, die es erlauben, diese Produkte hinsichtlich ihrer Konformität mit den rechtlichen Bestimmungen zu analysieren und die voraussichtlichen Kosten abzuschätzen.

Als Anforderungen an derartige Werkzeuge ergeben sich die Berücksichtigung sowohl qualitativer bzw. binärer Aspekte als auch quantitativer Aspekte. Nach den in Abschnitt 2 beschriebenen europäischen Richtlinien zu Elektro- und Elektronikgeräten hat der Hersteller in Zukunft herstellungsbezogene, End-of-Life-bezogene und gemischte Kriterien zu berücksichtigen sowie eine ökologische Bewertung seiner Produkte vorzusehen (Bild 6).

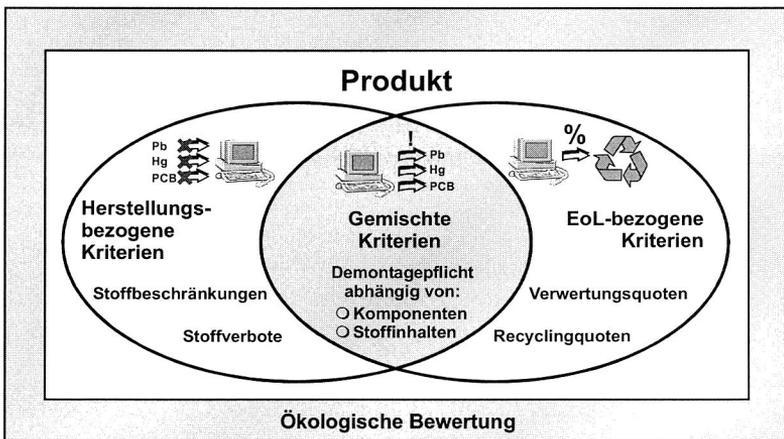


Bild 6: Kriterien der europäischen Richtlinien zu Elektro- und Elektronikgeräten

Herstellungsbezogene Kriterien beziehen sich auf Stoff(einsatz)beschränkungen und –verbote (z.B. für Quecksilber [161]) und sind direkt mit den einzelnen Bauteilen eines Produktes verknüpft. Stoffverbote sind binäre Anforderungen, d.h. ein bestimmtes Material darf definitiv nicht in einem Produkt enthalten sein. Dieser Aspekt ist daher auch über produktunabhängige, qualitative Werkzeuge wie z.B. Checklisten ab-

zufragen. Masse- oder anteilsbezogene Stoffbeschränkungen sind dagegen ggf. unter Berücksichtigung des Restproduktes zu überprüfen.

Die End-of-Life-bezogenen Kriterien betreffen vorgegebene Verwertungs- und Recyclingquoten (z.B. 75% bzw. 65% für Geräte der Informationstechnik [160]) und sind damit abhängig von den verfügbaren Entsorgungsprozessen und von der notwendigen Demontagetiefe. Durch die Zerlegung eines Produktes werden die Fraktionen festgelegt, die dann den entsprechenden Verwertungs- oder Beseitigungsprozessen zugewiesen werden und damit die Verwertungs- / Recyclingquote ergeben. Aus der Forderung nach einer wirtschaftlich optimalen Demontage bei gleichzeitiger Erfüllung vorgegebener Verwertungs- bzw. Recyclingquoten sind quantitative Kriterien abzuleiten, die direkten Einfluss auf eine Demontageanalyse nehmen.

Als gemischte Kriterien sind Bauteile zu verstehen, die aufgrund der Menge eines enthaltenen Stoffes (quantitative Bestimmung) oder aufgrund ihrer Funktion (qualitative Bestimmung) zwingend bei einer Demontage zu entnehmen sind. Diese Bauteile werden im folgenden als *Pflichtdemontageteile* bezeichnet. Beispielsweise sind nach der WEEE [160] durch stoffbezogene Festlegung quecksilberhaltige Bauteile bei der Zerlegung eines Elektro- oder Elektronikaltgerätes zu entnehmen. Durch die funktions- bzw. bauteilbezogene Festlegung von Pflichtdemontageteilen wird die Entnahme aller Komponenten zusammengefasst, die aufgrund ihrer Funktion potentiell stets Gefahrstoffe beinhalten (z.B. Batterien). Pflichtdemontageteile sind nach der Entnahme einer ordnungsgemäßen Entsorgung in dafür zugelassenen Prozessen zu zuführen.

Die Forderung nach einer Bewertung der Umweltrelevanz von Produkten entlang ihres Lebensweges im Sinne der geplanten Richtlinie EEE [141] nimmt hierbei eine gewisse Sonderstellung ein. Einerseits werden durch die Produktstruktur – und damit eher statisch – die Umweltwirkungen aus der Herstellung, und durch die Funktion des Produktes die Umweltwirkungen aus der Gebrauchsphase festgelegt. Andererseits bestimmt das Ergebnis der Demontageanalyse durch die entsprechenden Demontageverrichtungen und die resultierenden Entsorgungsfractionen die Umweltwirkung des Produktes in der Entsorgungsphase.

### **3.1 Methoden und Werkzeuge zur Produktanalyse**

In den letzten Jahren wurden zahlreiche rechnergestützte Methoden zur ökologischen Produktbewertung, zur umweltgerechten Produktentwicklung (Design for Environment – DfE) und zur Demontageplanung entwickelt [7], [182]. Diese werden im Folgenden hinsichtlich ihrer Eignung zur Integration produktbezogener, umweltrechtlicher Vorgaben sowie der Ermittlung kostenoptimaler Optionen zur Erfüllung der Kriterien untersucht und bewertet. Als Bewertungsgrundlage dient daher die Berechnung einer wirtschaftlich optimalen Demontagetiefe bei gleichzeitiger Berücksichtigung von Pflichtdemontageteilen und Verwertungs- bzw. Recyclingquoten, die mögliche Integration von Stoffverböten und Stoffbeschränkungen sowie die Durchführbarkeit einer ökologischen Produktbewertung.

### 3.1.1 Werkzeuge zur umweltgerechten Produktentwicklung

Systeme zur umweltgerechten Produktentwicklung können nach Werkzeugen zur ökologischen Produktbewertung und kennwertbasierten Design-for-Environment-Werkzeugen unterschieden werden. Werkzeuge zur ökologischen Produktbewertung basieren meist auf der Methodik der Ökobilanz nach ISO 14040 [100], [214]. Ökobilanzen (Life Cycle Assessment – LCA) gliedern sich in der Regel in die Schritte Zieldefinition mit Festlegung der Systemgrenzen, Sachbilanz, Wirkungsabschätzung und Auswertung.

Im Rahmen der Zieldefinition wird der Anwendungsbereich und die Zielgruppe der Betrachtung festgelegt. Daneben ist eine Systembeschreibung mit nachvollziehbarer Bestimmung des Bewertungsraumes und der Systemgrenzen erforderlich. Ein weiterer, wesentlicher Bestandteil der Zieldefinition ist die Definition einer nutzen- und leistungsbezogenen funktionalen Einheit als Bezugsgröße der Bewertung [214].

Bei der Sachbilanz – im Englischen als Life Cycle Inventory (LCI) bezeichnet – erfolgt eine physikalische Beschreibung des Systems als Kette von Prozessen beginnend bei der Rohstoffextraktion bis hin zur Entsorgung des Bilanzierungsgegenstandes hinsichtlich der tatsächlich vorhandenen Stoff- und Energieströme [11]. Die Darstellung erfolgt meistens in Form von Fliebschaubildern.

Durch eine Wirkungsabschätzung werden den in der Sachbilanz erhobenen Stoffströmen potentielle Umweltkategorien zugewiesen und quantitativ nach ihrer Wirkung erfasst [13]. Im Rahmen der Auswertung werden die Sachbilanzdaten mit den entsprechenden Umweltwirkungen in der Regel so weit verdichtet, dass eine Empfehlung bzw. eine Grundlage zur Entscheidungsfindung bezüglich verschiedener Alternativen oder Treibergrößen abgeleitet werden kann. Die Methoden zur Bilanzbewertung sind ebenso vielfältig wie diskussionsfähig (vgl. [184]) und sollen an dieser Stelle nicht weiter aufgeführt werden.

Alle Werkzeuge zur ökologischen Produktbewertung unterstützen den Anwender bei der Erstellung der Sachbilanz, bei der Wirkungsabschätzung und bei der Bilanzbewertung. Die Systeme CUMPAN [111], GaBi [38], [51], SimaPro[171], Umberto [170], CALA [21] und EDIP [214] bestehen aus einer Oberfläche zur Modellierung des Produktlebensweges mit den zugehörigen Einzelprozessen, Datenbanken zu Sachbilanzdaten sowie aus Wirkungsabschätzungen und verschiedenen Auswertansätzen und –möglichkeiten. Kennzeichnend für diese Werkzeuge ist die meist sehr zeit- und damit kostenintensive Modellierung des Produktlebensweges sowie die komplexe Systemgestaltung, die intensive Methodikkenntnisse voraussetzt. Deren effiziente Anwendbarkeit für alle Produkte eines Herstellers ist daher beschränkt.

Systeme zur umweltgerechten Produktentwicklung wie z.B. IQ-HoQ [205], RecyKon [213], CES [173], euroMat [35] etc. verzichten meist auf eine detaillierte Modellierung des Produktlebensweges. Sie stellen dem Anwender Informationen über die Umweltgerechtigkeit und Hilfestellungen zur Entscheidungsfindung in Form von verdichteten Kennwerten und / oder Auswahllisten bereit. Diesen Werkzeugen gemeinsam

ist die eher statische Berücksichtigung der Entsorgungsphase, d.h. es kann aufgrund des Modellierungsaufwandes in der Regel nur ein Szenario für die Nachgebrauchsphase erstellt werden.

Durch die detaillierte Erfassung der Stoffinhalte sind Werkzeuge zur umweltgerechten Produktentwicklung grundsätzlich geeignet, Stoffbeschränkungen und Stoffverbote nach der Zuweisung entsprechender Attribute bei der Materialdefinition zusätzlich zur Kernaufgabe dieser Systeme zu berücksichtigen.

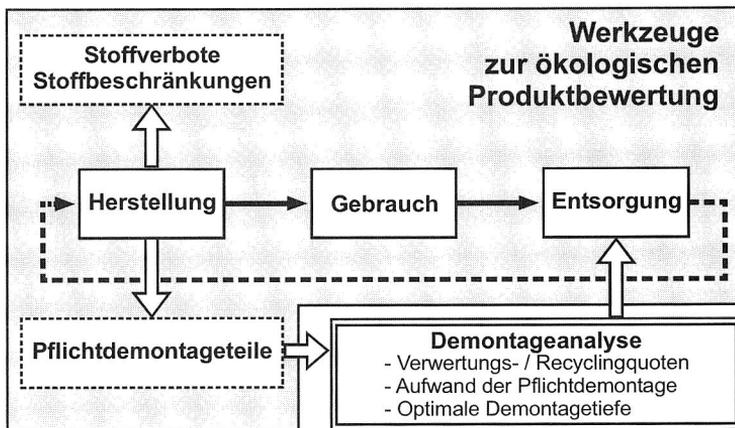


Bild 7: Integration umweltrechtlicher Kriterien in Werkzeugen zur ökologischen Produktbewertung

Alle demontagebezogenen Kriterien der gesetzlichen Regelungen können durch diese Systeme bisher nicht abgedeckt werden. Die Bestimmung von Pflichtdemontage-teilen durch deren stofflichen Zusammensetzung ist mit den implementierten Metho-diken prinzipiell möglich, die Bestimmung des Demontageaufwandes zu deren Ent-fernung jedoch nicht (Bild 7). Ebenso kann mit Hilfe der Werkzeuge zur ökologischen Produktbewertung keine wirtschaftlich optimale Demontagetiefe (vgl. Abschnitt 3.1.2) berechnet werden. Hierzu wären derartige Systeme mit entsprechenden Demonta-planungssystemen zu koppeln.

### 3.1.2 Werkzeuge zur Demontageplanung

Demontageplanungswerkzeuge werden überwiegend zur Bewertung der Demonta-ge- / Recyclingeignung und/oder zur Berechnung der wirtschaftlich optimalen De-montagetiefe eingesetzt und sind in ihrer Anwendung prinzipiell für die Berücksichti-gung der demontagebezogenen Aspekte wie z.B. vorgegebene Verwertungs- und Recyclingquoten relevant.

Der Begriff der „wirtschaftlich optimalen Demontagetiefe“ ist anhand der in Bild 8 qualitativ und stark vereinfacht dargestellten Verläufe der Demontage- und Entsor-gungskosten bzw. –erlöse zu verdeutlichen. Für ein zur Entsorgung anstehendes

Altprodukt fallen ohne Demontage in der Regel Kosten für die Beseitigung des kompletten Gerätes an. Bei der Demontage von Fraktionen sinken diese Kosten, da für einzelne Fraktionen ein Verwertungserlös erzielt werden kann (Bild 8 gestrichelte Kurve). Ab einer bestimmten Demontagetiefe ist meist insgesamt ein Erlös für die Verwertung der resultierenden Fraktionen zu erreichen.

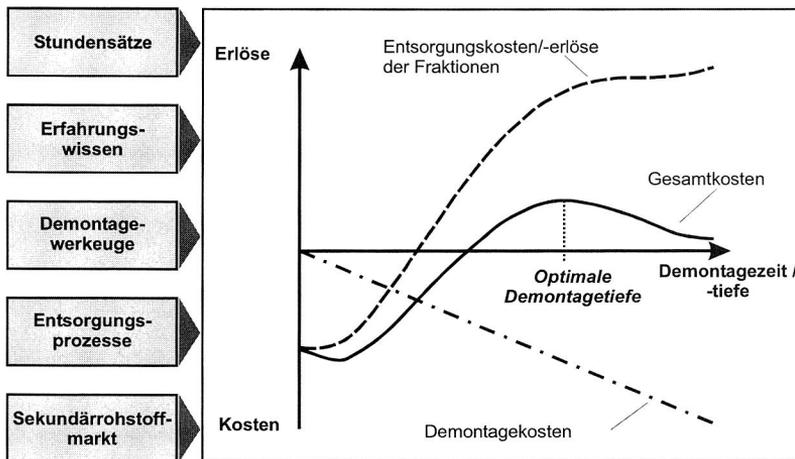


Bild 8: Qualitativer Verlauf der Demontage- und Entsorgungskosten / -erlöse [33], 170

Andererseits sind die Demontagekosten als Produkt aus Demontagezeit und Stundensatz für die Berechnung der Gesamtkosten zu berücksichtigen. Bei einem für alle Demontageverrichtungen konstanten Stundensatz nehmen die Demontagekosten mit der Demontagezeit linear zu (Bild 8 strichpunktierte Kurve). Aus einer Überlagerung beider Kurvenverläufe resultiert stets ein globales Maximum, das bei realen Produkten ggf. auch durch die Komplettentsorgung ohne Demontage oder die komplette Zerlegung erreicht werden kann. Der tatsächliche Verlauf der Entsorgungskosten ist über die Demontagezeit nicht kontinuierlich, sondern diskret, weil erst nach vollständiger Abarbeitung einer Demontageverrichtung ein neuer Demontagezustand erreicht wird. Dementsprechend nehmen auch die Gesamtkosten diskrete Werte an. Damit handelt es sich bei der Berechnung der optimalen Demontagetiefe nicht um ein kontinuierliches, sondern ein diskretes Optimierungsproblem [91].

Abhängig von der Produktstruktur sind bei der Demontagetiefe sehr viele Kombinationen zu betrachten. Bei einem Produkt, das beispielsweise aus 10 frei demontierbaren Komponenten besteht, ergeben sich nach den Regeln der Kombinatorik  $2^{10}=1024$  Demontagemöglichkeiten, von denen eine das wirtschaftliche Optimum repräsentiert.

Die verschiedenen, aktuell entwickelten bzw. auf dem Markt angebotenen Systeme zur Demontageplanung unterscheiden sich im wesentlichen durch die Art der Pro-

duktabbildung sowie durch die Berechnungsalgorithmen für die Demontageanalyse [80]. Die Produktabbildung erfolgt entweder in Form eines Produktmodells, das mit den demontage- und entsorgungsrelevanten Daten hinterlegt ist und als Grundlage einer Demontageanalyse dient, oder durch Erstellung eines Demontevorranggraphen, bei dem die einzelnen Elemente mit produktspezifischen Attributen versehen sind. Ökologische Kriterien werden bei Werkzeugen zur Demontageplanung eher in geringem Maße berücksichtigt. Die Verwendung eines Produktmodells erleichtert jedoch prinzipiell die Einbindung ökologischer Kriterien, weil sich die so dargestellte Produktstruktur mehr an den in Konstruktionsunterlagen bzw. CAD-Systemen enthaltenen Daten orientiert.

Nachfolgend werden die wesentlichen, aktuellen Ansätze kurz dargestellt und hinsichtlich der Berücksichtigung von demontagerelevanten rechtlichen Kriterien wie Pflichtdemontageteile, vorgegebene Verwertungs- und Recyclingquoten sowie hinsichtlich der möglichen Integration produktstrukturbezogener Aspekte wie Stoffverbote und -beschränkungen untersucht. Die Eignung der Systeme zur Integration einer ökologischen Produktbewertung wird ebenfalls in die Betrachtung einbezogen.

Der am Institut für Maschinenkonstruktion der Technischen Universität Berlin entwickelte *Baustruktureditor* bzw. das *Baustruktur-Analyse- und Modellierungssystem (BAMOS)* basiert auf einer graphischen Oberfläche, in welcher der Anwender interaktiv die Baustruktur eines Produktes bestehend aus Bauteilen, Baugruppen und Verbindungen modellieren kann [183], [205]. Mögliche Demontagereihenfolgen werden in einem AND/OR-Graph nach [59], [60], [71], [80], [178], [190] dargestellt. Durch Kennzahlen zur Beschreibung des Demontageaufwandes bezogen auf ein Bauteil, eine Baugruppe oder eine Verbindung und durch Summenbildung über alle zu demontierenden Bauteile kann der Demontageaufwand für das gesamte Produkt bestimmt werden. Während durch das System BAMOS Analysen hinsichtlich des Demontageaufwandes für ein Produkt durchgeführt werden können, ist nach [183], [205] die Berücksichtigung von Pflichtdemontageteilen und vorgegebenen Verwertungs- und Recyclingquoten nicht implementiert.

Das *Assessment Tool for Recycling Oriented Design – ATROiD* wurde am Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik der Technischen Universität Braunschweig entwickelt [50], [52], [53], [54]. Ausgehend von einem Produktmodell, das mit bauteil- und verbindungs-spezifischen Daten sowie bestehenden Vorrangbeziehungen zwischen Bauteilen hinterlegt ist, wird der Anwender in drei Ebenen unterstützt (Bild 9). In einer Bewertungsebene werden Demontagezeiten, -kosten, -tiefe und -reihenfolge sowie ein Recyclingpotential ermittelt. Das Recyclingpotential wird aus einer multikriteriellen Bewertung hinsichtlich demontage- und recyclingrelevanter Kenngrößen wie z.B. Materialauswahl, Verbindungstechniken, etc. berechnet und beschreibt die Demontage- und Recyclingorientierung des Produktes. In der Analyseebene werden die Ergebnisse zur Identifikation von Schwachstellen verdichtet und graphisch, z.B. durch entsprechende Farbcodes, im Produktmodell dargestellt. Nach der Identifikation von Schwachstellen können auf der Basis eines in das System in-

tegrierten Konstruktionsleitfadens Lösungsansätze und Anregungen zu deren Vermeidung oder Verbesserung abgeleitet werden. Das System ATROiD dient vorwiegend zur Analyse der Demontage- und Recyclingeignung eines Produktes und zur Verbesserung der demontagegerechten Produktgestalt. Die Berechnung von Verwertungs- bzw. Recyclingquoten wird auf der Basis der wirtschaftlich optimalen Demontagetiefe durchgeführt. Eine Integration von Zielquoten in die Demontageanalyse ist nach [172] derzeit ebenso wenig möglich wie die Berücksichtigung von Pflichtdemontageteilen oder Stoffverboten und –beschränkungen.

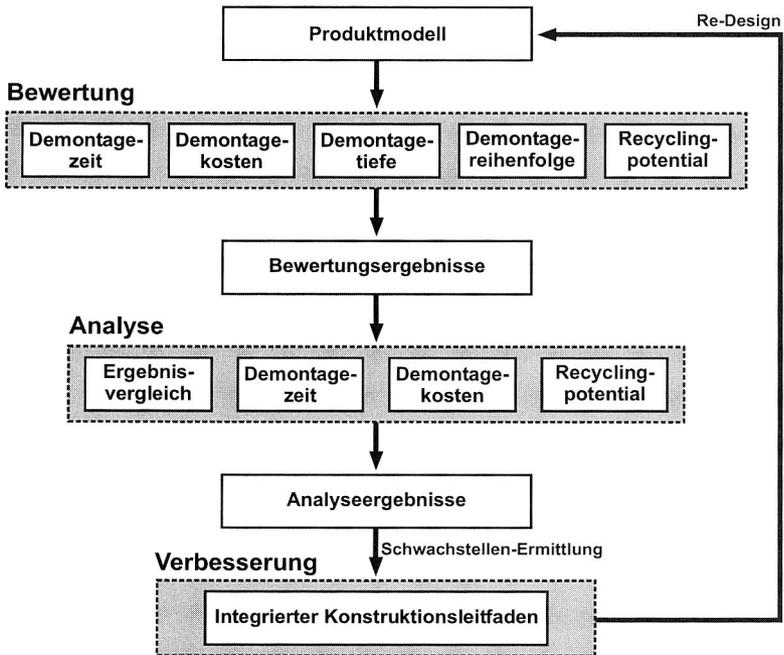


Bild 9: Ablaufdiagramm des Systems ATROiD nach [50]

Das von der Firma Siemens Business Services GmbH vertriebene Demontageplanungssystem *DEMROP Plus* unterstützt den Anwender durch die Ermittlung der wirtschaftlich optimalen Demontagetiefe und durch die Ausgabe eines spezifischen Recyclingreports [14], [64], [182]. Zunächst ist in *DEMROP Plus* die Stückliste eines Produktes manuell zu erstellen oder aus einem PDM-System einzulesen, die dann mit Hilfe einer Clusteranalyse sowie definierter Kriterien bezüglich Wert- und Störstoffen auf Bauteile reduziert wird, die für eine Demontage potentiell in Frage kommen. Ausgehend von der reduzierten Stückliste gibt der Anwender interaktiv in einem Editor den Demontagepfad und damit gleichzeitig die Produktstruktur ein. Auf der Basis der in einer Datenbank hinterlegten Entsorgungsprozesse wird die optimale Demontagetiefe unter Berücksichtigung der Störstoffe berechnet. Durch statistische

Daten zu Altersfaktoren, Restnutzen, Restwert, usw. von Standardkomponenten, auf die in entsprechenden Datenbanken zugegriffen werden kann, ist bei der Berechnung der optimalen Demontagetiefe auch die Einbeziehung der Optionen von Wieder- und Weiterverwendung möglich. Im Recyclingreport werden zu jedem Bauteil die optimalen Entsorgungsarten, Kosten bzw. Erlöse, usw. ausgegeben. Die funktionale Berücksichtigung der Wieder- und Weiterverwendung wurde in Zusammenarbeit mit dem Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebstechnik der Universität Karlsruhe vor allem in Bezug auf Montageanlagen zum System *Re-Use of Assembly Components – ReAsCo* erweitert [15]. Die Berücksichtigung von Pflichtdemontageteilen ist in DEMROP Plus durch die Definition von Störstoffen möglich. Die Verwertungs- bzw. Recyclingquote wird zwar für die optimale Demontagestrategie berechnet, eine Vorgabe von Zielquoten ist jedoch nicht vorgesehen. Auch die Analyse des Produktmodells bezüglich Stoffbeschränkungen und –verbote ist nicht möglich. Methoden zur ökologischen Produktbewertung sind nicht integriert.

Von Boothroyd und Dewhurst wurde zusammen mit dem niederländischen Institut TNO das *Design for Environment Tool – DfE-Tool* entwickelt [46], [47]. Das System unterstützt den Anwender bei der Analyse von Produkten hinsichtlich der wirtschaftlichen Folgen der Entsorgungsphase sowie der ökologischen Wirkungen in der Herstell- und Entsorgungsphase. Die Produkteigenschaften werden überwiegend tabellarisch erfasst und um die demontagerelevanten und ökologischen Eigenschaften wie z.B. Vorrangrelationen, Demontageverrichtungen, Werkzeuge, Materialien, Herstellverfahren, Entsorgungsart etc. ergänzt. Durch die Simulation verschiedener Entsorgungsszenarien können die resultierenden Entsorgungskosten bzw. –erlöse bei optimaler Demontage sowie die Umweltwirkungen für eine Produktoptimierung genutzt werden. Die Definition von Pflichtdemontageteilen kann ggf. durch die Zuweisung von Schadstoffgehalten berücksichtigt werden. Die Vorgabe von Zielquoten für Verwertung und Recycling ist nicht implementiert. Auch eine Analyse bezüglich Stoffbeschränkungen und –verbote ist aktuell nicht vorgesehen. Eine ökologische Produktbewertung erfolgt im DfE-Tool nach der MET-Point-Methode, d.h. das Produkt wird nach Materialeinsatz, Energieverbrauch und Toxizität analysiert.

Der *End-of-Life Design Advisor – ELDA* wird von der Stanford University / USA in Zusammenarbeit mit der Delft University of Technology in den Niederlanden entwickelt und stellt eine Weiterführung des Systems *LASeR* dar [63], [185]. Die Modellierung erfolgt in Form von semantischen Netzen. Den Baugruppen und –teilen können dabei Daten zu Montage, Service und Recycling zugeordnet werden. Das Programm berechnet die Gesamtkosten aus Demontage und Verwertung nach der Festlegung von Baugruppen und deren Verwertungsart durch den Benutzer, der durch regelbasierte Kompatibilitätsprüfungen von Material und Verwertungsart unterstützt wird. Durch die Abbildung des Produktes in einem Modell ist die Berücksichtigung von Stoffverboten und –beschränkungen ebenso wie die Ermittlung von Pflichtdemontageteilen denkbar. Durch die interaktive Festlegung von Baugruppen und deren Verwertungsart ist die Berechnung des Aufwands zum Entfernen der Pflichtdemontageteile jedoch kaum zu implementieren.

Am Institut für Arbeitswissenschaft und Betriebsorganisation der Universität Karlsruhe wird in Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Fertigungsvorbereitung der Universität Dortmund das *Demontage-Informationssystem DAISY* entwickelt [89], [192], [219]. Dieses Werkzeug unterstützt die manuelle Demontage durch eine adaptive, dynamische Demontageplanung. Dazu wird die Produktstruktur auf der Basis einer Probezerlegung in einem sog. Demontearbeitsplan abgebildet, der mit den relevanten Daten z.B. bezüglich Materialien und Gewichten hinterlegt wird. Abhängig von den bei der Probedemontage erkannten Verbindungstypen wird die Relation zwischen den Bauteilen in einem Demontageschema festgehalten, das die zum Lösen des Verbindungstyps einsetzbaren Demontevorgänge enthält. Ein wesentlicher Aspekt des Systems ist die Berücksichtigung von alters- und nutzungsbedingten Unsicherheiten hinsichtlich der Reihenfolge und Lösbarkeit von Verbindungen durch stochastische Netzwerke. Nach deren Überführung in GERT-Netzwerke kann daraus eine wirtschaftlich optimale Demontagefolge ermittelt werden, aus der Demontageanweisungen mit Multimedia-Unterstützung erzeugbar sind. Das System ist überwiegend für den Einsatz in der Entsorgungsphase konzipiert.

Das durch Scheller [190], Meedt [80] und Weber [213] an den Lehrstühlen für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik bzw. für Konstruktionstechnik der Universität Erlangen-Nürnberg entwickelte Werkzeug *Recyclinggraph-Editor / Disassembly Planning System (ReGrEd / Display)* war zunächst nur auf die Analyse der Entsorgungsphase von Produkten hin ausgelegt (vgl. Abschnitt 3.2). Ziel war die präventive Minimierung der Entsorgungskosten eines Altproduktes durch die Ermittlung der wirtschaftlich optimalen Demontagetiefe und die Ermittlung von Schwachstellen bezüglich Produktstruktur, Verbindungstechnik und Materialkompatibilität. Auf der Basis eines graphischen Produktmodells wird durch dessen Überführung in einen AND/OR-Graphen die absolut optimale Demontagetiefe berechnet. Daneben können den Materialdefinitionen im Produktmodell spezielle Kennwerte zur ökologischen Produktbewertung als Attribute zugewiesen werden.

### 3.1.3 Abgleichen der Methoden mit dem Entwicklungsbedarf

Bild 10 zeigt eine zusammenfassende Bewertung der wesentlichen Systeme und Methoden zur Produktanalyse hinsichtlich der möglichen Integration rechtlicher Anforderungen. Die Berücksichtigung von Stoffverboten ist durch die Erstellung verschieden ausgeprägter Produktmodelle mit Ausnahme des Systems DAISY bei allen Werkzeugen mehr oder weniger günstig zu realisieren. Die Produktdaten werden in DAISY aus einer Probezerlegung gewonnen und damit zu einem Zeitpunkt, der für diese präventive Forderung meist zu spät ist. Gleiches gilt für Stoffbeschränkungen.

Die Berechnung der optimalen Demontagetiefe ist zweckbedingt bei den meisten Werkzeugen zur umweltgerechten Produktentwicklung (DfE-Tools) sowie beim System ELDA wegen der interaktiven Festlegung der Entsorgungsfractionen nicht möglich. Die Vorgabe von Verwertungs- bzw. Recyclingquoten kann prinzipiell in die Systeme BAMOS, ATROiD, DEMROP Plus und ReGrEd/Display integriert werden,

da die erzeugbaren Fraktionen mit den zugehörigen Quoten hier auf der Basis von Produktmodellen bzw. des Demontagepfades berechnet werden.

Systeme, die aufgrund der hinterlegten Produktdaten Stoffbeschränkungen analysieren können, sind prinzipiell auch zur Ermittlung von Pflichtdemontageteilen geeignet, weil diese entweder aus dem Stoffgehalt von Komponenten oder deren Funktion definiert sind. Die Berücksichtigung von Pflichtdemontageteilen bei der Demontageanalyse kann jedoch nur aus der Berechnung der absolut optimalen Demontagetiefe heraus erfolgen.

		DfE-Tools	BAMOS	ATROID	DEMROP Plus	BDI DfE-Tool	ELDA	ReGrEd/DisPlay	DANSY
<b>Rechtliche Anforderung</b>	Berücksichtigung von Stoffverboten	◐	◐	◐	◐	◐	◐	○	◐
	Berücksichtigung von Stoffbeschränkungen	◐	◐	◐	◐	◐	◐	○	◐
	Berechnung der optimalen Demontagetiefe	○	●	●	●	●	○	●	●
	Vorgabe von Recycling- und Verwertungsquoten	○	◐	◐	◐	○	○	○	◐
	Ermittlung von Pflichtdemontageteilen	◐	◐	◐	◐	◐	◐	○	◐
	Berücksichtigung von Pflichtdemontageteilen	○	◐	◐	◐	◐	○	◐	◐
	Ökologische Produktbewertung	●	◐	◐	◐	●	●	○	●

Integration ○ nicht möglich ◐ möglich ● realisiert

Bild 10: Systematische Bewertung von Systemen zur Produktanalyse bezüglich der möglichen Integration rechtlicher Anforderungen

Eine ökologische Produktbewertung ist bei den Werkzeugen zur umweltgerechten Produktentwicklung, beim BDI DfE-Tool und beim System ELDA sowie mit Einschränkung auch beim System ReGrEd / DisPlay bereits implementiert. Darüber hinaus kann eine entsprechende Bewertung bei allen Systemen integriert werden, welche die Analysen auf der Basis der originären Produktdaten durchführen.

Festzustellen ist, dass keines der untersuchten Systeme durchgängig die wirtschaftliche Produktanalyse nach allen gesetzlichen Anforderungen vorsieht. Insgesamt sind jedoch die Demontageanalysewerkzeuge aufgrund der notwendigen Berücksichtigung von optimaler Demontagetiefe, Pflichtdemontageteilen und Verwertungs- bzw. Recyclingquoten primär für die umfassende Bewertung nach rechtlichen Kriterien geeignet.

Beim Werkzeug ReGrEd / DisPlay ist die Integration sämtlicher Anforderungen prinzipiell möglich. Ziel ist es deshalb, das bisher bestehende System im Rahmen dieser Arbeit um Module und Algorithmen zur ganzheitlichen Berücksichtigung der zukünftigen, gesetzlichen Anforderungen nach den geplanten Richtlinien WEEE [160], RoHS [161] sowie dem aktuellen Stand des Richtlinienentwurfes EEE [141] zu erweitern.

## 3.2 Entwicklungsstand des Analysewerkzeugs ReGrEd/DisPlay

Im Folgenden wird der Stand des Systems ReGrEd / DisPlay skizziert, bis zu dem es durch Scheller [190], Meedt [80] und Weber [213] entwickelt wurde. Dadurch sollen die konzeptionellen und methodischen Grundlagen des Systems zum besseren Verständnis der Ergänzungen im Rahmen dieser Arbeit dargestellt und die notwendigen Modifikationen an den Basisalgorithmen motiviert werden.

### 3.2.1 Gesamtstruktur des Produktanalyse-Werkzeugs

Die Gesamtstruktur des Produktanalyse-Werkzeugs orientiert sich an den Abläufen in einem realen Zerlegebetrieb (Bild 11) [34], [84]. Dort werden Altprodukte in den Betrieb eingebracht, grob analysiert und abhängig vom Produkttyp nach Erfahrungswerten demontiert. Die entstehenden Fraktionen werden am Ausgang des Zerlegebetriebes für die Zuführung zu nachfolgenden Aufbereitungs- oder Beseitigungsprozessen bereitgestellt.

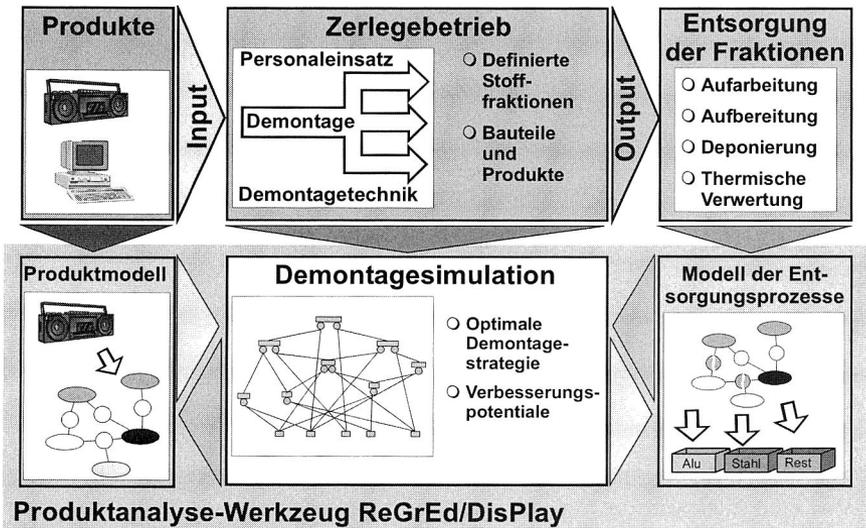


Bild 11: Grundstruktur des Produktanalyse-Werkzeugs im Vergleich zum realen Zerlegebetrieb

Im System ReGrEd/DisPlay werden Produkte durch in ein abstraktes Datenmodell repräsentiert. In gleicher Weise erfolgt die Modellierung von Entsorgungsprozessen. Auf der Basis dieser Modelle wird die Demontage eines Produktes simuliert, und so die wirtschaftlich optimale Demontagetiefe ermittelt sowie Verbesserungspotentiale aufgezeigt.

## Produktmodell

Das Produktmodell in ReGrEd / DisPlay unterscheidet prinzipiell zwischen Komponenten und (logischen) Verbindungen (Bild 12). Die Komponenten sind mit den entsorgungsrelevanten Daten wie z.B. Masse, Material, usw. hinterlegt. Die Verbindungen sind masselos und können entweder geschlossen oder geöffnet sein. Sie repräsentieren den Demontageprozess zum Trennen der mit ihr verknüpften Komponenten sowie die eigentliche Produktstruktur und sind daher mit den demontagerelevanten Daten wie z.B. Demontagezeit oder Vorrangrelationen hinterlegt.

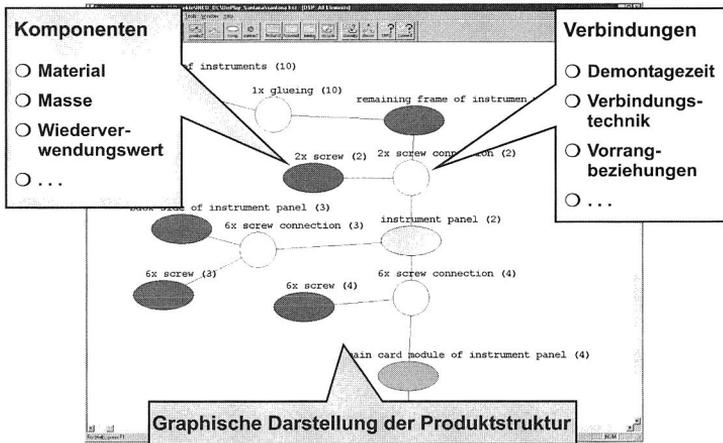


Bild 12: Produktmodell in in ReGrEd/DisPlay [30]

## Modell der Entsorgungsprozesse

Bei einem realen Zerlegebetrieb stehen in der Regel verschiedene „Kisten“ am Ausgang, in denen die einzelnen Fraktionen zu den nachfolgenden Entsorgungsprozessen transportiert werden. Bei der Beschickung der Kisten sind verschiedene Restriktionen z.B. bezüglich der Reinheit der Fraktionen zu beachten [193]. Für den Inhalt fallen bei der Weiterverarbeitung in den Prozessen Kosten oder Erlöse an. Demnach kann ein Entsorgungsprozess über die Kosten bzw. Erlöse pro Masse und der Liste der Materialrestriktionen eindeutig beschrieben werden (Bild 13).

Eine Sonderstellung im Modell der Entsorgungsprozesse – im folgenden auch als *Entsorgungsszenario* bezeichnet – nimmt der sog. *Rest*-Prozess ein. Bei der Definition dieses Prozesses wird von der Annahme ausgegangen, dass stets ein Prozess existiert, in dem jede Art von Materialgemisch - einschließlich Gefahrstoffe - entsorgt werden kann. Um vor allem bei der informationstechnischen Implementierung Analyseabbrüche zu vermeiden, wird dieser Prozess grundsätzlich in jedem Entsorgungsszenario eingerichtet.

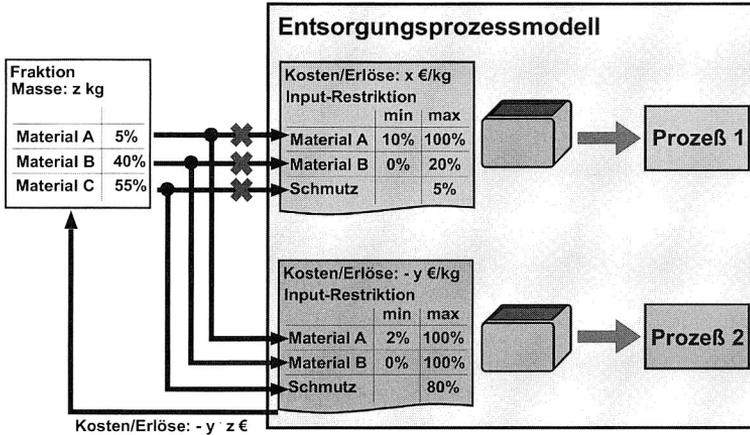


Bild 13: Modell der Entsorgungsprozesse in ReGrEd/DisPlay

**Modell des Zerlegebetriebs**

Neben den Modellen für Produkte und Entsorgungsprozesse sind die übrigen Randbedingungen eines Zerlegebetriebs in einem weiteren Datenmodell zusammengefasst. In einem Szenario wird zum einen der Arbeitsstundensatz als Grundlage für die Berechnung der Demontagekosten ebenso wie die zum Einsatz kommenden Werkzeuge festgelegt. Zum anderen können aus der Menge der definierten Entsorgungsprozesse die z.B. für einen realen Zerlegebetrieb relevanten ausgewählt werden.

**Verknüpfung von Produkt- und Entsorgungsprozessmodell**

Zur Verknüpfung von Produktmodell und Entsorgungsprozessen bzw. -szenario ist die Definition von Materialbezeichnungen notwendig [28], [80]. Dabei wird grundsätzlich zwischen *Basismaterialien* und *Technischen Materialien* unterschieden (Bild 14).

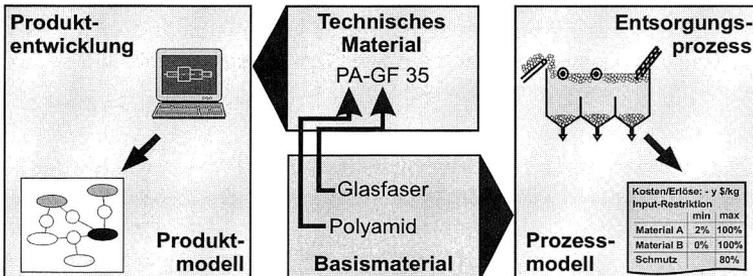


Bild 14: Definition von technischen Materialien und Basismaterialien

Als Basismaterialien sind neben den chemischen Grundelementen z.B. Basiskunststoffarten (z.B. PE, ABS), Metalllegierungen (z.B. Messing), usw. zu definieren. Bei der Definition eines Basismaterials kann die Einstufung als Gefahrstoff zusätzlich als Eigenschaft festgelegt werden. Die Basismaterialien sind nach [80] vor allem für die Zuordnung zu geeigneten Entsorgungsprozessen von Bedeutung.

Die technischen Materialien beschreiben Werkstoffe als Gemische von Basismaterialien. Dadurch stehen dem Anwender bei der Zuweisung von Materialien zu Komponenten bereits die bei der Entwicklung und in der Produktion üblichen Materialverbunde zur Verfügung.

### Berechnung der optimalen Demontagetiefe

Die Berechnung der optimalen Demontagetiefe erfolgt methodisch in zwei Schritten. In einem ersten Schritt werden – ausgehend von der Produktstruktur und den vorhandenen Vorrängen – alle Demontagemöglichkeiten in Form eines AND/OR-Graphen dargestellt (Bild 15). Diese Darstellungsform zeichnet sich durch seine Abbildungsmächtigkeit und Informationsredundanz bezüglich der Darstellung von Demontagealternativen aus und wird daher in zahlreichen Ansätzen [59], [60], [71], [80], [178], [190] zur Produktstrukturanalyse bevorzugt.

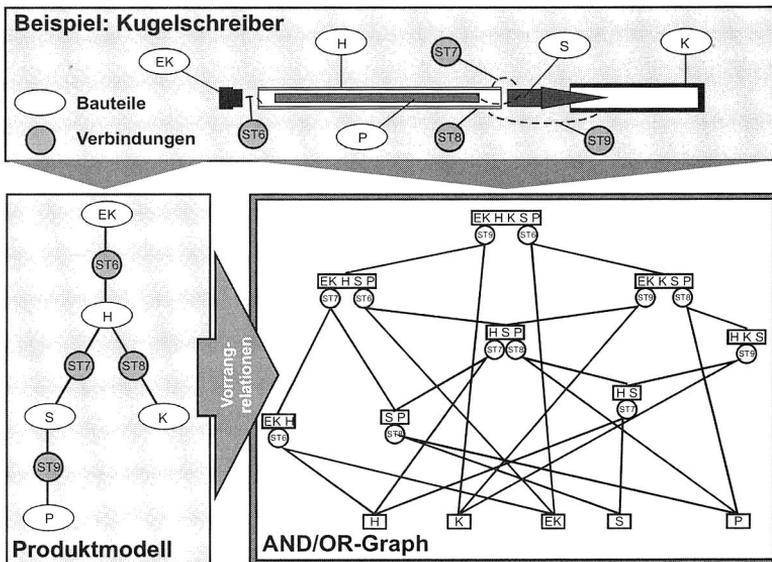


Bild 15: Ableiten eines AND/OR-Graphen aus dem Produktmodell [57]

Der in [59], [60] vorgestellte AND/OR-Graph oder Hypergraph ist ein gerichteter Graph, der in seinem Wurzelknoten das vollständige Produkt und in seinen Blättern die für den nächsten Demontageschritt relevanten Teilprodukte bis hin zu den ein-

zelen Bauteilen enthält. Der charakteristische Unterschied zu sonstigen, gerichteten Graphen und Bäumen ist die singuläre Existenz jedes Blattes. Dadurch wird der Komplexitätsgrad des Graphen im Vergleich zu Alternativen (vgl. [190]) wesentlich verringert. Im Folgenden werden Knoten, Blatt und Teilprodukt als synonyme Begriffe verwendet und beziehen sich stets auf das entsprechende Element im AND/OR-Graph.

In vorangegangenen Arbeiten [80], [190] wurde der AND/OR-Graph teilweise rekursiv aus dem Recyclinggraphen des Produktmodells abgeleitet. Dazu wurden – ausgehend vom Wurzelknoten – zunächst die unmittelbar lösbaren Verbindungen ermittelt, d.h. Verbindungen, die keine Vorgängerrelationen besitzen. Nach dem Lösen einer dieser Verbindungen führen Kanten zu den resultierenden Teilprodukten, die entsprechend weiter bis hin zu den Einzelteilen über Teilgraphen aufgespalten werden. Jedes Teilprodukt wird bei der informationstechnischen Umsetzung in eine Liste eingetragen, in der die Existenz eines neuerzeugten Teilproduktes abgefragt wird. Auf diese Weise wird eine redundante Datenhaltung vermieden und der Graph erhält die echte AND/OR- Struktur und nicht die eines Baumes.

In einem weiteren Schritt werden die einzelnen Demontagemöglichkeiten aus dem erstellten AND/OR-Graphen erzeugt und bewertet (Bild 16). Hierzu wird zunächst das Materialgemisch der einzelnen Knoten im AND/OR-Graphen bestimmt um diese den möglichen Entsorgungsprozessen zuzuweisen, aus denen der wirtschaftlich optimale ausgewählt wird. Anschließend werden die Demontageskosten einer Kombination aus den hinterlegten Stundensätzen und Zeiten berechnet.

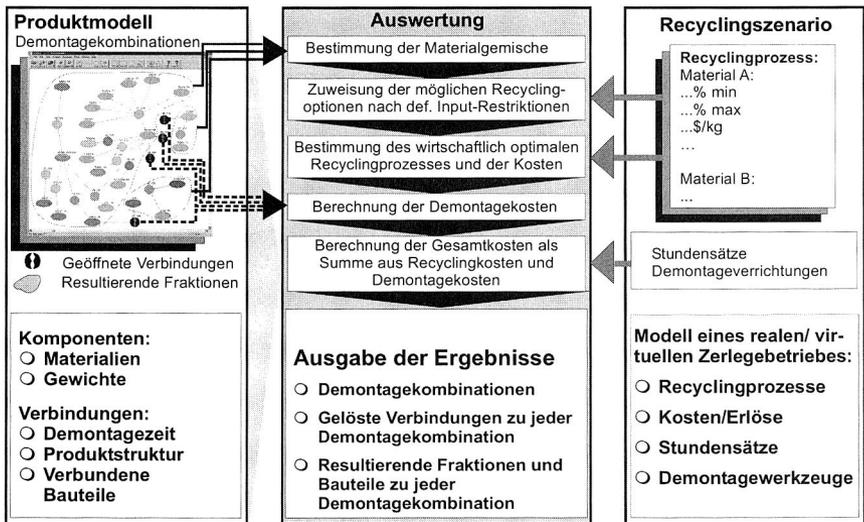


Bild 16: Bewertung der Demontagemöglichkeiten und Berechnung der optimalen Demontagetiefe

Aus den auf diese Weise bewerteten Demontageoptionen wird anhand des gesamten Deckungsbeitrags, d.h. der Summe aus Demontageskosten und Entsorgungskosten bzw. –erlösen die Kombination mit dem höchsten Deckungsbeitrag als wirtschaftlich optimale Demontagetiefe ermittelt. Entsorgungskosten und –erlöse werden im folgenden analog zu [80] als *Nutzen* eines Teilproduktes bzw. Bauteils bezeichnet.

### **3.2.2 Produktstruktur-basierte Reduktion des Lösungsraums**

Wie aus vorangegangenen Arbeiten [25], [28] bekannt ist, kann die Berücksichtigung aller technisch möglichen Demontagezustände aufgrund der sehr großen Anzahl an Rechenoperationen und Teilprodukten nach der informationstechnischen Umsetzung der Methodik, abhängig von der Komplexität des analysierten Produktes, zu weitreichenden Problemen bezüglich Rechenzeit und Speicherverwaltung führen. Deshalb wurden von Meedt [80] verschiedene Algorithmen und Ansätze zur Reduzierung des prozessorientierten Demontagegraphen entwickelt und implementiert. Durch entsprechende Abschätzungen der Lösungsräume auf der Basis des Produktmodells und des Entsorgungsszenarios sollen Demontagezustände identifiziert werden, die keinesfalls die optimale Lösung enthalten und daher aus der weiteren Analyse ausgeschlossen werden können.

#### ***Bilden von Demontagebaugruppen***

Bei einem teilweise rekursiven Aufbau des AND/OR-Graphen mit sequentieller Auswertung der Knoten, wie er nach [80], [190] vorgesehen ist, lässt sich der Rechenaufwand durch die Ermittlung sog. Demontagebaugruppen reduzieren. Diese sind als Mengen von verbundenen Bauteilen definiert, die nur nach der Abtrennung vom restlichen Produkt weiter zerlegt werden können. Aufgrund dieser Eigenschaft kann die Demontagebaugruppe unabhängig vom restlichen Produkt analysiert werden, so dass nicht jeder Zustand der Demontagebaugruppe mit jedem Zustand des restlichen Produkts verglichen werden muss. Eine Implementierung dieses Reduktionspotential ist in den vorangegangenen Arbeiten [80] nicht erfolgt.

#### ***Definition von Nachfolgerrelationen bzw. gleichwertigen Verbindungen***

Werden zwei oder mehrere Bauteile eines Produkts (z.B. Gehäuseteile) über mehrere Verbindungen miteinander befestigt, so führt lediglich das gemeinsame Öffnen aller Verbindungen zu neuen Bauteilfraktionen, d.h. Knoten im AND/OR-Graph. Analog zu den logischen Vorgängerrelationen können diese technischen Restriktionen über sog. „Nachfolgerrelationen“ beschrieben werden, d.h. die Verbindungsdaten werden um die Information über gleichzeitig zu lösende, weitere Verbindungen ergänzt [25].

Beim Ableiten des AND/OR-Graphen können diese Restriktionen entsprechend berücksichtigt werden, um alle Zwischenzustände, die nicht zur Erzeugung neuer Knoten führen, von einer weiteren Analyse auszuschließen. Zur Abgrenzung von echten

Nachfolgerrelationen als Umkehrrelation von Vorrangsbeziehungen wird dafür im weiteren der Begriff *gleichwertige Verbindungen* verwendet.

### 3.2.3 Kennwert-basierte Reduktion des Lösungsraums

Zur weiteren Reduzierung der Lösungsalternativen wurden nach [25], [32] verschiedene Kennwerte eingeführt, die sowohl das Produktmodell als auch die im Entsorgungsszenario definierten Prozesse berücksichtigen. Diese Kennwerte werden einzelnen Bauteilen im Produkt, Teilprodukten oder Verbindungen zugewiesen, um die für die optimale Demontagetiefe nicht relevanten Zwischenzustände vorab zu ermitteln. Diese können dann ebenfalls von der weiteren Analyse ausgeschlossen werden, wobei der Anspruch erhoben wird, dass der verbleibende Lösungsraum in jedem Fall die absolut optimale Lösung enthält. Von den in [80] ausführlich dargestellten Kennwerten und kennwertbasierten Reduktionspotentialen werden nachfolgend nur die für diese Arbeit relevanten Ansätze beschrieben.

#### Lokale Trennschärfe

Die *lokale Trennschärfe* ist ein für Verbindungen berechneter Kennwert, der die Material-Kompatibilität von Bauteilen quantifiziert, die unmittelbar um eine Verbindung herum angeordnet sind [80]. Die lokale Trennschärfe  $T_{loc}$  ergibt sich als Differenz aus der Summe der Einzelnutzen der umliegenden Bauteile und des Nutzens der Bauteile im Verbund abzüglich der Kosten für das Öffnen der Verbindung. Je kleiner der Wert von  $T_{loc}$  ist, desto kompatibler sind die Materialien der um die betrachtete Verbindung angeordneten Bauteile. Die Berechnung der lokalen Trennschärfe erfolgt nach [80] durch Gleichung ( 1 ).

$$T_{loc}(v) = \sum_{j=1}^n N_{max}(k_j) - N_{max}(k_1 \dots k_n) - Dk(v) \quad (1)$$

$T_{loc}(v)$ :	Lokale Trennschärfe der Verbindung $v$
$N_{max}(k_x)$ :	Max. Nutzen einer einzelnen, unmittelbar an $v$ angrenzenden Komponente $b_x$
$N_{max}(k_1 \dots k_n)$ :	Max. Nutzen des Bauteilverbundes $(k_1 \dots k_n)$
$Dk(v)$ :	Demontageaufwand der Verbindung $v$

#### Entnahmepotential

Bei der Berechnung des bauteilbezogenen Kennwertes *Entnahmepotential* wird der potentiell erreichbare Nutzen eines Bauteils mit dem für seine Demontage verbundenen Aufwand verglichen [25], [80]. Dies erfolgt mit Berücksichtigung der bei der Demontage des Zielbauteils entstehenden Fraktionen im Gesamtprodukt (*vollständiges Entnahmepotential*  $E_{vpot}$ ) und lediglich mit lokalem Bezug auf das Zielbauteil (*reduziertes Entnahmepotential*  $E_{rpot}$ ). Für den weiteren Kontext ist davon nur das reduzierte Entnahmepotential  $E_{rpot}$  relevant.

Die Berechnung des reduzierten Entnahmepotentials ergibt sich nach [80] aus Gleichung ( 2 ).

$$E_{rpot}(Zk) = N_{max}(Zk) - \sum_i Dk(v_i) \quad (2)$$

$E_{rpot}(Zk)$ : Reduziertes Entnahmepotential für die Zielkomponente Zk

$N_{max}(Zk)$ : Max. Nutzen die Zielkomponente Zk

$Dk(v_i)$ : Demontageaufwand der Verbindung  $v_i$ , die zur Entnahme des Zielbauteils zu öffnen ist

### Zerlegepotential

Die Berechnung des *Zerlegepotentials* erfolgt auf der Annahme, dass ein Bauteilverbund stets einen geringeren Nutzen als die Summe der Einzelnutzen aller im Verbund enthaltenen Komponenten aufweist. Zudem wird davon ausgegangen, dass zur Erschließung der Einzelnutzen mindestens eine Verbindung - diejenige mit der größten, lokalen Trennschärfe - zu öffnen ist [80]. Das Zerlegepotential  $Z_{pot}$  schätzt damit den erreichbaren Nutzen für einen Knoten im AND/OR-Graph nach einer weiteren Zerlegung ab. Die Berechnungsvorschrift ergibt sich nach [80] aus Gleichung ( 3 ).

$$Z_{pot}(TP) = N_{max}(TP) - \sum_j N_{max}(k_j) - Dk(v_{maxTloc}) \quad (3)$$

$Z_{pot}(TP)$ : Zerlegepotential des Bezugsknotens TP im AND/OR-Graph

$N_{max}(TP)$ : Max. Nutzen des Bezugsknotens TP

$N_{max}(k_j)$ : Max. Nutzen der Komponente  $k_j \in TP$

$Dk(v_{maxTloc})$ : Demontageaufwand der Verbindung  $v_{maxTloc}$  mit der größten, lokalen Trennschärfe innerhalb von BK

### Ermittlung demontagerelevanter Bauteile

Durch spezifische Analyse Kriterien sollen Zielbauteile identifiziert werden, deren Entnahme unabhängig von den sonst bei der Demontage des Bauteils anfallenden Fraktionen in jedem Fall lohnenswert ist. Dies trifft nach [25], [32], [80] immer dann zu, wenn der Nutzen für das Zielbauteil nach der Entnahme höher ist als die Summe aller notwendigen Demontageaufwände und wird für alle Bauteile eines Produktes angenommen, für die das reduzierte Entnahmepotential und die lokalen Trennschärfen aller umgebenden Verbindungen größer Null sind (Gleichung ( 4 )).

$$E = \{k_j \mid E_{rpot}(k_j) > 0 \wedge \forall v_i \in V_j : \{T_{loc}(v_i) > 0\}\} \quad (4)$$

$E$ : Menge aller demontagerelevanten Komponenten

$E_{rpot}(k_j)$ : Reduziertes Entnahmepotential der Komponente  $k_j$

$V_j$ : Menge aller Verbindungen  $v_i$ , in direkter Umgebung der Komponente  $k_j$

$T_{loc}(v_j)$ : Lokale Trennschärfe aller die Komponente  $k_j$  umgebenden Verbindungen  $v_j$

Alle Knoten des AND/OR-Graphen, die demontagerelevante Zielbauteile aus der Menge  $E$  im Verbund enthalten, können aufgrund dieses Kriteriums von der weiteren Analyse ausgeschlossen werden [57].

### Ermittlung nicht demontagerelevanter Teilprodukte

Durch die Auswertung des Zerlegepotentials für einzelne Knoten des AND/OR-Graphen sollen Teilprodukte identifiziert werden, deren Zerlegung in keinem Fall zu

einem höheren Nutzen führt. Dies wird für alle Teilprodukte angenommen, deren Zerlegepotential kleiner als Null ist (Gleichung ( 5 )). Der weitere Aufbau des AND/OR-Graphen wird bei den so ermittelten Teilprodukten abgebrochen.

$$Z = \{TP_j | Z_{pot}(TP_j) < 0 \} \quad (5)$$

Z: Menge aller Teilprodukte, deren weitere Demontage nicht relevant ist

$Z_{pot}(TP_j)$ : Zerlegepotential des Teilproduktes  $TP_j$

### 3.2.4 Schwachstellen-Analyse

Während die Ermittlung der wirtschaftlich optimalen Demogagetiefe eine Analyse der aktuellen Produktgestalt darstellt, werden durch eine Schwachstellenanalyse die Potentiale zur Verbesserung der Demontage- und Entsorgungsgerechtigkeit eines Produktes aufgezeigt.

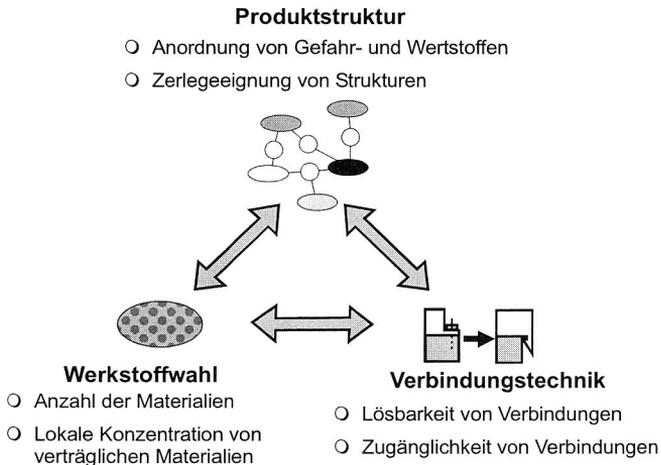


Bild 17: Einflussgrößen auf die Demontage- und Entsorgungsgerechtigkeit von Produkten nach [80]

Prinzipiell wird die Demontage- und Entsorgungsgerechtigkeit durch drei Einflussgrößen bestimmt [80] (Bild 17):

- Durch die Produktstruktur, d.h. die Anordnung von Wert- und Gefahrstoffen in der Produkthierarchie.
- Durch die Verbindungstechnik, d.h. sehr wichtige Verbindungen müssen effizient zu lösen sein.
- Durch die Werkstoffauswahl, d.h. Baugruppen sollen aus möglichst verwertungskompatiblen Materialien bestehen, um den Demontageaufwand zu minimieren.

In ReGrEd/DisPlay werden Module zur Ermittlung von konstruktiven Schwachstellen bezüglich der genannten Einflussgrößen bereitgestellt und sind - ebenso wie eine iterative Optimierungsmethode - in [80] ausführlich beschrieben.

### 3.2.5 Integration zusätzlicher ökologischer Analysekriterien

Wie bereits dargestellt, ist der Einsatz von ökologischen Bewertungsansätzen wie z.B. Ökobilanzen im industriellen Umfeld aufgrund des meist sehr hohen Aufwandes für die Datenakquisition und die Modellierung des Produktlebensweges nur sehr wenig verbreitet [9], [43], [48], [79]. Ziel bisheriger Arbeiten war es daher, einfach greifbare ökologische Indikatoren zu entwickeln, die möglichst auf der Basis von bereits bekannten Produktinformationen bzw. daraus ableitbar zu einer schnellen und einfachen Aussage über die Umweltrelevanz einer Produktvariante führen.

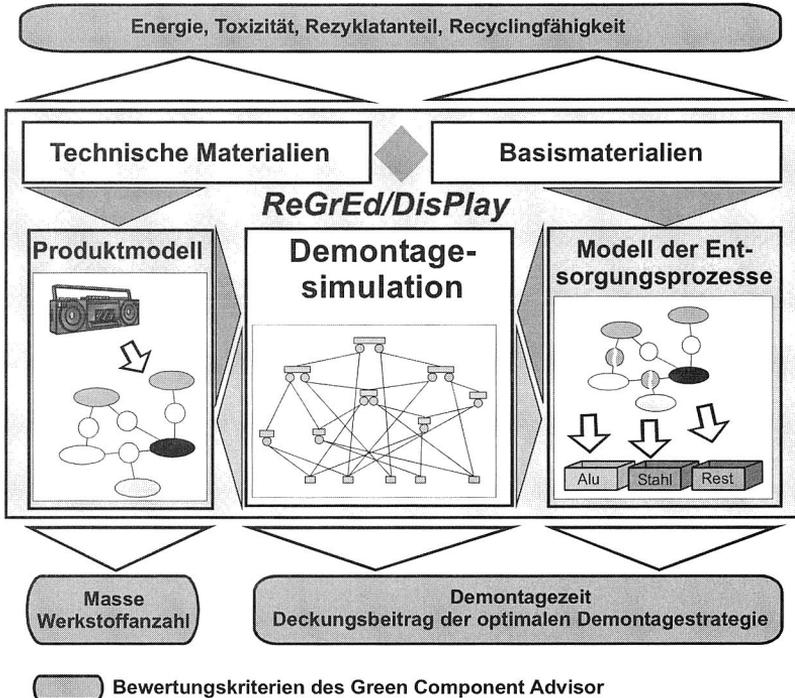


Bild 18: Berücksichtigung ökologischer Bewertungskriterien im System ReGrEd/ DisPlay

Ebenfalls in vorangegangenen Arbeiten [32], [57] wurden die Bewertungskriterien „Demontagezeit“ und „Entsorgungskosten“ des Konzeptes ReGrEd/DisPlay um Aspekte des Lebenszyklus-übergreifenden, produktbezogenen Umweltschutzes erweitert. Die von der Fa. Motorola Corp. entwickelte ökologische Analyseverfahren „Green Component Advisor“ (GCA) berücksichtigt produkt- und komponentenbezogene Bewertungskriterien, die direkt oder indirekt potentielle Umweltbelastungen als Indikatoren quantifizieren [57]. Diese zusätzlichen Kriterien wurden über die Materialdefinitionen bzw. direkt in das Produktmodell von ReGrEd/DisPlay eingebracht (Bild 18).

