

Öko-Portfolio: Methode zur Beurteilung der Recyclingeignung technischer Serienprodukte

Dipl.-Ing. M. Hartel, Prof. Dr.-Ing. D. Spath, Karlsruhe

Zusammenfassung

Die heutige Entwicklung marktgerechter, technischer Serienprodukte ist durch die Notwendigkeit gekennzeichnet den gesamten Lebenszyklus eines Produktes von der Rohstoffgewinnung bis zur Entsorgung frühzeitig in Entscheidungsprozessen zu berücksichtigen. Diese erweiterte Sichtweise fordert Produktentwickler und Konstrukteure auf, Umweltziele in Neukonzepten nicht nur umzusetzen sondern die Erreichung gar zu belegen. Damit wird der entwicklungsbegleitende Einsatz ganzheitlicher Bewertungsmethoden als Werkzeug des lebenszyklusorientierten Gestaltens in Zukunft unabdingbar.

Dieser Beitrag stellt ein solches Verfahren zur Beurteilung der Recyclingeignung technischer Produkte auf Basis einer am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebstechnik (wbk) entwickelten Bewertungsmethode „Öko“-Portfolio vor.

1. Einführung

Inzwischen hat sich das Schlagwort „Life-Cycle-Engineering“ etabliert, welches das Bestreben versinnbildlicht, bereits frühzeitig in der Produktplanung das Produktleben, d.h. dessen Stoffflüsse entsprechend dem Vorbild der Natur nicht offen enden zu lassen, sondern in Kreisläufen zu schließen. Aufgabe ist es, in einem ganzheitlichen Ansatz den Weg der Produkte über Produktion, Gebrauch und Entsorgung verantwortlich zu gestalten.

So ist in vielen Produktbereichen die Forderung nach recyclinggerechter Produktgestaltung bereits zu einem Standard geworden, dessen Nichterfüllung zu Wettbewerbsnachteilen führen kann. Insbesondere bei technischen Serienprodukten rückt aufgrund

sich verknappender Rohstoffressourcen (vgl. Abb. 1) der Aspekt der Materialrückgewinnung ins Blickfeld. Zahlreiche Unternehmen berücksichtigen bereits diesen Aspekt der Entsorgung und auch den gesamten Lebenszyklus eines Produktes in ihren Planungen und Entscheidungen. Für die Entwicklung eines ökologisch sinnvollen Produktes ist es darüberhinaus wichtig, bereits frühzeitig in der Planung einzelne Konstruktionsvarianten hinsichtlich ihrer Entsorgungseigenschaften systematisch bewerten und untereinander vergleichen zu können.

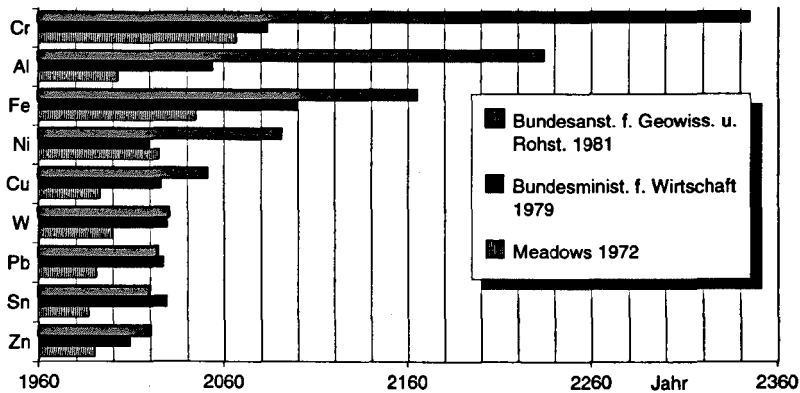


Abb. 1: Schätzung nutzbarer Rohstoffressourcen (Metalle)

2. Bewertungsverfahren mit ökologischem Bezug

Das ausgeprägtere Umweltbewußtsein in Öffentlichkeit, Industrie und auf gesetzgeberischer Seite hat letztendlich die Entwicklung zahlreicher Methoden und Verfahren zur Analyse und Bewertung der Umweltauswirkungen nicht allein technischer Produkte vorangetrieben. Abb. 2 gibt eine kurze Übersicht der wesentlichsten Verfahren.

Aufbauend auf einer eingehenden Analyse dieser und anderer Methoden wurde am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebstechnik (wbk) ein neuartiges Werkzeug zur umwelt/recyclinggerechten Produktbewertung entwickelt. Im Rahmen eines Entwicklungsprojektes für ein Produkt der „weißen“ Ware konnte mittels dieser Methode die Demontage- und Recyclingfähigkeit entscheidend verbessert werden.

