

# **Datenbanken als Informationsträger von der Produktentstehung bis zur Demontageplanung**

Jürgen Hesselbach<sup>1</sup>, Christoph Herrmann<sup>1</sup> und  
Karsten von Westernhagen<sup>1</sup>

## **Abstract**

Waste management as well as the consumption of raw materials and energy dominate public discussions. Environment-protection and preservation of the resources became important tasks for the producing-industry because of the increasing waste, the deficiency of landfills or the declining of important resources.

At the design stage of products, new demands concerning recycling and disassembly have to be taken into consideration. Comprehensive tools are going to be developed to support such a recycling and disassembly friendly design. Performing recycling and disassembly is costly and inefficient these days because of lack of important information about the products. On account of these reasons, information originating in the design phase must be edited in such a way that they can be used at the end-of-life phase. In addition, information from the end-of-life phases of products must be made available for usage at the design stage in order to be able to estimate the effects of design decisions. For these reasons, the development of a data memory system usable for the complete product life cycle is necessary. This paper presents such a system based on databases. Specific algorithms allow the data preparation for the individual product life phases.

## **1 Ausgangssituation**

Betrachtet man den Lebenszyklus eines Produktes, so ergeben sich die Anforderungen an ein Produkt aus der Summe der Einzelanforderungen der einzelnen Lebenszyklusphasen. Während in der Vergangenheit häufig nur die Phasen Entwicklung, Herstellung, Distribution sowie Nutzung oder Service in die Betrachtung einbezogen wurden, formulieren sich die Anforderungen heute zunehmend aus der vollständigen Betrachtung der Produkte bis hin zu ihrem Lebensende. Dies bedeutet entsprechend die zusätzliche Berücksichtigung der End-of-Life Phasen Recycling und Demontage der Produkte sowie Redistribution und Entsorgung (Hesselbach et al. 1999).

---

<sup>1</sup> Technische Universität Braunschweig, Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik (IWF), Langer Kamp 19b, D-38106 Braunschweig, Tel.: 05 31 / 391 – 7601, Fax: 05 31 / 391 – 5842

Der Grad der Erfüllung der sich so ergebenden Anforderungen an ein Produkt wird im wesentlichen in der Konstruktionsphase festgelegt. Aufgrund der gestiegenen Komplexität der Produkte sowie der Forderung nach immer kürzeren Entwicklungszeiten kommt der Produktbeschreibung im Rahmen des Computer Aided Engineering (CAE) eine immer wichtigere Rolle zu. Neben der Verknüpfung mit Fertigungs- und Arbeitsplanung können so u.a. Werkzeuge zur Produktanalyse (z.B. FEM) und Produktoptimierung (z.B. Virtual Reality, Rapid Prototyping) sinnvoll eingesetzt werden. Basis für die Verknüpfung der verschiedenen Phasen des Produktlebenszyklus ist die Gewährleistung eines sicheren Informationsflusses. In der Vergangenheit sind hierfür geeignete rechnerunterstützte Informations- und Kommunikationssysteme entwickelt worden. Wesentliche Ziele der Hersteller oder Zulieferer waren hierbei u.a. die Verbesserung der Zuverlässigkeit und der Qualität bzw. das Vermeiden von Produktionsstörungen (Albers/Eckarth 1997, Ebach et al. 1996, Tönshoff/Zahn 1999).

Die Betrachtung des erweiterten Produktlebenszyklus in der Produktentwicklung unterscheidet sich jedoch wesentlich von der klassischen Sichtweise. Während zwischen Konstruktion und Fertigung aufgrund der direkten Auswirkung von Entscheidungen eine unmittelbare Verknüpfung existiert und eine Produktoptimierung durch einen iterativen Verbesserungsprozeß gekennzeichnet ist bzw. Entscheidungen in interdisziplinären Teams getroffen werden, ist die Einbindung der Anforderungen aus der Nachgebrauchsphase dadurch gekennzeichnet, daß zwischen der Konstruktionsentscheidung und der daraus resultierenden Auswirkung eine Zeitspanne von mehreren Jahren liegt. Treten z.B. Computer oder mobile Telefongeräte schon nach relativ kurzen Zeitspannen in die Nachgebrauchsphase, so können bei Geräten der „Braunen Ware“ wie z.B. Fernsehgeräten viele Jahre zwischen Konstruktion und End-of-Life Phase liegen. Ein iterativer Informationsaustausch zwischen den genannten Phasen im Produktlebenszyklus ist somit gar nicht bzw. nur eingeschränkt möglich. Andererseits bilden in der End-of-Life Phase Informationen über die anfallenden Geräte eine Voraussetzung für die Planung der Recycling- und Demontagemassnahmen. Liegen z.B. keine Informationen über wiederverwendbare Bauelemente vor, können entsprechende Entscheidungen hinsichtlich einer zerstörungsfreien Demontage nicht oder nur bedingt getroffen werden. Eine genaue Planung der Demontageabläufe und -prozesse für ein wirtschaftliches und hochwertiges Recycling wird ebenfalls durch fehlende Informationen über Baustruktur der Geräte oder eingesetzte Fügeverfahren erschwert.

Der Kenntnis über die einzelnen Produktlebensphasen sowie der gezielte Informationsaustausch zwischen den einzelnen Phasen des Produktlebens kommt somit eine entscheidende Bedeutung zu. Auf der einen Seite müssen die Informationen aus den Lebensphasen, insbesondere aus den Nachgebrauchsphasen, für eine Anwendbarkeit in der Konstruktion zur Verfügung gestellt werden, um Auswirkungen von Konstruktionsentscheidungen abschätzen zu können. Auf der anderen Seite müssen die in der Konstruktionsphase entstehenden Informationen so aufbereitet werden,

daß sie in der Nachgebrauchsphase genutzt werden können. Aufgrund der Komplexität der zu berücksichtigenden Ein- und Ausgangsgrößen bieten sich Datenbanken an. Geeignete rechnerunterstützte Verfahren können die für die jeweiligen Lebensphasen notwendigen Daten entsprechend aufbereiten.