Um die nach einer Berechnung vorliegenden ökologischen Eigenschaften eines Produktes für den Anwender in Form eines eindimensionalen Kennwertes greifbar zu machen, werden die Einzelwerte durch eine multiattributive Wertanalyse auf Zahlen zwischen 0 (bester Wert) und 1 (schlechtester Wert) normiert und gewichtet aufsummiert [191].

### 3.2.6 Defizite der bisher implementierten Ansätze und Ableiten von Entwicklungspotentialen

Nachfolgend werden die im Rahmen dieser Arbeit ermittelten Defizite bezüglich Anwendbarkeit und Methodik des Systems ReGrEd / DisPlay dargestellt. Daraus erschließt sich die Motivation für die weitere Entwicklungsarbeit zur Effizienzsteigerung der Demontageanalyse als Voraussetzung für die Integration rechtlicher Anforderungen in das System.

#### **Beschränkungen der Analyseleistung und Einsatzmöglichkeiten**

Bereits durch die bisher beschriebenen Algorithmen zur Reduktion des AND/OR-Graphen kann am Beispiel eines CD-Spielers eine bemerkenswerte Verringerung der Rechenzeit um bis zu 98 % gegenüber der vollständigen Generierung aller Demontagekombinationen erreicht werden [80].

Weitere Anwendungsfällen zeigen jedoch, dass sich für den praktischen Einsatz – abhängig von Hierarchien in der Produktstruktur und Komplexität der Produkte – inakzeptable Rechenzeiten ergeben können. So wurden als Beispiele ein Radiogerät, ein Leistungsschalter (Schütz), ein Industrie-PC, ein Staubsauger und ein Kraftfahrzeug-Armaturenbrett mit jeweils unterschiedlicher Anzahl an Bauteilen und Verbindungen sowie Hierarchie analysiert (Tabelle 4).

Produkte mit flacher Hierarchie zeichnen sich dadurch aus, dass ggf. nach dem Lösen von nur wenigen Verbindungen die weiteren Bauteile für die Demontage frei zugänglich sind. Die Anzahl der Teilprodukte im AND/OR-Graph ist somit näherungsweise  $2^{(\text{Anzahl der Verbindungen})}$ . Produkte mit strenger Hierarchie weisen zahlreiche Vorrangssequenzen auf, d.h. Verbindungen haben sequentiell zahlreiche Vorrangsrelationen, die ebenfalls von Vorrangsrelationen abhängen. Die Anzahl der zu generierenden Teilprodukte reduziert sich entsprechend.

Produkt	Anzahl der Bauteile	Anzahl der Verbindungen	Hierarchie	Rechenzeit
Radiogerät	22	13	mittel	60 s
Leistungsschalter	66	38	streng	120 s
Industrie-PC	77	46	flach	5 h 23 min 18 s
Staubsauger	83	80	mittel	Abbruch nach 36 h
Kfz.-Armaturenbrett	53	42	flach	Abbruch nach 36 h

Tabelle 4: Rechenzeitvergleiche für verschiedene Produkte

In den Analysen zeigte sich, dass kleine Produkte ebenso wie Produkte mit strenger Hierarchie bei durchwegs kurzen Rechenzeiten zu analysieren sind. Die Berechnung der optimalen Demontagetiefe von größeren Produkten, wie einem Industrie-PC, führten jedoch zu Rechenzeiten, die für den Einsatz des rechnergestützten Werkzeugs im industriellen Umfeld nicht annehmbar sind. Ebenso konnten Produkte wie Staubsauger oder Armaturenbrett, deren Analyse zu den Standardanwendungen für derartige Werkzeuge gehört, aufgrund von Speicherproblemen selbst bei Nutzung entsprechend ausgestatteter Rechner nicht bis zum endgültigen Ergebnis berechnet werden.

Die akzeptable Rechenzeit für die Demontageanalyse ist eine wesentliche Voraussetzung für deren industriellen Einsatz und die Integration wirtschaftlich relevanter, rechtlicher Anforderungen in ein derartiges System [44]. Hieraus leitet sich das Potential für die Erschließung weiterer Optimierungsmöglichkeiten ab, durch die beispielsweise die Datenmodelle bereits im Vorfeld der Analyse abgeglichen und reduziert werden, und die verstärkt die Topologien des Recyclinggraphen berücksichtigen.

#### ***Defizite bei kennwertbezogenen Reduktionsalgorithmen***

Sämtliche kennwertbezogenen Reduktionsalgorithmen nach [80] gehen von der Annahme aus, dass der maximal erreichbare Nutzen der potentiellen Fraktionen eines Bauteilverbundes ohne Berücksichtigung des Demontageaufwandes bei dessen vollständiger Zerlegung gegeben ist. Dies würde dem monotonen Steigen des Nutzenverlaufs über der Zerlegetiefe (vgl. Bild 8) entsprechen.

Tatsächlich kann der Nutzenverlauf über die Zerlegetiefe jedoch auch eine negative Steigung aufweisen, wenn bestimmte Bauteile (z.B. Aufkleber auf einem Metallteil) als zulässige Verunreinigung in hochwertigen Verwertungsprozessen mit Erlösen behandelt werden können, die nach ihrer Abtrennung nur einer kostenbehafteten Beseitigung zuzuführen sind. In diesem Fall ist mit der Verwertung des Gesamtverbundes ein höherer Nutzen zu erzielen, als nach dessen Zerlegung.

Weiterhin wird durch diese Annahme vernachlässigt, dass das Ziel einer Demontage unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten nicht notwendiger Weise die Erzeugung möglichst reiner Stofffraktionen ist. Vielmehr sollen Stofffraktionen erzeugt werden, die zu Entsorgungsprozessen mit möglichst hohem Nutzen kompatibel sind [24], [191], [194].

Bild 19 zeigt ein beispielhaftes Produktmodell, an dem die daraus potentiell abzuleitenden Fehlermöglichkeiten durch ein Berechnungsbeispiel im Folgenden aufgezeigt werden. Ein Teilprodukt bestehe aus drei frei demontierbaren Bauteilen, die über eine Verbindung am restlichen Produkt montiert sind. Die zu diesem Beispiel gehörenden demontagerelevanten Bauteil- und Verbindungseigenschaften sind in Tabelle 5 angegeben.

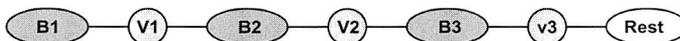


Bild 19: Produktmodell zur Darstellung von Fehlermöglichkeiten der Reduktionsalgorithmen

Bauteil	Masse	Material	Verbindung	Demontagekosten
B1	1 kg	Cu	V1	0,5 €
B2	0,08 kg	PP	V2	0,5 €
B3	1kg	Cu	V3	0,5 €

Tabelle 5: Demontagerelevante Daten des Beispielproduktes

Dem Berechnungsbeispiel sei außerdem das in Tabelle 6 enthaltene Entsorgungsszenario zugrunde gelegt.

Prozess	Materialrestriktion	Zul. Verschmutzung	Kosten/Erlös
P1	Cu: 0-100%; ...	max. 5%	10 € / kg
P2	Cu: 0-100%; ...	max. 10%	5 € / kg
P3	PP: 0-100%; ...	max. 5%	1 € / kg

Tabelle 6: Angenommenes Entsorgungsszenario für Berechnungsbeispiel

Für die Verbindungen V1-V3 und Bauteile B1-B3 werden zunächst nach den Gleichungen ( 1 )-( 3 ) die *Lokalen Trennschärfen* sowie die *reduzierten Entnahmepotentiale* berechnet. Die jeweiligen Ergebnisse sind in Tabelle 7 enthalten. Die lokale Trennschärfe für die Verbindung V3 wird ohne Beschränkung der Allgemeinheit auf  $T_{loc}(V3) > 0$  gesetzt.

Bauteil	$E_{rpot}(B_i)$	Prozess	Verbindung	$T_{loc}(V_i)$	Prozess Verbund
B1	9,50 €	P1	V1	4,18 €	P2
B2	- 0,92 €	P3	V2	4,18 €	P2
B3	9,00 €	P1	V3	> 0 €	N.N.

Tabelle 7: Reduzierte Entnahmepotentiale und lokale Trennschärfen für das Produktbeispiel

Nach den Kriterien zur Bestimmung demontagerelevanter Bauteile gemäß Gleichung ( 4 ) wird das Bauteil B1 prioritär zur Demontage vorgesehen, weil sowohl  $E_{rpot}(B1)$  als auch  $T_{loc}(V1)$  größer Null ist. Das gleiche gilt für das Bauteil B3. In beiden Fällen ist die lokale Trennschärfe nur deshalb positiv, weil im Verbund (B1, B2) bzw. (B2, B3) der Kunststoffanteil aus B2 mit 8% über den für den Prozess P1 zulässigen Grenzwert für Verschmutzungen von 5% liegt und die jeweiligen Verbünde dem Prozess P2 (zulässiger Verschmutzungsgrad 10%) zugeführt werden.

Teilprodukte	Prozesse			Deckungsbeitrag
	B1	B2	B3	
B1 B2 B3	P1	P3	P1	20,30 € + Rest
B1 B2 B3	P2		P1	14,40 € + Rest
B1 B2 B3	P1	P2		14,40 € + Rest
B1 B2 B3	P1			18,58 € + Rest

Tabelle 8: AND/OR-Graph, Fraktionen und Deckungsbeiträge zum Beispielprodukt

Demnach würde die optimale Demontagestrategie in der Entnahme der Bauteile *B1* und *B3* bestehen, wobei das Bauteil *B2* ebenfalls abgetrennt wird. Alle Zwischenzustände werden deshalb aus der weiteren Betrachtung ausgeschlossen. Der gesamte Deckungsbeitrag ergibt sich als Summe der Einzelnutzen abzüglich der Demonteaufwände nach Tabelle 8 zu € 18,58 (ausschließlich des Deckungsbeitrages für den Rest). Wird jedoch der Gesamtverbund (*B1, B2, B3*) belassen, so liegt der PP-Anteil bezogen auf die Masse des Verbundes nur noch bei 3,85% und damit unterhalb des für den Prozess *P1* zulässigen Grenzwerts. Ein einfaches Abtrennen des Teilproduktes (*B1, B2, B3*) führt deshalb zu einem Deckungsbeitrag von € 20,30 (ausschließlich des Deckungsbeitrages für den Rest) und liegt damit höher als bei der ursprünglich angenommenen, optimalen Demontagestrategie.

Es kann somit festgestellt werden, dass sich – ausgehend vom Teilprodukt (*B1, B2, B3*) – eine weitere Demontage nicht lohnt. Durch die Anwendung des Zerlegepotentials als Analysekriterium sollen nach Gleichung ( 5 ) derartige Teilprodukte identifiziert werden. Für den Verbund (*B1, B2, B3*) ergibt sich nach Gleichung ( 3 ) ein Zerlegepotential von  $Z_{pot}(B1, B2, B3) = 1,72 \text{ €}$ . Nachdem ein Bauteilverbund erst dann als nicht weiter demontagerelevant eingestuft wird, wenn  $Z_{pot}(BK) < 0$ , greift dieses Abbruchkriterium beim ausgeführten Beispiel nicht, obwohl eine weitere Zerlegung von (*B1, B2, B3*) nicht sinnvoll ist.

Für die Abschätzungen zur Reduzierung des AND/OR-Graphen leitet sich daraus eine Anfälligkeit für Fehler erster und zweiter Art ab [188]. So kann durch das *Entnahmepotential* und die *Lokale Trennschärfe* ein Bauteil als demontagerelevant eingeschätzt werden, obwohl es innerhalb eines Bauteilverbundes einen höheren Nutzen aufweist. Dies kann zur Folge haben, dass Demontagetzustände, die einen Beitrag zur optimalen Demontagestrategie leisten, aus dem Lösungsraum ausgeschlossen werden, und so das endgültige Berechnungsergebnis nur die suboptimale Lösung beschreibt.

Wie aus dem Beispiel anschaulich wird, liegt der Grund für diese Fehleranfälligkeit in der Verwendung der *Lokalen Trennschärfe* als eines der Abbruchkriterien. Durch diesen Kennwert werden lediglich die direkt um die Verbindung angeordneten Bauteile und deren Werkstoffe berücksichtigt, wodurch eine möglicherweise günstigere Kombination mit Bauteilen im restlichen Produkt nicht erkannt wird.

Ebenso wird ein Bauteilverbund nach Gleichung ( 5 ) als demontagerelevant bewertet und weiter analysiert, obwohl eine weitere Zerlegung in keinem Fall einen höheren Nutzen erwarten lässt. Dies führt zwar nicht zum Verlust des absolut optimalen Demontagezustands, es werden jedoch durch das Produkt gegebene Reduktionspotentiale nicht ausgenutzt.

Auf der Basis von möglichen, günstigen Bauteilkombinationen und durch die Berücksichtigung der Produktstruktur lassen sich daher weitreichende Potentiale für weitere Ansätze zur Berechnungsoptimierung ableiten. Ziel muss es also sein über geeignete Kriterien die optimal auf die Entsorgungsprozesse abgestimmten Teilprodukte zu ermitteln, um so eine sichere Abschätzung bezüglich nicht demontagerelevanter Bauteilverbunde zu treffen. In einem ersten Schritt zur Modifizierung des Systems ReGrEd / DisPlay sind demnach Ansätze zur Verbesserung der Analyseleistung und damit zur Steigerung der Verfügbarkeit zu entwickeln.

### ***Defizite bei der Definition des Entsorgungsszenarios***

Im Modell des Entsorgungsszenarios durch einen „Fraktionenbaum“ nach Scheller [190] ebenso wie bei der Modellierung durch „Entsorgungskisten“ nach Meedt [80] existiert ein sog. „Rest“-Prozess als Systemprozess, in dem jegliches Materialgemisch einschließlich der als Gefahrstoff definierten Stoffe behandelt werden kann. In der Praxis sind die einzelnen Prozesse zur Verwertung oder Beseitigung nach den spezifischen Gesetznormen nur für bestimmte Stoffgemische bzw. Abfallarten qualifiziert [56], [99], [132], [133], [180], [193]. Gerade für gefahrstoffhaltige Fraktionen, die nach der BestbÜAbfV [103] bzw. BestÜVAbfV [97] meist als „besonders überwachungsbedürftig“ oder „überwachungsbedürftig“ klassifiziert sind, existieren stoffspezifische Prozesse. Aufgrund des Gefahrenpotentials der im allgemeinen Sprachgebrauch als „Sonderabfall“ bezeichneten Fraktionen unterliegen diese in besonderem Maße einer Reglementierung hinsichtlich der getrennten Behandlung [56], [180], [193].

Ein Prozess, der Fraktionen mit beliebigen Zusammensetzungen aufnehmen kann, existiert demnach nicht. Dies hat jedoch weitreichende Folgen für den Aufbau und die Analyse des AND/OR-Graphen, weil darin ungültige Teilprodukte enthalten sein können, die in keinem Fall Bestandteil der optimalen Lösungen sind. Ebenso leitet sich aus dem Anspruch an die Berechnung praxisrelevanter Demontagestrategien für technisch komplexe Produkte eine umfassende Berücksichtigung des „unmöglichen“ Prozesses ab.

## 4 Leistungsoptimierung des rechnergestützten Produktanalysewerkzeugs ReGrEd/DisPlay

Im vorangegangenen Abschnitt wurden einige Potentiale zur weiteren Leistungssteigerung sowie Defizite der bisherigen Methodik des Werkzeugs ReGrEd/DisPlay dargestellt. Zur einfachen Abgrenzung des bisherigen Entwicklungsstandes vom neuentwickelten Werkzeug wird nachfolgend die Version nach [80], [190] als ReGrEd/DisPlay v2.0 und die im Rahmen dieser Arbeit erstellte Version als ReGrEd/DisPlay v3.0 bezeichnet.

Ein wesentlicher Baustein zur effizienteren Berechnung der optimalen Demontage-tiefe ist eine Reduktion bzw. Verdichtung der verfügbaren auf die für die Analyse relevanten Daten (Bild 20). Dies erfolgt unter anderem durch Transformation des ursprünglichen Produktmodells in ein spezifisches Datenmodell für die Demontageanalyse und durch Ausschluss nicht möglicher Entsorgungsprozesse. Neben Zahlenwerten werden im transformierten Datenmodell Relationen in Form von Mengen dargestellt, welche die in Relation stehenden Objekte enthalten.

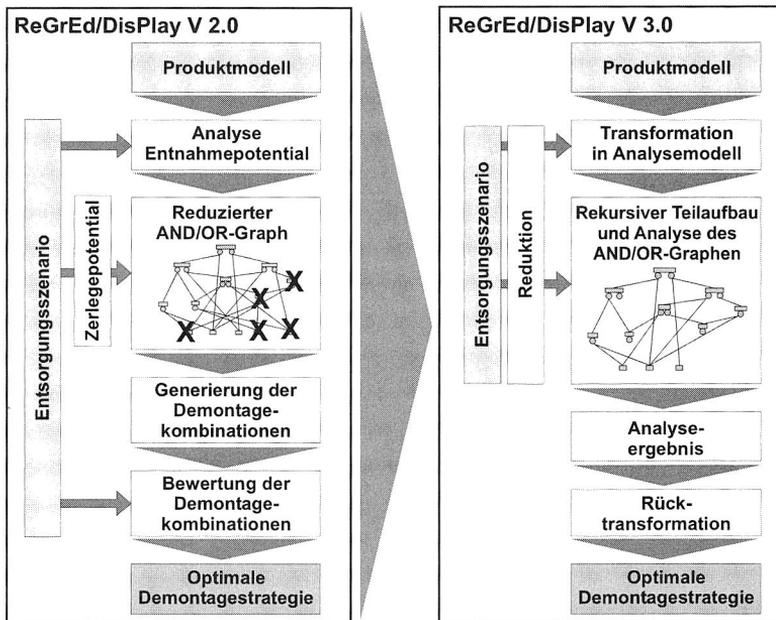


Bild 20: Module zur Leistungsoptimierung von ReGrEd/DisPlay im Vergleich

Auf der Basis des reduzierten Datenmodells erfolgt die vollständig rekursive Generierung des AND/OR-Graphen und dessen integrierte Analyse. In den vorangegangenen Arbeiten (v.a. [80], [190]) wurde zwar der AND/OR-Graph bereits rekursiv er-

zeugt, die eigentliche Bewertung des Graphen und die Analyse der Demontagealternativen zur Ermittlung der optimalen Demontagestrategie erfolgten jedoch sequentiell danach. Durch die vollständig rekursive Generierung des AND/OR-Graphen und durch die integrierte Bewertung können sehr effiziente Abbruchkriterien zur Anwendung kommen (Abschnitt 4.2 und 4.3). Durch eine einfache Rücktransformation des Datenmodells zur Analyse kann das Analyseergebnis als optimale Demontagestrategie wieder in das ursprüngliche Produktmodell zurückprojiziert werden.

## 4.1 Transformation des Produktmodells in ein Datenmodell zur Demontageanalyse

### 4.1.1 Reduktion der Produktstruktur durch Topographieanalyse

Durch die exakte Modellierung von Produkten auf der Basis von CAD-Daten oder einer Probezerlegung entsteht oftmals eine Produktstruktur, deren Topographie eine Reduzierung für die Demontageanalyse erlaubt. Mit jeder Komponente ist bei der Analyse eine Vielzahl von Berechnungen durch die Zuweisung zu entsprechenden Entsorgungsprozessen verbunden. Ebenso steigt die theoretische Anzahl an alternativen Demontagekombinationen um Faktor  $2^n$  für  $n$  frei lösbare Verbindungen [91]. Aufgrund einer Untersuchung der Eigenschaften verschiedener Topologie-Ausprägungen können unter bestimmten Voraussetzungen sowohl mehrere Komponenten als auch mehrere Verbindungen virtuell vereint werden.

#### Zusammenfassung von Komponenten

Bei den in Bild 21 als Beispiele gezeigten Topologien kann kein Bauteil vereinzelt werden, ohne auch die anderen Bauteile aus dem Verbund zu entfernen. Daher können die jeweiligen Bauteile zusammengefasst werden. Dies trifft demnach für Bauteile zu, die durch die gleichen Verbindungen mit dem Restprodukt verbunden sind (Gleichung ( 6 )).

$$\begin{aligned}
 B^* &= \{b_i, b_j \in B \mid V(b_i) = V(b_j)\} \\
 \Rightarrow m^*(b^*) &= m(b_i) + m(b_j) \\
 \Rightarrow Mat^*(b^*) &= Mat(b_i) \cup Mat(b_j) \\
 \Rightarrow W^*(b^*) &= W(b_i) + W(b_j); \quad W(b) = \max[(m(b) \cdot w(p(b))); W_{P_{Rec}}(b)]
 \end{aligned}
 \tag{ 6 }$$

$B^*$ : Menge aller jeweils zu virtuellen Komponenten kombinierbaren Bauteile

$m(b)$ : Masse des Bauteils  $b$

$W(b)$ : Nutzen des Bauteils  $b$

$p(b)$ : Nutzen pro Masse des wirtschaftlich optimalen Entsorgungsprozess für Bauteil  $b$

$W_{Rec}$ : Nutzen des Bauteils  $b$  bei Wiederverwendung

$Mat(b)$ : Menge der im Bauteil  $b$  enthaltenen Stoffe

Werden mehrere Bauteile zu einer virtuellen Komponente kombiniert, so ergibt sich die Masse der virtuellen Komponente aus der Summe der Einzelmasse. Die Materialzusammensetzung der virtuellen Komponente ist als Vereinigung der jeweiligen Stoffinhalte der Komponenten zu sehen.

Für den Fall, dass der vom Restprodukt herausgelöste Bauteilverbund keine Verbindung mehr enthält (Bild 21, a), b)), errechnet sich der Einzelwert der virtuellen Komponente aus der Summe der Einzelwerte der vereinigten Bauteile. Diese Einzelwerte sind als Nutzen der wirtschaftlich optimalen Entsorgung oder durch den Nutzen des Bauteils bei Wieder- und Weiterverwendung gegeben.

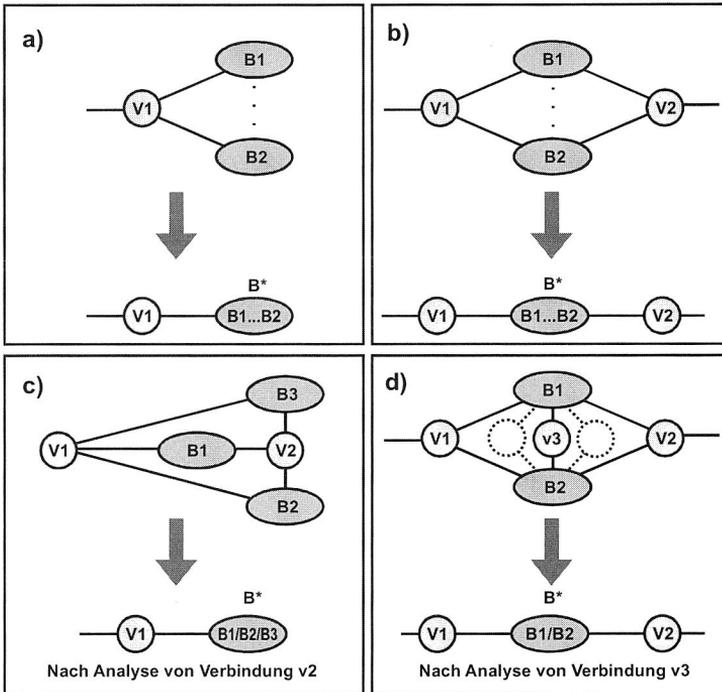


Bild 21: Topologieabhängige Reduktion der Komponenten in der Produktstruktur

Für potentielle Bauteilkombinationen, die nach dem Herauslösen aus dem Restprodukt noch eine Verbindung enthalten (Bild 21 c), d)), ist zur Festlegung des virtuellen Bauteilwerts die optimale Demontagetiefe vorab zu berechnen. In diesem Fall gilt:

$$\Rightarrow W^*(b^*) = W(b) = \max[W(b_i, b_j); (W(b_i) + W(b_j) - \sum Dk(V_{i,j}))] \quad (7)$$

$W(b_i, b_j)$ : Nutzen der Bauteile  $b_i$  und  $b_j$  im Verbund

$W(b)$ : Nutzen des Bauteils  $b$

$Dk(V_{i,j})$ : Demontagekosten der Verbindungen zwischen Bauteil  $b_i$  und  $b_j$

### Zusammenfassung von Verbindungen

Ähnlich wie Bauteile lassen sich auch Verbindungen unter bestimmten Voraussetzungen vereinigen. Dabei sind prinzipiell die in Bild 22 beispielhaft dargestellten drei Fälle zu unterscheiden.

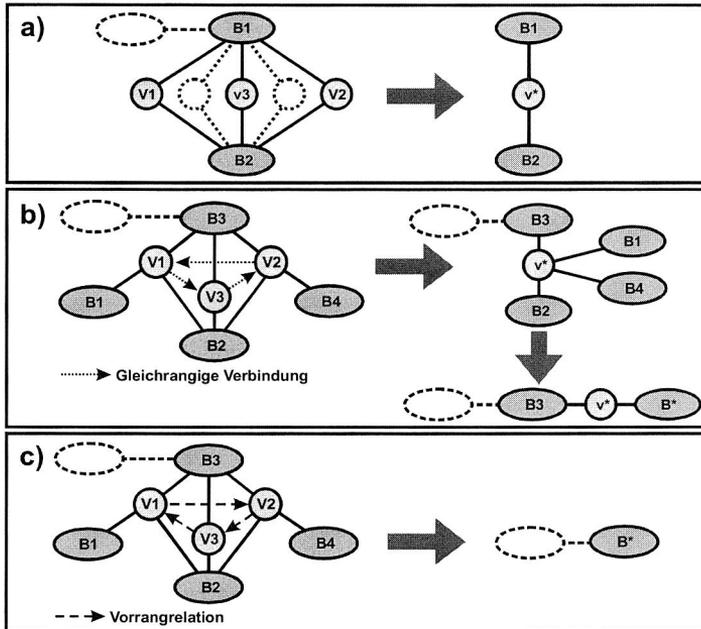


Bild 22: Topologieabhängige Reduktion der Verbindungen in der Produktstruktur

Bei Verbindungen, die genau die gleichen Bauteile in der Produktstruktur miteinander verknüpfen, führt nur das gleichzeitige Lösen aller zur Generierung neuer Teilprodukte (Bild 22, a)). Diese Verbindungen können demnach zu einer einzigen vereinigt werden. Es gilt dann:

$$\begin{aligned}
 V^* &= \{v_i, v_j \in V \mid B(v_i) = B(v_j)\} \\
 \Rightarrow Dt^*(v^*) &= Dt(v_i) + Dt(v_j)
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

$V$ : Menge aller jeweils zu virtuellen Verbindungen kombinierbaren Verbindungen

$B(v)$ : Menge aller an die Verbindung  $v$  geknüpften Bauteile

$Dt(v)$ : Demontagezeit der Verbindung  $v$

Die gleichrangigen Verbindungen  $Gleich(v)$  bedingen, dass mit dem Öffnen der Verbindung  $v$  auch sämtliche Verbindungen aus der Menge  $Gleich(v)$  zu lösen sind. Sind die gleichrangigen Verbindungen in der Produktstruktur als Zyklus definiert, so kön-

nen diese Verbindungen nach Gleichung ( 9 ) zu einer einzigen zusammengefasst werden (Bild 22, b)). Abhängig von der Topographie des Produktmodells kann danach eine weitere Reduzierung der Bauteile nach Gleichung ( 6 ) möglich sein.

$$\begin{aligned}
 V^* &= \{v_i, v_j, v_k \in V \mid v_i \in \text{Gleich}(v_j) \wedge v_j \in \text{Gleich}(v_k) \wedge v_k \in \text{Gleich}(v_i)\} \\
 \Rightarrow Dt^*(V^*) &= Dt(v_i) + Dt(v_j) + Dt(v_k) \\
 \Rightarrow B^*(V^*) &= B(v_i) \cup B(v_j) \cup B(v_k)
 \end{aligned}
 \tag{9}$$

$V^*$ : Menge aller jeweils zu virtuellen Verbindungen kombinierbaren Verbindungen

$B(v)$ : Menge aller an die Verbindung  $v$  geknüpften Bauteile

$Dt(v)$ : Demontagezeit der Verbindung  $v$

Einen Sonderfall stellen Verbindungen dar, deren Vorrangrelationen einen Zyklus bilden (Bild 22, c)). Derartig definierte Verbindungen sind niemals lösbar, d.h. die durch sie angeknüpften Bauteile können zu einem Bauteil kombiniert werden. Die betroffenen Verbindungen werden dabei eliminiert. Dieser Fall ist stets auf ein inkonsistentes Produktmodell zurückzuführen und wird hier nur im Kontext genannt. Er wird im folgenden bei der Entwicklung der Analysealgorithmen ausgeschlossen, muss jedoch bei der softwaretechnischen Implementierung in Form einer Fehlermeldung berücksichtigt werden.

#### 4.1.2 Material- und Prozessdatenreduktion

Das System ReGrEd/DisPlay verwaltet verschiedene Datenbasen (z.B. für Materialien und Entsorgungsprozesse), die zunächst nur einmal erstellt werden und dann als Grundlage für alle zu analysierenden Produkte dienen. Daraus ergibt sich zwangsläufig, dass im System eine Reihe Daten vorliegen, die bisher bei der Analyse zwar abgefragt werden, aber bezogen auf das Produkt nicht relevant sind. Ein wesentlicher Ansatz zur Steigerung der Analyseeffizienz ist daher die Reduktion der vorhandenen Daten auf die tatsächlich benötigten.

##### **Eliminierung der Technischen Materialien**

Bauteile werden im Produktmodell durch ihre Masse, Zusammensetzung und ggf. einem Bauteilwert bei Wieder-/Weiterverwendung charakterisiert. Die Beschreibung der Stoffinhalte erfolgt dabei über die Angabe von *Technischen Materialien* und deren Anteile in der Komponente. *Technische Materialien* entsprechen den Konstruktionswerkstoffen und sind in der Regel als Gemisch verschiedener *Basismaterialien* definiert, die als Eingangsrestriktionen bei der Beschreibung der Entsorgungsprozesse eingesetzt sind (vgl. Abschnitt 3.2.1). Demnach finden im System aus Gründen der einfacheren Anwendbarkeit zwei verschiedene Arten von Materialbeschreibungen Verwendung, die über festgelegte Relationen miteinander verknüpft sind.

Mit einer vorab durchgeführten Reduzierung der beiden Materialdefinitionen auf eine einheitliche Materialbeschreibung (Bild 23) kann ein wichtiger Beitrag zur Effizienz-

steigerung bei der Demontageanalyse geleistet werden. Dadurch wird die notwendige Transformation mit linearem Rechenaufwand (bezogen auf die Anzahl der Komponenten bzw. Verbindungen) und nicht mit exponentiellem Aufwand bei jeder Einzelberechnung der Teilproduktanalyse im AND/OR-Graphen durchgeführt.

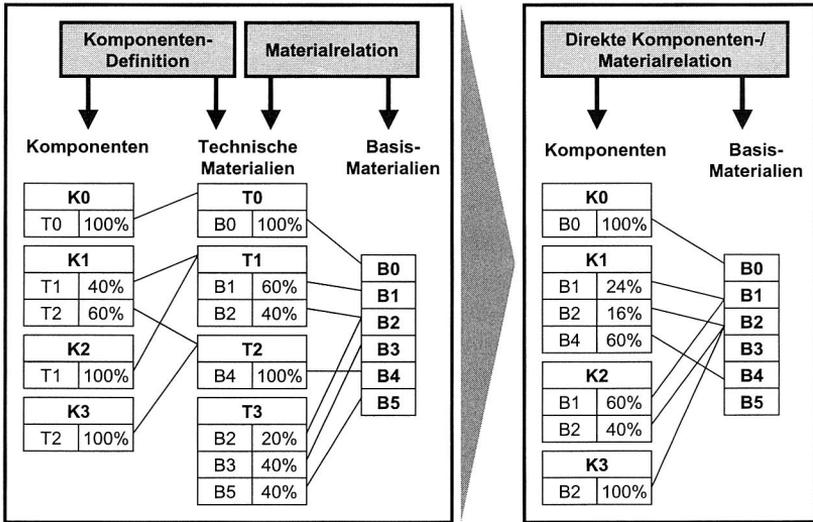


Bild 23: Eliminierung Technischer Materialien durch Vorabtransformation

Nachdem ein *Basismaterial* in mehreren *Technischen Materialien* vorkommen kann, die einer Komponente zugewiesen sind, errechnet sich der Anteil  $s_{BM}(b)$  eines *Basismaterials* in einer Komponente  $b$  aus:

$$\forall \{bm(tm_i) \in BM \mid tm_i \in TM(b)\} : s(bm, b) = \sum_i s(tm_i, b) \cdot s(bm, tm_i) \quad (10)$$

$bm(tm_i)$ : Basismaterial des Technischen Materials  $tm_i$

$BM$ : Menge aller Basismaterialien

$TM(b)$ : Menge der Technischen Materialien von Komponente  $b$

$s(bm, b)$ : Anteil eines Basismaterials in der Komponente  $b$

$s(tm_i, b)$ : Anteil des Technischen Materials  $tm_i$  in der Komponente  $b$

$s(bm, tm_i)$ : Anteil eines Basismaterials im Technischen Material  $tm_i$

### Reduktion der Material- und Prozessdaten

Aus der direkten Zuweisung von Basismaterialien zu den Komponenten leitet sich leicht eine Liste der nicht verwendeten Basismaterialien ab, die dann in einem ersten Schritt ebenfalls aus der Datenbasis eliminiert werden können. Im Beispiel nach Bild 24 sind dies die Basismaterialien  $B3$  und  $B5$ , weil sie in keiner der Komponenten verwendet werden.

Nach der Eliminierung der Basismaterialien können Entsorgungsprozesse ermittelt werden, deren Eingangsrestriktionen (vgl. Abschnitt 3.2.1) nun nicht mehr erfüllt werden können. Dies trifft immer dann zu, wenn der Minimalanteil eines der eliminierten Basismaterialien im Entsorgungsprozess größer Null oder die Summe der Maximalanteile einschließlich der unspezifizierten Materialien nach dem Entfernen der zugehörigen Eingangsrestriktionen aus den Prozessen kleiner als 100% ist.

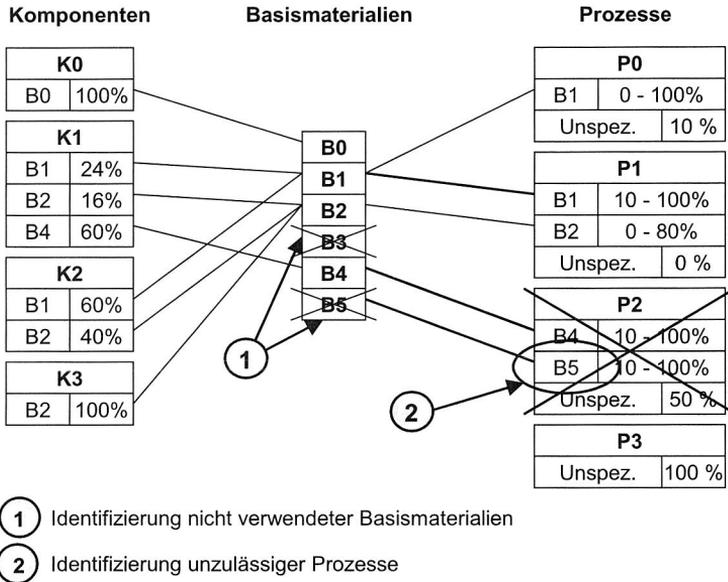


Bild 24: Eliminierung nicht relevanter Basismaterialien und Entsorgungsprozesse

Alle Fraktionen, die dem Prozess P2 in Bild 24 zugeführt werden können, müssen einen Mindestanteil des Basismaterials B5 von 10% aufweisen. Nachdem keine Komponente das Basismaterial B5 enthält, ist diese Bedingung für dieses Anwendungsbeispiel nicht zu erfüllen, d.h. keine Fraktion der Komponenten (K0...K3) kann dem Prozess P2 zugeordnet werden. Dieser Prozess ist also für dieses Produkt ungültig und kann im Rahmen der Datentransformation gestrichen werden. Die reduzierte Material- und Prozessdatenstruktur für das in Bild 23 und Bild 24 gezeigte Beispiel ist in Bild 25 zusammengefasst. Nachdem bei der Analyse der generierten Teilprodukte eine Zuweisung zu möglichen Entsorgungsprozessen aus der Prozessdatenbank erfolgt, reduziert sich durch diesen zweiten Schritt der Berechnungsaufwand ebenfalls erheblich.

Bei der Berechnung der wirtschaftlich optimalen Demontagetiefe ist das Optimierungskriterium durch die Kosten von Entsorgung und Demontage definiert, d.h. eine Fraktion wird stets dem kostenoptimalen zulässigen Prozess zugeordnet. Es bietet sich daher an, die reduzierte Liste der Entsorgungsprozesse neu zu ordnen und nach

den potentiellen Erlösen bzw. Kosten zu sortieren. Durch die geeignete Wahl der Suchreihenfolge wird die Zuweisung dadurch nach der Identifizierung des ersten, zulässigen Prozesses abgebrochen (vgl. Bild 26).

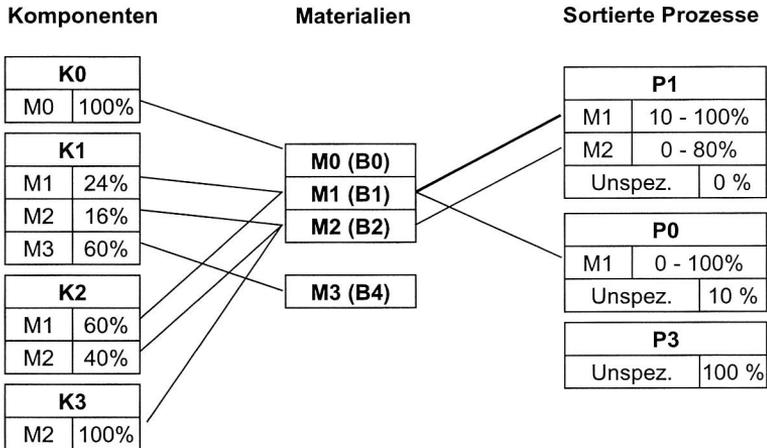


Bild 25: Reduzierte Material- und Prozessdatenstruktur

### 4.1.3 Modifizierung des Datenmodells für Entsorgungsprozesse

Bei der Analyse von Teilprodukten im AND/OR-Graphen müssen die verfügbaren Entsorgungsprozesse auf ihre Gültigkeit für die untersuchten Fraktionen hin überprüft werden. Um dabei eine höhere Effizienz zu erreichen, wird das Datenmodell der Entsorgungsprozesse bei der Transformation um Kriterien erweitert, über die ein schneller Eignungstest möglich ist.

Die für die Gültigkeit von Entsorgungsprozessen relevanten Eigenschaften werden durch minimal geforderte und maximal zulässige Anteile von spezifizierten Materialien sowie dem Anteil zulässiger Verschmutzung (unspezifizierte Materialien) festgelegt (vgl. Abschnitt 3.2.1). Bei Vorgabe eines Minimalanteils  $s_{min} > 0$  muss das betreffende Material in der zu prüfenden Fraktion enthalten sein. Wird dagegen für ein Material ein Maximalanteil  $s_{max} = 0$  gefordert, so ist dieses Material durch den Prozess ausgeschlossen. Als Verschmutzung ist nach [80] jedes Material zulässig, das nicht als Gefahrstoff klassifiziert ist.

Des weiteren können Materialien auch implizit ein- oder ausgeschlossen werden. Ergibt die Summe aller geforderten Minimalanteile 100%, so können in diesem Prozess nur Fraktionen mit Materialgemischen entsorgt werden, die exakt den geforderten minimalen Materialanteilen entsprechen. Alle weiteren, nicht spezifizierten Materialien sind für den Prozess unzulässig. Ist dagegen der zulässige Maximalanteil eines Materials abzüglich der Summe der weiteren Maximalanteile größer als Null,

so muss mindestens der Differenzbetrag dieses Materials in der Fraktion enthalten sein, um sie dem betrachteten Prozess zuzuführen. Bild 26 zeigt schematisch die Anwendung der beschriebenen Abbruchkriterien an einem Beispiel.

**Materialgemisch:**

Materialien, Anteile in %		
a	b	c
40	50	0

**Prozesse:**

	Prozeß Nr.	Wert €/kg	Materialien, Zulässigkeit in %			Abbruchkriterium
			a	b	c	
Prüfrichtung ↓	0	10,00	95 – 100	0 – 0	0 – 0	$b \in \text{Verbot}(P0)$ $c \in \text{Muss}(P1)$ $s_a < \text{Min}(P2, a)$
	1	3,00	0 – 10	10 – 100	10 – 50	
	2	1,70	40 – 60	40 – 60	0 – 1	
	3	0,30	0 – 100	0 – 100	0 – 10	} Überprüfung nicht mehr notwendig
	4	-0,30	0 – 50	0 – 100	0 – 50	
	5	-0,40	0 – 100	0 – 100	0 – 100	

Sortierung der Prozesse absteigend nach Wert

Bester für das Materialgemisch zulässiger Prozess

Bild 26: Zuweisung von Fraktionen zu gültigen Prozessen

Das transformierte Datenmodell für einen Entsorgungsprozess  $p$  beinhaltet demnach:

- Spez(p):** Menge aller für den Prozess  $p$  spezifizierten Materialien
- Verbot(p):** Menge aller für den Prozess  $p$  ausgeschlossenen Materialien, v.a. auch nicht spezifizierter Gefahrstoffe, Materialien mit  $\text{Max}(p, m)=0$  und alle nicht spezifizierten Materialien falls  $\Sigma \text{Min}(p, m)=100\%$
- Muss(p):** Menge aller unbedingt erforderlichen Materialien, d.h.  $\text{Min}(p, m)>0$
- Min(p, m):** Erforderlicher minimaler Anteil des Materials  $m$  im Prozess  $p$
- Max(p, m):** Zulässiger maximaler Anteil des Materials  $m$  im Prozess  $p$
- Unspez(p):** Zulässiger maximaler Anteil nicht spezifizierter Materialien (Verschmutzungen) im Prozess  $p$
- wert(p):** Nutzen für den Prozess  $p$  bezogen auf die Gewichtseinheit

#### 4.1.4 Ergänzung der Datenmodelle zur Abbildung der Produktstruktur

Wie beim Prozessmodell können bei den Datenmodellen von Verbindungen und Komponenten Potentiale zur Effizienzsteigerung der Demontageanalyse durch deren Ergänzung um spezifische Kennwerte und Relationen erschlossen werden. So ist beispielsweise bisher aufgrund der Vorrangrelationen nur ein Abarbeiten des AND/OR-Graphen „top-down“ möglich. Für die Analyse wichtige Kennwerte der Komponenten können bereits im Voraus berechnet und zu deren Datenmodell hinzugefügt werden.

##### **Ergänzung der Bauteildaten**

Die einzelnen Bauteile stellen die äußersten Blätter des AND/OR-Graphen und damit Teilprodukte dar, deren Nutzen vorab bestimmt werden kann. Ebenso ist für einzelne Komponenten zu ermitteln, welche Prozesse potentiell für deren Entsorgung zulässig sind. Mit der Menge potentieller Prozesse für einzelne Komponenten lässt sich der Rechenaufwand bei der Bewertung eines Teilproduktes, das aus mehreren Komponenten besteht, erheblich reduzieren, weil für die Entsorgung des Teilproduktes nur noch die Schnittmenge der potentiellen Prozesse der zum Teilprodukt gehörenden Komponenten zulässig sein kann. Das transformierte Datenmodell für Komponenten enthält folgende Informationen:

- $M(k)$ : Masse der Komponente  $k$
- $Spez(k)$ : Menge der in der Komponente  $k$  enthaltenen Basismaterialien
- $S(k,m)$ : Anteil des in der Komponente  $k$  enthaltenen Basismaterials  $m$
- $W_{PRec}(k)$ : Nutzen der Komponente  $k$  bei Wieder-/Weiterverwendung
- $Wert(k)$ : Nutzen der Komponente  $k$  als bester Wert aus den Entsorgungserlösen/-kosten der losgelösten Komponente und dem Wieder- / Weiterverwendungswert  $W_{PRec}(k)$
- $P_{pot}(k)$ : Menge der potenziell für die Entsorgung der Komponente  $k$  zulässigen Prozesse, d.h. kein Material  $m$  der Komponente gehört zu den verbotenen Stoffen  $Verbot(P_{pot}(k))$  der potenziellen Prozesse
- $V(k)$ : Menge der Verbindungen, durch welche die Komponente  $k$  mit dem restlichen Produkt verbunden ist

##### **Modifikation der Verbindungsdaten**

Die als binäre Elemente definierten Verbindungen legen über ihren aktuellen Zustand (offen/geschlossen) und durch die Definition von Vorrangsbeziehungen sowohl die Zusammensetzung der Bauteilfraktionen als auch deren Demontagerihenfolge fest. Zudem wird der Umfang des AND/OR-Graphen durch die Verbindungen sowie Vorrangrelationen bestimmt und steigt im Grenzfall exponentiell mit der Anzahl der Verbindungen. Diese Strukturbausteine des Produktmodells sind daher für die Effizienz der Demontageanalyse elementar.

Aufgrund des binären Charakters von Verbindungen, lässt sich eine Menge von Verbindungen günstig als binäre Matrix der Form  $1 \times n$  ( $n$ : Anzahl der Verbindungen im Produkt) darstellen, wobei jede Position in der Matrix eindeutig einer Verbindung zugeordnet ist:

$$V = [v_0 \cdots v_i \cdots v_n]; v_i \in [0, 1] \quad (11)$$

Die Belegung der einzelnen Matrixelemente mit 0 oder 1 kann entweder die Zugehörigkeit einer Verbindung zu einer Menge oder den Zustand der Verbindung charakterisieren.

Um eine schnelle Abarbeitung des AND/OR-Graphen zu erreichen, werden zunächst die Verbindungsdaten auf die wesentlichen Kennwerte reduziert. Die Relation gleichrangiger Verbindungen *Gleich*( $v$ ) (vgl. Abschnitt 3.2.2) ist die Umkehrrelation von Vorrangsbeziehungen *Vor*( $v$ ). Sowohl  $v_1 \in \text{Gleich}(v_2)$  als auch  $v_2 \in \text{Vor}(v_1)$  verhindern beispielsweise, dass die Verbindung  $v_1$  vor der Verbindung  $v_2$  gelöst wird. Zur leichteren Handhabung und zur Reduktion der Datenstrukturen ist es daher sinnvoll, gleichrangige Verbindungen in Vorrangrelationen umzuwandeln und somit eine Datenredundanz zu vermeiden. Es gilt:

$$v_i \in \text{Gleich}(v_j) \rightarrow v_j \in \text{Vor}(v_i) \quad (12)$$

*Gleich*( $v$ ): Menge aller gleichwertigen Verbindungen der Verbindung  $v$

*Vor*( $v$ ): Vorrangrelationen der Verbindung  $v$

In Abgrenzung zu gleichrangigen Verbindungen sind die sog. *Nachfolgerrelationen* zu sehen. Als Nachfolger einer Verbindung  $v$  werden alle Verbindungen bezeichnet, die erst nach dem Öffnen von  $v$  gelöst werden können. Damit wird eine Analyse der Produktstruktur auch „bottom-up“ ermöglicht und die Abschätzung der Auswirkungen durch die Fixierung einer Verbindung erleichtert. Nachfolgerrelationen werden definiert durch:

$$\text{Nach}(v) = \{v_j \mid v \in \text{Vor}(v_j)\} \quad (13)$$

*Nach*( $v$ ): Menge aller Nachfolger der Verbindung  $v$

*Vor*( $v$ ): Vorrangrelationen der Verbindung  $v$

Eine weitere nützliche Relation stellen die sog. *Nachbar-Verbindungen* dar, über die sehr effizient Teilprodukte erzeugt werden können. Nachbarverbindungen sind Verbindungen, die mindestens eine gemeinsame Komponente verknüpfen (Bild 27).

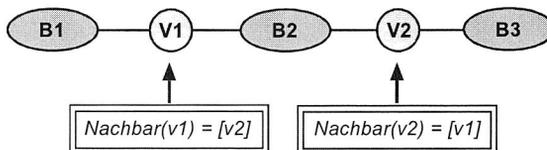


Bild 27: Definition von Nachbarrelationen

Bei der Erstellung des Produktmodells werden in der Regel nur die Vorrangrelationen in der Umgebung angegeben, die ihrerseits wiederum Vorrangbeziehungen haben können. Ebenso werden aufgrund der tatsächlichen Produktstruktur teilweise die unmittelbaren und die indirekten Vorgänger einer Verbindung definiert. Zur Generierung und Analyse von Teilprodukten sowie bei der Berechnung von Schätzwerten über weitere Demontagealternativen ist die getrennte Erfassung sowohl der direkten als auch der Gesamtheit der Vorrangrelationen zu einer Verbindung notwendig. Für eine Verbindung  $v$  werden daher die Menge der *expandierten Vorrangrelationen* und die Menge der *direkten Vorrangrelationen* bestimmt (Bild 28).

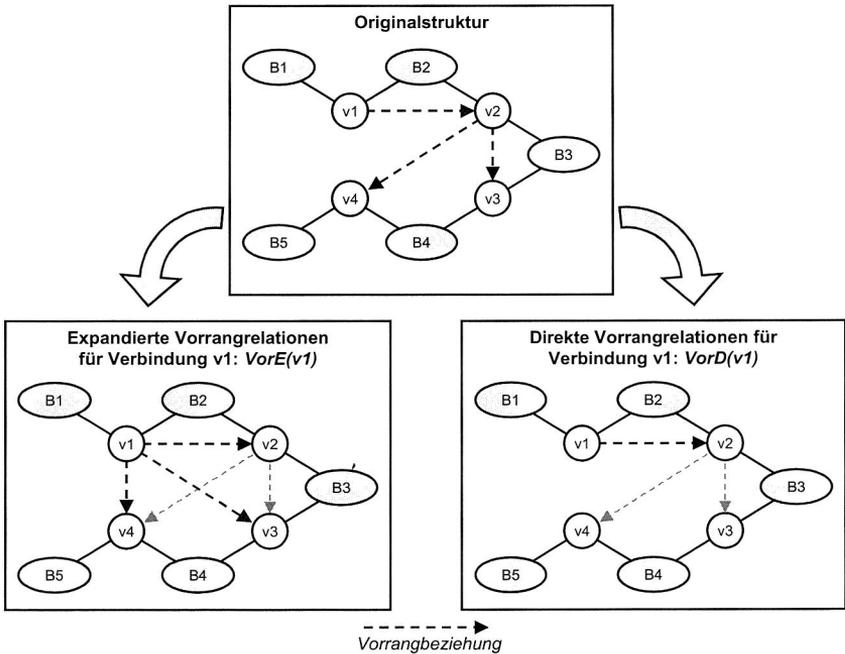


Bild 28: Ableiten der expandierten und direkten Vorrangbeziehungen

Die Menge der *expandierten Vorrangsrelationen* einer Verbindung  $v$  umfasst alle Verbindungen im Produkt, die gelöst werden müssen, um  $v$  zu öffnen. Demgegenüber werden als *direkte Vorrangbeziehungen* nur die unmittelbaren Vorränge berücksichtigt. Analog lassen sich umgekehrt die expandierten und direkten Nachfolger  $NachE(v)$  und  $NachD(v)$  einer Verbindung  $v$  ableiten. Auch die Menge der von einer Verbindung verknüpften Komponenten  $K(v)$  lässt sich um die Menge der Komponenten zu allen und zu den direkten Nachfolgern  $KE(v)$  und  $KD(v)$  einer Verbindung ergänzen.

Zur weiteren Datenreduktion ist es sinnvoll, auch den virtuellen, binären Verbindungen Entsorgungsprozesse zuzuweisen. Diese Zuweisung bezieht sich dann auf die von einer Verbindung verknüpften Komponenten eines Produktes. Nachdem in einem Produktmodell in der Regel weniger Verbindungen als Bauteile vorkommen, erfolgt dadurch eine Datenverdichtung für weitere Berechnungen.

Das transformierte Datenmodell für Verbindungen umfasst:

$K(v)$ :	Menge der von $v$ verknüpften Komponenten
$KE(v)$ :	Menge der von $v$ und allen ihren Nachfolgern verknüpften Komponenten
$KD(v)$ :	Menge der von $v$ und ihren direkten Nachfolgern verknüpften Komponenten
$VorE(v)$ :	Menge der expandierten Vorrangrelationen zur Verbindung $v$
$VorD(v)$ :	Menge der direkten Vorrangrelationen zur Verbindung $v$
$NachE(v)$ :	Menge der expandierten Nachfolger zur Verbindung $v$
$NachD(v)$ :	Menge der direkten Nachfolger zur Verbindung $v$
$P(v)$ :	Menge der Prozesse, in denen die von $v$ verknüpften Komponenten behandelt werden können; auch darzustellen als $P(K(v))$
$Dk(v)$ :	Demontagekosten der Verbindung $v$ , vorab aus Demontagezeit und Demontage-Stundensatz berechnet

## 4.2 Rekursives Erstellen des AND/OR-Graphen

In den bisherigen Arbeiten wurde stets die Gesamtheit aller Demontagealternativen [190] oder ein Teil davon [80] berechnet. In der industriellen Praxis sind unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten ausschließlich die Ergebnisse für drei Demontagezustände interessant [90], [181]:

- Der Deckungsbeitrag der Entsorgung des kompletten Produktes ohne Demontageverrichtungen, falls ein Prozess existiert, durch den das komplette Produkt behandelt werden kann;
- Die wirtschaftlich optimale Demontagetiefe;
- Der Deckungsbeitrag für die Entsorgung nach der kompletten Zerlegung des Produktes;

Aus den Zwischenergebnissen zu diesen Demontagezustände können in der Regel keine weiteren, nutzbaren Erkenntnisse gewonnen werden. Die Demontageanalyse eines Produktes wird deshalb auf die genannten drei Demontagezustände beschränkt. Dadurch wird ein vollständig rekursives Abarbeiten des AND/OR-Graphen mit integrierter Teilproduktanalyse möglich, nach deren Auswertung nur die optimale Demontagetiefe vorliegt.

Die damit verbundene Reduktion von Berechnungsschritten hat weitreichende Auswirkungen auf Rechenzeit und Speicherbelegung. Die Werte eines Produktes in den

Grenzfällen „Komplette Entsorgung“ und „Komplette Zerlegung“ lassen sich auf einfache Weise vorab berechnen. Für die Entsorgung eines Produktes ohne Demontageverrichtungen ergibt sich der Gesamtwert aus:

$$\text{Wert}_{\text{oDem}}(\text{Produkt}) = M(\text{Produkt}) \cdot \text{wert}(p_{\text{Opt}})$$

$p_{\text{Opt}}$ : wirtschaftlich optimaler Prozess aus allen Prozesse für die gilt:

( 14 )

$$\text{Spez}(\text{Produkt}) \cap \text{Verbot}(p) = \emptyset$$

$$\forall m_i: \text{Min}(p, m_i) \leq S(\text{Produkt}, m_i) \leq \text{Max}(p, m_i)$$

$\text{Wert}_{\text{oDem}}(\text{Produkt})$ :	Deckungsbeitrag eines Produktes bei Entsorgung ohne Demontage
$M(\text{Produkt})$ :	Gesamtmasse des Produktes
$\text{wert}(p_{\text{Opt}})$ :	Massebezogener Nutzen des wirtschaftlich optimalen Prozesses zur Entsorgung ohne Demontage
$\text{Spez}(\text{Produkt})$ :	Menge der im Produkt spezifizierten Materialien
$\text{Verbot}(p)$ :	Menge aller für den Prozess $p$ verbotenen Stoffe (vgl. 4.1.3)
$\text{Min}(p, m_i)$ :	Mindestanteil des Materials $m_i$ für den Prozess $p$
$\text{Max}(p, m_i)$ :	Maximalanteil des Materials $m_i$ für den Prozess $p$
$S(\text{Produkt}, m_i)$ :	Anteil des Materials $m_i$ im Produkt

Zur Ermittlung des Deckungsbeitrags bei kompletter Zerlegung eines Produktes dient:

$$\text{Wert}_{\text{KomplZerl}}(\text{Produkt}) = \sum_i \text{Wert}(k_i) - \sum_j \text{Dk}(v_j) \quad ( 15 )$$

$\text{Wert}_{\text{KomplZerl}}(\text{Produkt})$ :	Deckungsbeitrag eines Produktes bei kompletter Zerlegung
$\text{Wert}(k_i)$ :	Nutzen der einzelnen Komponente $k_i$
$\text{Dk}(v_j)$ :	Demontagekosten der Verbindung $v_j$

#### 4.2.1 Generierung des AND/OR-Graphen

Die Demontage eines Produkts besteht aus dem Lösen von Verbindungen und dem Zuordnen von Entsorgungsprozessen zu den entstehenden Fraktionen. Die Menge der jeweils im Produkt gelösten Verbindungen beschreibt als Demontagekombination den aktuellen Demontagezustand. Die zugehörigen Deckungsbeiträge bestehen aus dem Nutzen der entsorgten Fraktionen (Materialwert, ggf. Wiederverwendungswert) und den Kosten für das Lösen der Verbindungen (Demontagekosten).

Dieser prinzipielle Ablauf der Demontage ist in einem vollständig rekursiv erzeugten AND/OR-Graphen abgebildet. Ausgehend vom Gesamtprodukt wird jeweils nur eine Verbindung auf einmal gelöst (Demontageschritt), so dass das Gesamtprodukt in Teilprodukte zerfällt, die auf dieselbe Art wie das Ausgangsprodukt analysiert werden. Zu jedem Demontageschritt lässt sich ebenfalls der Deckungsbeitrag berechnen, der aus den Kosten für das Lösen der zum Schritt gehörenden Verbindung und den Deckungsbeiträgen der entstandenen Teilprodukte besteht.

Sind bei einem Teilprodukt mehrere Demontageschritte auszuführen, so wird am Ende der Teilproduktanalyse derjenige mit dem günstigsten Deckungsbeitrag gewählt und dem Teilprodukt als Ergebnis zugewiesen. Aus den Demontagekombinationen der abgeleiteten Teilprodukte und der durch den Demontageschritt gelösten Verbindung wird die Demontagekombination des aktuellen Teilprodukts als Menge der geöffneten Verbindungen erstellt.

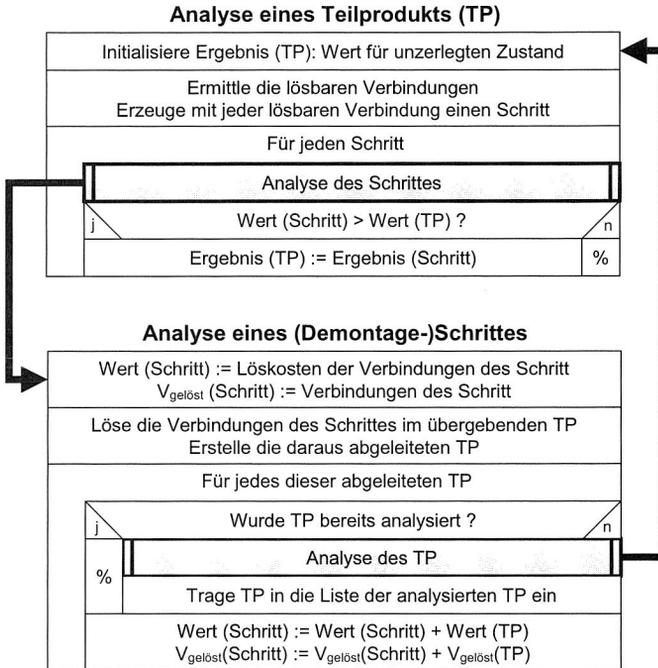


Bild 29: Rekursiver Aufbau des AND/OR-Graphen mit integrierter Analyse

Der Algorithmus zum rekursiven Aufbau des AND/OR-Graphen mit integrierter Analyse der resultierenden Teilprodukte besteht aus zwei Teilen, die sich gegenseitig aufrufen (Bild 29). Zur Analyse eines Teilproduktes wird zunächst der Wert des Teilproduktes im unzerlegten Zustand durch Zuweisung zum zulässigen, wirtschaftlich optimalen Entsorgungsprozess initialisiert. Anschließend wird die Menge der lösba- ren Verbindungen ermittelt. Diese ergeben sich aus:

$$V_{\text{lösbar}}(TP) = \{v_i \in V(TP) \mid \text{VorE}(v_i) \cap V(TP) = \emptyset\} \quad (16)$$

$V_{\text{lösbar}}(TP)$ : Menge aller lösba- ren Verbindungen im Teilprodukt TP

$V(TP)$ : Menge aller Verbindungen im Teilprodukt TP

$\text{VorE}(v_i)$ : Menge aller expandierten Vorrangsrelationen der Verbindung  $v_i$

Aus jeder lösbaren Verbindung wird ein (Demontage-)Schritt erzeugt, der dann im zweiten Teil des Algorithmus analysiert wird (Bild 29 unten). Der Deckungsbeitrag des Schrittes wird mit den Kosten zur Erzeugung des Schrittes durch das Öffnen der betrachteten Verbindung initialisiert. Ebenso wird die Verbindung in die binäre Matrix des Demontagezustandes als geöffnet eingetragen.

Anschließend erfolgt die eigentliche Generierung der aus dem Öffnen der betrachteten Verbindung abgeleiteten weiteren Teilprodukte. Knoten im AND/OR-Graph, die mehrere Komponenten enthalten, werden rekursiv über die Nachbarrelationen der zum Schritt gehörenden Verbindung ermittelt. Aus den Nachbarrelationen und deren Nachbarn wird das Verbindungsgerüst eines Teilproduktes festgelegt. Über die Menge der mit den Verbindungen verknüpften Bauteile  $K(V(TP))$  wird das Teilprodukt um die zugehörigen Komponenten  $K(TP)$  ergänzt.