Methoden	Merkmale	Eignung/Ziele
Ökologische Buchhaltung (Folgekostenrechnung)	volkswirtschaftliche Gesamtrechnung der Umweltschäden	Verrechnung aufgetretener Umweltschäden, Förderung von umweltfreundlichen Produkten
Ökosteuern	Besteuerung von umweltschädlichen Produkten	Kostenverteilung nach Verursacherprinzip
Ökobilanz Ökopunkte	Bewertungsverfahren durch Sach- und Wirkungsbilanz	ganzheitliche Bilanzbewertung (Ökobilanz)
Szenariotechnik	Methode zur Ermittlung von zukünftigen Perspektiven	Erreichen von mehr Handlungsspielraum bzw. Zeitgewinn
Umweltchecklisten	Checklisten mit Umweltanforderungsprofil	systematisierte Überprüfung der geforderten Produkteigenschaften
Ökologische Scoringmodelle	Bewertungsverfahren Nutzwertanalyse: Punkte=scores	Bewertungszahl ist Teil einer Ökobilanz (Wirkungsbilanz)
Produktlinienanalyse	Erfassung sozialer und nutzenbezogene Kriterien	Verfahren zur interdisziplinären Bewertung
Umweltverträglichkeitsprüfung	Umweltverträglichkeit von öffentlichen und privaten Projekten	Prüfung mittelbarer und unmittelbarer Umweltauswirkungen

Abb. 2: Bewertungsmethoden hinsichtlich ökologischer Auswirkungen

Das entwickelte Werkzeug der „Öko“-Portfolio Bewertung und die wesentlichen methodischen Ansätze werden im folgenden näher erläutert.

3. Methodik und Kennzahlen des Bewertungsverfahrens

Ziel des Bewertungsverfahrens:

Quantitative, entwicklungsbegleitende Beurteilung der lebenszyklusorientierten Umweltauswirkungen technischer Produkte zur frühzeitigen, systematischen Unterstützung der Produktplanung.

Ansatz des Bewertungsverfahrens:

Rückführung der Umweltauswirkungen auf sog. Umwelttreiber (Produktmerkmale) durch die Möglichkeit der Bewertung der Demontageeignung des Produktes und der Recyclingeignung der gewählten Materialien.

Systematisierung durch Kennwertebildung:

Erreichen der Vergleichbarkeit von alternativen Produktplanungen durch Gegenüberstellung der Kennwerte Umweltstärke und Konstruktionsstärke im „Öko“-Portfolio.

Die Einordnung des entwickelten Bewertungsverfahrens in den Planungs- und Konstruktionsprozeß stellt sich wie folgt dar:

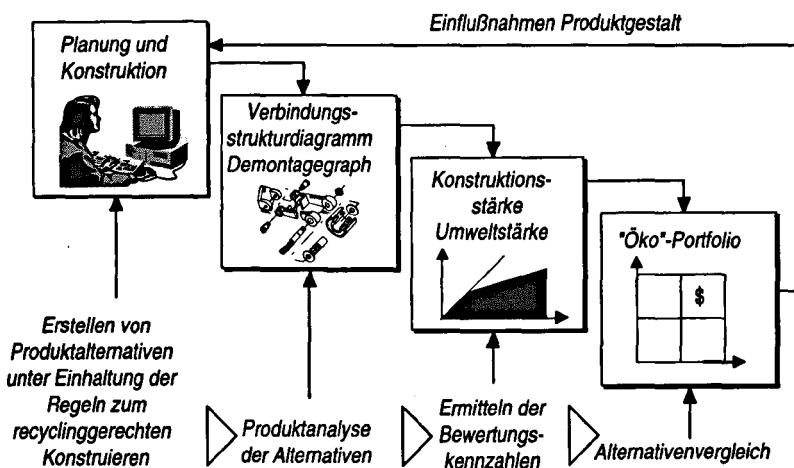


Abb. 3: Einordnung der Bewertungsmethode „Öko“-Portfolio

3.1 Umweltstärke

Der Kennwert **Umweltstärke** dient dazu, Produktalternativen bzw. Konstruktionsvarianten hinsichtlich ihrer Umweltauswirkungen zu bewerten. Der Umweltstärkekennwert besteht dabei aus den drei Elementen **Ökopunkte**, **Ressourcenkorrekturfaktor** und **Nutzungsdauer**.

3.1.1 Ökopunkte

Die Ökopunkte-Methode ist ein in der Praxis bereits eingesetztes Verfahren zur ganzheitlichen Bewertung der Umweltbelastungen technischer Produkte von der Rohmaterialgewinnung bis zu Entsorgung in Form einer Ökobilanz. Die Bewertung wird in einer einzigen Zahl in sog. **Ökopunkten** angegeben.