## 2 Datenmodell für Konstruktion, Recycling und Demontage

Im folgenden Abschnitt werden die sowohl in der Konstruktionsphase als auch die in der Nachgebrauchsphase notwendigen Prozeßparameter und -kenngrößen dargestellt, um anschließend die Möglichkeiten einer zentralen Datenbank als Informationsspeicher aufzuzeigen.

Vor dem Hintergrund zu berücksichtigender Anforderungen aus der End-of-Life Phase von Produkten kommt der Bereitstellung geeigneter Hilfsmittel in der Konstruktionsphase, die die Auswirkungen eines Konstruktionsvorschlages hinsichtlich der Demontage- und Recyclinggerechtigkeit bewerten, eine besondere Bedeutung zu. Für die Nachgebrauchsphase ist die Bestimmung der zur dem Zeitpunkt des Produktrücklaufes optimalen Recyclingstrategie für die Produkte wesentlich. Für zu zerlegende Produkte ist im Rahmen der Demontageplanung eine genaue Kenntnis des Demontageaufwandes notwendig. Die Ermittlung der Prozeßkenngrößen Demontagezeit, -kosten, -tiefe und -reihenfolge kommt daher sowohl in der Produktentwicklung als auch in der Recycling- und Demontageplanung eine zentrale Bedeutung zu.

### 2.1 Prozeßkenngrößen für Konstruktion und Recyclingplanung

Ausgangspunkt für die Bewertung in der Produktentwicklung als auch für die Recycling- und Demontageplanung ist die Abbildung des Produktmodells sowie der beeinflussenden Umwelt in geeignete Datenbanken. Darauf basierend können die Prozeßparameter ermittelt werden. Abbildung 1 zeigt Prozeßmodule als Schnittpunkt für Konstruktion und Planung:

- *Demontagezeit*: Die Demontagezeit ist die Zeit, die zum Trennen der Verbindungen eines Produktes erforderlich ist. Sie beinhaltet die Zeit zum Lösen der Verbindungen, zur Handhabung der Werkzeuge sowie der Verbindungselemente und Bauteile.
- *Demontageskosten*: Die Demontageskosten ergeben sich aus der Verknüpfung der Demontagezeit mit einem Arbeitsstundensatz und den Kosten, die durch die Entsorgung nicht verwendbarer oder verwertbarer Bauteile entstehen.
- *Demontagetiefe*: Die Demontagetiefe beschreibt den Grad der Demontage. Bauteile, die einem gemeinsamen Recyclingweg zugeführt werden können, werden zu Segmenten zusammengefaßt. Kriterien für die Bestimmung der Demontage-

tiefe sind die Separierung von Gefahr- und Schadstoffen, die Berücksichtigung von Restriktionen hinsichtlich der Zugänglichkeit, die zerstörungsfreie Trennung verwendbarer Bauteile sowie die Entscheidung zwischen Demontageskosten und Materialerlösen.

- *Demontagereihenfolge*: Dieser Prozeßparameter beschreibt die möglichen Reihenfolgen für die Zerlegung von Geräten. Die Demontagereihenfolge ergibt sich aus der Vorrangmatrix, in der die Vor- und Nachzeitigkeitsverhältnisse der Demontage eingetragen sind. Durch Algorithmen kann aus der Vorrangmatrix der Zerlegereihenfolge-Graph abgeleitet werden. Dieser enthält sämtliche mögliche Zerlegereihenfolgen des betrachteten Produktes.

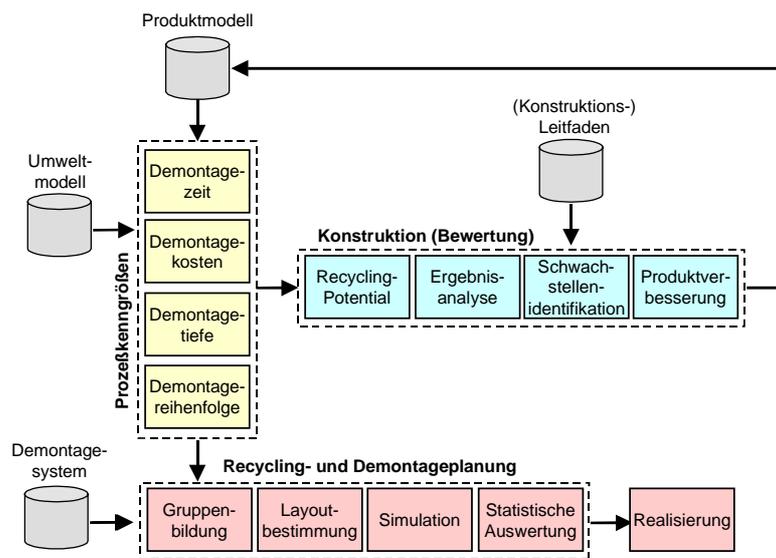


Abbildung 1  
Prozeßmodule für Konstruktion und Recyclingplanung

In der Konstruktionsphase beschreiben die Prozeßkenngrößen gemeinsam mit einer multikriteriellen Produktbewertung (Recycling-Potential) die Recyclingorientierung des Produktentwurfs. Auf Basis dieser Ergebnisse können Schwachstellen identifiziert und gezielt verbessert werden. In der End-of-Life Phase der Produkte kann ebenfalls aufbauend auf diesen Prozeßkenngrößen der aktuelle Recyclingpfad der Produkte ermittelt werden, wonach sich Schritte zur Planung der Demontage anschließen. Hierzu gehören Methoden zur Gruppenbildung, um recycling-ähnliche Produkte zusammenzufassen, und Verfahren zur Layoutermittlung des Demontagesystems mit nachgeschalteter Simulation.

## 2.2 Datenbanken als Informationsträger

Für die Bereitstellung der relevanten Informationen wurde das in Abbildung 2 dargestellte Modell einer Datenbank für die Nutzung in den entsprechenden Phasen eines Produktlebenszyklus entwickelt. Das Datenmodell gliedert sich in insgesamt sechs Partialmodelle. Abbildung 2 zeigt für jedes Partialmodell einige wesentliche Dateninhalte.