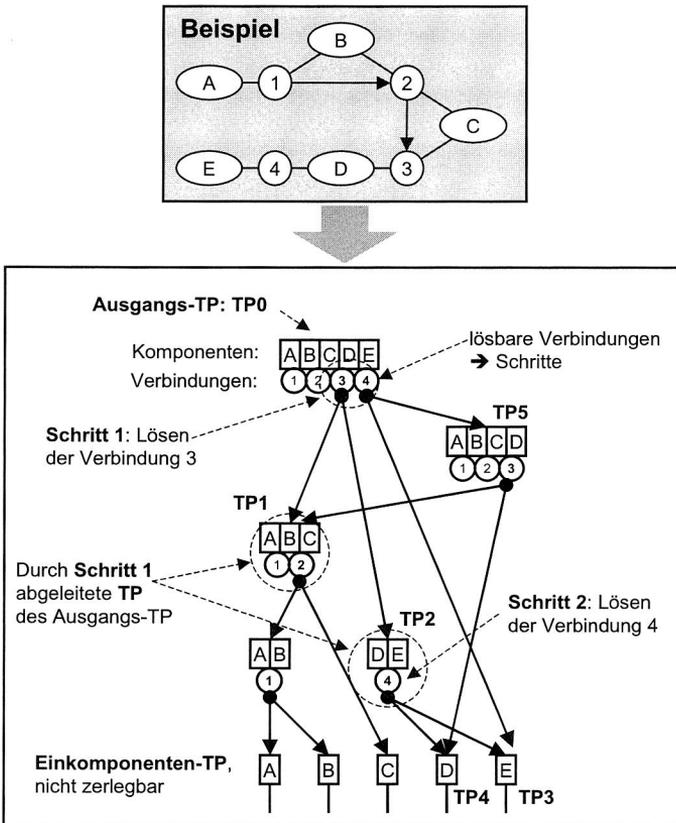
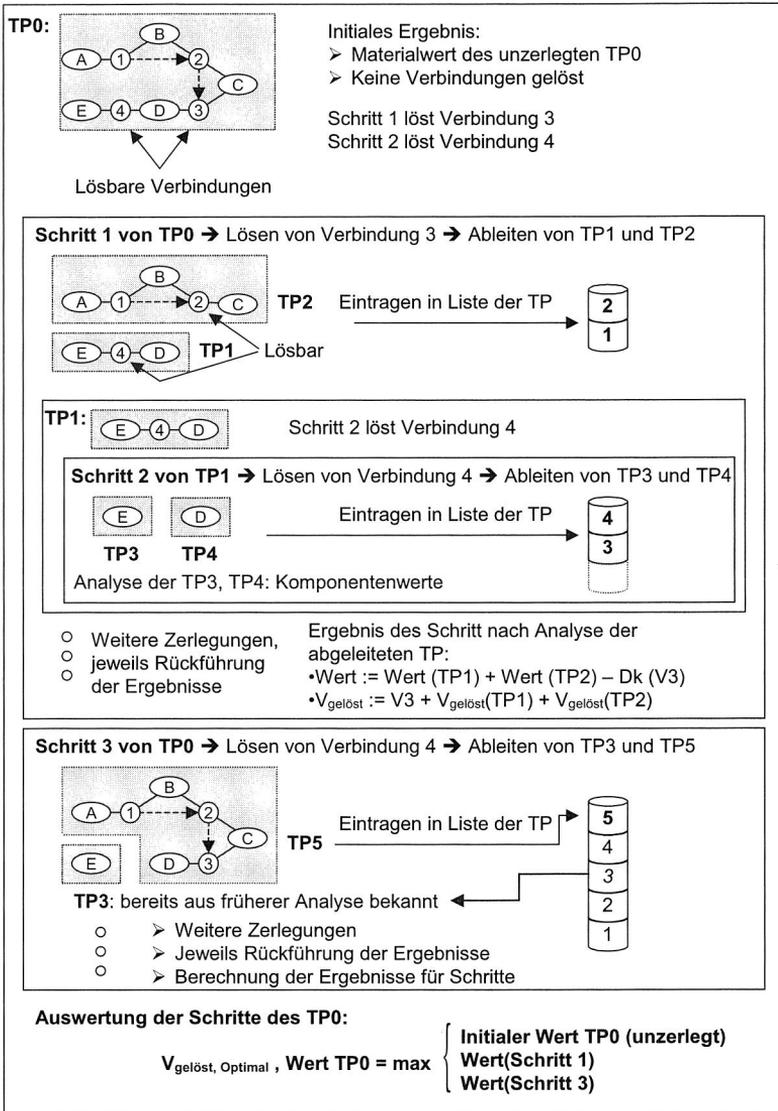


Bild 30: Schritte und Teilprodukte im AND/OR-Graph



-----> Vorrangrelation      TP: Teilprodukt

Bild 31: Beispiel für den Aufbau eines AND/OR-Graphen und den Ablauf der Analyse

Ein wesentliches Merkmal des AND/OR-Graphen ist die singuläre Existenz seiner Knoten. Nach dem Erzeugen der abgeleiteten Teilprodukte werden diese hinsichtlich einer bereits erfolgten Analyse überprüft und das bereits vorliegende Analyseergebnis übernommen. Andernfalls wird in der Rekursionsschleife wiederum die Analyse

der abgeleiteten Teilprodukte angestoßen. Bild 30 und Bild 31 zeigen den Aufbau des AND/OR-Graphen und den Ablauf der Analyse an einem Beispiel.

Das Datenmodell eines Teilproduktes enthält demnach die Menge der in ihm enthaltenen Verbindungen  $V(TP)$  und Bauteile  $K(TP)$ , den Deckungsbeitrag für die optimale Demontage der aus ihm ableitbaren, weiteren Teilprodukte  $Wert(TP)$  sowie den dazugehörigen Demontagezustand  $V_{gelöst}(TP)$ , beschrieben durch seine geöffneten und geschlossenen Verbindungen. Aufgrund der Rekursion entspricht der Wert des Wurzelknotens dem bei einer optimalen Demontage des Produktes erreichbaren Deckungsbeitrag.

#### 4.2.2 Reduktion der Teilprodukte durch Berücksichtigung von Demontagebaugruppen

Eine Demontagebaugruppe entspricht einem Teil-Graph im AND/OR-Graphen, zu dessen Knoten keine Kanten von Knoten des restlichen Graphen führen (Bild 32). Der Wurzelknoten einer Demontagebaugruppe entspricht dann gem. Definition nach [80] einem eigenständig zu analysierenden Teilprodukt, dessen optimale Demontagetiefe direkt in das Gesamtergebnis der Analyse einfließt, falls der entsprechende Demontageschritt Teil der optimalen Gesamtlösung ist.

Ein durch einen Schritt erzeugtes Teilprodukt  $TP$  ist genau dann eine Demontagebaugruppe, wenn die durch den Schritt geöffnete Verbindung Element der Schnittmenge der expandierten Vorrangsrelationen aller Verbindungen innerhalb von  $TP$  ist. Die Bedingung lautet also:

$$\forall v_i, v_j \in V(TP) : \text{Schritt} \in \text{VorE}(v_i) \cap \text{VorE}(v_j) \quad (17)$$

$V(TP)$ : Menge aller Verbindungen im Teilprodukt  $TP$

Schritt: Verbindung, durch deren Lösen das Teilprodukt  $TP$  generiert wird

$\text{VorE}(v_i)$ : Menge aller expandierten Vorrangsrelationen der Verbindung  $v_i$

Durch das rekursive Abarbeiten des AND/OR-Graphen und die integrierte Analyse werden Teil-Graphen stets komplett bis zur Einzelkomponente als unterstes Blatt aufgebaut und analysiert. Dadurch wird auch eine Demontagebaugruppe stets komplett analysiert, bevor der restliche AND/OR-Graph generiert wird. Es erfolgt also bereits durch den rekursiven Algorithmus der für Demontagebaugruppen vorgesehene, eigenständige Berechnungsablauf.

Vorteile der Bestimmung von Demontagebaugruppen liegen jedoch in der Reduzierung der zu speichernden Teilprodukte. Nachdem kein Kante aus dem restlichen AND/OR-Graphen auf ein Teilprodukt innerhalb der Demontagebaugruppe zeigt, brauchen diese Knoten auch nicht für spätere Vergleiche zur Verfügung stehen. Damit sind bei der informationstechnischen Implementierung große Potentiale zur Reduzierung der Rechenzeit aufgrund der geringeren Anzahl durchzuführender Teilprodukt-Vergleiche und eine Reduzierung des Speicherbedarfs verbunden.

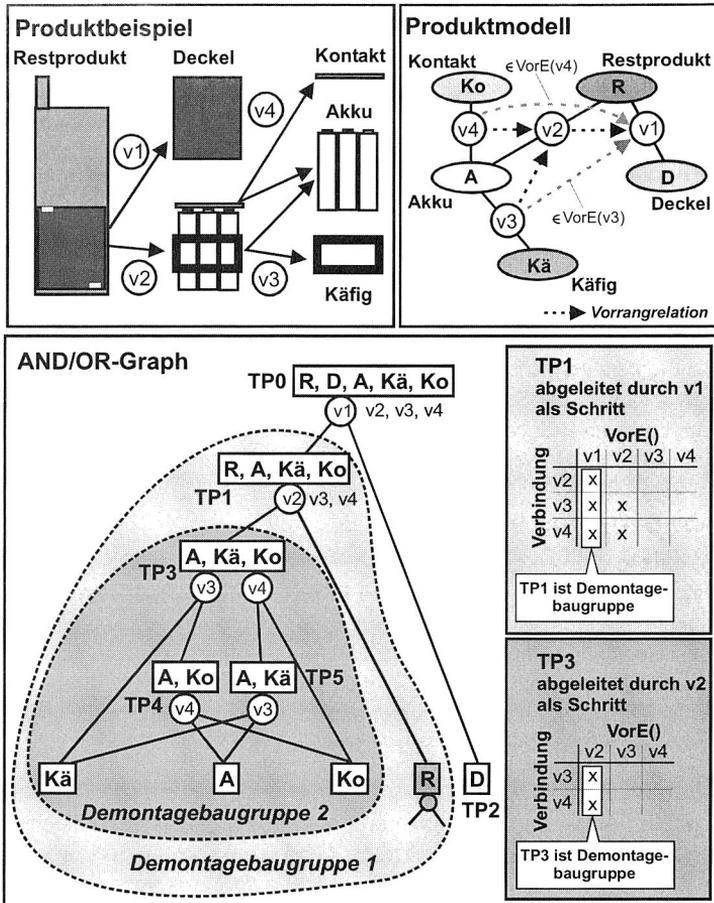


Bild 32: Ausprägung von Demontagebaugruppen im AND/OR-Graph

### 4.2.3 Rückkonvertierung des Ergebnisses

Die Demontageanalyse erfolgte mit der modifizierten Produktstruktur (vgl. Abschnitt 4.1), die sich von der originalen hinsichtlich der Mengen von Verbindungen und Komponenten unterscheidet. Das Ergebnis muss im Anschluss an die Analyse in das originale Produktmodell zurückkonvertiert werden. Einerseits ist dies durch Projektion des Verbindungszustands bei optimaler Demontage möglich, der nach Abschluss der Analyse im Wurzelknoten des AND/OR-Graphen enthalten ist. Aus der Information, welche Verbindungen bei optimaler Demontage geöffnet oder geschlossen sind, lassen sich dann im Produktmodell die jeweiligen Fraktionen und deren Werte bestimmen.

Andererseits können die entsprechenden Teilprodukte des AND/OR-Graphen, die zur optimalen Lösung gehören, zusammen mit den ihnen zugewiesenen Entscheidungswerten und dem zu ihrer Erzeugung gehörenden Verbindungszuständen übertragen werden.

### 4.3 Reduktion des AND/OR-Graphen durch Maximalwertabschätzung

Ziel einer wirtschaftlichen Demontage ist das Erzeugen von prozesskompatiblen Fraktionen, die unter Berücksichtigung der Demontagekosten den höchsten Deckungsbeitrag liefern [174]. Wie am Beispiel in Abschnitt 3.2.6 aufgezeigt wurde, kann es in vielen Fällen sinnvoll sein, einen Verbund aus Bauteilen unabhängig von den Demontagekosten nicht zu zerlegen, weil die Bauteile im Verbund einen höheren Nutzen aufweisen als die Summe der Einzelnutzen. Diese Eigenschaft kann genutzt werden, um in einem Branch-and-Bound-Verfahren Schranken zu definieren, die den Lösungsraum für die optimale Demontagetiefe erheblich einschränken [91], [218].

#### 4.3.1 Ermittlung potentieller Prozesse

Dem nachfolgend aufgezeigten Ansatz zur Reduzierung des AND/OR-Graphen liegt die Überlegung zu Grunde, durch welchen Prozess eine Komponente oder ein Teilprodukt bestenfalls entsorgt werden könnte, wenn durch das Hinzunehmen von Materialien aus dem restlichen Produkt die Eingangsrestriktionen bezüglich zulässiger Materialanteile für *potentielle Prozesse* erfüllt werden (Bild 33). In Abgrenzung dazu stehen *exakte Prozesse* für eine Materialfraktion, die als tatsächlich gültige Prozesse für das untersuchte Materialgemisch definiert sind.

Falls ein Prozess  $p$  nicht für die Entsorgung eines Materialgemisches zulässig ist, so ist allgemein der Anteil eines oder mehrerer Materialien entweder zu niedrig oder zu hoch. Für einen Prozess vorgeschriebene Materialien, die in den ursprünglichen Komponenten nicht enthalten sind, können evtl. ebenfalls aus den zusätzlich vorhandenen Bauteilen ergänzt werden, wenn diese entsprechend hohe Anteile aufweisen. Lediglich bei unzulässigen Materialien in der ursprünglichen Fraktion kann der zu hohe Anteil durch Zumischung nur näherungsweise auf Null reduziert werden. Damit wird ein Prozess grundsätzlich als potentieller Prozess ausgeschlossen, wenn eines der in der ursprünglichen Fraktion vorhandenen Materialien als „verbotener Stoff“ in der Menge  $Verbot(p, m)$  eingetragen ist.

Ist für den Prozess  $p$  ein Mindestanteil eines bestimmten Materials gefordert, der im ursprünglichen Materialgemisch nicht vorhanden ist, so muss anhand der Materialanteile im Restprodukt festgestellt werden, ob dieser Minderanteil zu decken ist. Dabei ist zu berücksichtigen, dass das Erhöhen eines Materialanteils die Verringerung der Anteile der übrigen Materialien bedeutet, d.h. der Anteil eines anderen Materials kann eventuell unter eine Untergrenze fallen. Umgekehrt lässt sicher der zu hohe Anteil eines Materials ausgleichen, indem bei beliebigen anderen Materialien die Anteile aus dem Zusatzgemisch erhöht werden. Auch hier ist das Einhalten der Ein-

gangsbedingungen bei den übrigen Materialien zu berücksichtigen. Es ist zweckmäßig, zunächst zu niedrige Materialanteile durch entsprechende Zusätze anzuheben und in einem zweiten Schritt zu überprüfen, ob sich zu hohe Materialanteile durch Zusätze bei den anderen Materialien ausgleichen lassen.

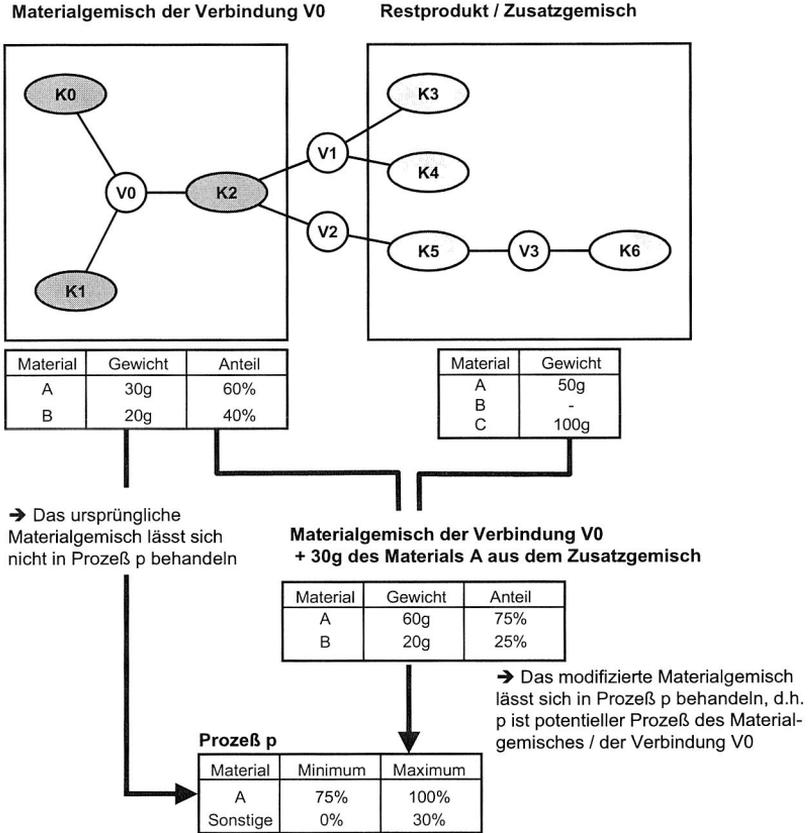


Bild 33: Ermittlung potentieller Entsorgungsprozesse

### Ausgleich zu niedriger Materialanteile

Die Menge aller Materialien im ursprünglichen Materialgemisch, deren Anteile durch Zusätze über die Mindestanforderung des Prozesses heben sind, lässt sich ermitteln aus:

$$I_L = \{m_i \mid s(m_i) < \text{Min}(p, m_i)\} \quad (18)$$

$I_L$ : Menge aller Materialien mit zu niedrigem Anteil im ursprünglichen Gemisch  
 $s(m_i)$ : Ursprünglicher Anteil des Materials  $m_i$   
 $\text{Min}(p, m_i)$ : Minimal geforderter Anteil des Materials  $m_i$  im Prozess  $p$

Es wird gefordert, dass der notwendige Minimalanteil nach der Ergänzung um einen Zusatzanteil und der anschließenden Neunormierung erreicht wird:

$$\forall m_j \in I_L : \frac{s(m_j) + c(m_j)}{1 + \sum_i c(m_i)} = \text{Min}(p, m_j) \quad (19)$$

$c(m_j)$ : Korrekturanteil des Materials  $m_j$   
 $c(m_i)$ : Korrekturanteil der weiteren Materialien  $m_i$  mit zu geringem Anteil

Der Normierungsfaktor, der die um die Korrekturanteile erhöhte Masse des ursprünglichen Materialgemisches berücksichtigt, ergibt sich aus:

$$N = \sum_i (s(m_i) + c(m_i)) = \sum_i s(m_i) + \sum_i c(m_i) = 1 + \sum_i c(m_i) \quad (20)$$

$N$ : Normierungsfaktor nach Anwendung der Korrekturen  
 $s(m_i)$ : Ursprünglicher Anteil des Materials  $m_i$   
 $c(m_i)$ : Korrekturanteil weiteren Materialien  $m_i$  mit zu geringem Anteil

Es folgt daraus:

$$\forall m_j \in I_L : s(m_j) = \text{min}(p, m_j) \cdot \left(1 + \sum_i c(m_i)\right) - c(m_j) \quad (21)$$

$$\sum_j s(m_j) = \left(1 + \sum_i c(m_i)\right) \cdot \sum_j \text{min}(p, m_j) - \sum_j c(m_j)$$

Nachdem nur die zu niedrigen Materialanteile korrigiert werden, gilt:

$$\forall m_i \notin I_L : c(m_i) = 0 \Rightarrow \sum_i c(m_i) = \sum_j c(m_j)$$

$$\Rightarrow \sum_j s(m_j) = \left(1 + \sum_i c(m_i)\right) \cdot \sum_j \text{min}(p, m_j) - \sum_j c(m_j) \quad (22)$$

$$\Rightarrow \sum_j c(m_j) = \frac{\sum_j s(m_j) - \sum_j \text{min}(p, m_j)}{\sum_j \text{min}(p, m_j) - 1}$$

Damit lassen sich die einzelnen Korrekturen direkt berechnen:

$$c(m_j) = \sum_j \min(p, m_j) \cdot \frac{1 - \sum_j s(m_j)}{1 - \sum_i \min(p, m_i)} \quad (23)$$

Die korrigierten Anteile ergeben sich aus:

$$s^*(m_j) = \frac{s(m_j) + c(m_j)}{N} \quad \text{mit } N = \frac{1 - \sum_j s(m_j)}{1 - \sum_i \min(p, m_i)} \quad (24)$$

$S^*(m_j)$ : Korrigierter Anteil des Materials  $m_j$

Diese Korrekturen sind dann erfüllbar, wenn gilt:

$$\forall m_i, m_j \in I_L:$$

$$s(m_j) \cdot \left(1 - \sum_i \min(p, m_i)\right) \leq \left(\frac{m_{\text{Orig}}}{m_{\text{Zusatz}}} \cdot s_{\text{Zusatz}}(m_j) + s(m_j)\right) \cdot \left(1 - \sum_i \min(p, m_i)\right) \quad (25)$$

$m_{\text{Orig}}$ : Masse des ursprünglichen Materialgemisches

$m_{\text{Zusatz}}$ : Masse des Zusatzgemisches

$s_{\text{Zusatz}}(m)$ : Anteil des Materials  $m_j$  im Zusatzgemisch

### Ausgleich zu hoher Materialanteile

Ebenso wie durch die Anhebung zu niedriger Materialanteile kann die Prozesskompatibilität durch die Verminderung zu hoher Anteile unter Hinzunehmen weiterer Anteile hergestellt werden. Die Menge aller Materialien im ursprünglichen Materialgemisch, deren Anteile zu hoch bezüglich gesetzter Maximalgrenzen in einem Entsorgungsprozess sind, genügen:

$$I_H = \{m_i \mid s(m_i) > \text{Max}(p, m_i)\} \quad (26)$$

$I_H$ : Menge aller Materialien mit zu hohem Anteil im ursprünglichen Gemisch

$s(m)$ : Ursprünglicher Anteil des Materials  $m$

$\text{Max}(p, m)$ : Maximal zulässiger Anteil des Materials  $m$  im Prozess  $p$

Durch Erhöhen der weiteren Materialanteile im ursprünglichen Gemisch kann der bisher zu hohe Anteil von Materialien nun ggf. soweit reduziert werden, dass er unter die entsprechende Maximalgrenze im Prozess fällt. Es ist deshalb zu fordern:

$$\forall m_j \in I_H: \frac{s(m_j) + c(m_j)}{1 + \sum_i c(m_i)} \leq \text{Max}(p, m_j) \quad (27)$$

$c(m)$ : Korrekturanteil des Materials  $m_j$

$c(m)$ : Korrekturanteil der weiteren Materialien  $m_i$  im ursprünglichen Gemisch

Ausschlaggebend für die Berechnung ist der Materialanteil mit dem größten Abstand von der Maximalgrenze. Durch eine Neunormierung der Anteile muss der Anteil dieses Materials auf das zulässige Maximum gesenkt werden. Daraus ergibt sich die Forderung:

$$N_H \geq \text{Max} \left\{ \frac{s(m_j)}{\text{Max}(p, m_j)} \right\} \quad (28)$$

$N_H$ : Normierungsfaktor für die Materialanteile nach der Korrektur

Maximalgrenzen von 0 % wurden bereits vorab durch die Menge  $\text{Verbot}(p, m)$  ausgeschlossen. Falls die Forderung nach Gleichung ( 28 ) nicht bereits durch die Erhöhung zu niedriger Materialanteile erfüllt wird, so sind weitere Korrekturen durchzuführen, wobei die geforderten Untergrenzen weiterhin nicht zu unterschreiten sind:

$$N_H \leq \text{Min} \left\{ \frac{\left( \frac{m_{\text{Orig}}}{m_{\text{Zusatz}}} \cdot s_{\text{Zusatz}}(m_j) + s(m_j) \right)}{\text{min}(p, m_j)} \right\} \quad (29)$$

$m_{\text{Orig}}$ : Masse des ursprünglichen Materialgemisches

$m_{\text{Zusatz}}$ : Masse des Zusatzgemisches

$s_{\text{Zusatz}}(m_j)$ : Anteil des Materials  $m_j$  im Zusatzgemisch

Potentielle Prozesse sind eine Obermenge der tatsächlich für Komponenten oder Verbindungen (d.h. der an eine Verbindung geknüpften Komponenten) zulässigen Entsorgungsprozesse. Sie lassen sich unter Berücksichtigung der sonst im Produkt existierenden Materialien vor der Erstellung des AND/OR-Graphen berechnen. Für Teilprodukte, die nur aus einer Komponenten bestehen, ist der optimale, tatsächlich zulässige Prozess bzw. der Wert bei Wieder-/Weiterverwendung bei der Berechnung anzusetzen. Bei Teilprodukten, die mindestens eine Verbindung enthalten, ergeben sich die potentiellen Prozesse als Schnittmenge der Prozesse, die den Verbindungen zugewiesen sind.

Die eigentliche Bestimmung der potentiellen Prozesse wird präzisiert, indem zuerst die tatsächlich zulässigen Prozesse für eine Verbindung bestimmt werden, und anschließend die potentiellen Prozesse für den Fall, dass jeweils eine der Nachbarverbindungen hinzugenommen wird. Die Nachbarverbindungen sind dabei die Nachbarn des Verbundes um die betrachtete Verbindung und deren Nachfolger. Dadurch wird das Restprodukt als potentielle Quelle für Materialergänzungen auf die real möglichen Anteile reduziert.

Ein weiterer Schritt nutzt die bereits erhaltenen Ergebnisse, um die potentiellen Prozesse, die ohne das Ergänzen mit zusätzlichen Materialanteilen aus dem Restprodukt nicht zulässig sind, weiter einzuschränken und damit zu präzisieren. Für jeden dieser Prozesse werden temporär alle Verbindungen gelöst, für die dieser Prozess

unzulässig ist. Es ergibt sich eine Zerlegung in mehrere Teilprodukte, von denen eines die zu überprüfende Verbindung enthält (Bild 34).

Die Anteile zur Ergänzung der Materialgemische werden nun nicht mehr dem kompletten übrigen Produkt entnommen, sondern nur noch diesem Teilprodukt. Falls der Prozess  $p$  im Beispiel von Bild 34 nicht für die um die Verbindung  $v1$  angeordneten Komponenten zulässig ist, so werden die Komponenten  $K3$  und  $K4$  aus der Menge der zumischbaren Anteile ausgeschlossen und somit die Berechnung präzisiert.

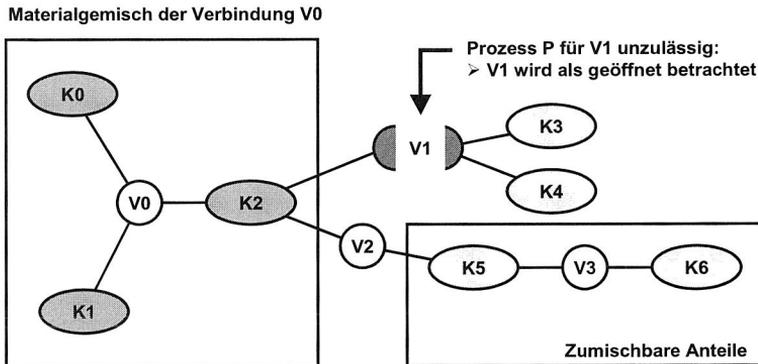


Bild 34: Präzisierung von potentiellen Prozessen für Verbindungen

### 4.3.2 Maximalwertabschätzung

Durch eine Maximalwertabschätzung soll festgestellt werden, ob die Analyse eines Teilproduktes unter Berücksichtigung der aktuellen Ergebnisse und der Stoffinhalte noch sinnvoll sein kann. Dazu wird über die ermittelten potentiellen Prozesse und daraus berechneten, spezifischen Schranken der Wert eines Teilproduktes abgeschätzt, der maximal zu erreichen ist. Durch die Wahl eines geeigneten Schätzwertes muss dabei sichergestellt werden, dass der Schätzfehler nur zu Fehlern 2. Art, nicht jedoch zu Fehlern 1. Art führt [188]. Damit können durch unpräzise Abschätzungen zwar ggf. mehr Berechnungsschritte als notwendig durchgeführt werden, die absolut optimale Lösung muss jedoch stets innerhalb des betrachteten Lösungsraums liegen.

Wurde beispielsweise bei einem Teilprodukt mit zwei Verbindungen nach Bild 35 ein Demontageschritt ausgeführt, so ist das für diesen Fall optimale Ergebnis bekannt und die Verbindung kann als fixiert angenommen werden. Ergibt die Maximalwertabschätzung für dieses Teilprodukt  $TP0$  mit fixierter Verbindung einen Nutzen, der kleiner als das bisher beste Ergebnis ist, so kann keine Verbesserung des Ergebnisses mehr erfolgen und die Analyse ist abzubrechen. Die Wirksamkeit dieser Wertabschätzungen hängt dabei wesentlich von der möglichst starken Einschränkung der potentiellen Prozesse von Verbindungen und Komponenten ab.

Genauere Schätzwerte sind zu erhalten, wenn diese für mehrkomponentige Teilprodukte nicht bezogen auf einzelne Komponenten, sondern auf die Verbindungen berechnet werden. Durch die Zuweisung der Einzelwerte der von einer Verbindung verknüpften Komponenten erfolgt eine weitere Datenverdichtung.

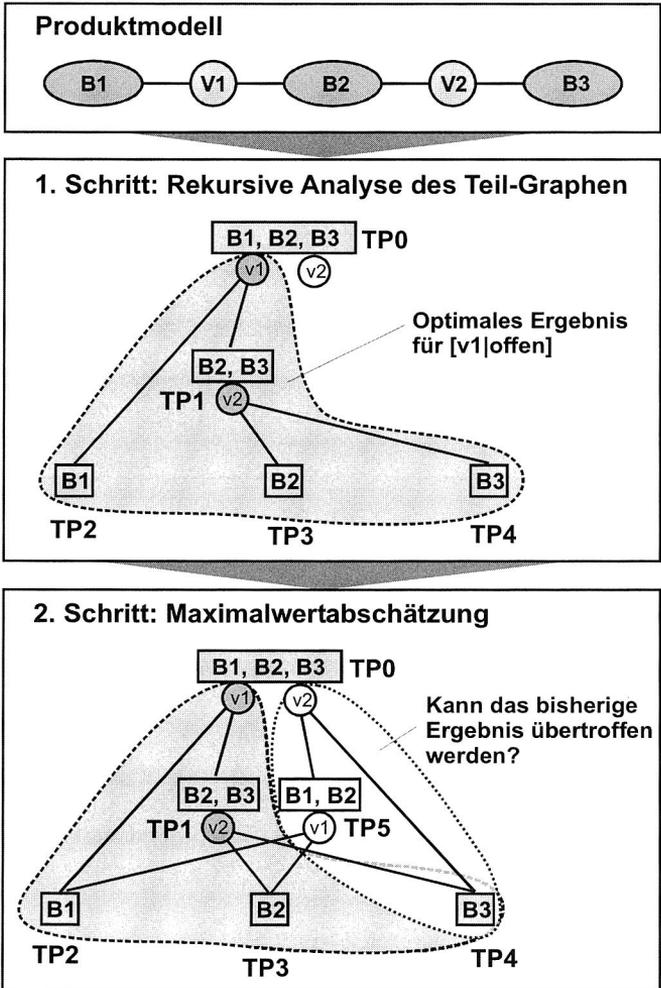


Bild 35: Reduktion des AND/OR-Graph durch Maximalwertabschätzung

Für jede Verbindung  $v$  eines Teilprodukts  $TP$  werden zwei Werte berechnet:

Verbindung  $v$  gelöst: 
$$A(v) = \sum_{k \in K(v)} (G(k,v) \cdot M(k) \cdot \text{Wert}(P_{\text{Pot}}(k)) - Dk(v)) \quad (30)$$

Verbindung  $v$  geschlossen: 
$$Z(v) = \text{Wert}(P_{\text{Pot}}(v)) \cdot \sum_{k \in K(v)} (G(k,v) \cdot M(k)) \quad (31)$$

- $A(v)$ : Schätzwert falls Verbindung  $v$  offen
- $Z(v)$ : Schätzwert falls Verbindung  $v$  geschlossen
- $G(k,v)$ : Gewichtung der Relation  $(k,v)$
- $M(k)$ : Masse der Komponente  $k$
- $\text{Wert}(P_{\text{Pot}}(k))$ : Nutzen des optimalen, potentiellen Prozesses für die Komponente  $k$
- $\text{Wert}(P_{\text{Pot}}(v))$ : Nutzen des optimalen, potentiellen Prozesses für die um  $v$  angeordneten Komponenten
- $Dk(v)$ : Demontagekosten der Verbindung  $v$

Die für die Komponente  $k$  und die Verbindung  $v$  angesetzten Werte der potentiellen Prozesse werden für den Fall angenommen, dass diese noch im Verbund mit weiteren Produktteilen steht. Bei abgetrennten Komponenten und Verbindungen ist der tatsächliche Entsorgungswert einzusetzen. Der Gewichtungsfaktor  $G(k,v)$  stellt sicher, dass die Masse einer Komponente nicht mehrfach berücksichtigt wird. Er wird angenommen als:

$$G(k,v) = \frac{1}{\text{Anzahl}(V(k))} \quad (32)$$

- $G(k,v)$ : Gewichtung der Relation  $(k,v)$
- $V(k)$ : Verbindungen, durch welche die Komponente  $k$  am Restprodukt angebunden ist

Der abgeschätzte Maximalwert einer Verbindung  $v$  bzw. für ein Teilprodukt  $TP$  ergibt sich dann aus:

$$\begin{aligned} SW(v) &= \text{Max}[A(v); Z(v)] \\ SW(TP) &= \sum_v SW(v(TP)) \end{aligned} \quad (33)$$

- $SW(v)$ : Abgeschätzter Maximalwert für die Verbindung  $v$
- $SW(TP)$ : Abgeschätzter Maximalwert für das Teilprodukt  $TP$

### Einbeziehung von Vorrangrelationen

In der Regel sind innerhalb eines Teilproduktes Vorrangrelationen der Verbindungen untereinander definiert, die bei der Berechnung und Anwendung von Schätzwerten berücksichtigt werden müssen. Für das in Bild 36 dargestellte Beispiel kann zwar ein Schätzwert für Verbindung  $v2$  berechnet werden, seine Berücksichtigung hängt jedoch davon ab, ob die Verbindung  $v1$  geöffnet ist. Umgekehrt wird durch das Fixieren der Verbindung  $v1$  auch gleichzeitig die Verbindung  $v2$  fixiert, so dass für diesen Fall nur noch die Massen der ihr zugehörigen Komponenten benötigt werden.

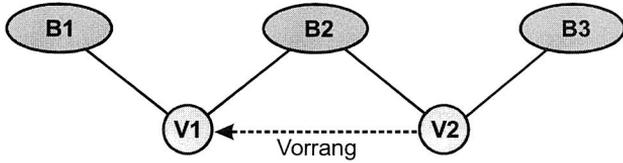


Bild 36: Beispiel zur Schätzwertberechnung mit Vorrangrelationen

Für die Schätzwertberechnung zu einer Verbindung wird deshalb zunächst angenommen, dass ihre sämtlichen Vorrangrelationen geöffnet sind. Für die Verbindung  $v$  wird der Schätzwert für den offenen Zustand  $A(v)$  also nach Gleichung ( 30 ) berechnet, und anschließend die Schätzwerte der direkten Nachfolger  $NachD(v)$  hinzugefügt, deren weitere Nachfolger bereits rekursiv berücksichtigt sind.

Bei der Berechnung der Schätzwerte für den geschlossenen Zustand einer Verbindung fließen zusätzlich die Massen der von den expandierten Nachfolgern  $NachE(v)$  verknüpften Komponenten ein. Für das Endergebnis der Schätzwertberechnung finden unmittelbar nur die Schätzwerte von Verbindungen ohne Vorrangrelationen Verwendung, in denen implizit die Schätzwerte von Nachfolgern enthalten sind.

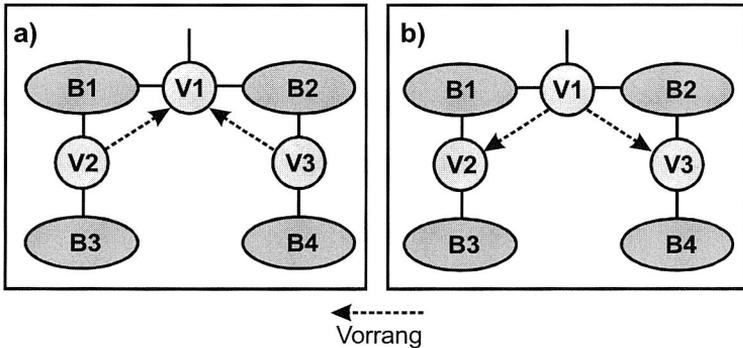


Bild 37: Beispiel zur Schätzwertberechnung bei verzweigten Vorrangrelationen

Vorrangstrukturen vom Typ a) in Bild 37 sind bei der Schätzwertberechnung durch Addition der Schätzwerte der beiden Nachfolger zu berücksichtigen. Bei Strukturen von Typ b) nach Bild 37 fließen die Eigenschaften von  $v_2$  und  $v_3$  ein, d.h. Mehrfachverwendung des Schätzwerts von Verbindung  $v_1$  ist durch eine gleichmäßige Aufteilung der Massenanteile auf die Vorrangrelationen zu vermeiden.

Die Schätzwerte ergeben sich dann nach den Gleichungen ( 34 ) und ( 35 ).

$$A(v) = \sum_{k \in KD(v)} (G(k, v) \cdot M(k) \cdot \text{Wert}(P_{\text{Pot}}(k)) - Dk(v)) + \sum_{v^* \in \text{NachD}(v)} \frac{SW(v^*)}{\text{Anzahl}(\text{VorD}(v^*))} \quad (34)$$

$$Z(v) = \text{Wert}(P_{\text{Pot}}(v)) \cdot \sum_{k \in K(v)} \left( G(k, v) \cdot M(k) + \sum_{v^* \in \text{NachD}(v)} \frac{M(v^*)}{\text{Anzahl}(\text{VorD}(v^*))} \right) \quad (35)$$

- $A(v)$ : Schätzwert falls Verbindung  $v$  offen
- $Z(v)$ : Schätzwert falls Verbindung  $v$  geschlossen
- $G(k, v)$ : Gewichtung der Relation  $(k, v)$
- $M(k)$ : Masse der Komponente  $k$
- $\text{Wert}(P_{\text{Pot}}(k))$ : Nutzen des optimalen potentiellen Prozesses für die Komponente  $k$
- $\text{Wert}(P_{\text{Pot}}(v))$ : Nutzen des optimalen potentiellen Prozesses für die um  $v$  angeordneten Komponenten
- $Dk(v)$ : Demontagekosten der Verbindung  $v$
- $SW(v^*)$ : Abgeschätzter Maximalwert für die Verbindung  $v$
- $\text{NachD}(v)$ : Menge der direkten Nachfolger von Verbindung  $v$
- $\text{Anzahl}(\text{VorD}(v^*))$ : Anzahl der direkten Vorrangrelationen zur Verbindung  $v^*$
- $M(v^*)$ : Massenanteile der von Verbindung  $v^*$  verknüpften Komponenten

### Schätzwertberechnung bei fixierten Verbindungen

Ist das Ergebnis aus der Analyse eines Demontageschrittes – also aus dem Öffnen einer Verbindung - bekannt, so kann diese unter bestimmten Umständen fixiert werden (vgl. insbesondere Abschnitt 4.3.3). Durch die Fixierung von Verbindungen werden die verknüpften Komponenten zu einem Materialklumpen zusammengefasst, der dann ersatzweise als einzelne Komponente zu betrachten ist (Bild 38). Bei diesen Ersatzkomponenten werden die tatsächlich zulässigen, optimalen Entsorgungsprozesse zur Schätzwertberechnung zu Grunde gelegt, wodurch der Schätzfehler verringert wird.

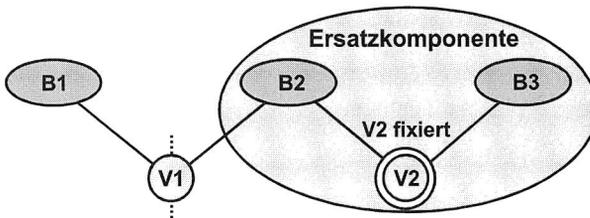


Bild 38: Beispiel für die Schätzwertberechnung bei fixierten Verbindungen

Wird im Beispiel nach Bild 38 die Verbindung  $v_2$  fixiert, so ergibt sich für die Berechnung der Schätzwerte:

$$A(v1) = M(B1) \cdot \text{Wert}(P_{\text{pot}}(B1)) + (M(B2) + M(B3)) \cdot \text{Wert}(P(v2)) - Dk(v1) \quad (36)$$

$$Z(v) = (M(B1) + M(B2) + M(B3)) \cdot \text{Wert}(P(B1, B2, B3)) \quad (37)$$

$A(v1)$ : Schätzwert falls Verbindung  $v$  offen

$Z(v1)$ : Schätzwert falls Verbindung  $v$  geschlossen

$M(k)$ : Masse der Komponente  $k$

$\text{Wert}(P_{\text{pot}}(k))$ : Nutzen des optimalen potentiellen Prozesses für die Komponente  $k$

$\text{Wert}(P(v))$ : Nutzen des tatsächlich zulässigen Prozesses für die um  $v$  angeordneten Komponenten

$\text{Wert}(P(k))$ : Nutzen des tatsächlich zulässigen Prozesses für die Komponenten  $k$

$Dk(v)$ : Demontagekosten der Verbindung  $v$

Daraus leitet sich ab, dass der Schätzwert für das aus  $(B1, B2, B3)$  bestehende Teilprodukt direkt aus dem Schätzwert  $SW(v1)$  für die Verbindung  $v1$  zu berechnen ist:

$$SW(TP) = SW(B1, B2, B3) = SW(v1) \quad (38)$$

### 4.3.3 Fixierung von Verbindungen

Eine Fixierung von Verbindungen kann zunächst immer dann erfolgen, wenn das Analyseergebnis für den offenen Zustand bereits bekannt oder abgeschätzt ist. In Folge ist eine weitere Analyse nur noch für den Fall notwendig, dass die Verbindung geschlossen ist. Die Gültigkeit von derartigen Fixierungen ist jedoch von verschiedenen Randbedingungen und der Vorgehensweise bei der Generierung des AND/OR-Graphen abhängig.

Die als *mitlaufende Fixierung* bezeichnete Reduktion des AND/OR-Graphen ist ohne die in Abschnitt 4.3.2 genannten Schätzwerte möglich. Fixierungen tragen jedoch im Zusammenspiel mit den Maximalwerten zu einer wesentlich höheren Präzision der Abschätzungen bei, weil die genaueren, bereits vorliegenden absoluten Ergebnisse einfließen.

Nach der Analyse eines Demontageschritts wird die zum Schritt gehörende Verbindung fixiert, weil durch die Analyse bereits das beste Ergebnis für den Fall des Lösen dieser Verbindung bekannt ist (Bild 39, Bild 40). Die Fixierung bezieht sich dabei nur auf das Teilprodukt, aus dem heraus der Demontageschritt erzeugt wurde. Die Menge aller fixierten Verbindungen werden als Fixierungszustand eines Teilproduktes zusammengefasst, der initial an die abgeleiteten Teilprodukte weitergegeben wird. Bei diesen wird dadurch die Anzahl der zu analysierenden Demontageschritte reduziert.

Die mitlaufende Fixierung von Verbindungen ist immer dann möglich, wenn die Reihenfolge der untersuchten Demontageschritte gleich ist. Nachdem die Analyse möglichst großer Teilprodukte, und damit das schnelle Ermitteln von Schätzwerten bzw. Abbruchkriterien zu bevorzugen ist, sollte jedoch nicht von einer gleichen Abarbeitungsfolge für Demontageschritte ausgegangen werden.

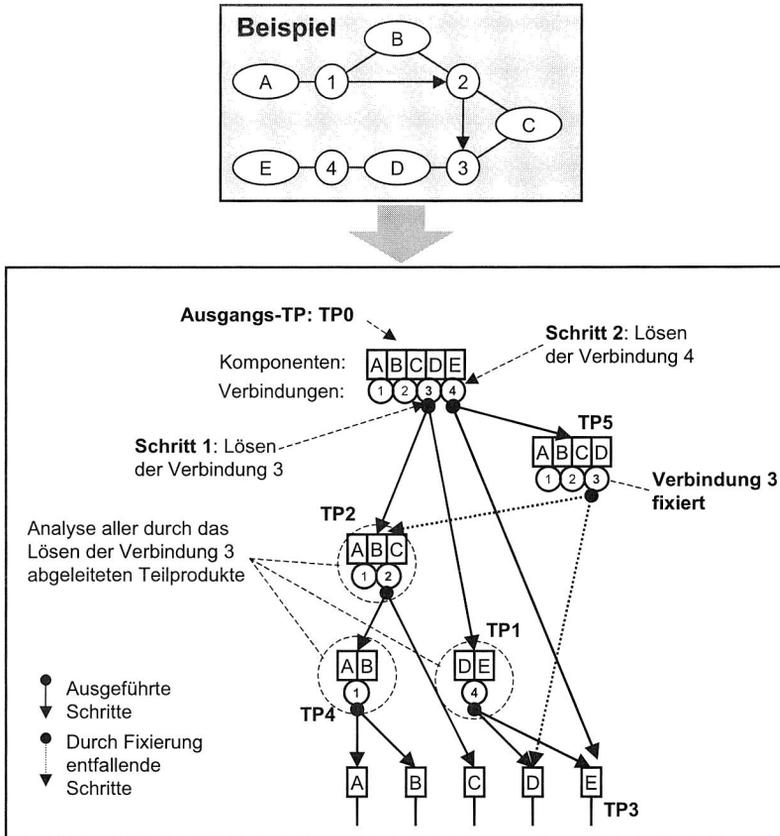


Bild 39: Beispiel mitlaufender Fixierungen im AND/OR-Graph

Um den Ausschluss von optimalen Lösungen durch ungültige Fixierungen zu vermeiden, wird einem Teilprodukt neben dem bisher errechneten optimalen Ergebnis der Fixierungszustand, unter dem es berechnet wurde, in Form der *initialen Fixierung* als Parameter zugewiesen. Wird das gleiche Teilprodukt ein weiteres Mal bei der Generierung des AND/OR-Graphen abgeleitet, so kann der Fixierungszustand, unter dem die erneute Ableitung erfolgte, mit dem initialen Fixierungszustand des Teilprodukts abgeglichen werden.

Der Fixierungszustand eines Teilprodukts ist somit die Bedingung für die Gültigkeit eines bisher ermittelten Ergebnisses. Ist der initiale Fixierungszustand eine Teilmenge des Fixierungszustands beim erneuten Aufruf, so kann das bisherige Ergebnis für das Teilprodukt übernommen werden. Andernfalls ist die Analyse des abgeleiteten Teilprodukts fortzusetzen.

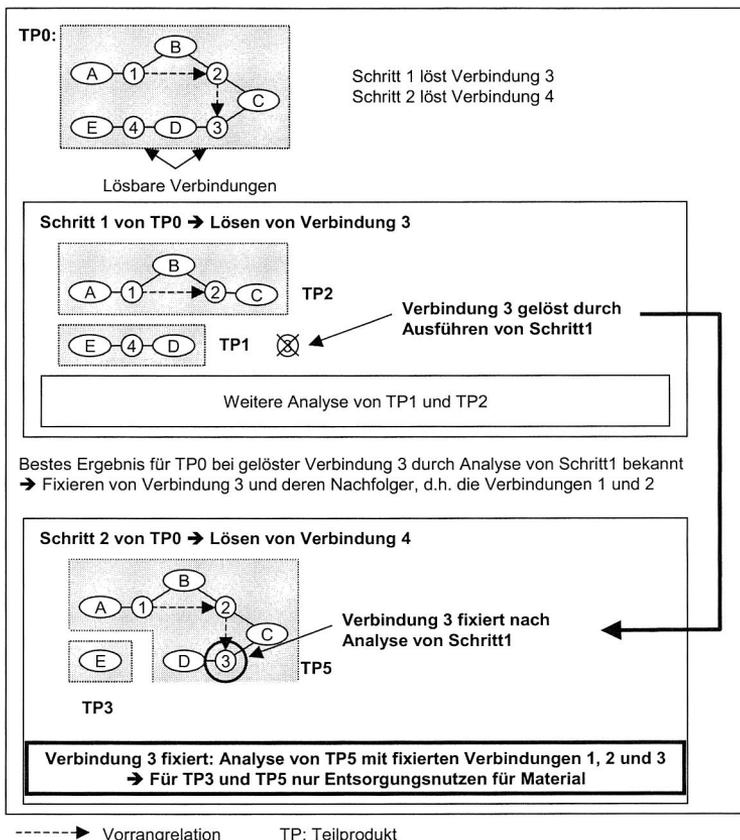


Bild 40: Beispiel für mitlaufende Fixierungen

Nachdem die Präzision der Berechnungen und Abschätzungen mit der Anzahl der fixierten Verbindungen steigt, gilt der Zusammenhang:

$$FixInit(TP) \subset FixNeu(TP) \Rightarrow Wert(TP | FixNeu) \leq Wert(TP | FixInit) \quad (39)$$

*FixInit(TP):* Menge der initial fixierten Verbindungen des Teilprodukts TP

*FixNeu(TP):* Menge der bei erneuter Ableitung fixierten Verbindungen des Teilprodukts TP

Weitere Möglichkeiten zur Fixierung von Verbindungen, und damit zur temporären Reduktion der Produktstruktur, bestehen in der Berücksichtigung der Schätzwerte (vgl. Abschnitt 4.3.2). Ergibt eine Abschätzung über den Maximalwert, dass durch die Ausführung eines Demontageschritts der bisherige Wert des Teilprodukts nicht mehr erreicht werden kann, so kann die zum Demontageschritt gehörige Verbindung ebenfalls fixiert werden:

$$SW(\text{Schritt}) < \text{Wert}(TP) \Rightarrow v(\text{Schritt}) \in \text{FixInit}(TP) \quad (40)$$

*SW(Schritt):* Abgeschätzter Maximalwert für die Durchführung eines Demontageschritts

*Wert(TP):* Bisheriger Deckungsbeitrag des Teilprodukts TP

*v(Schritt):* Zum Demontageschritt gehörende Verbindung

*FixInit(TP):* Menge der initial fixierten Verbindungen des Teilprodukts TP

Derartige Fixierungen finden stets vor der Analyse des jeweils nächsten Demontageschritts statt und werden entsprechend als initialer Fixierungszustand an die abgeleiteten Teilprodukte weitergegeben.

#### 4.3.4 Implementierung der Reduktionsansätze

Die Implementierung erfolgte als Erweiterung des bisher bestehenden Softwaresystems ReGrEd/Display v2.0 unter dem Betriebssystem Microsoft Windows NT 4.0. Die Programmierung wurde mit der objektorientierten Programmiersprache Microsoft Visual C++ durchgeführt. Eine detaillierte Erläuterung der Systemgrundlagen und der Programmierumgebung wird in diesem Rahmen nicht gegeben.

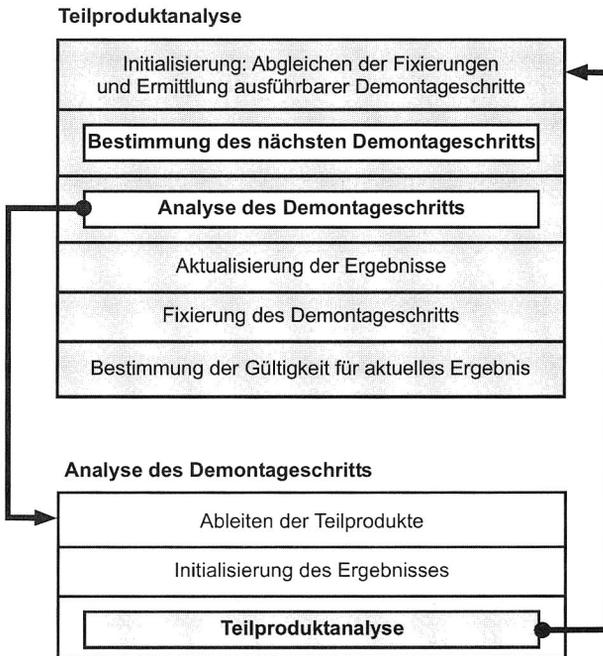


Bild 41: Rekursiver Aufbau des AND/OR-Graphen mit integrierten Reduktionsmechanismen

Bei der Generierung des AND/OR-Graphen zur reduzierten Produktstruktur (Abschnitt 4.1.1) werden als Abbruchkriterien die auf der Basis von potentiellen Prozessen (Abschnitt 4.3.1) ermittelten Maximalwertabschätzungen (Abschnitt 4.3.2) und die mitlaufenden oder abgeschätzten Fixierungen (Abschnitt 4.3.3) berücksichtigt. Diese Ansätze werden bei den Kernelementen des Algorithmus, insbesondere bei der Analyse eines Teilproduktes, bei der Ermittlung auszuführender Demontageschritte und bei deren Analyse implementiert (Bild 41). Elementare Voraussetzung ist dabei die Rekursion im Algorithmus zur Erstellung des AND/OR-Graphen (Abschnitt 4.2.1).

**Initialisierung und Ermittlung ausführbarer Demontageschritte**

Jedes analysierte Teilprodukt erhält als Ergebnis den bisher berechneten maximalen Deckungsbeitrag unter Berücksichtigung der bereits abgeleiteten, weiteren Teilprodukte. Liegt noch kein Ergebnis vor, so wird das Teilprodukt zum ersten Mal abgeleitet und erhält als initialen Wert zunächst den absoluten Nutzen der enthaltenen Fraktion bei einer Entsorgung ohne weitere Demontage zugewiesen (Bild 42).

j \	<b>Ergebnis existiert nicht ?</b>	n
	Initialisierung Ergebnis (TP)	%
j \	<b>TP enthält keine Verbindungen ?</b>	n
	Abbruch der Analyse	%
j \	<b>Teilmengentest Fixierungen erfolgreich?</b>	n
	Abbruch der Analyse	%
	Ermittlung ausführbarer Demontageschritte	
j \	<b>Keine Schritte vorhanden ?</b>	n
	Abbruch	%
	Übertragen der initialen Fixierung auf das Teilprodukt	

Bild 42: Initialisierung der Teilprodukt-Analyse und Ermittlung ausführbarer Demontageschritte

In einem weiteren Prüfschritt wird festgestellt, ob das Teilprodukt eine einzelne Komponente darstellt. In diesem Fall wird die weitere Analyse abgebrochen. Der absolute Nutzen der Komponente wurde bereits im vorangegangenen Schritt ermittelt und eingetragen.

Durch das Abgleichen des Fixierungszustands, unter dem ein bereits vorhandenes Teilprodukt-Ergebnis berechnet wurde, mit dem initialen Fixierungszustand, unter dem das Teilprodukt aktuell abgeleitet wurde, wird die Gültigkeit des bisherigen Ergebnisses verifiziert. Ist der bisherige Fixierungszustand eine Teilmenge der initialen

Fixierung, so kann das Ergebnis durch eine weitere Analyse keinesfalls verbessert werden, d.h. die weitere Betrachtung des Teilprodukts wird ausgeschlossen.

Bei der Ermittlung der zu analysierenden Demontageschritte werden alle unmittelbar lösbaren Verbindungen erfasst, und aus jeder ein Schritt erzeugt. Lösbar ist eine Verbindung immer dann, wenn sie nicht durch den als Parameter übergebenen Fixierungszustand als unlösbar klassifiziert ist, oder wenn sie keine Vorrangrelationen innerhalb des betrachteten Teilproduktes besitzt. Des Weiteren wird der initiale Fixierungszustand für eine spätere Verifizierung der Ergebnisse beim erneuten Ableiten der Teilprodukte aufgenommen.

**Bestimmung des nächsten Demontageschrittes**

Der nächste zu untersuchende Demontageschritt bestimmt sich aus der maximalen Wahrscheinlichkeit, mit der das Lösen einer Verbindung zur optimalen Demontage-tiefe gehört. Gleichzeitig werden bereits Abbruchkriterien für die weitere Analyse des Teilprodukts abgefragt und die Maximalwertabschätzungen für das Lösen und das Fixieren einer Verbindung durchgeführt.

<b>Für jeden Schritt S</b>		
Ermittlung $SW(V(S) gelöst)$		
j	<b><math>Max(V(S) gelöst) &lt; Wert(TP) ?</math></b>	n
Fixieren von V(S) Entfernen von S aus ausführbaren Schritten		%
Erneutes Ermitteln der Schätzwerte		
j	<b>Keine Schritte vorhanden ?</b>	n
<b>Abbruch: Kein zu analysierender Schritt</b>		%
Initialisierung nächster Schritt SM		
<b>Für jeden Schritt S</b>		
Ermittle $SW(V(S) fixiert)$		
Sortierwert(S) = $SW(V(S) gelöst) - SW(V(S) fixiert)$		
j	<b><math>SW(V(S) fixiert) &lt; Wert(TP) ?</math></b>	n
SM := S	<b>Noch kein nächster Schritt SM oder Sortierwert (S) &gt; Sortierwert (SM) ?</b>	n
SM := S		%
Rückgabe des nächsten Schritts SM		

V: Verbindung S: Schritt SM: nächster Schritt SW: Schätzwert

Bild 43: Ermittlung des nächsten Demontageschritts

Zur Bestimmung des nächsten Demontageschrittes wird zunächst eine Maximalwertabschätzung zu allen ausführbaren Schritte für den Fall durchgeführt, dass die zu einem Demontageschritt gehörende Verbindung geöffnet wird (Bild 43). Ist der zu erwartende Maximalwert eines Schrittes kleiner als der bisherige Wert des betrachteten Teilprodukts, so kann das Lösen der zum Schritt gehörenden Verbindung voraussichtlich nicht Teil der optimalen Demontage sein. Die entsprechende Verbindung kann daher fixiert werden und ist nicht weiter zu analysieren.

Durch die Fixierung können die Schätzwerte der weiteren ausführbaren Demontageschritte präziser bestimmt werden. Diese Schritte werden deshalb solange untersucht, bis sich keine Fixierungen mehr ergeben. Sind auf diese Weise sämtliche, ursprünglich ausführbaren Demontageschritte fixiert worden, so wird die weitere Analyse abgebrochen.

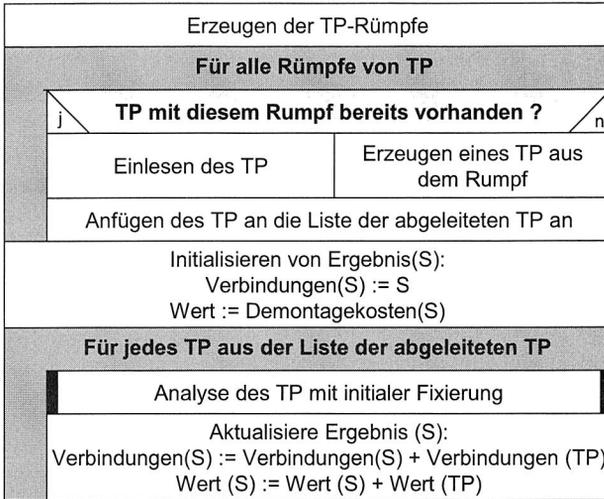
Als Maß für die Wahrscheinlichkeit, dass das Öffnen einer Verbindung zur optimalen Lösung gehört, wird die Differenz der Schätzwerte für die zu einem Schritt gehörende Verbindung im geöffneten und geschlossenen Zustand gebildet. Ist der Schätzwert für die geöffnete Verbindung sehr hoch und der Schätzwert für die fixierte Verbindung sehr klein, so ist dieser Schritt bevorzugt zu untersuchen. Der Sortierwert aus der Differenz beider Schätzwerte wird demnach maximiert. Ebenso ist der Demontageschritt bevorzugt zu untersuchen, wenn der Schätzwert für die fixierte Verbindung kleiner als der bisherige Wert des gerade untersuchten Teilprodukts ist.

### **Analyse eines Demontageschritts**

Ein Parameter der Analyse ist das Teilprodukt, aus dem heraus der Demontageschritt ausgeführt wird. In diesem wird die zum Schritt gehörende Verbindung gelöst, wodurch sich weitere Teilprodukte ableiten. Aus den zugehörigen Verbindungen und Komponenten werden Teilprodukt-Rümpfe erzeugt, die über die Attribute *Verbindungs-* und *Komponentenanzahl* mit den bisher im AND/OR-Graphen erzeugten Teilprodukte verglichen werden (Bild 44). Bereits generierte Teilprodukte brauchen aufgrund des Singularitätsprinzips von AND/OR-Graphen nicht ein weiteres Mal erstellt werden.

Das Ergebnis eines Demontageschritts ist von der Datenstruktur ähnlich wie das eines Teilproduktes aufgebaut, weil es den speziellen Fall repräsentiert, dass die zum Demontageschritt gehörende Verbindung im Teilprodukt gelöst ist. Die Ermittlung des Ergebnisses ist jedoch aus den Einzelergebnissen der abgeleiteten Teilprodukte und den Demontagekosten für das Durchführen des Schritts zusammengesetzt.

Aus der Analyse eines Demontageschritts heraus werden im weiteren rekursiv die neu abgeleiteten Teilprodukte analysiert. Dabei erfolgt die Übergabe des aktuellen Fixierungszustandes als initiale Fixierung für die weitere Teilproduktanalyse.



S: Schritt TP: Teilprodukt

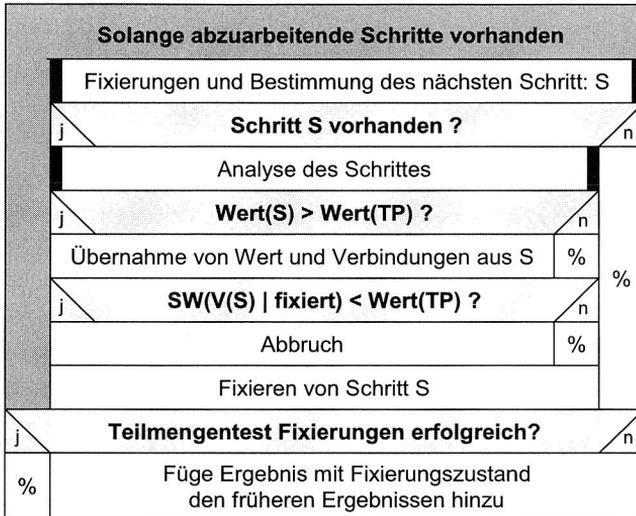
Bild 44: Analyse eines Demontageschrittes

### Weitere Analyse des Teilprodukts

Bild 45 zeigt den Analyseablauf für ein Teilprodukt als zweiten, zentralen Abschnitt des rekursiven Algorithmus. Aus der Bestimmung der nächsten Demontageschritte (Bild 43) ergeben sich die Schätzwerte zu den einzelnen Schritten, die Fixierungen und die Abarbeitungsreihenfolge. Auf der Basis dieser Parameter wird der Demontageschritt analysiert (Bild 44) und das berechnete Ergebnis mit dem bisherigen Ergebnis für das Teilprodukt verglichen. Ist der Wert für den Demontageschritt höher als der bisherige Deckungsbeitrag für das Teilprodukt, so wird dieser Wert des Schritts einschließlich der dazugehörigen Verbindungen für das Teilprodukt übernommen.

Falls der potentiell maximale Wert bei Fixierung der zum Schritt gehörenden Verbindung kleiner als der aktuelle Wert des Teilprodukts ist, so ist eine weitere Analyse als nicht mehr zielführend einzuschätzen und wird daher abgebrochen. Nach der Durchführung eines Demontageschrittes ist das Ergebnis für das Lösen der zugehörigen Verbindung bekannt, so dass diese Verbindung fixiert werden kann. Der aktuelle Fixierungszustand wird als Bedingung, unter der das Ergebnis zustande kam, festgehalten.

Nach dem vollständigen Durchlaufen der Rekursion enthält das Ergebnis des Wurzelknotens sowohl den bei optimaler Demontage erzielbaren Wert, als auch den dazugehörigen Verbindungszustand. Auf der Basis dieser Informationen kann das Ergebnis in das ursprüngliche Produktmodell zurück transferiert werden (Abschnitt 4.2.3)



V: Verbindung S: Schritt

Bild 45: Analyse eines Teilprodukts

#### 4.4 Ermittlung und Verifizierung der Reduktionsleistung

Die in den vorangegangenen Abschnitten vorgestellten Ansätze zur Reduzierung des Berechnungsaufwands für die Ermittlung der optimalen Demontagetiefe sind in hohem Maße vernetzt anzuwenden. Durch die integrale Implementierung der Module zur Transformation, Maximalwertabschätzung und Fixierung von Verbindungen erscheint eine getrennte Untersuchung der Analyseleistung von Einzelelementen wenig aussagekräftig. Im folgenden wird die Reduktionsleistung daher auf der Basis einer integrierten Implementierung aller Algorithmen in der Softwareversion ReGrEd/Display v3.0 mit der in Abschnitt 3.3 beschriebenen Softwareversion v2.0 verglichen.

