

Otto Meedt

Effizienzsteigerung bei Demontage und  
Recycling durch flexible  
Demontagetechnologien und optimierte  
Produktgestaltung

Lieber Thomas,  
für Deine Forschungen und  
Dein „Buch“ wünsche ich Dir  
viel Erfolg  
Otto



Otto Meedt

*Effizienzsteigerung bei Demontage und  
Recycling durch flexible  
Demontagetechnologien und optimierte  
Produktgestaltung*

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: 28. April 1998  
Tag der Promotion: 22. Juli 1998  
Dekan: Prof. Dr. G. Herold  
Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. K. Feldmann  
Prof. Dr.-Ing. H. Meerkamm

Die Deutsche Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme

**Meedt, Otto:**

Effizienzsteigerung bei Demontage und Recycling durch flexible  
Demontagetechologien und optimierte Produktgestaltung / Otto  
Meedt. Hrsg. von Klaus Feldmann. - Bamberg : Meisenbach, 1998  
(Fertigungstechnik - Erlangen ; 83)  
Zugl.: Erlangen, Nürnberg, Univ., Diss., 1998  
ISBN 3-87525-108-3 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 1998  
Herstellung: Gruner Druck GmbH, Erlangen-Eltersdorf  
Printed in Germany

# Vorwort

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

Herrn Prof. Dr.-Ing. K. Feldmann, dem Leiter dieses Lehrstuhls am Institut für Fertigungstechnik, danke ich herzlich für den Freiraum zur Durchführung dieser Arbeit sowie für die wohlwollende und großzügige Förderung.

Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. H. Meerkamm, Leiter des Lehrstuhls für Konstruktionstechnik bedanke ich mich für die fruchtbare Zusammenarbeit, aus der wesentliche Teile dieser Dissertation resultieren, sowie für die wohlwollende Übernahme des Korreferates.

Einen herzlichen Dank möchte ich allen meinen Kollegen, besonders aber Dr.-Ing. J. Weber, Dipl.-Ing. St. Trautner, Dipl.-Ing. B. Rosemann, Dr.-Ing. H. Scheller, Dr.-Ing. A. W. Colombo und Dipl.-Ing. St. Krug für die Anregungen, die Unterstützung und für die Diskussionsbereitschaft aussprechen.

Bedanken möchte ich mich auch bei den Studenten und Hilfskräften, die durch ihre Unterstützung die Arbeit in dieser Form ermöglicht haben. Ohne den Beitrag anderer zu schmälern möchte ich besonders Dipl.-Inf. H. Lohrmann, Dipl.-Inf. G. Haiplik, cand.-Ing. Th. Abraham, Dipl. Ing. M. Hiltner, und cand.-Inf. A. Kohl erwähnen. Für die jahrelange tatkräftige Unterstützung möchte ich dabei besonders Herrn cand.-Ing. Th. Wiedenhöfer danken.

Nicht zuletzt bedanke ich mich bei meinen Eltern, die mir diese Ausbildung nicht nur ermöglicht, sondern mich dabei auch mit viel Geduld und Vertrauen unterstützt haben.

Mein herzlichster Dank gebührt jedoch meiner Frau Susanne und meinem Sohn Alexander, die durch viel Verständnis und durch Motivation ganz wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.



# Effizienzsteigerung bei Demontage und Recycling durch flexible Demontagetechnologien und optimierte Produktgestaltung

## - Inhaltsverzeichnis -

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Demontage im Umfeld des Recyclings - Probleme und grundlegende Rationalisierungspotentiale</b>	<b>4</b>
2.1	Grundlagen und Grundbegriffe des Recyclings	4
2.2	Einordnung der Demontage in das Recycling	6
2.3	Analyse der aktuellen Demontage- und Recyclingpraxis	8
2.3.1	Recycling elektrischer und elektronischer Geräte	9
2.3.2	Vorgehensweise beim Recycling von Altfahrzeugen	11
2.3.3	Resultierende Problemstellungen	13
2.4	Rationalisierungspotentiale bei Recycling und Demontage	14
<b>3</b>	<b>Entwicklungspotentiale zur Optimierung von Demontagevorgängen</b>	<b>18</b>
3.1	Stand der Forschung	18
3.2	Grundlegender Rahmen für die Entwicklung neuer Demontagetechnologien	23
3.3	Lösungsräume für effiziente Demontagewerkzeuge	25
3.3.1	Allgemeine Entwicklungspotentiale für Demontagewerkzeuge	26
3.3.2	Prozeßimmanente Entwicklungspotentiale bei der Demontage	27
<b>4</b>	<b>Entwicklung effizienter Demontagewerkzeuge</b>	<b>32</b>
4.1	Alternative Werkzeugkonzepte für die flexible und effiziente Übertragung von Drehmomenten	33
4.1.1	Konzeption eines zerstörungsfreien Mehrfachschraubers	34
4.1.2	Entwicklung des Bohr-Entschraubwerkzeugs	36
4.1.3	Konzeption der Entschraubzange	37
4.1.4	Vergleich der Werkzeugkonzepte zur Drehmomentübertragung	39

4.2	Werkzeugkonzepte zur effizienten und flexiblen Einbringung von Kräften . . .	40
4.2.1	Trennen von Bauteilen mit dem Spreizmeißel . . . . .	41
4.2.2	Übertragung von Kräften mit dem Bohrgreifer . . . . .	43
4.2.3	Flexible Krafteinbringung mit einem Multifunktionswerkzeug . . . . .	44
4.2.4	Vergleich der Werkzeugkonzepte zur flexiblen Kraftübertragung . . . .	47
4.3	Beispielhafte Realisierung flexibler Demontagewerkzeuge zur Übertragung von Drehmomenten und Kräften . . . . .	48
4.3.1	Realisierung und Optimierung des Spreizmeißels . . . . .	48
4.3.2	Gestaltung des Bohr-Entschraubwerkzeugs und Optimierung der Prozeßparameter . . . . .	52
4.4	Integration flexibler Demontagewerkzeuge in automatisierte Systeme am Beispiel des Bohr-Entschraubwerkzeugs . . . . .	57
<b>5</b>	<b>Methoden zur recyclingorientierten Produktanalyse . . . . .</b>	<b>62</b>
5.1	Einflußgrößen auf die Recyclinggerechtigkeit von Produkten . . . . .	62
5.2	Methoden und Werkzeuge zur Bewertung der Recycling- und Demontageeignung von Produkten . . . . .	65
5.2.1	Methoden zur qualitativen Produktbewertung . . . . .	65
5.2.2	Werkzeuge zur quantitativen Produktbewertung . . . . .	66
5.2.3	Vergleich der Ansätze und Darstellung der Defizite . . . . .	72
5.3	Entwurf einer recyclingorientierten Produktanalyse zur Demontageplanung und optimierten Produktgestaltung . . . . .	74
<b>6</b>	<b>Entwicklung einer Systematik zur rechnergestützten Recycling- und Demontagesimulation . . . . .</b>	<b>79</b>
6.1	Abbildung recyclingrelevanter Produkteigenschaften . . . . .	79
6.2	Abbildung von Rahmenbedingungen für Demontage und Recycling . . . . .	85
6.3	Bewertung einzelner Demontagezustände . . . . .	88
6.4	Ableitung relevanter Demontagezustände aus Recyclinggraphen . . . . .	90
6.4.1	Vollständige Ableitung der technisch möglichen Demontagezustände aus Recyclinggraphen . . . . .	91
6.4.2	Reduktion des Lösungsraumes durch ergänzende Produkt- strukturierung . . . . .	93
6.4.3	Einschränkung der relevanten Demontagezustände durch spezifische Kennwerte . . . . .	95
6.5	Ermittlung der optimalen Recycling- und Demontagestrategie . . . . .	103

<b>7 Systematik zur rechnerunterstützten, recyclingorientierten Optimierung der Produktgestalt</b> .....	<b>105</b>
7.1 Konzeption von Methoden zur Schwachstellenanalyse unter Berücksichtigung von Produktmodell und Recyclingszenario .....	105
7.1.1 Optimierungspotentiale bei der Materialauswahl .....	106
7.1.2 Schwachstellen bei Auswahl und Anordnung von Verbindungen ....	107
7.1.3 Optimierungsmöglichkeiten bei der Anordnung von Bauteilen .....	110
7.2 Systematik zur integrierten Anwendung der Schwachstellenanalysen .....	111
7.3 Sensitivitätsanalysen mit variablen Recyclingszenarien .....	115
7.4 Integration der Systematik in Werkzeuge zur erweiterten, umweltorientierten Produktanalyse .....	116
<b>8 Implementierung des Softwaresystems DisPlay</b> .....	<b>119</b>
8.1 Strukturierung und Implementierung einer Datenbasis für DisPlay .....	119
8.1.1 Datenbasis zur Modellierung von Produkten und Recyclingszenarien	119
8.1.2 Entwicklung eines recyclingorientierten Produktmodells .....	120
8.1.3 Datenstruktur zur Modellierung von Recyclingszenarien .....	122
8.2 Gestaltung der Benutzerschnittstellen .....	123
8.3 Berechnung optimaler Demontage- und Recyclingstrategien auf der Basis von Produkt- und Recyclingmodell .....	126
8.4 Implementierung der Schwachstellenanalysen zur Optimierung der Demontage- und Recyclinggerechtheit von Produkten .....	131
8.5 Kopplung von DisPlay mit Systemen zur erweiterten, umweltgerechten Produktgestaltung .....	135
8.6 Berechnung eines Beispielproduktes und Validierung der Ergebnisse ....	138
<b>9 Zusammenfassung</b> .....	<b>147</b>
<b>Literatur</b> .....	<b>149</b>
<b>Anhang</b> .....	<b>161</b>



# 1 Einleitung

Technologischer Fortschritt und Produktivitätssteigerungen haben dazu geführt, daß technische Produkte immer effizienter und kostengünstiger gefertigt werden. Aus den beständig wachsenden Produktionszahlen und den immer kürzer werdenden Innovationszyklen, insbesondere im Bereich der Konsumgüter und der Automobile, resultiert ein stark zunehmendes Aufkommen an ausgedienten Altgeräten. So fallen jährlich beispielsweise ca. 1,9 Mio. t Elektronikschrott /130/, /89/ und ca. 2,4 Mio. Altfahrzeuge /67/, /113/ zur Entsorgung an.

Die derzeitige Entsorgung technischer Produkte ist vorwiegend auf die Rückgewinnung von Metallen ausgerichtet /131/. Deshalb stehen für die erhebliche Menge der verbleibenden Reststoffe und der metallarmen Kleingeräte die thermische Behandlung in Müllverbrennungsanlagen sowie die immer noch weitverbreitete direkte Deponierung im Vordergrund. Allerdings ist vor allem die Deponierung der vermischten, teils schadstoffhaltigen Fraktionen hinsichtlich der Umweltbelastung problematisch. Zusätzlich haben die zunehmenden technologischen Anforderungen an die Müllverbrennung erhebliche Kostensteigerungen in diesem Bereich zur Folge /99/.

Die wachsende Sensibilisierung der Bevölkerung für ökologische Fragen und die Verknappung von natürlichen Rohstoffen sind weitere wichtige Faktoren, die zukünftig ein umfassenderes Recycling technischer Gebrauchsgüter fordern (Bild 1).

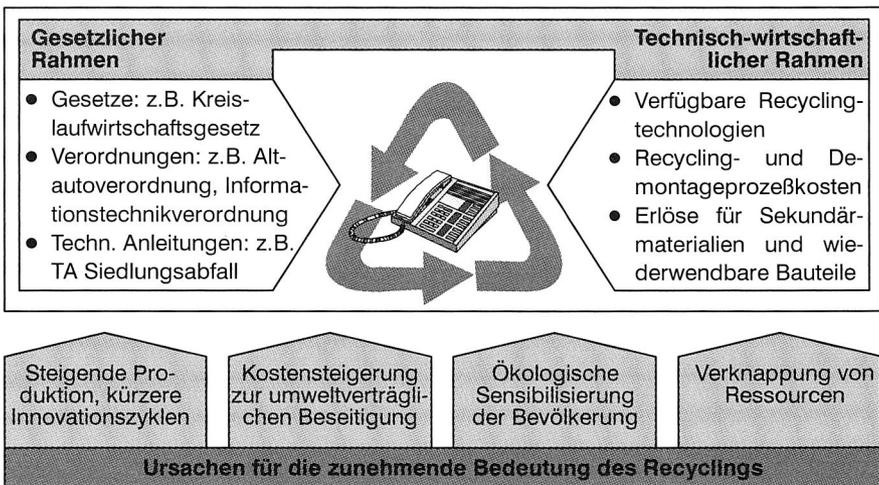


Bild 1: Motivation und Randbedingungen für das Recycling technischer Produkte

Auf die geschilderte Problematik reagiert der Gesetzgeber durch Gesetze, Verordnungen und allgemeine Verwaltungsvorschriften (Technische Anleitungen), die Mindestfor-

derungen für die Behandlung ausgedienter Produkte festlegen. Maßgeblichen Einfluß hat dabei das im Oktober 1996 in Kraft getretene Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz (Krw-/AbfG). Dieses hat die Schließung von Stoffkreisläufen zum Ziel und beinhaltet die Rangfolge "Abfallvermeidung vor Abfallverwertung vor Beseitigung"/48/. Der Vorrang der stofflichen oder thermischen Verwertung vor der Beseitigung ist dabei an drei Bedingungen gebunden: Die Verwertung muß technisch möglich, wirtschaftlich zumutbar und umweltverträglicher als die Beseitigung sein /100/. Weiterhin überträgt der Gesetzgeber den Herstellern und Vertriebern technischer Produkte die Produktverantwortung für die Umsetzung des Kreislaufwirtschaftsgesetzes /48/.

Im Rahmen von Verordnungen für bestimmte Produktgruppen werden vom Gesetzgeber detailliertere Vorgaben zur Entsorgung und Behandlung gemacht. Die vor kurzem in Kraft getretene Altautoverordnung /68/ schreibt beispielsweise die Vorlage eines Verwertungsnachweises bei der endgültigen Abmeldung eines Kraftfahrzeugs vor, der nur von zertifizierten Autoverwertern ausgestellt werden darf. Die Zertifizierung beruht dabei auf einer vorgegebenen technischen Ausstattung des Betriebes und auf der Einhaltung von spezifizierten Prozessschritten (z. B. Entnahme der Betriebsmittel). Eine weitere Verordnung ist für die Geräte der Informationstechnik bereits entworfen, jedoch noch nicht verabschiedet /79/.

Eine grundlegende Auswirkung auf zukünftige Entsorgungskonzepte wird darüber hinaus von der "Technische Anleitung Siedlungsabfall" erwartet. Eine Kernaussage dieser Vorschrift ist, daß ab dem Jahr 2005 kein Abfall mit einem organischen Anteil (auch Kunststoffe) von über 5 % deponiert werden darf /100/. Somit muß ein Großteil der bisher direkt deponierten Fraktionen einer Verwertung oder thermischen Behandlung zugeführt werden.

Abgesehen von den gesetzlichen Vorschriften, wird das Recycling ausgedienter Produkte ganz entscheidend von den technisch-wirtschaftlichen Rahmenbedingungen geprägt. Recyclingmaßnahmen, die das gesetzlich vorgegebene Mindestmaß übersteigen, werden in der Regel nur dann durchgeführt, wenn wirtschaftliche Vorteile zu erwarten sind. Dabei müssen einerseits die Erlöse für Sekundärwerkstoffe und für wiederverwendbare Bauteile sowie die Kosten für die Beseitigung der Reststoffe in Betracht gezogen werden. Andererseits ist die Durchführung der Prozesse zur entsprechenden Aufarbeitung bzw. Aufbereitung technischer Produkte ein wesentlicher Kostenfaktor. Die Effizienz der gesamten Prozeßkette bestimmt demnach maßgeblich die Wirtschaftlichkeit und damit auch die Nutzung von Recyclingmöglichkeiten. Gerade in diesem Bereich sind allerdings erhebliche Schwachstellen und entsprechende Optimierungspotentiale vorhanden. Es bieten sich zwei grundlegende Vorgehensweisen an, um die erneute Verwendung und Verwertung von Altgeräten zu vereinfachen und die Kosten zu reduzieren /19/, /33/ (Bild 2). Eine Strategie besteht darin, das Recycling bereits bei der Produktgestaltung verstärkt zu berücksichtigen, die andere zielt darauf ab, die Recyclingprozeßketten zu optimieren.

Die "recyclinggerechte Konstruktion" hat in den letzten Jahren zunehmend an Bedeutung gewonnen. Die Einflüsse der Produktgestalt auf die Recyclingfähigkeit am Ende

des Lebenszyklus (wie z. B. Materialauswahl und Baustruktur) sind jedoch vielfältig und aufgrund der komplexen Wechselwirkungen in ihrer Gesamtheit schwer zu beurteilen. Deshalb sind in diesem Bereich vor allem Werkzeuge erforderlich, die eine schnelle Bewertung von Produkten oder Produktentwürfen hinsichtlich der Recyclingfähigkeit und der voraussichtlichen Recyclingkosten ermöglichen. Desweiteren sind Methoden zur Erkennung von Schwachstellen notwendig, um die Wahl geeigneter Maßnahmen zur Verbesserung der Recyclingeignung zu vereinfachen.

Aufgrund der z. T. langen Gebrauchsdauer technischer Produkte sind die Auswirkungen der recyclinggerechten Produktgestaltung auf Entsorgungskonzepte erst mittel- und langfristig zu erwarten. Deshalb müssen parallel dazu aktuelle Recyclingprozesse verbessert werden.

Ein Kernelement des hochwertigen Recyclings technischer Produkte ist die Demontage, die eine sichere Schadstoffentfrachtung sowie die Trennung recyclingrelevanter Bestandteile ermöglicht /46/. Demontageprozesse sind jedoch aufgrund des großen manuellen Arbeitsanteils in Verbindung mit einem hohen Lohnniveau sehr kostenintensiv. Allerdings beinhalten konventionelle Demontagevorgänge erhebliche Optimierungspotentiale, wie beispielsweise den zielgerichteten Einsatz zerstörender Prozesse /133/. Durch deren Nutzung können wesentliche Kostensenkungen erreicht und dadurch die Wirtschaftlichkeit hochwertiger Recyclingkreisläufe entscheidend verbessert werden.

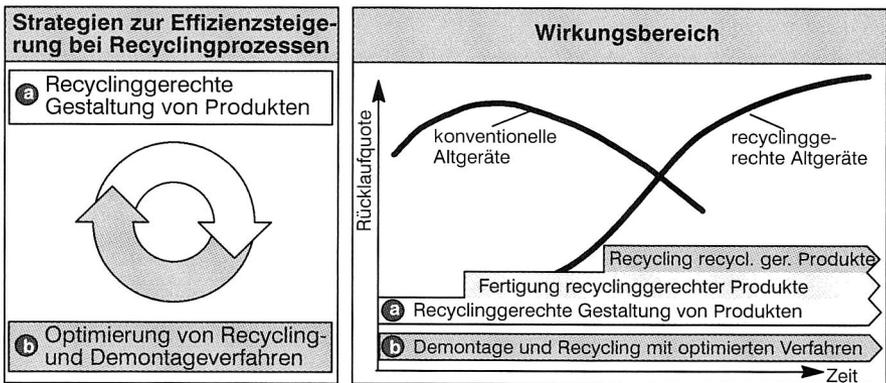


Bild 2: Strategien zur Effizienzsteigerung von Recyclingprozessen und deren Wirkungsbereich

Die Übergreifende Zielsetzung dieser Arbeit ist es, einen Beitrag zur Effizienzsteigerung bei Recycling und Demontage technischer Produkte zu leisten. Dazu werden zunächst anhand der aktuellen Recyclingpraxis die geschilderten Rationalisierungspotentiale konkretisiert. Anschließend werden sowohl für die Optimierung von Demontagevorgängen als auch zur Unterstützung der Produktgestaltung Methoden und Werkzeuge entwickelt. Diese sollen dazu beitragen, daß das Recycling zu einem wirtschaftlichen Prozeß in der Wertschöpfungskette technischer Produkte wird.

## 2 Demontage im Umfeld des Recyclings - Probleme und grundlegende Rationalisierungspotentiale

Die Nachgebrauchsphase von Produkten wird grundlegend von Recycling- und Demontageprozessen bestimmt. Im folgenden Kapitel werden zunächst die Grundbegriffe dieses Themenfeldes geklärt und präzisiert. Danach werden anhand der aktuellen Recyclingpraxis elementare Rationalisierungspotentiale in diesem Bereich abgeleitet.

### 2.1 Grundlagen und Grundbegriffe des Recyclings

Der Begriff Recycling umfaßt nach /69/ die erneute Verwendung oder Verwertung von Produkten oder Teilen von Produkten in Form von Kreisläufen. Man unterscheidet dabei Recyclingkreislaufarten, Recyclingformen und Recyclingbehandlungsprozesse.

Die Aufteilung des Recycling in Kreislaufarten folgt dem Lebenszyklus der Produkte. Grundsätzlich sind dies Produktion, Nutzung und Entsorgung. Bild 3 gibt eine Übersicht über die verschiedenen Kreislaufarten des Recyclings.

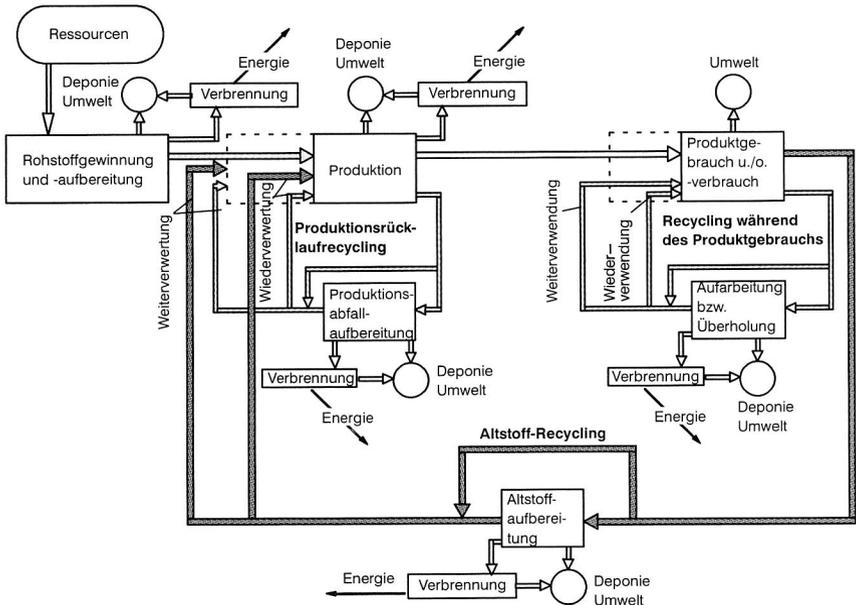


Bild 3: Begriffsbestimmungen zum Recycling nach VDI 2243 /69/

Im Rahmen des Produktionsrücklaufrecyclings werden bei der Produktion entstandene Materialabfälle sowie Hilfs- und Betriebsstoffe erneut in einen Produktionsprozeß zurückgeführt /69/. Diese Kreislaufart ist in der Industrie sehr weit verbreitet, da dabei zumeist definierte Materialien zur erneuten Verarbeitung vorliegen und somit Kosten eingespart werden können.

Das Recycling während des Produktgebrauchs (Produktrecycling) ist die Form des Recyclings, bei der eine Rückführung der ausgedienten Produkte oder Bauteile - mit oder ohne Durchlauf eines Behandlungsprozesses (Aufarbeitung) - in ein neues Gebrauchsstadium erfolgt. Demgegenüber versteht man unter Altstoffrecycling die Rückführung verbrauchter Produkte beziehungsweise von Altstoffen in einen neuen Produktionsprozeß. Stoffe, die nicht mehr in einer der oben beschriebenen Kreislaufarten dem Produktionsprozeß zurückgeführt werden können, müssen gegebenenfalls nach einer thermischen Behandlung deponiert werden.

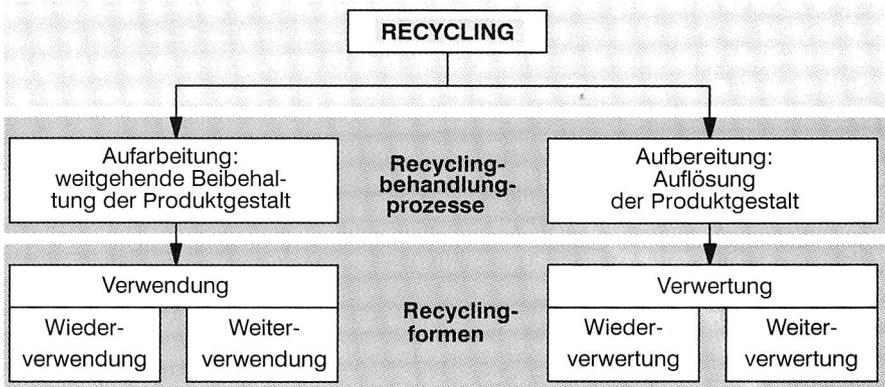


Bild 4: Recyclingformen und zugeordnete Recyclingbehandlungsprozesse nach /69/

Grundsätzlich gliedert sich das Recycling hinsichtlich der Recyclingformen in die erneute Verwendung und in die Verwertung von Altprodukten bzw. Teilen davon (Bild 4). Die erneute Verwendung erfordert meist einen Aufarbeitungsprozeß, wobei die Produktgestalt erhalten bleibt. Wird das Produkt für den gleichen Verwendungszweck eingesetzt, so spricht man von der Wiederverwendung bzw. bei einem Wechsel des Verwendungszweckes von der Weiterverwendung. Die Verwertung von Altprodukten impliziert eine Auflösung der Produktgestalt im Verfahrensablauf. Die aus dem Aufbereitungsverfahren resultierenden Materialfraktionen können entweder dem gleichen Produktionsprozeß erneut zugeführt werden (Wiederverwertung) oder in einem anderen Prozeß (Weiterverwertung) zum Einsatz kommen /69/.

## 2.2 Einordnung der Demontage in das Recycling

Die Demontage wird als wesentlicher Teilschritt sowohl der Aufarbeitung als auch der Aufbereitung zugerechnet. Demontageverrichtungen stellen als jeweils erstes Glied dieser Prozeßketten die Grundlage für die nachfolgenden Prozesse zur Verwendung und Verwertung dar und nehmen dadurch eine Schlüsselrolle im Rahmen des Recyclings ein /53/.

Neben den Teilfunktionen "Handhaben" und "Kontrollieren" sind bei der Demontage Trennprozesse von besonderer Bedeutung. Unter Trennen versteht man nach DIN 8580E das Fertigen durch Ändern der Form eines festen Körpers wobei der örtliche Zusammenhalt aufgehoben oder im Ganzen verringert wird /87/. Der Trennprozeß beginnt sobald das Trennwerkzeug und das Bauteil in Kontakt getreten sind und endet wenn die definierten Parameter erreicht sind. Die Einteilung der Trennprozesse ist in Bild 5 dargestellt.

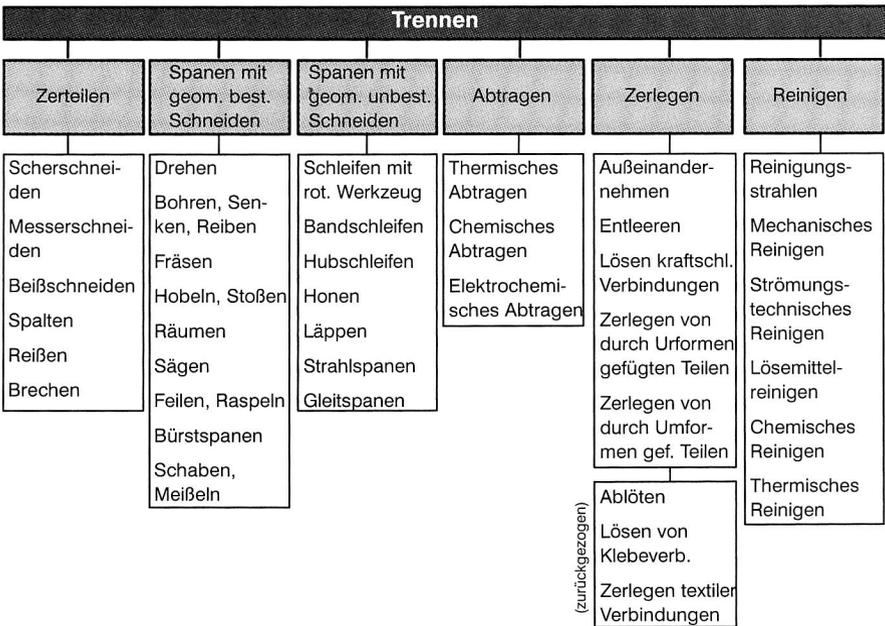


Bild 5: Unterteilung der Trennprozesse nach DIN 8580 E /87/

Die Auswahl des Trennprozesses orientiert sich am Zustand des Produktes vor dem Demontieren sowie an der gewählten Recyclingform der zu demontierenden Baugruppen und Bauteile. Grundsätzlich kann die zerstörungsfreie, die teilweise zerstörende

und die zerstörende Demontage unterschieden werden. In Bild 6 werden diese Demontagearten hinsichtlich ihrer Eigenschaften klassifiziert.

Legende:	Demontagearten		
	zerstörungsfrei	teilweise zerstörend	zerstörend (fraktionierend)
● möglich ○ nicht möglich			
<b>Verbindungstechnik</b>			
lösbar	●	●	●
unlösbar	○	●	●
<b>Beschädigung</b>			
Verbindungselement	○	●	●
Bauteile	○	○	●
<b>Recycling</b>			
Aufarbeitung/Verwendung	●	●	○
Aufbereitung/Verwertung	●	●	●

Bild 6: Demontagearten und ihre Eigenschaften

Die zerstörungsfreie Demontage ist durch das Trennen einer lösbaren Verbindung gekennzeichnet. Sowohl die miteinander verbundenen Teile als auch, falls vorhanden, die Verbindungselemente (z.B. Schrauben etc.), werden bei diesem Vorgang weder zerstört noch beschädigt und können somit wiederverwendet werden. Zur zerstörungsfreien Demontage werden grundsätzlich die Trennprozesse der Untergruppe "Zerlegen" (Bild 5) eingesetzt.

Werden bei der Demontageverrichtung Verbindungselemente oder Verbindungsmittel abgeändert oder zerstört liegt eine teilweise-zerstörende Demontage vor. Falls bei der Demontage auch das zu demontierende Bauteil zerstört wird, handelt es sich um eine zerstörende oder fraktionierende Demontage /53/.

Insbesondere bei der Prozeßkette des Aufbereitens, bei der eine Auflösung der Produktgestalt erfolgt, steht die Demontage in direkter Konkurrenz zu einer verfahrenstechnischen Zerkleinerung mit anschließender Sortierung. Bei diesen mechanischen Zerkleinerungsverfahren wird die Produktgestalt in einem Massenstromverfahren sehr schnell vollständig aufgelöst. Dabei ist die Flexibilität der Verfahren hinsichtlich verschiedener Produkte und Komponenten grundsätzlich hoch und nur durch wenige Ausschlußbedingungen begrenzt. Der Nachteil bei diesen Verfahren ist jedoch, daß zunächst eine Vermischung der Materialien stattfindet, die trotz nachgeschalteter Sortierverfahren problematisch sein kann (z.B. Vermischung der Fraktion mit Gefahrstoffen). Die prozeßbedingt resultierende Restfraktion (z. B. Shredderleichtfraktion) ist nach /72/ nicht wirtschaftlich aufbereitbar und wird deshalb beseitigt.

Im Gegensatz zu den mechanischen Zerkleinerungsverfahren können durch Demontage beliebige Komponenten mit hoher Werkstoffreinheit gewonnen werden.

Schadstoffe und Wertstoffe können somit gezielt separiert werden. Durch die Möglichkeit der Variation von zerstörenden, teilzerstörenden und zerstörungsfreien Demontageverrichtungen kann flexibel auf die Anforderungen der nachfolgenden Recyclingbehandlungsprozesse hinsichtlich des Bauteilzustandes reagiert werden.

<b>Legende:</b> ● hoch ◐ mittel ○ gering	<b>Shreddern</b> 	<b>Demontage</b> 
Mengenleistung	●	○
Prozeßkontinuität	●	○
Erzielbare Werkstoffreinheit	◐	●
Vermeidung von Schadstoffvermischungen	○	●
Vermeidung prozeßbedingter Restfraktionen	○	●
Eignung für das Produktrecycling von Bauteilen	○	●
Wirtschaftlichkeit bei variablen Mengen	○	●

*Bild 7: Vergleich der verfahrenstechnischen Zerkleinerung und der Demontage als Prozesse zur Aufbereitung für das Materialrecycling (nach [118], [33])*

Zum hochwertigen Recycling können somit grundsätzlich Vorteile der Demontage, gegenüber mechanischen Zerkleinerungsverfahren, erkannt werden. Nachteilig ist jedoch die bisher geringe Mengenleistung bei der Demontage, sowie die daraus resultierenden hohen Kosten.

### 2.3 Analyse der aktuellen Demontage- und Recyclingpraxis

Hinsichtlich des Spektrums von Produkten, die zur Demontage und zum Recycling anfallen, können die zwei wesentliche Problemfelder

- Elektronikschrott und
- Altfahrzeuge

unterschieden werden. Im folgenden wird die aktuelle Demontage- und Recyclingpraxis dieser Produktgruppen als Grundlage zur Ableitung von Rationalisierungspotentialen dargestellt.

### 2.3.1 Recycling elektrischer und elektronischer Geräte

Elektronikschrott nimmt im Rahmen der Recyclingproblematik eine besondere Stellung ein. Unter diesem Oberbegriff versteht man Geräte, die elektronische und elektrische Komponenten beinhalten. Während für das Jahr 1992 im Bundesgebiet 1,2 Mio. Tonnen Elektronikschrott anfielen, wird die Menge zu entsorgender elektronischer Altgeräte für 1998 auf ca. 1,9 Mio. Tonnen geschätzt (Bild 8). Allgemein wird in diesem Bereich mit einer jährlichen Steigerungsrate von 5-10% gerechnet /130/, /89/.

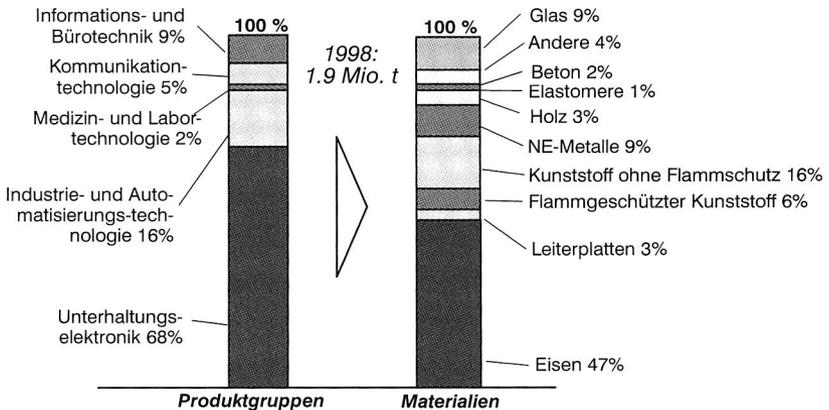


Bild 8: Geschätzter Anteil an Elektronikschrott und dessen Zusammensetzung in Deutschland für 1998 /130/, /89/

Neben dem wachsenden Aufkommen an Elektronikschrott stellt auch dessen Zusammensetzung ein Problemfeld bei der Entsorgung dar. Es handelt sich hierbei überwiegend um ein Vielstoffgemisch aus unterschiedlichsten, teils gefahrstoff- oder wertstoffhaltigen Materialien, deren gemeinsame Verwertung problematisch bzw. wenig sinnvoll ist.

Die prinzipielle Vorgehensweise zum derzeitigen Recycling von Elektronikschrott ist in Bild 9 dargestellt /139/. Nach einer Vorsortierung der ungeordnet vorliegenden Geräte in Produktgruppen findet eine manuelle Demontage der Geräte statt. Dabei werden in geringem Umfang Bauteile und Baugruppen für die Wiederverwendung entnommen. Weiterhin werden gefahrstoffhaltige Bauteile demontiert und einer Aufbereitung oder der Beseitigung zugeführt. Die verbleibenden Bauteile und Baugruppen werden dann in Materialfraktionen unterteilt und entweder direkt oder über mechanische Aufbereitungsprozesse, einer Verwertung zugeführt. Die Anzahl und die Unterscheidungskriterien für die Hauptfraktionen können je nach Verwerter stark variieren.

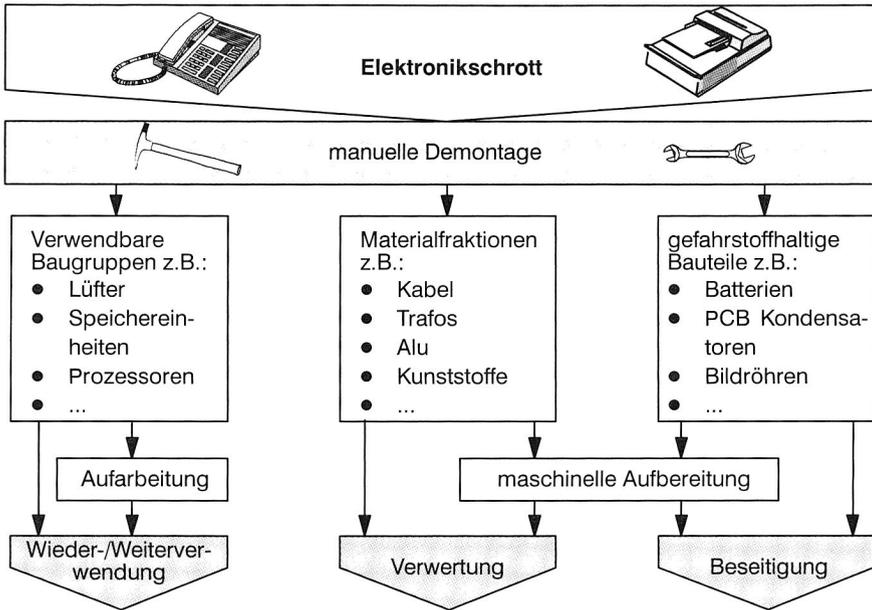


Bild 9: Grundstruktur beim Recycling von Elektronikschrott (nach /139/)

Bei den Betriebsmitteln in der (teil-) zerstörenden Demontage handelt es sich vielfach um einfache, universell einsetzbare konventionelle Werkzeuge und Vorrichtungen, wie Zangen, Meißel, Hämmer, Schraubendreher und Schraubenzieher. Zur Vereinfachung werden mechanisierte Werkzeuge wie z.B. Druckluft- und Akkuschauber verwendet. Als Spannvorrichtung wird in vielen Fällen der konventionelle Schraubstock genutzt. Produktspezifische Betriebsmittel existieren derzeit nur in wenigen Ausnahmefällen.

Bei Festlegung der zu erreichenden Demontagetiefe für die Geräte wird, aufgrund der zur Zeit üblichen kostenintensiven manuellen Demontageverrichtungen, eine geringe Zerlegetiefe favorisiert. Grundsätzlich wird jedoch die Mindestzerlegetiefe durch die Anforderungen der Schadstoffentfrachtung bestimmt /35/.

Hinsichtlich der wirtschaftlichen Demontage stellen Kleingeräte - trotz der darin potentiell vorhandenen Wert- oder Gefahrstoffe - ein besonderes Problemfeld dar. Da die Kosten und Erlöse für nachfolgende Aufbereitungs- und Beseitigungsprozesse massebezogen berechnet werden, fallen die benötigten Demontagezeiten bei kleinen, leichten Geräten besonders stark ins Gewicht. In Bild 10 sind verschiedene Geräte und die jeweils in der Praxis erforderliche Arbeitszeit zur Demontage von jeweils 800 kg dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, daß Telefonendgeräte zwar relativ einfach zu demontieren sind, sich im gewichtsbezogenen Vergleich zu anderen Geräten jedoch wesent-

lich höhere Demontagezeiten und -kosten ergeben. Deshalb ist insbesondere die Demontage kleinerer Geräte als Schwachstelle der bisherigen Prozeßketten zu sehen.

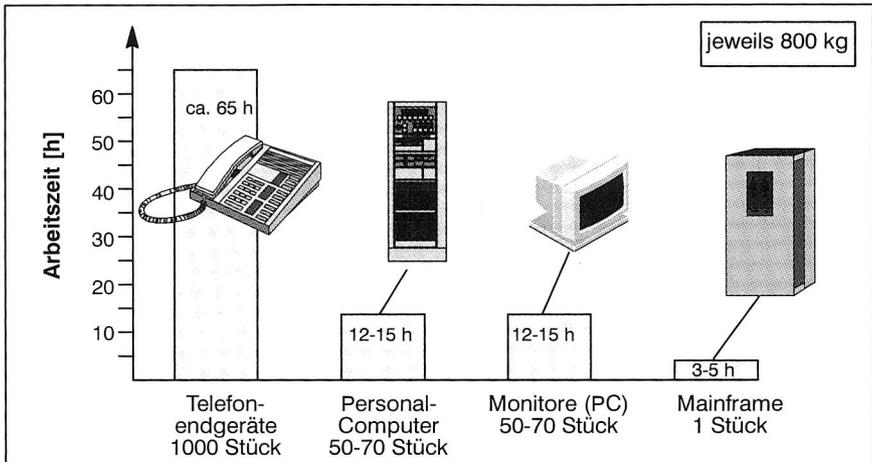


Bild 10: Gewichtsbezogener Vergleich der in der Praxis erforderlichen Demontagezeiten für verschiedene Geräte /139/

### 2.3.2 Vorgehensweise beim Recycling von Altfautos

Neben der Verwertung von Elektronikschrott ist die Entsorgung der anfallenden Altfautos ein weiteres, bedeutendes Problemfeld des Recyclings. Analog zu den zunehmenden Kfz-Zulassungen ist die Zahl der anfallenden Altfahrzeuge in den letzten Jahren stark angestiegen (Bild 11). Neben der Verwertung der Altfahrzeuge in den ca. 5000 inländischen Verwertungsbetrieben findet in zunehmendem Maße ein Export von Autowracks (ca. 30-40%) in Länder mit geringeren gesetzlichen Umweltauflagen statt /27/. Die Materialzusammensetzung für Altfahrzeuge und zukünftige Trends sind ebenfalls in Bild 11 dargestellt. Es fällt auf, daß der Kunststoffanteil steigt, während der Metallanteil sinkt.

Die derzeitige Entsorgung von Altfautos ist vorwiegend auf die Verwertung von Metallen abgestimmt (Bild 12). Zunächst erfolgt teilweise eine Entnahme der Betriebsstoffe (Trockenlegung). Danach werden Bauteile die hauptsächlich für die Wiederverwendung bestimmt sind (Ersatzteile, Reifen, etc.) demontiert. Die so vorbehandelten Wracks werden vorwiegend mit Shreddern zerkleinert und in eine Schrottfraktion, eine Schwerfraktion (vorw. NE-Metalle) und in die Shredderleichtfraktion getrennt /27/.

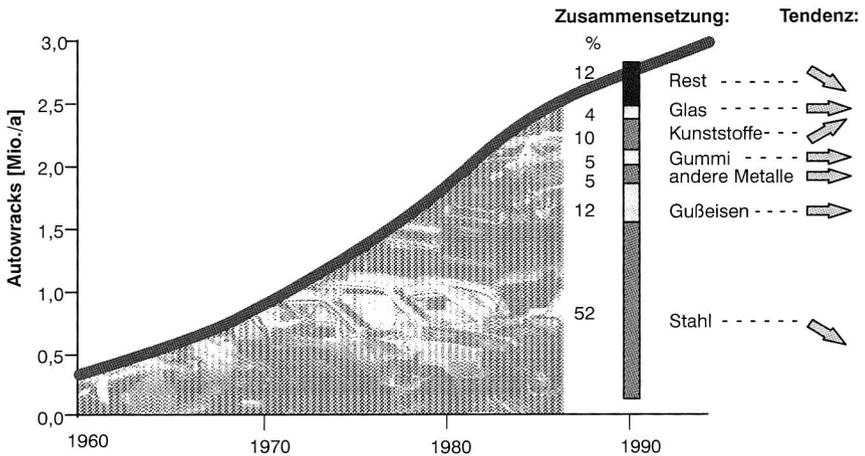


Bild 11: Aufkommen und Zusammensetzung von Autowracks (nach /67/, /113/)

Während die Metallfraktionen sehr gut wiederverwertbar sind, stellt die Behandlung der Shredderleichtfraktion - derzeit ca. 25% des aufgegebenen Shreddergutes - eines der Hauptprobleme beim Altag recycling dar. Sie besteht vorwiegend aus Kunststoffen (Thermo- und Duroplaste), Elastomeren, Glas und nicht abgetrennten Metallbestandteilen, die vielfach mit Resten von Betriebs- und anderen Schadstoffen (z.B. Blei, PCB) versetzt sind. Diese Shredderrückstände (derzeit ca. 600000 t/a /113/) müssen aufgrund des Schadstoffgehaltes kostenintensiv behandelt und/oder deponiert werden.

Aufgrund der Tendenz zum verstärkten Einsatz von Kunststoffen in der Automobilindustrie wird sich diese Problematik in Zukunft ohne Änderung der Entsorgungsprozeßkette verstärken /26/. Deshalb ist ein wesentliches Optimierungspotential bei der Altagverwertung in der Verringerung und in der Schadstoffentfrachtung der Shredderleichtfraktion zu sehen. Hierzu muß neben der Trockenlegung der Fahrzeuge vor allem die Demontagetiefe der Altfahrzeuge, insbesondere hinsichtlich der Entnahme von Schadstoffen, Glas- und Kunststoffteilen, erhöht werden /55/.

In Pilotdemontageanlagen werden deshalb Technologien zur Trockenlegung und Demontage optimiert um wirtschaftlichere Demontageverrichtungen zu erhalten. Ein Beispiel hierfür ist ein in /28/ vorgestelltes Glasentnahmegesetz, welches durch eine gezielt zerstörende Demontage der Türscheiben erhebliche Demontagezeitreduktionen ermöglicht.

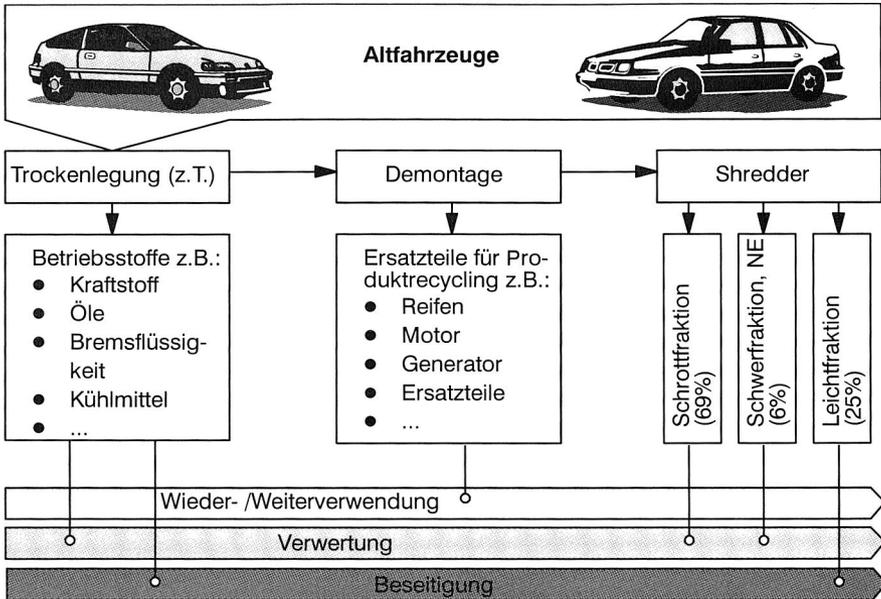


Bild 12: Verrichtungen und Materialströme bei der gegenwärtigen Altautoverwertung (nach /113/, /27/)

### 2.3.3 Resultierende Problemstellungen

Die aktuelle Demontage- und Recyclingpraxis ist, wie bei den Produktgruppen Elektronikgeräte und Altautos dargestellt, durch geringe Demontageumfänge und durch eine Priorisierung von Massenstromaufbereitungs- oder Beseitigungsverfahren gekennzeichnet. Einer ökonomisch und ökologisch effizienteren Vorgehensweise bei Demontage und Recycling stehen einige Probleme entgegen, die vor allem die *Gestaltung der anfallenden Produkte*, die *Demontageplanung* sowie die *Durchführung von Demontageverrichtungen* betreffen.

Einer der wichtigsten Aspekte in diesem Zusammenhang ist die meist mangelhafte Berücksichtigung von Demontage und Recycling bei der Gestaltung der aktuell anfallenden Produkte. Deshalb sind die Produkte z.T. nur mit hohen Demontageumfängen und somit kostenintensiv in recyclingrelevante Bauteile und materialkompatiblen Fraktionen zerlegbar.

Weitere Defizite der aktuellen Demontage- und Recyclingpraxis sind im Bereich der Planung zu sehen /19/. Im Gegensatz zur Montage liegt bei der Demontage zunächst das vollständige Produkt vor, welches in diejenigen Komponenten und Fraktionen zu zerlegen ist, die die höchste Wertschöpfung für das Recycling versprechen. Die Ermittlung der optimalen, wirtschaftlichsten Demontage- und Recyclingstrategie ist jedoch

keineswegs ein triviales Problem, da hierbei die gesamten Demontagealternativen hinsichtlich der potentiellen Wertschöpfung miteinander verglichen werden müssen. In der Praxis wird deshalb die optimale Demontagestrategie in der Regel lediglich aufgrund des Erfahrungswissens der Mitarbeiter und durch Schätzungen ermittelt. Der Umstand, daß in den Demontagebetrieben zumeist nur wenig Informationen über die eingesetzten Werkstoffe, die Produktstruktur und über die eingesetzten Verbindungstechniken eines Gerätes vorliegen, wirkt sich hierbei zusätzlich erschwerend aus.

Ein weiterer wesentlicher Grund für die hohen Demontagekosten und für die daraus resultierende z.T. geringe Recyclingqualität ist die mangelnde Effizienz der eingesetzten Demontagetechnologien. Die derzeit verfügbaren Technologien und Betriebsmittel sind selten konkret für die Demontage, sondern in der Regel für Montage oder Instandhaltung entwickelt worden. Die Randbedingungen der Montage oder der Instandhaltung weichen jedoch stark von denen der Demontage ab /15/. So ist beispielsweise bei der Demontage im Gegensatz zur Montage eine sehr große Produkt- und Variantenvielfalt zu bearbeiten. Dies ist zum einen durch die gestiegene Anzahl unterschiedlicher Geräte mit immer kürzeren Innovationszyklen bedingt. Andererseits ist der Zeitraum, in dem ein Gerät produziert und verkauft wird, wesentlich kürzer als der Zeitraum in dem dieses Gerät zur Entsorgung anfallen kann, wodurch die Vielfalt der zu bearbeitenden Geräte nochmals gesteigert wird /131/. Aufgrund dieses breiten Produktspektrums ist die Zahl der benötigten Demontageverrichtungen um ein Vielfaches höher als bei der Montage. Bei aktuellen Demontagetechnologien sind deshalb - mangels Flexibilität - vergleichsweise oft Werkzeugwechsel erforderlich, die sich sowohl auf die Demontagekosten als auch auf die Fehleranfälligkeit auswirken. Darüber hinaus weisen die konventionellen Demontagestrategien und -technologien häufig hohe Demontagezeiten auf, die oft eine wirtschaftliche Anwendung erschweren.

## 2.4 Rationalisierungspotentiale bei Recycling und Demontage

Wie bereits dargestellt, ist Gestaltung von Recycling- und Demontageprozeßketten neben den gesetzlichen Vorgaben auch ganz wesentlich von wirtschaftlichen Kriterien gekennzeichnet. In der Recyclingpraxis werden nur diejenigen Prozeßschritte durchgeführt, die gesetzlich vorgeschrieben oder hinsichtlich der Gesamtrecyclingkosten wirtschaftlich sind. Deshalb muß das wesentliche Optimierungsziel die Effizienzsteigerung bei Demontage und Recyclingverrichtungen sein, d. h. entweder Kostensenkungen bei gleicher Recyclingqualität oder eine gesteigerte Recyclingqualität bei gleichen Kosten. In Bild 13 ist die prinzipielle Zusammensetzung der Recyclingkosten dargestellt. Den mit zunehmenden Demontageumfängen steigenden Demontagekosten stehen die Kosten bzw. Erlöse der separierten Bauteile und Fraktionen gegenüber, wodurch sich bei einer bestimmten Demontagetiefe ein Kostenoptimum ergibt. Außerdem sind in Bild 13 verschiedene Rationalisierungspotentiale und deren tendenzielle Auswirkung auf die kostenoptimale Demontagetiefe dargestellt.

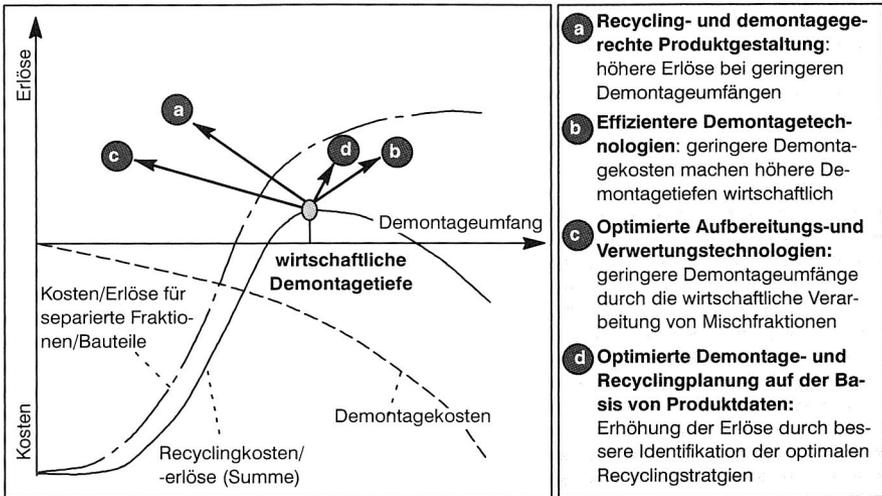


Bild 13: Tendenzielle Auswirkungen unterschiedlicher Optimierungspotentiale auf die Gesamtkosten des Recyclings und auf die wirtschaftliche Demontagetiefe

Die Art der Produktgestaltung hat einen ganz wesentlichen Einfluß auf die Demontage- und Recyclingfähigkeit eines Produktes. In der Konstruktionsphase wird der weitaus größte Teil der für die Recyclingphase relevanten Produkteigenschaften festgelegt /97/. Die Haupteinflußgrößen auf die Recyclinggerechtigkeit eines Produktes sind in der Werkstoffwahl für die Komponenten, in der Baustruktur und in der Wahl der Verbindungstechniken zu sehen /53/, /69/. Die Auswirkungen dieser Einflußgrößen werden in Kapitel 5.1 detaillierter erläutert. Durch eine optimierte Produktgestaltung werden, wie in Bild 13 (Strategie a) dargestellt, in der Regel die für optimale Recyclingstrategien erforderlichen Demontageumfänge reduziert und damit die potentiellen Recyclerlöse erhöht. Solche Maßnahmen werden demnach vorwiegend auf *zukünftige* Recyclingkonzepte bezüglich der Effizienz des Recyclings und einsetzbarer Recyclingtechnologien einen grundlegenden Einfluß haben.

Ein Rationalisierungspotential für das Recycling *aktueller und zukünftiger* Produkte besteht in der Optimierung der Demontagetechnologien (Bild 13, b). Dazu existieren etliche Potentiale, um diese effizienter und an die Erfordernisse des Recyclings angepaßter zu gestalten. Dies gilt zunächst für manuelle Demontageverrichtungen, bei denen beispielsweise die gezielte Nutzung (teil-) zerstörender Prozesse eine wesentliche Reduktion des Demontageaufwands bedeuten kann. Weiterhin ist es denkbar zur Reduktion der Lohnkosten (teil-) automatisierte Demontagelösungen zu entwickeln. Die Optimierung der Demontagetechnologien verschiebt demnach die kostenoptimale Demontagetiefe hin zu größeren Demontageumfängen.

Alternativ zu der Optimierung von Demontagetechnologien gibt es auch Anstrengungen die Aufbereitungsverfahren weiter zu entwickeln, so daß auch nicht demontierte

Mischfraktionen kostengünstig verarbeitet werden können (Bild 13, c). Die Demontage schadstoffhaltiger Bauteil wird durch solche Maßnahmen jedoch nicht zu ersetzen sein.

Ein weiterer Ansatz zur Effizienzsteigerung bei Demontage und Recycling ist die optimierte Bestimmung der wirtschaftlichen Demontage- und Recyclingstrategien für Produkte und deren Komponenten. In diesem Zusammenhang spielen einerseits Methoden zu deren Ermittlung, andererseits auch die Verfügbarkeit der benötigten Produktinformationen (z.B. Werkstoff, Verbindungsarten etc.) eine wesentliche Rolle. Durch einer optimierten Demontage- und Recyclingplanung auf der Basis von verfügbaren Produktdaten werden die Recyclingpotentiale der einzelnen Baugruppen besser identifiziert, wodurch höhere Erlöse bei tendenziell geringfügig höheren Demontageaufwänden zu erwarten sind (Bild 13, d).

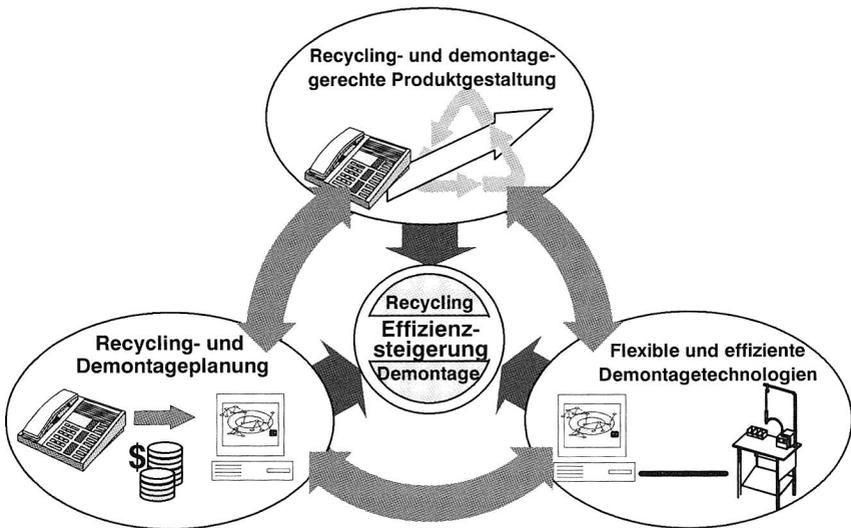


Bild 14: Integrierter Ansatz zur Effizienzsteigerung von Demontage und Recycling aktueller und zukünftiger Produkte

Aufgrund der dargestellten elementaren Rationalisierungspotentialen ist es die Zielsetzung dieser Arbeit, die Nutzung der aufgezeigten demontagebezogenen Potentiale in einem integrierten Ansatz zu unterstützen (Bild 14). Als Grundlage zur optimierten Durchführung von Demontageverrichtungen aktueller und zukünftiger Produkte werden zunächst Entwicklungspotentiale für alternative, effiziente Demontagemethoden definiert (Kapitel 3), aus welchen dann innovative Werkzeugkonzepte abgeleitet werden (Kapitel 4). Auf der Basis einer geeigneten Abbildung der recyclingrelevanten Eigenschaften von Produkten wird ein Konzept zur recyclingorientierten Produktanalyse vorgestellt (Kapitel 5). Diese Methodik, welche auf einer Recycling- und Demontagesimula-

tion (Kapitel 6) beruht, ist sowohl für die Demontageplanung als auch als Ausgangspunkt für eine rechnerunterstützte Optimierung der Produktgestaltung (Kapitel 7) einsetzbar.

Darüber hinaus ist das optimale Zusammenwirken der dargestellten Bereiche von wesentlicher Bedeutung. So müssen bei der recyclinggerechten Produktgestaltung sowohl die Möglichkeiten neuer Demontagetechnologien als auch die Rahmenbedingungen aktueller Recyclingkonzepte berücksichtigt werden. Gleichmaßen werden bei der Demontageplanung die Produktdaten und Vorgaben, welche bei der Produktgestaltung definiert wurden, sowie Informationen über alternative Demontagetechnologien benötigt. Bei der Entwicklung neuer Demontagetechnologien müssen neuartige Produktkonzepte mit veränderten Demontageeigenschaften und veränderten Rahmenbedingungen hinsichtlich der Recyclingprozesse berücksichtigt werden.

## **3 Entwicklungspotentiale zur Optimierung von Demontagevorgängen**

Ziel dieses Kapitels ist es, die Grundlagen und Schwerpunkte zur Optimierung von Demontagevorgängen aufzuzeigen. Dazu werden zunächst wichtige Forschungsansätze in diesem Bereich dargestellt und aktuelle Defizite ermittelt. Für die Entwicklung neuer Demontagelösungen bilden die Anforderungen an die Technologien und die recyclingspezifischen Freiheitsgrade einen grundlegenden Rahmen. Auf der Basis einer systematischen Analyse dieser Randbedingungen werden alternative Potentiale für optimierte Demontagevorgänge abgeleitet und strukturiert.

### **3.1 Stand der Forschung**

Zur Unterstützung und Optimierung der Demontage werden bereits verschiedene Forschungsaktivitäten in der Literatur beschrieben. Es existieren einerseits Ansätze zur Entwicklung von flexiblen Systemkomponenten für die Durchführung von einzelnen oder mehreren Demontageprozessen. Andererseits wurden auch spezielle Anlagen zur Demontage von Produkten oder Baugruppen mit gleichen oder ähnlichen Eigenschaften entwickelt. Die wichtigsten Entwicklungen in diesen Bereichen sind nachfolgend dargestellt.

#### **Werkzeuge und Systemkomponenten für die Demontage**

Im Rahmen des Sonderforschungsbereiches 281 "Demontagefabriken" werden Demontagesysteme und Demontagebetriebsmittel entwickelt /71/, /82/. Ein Bereich beschäftigt sich mit der Konstruktion eines flexiblen Spannsystems für Waschmaschinen. Aufbauend auf einem morphologischen Ordnungsschema für Spannprinzipien wurden einige flexible Spannkonzeppte für unterschiedliche Produktmerkmale und -abmessungen erarbeitet. Beispielhaft sei ein Spannwerkzeug nach dem Abform-Prinzip genannt. Bei diesem System werden eine Vielzahl hydraulischer Kolben in den Bohrungen eines Zylinderblocks geführt. Die Kolben passen sich durch Verschieben an die Geometrie des Werkstücks an und können dann gemeinsam mit dem Spanndruck beaufschlagt werden. Das System eignet sich gut für das Spannen kleiner freigeformter und robuster Baugruppen /82/.

Im Rahmen eines weiteren Teilprojektes wurden von Seliger /118/ und Wagner /132/, /133/ Endeffektoren für die Demontage entwickelt. Diese sind so gestaltet, daß Wirkflächen zum Einleiten der Kräfte bei dem Demontagevorgang geschaffen werden. Mittels eines mathematischen Prozeßmodells wird das impulsartige Einbringen keilförmiger Wirkkörper in Werkstücke beschrieben. Als Beispiel wurde ein Entschraubwerkzeug (Bild 15) realisiert, welches durch einen Stoß Schneiden in Schrauben einbringt und durch eine fast zeitgleiche Drehbewegung ein Drehmoment überträgt. Mit dem Prototypen dieses Entschraubsystems konnten in Versuchen 45% der untersuchten mit Nennmoment angezogene Schrauben (Innensechskant-, Schlitz- und Außensechskant-

schrauben der Größen M4, M6, M8) mit dem ersten Schlag, und weitere mit Folgeschlägen gelöst werden.

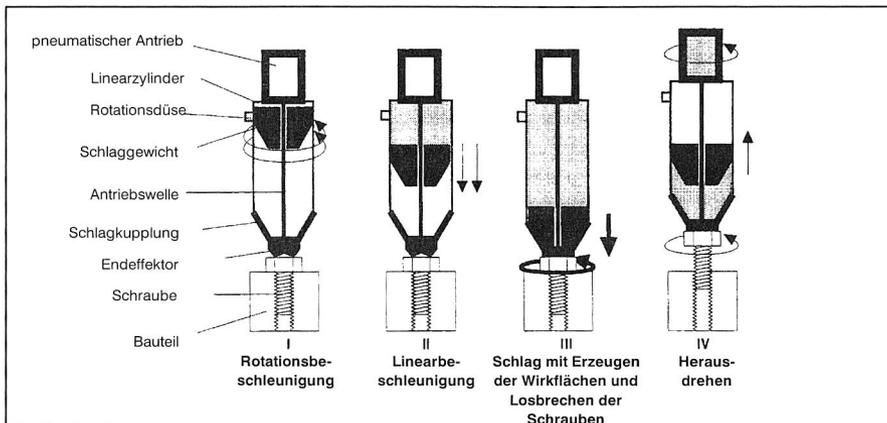


Bild 15: Funktionsfolge eines prototypischen Entschraubwerkzeugs mit geometrieunabhängigem Endeffektor [82]

Spur et. al. beschäftigen sich, ebenfalls im Sonderforschungsbereich 281 mit dem Trennen unlösbarer Verbindungen [82]. Hierzu wurden Konzepte zum Einsatz des Wasserstrahlschneidens sowie zum Trennen punktförmiger Verbindungen unter Einsatz eines Schneidstempels, welcher mit einem Bolzensetzgerät betrieben wird, erstellt.

In [86] werden produkt- und prozeßneutrale Betriebsmittel, die für häufige Kombinationen von elementaren Grundprozessen von Montage und Demontage konzipiert wurden, entwickelt. Diese sogenannten Micros werden erst durch produktspezifische Wirkkörper an die jeweiligen Anforderungen angepaßt und sind daher sehr flexibel einsetzbar [101]. Bisher wurden ein lineares, ein linear - rotatorisches und ein Feinpositioniermicro realisiert.

Ein einfacher Wirkkörper zum flexiblen Abheben von Kunststoffgehäusen wird in [8] vorgestellt. Die sogenannte Bohrschraube schraubt sich in den Kunststoff und nützt die Gewindegänge zum Übertragen der Kräfte auf das Gehäuse [101].

### Entwicklung von automatisierten Demontageanlagen

Für Baugruppen und Produkte, die einen gleichen oder ähnlichen Aufbau aufweisen und damit gleiche oder ähnliche Demontagekonzepte erfordern, existieren einige Ansätze diese Gemeinsamkeiten zu nutzen und in entsprechenden Demontageanlagen umzusetzen.