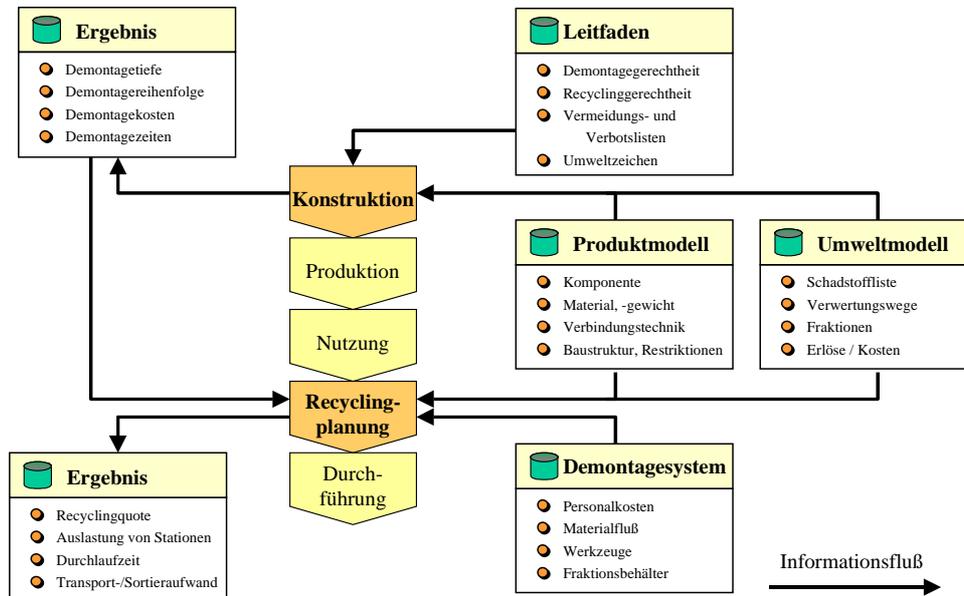


Abbildung 2  
Datenbanken als Informationsträger

Das Produktmodell enthält auf der einen Seite die erforderlichen bauteilspezifischen Informationen wie Bauteilbezeichnungen, Gewichte, Materialangaben, Geometrien und Abmaße. Auf der anderen Seite werden verbindungsspezifische Daten wie Verbindungspartner, die eingesetzte Verbindungstechnik und geeignete Demontagewerkzeuge abgebildet. Darüber hinaus werden die Vorrangbeziehungen in Form von Restriktionen im Produktmodell abgelegt. Die Beschreibung der Umwelt enthält Informationen über Fraktionen und deren Verwertungswege, deren Zusammensetzung und die erzielbaren Erlöse sowie Kosten für Entsorgung. Zusätzlich werden Informationen über Gefahr- und Schadstoffe abgebildet.

Spezifische Datenbanken enthalten darüber hinaus nur für eine der Phasen relevante Informationen. Die Datenbank (Konstruktions-)Leitfaden enthält Gestaltungsrichtlinien zur Vermeidung und Verbesserung von Schwachstellen hinsichtlich der

Demontage- und Recyclinggerechtigkeit. Darüber hinaus sind Vermeidungs- und Verbotslisten hinsichtlich Gefahr- und Schadstoffen sowie Anforderungen von Umweltzeichen abgebildet. Die Datenbank Demontagesystem enthält für die Planung wesentliche Informationen. Hierzu gehören neben Daten zu Personalstundensätzen Angaben zur Organisation des Materialflusses oder zu vorhandenen Betriebsmitteln.

Für die Phasen Konstruktion (Bewertung) und Recyclingplanung liegen zusätzlich Datenbanken zum Ablegen der Ergebnisse vor. Die beschriebenen Datenbanken bilden die Voraussetzung für die Bestimmung der Prozeßkenngrößen in der Demontage. Dabei muß jedoch berücksichtigt werden, daß hinsichtlich der Verwendung der Daten wesentliche Unterschiede bestehen, die bei der Entwicklung einer entsprechenden Bewertungsmethodik berücksichtigt werden müssen. Die Unterschiede beziehen sich dabei auf:

- die Systemgrenze des Datenmodells,
- die Interpretation der Informationen,
- die Veränderbarkeit sowie
- die Aktualität bzw. Genauigkeit der Daten.

Die Auswirkung einer veränderten Systemgrenze zeigt sich darin, daß für die Demontageplanung im Gegensatz zur demontage- und recyclinggerechten Produktentwicklung die Randbedingungen des Unternehmens abgebildet werden müssen. Demgegenüber steht in der Produktentwicklung aufgrund der Zielsetzung der Produktoptimierung die Notwendigkeit, Informationen zur Produktverbesserung und Fehlervermeidung zur Verfügung zu stellen.

Auch unter der Verwendung eines gemeinsamen Produktmodells für die Produktentwicklung und die Planung ergeben sich Unterschiede in der Interpretation der Daten. Ein Beispiel hierfür ist die Kennzeichnung von Kunststoffteilen. In der Produktentwicklung läßt sich die optimale Demontagetiefe aufgrund der Materialinformationen der Bauteile bestimmen. Die Information über die Kunststoffkennzeichnung kann hier als Einflußgröße für die Produktbewertung zur Schwachstellenanalyse herangezogen werden. Eine fehlende Kunststoffkennzeichnung kann jedoch für die Demontagedurchführung bedeuten, daß das entsprechende Material nicht identifiziert werden kann: Dies entspricht in der Bestimmung der Demontagetiefe dem Fehlen der Materialinformation, so daß eine mögliche Verwertung des Materials ausscheidet.

Die Wahl des Demontagewerkzeuges beeinflusst wesentlich die Höhe der Demontagezeit. In der Produktentwicklung besteht die Möglichkeit, aus den in der Datenbank hinterlegten Werkzeugen ein optimales auszuwählen. So können z.B. anstelle manueller Schraubwerkzeuge solche mit elektrischen oder pneumatischen Antrieb verwendet werden. In der Demontageplanung dagegen beschränkt sich die Werkzeugwahl auf die im Betrieb vorhandenen, wodurch nicht immer eine optimale Lösung realisierbar ist.