Die Rechenzeit für die Demontageanalyse wird im wesentlichen von der Anzahl an Baueilen und Verbindungen, von der Hierarchie und von den Stoffgehalten eines Produktes beeinflusst. Eine quantitative Korrelation dieser Einflussgrößen mit dem Berechnungsaufwand kann jedoch nicht zu Aussagen bezüglich der praktischen Anwendbarkeit eines derartigen Analysewerkzeugs führen. Letztlich ist die Vielfalt der Strukturen und Werkstoffe selbst bei ähnlichen Produkten so groß, dass sich daraus keine besondere Eignung des Analysewerkzeugs für spezifische Produktarten ableiten lässt. Die allgemeine Forderung für die praktische Anwendbarkeit des Analysewerkzeugs ist, dass die Rechenzeit für komplexe ebenso wie für einfach aufgebaute Produkte in einem akzeptablen Rahmen liegen muss.

Als Vergleichsmaßstab wurden daher die gleichen Testprodukte herangezogen, wie sie in Abschnitt 3.2.6 vorgestellt wurden. Diese stellen einen repräsentativen Quer-

schnitt von Produkten dar, die von umweltpolitischen Maßnahmen aufgrund der Massenströme besonders betroffen sind. Die Anwendbarkeit der vorgestellten Konzepte muss demnach für die unterschiedlichen Topologien und Strukturen sichergestellt sein. Kriterium hierfür ist eine Durchführung der Analyse innerhalb von ca. 3 Minuten [44]. Die Rechenzeit für die Analyse der Testprodukte wurde mit beiden Systemen auf Rechnern mit vergleichbaren Ausstattungen durchgeführt.

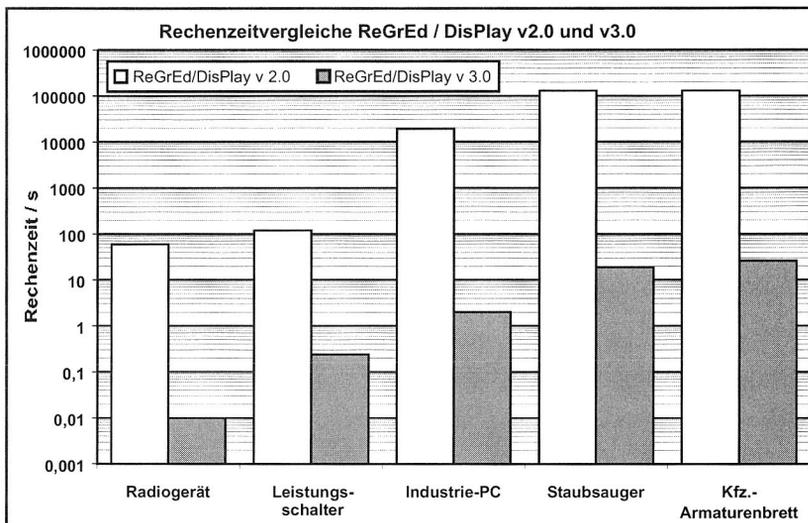


Bild 46: Verifizierung der Reduktionsleistung an Testprodukten

Bild 46 und Tabelle 9 zeigen die Ergebnisse verschiedener Testläufe mit den beiden Softwareversionen. Die Analyse wurde mit der neuentwickelten Softwareversion bei allen Testprodukten bis zum Ergebnis, d.h. ohne Abbruch durchgeführt. Die benötigten Rechenzeiten liegen für sämtliche Testprodukte bei weit unter einer Minute und sind daher als durchaus akzeptabel anzusehen.

Produkt	Anzahl Bauteile	Anzahl Verbindungen	Hierarchie	Rechenzeit Version 2.0	Rechenzeit Version 3.0	Faktor
Radiogerät	22	13	mittel	60 s	0,01 s	6000
Leistungsschalter	66	38	streng	120 s	0,24 s	5000
Industrie-PC	77	46	flach	5 h 23h 18s	2 s	9699
Staubsauger	83	80	mittel	> 36 h	19 s	> 6821
Kfz.-Armaturenbrett	53	42	flach	> 36 h	26 s	> 4985

Tabelle 9: Rechenzeitvergleiche für verschiedene Produkte

So konnte eine Reduktion der Rechenzeiten in einer Größenordnung von durchwegs  $10^3$  erreicht werden. Gerade bei der Analyse vergleichsweise komplexer Produkten, wie z.B. einem Industrie-PC, liegt die Reduktionsleistung bereits nahe der Dimension  $10^4$ . Damit wird es einem Anwender möglich, erkannte Verbesserungspotentiale bei der Gestaltung der Produktstruktur und bei der Materialauswahl schnell im Produktmodell umzusetzen und bezüglich ihrer Auswirkungen auf die optimale Demontagestrategie zu untersuchen. Ebenso ist die optimale Demontagestrategie durch eine Neuberechnung rasch an geänderte Randbedingungen des Sekundärrohstoffmarktes anzupassen.



Auf eine multikriterielle Bewertung nach [57], [90], [191] kann bei der Verifizierung gesetzlicher Anforderungen verzichtet werden, weil rechtliche Kriterien stets zu binären Aussagen (z.B. „erfüllt“ / „nicht erfüllt“) führen. Damit muss jedes Einzelergebnis innerhalb des gesetzlich vorgegebenen Rahmens liegen.

### 5.1 Berücksichtigung von Stoffverboten und -beschränkungen

Aufgrund der Richtlinie RoHS [161] dürfen in Europa nach derzeitigem Stand ab 01. Januar 2007 keine Elektro(nik)geräte in Verkehr gebracht werden, die bestimmte Stoffe wie z.B. Blei, Quecksilber, etc. enthalten. Davon sind sowohl spezifische Stoffgemische als auch Bauteile ausgenommen (vgl. Abschnitt 2.2). Stoffgemische werden in ReGrEd/DisPlay über die Technischen Materialien dargestellt, die sich aus verschiedenen Basismaterialien zusammensetzen. Nachdem die von der Ausnahme betroffenen Bauteile jeweils eine bestimmte Funktionen erfüllen (z.B. Kathodenstrahlröhren), können auch diese mit den spezifischen Materialgemischen als Technische Materialien definiert werden. Zur Integration von Stoffverboten und –beschränkungen in das Analysewerkzeug ReGrEd/DisPlay können demnach die Stoffverbote über die Restriktion von Basismaterialien und die dazugehörigen Ausnahmen über die Technischen Materialien abgebildet werden (Bild 48).

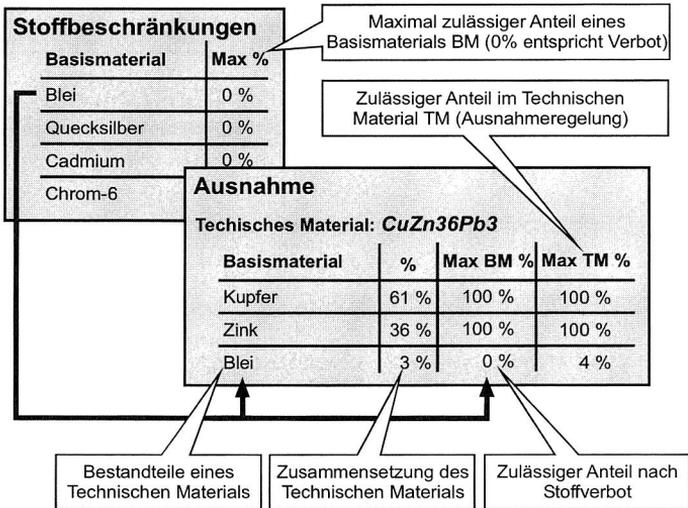
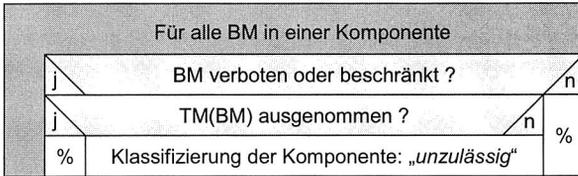


Bild 48: Abbildung von Stoffverboten und -beschränkungen in ReGrEd/DisPlay

In eine Tabelle wird zunächst das von einem Verbot oder einer Beschränkung betroffene Basismaterial sowie die maximal zulässige Konzentration eingetragen. Maximal zulässige Konzentrationen von 0% entsprechen dann einem Verbot. Die Berücksichtigung von zulässigen Konzentrationen als kontinuierliche Größe ist durchaus sinnvoll, weil über die (binären) Verbote der Richtlinie RoHS hinausgehend oft-

mals auch hersteller- oder kundenspezifische Restriktionen zu berücksichtigen sind, die über den maximalen Anteil definiert werden [90], [181].

In einer zweiten Tabelle werden die Technischen Materialien mit den für sie maximal zulässigen Konzentrationen eines Basismaterials als Ausnahmen eingetragen. Durch eine hierarchische Abfrage bei der Bewertung einer Komponente werden sowohl die Verbote als auch die Ausnahmen berücksichtigt. Nach dem Erzeugen einer neuen Komponente oder dem Einlesen eines bereits vorhandenen Produktmodells muss demnach die in Bild 49 dargestellte Abfrage durchgeführt werden.



BM: Basismaterial TM: Technisches Material

Bild 49: Abfrage zu Stoffverboten und –beschränkungen in ReGrEd/DisPlay

Die Darstellung der nach diesem Algorithmus klassifizierten Komponenten kann auf vielfältige Weise erfolgen (Bild 50). Neben einer direkten Darstellung im Recyclinggraphen oder der Ausgabe auf Druckmedien sind entsprechende Warnhinweise oder andere, anwenderspezifische Darstellungsformen denkbar. Diese sind jedoch nicht Gegenstand dieser Arbeit.

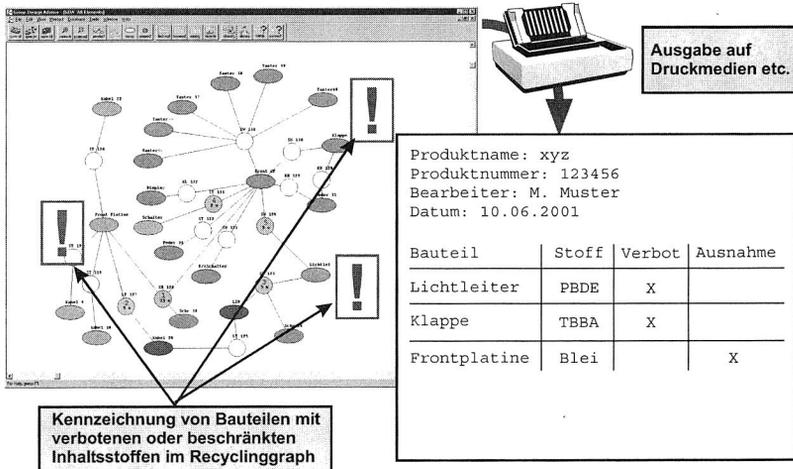


Bild 50: Darstellung von Stoffverboten und -beschränkungen

## 5.2 Integration demontagepflichtiger Bauteile in die Analyse

Gemäß der Richtlinie WEEE sind aus Elektro- und Elektronikgeräten bestimmte Bauteile bzw. Bauteile, die bestimmte Stoffe enthalten, zwingend durch Demontage zu entfernen. Dazu gehören beispielsweise PCB-haltige Kondensatoren, Schaltungsträger aus Mobiltelefonen oder Kabel [160]. Enthält ein Elektro(nik)gerät eine oder mehrere dieser Komponenten, so hat durch deren Entfernung also eine zwingend vorgeschriebene Mindestdemontage zu erfolgen, selbst wenn dies aus wirtschaftlichen Gründen nicht sinnvoll ist.

Diese zusätzliche Randbedingung ist bei der Demontageanalyse zu berücksichtigen. Eine ausschließliche Berechnung der minimalen Demontagetiefe ist jedoch nicht zielführend, weil eine weitergehende, wirtschaftlich optimale Demontagetiefe einen insgesamt höheren Deckungsbeitrag aufweisen kann und daher der Minimaldemontage vorzuziehen wäre. Falls die wirtschaftlich optimale Demontagetiefe zu einer geringeren Zerlegtiefe führt, so ist die Minimaldemontage die nächste, rechtlich gültige Demontagestrategie.

Wie in Abschnitt 3.2.6 dargestellt, können die bei einer Demontage erzeugten Fraktionen einschließlich der Fraktionen mit Pflichtdemontageteile nur den verwaltungsrechtlich entsprechend klassifizierten Entsorgungsprozessen zugeführt werden. Der bisher nach [80], [190] vorgesehene „Rest“-Prozess existiert in der Praxis nicht, kann jedoch als Kriterium für die notwendige weitere Zerlegung der Fraktion herangezogen werden. Wird der in Abschnitt 4.2 und 4.3 dargestellte Algorithmus zur Demontageanalyse dahingehend modifiziert, dass die aus einem Demontageschritt abgeleiteten Teilprodukte, die nur dem „Rest“-Prozess zugeführt werden können, in jedem Fall zu einer ungültigen Lösung führen, so wird die weitere Demontage erzwungen (Bild 51). Dadurch wird bei der Demontageanalyse eine Zerlegung angenommen, bei der jeder Fraktion zumindest ein gültiger Prozess zugeordnet ist.

Nachdem insbesondere auch Pflichtdemontageteile, die meist aufgrund des Gefahrstoffgehalts zu entfernen sind, nur in speziell zugelassenen Prozessen zu entsorgen sind, werden die Anforderungen der Minimaldemontage auf diese Weise automatisch erfüllt. Eine gesonderte Ermittlung von Pflichtdemontageteilen und Zuweisung dieses Attributs zu den Bauteileigenschaften ist nicht erforderlich. Ebenso wird durch diese Vorgehensweise den Gegebenheiten aus der industriellen Praxis Rechnung getragen, dass die vorgeschriebene Entfernung von Bauteilen nicht notwendigerweise deren völlige Separation von allen weiteren Bauteilen erfordert.

Bei jedem Verwertungs- oder Beseitigungsprozess ist ein mehr oder weniger großer Anteil an allgemeinen Verunreinigungen zulässig [193]. Falls die Anhaftungen am Pflichtdemontageteil durch den gleichen Prozess entsorgt werden können und die Zerlegekosten im Vergleich zu den Kosten einer Entsorgung in diesem Prozess höher sind, so werden Bauteilgemische, die ein Pflichtdemontageteil enthalten, nicht aufgelöst.

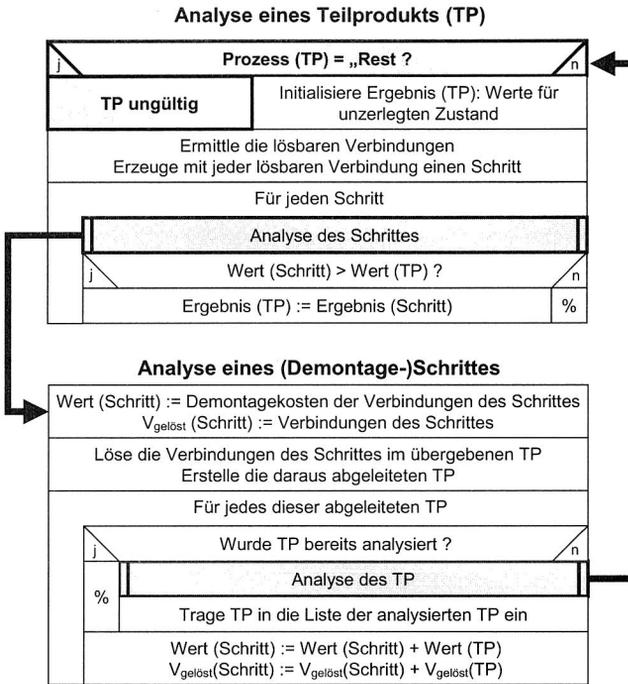


Bild 51: Modifizierte Demontageanalyse unter Berücksichtigung ungültiger Prozesse

Bei dem in Bild 52 dargestellten Beispiel ist der Akkumulator ein Pflichtdemontageteil nach der Richtlinie WEEE. Das ggf. sehr aufwendige Entfernen des Kunststoffkäfigs und des Kontaktes muss jedoch nicht erfolgen, wenn beide Bauteile als Verunreinigung zusammen mit dem Akkumulator entsorgt werden können.

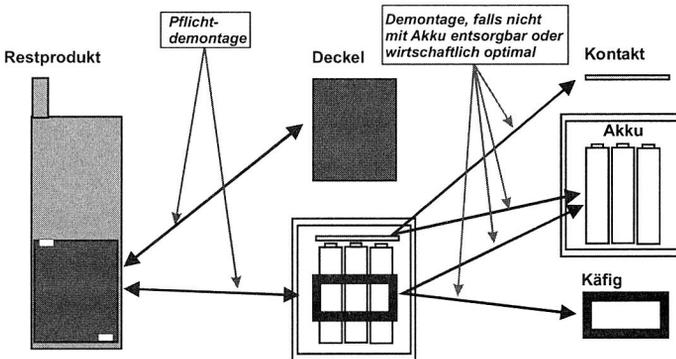


Bild 52: Akkumulator eines Mobiltelefons als Beispiel für ein Pflichtdemontageteil

## 5.3 Demontageanalyse bei vorgegebenen Verwertungs-/ Recyclingquoten

Nach der Richtlinie WEEE sind bei der Entsorgung von Elektro- und Elektronikgeräten abhängig von der Produktkategorie bestimmte Verwertungs- und Wiederverwendungs- bzw. Recyclingquoten zu erfüllen [160]. Als Verwertung werden dabei alle Aktivitäten bezeichnet, die in Anhang IIB der Richtlinie 75/442/EWG [96] aufgeführt sind. Als Recyclingprozesse sind Verfahren zur stofflichen Verwertung definiert, d.h. Verfahren, deren Hauptzweck auf die Rückgewinnung eines Stoffes oder die Nutzung der Eigenschaften eines Stoffes ausgelegt ist [56], [132]. Die Bestimmung der Quoten ist daher insbesondere von der Klassifizierung der Prozesse abhängig.

### 5.3.1 Klassifizierung von Entsorgungsprozessen

Während die Wiederverwendung von Bauteilen eine den Komponenten zugewiesene Eigenschaft ist, muss für die Entsorgungsprozesse eine eigene Klassifizierung nach der Entsorgungsart erfolgen. Die rechtlich vorgegebenen Prozessklassen sind [96], [132]:

- Prozesse zur stofflichen Verwertung
- Prozesse zur energetischen Verwertung
- Prozesse zur Beseitigung.

Die Entsorgungsart wird daher als eigenes Attribut bei der Definition der Entsorgungsprozesse eingeführt. Zur besseren Darstellung der folgenden Algorithmen werden die Prozessklassifizierungen durch die binären Faktoren  $a$  und  $b$  dargestellt. Es sind dann:

$$a(P(TP)) = \begin{cases} 0 & \text{falls } P(TP) \text{ Prozess zur Beseitigung} \\ 1 & \text{sonst} \end{cases} \quad (41)$$

$$b(P(TP)) = \begin{cases} 0 & \text{sonst} \\ 1 & \text{falls } P(TP) \text{ stoffl. Verwertung oder Wiederverwendung von TP} \end{cases} \quad (42)$$

Der Beitrag zur Verwertungs- oder Recyclingquote ist abhängig von der Entsorgungsart des Prozesses, dem eine Fraktion bei der Demontageanalyse zugeordnet wird. Einen Anteil zur *Verwertungsquote* liefern alle Fraktionen, die einem Prozess zur stofflichen oder energetischen Verwertung zugeführt werden sowie Bauteile, deren Wieder- oder Weiterverwendung erfolgt. Beiträge zur *Recyclingquote* liefern nur Fraktionen, die stofflich verwertet oder wieder- bzw. weiterverwendet werden.

Der Beitrag eines Teilproduktes in unzerlegtem Zustand zur Verwertungsquote des gesamten Produktes errechnet sich aus:

$$q_V(TP) = a(P(TP)) \cdot \frac{m(TP)}{m_{\text{Produkt}}} \quad (43)$$

- $q_V(TP)$ : Beitrag des Teilproduktes TP zur Verwertungsquote eines Produktes  
 $a(P(TP))$ : Klassifizierungsfaktor zur Entsorgungsart des Prozesses P für das Teilprodukt TP  
 $m(TP)$ : Masse des Teilproduktes TP  
 $m_{\text{Produkt}}$ : Gesamtmasse des Produktes

Der Beitrag eines Teilproduktes in unzerlegtem Zustand zur Recyclingquote des gesamten Produktes ergibt sich nach:

$$q_R(TP) = b(P(TP)) \cdot \frac{m(TP)}{m_{\text{Produkt}}} \quad (44)$$

- $q_R(TP)$ : Beitrag des Teilproduktes TP zur Recyclingquote eines Produktes  
 $b(P(TP))$ : Klassifizierungsfaktor zur Verwertungsart des Prozesses P für das Teilprodukt TP  
 $m(TP)$ : Masse des Teilproduktes TP  
 $m_{\text{Produkt}}$ : Gesamtmasse des Produktes

Die tatsächliche Verwertungs- oder Recyclingquote eines Teilproduktes ist abhängig von der rekursiv berechneten Zerlegung, d.h. von den aus dem Teilprodukt erzeugten Demontageschritten und den weiteren abgeleiteten Teilprodukten (vgl. Abschnitt 4.2). Die Ergebnisdaten der Teilprodukte werden um diese Quoten ergänzt, so dass neben dem aktuellen Wert und dem Verbindungszustand auch die jeweiligen Verwertungs- und Recyclingquoten festzuhalten sind. Aufgrund der Ähnlichkeit bei der Berechnung beider Quoten werden die Algorithmen im Folgenden aus Gründen der Verständlichkeit allgemein nur an einer Quote aufgezeigt.

### 5.3.2 Integration von Zielquoten bei der Demontageanalyse

Zielstellung für die Demontageanalyse unter Berücksichtigung von Verwertungs- und Recyclingquoten ist eine kostenoptimale Zerlegung, bei der die vorgegebenen Quoten als Nebenbedingung mindestens erfüllt sind. Alle Demontagezustände, bei denen die Zielquoten nicht erfüllt sind, werden als ungültig klassifiziert. Bei dem in Bild 53 gezeigten Beispiel sind die Zielquoten  $q_1$  und  $q_2$  vorgegeben.

Muss die Zielquote  $q_1$  erreicht werden, so ist die wirtschaftlich optimale Zerlegung nach den rechtlichen Anforderungen gültig. Bei Vorgabe der Zielquote  $q_2$  ist das Produkt über die optimale Demontagetiefe hinaus noch soweit zu zerlegen, bis die Quote erfüllt wird. Die Berechnung der optimalen Demontagetiefe unter Berücksichtigung vorgegebener Zielquoten für die Verwertung oder das Recycling wird damit zu einem gemischten diskret-binären Optimierungsproblem [91]. Als besondere Aufgabenstellung für die Demontageanalyse ergibt sich hierbei, dass die vorgegebenen Quoten nur für das gesamte Produkt erreicht sein müssen, und nicht für jedes einzelne Teilprodukt.

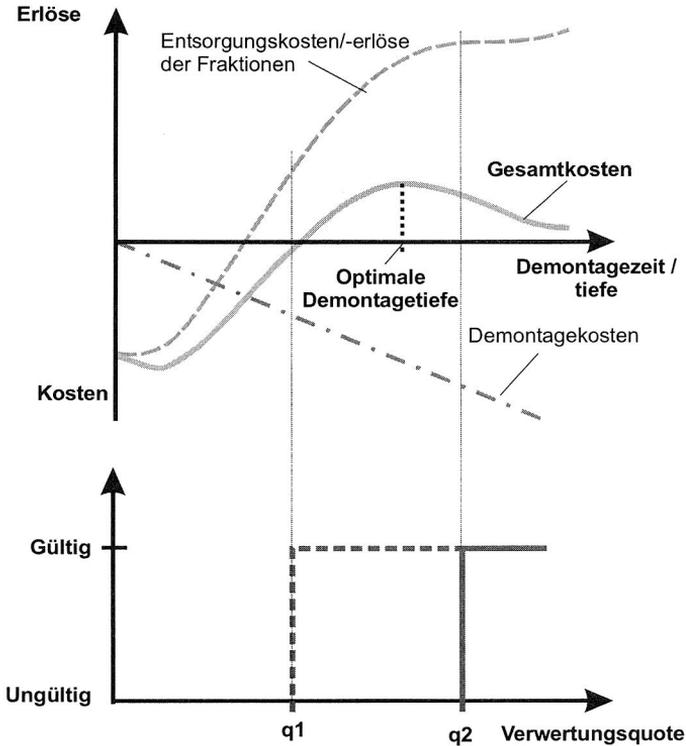


Bild 53: Gültige und ungültige Demontagezustände unter Berücksichtigung von Verwertungsquoten

Wird beispielsweise für ein Produkt, das bei der Demontage in zwei Teilprodukte gleicher Masse zerlegt wird, eine Recyclingquote von 60% gefordert, so wird diese Bedingung erfüllt, wenn eines der Teilprodukte zu 100% und das zweite zu 20% einer stofflichen Verwertung zugeführt wird. Allgemein gilt:

$$\frac{1}{m_{\text{Produkt}}} \cdot \sum_i q(TP_i) \cdot m(TP_i) \geq q_{\text{Ziel}} \quad (45)$$

- $m_{\text{Produkt}}$ : Gesamtmasse des Produktes
- $q(TP_i)$ : Verwertungs- oder Recyclingquote des Teilproduktes  $TP_i$
- $m(TP_i)$ : Masse des Teilproduktes  $TP_i$
- $q_{\text{Ziel}}$ : Vorgegebene Zielquote

Nachdem der bisherige Analysealgorithmus jedoch auf die Betrachtung von einzelnen Teilprodukten ausgelegt war, müssen nun zusätzliche Algorithmen für die Berücksichtigung der Verwertungs- und Recyclingquoten als Nebenbedingung entwickelt werden. Ziel muss es sein, die wirtschaftlich optimale Verteilung der einzelnen, teilproduktbezogenen Quoten  $q(TP_i)$  auf die Teilprodukte nach Gleichung ( 45 ) so zu

ermitteln, dass die Zielquote mindestens erreicht wird. Da die einzelnen Quoten aufgrund der Produktstruktur und der verwendeten Materialien nur diskrete Werte annehmen können, ist die Anzahl der möglichen Lösung endlich.

Die Ausgangsbasis für die Berücksichtigung von Zielquoten sind die aufgrund ihrer Massen maximal erreichbaren Beiträge der in einem Demontageschritt abgeleiteten Teilprodukte (vgl. Gleichung ( 43 ) und ( 44 )). Wird in dem Beispiel nach Bild 54 für das gesamte Produkt eine Quote  $q_0$  gefordert, so kann der Beitrag von Teilprodukt  $TP1$  dazu maximal  $m_1/m_0$  betragen, wenn die Verwertungsquote  $q_1=100\%$  beträgt. Der vom Teilprodukt  $TP2$  minimal zu leistende Anteil beträgt nach Gleichung ( 45 ):

$$\frac{1}{m_0} \cdot (q_1 \cdot m_1 + q_2 \cdot m_2) \geq q_0 ; q_1=100\% \quad (46)$$

$$\Rightarrow q_2 \geq \frac{q_0 \cdot m_0 - m_2}{m_1}$$

$q_i$ : Verwertungs- oder Recyclingquote des Teilproduktes  $i$

$m_i$ : Masse des Teilproduktes  $i$

Die maximal erreichbare Quote für ein Teilprodukt ist demnach der Initialwert zur Bestimmung der Anforderungen an die weiteren Teilprodukte. Sie kann auf der Basis der potentiellen Prozesse für die einzelnen im Teilprodukt enthaltenen Komponenten berechnet werden. Ist für eine Komponente kein einziger Verwertungsprozess bzw. Prozess zur stofflichen Verwertung als potentieller Prozess (vgl. Abschnitt 4.3.1) zulässig, so beträgt die maximale Quote:

$$q_{\max}(TP) = \frac{m(TP) - \sum_i m(k_i)}{m(TP)} \quad (47)$$

$q_{\max}(TP)$ : Maximal erreichbare Verwertungs- oder Recyclingquote für das Teilprodukt  $TP$

$m(TP)$ : Masse des Teilproduktes  $TP$

$m(k_i)$ : Masse des der Komponente  $k_i$

$k_i$ : Komponente  $i$ , deren Menge potentieller Prozesse nur aus Beseitigungsprozessen besteht

Mit den so berechneten Initialanforderungen an ein Bezugsteilprodukt können rekursiv die Teilprodukte gem. Abschnitt 4.2 und 4.3 analysiert werden, wobei die geforderten Quoten bei jedem Demontageschritt auf die abgeleiteten Teilprodukte weiterverteilt werden. Das zurückgegebene Ergebnis beinhaltet demnach die unter diesen Randbedingungen erreichte Quote für ein Teilprodukt, den Wert des Teilproduktes sowie die zu lösenden Verbindungen.

Die zurückgegebene Verwertungs- oder Recyclingquote kann unter den Mindestanforderungen liegen und führt damit zu einem ungültigen Ergebnis. Sind die Ergebnisse bis hin zum Wurzelknoten ungültig, so sind die vorgegebenen Zielquoten für das analysierte Produkt grundsätzlich nicht zu erreichen. In der Regel wird jedoch eine Quote zurückgegeben, die über der initial geforderten Mindestquote liegt. In diesem

Fall können die Mindestanforderungen bei der Analyse der weiteren Teilprodukte entsprechend reduziert werden.

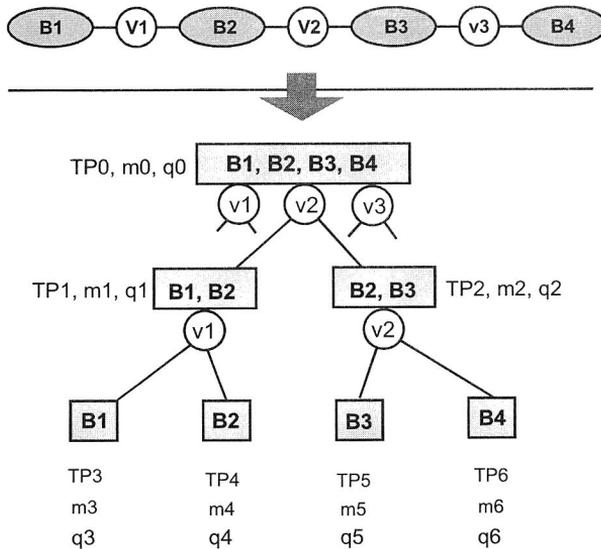


Bild 54: Beispiel zur Demontageanalyse unter Berücksichtigung von Verwertungs-/Recyclingquoten

Bei dem in Bild 54 gezeigten Beispiel wird zunächst das Teilprodukt *TP1* mit der minimal erforderlichen Quote analysiert. Aus dem Ergebnis wird die Minimalquote für die anschließende Analyse des Teilproduktes *TP2* berechnet. Nachdem es wirtschaftlich günstiger sein kann, eine höhere Anforderung an die Quote von *TP1* zu Gunsten der Quote von *TP2* zu stellen, wird in einem weiteren Iterationsschritt die ursprünglich erreichte Quote von *TP1* als Minimalforderung eingesetzt, und eine weitere Analyse angestoßen. Führt die erneute Analyse von *TP1* zu einem gültigen Ergebnis, so wird die Minimalquote für *TP2* entsprechend reduziert. Diese Iteration wird so lange durchgeführt, bis eine Erhöhung der Mindestquote für das Teilprodukt *TP1* nicht mehr zu einer gültigen Lösung führt. Aus den ermittelten Ergebnissen wird dann das wirtschaftlich optimale gewählt.

Das jeweilige Ergebnis für ein Teilprodukt ist demnach abhängig von der geforderten Quote. Bei der rekursiven Generierung des AND/OR-Graphen wird jedes Teilprodukt nur einmal erzeugt, d.h. die Ergebnisse bereits vorhandener Teilprodukte werden in der Regel wiederverwendet. Dies trifft auch bei der Berücksichtigung von Verwertungs- und Recyclingquoten zu, falls die Initialforderungen des erneuten Teilprodukt-Aufrufs zu den Randbedingungen, unter denen das bereits vorliegende Ergebnis berechnet wurde, kompatibel sind. Davon ist auszugehen, falls die beim erneuten Aufruf geforderte Quote zwischen der geforderten und der tatsächlich erreichten Quote des früheren Ergebnisses liegt. Ist dies nicht der Fall und wird bei einer erneuten A-

nalyse dennoch das frühere Ergebnis eingestellt, so lässt sich die zum früheren Ergebnis gehörende Forderung auf die aktuelle Forderung absenken. Durch die rekursive Analyse enthält das Ergebnis des Wurzelknotens die wirtschaftlich optimale Demontagestrategie, bei der die geforderten Verwertungs- bzw. Recyclingquoten mindestens erfüllt sind.

Wie bereits dargestellt, ist nach der Richtlinie WEEE das Erreichen sowohl bestimmter Verwertungs- als auch Recyclingquoten gefordert. Beide Quoten werden aufgrund unterschiedlicher Kriterien berechnet, führen jedoch zu den gleichen Algorithmen bei der Demontageanalyse. Durch das Verknüpfen beider Anforderungen in Form einer Konjunktion als Aussagenverbindung wird deren gleichzeitiges Erfüllen bei der Analyse sichergestellt.

## 5.4 Ökologische Bewertung bei der Produktanalyse

Nach dem Arbeitspapier zur Richtlinie EEE werden eine ökologische Bewertung von Elektro- und Elektronikgeräten sowie Ansätze zur umweltgerechten Produktentwicklung gefordert [141]. Aufgrund des aktuellen Diskussionsstandes und den noch zu erwartenden Änderungen unterbleibt eine detaillierte Berücksichtigung entsprechender Einzelanforderungen in diesem Kontext. Im folgenden wird daher ein Konzept dargestellt, über das verschiedene Ansätze zur Bewertung der Umweltverträglichkeit von Produkten in das Werkzeug ReGrEd / DisPlay integriert werden können. Damit soll dem Anwender aus einer einzigen Umgebung heraus eine einfache Bewertung der Umweltrelevanz eines Produktes gegeben werden. Detailfragen und Einzelentscheidungen werden in der Regel jedoch immer auf der Basis einer ausführlichen Betrachtung in Form einer Ökobilanz zu klären sein [174].

Bei einer ökologischen Produktbewertung in Form eines Life Cycle Assessments (LCA) können - eine entsprechende Zieldefinition vorausgesetzt - die Ergebnisse der Sachbilanz, Wirkungsabschätzung und Auswertung für Materialien und Standardbauteile als Module bereitgestellt werden. Diese Ergebnisse sind dann direkt beispielsweise den Materialien als Attribute zuzuweisen. Einige Auswertungsmethoden von Ökobilanzen berechnen auf der Basis der Stoff- und Energieströme sowie ggf. potentieller Umweltwirkungen eindimensionale Kennwerte. Dazu gehören unter anderem:

- Methode der Ökopunkte nach [1]
- Eco-Indicator-Methode [45]
- Methode der kumulierten Energieaufwände [110]

Die Intention einer lebenszyklusübergreifenden ökologischen Produktbewertung ist die Aufnahme aller Umweltwirkungen entlang der Zeitachse des Produktlebensweges [100]. Dazu wird dieser in die Abschnitte Produktion, Gebrauch und Entsorgung unterteilt, und die jeweiligen Prozesse mit den eingetragenen und ausgetragenen Stoffströmen erfasst. Der gesamte Produktlebensweg kann als dreidimensionales

Modell dargestellt werden, bei dem die Produktstruktur in zwei Dimensionen aufgespannt ist, und die dritte Dimension in der Zeitachse liegt (Bild 55). Damit entspricht das in ReGrEd / DisPlay dargestellte Produktmodell der Projektion der Produktstruktur in die zur Zeitachse normalen Ebene am Ende der Produktionsphase. Jedes Bauteil im Recyclinggraph kann in dieser Betrachtungsweise die gesamte Vorkette zu seiner Herstellung repräsentieren, d.h. durch die Ergänzung der relevanten Datenstrukturen kann eine einfache, ökologische Bewertung in ReGrEd / DisPlay integriert werden.

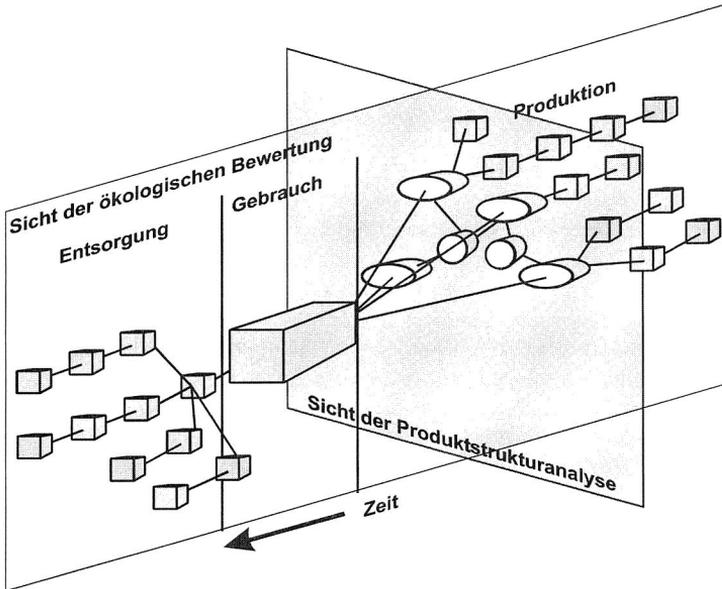


Bild 55: Ebenen der Produktstrukturanalyse und ökologischen Produktbewertung

Zur Vereinfachung einer ökologischen Bewertung ist die Herstellungsphase in die Bereitstellung der Werkstoffe bzw. Halbzeuge und in die Phase der Formgebung zu unterteilen [214]. Bauteile bestehen aus den zu technischen Materialien zusammengesetzten Basismaterialien, zu deren Herstellung Umweltbelastungen als eindimensionale Kennwerten angegeben werden können. Durch eine Erweiterung des Datenschemas für Basismaterialien können diese Kennwerte massebezogen für die Werkstoffherstellung in das Produktmodell integriert werden. Durch eine Erweiterung der Datenbasis für technische Materialien können wesentliche Fertigungsprozesse (z.B. Spritzgießen, Härten) mit ihren eindimensionalen ökologischen Kennwerten dargestellt werden.

Verbindungen stehen im Produktmodell von ReGrEd / DisPlay für Prozesse, über die einzelne Bauteile zusammengefügt sind. Durch eine Erweiterung der Datenstruktur

für Verbindungen können ökologische Kennwerte für relevante Montageprozesse (z.B. Schweißen) in das Produktmodell aufgenommen werden. Auf diese Weise lässt sich eine grobe ökologische Bewertung der Herstellungsphase durchführen, mit der eine Richtungsbestimmung bezüglich der Umweltwirkungen möglich ist.

Die Gebrauchsphase von Produkten ist – abgesehen von Verbrauchsmaterial - unabhängig von der Produktstruktur zu bewerten. Die Erfassung der relevanten Daten kann entweder in einem entsprechenden Modul im System ReGrEd / Display oder extern erfolgen. Nachdem ReGrEd / Display explizit ein System zur Produktstrukturanalyse ist, werden Konzepte zur Bewertung der Gebrauchsphase in diesem Kontext nicht weiter verfolgt.

Entsorgungsprozesse sind durch die Eingangsrestriktionen und dem massebezogenen Wert des eingebrachten Materialgemisches definiert. Bei Verwertungsprozessen ist meist ein gewisser Schwund an Material festzustellen, d.h. in der Regel werden nicht 100% eines eingebrachten Materials wieder als Sekundärrohstoff in den Stoffkreislauf gebracht [216]. Zu jedem zulässigen Material kann in der Prozessdefinition ein Wert angegeben werden, der den Anteil an tatsächlich erzeugten Sekundärrohstoffen quantifiziert. Über diesen Anteil und den für die Basismaterialien hinterlegten Aufwänden für die Herstellung der Primärrohstoffe kann dann eine ökologische Gutschrift für den Ersatz von Primärrohstoffen durch Sekundärrohstoffe berechnet werden.

Wird zusätzlich der ökologische Aufwand für die Durchführung jedes Prozesses ergänzt, so ergibt sich für einen Entsorgungsprozess die Umweltwirkung als Summe aus Durchführungsaufwand und Einzelgutschriften für die Herstellung von Sekundärrohstoffen (Gleichung ( 48 )). Gutschriften gehen bei der ökologischen Bewertung per Definition mit negativem Vorzeichen ein [104], [174], [214].

$$U_{\text{Entsorgung}}(\text{Fraktion}) = u_{\text{Prozess}} \cdot m_{\text{Fraktion}} + \sum_i s_i \cdot m_i \cdot u_i \quad (48)$$

$U_{\text{Entsorgung}}(\text{Fraktion})$ :	Umweltwirkung aus der Entsorgung einer Fraktion
$u_{\text{Prozess}}$ :	Spez. Umweltwirkung aus der Durchführung eines Entsorgungsprozesses
$m_{\text{Fraktion}}$ :	Masse einer Stofffraktion
$s_i$ :	Tatsächlich in den Stoffkreislauf zurückgeführter Anteil des Materials i
$m_i$ :	Masse des Materials i in einer Stofffraktion
$u_i$ :	Spez. Umweltwirkung aus der primären Herstellung des Materials i

Bild 56 fasst die Verknüpfung des Systems ReGrEd / Display mit der ökologischen Produktbewertung zusammen. Die entsprechende Darstellung der auf diese Weise berechneten Umweltwirkungen aus Herstellung und Entsorgung eines Produktes kann auf verschiedene Weise erfolgen und den individuellen Bedürfnissen des Anwenders angepasst werden. Verschiedene rechnergestützte Werkzeuge zur ökologischen Produktbewertung (z.B. nach [7]) bieten eine große Bandbreite dazu. Eine detaillierte Darstellung von Konzepten zur Ergebnisdarstellung wird an dieser Stelle nicht gegeben.

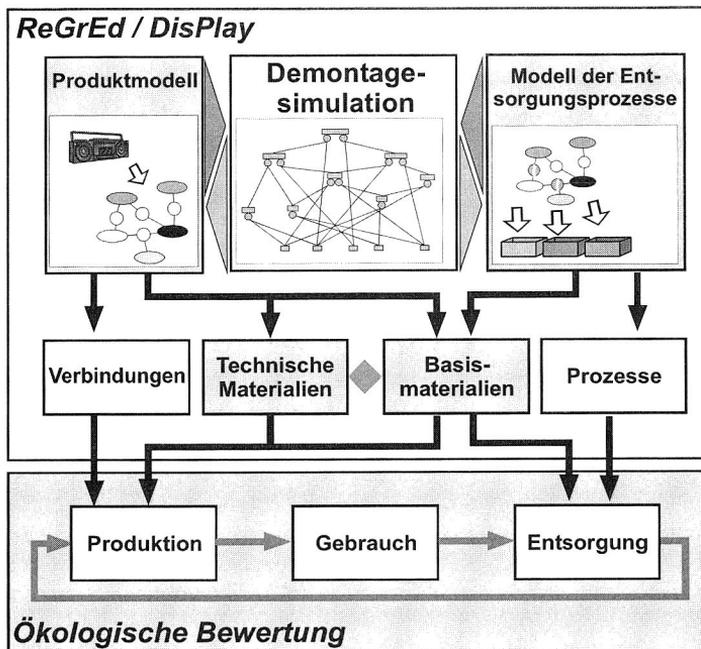


Bild 56: Integration einer ökologischen Bewertung in ReGrEd / Display

## 6 Herausforderungen durch innovative Ansätze der Umweltpolitik

Seit etwa 30 Jahren sind Umweltaspekte Gegenstand der Politik in der Europäischen Union [18]. Das klassische umweltpolitische Instrument war in den ersten Jahren aus der Fürsorgepflicht des Staates heraus das Ordnungsrecht in der Form „command & control“ und fokussierte insbesondere auf Herstellungsprozesse (prozessbezogener Umweltschutz) und die ordnungsgemäße, ökologisch vertretbare Entsorgung von Abfällen [187]. Festzustellen ist dabei, dass durch die Vorgabe statischer Grenzwerte oftmals die Anreizfunktion für die Verursacher von Umweltbelastungen fehlte. Freiwillige Maßnahmen wurden bisher wenig berücksichtigt und spielten insgesamt eine eher untergeordnete Rolle [196]. Ein weiteres Handlungsfeld wird durch das eigentliche Gesetzgebungsverfahren aufgespannt. Von der Problemfeststellung und den ersten Entwürfen einer gesetzlichen Regelung bis zu deren Inkrafttreten vergehen in der Regel einige Jahre, so dass alleine das Umweltrecht kein ausreichend flexibles Instrument darstellt, mit dem auf erkannte Umweltprobleme in einem sich schnell entwickelnden technisch-wirtschaftlichen Umfeld reagiert werden kann.

Deutlich sind gerade diese Aspekte auch an den Verfahren für die europäischen Richtlinien zu Elektro- und Elektronikgeräten aufzuzeigen. Während die Zielsetzung der Richtlinien bei Industrie-, Verbraucher- und Umweltverbänden gleichermaßen positiv bewertet wird, sind die Einschätzung der Auswirkungen und die Anforderungen an die Ausgestaltung abhängig von der jeweiligen Position sehr unterschiedlich ausgeprägt. Nicht zuletzt aufgrund der enormen, wirtschaftlichen Tragweite der Richtlinien bringt jeder Beteiligte spezifische Argumente, um negative Auswirkungen auch in Form von Reputationsverlust im eigenen Bereich zu mindern. Nachdem gerade am Beispiel der europäischen Richtlinien zu Elektro- und Elektronikgeräten in hervorragender Weise das Dilemma produktbezogener Umweltgesetzgebung und der daraus resultierende Bedarf nach alternativen politischen Lösungen abzuleiten ist, werden im folgenden die potentiellen Auswirkungen der europäischen Richtlinien zu Elektro- und Elektronikgeräten anhand der Standpunkte und Bedenken der verschiedenen betroffenen Akteure dargestellt. Daran können auch die vielschichtigen Problemfelder der beteiligten Gruppierungen aufgezeigt werden, die bei der technischen Umsetzung umweltpolitischer Instrumente aus der Sicht eines Herstellers zu berücksichtigen sind.

### 6.1 Standpunkte zu den europäischen Richtlinien über Elektro- und Elektronikgeräten

#### *Organe der europäischen Gesetzgebung*

Unterschiedliche Positionen zu den Richtlinienentwürfen für WEEE und ROHS werden bereits innerhalb der am europäischen Gesetzgebungsverfahren beteiligten Organe vertreten. So sollten beispielsweise die von der Europäischen Kommission ursprünglich vorgeschlagenen Verwertungs- und Recyclingquoten von 50 bis 75 % ab-

hängig von der Gerätekategorie [112] nach dem Wunsch des europäischen Parlaments auf 60 bis 85% angehoben werden [36]. Der Rat der Umweltminister schließt sich dagegen dem Kommissionsvorschlag mit Ausnahme der Quoten für Unterhaltungselektronik an, die um 10% höher liegen sollen [160].

Der Wirtschafts- und Sozialausschuss fordert „ehrgeizigere Ziele“ für das Erreichen der Verwertungsquoten [128], die laut Kommissionsvorschlag erst bis 2006 zu erfüllen und bis 2009 festgeschrieben sind [112]. Dieser Forderung konnten sich weder das europäische Parlament noch der Ministerrat anschließen. Anlass weiterer Diskussionen war die von der europäischen Kommission vorgeschlagene, unverbindliche Sammelquote von 4 Kilogramm pro Einwohner und Jahr [112], zu der sowohl vom Wirtschafts- und Sozialausschuss als auch vom Parlament eine Verschärfung hin zu einer bindenden Quote von 6 Kilogramm pro Einwohner gefordert wurde [36], [128]. Dies soll durch ein Wegwerfverbot für Elektro(nik)altgeräte ab Mitte 2004 erreicht werden [142]. Der Ministerrat blieb in seinem gemeinsamen Standpunkt letztlich bei dem Kommissionsvorschlag [160], so dass dieser Aspekt voraussichtlich im Vermittlungsausschuss zu klären ist. Ebenso wird der Zeitpunkt diskutiert, ab der die Verwendung von Blei, Quecksilber, Cadmium, usw. nach der RoHS eingeschränkt wird: nach dem Vorschlag der Kommission sollten Stoffbeschränkungen ab 2008 greifen [113], nach Auffassung des Parlaments ab 2006 [36] und nach Meinung des Ministerrates ab 2007 [161].

### ***Einschätzung außereuropäischer Wirtschaftsverbände***

Strittig sind einige Aspekte der europäischen Richtlinien zu Elektro(nik)geräten auch auf globaler Ebene. So wird vom europäischen Parlament gefordert, dass gebrauchte Elektro- und Elektronikaltgeräte, die in Nicht-EU-Länder exportiert werden, zur Wiederverwendung als ganzes Produkt geeignet und bestimmt sein müssen, und nicht zur Verwertung oder Beseitigung [36]. Dies würde jedoch nach Ansicht der O-ECD eine unmittelbare Einschränkung des freien Warenverkehrs bedeuten und unverzüglich zu entsprechenden Verfahren bei der WTO führen [147].

Auch die US-Handelskammer sieht durch die EU-Direktiven eine Beeinträchtigung des internationalen Handels durch die geplanten Stoffbeschränkungen. Demnach würden diese im Widerspruch zum internationalen Handelsrecht und dem GATT-Welthandelsabkommen stehen [125]. Zudem kritisieren sowohl der EU-Ausschuss der US-Handelskammer als auch die American Electronics Association und die amerikanische Electronic Industries Alliance die fehlenden wissenschaftlichen Risikoabschätzungen für die beschränkten Stoffe [4]. Die erhebliche, finanzielle Belastung sowie die komplexen Mechanismen zur Umsetzung der Richtlinien begründen weitere Befürchtungen zu negativen Auswirkungen [126]. Der EU-Ausschuss der US-Handelskammer vertritt die US-amerikanische Elektrobranche, die nun neben der Rücknahmepflicht aufgrund der Stoffbeschränkungen auch Produkte speziell für den europäischen Markt ohne die relevanten Substanzen herstellen muss.

### **Standpunkte der nationalen und europäischen Industrieverbände**

Ähnliche Befürchtungen wie die US-amerikanischen Hersteller werden auch von nationalen und europäischen Industrieverbänden angebracht. Während die europäische Kommission von Kosten für Entsorgung und Sammlung des Elektro(rik)schrotts von ca. 500 - 900 Mio. € pro Jahr ausgeht [112], beziffert der ZVEI die von der Industrie zu tragenden Kosten in der Anfangsphase auf etwa 1,5 - 2 Mrd. € und langfristig auf 7,5 Mrd. € pro Jahr [41]. Dementsprechend sind Zusatzkosten in Höhe von 2 - 5% - in Einzelfällen bis 10% - bezogen auf den Neugerätepreis anzusetzen [42]. Der Rückstellungsbedarf für die Erfüllung der europäischen Anforderungen liegt für die deutsche Elektroindustrie bei ca. 20 - 30 Mrd. € und beträgt damit ein Vielfaches der Vorsteuergewinne der betroffenen Unternehmen [139].

Des Weiteren kritisiert der Verband die Unterscheidung zwischen Verwertungs- und Recyclingquoten sowie deren Höhe, weil dadurch der Verwertungsweg statisch festgelegt wird [135], [139]. Aktuell würde dies beispielsweise bedeuten, dass sehr alte Kunststoffteile, die ehemals mit Cadmium als Farbstoff und gefährlichen Flammenschutzmitteln versehen wurden, nicht aus dem Stoffkreislauf ausgeschlossen werden [23], [42]. Der Wiedereinsatz dieser Stoffe steht jedoch eindeutig im Widerspruch zu den Bestimmungen der RoHS. Nach Ansicht des britischen Industrieverbandes ICER sollten deshalb in den ersten Jahren die Ziele für Wiederverwendung und stoffliche Verwertung zu Gunsten der energetischen Verwertung niedriger angesetzt werden [134]. Auch der Europäische Verband der Hersteller von Elektro-Hausgeräten CE-CED sowie der Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien e.V. (Bitkom) sieht die vorgeschlagenen Recyclingquoten zum vorgegebenen Stichtag als unrealistisch an, weil sie unter den aktuellen technischen Randbedingungen nicht zu erfüllen sind [138], [155].

Ebenso wird die besondere Favorisierung der Wiederverwendung für alle Produktkategorien als kritisch bewertet. Beispielsweise wird sich ein Kunde, der in 10 Jahren einen tragbaren Kassettenrekorder zurückgibt, als Neugerät mit gleicher Funktion z.B. einen MP3-Spieler kaufen, während in der Zwischenzeit zahlreiche Kunden tragbare CD-Spieler kaufen würden [139]. Ein Markt für Kassettenrekorder oder Teile davon existiert zu diesem Zeitpunkt voraussichtlich also nicht mehr. Außerdem sollte aus ökologischen Gründen von einer Lebensdauerverlängerung für diejenigen Produkte abgesehen werden, bei denen neuere Generationen eine wesentlich bessere Umweltverträglichkeit aufweisen (z.B. Kühlschränke, Waschmaschinen) [42].

Als innovationshemmend wird von den Industrieverbänden die Beschränkung von Stoffen angesehen, deren Substitute noch nicht vorhanden oder hinsichtlich ihrer Umweltrelevanz nicht ausreichend erforscht sind [116]. Eine detaillierte Ausnahmeliste für die Verwendung derartiger Stoffe in spezifischen Anwendungen kann beispielsweise umweltverträglichere Innovationen nicht berücksichtigen [42].

Auch der Verband der Europäischen Kunststoffhersteller APME hält die Regelungen zur Beschränkung und selektiven Behandlung von Kunststoffen mit bromierten Flammenschutzmitteln für überzogen, weil diese einerseits zur Erfüllung vielfältiger Si-

cherheitsbestimmungen erforderlich sind, und die Identifizierung bzw. Entnahme bei der Entsorgung derzeit kaum möglich ist [122], [124]. Nach einer Stellungnahme des Europäischen Verbands der Hersteller von Elektro-Hausgeräten CECED sollte deshalb die RoHS erst zum 01.01.2010 in Kraft treten [155].

Die größten Reibungspunkte zwischen Industrie und EU bestehen jedoch hinsichtlich der Finanzierungsverantwortung bei der Entsorgung von historischen Elektro- und Elektronik-Altgeräten, bei der Entsorgung sog. „Waisenprodukte“<sup>3</sup> sowie hinsichtlich der potentiellen (Mit-)Finanzierung der haushaltsnahen Sammlung. Zunächst wurden von Seiten des ZVEI Chancen für einen Konsens zur gemeinschaftlichen Finanzierung der Entsorgung historischer Abfälle eingeräumt, die über einen gesondert ausgewiesenen Betrag an den Verbraucher weitergegeben werden sollten [148]. Gemäß eines vom ZVEI in Auftrag gegebenen Rechtsgutachten wird die Finanzierung jedoch als grundgesetzwidrig und nicht mit der aktuellen EU-Rechtssprechung vereinbar angesehen, weil damit gegen das Verbot einer rückwirkenden Gesetzgebung verstoßen wird. Ebenso ist eine Übernahme der Verantwortung für Fremdprodukte und historische Waisenprodukte abzulehnen, da der Hersteller keinerlei Einfluss auf die verwertungsgerechte Gestaltung dieser Geräte hat [42].

Auch die Übernahme der Finanzierung einer haushaltsnahen Sammlung wird von den verschiedenen Industrieverbänden abgelehnt. Diese Leistungen werden nach Auffassung des ZVEI nicht unter marktwirtschaftlichen Bedingungen erbracht und sind nicht kontrollierbar [148], [157], [159]. Selbst aus Sicht von Florenz, dem Berichterstatter des Europäischen Parlaments, stellt das Heranziehen der Hersteller zur teilweisen oder vollständigen Finanzierung der haushaltsnahen Abholung für diese ein finanzielles Desaster dar, zumal dadurch auch die Nutzer von jeglicher Verantwortung entbunden werden [157].

Eher unklar bleibt dabei der sachliche Zusammenhang zwischen einer Warnung von Florenz [37] an die Industrie bezüglich weiterer „Drohungen mit dem Rechtsanwalt“ und der potentiellen Ausdehnung der Produzentenverantwortung auf die Finanzierung eben dieser haushaltsnahen Sammlung.

### **Auswirkungen für den Handel**

Die Organisation der Sammlung ist in gleicher Weise auch ein Diskussionspunkt für den Handel. So wird die generelle Rücknahmeverpflichtung für Elektro- und Elektronikaltgeräten insbesondere für den Einzelhandel abgelehnt, weil beispielsweise Geschäfte in den Innenstädten nicht über die räumlichen, hygienischen und finanziellen Voraussetzungen verfügen, um die bisher vorgegebenen Anforderungen zu erfüllen [37], [135]. So würde die Bereitstellung von nur 5 Quadratmetern Rücknahmefläche für beispielsweise etwa 6 Küchenherde bereits einer Reduktion um 1,5% der durchschnittlichen und sehr teuren Verkaufsfläche eines Geschäftes betragen [6]. Eine

---

<sup>3</sup> „Waisenprodukte“ sind Geräte, die nicht eindeutig einem Hersteller oder Vertreiber zuzuordnen sind.

Rücknahme von Elektro- und Elektronikaltgeräten durch den Handel sollte deshalb nur auf freiwilliger Basis erfolgen [6], [37], [135].

### ***Auswirkungen für den Verbraucher***

Als essentiell für die Verbraucher wird von der europäischen Verbraucherorganisation BEUC der problemlose Zugang zu den Sammelsystemen angesehen. Nur durch die für den Verbraucher kostenfreie Rückgabemöglichkeit für Elektro- und Elektronikaltgeräte kann sichergestellt werden, dass kleine Produkte wie z.B. Rasierapparate oder Haarföhns nicht zusammen mit dem übrigen Abfall in der Mülltonne entsorgt werden [121]. Die Kostenfreiheit wird dabei auch auf den Kauf ausgedehnt. Der europäische Verbraucherverband fordert darüber hinaus eine wesentliche Verschärfung sowohl der Übergangsfristen für die Sammlung von „historischem Abfall“ als auch bezüglich der Sammelziele.

Die vom EU-Ausschuss der amerikanischen Handelskammer angeführte Befürchtung, dass das Aufbringen zusätzlicher Symbole zum Entsorgungsverbot in der Abfalltonne den Verbraucher verwirren könnte [121], werden nicht geteilt. Bedenken bestehen von Seiten der BEUC bezüglich der Auswirkungen auf die Produktsicherheit. So muss ausgeschlossen werden, dass besonders demontagefreundliche Produkte zu einer Unfallgefahr für den Nutzer führen [121].

### ***Position der Kommunen***

Die bisher für die Sammlung und Entsorgung von Elektro(nik)schrott verantwortlichen Kommunen begrüßen verständlicherweise die Regelungen der WEEE, weil dadurch die Hersteller zumindest für die Kosten der Entsorgung aufkommen müssen [42], [151]. Sollten die Hersteller auch für die Finanzierung der Sammlung in die Pflicht genommen werden, so reduziert sich der finanzielle, bisher durch Abfallgebühren getragene Aufwand der Kommunen für Elektro- und Elektronikaltgeräten nochmals. Zusätzlich können neue Geschäftsfelder durch die Übernahme von Dienstleistungen für die Hersteller unter Nutzung bereits vorhandener Infrastrukturen erschlossen werden.

Dem gegenüber wird vor einer exklusiven Einbindung der Kommunen bzw. Monopolisierung der Sammelsysteme ähnlich dem Dualen System Deutschlands für Verpackungsabfall gewarnt, weil diese zu einer getrennten Sammlung nicht in der Lage sind [69]. Sehr schnell können sich die üblichen Erscheinungen monopolistischer strukturierter Bereiche wie niedriges innovatorisches Potential, überhöhte Kosten bzw. Gebühren und Diskriminierung potentieller Wettbewerber zeigen [189].

### ***Standpunkt der Entsorgungswirtschaft***

Die Verbände der Entsorgungswirtschaft sehen die europäischen Richtlinien verständlicherweise ebenso positiv wie die Kommunen, weil dadurch eine erhebliche Steigerung der Auslastung zu erwarten ist. Nach Meinung des Bundesverbands der deutschen Entsorgungswirtschaft e.V. (BDE) sollten die Kommunen für die Erfas-

sung der Elektro- und Elektronikaltgeräte verantwortlich sein, während die spezialisierten Verwertungsbetriebe die eigentliche Zerlegung und Aufbereitung übernehmen [117]. Eine Umfrage bei den Mitgliedsbetrieben des Bundesverbands Sekundärrohstoffe und Entsorgung e.V. (bvse) bezüglich der Recyclingquoten ergab jedoch, dass diese vom Standpunkt der Entsorgungswirtschaft für Haushaltskleingeräte und Unterhaltungselektronik zu hoch sind [49]. Von der Erweiterung der Herstellerverantwortung werden wesentliche Impulse hinsichtlich einer demontage- und recyclinggerechten Produktgestaltung erwartet.

### **Stellungnahme der Umweltverbände**

Das Europäische Umweltbüro EEB als Dachorganisation der europäischen Umweltverbände sieht bereits im Vorschlag der Kommission eine Schwächung der ursprünglichen Ziele und einen Kompromiss aufgrund des Drucks der Industrieverbände – insbesondere auch der US-Industrie [77]. So werden die Einrichtung von Sammelsystemen und das Erreichen der Recyclingquoten bereits bis 2005 sowie ein Sammelziel von 6 kg pro Einwohner und Jahr bis 2006 gefordert [78]. Sammelziele und Quoten sollten ab 2007 überprüft werden. Darüber hinaus fordert das EEB die Finanzierung der haushaltsnahen Sammlung durch die Hersteller [77]. Letztlich soll – gem. EEB – Cadmium, Blei, Quecksilber, sechswertigem Chrom und allen halogenierten Flammschutzmitteln bis 2006 in allen Anwendungen ersetzt werden.

### **Zusammenfassende Bewertung aktueller Gesetzgebungsverfahren**

Mit Blick auf die verschiedenen Auswirkungen, den damit verbundenen Einwänden (Bild 57) und die erforderliche Kompromissfähigkeit wird die geringe zeitliche und inhaltliche Flexibilität aktueller Gesetzesvorhaben deutlich, die als *command-and-control* ausgeführt sind [187]. Die endgültige Fassung der Richtlinien zu Elektro- und Elektronikgeräten (vgl. Abschnitt 2) wird in jedem Fall ein Kompromiss sein, durch den einige Akteure weniger und andere mehr Nachteile zu tragen haben. Dies gilt insbesondere auch für die Umwelt als Akteur, weil dadurch letztlich nicht die eigentlichen, produktbezogenen Optimierungspotentiale erschlossen werden.

Diese Defizite müssen durch flexible Modelle für die Anwendung umweltpolitischer Instrumente vermieden werden [210]. Dies kann insbesondere auch durch freiwillige Maßnahmen der Beteiligten erreicht werden, die vor der Auflage neuer Gesetzesvorhaben zu entwickeln und zu implementieren sind [157]. Dieser Paradigmenwechsel der Umweltpolitik ist in den letzten 10 - 20 Jahren durch die zunehmende Integration kooperierender und verhandelbarer Elemente erkennbar und wird durch die „Integrierte Produktpolitik“ konzeptionell und strategisch zusammengefasst [187]. Der Ansatz der Integrierten Produktpolitik bildete sich aus dem Nachhaltigkeits-Begriff, der als Prinzip der Umweltpolitik seit Ende der 80er Jahre eingeführt ist, und aus den Ansätzen der produktorientierten Umweltpolitik [18].