Ein Anwendungsfeld für die Entwicklung solcher Demontageanlagen ist die Entstückung elektronischer Flachbaugruppen.

Bei der von Scheller /110/, /21/ vorgestellten Demontageanlage wird die Menge aller zu bearbeitenden Leiterplatten in zwei Ströme aufgeteilt, die entweder nur simultan oder erst selektiv und dann simultan bearbeitet werden. In der selektiven Demontageeinheit wird als erster Prozeßschritt die Identifikation hochwertiger Bauelemente durchgeführt. Diese werden durch spezielle Vakuumgreifer mit integrierten Heißgasdüsen entstückt. Das simultane Demontagemodul hat hingegen die Aufgabe, die Leiterplatte vollständig zu entstücken. Dazu werden flächig wirkende Wärmequellen, die auf beiden Seiten der Flachbaugruppe angeordnet sein können, eingesetzt. Die Bauelemente werden beim Erreichen der Schmelztemperatur des Lotes mittels der Einbringung von Vibrationen und durch Bürstprozesse simultan entstückt. Die unbeschädigt entstückten Bauelemente werden mit Hilfe von Transportbändern aus der Entlötzzone entfernt, vereinzelt, identifiziert und entsprechend ihrer Materialklassenzugehörigkeit sortiert.

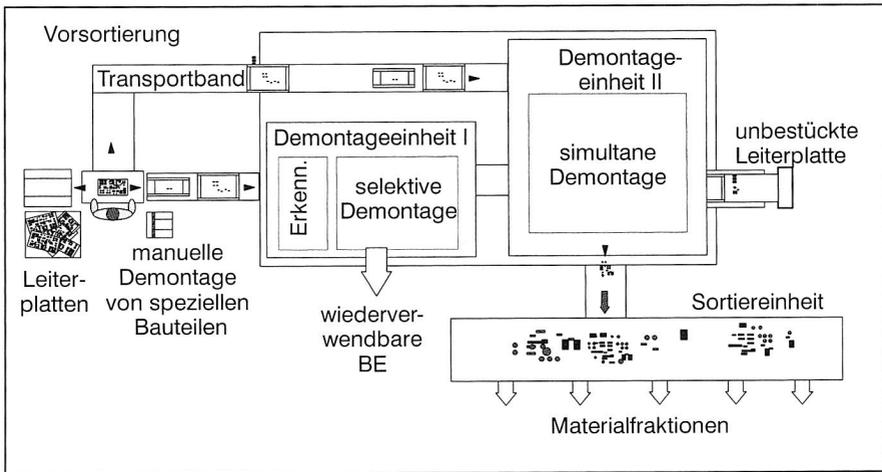


Bild 16: Konzept einer automatisierten Anlage zur Entstückung von Leiterplatten /22/

Ein ähnlicher Ansatz zur Demontage von elektronischen Baugruppen, der ebenfalls auf einer selektiven und simultanen Demontageeinheit beruht, wird von Hessellbach et al. /34/, /24/, /116/ vorgeschlagen. Hierbei wird die simultane Entstückung durch Abscheiden der Bauelemente von der Leiterplatte durchgeführt.

Möller /65/ entwickelte ebenfalls ein System zur selektiven Demontage von Leiterplatten das mit einem Industrieroboter, der über ein flexibles Greifsystem verfügt, unterschiedliche elektronische Bauelemente zerstörungsfrei demontieren kann. Das Konzept beruht auf einer zweistufigen Bildverarbeitung, die auch Detailaufnahmen zur Schrifterkennung ermöglicht.

Zur Demontage von Fernsprechengeräten wurde von Kahmeyer /46/ eine Demontagezelle entwickelt, welche nach einer entsprechenden Umrüstung verschiedene Telefone

zerlegen kann. Die Anlage verfügt über unterschiedliche Demontagewerkzeuge (z. B. ein Fräswerkzeug, ein Entschraubsystem oder ein Greifsystem) die über ein Werkzeugwechselsystem eingesetzt werden können. Die Zelle wird von einem Zellenrechner unter Nutzung von Sensordaten angesteuert und ist dadurch in der Lage, Telefone eines bestimmten Typs in jeweils 90 Sekunden zu zerlegen.

Der Aufbau einer Roboterzelle zur zerstörungsfreien Demontage wird in /137/ exemplarisch am Beispiel der Zerlegung eines Camcorders vorgestellt. Ein Schwerpunkt ist dabei die Entwicklung von Steuerstrategien für die Roboter, welche flexibel auf Sensorinformationen reagieren und entsprechende Demontageaktionen einleiten /138/.

Auch zur automatisierten Demontage von Bildschirmgeräten existieren verschiedene Ansätze. Hucht et. al. /40/ beschreiben eine Demontagezelle, welche auf der Basis gespeicherter Produktdaten und entsprechender Roboterprogramme verschiedene Fernsehgeräte in 9 bis 15 Minuten bis zur Entnahme der Bildröhre zerlegen kann. Es kommen hierbei verschieden konventionelle Werkzeuge zum Einsatz, welche durch ein Werkzeugwechselsystem bereitgestellt werden.

Ein vorwiegend auf Sensordaten beruhendes Konzept für ein Demontagesystem wird von Ebach /9/, /74/ vorgestellt. Das Verfahren basiert auf einem 3-dimensionalen Mustererkennungssystem, das die demontagerelevanten Teile und Baugruppen des Bildschirmgerätes erkennen soll und aufgrund der gewonnenen Informationen die Wahl des Demontageablaufs und der Demontagewerkzeuge trifft. Diese Daten werden an Roboter, die die Demontage mit konventionellen Werkzeugen durchführen, weitergeleitet.

Tritsch /131/ entwickelte ebenfalls am Beispiel des Fernsehgerätes flexible Systemkomponenten für automatisierte Demontagesysteme. Die Kernstück der resultierenden Demontagezelle ist ein Multifunktionswerkzeug mit integriertem Werkzeugwechselsystem (Bild 17), welches einen Zangengreifer, einen Sauggreifer sowie ein Schraubmodul beinhaltet. Das Werkzeug wird zusätzlich durch eine integrierte CCD-Kamera unterstützt. Eine spezielle modulare makrobasierte Roboterprogrammierung ermöglicht eine schnelle Umprogrammierung der Demontagezelle /124/.

Um die Flexibilität der automatisierten Demontage weiter zu erhöhen setzte Klimmek /47/ ein, in eine Roboterzelle integriertes, frei bewegliches Wasserstrahlwerkzeug ein. Der Vorteil dieses Ansatzes zur (teil-) zerstörenden Demontage liegt in der großen Bandbreite der bearbeitbaren Werkstoffe und Produkte. Deshalb kann das Verfahren sowohl für die Zerstörung von Bauteilen (z. B. Schneiden von 2 mm Stahlblech mit einem, Vorschub von bis zu ca. 10 mm/s) als auch für die gezielte Zerstörung von Verbindungen (z.B. Schneiden einer Schraube der Größe M5 in 18 s) eingesetzt werden. Nachteilig wirken sich hierbei jedoch die hohen Investitionskosten der Anlage sowie die Problematik des Bedienerschutzes aus.

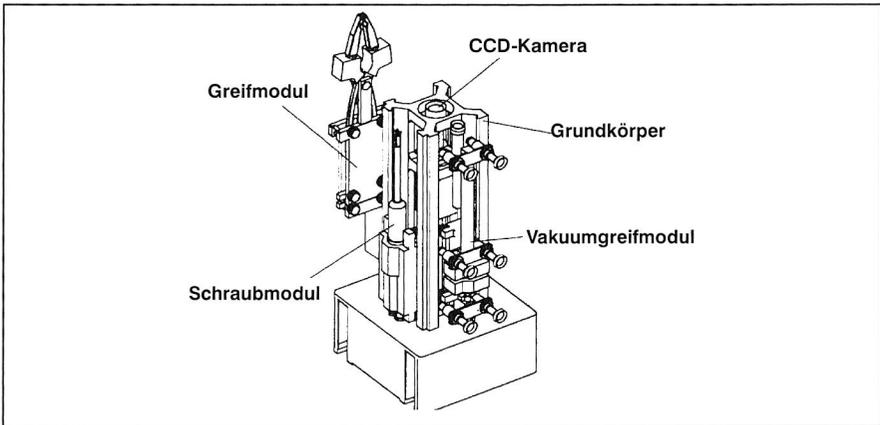


Bild 17: Multifunktionswerkzeug mit integrierter CCD Kamera [131/

Ein Ansatz für eine Anlage zur Automobildemontage wurde von Warnecke et. al. [134/, /107/ vorgestellt. Die Zielsetzung der Anlage ist die automatisierte Demontage des Fahrzeugdaches um eine verbesserte Zugänglichkeit zu den Komponenten des Innenraums (Fahrzeugsitze, etc.) zu ermöglichen. Hierfür wurden Werkzeuge und Systeme zum Erkennen und Durchtrennen der Fahrzeugsäulen sowie zum Herauslösen der Fensterscheiben entwickelt.

### Zusammenfassende Bewertung der Forschungsaktivitäten

Auf der Grundlage der beschriebenen Arbeiten kann festgestellt werden, daß eine Vielzahl von Ansätzen zur Optimierung von Demontagevorgängen besteht. Ein Großteil der Aktivitäten konzentriert sich auf die Entwicklung von automatisierten Demontagezellen, die zumeist auf modifizierten konventionellen Werkzeugen und Verfahren beruhen. In vielen Fällen wird versucht, aus der Montagetechnik bekannte Automatisierungsansätze auf die Demontage zu übertragen. Dabei werden im allgemeinen nur Aufgaben mit konkret definierten Rahmenbedingungen und eingeschränktem Produktspektrum behandelt, so daß die tatsächliche Produkt- und Variantenvielfalt der Demontagepraxis große Probleme bereitet. Andere Ansätze, die auf neuen Technologien wie z. B. dem Wasserstrahlschneiden beruhen und flexibler einsetzbar sind, weisen hinsichtlich der Arbeitssicherheit Defizite auf und sind mit hohen Investitionskosten verbunden.

Bei der Entwicklung von Demotagewerkzeugen und Betriebsmitteln, welche neben der automatisierten Demontage auch für optimierte manuelle Tätigkeiten unter Nutzung der Flexibilität des Menschen einsetzbar sind, existieren einige wenige Ansätze, welche in ihrer Gesamtheit jedoch dem Entwicklungs- und Optimierungspotential in diesem Bereich nicht gerecht werden.

### 3.2 Grundlegender Rahmen für die Entwicklung neuer Demonte-technologien

Das wesentliche Ziel der Demontage ist die kostengünstige, schnelle und effiziente Separierung unterschiedlicher Stoffe oder Bauteile. Das Kernelement von Demontagekonzepten ist die jeweils angewendete Demontagemethode und die Art ihrer Umsetzung in ein Demontageverfahren und -werkzeuge. Es können dabei zwei wesentliche Kriterien für die Beurteilung der Effizienz von Demontageverfahren identifiziert werden: Die *Verfahrensdauer* zur Durchführung der einzelnen Demontageschritte ist eine wichtige Komponente der Gesamtdemontagezeit des Produktes. Der zweite entscheidende Faktor, der die Nebenzeiten der Demontage bestimmt, ist die *Flexibilität* der eingesetzten Verfahren und Prozesse. Durch eine hohe Flexibilität werden einerseits zeitaufwendige Umrüstprozesse, beispielsweise bei der Demontage unterschiedlicher Produkte oder Verbindungselemente, vermieden. Andererseits wird, angesichts der z. T. unsicheren Produktzustände (Korrosion, Verschmutzung, etc.) die Fehleranfälligkeit der Demontageverrichtungen reduziert.

In der Regel kann die Demontage mit verschiedenem Automatisierungsgrad durchgeführt werden. Abhängig davon sind bei aktuellen Ansätzen unterschiedliche Tendenzen bezüglich der Parameter Verfahrensdauer und Flexibilität zu erkennen (Bild 18).

Bei der manuellen Demontage kann der Werker verschiedene Demontageanforderungen schnell erfassen und flexibel, z. B. durch einen Wechsel des Werkzeuges, umsetzen. Die hierfür erforderlichen Rüstzeiten sind dabei vergleichsweise gering. Nachteilig wirken sich jedoch die teilweise langen Hauptzeiten zur Durchführung der Demontageverrichtungen aus. Deshalb werden z. T. zerstörende Werkzeuge eingesetzt, die eine Verkürzung der Demontagezeit bewirken können. Diese Werkzeuge sind jedoch zu meist nicht für die Demontage konzipiert und schöpfen deshalb, bei einem teilweise unnötig hohen Zerstörungsgrad, das mögliche Effizienzpotential nicht voll aus.

Ein Bindeglied zwischen manueller und automatisierter Demontage stellt sowohl die mechanisierte als auch die teilautomatisierte Demontage dar. Deren Spektrum reicht von der Nutzung angetriebener Betriebsmittel bis zu teilautomatisierten Lösungen, wobei die Übergänge fließend sind. Oft werden hierzu manuelle Verfahren mit entsprechenden Betriebsmitteln unterstützt, wodurch in vielen Fällen jedoch die Flexibilität reduziert wird.

Bei automatisierten Lösungen können gegenüber der manuellen Demontage zwar einzelne Demontageschritte für sich beschleunigt werden, meist ist jedoch die Flexibilität der Systeme stark begrenzt /4/, so daß erhebliche Nebenzeiten in Kauf genommen werden müssen. Die Einschränkung der Flexibilität beruht einerseits darauf, daß für verschiedene Demontageprozesse unterschiedliche Werkzeuge eingesetzt und somit auch bereitgestellt und gewechselt werden müssen. Andererseits bestehen bei automatisierten Lösungen auch Flexibilitätsgrenzen aufgrund der zum Teil umfangreichen Produktdaten, die zur Ableitung der richtigen Demontagestrategien und -prozesse erforderlich, jedoch in der Regel kaum verfügbar sind. In aktuellen Forschungsansätzen

wird zumeist versucht, diese Problematik durch Benutzereingaben, Sensorik oder durch die Nutzung gespeicherter Produktdaten zu lösen. Dabei wird jedoch oft übersehen, daß die Art und der Umfang der benötigten Daten in großem Maße von den eingesetzten Demontagemethoden und -werkzeugen abhängt. Je flexibler diese gestaltet sind, desto robuster sind die Demontageprozesse gegenüber wechselnden oder unsicheren Randbedingungen und desto weniger Produktdaten werden benötigt.

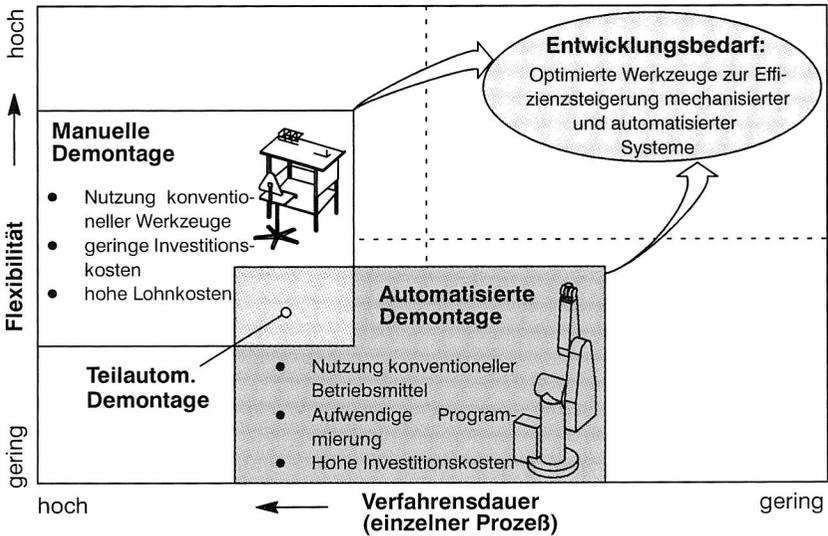


Bild 18: Klassifizierung unterschiedlicher Möglichkeiten der Demontage und Ableitung des Entwicklungsbedarfs

Zusammenfassend kann deshalb festgestellt werden, daß eine Effizienzsteigerung in der Demontage nicht ohne weiteres durch eine Automatisierung konventioneller Demontagemethoden zu erreichen ist, da dabei die Vorteile einer kürzeren Verfahrensdauer durch eine stark eingeschränkte Flexibilität teilweise aufgehoben werden. Vielmehr muß als erster Schritt bei der Optimierung von Demontagevorgängen die Entwicklung neuer Methoden und Werkzeuge stehen, die sich sowohl durch eine erhöhte Flexibilität als auch durch eine verkürzte Verfahrensdauern auszeichnen. Zur Optimierung von Demontagevorgängen wurde deshalb im Rahmen dieser Arbeit der Schwerpunkt auf die Entwicklung von effizienten Demontagewerkzeugen gelegt.

Abgesehen von den grundsätzlichen Forderungen nach hoher Flexibilität und geringen Demontagezeiten, ergeben sich für die zu entwickelnden Demontagewerkzeuge weitere Anforderungen und Potentiale. Diese beziehen sich auf das allgemeine Umfeld bei Recycling und Demontage, auf die vorgesehene Recyclingform sowie auf die durchzuführende Demontageaufgabe.

Weitere *allgemeine Anforderungen* an neue Demontagewerkzeuge sind:

- Fehlertoleranz: Abgesehen von der anzustrebenden Fehlertoleranz durch Flexibilität sollten die Werkzeuge zusätzlich eine Fehlertoleranz bezüglich der Durchführung einzelner Prozesse aufweisen.
- Geringe Betriebsmittelkosten bzw. geringe Maschinenstundensätze.
- Kleine und kompakte Bauform: Die Anwendbarkeit des Demontagewerkzeugs muß auch bei schwieriger Zugänglichkeit noch gewährleistet sein.
- Robustheit: In der Demontage müssen Verschmutzungen und starke Beanspruchungen der Betriebsmittel berücksichtigt werden.

Die *recyclingformbezogenen Anforderungen* und Freiheitsgrade für Demontageverfahren ergeben sich aus den Mindestforderungen der verschiedenen Recyclingformen an den Zustand der zugeführten Bauteile oder Fraktionen.

Komponenten, die einer Wiederverwendung zugeführt werden sollen, müssen zerstörungsfrei demontiert werden, um ihre Funktionsfähigkeit nicht zu beeinträchtigen. Dabei können zerstörende Prozesse nur zur Erhöhung der Zugänglichkeit eingesetzt werden.

Bei Bauteilen oder Baugruppen die zum Zwecke des Materialrecyclings - im Sinne einer Wieder- oder Weiterverwertung - entnommen werden, spielt die Produktgestalt keine wesentliche Rolle für den Recyclingprozeß. Hier kommt es vor allem darauf an, schnell und effizient die Kompatibilität der Bauteilfraktion zum nachfolgenden Recyclingprozeß herzustellen, indem alle Bauteile mit inkompatiblen Stoffen aus der entsprechenden Baugruppe entfernt werden. Dabei können ohne weiteres zerstörende Verfahren eingesetzt werden.

Werden Demontageverfahren lediglich zur Schadstoffentfrachtung eines Produktes oder einer Baugruppe eingesetzt, so können zerstörende Verfahren vor allem zur Herstellung der Zugänglichkeit zu den relevanten Bauteilen genutzt werden. Bei der Entnahme der Bauteile muß jedoch darauf geachtet werden, daß das schadstoffhaltige Bauteil nicht zerstört wird, um den Schadstoff nicht mit dem restlichen Produkt zu vermischen oder freizusetzen (z. B. Demontage PCB -haltiger Kondensatoren).

Weiterhin existieren spezifische Anforderungen und Freiräume, die aus der jeweils *vorliegenden Demontageaufgabe* (z. B. Lösen von Schraubverbindungen) resultieren. Diese werden bei der Entwicklung entsprechender Technologien hergeleitet.

### 3.3 Lösungsräume für effiziente Demontagewerkzeuge

Wie bereits in Kapitel 2 hergeleitet, unterscheiden sich die Rahmenbedingungen bei der Demontage deutlich von denen der Montage und der Instandsetzung. Deshalb ist es sinnvoll zunächst von einer Weiterentwicklung und Anpassung konventioneller Montagewerkzeuge abzusehen und gezielt neue, demontagespezifische Lösungen zu suchen.

Grundsätzlich kann bei der Entwicklung neuer Ansätze und Ideen durch eine Definition der vorhandenen Potentiale und der Randbedingungen systematisch ein Rahmen für die potentiellen Lösungen geschaffen werden. Darauf aufbauend können dann, vorwiegend durch Kreativität und auf der Basis von Erfahrung, innovative Lösungen gefunden werden /126/.

Im folgenden werden deshalb potentielle Lösungsräume durch die Spezifizierung von Entwicklungspotentialen als systematischer Rahmen für die Entwicklung neuer Demontagewerkzeuge ermittelt. Die Entwicklung neuer Demontagelösungen ist dann Inhalt des Kapitels 4.

### 3.3.1 Allgemeine Entwicklungspotentiale für Demontagewerkzeuge

Aufgrund der in Kapitel 3.2 definierten Anforderungen und Freiheitsgrade für neue Demontagewerkzeuge können zerstörende Prozesse bei den meisten Problemstellungen der Demontage eingesetzt werden. Hierbei ist jedoch ein - an die Problemstellung angepaßter - möglichst geringer Zerstörungsgrad anzustreben, um durch Vermeidung von Vermischungen eine hinreichende Material- und Bauteiltrennung zu gewährleisten.

Durch den gezielten Einsatz zerstörender Prozesse ist es grundsätzlich möglich, erhebliche Verkürzungen der Verfahrensdauer und eine wesentliche Steigerung der Flexibilität neuer Demontagetechnologien zu erreichen. Da das große Entwicklungspotential in diesem Bereich durch den Stand von Forschung und Technik nur unzureichend erschlossen ist, ergibt sich hier ein wichtiger Suchraum für spezifische Demontagewerkzeuge mit optimierten Eigenschaften.

Weitere allgemeine Entwicklungspotentiale und Lösungsräume für innovative Demontagewerkzeuge lassen sich durch eine Klassifizierung und Strukturierung von Flexibilitätspotentialen im Umfeld der Demontage ableiten. Wie in Bild 19 dargestellt, werden im Rahmen dieser Arbeit, entsprechend dem Wirkungsbereich, jeweils Flexibilitätspotentiale hinsichtlich Demontageaufgaben, Demontagelösungen und Prozessen unterschieden.

Aufgrund der großen Vielfalt an Produkten, Varianten und eingesetzten Verbindungsarten existieren entsprechend viele unterschiedliche Demontageaufgaben. Falls mehrere unterschiedliche Demontageaufgaben (z. B. die Demontage von Schraub-, Schnapp- und Nietverbindungen) mit dem gleichen Werkzeug gelöst werden können, liegt eine *demontageaufgabenbezogene Flexibilität* vor.

Für jede der Demontageaufgaben existieren jeweils verschiedene Demontagelösungen, um das gewünschte Ergebnis zu erreichen. So ist es beispielsweise möglich, Schraubverbindungen unter anderem durch Abschrauben, Aufbohren oder Kernbohren zu lösen. Falls zwei oder mehr Alternativen der potentiellen Demontagemöglichkeiten für eine Demontageaufgabe mit einem Werkzeug genutzt werden können, handelt es sich um eine *demontagelösungsbezogene Flexibilität*. Für den Fall, daß eine vorgesehene Demontagelösung unerwarteterweise nicht durchgeführt werden kann (z. B. Aufschrau-

ben bei Korrosion), ist es somit möglich mit dem gleichen Werkzeug auf eine alternative Lösung auszuweichen.

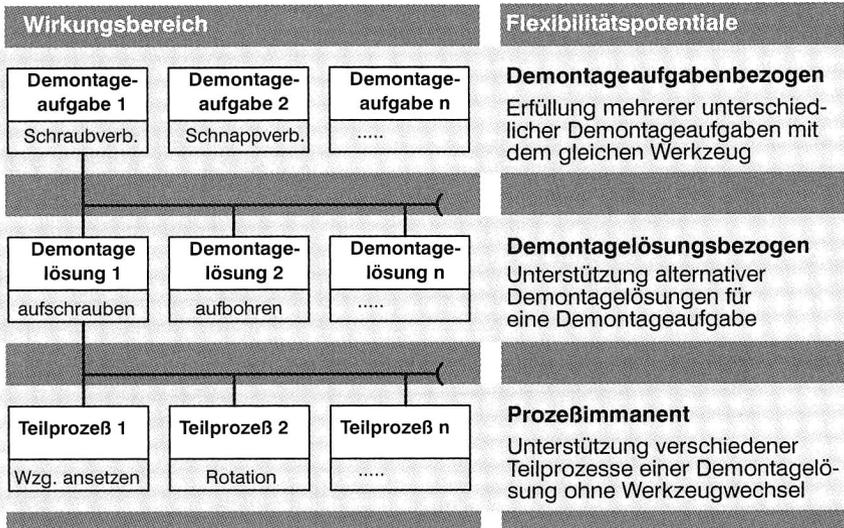


Bild 19: Flexibilitätspotentiale für unterschiedliche Wirkungsbereiche zur Entwicklung von Demotagewerkzeugen

Darüber hinaus existieren bei der Demontage *prozeßimmanente Flexibilitätspotentiale*, welche sich auf den optimierten Prozeßablauf jeweils innerhalb einer Demontagelösung beziehen. Die Spezifizierung dieser prozeßimmanenten Potentiale erfordert eine detaillierte Betrachtung der Funktionsstruktur von Demontageprozessen und wird deshalb im Kapitel 3.3.2 separat betrachtet.

Die in Bild 19 dargestellten Möglichkeiten der Flexibilität können von Demontagetechnologien einzeln oder sich überschneidend genutzt werden. Dabei kann sich eine Erhöhung der Flexibilität in einem Bereich durchaus auch auf andere Bereiche vorteilhaft auswirken.

### 3.3.2 Prozeßimmanente Entwicklungspotentiale bei der Demontage

Zur Ermittlung von prozeßimmanenten Entwicklungspotentialen ist zunächst eine Abstrahierung von Demontagevorgängen erforderlich. Dadurch kann eine grundsätzliche, lösungsneutrale Funktionsstruktur erstellt werden, die als Basis für eine Analyse dient.

Ein Demontagevorgang kann lösungsunabhängig in mehrere Teilfunktionen gegliedert werden (Bild 20). Zur Realisierung einer Demontagelösung müssen zunächst die erforderlichen Prozesse zur Erfüllung der Demontageanforderungen bereitgestellt werden.

Eine Teilmenge dieser Prozesse wird zur Schaffung der Verbindung zwischen dem Wirkkörper und dem Werkstück genutzt. Über die hergestellte Verbindung werden dann die Prozesse zur Durchführung der Trennung übertragen. In manchen Fällen ist es möglich berührungslose Demontagevorgänge durchzuführen (z.B. Laserschneiden). In diesen Fällen wird die Teilfunktion "Verbindung herstellen" nicht benötigt. Nach der Durchführung der Demontageprozesses müssen Werkstück und Wirkkörper wieder getrennt werden.

Im Zuge der Herleitung von Entwicklungspotentialen kommt der Teilfunktion "Verbindung herstellen" eine besondere Bedeutung zu, da diese häufig eine Schwachstelle hinsichtlich der Flexibilität konventioneller Demontagevorgänge ist. Eine Nutzung von vorhandenen Angriffsflächen ist hierbei aufgrund des großen Produktspektrums mit häufigen Werkzeugwechseln und den dafür erforderlichen Nebenzeiten verbunden.

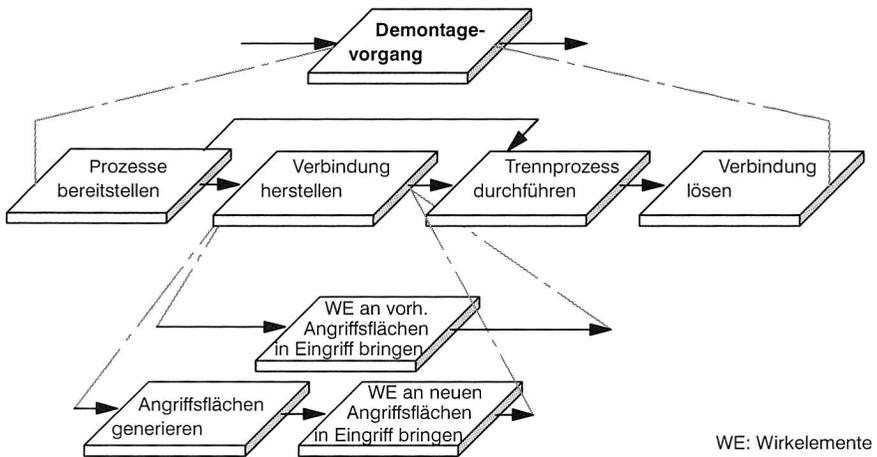


Bild 20: Lösungsunabhängige Funktionsstruktur eines Demontagevorgangs

Eine detaillierte Betrachtung der Teilfunktion "Verbindung herstellen" zeigt, daß diese in zwei alternative Funktionsstränge unterteilt werden kann (vgl. Bild 20). Eine Möglichkeit ist es, die Schaffung der Verbindung durch das in Eingriff bringen des Wirkelementes an vorhandenen Angriffsflächen durchzuführen. Dazu besteht aber auch die Alternative, die benötigten Angriffsflächen für den Demontageprozeß unter Nutzung entsprechender Trennprozesse zu generieren /16/, /118/, /132/. In einem zweiten Schritt dieser Teilfunktion wird das Wirkelement dann mit den neu generierten Angriffsflächen in Eingriff gebracht.

Diese alternative Funktionskette erfordert zunächst einen zusätzlichen Arbeitsgang. Trotzdem beinhaltet diese Möglichkeit, welche in der Praxis mangels geeigneter Technologien kaum genutzt wird, bei einer geeigneten Gestaltung der Werkzeuge er-

hebliche Flexibilitätspotentiale. Diese Potentiale sind dann besonders hoch, wenn von den folgenden Randbedingungen eine oder beide erfüllt sind:

- Die Teilfunktionen "Angriffsflächen generieren" und "Trennprozeß durchführen" sollten mit dem gleichen Werkzeug, wenn möglich mit dem gleichen Wirkelement realisiert werden.
- Idealerweise sollte das Werkzeug in der Lage sein, vorzugsweise vorhandene Angriffsflächen zu nutzen und erst wenn diese nicht ausreichen, neue geeignete Angriffsflächen zu erzeugen. Dadurch wird die Effizienz des Werkzeugs erhöht, da der zusätzliche Arbeitsgang des Generierens der Angriffsflächen je nach Bedarf nur teilweise oder gar nicht ausgeführt werden muß. Gleichzeitig bleibt aber die Option des Generierens neuer Angriffsflächen und damit die angestrebte Flexibilität erhalten.

Weitere prozeßimmanente Entwicklungspotentiale lassen sich aufzeigen, indem die jeweiligen Teilfunktionen mit potentiellen Wirkprinzipien hinterlegt werden.

Hinsichtlich der während eines Demontagevorgangs bereitgestellten und genutzten Prozesse (vgl. Bild 20) bedeutet dies zunächst, daß alle in der DIN 8580E definierten Trennprozesse (vgl. Bild 5) in Frage kommen. Eine Vielzahl dieser Prozesse weist jedoch zum Teil erhebliche Überschneidungen bezüglich der jeweils benötigten Funktionselemente auf. Aus diesem Grund besteht die Möglichkeit Trennprozesse (aber auch Fügeprozesse nach DIN 8593 /88/) hinsichtlich erforderlicher elementarer Funktionen zu untergliedern.

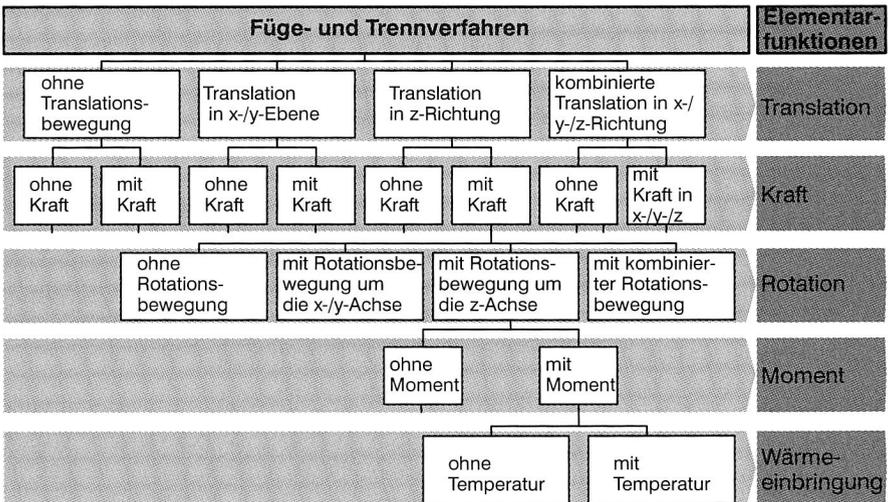


Bild 21: Struktur von Elementarfunktionen zur Klassifizierung von Trennprozessen (nach /86/)

In dem in /86/ vorgestellten Ansatz wird davon ausgegangen, daß sich alle Füge- und Trennprozesse durch eine Klassifizierung in einem 5-stufigen Baumdiagramm darstellen lassen. Dabei werden die Elementarfunktionen Translation, Krafteinbringung, Rotation, Drehmoment sowie Wärmeeinbringung als Basis der Strukturierung zugrundegelegt (Bild 21). Diese Einteilung der Trennprozesse erlaubt es, die Überschneidungen hinsichtlich häufig benötigter Elementarfunktionen und deren Kombinationen zu ermitteln und daraus Entwicklungspotentiale abzuleiten. Diese Elementarfunktionen werden deshalb, anstelle der Trennprozesse als potentielle Wirkprinzipien den Teilfunktionen "Prozesse bereitstellen" und "Trennprozeß durchführen" zugeordnet.

Die Teilfunktion "Wirkelemente an generierten oder vorhandenen Angriffsflächen zum Eingriff bringen" kann mit den Wirkprinzipien Stoffschluß, Formschluß, Kraftschluß und für die Wärmeübertragung realisiert werden, wobei wie in Bild 22 dargestellt unterschiedliche Ausprägungen dieser Wirkprinzipien möglich sind.

Durch *stoffschlüssige Verbindungen* ist es möglich vergleichsweise hohe Kräfte zu übertragen. Bei dieser Verbindungsart ist jedoch eine hohe Werkstoffabhängigkeit gegeben. *Formschlüssige Verbindungen* können Kräfte auf kleinen Flächen übertragen. Vorteilhaft wirkt sich die Werkstoffunabhängigkeit und die einfache Trennbarkeit dieses Wirkprinzips aus. *Kraftschlüssige Verbindungen* beruhen auf verschiedensten physikalischen Effekten, welche nur z. T. einen direkten Kontakt der Verbindungspartner erfordern. In den meisten Fällen sind die übertragbaren Kräfte jedoch vergleichsweise gering.

Physikalische Effekte und Prinziplösungen											
zum Übertragen von Kräften										zum Erwärmen	
Effekt	Adhäsion	Stoffschluß	Formschluß	Oberflächenspannung	Hooke-Gesetz	Aero-/Hydrostatik	Aero-/Hydrodynamik	Unterdruck	Gravitation	Strahlung	Kondensation
Prinziplösung											
Effekt	Elektro-statische Kräfte	Magnetische Kräfte		Reibung			Auftrieb	Fliehkraft, Trägheitskraft	Impuls	Konduktion	Konvektion
Prinziplösung											

Bild 22: Wirkprinzipien und Effekte zum Übertragen von Kräften, Momenten und von Wärme (ergänzt nach /49/)

Zur Übertragung von Wärme kommen Strahlung, Kondensation, Konvektion und Wärmeleitung (Konduktion) in Frage. Bei einem direkten Kontakt der Partner kommt jedoch nur die Wärmeleitung in Frage.

Je nach Demontageaufgabe und den Anforderungen an Demotagewerkzeuge können die alternativen Wirkprinzipien der verschiedenen Teilfunktionen zu einer Wirkstruktur kombiniert werden. In Bild 23 ist die Funktionsstruktur der Hauptfunktionen "Verbindung herstellen" und "Trennprozeß durchführen" dargestellt und mit den alternativen Wirkprinzipien hinterlegt.

Basierend auf der dargestellten Funktionsstruktur für Demontagevorgänge und auf den dafür hinterlegten Wirkprinzipien ist es möglich, ein weiteres wesentliches Entwicklungspotential zu definieren.

Grundsätzlich sind Lösungen erforderlich, die unter Berücksichtigung aller Teilprozesse auf eine möglichst *geringe Anzahl von Elementarfunktionen* zurückgreifen. So sollten für die Teilfunktion "Angriffsfläche generieren" die gleichen, oder ähnliche Elementarfunktionskombinationen genutzt werden, wie für die ohnehin benötigte Teilfunktion "Trennprozeß durchführen". Diese Randbedingung reduziert die Zahl der insgesamt erforderlichen Elementarprozesse für den Demontagevorgang, die vom Anwender oder einem Betriebsmittel (z. B. Bohrmaschine) zur Verfügung gestellt werden müssen.

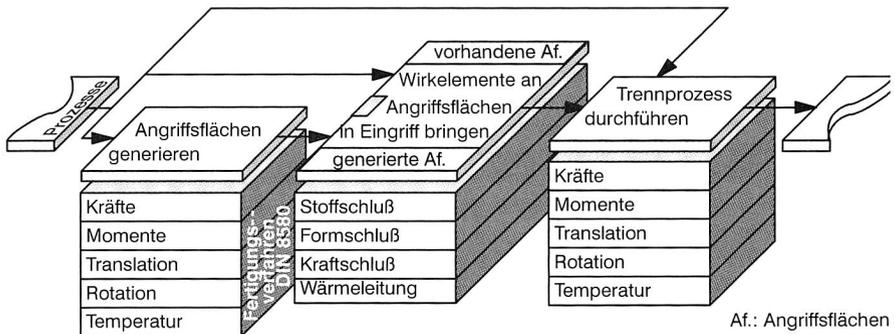


Bild 23: Alternative Wirkstrukturen für die Hauptfunktionen "Verbindung herstellen" und "Trennprozeß durchführen"

## 4 Entwicklung effizienter Demontagewerkzeuge

Wie in dem vorhergehenden Kapitel gezeigt wurde, existieren erhebliche Potentiale zur Entwicklung neuer Demontageverfahren mit optimierten Eigenschaften. Diese Potentiale werden im Rahmen dieses Kapitels genutzt, um entsprechende Werkzeuge zu entwickeln.

Die Schwerpunkte für praxisnahe Entwicklungen in diesem Bereich ergeben sich aus umfangreichen Untersuchungen die zur Ermittlung der Einsatzhäufigkeit von Trennprozessen in Zerlegeunternehmen durchgeführt wurden. Bei diesen Analysen wurden unterschiedliche demontagerelevante Produktgruppen vorwiegend aus dem Bereich elektrischer und elektronischer Geräte betrachtet und die jeweilig erforderlichen Demontageprozesse zur Erreichung der wirtschaftlichen Demontagetiefe aufgenommen. In Bild 24 sind die Ergebnisse beispielhaft für die Produktgruppen "Monitore" und "Telefone" dargestellt.

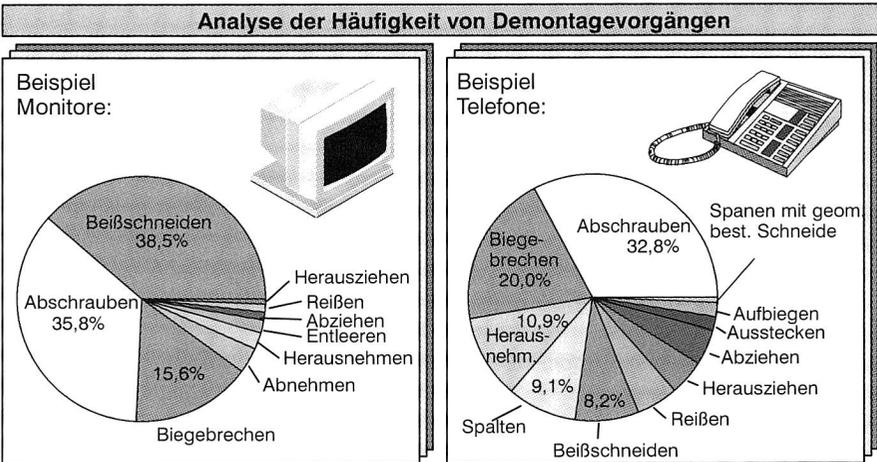


Bild 24: Analyse der Häufigkeit von Demontagevorgängen bei ausgewählten Produkten

Eine Auswertung der Demontageanalysen der untersuchten Produkte zeigt, daß das Aufschauben mit Abstand den häufigsten Trennprozeß darstellt. Ein weiteres Ergebnis ist, daß die zerstörungsfreie oder zerstörende Einbringung von Kräften bei einem weiten Spektrum von Demontageprozessen (z.B. Beißschneiden, Biegebrechen, Herausnehmen, Spalten, etc.) von großer Bedeutung ist.

In der Literatur werden ebenfalls mehrere Untersuchungen zu der Häufigkeit von Füge- und Trennprozessen beschrieben /86/, /70/, die zum Teil auf unterschiedlichen Rahmenbedingungen (z.B. Anzahl der untersuchten Prozesse, etc.) beruhen. Trotz man-

cher Unterschiede in Details bestätigen alle Analysen die dominierende Relevanz von Schraubverbindungen.

Ausgehend von diesen Untersuchungen werden die Schwerpunkte für die Entwicklung flexibler und effizienter Demontagewerkzeuge auf zwei Bereiche gelegt:

- Entwicklung von flexiblen Werkzeugen zur Einbringung von Drehmomenten mit dem Hauptziel der Schraubendemontage.
- Entwicklung von flexiblen Werkzeugen zur Einbringung von Kräften, die für einen oder mehrere zerstörungsfreie oder zerstörende Trennprozesse geeignet sind.

Im folgenden werden für diese Entwicklungsschwerpunkte Konzepte für Werkzeuge mit optimierten Demontageeigenschaften vorgestellt und miteinander verglichen.

#### **4.1 Alternative Werkzeugkonzepte für die flexible und effiziente Übertragung von Drehmomenten**

Bei der Übertragung von Drehmomenten ist, wie zuvor dargestellt, das Lösen von Schraubverbindungen die weitaus häufigste Anwendung. Deshalb ist es sinnvoll, bei der Entwicklung von entsprechenden Werkzeugkonzepten diese Demontageaufgabe prioritär zu berücksichtigen.

Zusätzlich zu den in Kapitel 3.2 definierten allgemeinen und recyclingformbezogenen Anforderungen ergeben sich hinsichtlich der Demontage von Schraubverbindungen weitere, demontageaufgabenbezogene Randbedingungen:

- Die Variantenvielfalt an Schraubenantrieben und -größen bedingt in der aktuellen Recyclingpraxis häufige Wechsel der Schrauberbits und damit erhebliche Nebenzeiten. Demontageanalysen an Elektrokleingeräten, die am Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik durchgeführt wurden, ergaben beispielsweise folgende Häufigkeitsverteilung: Kreuzschlitzschrauben 58%, Schlitzschrauben 29%, Innen- und Außensechskantschrauben jeweils 3 % und Torxschrauben 5%.
- Je nach Schraubenform gestaltet sich das schnelle Positionieren und Zentrieren des Schrauberbits zum Schraubenkopf schwierig. Dies gilt in besonderem Maße für Schlitzschrauben, aber auch für Außensechskant-, Innensechskant- und Torxantriebe.
- Durch Korrosion von Schrauben wird teilweise eine optimale Prozeßführung verhindert. So wird beispielsweise bei korrodierten Schraubenköpfen der Eingriff der Werkzeuge gestört. Darüber hinaus erschwert die Korrosion von Gewindegängen das Ausdrehen von Schrauben.

Bei dem Lösen von Schraubverbindungen ist somit die wesentliche Einschränkung der Flexibilität und Effizienz in der Teilfunktion "Verbindung zwischen dem Werkzeug und der Schraube herstellen" zu sehen. Durch eine Konkretisierung der in Kapitel 3.3 definierten Entwicklungspotentiale für die Demontageaufgabe "Lösen von Schraubverbin-

ungen" ergeben sich folgende Lösungsräume für Entschraubwerkzeuge mit optimierten Eigenschaften:

- Wirkkörper, die mit unterschiedlichen Schraubenantrieben einen Formschluß zur Drehmomentübertragung generieren können.
- Wirkkörper, welche die benötigten Angriffsflächen zur Drehmomentübertragung selber generieren und dadurch für verschiedene Schraubenarten und -größen einsetzbar sind.
- Wirkkörper, die für die Teilfunktion "Verbindung des Werkzeugs zu der Schraube herstellen" gleiche Elementarfunktionen wie für den Trennprozeß (z.B. Aufschrauben) erfordern.
- Integrierte Wirkkörper, die unterschiedliche Demontagelösungen (zerstörungsfrei, zerstörend, etc.) unterstützen und damit flexibel auf unsichere Verbindungszustände (z.B. Korrosion) reagieren können.

Auf der Basis dieser Überlegungen wurden verschiedene Werkzeugkonzepte entwickelt, die im folgenden vorgestellt bewertet werden.

#### 4.1.1 Konzeption eines zerstörungsfreien Mehrfachschraubers

Die in der Praxis am häufigsten vorkommenden Schraubenantriebe unterscheiden sich vor allem hinsichtlich der werkzeugspezifischen Angriffsflächen. Trotzdem sind bei verschiedenen Schraubenarten deutliche Überschneidungen bezüglich ihrer geometrischen Merkmale erkennbar, die für eine flexible Drehmomentübertragung verwendet werden können. Die Nutzung dieses Potentials war die wesentliche Zielsetzung bei der Entwicklung des sogenannten Mehrfachschraubers.

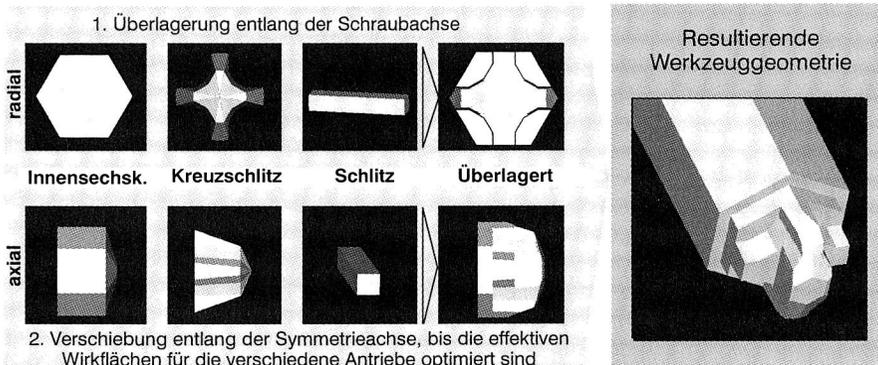


Bild 25: Vorgehensweise zur Generierung der Geometrie des Mehrfachschraubers durch Überlagerung verschiedener Schraubenantriebe

Hierzu wurden im Rahmen einer CAD-gestützten Analyse mit dem 3-D System Pro/Engineer die Schraubenantriebe verschiedenener Schraubenarten modelliert, um gemeinsame Eigenschaften abzuleiten. Dabei wurden diese zunächst radial bezüglich der jeweiligen Schraubenachse überlagert (vgl. Bild 25 oben). Aus der Überlagerung entsteht eine Schnittgeometrie, die alle gemeinsamen geometrischen Merkmale der Schraubenantriebe in sich vereint.

In dem nächsten Schritt wurden die resultierenden Wirkflächen für die einzelnen Antriebe in Abhängigkeit von der jeweiligen Eindringtiefe analysiert. Dies wurde durch eine schrittweise axiale Verschiebung der jeweiligen Antriebe entlang der Überlagerungsachse erreicht (vgl. Bild 25 unten). Die Auslegung dieser Wirkflächen ist von wesentlicher Bedeutung für das jeweils übertragbare Drehmoment.

Als Beispiel für die Anwendung dieser Vorgehensweise wurden folgende Schraubenarten und -größen modelliert und hinsichtlich ihrer Geometrien überlagert:

- Kreuzschlitzschrauben, Größen M4, M5, M6,
- Schlitzschrauben, Größen M4, M5, M6,
- Innensechskantschrauben, Größen M5, M6.

Das Ergebnis der Überlagerung ist in Bild 26 links oben dargestellt. Die Wirkflächen für die verschiedenen Antriebsarten sind in der Abbildung markiert und den jeweiligen Schraubentypen zugeordnet.

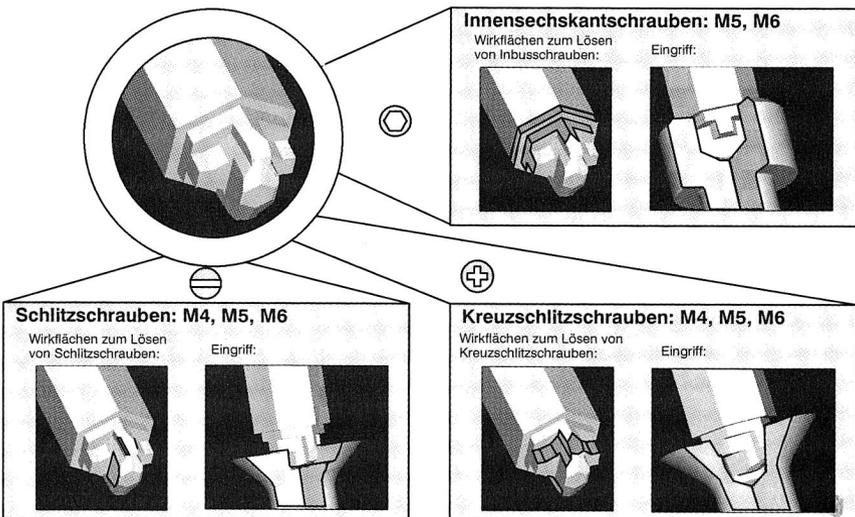


Bild 26: Beispielhaftes Einsatzspektrum des Mehrfachschraubendrehers mit Prüfung des Werkzeugeingriffs

Durch die Integration von Wirkflächen zu unterschiedlichen Schraubenarten und -größen ist es somit möglich, mit dem Mehrfachscharuber eine hohe Flexibilität hinsichtlich unterschiedlicher Demontageaufgaben zu erreichen. Eine weitere wesentliche Eigenschaft des vorgestellten Werkzeugkonzeptes ist die kompakte und robuste Bauform ohne bewegliche Komponenten.

#### 4.1.2 Entwicklung des Bohr-Entschraubwerkzeugs

Bei der Analyse verschiedener alternativer Lösungen für die Schraubendemontage fällt die Ähnlichkeit von Elementarfunktionskombinationen für das Aufschrauben und das Aufbohren auf /18/. Beide Demontagelösungen benötigen die Elementarfunktionen Rotation und Drehmoment, jedoch ist bei der Nutzung konventioneller Verfahren die Drehrichtung unterschiedlich. Bei dem Prozeß "Aufbohren" wird zusätzlich ein Vorschub (Translation entlang der Drehachse) sowie eine Vorschubkraft benötigt.

Der Prozeß "Bohren" kann als zerstörende Demontagelösung aber auch als Prozeß zur Generierung von Angriffsflächen genutzt werden. Die potentiellen Angriffsflächen, die dadurch verfügbar werden, sind einerseits die Geometrien des erzeugten Durchgangs- bzw. Sackloches, andererseits aber auch die während des Bohrprozesses entstehenden Späne oder Spanwurzeln.

Für den Fall, daß der Bohrprozeß statt konventionell rechtsdrehend in entgegengesetzter Rotationsrichtung durchgeführt wird, entstehen erhebliche Überschneidungen der oben genannten Prozesse und Teilfunktionen. Alle Teilfunktionen der verschiedenen Demontagelösungen können mit linksgerichteter Rotation und Drehmoment sowie mit Einbringung einer Vorschubbewegung und -kraft durchgeführt werden. Weiterhin ist es in diesem Fall auch möglich, entstehende Späne und Spanwurzeln für eine linksgerichtete Drehmomentübertragung zu nutzen. Ein Wirkkörper, der diese Prozesse flexibel unterstützen soll, muß folgende Anforderungen erfüllen:

- Durchführung von linksdrehenden Bohrprozessen.
- Erzeugung eines Formschlusses mit mehreren Schraubenantrieben.
- Generierung von wirksamen Angriffsflächen zur linksgerichteten Drehmomentübertragung.

Ausgehend von diesen Überlegungen und Anforderungen wurde das sogenannte Bohr-Entschraubwerkzeug entwickelt /93/. Dieses (Bild 27) ist ähnlich einem linksgewendelten Bohrer mit zwei linksorientierten Schneiden versehen. Die Geometrie des Werkzeugs ist so gestaltet, daß ein Formschluß mit den spezifischen Formelementen mehrerer Schraubenantriebe (z.B. Kreuzschlitz, Schlitzschrauben) zerstörungsfrei hergestellt werden kann. Alternativ dazu können durch Bohren Angriffsflächen in Form von Spanwurzeln erzeugt werden, die gleichermaßen die Übertragung von Drehmomenten ermöglichen. Darüber hinaus ist bei diesem Werkzeug auch die Möglichkeit zur zerstörenden Demontage durch einen konventionellen Bohrprozeß gegeben. Dadurch

können neben korrodierten Schrauben auch eine Vielzahl weiterer Verbindungsarten wie Nieten oder Punktschweißverbindungen durch Aufbohren gelöst werden.

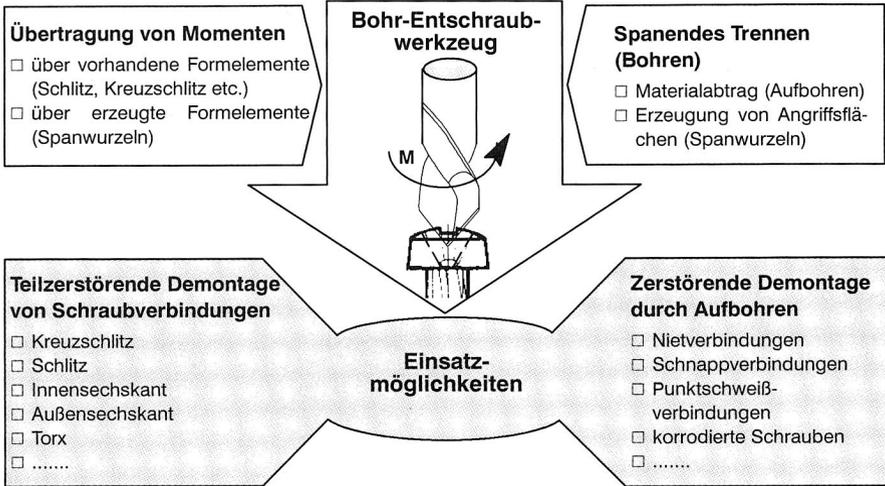


Bild 27: Funktionsmerkmale und Einsatzgebiete des Bohr-Entschraubwerkzeugs |18/

Das Werkzeug ermöglicht es somit, verschiedene Demontageaufgaben (unterschiedliche Schraubenarten und Verbindungstechniken) flexibel und effizient, ohne Werkzeugwechsel und unter Nutzung der gleichen Elementarfunktionen zu lösen. Desweiteren werden für schraubenspezifische Demontageaufgaben verschiedene Demontagelösungen bereitgestellt (Aufschrauben, Aufbohren). Darüber hinaus ermöglicht das Werkzeug die Nutzung vorhandener und im Prozeß generierter Angriffsflächen für die Demontagelösung "Aufschrauben". Diese Eigenschaften verdeutlichen die große Flexibilität des Bohr-Entschraubwerkzeugs.

### 4.1.3 Konzeption der Entschraubzange

Wie bereits in Kapitel 3.3 aufgezeigt, ist ein weiteres wesentliches Flexibilitätspotential die Nutzung gleicher Elementarfunktionen zur Durchführung verschiedener Demontageprozesse. Bezogen auf die Problematik des Aufschraubens bedeutet dies, daß für die Durchführung der Teilfunktion "Verbindung herstellen" die gleichen Elementarfunktionen wie für das Herausdrehen ("Drehmoment" und "Rotation") genutzt werden.

Bei der Entwicklung der sogenannten Entschraubzange wurde aufgrund dieser Überlegungen ein Wirksystem konzipiert, welches die bereits für das Aufschrauben erforderlichen Elementarfunktionen "Drehmoment" und "Rotation" gleichermaßen für die Anpassung des Werkzeugs an verschiedene Schraubengeometrien bzw. zur Generierung von Angriffsflächen nutzt. Dabei wurde im Gegensatz zu dem Bohr-Entschraubwerkzeug der Ansatz verfolgt, außenliegende Angriffsflächen für die Drehmomentübertragung zu

verwenden bzw. zu generieren. Hierbei wirken sich die längeren Hebelwege zur Schraubachse vorteilhaft aus.

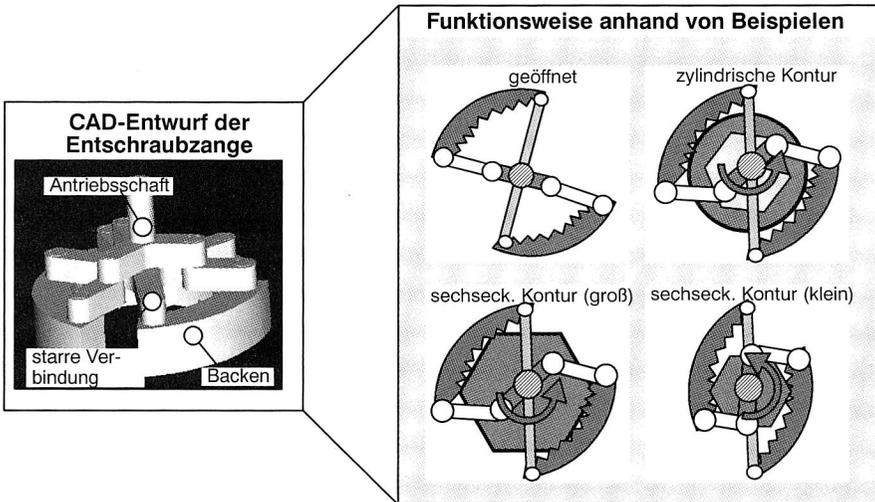


Bild 28: Prinzipielle Darstellung der Entschraubzange zur Demontage unterschiedlicher Schraubenarten [91]

Das resultierende Werkzeugkonzept ist in Bild 28 dargestellt [91]. Bei der Entschraubzange sind zwei bzw. drei Klemmbacken, welche mit linksgerichteten Zähnen versehen sind, über einen speziellen Hebelmechanismus miteinander verbunden. Über einen ebenfalls mit diesem Mechanismus verbundenen Schaft kann das Werkzeug angetrieben werden. Die Drehrichtung ist linksgerichtet.

Durch das Drehen des Schaftes werden die Klemmbacken zunächst soweit zusammengezogen, bis ein Kraft- oder Formschluß mit der zu lösenden Schraube hergestellt ist. Hierbei wirken sich vorhandene Umfangselemente der Schrauben günstig aus. Falls keine Formelemente vorliegen, greifen die Backen durch Umformen oder Spanen in den Schraubenkopf ein. Im Anschluß daran erfolgt die Übertragung des Drehmomentes über den so generierten Formschluß. Zum Lösen des Werkzeugs wird die Drehung gestoppt, bzw. die Drehrichtung kurzzeitig umgekehrt, wodurch die Klemmbacken auseinander gedrückt werden.

Mit dem beschriebenen Werkzeugkonzept ist es somit grundsätzlich möglich, eine Vielzahl von Schraubverbindungen unterschiedlicher Größe und Form ohne Werkzeugwechsel zu lösen. Die Voraussetzung ist jedoch, daß eine ausreichende Zugänglichkeit zum Ansetzen des Werkzeugs vorhanden ist.

Das Werkzeug wird zentral angetrieben, wodurch ein Einsatz mit Akkuschaubern o. ä. ermöglicht wird. Durch die Bauweise und Anordnung der Klemmbacken erfolgt

zusätzlich eine prozeßbedingte Zentrierung der Schraube zu dem Entschraubwerkzeug, wodurch eine einfache Positionierung gewährleistet ist.

#### 4.1.4 Vergleich der Werkzeugkonzepte zur Drehmomentübertragung

Die vorgestellten Werkzeugkonzepte zur flexiblen Übertragung von Drehmomenten erfüllen in unterschiedlichem Maße die in Kapitel 3.2 hergeleiteten Anforderungen an Demontagewerkzeuge. Um eine Auswahl des vielversprechendsten Konzeptes zu treffen, wurde eine Bewertung der Werkzeuge sowohl hinsichtlich der Nutzung von Effizienzpotentialen als auch bezüglich der Erfüllung der Anforderungen durchgeführt (Bild 29). Dabei erfolgt die Klassifizierung unabhängig von der Höhe des übertragbaren Drehmomentes, da dieses in wesentlichem Maße von der Ausarbeitung und Realisierung der jeweiligen Konzepte abhängt.

Alle drei Werkzeuge sind für unterschiedliche Demontageaufgaben (z.B. das Lösen unterschiedlicher Schraubenarten) einsetzbar. In dieser Beziehung ist jedoch die Flexibilität des Bohr-Entschraubwerkzeugs am größten, da neben Schrauben auch eine Vielzahl anderer Verbindungsarten gelöst werden können. Durch die Möglichkeit von Entschraub- und Bohrprozessen werden überdies von diesem Werkzeug auch die meisten Demontagelösungen unterstützt. Signifikante Unterschiede zeigen sich bei der Fähigkeit, prozeßintegrierte Angriffsflächen zu generieren. Während der Mehrfachschrauber zerstörungsfrei angewendet wird, bietet der Einsatz der beiden anderen Werkzeugkonzepte die Möglichkeit, innen- oder außenliegende Angriffsflächen zu generieren. Desweiteren benötigen der Mehrfachschrauber und die Entschraubzange lediglich die Bereitstellung der Elementarfunktionen "Rotation" und "Drehmoment" während das Bohr-Entschraubwerkzeug zusätzlich die Funktionen "Translation" und "Vorschubkraft" erfordert.

Deutliche Unterschiede zeigen sich weiterhin hinsichtlich der Erfüllung der allgemeinen Anforderungen. Sowohl der Mehrfachschrauber als auch das Bohr-Entschraubwerkzeug bestehen aus einem einzigen Teil, was sich gegenüber der Entschraubzange vorteilhaft auf die Fertigungskosten, die Robustheit und auf die Kompaktheit der Bauform auswirkt. Die bei den drei Werkzeugkonzepten genutzten Funktionsprinzipien erlauben grundsätzlich jeweils kurze Verfahrensdauern.

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die integrierte Fehlertoleranz der Werkzeuge. Aufgrund der Bauart ist beim Mehrfachschrauber keine Fehlertoleranz hinsichtlich einer falschen Positionierung des Werkzeugs gegeben. Demgegenüber ermöglichen die beiden anderen Werkzeugkonzepte eine Selbstzentrierung zu den Schrauben. Bei dem Bohr-Entschraubwerkzeug ist weiterhin eine gewisse Toleranz gegenüber unvorhersehbarer Produktzustände möglich, da z.B. korrodierte Schrauben mit dem gleichen Prozeß aufgeböhrt statt entschraubt werden können.

Bewertung		Werkzeugkonzepte		
		Mehrfach-schrauber	Bohr-Entschraubwerkz.	Entschraubzange
Legende	● erfüllt			
	◐ teilweise erfüllt			
	○ nicht erfüllt			
Flexibilitätpotentiale	Anwendung für mehrere Demontageaufgaben	◐	●	◐
	Unterstützung alternativer Demontagelösungen	○	●	○
	Integrierte Generierung von Angriffsflächen	○	●	◐
	geringe Anzahl benötigter Elementarfunktionen	●	◐	●
Allgemeine Anforderungen	Kurze Verfahrensdauer	●	●	●
	Einfache Lösung	●	●	◐
	Integrierte Fehlertoleranz	○	●	◐
	Geringe Betriebsmittelkosten	●	●	◐
	Kleine kompakte Bauform	●	●	◐
	Robustheit	●	●	◐

Bild 29: Bewertung der entwickelten Werkzeugkonzepte hinsichtlich der Nutzung der Flexibilitätpotentiale und der Erfüllung der definierten Anforderungen

Dieser Vergleich zeigt, daß alle drei Werkzeugkonzepte Vorteile gegenüber dem Stand der Technik aufweisen. Aufgrund der, trotz des einfachen Ansatzes, vielschichtigen Flexibilität des Bohr-Entschraubwerkzeugs erscheint dieses Werkzeugkonzept am vielversprechendsten. Deshalb wurde das Bohr-Entschraubwerkzeug aus dem Bereich der drehmomentübertragenden Werkzeuge für eine beispielhafte Realisierung im Rahmen dieser Arbeit ausgewählt (vgl. Kapitel 4.3).

## 4.2 Werkzeugkonzepte zur effizienten und flexiblen Einbringung von Kräften

Die Einbringung von Zug- und Druckkräften ist bei verschiedensten Trenn- und Handhabungsprozessen von wesentlicher Bedeutung. Die flexible und effiziente Durchführung dieser Prozesse mit handelsüblichen Betriebsmitteln gestaltet sich je-

doch besonders schwierig, da bei dem großen zu verarbeitenden Produktspektrum im allgemeinen kaum einheitliche prozeßspezifische oder prozeßübergreifende Angriffsflächen für die Kraftübertragung zur Verfügung stehen.

Eine Konkretisierung der in Kapitel 3.3 definierten Entwicklungspotentiale bezüglich der Einbringung von Kräften ergibt folgende Lösungsräume für neue effiziente und flexible Werkzeuge.

- Wirkkörper, die mit verschiedenen Werkstückgeometrien (produktneutral) einen zerstörungsfreien Formschluß zur Übertragung von Kräften bilden können.
- Wirkkörper, welche die benötigten Angriffsflächen zur Kraftübertragung selber generieren und dadurch im Rahmen unterschiedlicher Demontageprozesse für verschiedene Werkstückgestaltungen und -größen einsetzbar sind.
- Wirkkörper, die für die Teilfunktion "Verbindung herstellen" die gleichen Elementarfunktionen (Antriebskräfte) wie für den Trennprozeß benötigen.
- Integrierte Werkzeuge, die unterschiedliche Demontagelösungen (zerstörungsfrei, zerstörend, etc.) unterstützen und damit flexibel auf unsichere Bauteilzustände (z.B. Korrosion) reagieren können.