Ein weiterer wesentlicher Unterschied zur demontage- und recyclinggerechten Produktentwicklung ist die Aktualität bzw. Genauigkeit der Daten. Dies gilt insbesondere für die zu Grunde gelegten Informationen des Fraktionsmodells. Sowohl die Materialzusammensetzung einer Fraktion als auch insbesondere der erzielbare Erlös kann in der Produktentwicklung entweder aufgrund der aktuellen Daten des Sekundärrohstoffmarktes oder aber auf einer entsprechenden Prognose der Daten bzw. auf der Basis von Erwartungswerten bestimmt werden. In allen Fällen ergibt sich eine gewisse Ungenauigkeit bzw. Unschärfe in den Bewertungsergebnissen, die es zu berücksichtigen und zu interpretieren gilt. In der Demontageplanung ergeben sich die Daten unmittelbar aus der aktuellen Erlössituation auf dem Sekundärrohstoffmarkt.

In den folgenden Abschnitten sollen wesentliche Aspekte zur Bewertung der Demontage- und Recyclinggerechtigkeit sowie zur Planung von Recyclingmaßnahmen und Demontageschritten auf Basis gemeinsamer Datenbanken dargestellt werden.

### **3 Demontage- und recyclinggerechte Produktgestaltung**

Durch die Berücksichtigung von Anforderungen aus den End-of-Life Phasen in der Produktentwicklung ergibt sich auf der einen Seite eine positive Wirkung auf das Image des Unternehmens, auf der anderen Seite werden frühzeitig Maßnahmen eingeleitet, die einer sich ändernden Gesetzeslage Rechnung tragen. Darüber hinaus können sich neben ökologischen auch ökonomische Vorteile für ein Unternehmen ergeben.

Zur Unterstützung der Produktentwicklung dienen, neben Checklisten sowie Vermeidungs- und Verbotslisten für Gefahr- und Schadstoffe, vor allem rechnerunterstützte Bewertungsverfahren. Zielsetzung ist es, den Konstrukteur dabei zu unterstützen, die Auswirkungen seines Produktentwurfs hinsichtlich der Demontage- und Recyclinggerechtigkeit abzuschätzen und zu bewerten. Es sollen Verbesserungspotentiale erkannt sowie Maßnahmen zur Produktverbesserung eingeleitet werden (Hesselbach/Kühn 1998).

Bei der Bewertung von Produkten wird grundsätzlich zwischen produkt- und prozeßbasierenden Ansätzen unterschieden. In der Prozeßbewertung werden die bereits vorgestellten Prozeßkenngrößen ermittelt. Diese können unmittelbar als Maß für die Demontage- und Recyclingorientierung eines Produktes gesehen werden. Die Produktbewertung dagegen beruht auf der Betrachtung demontage- und recyclingrelevanter Produkteigenschaften. Hierzu werden in einem ersten Schritt problembezogene Kennzahlen ermittelt, die die Demontage- oder Recyclingorientierung bezüglich eines bestimmten Aspektes beschreiben. In einem zweiten Schritt erfolgt die eigentliche Bewertung. Hierzu werden über Bewertungsfunktionen mittels der Kennwerte Kriterienwerte bestimmt. Diese stellen das eigentliche Bewertungsergebnis dar.

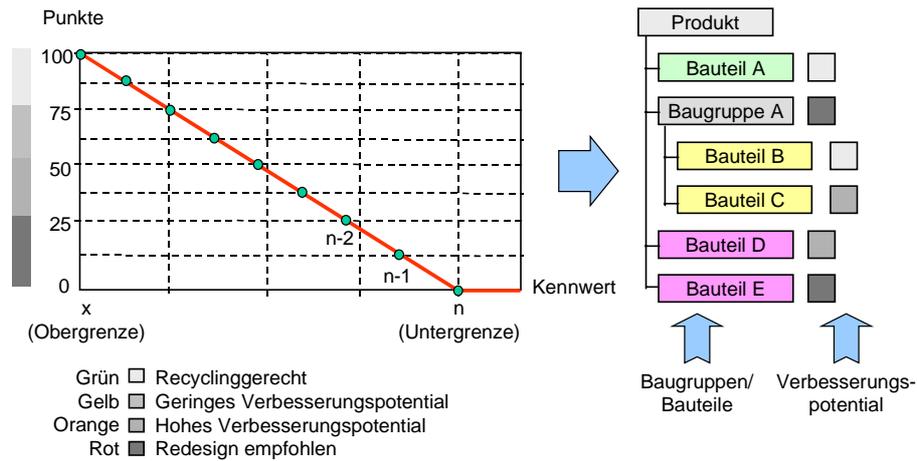


Abbildung 3  
Bewertungsfunktion zur Ermittlung des Verbesserungspotentials

Bezüglich der Demontagegerechtigkeit z.B. läßt sich die Forderung formulieren, die Anzahl der verschiedenen Materialien auf ein Minimum zu reduzieren. Hierdurch ergibt sich auf der einen Seite eine grundsätzliche Vereinfachung der Demontage, auf der anderen Seite kann der Trennaufwand in einem späterem Recycling verringert werden. Als Kennwert kann daher direkt die Anzahl der verwendeten Materialien herangezogen werden. Über eine Bewertungsfunktion kann der Kriterienwert ermittelt werden. Die Bestimmung des Funktionsverlaufs sowie der Ober- und Untergrenzen stellt den eigentlichen Bewertungsschritt dar (Abbildung 3).

Neben dem Kriterium „Vielfalt der Materialien“ lassen sich für die Bewertung der Demontage- und Recyclinggerechtigkeit eine Vielzahl weiterer Kriterien formulieren, wie z.B. die Kennzeichnung von Kunststoffen, die Verträglichkeit von Kunststoffen, die Demontagerichtung, die Zugänglichkeit, die Handhabbarkeit oder die Anzahl der erforderlichen Demontagewerkzeuge. Für jedes Kriterium kann nach dem oben beschriebenen Vorgehen ein Kriterienwert berechnet und als Bewertungsergebnis dargestellt werden.

Ausgehend von den Bewertungsergebnissen stellt sich in der Produktentwicklung die Aufgabe, Verbesserungspotentiale zu identifizieren sowie geeignete Verbesserungsmaßnahmen einzuleiten. Da bei dem oben beschriebenen Vorgehen die formulierten Kriterien Produkteigenschaften in einem aggregierten Zustand bewerten, ergibt sich die Schwierigkeit, Verbesserungspotentiale unmittelbar auf Basis der Bewertungsergebnisse zu erkennen (Hesselbach et al. 1997).