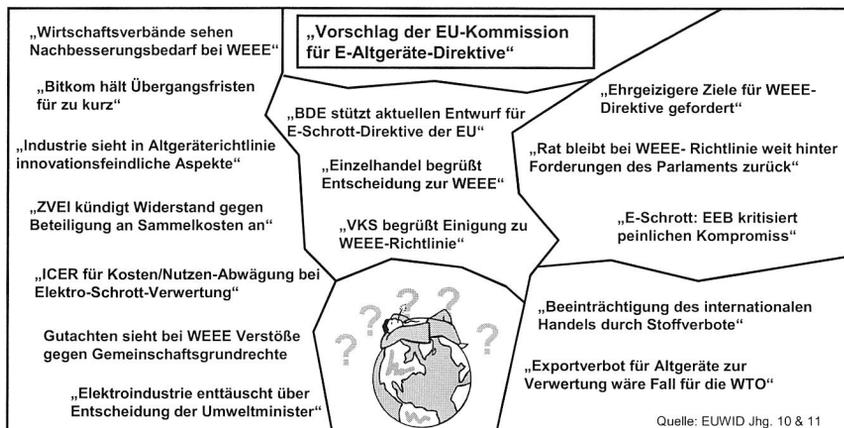


Bild 57: Konträre Positionen zu Gesetzgebungsvorhaben

Im Jahre 1997 wurden von Ernst & Young im Rahmen einer Studie die Maßnahmen einer Integrierten Produktpolitik, die Akteure und die Auswirkungen von Produkten über ihren gesamten Lebenszyklus erfasst [102]. In einem von der Europäischen Kommission organisierten Workshop für die beteiligten Gruppen wurde Ende 1998 einvernehmlich die Bedeutung der Lebenszyklusbetrachtung, der Einbeziehung der Beteiligten und der Informationsbereitstellung für dieses Konzept hervorgehoben. Anfang Februar 2001 wurden die bisherigen Ergebnisse und Erkenntnisse zur Integrierten Produktpolitik als Diskussionsgrundlage in einem *Grünbuch* der Europäischen Kommission zusammengefasst [136], die im Rahmen einer Konferenz Anfang März 2001 in Brüssel mit Vertretern verschiedener Akteure erörtert wurden. Nach Aufnahme und Auswertung der verschiedenen Stellungnahmen soll das *Grünbuch* bis zum Frühjahr 2002 in ein *Weißbuch* umgesetzt werden [158].

## 6.2 Konzept der Integrierten Produktpolitik (IPP)

Integrierte Produktpolitik ist eine Strategie zur Neuorientierung und Stärkung produktbezogener, umweltpolitischer Maßnahmen [136]. Diese sollen ergänzt werden, um auch ungenutztes Umweltpotential bei Produkten und Dienstleistungen über ihren gesamten Lebenszyklus hinweg auszuschöpfen [127]. Dabei hat eine Konzentration der Aktivitäten auf Phasen zu erfolgen, in denen insbesondere Einfluss auf die Umweltauswirkungen genommen werden kann, d.h. die Phase des Ökodesigns, die Entscheidungen der Verbraucher und die Berücksichtigung des Verursacherprinzips bei der Festlegung der Produktpreise [136].

Der Integrationsgedanke basiert auf verschiedenen Handlungsebenen. So werden im Rahmen der Integrierten Produktpolitik sowohl der ökologische als auch der ökonomische Produktlebensweg berücksichtigt [187]. Außerdem bezieht sich die Integration auf ein umfassendes Konzept, das verschiedene Instrumente in einem spezifi-

schen *Mix* mit dem Ziel kombiniert, durch verstärkte Mitwirkung aller Akteure eine umweltfreundlichere Ausgestaltung von Produkten und Dienstleistungen zu erreichen [136].

Prinzipiell werden alle Produkte und Dienstleistungen in den Geltungsbereich einer Integrierten Produktpolitik einbezogen, wobei konkrete Maßnahmen in der Praxis allgemein oder auch spezifisch auf Produkte ausgelegt sein können [102]. Dienstleistungen werden nach [136] nicht ausgeschlossen, stehen jedoch nicht primär im Fokus einer Integrierten Produktpolitik. Kritisch anzumerken ist dabei, dass letztlich die von einem Produkt bereitgestellte Dienstleistung die einzige Motivation für dessen Herstellung, und dass durch innovative Nutzungskonzepte ein wesentlicher Trend hin zum Vertrieb von Dienstleistungen an Stelle von Produkten festzustellen ist. Daraus ist abzuleiten, dass primär die Dienstleistung im Zentrum Integrierter Produktpolitik stehen sollte, und das eigentliche Produkt zwangsläufig mitzubetrachten wäre.

Bei der Umsetzung einer Integrierten Produktpolitik steht die unterstützende Tätigkeit des Gesetzgebers durch die Festlegung rechtlicher Rahmenbedingungen, das Schaffen von Anreizen für Aktivitäten der Beteiligten und durch die Vorgabe von Umweltzielen im Vordergrund [204], [209]. Dazu wird den betroffenen Akteuren gerade in der aktuellen Klärungsphase zur Gestaltung der Integrierten Produktpolitik ein wesentliches Entwicklungsfeld für deren Beitrag eingeräumt, durch welche die auf freiwilliger Basis zu erreichenden Wirkungen aufgezeigt werden können.

Rechtsvorschriften sollen möglichst den Rahmen für diese freiwillige Maßnahmen, wie z.B. Umweltzeichen, geben und für eine Harmonisierung der Wettbewerbsbedingungen sorgen [197]. Sehr direkt wird im Grünbuch der Europäischen Kommission jedoch auch auf das Eingreifen des Gesetzgebers hingewiesen, falls freiwillige Ansätze nicht zu den gewünschten Ergebnissen führen [136].

Damit sind die wesentlichen Grundprinzipien einer Integrierten Produktpolitik beschrieben [17], [187] (Bild 58):

**Verursacher-/ Vorsorgeprinzip:** diese umweltpolitischen Prinzipien sind bereits im EG-Vertrag [109] festgeschrieben und finden zunehmend Berücksichtigung bei der Gestaltung rechtlicher Regelungen (vgl. Abschnitt 2).

**Aufgabenteilung/ Kooperationsprinzip:** jeder Akteur entlang des Produktlebensweges soll die durch ihn beeinflussbaren Umweltpotentiale erschließen [136], [187].

**Implementationsprinzipien:** ein wesentliches Prinzip zur Implementierung Integrierter Produktpolitik ist die Information und Kommunikation der Akteure untereinander. Daneben sind zur Umsetzung von IPP das Subsidiaritätsprinzip, die Komplementierung der verschiedenen Maßnahmen, die Erarbeitung spezifischer produktbezogener Maßnahmen sowie die Integration in andere relevante Politikbereiche und ein Monitoring der IPP-Wirkungen zu berücksichtigen [209].

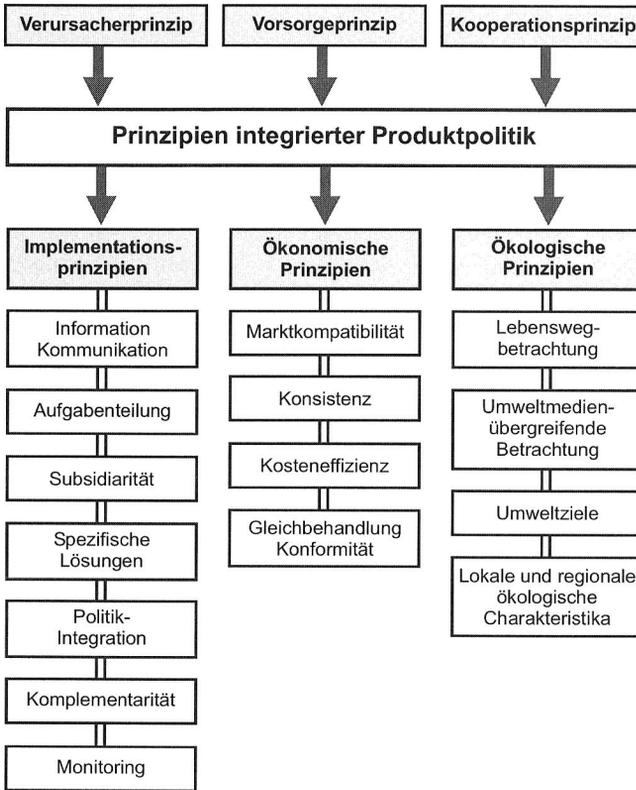


Bild 58: Prinzipien einer Integrierten Produktpolitik nach [187]

**Ökonomische Prinzipien:** Integrierte Produktpolitik setzt auf Selbstregulierungseffekte des Marktes durch das Zusammenspiel von Angebot und Nachfrage [136], [158]. Wesentlichen Einfluss darauf werden die Kosteneffizienz von IPP-Maßnahmen und die regionale Konformität umweltpolitischer Instrumente bzw. Gleichbehandlung von in- und ausländischen Akteuren haben [18], [187].

**Ökologische Prinzipien:** grundlegende ökologische Prinzipien einer Integrierten Produktpolitik sind die umfassende Betrachtung des gesamten Produktlebensweges sowie die Berücksichtigung von Verbindungen zwischen verschiedenen Umweltmedien, um eine Problemverlagerung sowohl zwischen den Lebensphasen als auch zwischen den Medien zu vermeiden. Daneben muss eine Integrierte Produktpolitik in die Gesamtstrategie der nachhaltigen Entwicklung und den damit verknüpften Umweltzielen eingebettet sein [210], [212], [217]. Aus diesen Prinzipien lassen sich demnach die Integration, die Information bzw. Kommunikation sowie die Kooperation als wesentliche Charakteristika einer Integrierten Produktpolitik ableiten [187].

### 6.2.1 Beitrag der Akteure im Produktlebenszyklus

Das Konzept der Integrierten Produktpolitik setzt auf eine starke Beteiligung aller Akteure auf sämtlichen, potenziellen Handlungsebenen. Die Rolle des Gesetzgeber als Hauptakteur der Umweltpolitik wurde im vorangegangenen Abschnitt bereits umrissen. Parallel dazu wird in [106], [187] das „Produktmanagement“ als Bereich eingeführt, der die Aktivitäten und Maßnahmen von nicht staatlichen Akteuren zusammenfasst. Einer dieser Akteure ist der Verbraucher, der insbesondere durch das Prinzip der Information und Kommunikation in die Lage versetzt werden soll, eine leichtere und sachkundige Kaufentscheidung zu Gunsten umweltfreundlicher Produkte zu treffen [136]. Weitere Akteure sind die sog. Nichtregierungsorganisationen (NGO) wie z.B. Umweltverbände, welche die Möglichkeit erhalten, an der Ermittlung von Problemen und der Entwicklung praktischer Lösungen mitzuwirken. Der wesentlichste Beitrag im Bereich Produktmanagement wird jedoch auf Grund der Einflussmöglichkeiten von der Industrie und dem Einzelhandel erwartet.

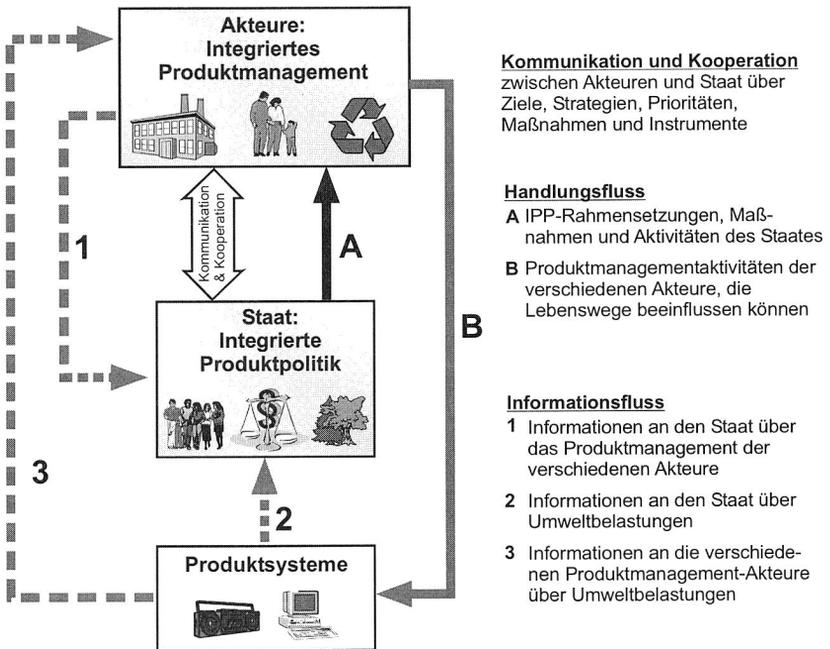


Bild 59: Zusammenwirken von Produktmanagement und Produktpolitik nach [187]

Bild 59 zeigt das langfristige Zusammenwirken der Bereiche Produktmanagement und Produktpolitik nach [187]. Durch intensive Kommunikation und Kooperation zwischen Produktpolitik und Produktmanagement ist ein ständiger Austausch über Maßnahmen und Problemstellungen im Rahmen des Gesamtkonzeptes zu gewähr-

leisten. Somit ist das politische Handeln in Form einer Veränderung von Rahmenbedingungen innerhalb eines dynamischen Prozesses ständig zu überdenken und anzupassen.

Die Maßnahmen der Akteure im Produktmanagement werden unmittelbare Auswirkungen auf die ökonomischen, ökologischen und sozialen Eigenschaften des eigentlichen Produktes bzw. der Dienstleistung haben, über die sowohl der Staat, als auch die Akteure des Produktmanagements informiert werden. Die Ausgestaltung der in Bild 59 dargestellten Abläufe ist Gegenstand der aktuellen Definitions- und Klärungsphase zur Integrierten Produktpolitik. Im weiteren soll dazu insbesondere das Wechselspiel zwischen Politik und Industrie betrachtet werden, aus dem eine Vielzahl von Gestaltungsmöglichkeiten für weitere Akteure im Produktmanagement abgeleitet werden können.

### 6.2.2 Strategien zur Umsetzung des IPP-Konzepts

Zur Umsetzung der Integrierten Produktpolitik müssen im Zusammenspiel aller Akteure verschiedene Instrumente entwickelt werden, die durch eine Gesamtstrategie zusammenzufassen ist. Die Clusterbildung der denkbaren Instrumente variiert je nach Quelle (z.B. [18], [136], [187]) sehr stark. Gerade das Grünbuch der Europäischen Kommission zur Integrierten Produktpolitik [136] vermischt die verschiedenen Instrumente in den dort beschriebenen Gruppen *Preismechanismen*, *Förderung der Nachfrage nach umweltfreundlichen Produkten* und *angebotsseitige Maßnahmen* und erschwert dadurch die Zuordnung der einzelnen Mechanismen. Gemeinsamkeit aller Ausführungen ist die Forderung nach einer produktspezifischen Zusammenstellung der Instrumente. Charter fasst die verschiedenen Instrumente einer Integrierten Produktpolitik in [18] ähnlich wie Rubik in [187] beispielhaft nach Tabelle 10 zusammen.

Ein Aspekt, der bei [18], [136], [187] nicht in ausreichender Weise gewürdigt wird, ist der Synergieeffekt zwischen Ökonomie und Ökologie. Wie zahlreiche Beispiele (exemplarisch auch in [136]) zeigen, ist mit einer verbesserten Umwelleistung von Produkten in den meisten Fällen auch eine direkte Kosteneinsparung verbunden [177]. Freiwillige Maßnahmen des Herstellers zur umweltgerechten Gestaltung von Produkt und Produktlebensweg können bei einer Weitergabe dieser Kostenvorteile damit direkt den Absatz umweltverträglicher Produkte alleine durch wirtschaftliche Kaufanreize für den Kunden fördern [22].

Zahlreiche Instrumente oder Werkzeuge nach Tabelle 10 bestehen bereits seit vielen Jahren und werden nun produktbezogen in einen neuen Rahmen gesetzt. Der innovative Charakter dieser Vorgehensweise besteht in der weitreichenden Mitwirkungsmöglichkeit der verschiedenen Akteure und in der gezielten Zusammenstellung der Instrumente für bestimmte Produktgruppen. So wird beispielsweise der Absatz umweltverträglicher Haushaltsgeräte wesentlich leichter durch Umweltzeichen zu fördern sein als der Absatz an Investitionsgütern im industriellen Produktionsbereich.

Instrumente	Beispiele
Freiwillige Instrumente	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Freiwillige Vereinbarungen</li> <li>• Selbstverpflichtungen</li> <li>• Industriepreise</li> </ul>
Freiwillige Informationsbereitstellung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Umweltzeichen</li> <li>• Produktprofile</li> <li>• Produkterklärungen</li> </ul>
Obligatorische Informationsbereitstellung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Warnhinweise</li> <li>• Informationsverpflichtung</li> <li>• Berichtspflicht</li> </ul>
Wirtschaftliche Instrumente	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Steuern und Abgaben</li> <li>• Subventionen</li> <li>• Pfandregelungen</li> <li>• Internalisierung externer Kosten</li> </ul>
Ordnungsrechtliche Instrumente	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Stoffverbote und –beschränkungen</li> <li>• Produktvorgaben</li> <li>• Rücknahmeverpflichtungen</li> </ul>

Tabelle 10: Beispiele möglicher Instrumente einer Integrierten Produktpolitik nach [18]

### 6.3 Kooperatives Gestalten Integrierter Produktpolitik

Die Implementierung Integrierter Produktpolitik als umweltpolitischer Ansatz stellt für ein Industrieunternehmen gleichermaßen Chance wie Herausforderung dar [150]. In der Vergangenheit waren umweltpolitische Instrumente insbesondere in Form von ordnungsrechtlichen Vorgaben ausgeprägt, die sich auf einzelne Produktlebensphasen wie z.B. die Herstellung oder die Entsorgung bezogen. Ebenso wurden vielfältige Produktarten durch gleiche Vorgaben reglementiert, obwohl die tatsächlichen Potentiale zur Vermeidung von Umweltbelastungen sehr produktspezifisch zu erfassen und auszuschöpfen sind. Dieses umweltpolitische Instrumentarium führte im Rahmen der industriellen Mitwirkung am Gesetzgebungsverfahren zu einer Art Blockadehaltung und damit zu einer geringen Flexibilität bezüglich einer dynamischen Anpassung der rechtlichen Regelungen an aktuelle Erkenntnisse über entsprechenden Handlungsbedarf (vgl. Abschnitt 6.1).

Integrierte Produktpolitik zielt auf eine stetige Verbesserung von Produkten und Dienstleistungen hinsichtlich ihrer Wirkungen auf Menschen und Umwelt entlang des gesamten Produktlebenszyklus ab. Dies soll erreicht werden, indem ein spezifisch auf die Eigenschaften und Potentiale von verschiedenen Produktarten abgestimmter Mix an umweltpolitischen Instrumenten zur Anwendung kommt [136]. Die Herausforderung für ein Industrieunternehmen muss es deshalb sein, aktiv an der Zusammenstellung dieser umweltpolitischen Instrumente für seine Produkte mitzuwirken. Ebenso muss der Hersteller sicherstellen, dass die bei seinen Produkten tatsächlich vorhandenen Umweltpotentiale genutzt werden, ohne die Lebensqualität der Gesellschaft zu vermindern, die sich in der Finanzierbarkeit der von einem Produkt erhalte-

nen Dienstleistung ausdrückt und über den Markt wieder direkt auf den unternehmerischen Erfolg zurückgeführt wird. Dadurch erhält der Hersteller die Möglichkeit, sich mehr Freiraum durch weniger gesetzliche Regelungen zu schaffen [197].

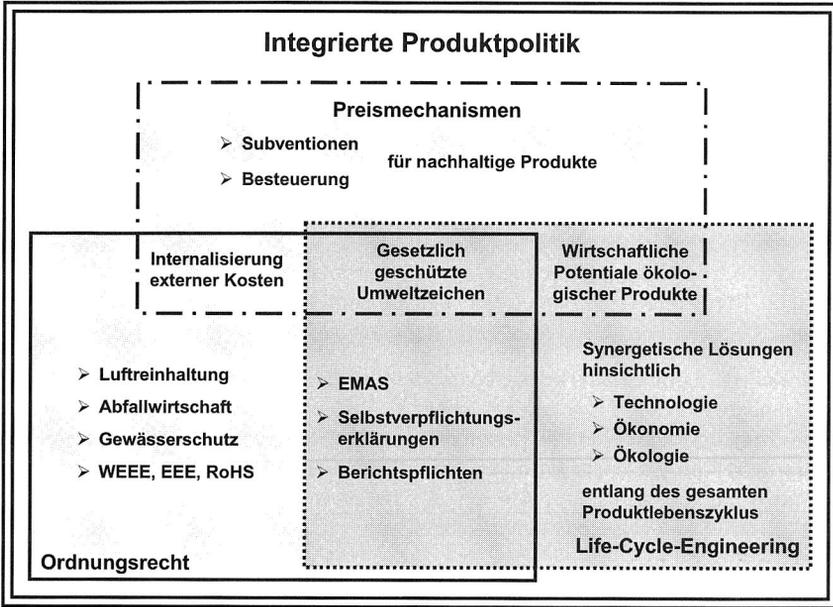


Bild 60: Handlungsfelder Integrierter Produktpolitik

Zusammenfassend können aus den Ausführungen in verschiedenen Quellen (z.B. [18], [136], [187]) mit den Maßnahmen des Ordnungsrechts, den Preismechanismen und dem sog. Life-Cycle-Engineering drei Handlungsfelder der Integrierten Produktpolitik aufgespannt werden (Bild 60) [200]:

- **Maßnahmen des Ordnungsrechts:** darunter fallen die klassischen Maßnahmen des betrieblichen Umweltschutzes ebenso wie zukünftige, produktbezogene Regelungen beispielsweise in Form der EU-Richtlinien für Elektro- und Elektronikprodukte.
- **Preismechanismen:** nach [136] sind Subventionen und Steuererleichterungen für nachhaltige Produkte sowie die „Internalisierung externer Kosten“ angedacht. Zu Ergänzen sind diese Preismechanismen um die ökonomischen Vorteile, die sich direkt aus Synergien des produktbezogenen Umweltschutzes beispielsweise durch Materialeinsparungen ergeben.
- **Life-Cycle-Engineering:** der im englischen Sprachgebrauch übliche Begriff bezeichnet im allgemeinen Verständnis alle lebenszyklus-übergreifenden Ingenieurstätigkeiten und bedeutet die Ermittlung eines optimalen Kompromisses aus

technologischen, wirtschaftlichen und ökologischen Anforderungen über den gesamten Produktlebenszyklus hinweg. Damit werden die spezifischen Potentiale zur Minderung der Umweltbelastungen während des gesamten Produktlebensweges unter den technologischen und wirtschaftlichen Randbedingungen erfasst und umgesetzt.

Diese Handlungsfelder überschneiden sich in Teilbereichen. So entspricht die Zuweisung der Entsorgungsverantwortung an den Hersteller durch entsprechende gesetzliche Regelungen der Internalisierung der klassisch externen Entsorgungskosten und ist damit gleichermaßen ein Preismechanismus [136]. Ebenso sind wirtschaftliche Vorteile bei nachhaltigen Produkten sowohl ein wichtiger Preismechanismus als auch elementarer Bestandteil des Life-Cycle-Engineering. Letztlich ist in der Einführung von gesetzlich abgesicherten Umweltzeichen für Produkte sowohl eine Maßnahme des Gesetzgebers, als auch - wegen der potentiellen Erhöhung der Marktakzeptanz - ein Preismechanismus und ein Element des Life-Cycle-Engineerings zu sehen.

Eine wichtige Eigenschaft dieses Denkmodells ist die komplementäre Gestaltung der drei Handlungsfelder, d.h. je stärker eines der Felder ausgeprägt ist, desto geringer ist der Handlungsbedarf in den anderen Feldern. Wird beispielsweise die Integrierte Produktpolitik im wesentlichen durch gesetzliche Regelungen ausgestaltet, so wird nur noch wenig Flexibilität bezüglich der hersteller-spezifischen Maßnahmen im Rahmen des Life-Cycle-Engineering verbleiben.

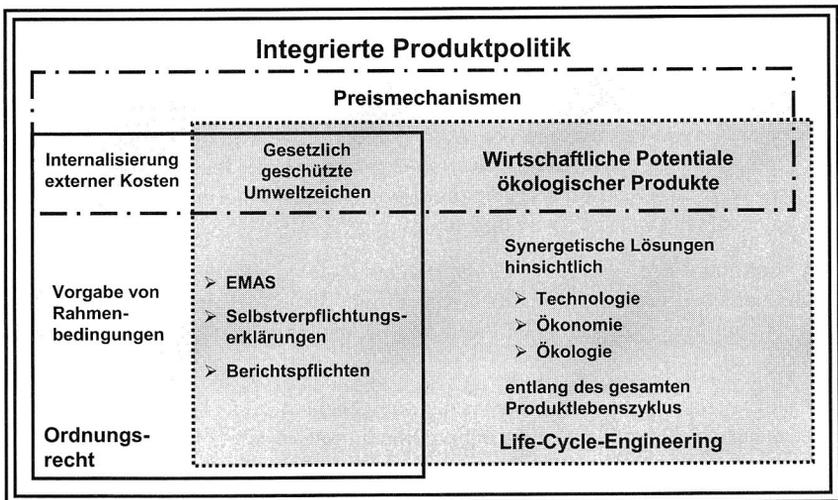


Bild 61 Zielvorstellung zu den Handlungsfeldern Integrierter Produktpolitik

Ziel muss es daher sein, durch freiwillige Maßnahmen des Herstellers im Sinne des Life-Cycle-Engineering – ggf. sogar im Vorgriff auf neue umweltrechtliche Vorgaben

[187] – eine technologische, wirtschaftliche und ökologische Gestaltung des gesamten Produktlebensweges sicherzustellen (Bild 61). Damit können die gesetzlichen Regelungen auf Rahmenvorgaben beschränkt sowie die Preismechanismen auf die direkten Synergien zwischen Ökonomie und Ökologie reduziert werden.

In Form von Pilotprojekten ist aufzuzeigen, wie die zukünftige Kooperation der Akteure entlang des Produktlebenszyklus einschließlich der Umweltpolitik gestaltet werden kann. Dabei sind Potentiale von Produktinnovationen, Systeminnovationen und neuen Formen der Zusammenarbeit zu beschreiben und hinsichtlich ihrer Auswirkung auf die Umwelt, Wirtschaftlichkeit und ihrer möglichen Einflussnahme auf die aktuelle und weitere Umweltpolitik zu bewerten.

#### **6.4 Aktuelle Ansätze zur Ausgestaltung Integrierter Produktpolitik**

In Deutschland wurden gerade auf der Ebene der Bundesländer zahlreiche Initiativen und Pilotprojekte zur Ausgestaltung der Integrierten Produktpolitik gestartet. Die Motivation dafür war es, die bisher erreichten Erfolge im Umweltschutz durch Kooperation zwischen Staat und Industrie auszubauen und weiteren gesetzlichen Regelungen vorzubeugen [196]. Alleine durch das Bayerische Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen (BStMLU) wurden insgesamt sieben Vorhaben gefördert bzw. betreut, zu denen auch die in Abschnitt 7 und 8 dargestellten Projekteinhalte gehören [204].

In einem Vorhaben zur *Integrierten Produktpolitik (IPP) am Beispiel Automobil* erarbeiteten verschiedene Akteure entlang des Produktlebensweges einen Leitfaden, der für Integrierte Produktpolitik typische Tätigkeiten, Abläufe und Instrumente sowie Optimierungserfolge aus der betrieblichen Praxis zusammenfasst [145]. Die Realisierung des Vorhabens erfolgte in Kooperation zwischen Rohstoffherstellern, Zulieferbetrieben, Automobilherstellern, Automobilverbänden, Verwertungsunternehmen, der Industrie- und Handelskammer für München und Oberbayern sowie dem BStMLU.

Im Rahmen des *Netzwerkes COUP 21 – Nachhaltiges Wirtschaften Nürnberger Unternehmen* wurde in Zusammenarbeit verschiedener Firmen wie z.B. Faber Castell AG, Lucent Technologies Network Systems GmbH, Quelle AG sowie dem Öko-Institut Freiburg ebenfalls ein Leitfaden erstellt, der Unternehmen mittels eines Fragenkataloges eine Hilfestellung zum Einstieg in die Thematik der Integrierten Produktpolitik gibt [136], [163]. Durch Modularisierung der umweltrelevanten Aspekte in verschiedenen Lebenszyklusstufen innerhalb des Leitfadens wird eine parallele Arbeit in verschiedenen Abteilungen eines Unternehmen ermöglicht.

Das Vorhaben *Integrierte Produktpolitik (IPP) in kleinen und mittelständischen Unternehmen* wird von der Technischen Universität München zusammen mit verschiedenen Industrieunternehmen durchgeführt [75], [76]. Ziel des Projektes ist die auf die spezifischen Bedürfnisse von kleinen und mittelständischen Unternehmen angepasste Einführung von Methoden zur umweltgerechten Produktgestaltung an Hand von Praxisbeispielen. Durch Ermittlung spezifischer Stärken und Schwächen aktuel-

ler Hilfsmittel für den Produktplanungsprozess und die Produktgestaltung sollten diese entsprechend modifiziert und für den Einsatz in kleinen und mittelständischen Unternehmen optimiert werden. Die gewonnenen Erfahrungen und entwickelten Vorgehensweisen werden in gleicher Weise durch einen Leitfaden zusammengefasst.

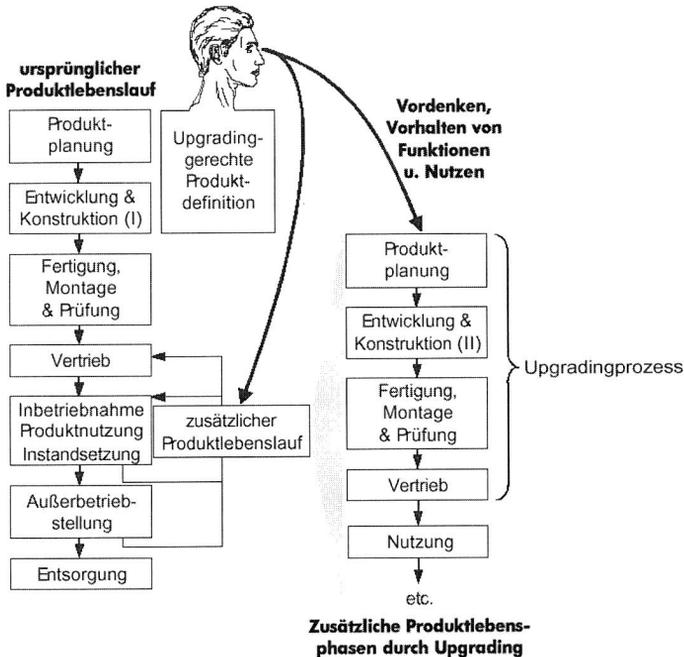


Bild 62: IPP-Vorhaben zur Optimierung der Produktlebensdauer [86]

Ebenfalls an der Technischen Universität München wird ein Vorhaben im Themenbereich *Optimierung der Produktlebensdauer zur nachhaltigen Abfallreduzierung* durchgeführt [86]. Durch Funktionsergänzung oder Funktionsänderung während oder am Ende des Gebrauchsphase soll der Nutzen eines bestehenden Produktes gesteigert werden (Upgrading). Das Vorhaben fokussiert dabei auf die Unterstützung der Produktplanung und –entwicklung hinsichtlich der Berücksichtigung eines zukünftigen Upgrading (Bild 62). Dazu werden praxisorientierte Hilfsmittel, Methoden und Vorgehensweisen erarbeitet und in einem internetbasierten Leitfaden zusammengefasst.

Das Projekt *Integrierte Produktpolitik (IPP) durch rechnergestützte Simulationstechnik* zielt auf die Einsparung des zeit-, material- und kostenintensiven Prototypenbau im Automobilssektor durch den Einsatz von Simulationstechnik [61]. Dabei werden alle wesentlichen Aspekte vom Innengeräusch in Fahrzeugen über die Gewichts-

und damit Energieeinsparung in der Nutzungsphase bis hin zur stofflichen Verwertung berücksichtigt. Das Vorhaben wird vom Fraunhofer Institut für Technologie- und Wirtschaftsmathematik in Zusammenarbeit mit der Fa. Christian Heinrich Sandler GmbH & Co. KG so der Fa. AUDI AG durchgeführt.

Daneben werden vom *World Business Council for Sustainable Development (WBCSD)* zahlreiche Fallstudien genannt, die im IPP-Grünbuch [136] explizit im Zusammenhang mit Integrierter Produktpolitik gesehen werden. Der WBCSD ist ein Zusammenschluss von etwa 150 internationalen Unternehmen aus 20 verschiedenen Industriesektoren in 30 Ländern [74] und verfolgt den Ansatz der Ökoeffizienz. Die Grundlage der Ökoeffizienz ist eine unternehmens- und marktorientierte Sichtweise der nachhaltigen Entwicklung, die auf gleichzeitige Erschließung wirtschaftlicher wie ökologischer Potentiale basiert. Dies wird erreicht, wenn wettbewerbsfähige Produkte und Dienstleistungen zur Erfüllung von Bedürfnissen und zur Steigerung der Lebensqualität mit einer progressiven Entlastung der Umwelt sowie geringerem Ressourcenverbrauch über den gesamten Produktlebensweg einher gehen (Bild 63) [74].

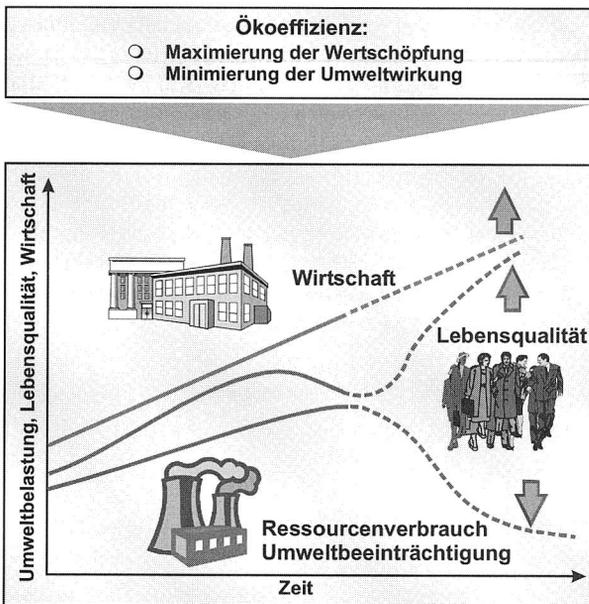


Bild 63: Sichtweise der Ökoeffizienz gemäß WBCSD (nach [74])

Ziel ist demnach eine höhere Wertschöpfung bei gleichzeitig geringeren Umweltwirkungen [58], [73], [177]. Der Politik wird dabei eine Schlüsselfunktion zugeordnet, die sich unter anderem auf die Förderung der Wettbewerbsfähigkeit, der Rechtssicherheit bei der Vertragsgestaltung, Prognostizierbarkeit politischer Intervention, sowie

faire und transparente Bilanzierungsgrundsätze erstreckt [177]. In der Vision des WBCSD wird also der Politik eine anteilige Verantwortung mit dem Ordnungsrecht als Ausgangspunkt über kooperative Elemente bis hin zu Marktmechanismen mit alleiniger Regelungsfunktion in der Zukunft zugeordnet [73].

Das als Beispiel für Ökoeffizienz-Aktivitäten des WBCSD angeführte Pilotprojekt von ELEKTROLUX zu Gebrauchsgütern bezieht sich überwiegend auf Gefrier- und Kühlschränke sowie Waschmaschinen [10], [165]. Aktivitäten von SONY betreffen vor allem Fernsehgeräte und Videorekorder [8]. Das von Rank Xerox durchgeführte Projekt zur Herstellung von Kopiergeräten unter Verwendung von Gebrauchtteilen [22], [136] ist eher im Investitionsgüterbereich einzuordnen. Die resultierenden Erkenntnisse sind jedoch nur bedingt auf Großgeräte übertragbar.

Bei den verschiedenen Vorhaben wird der Kooperationsgedanke vor allem zwischen Hersteller und Politik nur eingeschränkt erkennbar. Pepper et al. [177] und Lehni [74] beschreiben zwar wichtige Handlungsfelder der Politik in Zusammenarbeit mit der Industrie, leiten jedoch keine konkreten produktbezogenen Maßnahmen ab.

Die genannten Projekte stellen Bausteine zur industriellen Ausgestaltung Integrierter Produktpolitik dar und sind auf verschiedene Produkte, Lebenswegabschnitte, Unternehmensstrukturen und Kooperationen ausgerichtet. Ein Entwicklungsbedarf leitet sich aus den bisher im Rahmen der Aktivitäten des BStMLU nicht oder nicht umfassend abgedeckte Bereiche, beispielsweise hinsichtlich Massen- bzw. Gebrauchsgüter und komplexer Hochtechnologieprodukte bzw. Großgeräte aus dem Investitionsgüterbereich. Ziel im Rahmen dieser Arbeit ist es deshalb, einen Beitrag zur industriellen Ausgestaltung Integrierter Produktpolitik durch die Erarbeitung weiterer, produktbezogener Bausteine für Gebrauchsgüter und für Großgeräte als Beispiel komplexer Investitionsgüter zu leisten. Dabei sollen insbesondere auch die Einordnung und mögliche Wechselwirkung im Zusammenspiel der verschiedenen Akteure entlang des Produktlebenszyklus beleuchtet werden.

## 7 Implementierung von Elementen Integrierter Produktpolitik am Beispiel eines Haushaltsgerätes

Hersteller erzeugen letztlich Produkte als Ursache von Umweltwirkungen nur deshalb, weil eine Nachfrage von Seiten der Kunden besteht. Daraus ist zu schließen, dass eine Steigerung der Nachfrage nach umweltverträglichen Produkten im Sinne einer Integrierten Produktpolitik nur über die fundamentale Berücksichtigung der Kundenanforderungen von der Funktionalität bis hin zum Kaufpreis erreicht werden kann. Darüber hinaus kann ein umweltverträgliches Produkt nur dann die ökologischen Vorteile entfalten, wenn es erfolgreich auf dem Markt zu positionieren ist [82].

Umweltpolitische Maßnahmen, die auf eine Festschreibung von Produkthanforderungen abzielen, bergen stets die Gefahr einer Designlenkung [70]. Moderne Umweltpolitik muss also auf die Vorgabe innovationsfördernder Rahmenbedingungen ausgelegt sein, wobei gerade die in Abschnitt 6 genannten Grundsätze und Prinzipien wie Lebenswegbetrachtung, Kooperation der Akteure etc. das Potential beinhalten, derartige Innovationen anzustoßen. Vor allem das Zusammenführen von Kompetenzen verschiedener Quellen bietet die Möglichkeit, Innovationssprünge zu generieren und damit auch unter Berücksichtigung von Umweltaspekten im Wettbewerb zu bestehen. Voraussetzung dafür ist jedoch eine ziel- und funktionsorientierte Entwicklung der Forschung [66].

Im *Bayerischen Entwicklungsnetz für innovative Technologien (BEnefiT)* der Universität Erlangen soll am Beispiel des Haushaltsgerätes „Staubsauger“ aufgezeigt werden, wie sich durch interdisziplinäre Forschungsarbeit sowie Zusammenbinden verschiedener Methoden und vielfältigen Erfahrungswissens an einem an sich als auskonstruiert geltendem Produkt wesentliche Verbesserungen hinsichtlich der Umweltrelevanz erreichen lassen [197]. Gleichzeitig ist der Anspruch zu erheben, dass Funktionalität und Herstellungskosten in gleicher Weise wie bei den bereits auf dem Markt etablierten Geräten zu gewährleisten sind, um die Marktgängigkeit des Produktes sicherzustellen [83], [197]. Die durch diese Ansätze erreichbaren Ergebnisse werden nachfolgend ausschließlich an der Konzeptionierung und Gestaltung des Staubsaugergehäuses dargestellt.

### 7.1 Praxisnahe Bestimmung der Anforderungen

Gehäusekomponenten erfüllen für den überwiegenden Anteil auch unterschiedlicher technischer Produkte die Rolle eines zentralen Funktionsträgers [80]. Sie dienen der Aufnahme von Baugruppen, die zur Funktionserfüllung eines Produktes notwendig sind, und stellen die Schnittstelle zur Umgebung wie z.B. Benutzer, Stromversorgung oder Peripheriekomponenten dar (Bild 64). Damit beeinflusst die Gehäusegestaltung über den gesamten Lebenszyklus hinweg wesentliche Kriterien wie z.B. Herstellkosten, Marktakzeptanz (Design-Aspekte), Ergonomie, Ressourceneffizienz, Recyclingeignung und –kosten.

Die konzeptionellen und konstruktiven Lösungen für die vielfältigen Einzelfunktionen und Anforderungen führen zu einer hochkomplexen Baugruppe, deren Analyse primäres Ziel einer interdisziplinären Arbeitsgruppe<sup>4</sup> war. Aus den Analyseergebnissen wurden als sekundäres Ziel Optimierungspotentiale erkannt, alternative Lösungskonzepte erarbeitet und diese konsequent umgesetzt.

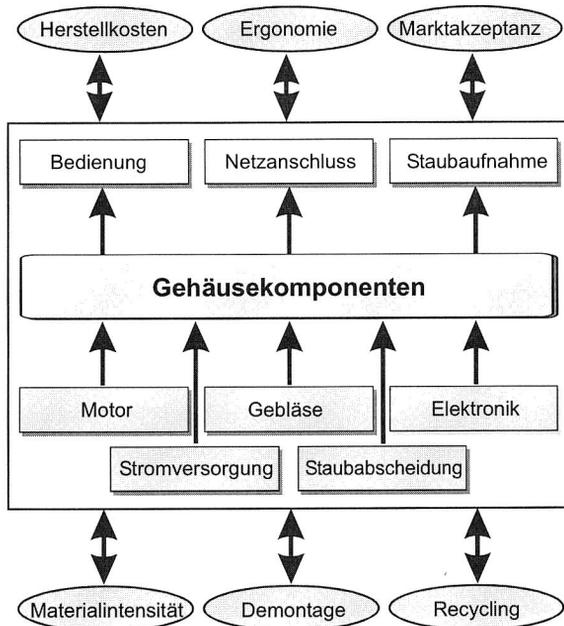


Bild 64: Zentrale Funktion von Gehäusekomponenten am Beispiel Staubsauger

In Form eines „Round Table“ wurden – ausgehend von verschiedenen, auf dem Markt etablierten Referenzprodukten – zunächst detailliert die zu realisierenden Funktionen ermittelt (Bild 65). Die resultierenden Anforderungen bezüglich der Umweltaspekte, Kostenaspekte, Kundenaspekte und der eingesetzten Technologien wurden aufgrund der Komplexität der Baugruppe für jede Einzelfunktion des Gehäuses betrachtet und berücksichtigt. Auf der Basis der interdisziplinären Zusammenarbeit und unter Berücksichtigung von Konzepten für völlig andere Produktarten (z.B. Rechner, Medizingeräte) wurden innovative Lösungsalternativen abgeleitet. Diese wurden konzeptionell in einem Entwurf umgesetzt und ausgestaltet.

<sup>4</sup> Die Arbeitsgruppe zur Gehäuseentwicklung an der Universität Erlangen-Nürnberg bestand aus Vertretern verschiedener Fachdisziplinen des Maschinenbaus, insbesondere Mitarbeitern der Lehrstühle für Konstruktionstechnik, für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik, für Kunststofftechnik sowie als Vertreter der Naturwissenschaften aus Mitarbeitern des Lehrstuhls für Anorganische Chemie. Die Gruppe wurde bei Bedarf um spezifische Kompetenzen von Mitarbeitern der Lehrstühle für Strömungsmechanik und für Elektrische Antriebe und Steuerungen ergänzt.

“Round Table”



**BENeFIT Arbeitsgruppe Gehäuse**  
**Eigenschaften des Referenzgerätes**

**Funktion: Mechanische Aufnahme**

**Anforderung**

Stabile Aufnahme	Fixierturteile zw. nengeföhren, d rufung. Innengegäm in i
Dichtheit	Gebllas
Schwingungsarme Lagerung	Gumm

**Funktionsforderungen**

- Aufnahme der Module  
=> Motor/Gebläse/Elektronik  
=> Kabelrolle  
=> Staubabscheidung  
=> Bedienelemente

**Kunden-/Marktanforderungen**

- Sicherheit
- Ergonomie
- Optik
- geringes Gewicht / kleine Baugröße
- hohe Beweglichkeit des Gerätes
- ...

**Kostenforderungen**

- Ca. 15,- € mit Montage

**Forderungen aus Umweltsicht**

- 70% Verwertungsquote
- Stoffeinsatz minimieren
- Maximaler energetischer Wirkungsgrad
- Modulorientierte Verwertungskompatibilität
- Trennbarkeit
- ...

Anforderungsliste für Gehäuse		Hersteller	Datum	Status	
		B. Rosenmann	23.01.2001	1 / 1	
Geheiß	Frage	Anforderungsliste			Beitrag
	Antwort				Beitrag
		Prüfung	Zust. (Anforderung)		Beitrag
Zweck / Funktion	FF	1. Mechanische Aufnahme von Motor und Gebläse	Stabile Fixierung, Abtrieb von ca. 200 Watt elektrischer Verlustleistung (Überspannungssicherung, Messung F1-Wert), Elektrische Verordnungen, Kabelschutzführungen luftdicht, Rückkopplung der Geräuschleistung von BSEB auf < 65 dB	Träcker Motor Kabel Beitrag	
	FF	2. Aufnahme der Staubabscheidung	Vermeidung des Rückstromes, Luftdichter Abschluss des Staubkammes zur Umgebung	Träcker Motor Kabel Beitrag	
	FF	3. Aufnahme der Elektronik	Antrieb von ca. 30 Watt elektrischer Verlustleistung (Überspannungssicherung, Kabelschutzführungen) luftdicht	Träcker Motor Kabel Beitrag	
	FF	4. Aufnahme der Stromversorgung	Elektrische Verbindungen (Kabelschutzführungen) luftdicht	Träcker Motor Kabel Beitrag	
	FF	5. Aufnahme der Bedienelemente	Elektrische Verbindungen (Kabelschutzführungen) luftdicht	Träcker Motor Kabel Beitrag	

Bild 65: Ermittlung der Anforderungen bei der Gehäuseentwicklung

Die wichtigsten Funktionen und Anforderungen an das Gehäuse eines Bodensaugers sind in Tabelle 11 zusammengefasst.

Funktion	Anforderung
1. Mechanische Aufnahme von Motor und Gebläse	Stabile Aufnahme, schwingungsarme Lagerung, Dichtheit, tief liegender Schwerpunkt, Geräuschdämmung, Wärmeabfuhr
2. Aufnahme der Staubabscheidung	Zugänglichkeit, Hygiene, Dichtheit, Strömungsführung, „Füllstandanzeige“, Sicherheit, optimale Lebensdauer des Staubaufnahmesystems
3. Aufnahme der Elektronikkomponenten	Mechanische Aufnahme, Schnittstelle zu Bedienelementen, Schnittstelle zur Stromversorgung, Schnittstelle zum Motor, Wärmeabfuhr
4. Schnittstelle zur Stromversorgung	Stabile Schnittstelle zur Elektronik, Zugänglichkeit
5. Mobilität	Geringes Gewicht, ergonomische Griffgestaltung, hoher Aktionsradius, Parksysteem, Stabilität, aktive Beweglichkeit, Sturzbeständigkeit, Kollisionsverhalten/Kantenschutz (Stoßdämpfung/Reibung)
6. Ergonomie/ Design	Anordnung der Bedienelemente, Bedienung mit dem Fuß, mechanische Belastbarkeit, Empfindlichkeit der Sichtflächen, kompakte Bauweise, Haptik

Tabelle 11: Funktionen und Anforderungen an die Gehäuseentwicklung

Durch eine funktionsübergreifende Analyse der Verwertungseignung des Gerätes wurde das Gehäusekonzept hinsichtlich einer demontage- und verwertungsgerechten Konstruktion überprüft, so dass auch dieser Aspekt in das Gesamtkonzept einfluss.

## 7.2 Bewertung konventioneller Lösungskonzepte

Die ermittelten Anforderungen wurden an einem handelsüblichen Gerät verifiziert und deren Realisierung analysiert. Aus Vor- und Nachteilen der konventionellen Lösungen ergab sich der Ansatz für die Neugestaltung des Gehäuses.

### **Mechanische Aufnahme von Motor und Gebläse**

Beim Referenzgerät werden die Anforderungen an die stabile mechanische Aufnahme von Motor und Gebläse vor allem durch ein gesondertes Innengehäuse realisiert (Bild 66), in dem die Motor- und Gebläseeinheit eingesetzt, axial durch entsprechende Gummilippen fixiert und zum Staubraum hin abgedichtet wird. Die Geräuschdämmung erfolgt u.a. über eine Einlage aus flexiblem Polymerschaum. Das Innengehäuse stellt eine Montagebaugruppe dar, die - inklusive Stromversorgung und Steuerelektronik – fertig vormontiert und anschließend in die Unterschale durch Schnappverbindungen fertigmontiert werden kann.

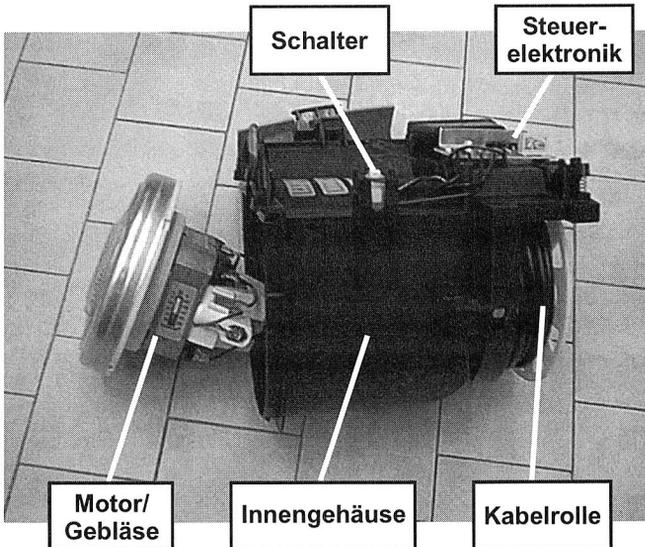


Bild 66: Innengehäuse eines Referenzgerätes

Die Realisierung des Gehäuses durch ein konventionelles Konzept mit integriertem oder separatem Innengehäuse widerspricht vor allem den ökologischen Anforderungen bezüglich Reduzierung der Materialvielfalt, Reduzierung der eingesetzten Werkstoffmassen und damit geringerem Gesamtgewicht bzw. Erhöhung der Materialeffizienz. Auch die unterschiedlichen Füge- und Zerlegerichtungen bei der Verwendung eines Innengehäuses wurden als Ansatz zur Konzeptoptimierung betrachtet.

### **Staubraumgestaltung**

Ein Schutzgitter, das sich zwischen Staubraum und Gebläse befindet und aus relativ mächtigen Kunststoffstegen besteht, schützt dieses vor dem Eindringen großvolumiger Fremdkörper, die den Staubbeutel durchtrennen könnten, und bewahrt somit das Gebläse vor Beschädigungen. Die um 90° umgelenkte Strömungsführung innerhalb des Gerätes verringert die Gefahr, dass der Staubsack durch große, scharfkantige Teile zerstört wird, führt allerdings ebenso wie das Schutzgitter zu Strömungs- und somit zu Saugleistungs- bzw. Energieverlusten. Insgesamt ist ein Überdenken der Staubraumgestaltung und die Platzierung der Saugrohranbringung sinnvoll, da bislang durch Abstandsrippen zwischen Staubsack und Gehäuse des Saugers „tote Ecken“ vorhanden sind, und die Führung des Luftstromes durch das Gerät erhebliche Strömungsverluste verursacht. Hierzu wurde insbesondere auf das Spezialwissen von Experten für Strömungsmechanik zurückgegriffen.

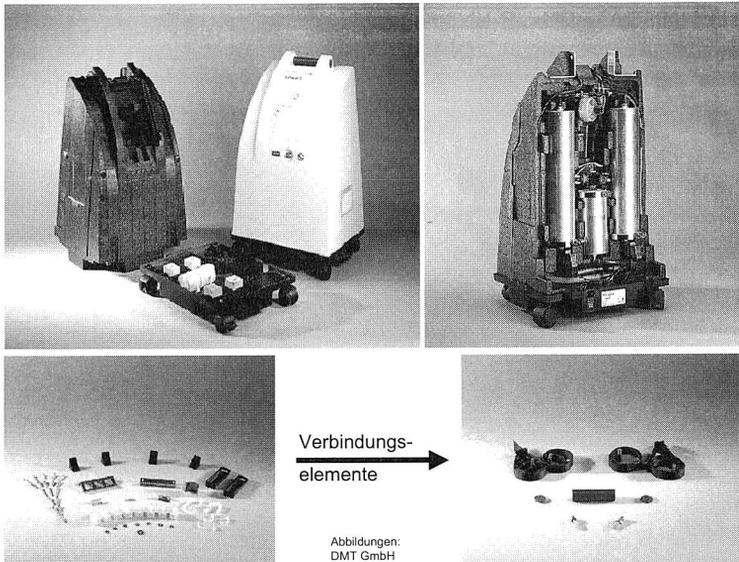
### **Mobilität**

Das Gewicht des Vergleichsmodells liegt mit Sauggeschirr bei ca. 5,5 kg. Aufgrund der Metallanteile beeinflussen Motor und Gebläse das Gewicht am stärksten. Durch eine kompaktere Motoreinheit könnte das Gewicht entscheidend verringert werden. Eine weitere Gewichtsersparnis liegt im Verzicht auf das Innengehäuse.

## **7.3 Entwicklung eines alternativen Gehäusekonzeptes**

Ein erfolgversprechendes Alternativkonzept, mit dem die genannten Optimierungspotentiale umgesetzt werden können, stellt der Einsatz von Formschaumteilen für das gesamte Gehäuse nach dem von der Fa. DMT GmbH entwickelten E-PAC-Konzept dar, das bereits z.B. bei medizinischen Geräten oder Rechnern Anwendung findet (Bild 67) [129], [201], [202]. Dabei werden die zu fixierenden Komponenten direkt in Formschaumteile aus expandiertem Polypropylen (EPP) eingelegt und mittels Formschluss und Pressung fixiert.

Durch entsprechende Materialanalysen wurde Polypropylen als ökologisch unbedenklicher Kunststoff identifiziert. Durch die universelle Einsetzbarkeit des Materials als Schaum, bei konventionellen Spritzgießteilen oder auch in Form von textilen Geweben wird die Möglichkeit gegeben, das gesamte Gehäuse weitgehend aus einem einzigen Material herzustellen. Dabei gewährleistet der Schaum die Fixierung der Komponenten und stellt gleichzeitig die für das technische Design relevante Außenform des Gehäuses dar. Die Gehäuseoberfläche besteht ggf. aus PP-Gewebe oder einer PP-Folie, um den Schaum vor Schäden durch spitze Gegenstände zu schützen. Durch Einsatz entsprechender Technologien wie beispielsweise das Hinterschäumen von Folien kann so auf ein separates Außengehäuse verzichtet werden. Die Funktionsteile wie z.B. Rollen oder Schalter sind als Spritzgießteile ausgeführt. Ein weiterer, leicht ersichtlicher Vorteil ist die Reduzierung von Verbindungselementen, die zu einer signifikanten Verringerung des Montage- und Demontageaufwandes führen kann.



Abbildungen:  
DMT GmbH

Bild 67: Einsatz von E-PAC am Beispiel eines medizinischen Gerätes [202]

### Anordnung der Komponenten

Die geringe Größe des Gehäuses ist ein wichtiges Kriterium für die Benutzerfreundlichkeit (z.B. Handhabbarkeit) und für den Materialeinsatz bzw. die Materialeffizienz. Nachdem der geometrische Körper einer Kugel die geringste Oberfläche bezogen auf das umschlossene Volumen hat, ist eine Gehäuseform umso effizienter, je mehr sie der Kugelform anzunähern ist.

Um die Gehäusegröße klein zu halten, ist eine geschickte Anordnung der aufzunehmenden Komponenten Motor, Gebläse, Kabelrolle, Staubaufnahme und Elektronik entscheidend. Aufgrund des Wirkprinzips sollten Staubabscheidung und Motor-/ Gebläseeinheit möglichst in der Strömungsrichtung liegen, und die Elektronikkomponenten nahe am Motor angebracht sein. Lediglich für die Kabelrolle sind alternative Lösungen denkbar. Konventionell liegt die Drehachse der Kabelrolle meist entweder koaxial zur Rotorachse hinter dem Motor oder normal zur Rotorachse neben dem Motor. Damit ist jedoch häufig aus Symmetriegründen ein Leervolumen oder eine entsprechende Abweichung von der idealen Kugelform verbunden.

Nach der Durchführung verschiedener Bauraumsimulationen wurde unter Nutzung der vorhandenen Freiheitsgrade die Anordnung der Kabelrolle unter dem Staubraum gewählt. Aus Bild 68 rechts ist leicht ersichtlich, dass durch diese Anordnung insgesamt eine dichtere Packung der Komponenten im Vergleich zu konventionellen Konzepten (Bild 68 links) erreicht wird.

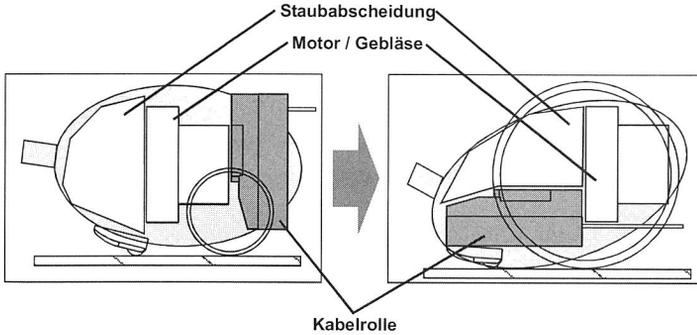


Bild 68: Alternative Anordnung der Kabelrolle; links: konventionelle Anordnung koaxial zur Rotorachse; rechts: Anordnung der Kabelrolle unter dem Staubraum

### Gestaltung des Staubraums

Um eine möglichst hohe Saugleistung an der Düse zu erhalten, muss der Staubraum gegenüber der Umwelt abgedichtet werden. Aufgrund der geschlossenen Oberfläche des PP-Schaums und des elastischen Werkstoffverhaltens ist durch angeformte Trapezprofile direkt mit EPP eine Dichtwirkung zu erreichen. Damit wird auf eine zusätzliche Elastomer-Dichtung, und somit auf eine weitere Werkstoffart, verzichtet.

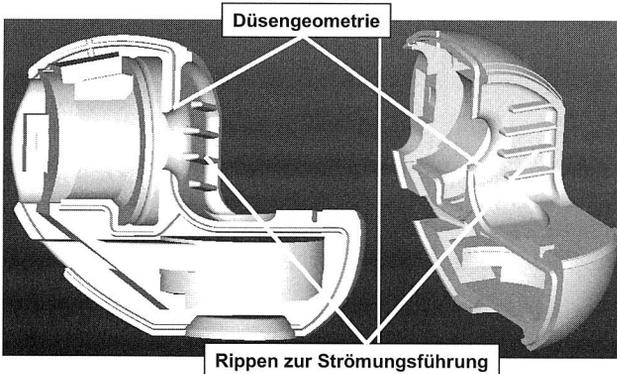


Bild 69: CAD-Darstellung einer Gehäusehälfte aus EPP mit angeformten Elementen zur Unterstützung der Strömungsführung

Schaumformteile ermöglichen oft eine ähnliche, bezüglich der Wandstärken teilweise auch höhere Gestaltungsfreiheit wie spritzgegossene Kunststoffkomponenten. Diese Gestaltungsmöglichkeiten können effizient genutzt werden, um die Strömungsführung durch die Anformung entsprechender Rippen oder Flächen, wie z.B. der Anformung einer Düsengeometrie am Gebläseeinlass, direkt zu unterstützen (Bild 69).

### Montage- und demontagefreundliche Gestaltung

Um die Potentiale des E-PAC-Konzepts bezüglich Montage- und Demontagefreundlichkeit entsprechend auszunutzen, wurde der Verschluss der Gehäusehälften hinsichtlich der eingesetzten Verbindungstechnik optimiert. Dazu wurden auf der Unterseite des Gehäuses funktionell klappbare Fixierungen (Schnappverbindung oder Scharnier) vorgesehen. Zwei jeweils an den Gehäusehälften angebrachte Träger werden bei der Montage mit dem Griffstück verschraubt (Bild 70 links). Diese beiden Schraubverbindungen sind – abgesehen von notwendigen Schrauben in der Motor-/ Gebläseeinheit – die einzigen im gesamten Gehäusekonzept.

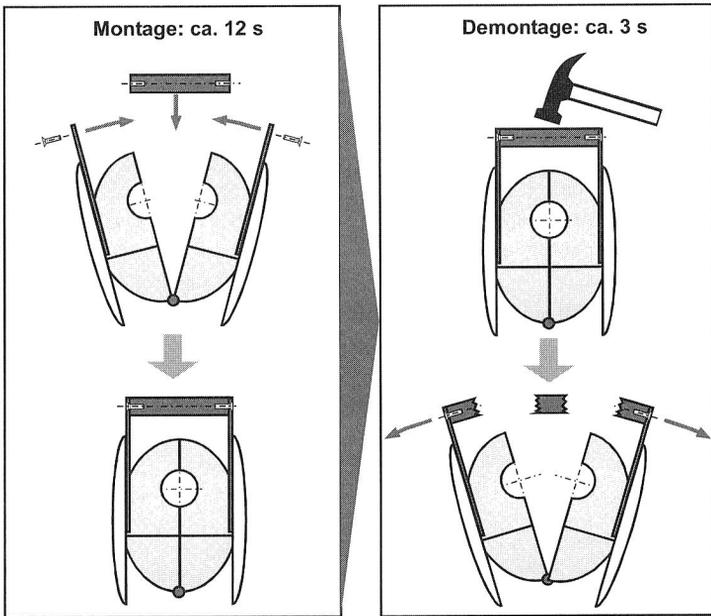


Bild 70: Gestaltung des Griffs als zentralen Gehäuseverschluss

Die industrielle Zerlegepraxis zeigt, dass die Demontage von elektrischen Kleingeräten überwiegend zerstörend durchgeführt wird [193]. Ebenso haben Demontagewerker in der Regel eine umfassende Erfahrung bei der Ermittlung effizienter Ansatzpunkte für den Einsatz zerstörender Demontagewerkzeuge. Es ist also davon auszugehen, dass der Zerleger bei der Demontage zunächst die offensichtlichen Verbindungsstellen – den Griff mit Schrauben – zerstören wird (Bild 70 rechts). Nachdem die innenliegenden Komponenten lediglich formschlüssig fixiert sind, können bei dem vorliegenden Konzept die Gehäusehälften nach der Zerstörung des Griffs auseinandergeklappt und die eingelegten Komponenten über die Schwerkraft bzw. Massenträgheit entnommen werden („ausschütteln“).

## 7.4 Umsetzung des Konzeptes in Prototypen

Auf der Basis der bisher erfolgten Konzeptarbeit wurde ein detaillierter Entwurf ausgearbeitet, der in einem spielfähigen Funktionsmuster realisiert wurde. Im Rahmen des Entwurfs wurden die Bauräume der einzelnen Komponenten in einem CAD-Modell angeordnet (Bild 71 links).