Auf der Basis dieser Überlegungen wurden verschiedene Werkzeugkonzepte zur flexiblen Kraftübertragung entwickelt, die im folgenden vorgestellt und bewertet werden.

#### 4.2.1 Trennen von Bauteilen mit dem Spreizmeißel

Eine Problemstellung, die in der Praxis des Elektronikschrottreyclings besonders häufig vorkommt, stellt das Öffnen von Produktgehäusen dar, um eine schnelle Zugänglichkeit zu den innenliegenden Gefahrstoffen oder Wertstoffen zu erreichen. Eine Zerstörung des Gehäuses ist im allgemeinen zulässig, da sich diese meist nicht nachteilig auf die nachfolgende Verwertung auswirkt. Für diese Demontageaufgabe existieren in der aktuellen Demontagepraxis keine befriedigenden effizienten Lösungen. Auch der Einsatz zerstörender Lösungen auf Basis konventioneller Werkzeuge ermöglicht nur geringe Effizienzvorteile, wobei hier jedoch auch eine ungewollte Zerstörung der innerhalb des Gehäuses liegenden Bauteile in Kauf genommen werden muß.

Gerade bei dieser Demontageaufgabe existieren aber produktübergreifende Überschneidungen, welche für eine innovative Werkzeuggestaltung genutzt werden können. Diese sind nachfolgend dargestellt.

- Gehäuse elektrischer oder elektronischer Geräte bestehen oft aus zwei oder mehr dünnwandigen Kunststoffelementen.
- Zum zerstörenden Öffnen des Gehäuses müssen hohe Zugkräfte auf die Gehäuseelemente übertragen werden, die den Zusammenhalt durch das Zerstören entweder der Verbindungen oder der Gehäuseelemente auflösen sollen.

- Als potentielle Angriffsfläche zur Krafteinbringung steht grundsätzlich eine Trennfuge zur Verfügung. Mit konventionellen Werkzeugen ist jedoch eine ausreichende Krafteinbringung über diese Formelemente nicht möglich.
- Eine Zerstörung des Innenlebens durch eingreifende Werkzeuge sollte vermieden werden, um eine Vermischung der u. U. enthaltenen Gefahrstoffe zu vermeiden.

Auf der Basis dieser Überlegungen wurde der sogenannte Spreizmeißel entwickelt /90/. Wie in Bild 30 dargestellt, beruht das Wirkprinzip des Spreizmeißels darauf, daß auf die zu trennenden Komponenten jeweils eine Kraft einwirkt, deren vertikale Komponente zur Nutzung oder Generierung von Angriffsflächen eingesetzt wird, während die horizontale Komponente die eigentliche Trennkraft darstellt.

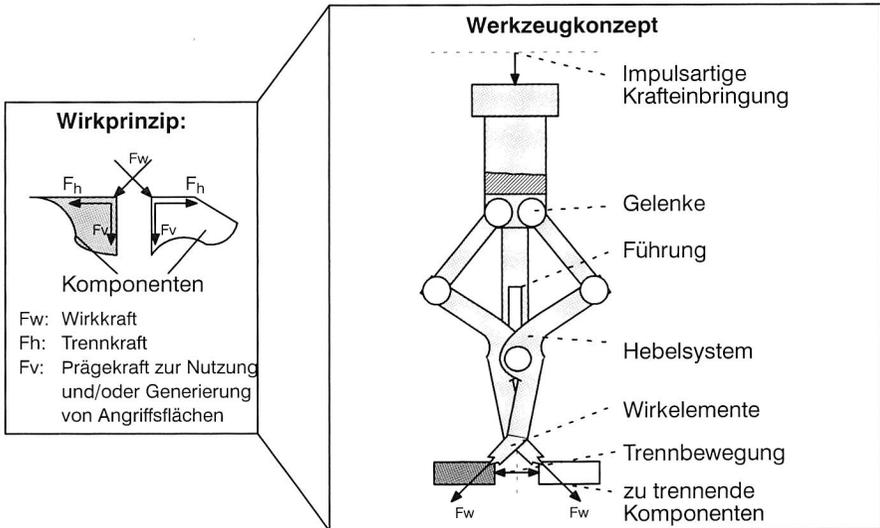


Bild 30: Wirkprinzip und Kinematikbeispiel für den Spreizmeißel

Die Anwendung dieses Wirkprinzips auf das Öffnen von Gehäusen bedingt geeignete Lösungen für die Wirkelemente zur Kraftübertragung sowie eine Kinematik, welche die benötigten Kräftepaare aus einer einzigen einfachen Elementarfunktionskombination bereitstellt. Ein entsprechendes Werkzeugkonzept ist in Bild 30 rechts dargestellt. Der Spreizmeißel besteht aus einem speziellen Hebelsystem und aus einem Schaft. Das Hebelsystem ist derart aufgebaut, daß die Eingangskraft (bzw. der Impuls) in eine gleichgerichtete und in eine senkrecht dazu gerichtete Komponente aufgeteilt wird.

Durch die gleichgerichtete Kraftkomponente werden die Wirkelemente des Spreizmeißels mit hoher Kraft an die zu trennenden Bauteile gepreßt. Dadurch wird je nach Ausprägung der Wirkelemente durch Umformen oder durch Spanen entweder ein Reibschluß oder ein Formschluß erzeugt. Falls bei den zu trennenden Bauteilen bereits

Formelemente (Trennfugen, Nuten, Absätze o.ä.) vorhanden sind, kann sich dies vorteilhaft auf die Kraftübertragung auswirken. Die senkrecht zu der Schlagrichtung gerichtete Kraftkomponente wird gleichzeitig als Trennkraft genutzt. Die erforderliche Eingangskraft wird vom Benutzer vorzugsweise impulsartig (Hammer, Pneumatikhammer o.ä.) eingebracht.

Aufgrund der Eigenschaft des Spreizmeißels, produktneutral mit einem einzigen Prozeß Angriffsflächen zu nutzen oder zu generieren und gleichzeitig eine hohe Trennkraft zu übertragen, wird eine hohe Flexibilität zum "Öffnen von Gehäusen" erreicht. Dadurch ist es möglich, andere konventionelle Demontagelösungen (z.B. Aufschrauben von Gehäusen) zu substituieren.

#### 4.2.2 Übertragung von Kräften mit dem Bohrgreifer

Im Rahmen der mechanisierten und insbesondere der automatisierten Demontage von Produkten sind häufig Spann- und Greifprozesse nötig. Ein demontagespezifischer Ansatz für diese Aufgaben ist das Werkzeugkonzept des sogenannten Bohrgreifers /92/.

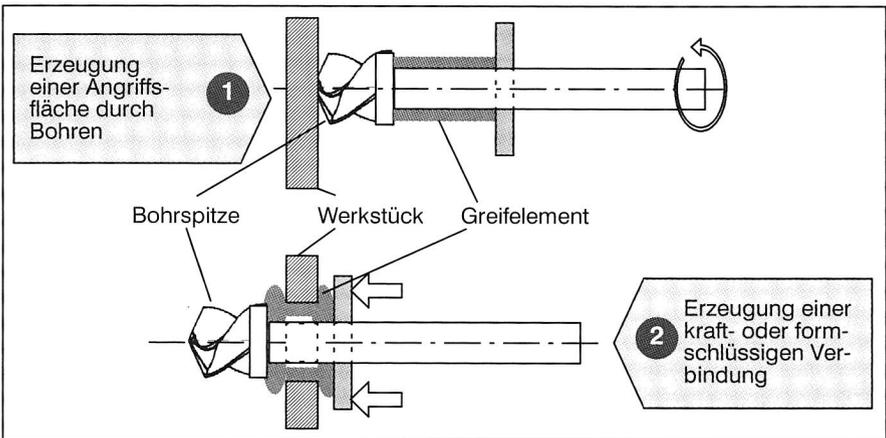


Bild 31: Aufbau und Funktionsprinzip des Bohrgreifers

Das Wirkprinzip des Bohrgreifers beruht auf einer zweistufigen Vorgehensweise. Für die Teilfunktion "Verbindung herstellen" werden zunächst Angriffsflächen durch einen Bohrprozeß erzeugt. Im Gegensatz zu dem Bohr-Entschraubwerkzeug (vgl. Kapitel 4.1.2) werden dabei jedoch nicht die Spanwurzeln sondern der Umfang der erzeugten Durchgangsbohrung als Angriffsflächen genutzt. Mit einem zweiten Wirkelement wird ein axialer Formschluß an der Durchgangsbohrung erzeugt, um die erforderlichen Kräfte zu übertragen. Dieses Wirkelement kann beispielsweise ein elastischer Greifring sein, dessen Verkürzung in Längsrichtung eine radiale Expansion bewirkt. Dadurch

paßt sich der Greifring an die Durchgangsbohrung an, so daß die Übertragung hoher Kräfte möglich wird. Die Aufhebung der Längskraft beendet den Greifvorgang.

Bei der Konzeption des Bohrgreifers wurde darauf geachtet, beide erforderliche Wirkelemente in ein einziges Werkzeug zu integrieren, um einen Werkzeugwechsel zu vermeiden. Eine solche Lösung ist in Bild 31 dargestellt. Hierbei ist das Greifelement (Elastomer) auf einem Schaft direkt hinter der Bohrspitze angeordnet. Nach dem Bohrvorgang wird der Greifbereich des Werkzeugs in die Bohrung eingeführt. Durch die Verkürzung des elastischen Greifrings in Längsrichtung (Längskraft auf den Schiebering) wird entweder ein Form- oder ein Kraftschluß erzeugt.

Durch diese Eigenschaften ist es möglich, mit dem Bohrgreifer Kräfte über generierte Angriffsflächen, insbesondere auf dünnwandige Bauteile und Produkte, zu übertragen. Die bei dieser Demontagelösung erforderlichen beiden Wirkelemente sind in einem einzigen Werkzeug integriert, so daß kein Werkzeugwechsel erfolgen muß. Nachteilig wirkt sich allerdings aus, daß neben den für das Bohren benötigten Elementarfunktionen ein weiterer zeitlich getrennter Prozeß für die Bewegung des Schieberinges benötigt wird.

Das Werkzeug ist aufgrund der beschriebenen Eigenschaften flexibel für verschiedene Demontageaufgaben, die die Übertragung hoher Kräfte erfordern (z.B. Aufbrechen, Herausreißen, etc.) einsetzbar. Weiterhin werden zerstörende Spann- und Greifprozesse unterstützt.

#### **4.2.3 Flexible Krafteinbringung mit einem Multifunktionswerkzeug**

Bei einer Vielzahl von Demontage- und Montageprozessen (Greifen, Spreizen, Aufbrechen, Spannen, etc.) ist die Kombination der Elementarfunktionen "Krafteinbringung" und "gleichgerichtete lineare Translation" erforderlich /86/.

Um diese Kombination von Elementarfunktionen für möglichst viele Demontagelösungen in einem einzigen Werkzeug verfügbar zu machen, wurde ein Werkzeugkonzept entwickelt, das sowohl den Antrieb als auch die entsprechenden Wirkelemente zur Übertragung der Kraft optimal zur Verfügung stellt. Für die Entwicklung dieses Werkzeugs wurde die Erfüllung folgender häufiger Aufgabenstellungen der Demontage zugrundegelegt:

- Sicheres Greifen (Innengreifen, Außengreifen) in einem großen Greifbereich, um eine hohe Flexibilität durch die Nutzung vorhandener Angriffsflächen zu gewährleisten.
- Aufbrechen von Gehäusen an Trennfugen durch Aufspreizen.
- Schneiden von Anschluß- und Verbindungsleitungen.

Zu diesen Demontageaufgaben können jeweils Lösungen gefunden werden, die auf einem linearen Antrieb und geeigneten Wirkkörpern beruhen. Eine besondere Anforderung an die Entwicklung eines integrierten Werkzeugs ist jedoch durch den unterschiedlichen Kraftbedarf für die alternativen Demontageprozesse gegeben.

Zur strukturierten Entwicklung eines entsprechenden Werkzeugkonzeptes können verschiedene Teilfunktionen unterschieden werden. Zunächst muß eine geeignete Antriebskraft und -bewegung bereitgestellt werden. Desweiteren ist eine Übersetzung derselben in die definierte aufgabenspezifische Wirkkraft und -bewegung erforderlich. Darüber hinaus werden geeignete Wirkelemente zur Übertragung der Kräfte auf das Werkstück benötigt. Für diese Teilfunktionen wurden jeweils Lösungsfelder definiert und hinsichtlich ihrer Eignung für ein integriertes Werkzeugkonzept analysiert. Das resultierende Werkzeugkonzept ist in Bild 32 dargestellt.

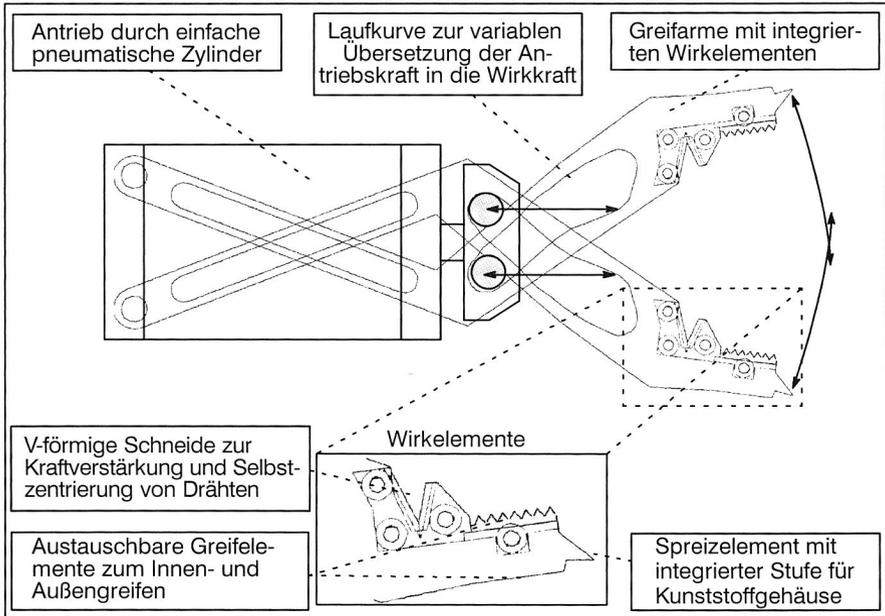
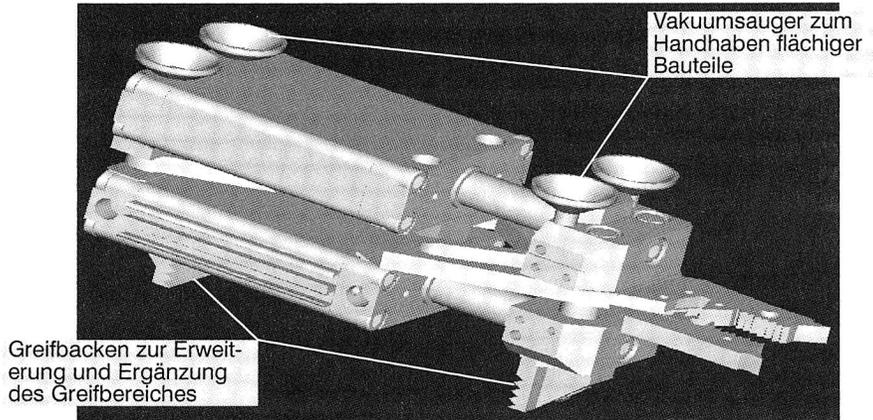


Bild 32: Werkzeugkonzept des Multifunktionswerkzeugs zur Kraftübertragung

Als Antriebseinheit wurde aus den Alternativen pneumatischer, elektrischer oder hydraulischer Antriebe eine pneumatische Lineareinheit gewählt, da diese neben der leichten und kompakten Bauform auch Vorteile hinsichtlich der Zuverlässigkeit und Unempfindlichkeit gegen Verschmutzungen aufweist.

Eine wichtige Aufgabe kommt der Übersetzung dieser Antriebskraft und -bewegung in eine definierte aufgabenspezifische Wirkkraft und Wirkbewegung zu. Hierzu wurde eine Kinematik auf der Basis einer Kurvenübersetzung gewählt, deren Vorteil darin zu sehen ist, daß die verfügbaren Kräfte in den verschiedenen Arbeitsbereichen an die jeweiligen Erfordernisse angepaßt werden können. Dies ist ein wichtiger Aspekt für die sinnvolle Integration vieler Funktionen in ein einfach aufgebautes, robustes und kompaktes Werkzeug. Weiterhin ermöglicht die Kraftübersetzung mittels unterschiedlicher Steuer-

kurven eine Anpassung des Kraft-Weg-Verlaufes an die gestellten Anforderungen. Dadurch ist es beispielsweise möglich für den Schneidprozeß in einem speziellen Bereich der Steuerkurve besonders hohe Kräfte bereitzustellen.



*Bild 33: CAD-Modell des Multifunktionswerkzeugs mit integrierten Vakuumsaugern und Backengreifern*

Zur Übertragung der über die beschriebene Kinematik generierten Kräfte in die Werkstücke wurden verschiedene aufeinander abgestimmte Wirkelemente in das Werkzeugkonzept integriert. Das Greifen verschiedener Bauteile wird mit einer querverzahnten Wirkfläche durchgeführt, um ein sicheres, jedoch u. U. teilzerstörendes Greifen verschiedenster Werkstückausprägungen zu ermöglichen. Zum Schneiden von Anschlußleitungen wurden V-förmig angeordnete Schneiden vorgesehen, um einen Scherschneidprozeß mit erhöhtem Kraftbedarf zu ermöglichen. Die Problematik des Aufbrechens und des Spreizens besteht darin, daß zum einen sehr hohe Kräfte aufgebracht werden müssen, zum anderen aber die Greiforgane möglichst klein und spitz gebaut sein müssen, so daß kleine Spalten und Überstände als Angriffsfläche genutzt werden können. Deshalb wurde die in der Darstellung aufgezeigte Geometrie für dieses Wirkelement gewählt. Die vorgesehene Stufe in dem Wirkelement soll ein Durchrutschen bei durchstoßenen dünnwandigen Blechteilen verhindern. Somit ergibt sich wie in Bild 32 dargestellt eine kompakte, funktionale Gestaltung der Wirkelemente, die eine einfache Integration in das Werkzeugkonzept erlauben.

Durch den symmetrischen Aufbau des gesamten Werkzeugs (Bild 33) ergibt sich weiterhin die Möglichkeit, Saugelemente zur Handhabung flächiger Bauteile anzubringen, welche durch Befestigung an der Verschiebeeinheit in dem Wirkbereich verstellbar und damit an verschiedene Bauteilgrößen anpassbar sind. Zusätzlich können durch die geschlossene und kompakte Bauweise noch Parallelgreifbacken angebracht werden, um den Greifbereich des Werkzeugs noch zu erweitern.

### 4.2.4 Vergleich der Werkzeugkonzepte zur flexiblen Kraftübertragung

Die vorgestellten Werkzeugkonzepte zur flexiblen Übertragung von Kräften erfüllen in unterschiedlichem Maße die in Kapitel 3.2 hergeleiteten Anforderungen an Demontagewerkzeuge. Um eine Auswahl des vielversprechendsten Konzeptes zu treffen, wurde eine Bewertung der Werkzeuge hinsichtlich der Flexibilitätspotentiale und der Anforderungen durchgeführt (Bild 34). Dabei erfolgte die Klassifizierung unabhängig von der Höhe und Art der übertragbaren Kräfte, da diese vor allem von Ausarbeitung und Auslegung der Werkzeuge abhängen.

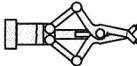
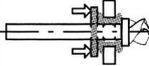
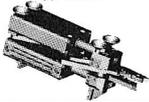
Bewertung		Werkzeugkonzepte		
		Spreizmeißel	Bohrgreifer	Multifunktionsgreifer
Legende	 erfüllt			
	 teilweise erfüllt			
	 nicht erfüllt			
				
Flexibilitätspotentiale	Anwendung für mehrere Demontageaufgaben			
	Unterstützung alternativer Demontagelösungen			
	Integrierte Generierung von Angriffsflächen			
	geringe Anzahl benötigter Elementarfunktionen			
Allgemeine Anforderungen	Kurze Verfahrensdauer			
	Einfache Lösung			
	Integrierte Fehlertoleranz			
	Geringe Betriebsmittelkosten			
	Kleine kompakte Bauform			
	Robustheit			

Bild 34: Bewertung der entwickelten Werkzeugkonzepte hinsichtlich der Nutzung der Flexibilitätspotentiale und der Erfüllung der definierten Anforderungen

Alle vorgestellten Werkzeugkonzepte zur Übertragung von Kräften weisen eine sehr hohe Flexibilität hinsichtlich der Anwendbarkeit auf verschiedene Demontageaufgaben, der Unterstützung alternativer Demontagelösungen und der integrierten Generierung von Angriffsflächen auf. Sowohl bei dem Spreizmeißel als auch bei dem Multifunktions-

greifer werden lediglich die Elementarfunktionen "Vorschubkraft" und "Translation" zur Umsetzung der Funktionen benötigt. Der Bohrgreifer erfordert zusätzlich noch die Prozesse "Rotation" und "Drehmoment", um die Angriffsflächen zu generieren.

Hinsichtlich der weiteren allgemeinen Anforderungen kommen die Vorteile des Spreizmeißels und des Bohrgreifers aufgrund der vergleichsweise einfachen, kostengünstigen und robusten Bauform zum Tragen.

Der in Bild 34 dargestellte Vergleich zeigt, daß alle drei Werkzeugkonzepte hinsichtlich ihrer Flexibilität wesentliche Vorteile gegenüber dem Stand der Technik aufweisen. Insgesamt erweist sich jedoch der Spreizmeißel aufgrund der einfachen Bauform und hohen Flexibilität als das Werkzeugkonzept mit dem größten Effizienzpotential. Deshalb wurde der Spreizmeißel aus dem Bereich der kraftübertragenden Werkzeuge für eine Realisierung im Rahmen dieser Arbeit gewählt.

### **4.3 Beispielhafte Realisierung flexibler Demontagewerkzeuge zur Übertragung von Drehmomenten und Kräften**

Nach der Bestimmung der Werkzeugkonzepte mit dem größten Effizienz- und Flexibilitätspotential, jeweils zur Übertragung von Kräften und von Drehmomenten, wird im folgenden die Realisierung und Optimierung des Spreizmeißels und des Bohr-Entschraubwerkzeugs beschrieben.

Hierzu müssen, ausgehend von dem jeweiligen Werkzeugkonzept, die Haupteinflussfaktoren für die optimale Funktionsfähigkeit des Werkzeugs bestimmt werden. Diese können grundsätzlich in Kriterien der Werkzeuggestaltung und in Prozeßparameter eingeteilt werden. Im folgenden werden für den Spreizmeißel und für das Bohr-Entschraubwerkzeug, ausgehend von theoretischen Überlegung und Versuchen, optimale Geometriemerkmale und Prozeßbedingungen abgeleitet. Die durchgeführten Versuche dienen weiterhin dazu, die Leistungsfähigkeit der entwickelten Prototypen zu aufzuzeigen.

#### **4.3.1 Realisierung und Optimierung des Spreizmeißels**

Auf der Basis des in Kapitel 4.2.1 beschriebenen Konzeptes des Spreizmeißels wurden im Rahmen von Vorversuchen die relevanten Einflußgrößen auf die Funktionsfähigkeit des Spreizmeißels bestimmt. Hinsichtlich der Gestaltung des Spreizmeißels sind folgenden Faktoren relevant:

- Die Form der Wirkelemente, welche zur Nutzung und Generierung von Angriffsflächen eingesetzt werden.
- Die Auslegung der Kinematik, die das Verhältnis der Präge- zur Trennkraft bestimmt.

Die Wirkelemente des Spreizmeißels können hinsichtlich des Materials (z. B. Elastomer oder Hartmetall) und ihrer Formgebung sehr unterschiedlich ausgeführt sein. Für die

Demontage sollten die Wirkelemente jedoch prioritär auf das produktneutrale Trennen von Kunststoffgehäusen ausgelegt sein, da diese Aufgabe eine wichtige aktuelle Problemstellung der Recyclingpraxis darstellt (vgl. Kap. 2). Deshalb wurde die in Bild 35 dargestellte Gestaltung der Wirkelemente gewählt.



Bild 35: Gestaltung der Wirkelemente des Spreizmeißels unter besonderer Berücksichtigung des Einsatzes zum Öffnen von Kunststoffgehäusen

Zum besseren Eingriff in Trennfugen und zum schnellen Eindringen in Kunststoffoberflächen (Schaffung von Angriffsflächen) verfügen die Wirkelemente über ein kurzes Spitzelement. Um das Durchdringen der Kunststoffelemente zu verhindern, wurden Auflageelemente vorgesehen. Eine Wechselvorrichtung ermöglicht desweiteren den schnellen Austausch der Wirkelemente, z. B. bei Verschleiß.

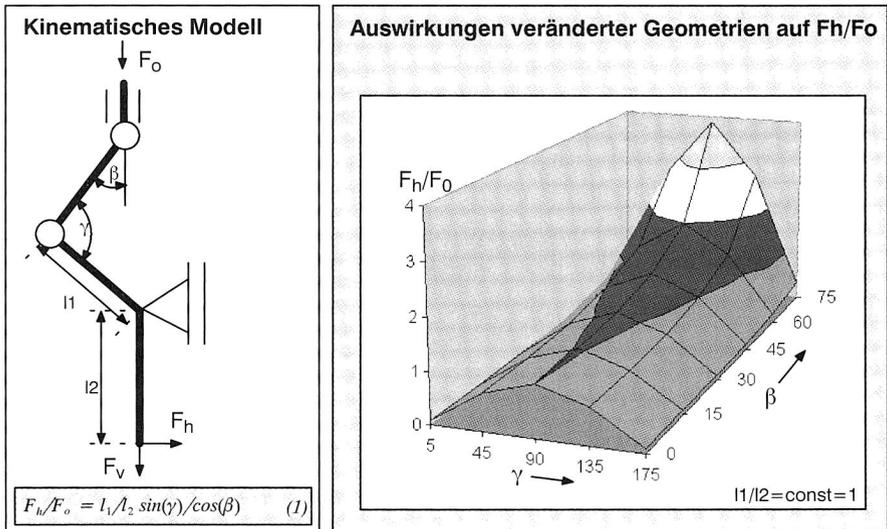


Bild 36: Theoretische Auswirkungen veränderter Hebelgeometrien und eines veränderten Impulsverhältnisses auf die übertragbare Trennkraft des Spreizmeißels

Die Umsetzung der Wirkkraft in Prägekraft und Trennkraft wird maßgeblich durch die Auslegung der Kinematik des Spreizmeißels bestimmt. Hierbei muß beachtet werden, daß einerseits die Prägekraft hoch genug sein muß, um einen Formschluß mit vorhandenen oder generierten Angriffsflächen zu gewährleisten. Andererseits muß die Trennkraft ausreichen, um den Demontageprozess durchzuführen.

In Bild 36 ist ein kinematisches Modell des Spreizmeißels dargestellt. Die kinematischen Eigenschaften des abgebildeten Systems können durch das Hebelverhältnis  $l_1/l_2$  sowie durch die Winkel  $\beta$  und  $\gamma$  beschrieben werden. Die theoretische Abhängigkeit der Trennkraft  $F_h$  von diesen Größen ist in Gleichung 1 aufgezeigt. Für den Fall eines konstanten Hebelverhältnisses ist in Bild 36 der Verlauf von  $F_h/F_0$  bei einer Variation der Winkel  $\beta$  und  $\gamma$  wiedergegeben. Es ist deutlich zu erkennen, daß eine optimale theoretische Umsetzung der Eingangskraft in eine Trennkraft bei  $\gamma = 90^\circ$  und bei einem möglichst großen Winkel  $\beta$  erfolgt.

Neben der optimalen Gestaltung des Spreizmeißels spielt auch die Art der Krafteinbringung eine wesentliche Rolle. Die Eingangskraft wird nur kurzzeitig benötigt, so daß eine impulsartige Krafteinbringung ideal ist. Hierbei muß jedoch das Verhältnis des Impulses zu dem Gewicht des Spreizmeißels beachtet werden, da dadurch Effizienzverluste entstehen können.

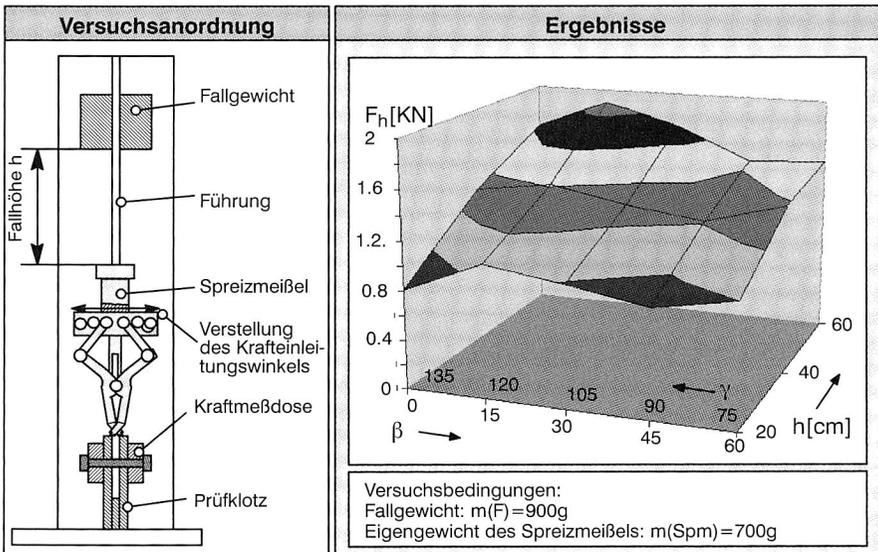


Bild 37: Versuchsaufbau und Versuchsergebnisse zur Prozeßanalyse beim Einsatz des Spreizmeißels

Um diesen Effekt und die Auswirkungen veränderter Hebelgeometrien in der praktischen Anwendung beurteilen zu können, wurden Versuche mit dem in Bild 37 links

dargestellten Versuchsaufbau durchgeführt. Mit einem Fallgewicht wird ein definierter Impuls auf den Spreizmeißel übertragen. Gemessen wird die jeweils in dem Prüfklotz resultierende Trennkraft.

Bei den Versuchen wurden folgende Parameter variiert, um die Einflüsse auf die übertragbare Trennkraft zu ermitteln:

- Der Eingangsimpuls (durch eine veränderte Fallhöhe des Fallgewichtes).
- Der Kräfteinleitungswinkel und damit die Hebelgeometrie des Spreizmeißels.

Die Ergebnisse der Versuche sind in Bild 37 dargestellt. Wie daraus ersichtlich, ist die jeweils übertragene Trennkraft nahezu linear von dem Eingangsimpuls abhängig. Erwartungsgemäß bedeutet eine Verdoppelung oder Verdreifachung des Eingangsimpulses jedoch keine gleichwertige Steigerung der Trennkraft. Dies ist einerseits auf die Eigenmasse des Spreizmeißels zurückzuführen, andererseits treten durch Reibung in den Gelenken des lediglich prototypisch realisierten Spreizmeißels hohe Reibwerte auf, die eine erhebliche Dämpfung des Eingangsimpulses bewirken. Noch deutlicher wird dieser Effekt bei der Betrachtung der Abhängigkeit der Trennkraft von der Variation der Hebelgeometrie. Wie theoretisch - unter Vernachlässigung von Dämpfungen - aufgezeigt (Bild 36), müßte die Trennkraft bei  $\gamma = 90^\circ$  und großen Werten für  $\beta$  am höchsten sein. Bei den durchgeführten Versuchen war die maximale Trennkraft jedoch bei der Paarung  $\beta=15^\circ$  und  $\gamma=120^\circ$  zu beobachten. Eine Erklärung hierfür ist die Dämpfung des Gesamtsystems. So ist beispielsweise bei den theoretisch vorteilhaften Hebelgeometrien eine erhöhte Reibung in den Gelenken zu verzeichnen.

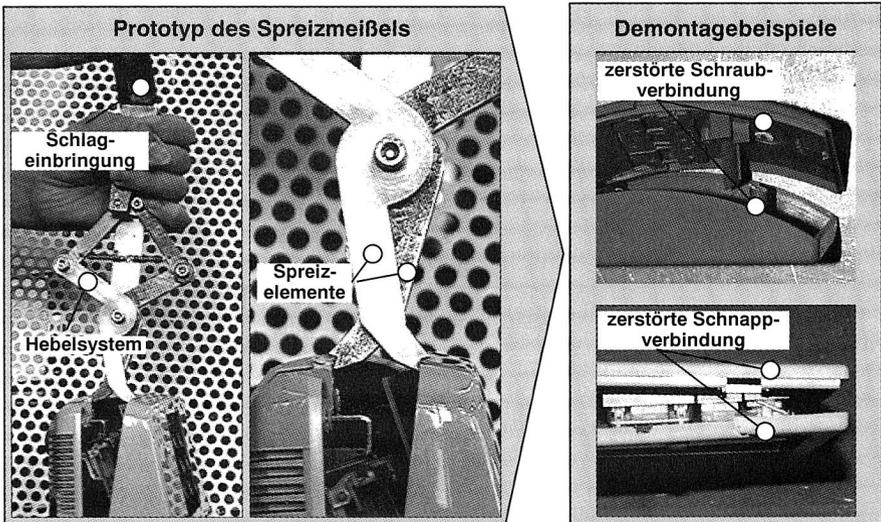


Bild 38: Prototyp des Spreizmeißels im praktischen Einsatz

Zur Optimierung des Spreizmeißels sind somit, neben einer verbesserten Hebelgeometrie, vor allem auch der Reibwert und die Traglast der Gelenkkomponenten sowie ein möglichst geringes Eigengewicht des Werkzeugs relevant.

Die Ergebnisse der beschriebenen Analysen und Versuche wurden in einen Prototypen umgesetzt, welcher im praktischen Einsatz erfolgreich erprobt wurde (Bild 38). Versuche in der Praxis zeigten, daß sich der Spreizmeißel vor allem für die Zerlegung von Kunststoffgehäusen kleinerer Elektro- und Elektronikgeräte eignet. Bei der Demontage wird zumeist das Gehäuse zerstört, indem beispielsweise Schraubstellen oder Schnappverbindungen ausreißen. Durch die flexible und effiziente Demontage mit dem Spreizmeißel sind somit erhebliche Demontagezeit- und Kostenersparnisse möglich.

#### 4.3.2 Gestaltung des Bohr-Entschraubwerkzeugs und Optimierung der Prozeßparameter

Zur optimierten Gestaltung des Bohr-Entschraubwerkzeugs und zur Ermittlung günstiger Prozeßparameter wurden theoretische Überlegungen und ausführliche Versuchsreihen durchgeführt. Die Anforderungen waren dabei, bei möglichst vielen Schraubenantrieben einen zur Lösung der Verbindung, ausreichenden Formschluß zu erzeugen und dabei die Zerspanungsfähigkeit des Werkzeugs zu erhalten.

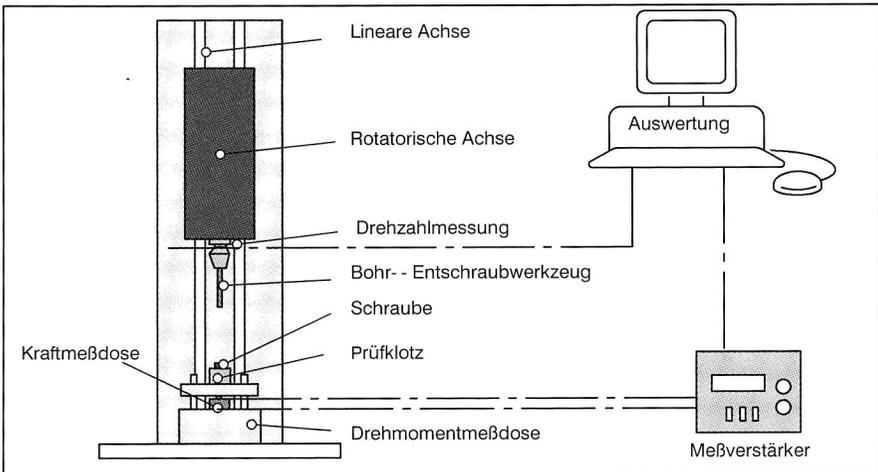


Bild 39: Versuchsaufbau zur Ermittlung der optimalen Geometrie und der optimalen Betriebsparameter des Bohr-Entschraubwerkzeugs

Die Versuche wurden mit dem in Bild 39 dargestellten Versuchsaufbau durchgeführt. Das Bohr-Entschraubwerkzeug wird über eine rotatorische Achse mit variabler Drehzahl angetrieben. Über eine lineare Achse wird eine variable Vorschubkraft zur Verfügung gestellt. In einem Prüfklotz können verschiedene Schraubenarten und -größen für

die Versuche fixiert werden. Gemessen werden das auf die Schrauben übertragene Drehmoment, die Vorschubkraft, die Drehzahl des Werkzeugs sowie der durchgeführte Vorschub der linearen Achse.

*Optimierung der Werkzeuggeometrie*

Die Geometrie der Wirkflächen des Bohr-Entschraubwerkzeugs hat einen wesentlichen Einfluß auf das übertragbare Drehmoment. Dadurch wird einerseits die Fähigkeit des Werkzeugs zur Nutzung vorhandener Angriffsflächen bei den unterschiedlichen Schraubenantrieben bestimmt. Andererseits wird durch die Schneidengeometrie die Generierung von Spanwurzeln sowie die Bohreigenschaften des Werkzeugs wesentlich beeinflusst.

Um diese Einflüsse abzuschätzen, wurden linksdrehende Bohrer mit unterschiedlichen Schneidengeometrien versehen und das jeweils übertragbare Drehmoment auf die unterschiedlichen Schraubenarten (bei konstanter Vorschubkraft) bestimmt. Dabei wurde eine Veränderung der Parameter Freiwinkel, Spanwinkel, Spitzwinkel durchgeführt und die die Verschleißanfälligkeit des Werkzeugs qualitativ beurteilt.

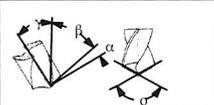
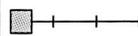
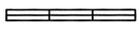
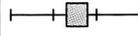
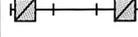
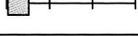
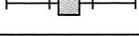
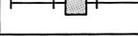
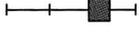
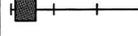
	Freiwinkel $\alpha$		Spanwinkel $\gamma$		Spitzenwinkel $\sigma$		
	Einfluß	opt. Bereich:	Einfluß	opt. Bereich:	Einfluß	opt. Bereich:	
		12° — 20°		10° — 40°		90° — 150°	
Kreuzschlitzschraube 							
Schlitzschraube 							
Innensechskantschraube 							
Außensechskantschraube 							
Resultierendes gew. Optimum							
<b>Klassifizierung des Einflusses:</b>							
	hoch		mittel		kaum erkennbar		aus dem Stand der Technik abgeleitet (Standard Bohrprozeß)

Bild 40: Auswirkungen verschiedener Schneidengeometrien des Bohr-Entschraubwerkzeugs auf das übertragbare Drehmoment

In Bild 40 sind die Ergebnisse der Versuche zusammengefaßt. Dabei ist, jeweils für die verschiedenen Schraubenantriebe, der Einfluß der Werkzeugwinkel auf das übertragbare Drehmoment dargestellt. Wenn ein signifikanter Einfluß erkennbar war, ist in der Abbildung der optimale Bereich der Winkel angegeben. Die für das Lösen von Sech-

kantschrauben geeignetsten Werkzeugwinkel wurden mit denen eines normalen Spiralbohrers gleichgesetzt, da es sich hierbei ebenfalls um einen Standard-Bohrprozess handelt.

Für jeden Schraubentyp wurde somit ein Teiloptimum hinsichtlich der Gestaltung des Bohr-Entschraubwerkzeugs ermittelt. Auf Basis der auftretenden Häufigkeit der untersuchten Schraubentypen bei Elektrokleingeräten (vgl. Kapitel 4.1) wurde eine Gewichtung dieser Teiloptima durchgeführt. Das resultierende Gesamtoptimum für die Werkzeuggeometrie des Bohr-Entschraubwerkzeugs ist in Bild 41 dargestellt. Um eine hohe Verschleißfestigkeit bei den stoßartigen Belastungen zu gewährleisten, wurde als Material zur Fertigung der Prototypen (vgl. 41 rechts) HSS-Co gewählt.

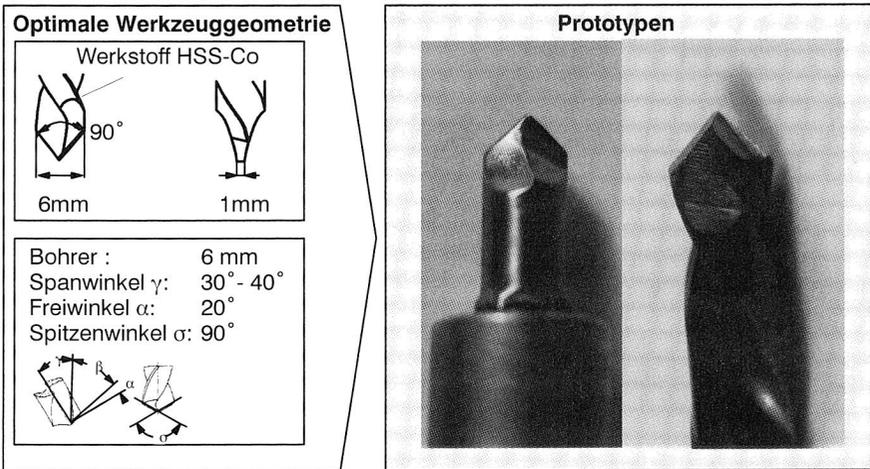


Bild 41: Optimierte Werkzeuggeometrie des Bohr-Entschraubwerkzeugs (links); Darauf basierende Prototypen (rechts)

#### Optimierung der Prozeßparameter

Mit dieser optimierten Werkzeuggeometrie wurden weitere Versuchsreihen durchgeführt, um den Einfluß der Prozeßparameter auf das übertragbare Drehmoment zu analysieren. Vorversuche ergaben, daß die wesentlichen prozeßspezifischen Einflußgrößen bei der Anwendung des Bohr-Entschraubwerkzeugs die Drehzahl des Werkzeugs und die Vorschubkraft sind.

Auf der Grundlage einer statistischen Versuchsplanung wurden für diese Parameter die Einflüsse auf das übertragbare Drehmoment bestimmt. In Bild 42 sind die resultierenden Einflüsse der veränderten Prozeßparameter auf die übertragbare Drehzahl klassifiziert. Es zeigt sich, daß die verschiedenen Schraubenarten zum Teil unterschiedliche Anforderungen hinsichtlich optimaler Prozeßparameter haben. Während sich bei Kreuzschlitz-, Schlitz- und Innensechskantschrauben eine niedrige Drehzahl vorteilhaft aus-

wirkt, weil dadurch vorhandene Formelemente besser genutzt werden können, erfordern Außensechskantschrauben eine hohe Drehzahl (Standardbohrprozeß). Die hohe Drehzahl wirkt sich zwar lediglich geringfügig auf das übertragbare Drehmoment aus, jedoch wird dadurch die Zerspanleistung gesteigert und dadurch die Zeit bis zu dem Erreichen des maximal möglichen Drehmomentes erheblich verkürzt. Eine hohe Anpreßkraft wirkt sich günstig auf das übertragbare Drehmoment aus. Grundsätzlich kann dabei festgestellt werden, daß die Abhängigkeit des Drehmomentes von der Anpreßkraft dann besonders hoch ist, wenn kaum nutzbare Formelemente des Schraubenantriebs zur Verfügung stehen. Die Versuche zeigten jedoch daß ein hoher Kraftbedarf nur kurzzeitig erforderlich ist. Deshalb können die Kräfte auch impulsartig, z.B. über kurze Schläge eingebracht werden.

Legende:	großer Einfluß mittlerer Einfluß geringer Einfluß	Drehzahl		Kraft	
		Einfluß	opt. Bereich: 100 [U/min] 900	Einfluß	opt. Bereich: 100 [N] 900
Außensechskantschraube					
Schlitzschraube					
Kreuzschlitzschraube					
Innensechskantschraube					

Bild 42: Auswirkungen der Prozeßparameter Drehzahl und Kraft auf das mit dem Bohr-Entschraubwerkzeug übertragbare Drehmoment

Die übertragbaren Drehmomente auf verschiedene Schraubenarten und -größen - bei einer jeweils optimalen Prozeßeinstellung - sind in Bild 43 dargestellt. Zum Vergleich sind ebenfalls die empfohlenen maximalen Anzugsmomente für metrische Standard-schrauben der Festigkeitsklasse 8.8 (Stahl-Stahl Paarung) eingezeichnet /83/. Dabei muß jedoch beachtet werden, daß das Lösemoment normalerweise geringer als das Anzugsmoment ist /105/. Eine in /132/ vorgestellte Untersuchung zeigt sogar, daß das Lösemoment bei M5-Schrauben im Durchschnitt lediglich 2,52 Nm beträgt. Wie in Bild 43 zu erkennen ist können die meisten Schraubenarten, die bereits nutzbare Formelemente aufweisen (Innensechskant-, Schlitz-, und Kreuzschlitzschrauben) - auch wenn sie mit dem maximalen Anzugsmoment eingeschraubt wurden - gelöst werden. Bei Außensechskantschrauben konnte ein Drehmoment von 2,1 Nm bei einer Anpreßkraft von 900 N übertragen werden. Gerade bei dieser Schraubenart kann jedoch noch eine erhebliche Steigerung durch eine impulsartige Kräfteinbringung erreicht werden.

In Bild 43 sind ebenfalls typische Momentenverläufe in Abhängigkeit von dem Drehwinkel des Werkzeugs bezüglich des festgespannten Schraubenkopfes wiedergegeben.

Insbesondere bei Kreuzschlitz- und bei Schlitzschrauben ist ein deutlicher Anstieg des Drehmomentes bei dem jeweiligen Eingriff des Werkzeugs in vorhandene Formelemente erkennbar. Der Vorgang wiederholt sich, bis keine Formelemente mehr vorhanden sind und das Werkzeug nur noch zerspannt. Bei Außensechskantschrauben ist das übertragbare Drehmoment zunächst gering, da die Bohrspitze erst in den Werkstoff eindringen muß. Danach bleibt das Drehmoment relativ konstant.

In Bild 43 sind weiterhin Beispiele für Schrauben abgebildet, die unter Einsatz des Bohr-Entschraubwerkzeugs gelöst wurden. Die Spanbildung bei den entsprechenden Schraubentypen ist deutlich zu erkennen.

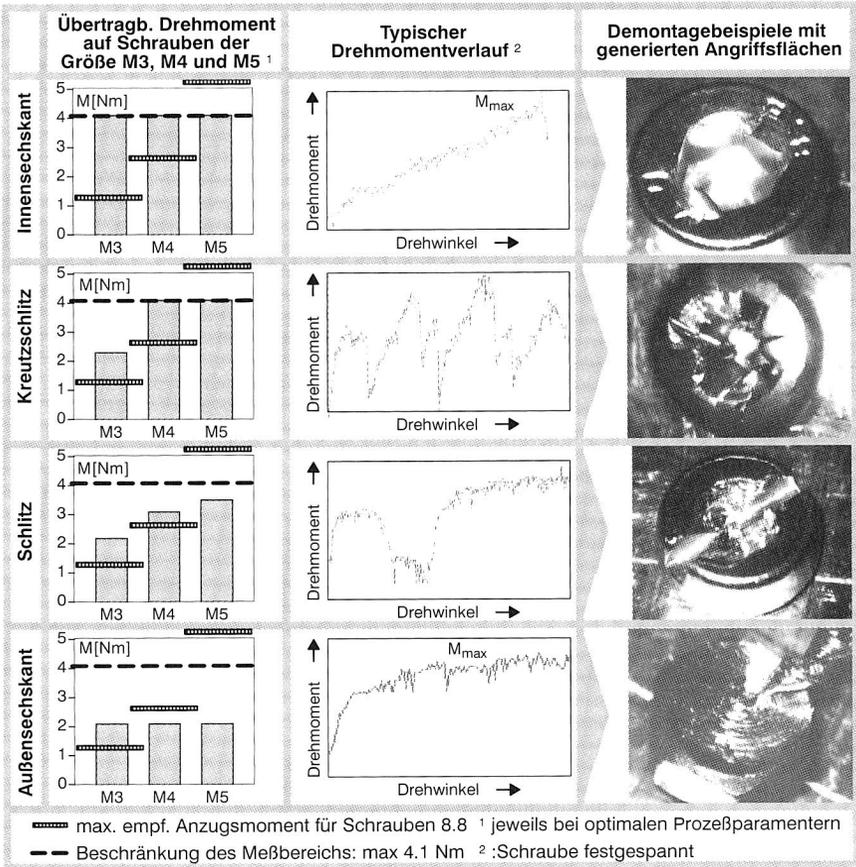


Bild 43: Übertragbares Drehmoment auf verschiedene Schraubenantriebe, typische Drehmomentverläufe sowie Beispiele für demontierte Schrauben

## 4.4 Integration flexibler Demontagewerkzeuge in automatisierte Systeme am Beispiel des Bohr-Entschraubwerkzeugs

Wie in dem vorhergehenden Kapitel gezeigt, ist durch die entwickelten Demontagewerkzeuge eine erhebliche Steigerung der Effizienz und der Flexibilität bei Demontagevorgängen möglich. Diese Eigenschaften sind jedoch bei der Automatisierung von Demontagevorgängen besonders relevant, da dadurch eine Automatisierung vereinfacht oder unter Umständen sogar erst ermöglicht werden kann.

Diese Möglichkeiten werden im folgenden exemplarisch am Beispiel der Realisierung eines flexiblen teilautomatisierten Entschraubmoduls auf der Basis des Bohr-Entschraubwerkzeugs diskutiert.

### Konzeption des flexiblen Entschraubmoduls

Die wesentliche Zielsetzung bei der Entwicklung eines flexiblen Entschraubmoduls war es, die spezifischen Eigenschaften des Bohr-Entschraubwerkzeugs auch für automatisierte Lösungen verfügbar zu machen. Dazu wurde ein strategiebasiertes System konzipiert, welches in der Lage ist, flexibel und ohne Benutzereingriff eine Vielzahl von Schraubverbindungen zu lösen oder alternativ dazu Verbindungen aufzubohren. Dabei wurde eine manuelle oder automatisierte Positionierung des Moduls zu der jeweiligen Verbindung bereits vorausgesetzt und nicht in die Entwicklung einbezogen.

Die besonderen Eigenschaften des Bohr-Entschraubwerkzeugs erfordern bei dessen Integration in ein automatisiertes System eine daran angepaßte Auswahl und Auslegung der Systemkomponenten. So müssen beispielsweise die zum Betrieb des Bohr-Entschraubwerkzeugs erforderlichen Elementarfunktionen Kraft, Translation, Drehmoment und Rotation durch die geeignete Antriebseinheit bereitgestellt werden. Dies wurde durch eine Kopplung einer linearen und einer rotatorischen Einheit, realisiert.

Die lineare Antriebseinheit muß für ein entsprechendes Entschraubmodul in der Lage sein, eine Kraft von mindestens 1000 N aufzubringen. Weiterhin muß damit sowohl eine weg- als auch eine kraftgesteuerte Verfahrensweise durchführbar sein, um eine Nachgiebigkeit des Systems bei dem Herausdrehen der Schraube zu ermöglichen. Deshalb wurde hierzu eine servopneumatische Achse gewählt, welche diese Vorteile in sich vereint.

Die Anforderungen an die rotatorische Achse sind insbesondere eine regelbare Drehzahl zwischen ca. 100 und 1500 U/min und die Verfügbarkeit eines Drehmomentes von mindestens 10 Nm. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, wurde ein System aus einem Wechselstrom-Reihenschlußmotor und einem angebauten Getriebe gewählt. Der Antrieb wird von einer Regelelektronik gesteuert, die Spannungsvorgaben von einer PC-Einsteckkarte in entsprechende Steuerimpulse umsetzt. Als Standardschnittstelle zu dem Bohr-Entschraubwerkzeug wurde ein handelsübliches Bohrfutter eingesetzt. Der gesamte Aufbau des flexiblen Entschraubmoduls ist in Bild 44 dargestellt.

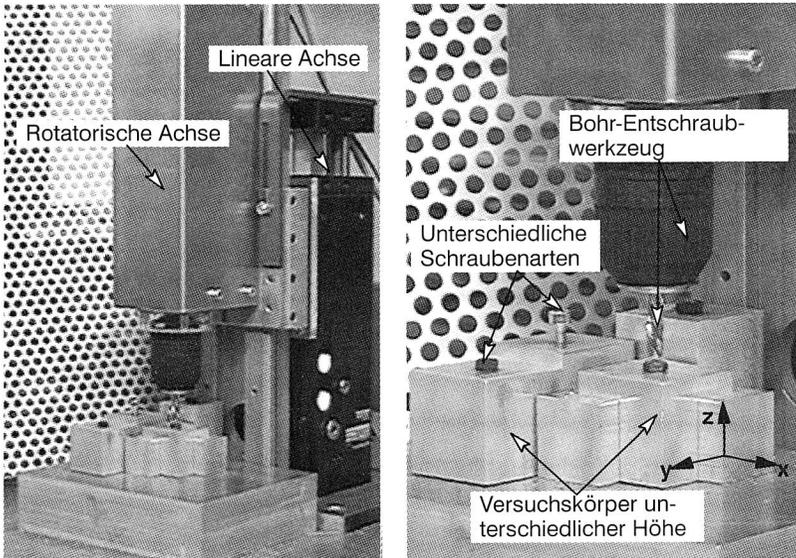


Bild 44: Teilautomatisiertes Demontagesystem zur Lösung unterschiedlicher Schraubenarten

### Implementierung einer flexiblen Steuerung

Die spezifischen Eigenschaften des Bohr-Entschraubwerkzeugs erfordern für ihre optimale Umsetzung in einem automatisierten System eine vergleichsweise komplexe Steuerung, die abhängig vom Prozeßverlauf unterschiedliche Demontagestrategien aktiviert. Als Basis für die Entwicklung der Steuerung diente ein entsprechend ausgerüsteter Industrie-PC mit einer speziell für diese Aufgabenstellung entwickelten Software. Die Implementierung der kompletten Steuerung wurde auf der Basis des Programmiersystems "Labview" unter dem Betriebssystem Windows 95 durchgeführt.

Als Eingangsinformationen für die Steuerung dienen dabei Prozeßdaten, die durch die Messung der aktuellen Anpreßkraft und Position der linearen Achse sowie der Drehzahl gewonnen werden. Auf der Basis dieser Kennwerte erfolgt eine strategiebasierte Ansteuerung der Sollwerte hinsichtlich Drehzahl der rotatorischen Achse und Vorschub bzw. Preßkraft der Linearachse. In Bild 45 ist der strategiebasierte Ansatz in einem Flußdiagramm zusammen mit typischen Verläufen der Prozeßparameter "Anpreßkraft", "Drehzahl", und "Verfahrweg (z)" dargestellt.

In dem Modul "Verbindung suchen" wird die rotatorische Einheit mit geringem, kraftgesteuertem Vorschub verfahren, bis das Bohr-Entschraubwerkzeug auf die Verbindung trifft und damit die Startposition erreicht ist. Danach wird mit geringer Drehzahl und mäßiger Anpreßkraft versucht, ob vorhandene Formelemente bereits zum Ausdrehen der Schraube genutzt werden können. Dies ist insbesondere bei Kreuzschlitz-, Schlitz-,

Innensechskant-, und Torxschrauben der Fall. Die erfolgte Lösung der Schraube wird als Rückstoß über die Wegmessung registriert und bedingt den Übergang zu dem "Ausdrehmodul".

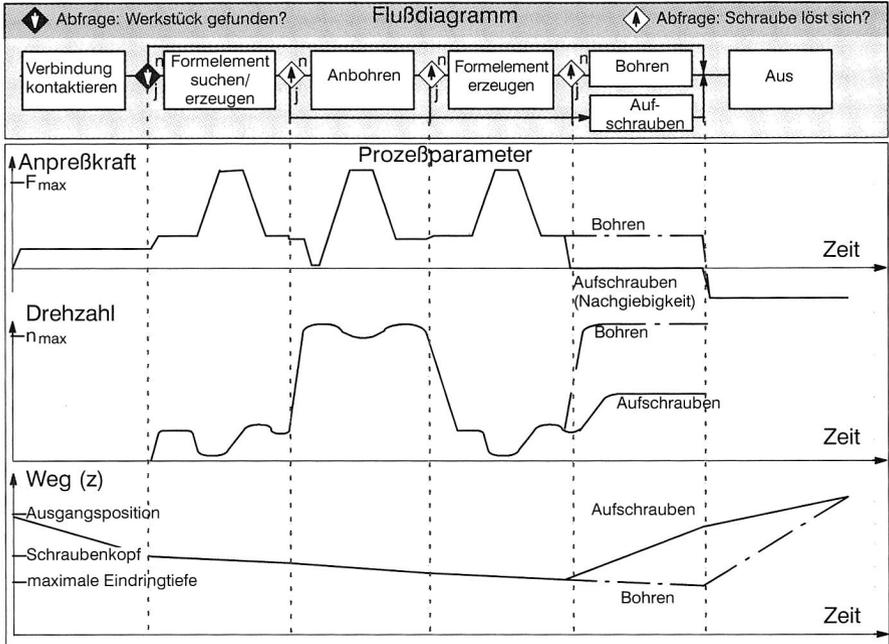


Bild 45: Flußdiagramm und Verläufe der Prozessparameter zur strategiebasierten Ansteuerung des flexiblen Entschraubmoduls

Falls kein Rückstoß erfolgte, wird mit dem Modul "Anbohren" unter hoher Drehzahl eine vorgegebene Tiefe gebohrt, um im Anschluß daran mit dem Modul "Formelemente erzeugen" wirksame Angriffsflächen zur Drehmomentübertragung zu generieren. Die kurzfristige Erhöhung der Anpreßkraft in diesen Modulen soll die Bildung großer Spanwurzeln, die als Formelemente genutzt werden können, verstärken.

Falls die Schraube dadurch gelöst werden kann, wird sie mit dem Modul "Ausdrehen" unter geringer Anpreßkraft (Simulation einer Nachgiebigkeit in z-Richtung) vollständig ausgeschraubt. Ist hingegen eine Lösung der Schraube nicht möglich oder nicht vorgesehen (z.B. bei Nietverbindungen), so wird im Modul "Bohren" der Kopf des Verbindungselementes abgebohrt.

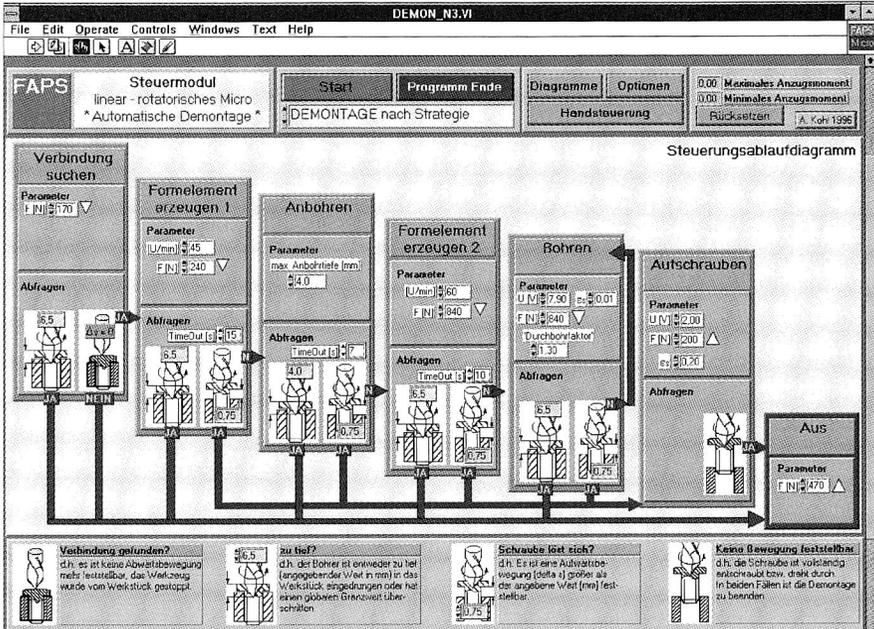


Bild 46: Benutzeroberfläche zur Bedienung und zur Parameterkonfiguration des flexiblen Entschraubmoduls

In Bild 46 ist die Oberfläche zum Editieren der Parameter der Bohr-Entschraubfunktion dargestellt. Entsprechend den Unterpunkten des Flußdiagramms, welche die einzelnen Strategien repräsentieren, werden verschiedene Grenzwert- und Schwellwertabfragen durchgeführt, die zur problemspezifischen Anpassung verändert werden können.

### Einsatzmöglichkeiten des flexiblen Entschraubmoduls

Versuche mit dem realisierten Entschraubmodul zeigten, daß Kreuzschlitz-, Schlitz-, Innensechskant, und Torxschrauben der Größen M3-M5, welche mit dem empfohlenen maximalen Anzugsmoment festgedreht wurden, problemlos gelöst werden können. In einigen Fällen war die Lösung von Außensechskantschrauben mit den bisher angewandten Parameterkombinationen nicht möglich, so daß der Schraubenkopf abgebohrt werden mußte.

Mit dem beschriebenen System wurde somit ein wichtiger Ansatzpunkt zur flexiblen teilautomatisierten Demontage von Schrauben aufgezeigt. Die Vorteile des Entschraub-

moduls auf der Basis des Bohr-Entschraubwerkzeugs sind vor allem in folgenden Punkten zu sehen:

- Durch die Flexibilität des Wirkkörpers werden Werkzeugwechsel vermieden.
- Für den Demontageprozeß ist die Schrauben- bzw. Verbindungsart in einem gewissen Bereich unerheblich, wodurch eine wesentliche Reduktion der benötigten Produkt- oder Sensordaten erfolgen kann.
- Die erhöhte Neigung des Werkzeugs zur Selbstzentrierung steigert die Prozeßsicherheit. Diese wird weiterhin dadurch erhöht, daß auch bei unsicheren Betriebsbedingungen (Korrosion, Verschmutzung, veränderte Schraubenart) eine Lösung der Verbindung erfolgen kann.

Aufgrund dieser Eigenschaften ist das flexible Entschraubmodul auch für den Einsatz in größeren automatisierten Demontagesystemen geeignet.

## 5 Methoden zur recyclingorientierten Produktanalyse

Zur Effizienzsteigerung bei Demontage und Recycling kommt, neben der Entwicklung neuer spezifischer Technologien, der optimierten Demontageplanung und vor allem der recyclinggerechten Produktgestaltung eine besondere Bedeutung zu /61/, /63/. Durch die Entwicklung eines rechnergestützten Systems, welches auf der Basis gemeinsamer Daten beide Zielsetzungen - die optimierte Recycling- und Demontageplanung und die recyclinggerechte Produktgestaltung - unterstützt, soll im Rahmen dieser Arbeit ein Beitrag zur Umsetzung effizienter hochwertiger Recyclingkreisläufe geleistet werden.

In diesem Kapitel werden zunächst die wesentlichen Einflußgrößen auf die Recyclinggerechtheit von Produkten dargestellt. Danach wird der Stand der Forschung im Bereich der recyclingorientierten Produktanalyse anhand der wichtigsten Methoden und aktuellen Ansätze dokumentiert. Auf der Basis bestehender Defizite wird in Kapitel 5.3 ein integriertes Grundkonzept zur recyclingorientierten Produktanalyse für die Demontageplanung und die Optimierung der Produktgestaltung entworfen.

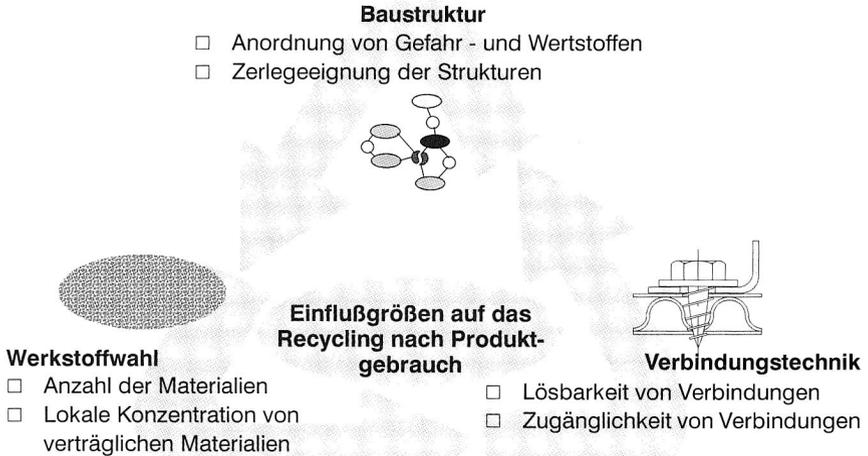
### 5.1 Einflußgrößen auf die Recyclinggerechtheit von Produkten

Der Aufbau und die Gestaltung eines Produktes haben einen ganz wesentlichen Einfluß auf dessen Demontage- und Recyclingfähigkeit. Die Haupteinflußgrößen auf die Nachgebrauchsphase sind vorwiegend in der Werkstoffwahl für die Komponenten, in der Baustruktur und in der Wahl der Verbindungstechniken zu sehen (Bild 47) /53/, /69/.

In Bezug auf die Materialauswahl kommt, neben der Vermeidung von Schadstoffen, der Bildung von möglichst großen materialkompatiblen Bauteilverbänden eine wesentliche Bedeutung zu. In diesem Zusammenhang spielt neben der Art der verwendeten Materialien auch deren Anzahl eine wichtige Rolle. Besonders positiv wirkt es sich aus, wenn das komplette Produkt bereits aufgrund seiner Materialzusammensetzung ohne Demontage hochwertigen Recyclingprozessen zugeführt werden kann. Wenn eine Bildung von materialkompatiblen Bauteilverbänden nicht möglich ist, sollten Materialien mit deutlich unterschiedlichen Stoffeigenschaften (Dichte, etc.) eingesetzt werden, um eine effiziente Behandlung mit mechanischen Aufbereitungsverfahren zu gewährleisten.

Die verwendeten Verbindungstechniken haben demgegenüber einen maßgeblichen Einfluß auf den Demontageaufwand. Hierbei sind jedoch nicht alle Verbindungen relevant, sondern nur diejenigen, welche tatsächlich demontiert werden müssen. Insbesondere diese Unterscheidung zwischen demontagerlevanten und -irrelevanten Verbindungen bereitet in der Praxis Probleme. Der Demontageaufwand für die jeweiligen Verbindungen hängt vorwiegend von der eingesetzten Verbindungsart ab. Darüber hinaus können aber auch weitere Faktoren, wie die Zugänglichkeit, die Demontagerichtung sowie die Anzahl gleicher Verbindungselemente die Demontagefähigkeit stark beeinflussen.