### 3.1 Identifikation von Verbesserungspotentialen

Um die Identifikation von Verbesserungspotentialen zu unterstützen, ist es notwendig, die Bewertungsergebnisse so auf die Produkteigenschaften zu beziehen, daß der Beitrag zum Bewertungsergebnis erkannt werden kann. Am Beispiel des Kriteriums „Vielfalt verwendeter Materialien“ soll das Vorgehen beschrieben werden. Für jedes Material wird zunächst das Gesamtgewicht im Produkt bestimmt und entsprechend eine Reihenfolge der Materialien gebildet. Basierend auf der beschriebenen Bewertungsfunktion wird die so ermittelte Reihenfolge in den Funktionsverlauf eingeordnet und ein Kriterienwert für die verwendeten Materialien bestimmt (Abbildung 3).

Zur Ableitung eines Verbesserungspotentials wird die Werteskala in vier Bereiche unterteilt. Für jedes Bauteil des Produktmodells wird im nächsten Schritt auf Basis der Punktwerte für die eingesetzten Materialien das Verbesserungspotential bestimmt und über einen Farbcode angezeigt.

### 3.2 Einleitung von Verbesserungsmaßnahmen

Nach der Identifikation einer Schwachstelle sind Maßnahmen zur Produktverbesserung einzuleiten. Der integrierte Konstruktionsleitfaden liefert hierfür Lösungsansätze und Anregungen zur Vermeidung und Verbesserung von Schwachstellen hinsichtlich der Demontage- und Recyclinggerechtigkeit (Abbildung 4).

Die Module zur Ergebnisanalyse sind so aufgebaut, daß der Leitfaden für jedes Bauteil bzw. jede Schwachstelle direkt aufgerufen werden kann. Nach Identifikation einer Schwachstelle und Aufruf des Konstruktionsleitfadens wird eine das Problemfeld beschreibende Schlüsselwortliste generiert. Diese Liste setzt sich zum einen aus produktunabhängigen Wörtern zusammen, die jedoch für das jeweilige Analysemodul bzw. das jeweilige Kriterium spezifisch sind, zum anderen aus Wörtern, die sich direkt aus der identifizierten Schwachstelle ergeben. Hierfür wird das Produktmodell herangezogen.

Nach der Generierung der Schlüsselwortliste wird eine Suchroutine gestartet und die Datenbank des Konstruktionsleitfadens durchsucht. Die gefundenen Konstruktionsrichtlinien werden, geordnet nach dem Grad der Übereinstimmung, angezeigt. Nach Durchführung oder Einleitung einer Verbesserungsmaßnahme kann das Produktmodell angepaßt und die Bewertung neu durchlaufen werden.

Das vorgestellte Bewertungsverfahren wurde in die Software ATROiD (Assessment Tool for **R**ecycling **O**riented **D**esign) umgesetzt. Die Software gliedert sich in die Ebenen Bewertung, Analyse und Verbesserung. Die Bewertungsebene umfaßt Module zur Bestimmung der Prozeßkenngrößen sowie eine multikriterielle Produktbewertung zur Bestimmung des Recycling-Potentials. In der Analyseebene werden Verbesserungspotentiale angezeigt, der in die Software integrierte Konstruktionsleitfaden liefert Ansätze zur Produktverbesserung.

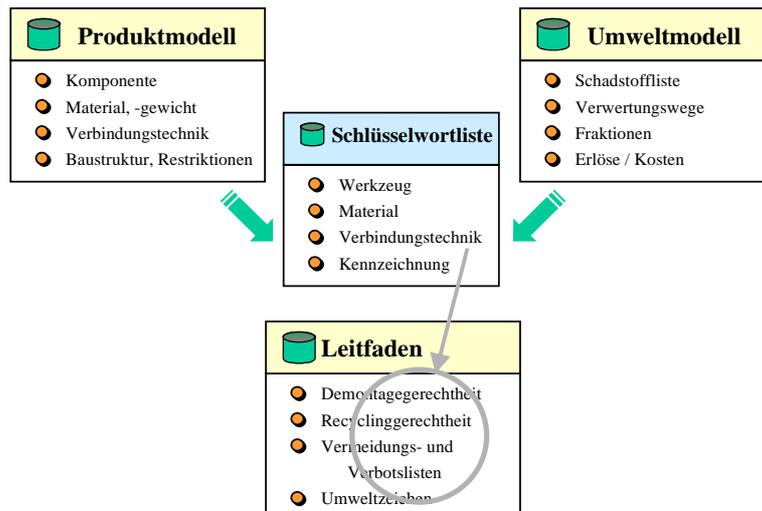


Abbildung 4  
Verknüpfung mit dem Konstruktionsleitfaden

#### 4 Planung der Demontage

Das in Recyclingbetrieben anfallende Gerätespektrum ist gekennzeichnet durch eine große Vielfalt unterschiedlichster Gerätefunktionen, Hersteller und Baujahre, wodurch die Losgrößen häufig bei Eins liegen. In dieser End-of-Life Phase ist die Abschätzung des Demontage-/Recyclingaufwandes der Produkte sowie die Planung der erforderlichen Maßnahmen eine zentrale Tätigkeit. Hier muß für jedes Produkt der unter den aktuellen Randbedingungen optimale Recyclingpfad ermittelt werden. Für zu demontierende Produkte müssen die Demontageabläufe und -prozesse geplant sowie die Auslegung des Demontagesystems bestimmt werden.

Zur Zeit fehlen in den Recyclingbetrieben in der Regel detaillierte Informationen über die Produkte. Zum einen sind Hersteller wenig daran interessiert, diesen Betrieben ihr Know-how aus der Konstruktion zur Verfügung zu stellen. Zum anderen erweist sich die bereits erwähnte Zeitspanne zwischen den Phasen Produktentstehung und Recycling als Hinderungsgrund. Dem Recyclingbetrieb bietet sich somit nur die Möglichkeit, über sog. Musterzerlegungen die fehlenden Produktinformationen zu erhalten. Unter den gegenwärtigen Randbedingungen eines stark heterogenen Produktspektrums ist dieser Weg zeit- und kostenintensiv.