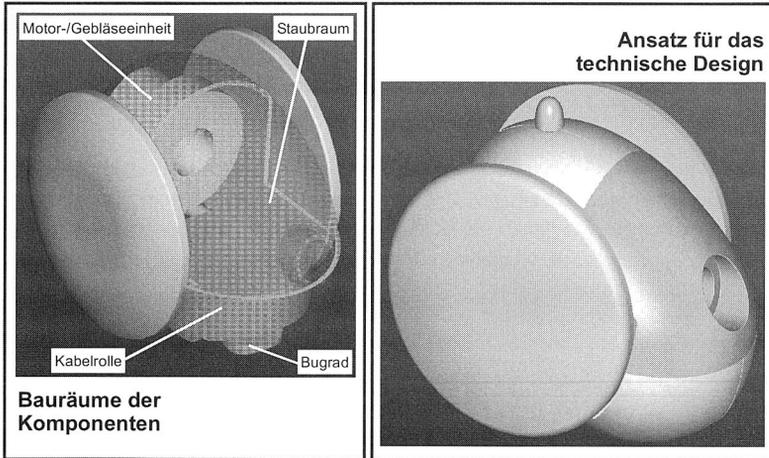


Bild 71: Schematische Darstellung der Komponentenbauräume und Ansatz für das technische Design des Staubsaugergehäuses

Der erste Ansatz für die äußere Design-Gestaltung ergab sich entsprechend der Vorgaben hinsichtlich eines minimalen Ressourceneinsatzes und einer weitgehenden Annäherung an die Kugelform aus dem umhüllenden Ellipsoiden (Bild 71 rechts). Um ein realitätsnahes Muster zu erhalten, wurden ballige Haupträder an den Ellipsoiden angefügt, die nach entsprechender Versenkung im Gehäuse gleichzeitig den Kantenschutz und eine hohe Beweglichkeit sowie ausreichende Bodenfreiheit gewährleisten. Als dritter Auflagepunkt wurde ein um 360° drehbares Bugrad vorgesehen. Die Gehäusetrennung wurde – im Gegensatz zu den meisten konventionellen Konzepten – vertikal festgelegt, um die Entformbarkeit der Schaumteile und die Montagefähigkeit für die eingefügten Komponenten sicherzustellen.

Bild 72 zeigt den Detailentwurf für das Funktionsmuster. Dazu ist nochmals hervorzuheben, dass für die Fixierung der einzelnen Komponenten in den Gehäusehälften keine Verbindungselemente wie Schrauben oder Schnapphaken erforderlich sind. Die Bugrolle ebenso wie alle weiteren Schnittstellenkomponenten (z.B. Drehzahlregler) werden über entsprechende Hinterschnitte in der Trennfuge der Schaumhälften formschlüssig mit dem Gehäuse verbunden bzw. darin festgehalten.

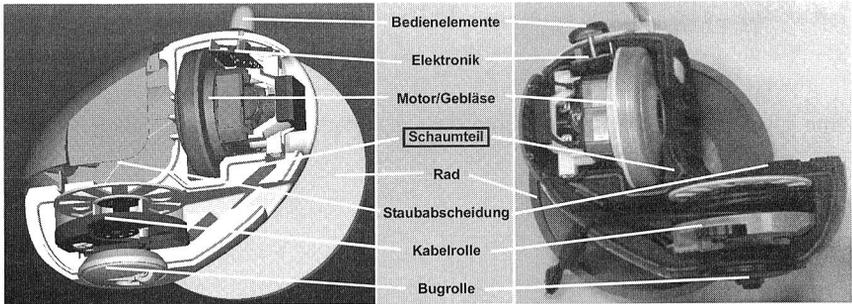


Bild 72: Detailansicht einer Gehäusehälfte mit aufzunehmenden Komponenten

Die hinsichtlich eines minimalen Gehäusevolumens ausgelegte Geometrie des Funktionsmusters bildete die Basis für den Entwurf des endgültigen technischen Designs (Bild 73). Zusätzlich wurden weitere Gestaltungsmerkmale z.B. zur Griffgestaltung oder zur Integration eines Parksystems bei der Umsetzung der Konzepte in einem weiteren Prototyp berücksichtigt.

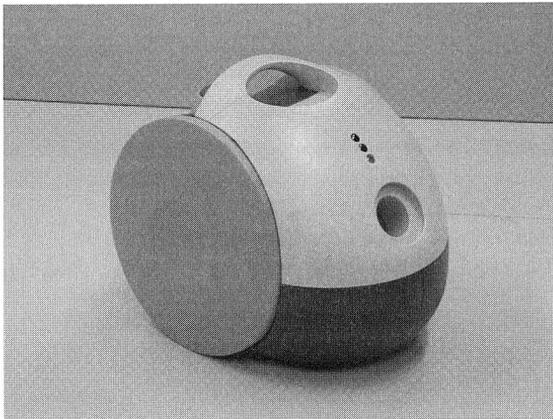


Bild 73: Prototyp zu einem Staubsaugergehäuse nach dem E-PAC-Konzept

## 7.5 Verifizierung der Demontageeignung

Zur Demontageanalyse des Referenzgerätes im Vergleich zum neuentwickelten Gehäusekonzept wurden auf der Basis einer Probedemontage und einer Gewichtsbestimmung der Komponenten bzw. mit Hilfe des CAD-Modells die Produktmodelle in ReGrEd/DisPlay v3.0 erstellt (vgl. Abschnitte 3.2 und 4). Als Grundlage für die Bewertung der Entsorgungsprozesse diente sowohl eine Literaturrecherche [167] als auch eine Marktstudie bei verschiedenen Entsorgungsunternehmen.

Gemäß Analyseergebnis werden bei der wirtschaftlich optimalen Zerlegung der Neuentwicklung nur drei Verbindungen geöffnet, so dass der konzeptionelle Ansatz bestätigt wird (Bild 74). Zunächst ist der Staubraumdeckel mit dem Sauggeschirr abzunehmen. Nach dem Durchtrennen des Griffs lassen sich beide Gehäusehälften auseinander klappen und die innenliegenden Komponenten mit Hilfe der Schwerkraft entnehmen.

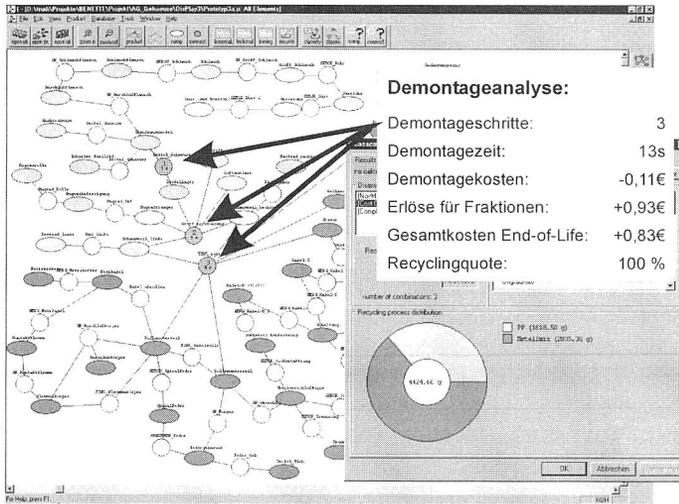


Bild 74: Ergebnisse für die optimale Demontage des neuentwickelten Gehäusekonzeptes

Die resultierenden Fraktionen bestehen entweder aus Polypropylen – und können entsprechend stofflich verwertet werden – oder sind als Kunststoff-Metall-Gemisch nach einer mechanischen Trennung im Massenstromverfahren den entsprechenden Recyclingprozessen zuzuführen. Tabelle 12 fasst die verschiedenen Kennwerte der sog. End-of-Life-Phase für das Referenzgerät und das neuentwickelte Gerät zusammen.

Ein wesentliches Ergebnis der Demontageanalyse auf Basis aktueller Preise für Sekundärrohstoffe ist, dass die um mehr als Faktor 10 geringeren Demontagekosten beim neuentwickelten Gehäusekonzept insgesamt einen positiven Deckungsbeitrag (€ +0,83) für die Zerlegung und Entsorgung erwarten lassen, während beim untersuchten Referenzgerät geringe Kosten (€ -0,07) dafür anfallen. Die höheren Erlöse für die Verwertung der resultierenden Fraktionen beim Referenzgerät (€ +1,49) gegenüber der Neuentwicklung (€ +0,93) sind teilweise auf das geringere Gewicht zurückzuführen.

Kriterium	Referenzgerät	Neuentwicklung
Demontagezeit	184 s	13s
Demontagekosten	-1,57€	-0,11€
Kosten/Erlöse für Fraktionen	+1,49€	+0,93€
Spezifische Kosten/Erlöse für Fraktionen	+0,27€/kg	+0,21€/kg
Deckungsbeitrag End-of-Life	-0,08€	+0,83€
Recyclingquote	97 %	100 %

Tabelle 12: Ergebnisse der Demontageanalyse von Referenzgerät und Neuentwicklung

Mit Blick auf die geplanten europäischen Richtlinien zur Rücknahme und Entsorgung von Elektro- und Elektronikaltgeräten [160] kann festgestellt werden, dass die Verwertungs- bzw. Recyclingquoten sowohl beim Referenzgerät (97%) als auch beim neuentwickelten Gerät (100%) die zukünftig potentiell vorgegebenen Quoten für Haushaltskleingeräte von 70% bzw. 50% bei kostenoptimaler Demontage sicher erfüllen. Der Einsatz von Formschaumteilen für das Gehäuse führt beim neuentwickelten Gerät zu einer geringeren Materialvielfalt und einer optimierten Zerlegung. Diese Einflussgrößen leisten einen signifikanten Beitrag zur Erhöhung der Demontagefreundlichkeit und Verwertbarkeit der Neuentwicklung.

## 7.6 Zusammenfassende Bewertung und Einordnung in die Integrierte Produktpolitik

Integrierte Produktpolitik setzt auf die Erschließung bisher ungenutzter Umweltpotentiale bei Produkten entlang ihres gesamten Lebensweges [127]. Dies soll unter anderem durch angebotsseitige und durch nachfragebezogene Maßnahmen erfolgen [136]. Angebotsseitige Maßnahmen sind vor allem in der Produktentwicklung beim Hersteller anzusetzen und beziehen sich im Sinne einer erweiterten Herstellerverantwortung auch auf Lebensphasen, die konventionell nicht in die Sichtweise der Hersteller eingeschlossen sind [78], [98].

Nachfragebezogene Maßnahmen sollen den Absatz von umweltfreundlichen Produkten fördern [136], [187]. Dazu gehört jedoch insbesondere, dem Kunden die gleiche oder mehr Funktionalität möglichst zum gleichen Preis wie bei konventionellen Produkten bereitzustellen [179]. Gerade wenn bisher externe Umweltkosten für den Hersteller internalisiert werden und auf diese Weise direkt in den Kaufpreis eingehen, treten angebotsseitige Maßnahmen in eine unmittelbare Wechselwirkung mit den nachfragebezogenen Aktivitäten. Damit können in diesem Gesamtkonzept nur Lösungen zielführend sein, die für den Nutzer von Produkten ebenso wie für den Hersteller und die Umwelt mit Vorteilen gegenüber dem Status quo verbunden sind.

Ein wesentlicher Beitrag zu diesem weitreichenden Spannungsfeld kann durch Innovationen und diese nur durch fachübergreifende Kooperation und Kommunikation geleistet werden. Am Beispiel des Staubsaugers ist gerade dieser Aspekt aufzuzei-

gen: in einem innovativen Ansatz wurden selbst bei einem seit Jahrzehnten entwickelten Produkt signifikante und technologisch erschließbare Umweltpotentiale z.B. hinsichtlich der Gehäusegestaltung erkannt und konzeptionell sowie in Form von Prototypen umgesetzt.

Innerhalb der Entwicklungsgruppe wurden einerseits interne, interdisziplinäre Ansätze durch die Nutzung komplementärer Kompetenzen verfolgt. Andererseits führte externes, interdisziplinäres Arbeiten durch die Einbeziehung der entsprechenden Wissensträger bei der Lösung spezifischer Fragestellungen zu einer effizienten Arbeitsweise. Die letztlich zum Erfolg führenden Aspekte der gewählten Arbeitsweise sind vielschichtig: in einer qualitativen Betrachtung kann festgestellt werden, dass die fundierten technisch-naturwissenschaftlichen Grundkenntnisse der beteiligten Teammitglieder, ergänzt um deren spezifische Fachkenntnisse einerseits und deren Erfahrung als Nutzer des zu entwickelten Produktes andererseits, einen wesentlichen Beitrag zum Erreichen der Entwicklungsziele geleistet haben.

Bild 75 fasst die essentiellen Ergebnisse und deren Einordnung in die Elemente Integrierter Produktpolitik zusammen. Die Reduzierung der Werkstoffvielfalt ist vor allem eine angebotsseitige Maßnahme, die weitreichende Auswirkungen hinsichtlich einer verbesserten Umweltverträglichkeit hat. Auf die anwendungsbezogenen Eigenschaften des Produkts hat die Anzahl der verwendeten Werkstoffe – die gleiche Funktionalität vorausgesetzt – jedoch keinen direkten Einfluss und steht damit zunächst nicht im Fokus des Kunden, der die Nachfrage generiert. Nachdem die Werkstoffvielfalt auch einen signifikanten Einfluss auf die Verwertbarkeit des Produktes hat, wird dieser Aspekt bei einer Rücknahmeverpflichtung jedoch indirekt den Kaufpreis beeinflussen.

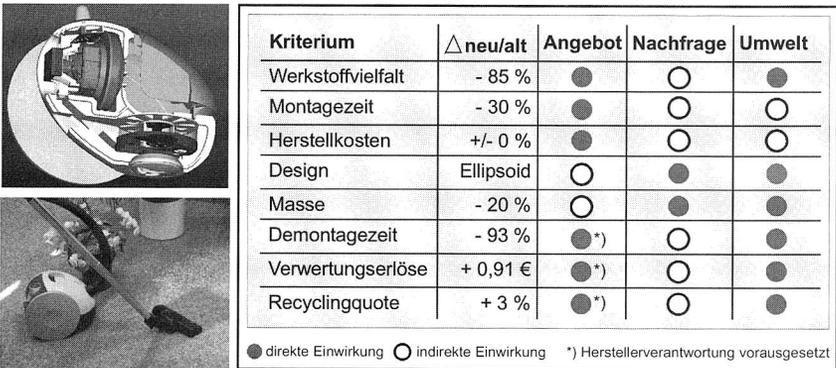


Bild 75: Einordnung der Optimierungsergebnisse in Elemente Integrierter Produktpolitik

Aufgrund der hohen Packungsdichte der Komponenten konnte das Gehäuse an die Kugelform angenähert und so das zu umschließende Volumen im Sinne der Materialeffizienz verringert werden. Dieser Gesichtspunkt zusammen mit einem anspre-

chenden, innovativen Design hebt die Neuentwicklung deutlich von bereits auf dem Markt befindlichen Geräten ab und beeinflusst so die Nachfrage positiv. Ein robust absetzbares Produkt trägt zum wirtschaftlichen Ergebnis des Herstellers bei, so dass auch dadurch angebotsseitige Vorteile abzuleiten sind.

Die Masse des gewählten Produktbeispiels beeinflusst maßgeblich die Ergonomie bei dessen Gebrauch und ist daher ein wichtiges Kaufkriterium für den Kunden [101], [105]. Eine durch die geringere Masse ggf. stimulierte, höhere Nachfrage wirkt sich indirekt auf den unternehmerischen Erfolg aus. Ein direkter Beitrag zur Umweltentlastung wird durch den geringeren Ressourcenverbrauch geleistet.

Die geringere Demontagezeit und die effizientere Verwertung wirken sich zunächst auf eine bessere Kreislaufführung der verwendeten Materialien und damit positiv auf die Umwelt aus. Unter Berücksichtigung der zukünftigen, erweiterten Herstellerverantwortung bezüglich der Rücknahme und Verwertung seiner Produkte wird dieser Aspekt auch angebotsseitig wesentlichen Einfluss nehmen, weil die geringeren Entsorgungskosten bei der Preisgestaltung zu Vorteilen führen. Im gleichen Zusammenhang ist auch die höhere Recyclingquote zu sehen, die in jedem Fall über dem voraussichtlich vom Gesetzgeber geforderten Anteil an der Entsorgung liegt.

Durch diese Ergebnisse kann aufgezeigt werden, wie durch eine neue Herangehensweise bedeutsame Umweltpotentiale bei ausgewogenen Vorteilen für Hersteller, Kunden und Umwelt erschlossen werden können. Dies soll in einem ersten Schritt und in Ergänzung durch vielfältige weitere Maßnahmen (z.B. Kommunikation) beispielhaft einen Denkprozess bei Hersteller und Kunden anstoßen.

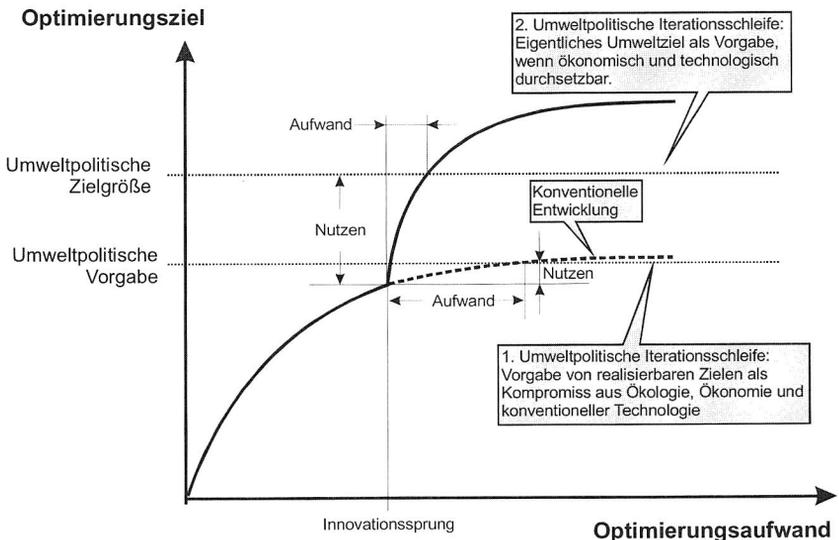


Bild 76: Einfluss von Innovationen auf die ökologische Produktoptimierung

Ebenso wichtig ist der aus den Ergebnissen abzuleitende Argumentationsbeitrag gegenüber der Umweltpolitik, der zumindest in der ersten Iterationsschleife eines produktbezogenen Umweltschutzes geleistet wird. Letztlich ist die (ökologische) Produktoptimierung ein dynamischer Prozess, der in seinem asymptotischen Verlauf hin zum Optimum konventionell zunächst durch ein inakzeptables Nutzen / Aufwand-Verhältnis verlangsamt wird und nur durch weitere Stufen der Innovation neue Impulse erhält (Bild 76). Umweltpolitische Forderungen nach einer besseren Umweltverträglichkeit ohne gleichzeitige Stimulation von Innovationen bedeutet, dass bei zahlreichen Produkten, die seit langem in der Entwicklung stehen, nur ein sehr geringer Nutzen bei gleichzeitig hohem Aufwand zu erreichen ist.

## 8 Umsetzung Integrierter Produktpolitik bei medizinischen Röntgendiagnosesysteme

Investitionsgüter sind im Vergleich zu Massenprodukten wie z.B. Staubsauger bezüglich einer Integrierten Produktpolitik unter wesentlich anderen Randbedingungen zu betrachten. Sie werden in der Regel nicht für den allgemeinen Verbraucher hergestellt, sondern repräsentieren spezifisch angepasste Lösungen für spezielle Einsatzzwecke, vorwiegend in einem industriellen oder industrieähnlichen Umfeld. Daneben ist mit der Herstellung meist eine hohe ökonomische wie ökologische Wertschöpfung verbunden.

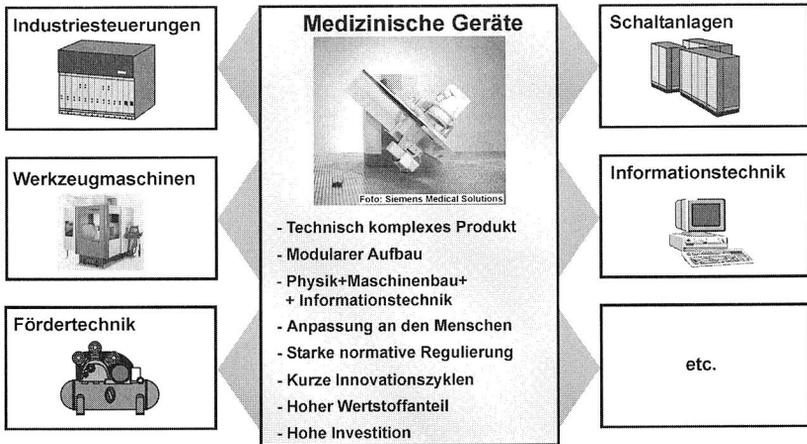


Bild 77: Medizinische Geräte als Beispiel für Investitionsgüter

Medizinische Röntgendiagnosesysteme vereinen zahlreiche Aspekte von Investitionsgütern (Bild 77). Sie weisen einen sehr hohen technologischen Komplexitätsgrad sowie eine modulare Bauweise auf, werden überwiegend baulich beim Kunden integriert (Bild 78) und unterliegen relativ kurzen Innovationszyklen. Darüber hinaus heben sich medizinische Diagnosesysteme aufgrund ihrer Anwendung am Menschen und den daraus international resultierenden, sehr restriktiven gesetzlichen und normativen Regelungen zum Schutz von Patienten, Bedienpersonal und Umwelt ab. Daraus kann abgeleitet werden, dass die am Beispiel von medizinischen Diagnosesystemen erarbeiteten Ergebnisse in hohem Maße auf zahlreiche anderen Produkte der Investitionsgüterindustrie übertragen werden können, weil dabei eher mit einer Vereinfachung der Randbedingungen zu rechnen ist.

Die Ermittlung ökologischer Optimierungspotentiale aus einer Produkt-Lebensweganalyse heraus und deren Umsetzung durch überwiegend freiwillige Maßnahmen der beteiligten Akteure sind Kernaspekte Integrierter Produktpolitik. An medizinischen Röntgendiagnosesystemen als Beispiel für technologisch komplexe Investi-

tionsgüter soll im Folgenden aufgezeigt werden, wie auf der Basis einer praxisbezogenen Lebenswegbetrachtung ökologische Optimierungspotentiale erkannt und ausgeschöpft werden können. Ebenso wie beim Bodenstaubsauger ist hierbei ein wesentlicher Aspekt für die industrielle Praxis, dass mit der Implementierung der Optimierungsansätze keine wirtschaftlichen Nachteile verbunden sind, sondern vielmehr zusätzliche Marktpotentiale erschlossen und ein additiver Beitrag zum Geschäftsergebnis geleistet werden kann. Die in diesem Abschnitt dargestellten Ergebnisse wurden im Rahmen eines ebenfalls vom Bayerischen Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen zusammen mit den Firmen Siemens Medical Solutions, T-Systems ITS GmbH und Hetzel Elektronik-Recycling GmbH & Ko KG durchgeführten Forschungsvorhabens erarbeitet.

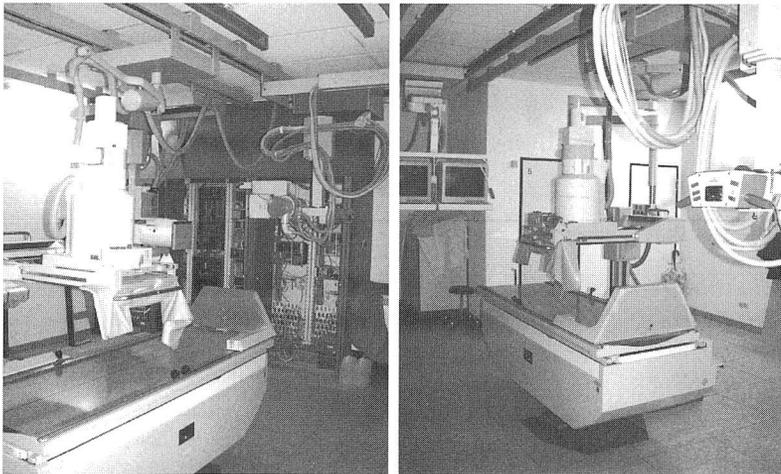


Bild 78: Bauliche Integration einer Röntgenanlage in einem Krankenhaus

Bei [18], [127], [136], [187] findet sich eine sehr starke Fokussierung der Integrierten Produktpolitik auf die umweltgerechte Produktentwicklung, weil diese mindestens 70% der späteren Umweltwirkungen eines Produktes festgelegt [7], [83]. Die umweltgerechte Produktentwicklung nimmt damit eine Schlüsselrolle bei der ökologischen Gestaltung des Produktlebensweges ein, so dass die Innovationskraft durch die Berücksichtigung umweltrelevanter Aspekte bei der Produktentwicklung ein zentraler Anspruch bei der Erarbeitung von Pilotprojekten zur Ausgestaltung Integrierter Produktpolitik sein muss.

Dennoch laufen die Anstrengungen einer nachhaltigen Produktentwicklung ins Leere, wenn nicht gleichzeitig auch die entsprechenden industriellen Prozesse – durch die das ökologische Potential eines Produktes erst ausgeschöpft werden kann – zumindest gleichzeitig geplant und implementiert werden. Bei einem Anteil an Zulieferteilen von beispielsweise 80-90% am Gesamtprodukt können die für die nachhaltige Ent-

wicklung notwendigen ökologischen Indikatoren nicht ohne Einbeziehung des gesamten Beschaffungsprozesses – von der Vertragsgestaltung bis hin zur Lieferantenbewertung – erhoben werden. Ebenso kann ein optimal demontagegerechtes Produkt seine Wirkung nicht entfalten, wenn nicht die Prozesse der Rückführlogistik und ein geeignetes Informationsmanagement beim Verwerter berücksichtigt wurden.

Daher muss auch das Einrichten und Modifizieren industrieller Prozesse und Abläufe – neben der nachhaltigen Produktentwicklung – ein besonderer Schwerpunkt bei der Ausgestaltung Integrierter Produktpolitik sein. Ziel ist es deshalb, die ökologischen Potentiale der Gestaltung industrieller Abläufe ohne direkten Eingriff in die Produktentwicklung aufzuzeigen. Die sich daraus ergebenden Anforderungen an die Prozessgestaltung sind ebenso vielschichtig wie schwerwiegend, weil oftmals in an sich optimierte, aktuelle Abläufe eingegriffen werden muss, ohne dass die Vorteile für unternehmerische Zielvorgaben kurz- bis mittelfristig quantifizierbar sind. Damit ergeben sich Herausforderungen von der Motivation und Bewusstseinsänderung der Beteiligten über die Vorbereitung strategischer Entscheidungen bis hin zur Bereitstellung zusätzlicher Ressourcen und enger Anbindung externer Partner.

## **8.1 Lebenszyklusanalyse bei medizinischen Systemen**

Zur ökologischen Analyse von Produktlebenswegen wird oftmals das Instrument der Ökobilanzierung eingesetzt, das meist sehr detailliert alle Prozesse im Lebenszyklus mit deren eingetragenen und ausgetragenen Stoffströmen erfasst (vgl. Abschnitt 3.1.1) [7], [12], [174], [214]. Dieses Vorgehen wird jedoch mit breitem Konsens als sehr komplex sowie zeit- und kostenintensiv eingeschätzt, so dass es für eine pragmatische, industrieorientierte Lebenswegbetrachtung nicht immer geeignet ist [46], [141], [174], [187]. Im folgenden wird deshalb eine auf qualitative Betrachtungen aufgebaute Lebenszyklusanalyse vorgestellt, die aus den produktspezifischen Eigenschaften heraus eine Ermittlung effizient zu erschließender Umweltpotentiale erlaubt, deren ökologischer Nutzen quantitativ dargestellt wird.

### **8.1.1 Eigenschaften medizinischer Röntgendiagnosesysteme**

Die speziell im Bezug auf die Implementierung von Elementen der Integrierten Produktpolitik untersuchten Produkte beschränken sich auf Systeme der medizinischen Röntgendiagnostik, von einfachen Aufnahmeplätzen über hochwertige Durchleuchtungssysteme bis hin zu komplexen Angiographie-Anlagen<sup>5</sup>. In der Röntgendiagnostik wird die Eigenschaft verschiedener Gewebe und Substanzen zur unterschiedlichen Röntgenstrahlenabsorption ausgenutzt, um Organe bzw. Organteile oder deren Funktion darzustellen. Röntgenstrahlen werden bei der Durchdringung eines

---

<sup>5</sup> Angiographiesysteme werden zur Darstellung meist arterieller Blutgefäße mit Hilfe von Kontrastmitteln eingesetzt. Dazu wird eine dünne Nadel in eine Schlagader eingeführt. Durch diese Nadel wird eine Drahtsonde in das Gefäß vorgeschoben, über die dann wiederum ein dünner Katheter unter Mithilfe der Röntgenstrahlen (Durchleuchtungsmodus) an die entsprechende Stelle im Körper dirigiert wird. Über den Katheter wird das jodhaltige Kontrastmittel gespritzt, um die Blutgefäße der einzelnen Organe sichtbar werden zu lassen [85], [87].

menschlichen oder tierischen Körpers unterschiedlich abgeschwächt. Die wieder aus dem Körper austretende Strahlung wird über verschiedene, röntgensensitive bzw. photoreaktive Medien detektiert und analog oder digital ausgewertet [87].

Bild 79 zeigt die typischer Weise vorhandenen Komponenten eines Röntgendiagnosesystems am Beispiel einer Angiographieanlage. Im sog. *Generator* wird Hochspannung erzeugt, die im *Strahler* zur Generierung der Röntgenstrahlung umgewandelt wird. Der Großteil der vom Generator an den Strahler übertragenen Energie wird in Wärme transformiert (ca. 98%). Die Strahlung wird über spezielle bewegliche Bleilamellen in der *Tiefenblende* geformt.

Ebenso wird durch eine Bleiabschirmung die Streustrahlung absorbiert. Die Röntgenstrahlung dringt durch den zu untersuchenden Körper und trifft beispielsweise im *Bildaufnahmesystem/ Bildverstärker* auf eine röntgensensitive Folie. Die auf der Folie durch das Auftreffen der Röntgenstrahlung emittierten Lichtimpulse werden von einer Kamera im Bildverstärker aufgenommen und – ggf. nach einer digitalen Nachbearbeitung – an geeignete *Visualisierungseinrichtungen* (z.B. Monitore) übertragen.

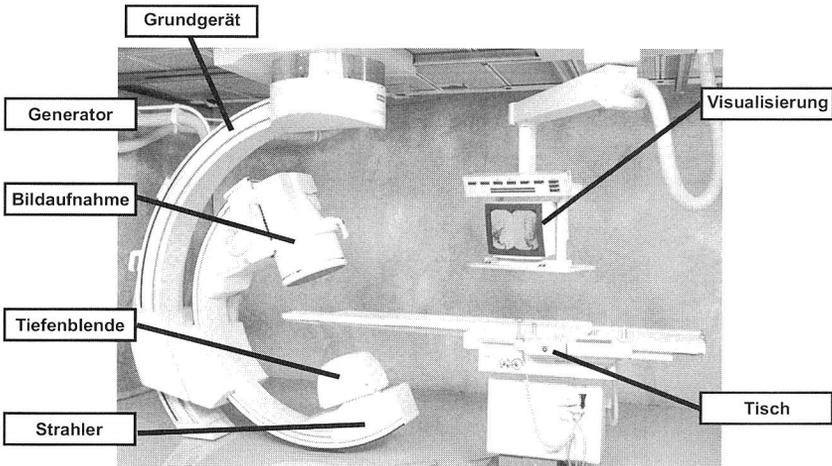


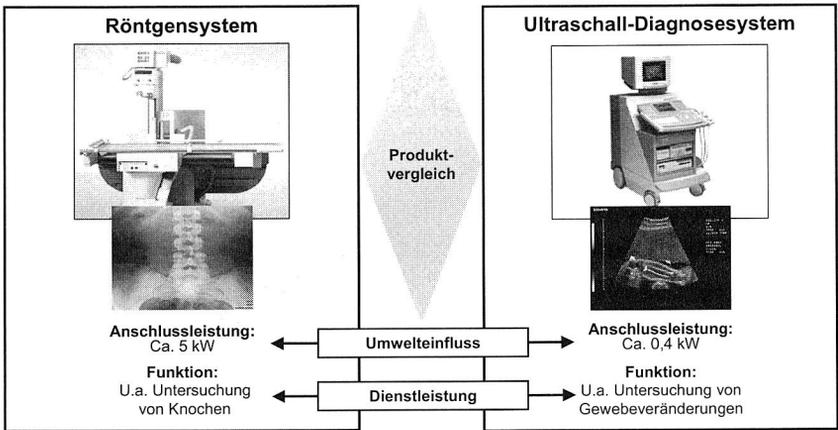
Foto: Siemens Medical Solutions

Bild 79: Komponenten eines Röntgendiagnosesystems am Beispiel einer Angiographieanlage

Medizinische Röntgendiagnosesysteme werden auf dem Markt – je nach Anlagentyp und Konfiguration – in Preislagen von etwa 25.000 € bis über 500.000 € angeboten. Die durchschnittliche Masse einer Anlage, die ebenfalls in Abhängigkeit von Typ und Konfiguration stark variieren kann, beträgt ca. 3,5 t, von denen ca. 25 - 30% auf sehr hochwertige Elektro- und Elektronikkomponenten entfallen. Die jährlichen, von einem einzigen Hersteller produzierten Stückzahlen für diese Systeme liegen bei einigen Tausend weltweit.

### 8.1.2 Qualitative Ermittlung von Umweltpotentialen

Integrierter Produktpolitik zielt darauf ab, Produkte und Dienstleistungen in Eigenverantwortung der Wirtschaft hinsichtlich ihrer Potenziale für eine Minderung der während ihres Lebensweges auftretenden *Umweltbelastungen* zu überprüfen [127], [136]. Der Begriff *Umweltbelastungen* kann letztlich jedoch nicht für absolute Umweltwirkungen – beispielsweise ausgedrückt in Kilogramm Treibhauspotential – stehen, sondern nur für Umweltwirkungen bezogen auf die vom Produkt erhaltene Dienstleistung (Bild 80). So hat ein Ultraschallgerät zwar einen geringeren Energiebedarf als ein Röntgensystem, kann jedoch meist nicht dessen Funktion übernehmen und scheidet daher als vermeintlich umweltfreundlichere Alternative für entsprechende medizinische Diagnosen aus.



Fotos: Siemens Medical Solutions

Bild 80: Vergleich der unterschiedlichen Funktionen von Röntgen- und Ultraschalldiagnosesystem

Die Funktion oder Dienstleistung medizinischer Diagnosesysteme im Allgemeinen ist die Unterstützung des Arztes bei der Erhebung von Befunden, beispielsweise durch die Erstellung eines oder mehrerer Röntgenbilder. Damit sind die gesamten Umweltwirkungen eines medizinischen Diagnosesystems auf die funktionale Einheit – 1 Diagnose – zu beziehen, wobei die verschiedenen Diagnosemöglichkeiten durch unterschiedliche Wirkprinzipien (z.B. Ultraschall, Röntgenaufnahme, Röntgendurchstrahlung) zu berücksichtigen sind. In einem allgemeinen Ansatz ergibt sich die Umweltwirkung  $U$  pro funktionaler Einheit (also pro Diagnose  $d$ ) aus den Umweltwirkungen der Herstellung, bezogen auf die gesamte in der Gebrauchsphase erbrachte Dienstleistung sowie aus den Umweltwirkungen während des Erbringens der Dienstleistung und aus den Umweltwirkungen der Entsorgung, ebenfalls bezogen auf die gesamte erbrachte Dienstleistung des Produktes (Gleichung ( 49 )).

$$\frac{U}{d} = q \cdot \left( \frac{U_{\text{Produktion}}}{n_{\text{gesamt}}} + u + \frac{U_{\text{Entsorgung}}}{n_{\text{gesamt}}} \right) = q \cdot \left( \frac{U_{\text{Produktion}} + U_{\text{Entsorgung}}}{n_{\text{gesamt}}} + u \right) \quad (49)$$

$U/d$ :	Umweltwirkung pro Diagnose
$Q$ :	Qualitätsfaktor; gibt z.B. Anzahl der Aufnahmen pro Diagnose an ( $q=n/d$ )
$U_{\text{Produktion}}$ :	Summe der Umweltwirkungen aus der Produktionsphase
$U_{\text{Entsorgung}}$ :	Summe der Umweltwirkungen aus der Entsorgungsphase
$n_{\text{gesamt}}$ :	Gesamtzahl der Aufnahmen in der Gebrauchsphase
$u$ :	Umweltwirkung pro Aufnahme

Die Umweltwirkung pro Diagnose kann nach Gleichung ( 49 ) prinzipiell durch folgende Faktoren beeinflusst werden:

### **Diagnosequalität $q$**

Die *Diagnosequalität*  $q$  beschreibt beispielsweise die Anzahl der Röntgenaufnahmen pro Diagnose. Die Diagnosequalität wird im wesentlichen durch objektive Faktoren (z.B. Auflösung der Röntgenaufnahme) und subjektive Faktoren (z.B. Bedienerqualifikation) beeinflusst. Der Hersteller ist in jedem Fall bestrebt, durch technologische Maßnahmen den Zeit- und Betriebsmittelaufwand für den Kunden möglichst gering zu halten [144]. Letztlich wird der Kunde dies als wichtiges Qualitätsmerkmal bei der Auswahl eines Produktes berücksichtigen. Zusätzliche Impulse für den diesbezüglichen aktuellen Innovations- und Entwicklungsprozess erscheinen nicht zielführend.

### **Umweltverträgliche Produktion $U_{\text{Produktion}}$**

Aufgrund des hohen Anteils an Zukaufteilen von über 50% und gleichzeitig relativ geringen Stückzahlen kann der Hersteller hierauf nur bedingt Einfluss nehmen. Eine weitere Betrachtung von Maßnahmen, die über intensive Aktivitäten im Rahmen der Umweltvalidierung und -zertifizierung nach EMAS [143], [152] hinausgehen, scheint nicht zu effizient erschließbaren Minderungspotenzialen zu führen.

### **Umweltbelastungen pro Aufnahme $u$**

Unter anderem aufgrund der physikalischen Wirkprinzipien und der damit verbundenen Wirkungsgrade stehen hier technologische Gründe einer umfassenden ökologischen Optimierung, die über die aktuellen Innovations- und Entwicklungstätigkeiten hinausgeht, entgegen.

### **Gesamtzahl der Aufnahmen $n_{\text{gesamt}}$ und ökologische Entsorgung $U_{\text{Entsorgung}}$**

Alleine in Deutschland standen im Jahr 2000 schätzungsweise etwa 16.000 t Elektro- und Elektronikaltgeräte aus der Medizintechnik zur Verwertung an [168]. Bemerkenswert dabei ist, dass oftmals völlig oder weitgehend funktionsfähige bzw. einfach instandsetzbare Systeme und Komponenten der Verwertung zugeführt werden. Aufgrund der umfassenden und sehr restriktiven Qualitäts- und Sicherheitsanforderungen an die am Menschen angewandten medizinischen Systeme werden durchweg besonders zuverlässige Komponenten verwendet, die ihre Einzelfunktion auch nach

der primären Gebrauchsphase noch erfüllen. Zudem stehen die Anlagen in der Regel noch bis zum Tag ihres Abbaus in Gebrauch und müssen daher voll funktionsfähig sein. Es ist weder ökologisch noch ökonomisch sinnvoll, diese Funktionalität durch die Zerlegung, Aufbereitung und stoffliche oder energetische Verwertung zu vernichten. Ziel muss es vielmehr sein, die für die Herstellung der Anlagen – also für die Bereitstellung der Funktionalität – benötigten Ressourcen effizient zu nutzen, und möglichst viel Nutzen aus dem Produkt zu erhalten.

Demnach kann die Gesamtzahl der Diagnosen eines Systems effektiv durch kontrollierte Rücknahme von Altgeräten aus dem Markt, Aufarbeitung und Instandsetzung, durch Aufrüstung hinsichtlich der aktuellen Sicherheitsstandards und einem effizienten Einbringen in einen Sekundärmarkt erhöht werden. Besonders zielführend sind Maßnahmen zur Erhöhung der Gesamtdienstleistung dann, wenn die Umweltwirkungen aus Produktion und Entsorgung im Vergleich zu den Umweltwirkungen aus dem Gebrauch relativ hoch sind. Dies bedeutet, dass Maßnahmen zur Steigerung der Gesamtzahl an Diagnosen bzw. Aufnahmen bei medizinischen Systemen ein wichtiges Potential zur Minderung der nutzenbezogenen Umweltbelastungen beinhalten.

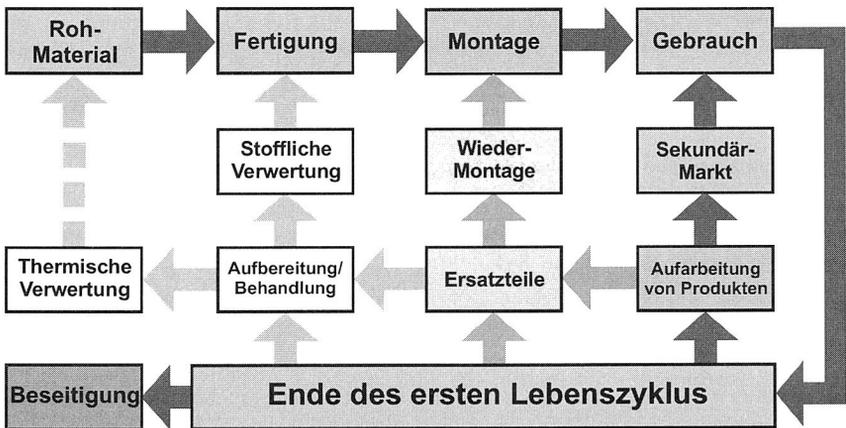


Bild 81: Behandlungsoptionen für medizinische Systeme am Ende des Lebenszyklus

Durch den Aufbau eines entsprechenden Verwerternetzes und durch Bereitstellung relevanter Informationen kann kurz- bis mittelfristig die Verwertung von Altsystemen, die für eine Aufarbeitung aus technischen Gründen nicht geeignet sind, ökologisch und ökonomisch effizienter gestaltet werden. Ein zu verfolgender Lösungsansatz ist hierbei die verstärkte Kooperation zwischen Hersteller und Entsorger. Damit kann abhängig von Zustand und Alter eines Systems am Ende des ersten Lebenszyklus eine abgestimmte, optimale Strategie für dessen weitere Behandlung durchgeführt werden (Bild 81).

## **Abschließende Bewertung**

Aus technologischer, ökologischer und ökonomischer Sicht ist in einer Erhöhung der Gesamtzahl an Aufnahmen durch die Erschließung eines zweiten oder dritten Lebenszyklus das größte – bei vergleichsweise geringem Aufwand erschließbare – Optimierungspotential für medizinische Systeme zu sehen. Aufgrund der organisatorischen, strategischen und instrumentellen Verknüpfung von Zerlegung bzw. Entsorgung und Aufarbeitung ist eine Optimierung der Verwertung ebenfalls abzusehen.

### **8.1.3 Quantifizierung der Umweltpotentiale**

Bei Röntgendurchleuchtungssystemen stellt die gesamte verbrauchte Energie aus Herstellung, Gebrauch und Verwertung bezogen auf eine Röntgenaufnahme einen Indikator für die nutzenbezogene Ressourceneffizienz dar. Um eine quantitative Abschätzung über die ökologischen Potentiale der Aufarbeitung von Röntgensystemen zu erhalten, wurde auf Basis ermittelter Stoffinhalte für ein repräsentatives System und der Methode der *Kumulierten Energie-Aufwände* (KEA) nach [110] der Energiebedarf für die Herstellung eines Systems abgeschätzt. Aus den technischen Daten einer Anlage kann der Energiebedarf für die Erstellung einer Röntgenaufnahme berechnet werden. Mit einer Bezugsbasis von 40.000 Röntgenaufnahmen im ersten Lebenszyklus einer Anlage kann gezeigt werden, dass der Energiebedarf für die Herstellung um etwa den Faktor 160 höher liegt als der Energieaufwand in der gesamten Gerbrauchsphase. Für die Quantifizierung der ökologischen Minderungspotentiale wurden zwei Berechnungsszenarien zu Grunde gelegt (Bild 82):

Wird die Systemgrenze bezüglich einer einzelnen Anlage definiert, so sind im Rahmen der Aufarbeitung zusätzlich etwa 20% des Energiebedarfs aus der Herstellung in Form von Austauschteilen zu berücksichtigen. Nach der Aufarbeitung und erneuten Überlassung wird der erweiterte Lebenszyklus mit 50% an zusätzlichen Röntgenaufnahmen bezogen auf den ersten Lebenszyklus abgeschätzt, also insgesamt mit 60.000 Röntgenaufnahmen. Der Energieaufwand pro Röntgenaufnahme unter Berücksichtigung von Herstellung und Gebrauch ist durch die Erschließung eines zweiten Produktlebenszyklus um ca. 20% niedriger als beim Durchlaufen von nur einem Lebenszyklus. Hochgerechnet auf die zwei Gebrauchsphasen einer Röntgenanlage entspricht dies einer Reduzierung des Energiebedarfs um 9600 kWh. Wird von einem Jahresabsatz eines Herstellers auf dem deutschen Markt von etwa 400 Anlagen ausgegangen, so bedeutet dies eine jährliche Einsparung von ca. 3.800 MWh (ca. 2.260 t CO<sub>2</sub>-Äquivalente nach [169]). Dieses Berechnungsmodell bezieht sich vor allem auf das Bereitstellen der Dienstleistung eines Produktes im Sinne eines System-Leasings.

In einem weiteren Berechnungsmodell können die ökologischen Auswirkungen durch Erweitern der Marktsegmente (vgl. Abschnitt 8.1.4) erfasst werden. Ausgehend von der Tatsache, dass derzeit global eine Unterversorgung an Röntgendiagnostik besteht [108], können für die Deckung der Defizite zwei Optionen angenommen werden:

1. Die Unterversorgung wird alleine aus Neuanlagen gedeckt. Diese Option ist aktuell aufgrund der dazu notwendigen Investitionsmittel bzw. der wirtschaftlichen Weltlage unrealistisch und würde in letzter Konsequenz auch zu weitreichenden ökologischen Problemstellungen führen.
2. Die Unterversorgung wird in einem Mischansatz sowohl durch Neu- als auch durch Gebrauchtanlagen gedeckt. Dieser Ansatz wird den globalen, wirtschaftlichen Ressourcen ebenso wie den sozialen Aspekten der Bereitstellung von medizinischen Diagnosemöglichkeiten gerecht.

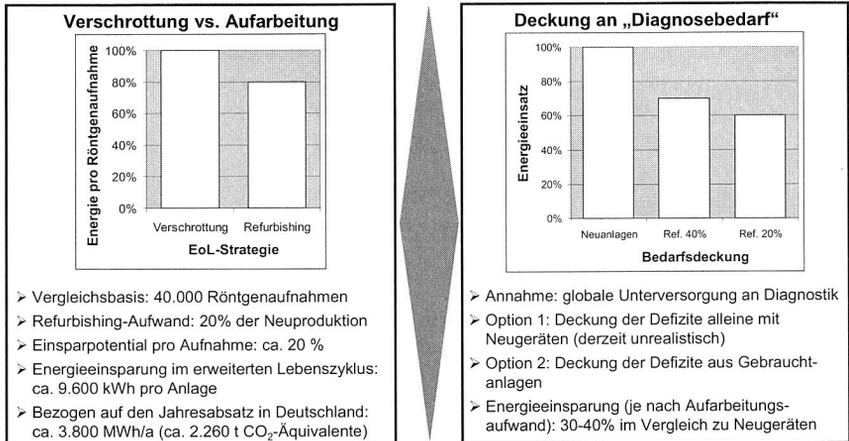


Bild 82: Umweltpotentiale durch die Aufarbeitung von Röntgendiagnosesystemen

Für den zweiten Fall ergeben sich je nach Aufwand für die Aufarbeitung Reduktionspotentiale pro Röntgenaufnahme von 30 - 40%. Dies bedeutet eine Energieeinsparung von 16.000 - 21.000 MWh (10.000 - 14.000t CO<sub>2</sub>-Äquivalente), falls für jeden Einwohner der OECD-Länder nach [166] im Laufe seines Lebens 10 Röntgenaufnahmen erstellt werden.

### 8.1.4 Qualitative Bewertung wirtschaftlicher Potentiale

Integrierte Produktpolitik stützt sich auf die Säulen der nachhaltigen Entwicklung Ökonomie, Ökologie und Soziales [187]. Wie in Abschnitt 6 und 7 dargestellt wurde, ist die Nutzung von wirtschaftlichen und ökologischen Synergien darüber hinaus notwendig, um langfristig tragfähige Lösungen zu erhalten. Nicht zuletzt aus Gründen der unternehmensinternen Argumentation für die Durchführung freiwilliger Maßnahmen ist die Darstellung der wirtschaftlichen Vorteile durch die Implementierung von Elementen einer Integrierten Produktpolitik eine wichtige Anforderung. Darüber hinaus leistet das Herausstellen wirtschaftlicher Vorteile einen wesentlichen Beitrag zur Übertragung von Ergebnissen und Maßnahmen auf andere Branchen.

Die Erschließung der ökologischen Potenziale für medizinische Röntgendiagnosesysteme geht mit der Erschließung zusätzlicher wirtschaftlicher Potenziale einher. Bild 83 zeigt in einem einfachen Portfolio der verfügbaren Investitionsmittel eines Kunden über dem Deckungsbeitrag für den Hersteller die verschiedenen Marktsegmente:

Im Segment oben rechts von Bild 83 ist der aktuell erschlossene Markt für den Hersteller dargestellt: mit entsprechenden Investitionsmitteln ausgestattete Kunden beziehen Neuanlagen mit dem entsprechenden Deckungsbeitrag. Das Überlassen von Neuanlagen zu einem geringeren Preis an Kunden, die für diese Anlagen eigentlich eine zu geringe Investitionsfähigkeit aufweisen (Segment rechts unten), ist in Einzelfällen aus karitativen oder Wettbewerbsgründen möglich. Als durch das Refurbishing neu zu erschließendes Marktpotential sind Kunden anzusehen, die zwar nicht genügend Investitionen für Neuanlagen leisten können, jedoch über Gebrauchtanlagen zu bedienen sind (Segment links unten).

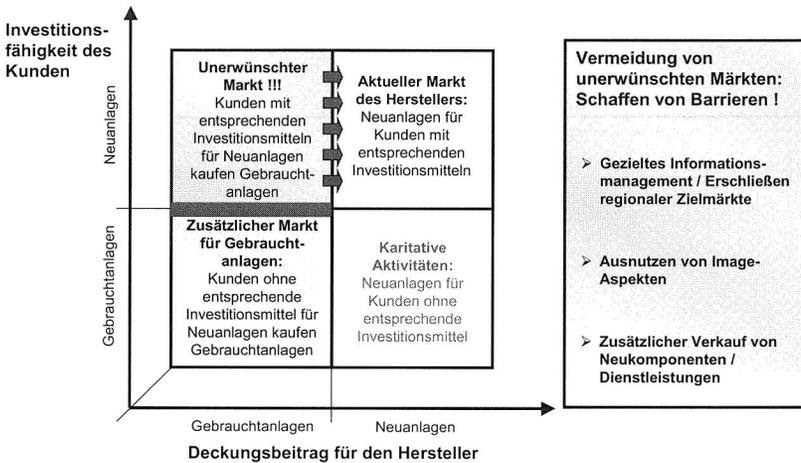


Bild 83: Erschließen neuer Märkte durch Umsetzung von Elementen Integrierter Produktpolitik

Das Problemfeld, das in der Regel den unternehmerischen Zielen hinsichtlich einer Marktpositionierung für Neusysteme widerspricht, sind Kunden, die zwar über entsprechende Investitionsmittel für Neuanlagen verfügen, jedoch eher auf die kostengünstiger angebotenen Gebrauchtanlagen zugreifen (Segment links oben). Eine zu starke Ausprägung dieses Feldes kann weder im Sinne des Herstellers noch des Ansatzes der Aufarbeitung von Altanlagen sein. Letztlich ist der Vertrieb von Neuanlagen elementare Voraussetzung, um diese dann nach bestimmter Zeit zurückzunehmen, aufzuarbeiten und wieder zu vertreiben. Um dieses unerwünschte Segment möglichst zu beschränken, sind daher entsprechende Vertriebsstrategien für Gebrauchtanlagen und die Anwendung geeigneter Marketingmaßnahmen erforderlich.

Unter Berücksichtigung dieser Aspekte können verschiedenen Kunden Produkte in einem wesentlich breiteren Preisspektrum angeboten werden. Damit sind Marktsegmente zu bedienen, die bisher aus wirtschaftlichen Gründen sowohl von den technologischen als auch von den sozialen Vorzügen des Produktnutzens ausgeschlossen waren.

Ein weiteres Beispiel für die wirtschaftlichen Potenziale kann hinsichtlich der Ersatzteilgewinnung gegeben werden (Bild 84). Bei der Probezerlegung einer Angiographieanlage aus dem Jahr 1974 wurden elektronische Bauelemente in der Schaltungsträgerfraktion identifiziert, die aktuell aufgrund der Ersatzteilsituation benötigt wurden. Der Wert dieser Bauelemente mit einem Gewicht von wenigen Gramm hätte bei qualitativ abgesicherter Entnahme 60% der Entsorgungskosten für die Gesamtanlage mit einem Gewicht von ca. 4 t kompensiert.



Bild 84: Beispiel für wirtschaftliche Potentiale der Ersatzteilgewinnung aus Altanlagen

## 8.2 Aufarbeitung medizinischer Röntgensysteme

Wirtschaftliches und ökologisch sinnvolles Aufarbeiten von ausgedienten primären medizintechnischen Systemen zu qualitativ hochwertigen Sekundärsystemen bedarf einer Vielzahl von Entwicklungs-, Planungs-, Steuerungs- und Logistikmaßnahmen, um diesen zusätzlichen Aspekt in die Unternehmenspolitik und -abläufe zu integrieren. Dabei müssen die Anforderungen bezüglich einer effizienten Rückführlogistik und eines minimalen Aufarbeitungsaufwandes bei gleichzeitiger Erfüllung hoher Qualitäts- und Sicherheitsstandards auch unter diesen Rahmenbedingungen abgedeckt werden. Letztlich muss die umfassende Berücksichtigung der Kundenbedürfnisse auch hinsichtlich der Gebrauchtanlagen durch eine qualifizierte Vertriebsstruktur sichergestellt werden.

### 8.2.1 Einordnung von Aufarbeitungsstrategien

Auf der Basis von ursprünglichen Verkaufsunterlagen, Service-Berichten, Informationen über die Einsatzbedingungen (z.B. Unfallklinik vs. Ausstellungsstück) bzw. den Erhaltungszustand einer Anlage sowie aktueller Marktbeobachtungen ist eine adäquate Aufarbeitungsstrategie festzulegen (Bild 85). Die hochwertigste Aufarbeitungsstrategie ist die Instandhaltung bzw. Instandsetzung eines Gesamtsystems. Abhängig von bisher durchgeführten Kundendienstmaßnahmen werden hier nach einer entsprechenden Reinigung die erforderlichen Instandsetzungsmaßnahmen und Sicherheits-Updates durchgeführt sowie ggf. zusätzliche Funktionalitäten integriert.

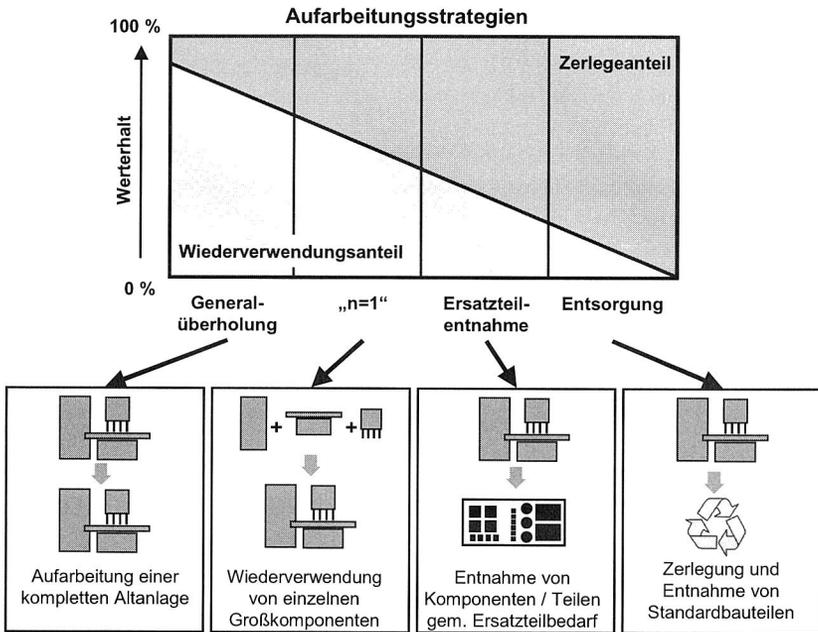


Bild 85: Strategien für die Aufarbeitung bzw. Verwertung medizinischer Systeme

Röntgendurchleuchtungssysteme sind meist in die fünf Hauptkomponenten Grundgerät, Hochspannungsgenerator, Röntgenstrahler, Bildaufnahme / -verarbeitung und Tisch zu gliedern (vgl. Bild 79, S. 131). Bereits jetzt zeigt die industrielle Praxis, dass oftmals die Komponenten mehrerer Altsysteme kombiniert und zu einem einsatzfähigen Gebrauchtsystem zusammengesetzt oder bestehende Anlagen durch gebrauchte Einzelkomponenten (z.B. Tisch) ergänzt werden können.

Aufgrund der Ersatzteil-Lieferpflicht des Herstellers und des hohen Anteils an Zukaufteilen entstehen mitunter Engpässe bei der Ersatzteilbevorratung, gerade für ältere Systeme. Um die erforderlichen Ersatzteile nachträglich zu beschaffen, ist oft eine ökologisch wie ökonomisch sehr aufwendige Einzelanfertigung notwendig. Der-

artige Ersatzteile können im Zuge der Aufarbeitung aus einer Altanlage entnommen werden, falls das Gesamtsystem an sich nicht für eine Instandsetzung geeignet ist.

Systeme, bei denen aufgrund ihres Alters oder der bisherigen Einsatzbedingungen keine der genannten Strategien zielführend ist, müssen einer geordneten Zerlegung und einer ressourceneffizienten Verwertung zugeführt werden. Selbst wenn die verwendeten Komponenten und Bauteile in ihrem Zusammenspiel nicht mehr zur Funktion gebracht werden können, ist hierbei noch die Entnahme von Standardbaugruppen – wie z.B. Motoren oder Getriebe – zur Weiterverwendung in anwendungsfremden Produktgruppen möglich.

### **8.2.2 Analyse bestehender Abläufe zur Aufarbeitung medizinischer Systeme**

Zur Förderung und Optimierung der für die Aufarbeitung der Gebrauchtanlagen vom Kunden zum Kunden erforderlichen Prozesse wurden zunächst die in einem internen Projekt des Herstellers Siemens Medical Solutions eingerichteten Abläufe analysiert. Diese basieren auf den Prozessen für Neuprodukte, die aufgrund der zeitlich bedingten technologischen Differenz zwischen Neu- und Altanlagen und der spezifischen Anforderungen (z.B. Erweiterung der Ersatzteillieferpflicht) modifiziert wurden. Das interne Projekt beim Hersteller fokussiert seine Aktivitäten bisher vor allem auf die Strategien der Generalüberholung und der Entnahme von Großkomponenten. Die Ersatzteilbeschaffung erfolgte nur in einem untergeordneten Rahmen. Die Zerlegung und Entsorgung von Altanlagen wird weitgehend unabhängig von diesen Aktivitäten in einem gesonderten Prozess organisiert.

Eine Altanlage wird zunächst von einem Kunden – meist unter Einbeziehung der Vertriebsorganisation – zur Rücknahme und Entsorgung oder Instandsetzung angeboten. Nach einer Zustandsbewertung wird bei einer Entscheidung für die Rücknahme und Instandsetzung der kompletten Altanlage bzw. von Anlagenkomponenten ein Rückkaufpreis abgeschätzt. Durch externe Dienstleister, die das Wissen über Auf- und Abbau derartig komplexer Anlagen aus den Aufträgen für Neuprodukte besitzen, werden die Altanlagen beim Primärkunden abhängig von der Aufarbeitungsstrategie weitgehend zerstörungsfrei oder teil-zerstörend demontiert. Anschließend werden sie zum entsprechenden Fertigungsstandort des Herstellers transportiert und zunächst eingelagert. Dort wird auf der Basis einer erneuten Begutachtung festgehalten, welche Teile der Anlage entsorgt, welche als Ersatzteile verwendet, welche Teile eingelagert und welche Teile an einen Lieferanten zur Instandsetzung oder Überprüfung abgegeben werden. Wird durch die regionalen Vertriebseinheiten ein Kunde für die Gebrauchtanlage akquiriert, so werden die eigentlichen Aufarbeitungsaktivitäten angestoßen. Der Vertriebsprozess verläuft dabei analog zum Neuwarengeschäft.

Besondere Anforderungen an die Abläufe zur Aufarbeitung ergeben sich unter anderem aufgrund des spezifischen Anwendungsfeldes medizinischer Produkte (Bild 86). Im Rahmen der Instandsetzung muss die Anlage zunächst dekontaminiert, gereinigt und optisch aufgebessert werden. Anhand des Kundenauftrags sowie weiterer Unterlagen über die technische Ausrüstung werden die Bestellung erforderlicher Er-

satzteile und die gesonderte Instandsetzung bzw. Entsorgung von Komponenten ausgelöst. Die Anlage wird anschließend an einer Fertigungslinie beim Hersteller aufgebaut. Bei der eigentlichen Instandsetzung der Anlage erfolgt der Ausbau von Optionen, die der Kunde nicht wünscht, der Einbau von gewünschten Optionen sowie der Austausch von fehlerhaften Komponenten. Darüber hinaus werden alle erforderlichen Sicherheitsnachrüstungen und Kundendienstmaßnahmen durchgeführt.

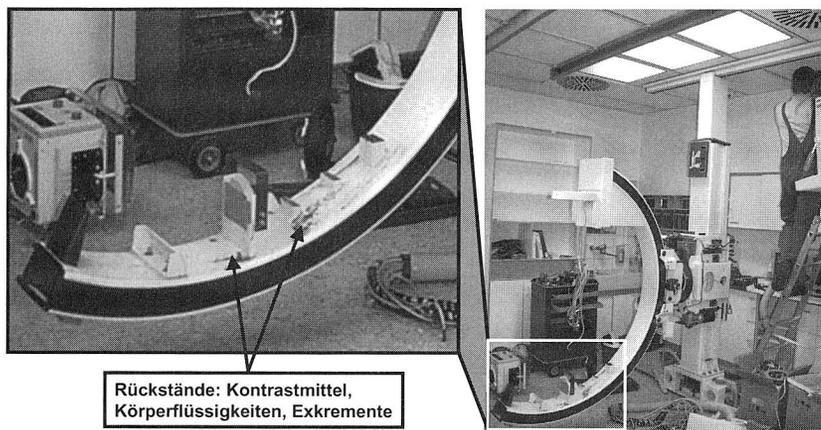


Bild 86: Spezifische Problemstellungen bei der Aufarbeitung medizinischer Systeme

Die Abnahme von Gebrauchsanlagen entsprechend der gültigen Qualitäts- und Sicherheitsstandards wird analog den Anforderungen für Neuanlagen durchgeführt. Weiterer Bestandteil der Qualitätsmaßnahmen ist die Überprüfung der den Veränderungen angepassten technischen Unterlagen sowie der Gebrauchsanweisung der Anlage hinsichtlich Vollständigkeit und Änderungsstand. Durch den zeitlichen Versatz zwischen ursprünglicher Herstellung der Anlage und aktuellem Änderungsstand ist gerade dabei ein weitreichendes Problemfeld gegeben.