Die Baustruktur eines Produktes sollte so gestaltet sein, daß eine schnelle und einfache Zerlegung in Recyclinggruppen erfolgen kann. Weiterhin sollten schadstoff- oder wertstoffhaltige Bauteile möglichst so angeordnet werden, daß sie leicht zugänglich sind. Gleiches gilt für Bauteile die potentiell wiederverwendbar sind. Desweiteren wirkt sich ein Produktaufbau, bei dem Zwangsreihenfolgen vermieden werden, positiv auf die Demontagefähigkeit des Produktes aus.



*Bild 47: Haupteinflußgrößen der Produkteigenschaften auf das Recycling nach Produktgebrauch*

Neben den dargestellten Haupteinflußgrößen existieren noch weitere recyclingrelevante Gestaltungsfelder zur Optimierung der Produktgestaltung. Hierzu gehört u. a. die Berücksichtigung von Lebensdaueraspekten, die insbesondere für die Wieder- oder Weiterverwendung von Bauteilen oder Baugruppen relevant sind. So ist es beispielsweise sinnvoll, die Lebensdauer von Komponenten aufeinander abzustimmen und anzugleichen. Verschleißbauteile mit ähnlicher Lebensdauer sollten zusammengefaßt und gut zugänglich angeordnet werden.

Ein anderer wichtiger Aspekt ist die Bereitstellung recyclingrelevanter Informationen für die Entsorgungsphase. Hierzu gehören Angaben zu den eingesetzten Werkstoffarten, zum Produktaufbau, Hinweise auf demontagerelevante Bauteile (z. B. wertstoffhaltige, gefahrstoffhaltige oder wiederverwendbare Bauteile) und die Spezifikation der Verbindungstechniken in einem Produkt.

Hinsichtlich der dargestellten Einflußgrößen existieren eine Reihe von Gestaltungsrichtlinien zur recyclinggerechten Produktgestaltung, welche entweder, wie in Tabelle 1 beispielhaft dargestellt, allgemein formuliert oder spezifisch auf Produktgruppen

(z. B. Automobile /103/ oder elektronische Baugruppen /110/) ausgerichtet sind. Zu den im Rahmen dieser Arbeit nur kurz vorgestellten Aspekten der recyclinggerechten Produktentwicklung existieren umfangreiche Grundlagenwerke und Forschungsarbeiten /25/, /53/, /63/, /69/, /80/, /103/, /104/, auf die hier nur verwiesen werden soll.

Bereich	Gestaltungsmaßnahmen
□ Verbindungstechnik	Einsatz einfach demontierbarer oder zerstörbarer Verbindungselemente
	Zeitparallele Demontage mehrerer Verbindungsstellen
	Minimierung der Anzahl der Verbindungselemente
	Zugänglichkeit sichern
	Einheitliche Demontagerichtungen vorsehen
	Einsatz gleicher Verbindungselemente
□ Baustruktur	Direkte Zugänglichkeit zu recyclingrelevanten Bauteilen ermöglichen
	Strukturierung des Produkts in Gruppen der selben Recyclingstrategie (sogenannte Recyclinggruppen)
	Zugänglichkeit und Trennbarkeit der Recyclinggruppen
	Vermeiden von Zwangsreihenfolgen
□ Materialauswahl	Anstreben eines Einstoffprodukts
	Geringe Materialvielfalt
	Lokale Konzentration von Bauteilen mit gleichen Recyclingeigenschaften
	Verwendung von verträglichen oder gut mechanisch trennbaren Materialien
	Vermeidung von Gefahrstoffen
	Berücksichtigung von Materialermüdungs- und Aufarbeitungsaspekten
□ Lebensdaueraspekte	Modularisierung von Produkten
	Beachtung von Innovationssprüngen, d.h. Abschätzung der technologischen Lebensdauer
	Zusammenfassung von Verschleißbauteilen mit ähnlichen Lebensdauern
	Beachtung von Standards
□ Information	Bereitstellung von Information zu Werkstoffarten, Produktaufbau und eingesetzten Verbindungstechniken
	Kennzeichnung zur Ermöglichung der Zuordnung bereitgestellter Informationen

Tabelle 1: Allgemeine Gestaltungshinweise für die recyclinggerechte Produktgestaltung (ergänzt nach /45/und /110/)

Es existieren bereits einige wenige Beispiele für demontage- und recyclinggerechte Produkte. Beispielhaft seien hier zwei Produktkonzepte erwähnt: Mit dem sogenannten HP-Packaging /117/ werden statt konventioneller Verbindungselemente geschäumte Teile eingesetzt, welche durch Formschluß die verschiedene Baugruppen in einem Gehäuse fixieren. Eine nach diesem Konzept realisierte Workstation weist eine Demontagezeitreduktion von 90% auf /58/. Ein anderes Konzept, bei welchem die Materialkompatibilität des Produktes im Vordergrund steht, ist der sogenannte "Stahlfernseher" von Loewe Opta /54/. Hierbei wird statt eines konventionellen Kunststoffgehäuses ein Gehäuse aus Stahlblech gewählt und die Materialzusammensetzung der restlichen Bau-

gruppen soweit wie möglich auf die Erfordernisse der Prozesse des Stahlrecyclings abgestimmt /108/.

## **5.2 Methoden und Werkzeuge zur Bewertung der Recycling- und Demontageeignung von Produkten**

In Forschung und Praxis existieren eine Reihe von Methoden und Ansätzen, um Produkte hinsichtlich ihrer Recyclinggerechtigkeit zu analysieren, zu bewerten und zu optimieren. Die Verfahren unterscheiden sich deutlich bezüglich der benötigten Eingangsinformationen, der Analysesystematik, der Art und Strukturierung der Ergebnisse sowie im Grad der Unterstützung des Anwenders. Die Vielzahl an Kriterien, welche zur Produktbewertung zugewiesen und ausgewertet werden müssen, bedeutet für eine manuelle Produktanalyse einen erheblichen Aufwand. Um den Analyseaufwand gering zu halten, sehen viele Ansätze eine Rechnerunterstützung vor.

Im folgenden soll ein Überblick über die wichtigsten Ansätze zur Ermittlung und Bewertung der Demontage- und Recyclingfähigkeit dargestellt werden.

### **5.2.1 Methoden zur qualitativen Produktbewertung**

Methoden zur qualitativen Beurteilung von Produkten hinsichtlich der Recycling- und Demontageeignung erlauben, auf der Basis von allgemeinen Aussagen oder Kennzahlen, lediglich eine Vergleichbarkeit von Produktentwürfen /31/.

Ein allgemeines Hilfsmittel zur qualitativen Produktbewertung ist die Nutzung von Checklisten, in welchen Grundregeln der recyclinggerechten Produktgestaltung für die praxisbezogene Anwendung aufbereitet werden. Ein Checklisten-system wurde beispielsweise von Steinhilper et. al. /127/,/125/,/36/,/126/ konzipiert. Ziel ist zunächst umfangreiche Regelkataloge zu unterschiedlichen Aspekten der recyclinggerechten Konstruktion mit verschiedenen Anwendungsbereichen zu erstellen. In einem weiteren Schritt wird ein System entwickelt, das für zu bewertende Produkte automatisch die relevanten Checklisten und die zu überprüfenden Punkte ermittelt und dem Anwender zur Verfügung stellt.

Einen anderen checklistenbezogenen methodischen Ansatz verfolgt Luttrupp /57/, /56/. Über einen Fragenkatalog werden die relevanten Produktmerkmale erfaßt, auf deren Basis dann eine Recyclingvorhersage getroffen werden kann. Aus diesen Daten wird ein Verbindungsgraph von Recyclinggruppen erstellt, aus welchem dann Hinweise für den Konstrukteur zur recyclinggerechten Konstruktion abgeleitet werden.

Im Rahmen der VDI-Richtlinie 2243 /69/, welche in der Zwischenzeit eine weite Verbreitung in Forschung und Industrie gefunden hat, werden ebenfalls Vorgehensweisen, Hinweise und Methoden der recyclinggerechten Produktgestaltung zur Verfügung gestellt. Weitere mögliche qualitative Hilfsmittel, auf welche im Rahmen dieser Arbeit nicht

näher eingegangen werden soll, sind z. B. Tabellen mit recyclinggerechten Verbindungselementen, Fallbeispielkataloge und Materialverträglichkeitstabellen.

### 5.2.2 Werkzeuge zur quantitativen Produktbewertung

Im Rahmen von quantitativen Produktanalysen werden der Beurteilung Kostenberechnungen oder andere absolute Beurteilungsgrößen zugrundegelegt /31/. Die Produktanalyse erfolgt in der Regel mit dem Ziel, eine optimale Demontage- und Recyclingstrategie zu ermitteln, welche dann als Grundlage für die Bewertung und Optimierung der Recyclinggerechtigkeit von Produkten oder für eine Demontageplanung dienen kann.

Grundlagen zur Ermittlung und Bewertung von Demontage- und Recyclingstrategien wurden von Gehrmann /25/ aufgebaut. Dieser erstellt und bewertet Demontagestrukturpläne, die mögliche Demontagemaßnahmen und die jeweils resultierenden Bauteile und Baugruppen sogenannten Demontageebenen zuordnen.

Simon /122/ entwickelte eine Systematik zur Durchführung von Demontageanalysen auf der Basis der Produktstruktur. Zur Bewertung der Alternativen setzt er ein kennzahlbasiertes System ein, welches beispielsweise die Anzahl der eingesetzten Materialien oder das Verhältnis von Demontagezeit zu Bauteilwert für eine Bewertung zugrundelegt. Weiterhin schlägt Simon eine CAD-Anbindung des Systems vor /121/, um eine direkte Einbindung der Bewertung in den Konstruktionsprozeß zu erreichen.

Eine Weiterentwicklung stellt die von Tritsch /131/ vorgestellte Vorgehensweise zur Demontageplanung dar. Die Modellierung alternativer Demontageabläufe erfolgt in einem sogenannten Demontagegraphen, welcher Demontevorgänge und resultierende Baugruppen mit Zusatzinformationen abbildet /124/. Die Ablauflogik wird durch Logikelemente, nach der GERT Netzplantechnik, abgebildet (Bild 48). Zur Ermittlung der wirtschaftlichsten Demontagestrategie werden die Bauteile und Baugruppen einem hierarchischen Fraktionsgraphen zugeordnet und die potentiellen Erlöse mit den Demontagekosten gegengerechnet. Bei der Umsetzung des Algorithmus zur Ermittlung der kostenoptimalen Recyclingstrategie wurde zur Reduktion der Rechenzeiten eine benutzerorientierte Vorgehensweise gewählt, bei der eine manuelle Vorgabe von Demontagezielen (Schadstoffe oder Wertstoffe) erfolgt.

Der gleiche Ansatz wurde von Hartel /31/ hinsichtlich einer Verkürzung der Rechenzeit weiterentwickelt und als ein Bestandteil des Softwaresystems "REKON" eingesetzt. Die Bewertung von Produkten in REKON beruht auf den zwei Kennwerten "Konstruktionsstärke" und "Umweltstärke", welche in einem Portfolio klassifiziert werden. Die "Konstruktionsstärke" beurteilt die Demontageeignung und die Werkstoffwahl eines Produktes, wobei die Wertungskenngrößen "Komplexitätsbeiwert", "Verbindungsstrukturbeiwert", "Demontagestrukturbeiwert" und "Monostrukturbeiwert" ausgewertet werden. Die Umweltstärke wird aus den Kriterien "Ökopunkte", "Nutzungsdauer" und "Ressour-

cenkorrekturfaktor" gebildet und beschreibt den Grad der Umweltbeeinflussung durch das Produkt. Die grundlegenden Bestandteile des Bewertungsverfahrens zeigt Bild 49.

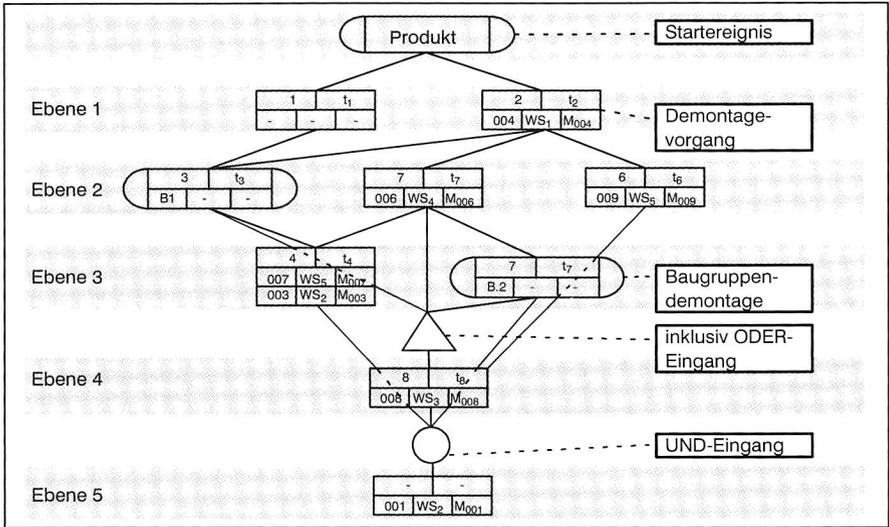


Bild 48: Demontagegraphen zur prozeborientierten hierarchischen Abbildung von Demontageschritten und Ergebnissen /131/

Die Berücksichtigung aller möglichen Demontagealternativen ist nach Kriwet /53/, Zussman und Seliger /140/ von essentieller Bedeutung zur Bestimmung und Bewertung der optimalen Demontage- und Recyclingstrategie. Den Kern der vorgeschlagenen Methodik bildet die Darstellung der Demontagereihenfolgebeziehungen in einem sogenannten "Rückgewinnungsgraphen", welcher auf der Systematik von AND/OR-Graphen basiert. Es werden alle möglichen Demontagereihenfolgen und -tiefen sowie die resultierenden Recyclingmöglichkeiten eines Produktes vollständig dargestellt. Zur Berücksichtigung des ökonomischen und des ökologischen Nutzens alternativer Recyclingstrategien und von zeitlichen Unsicherheiten wurde im Rahmen der Bewertung ein "multiattributiver nutzentheoretischer Ansatz" verwendet. An der Umsetzung des Konzeptes in ein rechnergestütztes System auf der Grundlage eines CAD-Systems wird zur Zeit gearbeitet /82/.

Das Softwaretool "LAsER" /42/, /41/ basiert auf der Darstellung der Struktur eines Produktes unter Nutzung eines semantischen Netzes. Unterstützt wird sowohl die Analyse der Recyclinggerechtigkeit als auch die Beachtung der Instandhaltung und der Montage. Nach der Produktabbildung werden Bauteile und Verbindungen mit den relevanten Daten hinterlegt. Vor einer Analyse muß der Anwender manuell Recyclinggruppen bilden und diese mit der sinnvollsten Verwertungsart verknüpfen. Das Programm stellt dann die Verwertungskosten und -erlöse den Demontagekosten gegenüber und ermit-

telt die Gesamtrecyclingkosten. Interessant ist, daß ausgehend von der gleichen abgebildeten Produktstruktur nach Eingabe weiterer Daten ebenfalls eine Analyse der Montagefähigkeit (nach der GE-Hitachi Methode) und der Serviceeignung des Produktes erfolgen kann. Nachteilig wirkt sich aus, daß LASeR derzeit nur in der Lage ist, vom Benutzer eingegebene Werte zu summieren, aufzuarbeiten und graphisch auszugeben.

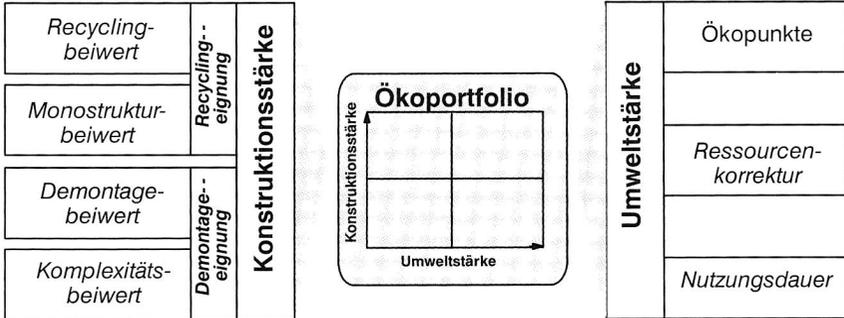


Bild 49: Grundstruktur des Bewertungssystems REKON /123/

Bei der Software ReStar /81/, /94/, /95/ (Recycling-Star), die an der Carnegie Mellon University in Pittsburg entwickelt wurde, wird das Produkt in einer sogenannten "disassembly table" dargestellt, in der für jedes Teil alle möglichen Demontagerichtungen eingetragen werden. Zu jeder nicht möglichen Demontagerichtung wird vermerkt, welche Komponente diese Richtung blockiert. Aus dieser Beschreibung generiert die Software einen Demontagebaum, der alle Demontagealternativen und -schritte enthält. Die in den Verbindungen hinterlegten Kosten und Zeiten sowie die für die Werkstoffe definierten Verkaufserlöse bzw. Entsorgungskosten werden zur Bewertung und Optimierung herangezogen. Das Verfahren bietet desweiteren die Möglichkeit, alternative Demontagepfade unter Berücksichtigung verschiedener Szenarien der Rahmenbedingungen zu analysieren. Es werden jedoch nicht alle möglichen Demontagepfade bestimmt, sondern nur die, die benötigt werden, um jedes Bauteil auf dem einfachsten Weg zu Reparaturzwecken aus dem Produkt herauszulösen. Dadurch werden aber u. U. wirtschaftlichere Demontagepfade, beispielsweise zur Bildung von materialkompatiblen Fraktionen nicht berücksichtigt.

Das Software-Werkzeug "TOPROCO" (Total Product Life-Cycle Cost Estimation) /6/, /5/ soll die Gesamtkosten eines Produktes während des Lebenszyklusses erfassen. Ein wichtiger Bestandteil ist hierbei die Nachgebrauchsphase. Nach der Produktmodellierung in Form eines Netzes (über eine graphische Schnittstelle oder durch Nutzung von Stücklisten) erfolgt die Zuweisung von Materialdaten, die in der integrierten Materialdatenbank definiert sind (Bild 50). Diese Datenbank enthält Daten zur Werkstoffdichte, Zusammensetzung von Fraktionen, Werkstoffpreise und Umweltgefährdung. Danach werden die Verbindungselemente und logische Abhängigkeiten zwischen den Bautei-

len definiert. In der anschließenden "Clumping Session" kann der Benutzer Gruppen von Bauteilen definieren, denen beim Recyclingprozeß dieselbe Verwertungsart zugeordnet wird. Damit wird vermieden, daß durch einen Algorithmus alle Demontagealternativen bestimmt und bewertet werden müssen. Zur Unterstützung bei der Bildung der Bauteilgruppen kann der Anwender ein "Support-Fenster" öffnen, welches mögliche Fraktionen und Erlöse für die aktive Bauteilgruppe zeigt. Das Programm berechnet dann die kostenoptimale Demontagestrategie. Ergebnisse mehrerer Produktvarianten können miteinander verglichen werden.

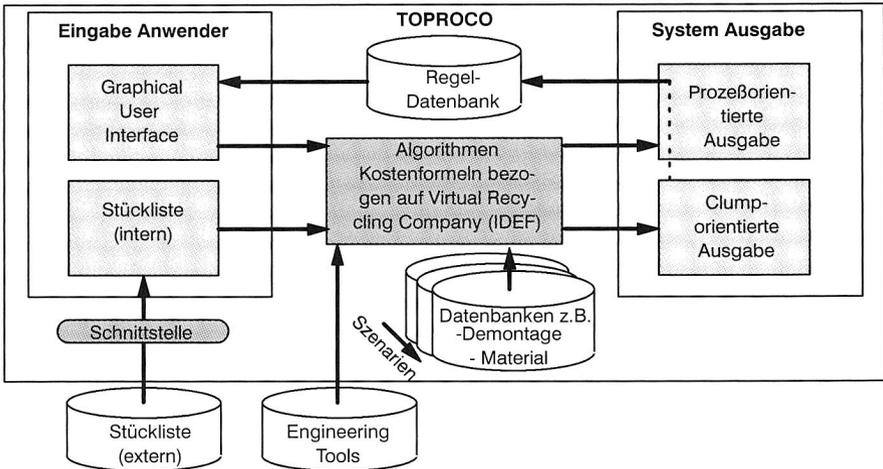


Bild 50: Konzept der Software TOPROCO /5/

Von Boothroyd und Dewhurst wurde zusammen mit dem niederländischen Institut TNO das Tool "Design for Environment" entwickelt. Das Werkzeug stellt eine Weiterentwicklung der Werkzeuge "Design for Disassembly" (DFD) und "Design for Service" (DFS) [7], [30] dar. Zur Durchführung einer Analyse muß der Benutzer zunächst alle Komponenten und Demontageoperationen in der Reihenfolge der Demontage tabellarisch festlegen. Alternativ besteht die Möglichkeit, die Bauteilliste von Boothroyd Dewhurst's "Design for Assembly" (DFA) Software zu übernehmen. Die graphische Darstellung der Produktstruktur ist nicht vorgesehen. Für jedes Teil und jede Demontageoperation werden Vorgabezeiten für Werkzeugeinsatz und Ausführung der Operation vergeben. Danach sind die Demontageoperationen und der Einfluß auf die Umwelt genauer zu spezifizieren. Zur Festlegung der Demontagefreundlichkeit werden Kriterien wie Zugänglichkeit, Sichtbarkeit, Schwierigkeitsgrad der Operation, Gewicht, Abmessungen des Teils, zurückzulegende Wegstrecke, Notwendigkeit von Handhabungsgeräten u.s.w. angegeben. Mit diesen Angaben werden die Vorgabewerte für die Demontagezeiten entsprechend angepaßt. Die Umweltfreundlichkeit wird durch den Fertigungsprozeß, die Werkstoff- und die Verwertungsart festgelegt. Diesen Kriterien sind in der Da-

tenbank Bewertungsparameter für Material, Energie und Toxizität zugewiesen. Aus diesen drei Bewertungsparametern werden die sogenannten "MET-Punkte" gebildet, die ein Maß für die Umweltfreundlichkeit der untersuchten Bauteile sind. In einem weiteren Schritt kann die Software nach Angabe von Vorrangbeziehungen bei der Demontage eine Optimierung bezüglich alternativer Demontagereihenfolgen durchführen.

Das Softwaresystem DEMROP /3/, /10/ unterstützt den Anwender bei der Kostenbeurteilung eines Produktes bezüglich Zerlegung und Recycling. Ein Produkt wird in Form von alternativen Demontagesequenzen modelliert. Kernstück des Systems ist eine Funktion, welche beliebigen Baugruppen einen optimalen Recyclingprozeß und entsprechende Kosten/Erlöse zuweisen kann. Dabei werden neben den stofflichen Eigenschaften auch andere Kriterien (z. B. Größenverhältnisse) durch z.T. nichtlineare Zuweisungsfunktionen ausgewertet. Auf der Basis der Kosten/Erlöse und der Demontageaufwände wird die optimale Demontagetiefe der modellierten Demontagealternativen berechnet und die Gesamtverwertungskosten des Produktes ermittelt.

Renken stellt in /103/ ein Konzept vor, bei dem ausgehend von der Abbildung der Produktstruktur in einem stark vereinfachten 3D-CAD Modell aufgrund von Kollisionsbetrachtungen ein Demontagevorranggraph abgeleitet wird, der alle Demontagealternativen des Produktes enthält. Den Bauteilen wird direkt ein Wiedergewinnungswert und eine Angabe über Verträglichkeiten zugeordnet, der die Information über mögliche Kosten oder Erlöse enthält. Änderungen der Rahmenbedingung sind deshalb nur durch eine Änderung der Eigenschaften der Bauteile durchführbar. Nach der Ermittlung der wirtschaftlichen Demontagetiefe aus dem Demontagevorranggraphen werden anhand eines umfangreichen Katalogs zu Gestaltungshinweisen Verbesserungsmaßnahmen abgeleitet.

Das Softwaresystem DAISY /29/ ist ein speziell auf die Anforderungen der Automobilindustrie abgestimmtes Demontage- und Recyclingplanungssystem. Auf der Basis einer Probezerlegung von Kraftfahrzeugen werden recyclingspezifische Daten demontierter Bauteile erfaßt und in einem Demontagevorranggraphen abgebildet. Für jedes Bauteil kann ein sogenannter "Recycling Faktor" berechnet werden, der die Gesamtkosten des Recyclings bzw. der Beseitigung ins Verhältnis zu den Kosten des für Herstellung erforderlichen Neumaterials setzt. Zur Ermittlung der optimalen Demontagetiefe wird der Anwender durch die Bereitstellung der Demontageabläufe und -kosten zu selektierten Bauteilen unterstützt.

Der sogenannte Recyclinggraph-Editor /52/, /51/, /20/, der an der Universität Erlangen-Nürnberg in enger Zusammenarbeit der Lehrstühle FAPS und KTMf entwickelt wurde, ist ein ungerichteter einfacher Verbindungsgraph, der mit analyserelevanten Zusatzdaten hinterlegt wird. Damit wird eine produktnahe graphische Abbildung der Produktstruktur durch die Modellierung von Bauteilen und Verbindungen ermöglicht.

Scheller /110/ nutzte die Systematik des Recyclinggraphen, um ein auf elektronische Flachbaugruppen abgestimmtes System zur recyclinggerechten Produktbewertung aufzubauen. Ausgehend von dem Produktmodell wird zunächst ein vollständiger AND/OR-Graph ermittelt, welcher alle technisch möglichen Demontagealternativen enthält.

Dieser sogenannte "Demontagehypergraph" wird durch die Zuordnung von alternativen Recyclingprozessketten zu den entstehenden Bauteilen und Fraktionen erweitert. Durch eine Bewertung aller Alternativen wird die optimale Demontage- und Recyclingstrategie bestimmt. Dieser erweiterte AND/OR-Graph wird jedoch bei komplexeren Produkten sehr umfangreich und kann deshalb zu langen Antwortzeiten führen.

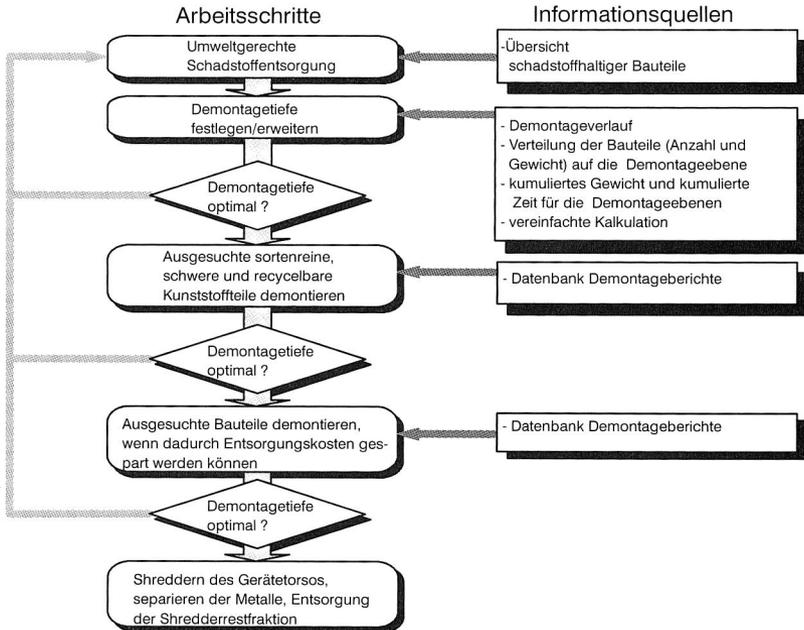


Bild 51: Vorgehensweise zur Ermittlung der optimalen Recyclingstrategie im Rahmen des Assistenzsystems zur Entwicklung umweltgerechter Produkte /135/

Meerkamm /62/, /63/ und Weber /135/ setzen die Methodik des Recyclinggraphen zur Produktmodellierung im Rahmen der Realisierung eines Assistenzsystems für die Entwicklung umweltgerechter Produkte ein. Bei diesem System werden die Elemente des Recyclinggraphen (Bauteile und Verbindungen) mit Daten des gesamten Lebenszyklus (Rohmaterialgewinnung, Fertigung, Montage, Gebrauchsphase, Demontage, Recycling/Deponierung und Transport) hinterlegt. Das System soll den Konstrukteur bereits in den frühen Phasen der Produktentwicklung unterstützen und verfügt deshalb über eine direkte Kopplung zu dem 3D-CAD System Pro-Engineer /135/. Die Auswertung der Daten findet im Sinne einer vereinfachten Ökobilanzierung statt. Zur Bestimmung der optimalen Demontage- und Recyclingstrategie für Bauteile und Baugruppen wird zunächst von der reinen Schadstoffentfrachtung ausgegangen. Durch die Angabe eines technisch möglichen Demontageverlaufs und durch weitere Zusatzinformationen wird

der Anwender in der Festlegung weiterer Demontageschritte unterstützt (Bild 51). Eine Berücksichtigung aller realisierbarer Demontagezustände findet nicht statt.

Weitere Systeme zur ganzheitlichen Bilanzierung sind Ökobilanzwerkzeuge wie CUM-PAN/50/, GaBi /98/, EDIP /2/, SimaPro /120/, Umberto /114/ sowie andere "Design for Environment"-Werkzeuge wie ECO Scan /75/ oder ECO it /76/. Diese basieren in der Regel auf einer durch den Anwender definierten Demontage- und Recyclingstrategie /78/, /44/ und werden deshalb in diesem Rahmen nicht näher beschrieben.

### 5.2.3 Vergleich der Ansätze und Darstellung der Defizite

Die vorgestellten Ansätze zeigen, daß auf dem Gebiet der recyclingorientierten Produktanalyse sehr unterschiedliche Konzepte und Methoden entwickelt wurden. Wesentliche Unterschiede der Vorgehensweisen können in der Art der Produkterfassung und -modellierung, der Art der Bewertungsziele und -methoden und im Umfang der Unterstützung bei der Produktoptimierung gesehen werden. In Bild 52 werden die wichtigsten Methoden zur quantitativen Produktanalyse hinsichtlich wesentlicher Kriterien in diesen Bereichen klassifiziert und gegenübergestellt. Weiterhin wird für jede Methode der Grad der Umsetzung in ein rechnergestütztes System angegeben.

Bei der Produktmodellierung greifen die meisten Systeme auf eine demontageorientierte Vorgehensweise zurück, bei der das Produkt beispielsweise in Demontagevorranggraphen abgebildet wird. Für Anwender aus dem Bereich der Produktgestaltung ist diese Vorgehensweise jedoch z.T. mühsam, da diese Zielgruppe meist wenig Kenntnisse optimaler Demontagestrategien besitzt. In dieser Hinsicht ist es vorteilhaft, wenn die Modellierung auf der Basis der Produktstruktur, z. B. in Form von Verbindungsgraphen, erfolgt und daraus dann die Demontagealternativen abgeleitet werden. Weiterhin besteht die Möglichkeit der direkten Durchführung von Analysen auf der Basis eines CAD-Modells. Hierbei muß jedoch beachtet werden, daß das System in diesem Fall lediglich auf fertig ausgearbeitete Produkte angewendet werden kann, was einem Einsatz in den frühen Phasen der Produktentwicklung entgegensteht. Ein weiterer Aspekt hinsichtlich der Produktmodellierung ist der Grad der Unterstützung des Anwenders bei der Erfassung der Produktdaten. Hier sehen einige Konzepte eine systemunterstützte Dateneingabe vor, bei der durch teilweise graphisch aufbereitete Abfragen die Produktabbildung unterstützt wird. Zusätzlich besteht zum Teil die Möglichkeit Daten aus anderen Systemen (z. B. CAD-Systemen oder Stücklisten) zu übernehmen.

Die untersuchten Methoden zur Produktanalyse berücksichtigen verschiedene Analysebereiche. Manche Methoden beziehen sich vorwiegend auf die Bewertung der Recyclingphase (z. B. Demrop), andere Systeme berücksichtigen mehrere (z.B. Laser, TO-PROCO) oder alle (z. B. Meerkamm/Weber) Phasen des Lebenszyklusses. Insbesondere bei Systemen zur alleinigen Analyse der Recyclinggerechtigkeit stellen fehlende Datenschnittstellen, welche die Generierung und Nutzung der Ergebnisse in anderen ganzheitlich ausgelegten Werkzeugen ohne ausgeprägte Recyclinganalysen (z. B. Ökobilanzwerkzeuge) erlauben, ein Defizit dar.

Simon	●	○	○	○	●	○	○	○	●
Tritsch	○	●	○	●	●	○	○	●	
Hartel	○*)	●	●	●	●**)	○	○	○	
Seliger/Kriwet	●	○	○	●	●	○	○	○	●
LASeR	○	○	○	○	○	○	○	○	
TOPROCO	○	○	○	○	○	○	○	○	
ReStar	○	○	○	○	○	○	○	○	
Boothroyd/TNO	○	○	○	○	○**)	○	○	○	
Demrop	○	○	○	○	○	○	○	○	
Renken	●***)	○	○	○	○	○	○	○	○
DAISY	○	○	○	○	○	○	○	○	
Scheller	○	○	○	○	○	○	○	○	
Meerkamm/Weber	●***)	○	○	○	○	○	○	○	

*) Demontageorientierte Modellierung unter Nutzung von CAD-Daten
***) Ermittlung von Kennzahlen u. a. aus Kosten / Erlösen
****) Zusätzlich Möglichkeit zur Abbildung der Produktstruktur

Produktmodellierung; Produktstruktur	Demontagestruktur (○), Pro- duktstruktur (●), CAD- -systemgestützt (○), Bewertungskriterien (○), Zuweisung von Recyclingprozessen (○) interaktiv systemunterstützt (○), Bewertungskriterien: Subjektiv (○), Schwachstellenanalyse: nicht mög. (○), Implementiert (●) Einfache Änderung und Rechner implementiert (●)
Erfassen d. Produktdaten	Produktmodell (○), Tabellen (○), Lebenszyklusphasen (○), graphisch (○)
Berücksichtigung der interaktiven Recyclingphasen	manuell (○), automatisiert (●)
Zuweisung von Recyclingprozessen	manuell (○), automatisiert (●)
Bewertungskriterien: Subjektiv	manuell (○), automatisiert (●)
Bewertungskriterien: Kosten/Erlöse	manuell (○), automatisiert (●)
Schwachstellenanalyse	nicht möglich (○), bedingt möglich (○), Rechner vorgesehene (○), Rechner implementiert (●)
Einfache Änderung und Rechner implementiert	manuell (○), Rechner vorgesehene (○), Rechner implementiert (●)

Basis	Bewertung	Optimierung	Syst.
-------	-----------	-------------	-------

Bild 52: Vergleichende Klassifizierung der wichtigsten Methoden und Werkzeuge zur recyclingorientierten Produktanalyse

Bei der Durchführung der recycling-spezifischen Produktanalysen ist einerseits der Grad der Unterstützung des Anwenders durch Zuweisungs- und Berechnungsalgorithmen, andererseits aber auch die Exaktheit und Nachvollziehbarkeit des Bewertungsverfahrens wesentlich für die Einsatzfähigkeit des Systems. Ein zentraler Aspekt bei der Unterstützung des Anwenders ist die Art der Zuweisung von Recyclingprozessen zu den möglichen Baugruppen und Bauteilen. Viele der Systeme stellen nur mögliche Recyclingprozesse zur Verfügung, die vom Anwender ausgewählt und den Bauteilen und Baugruppen zugewiesen werden müssen. Baugruppen können jedoch in der Regel mehreren alternativen Recyclingprozessen zugewiesen werden. Da sich weiterhin potentielle recycling-prozesskompatible Bauteilverbände überlappen können, wird der Anwender dadurch vor Zuordnungsprobleme gestellt. Deswegen ist eine automatisierte Zuweisung von Recyclingprozessen von großem Nutzen.

Die Exaktheit des Bewertungsverfahrens hängt in hohem Maße davon ab, ob alle Demontagealternativen berücksichtigt wurden. Ist dies nicht der Fall, wie bei einigen Verfahren, welche nur die Abbildung und Bewertung von einer oder mehreren vorgegebenen Demontagesequenzen erlauben, so besteht die Gefahr, daß statt der optimalen Demontagestrategie ein Suboptimum ermittelt und bewertet wird. Diejenigen Verfahren, welche alle Alternativen berücksichtigen, müssen eine Vielzahl von Kombinationen verarbeiten, wodurch insbesondere bei komplexeren Produkten Probleme hinsichtlich der Rechenzeit auftreten können.

Für die Wahl des Hauptbewertungskriteriums gilt, daß auf dessen Basis eine exakte und vor allem eine nachvollziehbare Kalkulation möglich sein muß. Defizite sind hier im besonderen bei subjektiven aber auch bei kennzahlbasierten Verfahren zu sehen, da hier zum Teil Kennziffern eingesetzt werden, deren Bedeutung nur schwer zu erfassen ist.

Ähnlich der Produktanalyse, werden auch bei der Unterstützung der Produktoptimierung verschiedene Konzepte verfolgt. Die von vielen Systemen bereitgestellten Schwachstellenanalysen beschränken sich zumeist auf allgemeine Aussagen zur recyclinggerechten Produktgestaltung. Ein weiterer Aspekt ist die Möglichkeit des Anwenders bestehende Produktentwürfe ohne großen Aufwand abzuändern und eine Neubewertung durchzuführen. Hier ergeben sich insbesondere bei Systemen, bei welchen die Produktmodellierung auf der Basis von Demontageverrichtungen erfolgt, systembedingte Nachteile, da auch bei geringen Produktänderungen (z. B. Änderung von Verbindungstechniken) unter Umständen die erneute vollständige Modellierung der Demontageprozeßgraphen erfolgen muß. In diesem Bereich weisen Systeme zur Modellierung der Produktstruktur und automatischen Generierung der Demontagesequenzen wesentliche Vorteile auf.

Die Gegenüberstellung der Verfahren (Bild 52) zeigt, daß die vorhandenen Ansätze und Methoden den Anforderungen an ein anwendungsfreundliches und einsatzfähiges System zur recyclingorientierten Produktanalyse nur bedingt gerecht werden. Ziel ist es deshalb im Rahmen dieser Arbeit ein solches System zu entwickeln.

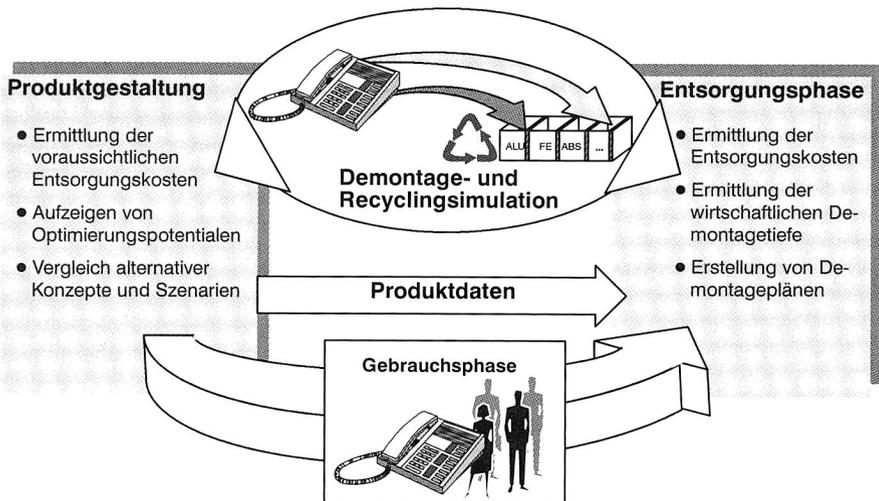
### **5.3 Entwurf einer recyclingorientierten Produktanalyse zur Demontageplanung und optimierten Produktgestaltung**

Aufgrund der erkannten Defizite aktueller Systeme soll im folgenden ein Grundkonzept für ein System zur gemeinsamen Unterstützung der Demontageplanung und der recyclinggerechten Produktgestaltung entworfen werden.

Beide Zielsetzungen - die optimierte Demontageplanung und die Unterstützung der recyclinggerechten Produktgestaltung - erfordern eine Aussage über die optimale Demontage- und Recyclingstrategie eines Produkts. Deshalb ist das zentrale Element des Konzeptes die Durchführung einer Recycling- und Demontagesimulation zur Ermittlung entsprechender Aussagen (Bild 53). Als primäres Bewertungskriterium werden hierzu

die potentiellen Kosten und Erlöse alternativer Demontagesequenzen und der resultierenden Verwertungsmöglichkeiten genutzt, um eine realitätsnahe und nachvollziehbare Analyse zu gewährleisten. Um sinnvolle und aussagekräftige Ergebnisse zu erzielen, ist es erforderlich, alle technisch möglichen Demontagekombinationen (Komplettdemontage und alle Zwischenzustände) des Produktes zu berücksichtigen /53/, /31/, /131/. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist, daß Produkte unabhängig von Recyclingprozessen (und umgekehrt) definierbar sein sollten. Dadurch soll ermöglicht werden, daß unterschiedliche Produkte unter Berücksichtigung der gleichen Recyclingprozesse betrachtet werden können, bzw. daß ein Produkt unter verschiedenen recyclingspezifischen Rahmenbedingungen berechnet werden kann. Weiterhin ist eine realitätsnahe aber möglichst einfache Möglichkeit zur Abbildung der Eigenschaften von Recycling- und Beseitigungsprozessen nötig. Da diese Eigenschaften (z. B. Kosten der Prozesse) häufig schwanken, muß das System Änderungen schnell und einfach zulassen.

Die Ergebnisse einer Recycling- und Demontagesimulation können direkt zur Demontageplanung genutzt werden. So können auf dieser Grundlage die voraussichtlichen Entsorgungskosten von Produkten ermittelt werden, wodurch die Preisgestaltung wesentlich vereinfacht wird. Weiterhin sollen ein Demontageplan für analysierte Produkte ausgegeben, und Informationen für die Gestaltung von Verwertungsnachweisen zur Verfügung gestellt werden.



tung der wahrscheinlichsten Recyclingstrategie aufgrund der komplexen Zusammenhänge vor allem für Konstrukteure schwierig gestaltet. Der Ansatz im Rahmen dieser Arbeit ist deshalb, den Schwerpunkt der Entwicklungen bewußt auf die Recyclingphase zu beziehen und mit gleicher Priorität die Integration der kompletten Systematik oder der Bewertungsergebnisse in Systeme zur ganzheitlichen Produktbewertung vorzusehen.

Zur Unterstützung der recyclinggerechten Produktgestaltung lassen sich auf der Grundlage der Recycling- und Demontagesimulation die voraussichtlichen Nachgebrauchs-Eigenschaften und -kosten eines Produktes ermitteln. Diese wiederum können für eine Bewertung eines Produktentwurfes genutzt werden. Eine wichtige Funktionalität zur recyclinggerechten Konstruktion ist die Möglichkeit einer Schwachstellenanalyse um die wesentlichen Optimierungspotentiale eines Produktes zur erfassen. Die Problematik der komplexen, zum großen Teil voneinander abhängigen, recyclingrelevanten Produkteigenschaften, welche die Auswahl der besten Optimierungsmöglichkeit erschweren, soll durch spezifische Kennwerte unter gemeinsamer Berücksichtigung von Produkt- und Recyclingdaten erfolgen. Weiterhin ist die Möglichkeit zur Durchführung von Vergleichen alternativer Produktkonzepte und verschiedener Recyclingbedingungen vorzusehen.

Um die Verfügbarkeit wichtiger Produktdaten in der Entsorgungsphase zur Demontageplanung und zur Durchführung von Demontageverrichtungen zu gewährleisten, ist es vorteilhaft, auf Herstellerdaten zurückgreifen zu können. Unter der Voraussetzung, daß das gleiche Softwaresystem zunächst für die Optimierung der Produktgestaltung und später für die Demontageplanung eingesetzt wird, müssen die Produktdaten über den Zeitraum der Gebrauchsphase hinweg gespeichert werden. Hierzu existieren bereits unterschiedliche Ansätze, welche beispielsweise von einer vollständigen Speicherung relevanter Daten am Produkt (z. B. Barcodes oder ICs /109/) ausgehen. Andere in der Literatur vorgeschlagene Ansätze basieren auf der Speicherung der Produktdaten in zentralen Datenbanken, welche von den Verwertern aufgerufen werden können /129/. In diesem Fall ist es Verwertern möglich, sich nach der Identifikation eines bestimmten Produkttyps über Internet entsprechende Informationen zu beschaffen/64/, /13/. Gleichmaßen können in diesen Engineering-Netzwerken auch Hersteller auf aktuelle Daten und Preise zur Verwertung zurückgreifen. Das letztgenannte Konzept ist durch die flexible Austauschbarkeit von Daten zwischen Herstellern und Entsorgern in hervorragender Weise als Ergänzung des konzipierten Systems zur recyclinggerechten Produktgestaltung und Demontageplanung geeignet /13/. Deshalb wird der Aspekt der Datensicherung und -übertragung im Rahmen dieser Arbeit nicht näher behandelt, es wird vielmehr eine Abstimmung mit den vorhandenen Ansätzen angestrebt.

Das resultierende Grundkonzept für das Softwaresystem DisPlay besteht aus den in Bild 54 dargestellten Hauptkomponenten. Die Grundlage des Systems ist die strukturierte Erfassung und Abbildung der benötigten Daten. Ein zentrales Element des Ansatzes ist die Bewertung von Produkten unter Zugrundelegung alternativer Rahmenbedingungen des Recyclings (im folgenden Recyclingszenarien genannt). Deshalb muß eine

getrennte Erfassung und Aufbereitung von produktspezifischen und recyclingszenariospezifischen Daten erfolgen.

Das Kernelement des Konzeptes ist die Bereitstellung von geeigneten Algorithmen zur Bewertung und Optimierung von Produkten. Zunächst erfolgt im Rahmen einer Recycling- und Demontagesimulation die Ermittlung der optimalen Demontage- und Recyclingstrategie unter Berücksichtigung der Daten des Recyclingszenarios. Eine besondere Herausforderung bei der Entwicklung des Algorithmus zur Berechnung der optimalen Recyclingstrategie stellt die Forderung nach der Berücksichtigung aller potentiellen Demontagealternativen bei geringen vertretbaren Rechenzeiten dar. Eine weitere wesentliche Funktionalität ist eine geeignete Schwachstellenanalyse, die dem Anwender die vorhandenen Optimierungspotentiale des Produktes hinsichtlich der Demontage- und Recyclinggerechtheit aufzeigt.

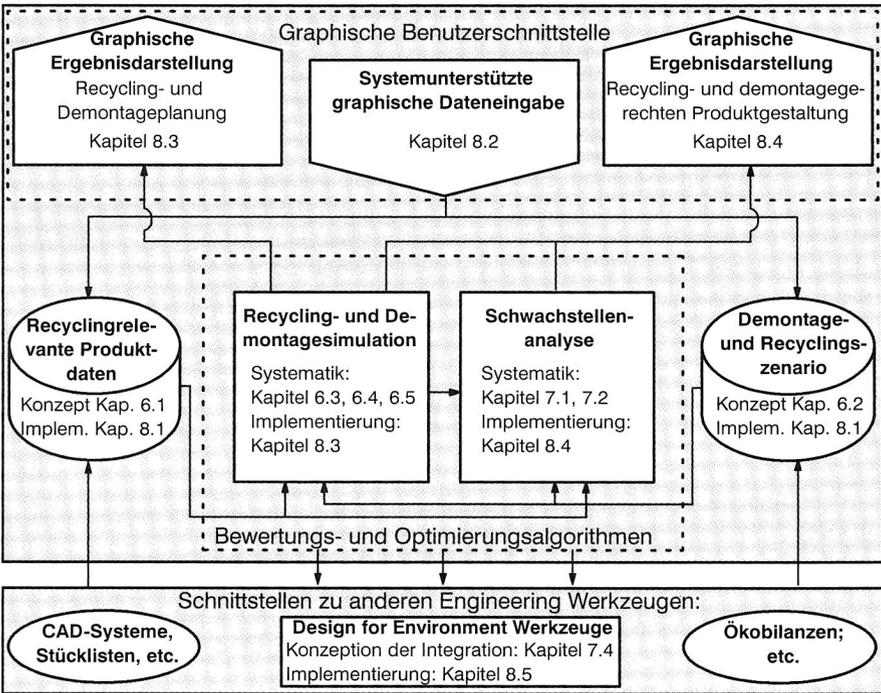


Bild 54: Grundkonzept für das System DisPlay zur recyclingorientierten Produktanalyse

Um die Anwendungsfreundlichkeit des Systems zu gewährleisten, wird eine graphische Benutzerschnittstelle entwickelt und implementiert, die eine einfache interaktive und systemunterstützte Dateneingabe ermöglicht. Desweiteren ist ein Modul zur Ergebnisdarstellung für die Demontageplanung vorgesehen, das die Ergebnisse der Demontage-

und Recyclingsimulation visualisiert. Eine andere Ergebnisaufbereitung wird zur Unterstützung der recyclinggerechten Produktgestaltung benötigt, bei der sowohl Ergebnisse der Demontage- und Recyclingsimulation als auch die der Schwachstellenanalyse dargestellt werden müssen.

Wie die Untersuchungen zum Stand der Technik zeigen, weisen viele aktuelle Systeme zur umweltorientierten Produktanalyse - insbesondere Systeme zur ganzheitlichen Analyse des Produktlebenszyklusses - erhebliche Schwachstellen im Bereich der Beurteilung der Recyclingphase auf. Aus diesem Grund kommt den vorgesehenen externen Schnittstellen von DisPlay eine wesentliche Bedeutung zu. Dadurch kann eine Übertragung der Ergebnisse der recyclingorientierten Produktbewertung und -optimierung in andere Systeme, z. B. Ökobilanzwerkzeuge oder "Design for Environment" (DFE)-Werkzeuge, erfolgen. Um die Möglichkeit einer solchen Kopplung nachzuweisen, wird im Rahmen dieser Arbeit eine Integration von DisPlay in ein praxisnahes DFE-Werkzeug durchgeführt.

Ein anderer wesentlicher Aspekt von externen Schnittstellen ist die Möglichkeit der Übernahme von bereits vorhandenen Produktdaten, um den Aufwand zur Datenerfassung und Produktmodellierung gering zu halten. In diesem Zusammenhang spielt die Möglichkeit der Kopplung mit CAD-Systemen eine wichtige Rolle.

Auf der Basis der dargestellten Struktur von DisPlay sind auch die folgenden Kapitel gegliedert (vgl. Bild 54). Zunächst soll eine Systematik zur Recycling- und Demontage-simulation auf der Basis von noch zu spezifizierenden Produkt- und Recyclingdaten entwickelt werden. In Kapitel 7 wird dann darauf aufbauend ein Konzept für eine integrierte Schwachstellenanalyse abgeleitet. Die im Anschluß daran aufgezeigte Umsetzung des Konzeptes wird durch die Modellierung und Berechnung eines Beispielproduktes validiert.

## 6 Entwicklung einer Systematik zur rechnergestützten Recycling- und Demontagesimulation

Ein zentrales Element des Konzeptes der recyclingorientierten Produktanalyse ist die Simulation der Nachgebrauchsphase. Deren Ergebnisse können sowohl für die Optimierung der Produktgestaltung als auch für eine kostenorientierte Demontageplanung genutzt werden. In diesem Kapitel wird eine den hergeleiteten Anforderungen entsprechende Systematik zur Recycling- und Demontagesimulation vorgestellt. Die Grundstruktur des Konzeptes ist in Bild 55 wiedergegeben. Auf der Basis von recyclingrelevanten Produktdaten wird unter Berücksichtigung von definierten Rahmenbedingungen für Demontage, Verwertung und Beseitigung (Recyclingszenarien) die optimale Demontage- und Recyclingstrategie ermittelt.

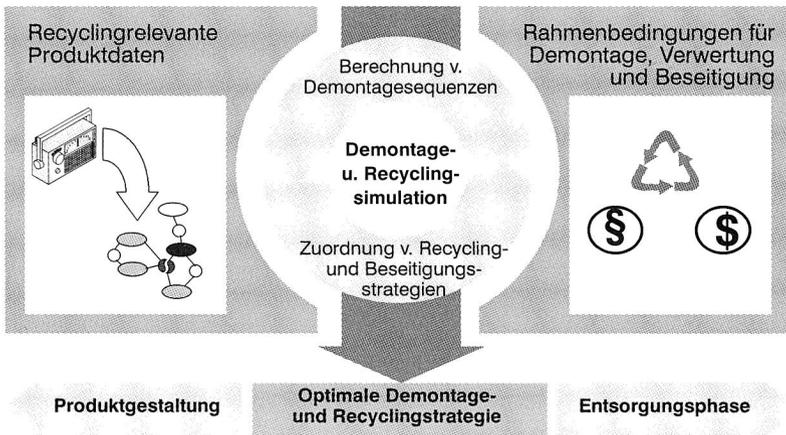


Bild 55: Grundkonzept zur Demontage- und Recyclingsimulation

Im folgenden werden zunächst die benötigten Informationen zu Produkten und Recyclingszenarien bestimmt, aus denen alternative Optionen der Nachgebrauchsphase abgeleitet und strukturiert werden. Auf dieser Basis wird eine Vorgehensweise zur Bestimmung alternativer Demontagesequenzen technischer Produkte aufgezeigt. Abschließend wird ein Ansatz zur Ermittlung der optimalen Recycling- und Demontagestrategie vorgestellt.

### 6.1 Abbildung recyclingrelevanter Produkteigenschaften

Ausgehend von den Zielen und den in Kapitel 5.3 definierten Anforderungen an die recyclingorientierte Produktanalyse können die analyserelevanten Informationen über Produkteigenschaften abgeleitet werden. Unabdingbar sind Informationen über die De-

montagefähigkeit des Produktes. Um eine exakte Bewertung des Produktes vornehmen zu können, müssen hierzu, wie bereits in Kapitel 5 hergeleitet, alle alternativen Demontagesequenzen berücksichtigt werden. Weiterhin muß der Aufwand zur Durchführung der entsprechenden Demontageschritte bekannt sein.

Andere für eine Bewertung benötigte Informationen beziehen sich auf die resultierenden Bauteile und Fraktionen der alternativen Demontagemöglichkeiten eines Produktes. Hierzu müssen jeweils Kosten bzw. Erlöse ermittelt werden können. Wichtige Informationen, welche diesen Bauteilen und Baugruppen zugeordnet werden können, sind die Materialzusammensetzung, das Gewicht und der potentielle Wert bei der Wieder- oder Weiterverwertung.

Unterschiedliche Möglichkeiten zur Abbildung der recyclingrelevanten Produkteigenschaften ergeben sich vor allem durch die Art der Modellierung oder Generierung von bewertungsrelevanten Demontagealternativen. Wie in Bild 56 dargestellt können die Demontagesequenzen eines Produktes direkt, z. B. in Form von Vorranggraphen, abgebildet werden. Ein Vorteil dieser Vorgehensweise ist die einfache Auswertbarkeit der Informationen. Weiterhin besteht die Möglichkeit, Strukturgraphen, welche die Produktstruktur repräsentieren, einzusetzen und daraus alternative Demontagemöglichkeiten eines Produktes abzuleiten. Eine Alternative hierzu ist aber auch die direkte Nutzung von 3D-CAD Produktmodellen für die recyclingorientierte Produktanalyse.

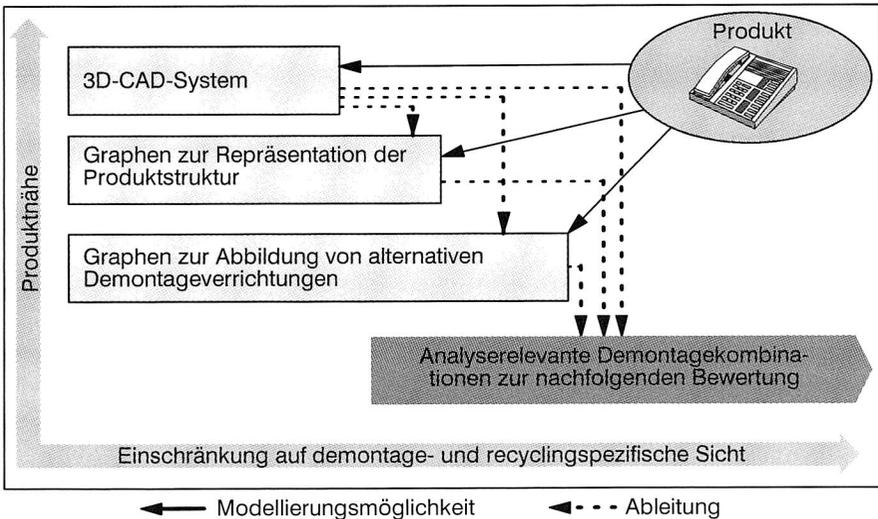


Bild 56: Alternative Vorgehensweisen zur Modellierung und Aufbereitung demontageorientierter Produktdaten

Im folgenden werden Abbildungsalternativen dieser drei Kategorien beschrieben und hinsichtlich ihrer Vor- und Nachteile für die zu entwickelnde Recycling- und Demontagesimulation miteinander verglichen.

### Ansätze zur direkten Abbildung von Demontageverrichtungen

Graphen zur Modellierung von Demontageverrichtungen sind prozeborientierte Graphen, mit denen Demontagealternativen von Produkten direkt abgebildet werden können. Zur Darstellung der realisierbaren Demontagefolgen werden dabei die Abhängigkeitsbeziehungen von Verrichtungen abgebildet /131/. Ein Beispiel hierfür ist der für die Montageplanung entwickelte Vorranggraph /115/. Für die Demontage angepaßt stellen diese Demontagevorranggraphen Demontageverrichtungen als Knoten und deren Vorrangbeziehungen als Kanten dar /131/. Dies bietet den Vorteil, daß Demontagefolgen relativ kompakt dargestellt werden können. Bauteilbezogene Produktzustände können jedoch nur durch erhebliche Weiterentwicklungen und Ergänzungen dieser Graphen abgebildet werden. Daten über Bauteilzustände sind aber zur Beurteilung der Recyclingeignung unabdingbar. Ein weiterer Nachteil ist, daß zur Abbildung aller technisch realisierbaren Demontagefolgen eines Produktes unter Umständen eine Vielzahl solcher Vorranggraphen erstellt werden müssen, da nicht alle Demontagealternativen in einem einzigen Graphen abbildbar sind /53/ /131/. Aus diesen Gründen scheidet Demontagevorranggraphen für die weitere Betrachtung aus.

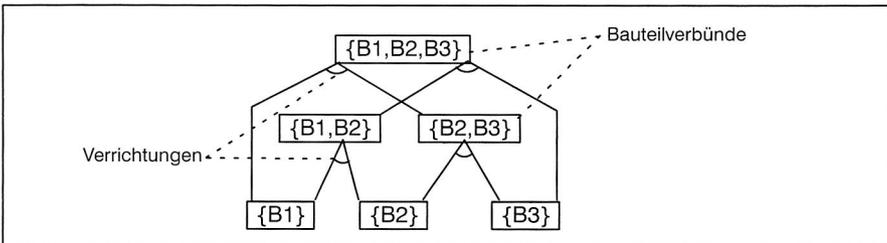


Bild 57: Beispiel für AND/OR-Graphen

Um die Nachteile des Demontagevorranggraphen zu vermeiden, wurde von Kriwet und anderen /53/, /110/ vorgeschlagen, den ebenfalls für die Montageplanung entwickelten AND/OR-Graphen zu nutzen. Ein AND/OR-Graph ist ein gerichteter Graph, dessen Knoten alle möglichen Bauteile und Bauteilverbände darstellen. Von demontierbaren Bauteilverbänden führen Kanten, welche die technischen Verrichtungen repräsentieren, zu den entstehenden Knoten. Die Verrichtungen sind dabei mehrfach enthalten, da sie auf unterschiedliche Bauteilverbände angewendet werden können. Dadurch ist es möglich, alle Montage- bzw. Demontagealternativen in einem einzigen Graphen abzubilden. Ein für die Demontage angepaßter AND/OR-Graph ist in Bild 57 dargestellt. AND/OR-Graphen haben somit im Vergleich zu den Demontagevorranggraphen den Vorteil, daß alle technisch realisierbaren Demontagezustände darstellbar sind. Weiterhin lassen sich

aus dem AND/OR-Graphen direkt Bauteile oder Bauteilverbünde zur Ermittlung der Recyclingeignung ablesen.

Nachteilig wirkt sich jedoch aus, daß ein AND/OR-Graph bei komplexeren Produkten sehr umfangreich und unübersichtlich werden kann. Das führt dazu, daß die manuelle Erstellung der Graphen sehr aufwendig wird. Ein weiteres Problem ist, daß zwar die einzelnen Bauteilverbünde und Bauteile dargestellt werden, aber für eine Bewertung des Gesamtnutzens einer Demontagekombination sind die Kombinationen der möglichen Bauteilverbünde und Bauteile relevant, die in dem Graphen nicht direkt abgebildet sind.

### Graphen zur Modellierung der Produktstruktur

Bei den Strukturgraphen können hinsichtlich der Einsatzmöglichkeiten für die recyclingorientierte Produktanalyse im wesentlichen Baustukturgraphen und Verbindungsstrukturgraphen unterschieden werden /131/ /103/.

Baustukturgraphen bilden eine hierarchische Erzeugnisstruktur ab, in dem Produkte in Baugruppen, Unterbaugruppen und Bauteile aufgegliedert werden (vgl. Bild 58). Diese Modellierungsart ist problematisch in bezug auf die Generierung von Demontagefolgen, da die Art der Aufgliederung des Produktes immer mit einer Zielsetzung verbunden ist. So kann beispielsweise eine Baugruppe aus Sicht der Konstruktion (z. B. Zusammenfassung aller Bauteile zur Durchführung einer bestimmten Funktion) nicht mit einer Recyclinggruppe (Zusammenfassung von Bauteilen mit gleichen Recyclingeigenschaften) gleichgesetzt werden. Aus diesem Grund kann dieser Graphentyp nicht ohne weiteres zur Modellierung von Produkten und anschließender Aufbereitung aller Demontagekombinationen genutzt werden.

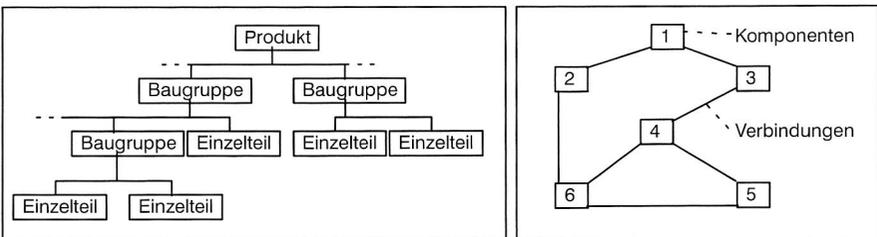


Bild 58: Graphen zur Abbildung der Produktstruktur; links: Baustukturgraph; rechts: Verbindungsstrukturgraph

Verbindungsstrukturgraphen stellen die Relationen zwischen Einzelteilen und Verbindungen dar. Dabei gibt es verschiedene Möglichkeiten hinsichtlich der Bedeutung von Knoten und Kanten /103/.

Verbindungsstrukturgraphen an sich beinhalten noch keine Informationen über Zugänglichkeiten der Verbindungen oder Vorrangrelationen, aus denen alle alternativen Demontagefolgen ableitbar sind. Vorteilhaft wirkt sich jedoch die anschauliche produkt-

nahe Darstellung aus, da sie sowohl bei der Produktgestaltung als auch bei der Demontageplanung anwendbar ist.

### **Ableitung von Demontagekombinationen aus CAD-Modellen**

Wie dem Stand der Forschung bei recyclingorientierten Produktanalysen zu entnehmen ist, existieren verschiedene Ansätze, welche auf CAD-Modellen beruhen oder diese gezielt in die Systematik der Analyse einbinden. Dabei muß unterschieden werden, ob die Produktanalyse direkt auf der Basis des Produktmodells durchgeführt wird oder ob aus den CAD-Daten zunächst ein produktstruktur- oder ein demontageorientierter Graph abgeleitet wird, welcher dann zur Analyse herangezogen wird (vgl. Bild 56).

Die direkte Nutzung eines CAD-Modells mit einer Ableitung aller Demontagealternativen (z. B. durch Kollisionsprüfungen) bietet den Vorteil, daß der Anwender direkt in der Konstruktionsumgebung die benötigten recyclingrelevanten Produktinformationen zur Verfügung gestellt bekommt. Nachteilig wirkt sich jedoch aus, daß für eine solche Analyse bereits ein fertig ausgearbeitetes Produkt vorhanden sein muß, wodurch der Einsatz in den frühen Phasen der Konstruktion erschwert wird. Weiterhin kann diese Vorgehensweise für die Demontageplanung am Ende des Lebenszyklusses (z.B. bei einem Recyclingunternehmen) nicht eingesetzt werden, da hierbei die Möglichkeit der Nutzung eines CAD-Systems zumeist nicht gegeben ist.

Bei der indirekten Nutzung eines CAD-Systems werden lediglich Schnittstellen zur Erfassung der CAD-Daten vorgesehen. Die Bewertung erfolgt dann auf der Basis der entsprechenden Struktur- oder Demontagegraphen.

### **Zusammenfassende Bewertung der Alternativen**

Aufgrund der Darstellung alternativer Möglichkeiten zur Abbildung recyclingrelevanter Produkteigenschaften kann ein Vergleich unter der Berücksichtigung der im Rahmen dieser Arbeit gestellten Anforderungen durchgeführt werden.

Demontageorientierte Graphen sind wegen ihrer Nähe zum Demontageprozeß für die Zielgruppe der Recycler anschaulich und - für den Fall, daß nur die wichtigsten Demontagesequenzen abgebildet werden - vergleichsweise einfach nachvollziehbar. Hinsichtlich der Anwendung für die Produktgestaltung ist jedoch die produktorientierte Ausrichtung vorzuziehen, da die Abbildung von Demontageverrichtungen und Demontageresultaten nicht zu den grundlegenden Kenntnissen eines Konstrukteurs gehören.

Im Gegensatz zu der Abbildung von Demontageverrichtungen steht die direkte Nutzung von CAD-Produktmodellen für die Produktbewertung. Hier ist grundsätzlich die Integration in eine Konstruktionsumgebung möglich. Diese Vorgehensweise ist jedoch nicht ohne weiteres zur Demontageplanung am Ende des Lebenszyklusses einsetzbar.