Aus diesen Gründen erfolgt in den meisten Recyclingbetrieben eine manuelle Demontage der Produkte an Einzelarbeitsplätzen, wobei auf Musterzerlegungen häu-

fig verzichtet wird. Automatisierte Lösungen sind nicht nennenswert verfügbar. Rationalisierungspotentiale, etwa durch Ausschöpfung von Lerneffekten bei strukturierter Zerlegung, werden kaum erschlossen. Durch ungünstige und nicht auf das aktuelle Gerätespektrum angepaßte Layouts gestaltet sich der innerbetriebliche Materialfluß zudem aufwendig.

Ziel ist es daher, durch eine auf die Demontagecharakteristiken der Altgeräte und die lokalen Randbedingungen des Demontage- bzw. Zerlegebetriebes abgestimmte Planung der Demontageabläufe und -prozesse diese effizienter und damit kostengünstiger zu machen. Aufgrund veränderter Verwertungs- oder Verwendungsmöglichkeiten oder anderer Kosten-/Erlösstrukturen ist die zu diesem Zeitpunkt optimale Demontagetiefe und -reihenfolge nicht zwangsweise identisch der in der Konstruktionsphase bestimmten. Am Beispiel der Prozeßkenngröße Demontagerihenfolge soll die Bedeutung einer durchgängig nutzbaren Datenbank gezeigt werden

#### 4.1 Organisationsformen für die Demontage

Die vorherrschende Organisationsform in der Demontage ist mit einem Anteil von über 66% die manuelle Demontage an Einzelarbeitsplätzen (Hesselbach et al. 1999). Gekennzeichnet ist diese Organisationsform durch unbewegte Demontageobjekte sowie unbewegte Arbeitsplätze. Die Arbeitsplätze bzw. Stationen bilden den Grundbestandteil eines Demontagesystems. Diese sind entsprechend den zu bearbeitenden Produkten mit den nötigen Betriebsmitteln (Werkzeuge, Fraktionsbehälter, Energiezuführung, ...) auszustatten.

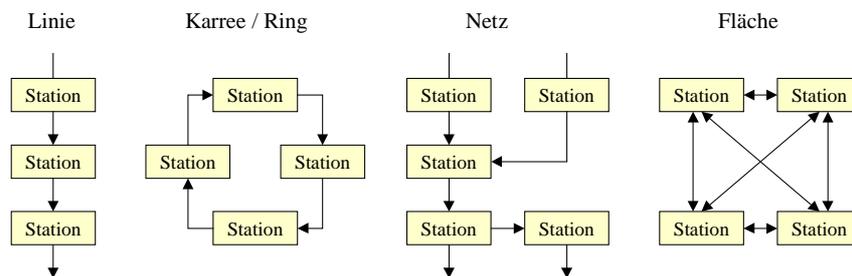


Abbildung 5  
Fließstrukturen in der Demontage

In einem gerade beendeten Forschungsprojekt konnten die prinzipiellen Vorteile einer Demontage mit Arbeitsteilung bei komplexen, homogenen Produkten festgestellt werden (Hesselbach/Westernhagen 1999). Diese kann in Form von Fließstrukturen realisiert werden. Wichtige, aus der Montage bekannte Fließstrukturen sind die in

Abbildung 5 dargestellten Varianten Linie, Karree, Netz und Fläche. Hiervon sind für die Demontage am ehesten die beiden erstgenannten geeignet, da der Steuerungsaufwand für Netz- oder Flächenstrukturen zu hoch ist. Der Unterschied zwischen Karree- und Linienstruktur liegt in der Möglichkeit eines Mehrfachumlaufes, d.h. Produkte können die einzelnen Stationen mehr als einmal anfahren.

Die Einzelplatzdemontage eignet sich dagegen bei relativ heterogenen, einfach aufgebauten Geräten mit relativ wenig verschiedenen Fraktionen.

Mit Hilfe von Simulationsstudien konnten für die Demontage von Monitoren, die durch ähnliche Demontageprofile gekennzeichnet sind, Konzepte für eine Liniendemontage mit drei verketteten Arbeitsplätzen entwickelt werden. Problematisch bei Demontagelinien ist die Abhängigkeit von den Demontagereihenfolgen der Geräte. Nur bei homogenen Gerätespektren mit ähnlichen Arbeitsumfängen kann eine deutliche Reduzierung des Fraktionsaufkommens und eine Vereinheitlichung der Demontageverrichtungen pro Station realisiert werden.

Die Festlegung der Demontagereihenfolgen kommt der Erstellung der Arbeitspläne in der Arbeitsvorbereitung gleich. Anders als in der Montage sind viele Varianten von Demontage-Arbeitsplänen für die Produkte denkbar, da die Vorrang-Restriktionen weniger vielfältig als in der Montage sind. Für die Systemauslegung bei Fließstrukturen sind die Festlegung des Arbeitsumfanges und die Ermittlung der Arbeitspläne pro Station wichtige Planungsaufgaben. Wesentliche Ziele sind die Reduzierung des Fraktionsaufkommens und eine Minimierung der benötigten Werkzeuge an den Stationen. Hierdurch sollen Transport- und Sortierzeiten verringert sowie die vorhandenen Betriebsmittel besser ausgelastet und häufige Werkzeugwechsel bzw. Umrüstvorgänge vermieden werden. Zusätzlich muß eine gleichmäßige Auslastung der beteiligten Stationen gewährleistet sein.

Für die parallele Berücksichtigung verschiedener Demontagereihenfolgen bei der Bestimmung der Arbeitsumfänge für eine vorgegebene Anzahl von verketteten Arbeitsplätzen wurde eine Entscheidungslogik entwickelt. Im folgenden Abschnitt wird diese Methodik am Beispiel einer Demontagelinie mit zwei verketteten Stationen erläutert.