Mit den genannten Qualitätsmaßnahmen können bei Gebrauchtsystemen ebenfalls ein Gewährleistungszeitraum und eine Ersatzteillieferverpflichtung ähnlich wie bei Neuanlagen zugesichert werden. Das vom Hersteller garantierte hohe Qualitätsniveau wird unter anderem auch durch ein aufgebrachtes Symbol dargestellt, das als eingetragenes Warenzeichen geschützt ist und den Absatz von Sekundärsystemen unterstützt.

Gebrauchsanlagen werden in gleicher Weise wie Neuanlagen von externen Dienstleistern zum Sekundärkunden transportiert und vorinstalliert. Die Inbetriebnahme, erneute Funktionskontrolle und Übergabe an den Sekundärkunden erfolgt durch die regionalen Unternehmenseinheiten von Vertrieb und Kundendienst. Schließlich wird die Anlage nach Abschluss aller Arbeiten beim Kunden abgenommen.

### 8.3 Entwicklung von Optimierungsmaßnahmen

Nach den aktuell vorhandenen Abläufen können bislang ca. 4-5 komplette Anlagen pro Monat aufgearbeitet werden, die abhängig von Herkunft und Zustand zu etwa 30 - 90% des Neupreises angeboten werden. Auf dem Markt ist derzeit eine stark ansteigende Nachfrage nach Gebrauchtanlagen zu beobachten, die eine Intensivierung der Aufarbeitungsaktivitäten fordert. Die Steigerung des Anlagendurchsatzes bei gleichbleibend optimaler Qualität ebenso wie die Bereitstellung betriebswirtschaftlicher Argumente sind nur durch eine erhebliche Effizienzsteigerung bei den beteiligten Prozessen erreichbar.

Derzeit wird die Aufarbeitung von Großkomponenten im Vergleich zur Generalüberholung nur als Nischengeschäft verstanden, d.h. nur bei direkt bekanntem Bedarf werden auch Anlagen zurückgenommen, von denen nur einzelne Komponenten oder Ersatzteile benötigt werden. Letztlich kommt jedoch gerade der Ersatzteilgewinnung eine erhebliche Bedeutung für die Ausnutzung der einmal in der Produktion geschaffenen Funktionalität nicht nur bis zur Baugruppen-Ebene, sondern bis hin zur Bauteilebene zu.

Ziel muss es sein, die Abläufe zur konsequenten Umsetzung aller vier Aufarbeitungsstrategien nach Bild 85 (S. 139) zu optimieren und robust zu gestalten. Dazu ist eine enge Vernetzung der beteiligten internen und externen Akteure sowie eine auf die spezifischen Randbedingungen angepasste informationstechnische Unterstützung notwendig. Parallel müssen effiziente, bedarfs- und sachorientierte Maßnahmen zur Sicherstellung einer hohen Qualität und Zuverlässigkeit von der gesamten Gebrauchtanlage über gebrauchte Komponenten bis hin zu einzelnen Ersatzteilen aus Altanlagen bezüglich Abbau, Aufarbeitung, Inbetriebnahme bzw. Einbau entwickelt werden.

#### 8.3.1 Basisstrategie für die Implementierung von Maßnahmen Integrierter Produktpolitik

Die Durchführung der Projektarbeit beim Hersteller erfolgt durch das fachlich entsprechende Referat als von den Geschäftsgebieten unabhängige Stabsstelle mit beratender Funktion. Aus dieser Position heraus werden mit Unterstützung durch Wissenschaft, Informationstechnik-Experten und Entsorger prinzipiell zwei Wege zur Umsetzung Integrierter Produktpolitik beschritten (Bild 87):

Einerseits wird die Führungsebene des Herstellers im Rahmen der turnusgemäßen Arbeitstreffen und bei sonstigen internen Veranstaltungen über die Aufarbeitung als Maßnahme im Rahmen der Integrierte Produktpolitik, über deren Inhalte und über die ökologischen und ökonomischen Potentiale informiert. Dies soll gleichermaßen Interesse und Verständnis für die Situation wecken und mögliche Veränderungen bei den an der Aufarbeitung beteiligten Unternehmenseinheiten vorbereiten.

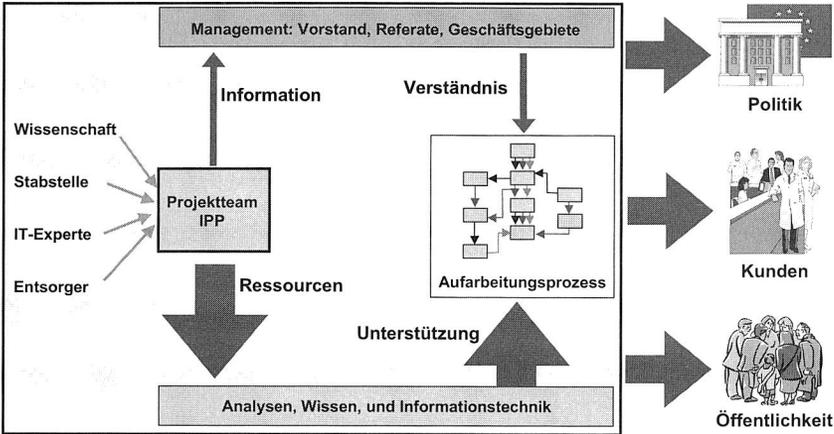


Bild 87: Strategie für die Implementierung Integrierter Produktpolitik bei medizinischen Systemen

Der Schwerpunkt der Arbeiten liegt jedoch andererseits in der Nutzung der verfügbaren, komplementären Ressourcen bezüglich Analyse, Wissen und Informationstechnik, um die beteiligten Unternehmenseinheiten kurzfristig und effizient zu unterstützen. Ein weiterer Schwerpunkt der Arbeiten bildet die begleitende Öffentlichkeitsarbeit, um die Thematik der Integrierten Produktpolitik weit zu streuen, und so deren Gestaltungschancen durch entsprechende Kommunikation (vgl. [187]) auszuschöpfen.

### 8.3.2 Entwicklung eines Grobkonzeptes zur Aufarbeitung medizinischer Röntgendiagnosesysteme

Die aus den bisher implementierten Abläufen ermittelten und teilweise ergänzten Basisfunktionen zur Berücksichtigung der vier Aufarbeitungsstrategien sind zusammen mit den internen und externen Akteuren in Bild 88 dargestellt. Im weiteren werden jedoch nur die wesentlichen Funktionen mit ihren Optimierungspotentialen und Ansätzen aufgezeigt.

#### Akquisition von Altanlagen

Unter Akquisition von Altanlagen ist die Meldung von *Anlagen zum Abbau* mit bzw. ohne Erstellung eines Angebotes zu verstehen. Altanlagen werden oft im Zuge von Neugeschäften in Kliniken oder Praxen ersetzt. Dabei ist zu unterscheiden, ob das primäre Ziel das einfache Entfernen der Anlage ist, oder ob ein ggf. anzusetzender Restwert der Altanlage in die aktuellen Vertriebsverhandlungen einfließen soll. Darüber hinaus ist durch die Einrichtung geeigneter Abläufe möglichst sicherzustellen, dass Altanlagen vor unbefugtem Zugriff durch Dritte geschützt werden.

Aktuell sind zwei parallele Prozesse für die Akquisition von Altanlagen installiert, die weitgehend manuell miteinander gekoppelt sind. Als Zwischenergebnis ist das Zu-

sammenlegen beider Prozesse angestrebt. Denkbar ist hier ein Internetportal, auf das die Feldorganisation mit unterschiedlichen Rechten zugreifen kann. Ausgehend von den eingetragenen Daten und der Auftragsart (zwingender Abbau / Angebotserstellung) können damit die jeweils betroffenen weiteren Akteure informiert werden. Dadurch liegen dann auch wichtige Daten zu den Altanlagen, die bei den weiteren Abläufen zwingend erforderlich sind, bereits in elektronischer Form vor.

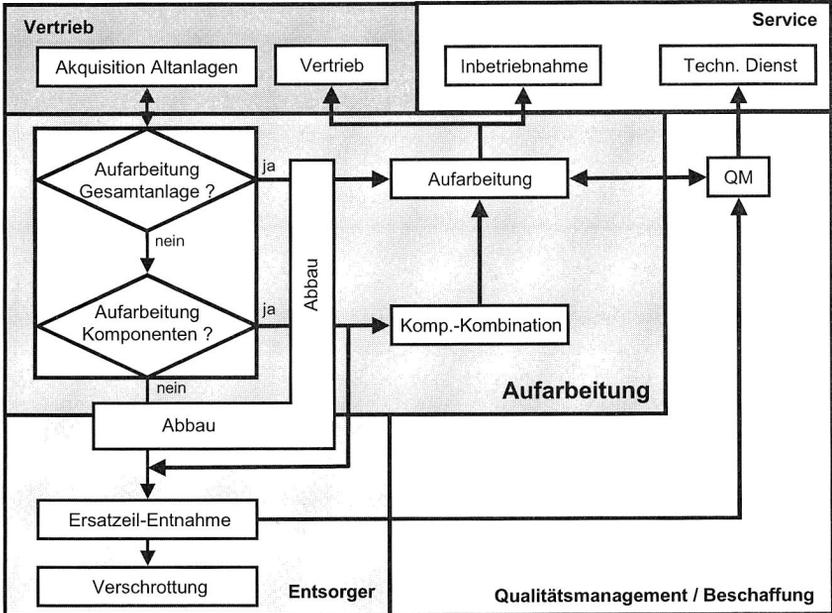


Bild 88: Basisfunktionen der Aufarbeitung medizinischer Systeme

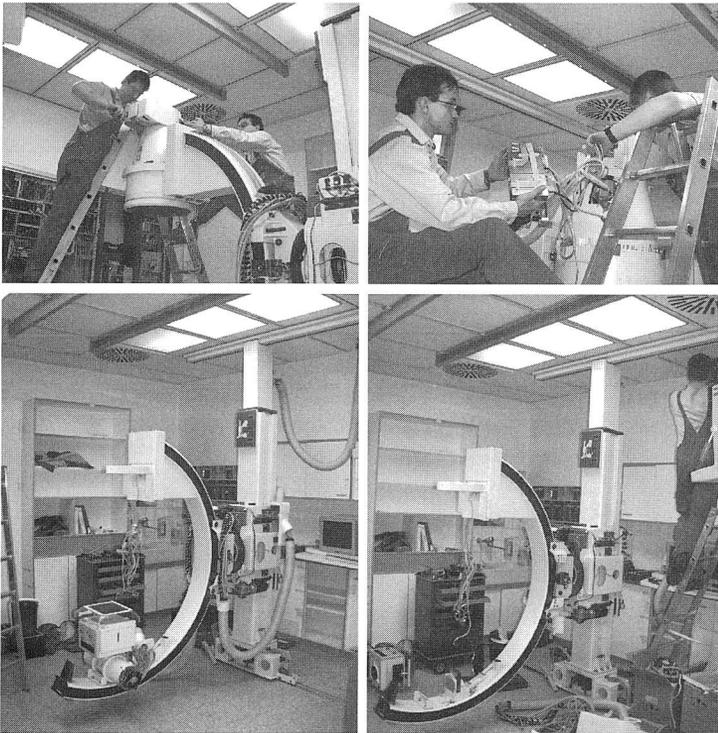
### Entscheidung über die Aufarbeitungsstrategie

Ausgehend von Basisdaten, die bei der Akquisition von Altanlagen geliefert werden, sind aus den ursprünglichen Verkaufsunterlagen sowie aus verschiedenen Systemen, beispielsweise des Kundendienstes, weitere Informationen über Zustand und Ausstattung der Altanlage zu ermitteln. In Form einer verbal-argumentativen Bewertung aus dem Erfahrungswissen der Beteiligten heraus und unter Berücksichtigung der aktuellen Marktlage, des voraussichtlichen Aufarbeitungsaufwandes sowie der Zulassung nach den länderspezifischen Schutzvorschriften wird die Entscheidung über die Rücknahme bzw. Aufarbeitungsstrategie getroffen. Des Weiteren wird oftmals eine körperliche Begutachtung für die Entscheidungsfindung durchgeführt.

Unterstützung kann hier in Form einer automatisierten Bereitstellung relevanter Daten aus den verschiedenen DV-Systemen sowie durch ein Kalkulationswerkzeug zur Abschätzung von Restwert und Aufarbeitungsaufwand gegeben werden.

### **Qualifizierter und nicht qualifizierter Abbau**

Altanlagen, die komplett oder in wesentlichen Teilen aufgearbeitet werden sollen, sind weitgehend zerstörungsfrei, d.h. qualifiziert oder teil-qualifiziert abzubauen. Röntgendiagnoseanlagen sind in der Regel baulich beim Kunden integriert, d.h. besondere Anforderungen an den Abbau werden gestellt, weil einerseits oftmals Deckenkomponenten (vgl. Bild 89) mit erheblichem Gewicht in der richtigen Reihenfolge und andererseits sehr empfindliche Komponenten demontiert werden müssen.

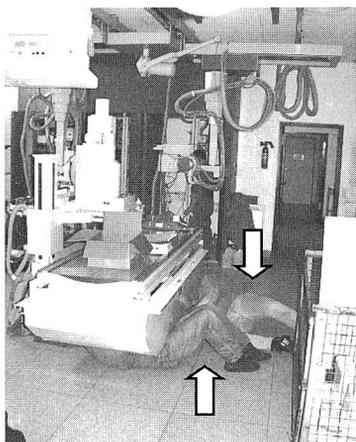


*Bild 89: Teilqualifizierter Abbau einer Angiographieanlage*

Ziel eines nicht qualifizierten Abbaus ist die möglichst rasche und effiziente Entfernung einer Anlage beim Kunden. Dabei werden ebenfalls erhebliche Anforderungen an die Erfahrung z.B. bezüglich der Demontage von schweren Deckenkomponenten sowie der Zerlegung in Transporteinheiten gestellt, die durch oftmals enge Ausgänge und Aufzüge transportiert werden können. Daneben darf auch durch den Einsatz zerstörender Demontagetechniken der übrige Betrieb beim Kunden in Krankenhäusern und Arztpraxen z.B. durch Lärm oder Verschmutzung nicht weiter beeinträchtigt werden.

Röntgensysteme generieren zur Erzeugung der Röntgenstrahlen eine elektrische Hochspannung und müssen daher an eine entsprechend leistungsstarke Energieversorgung angeschlossen sein. Daraus resultieren weitreichende Anforderungen bezüglich der Arbeitssicherheit und damit einer entsprechend qualifizierten Außerbetriebnahme der Anlage.

Dagegen sind einige Komponenten der Anlagen jedoch erst nach der elektromechanischen Bewegung von Anlagenteilen effizient und ergonomisch zu entfernen. Damit ist die Kooperation zwischen kompetenten Fachleuten, die sowohl zum Bewegen als auch zur Außerbetriebnahme der Anlage befugt sind, und den für den mechanischen Abbau zuständigen Dienstleistungsunternehmen von besonderer Bedeutung (Bild 90).



**Aktueller Ablauf:**

- Gesamte Anlage bereits außer Betrieb genommen
- Sehr aufwendige Demontage von Vertikal-Strahler und Ausgleichsgewichten
- Zeitbedarf für Ausbau: ca. 1 Mann-Stunde

**Optimaler Ablauf:**

- Anlage nur teilweise außer Betrieb genommen
- Drehen des Tisches in Vertikal-Lage, dadurch freier Zugang zu Strahler und Ausgleichsgewichten
- Zeitbedarf für Ausbau: ca. 15 Minuten

Bild 90: Ablaufoptimierung beim Abbau von Altanlagen

Ziel muss es sein, den Ablauf zur Außerbetriebnahme der Anlage zu optimieren sowie eine bessere Informationsgrundlage für den Dienstleister zu schaffen. Dieser muss vor allem bei der qualifizierten und teil-qualifizierten Demontage in die Lage versetzt werden, Baugruppen einer Komponente zweifelsfrei zu identifizieren bzw. effizient und qualitativ einwandfrei zu demontieren. Hierfür ist zu prüfen, ob vorhandene Informationen aus der Ersatzteilbeschaffung bzw. den Technischen Unterlagen, welche die einzelnen Komponenten beispielsweise auch bildhaft darstellen, durch die informationstechnische Anbindung verfügbar werden, oder ob ggf. durch entsprechende Schulungsmaßnahmen die genannten Anforderungen zu erfüllen sind.

### **Aufarbeitung**

Industrielle Prozessstrukturen sind auf Neuproduktion oder Kundendienstleistungen während des Produktgebrauchs ausgerichtet. Damit sind prinzipiell alle internen Stellen und Informationen vorhanden, die auch für die effiziente und rechtskonforme

Aufarbeitung benötigt werden. Problematisch ist hierbei, dass der eigentliche Informationsfluss innerhalb des Unternehmens ebenfalls auf Neuprodukte ausgerichtet ist, so dass oftmals notwendige Informationen vorhanden, jedoch nicht für einen effizienten Prozessablauf im Rahmen der Aufarbeitung verfügbar sind.

Für das In-Verkehr-Bringen medizinischer Produkte gibt es zum Schutz von Bedienungspersonal, Patienten und technischem Personal unter anderem bezüglich des Strahlen- und Gesundheitsschutzes international zahlreiche gesetzliche Regelungen (vgl. [175]). Die dokumentierte Erfüllung dieser Auflagen – unter Berücksichtigung spezifischer Aspekte wie beispielsweise Hygiene oder Fortschreibung des Stands der Technik – ist eine Grundvoraussetzung für die Aufarbeitung und die erneute Überlassung gebrauchter medizinischer Produkte und damit für deren Absetzbarkeit.

Beispielsweise werden bei den mit Projektcharakter eingerichteten Abläufen zur Aufarbeitung aus organisatorischen und logistischen Gründen sowie aufgrund der Anforderungen an die Qualitätssicherung und den Strahlenschutz über 20 Dokumente mit zahlreichen Einzeldaten zumeist manuell erstellt, weil eine informationstechnische Verknüpfung untereinander und mit den vorhandenen Datenquellen nicht gegeben ist. Die bisher eingerichteten Abläufe zur Aufarbeitung sind daher mit steigendem Durchsatz an Altanlagen fehleranfällig, was in schneller Konsequenz aufgrund des potentiell negativen Qualitätsbildes insgesamt zu einer Gefährdung der Aufarbeitungsaktivitäten führen kann.

Auf Basis einer Analyse der für die Aufarbeitung benötigten Daten und der zugrunde liegenden Datenlandschaft bei den an den Prozessen beteiligten Akteuren ist daher eine praxistaugliche und effiziente informationstechnische Unterstützung zu konzipieren. Entsprechende Ansätze werden hinreichend bei Huber [62] beschrieben.

### **Ersatzteilgewinnung aus Altanlagen**

Neben der Rücknahme und Reparatur gesamter Anlagen und Großkomponenten kommt der Entnahme funktionstüchtiger Bauteile aus Altanlagen als Ersatzteile eine wesentliche Bedeutung zu. Bisher erfolgte die Ersatzteilentnahme bis hin auf Baugruppen-Ebene (z.B. Tiefenblenden, Fernsehkameras etc.).

Wie bereits mehrfach genannt, sind mit der Anwendung der medizinischen Diagnostetechnologien auf den Menschen hohe Anforderungen an die Zuverlässigkeit und Betriebssicherheit der Anlagen und ihrer Komponenten verbunden. Um diese Anforderungen zu erfüllen, werden auch für Standardaufgaben oftmals Baugruppen bis hin auf Bauteilebene eingesetzt, die speziell für den Anlagenhersteller und seine hohen Sicherheitsstandards – und damit verbunden auch mit entsprechenden ökologischen Aufwänden – produziert werden. Somit ist auch bei vergleichsweise einfachen Baugruppen und Bauteilen eine hohe ökologische und ökonomische Wertschöpfung gegeben.

Medizinische Anlagen sind überwiegend bis zum Abbau in Betrieb und damit voll funktionsfähig. Dies bedeutet, dass beispielsweise bei Anlagen zur Verschrottung mit

einem Alter von bis zu 30 Jahren noch Baugruppen zu identifizieren sind, die bei entsprechender Qualitätssicherung durchaus als Ersatzteile für installierte Anlagen oder als Ersatzteile im Zuge der Aufarbeitung von Altanlagen eingesetzt werden können. Dabei liegen die Einzelnutzen dieser Ersatzteile (z.B. Platinen) aus Altanlagen mit einem Gewicht von wenigen Gramm im Betrag mitunter um Faktor 2 - 3 über den Entsorgungskosten der Gesamtanlage mit einem Gewicht von mehreren Tonnen.

Um die weitreichenden ökologischen und ökonomischen Potentiale durch die Entnahme von Ersatzteilen aus Altanlagen auszuschöpfen, sind nicht alleine aus Qualitäts- und Haftungsfragen umfangreiche Maßnahmen zur robusten Gestaltung der entsprechenden Prozesse zu entwickeln. Die wichtigste Voraussetzung ist die zusätzliche Implementierung von Organisationsstrukturen, Abläufen und Ressourcen im partnerschaftlichen Verbund verschiedener Akteure, die eine qualitativ hochwertige Entnahme benötigter Bauteile sowie deren entsprechende (z.B. EGB-gerechte) Einlagerung, Bereitstellung und Qualitätssicherung gewährleisten. Darüber hinaus ist eine umfassende informationstechnische Unterstützung für die Bedarfserfassung, die Lokalisierung von Ersatzteilen in Altanlagen, die Lagerhaltung und den Lagerabruf vorzusehen.

In einem ersten Schritt wurden dazu die aktuellen Abläufe der konventionellen Ersatzteilversorgung vor allem mit Blick auf die Qualitätssicherung untersucht. Ausgangspunkt ist die Überlegung, dass auch bei der bisherigen konventionellen Ersatzteilversorgung zu einem bestimmten Zeitpunkt das Qualitätsniveau eines Bauteils festgestellt wird und alle weiteren Qualitätsmaßnahmen auf das Erhalten dieses Niveaus ausgerichtet sind. Damit werden zwei Aufgabenfelder definiert: das Feststellen des aktuellen Qualitätsniveaus eines Ersatzteils aus Altanlagen und die Maßnahmen zum Qualitätserhalt. Für die Feststellung der einwandfreien und zuverlässigen Funktion von einzelnen Baugruppen und Komponenten können spezifische Funktionsprüfungen an der Gesamtanlage entwickelt werden, aus deren Ergebnis Rückschlüsse auf die Qualität dieser Bauteile ohne Einzelprüfungen abzuleiten sind. Aus der Betrachtung der aktuellen Vorgänge bei der konventionellen Ersatzteilversorgung sind neben den erforderlichen Maßnahmen zur Sicherung des Qualitätsniveaus hinaus auch die Anknüpfungspunkte für Gebrauchtersatzteile in die Abläufe zu ermitteln. Durch geeignete organisatorische Maßnahmen können dann die Altersatzteile in die aktuellen Logistikprozesse eingebunden werden.

### **Verschrottung**

Die wesentlichen Anforderungen liegen auch bei der Zerlegung bzw. Verschrottung in der Optimierung des Informationsmanagements. Beispielsweise gehören zu medizinischen Systemen oftmals Federgewichte, die mit einer hohen Kraft vorgespannt sind und damit bei der Zerlegung ein Gefahrenpotential darstellen. Ebenso führt die Kenntnis über Sperr- und Verriegelungsmechanismen der beweglichen Teile zu wesentlichen Zeitersparnissen bei der Zerlegung (Bild 91). Zu ermitteln ist hier die effizienteste Form der Informationsbereitstellung, die durch Schulung, Druckmaterial und auch durch konstruktive Maßnahmen erfolgen kann.



Bild 91: Zerlegung einer 2-Ebenen-Röntgendurchleuchtungsanlage

#### 8.4 Einordnung der Aufarbeitung medizinischer Systeme in die Anforderungen einer Integrierten Produktpolitik

Integrierte Produktpolitik hebt auf die Verbesserung der Umweltrelevanz durch Ermittlung und Erschließung von Potentialen entlang des gesamten Produktlebenszyklus ab. Durch eine pragmatische Lebenswegbetrachtung ist bei medizinischen Röntgendiagnosesystemen als Beispiel komplexer Hochtechnologie-Produkte in der Rücknahme und Aufarbeitung derartiger Anlagen ein signifikantes Potential zur Reduktion der aus Herstellung, Betrieb und Entsorgung resultierenden Umweltbelastungen festzustellen. Über die ökologischen Vorteile hinaus ist dadurch direkt und indirekt ein zusätzlicher wirtschaftlicher Beitrag zum Unternehmensergebnis zu erwarten.

Um diese Vorteile auszuschöpfen, ist eine Bewusstseinsänderung in den Unternehmen herbeizuführen, durch welche die industrielle Sichtweise über Herstellung und ggf. Gebrauch hinaus auf den erweiterten Lebenszyklus ausgedehnt wird (Bild 92). Darüber hinaus sind die entsprechenden Prozesse einzurichten bzw. zu modifizieren,

um die Aufarbeitung derartig komplexer Systeme auch unter den restriktiven Randbedingungen des Strahlen- und Gesundheitsschutzes zu ermöglichen.

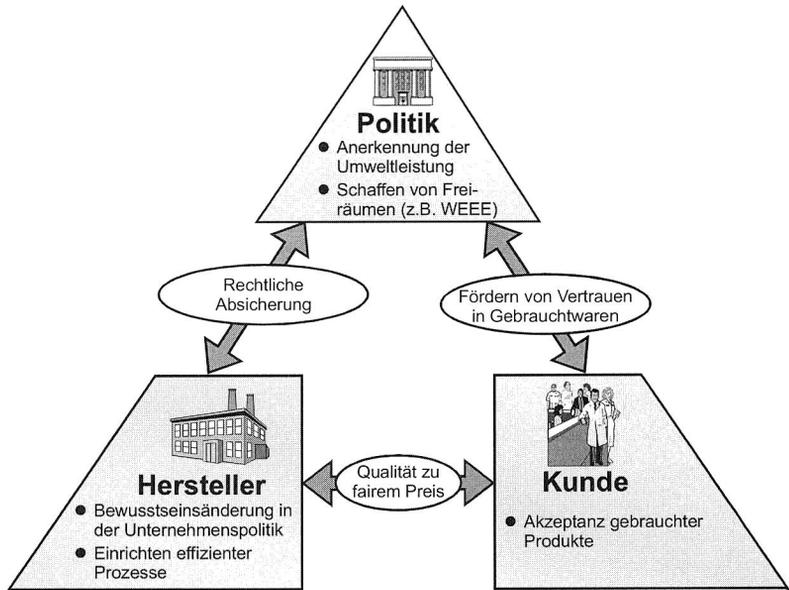


Bild 92: Einordnung der Aufarbeitung in die Integrierte Produktpolitik

In der Verantwortung des Kunden liegt die Akzeptanz von Gebrauchssystemen als dem Einsatzzweck entsprechende, hochwertige Produkte. Voraussetzung für diese Akzeptanz ist das Schaffen von Vertrauen in Gebrauchsanlagen durch Zusicherung eines hohen Qualitätsniveaus und Anbieten der Gewährleistung bzw. Ersatzteilversorgung weitgehend analog zu Neuwaren. Eine weitere Voraussetzung ist das Angebot der Gebrauchsanlagen zu einem adäquaten Preis, d.h. das Erfüllen der Anforderungen an die Effizienz der Aufarbeitungsprozesse.

Die Aufgaben der Politik bezüglich der Aufarbeitung medizinischer Anlagen sind vielschichtig. Wesentlich ist dabei die Anerkennung der freiwilligen Aktivitäten des Herstellers. Durch das Bereitstellen von differenzierten Aufarbeitungsstrategien werden Anlagen unabhängig von Alter und Zustand ohne gesetzlichen Zwang vom Hersteller zurückgenommen. Die Regelungen zur Rücknahmeverpflichtung beispielsweise nach der europäischen Richtlinie WEEE [160] sind damit nicht erforderlich. Vielmehr sollte durch den Gesetzgeber ein entsprechender Freiraum für die z.B. vertragsrechtliche Gestaltung der Rücknahme gewährt werden (vgl. [177]). Daneben ist insbesondere auch die rechtliche Absicherung von neuwertigen im Vergleich zu neuen Produkten (vgl. [123]) in der Verantwortung des Gesetzgebers zu sehen.

Letztlich kann die Politik durch die Vorgabe von rechtlichen Rahmenvorschriften bezüglich einheitlicher Qualitätsmaßstäbe für gebrauchte Produkte z.B. in Form von Umweltzeichen oder Gütesiegeln das Vertrauen des Kunden in Gebrauchsgüter und damit deren Absatz fördern. Wesentlich ist hierbei, dass derartige Kennzeichen entsprechend auch international kommuniziert werden, damit Hochtechnologieprodukte in Ländern mit hohem Bedarf bei gleichzeitig geringen wirtschaftlichen Ressourcen einer breiten Anwendung zugeführt werden können.

Damit wird beispielhaft aufgezeigt, wie das Zusammenspiel der Akteure im Sinne einer Integrierten Produktpolitik bei Hochtechnologieprodukten gestaltet werden kann. Es ist festzuhalten, dass auch bei diesem Beispiel Umweltschutz und Betriebswirtschaft Synergien freisetzen, die mit Vorteilen für alle Akteure verbunden sind.

## 9 Zusammenfassung

Aktuelle Instrumente der Umweltpolitik weisen vom betrieblichen oder produktionsbezogenen hin zum produktbezogenen Umweltschutz. Wesentliche Aspekte sind die zunehmende Integration präventiver ordnungsrechtlicher Elemente und die Etablierung des Verursacherprinzips unter anderem durch die erweiterte Herstellerverantwortung. Produktbezogene, umweltrechtliche Aspekte beeinflussen damit direkt die Planung und Gestaltung von Produkten durch den Hersteller. Die Berücksichtigung des Produktverhaltens in der Entsorgungsphase wird durch die aktuelle Umweltgesetzgebung zum Preisfaktor, der in der Zukunft wesentlichen Einfluss auf den Markterfolg haben wird.

Die derzeit im Gesetzgebungsverfahren behandelten europäischen Richtlinien zu Elektro- und Elektronikgeräten beinhalten detaillierte Vorgaben bezüglich Stoffverbote und –beschränkungen, zwingend zu demontierenden Bauteilen und Verwertungs- bzw. Recyclingquoten. Daneben ist eine weitere Richtlinie zur umweltgerechten Gestaltung von Elektro- und Elektronikgeräten bzw. zur deren ökologischen Bewertung in der Entwurfsphase. Die Verantwortung hinsichtlich der Einhaltung dieser Anforderungen wird zukünftig dem Hersteller übertragen, für den daher ein dringender Bedarf an effizienten Werkzeugen zur Berücksichtigung der rechtlichen Kriterien abzuleiten ist.

In dieser Arbeit wurde auf der Basis des bereits bestehenden Produktanalysewerkzeugs ReGrEd / DisPlay ein Ansatz zur effizienten und umfassenden Berücksichtigung der Vorgaben aus den zukünftigen europäischen Richtlinien entwickelt. Dazu wurden zunächst weitreichende Modifikationen am Algorithmus zur Demontageplanung erarbeitet und implementiert. Die Neuentwicklung betraf die Reduktion des Produktmodells und des Modells der Entsorgungsprozesse auf die zur Analyse wesentlichen Daten, die vollständig rekursive Abarbeitung des Optimierungsalgorithmus und die Einführung neuer Abbruchkriterien zur Reduktion der Rechenoperationen. Die Auswirkungen dieser Änderungen wurden an Praxisbeispielen verifiziert, und eine Erhöhung der Analysegeschwindigkeit um etwa den Faktor  $10^3$  festgestellt.

Die rechtlichen Anforderungen nach den europäischen Richtlinien zu Elektro- und Elektronikgeräten lassen sich allgemein nach bauteilbezogenen, demontagebezogenen und gemischten Kriterien unterscheiden, deren quantitative Ausprägung von der jeweiligen Produktart abhängt. Stoffverbote und –beschränkungen sind bauteilbezogene Aspekte und lassen sich in ReGrEd / DisPlay über die Materialdefinitionen direkt mit dem Produktmodell verknüpfen. Die einzuhaltenden Verwertungs- und Recyclingquoten haben unmittelbaren Einfluss auf die Berechnung der wirtschaftlich optimalen Demontagetiefe und waren deshalb innerhalb des Analysealgorithmus zu berücksichtigen. Sogenannte Pflichtdemontageteile werden aufgrund des Stoffinhaltes bzw. einer Bauteilfunktion definiert und können direkt aus dem Produktmodell heraus ermittelt werden. Die zwingende Entfernung dieser Bauteile bei der Zerlegung des Produktes war ebenfalls im Analysealgorithmus zu integrieren. Durch das Pro-

duktmodell als Darstellung der Herstellphase, einem Gebrauchsszenario sowie der berechneten optimalen Demontagetiefe als Abbild der Entsorgungsphase können die Indikatoren für eine Bewertung der Umweltverträglichkeit eines Produktes bereitgestellt werden. Zur Berücksichtigung dieser Indikatoren wurde im Rahmen dieser Arbeit ebenfalls ein Konzept entwickelt und vorgestellt. Damit können innerhalb eines Werkzeugs – flexibel an die jeweiligen produktspezifischen Anforderungen angepasst – alle rechtlichen Vorgaben der europäischen Richtlinien zu Elektro- und Elektronikgeräten schnell und effizient analysiert werden.

Integrierte Produktpolitik als innovativer Ansatz der Umweltpolitik auf der Basis von Kooperation und Kommunikation wird derzeit von Staat, Industrie, Verbraucher und Verbänden gestaltet. Ziel ist die ökologische Optimierung von Produkten entlang des gesamten Lebensweges durch Ermitteln und Umsetzen der spezifischen Beiträge aller betroffenen Akteure. Aufgabe der Wirtschaft ist es hierbei unter anderem, eine aktive Rolle bei der Festlegung der umweltpolitischen Strukturen einzunehmen und die Möglichkeiten und Grenzen freiwilliger Maßnahmen aufzuzeigen. In dieser Arbeit wurden verschiedene, teilweise auch unscharf formulierte Interpretationen zur Integrierten Produktpolitik aufgearbeitet und dargestellt. An Hand zweier Best-Practice-Beispiele wurden Möglichkeiten für industrielle Beiträge erarbeitet und bezüglich ihrer Einordnung in die Integrierte Produktpolitik bewertet.

Durch interdisziplinäre Zusammenarbeit wurde für das Haushaltsgerät Bodestaubsauger ein innovatives Gehäusekonzept auf der Basis von Formschaumteilen entwickelt, das weitreichende Vorteile hinsichtlich der Umweltverträglichkeit aufweist. So konnten die Werkstoffvielfalt im Vergleich zu Referenzgeräten um 85%, die Montagezeit durch den weitgehenden Verzicht auf Verbindungselemente um 30%, die Masse um 20% und die Demontagezeit um 93% reduziert werden. Ein wesentliches Ergebnis an diesem Beispiel war die Erschließung der ökologischen Potentiale bei gleichbleibenden Herstellkosten. Damit konnte nachgewiesen werden, dass mit der Entwicklung innovativer, umweltverträglicher Produkte keineswegs eine Erhöhung der Kosten verbunden sein muss.

In einem zweiten Beispiel wurden Gestaltungsmöglichkeiten einer Integrierten Produktpolitik bei medizinischen Röntgendiagnosesystemen repräsentativ für komplexe Hochtechnologieprodukte untersucht. Auf der Basis einer qualitativen und quantitativen Lebenswegbetrachtung wurden die Rücknahme dieser Produkte und deren Aufarbeitung nach spezifisch vom Zustand einer Altanlage abhängigen Strategien als vergleichsweise einfache Möglichkeit für die Reduzierung der produktbezogenen Umweltbelastungen ermittelt. Die Anwendung der untersuchten Produkte auf den Menschen führt jedoch bei der Erschließung eines weiteren Lebenszyklus zu weitreichenden Anforderungen an die industriellen Abläufe bezüglich Robustheit, Dokumentation, Qualitätsmanagement und Sicherheit. Auf der Basis einer Analyse von Prozessen in der Praxis wurden die entsprechenden Anforderungen an die Einrichtung effizienter industrieller Systeme zur Aufarbeitung von Großgeräten formuliert.

Auch an diesem Beispiel konnte aufgezeigt werden, dass mit der Ausschöpfung ökologischer Potentiale, die sogar außerhalb des konventionellen Handlungsfeldes der Industrie liegen, wichtige wirtschaftliche Vorteile vom direkten Beitrag zum Unternehmensergebnis bis hin zur Erschließung zusätzlicher Marktsegmente verbunden sind. Damit konnte auch dargestellt werden, dass die Rücknahme von Röntgendiagnosesystemen als Beispiel für Großgeräte der Investitionsgüterindustrie im vitalen Interesse des Herstellers liegen kann und daher nicht durch eine gesetzliche Rücknahmeverpflichtung abgedeckt werden muss.

Wie in dieser Arbeit aufgezeigt wurde, nehmen umweltpolitische Aspekte in Form von gesetzlichen Restriktionen oder der Einladung zur Kooperation einen wesentlichen Einfluss auf die zukünftige Ingenieurstätigkeit. Ziel muss es daher sein, produktbezogenen Umweltschutz als Chance zu begreifen, ökologische und unmittelbar damit verbundene ökonomische Potentiale im Wirkungsbereich des Herstellers auszunutzen, die bisher aus der konventionellen Sichtweise heraus nicht erfasst werden. Dadurch kann auch die Möglichkeit erschlossen werden, Art und Wirkungsweise umweltpolitischer Instrumente spezifisch für die eigenen Produkte und Bedürfnisse mitzugestalten und die tatsächlich vorhandenen Synergien zwischen Ökonomie und Ökologie effizient auszuschöpfen.

## Literatur

- [1] Ahbe, St.; Braunschweig, A.; Müller-Wenk, R.: „Methodik für Ökobilanzen auf der Basis ökologischer Optimierung“; Schweizerisches Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (Hrsg.); Eigenverlag, Bern, 1992.
- [2] Akermark, A.-M.: “Environmentally adapted product development from the designers perspective”; Licentiate Thesis, Department of Machine Design, Royal Institute of Technology; Stockholm, 1999.
- [3] Altung L., Legarth B.: "Life Cycle Engineering and Design", Annals of CIRP Vol. 44/2/1995
- [4] Archey, W.T.; McCurdy, D.: Offener Brief an den Vizepräsidenten der Vereinigten Staaten Albert Gore Jr.; American Electronics Association & Electronic Industries Alliance; Washington D.C., USA, 18.07.2000.
- [5] Bartlsperger, R.: “Von Abfallbegriff und Abfallregime”; Verwaltungsarchiv 1995, S.32.
- [6] Baum, K.-J.: „Forderung eines praxisorientierten Entsorgungsmodells“; Tagungsunterlagen der *EUROFORUM-Konferenz Elektro(nikschrott*, 6./7.11.2001, Düsseldorf, 2001.
- [7] Birkhofer, H.; Spath, D.; Winzer, P.; Müller, D.: „Umweltgerechte Produktentwicklung – Ein Leitfaden für Entwicklung und Konstruktion“; Deutsches Institut für Normung (Hrsg.); Beuth Verlag; Berlin, Stand November 2001.
- [8] Blumberg, J.; Blum, G.; Korsvold, A.: “Environmental Performance and Shareholder Value”; World Business Council for Sustainable Development (Hrsg.); Genf, Schweiz, 1997.
- [9] Böhke, U. H.: “Rechnerunterstützte Analyse von Produktlebenszyklen”, Dissertation, Technische Hochschule Aachen, 1994.
- [10] Boukari, F.: „Electrolux takes entire life cycle into account“; In: *EnviroReport No. 2 IPP - Integrated Product Policy*; Swedish Environmental Protection Agency / Swedish Ministry of the Environment (Hrsg.); Stockholm, Januar 2000.
- [11] Boustead, I.: „Eco-Balance Methodology for Commodity Thermoplastics“; Association of Plastics Manufacturers in Europe – APME (Hrsg.); Brüssel, 1992
- [12] Boustead, I.: “Ökobilanzen – Theorie und Definitionen“; in: Brandrup, J.: Wiederverwertung von Kunststoffen; Hanser Verlag; München, Wien, 1995.
- [13] Brinkmann, T.; Ehrenstein, G.W.; Steinhilper, R.: „Umwelt- und recyclinggerechte Produktentwicklung“; WEKA-Fachverlag für technische Führungskräfte; Augsburg, Stand 2000.

- [14] Buchholz, C.: „DEMROP Plus – Design and Evaluation Method for the Recyclability of Electromechanical Products“; In: Birkhofer, H.; Spath, D.; Winzer, P.; Müller, D.: „Umweltgerechte Produktentwicklung – Ein Leitfaden für Entwicklung und Konstruktion“; Deutsches Institut für Normung (Hrsg.); Beuth Verlag; Berlin, Stand November 2001.
- [15] Buchholz, C.: „ReAsCo – Re-Use of Assembly Components“; In: Birkhofer, H.; Spath, D.; Winzer, P.; Müller, D.: „Umweltgerechte Produktentwicklung – Ein Leitfaden für Entwicklung und Konstruktion“; Deutsches Institut für Normung (Hrsg.); Beuth Verlag; Berlin, Stand November 2001.
- [16] Bullinger, H. J.; Warschat, J. Bopp, J. Wörner, K.: "Approaches to Product Life-Cycle Cost Estimation in Concurrent Engineering", *Proceedings of the 3rd International Conference on Concurrent Engineering and Electronic Design Automation*, April 10-12 1996, Cambridge, UK, 118-122.
- [17] Cederlof, K.: "Consolidated environmental law – a good basis for cleaner products"; In: *EnviroReport No. 2 IPP - Integrated Product Policy*; Swedish Environmental Protection Agency / Swedish Ministry of the Environment (Hrsg.); Stockholm, Januar 2000.
- [18] Charter, M.; Young, A.; Kielkiewicz-Young, A.; Belmane, I.: "Integrated Product Policy and eco-product development"; In: Charter, M.; Tischner, U.: *Sustainable Solutions – Developing Products and Services for the Future*; Greenleaf Publishing Ltd, London, 2001.
- [19] Darnall, N. M., Nehman, I. G., Priest, J. W., Sarkis, J., „A review of environmentally conscious manufacturing theory and practices“, *International Journal of Environmentally Conscious Design and Manufacturing*, 3(2), 49-57.
- [20] Dieckmann, M.: "Was ist Abfall"; *Zeitschrift für Umweltrecht* 1995, Heft 4, S. 169.
- [21] Eversheim, W.; Albrecht, T.; Klöckner, R.; Mann, E.W.: „Vergleich ökologischer und ökonomischer Bewertung unterschiedlicher industrieller Produktionsverfahren mit Hilfe eines Computerprogramms“; ,In: VDI-Gesellschaft Energietechnik (Hrsg.): „Fortschrittliche Energiewandlung und –anwendung, Band1“; VDI-Berichte 1321-1; VDI-Verlag; Düsseldorf, 1997.
- [22] Falkman, E.G.: „Sustainable Production and Consumption“; *World Business Council for Sustainable Development* (Hrsg.); Genf, Schweiz, 1996.
- [23] Feldmann, H.: „Kunststoffe im Spannungsfeld zwischen Anspruch und Wirklichkeit der EU-Richtlinienvorschläge: WEEE und RoHS“; *Tagungsunterlagen zum 10. Kunststoff und Recycling Kolloquium*; 20./21.09.2001, Krefeld.
- [24] Feldmann, K.; Meedt, O.; Trautner, St.: „Demontage mit flexiblen Werkzeugen“; *maschinen anlagen verfahren mav H. 7/8*, S. 68-69, 1997
- [25] Feldmann, K.; Meedt, O.: „Determination and evaluation of the optimal end of life strategy for products based on simulation of disassembly and recycling“; in: *Life Cycle Networks, Proceedings of the 4<sup>th</sup> CIRP International Seminar on Life Cycle Engineering*, 26-27 June 1997, Berlin, Germany

- [26] Feldmann, K.; Trautner, S.: „Integration abfallrechtlicher Bestimmungen in die Produktgestaltung“; Unterlagen zum FOWEP Fachseminar *Kreislaufwirtschaft bei elektronischen Geräten*; Erlangen, 06.11.1997.
- [27] Feldmann, K.; Meedt, O.: "Design for Recycling based on Computer assisted simulation of the end-of-life" *Production Engineering, Annals of the WGP*, Vol **IV/2** (1997) 101-104.
- [28] Feldmann, K.; Meedt, O.: "Development of a Software to Support Design for Environment", *Proceedings of the 31st CIRP International Seminar on Manufacturing Systems*, Berkeley, 1998
- [29] Feldmann, K.; Meedt, O.; Trautner, St.: "Computer Based Design for Disassembly and Recycling under Consideration of Environmental Regulations"; *Proceedings of the CIRP 5th International Seminar on Life Cycle Engineering*, Stockholm, Schweden 16.-18.09.1998.
- [30] Feldmann, K.; Trautner, St.: „Demontagetechniken bei Elektronikaltgeräten“; BayFORREST/FORMAT Berichtsheft 10 zum Fachseminar *Altelektronik und Produktverantwortung*, 22.04.1999, München
- [31] Feldmann, K.; Trautner, St.; Meedt, O.: "Design for Recycling and Integrated Disassembly Planning". *Proceedings of the CIRP 6th International Seminar on Life Cycle Engineering*, June 1999, Kingston, Canada
- [32] Feldmann, K.; Meedt, O.; Trautner, S.; Scheller, H.; Hoffman; W.: "The "Green Design Advisor": A tool for Design for Environment". *Journal of Electronics Manufacturing*, Vol. 9, No 1, 2000, S. 17-28
- [33] Feldmann, K.; Trautner, St.: "Design for Environment – Methodology, Implementation and Industrial Experience; Part 1: Computer Based Disassembly Planning and Design for Recycling", *Proceedings of the International Congress "Electronic Goes Green 2000+"*, September 2000, Berlin
- [34] Feldmann, K.; Trautner, St.; Lohrmann, H.; Melzer, M.: „Computer-based product structure analysis for technical goods regarding optimal end-of-life strategies“. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, IMechE* 2001, Vol. 215 Part B, pp 683-693.
- [35] Fleischer, G.; Lichtenvort, K.; Rebitzer, G.; Schiller, U.: Entwicklungsbegleitendes Instrument für umwelt- und recyclingorientierte Produktentwicklung = euroMat“; VDI-Berichte 1570 zur Tagung *Recyclingorientierte Entwicklung technischer Produkte 2000*; Fellbach, 15./16.11.2000.
- [36] Florenz, K.-H.: „Bericht über den Vorschlag für eine Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates über Elektro- und Elektronikaltgeräte“; A5-0148/2001; Brüssel, 03.05.2001
- [37] Florenz, K.-H.: „Was beinhalten die neuen Richtlinienentwürfe?“; Tagungsunterlagen der *EUROFORUM-Konferenz Elektro(niks)schrott*, 6./7.11.2001, Düsseldorf, 2001.

- [38] Florin, H.; Pfeleiderer, I.; Volz, T.: „Software zur Ganzheitlichen Bilanzierung“; In: Eyerer, P.: „Ganzheitliche Bilanzierung“; Springer Verlag; Berlin, Heidelberg, 1996.
- [39] Franze, H.A.: „Umweltverträglichkeit im Entwicklungsprozess – Instrumente in der Automobilindustrie“; VDI-Berichte 1400 zu Tagung *Markt- und Kostenvorteile durch Entwicklung umweltverträglicher Produkte*; Fellbach, 9./10.06.1998.
- [40] Franze, H. A.: „Integration von Recyclingaspekten in den Produktentwicklungsprozess“; VDI-Berichte 1570 zur Tagung *Recyclingorientierte Entwicklung technischer Produkte 2000*; Fellbach, 15./16.11.2000.
- [41] Frey, O.: „Entsorgung von Elektro- und Elektronik-Altgeräten – Fakten und Argumente“; Position der Elektrotechnik- und Elektronikindustrie; ZVEI (Hrsg.); Frankfurt am Main, 01.11.2000
- [42] Frey, O.: „Kommt eine innovationsfeindliche Überregulierung?“; Tagungsunterlagen der *EUROFORUM-Konferenz Elektro(nikschrott)*, 6./7.11.2001, Düsseldorf, 2001.
- [43] Fritsche, U.R.; Jenseit, W.; Hochfeld, C.: „Methodikfragen bei der Berechnung des Kumulierten Energieaufwands (KEA)“; Öko-Institut Freiberg (Hrsg.); Arbeitspapier im Rahmen des UBA-F&E-Vorhabens Nr. 10401123, Darmstadt, Mai 1999
- [44] Frühbrodt, E., Heidelberger Druckmaschinen AG, Persönliche Mitteilung, Heidelberg, Mai 1999
- [45] Goedkoop, M; Demmers, M.; Collignon, M.: „The Eco-Indicator 95“; Pre Consultants; NOH report 9524; Amersfoort, The Netherlands, 1995
- [46] Grieger, S.: „Entwicklungsmethodik zur umwelt- und recyclinggerechten Produktgestaltung“; VDI-Berichte 1570 zur Tagung *Recyclingorientierte Entwicklung technischer Produkte 2000*; Fellbach, 15./16.11.2000.
- [47] Grieger, S.: „DFE-Tool – Design for Environment“; In: Birkhofer, H.; Spath, D.; Winzer, P.; Müller, D.: „Umweltgerechte Produktentwicklung – Ein Leitfaden für Entwicklung und Konstruktion“; Deutsches Institut für Normung (Hrsg.); Beuth Verlag; Berlin, Stand November 2001.
- [48] Gungor A., Gupta S.M.: „Issues in Environmentally Conscious Manufacturing and Product Recovery: A Survey“, *Journal of Computers and Industrial Engineering*, 1999.
- [49] Hallerbach, A.: „bvse begrüßt Vorschläge zur Europäischen Elektronikschrott-Richtlinie“; Pressemitteilung, Bundesverband Sekundärrohstoffe und Entsorgung e.V. – bvse; Bonn, 20.02.2001.
- [50] Herrmann, C.: „Werkzeug für die demontage- und recyclingorientierte Produktbewertung“; Tagungsunterlagen zum *Kolloquium zur Kreislaufwirtschaft und Demontage – SfB 281*; Berlin, 20./21.01.2000.

- [51] Herrmann, C.; Schöch, H.; Betz, M.; Eyerer, P.: „The Implementation of LCA into DfE“; Proceedings of the *International Congress "Electronic Goes Green 2000+"*; Berlin, September 2000.
- [52] Hesselbach, J.; Herrmann, C.; v. Westernhagen, C.: „Elektro(nik)schrott – Umweltgerechte Produktgestaltung und Planung der Demontage“; *Umwelt Bd. 29* (1999), Nr. 3 – März; S. 6-12.
- [53] Hesselbach, J.; Herrmann, C.; Kim, Y.-K.: „Recycling oriented design – Weak-point identification and product improvement“; Proceedings of the *International Symposium on Sustainable Manufacturing*; Shanghai, China, 16./17.11.1999.
- [54] Hesselbach, J.; Herrmann, C.; Kang, H.-Y.: „Recyclingorientierte Produktentwicklung – Bewertung und Lösungswissen“; *VDI-Berichte 1570 zur Tagung Recyclingorientierte Entwicklung technischer Produkte 2000*; Fellbach, 15./16.11.2000.
- [55] Hipp, C.: Rede anlässlich der Veranstaltung *“IPP Integrierte Produktpolitik“*; Akademie der IHK für München und Oberbayern, München, 11.05.2001.
- [56] Hösel, G.; v. Lersner, H.; Wendenburg, H.: „Recht der Abfallbeseitigung des Bundes, der Länder und der Europäischen Union“; Lsbl., Erich Schmidt Verlag, Berlin, 1979, Stand 2001
- [57] Hoffman, W.; Scheller, H.: „Design for Environment At Motorola“. Proceedings of the *Seminar on Innovative Production of Electronic Systems*; Productronica 97; Nuremberg, November 1997.
- [58] Holme, R.; Watts, P.: „Corporate social responsibility: making good business sense“; World Business Council for Sustainable Development (Hrsg.); Genf, Schweiz, 2000.
- [59] Homem de Mello, L.; Sanderson, A.C.: „AND/OR-Graph representation of assembly plans“. *IEEE transactions on robotics and automation*, Vol. 6 no. 2, 1990
- [60] Homem de Mello, L.; Sanderson, A.C.: „A correct and complete algorithm for the generation of mechanical assembly sequences“; *IEEE transactions on robotics and automation*, Vol. 7 no. 2, 1991.
- [61] Hornfeck, U.; Riedel, B.; Steiner, K.: „Integrierte Produktpolitik (IPP) durch rechnergestützte Simulationstechnik“; Informationsblatt; Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen (Hrsg.); München, Mai 2001.
- [62] Huber, A.: „Demontageplanung und –steuerung – Planung und Steuerung industrieller Demontageprozesse mit PPS-Systemen“; *Magdeburger Schriften zur Wirtschaftsinformatik*; Shaker Verlag; Aachen, 2001.
- [63] Ishii, K., "Incorporating End-of-Life Strategy in Product Definition," Proceedings of the *EcoDesign '99: First International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing*; Tokyo, February 1999.

- [64] Kaase, W.; Baier, C.: „DV-gestützte Recyclingoptimierung komplexer Produkte“; VDI-Berichte 1400 zur Tagung *Markt- und Kostenvorteile durch Entwicklung umweltverträglicher Produkte*; Fellbach, 9./10.06.1998.
- [65] Kaminski, R.; Figgen, M.: „Vom Hauptzweck der Maßnahme“; *Umweltpraxis* 12/2000, S. 49.
- [66] Klocke, F.: „Produktionsstandort Deutschland“; *wt Werkstattstechnik* 88 (1998) Heft 3; S. 81.
- [67] Korfmacher, H.: „Das CYCLE Modell: Die neue Elektroaltgeräteverordnung aus der Sicht der IT-Industrie“; BayFORREST/FORMAT Berichtsheft 10 zum Fachseminar *Altelektronik und Produktverantwortung*; München, 22.04.1999,
- [68] Krause, D.; Scheller H.: „Recyclinggerechte Produktgestaltung und wirtschaftliche Demontageplanung feinwerktechnischer Geräte“; *Unterlagen zur Veranstaltung Serienfertigung feinwerktechnischer Produkte*; Braunschweig, Oktober 1994.
- [69] Krause, B: Rede zur Anhörung des Europäischen Parlaments am 19.10.2000 neue Richtlinie on Waste Electrical and Electronic Equipment; CCR Deutschland AG, Brüssel, 19.10.2000.
- [70] Kremer, U.: „VDMA-Position zur Integrierten Produktpolitik“; Positionspapier VDMA, European Office; Brüssel, 23.07.2001.
- [71] Kriwet, A.: „Bewertungsmethodik für die recyclinggerechte Produktgestaltung“. Forschungsberichte für die Praxis Nr. 163, Carl Hanser Verlag, München Wien, 1994
- [72] Lagerstedt, J.: „Advancement in product design strategies in early phases of design – balancing environmental impact and functionality“; Licentiate Thesis, Department of Machine Design, Royal Institute of Technology; Stockholm, 2000.
- [73] Lehni, M.: „WBCSD – Perspectiva Global sobre Ecoeficiencia“; Proceedings del evento *Responsabilidad Social Corporativa, Mercados y Eco-eficiencia*; Buenos Aires, Argentina, 09.09.1999.
- [74] Lehni, M.: „eco-efficiency – creating more value with less impact“; World Business Council for Sustainable Development (Hrsg.); Genf, Schweiz, 2000.
- [75] Lindemann, U.; Hutterer, P.; Heßling, T.: „Integrierte Produktpolitik (IPP) bei kleinen und mittelständischen Unternehmen (KMU)“; Informationsblatt; Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen (Hrsg.); München, Mai 2001.
- [76] Lindemann, U.: „IPP – eine Sicht aus der Wissenschaft“; Tagungsunterlagen zum *IPPsilon-Kongress*, Nürnberg, 10.12.2001.

- [77] Lymberidi, E.: „EEB Comments on the Commission’s Proposal for a Directive on Waste from Electrical and Electronic Equipment (WEEE) and the restriction of the use of certain hazardous substances in Electrical and Electronic Equipment (EEE)“; Position Paper, European Environmental Bureau; Brüssel, September 2000
- [78] Lymberidi, E.: “Towards Waste-Free Electrical and Electronic Equipment“; European Environmental Bureau, Brüssel, März 2001.
- [79] van Nes, C.N.; Stevels, A.L.N.: „Selecting green design strategies on the basis of eco-efficiency“, Proceedings of the 4<sup>th</sup> CIRP Seminar on Life Cycle Engineering, Berlin, 1997, S. 447-457
- [80] Meedt, O.: „Effizienzsteigerung bei Demontage und Recycling durch flexible Demontagetechnologien und optimierte Produktgestaltung“; Dissertation; Universität Erlangen-Nürnberg, 1998.
- [81] Meerkamm, H.; Feldmann, K.; Rosemann, B.; Trautner, St.: “Design for recycling, Recycling Data Management and Optimal End-of-Life Planning based on Recycling Graphs“; Proceedings of the *International Conference on Engineering Design ICED 1999*; München, 24-26.08.1999.
- [82] Meerkamm, H.; Rosemann, B.: *Integrated Product Policy und BEnefIT – Das Bayerische Entwicklungsnetz für innovative Technologien*; Tagungsband zum IPP-Symposium *Integrierte Produktpolitik (IPP), von der Entwicklung bis zur Entsorgung*; Nürnberg, 03.04.2000.
- [83] Meerkamm, H.; Rosemann, B.; Steinmetzer, H.-C.: “Integrated Product Policy in Bavaria and the Bavarian Network for the Development of Innovative Technologies (BenefIT)“; Proceedings of the *International Congress Electronic Goes Green 2000+*; Berlin, September 2000.
- [84] Meerkamm H.; Feldmann, K.; Trautner, St.; Rosemann, B.: „Methodische und instrumentelle Unterstützung zur Optimierung der Kreislaufführung technischer Produkte“; VDI-Berichte 1570 zur VDI-EKV Tagung *Recyclingorientierte Entwicklung technischer Produkte 2000*, Fellbach, 15-16.11.2000.
- [85] Meschan, I.: “Röntgendiagnostik in Klinik und Praxis“; Farrer-Meschan, R.M. (Hrsg.); Medica Verlag, Stuttgart; 1998.
- [86] Mörtl, M.; Lindemann, U.: „Optimierung der Produktlebensdauer zur nachhaltigen Abfallreduzierung“; In: Wilderer, P. A., Wimmer, M. C. (Hrsg.): „Bay-FORREST – Statusbericht 2001“; München, 2001.
- [87] Morneburg, H.: „Bildgebende Systeme für die medizinische Diagnostik“; Siemens Aktiengesellschaft, Berlin, München (Hrsg.); Publicis-MCD-Verlag, Erlangen, München, 1995.
- [88] Moyer, L. K., Gupta, S.M., “Environmental concerns and recycling/ disassembly efforts in the electronics industry“, *Journal of Electronics Manufacturing*, 7(1), 1997, 1-22.

- [89] Müller, R.; Wesselmann, J.: „Entwicklung eines erzeugnisorientierten Planungshilfsmittels für die manuelle Demontage“; Tagungsunterlagen zum *Kolloquium zur Kreislaufwirtschaft und Demontage – SfB 281*; Berlin, 20./21.01.2000.
- [90] Müller, K.; Hoffman, W.F.: “Design for Environment – Methodology, Implementation and Industrial Experience; Part 2: Environmentally Preferred Products – How to evaluate, improve our products and report to our customers?“, *Proceedings of the International Congress Electronic Goes Green 2000+*; Berlin, September 2000.
- [91] Neumann, K.: “Operations Research“; Carl Hanser Verlag, München, Wien, 1993.
- [92] N.N.: „Entwurf einer Verordnung über die Vermeidung, Verringerung und Verwertung von Abfällen gebrauchter elektrischer und elektronischer Geräte (Elektronik-Schrott-Verordnung“; Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit; WA II 3-30 114 – 5; Bonn, 11.07.1991
- [93] N.N.: “Umweltschutz im Regierungsbezirk Mittelfranken“; 1. Auflage; Verlag Heinz-Dieter Petzold, Ansbach, 1995
- [94] N.N.: „Environmental Consequences of Incineration and Landfilling of Waste from Electro(nic) Equipment“; Nordic Council of Ministers; Kopenhagen, 1995.
- [95] N.N.: „Entwurf einer Verordnung über die Entsorgung von Geräten der Informationstechnik (IT-Geräte-Verordnung“; Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit; WA II 3-30 114 / 8; Bonn, 20.02.1996
- [96] N.N.: „Richtlinie des Rates 75/442/EWG vom 15. Juli 1975 über Abfälle“, ABl. EWG L 194 vom 25.07.1975, S. 47, zuletzt geändert durch die Entscheidung 96/350/EG der Europäischen Kommission (ABl. L 135 vom 06.06.1996, S.32).
- [97] N.N.: „Verordnung zur Bestimmung von überwachungsbedürftigen Abfällen zur Verwertung (Bestimmungsverordnung überwachungsbedürftige Abfälle zur Verwertung - BestüVabfV)“ vom 10. September 1996; BGBl. I 1996 S. 1377
- [98] N.N.: “Pollution Prevention and Control – Extended Producer Responsibility in the OECD Area Phase 1 Report“; OECD, Paris, 1996.
- [99] N.N.: „Verordnung über Verwertungs- und Beseitigungsnachweise (NachwV - Nachweisverordnung)“ vom 10. September 1996; BGBl. I S. 1382; BGBl. I vom 20.11. 1997 S. 2860.
- [100] N.N.:“DIN EN ISO 14040:1997-08: Umweltmanagement – Ökobilanz – Prinzipien und allgemeine Anforderungen“; Deutsches Institut für Normung; Beuth Verlag, Berlin, 1997.
- [101] N.N.: „Sauber auch mit weniger Watt“; In: test 4/97; S. 75-80.
- [102] N.N.: “European Commission DG XI: Integrated Product Policy“; *Executive Summary from the Final Report*; Ernst & Young; Brüssel, März 1998.