Da das Einsatzfeld für die geplante Systematik sowohl die Produktgestaltung als auch die Demontageplanung ist, sind beide Ansätze für die Produktmodellierung im Rahmen dieser Arbeit ungeeignet. Die Modellierung von Produkten durch Verbindungsstruktur-

graphen, welche mit den ergänzenden recyclingrelevanten Daten hinterlegt sind, bietet hingegen große Vorteile. Die Nutzung eines solchen Systems beim Entwurf von Produkten, ist damit ebenso möglich wie der Einsatz zur Demontageplanung.

Die benötigten Produktdaten können auf unterschiedliche Arten erfaßt und für eine Analyse bereitgestellt werden: Falls konkrete CAD-Daten vorliegen, kann über eine geeignete Schnittstelle ein Verbindungsstrukturgraph aus diesen abgeleitet werden. Weiterhin ist es möglich, solche Graphen durch Probezerlegungen von realen Produkten aufzubauen, wodurch auch eine Nutzung des Systems in der Nachgebrauchphase auf einfache Weise möglich ist. Darüber hinaus bietet diese Modellierungsart durch die produktnahe Darstellung und durch die damit verbundene Möglichkeit der Visualisierung der Ergebnisse Vorteile.

Diese Überlegungen zeigen die Vorteile von Verbindungsstrukturgraphen für die recyclingorientierte Produktanalyse. Diese Modellierungsart dient deshalb im Rahmen dieser Arbeit als Grundlage für die Entwicklung einer entsprechenden Systematik.

### **Abbildung und Aufbereitung recyclingrelevanter Produkteigenschaften auf der Basis von Recyclinggraphen**

Zur Modellierung recyclingrelevanter Produkteigenschaften wurde im Rahmen eines gemeinsamen Forschungsvorhabens<sup>1</sup> des Lehrstuhls für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik und des Lehrstuhls für Konstruktionstechnik (Universität Erlangen-Nürnberg) der sogenannte "Recyclinggraph" entwickelt /20/.

Der Recyclinggraph basiert auf einem Verbindungsstrukturgraphen, der mit ergänzenden Merkmalen versehen wurde, um die recyclingrelevanten Eigenschaften von Produkten in optimaler Weise abbilden zu können. Im Recyclinggraphen wird die Produktinformation in bauteilrelevante Eigenschaften und verbindungsrelevante Eigenschaften aufgeteilt. Entsprechend werden in dem Graphen Komponenten (Ovale) und logische Verbindungen (Kreise) abgebildet und miteinander verknüpft (vgl. Bild 59). Sowohl Verbindungen als auch Bauteile werden mit recyclingrelevanten Daten hinterlegt, die für eine Recycling- und Demontagesimulation und für die entsprechende Optimierung der Produktgestaltung erforderlich sind.

Eine besondere Bedeutung kommt hierbei den Vorrangbeziehungen zu, die festlegen, welche Verbindungen vor anderen gelöst werden müssen. Diese Information wird benötigt, um aus dem Recyclinggraphen die technisch realisierbaren Demontagesequenzen bestimmen zu können. Für eine Verbindung können mehrere z. T. auch alternative Vorrangbeziehungen existieren. Deshalb ist bei der Abbildung von Verbindungen die Möglichkeit der Verknüpfung durch UND/ODER - Operatoren vorgesehen.

Mit dieser Art der Modellierung können somit Informationen über zerstörungsfreie und teilzerstörende Demontageprozesse durch die Zuordnung von Demontagezeiten und Vorrangrelationen zu Verbindungen abgebildet werden. Ein Sonderfall stellt die Modellierung von zerstörenden Demontageprozessen dar. Hierzu können virtuelle Verbindun-

---

1: Gefördert von BayFORREST (Bayerischer Forschungsverbund für Reststoffverwertung)

gen, welche Sollbruchstellen darstellen, eingesetzt werden (vgl. auch /53/ und /110/). Die zerstörten Bauteile werden als zwei oder mehr Komponenten betrachtet, welche die voraussichtlichen Bruchteile des zerstörten Bauteils darstellen und mit entsprechenden Daten hinterlegt sind /135/.

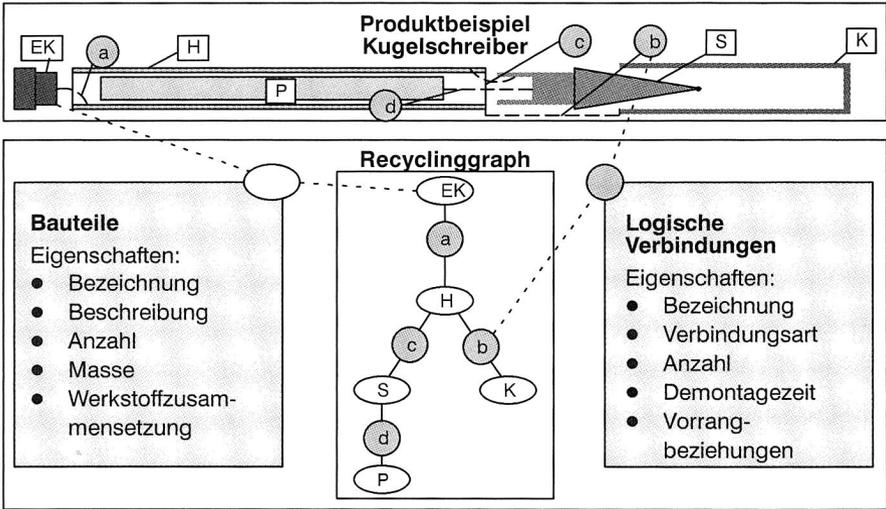


Bild 59: Abbildung von Produkteigenschaften mit Recyclinggraphen

Da bei dieser Art der Produktmodellierung die Demontageverrichtungen nicht direkt, sondern wie beschrieben über Vorrangrelationen abgebildet werden, muß eine automatisierte und rechnergestützte Ermittlung aller relevanten Demontagekombinationen aus dem Produktmodell erfolgen. Hierzu wird, ausgehend von dem Recyclinggraphen, ein rechnerinterner prozeßorientierter Graph aufgebaut, der die nötigen Informationen für die Bewertung der Demontagekombinationen enthält. Der Ansatz zur Übertragung des Recyclinggraphen in den prozeßorientierten Graphen ist Inhalt des Kapitels 6.4.

## 6.2 Abbildung von Rahmenbedingungen für Demontage und Recycling

Zur realitätsnahen Abbildung realer oder virtueller Rahmenbedingung für Demontage und Recycling ist es erforderlich, die Strukturen der aktuellen Demontage- und Recyclingpraxis zu analysieren.

In Bild 60 ist die Struktur eines Demontageunternehmens aufgezeigt. Der Input des Unternehmens setzt sich aus unterschiedlichsten Produkten, die in verschiedenen Varianten vorkommen können, zusammen. Der Output des Unternehmens besteht im all-

gemeinen aus verschiedenen Fraktionen, die bestimmte Bedingungen erfüllen müssen. Dabei kann es sich beispielsweise um wiederverwendbare Bauteile handeln, welche entweder von dem Abnehmer oder von dem Demontageunternehmen selbst einer Aufarbeitung zugeführt werden. Weitaus häufiger handelt es sich jedoch bei den Outputfraktionen um sortierte Fraktionen mit einer in einem gewissen Bereich definierten zulässigen stofflichen Zusammensetzung, welche dann den verfügbaren nachfolgenden Prozeßketten des Recycling bzw. der Beseitigung zugeführt werden.

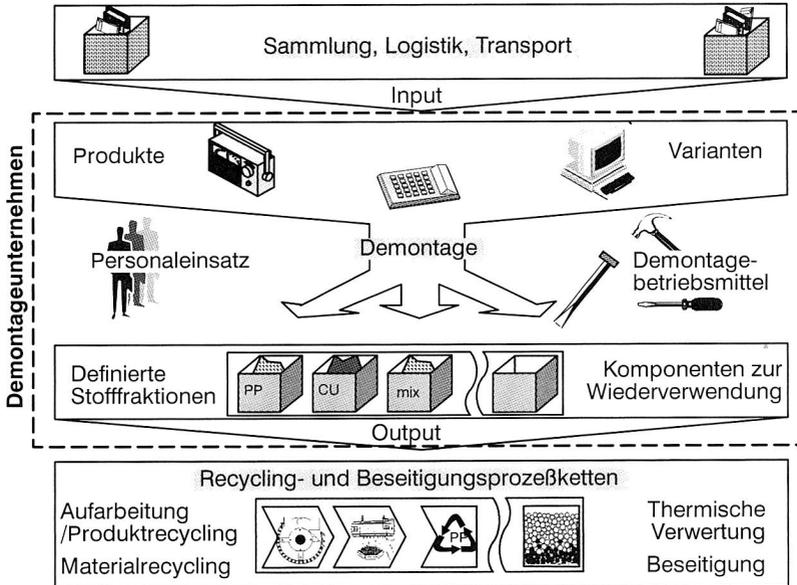


Bild 60: Struktur eines Zerlegebetriebs als Basis zur Modellierung recyclingrelevanter Daten

Das primäre Ziel des Demontageunternehmens ist die möglichst kosteneffiziente Aufteilung der unterschiedlichen Produkte in die verfügbaren Outputfraktionen. Hierbei muß für jedes Produkt der Aufwand der durchgeführten Demontageschritte mit den Erlösen bzw. den Kosten der resultierenden Fraktionen verrechnet werden. Die wirtschaftliche Demontagetiefe eines Produktes ist der Demontagezustand mit den höchsten Erlösen, bzw. den geringsten Gesamtkosten.

Aus den Alternativen Recycling- und Beseitigungsmöglichkeiten lassen sich die für eine Produktanalyse benötigten Daten zur Beschreibung der realen oder virtuellen Rahmenbedingungen für das Recycling ableiten. Dabei bietet es sich an, die Systemgrenzen, wie in Bild 60 (gestrichelte Linie) dargestellt, um ein reales oder virtuelles Demontageunternehmen zu legen.

Hinsichtlich der Rahmenbedingungen der Demontage sind aufgrund der überwiegend manuellen Verrichtungen die Lohnkosten der entscheidende Faktor. Weiterhin sind auch Informationen über alternativ zum Einsatz kommende Demontagebetriebsmittel für eine Bewertung notwendig.

Zur Berücksichtigung des Produktrecyclings müssen die wiederverwendbaren Bauteile bzw. Baugruppen und deren potentieller Wert bekannt sein. Eine wesentliche Bedeutung kommt jedoch der Systematik zur Beschreibung der Outputfraktionen des Demontageunternehmens zu. Die Outputfraktionen und deren zulässige Inhaltsstoffe werden im allgemeinen nachfolgenden Prozeßketten zur Rückgewinnung oder Beseitigung zugeführt (vgl. Bild 61). Die Entscheidung, ob ein Materialgemisch kompatibel zu den Restriktionen der Prozeßketten ist, wird in den meisten Fällen auf der Basis der stofflichen Zusammensetzung getroffen.



Bild 61: Zusammenwirken zwischen Outputfraktionen und Prozeßketten am Beispiel von Elektronikschrott (Daten nach /85/, /128/, /110/)

Einige bestehende Ansätze (z.B. /131/) nutzen zur Strukturierung der Recyclingalternativen (Outputfraktionen) einen hierarchischen Fraktionenbaum. Dabei werden in der untersten Ebene zunächst sortenreine Fraktionen definiert, welche in den darüberliegenden Ebenen jeweils zu Mischfraktionen zusammengefaßt, und mit den potentiellen Kosten bzw. Erlösen hinterlegt werden. Da bei Mischfraktionen in der Praxis z.T. erhebliche Überschneidungen hinsichtlich der zulässigen Inhaltsstoffe vorherrschen, ist eine entsprechende Modellierung mit einer streng hierarchischen Struktur problematisch. Aus diesem Grund ist diese Abbildungsart für die hier definierte Zielsetzung ungeeignet.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein semantischer Ansatz zur Strukturierung der Outputfraktionen gewählt. Es wurde eine Syntax entwickelt, die es erlaubt, die zulässigen, für die nachfolgenden Recycling- oder Beseitigungsprozesse kompatible, Materialzusammensetzungen zu beschreiben. Zur Abbildung dieser sogenannten "Materialrestrik-

tionen" wird die zulässige stoffliche Zusammensetzung durch folgende Kriterien oder deren Kombination beschrieben:

- Der "maximale Anteil" eines Materials beschreibt den maximal zulässigen prozentualen Anteil eines Stoffes in einem Materialgemisch, damit dieses zu einem Nachfolgeprozeß kompatibel bleibt, beispielsweise der maximal erlaubter Anteil von Kupfer in einem zur weiteren Verwertung vorgesehenen Stahlgemisch.
- Der "minimale Anteil" eines Stoffes beschreibt den minimal zulässigen prozentualen Anteil eines Stoffes in einem Materialgemisch, damit dieses zu einem Nachfolgeprozeß kompatibel bleibt, beispielsweise der minimale Anteil von Kupfer in einer Outputfraktion, die für die Kupfergewinnung bestimmt ist.
- Der "zulässige Verschmutzungsgrad" gibt den maximalen aufsummierten Anteil von Materialien an, die nicht über die vorgenannten Kriterien spezifiziert wurden. Dabei sind als Gefahrstoff deklarierte Materialien ausgeschlossen.

Mit dieser vergleichsweise einfachen Syntax lassen sich somit Outputfraktionen für alle denkbaren Recycling- oder Beseitigungsprozeßketten beschreiben. Wichtig ist jedoch, daß in jedem Satz dieser Outputfraktionen eine Restfraktion enthalten ist, welche alle Materialgemische ohne Einschränkung aufnehmen kann. Diese Outputfraktion ist das Pendant zu der Beseitigung.

Jede dieser Outputfraktionen muß weiterhin mit dem erzielbaren Gesamterlös bzw. den Kosten der nachfolgenden Prozeßkette abgebildet werden. Darüber hinaus ist es möglich für die Outputfraktionen einen ökologischen Kennwert zur Beschreibung der durch die nachfolgenden Recycling- und Beseitigungsprozesse entstehenden ökologischen Belastungen anzugeben. Ein solcher Kennwert kann grundsätzlich über eine Ökobilanzierung der Prozeßketten gewonnen und über geeignete Systemschnittstellen in die Bewertung mit einbezogen werden.

Die mit der vorgestellten Strukturierung erstellte Datengrundlage bezüglich der Rahmenbedingungen von Recycling und Demontage wird im folgenden auch Recyclingszenario genannt.

### 6.3 Bewertung einzelner Demontagezustände

Auf der Grundlage eines Recyclingszenarios kann ein beliebiger Demontagezustand eines Produktes hinsichtlich seines Nutzens bewertet werden. Der Nutzen kann je nach Ziel der Demontage- und Recyclingsimulation entweder ein ökonomischer oder ein ökologischer Nutzen sein, wobei explizit darauf hingewiesen werden muß, daß im folgenden der "Nutzen" sowohl positive als auch negative Werte annehmen kann. Die folgenden Betrachtungen beziehen sich auf den ökonomischen Nutzen (Kosten/Erlös) der Demontagezustände.

Zur genauen Definition des Begriffes "Demontagezustand" wird folgendes festgelegt:

*Ein Demontagezustand beschreibt eine Demontagemöglichkeit eines Produktes mit den jeweilig gelösten Verbindungen und den entsprechend resultierenden Bauteilfraktionen (Bauteile oder Bauteilverbünde).*

Zur Bewertung eines Demontagezustandes müssen im wesentlichen zwei Aspekte berücksichtigt werden:

- Der Aufwand zum Lösen der Verbindungen, deren Demontage diesen Zustand herbeiführt.
- Der Nutzen (Kosten oder Erlös), der durch die Zuordnung der entstandenen Bauteilfraktionen zu entsprechenden Recycling- oder Beseitigungsprozessen entsteht.

Diese Teilbewertungen werden im folgenden diskutiert.

### **Bewertung der Demontageverrichtungen**

Da bei der Demontage zur Zeit fast ausschließlich manuelle Tätigkeiten anfallen, sind diese auch als Grundlage für eine Bewertung der Demontageverrichtungen geeignet. Hierbei spielen die Lohnkosten die entscheidende Rolle.

Somit ergibt sich der Aufwand für das Lösen einer Verbindung  $v$  als:

$$DK(v) = 1/3600 * t(v) * S \quad (2)$$

$DK(v)$ : Demontagekosten der Verbindung  $v$   
 $t(v)$ : Demontagezeit der Verbindung  $v$  in Sekunden  
 $S$ : Demontagestundensatz

Der Demontageaufwand, der zu einem Demontagezustand mit mehreren gelösten Verbindungen führt, ergibt sich analog als die Summe der Demontageaufwände für die Einzelverbindungen.

### **Zuordnung von Bauteilen und Bauteilverbänden zu den Recyclingoptionen**

Bei der Generierung von Demontagezuständen entstehen Bauteilfraktionen, welche einzelne Bauteile oder Bauteilverbände darstellen. Diese müssen bezüglich ihres Nutzens in der Nachgebrauchsphase bewertet werden. Hierzu werden die Bauteilfraktionen mit den in einem Recyclingszenario definierten Rahmenbedingungen abgeglichen und der bestmögliche Verwertungsweg bestimmt.

Die Vorgehensweise zur Bestimmung der optimalen Nachgebrauchsstrategie für diese Bauteilfraktionen ist mehrstufig. Im ersten Schritt werden die enthaltenen Bauteile hinsichtlich ihrer Materialzusammensetzung analysiert. Das Ergebnis ist eine Materialliste mit den entsprechenden Gewichtsanteilen. Ausgehend von dieser Materialverteilung werden alle nicht kompatiblen Outputfraktionen aus der Bewertung ausgeschlossen. Dazu wird die Materialliste der Bauteilfraktion mit den Materialrestriktionen der Outputfraktionen abgeglichen und für jedes Material überprüft, ob der tatsächliche Anteil jedes Materials in der jeweiligen Outputfraktion zulässig ist. Der Nutzen durch die Zuord-

nung der Bauteilfraktion zu einer beliebigen kompatiblen Outputfraktion ergibt sich wie in Gleichung (3) dargestellt.

$$N(Bv) = m(Bv) * W(o) \quad (3)$$

$N(Bv)$ : Nutzen eines Bauteilverbundes

$m(Bv)$ : Masse eines Bauteilverbundes

$W(o)$ : Kosten|Erlös der Outputfraktion

Nach der Ermittlung aller kompatiblen Outputfraktionen wird der jeweilige potentielle Nutzen dieser Verwertungsmöglichkeiten miteinander verglichen und die Variante mit dem größten Nutzen ermittelt. Danach wird festgestellt, ob für den Bauteilverbund eine Wiederverwendung in Frage kommt und welchen Nutzen diese Option haben würde. Der Nutzen der Wiederverwendung wird mit dem potentiellen Nutzen durch die Zuordnung der geeignetsten Outputfraktion verglichen und damit die kosteneffizienteste Recycling- oder Beseitigungsstrategie bezüglich der zugrundeliegenden Datenbasis bestimmt (Gleichung 4).

$$N_{max}(Bv) = Max \{N(Bv)_1, \dots, N(Bv)_n, N_{wv}(Bv)\} \quad (4)$$

$N_{max}(Bv)$ : Maximaler Nutzen eines Bauteilverbundes

$N(Bv)_x$ : Nutzen eines Bauteilverbundes bzgl. Outputfraktionen

$N_{wv}(Bv)$ : Nutzen des Bauteilverbundes bei Wiederverwendung

### Ermittlung des Deckungsbeitrages eines Demontagezustandes

Ein Demontagezustand ist gekennzeichnet durch die gelösten Verbindungen, welche diesen Zustand herbeiführen, und durch die dabei entstandenen Bauteilverbände. Entsprechend kann der Deckungsbeitrag eines Demontagezustandes aus dem Aufwand zum Lösen der Verbindungen und der Summe der Nutzen der Bauteilverbände berechnet werden (Gleichung 5).

$$DB(Dz) = \sum N_{max}(Bv_1) \dots N_{max}(Bv_n) - \sum Dk(v_1) \dots Dk(v_n) \quad (5)$$

$DB(Dz)$ : Deckungsbeitrag eines vollständigen Demontagezustandes

$N_{max}(Bv)$ : Maximaler Nutzen eines Bauteilverbundes

$Dk(v)$ : Aufwand zur Demontage einer Verbindung

## 6.4 Ableitung relevanter Demontagezustände aus Recyclinggraphen

Nach der Abbildung von Produkten im Recyclinggraphen ist zur Durchführung der Demontage- und Recyclingsimulation die Bestimmung aller relevanten Demontagezustände, welche in eine Bewertung einfließen sollen, erforderlich.

Wesentlich ist, daß die Generierung und Handhabung aller technisch möglichen Demontagezustände wegen der Vielzahl der Varianten zu Problemen bei der Rechenzeit und der Speicherverwaltung führen kann. Deswegen ist ein Kernelement des vorliegenden Ansatzes die Reduktion der alternativen Demontagekombinationen bereits bei der

Übertragung des Produktmodells in den prozeßorientierten Graphen. Diese Reduktion basiert auf der Abschätzung von Lösungsräumen (Gruppen von Demontagekombinationen), die keinesfalls die optimale Lösung enthalten können. Dazu werden einerseits Produktinformationen und andererseits auch Daten zu den Rahmenbedingungen für Demontage und Recycling genutzt.

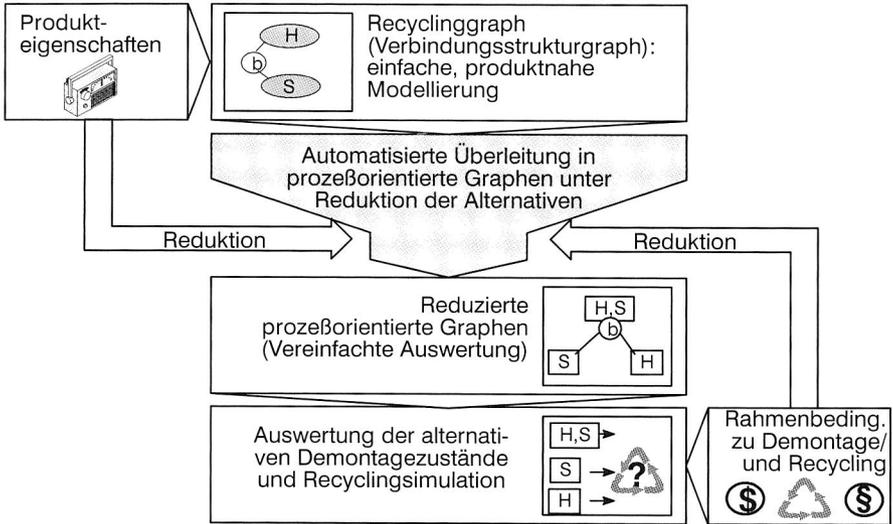


Bild 62: Vorgehensweise zur Auswertung von Recyclinggraphen für eine Demontage- und Recyclingsimulation

Im folgenden wird zunächst die Möglichkeit der Ableitung aller technisch realisierbaren Demontagekombinationen diskutiert. Danach werden Möglichkeiten zur effizienten Reduktion des Lösungsraumes bei der Generierung der Demontagealternativen durch die Einbeziehung der Rahmenbedingungen aufgezeigt.

### 6.4.1 Vollständige Ableitung der technisch möglichen Demontagezustände aus Recyclinggraphen

Für ein Produkt, das aus  $n$  Verbindungen besteht, ergeben sich theoretisch  $2^n$  Demontagezustände. Diese Anzahl wird jedoch durch technische Restriktionen erheblich reduziert. Diese sogenannten "Vorrangrelationen" sind bereits in der Definition des Recyclinggraphen von Produkten enthalten. Es gilt nun, diese Vorrangrelationen auszuwerten und daraus alle technisch realisierbaren Demontagezustände zu generieren. Aufgrund der Informationsredundanz und der Abbildungsmächtigkeit von AND/OR-Graphen eignen sich diese hervorragend zur systeminternen Abbildung realisierbarer Demontagezustände (vgl. Bild 63).

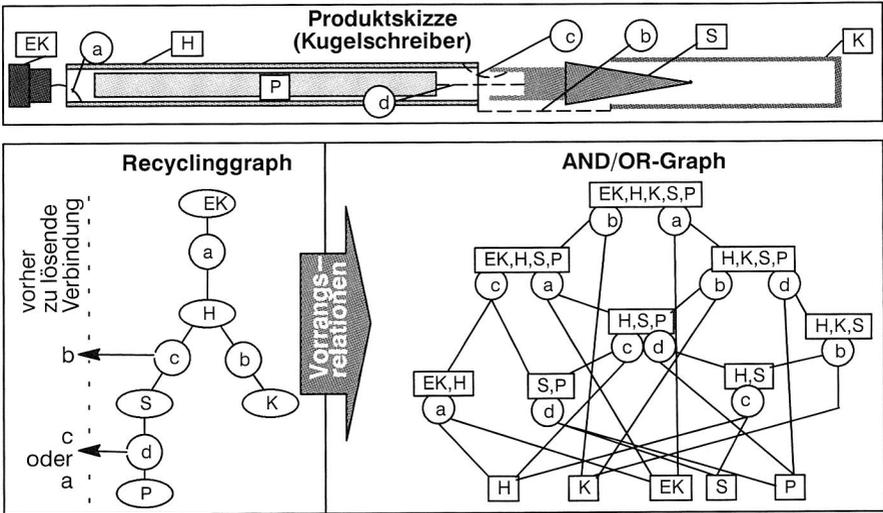


Bild 63: Ableitung der Demontagekombinationen aus Recyclinggraphen

Zur Generierung eines AND/OR-Graphen aus Recyclinggraphen kann, wie in Bild 64 dargestellt, folgende Vorgehensweise angewendet werden /110/:

In einem ersten Schritt werden alle unmittelbar lösbaren Verbindungen (Verbindungen ohne Vorgängerverbindung) ermittelt. Das Ausgangsprodukt wird durch das Öffnen jedes der gefundenen Verbindungen in mehrere Teilgraphen aufgeteilt, bis eine weitere Aufteilung nicht mehr möglich ist (Komponenten). Die Bearbeitung der Teilgraphen erfolgt zu einem späteren Zeitpunkt nach der gleichen Methode. Dort werden dann auch Verbindungen geöffnet, deren Vorgängerverbindungen in vorangegangenen Schritten gelöst wurden. Die Lösbarkeitsanalyse jeder Verbindung setzt eine Untersuchung aller ihrer Vorgängerverbindungen voraus. Eine zu öffnende Verbindung wird aus dem Graphen gelöscht, wodurch dieser in mehrere Untergraphen zerfällt, welche Ausgangspunkt weiterer Analysen sind.

Der zweite Schritt ordnet jeder der geöffneten Verbindungen eine Kante zu, die den Ausgangsgraph mit dem jeweiligen Teilgraphen verbindet. Auf diese Weise erhält man bei jedem Durchlauf des Algorithmus einen Knoten des AND/OR-Graphen, der mit seinen Nachfolgerknoten verbunden ist. Vorher muß aber überprüft werden, ob der jeweilige Teilgraph schon einmal erzeugt wurde. Dies ist der Fall, wenn verschiedene Demontageoperationen zum gleichen Zustand führen. Der Teilgraph wird, falls er neu auftritt, in die Liste der noch zu bearbeitenden Untergraphen aufgenommen, die im Rahmen späterer Durchläufe untersucht werden müssen. Der Algorithmus endet erst, wenn die Liste keine weiter zu unterteilenden Recyclinggraphen mehr enthält. Existiert ein Teilgraph bereits aus früheren Durchläufen, so wird dieser für die weitere Verarbeitung herangezogen. Dadurch kann verhindert werden, daß in dem späteren AND/OR-

Graphen zwei unterschiedliche Knoten existieren, die dieselben Bauteilverbünde darstellen.

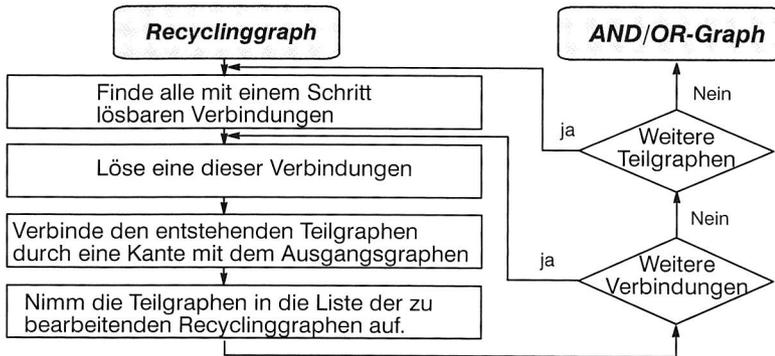


Bild 64: Algorithmus zur Transformation von Recyclinggraphen in AND/OR-Graphen (nach [110])

In einem weiteren Schritt müssen dann aus den Knoten des AND/OR-Graphen alle Demontagezustände des gesamten Produktes ermittelt werden. Dies bedeutet, daß alle möglichen Kombinationen der Knoten des AND/OR-Graphen - die in Ihrer Summe der Bauteile das vollständige Produkt ergeben - gefunden werden müssen. Daraus ergeben sich dann alle technisch realisierbaren Demontagezustände.

Die Nutzung aller technisch realisierbaren Demontagezustände (vollständiger AND/OR-Graph) zur Ermittlung der optimalen Demontage- und Recyclingstrategie ist bei kleinen Produkten mit wenigen Verbindungen problemlos durchführbar. Dieses Verfahren stößt jedoch bei wachsender Komplexität der Produkte sehr schnell an seine Grenzen, da dabei die AND/OR-Graphen sehr groß werden und selbst mit Rechnerunterstützung nur schwer handhabbar sind. Damit ist diese Lösung für ein anwendungsfreundliches Softwaresystem nur bei weniger komplexen Produkten als geeignet anzusehen.

Um auch komplexere Produkte bewerten zu können, ist es nötig, bereits bei der Auswertung der Recyclinggraphen eine Reduktion der relevanten Demontagekombinationen zu erreichen. Der Ansatz, der im Rahmen dieser Arbeit verfolgt wird, ist es, die demontage- und recyclingspezifischen Rahmenbedingungen bereits bei der Transformation des Recyclinggraphen in den AND/OR-Graphen mit einzubeziehen und offensichtlich sinnlose Lösungsräume von vornherein auszuschließen.

#### 6.4.2 Reduktion des Lösungsraumes durch ergänzende Produktstrukturierung

Um die Anzahl der zu bewertenden Demontagealternativen in komplexen Produkten zu verringern, ist es möglich, bereits durch weitere Produktinformationen hinsichtlich der

Produktstrukturierung erhebliche Reduktionen zu erzielen. Hierzu ist es nötig, die Produktmodellierung in dem Recyclinggraphen um weitere Strukturierungselemente zu erweitern und eine entsprechende Systematik zur Aufbereitung dieser Informationen vorzusehen.

*Bilden von Demontagebaugruppen*

In dem Recyclinggraphen eines Produktes sind zunächst alle Bauteile und Verbindungen enthalten. Aus verschiedenen Gründen bietet es sich an, einige Bauteile in Demontagebaugruppen zusammenzufassen. Demontagebaugruppen werden wie folgt definiert:

*Existiert eine Menge M von verbundenen Bauteilen in einem Produkt (Teilgraph des Recyclinggraphen), welche die Eigenschaft aufweist, daß Bauteile lediglich **außerhalb des Produktes** von M entfernt werden können, so kann M als Demontagebaugruppe definiert werden.*

Eine solche Demontagebaugruppe kann unter diesen Voraussetzungen separat von dem Produkt hinsichtlich der optimalen Recycling- und Demontagesstrategie analysiert werden. Das Ergebnis kann dann in den Hauptgraphen einfließen. Hierzu wird die Demontagebaugruppe im Hauptgraphen als einzelne Komponente dargestellt, welche mit einer eigenen Recyclingstrategie verknüpft ist (Bild 65). In den Demontageszuständen, in denen eine Separierung der Gruppe vorgesehen ist, wird die bereits ermittelte optimale Demontagesequenz und der entsprechende Deckungsbeitrag der Gruppe als  $N_{max}$  eingesetzt.

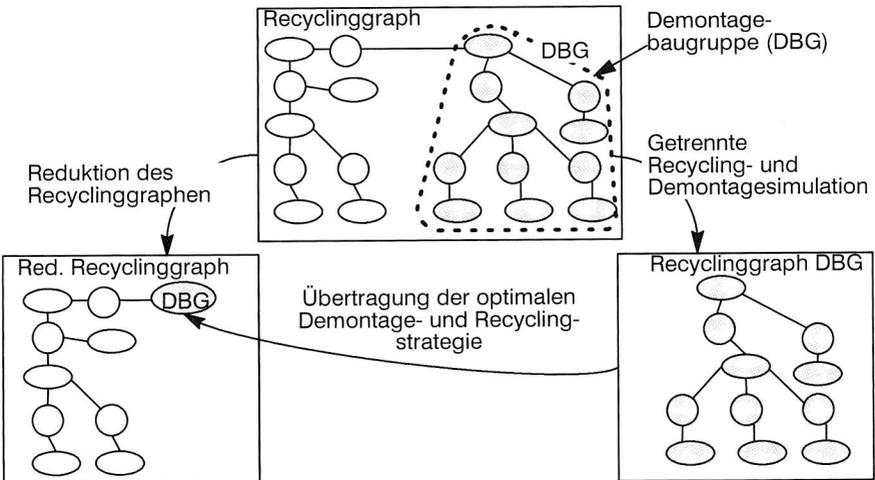


Bild 65: Reduktion von Recyclinggraphen durch Bildung von Demontagebaugruppen

Auf diese Weise lassen sich die Demontagealternativen erheblich einschränken, da die alternativen Demontagezustände der Demontagebaugruppe nicht mit denen des Gesamtproduktes kombiniert werden müssen.

#### *Definition von Nachfolgerrelationen*

Eine weitere Möglichkeit der erweiterten Produktmodellierung zur Reduktion der Demontagealternativen ist durch die Einbindung logischer Demontagerestriktionen gegeben. Wie bereits beschrieben werden die technischen Restriktionen (z. B. die Zugänglichkeit) in dem Recyclinggraphen als Vorrangrelationen in Form von Vorgängerinformationen dargestellt. Neben diesen technischen Restriktionen können jedoch, z.T. ausgehend von produktspezifischen Eigenschaften, auch logische Restriktionen definiert werden um damit sinnlose Lösungsräume bereits über die Produktmodellierung auszuschließen. Ein Beispiel hierfür ist ein Bauteil, das mit mehreren gleichen Schrauben befestigt ist. Da die Schrauben alle zugänglich sind, besteht keine technische Restriktion hinsichtlich der Demontagereihenfolge. Deshalb müssen alle möglichen Reihenfolgen der Demontage bei einer Bewertung berücksichtigt werden. Als logische Restriktion kann jedoch zur Vereinfachung definiert werden, daß entweder keine oder alle Schrauben gemeinsam gelöst sein können. Die Zwischenzustände, bei welchen einige Schrauben gelöst sind, entfallen somit für die Bewertung.

Aus dieser Motivation wird die Systematik des Recyclinggraphen um die verbindungsbezogene Eigenschaft "Nachfolger" ergänzt. Die Spezifikation eines Nachfolgers einer Verbindung bedeutet bei der Auswertung, daß gleichzeitig mit dieser Verbindung auch die Nachfolgerverbindung zu lösen ist. Somit können bei der Analyse einige Kombinationen und Permutationen mit diesen Verbindungen eingespart werden.

### **6.4.3 Einschränkung der relevanten Demontagezustände durch spezifische Kennwerte**

Die vorgestellten Möglichkeiten zur Reduktion der Alternativen durch eine erweiterte Produktinformation ist zwar wirksam, aber aufgrund der verbleibenden Vielzahl der alternativen Demontagezustände jedoch noch nicht befriedigend.

Die Ermittlung bewertungsrelevanter Demontagezustände aus Recyclinggraphen läßt sich in die Klasse der sogenannten "kombinatorischen Optimierungsprobleme" einreihen, für welche Grundstrukturen von Optimierungsverfahren verfügbar sind /96/. Eine Gruppe möglicher Optimierungsverfahren dient zur Ermittlung exakter Lösungen, wie z. B. "vollständige Enumeration" oder "Branch and Bound"-Verfahren, bei welchen das absolute Optimum im Lösungsraum gefunden wird. Im Gegensatz dazu stehen die Verfahren zur Ermittlung von angenäherten Lösungen. Dies sind zumeist heuristische Verfahren, die in der Regel mit geringerem Rechenaufwand suboptimale Lösungen generieren /106/.

Die Zielsetzung im Rahmen dieser Arbeit ist es, die absolut optimale Demontagestrategie für technische Produkte zu finden, wodurch nur Verfahren zur Ermittlung exakter

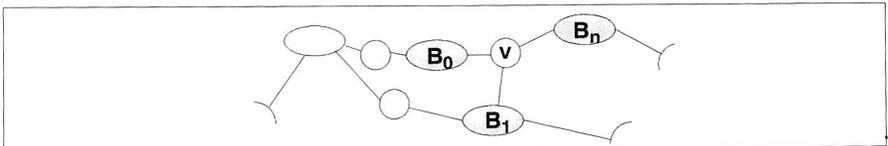
Lösungen in Frage kommen. In diesem Zusammenhang ist das "Branch and Bound"-Verfahren besonders interessant. Bei diesem Optimierungsverfahren wird sukzessive versucht, Teilmengen des Lösungsraumes zu bilden, in denen keine optimale Lösung zu erwarten ist, um diese auszusondern. Für jede der erzeugten disjunkten Teilmengen werden untere oder obere Schranken für Zielfunktionswerte genutzt, um die Relevanz hinsichtlich eines definierten Ziels zu überprüfen.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde zur effizienten Einschränkung der potentiellen Lösungsräume ein empirisches Verfahren, das an die "Branch and Bound"-Methodik angelehnt ist, entwickelt.

Die Vorgehensweise basiert darauf, durch eine überschaubare Anzahl einfacher Berechnungen an extremen Demontagezuständen (z. B. vollständig zerlegt <-> unzerlegt) Aussagen über die z.T. zahlreichen Zwischenzustände zu generieren, welche eine Abschätzung des Lösungsraumes erlauben. Wesentlich ist dabei, daß auch durch solche Abschätzungen keine angenähert optimalen Lösungen, sondern in jedem Fall die absolut optimale Lösung gefunden wird. Dazu werden im folgenden zunächst spezielle Kennwerte (Zielfunktionswerte) definiert, welche auf Lösungsräume hinweisen, in denen die optimale Lösung zu suchen ist. Danach wird die Anwendung dieser Kennwerte zur effizienten Reduktion des Lösungsraumes beschrieben.

**Lokale Trennschärfe**

Ein wesentlicher Kennwert, der im folgenden sehr oft genutzt wird, ist die *lokale Trennschärfe* einer Verbindung. Die *lokale Trennschärfe* ist ein Maß dafür, ob es sich lohnt, eine Verbindung zu öffnen, wenn nur die unmittelbar angrenzenden Bauteile berücksichtigt werden. Unabhängig vom restlichen Produkt wird bezüglich dieser verbundenen Bauteile der potentielle Nutzen durch das Öffnen der Verbindung berechnet. Der Nutzen läßt sich als Differenz des Erlöses der einzeln bewerteten Bauteile zum Nutzen des Bauteilverbundes ermitteln. Weiterhin wird noch der Aufwand für die Demontage der Verbindung, wie in Gleichung 6 dargestellt, mit einbezogen.



$$T_{loc}(v) = \sum N_{max}(B_1) .. N_{max}(B_n) - N_{max}(B_1 .. B_n) - Dk_{Minimal}(v) \tag{6}$$

- $T_{loc}(v)$ : Lokale Trennschärfe der Verbindung v
- $N_{max}(B_k)$ : Maximaler Nutzen eines einzelnen unmittelbar angrenzenden Bauteils
- $N_{max}(B_1 .. B_n)$ : Maximaler Nutzen des Bauteilverbundes
- $Dk(v)$ : Demontageaufwand der Verbindung v

Bild 66: Definition der "lokalen Trennschärfe"

## Variable Trennschärfe

Die *variable Trennschärfe* ist ebenfalls ein verbindungsbezogener Kennwert und kennzeichnet den potentiellen Deckungsbeitrag des Lösens einer Verbindung in einem Bezugsbauteilverbund. Im Gegensatz zur *lokalen Trennschärfe*, die sich auf die Bauteile in direkter Umgebung der Verbindung bezieht, werden bei der *variablen Trennschärfe* die Knoten des Demontage-AND/OR-Graphen, in welchem die relevanten Verbindung gelöst werden kann, berücksichtigt. Da im allgemeinen eine Verbindung von mehreren Knoten ausgehend gelöst werden kann, ist es möglich, daß sich knotenabhängig unterschiedliche *variable Trennschärften* ergeben. Die Vorgehensweise zur Berechnung der *variablen Trennschärfe* ist in Bild 67 dargestellt.

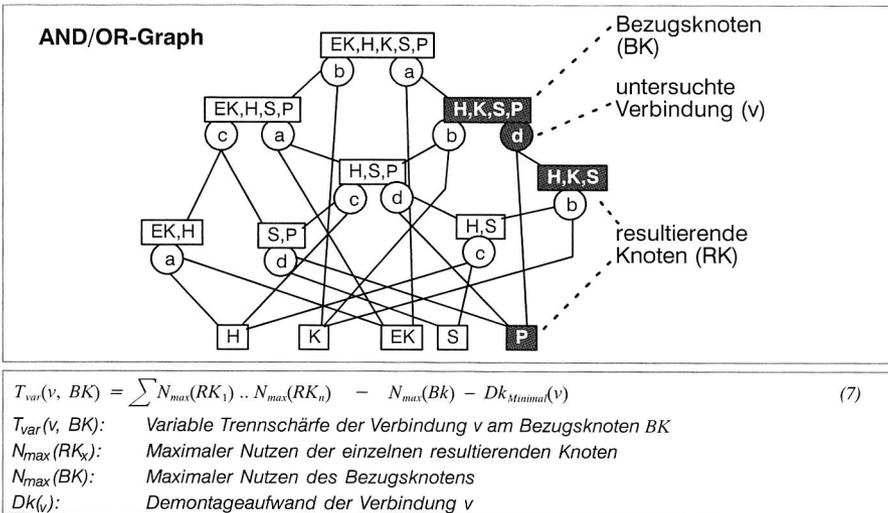


Bild 67: Der Kennwert "variable Trennschärfe" als Maß für die lokale Kompatibilität der Materialien von Bauteilverbänden nach einer Demontageverrichtung

## Entnahmepotential

Das Entnahmepotential ist ein bauteilbezogener Kennwert und gibt an, welchen potentiellen Nutzen die Entnahme eines Zielbauteils hat. Zur Berechnung gibt es zwei Alternativen, je nachdem, ob der Rest des Produktes berücksichtigt wird (vollständiges Entnahmepotential,  $E_{vpot}$ ) oder nicht (reduziertes Entnahmepotential  $E_{rpot}$ ). Beide Varianten werden für die Reduktion der Demontagealternativen benötigt.

Zur Berechnung des vollständigen Entnahmepotentials wird angenommen, daß ein Zielbauteil für sich demontiert wird und dann der zugehörige günstigste Demontageweg bestimmt. Für den resultierenden Demontagezustand wird der Deckungsbeitrag berechnet. Zur Ermittlung von  $E_{vpot}$  wird nun der Nutzen des unzerlegten Produktes mit

dem Gesamtnutzen (vgl. Gleichung 5) des zur Demontage des Zielbauteils benötigten Demontagezustandes verrechnet.

Zur Berechnung des reduzierten Entnahmepotentials  $E_{rpot}$  wird der Nutzen des Bauteils  $N_{max}(B)$  lediglich mit dem günstigsten Demontageweg zur Demontage des Bauteils verrechnet (Gleichung 9). Der Aufwand für die Demontage wird dabei vollständig dem Zielbauteil zugerechnet, auch wenn dabei ebenfalls andere Bauteile gelöst werden oder die Demontage anderer Bauteile vereinfacht wird (Bild 68).

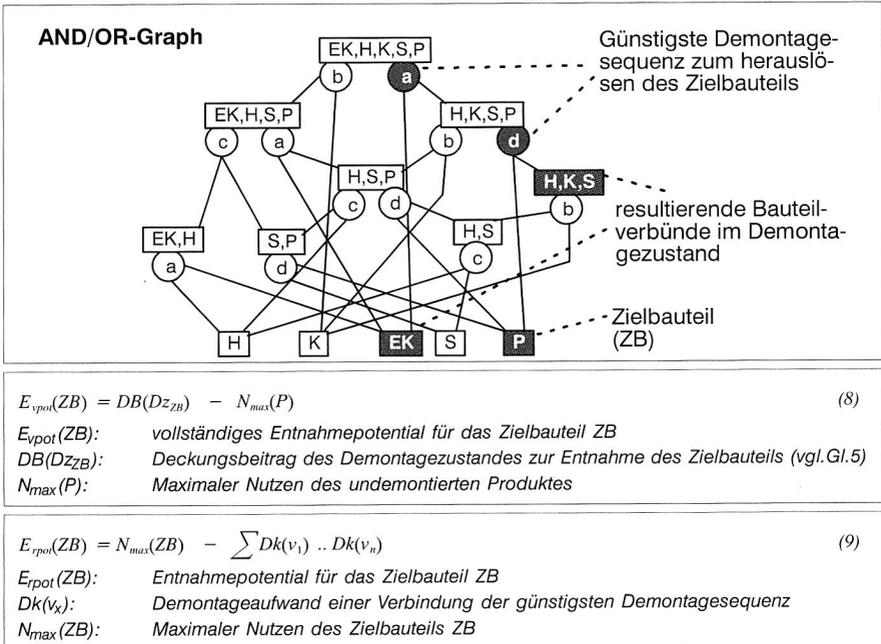


Bild 68: Berechnung des vollständigen und des reduzierten Entnahmepotentials für ein Zielbauteil

## Zerlegepotential

Der maximal erreichbare Nutzen der potentiellen Fraktionen eines Bauteilverbundes - ohne Berücksichtigung des Demontageaufwandes - ist bei einer vollständigen Zerlegung gegeben, da hierbei eine optimale Zuordnung der Materialien zu den verfügbaren Outputfraktionen erfolgen kann. Andere Demontagezustände können zwar einen ähnlichen oder gleichen, jedoch keinesfalls einen höheren Nutzen aufweisen.

Diese Tatsache wird im folgenden zur Abschätzung des potentiellen Nutzens, der durch die Zerlegung eines Bauteilverbundes zu erwarten ist, genutzt. Dabei wird der minimal erreichbare Nutzen (vollständiger Bauteilverbund) mit dem maximal erreichbaren Nut-

zen (vollständig zerlegter Bauteilverbund) in Beziehung gesetzt. Weiterhin wird angenommen, daß mindestens ein Demontageschritt benötigt wird, um den Zustand des maximal möglichen Nutzens zu erreichen. Darüber hinaus wird zugrundegelegt, daß hierzu die Verbindung mit der größten lokalen Trennschärfe (größte lokale Materialinkompatibilität) gelöst werden muß. Die Berechnungsvorschrift zur Ermittlung des Zerlegepotentials ist in Gleichung 10 dargestellt.

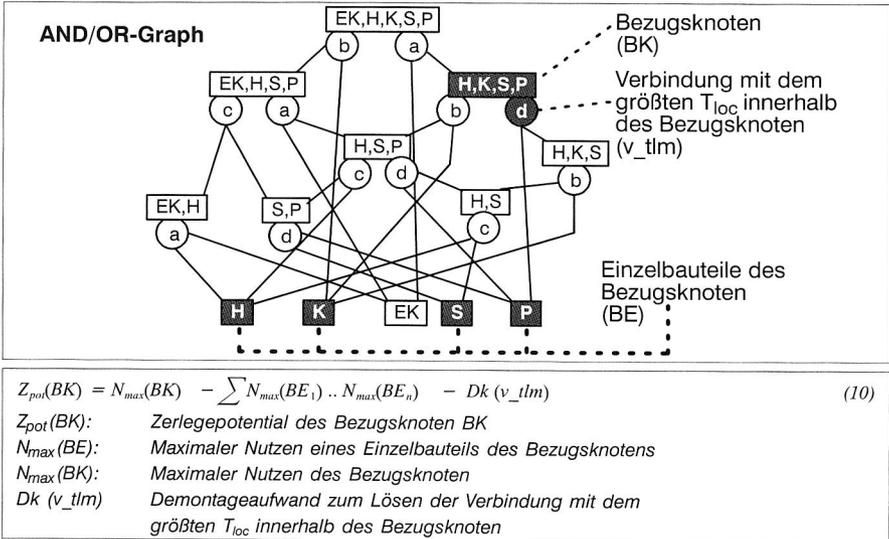


Bild 69: Das Zerlegepotential eines Bauteilverbundes erlaubt eine Abschätzung des potentiellen Nutzens der Demontage dieses Verbundes

Die vorgestellten Kennwerte beruhen alle auf einer Kombination von Produktdaten und Daten des Recycling szenarios. Diese Kennwerte werden nun systematisch eingesetzt und kombiniert, um mit den daraus ableitbaren Aussagen eine effiziente Reduktion der relevanten Demontagealternativen zu erreichen. Die hierzu relevanten Regeln werden im folgenden vorgestellt.

### Ermittlung von prioritären Bauteilen zur Demontage

Ziel dieses Teilschrittes ist die Ermittlung von Bauteilen in dem Recyclinggraphen, welche unter den gegebenen Rahmenbedingungen der Demontage in jedem Fall zu demontieren sind. Dadurch sollen die zahlreichen Permutation mit diesen Bauteilen vermieden werden.

Zwei Eigenschaften dieser Bauteile können dabei ausschlaggebend sein:

- Ein Bauteil weist einen potentiellen Nutzen auf, der größer ist als der Aufwand zu seiner Entnahme.
- Die Entnahme eines Bauteils (z. B. eines Gefahrstoffs) erhöht den Nutzen der restlichen Bauteilverbünde dermaßen, daß der Mehraufwand durch die entsprechenden Zerlegung aufgewogen wird.

Bei der Ermittlung dieser Bauteile muß jedoch beachtet werden, daß diese nicht in einem kompatiblen Bauteilverbund liegen dürfen (beispielsweise einem Verbund aus Bauteilen mit dem gleichen Gefahrstoff), da hierbei eine separate Demontage eines Bauteils nicht Teil der optimalen Demontage Lösung ist.

Zur Ermittlung dieser Bauteile stehen die Entnahmepotentiale  $E_{\text{vpot}}$  und  $E_{\text{rpot}}$  sowie der Kennwert der lokalen Trennschärfe zur Verfügung.

<p><b>Bedingung:</b> Für alle umgebenden Verbindungen eines Bauteils (B): <math>T_{\text{loc}} &gt; 0</math>                  Entweder <math>E_{\text{vpot}}(B) &gt; 0</math> oder <math>E_{\text{rpot}}(B) &gt; 0</math></p> <p><b>Aktion:</b> Alle Knoten des AND/OR-Graphen welche die ermittelten Bauteile in einem Verbund enthalten werden gestrichen.</p>
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

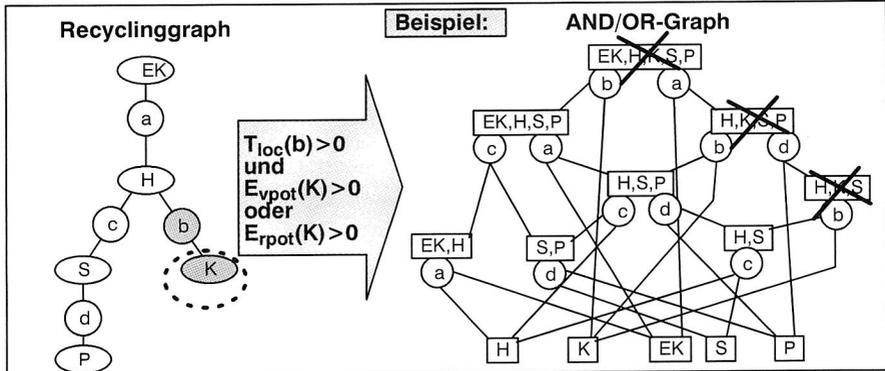


Bild 70: Reduktion des AND/OR-Graphen durch die Ermittlung von prioritären Bauteilen zur Demontage

Zunächst werden in dem Recyclinggraphen alle Bauteile ermittelt, für die gilt, daß alle angrenzenden Verbindungen  $T_{\text{loc}} > 0$  aufweisen. Das bedeutet, daß diese Bauteile mit allen angrenzenden Bauteilen lokal inkompatibel sind.

Im nächsten Schritt werden für diese Bauteile die Entnahmepotentiale  $E_{\text{vpot}}$  und  $E_{\text{rpot}}$  berechnet. Es ist sinnvoll, beide Potentiale zu berücksichtigen, da  $E_{\text{vpot}}$  gefahrstoffhaltige Bauteile berücksichtigt und  $E_{\text{rpot}}$  eine stärkere Einschränkungen bezüglich wertstoffhaltiger Bauteile zuläßt. Für alle Bauteile, bei denen eines der beiden Potentiale

größer als 0 ist, kann unabhängig von einer Analyse der kompletten Produktstruktur festgelegt werden, daß sich eine Demontage in jedem Fall lohnt. In diesem Fall können in dem zu erstellenden AND/OR-Graphen alle Knoten, welche die entsprechenden Bauteile in einem Verbund enthalten, von einer weiteren Analyse ausgeschlossen werden (vgl. Bild 70). Entsprechend können alle Verbindungen, die in der Demontagesequenz zu diesen Bauteilen liegen, als offen betrachtet werden. Dadurch sind erhebliche Einschränkungen des Lösungsraums möglich.

### Einschränkung des Lösungsraumes durch Nutzung des Zerlegepotentials

Wie bereits bei der Definition des Zerlegepotentials aufgezeigt, ermöglicht dieses die Abschätzung des potentiellen Nutzens der Zerlegung eines Bauteilverbundes ohne Berechnung der Zwischenzustände. Diese Aussage kann für eine weitere effiziente Reduktion des Lösungsraums genutzt werden.

Falls für einen Bezugsknoten (Bk) des AND/OR-Graphen (Bauteilverbund) gilt:  $Z_{\text{pot}}(\text{Bk}) < 0$ , so folgt daraus, daß eine weitere Zerlegung dieses Verbundes keinesfalls einen höheren Deckungsbeitrag liefern würde als der unzerlegte Bauteilverbund. Deshalb kann im AND/OR-Graphen der entsprechende Teilgraph gelöscht werden oder der Teilgraph muß gar nicht aufgebaut werden.

**Bedingung:** Für einen Bezugsknoten Bk gilt:  $Z_{\text{pot}}(\text{Bk}) < 0$

**Aktion:** Der Teilgraph zur Zerlegung des Bauteilverbundes kann aus dem AND/OR-Graphen gestrichen werden

#### Beispiel:

$Z_{\text{pot}}(\text{EK,H,S,P}) < 0$

Reduktion  
des  
Teilgraphen

Knoten, die ebenfalls an-  
deren Teilgraphen zu-  
geordnet sind können  
nicht gelöscht werden

#### AND/OR-Graph

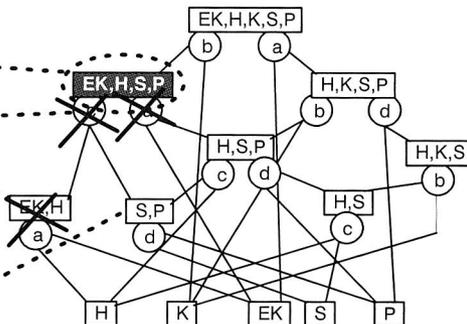


Bild 71: Reduktion des AND/OR-Graphen durch die Nutzung des Zerlegepotentials

Durch die Nutzung dieser Systematik lassen sich bei einer schrittweisen virtuellen Abbildung des AND/OR-Graphen, insbesondere bei komplexen Produkten, erhebliche Reduktionen desselben erreichen. Da auch das unzerlegte Produkt (der Wurzelknoten des AND/OR-Graphen) bewertet wird, kann das Zerlegungspotential aufzeigen, daß

keine einzige Zerlegung des Produktes hinsichtlich des Deckungsbeitrages sinnvoll ist. Auf eine weitere Analyse kann dann verzichtet werden.

### Reduktion der Alternativen durch Identifikation prioritärer Verbindungen in Bauteilverbänden

In einem Bauteilverbund können die Verbindungen -falls keine technischen Restriktionen vorliegen- in verschiedenen Reihenfolgen geöffnet werden. Entsprechend aufwendig werden alle alternativen Demontagereihenfolgen in dem AND/OR-Graphen abgebildet.

Betrachtet man nun eine Verbindung  $v$  in einem Bauteilverbund mit  $T_{var}(v) > 0$ , so kann folgendes festgestellt werden:

A) Ist  $T_{loc}(v)$  ebenfalls größer als 0, so steigt  $T_{var}$  mit abnehmender Bauteilzahl des Bauteilverbundes monoton an, bis es schließlich den Wert von  $T_{loc}$  erreicht. Dies läßt sich dadurch begründen, daß bei dieser Verbindung sowohl im lokalen Bereich als auch im Bereich des Bezugsbauteilverbundes eine Kompatibilitäts Grenze der umliegenden Bauteile bzw. Bauteilverbände vorliegt. Je kleiner der Bauteilverbund wird, desto sortenreiner werden die umliegenden Materialien in den resultierenden Bauteilverbänden, welche durch die Verbindung getrennt werden können (Verlauf A in Bild 72). Der maximale Deckungsbeitrag kann dann bei dem Bauteilverbund erreicht werden, bei welchem nur diese eine Verbindung enthalten ist.

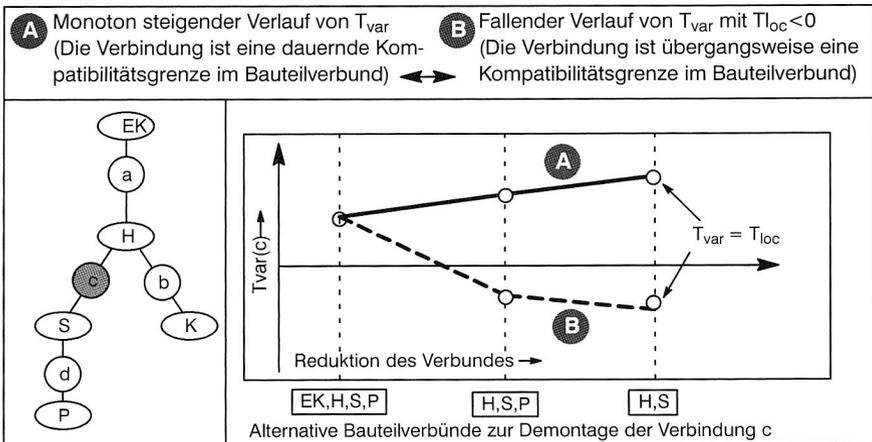


Bild 72: Alternative Verläufe von  $T_{var}$  bezogen auf verschiedene Bauteilverbände (schematisch)

B) Ist  $T_{loc}(v)$  kleiner als 0, so handelt es sich um eine übergangsweise Erhöhung des Deckungsbeitrages durch das Lösen der Verbindung in diesem Bauteilverbund. Die Erhöhung des Deckungsbeitrages wird dann durch inkompatible Materialien in Bauteil-

len, welche nicht in der direkten Umgebung der relevanten Verbindung sind, erhöht. Deshalb lohnt sich bei dem Bezugsbauteilverbund mit  $T_{var} > 0$  zunächst die Demontage der Verbindung. Wird jedoch der Bauteilverbund erreicht, in welchem lediglich die relevante Verbindung enthalten ist, so lohnt sich die weitere Demontage nicht mehr (Verlauf B in Bild 72).

**Bedingung:** Für eine Verbindung  $v$  in einem Bezugsknoten gilt:  
 $T_{var}(v, BK) > 0$  und  $T_{loc}(v) > 0$

**Aktion:** Die Verbindung kann in dem Teilgraphen von BK als geöffnet betrachtet werden

**Beispiel:**

**AND/OR-Graph**

Bezugsknoten (BK)

Verbindung  $c$  mit:

$T_{var}(c, BK) > 0$  und  $T_{loc}(c) > 0$

Reduktion des Teilgraphen  
 Alternative Reihenfolgen  
 werden eliminiert

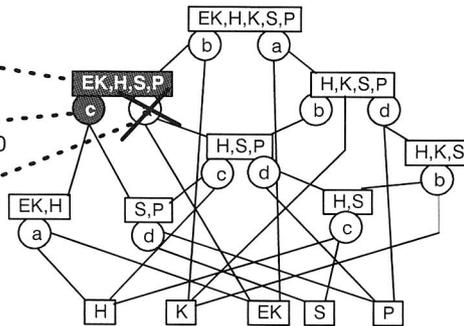


Bild 73: Reduktion des AND/OR-Graphen durch die Ermittlung von prioritären Verbindungen zur Demontage in Bezugsknoten des AND/OR-Graphen

Auf dieser Basis kann nun folgende Regel für alle Verbindungen in Bezugsbauteilverbänden zur Einschränkung des Lösungsraumes formuliert werden:  
 Falls für eine Verbindung  $v$  in einem Bezugsknoten (BK) gilt:

$$T_{var}(v, BK) > 0 \text{ und } T_{loc}(v) > 0$$

dann lohnt sich das Lösen der Verbindung  $v$  in allen aus BK resultierenden Bauteilverbänden. Darum kann in diesem Fall bei der Erstellung des AND/OR-Graphen darauf verzichtet werden verschiedene Reihenfolgen zur Lösung dieser Verbindung abzubilden, und die Verbindung kann bezüglich BK als geöffnet betrachtet werden (vgl. Bild 73).

## 6.5 Ermittlung der optimalen Recycling- und Demontagestrategie

Die Ermittlung der optimalen Recycling- und Demontagesimulation für Produkte basiert auf der Ermittlung der relevanten Demontagekombinationen, wie sie in dem vorangegangenen Kapitel vorgestellt wurde. Nach dem Aufbau eines reduzierten AND/OR-Gra-

phen werden zunächst aus den Knoten des Graphen komplette Demontagezustände des Produktes generiert. Diese bewertungsrelevanten Demontagezustände werden dann, wie in Bild 74 dargestellt, hinsichtlich ihres Deckungsbeitrages bewertet. Dabei wird der Nutzen der resultierenden Knoten eines Demontagezustandes mit dem Aufwand zur Demontage der gelösten Verbindungen verrechnet (vgl. Gleichung 5).

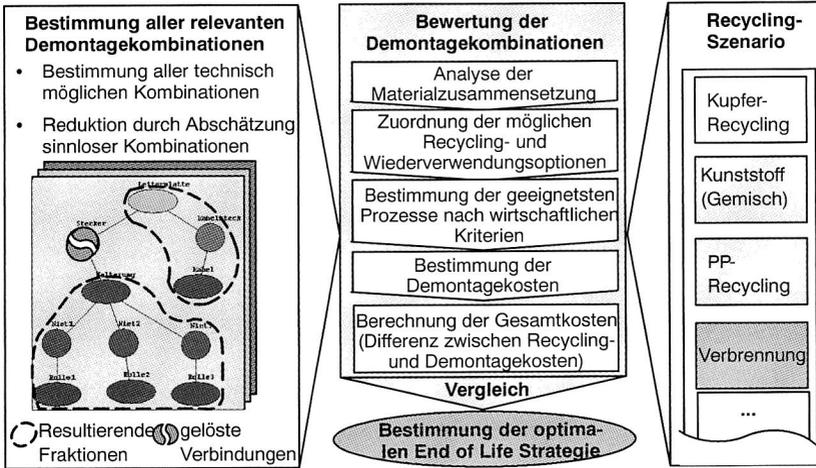


Bild 74: Systematik zur Bewertung von Demontagekombinationen und Ermittlung des wirtschaftlichen Optimums

Die kosteneffizienteste Recycling- und Demontagestrategie (End of Life Strategie)  $DZ_{opt}$  für das zu analysierende Produkt erhält man durch den Vergleich der potentiellen Deckungsbeiträge der verfügbaren Demontagezustände (Gleichung 11)

$$DZ_{opt} = DZ \mid DB(Dz) = \max (DB(Dz_1) \dots DB(Dz_n)) \quad (11)$$

$DZ$ : Demontagezustand

$DZ_{opt}$ : Demontagezustand mit dem höchsten Deckungsbeitrag

$DB(Dz_x)$ : Deckungsbeitrag eines vollständigen Demontagezustandes

Analog zu der Ermittlung der kosteneffizientesten Recyclingstrategie ist es möglich, eine **ökologisch** optimale Recyclingstrategie zu ermitteln. Als Voraussetzung hierfür müssen die verfügbaren Outputfraktionen sowie die Demontageverrichtungen mit einem ökologischen Kennwert (z. B. aus Schnittstellen zu Ökobilanzwerkzeugen) belegt werden. Diese Kennwerte werden statt dem ökonomischen Nutzen in die Bewertung einbezogen und führen zu dem ökologisch optimalen Demontagezustand. Die Schwachstelle bei dieser Bewertung ist jedoch eine gesicherte Datenbasis für solche ökologische Kennwerte. Darüber hinaus ist die Gewichtung von ökologischen und ökonomischen Kriterien problematisch, so daß hier noch erheblicher Forschungsbedarf besteht.

## **7 Systematik zur rechnerunterstützten, recycling-orientierten Optimierung der Produktgestalt**

Im vorhergehenden Kapitel wurde eine systematische Vorgehensweise zur Ermittlung der optimalen Recycling- und Demontagestrategie vorgestellt. Die Ergebnisse einer solchen Analyse von Produkten sind bei der Produktentwicklung hilfreich, da Vergleiche alternativer Produktkonzepte hinsichtlich der besseren Recycling- und Demontageeignung durchgeführt werden können. Diese Produktbewertung beinhaltet jedoch nur selten direkte Aussagen darüber, wo und wie der Konstrukteur zur Optimierung eingreifen muß. Konventionelle Methoden wie beispielsweise Checklisten liefern hierzu nur sehr allgemeine Informationen, die auch nicht immer auf die tatsächlichen Rahmenbedingungen abgestimmt sind. Bei der Produktgestaltung ist deshalb eine umfassende Schwachstellenanalyse zur Ermittlung von Optimierungspotentialen besonders wichtig.