## 4.2 Entscheidungslogik zur Bestimmung des Demontageumfanges

Bei der Bestimmung der Demontageumfänge kann es zu ungleichmäßigen Auslastungen der Stationen kommen, da als Basis die Zeiteinheit eines vollständigen Zerlegeschrittes angenommen werden muß. Um in einer Linienstruktur Engpässe zu vermeiden, ist eine möglichst gleichmäßige Auslastung jeder Station anzustreben. Gleichmäßig bedeutet, daß die tatsächliche Demontagezeit möglichst nahe am Idealwert liegt. Der Idealwert ist die Zeit, die einem Arbeitssystem bei gleichmäßiger Auslastung zukommt. Dieser Zeitanteil wird *Zeitfenster* genannt. Das Zeitfenster einer Station ist der Quotient aus der Demontagezeit der Gerätegruppe und der An-

zahl der Stationen. Wird zur Demontage an einer Station mehr oder weniger Zeit benötigt, so wird die Abweichung der Auslastung in Bezug auf das Zeitfenster in Prozent angegeben.

Im folgenden wird angenommen, daß für jedes betrachtete Produkt die Demontagereihenfolgen in einer Datenbank vorliegen. Alternativ müssen diese Vorrangrestriktionen in exemplarischen Musterzerlegungen gewonnen werden. Abbildung 6 zeigt am Beispiel eines (vereinfachten) Fernsehgerätes vier unterschiedliche Reihenfolgen, wobei statt den Komponentennummern zur Veranschaulichung die entsprechenden Materialfraktionen der Zerlegeschritte angegeben sind. Die Zerlegereihenfolgen lauten:

- Reihenfolge 1: PE-belüften-Metall-Platine-BRGlas-PP
- Reihenfolge 2: PE-belüften-Platine-Metall-BRGlas-PP
- Reihenfolge 3: PE-belüften-Platine-BRGlas-Metall-PP
- Reihenfolge 4: PE-belüften-Platine-BRGlas-PP-Metall

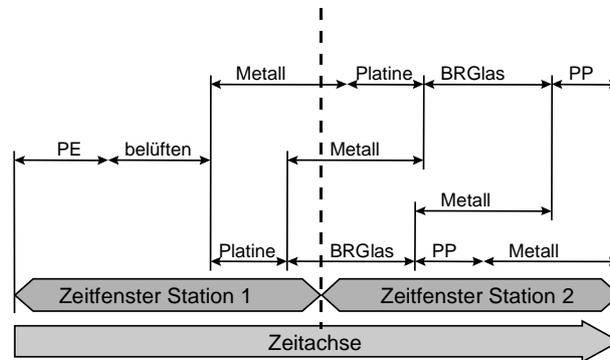


Abbildung 6

Vier mögliche Demontagereihenfolgen am Beispiel eines Fernsehgerätes

Ein Doppelpfeil kennzeichnet den Zeitraum, den ein Zerlegevorgang beansprucht. Über den Pfeilen sind die entsprechenden Fraktionen der Zerlegeschritte gekennzeichnet. Die Bezeichnung „belüften“ bezieht sich auf die Tätigkeit „Belüften der Bildröhre“; hier fällt keine Fraktion an. Die gestrichelte Linie deutet die Grenze des Zeitfensters bei zwei angenommenen Stationen an. An diesem Beispiel wird deutlich, daß in den seltensten Fällen ein Vorgangsende mit der Zeitfenstergrenze zusammenfällt. Weitau häufiger „teilt“ die Zeitfenstergrenze einen Vorgang (hier die Fraktionen „Metall“ und „BRGlas“).

Die entwickelte Entscheidungslogik basiert auf einem Vergleich jeder Reihenfolge des einen Produktes mit den möglichen Reihenfolgen anderer Produkte sowie einer nachgeschalteten Bewertung. Die Bewertung berücksichtigt zum einen die An-

zahl benötigter Werkzeuge und Fraktionsbehälter pro Station, zum anderen die Gleichmäßigkeit der Auslastung des Demontagesystems.

Für eine Reihenfolgekombination entsteht an jeder Station eine bestimmte Fraktionsmenge. Die Summe der Fraktionsmengen über alle Stationen ergibt die Anzahl der Behälter, die an der betrachteten Demontagelinie für diese Reihenfolgekombination bereitstehen müssen (Abbildung 7). Eine ähnliche Betrachtung findet für Werkzeuge statt. Als Kennwert zur Bewertung der zeitlichen Auslastung der Stationen dient die Standardabweichung. Je kleiner die Differenzen der einzelnen Stationsauslastungen zu hundert Prozent sind, desto kleiner wird die Standardabweichung.

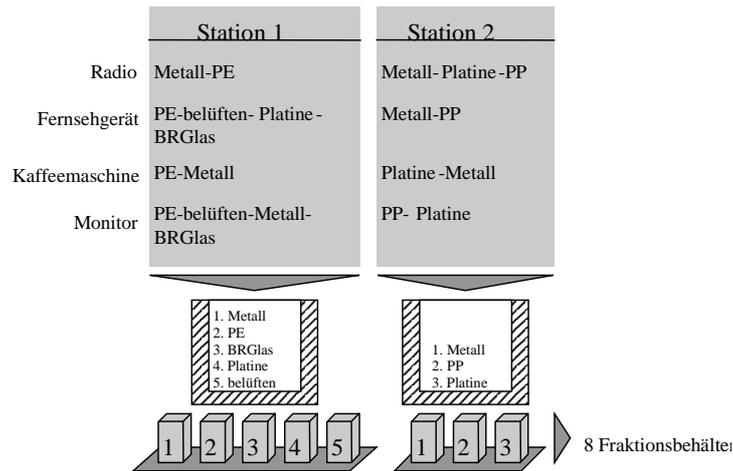


Abbildung 7  
Reihenfolgekombination und Fraktionsmengen

Somit ergeben sich drei Bewertungsmöglichkeiten für die Ermittlung des optimalen Demontageumfanges für ein bestimmtes Gerätespektrum bei einer vorgegebenen Anzahl von Stationen. Mit Hilfe dieser Entscheidungslogik kann ein Demontagesystem optimal auf die Bearbeitung eines gegebenen Produktspektrums ausgelegt werden. Die Ermittlung der Demontagereihenfolgen als wesentliche Prozeßkenngröße ist hier ein entscheidendes Kriterium.