- [103] N.N.: „Verordnung zur Bestimmung von besonders überwachungsbedürftigen Abfällen (Bestimmungsverordnung besonders überwachungsbedürftige Abfälle – BestbÜAbfV)“ vom 10. September 1996; BGBl. I S. 1366; BGBl. I 1998 S. 3956.
- [104] N.N.: „DIN EN ISO 14041:1998-11: Umweltmanagement – Ökobilanz – Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens sowie Sachbilanz“; Deutsches Institut für Normung; Beuth Verlag, Berlin, 1998.
- [105] N.N.: „Staub-Fänger“; In: Mein Eigenheim 4/98, S. 14.
- [106] N.N.: „Informelles Treffen der EU Umweltminister zur Integrierten Produktpolitik (IPP), Weimar 7.-9. May 1999: Hintergrundpapier zur produktbezogenen Umweltpolitik“; Bonn, 20.04.1999.
- [107] N.N.: „Entwurf einer Verordnung über die Entsorgung von elektrischen und elektronischen Geräten (Elektroaltgeräte-Verordnung - EAV“; Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit; WA II 3-30 114 – 8/1; Berlin, 24.06.1999
- [108] N.N.: „World Diagnostic Imaging Equipment Markets“; Frost & Sullivan; Report 5225-01; New York, 20.07.1999
- [109] N.N.: „Vertrag zur Gründung einer Europäischen Gemeinschaft“; in: Europäische Union, Textsammlung Band I Teil I; Amt für amtliche Veröffentlichungen der Europäischen Gemeinschaften; Luxemburg, 1999.
- [110] N.N.: „KEA: mehr als eine Zahl“; Broschüre zum UBA F&E-Vorhaben Erarbeitung von Basisdaten zum Energieaufwand und der Umweltbelastung von energieintensiven Produkten und Dienstleistungen für Ökobilanzen und Öko-Audits; Umweltbundesamt, Berlin, 1999.
- [111] N.N.: „CUMPAN – Computergestützte, umweltorientierte Produktanalyse: Benutzerhandbuch v1.4“; debis Systemhaus Industry GmbH; Fellbach, 1999.
- [112] N.N.: „Vorschlag für eine Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates über Elektro- und Elektronikaltgeräte“, Kommission der Europäischen Gemeinschaften; KOM (2000) 347 endgültig; 2000/0158 (COD); Brüssel, 13.06.2000.
- [113] N.N.: „Vorschlag für eine Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates zur Beschränkung der Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe in elektrischen und elektronischen Geräten“, Kommission der Europäischen Gemeinschaften; KOM (2000) 347 endgültig; 2000/0159 (COD); Brüssel, 13.06.2000.
- [114] N.N.: „Die Kommission geht das wachsende Problem der Elektro- und Elektronikaltgeräte an“; Pressemitteilung der Kommission der Europäischen Gemeinschaften, IP/00/602; Brüssel, 13.06.2000.
- [115] N.N.: „Developing the foundation of Integrated Product Policy in the EU“; DG Environment, European Commission; Report by Ernst & Young; Brüssel, 23.06.2000.

- [116] N.N.: „Elektronikentsorgung: EU-Richtlinienentwurf lässt noch viele Fragen offen“; Pressemitteilung; ZVEI, Pr – 50/2000; Frankfurt am Main, 15.06.2000
- [117] N.N.: „BDE stützt aktuellen Entwurf für E-Schrott-Direktive der EU“; EUWID Recycling und Entsorgung, Jhg. 10, Heft 29 vom 18.07.2000, S. 8.
- [118] N.N.: „Noch keine Fortschritte bei BattV und EAV“; EUWID Recycling und Entsorgung, Jhg. 10, Heft 29 vom 18.07.2000, S. 17.
- [119] N.N.: “Waste of Electrical and Electronic Equipment (WEEE) / Restriction of the Use of Hazardous Substances in Electrical and Electronic Equipment (ROS) – Summary Position of ORGALIME’s Electrical & Electronic Liaison Committee (EELC) in Cooperation with European Sector Committees”; ORGALIME; Positionspapier, Brüssel, 11.08.2000.
- [120] N.N.: „ZVEI: EU-Elektronikentsorgung – Rechtsunsicherheit gefährdet Umsetzung der Kommissionsvorschläge“; Pressemitteilung; ZVEI, Pr – 73/2000; Frankfurt am Main, 14.08.2000
- [121] N.N.: “BEUC position paper on the Waste Electrical and Electronic Equipment Directive”; The European Consumer’s Organization – BEUC; Brüssel, 08.09.2000.
- [122] N.N.: “APME’s position on the proposal for a Directive on WEEE Waste Electrical and Electronic Equipment”; Positionspapier, Association of Plastics Manufacturers in Europe - APME, Brüssel, 18.09.2000.
- [123] N.N.: “DIN E 48480: Elektrotechnik; Gebrauchstauglichkeit und Qualität bei erneuter Verwendung von Teilen und Geräten – Anforderungen und Prüfungen (Entwurf)“; Deutsches Institut für Normung; Berlin, Stand September 2000
- [124] N.N.: “Comments on the European Commission’s Proposal on Waste Electrical and Electronic Equipment”; Positionspapier, European Brominated Flame Retardant Industry Panel – EBFRIP; Brüssel, Oktober 2000.
- [125] N.N.: “Initial Discussion Paper on the proposed WEEE and RoHS Directives”; The EU Committee of the American Chamber of Commerce in Belgium, Brüssel, 05.10.2000.
- [126] N.N.: “EU Committee concerned about transatlantic implications of proposed Electrical and Electronic Waste Directive”; The EU Committee of the American Chamber of Commerce in Belgium, Pressemitteilung, Brüssel, 06.10.2000.
- [127] N.N.: „Umweltpakt Bayern – Nachhaltiges Wirtschaften im 21. Jahrhundert“; Hrsg.: Bayerische Staatskanzlei, München, 23.10.2000
- [128] N.N.: „Stellungnahme des Wirtschafts- und Sozialausschusses zu dem Vorschlag für eine Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates über Elektro- und Elektronikaltgeräte und dem Vorschlag für eine Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates zur Beschränkung der Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe in elektrischen und elektronischen Geräten“; NAT/078; CES 1407/2000-2000/0158-0159 (COD); Brüssel, 05.12.2000.

- [129] N.N.: "VDI-Richtlinie 2243 Blatt 1 (Entwurf): Recyclingorientierte Produktentwicklung"; VDI-Gesellschaft Entwicklung Konstruktion Vertrieb, Dezember 2000.
- [130] N.N.: "DIN EN ISO 14042:2000-07: Umweltmanagement – Ökobilanz – Wirkungsabschätzung"; Deutsches Institut für Normung; Beuth Verlag, Berlin, 2000.
- [131] N.N.: "DIN EN ISO 14043:2000-07: Umweltmanagement – Ökobilanz – Auswertung"; Deutsches Institut für Normung; Beuth Verlag, Berlin, 2000.
- [132] N.N.: „Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Beseitigung von Abfällen (Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz - KrW-/AbfG)" vom 27. September 1994; BGBl. I 1994 S. 2705; zul. geändert BGBl. I 2001 S. 2331
- [133] N.N.: „Verordnung über Entsorgungsfachbetriebe (EfbV - Entsorgungsfachbetriebeverordnung)" vom 10. September 1996; BGBl. I 1996 S. 1421, zul. geändert BGBl. I 2001 S. 2331
- [134] N.N.: „ICER für Kosten/Nutzen-Abwägung bei Elektro-Schrott-Verordnung"; EUWID Recycling und Entsorgung, Jhg. 11, Heft 5 vom 30.01.2001.
- [135] N.N.: „Wirtschaftsverbände sehen Nachbesserungsbedarf bei WEEE"; EUWID Recycling und Entsorgung, Jhg. 11, Heft 5 vom 30.01.2001, S. 6.
- [136] N.N.: „Grünbuch zur Integrierten Produktpolitik"; Kommission der Europäischen Gemeinschaften, KOM (2001) 68, Brüssel, 07.02.2001.
- [137] N.N.: „Commission adopts green paper on integrated product policy"; Pressemitteilung; Kommission der Europäischen Gemeinschaften, Generaldirektion Umwelt, Brüssel, 08.02.2001
- [138] N.N.: „Bitkom hält Übergangsfristen für zu kurz"; EUWID Recycling und Entsorgung, Jhg. 11, Heft 9 vom 27.02.2001, S. 4.
- [139] N.N.: „Elektronikschrott-Richtlinie: Lösung für Alt-Geräte in greifbarer Nähe, aber innovationsfeindliche Überregulierung für Neugeräte"; Pressemitteilung; ZVEI, Pr – 10/2001; Frankfurt am Main / Brüssel, 27.02.2001
- [140] N.N.: „Vorschlag für eine Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates über Elektro- und Elektronikaltgeräte; Vorschlag für eine Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates zur Beschränkung der Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe in elektrischen und elektronischen Geräten: Stellungnahme des Ausschusses der Regionen am 14. Februar"; Bulletin EU 1 / 2-2001, Umwelt (6/22); Ziffer 1.4.33, Brüssel, Februar 2001.
- [141] N.N.: "Working Paper for a Directive of the European Parliament and of the Council on the Impact on the Environment of Electrical and Electronic Equipment (EEE)"; Kommission der Europäischen Gemeinschaften, DG Unternehmen; Brüssel, Februar 2001.

- [142] N.N.: „WEEE: Wegwerfverbot stößt auf Akzeptanz“; EUWID Recycling und Entsorgung, Jhg. 11, Heft 13 vom 27.03.2001, S. 21.
- [143] N.N.: „Verordnung (EG) Nr. 761/2001 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 19.03.2001 über die freiwillige Beteiligung von Organisationen an einem Gemeinschaftssystem für das Umweltmanagement und die Umweltbetriebsprüfung (EMAS)“; Brüssel, Abl. EG L114/1 vom 24.04.2001.
- [144] N.N.: „Obertisch-Durchleuchtungssystem ICONOS R200“; Produktinformation; Siemens AG, Medical Solutions; Forchheim, Stand April 2001.
- [145] N.N.: „IPP Integrierte Produktpolitik – Instrumente aus der Praxis am Beispiel Automobil“; IHK für München und Oberbayern, Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen (Hrsg.); München, 10.05.2001.
- [146] N.N.: „Common position of ANEC, BEUC and EEB on Draft proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council on the impact on the environment of electrical and electronic equipment (EEE)“; Bureau Européen des Unions de Consommateurs – BEUC; Brüssel; 17.05.2001
- [147] N.N.: „Exportverbot für Altgeräte zur Verwertung wäre *Fall für die WTO*“; EUWID Recycling und Entsorgung, Jhg. 11, Heft 21 vom 22.05.2001, S. 26.
- [148] N.N.: „ZVEI kündigt Widerstand gegen Beteiligung an Sammelkosten an“; EUWID Recycling und Entsorgung, Jhg. 11, Heft 21 vom 22.05.2001, S. 3.
- [149] N.N.: „Geänderter Vorschlag für eine Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates“, Kommission der Europäischen Gemeinschaften; KOM (2001) 315 endgültig; 2000/0158 (COD); Brüssel, 06.06.2001.
- [150] N.N.: „Stellungnahme des Deutschen Industrie- und Handelstages (DIHT) zu dem von der Kommission der Europäischen Gemeinschaften vorgelegten Grünbuch zur Integrierten Produktpolitik“; Berlin, Bonn, 20.06.2001.
- [151] N.N.: „VKS begrüßt Vorschlag der EU-Umweltminister zur europäischen Elektroschrottrichtlinie“; Pressemitteilung; Verband Kommunale Abfallwirtschaft und Stadtreinigung; Köln, 08.07.2001.
- [152] N.N.: „Entscheidung der Kommission vom 07.09.2001 über Leitlinien für die Anwendung der Verordnung (EG) Nr. 761/2001 des Europäischen Parlaments und des Rates über die freiwillige Beteiligung von Organisationen an einem Gemeinschaftssystem für das Umweltmanagement und die Umweltbetriebsprüfung (EMAS)“; Az. K(2001) 2504; 2001/681/EG; Brüssel, Abl. EG L 247/24 vom 17.09.2001.
- [153] N.N.: „Kennzahlen zur Elektrokonjunktur“; ZVEI; [http://www.zvei.de/news/Presseinformationen/2000-12/kennzahlen\\_elektrokonjunktur\\_115\\_2000.pdf](http://www.zvei.de/news/Presseinformationen/2000-12/kennzahlen_elektrokonjunktur_115_2000.pdf); Stand 27.09.2001
- [154] N.N.: „Elektroaußenhandel Deutschland: Januar – Dezember 2000“; ZVEI; [http://www.zvei.de/mk/daten\\_und\\_fakten/MK-DF-GIE-AH-Regionen-2000.pdf](http://www.zvei.de/mk/daten_und_fakten/MK-DF-GIE-AH-Regionen-2000.pdf); Stand 27.09.2001

- [155] N.N.: "CECED paper on Waste Electrical and Electronic Equipment prior to Second Reading – Key Provisions"; CECED; Positionspapier; Brüssel, 22.10.2001.
- [156] N.N.: „Richtlinie 76/769/EWG des Rates vom 27. Juli 1976 zur Angleichung der Rechts- und Verwaltungsvorschriften der Mitgliedstaaten für Beschränkungen des Inverkehrbringens und der Verwendung gewisser gefährlicher Stoffe und Zubereitungen“, ABl. Nr. L 262 vom 27.09. 1976 S. 201, zuletzt geändert durch die Richtlinie 2001/91/EG (ABl. Nr. L 286 vom 30.10.2001 S. 27).
- [157] N.N.: „Florenz für Nutzung freiwilliger Instrumente“; EUWID Recycling und Entsorgung, Jhg. 11, Heft 40 vom 02.11.2001, S. 31.
- [158] N.N.: „Integrated Product Policy“; <http://europa.eu.int/comm/environment/ipp/home.htm>; Stand 12.11.2001.
- [159] N.N.: „WEEE: Industrie lehnt Beteiligung an Kosten für Sammlung ab“; EUWID Recycling und Entsorgung, Jhg. 11, Heft 46 vom 13.11.2001, S. 7.
- [160] N.N.: „Gemeinsamer Standpunkt des Rates im Hinblick auf den Erlass der Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates über Elektro- und Elektronikaltgeräte“; 2000/0158 (COD); Rat der Europäischen Union, 11304/01; ENV 408, CODEC 798; Brüssel, 14.11.2001.
- [161] N.N.: „Gemeinsamer Standpunkt des Rates im Hinblick auf den Erlass der Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates zur Beschränkung der Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe in elektrischen und elektronischen Geräten“ 2000/0159 (COD); Rat der Europäischen Union, 11356/01; ENV 416, CODEC 809; Brüssel, 14.11.2001.
- [162] N.N.: „Frequently Asked Questions Relating to the EEE Draft Proposal“; Kommission der Europäischen Gemeinschaften, Generaldirektion Unternehmen; [http://europa.eu.int/comm/enterprise/electr\\_equipment/eee/faq.htm](http://europa.eu.int/comm/enterprise/electr_equipment/eee/faq.htm); Stand 17.11.2001.
- [163] N.N.: „IPP Integrierte Produktpolitik – Leitfaden: Management ökologischer Produktentwicklung“; Netzwerk COUP 21 (Hrsg.); Nürnberg, 10.12.2001.
- [164] N.N.: „OECD Environmental Outlook“; OECD, Paris, 2001.
- [165] N.N.: „Eco-Efficiency Case Study Collection“; [www.wbcscd.ch/eedata/electrolux.htm](http://www.wbcscd.ch/eedata/electrolux.htm); Stand 19.04.2001.
- [166] N.N.: „Population“; <http://www.oecd.org/pdf/M00022000/M00022957.pdf>; Paris, Stand November 2001
- [167] N.N.: Rubrik Märkte; EUWID Recycling und Entsorgung, Jg. 10 und 11.
- [168] N.N.: „Daten zur Umwelt 2000“; [www.umweltbundesamt.org](http://www.umweltbundesamt.org); Umweltbundesamt, Berlin, Stand 22.12.2001.

- [169] N.N.: „Prozessbezogene Basisdaten zum Umweltmanagement“; Umweltbundesamt; [www.umweltbundesamt.de/uba-info-daten/daten/baum/](http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-daten/daten/baum/); Berlin, Stand 22.12.2001.
- [170] N.N.: „umberto“; [www.umberto.de](http://www.umberto.de); Stand: 22.12.2001.
- [171] N.N.: „SimaPro 5“; [www.pre.nl/simapro/](http://www.pre.nl/simapro/); Stand: 22.12.2001.
- [172] N.N.: „ATROiD 3.0 – Assessment Tool for Recycling Oriented Design“; [www.lce-consulting.com](http://www.lce-consulting.com); Stand 22.12.2001.
- [173] N.N.: “CES Overview“: [www.grantadesign.com](http://www.grantadesign.com); Stand: 22.12.2001.
- [174] Nissen, N. L.: “Entwicklung eines ökologischen Bewertungsmodells zur Beurteilung elektronischer Systeme“; Dissertation; Technische Universität Berlin, 2001.
- [175] Obermayer, A.: „Schlaf Medizintechnik, schlaf – Ein Hinweis auf das Ende der Übergangsfrist (Abverkaufsfrist) für Medizinprodukte“; *medizintechnik* 121 Jg. 5/2001, S. 167-170.
- [176] Peles, S.; Warnecke, G.: „Transformation von Recyclinganforderungen in der Produktentwicklung“; VDI-Berichte 1570 zur VDI-EKV-Tagung *Recyclingorientierte Entwicklung technischer Produkte 2000*; Fellbach, 15./16.11.2000.
- [177] Pepper, J.; Holliday, C.: “Sustainability through the market – seven keys to success“; World Business Council for Sustainable Development (Hrsg.); Genf, Schweiz, 2001.
- [178] Perlewitz, H.: “Planung und marktorientierter Betrieb von Demontagefabriken“; Dissertation; Technische Universität Berlin, 1999.
- [179] Probst, S.: „Integrierte Produktpolitik – Stärkung und Neuorientierung produktbezogener umweltpolitischer Maßnahmen aus deutscher Sicht“; Rede zum Europäischen VDMA-Umwelttag; Brüssel, 20.11.2001.
- [180] Queitsch, P.: „Kreislaufwirtschafts- und Abfallrecht“, Bundesanzeiger Verlag, Köln, 1995.
- [181] Quella, F.: „Umweltverträgliche Produktgestaltung“; Siemens Aktiengesellschaft, Berlin, München (Hrsg.); Publicis-MCD-Verlag, Erlangen, München, 1998.
- [182] Radtke, M.: „Workshop D: Rechneranwendung in der demontagegerechten Produktgestaltung“; Tagungsunterlagen zum *Kolloquium zur Kreislaufwirtschaft und Demontage – SfB 281*; Berlin, 20./21.01.2000.
- [183] Radtke, M.: „BAMOS-Baustruktureditor“; In: Birkhofer, H.; Spath, D.; Winzer, P.; Müller, D.: „Umweltgerechte Produktentwicklung – Ein Leitfaden für Entwicklung und Konstruktion“; Deutsches Institut für Normung (Hrsg.); Beuth Verlag; Berlin, Stand November 2001.

- [184] Rehbinder, E.: „Legalization of Eco-balances in Germany“; In: *International Journal of Life Cycle Assessment*; **6** (3) S. 177-179.
- [185] Rose, C. M., Stevels, A., Ishii, K. "A New Approach to End-of-Life Design Advisor (ELDA)"; Proceedings of the *2000 IEEE International Symposium for Electronics and the Environment Conference*, San Francisco, CA, Mai 2000.
- [186] Rummler, Th.: „Wie wird die deutsche Elektro-Altgeräteverordnung aussehen?“; Tagungsunterlagen der *EUROFORUM-Konferenz Elektro(nikschrött*, 6./7.11.2001, Düsseldorf, 2001.
- [187] Rubik, F.; Hoffmann, E.; Simshäuser, U.: „Innovationen durch Umweltpolitik - Integrierte Produktpolitik (IPP) in Deutschland“; Institut für ökologische Wirtschaftsforschung GmbH; Gutachten im Auftrag des BMU, Heidelberg, April 2000.
- [188] Sachs, L.: „Angewandte Statistik“, 7. Auflage, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1992
- [189] Schatz, M.: „Aktueller Stand der wissenschaftlichen Diskussion“; Tagungsunterlagen der *EUROFORUM-Konferenz Elektro(nikschrött*, 6./7.11.2001, Düsseldorf, 2001.
- [190] Scheller, H.: „Automatisierte Demontage und recyclinggerechte Gestaltung elektronischer Flachbaugruppen“, Dissertation, Universität Erlangen-Nürnberg, 1997
- [191] Scheller, H.: „Design for Environment for Electronic Products“. BayFOR-REST/FORMAT Berichtsheft 10 zum Fachseminar *Altelektronik und Produktverantwortung*, München, April 1999.
- [192] Schiller, E. F.: „Ein Beitrag zur adaptiv-dynamischen Arbeitsplanung in der Demontage“; Dissertation, Universität Karlsruhe, 1998.
- [193] Schlögl, M.: „Recycling von Elektro- und Elektronikschrott“; 1. Auflage, Vogel Verlag; Würzburg; 1995
- [194] Schlögl M.: "Aktuelle Praxis der Wiederverwertung elektronischer Geräte“, FOWEP-Seminar *Kreislaufwirtschaft bei elektronischen Geräten*, Erlangen, November 6<sup>th</sup>, 1997.
- [195] Schlüter, F.: „On the Integration of Environmental Aspects into Early Product Development – Life Cycle Design Structure Matrix“; Licentiate Thesis, Department of Machine Design, Royal Institute of Technology; Stockholm, 2001.
- [196] Schnappauf, W.: „Integrierte Produktpolitik (IPP) – den Lebensweg von Produkten im Visier“; Pressemitteilung; Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen; München, 11.05.2001.
- [197] Schnappauf, W.: „Integrierte Produktpolitik – Nachhaltigkeit konkret gemacht“; Rede zum *IPP-silon-Kongress*, Nürnberg, 10.12.2001.

- [198] Schnurer, H.: „Produktverantwortung und Altelektronik – Perspektiven für eine enge Bindung“; BayFORREST/FORMAT Berichtsheft 10 zum Fachseminar *Altelektronik und Produktverantwortung*, 22.04.1999, München
- [199] Schnurer, H.: „Entwicklungen in der Abfallwirtschaft aus der Sicht des Bundes“; Tagungsunterlagen zu den 7. *Münsteraner Abfallwirtschaftstagen*; Münster, 29.01.-31.01.2001.
- [200] Schröder, F.; Trautner, St.: „IPP konkret – Integrierte Produktpolitik bei medizinischen Systemen – IPPMed“; In: Tagungsunterlagen zum *IPPsilon-Kongress*; Nürnberg, 10.12.2001.
- [201] Schwegler, T.: „Umweltfreundliche Gestaltung eines PC“, Handbuch zum VDI-Seminar *Recyclingfähige elektronische Produkte*, Erlangen, 12./13. Juni 1996.
- [202] Schwegler, T.: „E-PAC Referenzanwendungen“, Informationsmaterial der Fa. DMT GmbH, Holzgerlingen, Mai 2000.
- [203] Seliger, G; Feldmann, K; Trautner, St; Perlewitz, H.: „Product Design for Ease of Disassembly and Recycling“; Proceedings of the *International Symposium on Sustainable Manufacturing*; Shanghai, China, 16/17.11.1999.
- [204] Steinmetzer, H.-C.: „IPP-Projekte in Bayern aus der Sicht der Umweltverwaltung“; Tagungsunterlagen zum *IPPsilon-Kongress*, Nürnberg, 10.12.2001.
- [205] Tegel, O.; Brandt, R.; Radtke, M.: „Teilprojekt D2: Gestaltungsregeln für Baustruktur, Füge­teile und Demontagehilfen“; In: N.N.: „Sonderforschungsbereich 281 – Demontagefabriken zur Rückgewinnung von Ressourcen in Produkt- und Materialkreisläufen“; Technische Universität Berlin; Arbeits- und Ergebnisbereich 1998-2000.
- [206] Trautner, St.: „Rechnergestützte Methoden zur Bestimmung optimaler Demontagestrategien“; Sonderforschungsbereich 281; Tagungsunterlagen zum *Kolloquium zur Kreislaufwirtschaft und Demontage*; Berlin, 20.-21.01.2000.
- [207] Trittin, J.: „Zukunft des produktbezogenen Umweltschutzes – was erwarten Politik und Industrie“; BMU/BDI-Workshop *Perspektiven des produktbezogenen Umweltschutzes*; Berlin, 01.02.2000.
- [208] Vehlow, J.; Mark, F.E.: „Electrical and electronic plastics waste co-combustion“; Technical Paper, APME, Brüssel, Februar 1997.
- [209] Wallström, M.: „A European Integrated Product Policy will enhance our competitiveness“; In: *EnviroReport No. 2 IPP - Integrated Product Policy*; Swedish Environmental Protection Agency / Swedish Ministry of the Environment (Hrsg.); Stockholm, Januar 2000.
- [210] Wallström, M.: „The 6<sup>th</sup> Environmental Action Program: New ways of working“; Speech/01/83; The Centre for European Reform, Brüssel, 26.02.2001.

- 
- [211] Wallström, M.: "From Lisbon to Gothenburg – The Business Agenda for Sustainable Development"; Proceedings of the Seminar *Achieving Effective Sustainable Development: The European Policy Agenda during the Swedish Presidency*; London, 15.03.2001
- [212] Wallström, M.: "Sustainable Development and the Environment – the Challenges facing the EU"; Proceedings of the *Bridging the Gap seminar*, Stockholm, 09.-11.05.2001.
- [213] Weber, J. "Konzept eines rechnergestützten Werkzeugs für die Entwicklung umweltgerechter Produkte" Dissertation; Universität Erlangen-Nürnberg, 1997
- [214] Wenzel, H.; Hauschild, M.; Alting, L.: „Life cycle Assessment of Products Vol. 1: Methodology, tools and case studies in product development“; Chapman & Hall; London, Weinheim, 1997.
- [215] Wolf, M.: „Bestimmung der Elementgehalte in Elektronikschrott mit Flammen-AAS und ICP-AES“; Dissertation, Universität Erlangen-Nürnberg, 1997.
- [216] Wolf, B.: "Beurteilung des Recyclings bei der Entwicklung umweltgerechter Produkte"; Fortschritts-Berichte VDI Reihe 1 Nr. 338; Düsseldorf, 2001.
- [217] Young, A.; Kielkiewicz-Young, A.: "Integrated Product Policy (IPP) and Eco-Product Development (EPD) in the Electronics Sector"; Proceedings of the *International Congress "Electronic Goes Green 2000+"*; Berlin, September 2000.
- [218] Zimmermann, H.-J.: „Methoden und Modelle des Operations Research“; Verlag Friedrich Vieweg & Sohn, Braunschweig, 1987
- [219] Zülch, G.; Schiller, E.F.; Müller, R.: "A Disassembly Information System"; In: *Life Cycle Networks*, Proceedings of the 4<sup>th</sup> *CIRP International Seminar on Life Cycle Engineering*, Berlin, Germany, 26-27 June 1997.

## Abkürzungen

ABS	Acrylnitril-Butadien-Styrol
AEA	American Electronics Association
APME	Association of Plastic Manufacturers in Europe
BDE	Bundesverband der deutschen Entsorgungswirtschaft e.V.
BDI	Boothroyd & Dewhurst Incorporate
BEnefiT	Bayerisches Entwicklungsnetz für innovative Technologien
BestbüAbfV	Verordnung zur Bestimmung besonders überwachungsbedürftiger Abfälle
BestüVAbfV	Verordnung zur Bestimmung überwachungsbedürftiger Abfälle zur Verwertung
BEUC	Bureau Européen des Unions de Consommateurs
Bitkom	Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien e.V.
BStMLU	Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen
bvse	Bundesverband Sekundärrohstoffe und Entsorgung e.V.
CAD	Computer Aided Design
CD	Compact Disc
CECED	European Committee of Manufacturers of Domestic Equipment
CO <sub>2</sub>	Kohlenstoff-Dioxid
DfE	Design for Environment
DisPlay	Disassembly Planning System
DV	Datenverarbeitung
EBFRIP	European Brominated Flame Retardant Industry Panel
EEB	European Environmental Bureau
EEE	Impact on the Environment of Electrical and Electronic Equipment
EG	Europäische Gemeinschaft
EGB	Elektrostatisch gefährdeter Bereich
EIA	Electronic Industries Alliance
EMAS	Environmental Management Auditing Scheme
EoL	End of Life

---

EPA	Environmental Protection Agency
EPP	Expandiertes Polypropylen
EU	Union der Europäischen Gemeinschaften
EWG	Europäische Wirtschaftsgemeinschaft
FCKW	Fluorchlor-Kohlenwasserstoffe
FKW	Fluor-Kohlenwasserstoffe
GATT	General Agreement on Tariffs and Trade
GCA	Green Component Advisor
GERT	Graphical Evaluation and Review Technique
ICER	Industry Council for Electronic Equipment Recycling
IHK	Industrie- und Handelskammer
IPP	Integrierte Produktpolitik
ISO	International Organization of Standardization
IT	Informationstechnik
H-FCKW	Halogenierte Fluorchlor-Kohlenwasserstoffe
Hg	Quecksilber
KEA	Kumulierter Energieaufwand
KMU	Kleines und mittelständisches Unternehmen
KrW-/AbfG	Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz
KW	Kohlenwasserstoffe
LCA	Life Cycle Assessment
LCD	Liquid Cristal Display
LCI	Life Cycle Inventory
MET	Materialeinsatz, Energieverbrauch, Toxizität
MP3	Moving Picture Expert Group 1.0 Layer 3
NGO	Non-Governmental Organization
OECD	Organization for Economic Co-Operation and Development
Orgalime	Organisme de Liaison des Industries Métallique Européennes
Pb	Blei
PBB	Polybromierte Biphenyle
PBDE	Polybromierte Diphenylether
PC	Personal Computer

PCB	Polychlorierte Biphenyle
PCDD	Polychlorierte Dibenzo-Dioxine
PCDF	Polychlorierte Dibenzo-Furane
PDM	Product Data Management
PE	Polyethylen
PP	Polypropylen
PVC	Polyvinylchlorid
PWB	Printed Wired Board
QM	Qualitätsmanagement
ReGrEd	Recyclinggraph-Editor
RoHS	Restriction of Hazardous Substances in Electrical and Electronic Equipment
TD	Technischer Dienst
US	United States
WBCSD	World Business Council for Sustainable Development
WEEE	Waste of Electrical and Electronic Equipment
WTO	World Trade Organization
ZVEI	Zentralverband der Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V.

## Abstract

### **Technical implementation of product-related instruments of environmental politics regarding electrical and electronic equipment**

Recently, the focus of environmental politics is extended more and more from the production and emission orientation towards the products itself. Principles of this new policy are e.g. the pollution prevention or the polluter-pays-principle. Especially the end-of-life behaviour of products – such as electrical and electronic equipment – is a main topic of legislation at the moment.

By looking at actual regulation activities, European directives regarding the waste from electrical and electronic equipment (WEEE), the restriction of certain hazardous substances (ROHS), and regarding the impact on the environment of electrical and electronic equipment (EEE) will force especially producers to consider these aspects already in the product development. Due to the obligatory take-back of products by the producer, an efficient disassembly and treatment of discarded products will become a price factor. Also the provision for restrictions of certain substances leads to the need for easy-to-use tools that support the producers by the specific analysis of its products.

One main topic of this publication is the development of an efficient, computer-based tool that allows the analysis and estimation of product features regarding all requirements of the recent European directive drafts of WEEE, ROHS and EEE. Therefore, the respective requirements of the directive drafts are analysed and extracted. In order to integrate the requirements in the previously developed software tool Disassembly Planning System / Recycling Graph Editor, the performance of the existing system has been significantly increased by factor 103 (regarding calculation time). The reduction of calculation effort has been enabled by the extraction of relevant data from the different data models and the development of specific dropout criteria based on product model and end-of-life processes.

The requirements of the European directives mentioned above can be differentiated by component-related, disassembly related and mixed criteria. Therefore, the integration of these aspects in the product analysis was performed by changing the data models of the materials, the end-of-life processes and the calculation algorithms. As a main result, the concept of a comprehensive software tool is presented that allows the analysis of product compliance with the legal requirements within one environment.

Integrated Product Policy is an innovative approach at European level aiming at product optimization in respect of ecological, economic, and social aspects during the entire product life cycle. The essential aspect of this approach is the cooperation of all stakeholders involved in the product life, such as manufacturers, political institutions, customers, and industrial associations. Each group involved is to open up and realize the potential within its sphere of action. The manufacturer's role within the

Integrated Product Policy is of particular importance due to its potential in deciding on environmentally relevant aspects and alternatives. In order to develop and adopt the principles of Integrated Product Policy, two best-practice projects concerning a vacuum cleaner and medical X-ray diagnostic systems were carried out.

By the design of an innovative housing concept for a vacuum cleaner, it could be demonstrated that using new approaches major ecological optimizations regarding number of material, disassembly time and material efficiency can be achieved within the economical limits of a small household appliance.

Based on a qualitative evaluation of the product life cycle, an important potential was identified in the return, refurbishment, and re-installation of X-ray systems, resulting in further environmental benefits by increased product use, creating additional value added for the company, and thereby making medical high technology available for broad application. The project provides both the organizational and logistical conditions for firmly and sustainably establishing in the industrial environment the Europe-wide take-back and reprocessing of used products on highest quality levels.

This publication aims to provide a contribution for the implementation of instruments of the environmental politics regarding the efficient reaction of product-related regulations by performing a respective, computer based product analysis. Because of the complex interactions between economy and environmental politics, new forms of cooperation have to be applied. Thus, the scope of future activities should be proactive efforts of industry and – living the spirit of cooperation – the recognition of options and limitations by political decision-makers.

## Lebenslauf

Stefan Hans Trautner

geboren 30. Dezember 1968 in Ansbach

verheiratet mit Margarita Trautner, geb. Negrete V., 1 Kind

- 1975 - 1979      Grundschule in Ansbach
- 1979 - 1988      Gymnasium Carolinum Ansbach  
Abschluss: Abitur
- 1988 - 1990      Soldat auf Zeit in Nürnberg
- 1990 - 1996      Studium der Fertigungstechnik  
an der Universität Erlangen-Nürnberg  
Abschluss: Dipl.-Ing. (univ.)
- 1997 - 2002      Wissenschaftlicher Assistent am Lehrstuhl für  
Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik  
der Universität Erlangen-Nürnberg  
Leiter: Prof. Dr.-Ing. K. Feldmann



# Reihe Fertigungstechnik - Erlangen

[www.mb.uni-erlangen.de/diss](http://www.mb.uni-erlangen.de/diss)

**Band 1 - 52**  
Carl Hanser Verlag, München

**ab Band 53**  
Meisenbach Verlag, Bamberg  
45,- Euro

Band 1: Andreas Hemberger  
**Innovationspotentiale in der rechnerintegrierten Produktion durch wissensbasierte Systeme**  
208 Seiten, 107 Bilder. 1988.

Band 2: Detlef Classe  
**Beitrag zur Steigerung der Flexibilität automatisierter Montagesysteme durch Sensorintegration und erweiterte Steuerungskonzepte**  
194 Seiten, 70 Bilder. 1988.

Band 3: Friedrich-Wilhelm Nolting  
**Projektiertung von Montagesystemen**  
201 Seiten, 107 Bilder, 1 Tabelle. 1989.

Band 4: Karsten Schlüter  
**Nutzungsgradsteigerung von Montagesystemen durch den Einsatz der Simulationstechnik**  
177 Seiten, 97 Bilder. 1989.

Band 5: Shir-Kuan Lin  
**Aufbau von Modellen zur Lageregelung von Industrierobotern**  
168 Seiten, 46 Bilder. 1989.

Band 6: Rudolf Nuss  
**Untersuchungen zur Bearbeitungsqualität im Fertigungssystem Laserstrahlschneiden**  
206 Seiten, 115 Bilder, 6 Tabellen. 1989.

Band 7: Wolfgang Scholz  
**Modell zur datenbankgestützten Planung automatisierter Montageanlagen**  
194 Seiten, 89 Bilder. 1989.

Band 8: Hans-Jürgen Wißmeier  
**Beitrag zur Beurteilung des Bruchverhaltens von Hartmetall-Fließpreßmatrizen**  
179 Seiten, 99 Bilder, 9 Tabellen. 1989.

Band 9: Rainer Eisele  
**Konzeption und Wirtschaftlichkeit von Planungssystemen in der Produktion**  
183 Seiten, 86 Bilder. 1990.

Band 10: Rolf Pfeiffer  
**Technologisch orientierte Montageplanung am Beispiel der Schraubtechnik**  
216 Seiten, 102 Bilder, 16 Tabellen. 1990.

Band 11: Herbert Fischer  
**Verteilte Planungssysteme zur Flexibilitätssteigerung der rechnerintegrierten Teilefertigung**  
201 Seiten, 82 Bilder. 1990.

- Band 12: Gerhard Kleineidam  
**CAD/CAP: Rechnergestützte Montagefeinplanung**  
203 Seiten, 107 Bilder. 1990.
- Band 13: Frank Vollertsen  
**Pulvermetallurgische Verarbeitung  
eines übereutektoiden verschleißfesten Stahls**  
XIII u. 217 Seiten, 67 Bilder, 34 Tabellen. 1990.
- Band 14: Stephan Biermann  
**Untersuchungen zur Anlagen- und Prozeßdiagnostik  
für das Schneiden mit CO<sub>2</sub>-Hochleistungslasern**  
VIII u. 170 Seiten, 93 Bilder, 4 Tabellen. 1991.
- Band 15: Uwe Geißler  
**Material- und Datenfluß  
in einer flexiblen Blechbearbeitungszelle**  
124 Seiten, 41 Bilder, 7 Tabellen. 1991.
- Band 16: Frank Oswald Hake  
**Entwicklung eines rechnergestützten Diagnosesystems  
für automatisierte Montagezellen**  
XIV u. 166 Seiten, 77 Bilder. 1991.
- Band 17: Herbert Reichel  
**Optimierung der Werkzeugbereitstellung  
durch rechnergestützte Arbeitsfolgenbestimmung**  
198 Seiten, 73 Bilder, 2 Tabellen. 1991.
- Band 18: Josef Scheller  
**Modellierung und Einsatz von Softwaresystemen  
für rechnergeführte Montagezellen**  
198 Seiten, 65 Bilder. 1991.
- Band 19: Arnold vom Ende  
**Untersuchungen zum Biegeumformen mit elastischer Matrize**  
166 Seiten, 55 Bilder, 13 Tabellen. 1991.
- Band 20: Joachim Schmid  
**Beitrag zum automatisierten Bearbeiten  
von Keramikguß mit Industrierobotern**  
XIV u. 176 Seiten, 111 Bilder, 6 Tabellen. 1991.
- Band 21: Egon Sommer  
**Multiprozessorsteuerung für kooperierende  
Industrieroboter in Montagezellen**  
188 Seiten, 102 Bilder. 1991.
- Band 22: Georg Geyer  
**Entwicklung problemspezifischer Verfahrensketten  
in der Montage**  
192 Seiten, 112 Bilder. 1991.
- Band 23: Rainer Flohr  
**Beitrag zur optimalen Verbindungstechnik  
in der Oberflächenmontage (SMT)**  
186 Seiten, 79 Bilder. 1991.
- Band 24: Alfons Rief  
**Untersuchungen zur Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden  
und -schweißen in der Rohkarosseriefertigung**  
VI u. 145 Seiten, 58 Bilder, 5 Tabellen. 1991.
- Band 25: Christoph Thim  
**Rechnerunterstützte Optimierung von Materialflußstrukturen  
in der Elektronikmontage durch Simulation**  
188 Seiten, 74 Bilder. 1992.
- Band 26: Roland Müller  
**CO<sub>2</sub>-Laserstrahlschneiden  
von kurzglasverstärkten Verbundwerkstoffen**  
141 Seiten, 107 Bilder, 4 Tabellen. 1992.
- Band 27: Günther Schäfer  
**Integrierte Informationsverarbeitung bei der Montageplanung**  
195 Seiten, 76 Bilder. 1992.

- Band 28: Martin Hoffmann  
**Entwicklung einer CAD/CAM-Prozesskette für die Herstellung von Blechbiegeteilen**  
149 Seiten, 89 Bilder. 1992.
- Band 29: Peter Hoffmann  
**Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden und –schweißen :  
Prozeführung und Systemtechnik in der 3D–Laserstrahlbearbeitung  
von Blechformteilen**  
186 Seiten, 92 Bilder, 10 Tabellen. 1992.
- Band 30: Olaf Schrödel  
**Flexible Werkstattsteuerung mit objektorientierten Softwarestrukturen**  
180 Seiten, 84 Bilder. 1992.
- Band 31: Hubert Reinisch  
**Planungs– und Steuerungswerkzeuge zur impliziten Geräteprogrammierung in Roboterzellen**  
XI u. 212 Seiten, 112 Bilder. 1992.
- Band 32: Brigitte Bärnreuther  
**Ein Beitrag zur Bewertung des Kommunikationsverhaltens von Automatisierungsgeräten in flexiblen Produktionszellen**  
XI u. 179 Seiten, 71 Bilder. 1992.
- Band 33: Joachim Hutfless  
**Laserstrahlregelung und Optikiagnostik in der Strahlführung einer CO<sub>2</sub>-Hochleistungslaseranlage**  
175 Seiten, 70 Bilder, 17 Tabellen. 1993.
- Band 34: Uwe Günzel  
**Entwicklung und Einsatz eines Simulationsverfahrens für operative und strategische Probleme der Produktionsplanung und –steuerung**  
XIV u. 170 Seiten, 66 Bilder, 5 Tabellen. 1993.
- Band 35: Bertram Ehmann  
**Operatives Fertigungscontrolling durch Optimierung auftragsbezogener Bearbeitungsabläufe in der Elektronikfertigung**  
XV u. 167 Seiten, 114 Bilder. 1993.
- Band 36: Harald Kolléra  
**Entwicklung eines benutzerorientierten Werkstattprogrammiersystems für das Laserstrahlschneiden**  
129 Seiten, 66 Bilder, 1 Tabelle. 1993.
- Band 37: Stephanie Abels  
**Modellierung und Optimierung von Montageanlagen in einem integrierten Simulationssystem**  
188 Seiten, 88 Bilder. 1993.
- Band 38: Robert Schmidt–Hebbel  
**Laserstrahlbohren durchflußbestimmender Durchgangslöcher**  
145 Seiten, 63 Bilder, 11 Tabellen. 1993.
- Band 39: Norbert Lutz  
**Oberflächenfeinbearbeitung keramischer Werkstoffe mit XeCl–Excimerlaserstrahlung**  
187 Seiten, 98 Bilder, 29 Tabellen. 1994.
- Band 40: Konrad Grampp  
**Rechnerunterstützung bei Test und Schulung an Steuerungssoftware von SMD–Bestücklinien**  
178 Seiten, 88 Bilder. 1995.
- Band 41: Martin Koch  
**Wissensbasierte Unterstützung der Angebotsbearbeitung in der Investitionsgüterindustrie**  
169 Seiten, 68 Bilder. 1995.
- Band 42: Armin Gropp  
**Anlagen– und Prozeßdiagnostik beim Schneiden mit einem gepulsten Nd:YAG–Laser**  
160 Seiten, 88 Bilder, 7 Tabellen. 1995.

- Band 43: Werner Heckel  
**Optische 3D-Konturerfassung und on-line Biegewinkelmessung mit dem Lichtschnittverfahren**  
149 Seiten, 43 Bilder, 11 Tabellen. 1995.
- Band 44: Armin Rothhaupt  
**Modulares Planungssystem zur Optimierung der Elektronikfertigung**  
180 Seiten, 101 Bilder. 1995.
- Band 45: Bernd Zöllner  
**Adaptive Diagnose in der Elektronikproduktion**  
195 Seiten, 74 Bilder, 3 Tabellen. 1995.
- Band 46: Bodo Vormann  
**Beitrag zur automatisierten Handhabungsplanung komplexer Blechbiegeteile**  
126 Seiten, 89 Bilder, 3 Tabellen. 1995.
- Band 47: Peter Schnepf  
**Zielkostenorientierte Montageplanung**  
144 Seiten, 75 Bilder. 1995.
- Band 48: Rainer Klotzbücher  
**Konzept zur rechnerintegrierten Materialversorgung in flexiblen Fertigungssystemen**  
156 Seiten, 62 Bilder. 1995.
- Band 49: Wolfgang Greska  
**Wissensbasierte Analyse und Klassifizierung von Blechteilen**  
144 Seiten, 96 Bilder. 1995.
- Band 50: Jörg Franke  
**Integrierte Entwicklung neuer Produkt- und Produktionstechnologien für räumliche spritzgegossene Schaltungsträger (3-D MID)**  
196 Seiten, 86 Bilder, 4 Tabellen. 1995.
- Band 51: Franz-Josef Zeller  
**Sensorplanung und schnelle Sensorregelung für Industrieroboter**  
190 Seiten, 102 Bilder, 9 Tabellen. 1995.
- Band 52: Michael Solvie  
**Zeitbehandlung und Multimedia-Unterstützung in Feldkommunikationssystemen**  
200 Seiten, 87 Bilder, 35 Tabellen. 1996.
- Band 53: Robert Hopperdietzel  
**Reengineering in der Elektro- und Elektronikindustrie**  
180 Seiten, 109 Bilder, 1 Tabelle. 1996.  
ISBN 3-87525-070-2
- Band 54: Thomas Rebhan  
**Beitrag zur Mikromaterialbearbeitung mit Excimerlasern – Systemkomponenten und Verfahrensoptimierungen**  
148 Seiten, 61 Bilder, 10 Tabellen. 1996.  
ISBN 3-87525-075-3
- Band 55: Henning Hanebuth  
**Laserstrahlhartlöten mit Zweistrahltechnik**  
157 Seiten, 58 Bilder, 11 Tabellen. 1996.  
ISBN 3-87525-074-5
- Band 56: Uwe Schönherr  
**Steuerung und Sensordatenintegration für flexible Fertigungszellen mit kooperierenden Robotern**  
188 Seiten, 116 Bilder, 3 Tabellen. 1996.  
ISBN 3-87525-076-1
- Band 57: Stefan Holzer  
**Berührungslose Formgebung mit Laserstrahlung**  
162 Seiten, 69 Bilder, 11 Tabellen. 1996.  
ISBN 3-87525-079-6

- Band 58: Markus Schultz  
**Fertigungsqualität beim 3D-Laserstrahlschweißen von Blechformteilen**  
165 Seiten, 88 Bilder, 9 Tabellen. 1997.  
ISBN 3-87525-080-X
- Band 59: Thomas Krebs  
**Integration elektromechanischer CA-Anwendungen über einem STEP-Produktmodell**  
198 Seiten, 58 Bilder, 8 Tabellen. 1997.  
ISBN 3-87525-081-8
- Band 60: Jürgen Sturm  
**Prozeßintegrierte Qualitätssicherung in der Elektronikproduktion**  
167 Seiten, 112 Bilder, 5 Tabellen. 1997.  
ISBN 3-87525-082-6
- Band 61: Andreas Brand  
**Prozesse und Systeme zur Bestückung räumlicher elektronischer Baugruppen (3D-MID)**  
182 Seiten, 100 Bilder. 1997.  
ISBN 3-87525-087-7
- Band 62: Michael Kauf  
**Regelung der Laserstrahlleistung und der Fokusparameter einer CO<sub>2</sub>-Hochleistungslaseranlage**  
140 Seiten, 70 Bilder, 5 Tabellen. 1997.  
ISBN 3-87525-083-4
- Band 63: Peter Steinwasser  
**Modulares Informationsmanagement in der integrierten Produkt- und Prozeßplanung**  
190 Seiten, 87 Bilder. 1997.  
ISBN 3-87525-084-2
- Band 64: Georg Liedl  
**Integriertes Automatisierungskonzept für den flexiblen Materialfluß in der Elektronikproduktion**  
196 Seiten, 96 Bilder, 3 Tabellen. 1997.  
ISBN 3-87525-086-9
- Band 65: Andreas Otto  
**Transiente Prozesse beim Laserstrahlschweißen**  
132 Seiten, 62 Bilder, 1 Tabelle. 1997.  
ISBN 3-87525-089-3
- Band 66: Wolfgang Blöchl  
**Erweiterte Informationsbereitstellung an offenen CNC-Steuerungen zur Prozeß- und Programoptimierung**  
168 Seiten, 96 Bilder. 1997.  
ISBN 3-87525-091-5
- Band 67: Klaus-Uwe Wolf  
**Verbesserte Prozeßführung und Prozeßplanung zur Leistungs- und Qualitätssteigerung beim Spulenwickeln**  
186 Seiten, 125 Bilder. 1997.  
ISBN 3-87525-092-3
- Band 68: Frank Backes  
**Technologieorientierte Bahnplanung für die 3D-Laserstrahlbearbeitung**  
138 Seiten, 71 Bilder, 2 Tabellen. 1997.  
ISBN 3-87525-093-1
- Band 69: Jürgen Kraus  
**Laserstrahlumformen von Profilen**  
137 Seiten, 72 Bilder, 8 Tabellen. 1997.  
ISBN 3-87525-094-X
- Band 70: Norbert Neubauer  
**Adaptive Strahlführungen für CO<sub>2</sub>-Laseranlagen**  
120 Seiten, 50 Bilder, 3 Tabellen. 1997.  
ISBN 3-87525-095-8

Band 71: Michael Steber

**Prozeßoptimierter Betrieb flexibler Schraubstationen  
in der automatisierten Montage**

168 Seiten, 78 Bilder, 3 Tabellen. 1997.  
ISBN 3-87525-096-6

Band 72: Markus Pfestorf

**Funktionale 3D-Oberflächenkenngrößen in der Umformtechnik**

162 Seiten, 84 Bilder, 15 Tabellen. 1997.  
ISBN 3-87525-097-4

Band 73: Volker Franke

**Integrierte Planung und Konstruktion  
von Werkzeugen für die Biegebearbeitung**

143 Seiten, 81 Bilder. 1998.  
ISBN 3-87525-098-2

Band 74: Herbert Scheller

**Automatisierte Demontagesysteme und recyclinggerechte  
Produktgestaltung elektronischer Baugruppen**

184 Seiten, 104 Bilder, 17 Tabellen. 1998.  
ISBN 3-87525-099-0

Band 75: Arthur Meßner

**Kaltmassivumformung metallischer Kleinstteile  
– Werkstoffverhalten, Wirkflächenreibung, Prozeßauslegung**

164 Seiten, 92 Bilder, 14 Tabellen. 1998.  
ISBN 3-87525-100-8

Band 76: Mathias Glasmacher

**Prozeß- und Systemtechnik zum Laserstrahl-Mikroschweißen**

184 Seiten, 104 Bilder, 12 Tabellen. 1998.  
ISBN 3-87525-101-6

Band 77: Michael Schwind

**Zerstörungsfreie Ermittlung mechanischer Eigenschaften  
von Feinblechen mit dem Wirbelstromverfahren**

124 Seiten, 68 Bilder, 8 Tabellen. 1998.  
ISBN 3-87525-102-4

Band 78: Manfred Gerhard

**Qualitätssteigerung in der Elektronikproduktion durch Optimierung  
der Prozeßführung beim Löten komplexer Baugruppen**

179 Seiten, 113 Bilder, 7 Tabellen. 1998.  
ISBN 3-87525-103-2

Band 79: Elke Rauh

**Methodische Einbindung der Simulation  
in die betrieblichen Planungs- und Entscheidungsabläufe**

192 Seiten, 114 Bilder, 4 Tabellen. 1998.  
ISBN 3-87525-104-0

Band 80: Sorin Niederkorn

**Meßeinrichtung zur Untersuchung der Wirkflächenreibung  
bei umformtechnischen Prozessen**

99 Seiten, 46 Bilder, 6 Tabellen. 1998.  
ISBN 3-87525-105-9

Band 81: Stefan Schubert

**Regelung der Fokusslage beim Schweißen mit CO<sub>2</sub>-Hochleistungslasern  
unter Einsatz von adaptiven Optiken**

140 Seiten, 64 Bilder, 3 Tabellen. 1998.  
ISBN 3-87525-106-7

Band 82: Armando Walter Colombo

**Development and Implementation of Hierarchical Control Structures  
of Flexible Production Systems Using High Level Petri Nets**

216 Seiten, 86 Bilder. 1998.  
ISBN 3-87525-109-1

Band 83: Otto Meedt

**Effizienzsteigerung bei Demontage und Recycling  
durch flexible Demontagetchnologien und optimierte Produktgestaltung**

186 Seiten, 103 Bilder. 1998.  
ISBN 3-87525-108-3

- Band 84: Knuth Götz  
**Modelle und effiziente Modellbildung zur Qualitätssicherung in der Elektronikproduktion**  
212 Seiten, 129 Bilder, 24 Tabellen. 1998.  
ISBN 3-87525-112-1
- Band 85: Ralf Luchs  
**Einsatzmöglichkeiten leitender Klebstoffe zur zuverlässigen Kontaktierung elektronischer Bauelemente in der SMT**  
176 Seiten, 126 Bilder, 30 Tabellen. 1998.  
ISBN 3-87525-113-7
- Band 86: Frank Pöhlau  
**Entscheidungsgrundlagen zur Einführung räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3-D MID)**  
144 Seiten, 99 Bilder. 1999.  
ISBN 3-87525-114-8
- Band 87: Roland T. A. Kals  
**Fundamentals on the miniaturization of sheet metal working processes**  
128 Seiten, 58 Bilder, 11 Tabellen. 1999.  
ISBN 3-87525-115-6
- Band 88: Gerhard Luhn  
**Implizites Wissen und technisches Handeln am Beispiel der Elektronikproduktion.**  
252 Seiten, 61 Bilder, 1 Tabelle. 1999.  
ISBN 3-87525-116-4
- Band 89: Axel Sprenger  
**Adaptives Streckbiegen von Aluminium-Strangpreßprofilen**  
114 Seiten, 63 Bilder, 4 Tabellen. 1999.  
ISBN 3-87525-117-2
- Band 90: Hans-Jörg Pucher  
**Untersuchungen zur Prozeßfolge Umformen, Bestücken und Laserstrahllöten von Mikrokontakten**  
158 Seiten, 69 Bilder, 9 Tabellen. 1999.  
ISBN 3-87525-119-9
- Band 91: Horst Arnet  
**Profilbiegen mit kinematischer Gestalterzeugung**  
128 Seiten, 67 Bilder, 7 Tabellen. 1999.  
ISBN 3-87525-120-2
- Band 92: Doris Schubart  
**Prozeßmodellierung und Technologieentwicklung beim Abtragen mit CO<sub>2</sub>-Laserstrahlung**  
133 Seiten, 57 Bilder, 13 Tabellen. 1999.  
ISBN 3-87525-122-9
- Band 93: Adrianus L. P. Coremans  
**Laserstrahlsintern von Metallpulver – Prozeßmodellierung, Systemtechnik, Eigenschaften laserstrahlgesinterter Metallkörper**  
184 Seiten, 108 Bilder, 12 Tabellen. 1999.  
ISBN 3-87525-124-5
- Band 94: Hans-Martin Biehler  
**Optimierungskonzepte für Qualitätsdatenverarbeitung und Informationsbereitstellung in der Elektronikfertigung**  
194 Seiten, 105 Bilder. 1999.  
ISBN 3-87525-126-1
- Band 95: Wolfgang Becker  
**Oberflächenausbildung und tribologische Eigenschaften excimerlaserstrahlbearbeiteter Hochleistungskeramiken**  
175 Seiten, 71 Bilder, 3 Tabellen. 1999.  
ISBN 3-87525-127-x
- Band 96: Philipp Hein  
**Innenhochdruck-Umformen von Blechpaaren: Modellierung, Prozeßauslegung und Prozeßführung**  
129 Seiten, 57 Bilder, 7 Tabellen. 1999.  
ISBN 3-87525-128-8

Band 97: Gunter Beitinger  
**Herstellungs- und Prüfverfahren  
für thermoplastische Schaltungsträger**  
169 Seiten, 92 Bilder, 20 Tabellen. 1999.  
ISBN 3-87525-129-6

Band 98: Jürgen Knoblach  
**Beitrag zur rechnerunterstützten verursachungsgerechten Angebotskalkulation von  
Blechteilen mit Hilfe wissensbasierter Methoden**  
155 Seiten, 53 Bilder, 26 Tabellen. 1999.  
ISBN 3-87525-130-X

Band 99: Frank Breitenbach  
**Bildverarbeitungssystem zur Erfassung der Anschlußgeometrie  
elektronischer SMT-Bauelemente**  
147 Seiten, 92 Bilder, 12 Tabellen. 2000.  
ISBN 3-87525-131-8

Band 100: Bernd Falk  
**Simulationsbasierte Lebensdauervorhersage  
für Werkzeuge der Kaltmassivumformung**  
134 Seiten, 44 Bilder, 15 Tabellen. 2000.  
ISBN 3-87525-136-9

Band 101: Wolfgang Schögl  
**Integriertes Simulationsdaten-Management  
für Maschinenentwicklung und Anlagenplanung**  
169 Seiten, 101 Bilder, 20 Tabellen. 2000.  
ISBN 3-87525-137-7

Band 102: Christian Hinsel  
**Ermüdungsbruchversagen hartstoffbeschichteter  
Werkzeugstähle in der Kaltmassivumformung**  
130 Seiten, 80 Bilder, 14 Tabellen. 2000.  
ISBN 3-87525-138-5

Band 103: Stefan Bobbert  
**Simulationsgestützte Prozessauslegung  
für das Innenhochdruck-Umformen von Blechpaaren**  
123 Seiten, 77 Bilder. 2000.  
ISBN 3-87525-145-8

Band 104: Harald Rottbauer  
**Modulares Planungswerkzeug  
zum Produktionsmanagement in der Elektronikproduktion**  
166 Seiten, 106 Bilder. 2001.  
ISBN 3-87525-139-3

Band 105: Thomas Hennige  
**Flexible Formgebung von Blechen durch Laserstrahlumformen**  
119 Seiten, 50 Bilder. 2001.  
ISBN 3-87525-140-7

Band 106: Thomas Menzel  
**Wissensbasierte Methoden für die rechnergestützte Charakterisierung  
und Bewertung innovativer Fertigungsprozesse**  
152 Seiten, 71 Bilder. 2001.  
ISBN 3-87525-142-3

Band 107: Thomas Stöckel  
**Kommunikationstechnische Integration der Prozeßebe-  
ne in Produktionssysteme durch Middleware-Frameworks**  
147 Seiten, 107 Bilder, 5 Tabellen. 2001.  
ISBN 3-87525-143-1

Band 108: Frank Pitter  
**Verfügbarkeitssteigerung von Werkzeugmaschinen  
durch Einsatz mechatronischer Sensorlösungen**  
158 Seiten, 131 Bilder, 8 Tabellen. 2001.  
ISBN 3-87525-144-X

Band 109: Markus Korneli  
**Integration lokaler CAP-Systeme  
in einen globalen Fertigungsdatenverbund**  
121 Seiten, 53 Bilder, 11 Tabellen. 2001.  
ISBN 3-87525-146-6

Band 110: Burkhard Müller  
**Laserstrahljustieren mit Excimer-Lasern – Prozeßparameter und Modelle zur Aktorkonstruktion**  
128 Seiten, 36 Bilder, 9 Tabellen. 2001  
ISBN 3-87525-159-8

Band 111: Jürgen Göhringer  
**Integrierte Telediagnose via Internet zum effizienten Service von Produktionssystemen**  
178 Seiten, 98 Bilder, 5 Tabellen. 2001.  
ISBN 3-87525-147-4

Band 112: Robert Feuerstein  
**Qualitäts- und kosteneffiziente Integration neuer Bauelementetechnologien in die Flachbaugruppenfertigung**  
161 Seiten, 99 Bilder, 10 Tabellen. 2001.  
ISBN 3-87525-151-2

Band 113: Marcus Reichenberger  
**Eigenschaften und Einsatzmöglichkeiten alternativer Elektroniklote in der Oberflächenmontage (SMT)**  
165 Seiten, 97 Bilder, 18 Tabellen. 2001.  
ISBN 3-87525-152-0

Band 114: Alexander Huber  
**Justieren vormontierter Systeme mit dem Nd:YAG-Laser unter Einsatz von Aktoren**  
122 Seiten, 58 Bilder, 5 Tabellen. 2001.  
ISBN 3-87525-153-9

Band 115: Sami Krimi  
**Analyse und Optimierung von Montagesystemen in der Elektronikproduktion**  
155 Seiten, 88 Bilder, 3 Tabellen. 2001.  
ISBN 3-87525-157-1

Band 116: Marion Merklein  
**Laserstrahlumformen von Aluminiumwerkstoffen - Beeinflussung der Mikrostruktur und der mechanischen Eigenschaften**  
122 Seiten, 65 Bilder, 15 Tabellen. 2001.  
ISBN 3-87525-156-3

Band 117: Thomas Collisi  
**Ein informationslogistisches Architekturkonzept zur Akquisition simulationsrelevanter Daten**  
181 Seiten, 105 Bilder, 7 Tabellen. 2002.  
ISBN 3-87525-164-4

Band 118: Markus Koch  
**Rationalisierung und ergonomische Optimierung im Innenausbau durch den Einsatz moderner Automatisierungstechnik**  
176 Seiten, 98 Bilder, 9 Tabellen. 2002.  
ISBN 3-87525-165-2

Band 119: Michael Schmidt  
**Prozeßregelung für das Laserstrahl-Punktschweißen in der Elektronikproduktion**  
152 Seiten, 71 Bilder, 3 Tabellen. 2002.  
ISBN 3-87525-166-0

Band 120: Nicolas Tiesler  
**Grundlegende Untersuchungen zum Fließpressen metallischer Kleinstteile**  
126 Seiten, 78 Bilder, 12 Tabellen. 2002.  
ISBN 3-87525-175-X

Band 121: Lars Pursche  
**Methoden zur rechnergestützten Programmierung für die 3D- Lasermikrobearbeitung**  
in Druck

Band 122: Jan-Oliver Brassel  
**Prozeßkontrolle beim Laserstrahl-Mikroschweißen**  
in Druck

Band 123: Mark Geisel

**Prozeßkontrolle und –steuerung beim Laserstrahlschweißen**  
in Druck

Band 124: Gerd Eßer

**Laserstrahlunterstützte Erzeugung metallischer Leiterstrukturen auf  
Thermoplastsubstraten für die MID-Technik**  
148 Seiten, 60 Bilder, 6 Tabellen. 2002.  
ISBN 3-87525-171-7

Band 125: Marc Fleckenstein

**Qualität laserstrahl-gefügter Mikroverbindungen  
elektronischer Kontakte**  
159 Seiten, 77 Bilder, 7 Tabellen. 2002.  
ISBN 3-87525-170-9

Band 126: Stefan Kaufmann

**Grundlegende Untersuchungen zum Nd:YAG- Laserstrahlfügen  
von Silizium für Komponenten der Optoelektronik**  
159 Seiten, 100 Bilder, 6 Tabellen. 2002.  
ISBN 3-87525-172-5

Band 127: Thomas Fröhlich

**Simultanes Löten von Anschlußkontakten elektronischer Bauelemente  
mit Diodenlaserstrahlung**  
in Druck

Band 128: Achim Hofmann

**Erweiterung der Formgebungsgrenzen beim Umformen von  
Aluminiumwerkstoffen durch den Einsatz prozessangepasster Platinen**  
in Druck

Band 129: Ingo Kriebitzsch

**3-D MID Technologie in der Automobilelektronik**  
129 Seiten, 102 Bilder, 10 Tabellen. 2002.  
ISBN 3-87525-169-5

Band 130: Thomas Pohl

**Fertigungsqualität und Umformbarkeit laserstrahlgeschweißter  
Formplatinen aus Aluminiumlegierungen**  
in Druck

Band 131: Matthias Wenk

**Entwicklung eines konfigurierbaren Steuerungssystems für die  
flexible Sensorführung von Industrierobotern**  
167 Seiten, 85 Bilder, 1 Tabelle. 2002.  
ISBN 3-87525-174-1

Band 132: Matthias Negendanck

**Neue Aktorik und Sensorik für Bearbeitungsköpfe  
zum Laserstrahlschweißen**  
in Druck

Band 133: Oliver Kreis

**Integrierte Fertigung –  
Verfahrensintegration durch Innenhochdruck-Umformen, Trennen und  
Laserstrahlschweißen in einem Werkzeug sowie ihre tele- und multimediale  
Präsentation**  
in Druck

Band 134: Stefan Trautner

**Technische Umsetzung produktbezogener Instrumente der  
Umweltpolitik bei Elektro- und Elektronikgeräten**  
179 Seiten, 92 Bilder, 11 Tabellen. 2002.  
ISBN 3-87525-177-6

Band 135: Roland Meier

**Strategien für einen produktorientierten Einsatz räumlicher  
spritzgegossener Schaltungsträger (3-D MID)**  
155 Seiten, 88 Bilder, 14 Tabellen. 2002.  
ISBN 3-87525-178-4