Im folgenden Kapitel wird eine Methodik zur recyclingbezogenen Schwachstellenanalyse von Produkten unter Berücksichtigung des Recyclingszenarios vorgestellt und eine abgestimmte Vorgehensweise zur Produktoptimierung aufgezeigt. Als Abschluß des Kapitels werden Möglichkeiten zur Kopplung (bzw. Integration) der entwickelten Systematik mit Systemen zur lebenszyklusübergreifenden umweltbezogenen Produktdanalyse vorgestellt und diskutiert.

### **7.1 Konzeption von Methoden zur Schwachstellenanalyse unter Berücksichtigung von Produktmodell und Recyclingszenario**

Die Haupteinflußfaktoren auf die Recyclingfähigkeit von Produkten sind im allgemeinen die Produktstruktur, die benutzten Materialien und ihre Anteile in den jeweiligen Komponenten, sowie die Demontageeignung der eingesetzten Verbindungstechniken (vgl. Kapitel 5.1). Da die Recyclingeignung von Produkten auch stark von der Wechselwirkung dieser Merkmale abhängt, ist die Ermittlung der wesentlichen Optimierungspotentiale sehr schwierig. Eine besondere Erschwernis ist darüber hinaus, daß diese Kriterien, zum Teil wegen anderer Konstruktionsbeschränkungen, nicht frei geändert werden können.

Der Grundgedanke des Ansatzes, der im folgenden vorgestellt wird, besteht darin, die lokalen oder globalen Schwachstellen bezüglich der Wechselwirkung zwischen der Produktstruktur und den Eigenschaften von Komponenten und Verbindungen unter Berücksichtigung des definierten Recyclingszenarios zu ermitteln. Dazu wurden spezielle Kennwerte und Methoden entwickelt, welche die Ermittlung von Optimierungspotentialen ermöglichen.

### 7.1.1 Optimierungspotentiale bei der Materialauswahl

Ein wichtiger Aspekt der Recyclinggerechtigkeit von Produkten ist die Kompatibilität der eingesetzten Materialien. Durch eine Optimierung der Materialkompatibilität innerhalb von Produkten oder Baugruppen kann einerseits der Demontageaufwand erheblich reduziert werden. Andererseits können unter Umständen höherwertige Recyclingkreisläufe erreicht werden.

Die Problemstellung liegt hierbei vor allem darin, daß für ein Gemisch aus verschiedenen Materialien je nach Zusammensetzung verschiedene Optionen zur Erreichung einer Kompatibilität zur Verfügung stehen. So ist es beispielsweise bei einem Gemisch aus drei Stoffen möglich, eine sortenreine Kompatibilität durch das Ersetzen der jeweils anderen beiden "Störstoffe" zu erreichen. Weiterhin ist es denkbar, das Gemisch so zu optimieren, daß nur ein Material entfernt werden muß. Neben der Fragestellung, welche dieser Kompatibilitäten leichter zu erreichen ist, stellt sich auch die Frage nach der erstrebenswertesten Kompatibilität und damit nach einer Bewertung der Alternativen.

In dem vorliegenden Ansatz wurde für die Bewertung alternativer Kompatibilitäten der potentiell erreichbare Nutzen als Maß für die Hochwertigkeit des Recyclingprozesses zugrundegelegt. Bereits für die Ermittlung der optimalen Recyclingstrategie wurde ein Recyclingszenario definiert, in welchem verfügbare Recycling- und Beseitigungsprozesse hinsichtlich ihrer Materialrestriktionen spezifiziert wurden. Da die Materialrestriktionen der Outputfraktionen Aussagen über kompatible und inkompatible Materialien enthalten, ist es sinnvoll, diese Information nicht nur für die Bewertung, sondern auch für die Optimierung der Materialkompatibilität zu nutzen.

Die Vorgehensweise zur Optimierung der Materialkompatibilität ist in Bild 75 dargestellt. In einem ersten Schritt wird die Materialzusammensetzung der ausgewählten Komponenten, Baugruppen oder des gesamten Produktes analysiert. Dem ermittelten Materialgemisch wird zunächst der entsprechende Recycling- oder Beseitigungsprozeß mit dem maximal möglichen Nutzen zugewiesen. Ein Vergleich der Materialzusammensetzung mit den Materialrestriktionen der zunächst inkompatiblen Prozesse zeigt für jeden dieser Prozesse die Störstoffe bzw. die Störanteile des aktuellen Materialgemisches auf. Ein Ergebnis für einen Prozeß kann dabei sein, daß von einem oder mehreren Materialien entweder zuviel (Störstoff) oder zuwenig (Grundstoff, z.B. zuwenig Kupfer in der Kupferfraktion) enthalten ist. Gleichzeitig wird für jeden dieser Prozesse der potentielle Nutzen (bzw. Erlös) ermittelt, wobei zur Abschätzung angenommen wird, daß inkompatible Materialien durch kompatible mit der gleichen Masse ersetzt werden.

Nach der Analyse der relevanten Bauteile stehen für das Materialgemisch folgende Kennwerte für alternative Recycling- oder Beseitigungsprozesse zur Verfügung:

- Anzahl der Störstoffe,
- zu substituierender Gewichtsanteil des Materialgemisches,
- potentieller Nutzen.

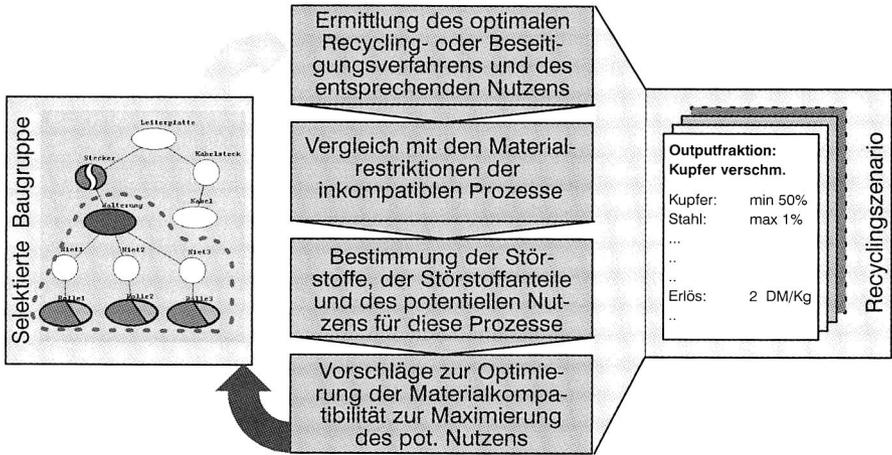


Bild 75: Methodik zur Verbesserung der Materialverträglichkeit von selektierten Komponenten hinsichtlich des zugrundeliegenden Recyclingszenarios

Somit ist es möglich, die geeignetsten alternativen Kompatibilitätsmöglichkeiten hinsichtlich des potentiellen Nutzens und des dafür nötigen Änderungsaufwandes abzuschätzen.

### 7.1.2 Schwachstellen bei Auswahl und Anordnung von Verbindungen

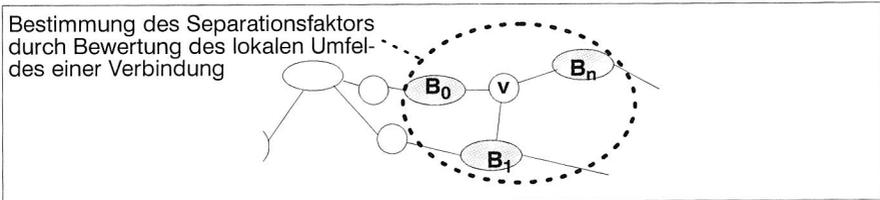
Bei der recyclinggerechten Produktgestaltung spielt die Anordnung und die Auswahl von Verbindungselementen eine wichtige Rolle. Dabei sind folgende zwei Fragestellungen als Entscheidungs- und Optimierungsgrundlage wesentlich:

- Welche Verbindungen sind für das Recycling des Produktes wichtig und stellen damit potentielle Schwachstellen und Optimierungspotentiale dar?
- Welche dieser relevanten Verbindungen lassen sich durch eine Umstrukturierung oder durch eine Änderung der Verbindungstechnik optimieren?

Der vorliegende Ansatz beruht darauf, den Anwender bei diesen Fragestellungen zu unterstützen, indem rechnergestützt produktseitige verbindungsrelevante Eigenschaften zusammen mit den Anforderungen und Definitionen des Recyclingszenarios ausgewertet werden.

Bei dieser Vorgehensweise wird zunächst die Wichtigkeit jeder Verbindung in dem jeweiligen lokalen Umfeld der Produktstruktur ermittelt. Dazu wird die Materialkompatibilität der durch die Verbindung miteinander verbundenen Bauteile ermittelt. Die lokale verbindungsbezogene Materialkompatibilität wird durch die Berechnung des sogenannten "Separationsfaktors" bestimmt. Der Separationsfaktor einer Verbindung wird, ähnlich der lokalen Trennschärfe, als potentieller Nutzen durch das Öffnen der Verbindungen

dung bezüglich der unmittelbar angrenzenden Bauteile definiert (Bild 76). Der Nutzen läßt sich als Differenz des Erlöses der einzeln bewerteten Bauteile zum Nutzen des Bauteilverbundes ermitteln (Gleichung 12).



$$SF(v) = \sum N_{\max}(B_1) \dots N_{\max}(B_n) - N_{\max}(B_1 \dots B_n) \quad (12)$$

$SF(v)$ : Separationsfaktor der Verbindung  $v$

$N_{\max}(B_k)$ : Maximaler Nutzen eines einzelnen unmittelbar angrenzenden Bauteils

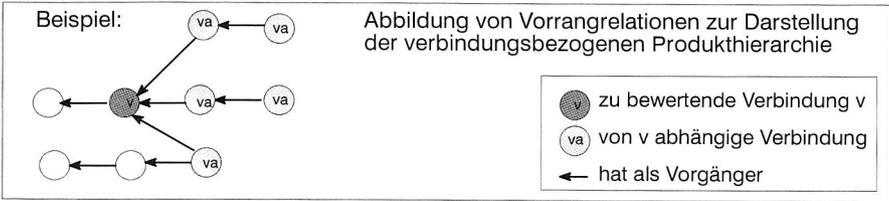
$N_{\max}(B_1 \dots B_n)$ : Maximaler Nutzen des Bauteilverbundes

Bild 76: Der Separationsfaktor einer Verbindung stellt die Demontagerelevanz einer Verbindung aufgrund der lokalen Materialkompatibilität dar

Nach der Berücksichtigung der lokalen Wichtigkeit einer Verbindung muß auch die Anordnung der Verbindung innerhalb der Produkthierarchie in die Bewertung mit einfließen. Ein Beispiel hierfür ist eine Gehäuseverbindung (geringer Separationsfaktor), welche zuerst gelöst werden muß, um die Zugänglichkeit zu einem innenliegenden Wert- oder Gefahrstoff (Verbindungen mit einem hohen Separationsfaktor) zu sichern. In diesem Fall ist die Optimierung oder Neustrukturierung der Gehäuseverbindung mindestens ebenso wichtig wie die Optimierung der Verbindungen zu den innenliegenden Zielbauteilen.

Um eine systematische Aussage über die Stellung einer Verbindung in der Produkthierarchie zu erreichen, werden die Vorrangrelationen ausgewertet und die anderen Verbindungen, welche direkt oder indirekt die relevante Verbindung als Vorrangrelation enthalten (abhängige Verbindungen), ermittelt. Jede dieser abhängigen Verbindungen hat, je nach lokaler Wichtigkeit, einen entsprechenden Separationsfaktor. Da diese Separationsfaktoren alle von dem Lösen der zu berechnende Verbindung abhängig sind, fließen sie aufsummiert in die Berechnung der Recyclingrelevanz der Verbindung ein.

Als Kennwert für die Recyclingrelevanz einer Verbindung unter Berücksichtigung der lokalen Wichtigkeit und der Anordnung der Verbindung in der Produkthierarchie wurde das *Separationspotential* definiert (Bild 77). Zur Berechnung des Separationspotentials einer Verbindung werden die Separationsfaktoren der jeweils abhängigen Verbindungen aufsummiert und zu dem Separationsfaktor der zu bewertenden Verbindung addiert (Gleichung 13)



$$S_{pot}(v) = SF(v) + \sum SF(v_{a1}) \dots SF(v_{an}) \tag{13}$$

$S_{pot}(v)$ : Separationspotential der Verbindung v  
 $SF(v)$ : Separationsfaktor der Verbindung v (vgl. Gleichung 12)  
 $SF(v_{ax})$ : Separationsfaktor einer von v abhängigen Verbindungen

Bild 77: Berechnung des Separationspotentials für Verbindungen unter Berücksichtigung der Anordnung von Verbindungen in der Produkthierarchie

Nach der Berechnung des Separationspotentials für jede Verbindung ist es möglich, die recyclingrelevanten Verbindungen von den weniger wichtigen zu unterscheiden. Im nächsten Schritt muß der Demontageaufwand der jeweiligen Verbindungen berücksichtigt werden. Eine Schwachstelle bei der Produktgestaltung liegt dann vor, wenn eine der recyclingrelevanten Verbindungen (hohes Separationspotential) nur mit hohem Aufwand zu demontieren ist. Um diese Schwachstellen dem Anwender schnell und einfach zu visualisieren, bietet es sich an, die Portfoliotechnik einzusetzen. Hierbei wird das Separationspotential jeder Verbindung der x-Achse und der jeweilige Demontageaufwand der y-Achse zugeordnet.

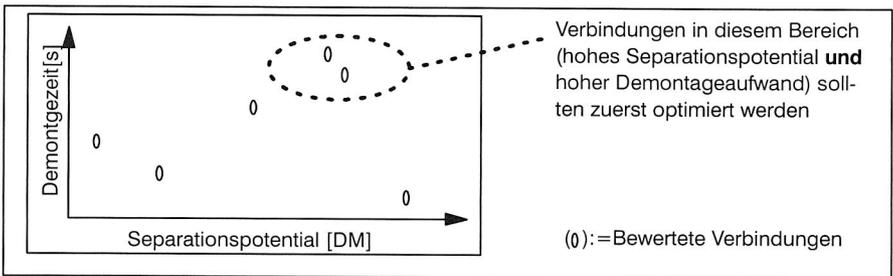


Bild 78: Visualisierung der verbindungsbezogenen Schwachstellen der Produktgestaltung durch die Darstellung von Separationspotential und Demontageaufwand

Verbindungen mit einem hohen Separationspotential **und** einer hohen Demontagezeit (rechts oben im Portfolio) sollten als erste hinsichtlich einer möglichen Optimierung überprüft werden. Im allgemeinen stehen zur verbindungsbezogenen Produktoptimierung zwei Optionen zur Verfügung:

- Verringerung der Demontagezeit für das Lösen einer Verbindung durch die Verringerung der Anzahl an Verbindungselementen oder Verwendung alternativer Verbindungstechniken.
- Änderung der Produktstruktur dahingehend, daß die Zugänglichkeit zu wichtigen Verbindungen, welche von der zu optimierenden Verbindung gesperrt werden, durch eine andere Anordnung erhöht wird.

Die vorgestellte Systematik zur Bewertung der Recyclingrelevanz von Verbindungen erlaubt somit eine schnelle und effiziente Detektion von verbindungsbezogenen Schwachstellen und Optimierungspotentialen des Produktes.

### 7.1.3 Optimierungsmöglichkeiten bei der Anordnung von Bauteilen

Zur Optimierung der Produktstruktur können neben verbindungsbezogenen auch bauteilspezifische Eigenschaften genutzt werden. Das Hauptziel ist dabei, zunächst demontagerelevante Zielbauteile zu ermitteln und die Produktstruktur dann so zu ändern, daß ein geringerer Demontageaufwand bei deren Demontage entsteht.

Komponenten eines Produktes können demontagerelevante Zielbauteile sein, wenn eine der folgenden Bedingungen erfüllt ist:

- Das Bauteil hat einen hohen potentiellen Nutzen, beispielsweise durch eine mögliche Wiederverwendung oder durch enthaltene Wertstoffe. In diesem Fall ist die Motivation für die Demontage die *Verwertung oder Wiederverwendung dieses Zielbauteils* unabhängig vom restlichen Produkt
- Das Bauteil hat einen hohen negativen Nutzen, beispielsweise durch enthaltene Gefahrstoffe, die teure Beseitigungsverfahren bedingen. In diesem Fall ist die Motivation für die Demontage die *optimierte Verwertung des restlichen Produktes* mit einem kostengünstigeren Verfahren

In beiden Fällen handelt es sich um Bauteile, die bei der Produktgestaltung hinsichtlich einer demontagegerechten Anordnung besonders berücksichtigt werden sollten. Dabei muß darauf geachtet werden, ob ein solches Zielbauteil in einem gleichartigen (materialverträglichen) Verbund angeordnet ist. In diesem Fall sollte der komplette Verbund hinsichtlich einer Entnahme aus dem Produkt optimiert werden.

Zur schnellen und effizienten Detektion dieser bauteilspezifischen Schwachstellen in der Produktstruktur wurde die nachfolgend beschriebene Systematik entwickelt. Zunächst wird jedem Bauteil für den Fall, daß es von dem Restprodukt separiert wäre, ein potentieller Nutzen zugewiesen. Anschließend wird für jedes Bauteil der günstigste Demontageweg für die Entnahme berechnet und der entsprechende Aufwand zugeordnet. Beide Werte werden für jedes Bauteil in ein Portfolio übertragen (Bild 79).

Ob ein Bauteil in einem materialverträgliche Verbund enthalten ist, kann durch die Überprüfung der lokalen Trennschärfe ( $T_{loc}$ ) aller direkt anliegenden Verbindungen

überprüft werden. Wenn alle diese Verbindungen  $T_{loc} > 0$  aufweisen, liegt kein Verbund vor (vgl. auch Bild 70).

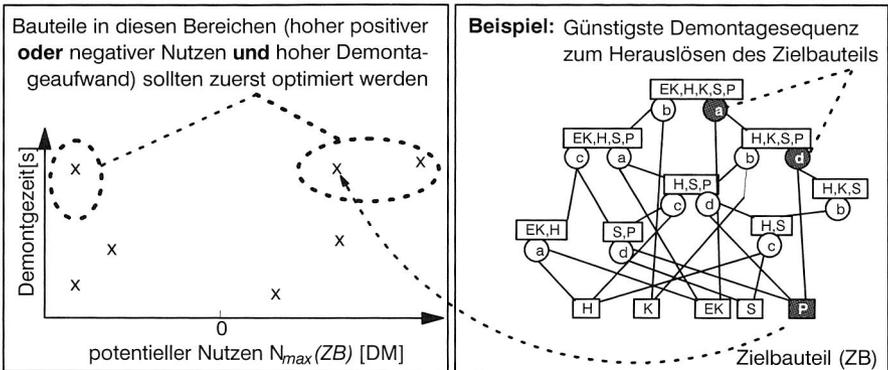


Bild 79: Darstellung von potentiellem Nutzen und Demontageaufwand jedes Bauteils in einem Portfolio zur Detektion von Schwachstellen

Auf diese Weise werden potentielle Schwachstellen des Produktes schnell und einfach visualisiert. Insbesondere Bauteile, welche in dem Portfolio entweder rechts oben oder links oben eingetragen sind (hoher positiver **oder** negativer Nutzen **und** hoher Demontageaufwand), sollten hinsichtlich einer Optimierung überprüft werden. Zu einer Optimierung besteht die Möglichkeit, die Produktstruktur so zu ändern, daß diese Bauteile für eine Demontage leichter zugänglich werden. Alternativ dazu können die Verbindungselemente, die in der Demontagesequenz zu den relevanten Zielbauteilen enthalten sind, hinsichtlich ihres Demontageaufwandes (alternative Verbindungstechnik) optimiert werden.

## 7.2 Systematik zur integrierten Anwendung der Schwachstellenanalysen

In dem vorhergehenden Kapitel wurden Methoden zur Detektion von Schwachstellen in Produkten zusammen mit entsprechenden Optimierungsmöglichkeiten vorgestellt. Die isolierte Anwendung dieser Methoden kann aufgrund des komplexen Zusammenspiels der Einflußfaktoren auf die Demontage- und Recyclingeignung von Produkten zu unterschiedlichen Ergebnissen führen. So kann z.B. eine Optimierung der Materialkompatibilität eines Produktes die Ausgangsbedingungen für die Optimierung der Demontageeignung verändern (und umgekehrt). Deshalb ist die Entwicklung einer systematischen Vorgehensweise zum Einsatz der vorgestellten Methoden der Schwachstellenanalyse entscheidend für den Erfolg der rechnergestützten Produktoptimierung.

Das wesentliche Ziel einer Produktoptimierung hinsichtlich der Recycling- und Demontageeignung ist es, möglichst hochwertige Recyclingkreisläufe bei möglichst geringem

Demontageaufwand zu erreichen. Am besten wäre es demnach, wenn ein Produkt ohne jegliche Demontage einem hochwertigen Recyclingkreislauf zugeführt werden könnte. Deshalb wurde zur Produktoptimierung mit den definierten Schwachstellenanalysen eine "Top Down" Strategie gewählt. Hierbei werden die Analysen und Methoden zuerst auf das vollständige Produkt angewendet. Falls zunächst keine Optimierung möglich ist, wird das Produkt auf der Basis einer speziellen Strategie in kleinere Optimierungssegmente aufgeteilt. Die entsprechenden Analysemethoden werden dann isoliert auf die Optimierungssegmente angewendet. Falls wiederum keine Optimierung möglich ist, erfolgt erneut eine Unterteilung der Segmente. Die Methodik wird solange fortgeführt, bis entweder keine Unterteilung mehr möglich ist oder bis keine Optimierungspotentiale mehr abzusehen sind.

Die entwickelte systematische Vorgehensweise zur Optimierung ist auf unterschiedliche Wirkungsbereiche - sowohl auf das komplette Produkt als auch auf beliebige Teilprodukte - anwendbar. Die Methodik enthält eine aufeinander abgestimmte Abfolge von Funktionen mit verschiedenen Zielkriterien zur Optimierung. Für jedes Zielkriterium wird jeweils die folgende Sequenz abgearbeitet:

- Analyse des Wirkungsbereiches: Schwachstellen und Optimierungspotentiale innerhalb des Wirkungsbereiches bezüglich der jeweiligen Zielkriterien werden detektiert.
- Anwendung von Optimierungsansätzen: Es wird untersucht, ob geeignete Optimierungsmaßnahmen bezüglich dieses Wirkungsbereichs angewendet werden können, um die erkannten Schwachstellen zu vermeiden.
- Kriterien zur Reduktion des Wirkungsbereiches: Falls keine Optimierung bezüglich des entsprechenden Zielkriteriums möglich ist, werden die Informationen über die Schwachstellen des aktuellen Wirkungsbereiches für eine spätere Reduktion durch Segmentierung bereitgestellt.

Bei der entwickelten Methodik zur iterativen Produktoptimierung kommt der systematischen Reduktion des Wirkungsbereiches durch die Bildung von Optimierungssegmenten eine wesentliche Bedeutung zu. Auch hier müssen Materialverträglichkeit und Demontagegerechtheit aufeinander abgestimmt sein, um die geeigneten Optimierungspotentiale zu nutzen. Die Vorgehensweise und Strategie zur Analyse und Optimierung eines Wirkungsbereiches und der anschließenden Bildung von Optimierungssegmenten wird im folgenden detaillierter vorgestellt (Bild 80).

Zunächst wird bezüglich des Wirkungsbereiches eine Analyse und Optimierung der Materialkompatibilität (nach Kap. 7.1.1) der eingesetzten Stoffe ohne weitere Demontage durchgeführt. Alternative Recyclingprozesse und die entsprechenden inkompatiblen Stoffe werden ermittelt. Es wird überprüft, ob eine Substitution dieser Stoffe erfolgen kann. Diese Optimierung hat zum Ziel, den Wirkungsbereich hinsichtlich der eingesetzten Materialien so zu gestalten, daß auf eine weitere Demontage verzichtet werden kann und trotzdem eine sinnvolle Verwertung oder einfache Beseitigung - im Sinne von "Design for Non Disassembly" - ermöglicht wird.

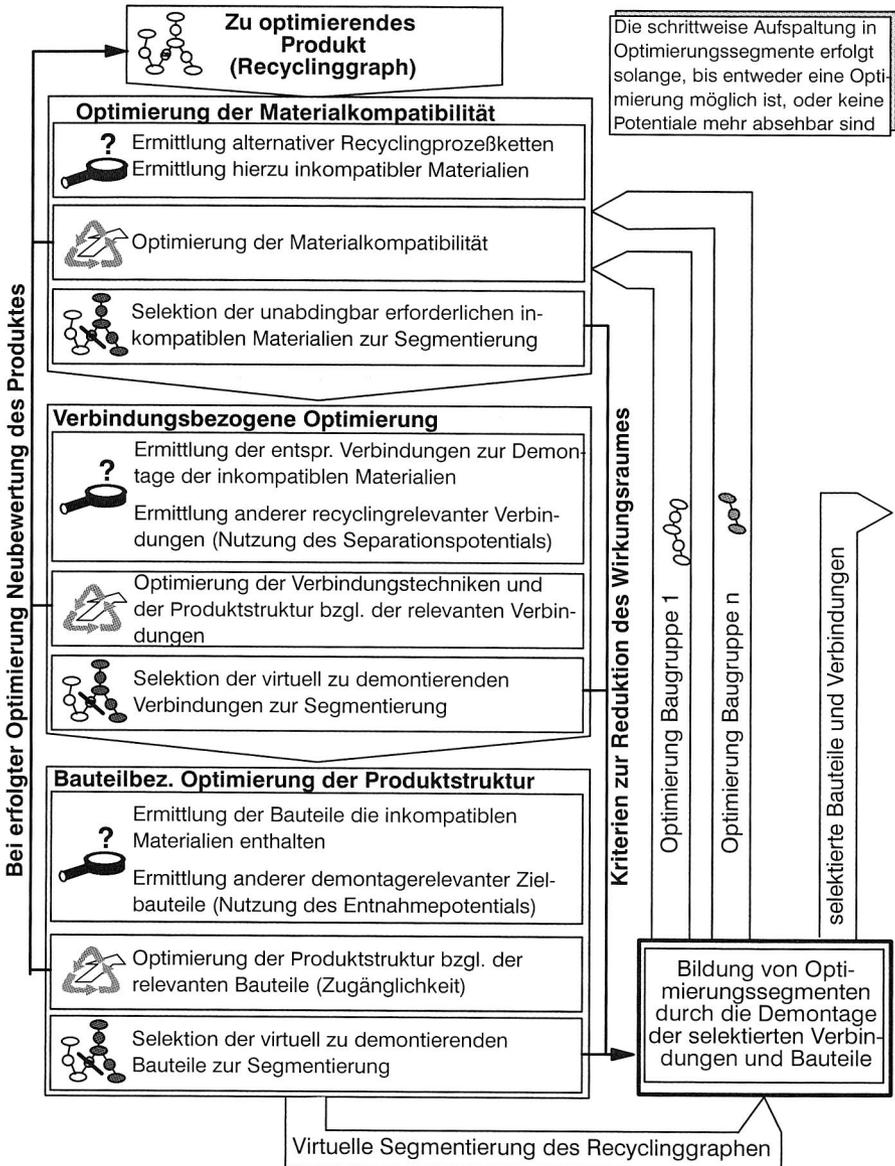


Bild 80: Vorgehensweise zur iterativen Produktoptimierung unter Nutzung verschiedener Schwachstellenanalysen

In vielen Fällen kann ein als "Störstoff" erkanntes Material aus funktionellen Gründen nicht ersetzt werden. Deshalb bietet es sich an, die Separierung dieser Störstoffe von dem restlichen Produkt zu optimieren. Für die Produktgestaltung bedeutet dies, daß die Demontagegerechtheit der jeweiligen Bauteile mit den ermittelten inkompatiblen Materialien erhöht werden muß. Für diesen Schritt werden die Funktionen zur verbindungsbezogenen und bauteilbezogenen Produktstrukturoptimierung genutzt.

Zur Ermittlung von verbindungsbezogenen Schwachstellen im Wirkungsbereich (nach Kap. 7.1.2) werden Verbindungen detektiert, die für das Recycling des Produktes eine wesentliche Rolle spielen können. Diese Verbindungen und jene, die zur Separierung der Störstoffe gelöst werden müssen, sollten entweder hinsichtlich der Verbindungstechnik (geringere Demontagezeit) oder hinsichtlich einer anderen Anordnung in der Produkthierarchie optimiert werden.

Im nächsten Schritt werden die demontagerelevanten Zielbauteile (nach Kap. 7.1.3) ermittelt. Dies sind neben den Bauteilen, welche die detektierten Störstoffe enthalten, die Bauteile mit einem hohen positiven oder negativen Nutzen und einem hohen Demontageaufwand. Diese sollten in der Produkthierarchie optimiert angeordnet werden, so daß eine einfachere Demontage möglich wird.

Nach der (versuchten) Optimierung der Anordnung und der Eigenschaften der relevanten Bauteile und Verbindungen erfolgt die Reduktion des Wirkungsbereiches durch die Bildung von Optimierungssegmenten. Hierzu wird davon ausgegangen, daß die ermittelten demontagerelevanten Zielbauteile und Verbindungen bei der optimalen Nachgebrauchsstrategie als demontiert betrachtet werden können. Dadurch müssen diese Bauteile bei der Optimierung nicht weiter berücksichtigt werden. Weiterhin ergeben sich durch die Entnahme dieser Bauteile und das Lösen der entsprechenden Verbindungen unter Umständen mehrere Bauteilverbünde (Optimierungssegmente). Die beschriebene Systematik wird nun auf die resultierenden Optimierungssegmente angewendet, die dadurch gegebenenfalls wieder aufgespalten werden.

Die Reduktion des Wirkungsbereiches wird solange fortgesetzt, bis in den Optimierungssegmenten keine Optimierungspotentiale mehr absehbar sind oder bis eine Optimierung erfolgreich umgesetzt werden konnte. Im letzteren Fall kann dann die vollständige Bewertung des Produktes (Kap. 6) erneut durchgeführt werden, um den Effekt der Produktoptimierung im Vergleich zum Ausgangsprodukt zu ermitteln. Gegebenenfalls sollte die Optimierungsschleife erneut durchgeführt werden, um weitere Verbesserungen der Produktgestalt zu erreichen.

Der vorgestellte Ablauf zur Integration der entwickelten Schwachstellenanalysen stellt somit eine strukturierte Vorgehensweise zur recyclingorientierten Produktoptimierung dar.

### 7.3 Sensitivitätsanalysen mit variablen Recyclingszenarien

Ein wesentlicher Aspekt bei der Produktbewertung und -optimierung ist die Ermittlung der Stabilität der Ergebnisse bei sich ändernden Rahmenbedingungen. Im Bereich der recyclinggerechten Produktgestaltung ist dies besonders relevant, da aufgrund der Zeitspanne zwischen Konstruktion und Recycling, welche aus der Gebrauchsphase resultiert, eine sichere Bewertungsgrundlage bezüglich der zu erwartenden Rahmenbedingungen nur bedingt gegeben ist. Darüber hinaus treten auch räumliche (nationale und internationale) Unterschiede hinsichtlich der verfügbaren Demontage- und Recyclingprozesse und deren Kosten auf.



Bild 81: Sensitivitätsanalyse zur Bewertung der Stabilität der Ergebnisse

Dieser Problematik wird im Rahmen der vorliegenden Systematik durch die Möglichkeit einer Sensitivitätsanalyse Rechnung getragen. Bei einer solchen Analyse werden die veränderlichen Daten zunächst als fest betrachtet und eine Lösung berechnet. Danach wird untersucht, wie sich diese optimale Lösung gegenüber Änderungen der Eingangsdaten verhält /96/.

Das konsequent modulare Konzept erlaubt es, Produkte und Recyclingszenarien auf einfache Weise auszutauschen. Somit ist es möglich, reale oder virtuelle, räumlich und zeitlich variable Recyclingszenarien abzubilden und für eine Bewertung bereitzustellen. Bei der Abbildung zukünftiger Recyclingszenarien können erkennbare Tendenzen hinsichtlich der Preisentwicklung für Recyclingprozesse einbezogen werden. Darüber hinaus ist es möglich, worst-case und best-case Szenarien zu entwickeln und zu modellieren.

Die Produktbewertung und die Ermittlung von Optimierungspotentialen kann dann - im Sinne einer Sensitivitätsanalyse - unter der Berücksichtigung der unterschiedlichen variierenden Rahmenbedingungen erfolgen.

## 7.4 Integration der Systematik in Werkzeuge zur erweiterten, umweltorientierten Produktanalyse

Konventionelle Systeme zur Bewertung der Umweltwirkung von Produkten (z. B. Ökobilanzwerkzeuge) können im allgemeinen nur fest vorgegebene Nachgebrauchsstrategien berücksichtigen. Dies ist aus folgenden Gründen problematisch:

- Die Abschätzung oder Ermittlung der geeigneten Demontagetiefe und Recyclingstrategien ist zumeist relativ aufwendig und ungenau.
- Bereits kleine Änderungen in der Produktgestaltung können wesentliche Auswirkungen auf die Nachgebrauchsphase haben, die nur sehr schwer in die Bewertung mit ein-zubeziehen sind.

Gerade in diesen Bereichen sind die Vorteile der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Systematik zu sehen. Deshalb ist es sinnvoll, Möglichkeiten zur Integration der Systematik oder deren Bewertungsergebnisse in lebenszyklusübergreifende Systeme zur umweltgerechten Produktanalyse vorzusehen. Zur Demonstration dieser Möglichkeit wurde beispielhaft eine Kopplung mit einer in der Industrie entwickelten und eingesetzten Bewertungsmethodik, dem sogenannten "Green Component Advisor", durchgeführt /39/. Im folgenden werden zunächst die Grundzüge des "Green Component Advisor" aufgezeigt. Danach wird ein Konzept zur Kopplung der beiden Systeme vorgestellt.

### Methodik des "Green Component Advisors"

Der "Green Component Advisor" (GCA) ist ein von der Firma Motorola entwickeltes Programmsystem, welches die Beeinflussung der Umwelt durch verschiedene Konstruktionsentwürfe, im speziellen von Abschirmungskomponenten bestimmt, und damit einen Vergleich der Entwürfe ermöglicht. Hierfür wurden acht wesentliche Einflußfaktoren definiert, welche eine Bewertung der Umweltverträglichkeit ermöglichen /37/. Aus den Kriterien Anzahl verschiedener Werkstoffe, Wiederverwertbarkeit, Masse, recycelter Werkstoffanteil, Kosten der Verwertung, Toxizität des Werkstoffs, Demontagezeit und Energieeinsatz wird die Kennzahl "Green Score" berechnet. "Green Score" bezeichnet die absolute Umweltbeeinträchtigung, d.h. je geringer der sich ergebende "Green Score" (GS) je Variante ausfällt, desto geringer ist auch der Schaden für die Umwelt. Der Wert des GS liegt im Bereich zwischen 0 und 1, bzw. 0 und 100%. Er ist damit eine normierte Kennzahl für die Umweltbeeinträchtigung.

Die Schwierigkeit des Bildens einer Kennzahl liegt vor allem in der Einbeziehung von Beschreibungsgrößen mit verschiedenen Maßeinheiten. Um aus den genannten Einzelkriterien eine aussagekräftige Kennzahl zu bilden, welcher das Zusammenwirken der einzelnen Faktoren beschreibt, wird vom GCA die "Multiattributive Wertanalyse" verwendet. Sie erlaubt die gleichzeitige Berücksichtigung verschiedener Einflüsse mit variierender Gewichtung. Die Wichtung der jeweiligen Kriterien gegeneinander wurde anhand von Expertenbefragungen festgelegt. Sie kann jedoch beliebig verändert werden. Desweiteren wurden die Kriterien anhand von Produktbeispielen normiert. Die Methode

liefert eine somit normierte Kennzahl und ermöglicht damit einen einfachen Vergleich mehrerer Alternativen. Auf die Beschreibung der genauen Berechnungsvorschriften zur Berechnung der Einzelkriterien wird in diesem Rahmen verzichtet und auf /37/ verwiesen.

### Konzept zur Kombination des "Green Component Advisors" mit dem System zur Recycling- und Demontagesimulation

Zur Kombination der Methodik des "Green Component Advisors" mit der Systematik der Recycling- und Demontagesimulation wurde das in Bild 82 dargestellte Konzept entwickelt /12/. Auf der Basis von Materialdaten, welche sowohl recyclingrelevante Informationen als auch GCA spezifische Informationen (z.B. Energieverbrauch bei der Herstellung) enthalten, werden zunächst Produkte modelliert. Hierzu wird die Systematik des Recyclinggraphen eingesetzt.

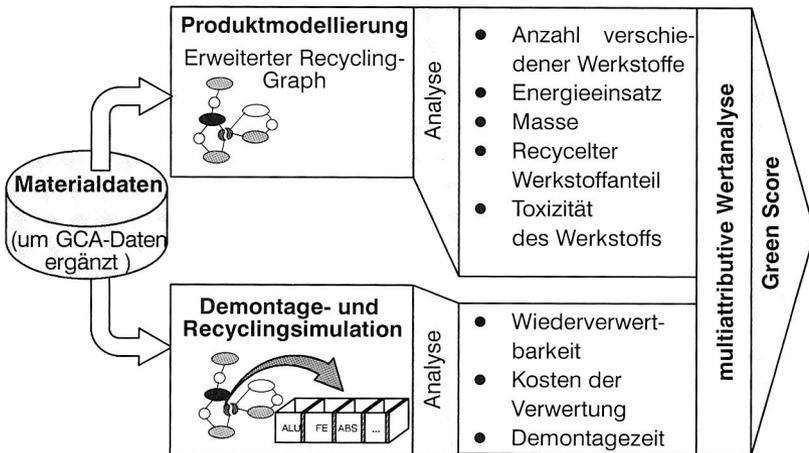


Bild 82: Konzept zur Kombination der Bewertungsmethodik "Green Component Advisors" mit der Systematik von Display

Von den GCA-spezifischen Kriterien zur Bewertung der Umwelteinwirkung können fünf (Anzahl verschiedener Werkstoffe, Energieeinsatz, Masse, recycelter Werkstoffanteil und Toxizität des Werkstoffs) direkt aus den modellierten Produktdaten und aus den Daten der entsprechend benutzten Materialien mit den GCA-Berechnungsvorschriften ermittelt werden.

Die anderen Kriterien beziehen sich auf die Nachgebrauchsphase und können deshalb nur aufgrund einer definierten Demontage- und Recyclingstrategie bestimmt werden. Aus diesem Grund wird zunächst auf der Basis des erweiterten Recyclinggraphen eine Recycling- und Demontagesimulation durchgeführt und die optimale Nachgebrauchsstrategie ermittelt. Auf der Basis dieser Berechnungen können dann die Kriterien Kosten der Verwertung, Demontagezeit und Wiederverwertbarkeit bestimmt werden. Nach

der Ermittlung der Einzelkriterien werden diese mit Hilfe der multiattributiven Wertanalyse zu einer Kennzahl, dem Green Score verrechnet.

Die in diesem Rahmen durchgeführte Kopplung der recyclingorientierten Produktanalyse mit dem "Green Component Advisor" kann grundsätzlich auch mit anderen ähnlich strukturierten Systemen (z.B. Ökobilanzwerkzeugen) durchgeführt werden. So ist beispielsweise eine Kopplung mit dem sogenannten "Assistenzsystem zur umweltgerechten Produktgestaltung" /136/, /135/ (vgl. Kap. 5.2.2), welches eine ähnlich Produktmodellierung nutzt, realisierbar. Dadurch kann in solchen Systemen, wie an dem vorhergehenden Beispiel verdeutlicht, eine wesentlich detailliertere Analyse der Recyclingphase erfolgen.

## 8 Implementierung des Softwaresystems DisPlay

Die Implementierung des Softwaresystems DisPlay wurde unter dem weit verbreiteten Betriebssystem Windows NT durchgeführt, um eine problemlose Anwendung des Systems in der Industrie zu ermöglichen. Zur Programmierung kam die objektorientierte Programmiersprache Visual C++ der Firma Microsoft zum Einsatz. Auf eine Erläuterung der Grundlagen der Programmierumgebung wird in diesem Rahmen verzichtet.

Die Kernelemente des Softwaresystems sind die Datenstrukturierung, die Implementierung graphischer Benutzerschnittstellen und die rechnerische Umsetzung der Methoden zur Produktbewertung und -optimierung, die nachfolgend beschrieben werden.

Nach der Darstellung der Implementierung wird das Kapitel durch die Evaluierung der Software anhand eines Beispielproduktes ergänzt.

### 8.1 Strukturierung und Implementierung einer Datenbasis für DisPlay

Das Grundgerüst einer Simulation oder einer Bewertung ist die zugrundeliegende Datenbasis. Deshalb setzt die Realisierung der recyclingorientierten Produktanalyse voraus, daß sowohl die recyclingrelevanten Eigenschaften der zu analysierenden Produkte als auch die Daten des Recyclingszenarios in einem geeigneten Datenmodell strukturiert abgebildet werden.

Ein wichtiges Element der beschriebenen Methoden zur Produktbewertung und -optimierung ist die Möglichkeit, verschiedene Produktvarianten und unterschiedliche Recyclingszenarien miteinander zu kombinieren (vgl. Kap. 7.3). Dies erfordert eine klare Trennung von Daten, die die Produkteigenschaften beschreiben und Daten, die die Demontage- und Recyclingtechnologien betreffen. Um dies zu gewährleisten, wurde bei der Konzeption der Datenstruktur neben der Aufteilung in Produktmodell und Recyclingszenario zusätzlich eine Datenschnittstelle, bestehend aus den sogenannten "Basisdaten", vorgesehen. Der Aufbau dieser Strukturen wird im folgenden diskutiert.

#### 8.1.1 Datenbasis zur Modellierung von Produkten und Recyclingszenarien

Die Implementierung einer Datenschnittstelle, eine wichtige Voraussetzung für die optimale Umsetzung der Methodik zur Produktbewertung und -optimierung, weist zur Erstellung von Produktmodell und Recyclingszenario folgende Vorteile auf:

- Systematisierung der Datendefinition,
- Ermöglichung der Austauschbarkeit von Produktmodell und Recyclingszenario,
- Vermeidung von Eingabefehlern und wiederholten Dateneingaben.

In diesem Zusammenhang kommt vor allem der Materialdefinition, die sowohl zur Spezifizierung von Produkten als auch zur Definition von Recyclingszenarien gebraucht

wird, eine wesentliche Rolle zu. Im Umfeld der Produktentwicklung sind die verfügbaren Materialinformation meist auf technische Materialien, welche aus einem oder mehreren Stoffen bestehen können (z. B. Blends oder beschichtete Materialien), bezogen. Demgegenüber werden bei der Beschreibung der Materialverträglichkeiten bei Recyclingprozesseketten vor allem die Grundmaterialien, (z. B. Eisen oder Kupfer) benötigt.

Um beiden Anforderungen gerecht zu werden, wurden in die Struktur der Basisdaten sowohl Basismaterialien als auch technische Materialien übernommen. Technische Materialien können dabei aus einem oder mehreren Basismaterialien mit beliebigen Anteilen bestehen.

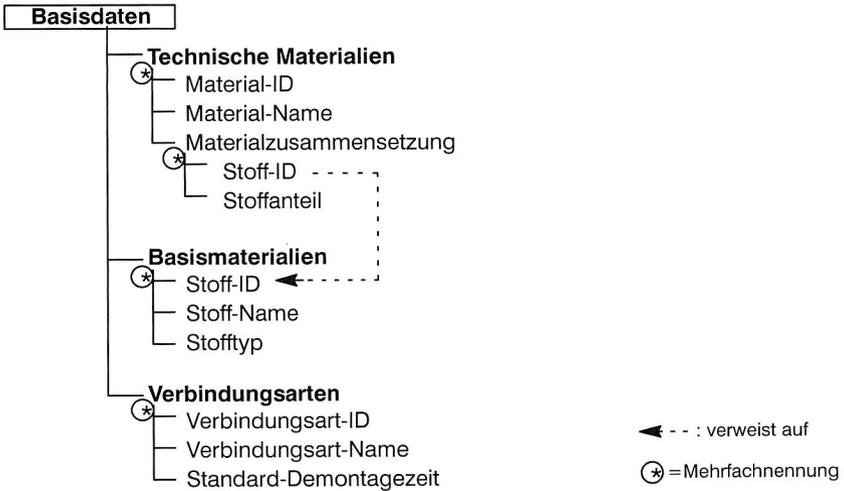


Bild 83: Datenstruktur der Basisdaten zur Modellierung von Produkten und Recyclingzenarien

Zur Vereinfachung und Systematisierung der Dateneingabe wurden in die Basisdaten die verfügbaren Verbindungsarten und entsprechende Standard-Demontagezeiten übernommen. In Bild 83 ist die resultierende Struktur der Datenschnittstelle dargestellt.

### 8.1.2 Entwicklung eines recyclingorientierten Produktmodells

In Kapitel 6.1 wurde bereits festgelegt, welche produktspezifischen Informationen für eine Recycling- und Demontagesimulation benötigt werden. Die Strukturierung dieser Produktdaten erfolgt analog zur Definition des Recyclinggraphen in komponenten- und verbindungsbezogene Daten (Bild 84).

Der Begriff Komponente beinhaltet dabei sowohl Bauteile als auch komplette Baugruppen. Beide werden bei der Datenabbildung und bei den Berechnungen ähnlich behandelt. Der Unterschied besteht darin, daß Baugruppen separat analysiert werden. Der

Deckungsbeitrag, welcher bei der optimalen Recyclingstrategie einer Baugruppe berechnet wird, wird vermerkt und fließt in die weitere Berechnung des Produktes mit ein. Deshalb enthält die Datenstruktur zusätzlich zu den gemeinsamen Daten ("Komponenten-Name, Gewicht, etc.) auch die Elemente "Recyclingnutzen" und "Komponenten-Typ".

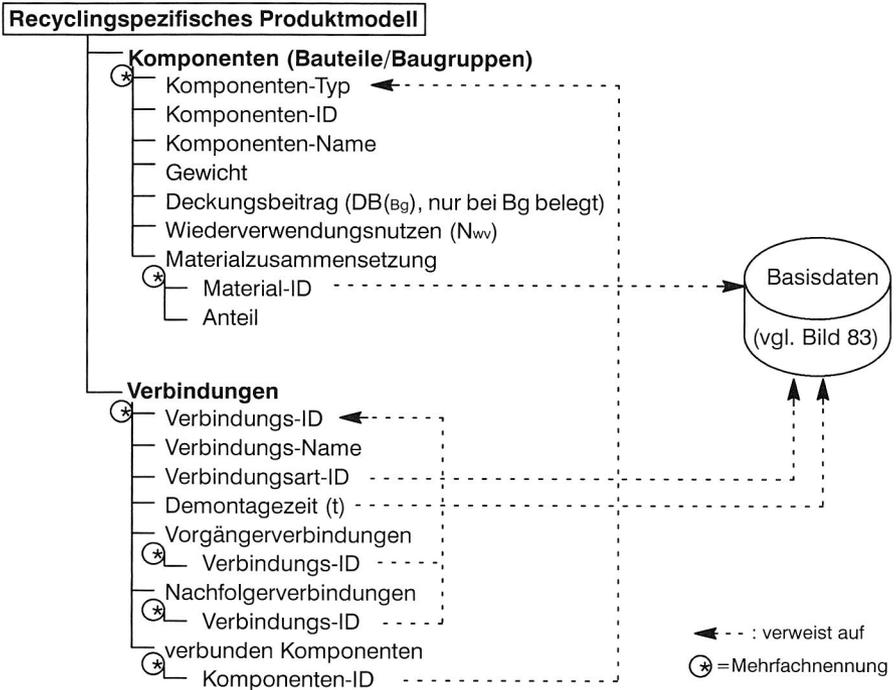


Bild 84: Datenstruktur zur recyclingorientierten Modellierung von Produkten

Die Materialzusammensetzung einer Komponente kann aus mehreren "technischen Materialien" mit jeweils beliebigem Anteil bestehen. Diese technischen Materialien werden aus der Datenschnittstelle übernommen (vgl. Bild 83).

Das Modell zur Abbildung von Verbindungen beinhaltet neben organisatorischen Daten auch die Definition einer Verbindungsart, welche ebenfalls aus den Basisdaten übernommen wird. Entsprechend wird auch die Standarddemontagezeit der gewählten Verbindungsart dem Anwender vorgeschlagen und kann als Demontagezeit der Verbindung übernommen oder gegebenenfalls abgeändert werden.

Die ebenfalls vorgesehenen Vorgänger- und Nachfolgerrelationen verweisen jeweils auf die Verbindungs-IDs der relevanten Verbindungen.

Zusätzlich zu den in Bild 84 dargestellten bewertungsrelevanten Datenstrukturen werden für den rechnergestützten Aufbau eines Recyclinggraphen weitere rechnerinterne Daten wie beispielsweise Angaben zu der Visualisierung von Verbindungen und Komponenten benötigt. Auf diese Datenstrukturen wird in diesem Rahmen nicht näher eingegangen.

### 8.1.3 Datenstruktur zur Modellierung von Recyclingszenarien

Die Entwicklung eines Datenmodells zur Abbildung der Rahmenbedingungen von Demontage und Recycling (Recyclingszenario) basiert auf den in Kapitel 6.2 vorgestellten Vorgaben und Definitionen.

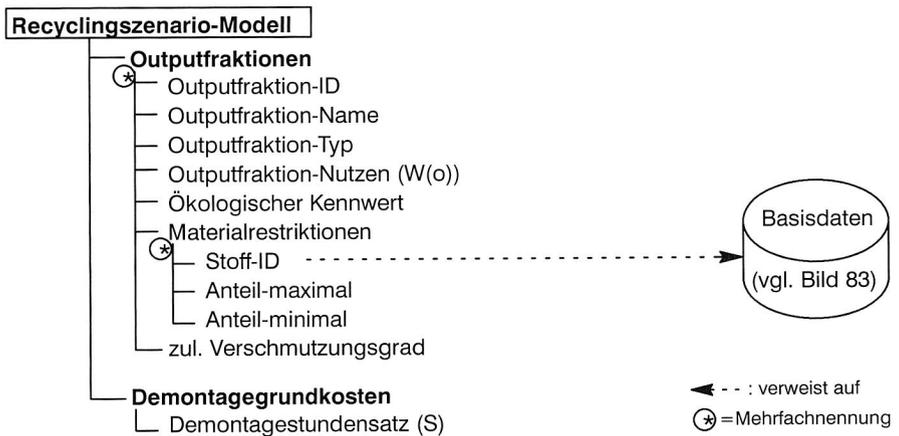


Bild 85: Datenstruktur zur Modellierung von Recyclingszenarien

Wie in Bild 85 dargestellt, werden in der Datenstruktur für Recyclingszenarien zunächst Outputfraktionen näher spezifiziert. Mit dem Kennwert "Outputfraktion-Typ" kann unterschieden werden, ob die nachfolgende Prozeßkette vorwiegend eine Verwertung (thermische/stofflich) oder eine Beseitigung darstellt. Diese Information ist, analog zu der Nutzung des "ökologischen Kennwertes, insbesondere für die Einbeziehung ökologischer und gesetzgeberischer Aspekte in die Produktbewertung und -optimierung relevant. Für die kostenbezogene Bewertung wird der Nutzen (Kosten/Erlös) der Outputfraktion abgebildet.

Ein wesentliches Element der Datenstruktur für Recyclingszenarien ist die Definition von Materialrestriktionen. Diese Restriktionen werden durch die Angabe von minimalen und/oder maximalen Anteilen von Basismaterialien abgebildet. Die Basismaterialien werden dabei aus der Datenschnittstelle übernommen. Weiterhin ist der zulässige Verschmutzungsgrad der Outputfraktion spezifiziert.

Hinsichtlich der Rahmenbedingungen der Demontage werden die Demontagegrundkosten durch die Angabe eines Demontagegestundensatzes abgebildet.

## 8.2 Gestaltung der Benutzerschnittstellen

Die wesentliche Aufgabe der Benutzerschnittstelle ist die Ermöglichung von Dateneingabe und Datenmanipulation sowie die Visualisierung von Datenbeständen und Berechnungsergebnissen. Die Editoren zur Dateneingabe und -manipulation wurden einheitlich und konsistent erstellt. Dabei wurde auf eine ergonomische Gestaltung und auf Reduktion der potentiellen Fehlerquellen bei der Eingabe geachtet.

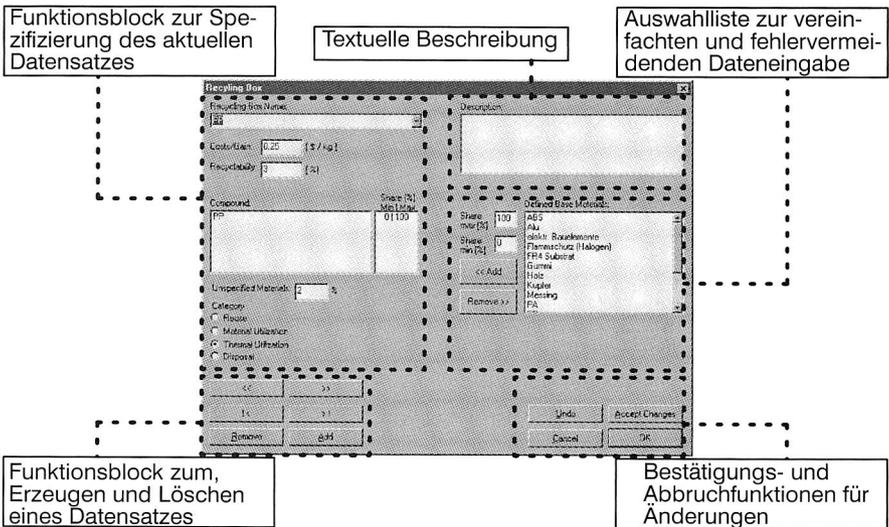


Bild 86: Aufbau der Editoren zur Dateneingabe und Datenmanipulation am Beispiel der Definition von Outputfraktionen

Durch entsprechende optische und logische Gestaltung der Benutzerschnittstelle wurde versucht, die Kommunikation zwischen Benutzer und System möglichst einfach zu gestalten. Dies betrifft nicht nur die graphische Oberfläche, sondern auch die Ablaufstruktur. Ein Beispiel für einen entwickelten Editor zur Dateneingabe und -manipulation ist in Bild 86 zusammen mit Standard-Funktionsblöcken dargestellt. Falls auf bereits vorhandene Daten (z.B. Basisdaten, erstellte Verbindungen, Bauteile, etc.) verwiesen werden muß, werden in dem Editor Auswahllisten bereitgestellt. Diese Maßnahme vereinfacht die Dateneingabe erheblich und schränkt fehlerhafte Eingaben ein.

Die Benutzerschnittstelle des Gesamtsystems gliedert sich in verschiedene Bereiche. Über die Menüstruktur sind alle Funktionen erreichbar. Besonders häufig verwendete Funktionen können über Symbolleisten ausgeführt werden. Hierbei wurden die Kom-



Verknüpfen von Bauteilen und Verbindungen oder durch eine textuelle Definition im Verbindungseditor erfolgen.

Wie in Bild 87 dargestellt, sind in dem Recyclinggraph-Editor bereits einfache Funktionen zur Visualisierung der Produktdaten und integriert. So kann die Verteilung der Verbindungsarten und des Materials in dem modellierten Produkt angezeigt werden.

### Datenkopplung zu einem 3D-CAD System

Die benötigten Daten zum Modellieren von Produkten können durch Probedemontagen ermittelt und über den Recyclinggraph-Editor eingegeben werden. Zur optimalen Unterstützung des Konstrukteurs und zur Vermeidung von Mehrfacheingaben ist es sinnvoll, eine Möglichkeit zur direkten Übernahme von CAD-Daten vorzusehen. Deshalb wurde am Lehrstuhl für Konstruktionstechnik (Universität Erlangen-Nürnberg) eine Schnittstelle entwickelt, die es ermöglicht, aus dem 3D-CAD System Pro-Engineer direkt Recyclinggraphen zu exportieren [135],[13].

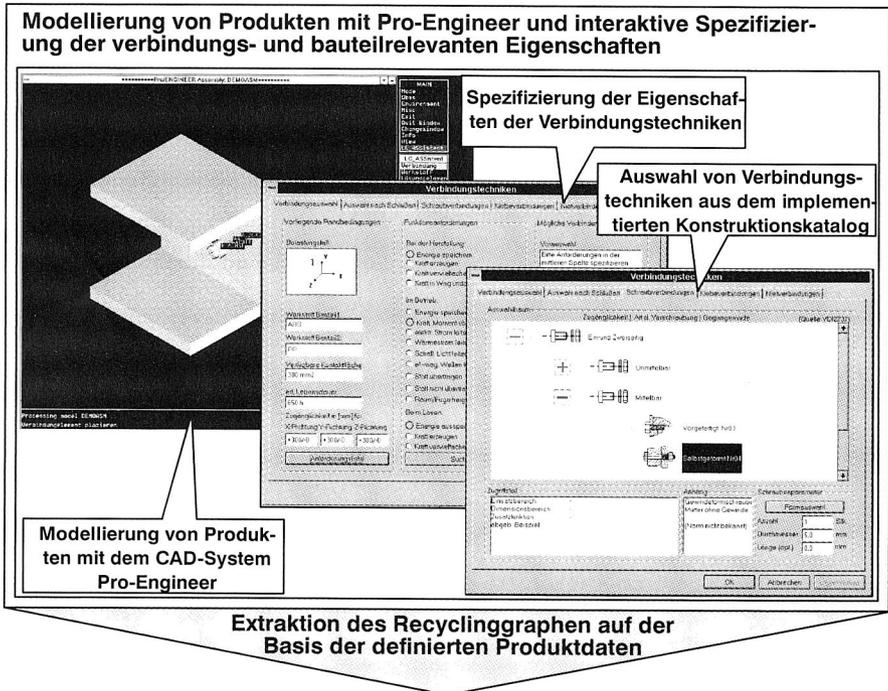


Bild 88: Ausgehend von einem erweiterten 3D-CAD-Produktmodell können mit Hilfe einer Datenschnittstelle direkt Recyclinggraphen aufgebaut werden [135],[13]

Mit dieser Kopplung besteht somit die Möglichkeit, die Benutzerschnittstelle zur Dateineingabe auf das CAD-System zu erweitern. Hierzu wurde die Struktur des CAD-Geo-

metriemodells ergänzt, so daß direkt im CAD-Modell recyclingrelevante Daten Bauteilen und Verbindungen zugewiesen werden können. Der Konstrukteur wird dabei durch umfangreiche Lösungskataloge unterstützt. Nach der Modellierung des Produktes kann eine Datei erstellt werden, welche die wesentlichen Daten und die Struktur des entsprechenden Recyclinggraphen enthält. Der extrahierte Recyclinggraph muß dann in geringem Umfang, beispielsweise durch Ergänzung der Vorrangrelationen, nachbearbeitet werden, um die Durchführung der Analysen und Optimierungen zu ermöglichen /14/.

### **8.3 Berechnung optimaler Demontage- und Recyclingstrategien auf der Basis von Produkt- und Recyclingmodell**

Zur Umsetzung der in Kapitel 6 beschriebenen Methodik der Produktbewertung in dem Softwaresystem DisPlay wurde darauf geachtet, möglichst speicher- und rechenzeiteffiziente Algorithmen zu entwickeln. Die Module zur Berechnung der Demontage- und Recyclingstrategien auf der Basis von Produkt- und Recyclingmodell werden nachfolgend beschrieben.

Zur Beschreibung der Berechnungsverfahren wird der Begriff des "virtuellen Teilproduktes" (im folgenden auch VTP abgekürzt) als Sammelbegriff für beliebige Teilmengen eines Produktes (Komponentenverbünde oder einzelne Komponenten) eingeführt. Ein VTP enthält als primäre Eigenschaft die Daten seiner Komponenten und Verbindungen.

#### **Bestimmung der optimalen Nachgebrauchsoption und des maximalen Nutzens von virtuellen Teilprodukten**

Ein wesentliches Element der Produktbewertung ist die Bestimmung des maximalen Nutzens von virtuellen Teilprodukten. Hierzu muß im ersten Schritt eine Zuordnung der entsprechenden Bauteile oder Bauteilverbünde zu der optimalen Nachgebrauchsstrategie erfolgen.

Für das virtuelle Teilprodukt werden zunächst die kompatiblen Outputfraktionen bestimmt, indem die Materialliste mit den Materialrestriktionen der Outputfraktionen hinsichtlich der zulässigen Materialien abgeglichen werden.

Danach wird überprüft, ob das virtuelle Teilprodukt einer Wiederverwendung zugeführt werden kann. Dies ist nur möglich, wenn es sich dabei um eine einzelne Komponente (Bauteil oder Demontagebaugruppe) handelt und wenn dieser ein Wiederverwendungsnutzen zugewiesen wurde. Falls es sich bei dem virtuellen Teilprodukt um eine Demontagebaugruppe handelt, wird der bereits berechnete Deckungsbeitrag (vgl. Bild 84) der Baugruppe abgerufen.

Nach diesen Überprüfungen werden die potentiellen Nutzen aller Verwertungs- und Verwendungsmöglichkeiten miteinander verglichen und diejenige Variante mit dem größten Nutzen ermittelt. Der Aufbau des Algorithmusses ist in Bild 89 wiedergegeben.

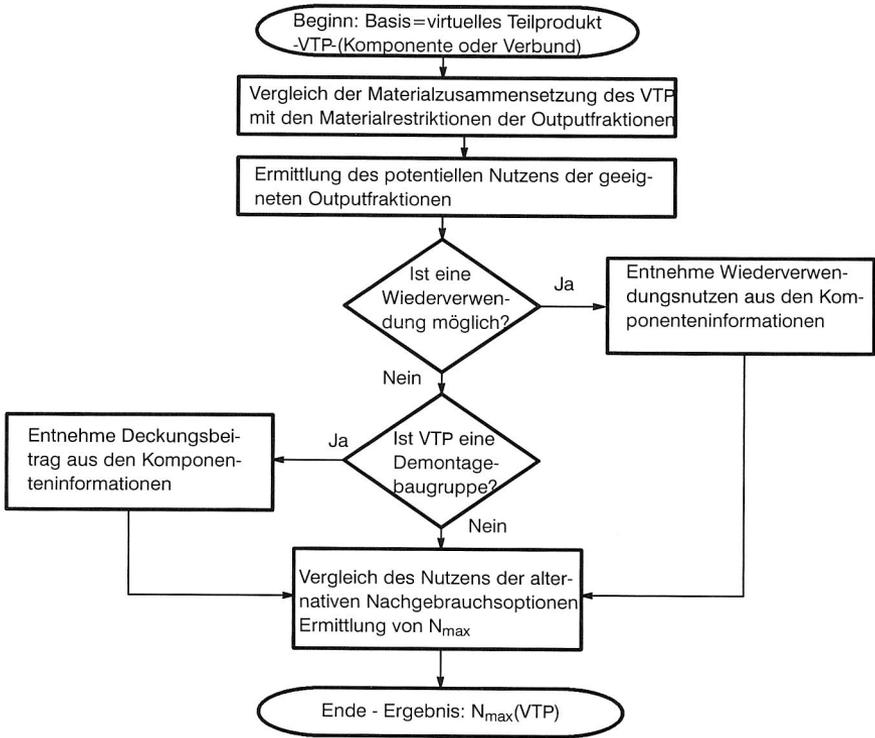


Bild 89: Algorithmus zur Bestimmung des maximalen Nutzens  $N_{\max}$  eines virtuellen Teilproduktes

Abgesehen von der Bestimmung von  $N_{\max}$  zur Durchführung der automatisierten Produktbewertung, kann die Zuordnung einer geeigneten Outputfraktion auch zu manuell selektierten Teilprodukten erfolgen. Hierzu werden in dem Recyclinggraph-Editor eine oder mehrere Komponenten selektiert. Diese werden ohne Berücksichtigung von Demontagevorgängen hinsichtlich der kompatiblen Outputfraktionen bewertet. Eine entsprechende Bildschirmdarstellung ist in Bild 90 aufgezeigt.

In dem Ergebnisfenster werden zunächst die selektierten Komponenten, ihre Materialzusammensetzung und ihr Gewicht dargestellt. Die Outputfraktionen, die zu dieser Materialzusammensetzung kompatibel sind, werden nach dem potentiellen Nutzen sortiert und in einer Auswahlliste ausgegeben. Zu der jeweils selektierten Outputfraktion werden die entsprechenden Materialrestriktionen dargestellt, damit der Anwender die Zuordnung nachvollziehen kann.

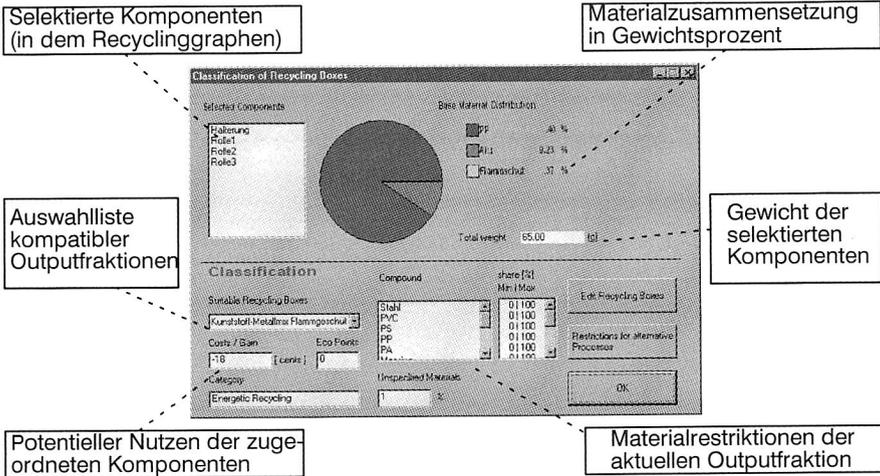


Bild 90: Zuordnung von Komponenten zu kompatiblen Outputfraktionen

## Generierung von reduzierten AND/OR-Graphen aus Recyclinggraphen

Zur rechnerinternen Repräsentation der alternativ möglichen Demontageverrichtungen und der dabei entstehenden virtuellen Teilprodukte wurde ein an die benötigten Daten angepaßter, reduzierter AND/OR-Graph gewählt (vgl. auch Kapitel 6.4). Die Knoten des AND/OR-Graphen entsprechen den virtuellen Teilprodukten und beinhalten die Daten der enthaltenen Komponenten und der nicht gelösten Verbindungen. Um den Rechen- und Speicheraufwand gering zu halten und um auch die Berechnung komplexerer Produkte zu ermöglichen, wurden die in Kapitel 6.4 dargestellten Methoden zur Reduktion der Anzahl alternativer Demontagezustände angewendet.