### 4.3 Exemplarische Anwendung auf ein Produktspektrum

Abbildung 8 zeigt drei Varianten von Demontagesystemen für die Zerlegung von Monitoren. Für das betrachtete Produktspektrum fallen 12 Fraktionen an, wobei für die Zerlegung neun verschiedene Werkzeuge bzw. -kombinationen benötigt werden.

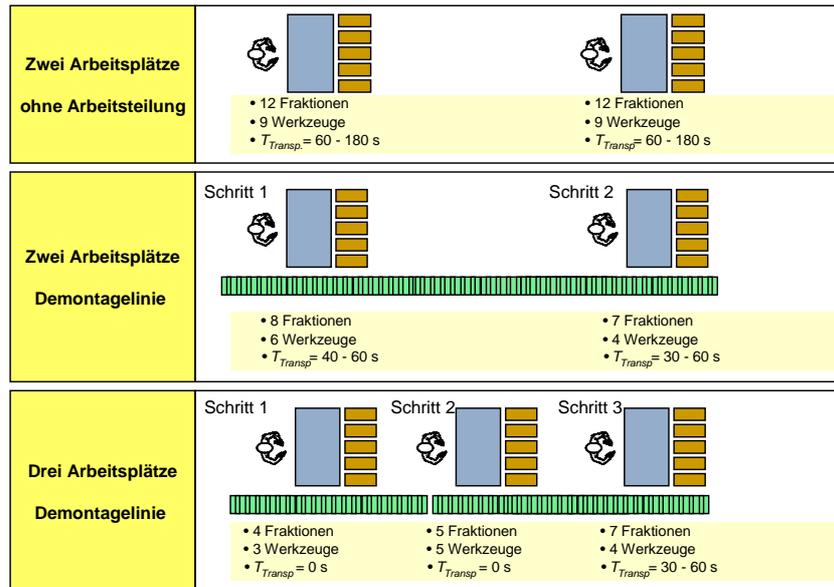


Abbildung 8  
Vergleich unterschiedlicher Organisationsformen in der Demontage

Im ersten Fall werden zwei Arbeitsplätze ohne Arbeitsteilung betrachtet. Unter der Randbedingung, daß aufgrund der Größe der Behälter nicht mehr als fünf unterschiedliche Fraktionen an den einzelnen Stationen gesammelt werden können, entstehen bei dieser Variante durch zusätzliche Transportvorgänge hohe Nebenzeitannteile, da der gesamte Fraktionsvorrat an jeder Station anfällt. Die Entscheidungslogik wird anschließend für den Fall einer Fließdemontage in Linienstruktur mit zwei bzw. drei Arbeitsplätzen angewandt. Hierdurch kann das Aufkommen an Fraktionen deutlich reduziert werden. Bei der dritten Variante können an zwei Stationen sämtliche Fraktionen ohne zusätzliche Transportvorgänge bevorratet werden. Untersuchungen mit vier oder mehr Stationen in einer Linie ergaben dagegen Probleme bei der gleichmäßigen Auslastung.

Eine Strukturierung der Demontage im Sinne einer Arbeitsteilung stellt auch zugleich die Voraussetzung für eine Mechanisierung bzw. Automatisierung von Trennprozessen, die in ähnlicher Form bei mehreren Produkten vorliegen, dar.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Zur Zeit erfolgt der Informationsaustausch zwischen Herstellern und Recyclingbetrieben nur unzureichend. Ein Hauptgrund hierfür ist in dem Wunsch nach Schutz

des eigenen Know-hows auf Seiten der Hersteller zu sehen. Häufig wird dabei eine auf die Produkte abgestimmte Planung der Recycling- und Demontagemaßnahmen erschwert. Eine effiziente Durchführung der Demontage ist daher oft kaum möglich. Der konsequente Einsatz von Datenbanken zur Bereitstellung wesentlicher Informationen, die in den verschiedenen Phasen des Produktlebenszyklus genutzt werden können, vermag dagegen einen guten Beitrag zur Bewältigung der End-of-Life Problematik von Produkten zu leisten.

Zur Bereitstellung derartiger Daten könnte sich die Nutzung des Internet anbieten, in denen Recyclingbetriebe die notwendigen Informationen, die sie sonst durch aufwendige Musterzerlegungen erhalten würden, abrufen können. Zum Schutz des eigenen Know-how könnte der Zugang zu diesen Informationen entsprechend nur vom Hersteller „zertifizierten“ Recyclingbetrieben ermöglicht werden. Darüberhinaus sind in den Datenbanken keine Konstruktionsdetails enthalten.

### **Literaturverzeichnis**

- Albers, St., Eckarth, G. (1997): Kombination technischer und organisatorischer Strategien zu Wiederverwendung und Recycling im industriellen Einsatz, in: Produzieren in der Kreislaufwirtschaft, Proceedings Symposium Düsseldorf, Fraunhofer ICT
- Ebach, H., Kaase, W., Roth, N. (1996): DV-gestütztes Recycling Management-System, in: Industrie Management, 12, Heft 2
- Hesselbach, J., Herrmann, C., v. Westernhagen, K. (1999): Elektro(nik)schrott: Umweltgerechte Produktgestaltung und Planung der Demontage, in: VDI/Springer Umwelt, 29, Nr. 3
- Hesselbach, J., v. Westernhagen, K. (1999): Effizienzsteigerung der Demontage als Anreiz zur umweltverträglichen Altgeräteverwertung am Beispiel des Elektronikschrottes, Abschlußbericht zum Vorhaben AZ II/71 820, VW-Stiftung
- Hesselbach, J., Kühn, M. (1998): Disassembly Evaluation of electronics & electrical products, in: Proc. of the IEEE Int. Symposium on Electronics and the Environment, Oak Brook/IL
- Hesselbach, J., Herrmann, C., Kühn, M. (1997): Eco-Potential as a Tool for Design for Environment, in: 4<sup>th</sup> Int. Seminar on Life Cycle Engineering, Berlin
- Tönshoff, H.-K., Zahn, G.: Wissensbasiertes Datenmodell für Konstruktion und Arbeitsplanung, in: ZWF, 94, Heft 3