Zur Erstellung des AND/OR-Graphen, aus dem Recyclinggraphen, wurde der in Bild 91 dargestellte Algorithmus implementiert. Ausgehend von dem vollständigen Recyclinggraphen werden zunächst alle Komponenten hinsichtlich des vollständigen oder reduzierten Entnahmepotentials und hinsichtlich der lokalen Trennschärfe der direkt angrenzenden Verbindungen überprüft. Trifft das Abbruchkriterium "Entnahmepotential" (vgl. Bild 91 rechts und Bild 70) auf eine oder mehrere Komponenten zu, dann werden die Verbindungen, die zu diesen Komponenten gehören, gelöst. Das Produkt zerfällt in mehrere virtuelle Teilprodukte, welche dann der weiteren Zerlegung zugeführt werden.

Für jedes dieser virtuellen Teilprodukte wird das Zerlegepotential berechnet, als Entscheidungskriterium dafür, ob eine weitere Zerlegung überhaupt sinnvoll sein könnte (vgl. Bild 91 rechts und Bild 71). Für den Fall, daß eine weitere Zerlegung technisch möglich und sinnvoll ist, wird ein erster Zerlegungsschritt durchgeführt. Für das Lösen der entsprechenden Verbindung wird die variable Trennschärfe ( $T_{var}$ ) berechnet. Falls in dieser Zerlegung sowohl  $T_{var}$  als auch  $T_{loc}$  (lokale Trennschärfe) positiv sind, können die bisher noch nicht durchgeführten alternativen Zerlegungen des virtuellen Teilpro-

duktes vernachlässigt werden (vgl. Bild 91 rechts und Bilder 72 bzw. 73). Andernfalls müssen alle alternativ möglichen Zerlegungen eines virtuellen Produktes abgearbeitet werden.

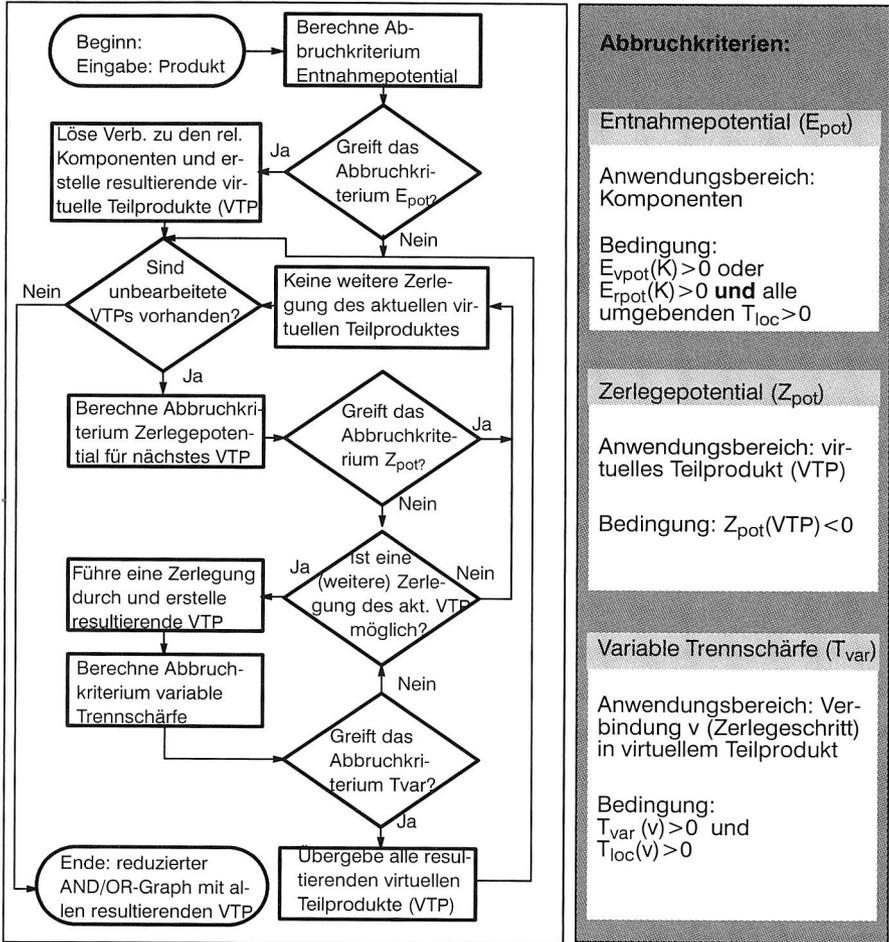


Bild 91: Algorithmus zur Generierung eines reduzierten AND/OR-Graphen aus dem Recyclinggraphen eines Produktes

Anschließend werden die bisher entstandenen virtuellen Teilprodukte mit dem gleichen Algorithmus behandelt. Alle in den Durchläufen durchgeführten Zerlegungen werden mitprotokolliert und zusammen mit den virtuellen Teilprodukten und den gelösten Verbindungen in einem reduzierten AND/OR-Graphen gespeichert.

Aus diesem Zerlegegraphen lassen sich nun sämtliche Demontagezustände ermitteln. Der hierfür verwendete Algorithmus beginnt bei einem initialen Demontagezustand, in dem das Ausgangsprodukt ohne gelöste Verbindungen vorliegt. Ein weiterer Demontagezustand ergibt sich durch Wahl eines Zerlegeschriffs und Ersetzen des Ausgangsprodukts durch die entstandenen Teilprodukte. In diesem neuen Demontagezustand sind die gelösten Verbindungen des Zerlegeschriffs einzutragen. Man erhält alle Demontagezustände, indem man zu jedem bereits existierenden Demontagezustand sämtliche Zerlegeschriffe ausführt und dabei das jeweilige Teilprodukt durch dessen Teilprodukte ersetzt und die gelösten Verbindungen mitnotiert.

Die Berechnung erfolgt, wie auch schon das Zerlegen in Teilprodukte, rekursiv. Jeder Demontagezustand erzeugt seine eigenen Folgekombinationen. Die Demontagezustände werden zentral im Berechnungskontext abgelegt, wo jeder gerade berechnete Demontagezustand darauf überprüft werden kann, ob er bereits existiert.

### **Ermittlung der optimalen Demonetagetiefe und der resultierenden Recyclingstrategie**

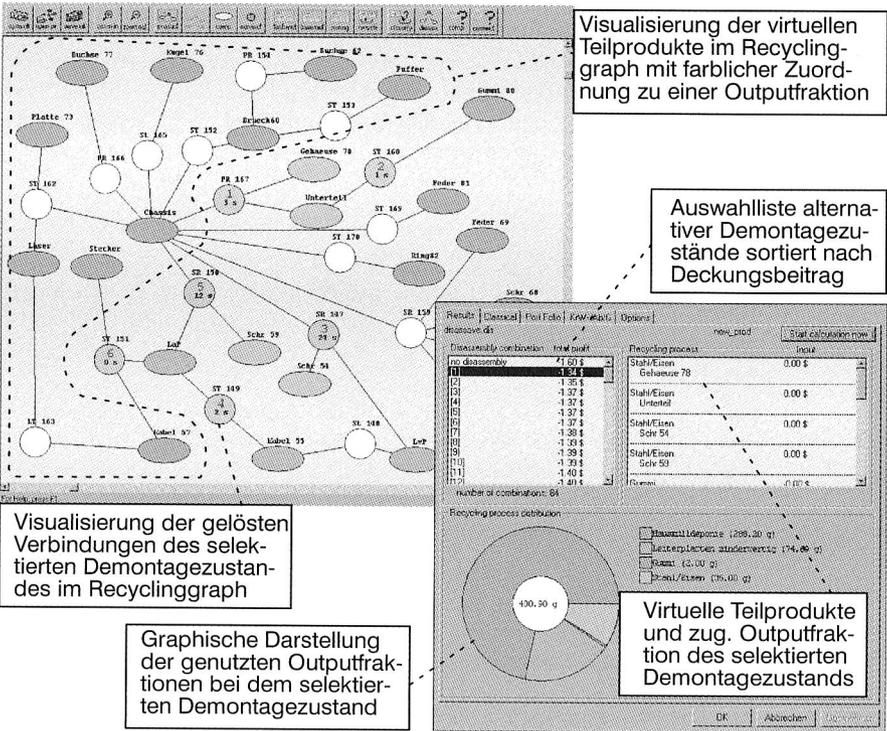
In Kapitel 8.3 wurden die Algorithmen zur Generierung aller für eine Bewertung relevanten Demontagezustände beschrieben. Ziel ist es im nächsten Schritt aus den generierten Demontagezuständen den wirtschaftlich optimalen Zustand zu ermitteln. Hierzu wurde die in Kapitel 6.5 beschriebene Methodik implementiert.

Für jeden Demontagezustand wird auf der Basis des Nutzens der enthaltenen virtuellen Teilprodukte und des Aufwands zur Demontage der gelösten Verbindungen der potentielle Deckungsbeitrag ermittelt (vgl. Kap. 6.3). Die Sortierung der Demontagezustände nach ihrem Deckungsbeitrag ergibt die wirtschaftlich optimale Recycling- und Demontagestrategie. Die Benutzerschnittstelle zur Visualisierung der Ergebnisse ist in Bild 92 dargestellt.

Nach der durchgeführten Berechnung werden die Ergebnisse graphisch dargestellt. Eine Auswahlliste zeigt alle berechneten Demontagezustände an, die vom Anwender selektiert werden können. Standardmäßig ist der kosteneffizienteste Demontagezustand selektiert. Für jeden Demontagezustand wird der entsprechende Deckungsbeitrag angezeigt. Desweiteren werden für den aktuell selektierten Demontagezustand die geöffneten Verbindungen sowie die jeweiligen resultierenden virtuellen Teilprodukte und deren Zuordnung zu Outputfraktionen in dem Recyclinggraphen farblich gekennzeichnet. Die massebezogene Verteilung der virtuellen Teilprodukte des aktuellen Demontagezustands auf die Outputfraktionen wird ebenfalls in Form eines Ringdiagramms angezeigt. Somit kann der Anwender die verschiedenen Demontagezustände selektieren und die wesentlichen Informationen direkt im Recyclinggraphen ansehen.

In der Dialogbox "Options" ist es möglich, sowohl die aktuell durchgeführte Bewertung (alle Demontagezustände und Ergebnisse) in einer Datei abzuspeichern als auch eine frühere Bewertung zu laden. Weiterhin kann die Berücksichtigung der Abbruchkriterien zur Reduktion der Demontagekombinationen einzeln ein- und ausgeschaltet werden.

Dies ist insbesondere wichtig, um die Wirksamkeit der Kriterien bei unterschiedlichen Produkten nachvollziehen zu können.



Visualisierung der virtuellen Teilprodukte im Recyclinggraph mit farblicher Zuordnung zu einer Outputfraktion

Auswahlliste alternativer Demontagezustände sortiert nach Deckungsbeitrag

Visualisierung der gelösten Verbindungen des selektierten Demontagezustandes im Recyclinggraph

Graphische Darstellung der genutzten Outputfraktionen bei dem selektierten Demontagezustand

Virtuelle Teilprodukte und zug. Outputfraktion des selektierten Demontagezustands

Bild 92: Anzeige der Verteilung der Bauteile auf die Recyclingprozesse und Visualisierung der Ergebnisse im Recyclinggraphen

Die vorgestellten Methoden erlauben somit eine schnelle Auswertung von modellierten Produkten hinsichtlich ihrer optimalen Demontage- und Recyclingstrategie. Eine Ausgabe der Ergebnisse als Demontageplan, bei welchem die Reihenfolge der zu lösenden Verbindungen und die nach jedem Demontageschritt entstehenden Fraktionen sowie die zugehörigen Outputfraktionen aufgelistet sind, ist ebenfalls möglich.

### 8.4 Implementierung der Schwachstellenanalysen zur Optimierung der Demontage- und Recyclinggerechtigkeit von Produkten

Zur recyclinggerechten Produktgestaltung ist neben der Produktbewertung die Ermittlung potentieller Schwachstellen essentiell. Deshalb wurden im Rahmen des Software-

systems DisPlay Analysen und Funktionen implementiert, welche die in Kapitel 7 entwickelte Methodik zur Produktoptimierung unterstützen.

**Optimierungspotentiale zur Verbesserung der Materialkompatibilität**

Zur Optimierung der Materialkompatibilität von Bauteilen und Baugruppen wurde ein zweistufiges Verfahren implementiert. Nach der Auswahl der zu optimierenden Komponenten wird in einem Ausgabefenster die entsprechende Materialzusammensetzung des Bauteilverbundes angezeigt, und es werden die kompatiblen Outputfraktionen zusammen mit dem jeweiligen Nutzen dargestellt.

**Visualisierung der Materialzusammensetzung der selektierten Komponenten und der kompatiblen Outputfraktionen.**

**Restrictions for alternative Processes**

Incompatible Recycling Boxes				
Incompatible Recycling Boxes	Number	Share	Cost / Gain	
Kunststoffmischschutt	1	0	5	
PP Flammgeschutt	1	0	-2	
Kunststoff - mix Flammgeschutt	1	0	-13	
Rest ohne Gefährstoffe	1	0	-13	
Alu	2	85	0	
Metalmix	2	90	3	
Aluminium	2	70	3	
PP	2	18	2	
Kunststoffmix ohne PVC	2	5	-1	
	2	0	0	

**Alternative Outputfraktionen als Liste und als 3-dim. Portfolio; Parameter: Anz. der Störstoffe, deren Gewichtsanteil und pot. Nutzen**

**Spezifikation der inkompat. Materialien zur selektierten Outputfraktion**

**Anzeige der Bauteile mit den inkompat. Materialien zur selektierten Outputfraktion**

Bild 93: Verbesserung der Materialverträglichkeit von ausgewählten Komponenten hinsichtlich der definierten Recyclingprozesse

Zur Analyse der Optimierungspotentiale steht eine Funktion zur Verfügung, welche die aktuelle Materialzusammensetzung mit den Restriktionen aller verfügbaren Outputfraktionen vergleicht. Als Ergebnis dieser Analyse erhält der Anwender alle "besseren" Outputfraktionen mit der Angabe, wie viele Stoffe um welchen Gewichtsanteil geändert wer-

den müßten und den entsprechenden potentielle Nutzen, den eine solche Änderung bewirken würde. In Bild 93 ist das Analysefenster dargestellt. Die alternativen Outputfraktionen können zusammen mit den genannten Parametern entweder in Listenform (sortiert nach der Anzahl der zu ändernden Stoffe und nach dem potentiellen Nutzen) oder als 3-dimensionales Portfolio dargestellt werden. In letzterem Fall werden die Parameter in dem Portfolio folgendermaßen dargestellt: x-Achse: potentieller Nutzen; y-Achse: Anzahl der zu ändernden Stoffe; Durchmesser der Punkte: zu ändernder Gewichtsanteil. Als Optimierungsziel sind die Outputfraktionen am ehesten geeignet, die sich durch einen hohen potentiellen Nutzen auszeichnen und nur ein geringfügige Änderung des bestehenden Materialgemisches bedürfen. Diese Fraktionen werden dem Anwender durch das Portfolio schnell und einfach visualisiert.

Weiterhin kann eine dieser Fraktionen in der Liste oder in dem Portfolio ausgewählt werden, um sich die hierfür inkompatiblen Stoffe des Materialgemisches anzeigen zu lassen. Diese Stoffe werden jeweils mit dem zu reduzierenden (oder auch zu erhöhenden) Gewichtsanteil spezifiziert. Desweiteren besteht die Möglichkeit, die Stoffe in der Liste zu selektieren um sich die zugehörigen Komponenten im Recyclinggraphen anzeigen zu lassen (vgl. Pfeile in Bild 93).

Auf diese Art können für ein bestimmtes Bauteilgemisch sehr schnell mögliche Optimierungspotentiale hinsichtlich der Materialkompatibilität der in dem Recyclingszenario definierten Prozesse darzustellen und durch Substitutionen von inkompatiblen Materialien umzusetzen.

### **Detektion verbindungspezifischer Schwachstellen**

Zur Bewertung des Einflusses von Verbindungselementen auf die Recyclingfähigkeit eines Produktes wurde das sogenannte "Separationspotential" einer Verbindung definiert (vgl. Kap. 7.1.2). Für eine Optimierung sind insbesondere diejenigen Verbindungen relevant, die ein hohes Separationspotential und eine hohe Demontagezeit aufweisen. Zur Visualisierung dieser Informationen wurde die in Kap. 7.1.2 vorgeschlagene Portfoliotechnik mit weiteren relevanten Informationen in ein Ausgabefenster integriert (Bild 94).

Eine wichtige Entscheidungshilfe ist hierbei die Anzeige all jener Verbindungen, die von der selektierten Verbindung "gesperrt" werden, und der entsprechenden Separationspotentiale. Dadurch kann der Anwender schnell feststellen, ob eine Änderung der Produkthierarchie eine wesentliche Verringerung des Separationspotentials der selektierten Verbindung bewirken würde. Zur Visualisierung der ausgewählten Verbindungen werden diese im Recyclinggraphen automatisch mit einem Pfeil versehen (vgl. Bild 94).

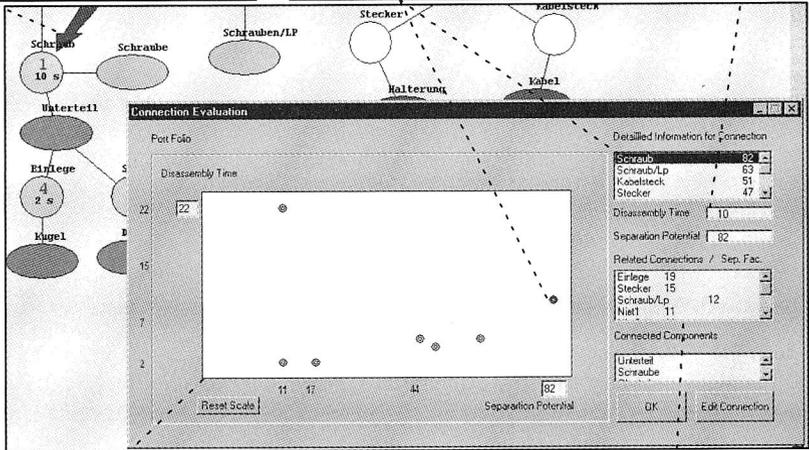
Der Anwender sollte insbesondere Verbindungen mit einem hohen Separationspotential und einer hohen Demontagezeit (rechts oben im Portfolio) hinsichtlich einer Optimierung überprüfen (vgl. Kap. 7.1.2.). Zur Optimierung kann der Konstrukteur beispielsweise die Demontagezeit für das Lösen dieser Verbindungen reduzieren (d.h. z.B. Verwendung alternativer Verbindungselemente). Alternativ dazu kann er aber auch

die Produktstruktur dahingehend ändern, daß wichtige Verbindungen von dieser Verbindung nicht mehr gesperrt werden.

Visualisierung der im Portfolio selektierten Verbindung im Recyclinggraph

Selektion einer Verbindung in der Auswahlliste oder im Portfolio

Ergänzende Angaben zur selektierten Verbindung (Demontagezeit, verbundene Bauteile)



Portfolio; x- Achse: Separationspotential; y- Achse: Demontagezeit für jede Verbindung des Recyclinggraphen

Anzeige der durch die selektierte Verbindung gesperrten Verbindungen und deren Relevanz

Bild 94: Bewertung und Optimierung von Verbindungen mit dem sogenannten "Separationspotential"

### Detektion bauteilspezifischer Schwachstellen

Ähnlich der Detektion von verbindungsbezogenen Schwachstellen wurde in Kapitel 7.1.3 auch eine Methodik zur Schwachstellenanalyse der Produktstruktur hinsichtlich besonders demontagerelevanter Komponenten vorgestellt. Hierzu wird zunächst der Nutzen aller Komponenten in jeweils demontiertem Zustand ermittelt. Sodann wird der Demontageaufwand für die alleinige zielgerichtete Demontage der entsprechenden Komponenten berechnet. Beide Werte werden in einem Portfolio gegeneinander aufgetragen (vgl. Bild 95). Die Komponenten können in dem Portfolio oder in der Auswahlliste selektiert werden, um ergänzende Informationen (Nutzen, Demontagezeit, Demontagepfad zu der Komponente) anzuzeigen. Weiterhin wird die selektierte Komponente in dem Recyclinggraphen mit einem Pfeil visualisiert.

Wenn Bauteile mit einem hohen positiven oder negativen potentiellen Nutzen gleichzeitig eine hohe Demontagezeit aufweisen (Darstellung im Portfolio oben links bzw. oben rechts), so ist das ein Hinweis auf ein mögliches Optimierungspotential. In diesem Fall

sollte der Konstrukteur versuchen, die Produktstruktur so zu ändern, daß diese Bauteile leichter zu demontieren sind.

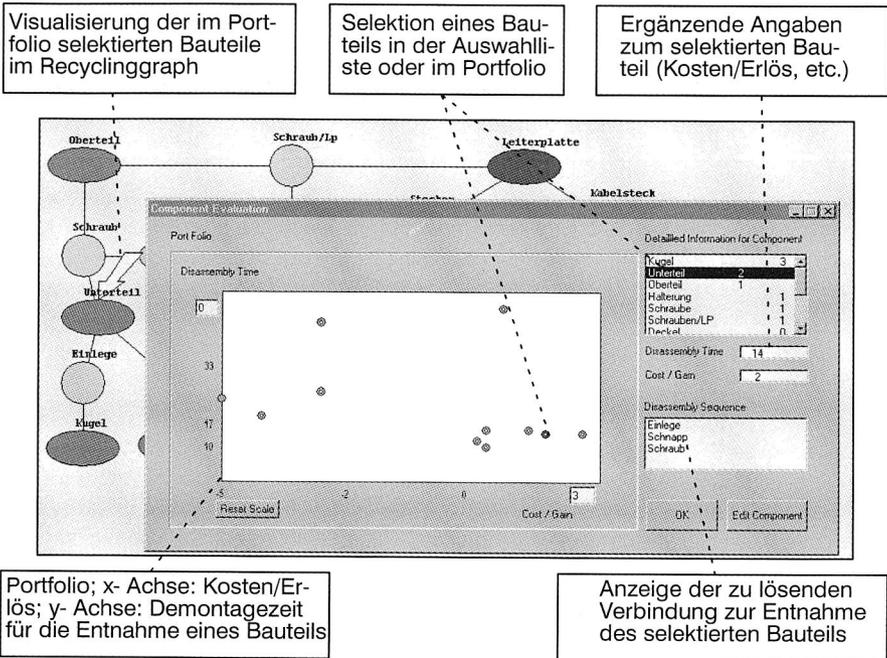


Bild 95: Bewertung von Bauteilen zur Detektion von Schwachstellen

Beim Einsatz der beschriebenen Funktionen zur Schwachstellenanalyse sollte die in Kapitel 7.2 (Bild 80) dargestellte Ablaufstruktur beachtet werden, um ein effizientes Optimierungsverfahren zu gewährleisten. Die vorgestellten Methoden zeigen dem Konstrukteur dadurch schnell und einfach die Schwachpunkte in seinem Produkt auf. Dieser muß dann seine Erfahrung nutzen, um zu entscheiden, ob es zu den erkannten Schwachstellen in der Produktgestalt technisch umsetzbare Alternativen gibt. Nach der Änderung des Produktes kann dieses mit DisPlay erneut bewertet werden, um die Auswirkungen der Änderungen auf die Recyclinggerechtigkeit der neuen Produktgestalt festzustellen.

## 8.5 Kopplung von DisPlay mit Systemen zur erweiterten, umweltgerechten Produktgestaltung

Viele Systeme zur lebenszyklusübergreifenden umweltgerechten Produktbewertung und -gestaltung berücksichtigen die Recyclingphase zwar in der Bewertung, sind je-

doch nicht in der Lage, die optimale Recycling- und Demontagestrategie sowie recyclingsspezifische Optimierungspotentiale zu ermitteln. Deshalb stellt DisPlay eine optimale Ergänzung für solche Systeme dar. Zur Bereitstellung der Funktionalitäten im Bereich der recyclingorientierten Produktbewertung sind verschiedene Möglichkeiten denkbar. Ein Austausch der bewertungsrelevanten Produktdaten und der Ergebnisse ist beispielsweise über definierte Schnittstellen zu externen Systemen möglich. In diesem Sinne ist beispielsweise eine Kopplung zu dem ebenfalls auf dem Recyclinggraphen basierenden "Assistenzsystem für die Entwicklung umweltgerechter Produkte" /136/, /135/ (vgl. Kap. 5.2.2) problemlos durchführbar.

Ein anderer Ansatz beruht darauf, die Funktionalität von DisPlay direkt in die Bewertungssystematik anderer Systeme einzubeziehen. In diesem Sinne wurde eine Kombination des "Green Component Advisors" mit DisPlay auf der Basis des in Kap. 7.4 dargestellten Konzeptes durchgeführt. Die resultierende Software, der sogenannte "Green Design Advisor", ist in der Lage komplexe Produkte auf der Basis einer Produktstrukturanalyse hinsichtlich ihrer Umweltgerechtigkeit zu bewerten und zu optimieren.

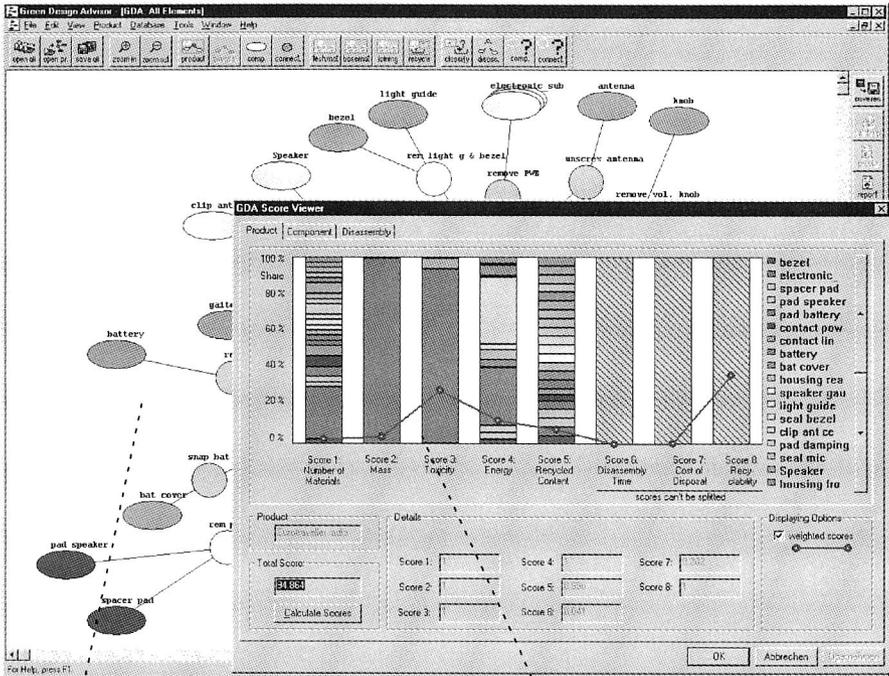
Ein erster Schritt zur Kombination der beiden Systeme ist die Erweiterung des Datenmodells um die GCA-spezifischen Daten. Hierzu muß auf der Basis der zur Berechnung des "Green Scores" verwendeten acht Parameter zunächst analysiert werden, welche der Parameter ohne Ergänzungen direkt aus dem ursprünglichen Datenmodell zu ermitteln sind. Es zeigt sich, daß die Kriterien "Anzahl verschiedener Werkstoffe" und "Masse" direkt aus dem Produktmodell (Recyclinggraphen) ausleitbar sind. Die Kriterien "Kosten der Verwertung" und "Demontagezeit" ergeben sich ebenfalls ohne weitere Ergänzungen des Datenmodells aus der implementierten Recycling- und Demontagesimulation mit DisPlay. Zur Berechnung der verbleibenden GCA-Parameter werden zusätzliche Informationen benötigt, welche in das Datenmodell an geeigneter Stelle integriert werden müssen.

Die Parameter "Energieeinsatz", "recycelter Werkstoffanteil" und "Toxizität des Werkstoffs" sind materialspezifische Kriterien. Deshalb wird die Datenstruktur der Basisdaten (vgl: Bild 83) erweitert. Die Daten "Toxizität" und "Energieaufwand zur Herstellung eines Stoffes" werden der Klasse der Basismaterialien zugeordnet. Weiter werden die Daten "recycelter Anteil" und "weiterer Energieaufwand zur Fertigung" der Klasse der technischen Materialien zugeordnet.

Die Recyclierbarkeit, bzw. der prozentuale Anteil an rückgewonnenem Sekundärrohstoff und die Kosten der Verwertung hängen von der Verwertungsstrategie des Produktes oder einer jeweiligen Komponente ab. Deshalb ist dieser Parameter ebenfalls vom Ergebnis der Recycling- und Demontagesimulation abhängig. Weiterhin muß das Datenmodell des Recyclingszenarios (vgl. Bild 85) um das Datenelement "Wiederverwertbarkeit" als Eigenschaft einer Outputfraktion ergänzt werden.

Um für den Anwender die Möglichkeit der Eingabe und Änderung der jeweiligen Parameter zu erlauben, werden die entsprechenden Dialogboxen um Eingabefelder erweitert. Auf der Basis dieser ergänzten Datenmodelle wurden die Berechnungsvor-

schriften zur Ermittlung der GCA-Parameter angepaßt und in entsprechenden Berechnungsalgorithmen implementiert.



Benutzerschnittstelle des "Green Design Advisors" auf der Basis des Recyclinggraphen

Visualisierung der Scores, welche z.T. auf der Recycling- und Demontagesimulation beruhen

Bild 96: Visualisierung umweltrelevanter Bewertungskriterien auf Produkt und Komponentenebene im "Green Design Advisor"

Neben der Implementierung der Möglichkeit, interaktiv über verschiedene Dialogfenster die Optionen für die Bewertung einzustellen und zu verändern (z. B. Gewichtung der GCA- Parameter gegeneinander), wurde großer Wert auf die Visualisierung der Ergebnisse gelegt. Die graphische Ergebnisdarstellung in dem sogenannten "Score-Viewer" (Bild 96) verdeutlicht die Haupteinflussfaktoren auf die Scores. Auf dieser Grundlage ist es möglich, eine systematische Produktoptimierung hinsichtlich Umweltgerechtigkeit und Demontagefreundlichkeit durchzuführen.

Das resultierende Softwarewerkzeug "Green Design Advisor" wurde in der Industrie zur Produktbewertung und -optimierung von Konstrukteuren und unternehmensinternen Umweltbeauftragten erfolgreich getestet /39/.

## 8.6 Berechnung eines Beispielproduktes und Validierung der Ergebnisse

Zur Veranschaulichung der Methodik und Validierung des implementierten Systems wird im folgenden ein komplexes Modellprodukt zunächst mit dem Recyclinggraph-Editor modelliert, anschließend wird eine Schwachstellenanalyse zur Ermittlung von Optimierungspotentialen durchgeführt. Die Wirksamkeit der vorgeschlagenen Optimierungen wird abschließend durch eine erneute Produktbewertung aufgezeigt. Als Modellprodukt wurde ein handelsüblicher CD-Player der Firma Grundig (CD 8200) gewählt.

### Erstellung des Recyclinggraphen und des Recyclingszenarios

Die Modellierung eines Produktes mit dem Recyclinggraph-Editor erfordert Informationen über den Aufbau der Produktstruktur und über die Materialzusammensetzung.

Zur Modellierung des CD-Players konnten folgende Informationsquellen genutzt werden:

- Probedemontage des Produktes,
- Explosionszeichnungen,
- Materialkennzeichnungen,
- Chemische Materialanalysen<sup>2</sup>

Die Probedemontage des Modellproduktes wurde mit handelsüblichem Werkzeug bis zur vollständigen Zerlegung durchgeführt. Der CD-Player besteht aus insgesamt 155 Einzelteilen, die mit 131 Verbindungen verbunden sind. Die Ergebnisse der Probezerlegung wurden in einem Verbindungsbericht (Anhang B 1) strukturiert abgelegt. Analog wurde ein Bauteilbericht (Anhang B 2) erstellt, in welchem u.a. die Materialzusammensetzung der Bauteile angegeben ist.

Aus den Ergebnissen der Probezerlegung kann der Recyclinggraph des CD-Players erstellt werden. Entsprechend der Definition von Demontagebaugruppen ist es möglich, das Gerät durch das Bilden der Baugruppen Front, Laufwerk und Chassis (innerhalb der Baugruppe Laufwerk) zu strukturieren. Die Baugruppen werden jeweils für sich als Recyclinggraph modelliert und als bewertete Komponenten in den übergeordneten Recyclinggraphen eingebunden. Die Recyclinggraphen der Baugruppen und des vollständigen CD-Players sind in Bild 97 dargestellt. In der Abbildung des vollständigen CD-Players ist weiterhin die Materialverteilung des Produktes in einem Dialogfenster wiedergegeben.

Als Grundlage für die Erstellung eines Recyclingszenarios diente sowohl eine Literaturrecherche der aktuellen Preise für Sekundärrohstoffe /84/ als auch eine Marktanalyse bei verschiedenen Entsorgungsunternehmen. Es zeigte sich, daß die Kosten-Erlössi-

---

<sup>2</sup>. Durchgeführt vom Institut für anorganische Chemie (AOC) der Universität Erlangen Nürnberg

tuation der einzelnen Fraktionen sowohl großen räumlichen als auch zeitlichen Schwankungen unterliegt.

Auf der Basis dieser Analyse wurde ein exemplarisches Recyclingszenario, bestehend aus 25 Outputfraktionen, erstellt (vgl. Anhang A).

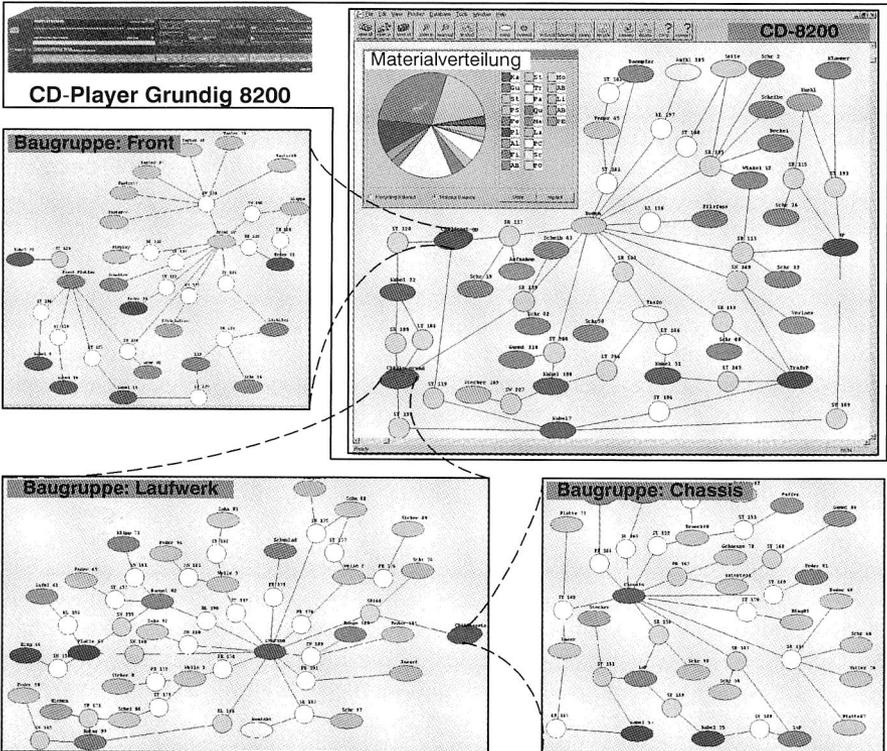


Bild 97: Recyclinggraph des CD-Players Grundig CD 8200; Die dargestellten Baugruppen sind jeweils mit dem übergeordneten Recyclinggraphen verknüpft

## Recycling- und Demontagesimulation

Da das Modellprodukt in mehrere Baugruppen aufgeteilt ist, müssen im "Bottom up" Verfahren die untersten Baugruppen zuerst berechnet und dann zusammen mit dem Ergebnis (optimale Demontage- und Recyclingstrategie) in die jeweils übergeordneten Baugruppen eingebunden werden. Die detaillierten Ergebnisse der Berechnungen sind in Anhang B 3 wiedergegeben.

Die Berechnung der *Frontbaugruppe* (vgl. Bild 97 links) ergibt, daß eine Zerlegung nicht sinnvoll ist, da die Entsorgung der Baugruppe mit der Outputfraktion "Sondermüll" günstiger (Kosten: 1,17 DM) ist als jegliche andere Demontagekombination.

Die Recycling- und Demontagesimulation der Baugruppe *Chassis* (vgl. Bild 97 unten rechts) ergab eine optimale Demontage- und Recyclingstrategie bei der Demontage von 6 Verbindungen. Die 9 resultierenden Recyclinggruppen werden 4 Outputfraktionen zugewiesen. Der Gesamtdeckungsbeitrag beträgt -1.34 DM (unzerlegt -1,60 DM).

Wie bereits beschrieben, wird diese Baugruppe mit dem berechneten Ergebnis in die Baugruppe *Laufwerk* eingebunden und bei deren Simulation mit berücksichtigt. Die Berechnung der Baugruppe *Laufwerk* ergab, daß die kosteneffizienteste Lösung bei Gesamtkosten von 1.49 DM liegt. Im Vergleich dazu würde eine unzerlegte Entsorgung 2,82 DM kosten. Bei dieser Kombination wird die *Chassis*-Baugruppe von den restlichen Komponenten separiert. Das bedeutet, daß diese Baugruppe weiter nach der zuvor berechneten Strategie demontiert wird.

Die Baugruppen *Front* und *Laufwerk* werden nun mit den jeweiligen Ergebnissen in den Recyclinggraphen des vollständigen CD-Players eingebunden. In Bild 98 ist das Ergebnis der Recycling- und Demontagesimulation des vollständigen CD-Players dargestellt. Es zeigt sich, daß die optimale Demontage- und Recyclingstrategie 6,31 DM kostet. Würde der CD-Player ohne Demontage entsorgt werden, müßte er aufgrund der enthaltenen Gefahrstoffe komplett als Sondermüll bei Kosten von 14,44 DM (vgl. Recyclingzenario) beseitigt werden.

Bei der optimalen Demontagetiefe fällt auf, daß sowohl die *Laufwerksbaugruppe* als auch die *Frontbaugruppe* aus dem Produkt entnommen werden. Die Demontage der *Laufwerksbaugruppe* aus dem Hauptgraphen wird durch die Kostenspanne zwischen der Entsorgung der unzerlegten Baugruppe zu der berechneten optimalen Demontagestrategie motiviert. Demgegenüber wird die aus dem CD-Player entnommene *Frontbaugruppe* nicht weiter demontiert. Bei dieser Baugruppe lohnt sich die Entnahme aus dem Hauptgraphen, um die Zuordnung der verbleibenden Recyclinggruppen zu günstigeren Outputfraktionen zu ermöglichen.

Neben den Ergebnissen der Simulation soll in diesem Abschnitt auch die Anwendbarkeit der Software und die Wirksamkeit der Methoden zur Reduktion der relevanten Demontagekombinationen, die sich insbesondere auf die Rechenzeit auswirken, evaluiert werden. In Bild 99 links sind die Rechenzeiten und die Anzahl der jeweils generierten Demontagekombinationen für die einzelnen Baugruppen und für den Hauptgraphen dargestellt. Die einzelnen Rechenzeiten liegen in dem Bereich von 1,5 bis 99 Sekunden und summieren sich für die vollständige Berechnung des Produktes auf ca. 110 Sekunden auf. Angesichts der Komplexität des Gerätes und der Tatsache, daß eine exakte (keine suboptimale) Lösung gefunden wird, ist diese Rechenzeit sehr gering.

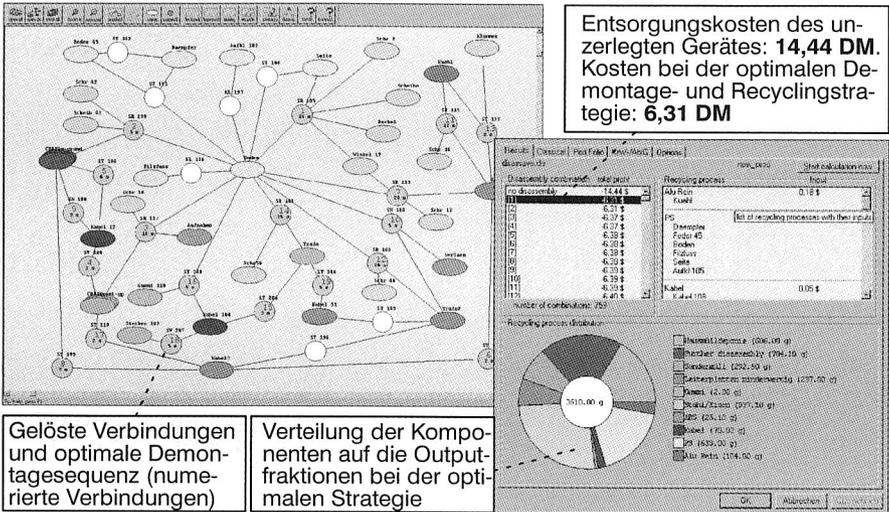


Bild 98: Ergebnis der Berechnung der optimalen Demontage- und Recyclingstrategie des CD-Players unter Berücksichtigung der eingebundenen Baugruppen

Bei den dargestellten Berechnungen wurden standardmäßig alle entwickelten Methoden zur Reduktion der Lösungsräume und der Rechenzeit eingesetzt. Um die Wirksamkeit der einzelnen Methoden nachzuweisen, wurde die Software so implementiert, daß die jeweiligen Abbruchkriterien optional deaktiviert werden können.

In Bild 99 rechts ist am Beispiel der Berechnung des Hauptgraphen der Einfluß der implementierten Methoden auf die Anzahl der generierten Demontagekombinationen und die entsprechende Rechenzeit dargestellt. Ohne Berücksichtigung der entwickelten Reduktionsmethoden müssen demnach ca 50000 Demontagekombinationen berechnet und bewertet werden (Dauer: 484s). Es zeigt sich, daß die wirksamste Einzelmethode, in dieser Konstellation von Produktmodell und Recyclingszenario, die Nutzung des Entnahmepotentials ist. Durch insgesamt 9 Abbrüche während der Berechnungen wird die Anzahl der relevanten Demontagekombinationen dabei auf ca. 3900 verringert und die Rechenzeit auf ca. 10s reduziert. Auch die anderen Kriterien erbringen deutliche Reduktionen. Durch die integrierte Nutzung aller Kriterien wird jedoch die maximale Reduktion der zu berücksichtigenden Demontagekombinationen um den Faktor 67, auf 760, und eine Verkürzung der Rechenzeit um den Faktor 86, auf 5,6s, erreicht (Bild 99). Bei dieser Berechnung wurde das Entnahmepotential 9-mal, das Zerlegpotential 10-mal und die variable Trennschärfe 21-mal rechnerintern als Abbruchkriterium genutzt. Selbstverständlich führten alle Rechenläufe trotz unterschiedlicher Reduktionskriterien zu der gleichen optimalen Recycling- und Demontagestrategie.

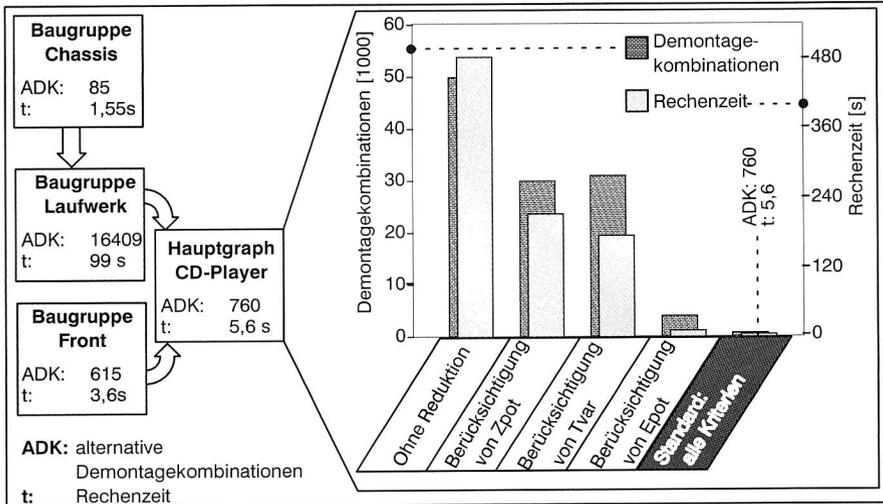


Bild 99: Vergleich der zu berücksichtigenden Demontagekombinationen und der entsprechenden Rechenzeiten bei Nutzung unterschiedlicher Abbruchkriterien

Ausführliche Versuche mit verschiedenen Produkten und unterschiedlichen Recyclingszenarien haben gezeigt, daß der erreichbare Reduktionsfaktor für Demontagekombinationen sehr stark variieren kann. Dies liegt darin begründet, daß die Wirksamkeit der definierten Abbruchkriterien sehr stark vom Produktmodell und vom Recyclingszenario abhängen. Weiterhin konnte festgestellt werden, daß die einzelnen Kriterien den größten Effekt auf die Rechenzeit bei jeweils unterschiedlichen Rahmenbedingungen (Produktstrukturen und Recyclingszenarien) haben, so daß sich die Kriterien hervorragend gegenseitig ergänzen.

Aufgrund der vorgestellten Ergebnisse wird die hohe Wirksamkeit der in Kapitel 6 entwickelten Methoden deutlich. Diese tragen wesentlich zur Einsatzfähigkeit der Software bei, da die Rechenzeiten extrem reduziert werden und die Berechnung großer und komplexer Produkte damit erst ermöglicht wird.

### Detektion von Schwachstellen und recyclinggerechte Optimierung

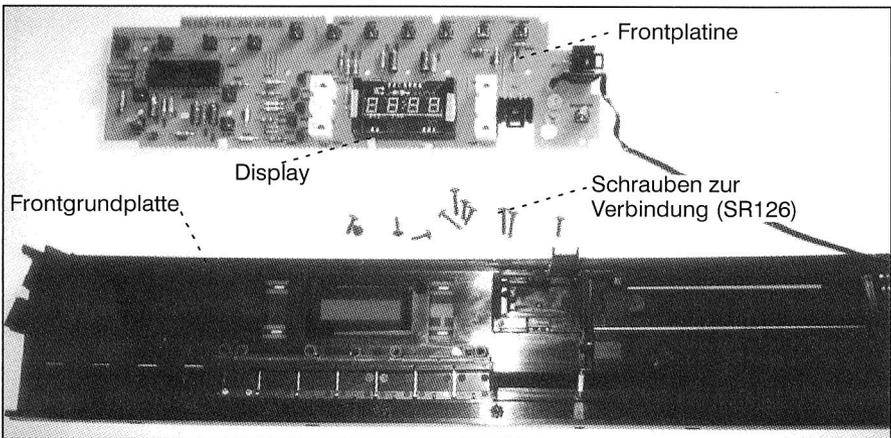
Auf der Basis der Ergebnisse der Demontage- und Recyclingsimulation kann nun eine Optimierung des Produktes oder seiner Baugruppen durchgeführt werden. Die implementierten Funktionen zu der hierfür hilfreichen Schwachstellenanalyse und die Vorgehensweise zur Nutzung dieser Funktionen sollen im folgenden evaluiert werden.

Wie bereits im vorhergehenden Abschnitt beschrieben, wird bei der optimalen Demontagekombination die Frontbaugruppe zwar aus dem CD-Player entnommen, jedoch nicht weiter demontiert, sondern als Sondermüll entsorgt. Als Beispiel für die Anwend-

barkeit der Schwachstellenanalysen soll deshalb in diesem Rahmen die Frontbaugruppe hinsichtlich vorhandener Optimierungspotentiale untersucht werden.

Die Frontbaugruppe des CD-Players (Bild 100) besteht im wesentlichen aus einer Frontgrundplatte (Blende), welche die Bedienelemente, das Display sowie den zugehörigen Schaltungsträger und einige weitere Komponenten enthält (vgl.: Anhang B 2).

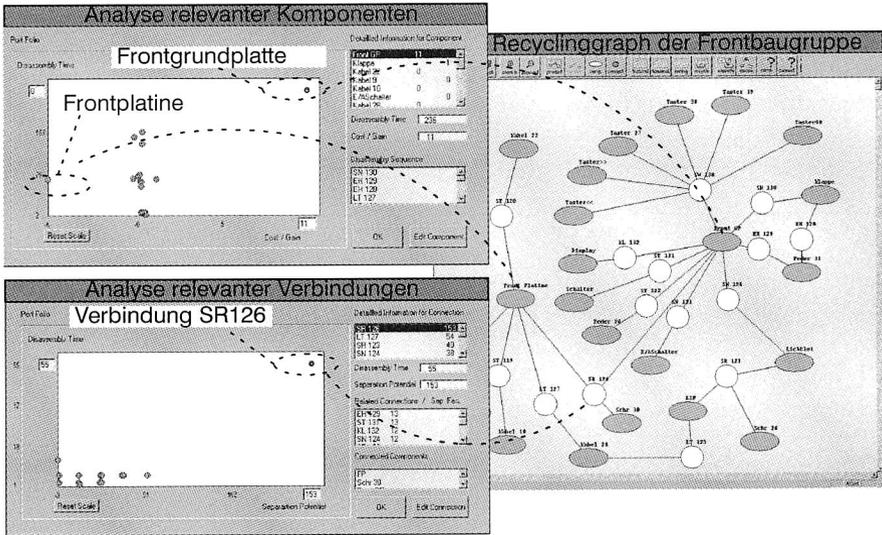
Zunächst soll eine Analyse der Optimierungspotentiale hinsichtlich einer Verbesserung der Materialkompatibilität ohne weitere Demontage durchgeführt werden. Es zeigt sich, daß bei der Bewertung der kompletten Baugruppe eine Materialoptimierung schwierig ist, da hierzu beispielsweise der Flammenschutz aus der Platine sowie andere Stoffe substituiert werden müßten, um eine geringfügige Verbesserung des Nachgebrauchsverhaltens der unzerlegten Baugruppe zu gewährleisten. Da dies technisch nicht sinnvoll ist, soll zunächst versucht werden die Demontagefähigkeit der Baugruppe zu erhöhen.



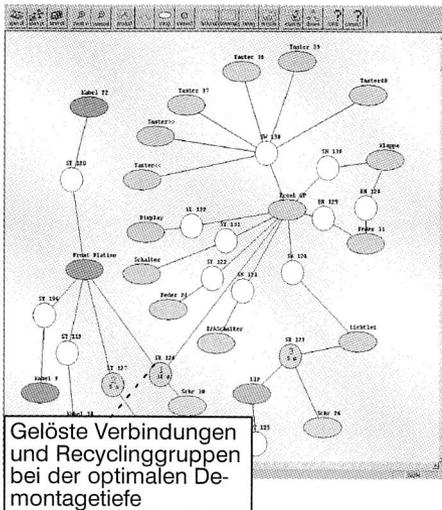
*Bild 100: Abbildung der teilzerlegten Frontbaugruppe des CD-Players mit der Benennung der demontierten Komponenten*

In Bild 101 sind die Schwachstellenanalysen hinsichtlich verbindungsspezifischer und bauteilspezifischer Optimierungspotentiale in einer gemeinsamen Abbildung dargestellt. Das Portfolio zur Analyse von Komponenten zeigt, daß zunächst zwei Bauteile hinsichtlich einer Demontage relevant sind: Die Frontgrundplatte weist einen potentiellen Gewinn von 0,11 DM bei einer Gesamtdemontagezeit von 236 s auf. Auf der linken Seite des Portfolios erkennt man, daß die Komponente Frontplatte im Vergleich zu den anderen Bauteilen hohe Kosten von 0,06 DM bei einer Demontagezeit von 60 s aufweist. Diese Bauteile deuten wegen des im Vergleich zu den übrigen Komponenten hohen potentiellen Gewinns bzw. hoher Kosten kombiniert mit der hohen Demontagezeit auf eine Schwachstelle hin.

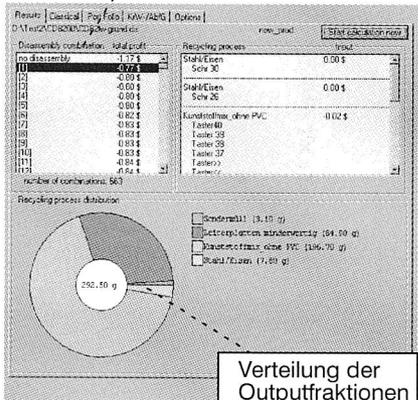
In einer weiteren Analyse werden nun die verbindungsbezogenen Schwachstellen detektiert. Wie im entsprechenden Portfolio zu erkennen ist, kann insbesondere eine Verbindung nämlich die Verbindung SR126, als potentielle Schwachstelle erkannt werden. Diese Verbindung, die die Frontplatte mit der Frontgrundplatte verbindet, weist das hohe Separationspotential von 153 kombiniert mit einer Demontagezeit von 55 s auf. Da mit dieser Verbindung auch die vorhin als potentielle Schwachstellen detektierten Komponenten verbunden sind, sollte hier eine Optimierung versucht werden.



änderung zu überprüfen. Das Ergebnis der Produktbewertung ist in Bild 102 dargestellt. Es zeigt sich, daß die durchgeführte geringfügige Änderung der Produktgestaltung einen wesentlichen Einfluß auf die Nachgebrauchsphase hat. Als optimale Strategie wurde nun eine Demontage von drei Verbindungen (auch SR 126) ermittelt. Die Baugruppe zerfällt dabei in 5 Recyclinggruppen, welche 4 Outputfraktionen zugeordnet werden. Entscheidend ist jedoch, daß die Nachgebrauchskosten von 1,17 DM auf 0,77 DM fallen. Diese Reduktion wirkt sich auch direkt auf die Demontage- und Recyclingkosten des vollständigen CD-Players aus.



Verbesserung des Deckungsbeitrages von 1,17 DM (ohne Demontage) auf 0,77 DM für die optimierte Baugruppe



steht die Möglichkeit, entweder die technische Realisierbarkeit einer solchen Materialsubstitution zu untersuchen oder eine erneute Demontageoptimierung mit diesen Zielbauteilen durchzuführen.

Für den Fall einer erfolgreichen Substituierung von ABS und PA durch PC in den beiden relevanten Bauteilen zeigt eine erneute Recycling- und Demontagesimulation, daß die Gesamtkosten der Frontbaugruppe auf 0.58 DM reduziert würden. Die Umsetzung dieser Optimierung würde die Kosten für das Recycling des vollständigen CD-Players von 6,31 DM auf 5.73 DM reduzieren.

**Restrictions for alternative Processes**

**Incompatible Recycling Boxes**

Incompatible Recycling Boxes	Number	Share	Cost / Gain
ABS	1	77	14
PC	2	5	17
PA	2	86	12
Stahl/Eisen	3	86	1
Metalllas	4	99	10
Kabel	6	27	14

**Incompatible Materials in selec. Box**

Specified Materials	Unspec. Mat.	Share
ABS		317249
PA		1.90845
Glac		1.22191
PET		0.60659

Options:  
 All Boxes  
 Better Boxes  
 Sort for Cost/Gain  
 Sort for Share

Edt Recycling Box  
OK

**Größtes Optimierungspotential bei der Zuordnung zu der Outputfraktion PC**

**Vorschlag: Substitution der Störstoffe ABS (3.2%) und PA (1.9%), um eine Materialkompatibilität zu erreichen**

Bild 103: Optimierung der Materialkompatibilität einer Recyclinggruppe

Die Evaluierung des entwickelten Softwaresystems und der zugrundeliegenden Methodik zeigt, daß ein effizienter, schneller Einsatz von DisPlay zur recyclingorientierten Produktanalyse möglich ist. Mit dem Einsatz der Funktionen zur Schwachstellenanalyse und der entwickelten systematischen Vorgehensweise können die wesentlichen Optimierungspotentiale eines Produktes schnell erfaßt und hinsichtlich des zu erwartenden Nutzens beurteilt werden.

## 9 Zusammenfassung

Angesichts zunehmender Umweltprobleme und der daraus resultierenden gesetzlichen Regelungen nimmt die Bedeutung des Recyclings technischer Produkte beständig zu. Übergreifendes Ziel dieser Arbeit war es, einen Beitrag zur Effizienzsteigerung bei Recycling und Demontage zu leisten, um wirtschaftliche und trotzdem hochwertige Recyclingkreisläufe zu ermöglichen.

Eine Analyse der Rationalisierungspotentiale bei den besonders recyclingrelevanten Produktgruppen (elektronische und elektrische Geräte sowie Automobile) hat ergeben, daß vor allem in drei Bereichen entscheidende Verbesserungen möglich sind: Eine *recyclinggerechte Produktgestaltung* kann mittel- und langfristig eine grundlegende Vereinfachung der Verwertung und erneuten Verwendung ermöglichen. Bei aktuell zum Recycling anfallenden Produkten kann jedoch vorwiegend durch die *Optimierung von Demontagevorgängen* sowie durch eine *verbesserte Demontageplanung* eine erhebliche Effizienzsteigerung erreicht werden.

Zur Optimierung von Demontagevorgängen wurde der Schwerpunkt auf die Entwicklung neuer, speziell an die Anforderungen der Demontage angepaßter Werkzeuge gelegt, da diese die Grundlage für effiziente manuelle und automatisierte Demontagekonzepte bilden. Hierzu wurden durch Abstrahierung und Strukturierung von Demontagevorgängen bisher kaum genutzte Entwicklungspotentiale zur Erhöhung der Flexibilität und Verkürzung der Verfahrensdauer aufgezeigt. Auf der Grundlage dieser Ergebnisse konnten sechs neue Demontagewerkzeuge konzipiert werden. Diese Werkzeuge, die Lösungen für das effiziente Übertragen von Drehmomenten und Kräften bereitstellen, wurden hinsichtlich der zuvor definierten Anforderung bewertet und verglichen. Für eine Ausarbeitung und prototypische Realisierung wurden die Werkzeuge mit dem größten Effizienzpotential ausgewählt:

- Das Bohr-Entschraubwerkzeug ist in der Lage, Drehmomente auf eine Vielzahl aktueller Schraubenantriebe entweder über Formschluß oder über prozeßimmanent erzeugte Angriffsflächen zu übertragen. Alternativ dazu ist bei diesem Werkzeug die Möglichkeit zur zerstörenden Demontage durch Aufbohren gegeben.
- Der Spreizmeißel ist für das schnelle Öffnen von Kunststoffgehäusen - unabhängig von den eingesetzten Verbindungsarten - konzipiert. Durch ein spezielles Hebelsystem wird hierbei eine impulsartige Eingangskraft gleichzeitig zur Generierung geeigneter Angriffsflächen und zum Trennen der Kunststoffelemente genutzt.

Im Rahmen experimenteller Untersuchungen konnten einerseits die Werkzeuggestaltung und die Prozeßparameter optimiert, andererseits aber auch die Leistungsfähigkeit der Prototypen nachgewiesen werden. Darüber hinaus wurde - als Beispiel für den vorteilhaften Einsatz flexibler Werkzeuge in der automatisierten Demontage - ein teilautomatisiertes Entschraubmodul auf der Basis des Bohr-Entschraubwerkzeugs entworfen und realisiert.

Für die Demontageplanung und für die optimierte Produktgestaltung ist eine recyclingorientierte Produktanalyse von entscheidender Bedeutung. Hierzu wurde auf der Grundlage aktueller Defizite ein Konzept entwickelt, das als zentrales Element eine Demontage- und Recyclingsimulation von Produkten beinhaltet. Diese Systematik ermöglicht die Ermittlung der optimalen Recycling- und Demontagestrategie für technische Produkte, unter der gemeinsamen Berücksichtigung von Produkteigenschaften und Rahmenbedingungen des Recyclings. Ausgangspunkt für die Analyse ist die Produktabbildung in einem speziellen Verbindungsstrukturgraphen, dem sogenannten Recyclinggraphen. Die Modellierung alternativer Recycling- und Beseitigungsprozessketten erfolgt produktunabhängig mit einem semantischen Verfahren. Eine besondere Herausforderung bei der Produktanalyse war es, alle potentiellen Demontagealternativen bei geringen, vertretbaren Rechenzeiten einzubeziehen. Deshalb wurden für diese Problemstellung auf der Grundstruktur des "Branch and Bound"-Optimierungsverfahrens eine Methode entwickelt, die den Lösungsraum für die optimale Demontage- und Recyclingstrategie erheblich einschränkt. Hierbei werden empirische Kennwerte eingesetzt, die sowohl auf Produktdaten als auch auf Daten verfügbarer Demontage- und Recyclingprozesse beruhen.

Zusätzlich wurden für die Unterstützung der recyclinggerechten Produktgestaltung verschiedene Methoden zur Schwachstellenanalyse entwickelt. Diese betreffen die Materialkompatibilität, die Anordnung und Auswahl von Verbindungselementen sowie die Anordnung von wert- und gefahrstoffhaltigen Bauteilen innerhalb der Produktstruktur. Eine ebenfalls im Rahmen dieser Arbeit entwickelte systematische Vorgehensweise erlaubt den integrierten Einsatz dieser Verfahren zur Produktoptimierung. Die geschilderten Methoden zur Produktanalyse und -optimierung wurden in die Software "DisPlay" umgesetzt und in der Industrie erprobt. Die Einbindung der umfangreichen, recyclingbezogenen Funktionalität von DisPlay in Systeme zur übergreifenden ökologischen Produktbewertung wurde am Beispiel der industriell eingesetzten Software "Green Design Advisor" demonstriert.

Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Lösungen zeigen Möglichkeiten zur Optimierung von Demontagevorgängen und -abläufen sowie für eine Verbesserung der Recyclingeignung von Produkten auf. Die bei einer entsprechenden Umsetzung zu erwartenden Effizienzsteigerungen beim Recycling aktuell anfallender und zukünftiger technischer Produkte können die Wirtschaftlichkeit hochwertiger Recyclingkreisläufe entscheidend verbessern.

## Literatur

- /1/ Albers, Th.: Kostenoptimale Demontage am Beispiel von Videokassetten; Motek, Sinsheim, 1997.
- /2/ Alting, L.; Legarth, B.: Life Cycle Engineering and Design; Annals of the CIRP Vol. 44/2/1995, 1995.
- /3/ Baier, C.: Benefit Function for the Calculation of the Best Recycling Option for Products and Parts; 4th International Seminar on Life Cycle Engineering, Chapman & Hall, Berlin, 1997.
- /4/ Boks, C. B.; Tempelman, E.: Final Report of the Delphi Study on Future Disassembly and Recycling Technology for the Electronics and Automotive Industry; Delft University of Technology, Delft, 1997.
- /5/ Bullinger, H.J.; Warschat, J.; Bopp, J.: Tools zur Abschätzung des End-of Life Value bei technischen Produkten; VDI Berichte Nr. 1289, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1996.
- /6/ 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, S. 118-122, Cambridge, UK April, 1996.
- /7/ Dewhurst, P.: Product Design For Manufacture: Design For Disassembly; Journal Of Industrial Engineering, September, 1993.
- /8/ Dieterle, A.: Recyclingintegrierte Produktentwicklung; Dissertation TU München, Springer Verlag, Berlin, New York, 1995.
- /9/ Ebach, H.: Advanced Disassembly Systems, an Important Step in Life Cycle; Recy '94, Meisenbach Verlag, Bamberg, 1994.
- /10/ Ebach H.; Kaase, W.; Roth, N.: DV-gestütztes Recycling - Management - System; Industrie Management 12 /1996, GITO-Verlag, 1996
- /11/ Feldmann, K.; Meedt, O.: Design for Recycling based on a Simulation of the End of Life; Production Engineering, Annals of the WGP Vol. IV/2, S. 101-104, 1997.
- /12/ 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.

- /13/ Feldmann, K.; Meedt, O.; Trautner, S.; Meerkamm, H.; Rosemann, B.: Entwicklung einer Design-Disassembly Verfahrenskette auf der Basis einer recyclingrelevanten Produktkennzeichnung; Berichtsheft 7 zum 5. BayForrest Statusseminar, München, 1997.
- /14/ Feldmann, K.; Meedt, O.; Trautner, S.; Meerkamm, H.; Rosemann, B.: Entwicklung einer Verfahrenskette zur recyclinggerechten Produktgestaltung und effizienten Demontage; VDI Tagung: Markt und Kostenvorteile durch Entwicklung umweltverträglicher Produkte, Fellbach, 1998.
- /15/ Feldmann, K.; Meedt, O.; Trautner, S.: Innovative Disassembly Strategies Based on Flexible Partial Destructive Tools; 1st IFAC Workshop on Intelligent Assembly and Disassembly (IAD' 98), Bled, SI, 1998
- /16/ Feldmann, K.; Meedt, O.: Recycling and disassembly of electronic devices; International conference on Life-Cycle Modelling for Innovative Products and Processes, PROLAMAT'95, Chapman & Hall, Berlin, 1995.
- /17/ Feldmann, K.; Meedt, O.: Determination and evaluation of the optimal end of life strategy for products based on simulation of disassembly and recycling; Life Cycle Networks, 4 th CIRP International Seminar on Life Cycle Engineering, Berlin, 1997.
- /18/ Feldmann, K.; Meedt, O.: Innovative Tools and Systems for Efficient Disassembly processes.; 3rd international seminar on life-cycle-engineering, ECO-Performance'96, Zürich, 1996.
- /19/ Feldmann, K.; Meedt, O.: Demontage elektronischer Geräte unter Nutzung effizienter Werkzeuge und lebenszyklusübergreifender Produktdaten; Industrie Management 12, S. 30-34, GITO Verlag, 1996.
- /20/ Feldmann, K.; Meedt, O.; Meerkamm, H.; Weber, J.: Entwicklung einer CAD-CADis-Verfahrenskette auf Basis recyclingrelevanter Produktkennzeichnung; Umweltinformationssysteme in der Produktion, Metropolis-Verlag, Berlin, 1995.
- /21/ Feldmann, K.; Scheller, H.: Automatisierte Demontage elektronischer Flachbaugruppen; VDI Seminar: Recyclingfähige elektronische Geräte; Erlangen, 1996.
- /22/ Feldmann, K.; Scheller, H.; Franke, J.: Platinen: Zerlegen statt wegwerfen; Elektronik Nr. 20, Franzis-Verlag, Poing, 1994.

- /23/ Franze, H.;  
Neumann, U.: Life Cycle Optimization of Car Components; SAE Technical Paper 950207, SAE International Congress and Exposition, Detroit, 1995.
- /24/ Friedrich, R. : Identifizierung elektronischer Bauelemente und deren gezielte Demontage; Dissertation TU Braunschweig, Fortschritt-Berichte VDI Reihe 8, Nr. 586, 1996.
- /25/ Gehrmann, F.: Konstruktion und werterhaltendes Recycling niederwertiger technischer Gebrauchsgüter, dargestellt am Beispiel Haushaltskleinmaschinen; Fortschrittsbericht VDI-Reihe 15, Nr. 40, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1986.
- /26/ Graser, K.;  
Hooock, R.;  
Gruber, F.: Rezyklate im Fahrzeugbau; Kunststoffe 85/3, S. 330-335, Carl Hanser Verlag, München, 1995.
- /27/ Große-Ophoff, M.;  
Gruber, F.: Altautoverwertung - Probleme und zukünftige Anforderungen; Entsorgungspraxis Nr. 7-8, S.48-54, 1995.
- /28/ Harbauer, J.: Innovative Recycling- und Demontagekonzepte in der Automobilindustrie; Motek, Sinsheim, 1996.
- /29/ Harbauer, J.: DAISY - Dismantling Information System; Proceedings of the 4th International Car Recycling Workshop, Tokyo, 1998
- /30/ Harjula, T.;  
Raponza, B.;  
Boothroyd, G.: Design for Disassembly and Environment; Annals of the CIRP Vol. 45/1, S. 109-114, 1996.
- /31/ Hartel, M.: Kennzahlenbasiertes Bewertungssystem zur Beurteilung der Demontage- und Recyclingeignung von Produkten; Dissertation, Institut für Werkzeugmaschinen, Universität Karlsruhe, Karlsruhe, 1997.
- /32/ Hascher, W.: Entwickler - in die Umweltpflicht genommen; Elektronik Nr. 9, 1995.
- /33/ Hentschel, C.: Beitrag zur Organisation von Demontagesystemen; Dissertation, Fraunhofer Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik, Berlin, 1997.
- /34/ Hesselbach, J.;  
Friedrich, R.;  
Schütte, G.: Automatization in Dismantling of Printed Circuit Boards; Recy '94, Meisenbach Verlag, Bamberg, 1994.
- /35/ Hesselbach, J.;  
von Werder, H.-K.: Elektronikschrott-Recycling: Der Engpaß ist die Demontage; me Bd. 9, S.8-13, 1995.

- /36/ Hieber, M.: Praxisbeispiele und Methoden der umwelt- und recyclinggerechten Produktentwicklung; Motek, Sinsheim, 1997.
- /37/ Hoffman, W. F.: A Tiered Approach to Design for Environment; Proceedings of Clean Electronic Products and Technology, IEE Conference Edinburgh, Edinburgh, 1995.
- /38/ Hoffman, W.F.; Locascio, A.: Design for Environment Development at Motorola; Motorola, Schaumburg, IL, USA.
- /39/ Hoffman III, W. F.; Scheller, H.: "Design for Environment at Motorola"; Proceedings of the Seminar "Innovative Production of Electronic Systems", Productronica 97, München, 1997.
- /40/ Hucht, A., Nave, M.: Entwicklung einer flexiblen, robotergestützten Demontagezelle für Fernsehgeräte; Prielog Logistik GmbH, Motek, Sinsheim, 1996.
- /41/ Ishii, K.; Eubanks, C.F.; Marks, M.: Evaluation Methodology for Post-manufacturing issues in Life-Cycle Design; Concurrent Engineering Research and Applications Nr. 1, 1993.
- /42/ Ishii, K.; Marks, M.D.; Eubanks, C.F.; Shriver, M.B.: Life-cycle Design for Recyclability; ICED '94, Amsterdam, 1994.
- /43/ Jansen, R.; Brüning, R.; Kreis, W.; Möller, T.: Automatisierte Wiederverwendung elektronischer Komponenten von Leiterplatten und Entfernung toxischer Bauelemente; EG-Forschungsprojekt CRAFT, PUB\_6B.DOC, 14.09.95, 1995.
- /44/ Johnson, E.; Seeberg, C.: Greener Design; BYTE Magazin 11/97, New York, 1997.
- /45/ Jovane, F.; Altling, L.; Armillotta, A.; Eversheim, W.; Feldmann, K.; Seliger, G.; Roth, N.: A Key Issue in Product Life Cycle: Disassembly; Keynote Paper, Annals of the CIRP Vol. 42/2/1993, 1993.
- /46/ Kahmeyer, M.: Flexible Demontage mit dem Industrieroboter am Beispiel von Fernsprech-Endgeräten; Springer-Verlag, Berlin, New-York, 1995.

- /47/ Klimmek, M.: Fraktionierung technischer Produkte mittels eines frei beweglichen Wasserstrahlwerkzeugs; Dissertation, Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebstechnik, Universität Karlsruhe, Karlsruhe, 1997.
- /48/ Köller, H.: Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz; Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis Bd. 77, Erich Schmidt Verlag, Berlin, 1995.
- /49/ Koller, R.: Konstruktionslehre für den Maschinenbau; Springer Verlag, Berlin, New York, 1994.
- /50/ Krasowski, H.: Ökobilanz - lifecycle assessment von Kfz-Elektronik; Kreislaufwirtschaftsgesetz: Entwicklung und Demontage recyclingfähiger Elektronikgeräte und Bauteile, VDI Bildungswerk, Erlangen, 1996.
- /51/ Krause, D. ; Scheller, H.: Recyclinggerechte Produktgestaltung und wirtschaftliche Demontageplanung feinwerktechnischer Geräte; VDI Tagungsbericht: Serienfertigung feinwerktechnischer Produkte, Braunschweig, 1994.
- /52/ Krause, D.; Scheller, H.: Design for Recyclability and Economical Planning of Disassembly based on the Recyclinggraph-tool; Proceedings 2nd CIRP Seminar on Life Cycle Engineering RECY '94, Erlangen, Meisenbach Verlag, Bamberg, 1994.
- /53/ Kriwet, A.: Bewertungsmethodik für die recyclinggerechte Produktgestaltung; Dissertation, Produktionstechnik - Berlin, technische Universität Berlin, 1994.
- /54/ Landeck, H.: Konstruktion eines entsorgungsfreundlichen Farbfernsehgerätes der Loewe Opta GmbH; Umweltwirtschaftsforum Heft 5, 1994.
- /55/ Lehmann, F.; Hartmann, M.; Munz, M.: Fachgebiete in Jahresübersichten - Demontage -; VDI Z 136 Nr. 6, 1994.
- /56/ Luttropp, C.: Disassembly Structures - An Approach to Understand Product Structures from a Separation Viewpoint; 4th International Seminar on Life Cycle Engineering Berlin, 1997.
- /57/ Luttropp, C.: Design for Disassembly - Environmental Adapted Product Development Based on Prepared Disassembly and Sorting, Dissertation, KTH Stockholm, 1997.

- /58/ Mahn, J.; Häberle, J.; Kopp, S.; Schwegler, T.: HP-PAC: A new Chassis and Housing Concept for Electronic Equipment; Hewlett-Packard Journal, August, 1994.
- /59/ Meedt, O.; Weber, J.: Entwicklung eines Werkzeugs zur recyclinggerechten Produktentwicklung und zur wirtschaftlichen und automatisierten Demontageplanung; VDI Seminar: Entwicklung und Demontage recyclingfähiger Elektronikgeräte und Bauteile, Erlangen, 1995.
- /60/ Meerkamm, H.: Engineering Workbench - ein Schlüssel zur Lösung komplexer Konstruktionsprobleme; Proceedings of the ICED'95, Praha, Heurista-Verlag, Zürich, 1995.
- /61/ Meerkamm, H.; Storath, E.: Design for X - the Interference between Product and Process - a Potential for Engineering Network; 13. Workshop WDK, Rigi-Kaltbach, 1996.
- /62/ Meerkamm, H.; Weber, J.: Design for Recyclability - an Analysis-Tool in the Engineering Workbench; Proceedings of the IFIP WG5.3 international conference on life-cycle modelling for innovative products and processes, S.510, Chapman & Hall, Berlin, 1995.
- /63/ Meerkamm, H.; Weber, J.: Integration of the Design for Recyclability tool RecyKon in an environmental management concept; 3rd international seminar on life-cycle-engineering, ECO-Performance'96, Zürich, 1996.
- /64/ Middendorf, A.; Höppner, W.; Teller, M.: IDEE Information Network for Closed Loop Economy; 4th International Seminar on Life Cycle Engineering Berlin, Berlin, 1997.
- /65/ Möller, T.: Beitrag zur automatisierten selektiven Entstückung von Leiterplatten; Dissertation, Universität Dortmund, Shaker Verlag, Aachen, 1996.
- /66/ n.n.: Study Contract "Waste 92 - End of Life Electronic Equipment"; CEU n.B4-3040/014127/92, Final Report, ENEA, Rom, 1993.
- /67/ n.n.: Daten zur Umwelt 1992/1993; Umweltbundesamt, Berlin, 1993.
- /68/ n.n.: Althauto-Verordnung (AlthautoV) BGBl. I S. 1666, 1997

- /69/ n.n.: VDI Richtlinie 2243 Blatt 1 Konstruieren recyclinggerechter technischer Produkte; VDI-Gesellschaft Entwicklung Konstruktion Vertrieb, Oktober, 1993.
- /70/ n.n.: Automatische Schraubmontage (ICS Handbuch); Hans-Herbert Mönnig Verlag, Iserlohn, 1993.
- /71/ n.n.: Kolloquium zur Kreislaufwirtschaft des Sonderforschungsbereiches 281 "Demontagefabriken zur Rückgewinnung von Ressourcen in Produkt- und Materialkreisläufen; TU Berlin, Berlin, 1997.
- /72/ n.n.: Ohne Zuzahlung ist Shredderabfall nicht wirtschaftlich aufzubereiten; EUWID Nr. 8, 1998.
- /73/ n.n.: Fließbild der Elektronikschrottverwertung; ELPRO Elektronik Produkt GmbH; Braunschweig, 1994.
- /74/ n.n.: Selbständige Demontage mit fortschrittlicher Teileerkennung; Förderprojekt der EU: ESPRIT III Project 9052 ADAS - Informationsbroschüre der Hetzel Elektronik-Recycling GmbH, Nürnberg, 1996.
- /75/ n.n.: Eco Scan 1.0; Home Page: <http://www.luna.nl/turtlebay>, Turtle Bay, Amsterdam, 1996.
- /76/ n.n.: ECO-it, Eco Indicator Tool for environmentally friendly design; Web-Page: <http://www.pre.nl>, Amersfoort, 1997.
- /77/ n.n.: LASer 1.0, Life-cycle Assembly, Service and Recycling - User's Manual, Life-cycle Engineering Group at Stanford Engineering Manufacturing Modeling Laboratory Design Division; Mechanical Engineering Dept., Stanford University, Februar, 1994.
- /78/ n.n.: Electronics Industry Environmental Roadmap; MCC Technical Report MCC-ECESM-001-96, Microelectronics and Computer Technology Corporation, Februar, 1996.
- /79/ n.n.: Verwertung von Elektro- und Elektronikschrott in Bayern; Bayerisches Landesamt für Umweltschutz, Abteilung Abfallwirtschaft, München, 1996.
- /80/ n.n.: Recyclinggerechtes Design; General Electric Plastics GmbH, Rüsselsheim, 1995.
- /81/ n.n.: ReStar, Restar-Tutorial & Guide; Green Engineering Corp., Pittsburgh, 1994.

- /82/ n.n.: Arbeits- und Ergebnisbericht 1995-1997 des Sonderforschungsbereiches 281 "Demontagefabriken zur Rückgewinnung von Ressourcen in Produkt- und Materialkreisläufen; TU Berlin, Berlin, 1997.
- /83/ n.n.: Bosch Industriewerkzeuge, Schraubtechnik; Produktinformation, Bosch GmbH, Geschäftsbereich Elektrowerkzeuge, Murrhardt, 1997.
- /84/ n.n.: Preisspiegel für Altstoffe; Euwid Recycling und Entsorgung Jg.: 95, 96, 97, Europäischer Wirtschaftsdienst GmbH, Gernsbach
- /85/ n.n.: Computerschrott ist umweltfreundlich recyclebar; Norddeutsche Affinerie, Pressemitteilung, Hamburg, 1990.
- /86/ n.n.: Integration der Montage- und Demontageprozeßgestaltung in einem produktneutralen Ansatz; Bericht über den ersten Bearbeitungszeitraum an die DFG, Erlangen, München, Stuttgart, 1995.
- /87/ n.n.: DIN 8580 Trennen; Beuth Verlag GmbH, Berlin, Köln, 1986.
- /88/ n.n.: DIN 8593 Fügen; Beuth Verlag GmbH Berlin, Köln, 1986.
- /89/ n.n.: Erwartete Abfallmenge gebrauchter elektrischer und elektronischer Geräte; Zentraler Verband der deutschen Elektroindustrie (ZVEI), Frankfurt, 1992.
- /90/ n.n.: Offenlegungsschrift DE 19623228 A1. Meedt, O., Trennwerkzeug; Deutsches Patentamt, 1997.
- /91/ n.n.: Offenlegungsschrift DE 19640884 A1. Meedt, O., Demontage- bzw. Montagewerkzeug insbesondere für Schrauben; Deutsches Patentamt, 1997.
- /92/ n.n.: Patentschrift DE 19532462 C2. Meedt, O., Werkzeug, Deutsches Patentamt, 1997.
- /93/ n.n.: Offenlegungsschrift DE 19526631 A1. Meedt, O., Verwendung eines Werkzeug, Deutsches Patentamt, 1997.
- /94/ Navin- Chandra, D.: ReStar: A design tool for environmental recovery analysis; Proceedings of the International Conference on Engineering Design ICED 93, The Hague, Schriftenreihe WDK 22, Heurista Verlag, Zürich, 1993.
- /95/ Navin- Chandra, D.: An Overview of the Green Engineering Projekt; Carnegie Mellon University, Pittsburgh, 1993.

- /96/ Neumann, K.;  
Morlock, M.: Operations Research; Hanser Verlag, Wien, 1993.
- /97/ Pahl, G.;  
Beitz, W.: Konstruktionslehre; Springer Verlag, Berlin, Heidelberg  
New York, 1993.
- /98/ Pfeleiderer, I.;  
Volz, Th.;  
Eyerer, P.: EDV-gestützte Ganzheitliche Bilanzierung; Betriebliche  
Umweltinformationssysteme; Metropolis Verlag, Marburg,  
1995.
- /99/ Pausch, W.: Sondermüllentsorgung in Mittelfranken; Umweltschutz im  
Regierungsbezirk Mittelfranken, 1/95, St. Augustin, 1995.
- /100/ Queitsch, P.: Kreislaufwirtschafts- und Abfallrecht; Bundesanzeiger Ver-  
lagsgesellschaft, Köln, 1995.
- /101/ Reinhardt, G.;  
Friess, D.: Perspektiven automatisierter Demontagesysteme; ZWF  
Nr. 6, Carl Hanser Verlag, München, 1995.
- /102/ Rembold, U.: Einführung in die Informatik für Naturwissenschaftler und  
Ingenieure; Carl-Hanser Verlag, München, 1991.
- /103/ Renken, M.: Nutzung recyclingorientierter Bewertungskriterien  
während des Konstruierens; Dissertation, TU Braun-  
schweig, Braunschweig, 1996.
- /104/ Röhrs, G.;  
Kraus, W.: Recyclinggerechtes Konstruieren elektronischer und fein-  
werktechnischer Produkte; VDI Berichte Nr. 1254, VDI  
Verlag, Düsseldorf, 1995.
- /105/ Matek, W.;  
Muhs, D.;  
Wittel, H.: Roloff/Matek Maschinenelemente; Vieweg & Sohn Verlag,  
Braunschweig, Wiesbaden, 1987.
- /106/ Rothhaupt, A.: Modulares Planungssystem zur Optimierung der Elektro-  
nikfertigung; Dissertation Universität Erlangen-Nürnberg,  
Hanser Verlag, München, 1995.
- /107/ Rupprecht, R.: Automatisierte Altfahrzeugdemontage; Motek, Sinsheim,  
1996.
- /108/ Schaas, H.: Design of a Recyclable TV-Set; Proceedings 2nd CIRP  
Seminar on Life Cycle Engineering RECY '94, Erlangen,  
Meisenbach Verlag, Bamberg, 1994.
- /109/ Scheidt, L.G.: Starting a new Solution to Electronic Recycling; R'95 In-  
ternational congress Genf, Dübendorf, CH, 1995.

- /110/ Scheller, H.: Automatisierte Demontagesysteme und recyclinggerechte Produktgestaltung elektronischer Baugruppen; Dissertation Universität Erlangen-Nürnberg, Meisenbach Verlag, Bamberg, 1998.
- /111/ Scheller, H.: Vergleichende Betrachtung von Recyclinggrundkonzepten für Haushaltskältegeräte; Entsorgungspraxis 11/95, S. 23-29, 1995.
- /112/ Schiebisch, J.: Zum Recycling von Faserverbundkunststoffen mit Duroplastmatrix; Dissertation, FAU Erlangen-Nürnberg, Erlangen, 1996.
- /113/ Schmidt; et. al.: Altautoverwertung und -entsorgung; expert Verlag, Renningen, Malmshelm, 1995.
- /114/ Schmidt, M.: Stoffstromanalysen als Basis für ein Umweltmanagementsystem im produzierenden Gewerbe; Umweltinformationssysteme in der Produktion, Metropolis Verlag, Marburg, 1995.
- /115/ Scholz, W.: Modell zur datenbankgestützten Planung automatisierter Montageanlagen; Dissertation, Universität Erlangen-Nürnberg, Hanser Verlag, München, 1995.
- /116/ Schütte, G.: Leiterplattendemontage für verwertungsorientierte Recyclingkreisläufe; Dissertation TU Braunschweig, Fortschritt-Berichte VDI Reihe 8 Nr. 660, 1997.
- /117/ Schwegler, T.: Umweltfreundliche Gestaltung eines PC's; VDI Seminar Recyclingfähige elektronische Produkte, Erlangen, 1996.
- /118/ Seliger, G.; Hentschel, C.; Wagner M.: Disassembly Factories for Recovery of Resources in Product and Material Cycles; International conference on life-cycle modelling for innovative products and processes, PROLAMAT'95, Berlin, 1995.
- /119/ Seliger, G.; Wagner, M.: Demontagewerkzeuge schaffen Zeit- und Kostenvorteile; Der Betriebsleiter 10/95, Verlag für Technik und Wirtschaft, Mainz, 1995.
- /120/ Siegenthaler, C.P.; Linder, S.; Pagliari, F.: LCA Software Guide 1997: Market Overview - Software Portraits; Adliswil, CH: öbu, 1997.
- /121/ Simon M.: Objective Assessment of Design for Recycling; Proceedings of ICED '93, The Hague, 1993.

- /122/ Simon, M.;  
Fogg, B.;  
Chambellant, F.: Design for Cost-Effective Disassembly; International Forum on Design for Manufacture and Assembly, Newport, 1992.
- /123/ Spath, D.;  
Hartel, M.: Entwicklungsbegleitende Beurteilung der ökologischen Eignung technischer Produkte als Bestandteil des ganzheitlichen Gestaltens; Konstruktion 47/1995, S. 105-110, 1995.
- /124/ Spath, D.;  
Tritsch, C.: Information Management to Support Economical Disassembly of Technical Products; International conference on life-cycle modelling for innovative products and processes, PROLAMAT'95, Berlin, 1995.
- /125/ Steinhilper, R.;  
Hieber, M.;  
Friedel, A.: DFE of electronic products - an interdisciplinary approach; 3rd international seminar on life-cycle-engineering, ECO-Performance'96, Zürich, 1996.
- /126/ Steinhilper, R.;  
Hieber, M.: Umweltgerechte Produktgestaltung - Ecodesign; Motek 96, Sinsheim, 1996.
- /127/ Steinhilper, R.;  
Hieber, M.;  
v. d. Oesten-  
Sacken: Decicion Management Systems for Downcycling/Upcycling/Eco Design -interdisciplinary Experiences; 4th International Seminar on Life Cycle Engineering, Berlin, 1997.
- /128/ Tartler, D.: Analytisch-chemische Behandlung von elementreichen Verbundmaterialien und Möglichkeiten ihrer stofflichen Verwertung am Beispiel Elektronikschrott; Dissertation, FAU Erlangen, Institut für Anorganische und Analytische Chemie, Erlangen, 1995.
- /129/ Teller, M.: IDEE - Information system for recycling services for electronic products; proceedings of CARE INNOVATION, Frankfurt, 1996.
- /130/ Töpfer, P.: Elektronikschrottsorgung/Recycling; VDMA, Impulsstiftung, Frankfurt, 1993.
- /131/ Tritsch, C.: Flexible Demontage technischer Gebrauchsgüter; Dissertation, Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebstechnik, Universität Karlsruhe, Karlsruhe, 1996.
- /132/ Wagner, M.: Prozeßmodell für die Kraftübertragung durch neue Wirkflächen zur Entwicklung geometrietoleranter Demontagewerkzeuge; Dissertation, Fraunhofer Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik, Berlin, 1997.

- /133/ Wagner, M.;  
Seliger, G.: Modeling of Geometry-independent Endeffectors; 3rd international seminar on life-cycle-engineering, ECO-Performance'96, Zürich, 1996.
- /134/ Warnecke, H. J.;  
Kahmeyer, M.;  
Rupprecht, R.: Automotive Disassembly - a new Strategic and Technologic Approach; Recy '94, Meisenbach Verlag, Bamberg, 1994.
- /135/ Weber, J.: Konzept eines rechnergestützten Assistenzsystems für die Entwicklung umweltgerechter Produkte; Dissertation, Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Konstruktionstechnik, Erlangen, 1997.
- /136/ Weber, J.;  
Meedt, O.: Methodik der recyclinggerechten Produktgestaltung auf Basis des Recyclinggraphen; Proceedings of the ICED'95, S. 1073ff., Praha, Heurista-Verlag, Zürich, 1995.
- /137/ Weigl, A.: Exemplarische Untersuchungen zur flexiblen automatisierten Demontage elektronischer Geräte mit Industrierobotern; Dissertation TU Darmstadt, Shaker Verlag, Aachen, 1997.
- /138/ Weigl, A.;  
Tolle, H.: Demontage von Elektronikgeräten mit Industrierobotern; Spektrum der Wissenschaft 1/1998, 1998.
- /139/ Wolf, D. H.: Praxis des Elektronikschrottrecyclings; Tagungsband zu Kreislaufwirtschaftsgesetz: Entwicklung und Demontage recyclingfähiger Elektronikgeräte und Bauteile, VDI Bildungswerk, Erlangen, 1996.
- /140/ Zussman, E.;  
Kriwet, A.;  
Seliger, G.: Disassembly Oriented Assessment Methodology to Support Design for Recycling; Annals of the CIRP Vol. 43/1, Technische Rundschau, Hallwag Verlag, Bern, 1994.

# Anhang

<b>Anhang A</b>	<b>Beispiel eines Recyclingszenarios</b> .....	<b>162</b>
<b>Anhang B</b>	<b>Bewertung des Modellproduktes</b> .....	<b>164</b>
	B 1 Verbindungsbericht des CD-Players Grundig CD 8200 .....	164
	B 2 Bauteilbericht des CD-Players Grundig CD 8200 .....	167
	B 3 Bewertungsergebnisse von Unterbaugruppen .....	170

## Anhang A Beispiel eines Recyclingszenarios

Name der Outputfraktion	Erlöse [DM/kg]	Zul. Verschm.-grad [%]	Spezifizierte Materialien	Min. Anteil [%]	Max. Anteil [%]
Kupfer	3,40	2	Kupfer	98	100
Messing	1,20	2	Messing	98	100
Stahl/Eisen	0,04	2	Stahl	0	100
			Eisen	0	100
Alu Rein	1,70	0	Aluminium	0	100
ABS	0,70	20	ABS	80	100
PA	0,60	2	PA	98	100
NE-Metallmix	0,50	1	Zink	0	100
			Silber	0	100
			Aluminium	0	100
			Kupfer	0	100
			Messing	0	100
Metallmix	0,01	1	Zink	0	100
			Silber	0	100
			Aluminium	0	100
			Kupfer	0	100
			Messing	0	100
			Stahl	0	100
Aluminium+Anhaftungen	1,10	2	Aluminium	98	100
PC	0,85	1	PC	99	100
PVC	0,30	2	PVC	98	100
PP	0,25	2	PP	98	100
PS	0,15	2	PS	98	100
Kabel	0,70	0	PC	0	100
			PVC	0	40
			Kupfer	20	100
Kunststoffmix ohne PVC	-0,10	5	PC	0	100
			PVC	0	0
			ABS	0	100
			PA	0	100
			PP	0	100
			PS	0	100
Gummi	-0,20	2	Gummi	98	100
Kunststoffmix	-0,35	5	PC	0	100
			PP	0	100
			PS	0	100
			PVC	0	100
			PA	0	100
			ABS	0	100
Leiterplatten minderwertig	-0,85	20	Kupfer	0	100
			Elektr. Bauelemente	0	100
			FR4-Substrat	0	100
			Flammschutz (Halogen)	0	5

Name der Outputfraktion	Erlöse [DM/kg]	Zul. Verschm. -grad [%]	Spezifizierte Materialien	Min. Anteil [%]	Max. Anteil [%]
Leiterplatten hochwertig	1,50	10	Kupfer	20	100
			Elektr. Bauelemente	0	100
			FR4-Substrat	0	100
			Flammschutz (Halogen)	0	5
			Gold	1	100
Hausmülldeponie	-2,00	100			
Sondermüll	-4,00	100			

## Anhang B Bewertung des Modellproduktes

### B 1 Verbindungsbericht des CD-Players Grundig CD 8200

#### Verbindungsbericht zum Hauptgerät

Lf. Nr.	Name	Bezeichnung ReGrEd	Verbindungsart	Anzahl	De-monta-gezeit	verbundene Bauteile	vorher zu lösende Verb.
1	Deckelbefestigung	SR 105	schraub	7	42	1,2,5,6,12,5 2	*
4	Seitenteil	ST 108	steck	2	10	6,52	1
5	Kabelbaum an HP	ST 109	steck	1	8	7,11	1
9	HP-Befestigung	SR 113	schraub	5	30	11,12,13,52	5
11	Kühlelementbefestigung	SR 115	schraub	2	12	11,15,16	9
12	Filzfüse	KL 116	kleb	4	4	18,52	9,15,16,37, 96
13	Front lösen	SR 117	schraub	3	15	19,41,52	1
15	Kabelbaum an FP lösen	ST119	steck	1	2	10,27	13
16	Kabel 22 an FP lösen	ST 120	steck	1	2	22,27	13
35	Laufwerk entfernen	SR139	schraub	1	5	42,43,52,10 4	1
36	Verlängerung	SN 140	schnapp	1	5	44,47,52	35
37	Feder Laufwerk	ST 141	steck	1	4	45,46,52	35
38	Dämpfer	ST 142	steck	1	8	45,46	37
39	Platine Trafo	SR 143	schraub	2	10	47,48,52	36
40	Trafo entfernen	SR 144	schraub	4	24	49,50,52,10 8	5,39
41	Kabel 51 an Trafoplatine	LT 145	löt	1	5	47,51	39
42	Kabel 51 an Trafo	LT 146	löt	1	5	49,51	40
80	Kabel 22 an Kontakten, Motor	LT 184	löt	1	10	22,104	16,35
84	Kabel 22 an Grundträger	SN 188	schnapp	1	5	22,104	80
89	Klammer	ST 193	steck	1	2	11,15,17	11
90	Kabel 7 an Trafoplatine	ST 194	steck	1	5	7,47	39
91	Kabelbaum an LwPlatine	ST 195	steck	1	10	7,104	35
93	Aufkleber Boden	KL 197	kleb	3	3	52,105	9,15,16,37, 96
96	Kabel 220V-Anschluß	LT 206	löt	1	5	49,108	40
97	Stecker 220V-Anschluß	SW 207	schweis	1	5	108,109	96
98	Gummitülle	ST 208	steck	1	5	52,108,110	96

### Verbindungsbericht zur Frontbaugruppe

Lf. Nr.	Name	Bezeichnung ReGrEd	Verbindungsart	Anzahl	De-monta-gezeit	verbundene Bauteile	vorher zu lösende Verb.
17	E/A-Schalter	SN 121	schnapp	1	5	23,41	*
18	Druckfeder	ST 122	steck	1	1	24,41	17
19	Schraube Lichtl. & Platine	SR 123	schraub	1	5	25,26,29,41	23
20	Lichtleiter	SN 124	schnapp	1	5	25,41	19
21	Kabel 28 an Lichtleiter	LT 125	löt	1	5	28,29	20
22	Schrauben FP	SR 126	schraub	11	55	27,30,41	*
23	Kabel 28 an FP	LT 127	löt	1	5	27,28	22
24	Feder Frontklappe	EH 128	eingehängt	1	2	31,32	23
25	Feder Frontgrundträger	EH 129	eingehängt	1	2	31,41	24
26	Frontklappe	SN 130	schnapp	1	5	32,41	25
27	Bedienschalter	ST 131	steck	1	2	33,41	21,23
28	Display 35	KL 132	kleb	1	2	34,41	21,23,26,27
29	Taster 35	SW 133	schweiß	6	12	35,41	21,23,26,27

### Verbindungsbericht zum Laufwerk

Lf. Nr.	Name	Bezeichnung ReGrEd	Verbindungsart	Anzahl	De-monta-gezeit	verbundene Bauteile	vorher zu lösende Verb.
43	Platine LW	SR 147	schraub	4	24	53,54,75	*
44	Kabel 55 anLW	ST 148	steck	1	2	53,55	43
45	Kabel 55 an Laserplatine	ST 149	steck	1	2	55,56	43
46	Platine Laser	SR 150	schraub	2	12	56,59,75	45
47	Kabel 57 an Laserplatine	ST 151	steck	1	2	56,57,58	46
48	Kunststoffbrücke	ST 152	steck	1	2	60,75	46
49	Puffer	ST 153	steck	1	1	60,61	48
50	Metallbuchse	PR 154	preß	1	2	60,62	48
51	Andruckplatte	SN 155	schnapp	1	2	63,102	35
52	Aufkleber	KL 156	kleb	1	1	63,64	*
53	Druckfeder	ST 157	steck	1	2	65,102	51,54
54	Andruckring	SN 158	schnapp	1	2	63,66	51
55	Motorlagerplatte	SR 159	schraub	2	10	67,68,69,70,75	48
56	Platte 63 an Grundbauteil	SN 160	schnapp	1	5	63,104	*
57	Kabelklipp	SN 161	schnapp	1	4	71,102	54
58	Lasereinheit	ST 162	steck	1	5	72,73,75	55
59	Kabel 57 an Laser	LT 163	löt	1	5	57,72	58
60	Metallbügel Chassis	SR 164	schraub	1	5	73,74,75,104	46
61	Stahlkugel	ST 165	steck	1	1	75,76	58
62	Messingbuchse	PR 166	preß	1	2	75,77	58
63	CD-Motorgehäuse	PR 167	preß	1	3	75,78,79	60
64	Gummi	ST 168	steck	1	1	79,80	63
65	Bügelfeder	ST 169	steck	1	2	75,81	63

Lf. Nr.	Name	Bezeichnung ReGrEd	Verbindungsart	Anzahl	Demontagezeit	verbundene Bauteile	vorher zu lösende Verb.
66	Kunststoffring	ST 170	steck	1	1	75,82	63
67	Antriebsriemen	SP 171	spann	1	1	83,84,99	*
68	Sicherung Riemensch.	PR 172	preß	1	1	85,86	67
69	Riemenscheibe	ST 173	steck	1	1	84,86	68
70	Metallwelle	PR 174	preß	1	1	86,104	69
71	Bügel Schublade	SN 175	schnapp	1	1	87,88,104	69
72	Sicherung Schaltrad	PR 176	preß	1	1	89,90	69
73	Schaltrad	ST 177	steck	1	1	88,90	69,71,72
74	Metallwelle	PR 178	preß	1	1	90,104	73
75	Schublade	FH 179	Führung	1	5	91,104	71
76	Zahnrad	SN 180	schnapp	1	5	92,104	73
77	Federring	SN 181	schnapp	1	2	94,95	76
78	Ritzel	ST 182	steck	1	5	93,95	82
79	Schubladenkontakte (Schalter)	SR 183	schraub	2	10	96,97,104	*
81	Bügelfeder Motor	SN 185	schnapp	1	5	98,99,104	*
82	Motor	EL 186	ingelegt	1	5	99,104	81,83
85	Schubladenbügel	SN189	schnapp	1	5	100,101,104	73
86	Kunststoffbügel	EL 190	ingelegt	1	5	102,104	53,71,75,85
87	Metallinserts	PR 191	preß	1	10	103,104	46,48,55,58 60,62,63,65 66,71,75,85
88	Welle 3	ST 192	steck	1	5	95,104	75,76

### Verbindungsbericht zum Chassis

Lf. Nr.	Name	Bezeichnung ReGrEd	Verbindungsart	Anzahl	Demontagezeit	verbundene Bauteile	vorher zu lösende Verb.
43	Platine LW	SR 147	schraub	4	24	53,54,75	*
44	Kabel 55 anLW	ST 148	steck	1	2	53,55	43
45	Kabel 55 an Laserplatine	ST 149	steck	1	2	55,56	43
46	Platine Laser	SR 150	schraub	2	12	56,59,75	45
47	Kabel 57 an Laserplatine	ST 151	steck	1	2	56,57,58	46
48	Kunststoffbrücke	ST 152	steck	1	2	60,75	46
49	Puffer	ST 153	steck	1	1	60,61	48
50	Metallbuchse	PR 154	preß	1	2	60,62	48
55	Motorlagerplatte	SR 159	schraub	2	10	67,68,69,70,75	48
58	Lasereinheit	ST 162	steck	1	5	72,73,75	55
59	Kabel 57 an Laser	LT 163	löt	1	5	57,72	58
61	Stahlkugel	ST 165	steck	1	1	75,76	58
62	Messingbuchse	PR 166	preß	1	2	75,77	58
63	CD-Motorgehäuse	PR 167	preß	1	3	75,78,79	60
64	Gummi	ST 168	steck	1	1	79,80	63
65	Bügelfeder	ST 169	steck	1	2	75,81	63
66	Kunststoffring	ST 170	steck	1	1	75,82	63

## B 2 Bauteilbericht des CD-Players Grundig CD 8200

### Bauteilbericht zum Hauptgerät

Lf. Nr.	Name	Bezeichnung ReGrEd	Material	Gewicht [g]	Anzahl
1	Gehäuseoberteil	Deckel	Fe	920	1
2	Torx-Schrauben	Schr 2	Fe	4,7	7
5	Beilagscheibe	Scheibe	Fe	0,1	1
6	Seitenteil	Seite	PS	38	2
7	Kabelbaum	Kabelbau	Kabel	23,1	1
11	Hauptplatine	HP	Platine	208	1
12	Blechwinkel	Winkel12	Fe	1,7	1
13	Torx-Schraube	Schr 13	Fe	0,6	5
15	Kühlelement	Kuehl	Alu	104	1
16	Torx-Schraube	Schr 16	Fe	0,6	2
17	Metallklammer	Klammer	Fe	0,3	1
18	Filzfüße	Filzfuss	Filz	0,8	4
19	Torx-Schraube	Schr 19	Fe	0,6	3
21	Schraubenaufnahme	Aufnahme	ABS	0,7	1
22	Kabel Frontplatine-Schubladenmotor 5-pol. bunt	Kabel 22	Kabel	5	1
41	Front	Front	Front	279,7	1
42	Torx-Schraube	Schr 42	Fe	0,6	1
43	Beilagscheibe	Scheib43	Fe	2,8	1
44	Verlängerung Ein/Aus	Verlaeng	ABS	24,4	1
45	Feder Laufwerk	Feder 45	Stahl	0,5	4
46	Federdämpfer	Daempfer	Gummi	0,1	4
47	Platine Trafo	Trafo P	Platine	22	1
48	Torx-Schraube	Schr 48	Fe	0,6	2
49	Trafo	Trafo	Trafo	596	1
50	Torx-Schraube	Schr 50	Fe	0,6	4
51	Kabel Trafo-Platine Trafo	Kabel 51	Kabel	2	1
52	Gehäuse Boden	Boden	PS	550	1
104	Laufwerk	Laufwerk	Laufwerk	714,5	1
105	Aufkleber Boden	Aufkl105	Papier	1,5	3
108	Kabel 220V-Anschluß	Kabel108	Kabel	65	1
109	Stecker 220V-Anschluß	Stecker	Stecker	10	1
110	Gummitülle	Gummi110	Gummi	2	1

### Bauteilbericht zur Frontbaugruppe

Lf. Nr.	Name	Bezeichnung ReGrEd	Material	Gewicht [g]	Anzahl
21	Schraubenaufnahme	Aufnahme	ABS	0,7	1
23	Ein/Aus-Schalter	Schalter	ABS	2,5	1
24	Druckfeder	Feder 24	Stahl	0,1	1
25	Lichtleiter	Lichtlei	Lichtleiter	2,6	1
26	Torx-Schraube	Schr 26	Fe	0,6	1
27	Frontplatine	FP	Platine	72	1
28	Kabel FP-Platine Lichtleiter 2-pol. schwarz	Kabel 28	Kabel	1,5	1

Lf. Nr.	Name	Bezeichnung ReGrEd	Material	Gewicht [g]	Anzahl
29	Platine Lichtleiter	LIP	Platine	1,6	1
30	Torx-Schraube	Schr 30	Fe	0,6	11
31	Feder	Feder 31	Stahl	0,1	1
32	Frontklappe	Klappe	PC	14,9	1
33	Bedienschalter	Schalter	ABS/PA	7,5	1
34	Display	Display	PET/PC	2	1
35	Taster	Taster	PC	1,5	6
41	Front Grundplatte	FrontGP	PC	158	1

### Bauteilbericht zum Laufwerk

Lf. Nr.	Name	Bezeichnung ReGrEd	Material	Gewicht [g]	Anzahl
53	Platine Laufwerk	LwP	Platine	54	1
54	Torx-Schraube	Schr 54	Fe	0,6	4
55	Kabel LW,platine-Laserplatine 4-pol. grau	Kabel 55	Kabel	2,8	1
56	Platine Laser	LaP	Platine	17,9	1
57	Kabel Laser-Laserplatine	Kabel 57	Kabel	4	1
58	Stecker	Stecker	Stecker	2	1
59	Torx-Schrauben	Schr 59	Fe	0,8	2
60	Kunststoffbrücke	Brueck60	PC	6,5	1
61	Puffer	Puffer	Gummi	0,1	2
62	Metallbuchse	Buchse62	Fe	1	1
63	Andruckplatte Motor	Platte63	PC	33,8	1
64	Warnaufkleber Laser	Aufkl 64	Papier	0,5	1
65	Druckfeder	Feder 65	Stahl	1,4	1
66	Andruckring	Ring 66	PC	2,4	1
67	Motorlagerplatte	Platte 67	Fe	3	1
68	Torx-Schrauben	Schr 68	Fe	1,4	2
69	Federringe	Feder 69	Fe	0,1	2
70	Muttern	Mutter70	Fe	0,3	2
71	Kabelklipp	Klipp 71	PC	0,4	1
72	Lasereinheit	Laser	Laser	114	1
73	Lagerplatte	Platte73	Fe	1,5	1
74	Torx-Schraube	Schr 74	Fe	0,6	1
75	Chassis	Chassis	Quarz	148	1
76	Stahlkugel	Kugel 76	Stahl	0,4	2
77	Messingbuchse	Buchse77	Messing	3	1
78	CD Motorgehäuse	Gehaeu78	Fe	20	1
79	Unterteil	Untertei	Fe	12	1
80	Gummieinlage	Gummi 80	Gummi	2	1
81	Bügelfeder	Feder 81	Stahl	0,5	1
82	Kunststoffring	Ring 82	PC	0,5	1
83	Antriebsriemen	Riemen	Gummi	0,2	1
84	Riemenscheibe	Schei 84	POM/PTFE	3,6	1
85	Sicherung Riemenscheibe (Sprengring)	Sicher R	Fe	0,1	1
86	Metallwelle Riemenscheibe	Welle 1	Stahl	1	1
87	Bügel Schublade	Buegel87	Fe	4,9	1

Lf. Nr.	Name	Bezeichnung ReGrEd	Material	Gewicht [g]	Anzahl
88	Schaltrad	Zahn 88	POM/PTFE	8,8	1
89	Sicherung Schaltrad	Sicher89	Stahl	0,1	1
90	Metalwelle	Welle 2	Stahl	1	1
91	Schublade	Schublad	ABS	65	1
92	Zahnrad	Zahn 92	POM/PTFE	0,6	1
93	Ritzel	Zahn 93	POM/PTFE	1,2	1
94	Federring	Feder 94	Stahl	0,1	1
95	Metalwelle	Welle 3	Stahl	0,7	1
96	Schubladenkontakte (Schalter)	Kontakt	Schalter	2	2
97	Torx-Schrauben	Schr 97	Fe	0,5	2
98	Bügefeder Motor	Feder 98	Stahl	0,3	1
99	Motor	Motor 99	Motor	43	1
100	Schubladenbügel	Buege100	ABS	2	1
101	Feder	Feder101	Stahl	0,2	1
102	Kunststoffbügel	Buege102	ABS	1,3	1
103	Metallmutterninserts	Insert	Fe	10	2
104	Laufwerkgrundbauteil	LwGrund	ABS/WM	115	1

### Bauteilbericht zum Chassis

Lf. Nr.	Name	Bezeichnung ReGrEd	Material	Gewicht [g]	Anzahl
53	Platine Laufwerk	LwP	Platine	54	1
54	Torx-Schraube	Schr 54	Fe	0,6	4
55	Kabel LW.platine-Laserplatine 4-pol. grau	Kabel 55	Kabel	2,8	1
56	Platine Laser	LaP	Platine	17,9	1
57	Kabel Laser-Laserplatine	Kabel 57	Kabel	4	1
58	Stecker	Stecker	Stecker	2	1
59	Torx-Schrauben	Schr 59	Fe	0,8	2
60	Kunststoffbrücke	Brueck60	PC	6,5	1
61	Puffer	Puffer	Gummi	0,1	2
62	Metallbuchse	Buchse62	Fe	1	1
67	Motorlagerplatte	Platte 67	Fe	3	1
68	Torx-Schrauben	Schr 68	Fe	1,4	2
69	Federringe	Feder 69	Fe	0,1	2
70	Muttern	Mutter70	Fe	0,3	2
72	Lasereinheit	Laser	Laser	114	1
73	Lagerplatte	Platte73	Fe	1,5	1
75	Chassis	Chassis	Quarz	148	1
76	Stahlkugel	Kugel 76	Stahl	0,4	2
77	Messingbuchse	Buchse77	Messing	3	1
78	CD Motorgehäuse	Gehaeu78	Fe	20	1
79	Unterteil	Unterteil	Fe	12	1
80	Gummieinlage	Gummi 80	Gummi	2	1
81	Bügefeder	Feder 81	Stahl	0,5	1
82	Kunststoffring	Ring 82	PC	0,5	1

### B 3 Bewertungsergebnisse von Unterbaugruppen

#### Ergebnisse des Rechenlaufs beim Hauptgerät

Demontagekosten: 2,63 DM; Deckungsbeitrag: -6.31 DM

Bauteile/Bauteilverbünde	Outputfraktion	Gewicht [g]	Erlöse [DM]
Kuehl	Alu Rein	104,00	0,18
Aufkl 105, Seite, Filzfuss, Boden, Feder 45, Daempfer	PS	633,00	0,09
Kabel 108	Kabel	65,00	0,05
Kabel 22	Kabel	5,00	0,00
Verlaen	ABS	24,40	0,02
Aufnahme	ABS	0,70	0,00
Deckel	Stahl/Eisen	920,00	0,04
Schr 2	Stahl/Eisen	3,20	0,00
Scheib 43	Stahl/Eisen	2,80	0,00
Schr 13	Stahl/Eisen	2,40	0,00
Schr50	Stahl/Eisen	2,40	0,00
Winkel 12	Stahl/Eisen	1,70	0,00
Schr 19	Stahl/Eisen	1,20	0,00
Schr 16	Stahl/Eisen	1,20	0,00
Schr 48	Stahl/Eisen	1,20	0,00
Schr 42	Stahl/Eisen	0,60	0,00
Klammer	Stahl/Eisen	0,30	0,00
Scheibe	Stahl/Eisen	0,10	0,00
Gummi 110	Gummi	2,00	0,00
HP	Leiterplatten minderw.	208,00	-0,18
Kabel, TrafoP, Kabel51	Leiterplatten minderw.	29,00	-0,02
CD82front-gp	Further disassembly	292,50	-1.17
CD82lw-grund	Further disassembly	704,10	-1,49
Trafo	Hausmülldeponie	596,00	-1,19
Stecker 109	Hausmülldeponie	10,00	-0,02
Stecker 109	Hausmülldeponie	10,00	-0,02

#### Ergebnisse des Rechenlaufs bei der Baugruppe Front

Demontagekosten: 0,00 DM; Deckungsbeitrag: -1.17 DM

Bauteile/Bauteilverbünde	Outputfraktion	Gewicht [g]	Erlöse [DM]
Front GP, Klappe, Feder 31, Kabel 10, Kabel 9, Schr 30, Kabel 28, LIP, Schr 26, Lichtlei, E/A, Schalter, Feder 24, Schalter, Display, Taster < <, Taster >>, Taster 37, Taster 38, Taster 39, Taster 40, Front Platine, Kabel 22	Sondermüll	292,50	-1,17

### Ergebnisse des Rechenlaufs bei der Baugruppe Chassis

Demontagekosten: 0,70 DM; Deckungsbeitrag: -1,34 DM

Bauteile/Bauteilverbünde	Outputfraktion	Gewicht [g]	Erlöse [DM]
Gehaeuse 78	Stahl/Eisen	20,00	0,00
Unterteil	Stahl/Eisen	12,00	0,00
Schr 54	Stahl/Eisen	2,40	0,00
Schr 59	Stahl/Eisen	1,60	0,00
Gummi 80	Gummi	2,00	0,00
LwP, Kabel55	Leiterplatten minderw.	56,80	-0,05
LaP	Leiterplatten minderw.	17,90	-0,02
Ring82, Kugel 76, Puffer, Buchse 62, Brueck60, Feder 81, Feder 69, Schr 68, Mutter 70, Platte67, Kabel 57, Laser, Platte 73, Buchse 77, Chassis	Hausmülldeponie	286,20	-0,57
Stecker	Hausmülldeponie	2,00	0,00

### Ergebnisse des Rechenlaufs bei der Baugruppe Laufwerk

Demontagekosten: 0,33 DM; Deckungsbeitrag: -1.49 DM

Bauteile/Bauteilverbünde	Outputfraktion	Gewicht [g]	Erlöse [DM]
Kontakt, Buegel 87, Insert, Schr 97, Sicher R, Zahn 88, Sicher 89, Welle 2, Buege 100, Feder 101, Schei 84, Welle 1, Zahn 92, Feder 65, Klipp 71, Buegel 02, Zahn 93, Feder 94, Welle 3, Schublad, LwGrund	ABS	222,40	0,16
Ring 66, Platte 63	PC	36,70	0,03
Motor 99	Metallmix	43,00	0,00
Feder 98	Metallmix	0,30	0,00
Schr 74	Stahl/Eisen	0,60	0,00
Riemen	Gummi	0,20	0,00
Aufkl 64	Hausmülldeponie	0,50	0,00
CD82Chassis	Further disassembly	400,90	-1,34



## **Lebenslauf**

Otto Meedt

geboren am 29.07.1968 in Agnetheln (Rum)

verheiratet mit Susanne Meedt, 1 Kind

- |             |                                                                                                                                                                                        |
|-------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1974 - 1978 | Grundschule in Heltau                                                                                                                                                                  |
| 1978 - 1987 | Gymnasium, Abitur am Pirkheimer - Gymnasium Nürnberg                                                                                                                                   |
| 1988 - 1993 | Studium der Fertigungstechnik<br>an der Universität Erlangen-Nürnberg                                                                                                                  |
| 1994-1998   | Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für<br>Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik<br>an der Universität Erlangen-Nürnberg.<br>Leiter: Prof.- Dr.-Ing. K. Feldmann |
| seit 1998   | Oberingenieur der Gruppe: "Handhabungs- und<br>Montagetechnik" am gleichen Lehrstuhl                                                                                                   |



# Reihe Fertigungstechnik Erlangen

Band 1

Andreas Hemberger

**Innovationspotentiale in der rechnerintegrierten Produktion durch  
wissensbasierte Systeme**

208 Seiten, 107 Bilder. 1988. Kartoniert.

Band 2

Detlef Classe

**Beitrag zur Steigerung der Flexibilität automatisierter Montage-  
systeme durch Sensorintegration und erweiterte Steuerungskonzepte**

194 Seiten, 70 Bilder. 1988. Kartoniert.

Band 3

Friedrich-Wilhelm Nolting

**Projektiertung von Montagesystemen**

201 Seiten, 107 Bilder, 1 Tabelle. 1989.

Kartoniert.

Band 4

Karsten Schlüter

**Nutzungsgradsteigerung von Montagesystemen durch den Einsatz  
der Simulationstechnik**

177 Seiten, 97 Bilder. 1989. Kartoniert.

Band 5

Shir-Kuan Lin

**Aufbau von Modellen zur Lageregelung von Industrierobotern**

168 Seiten, 46 Bilder. 1989. Kartoniert.

Band 6

Rudolf Nuss

**Untersuchungen zur Bearbeitungsqualität im Fertigungssystem  
Laserstrahlschneiden**

206 Seiten, 115 Bilder, 6 Tabellen. 1989. Kartoniert.

Band 7

Wolfgang Scholz

**Modell zur datenbankgestützten Planung automatisierter  
Montageanlagen**

194 Seiten, 89 Bilder. 1989. Kartoniert.

Band 8

Hans-Jürgen Wißmeier

**Beitrag zur Beurteilung des Bruchverhaltens von Hartmetall-  
Fließpreßmatrizen**

179 Seiten, 99 Bilder, 9 Tabellen. 1989. Kartoniert.

Band 9

Rainer Eisele

**Konzeption und Wirtschaftlichkeit von Planungssystemen in der  
Produktion**

183 Seiten, 86 Bilder. 1990. Kartoniert.

Band 10

Rolf Pfeffer

**Technologisch orientierte Montageplanung am Beispiel der  
Schraubtechnik**

216 Seiten, 102 Bilder, 16 Tabellen. 1990. Kartoniert.

- Band 11  
Herbert Fischer  
**Verteilte Planungssysteme zur Flexibilitätssteigerung der rechnerintegrierten Teilefertigung**  
201 Seiten, 82 Bilder. 1990. Kartoniert.
- Band 12  
Gerhard Kleineidam  
**CAD/CAP: Rechnergestützte Montagefeinplanung**  
203 Seiten, 107 Bilder. 1990. Kartoniert.
- Band 13  
Frank Vollertsen  
**Pulvermetallurgische Verarbeitung eines übereutektoiden verschleißfesten Stahls**  
XIII + 217 Seiten, 67 Bilder, 34 Tabellen. 1990. Kartoniert.
- Band 14  
Stephan Biermann  
**Untersuchungen zur Anlagen- und Prozeßdiagnostik für das Schneiden mit CO<sub>2</sub>-Hochleistungslasern**  
VIII + 170 Seiten, 93 Bilder, 4 Tabellen. 1991. Kartoniert.
- Band 15  
Uwe Geißler  
**Material- und Datenfluß in einer flexiblen Blechbearbeitungszelle**  
124 Seiten, 41 Bilder, 7 Tabellen. 1991. Kartoniert.
- Band 16  
Frank Oswald Hake  
**Entwicklung eines rechnergestützten Diagnosesystems für automatisierte Montagezellen**  
XIV + 166 Seiten, 77 Bilder. 1991. Kartoniert.
- Band 17  
Herbert Reichel  
**Optimierung der Werkzeugbereitstellung durch rechnergestützte Arbeitsfolgenbestimmung**  
198 Seiten, 73 Bilder, 2 Tabellen. 1991. Kartoniert.
- Band 18  
Josef Scheller  
**Modellierung und Einsatz von Softwaresystemen für rechnergeführte Montagezellen**  
198 Seiten, 65 Bilder. 1991. Kartoniert.
- Band 19  
Arnold vom Ende  
**Untersuchungen zum Biegeumformen mit elastischer Matrice**  
166 Seiten, 55 Bilder, 13 Tabellen. 1991. Kartoniert.
- Band 20  
Joachim Schmid  
**Beitrag zum automatisierten Bearbeiten von Keramikguß mit Industrierobotern**  
XIV + 176 Seiten, 111 Bilder, 6 Tabellen. 1991. Kartoniert.
- Band 21  
Egon Sommer  
**Multiprozessorsteuerung für kooperierende Industrieroboter in Montagezellen**  
188 Seiten, 102 Bilder. 1991. Kartoniert.
- Band 22  
Georg Geyer  
**Entwicklung problemspezifischer Verfahrensketten in der Montage**  
192 Seiten, 112 Bilder. 1991. Kartoniert.

Band 23

Rainer Flohr

**Beitrag zur optimalen Verbindungstechnik in der Oberflächenmontage (SMT)**

186 Seiten, 79 Bilder. 1991. Kartoniert.

Band 24

Alfons Rief

**Untersuchungen zur Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden und -schweißen in der Rohkarosseriefertigung**

VI + 145 Seiten, 58 Bilder, 5 Tabellen. 1991. Kartoniert.

Band 25

Christoph Thim

**Rechnerunterstützte Optimierung von Materialflußstrukturen in der Elektronikmontage durch Simulation**

188 Seiten, 74 Bilder. 1992. Kartoniert.

Band 26

Roland Müller

**CO<sub>2</sub>-Laserstrahlschneiden von kurzglasverstärkten Verbundwerkstoffen**

141 Seiten, 107 Bilder, 4 Tabellen. 1992. Kartoniert.

Band 27

Günther Schäfer

**Integrierte Informationsverarbeitung bei der Montageplanung**

195 Seiten, 76 Bilder. 1992. Kartoniert.

Band 28

Martin Hoffmann

**Entwicklung einer CAD/CAM-Prozesskette für die Herstellung von Blechbiegeteilen**

149 Seiten, 89 Bilder. 1992. Kartoniert.

Band 29

Peter Hoffmann

**Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden und -schweißen : Prozeßführung und Systemtechnik in der 3D-Laserstrahlbearbeitung von Blechformteilen**

186 Seiten, 92 Bilder, 10 Tabellen. 1992. Kartoniert.

Band 30

Olaf Schrödel

**Flexible Werkstattsteuerung mit objektorientierten Softwarestrukturen**

180 Seiten, 84 Bilder. 1992. Kartoniert.

Band 31

Hubert Reinisch

**Planungs- und Steuerungswerkzeuge zur impliziten Geräteprogrammierung in Roboterzellen**

XI + 212 Seiten, 112 Bilder. 1992. Kartoniert.

Band 32

Brigitte Bärmreuther

**Ein Beitrag zur Bewertung des Kommunikationsverhaltens von Automatisierungsgeräten in flexiblen Produktionszellen**

XI + 179 Seiten, 71 Bilder. 1992. Kartoniert.

Band 33

Joachim Hutfless

**Laserstrahlregelung und Optikdiagnostik in der Strahlführung einer CO<sub>2</sub>-Hochleistungslaseranlage**

175 Seiten, 70 Bilder, 17 Tabellen. 1993. Kartoniert.

Band 34

Uwe Günzel

**Entwicklung und Einsatz eines Simulationsverfahrens für operative und strategische Probleme der Produktionsplanung und -steuerung**

XIV + 170 Seiten, 66 Bilder, 5 Tabellen. 1993. Kartoniert.

Band 35  
Bertram Ehmann  
**Operatives Fertigungscontrolling durch Optimierung auftragsbezogener Bearbeitungsabläufe in der Elektronikfertigung**  
XV + 167 Seiten, 114 Bilder. 1993. Kartonierte.

Band 36  
Harald Kolléra  
**Entwicklung eines benutzerorientierten Werkstattprogrammiersystems für das Laserstrahlschneiden**  
129 Seiten, 66 Bilder, 1 Tabelle. 1993. Kartonierte.

Band 37  
Stephanie Abels  
**Modellierung und Optimierung von Montageanlagen in einem integrierten Simulationssystem**  
188 Seiten, 88 Bilder. 1993. Kartonierte.

Band 38  
Robert Schmidt-Hebbel  
**Laserstrahlbohren durchflußbestimmender Durchgangslöcher**  
145 Seiten, 63 Bilder, 11 Tabellen. 1993. Kartonierte.

Band 39  
Norbert Lutz  
**Oberflächenfeinbearbeitung keramischer Werkstoffe mit XeCl-Excimerlaserstrahlung**  
187 Seiten, 98 Bilder, 29 Tabellen. 1994. Kartonierte.

Band 40  
Konrad Grampp  
**Rechnerunterstützung bei Test und Schulung an Steuerungssoftware von SMD-Bestücklinien**  
178 Seiten, 88 Bilder. 1995. Kartonierte.

Band 41  
Martin Koch  
**Wissensbasierte Unterstützung der Angebotsbearbeitung in der Investitionsgüterindustrie**  
169 Seiten, 68 Bilder. 1995. Kartonierte.

Band 42  
Armin Gropp  
**Anlagen- und Prozeßdiagnostik beim Schneiden mit einem gepulsten Nd:YAG-Laser**  
160 Seiten, 88 Bilder, 7 Tabellen. 1995. Kartonierte.

Band 43  
Werner Heckel  
**Optische 3D-Konturerfassung und on-line Biege winkelmessung mit dem Lichtschnittverfahren**  
149 Seiten, 43 Bilder, 11 Tabellen. 1995. Kartonierte.

Band 44  
Armin Rothhaupt  
**Modulares Planungssystem zur Optimierung der Elektronikfertigung**  
180 Seiten, 101 Bilder. 1995. Kartonierte.

Band 45  
Bernd Zöllner  
**Adaptive Diagnose in der Elektronikproduktion**  
195 Seiten, 74 Bilder, 3 Tabellen. 1995. Kartonierte.

Band 46  
Bodo Vormann  
**Beitrag zur automatisierten Handhabungsplanung  
komplexer Blechblegeteile**  
126 Seiten, 89 Bilder, 3 Tabellen. 1995. Kartonierte.

Band 47  
Peter Schnepf  
**Zielkostenorientierte Montageplanung**  
144 Seiten, 75 Bilder. 1995. Kartonierte.

Band 48  
Rainer Klotzbücher  
**Konzept zur rechnerintegrierten Materialversorgung  
in flexiblen Fertigungssystemen**  
156 Seiten, 62 Bilder. 1995. Kartonierte.

Band 49  
Wolfgang Greska  
**Wissensbasierte Analyse und Klassifizierung von Blechteilen**  
144 Seiten, 96 Bilder. 1995. Kartonierte.

Band 50  
Jörg Franke  
**Integrierte Entwicklung neuer Produkt- und Produktionstechnologien  
für räumliche spritzgegossene Schaltungsträger (3-D MID)**  
196 Seiten, 86 Bilder, 4 Tabellen. 1995. Kartonierte.

Band 51  
Franz- Josef Zeller  
**Sensorplanung und schnelle Sensorregelung für Industrieroboter**  
190 Seiten, 102 Bilder, 9 Tabellen. 1995. Kartonierte.

Band 52  
Michael Solvie  
**Zeitbehandlung und Multimedia-Unterstützung in Feldkommunikationssystemen**  
200 Seiten, 87 Bilder, 35 Tabellen. 1996. Kartonierte.

Band 53  
Robert Hopperdietzel  
**Reengineering in der Elektro- und Elektronikindustrie**  
180 Seiten, 109 Bilder, 1 Tabelle. 1996. Kartonierte.

Band 54  
Thomas Rebhan  
**Beitrag zur Mikromaterialbearbeitung mit Excimerlasern --  
Systemkomponenten und Verfahrensoptimierungen**  
148 Seiten, 61 Bilder, 10 Tabellen. 1996. Kartonierte.

Band 55  
Henning Hanebuth  
**Laserstrahlhartlöten mit Zweistrahltechnik**  
157 Seiten, 58 Bilder, 11 Tabellen. 1996. Kartonierte.

Band 56  
Uwe Schönherr  
**Steuerung und Sensordatenintegration für flexible Fertigungszellen  
mit kooperierenden Robotern**  
188 Seiten, 116 Bilder, 3 Tabellen. 1996. Kartonierte.

Band 57  
Stefan Holzer  
**Berührungslose Formgebung mit Laserstrahlung**  
162 Seiten, 69 Bilder, 11 Tabellen. 1996. Kartonierte.

Band 58  
Markus Schultz  
**Fertigungsqualität beim 3D-Laserstrahlschweißen von Blechformteilen**  
165 Seiten, 88 Bilder, 9 Tabellen. 1997. Kartonierte.

Band 59  
Thomas Krebs  
**Integration elektromechanischer CA-Anwendungen über einem STEP-Produktmodell**  
198 Seiten, 58 Bilder, 8 Tabellen. 1996. Kartoniert.

Band 60  
Jürgen Sturm  
**Prozeßintegrierte Qualitätssicherung  
in der Elektronikproduktion**  
167 Seiten, 112 Bilder, 5 Tabellen. 1997. Kartoniert.

Band 61  
Andreas Brand  
**Prozesse und Systeme zur Bestückung räumlicher  
elektronischer Baugruppen (3D--MID)**  
182 Seiten, 100 Bilder. 1997. Kartoniert

Band 62  
Michael Kauf  
**Regelung der Laserstrahlleistung und der Fokusparameter einer  
CO<sub>2</sub>--Hochleistungslaseranlage**  
140 Seiten, 70 Bilder, 5 Tabellen. 1997. Kartoniert

Band 63  
Peter Steinwasser  
**Modulares Informationsmanagement in der integrierten  
Produkt- und Prozeßplanung**  
190 Seiten, 87 Bilder. 1997. Kartoniert.

Band 64  
Georg Liedl  
**Integriertes Automatisierungskonzept für den flexiblen Materialfluß  
in der Elektronikproduktion**  
196 Seiten, 96 Bilder, 3 Tabellen. 1997. Kartoniert.

Band 65  
Andreas Otto  
**Transiente Prozesse beim Laserstrahlschweißen**  
132 Seiten, 62 Bilder, 1 Tabelle. 1997. Kartoniert

Band 66  
Wolfgang Blöchl  
**Erweiterte Informationsbereitstellung an offenen CNC--Steuerungen  
zur Prozeß-- und Programmoptimierung**  
168 Seiten, 96 Bilder. 1997. Kartoniert.

Band 67  
Klaus--Uwe Wolf  
**Verbesserte Prozeßführung und Prozeßplanung zur Leistungs- und  
Qualitätssteigerung beim Spulenwickeln.**  
186 Seiten, 125 Bilder. 1997. Kartoniert.

Band 68  
Frank Backes  
**Technologieorientierte Bahnplanung für die 3D--Laserstrahlbearbeitung**  
138 Seiten, 71 Bilder, 2 Tabellen. 1997. Kartoniert.

Band 69  
Jürgen Kraus  
**Laserstrahlumformen von Profilen**  
137 Seiten, 72 Bilder, 8 Tabellen. 1997. Kartoniert.

Band 70  
Norbert Neubauer  
**Adaptive Strahlführungen für CO<sub>2</sub>--Laseranlagen**  
120 Seiten, 50 Bilder, 3 Tabellen. 1997. Kartoniert.

- Band 71  
Michael Steber  
**Prozeßoptimierter Betrieb flexibler Schraubstationen  
in der automatisierten Montage**  
168 Seiten, 78 Bilder, 3 Tabellen. 1997. Kartoniert.
- Band 72  
Pfebstorf, Markus  
**Funktionale 3D--Oberflächenkenngrößen in der Umformtechnik**  
162 Seiten, 84 Bilder, 15 Tabellen. 1997. Kartoniert.
- Band 73  
Volker Franke  
**Integrierte Planung und Konstruktion von Werkzeugen  
für die Blegebearbeitung**  
143 Seiten, 81 Bilder. 1998. Kartoniert.
- Band 74  
Herbert Scheller  
**Automatisierte Demontagesysteme und recyclinggerechte  
Produktgestaltung elektronischer Baugruppen**  
184 Seiten, 104 Bilder, 17 Tabellen. 1998. Kartoniert.
- Band 75  
Arthur Meßner  
**Kaltmassivumformung metallischer Kleinstteile  
-- Werkstoffverhalten, Wirkflächenreibung, Prozeßauslegung --**  
164 Seiten, 92 Bilder, 14 Tabellen. 1998. Kartoniert.
- Band 76  
Matthias Glasmacher  
**Prozeß-- und Systemtechnik zum Laserstrahl--Mikroschweißen**  
184 Seiten, 104 Bilder, 12 Tabellen. 1998. Kartoniert.
- Band 77  
Michael Schwind  
**Zerstörungsfreie Ermittlung mechanischer Eigenschaften von  
Feinblechen mit dem Wirbelstromverfahren**  
124 Seiten, 68 Bilder, 8 Tabellen. 1998. Kartoniert.
- Band 78  
Manfred Gerhard  
**Qualitätssteigerung in der Elektronikproduktion durch Optimierung  
der Prozeßführung beim Löten komplexer Baugruppen**  
179 Seiten, 113 Bilder, 7 Tabellen. 1998. Kartoniert.
- Band 79  
Elke Rauh  
**Methodische Einbindung der Simulation in die betrieblichen Planungs-  
und Entscheidungsabläufe**  
192 Seiten, 114 Bilder, 4 Tabellen. 1998. Kartoniert.
- Band 80  
Nieder Korn Sorin  
**Meßeinrichtung zur Untersuchung der Wirkflächenreibung bei  
umformtechnischen Prozessen**  
99 Seiten, 46 Bilder, 6 Tabellen. 1998. Kartoniert.
- Band 81  
Stefan Schuberth  
**Regelung der Fokusslage beim Schweißen mit CO<sub>2</sub>-Hochleistungslasern  
unter Einsatz von adaptiven Optiken**  
140 Seiten, 64 Bilder, 3 Tabellen. 1998. Kartoniert.
- Band 82  
Armando Walter Colombo  
**Development and Implementation of Hierarchical Control Structures  
of Flexible Production System Using High-Level Petri Nets**  
216 Seiten, 86 Bilder. 1998. Kartoniert.

Band 83

Otto Meedt

**Effizienzsteigerung bei Demontage und Recycling durch flexible  
Demontagetechnologien und optimierte Produktgestaltung**

186 Seiten, 103 Bilder. 1998. Kartoniert.