Das Bewertungsverfahren rechnet im Rahmen der „kritischen Bilanzierung“ die Emissionen bzw. Umweltauswirkungen auf die vier grundsätzlich unterschiedlichen Klassen (Wasser, Luft, Abfall, Energie) um. Die Ökopunkte des zu untersuchenden Produktes werden durch Multiplikation der tatsächlichen auftretenden Emissionen mit den Ökofaktoren errechnet. Diese Faktoren gewichten die jeweiligen Emissionsarten nach ihrer

Schädlichkeit. Zur Gewichtung werden die gesetzlichen Schadstoffgrenzwerte zugrundegelegt. Die daraus resultierende Gesamtbelastung wird in Ökopunkten angegeben und ist proportional der Größe der Umweltbelastung durch das Produkt.

3.1.2 Ressourcenkorrekturfaktor

Die durch eine Konstruktion festgelegte Materialwahl hat, zusätzlich zu den Umweltauswirkungen, auch eine Auswirkung auf die ständige Abnahme der weltweiten Rohstoffvorkommen. Der **Ressourcenkorrekturfaktor (RKF)** ist ein Bewertungsfaktor, der diese Abnahme anhand der statistischen Lebensdauer bewertet. Der RKF ist als Erweiterung des Bewertungsverfahrens der Ökofaktoren bzw. Ökopunkte zu sehen und setzt die statistische Lebensdauer eines Rohstoffes ins Verhältnis zu einem Bezugsjahr ($RKF \leq 1$).

Für Regenerativrohstoffe, wie z.B. Naturkautschuk für Elastomere bzw. Recyclate, bleibt der Ressourcenkorrekturfaktor unberücksichtigt. Bei Materialien, die sich aus unterschiedlichen Rohstoffen zusammensetzen, wird der RKF aus der Summe der Einzel-RKF's über die Massenverhältnisse gebildet, wie z.B. auch Mischmaterialien mit Recyclatanteil. Bei Materialien die aus Vorprodukten, wie z.B. Erdöl, entstanden sind, wird für die Berechnung des RKF's auf die Rohstoffdaten der Vorprodukte zurückgegriffen.

Die Grundlage der Ermittlung des RKF bildet die statistische Lebensdauer der Rohstoffe. Sie kann aus dem **Fischer Weltalmanach (1994)** (vgl. Abb. 4) entnommen werden und stellt die nach dem heutigem Stand der Technik statistische Lebensdauer wirtschaftlich gewinnbarer Rohstoffe bei gleichbleibender Jahresförderung dar.

Statistische Lebensdauer metallischer Rohstoffe [a]	Weltalmanach (Stand '92/93)	Vergleichsdaten (Stand '90)
Chrom	350	369*
Eisen	280	187*
Nickel	160	106*
Kupfer	90	56*
Silber	50	(keine Angabe)
Zink	40	38*

* Angaben nach Bundesanstalt f. Geow. und Rohstoffe 1990

Abb. 4: Auszug aus dem Fischer Weltalmanach 1994

3.1.3 Nutzungsdauer

Die **Nutzungsdauer** eines Produktes ist eine wichtige Größe, um den Einsatz von Materialien bzw. die durch ein Produkt entstandenen Umweltauswirkungen relativ zum Nutzen ausdrücken zu können. Die Nutzungsdauer gliedert sich in zwei Bereiche Produktlebensdauer und erweiterte Lebensdauer. Bei der erweiterten Lebensdauer handelt es sich um die von der Instandsetzung und Aufarbeitung/-bereitung zusätzlich gewonnene Lebensdauer.

Diese Definition der Nutzungsdauer technischer Serienprodukte muß zur Relativierung der Umweltauswirkungen im Umweltstärkekennwert Berücksichtigung finden.



Abb. 5: Darstellung und Definition der Nutzungsdauer

3.1.4 Berechnung der Umweltstärke

Der **Umweltstärkekennwert** setzt sich aus den **Ökopunkten**, dem **Ressourcenkorrekturfaktor** und aus der **Nutzungsdauer** wie folgt zusammen.

$$\text{UstKw} = \left[\frac{\sum \text{Ökopunkte}_i \cdot \sum \text{RKF}_i}{\text{ND}} \right]^{-1} \cdot \text{UstKw}_{\text{Norm}} \quad (1)$$

Die Normierung des Kennwertes erfolgt auf eine als „ideal“ betrachtete Lösung.

Der **Umweltstärkekennwert (UstKw)** bewertet über die Ökopunkte alle Umweltauswirkungen, die von einem Material bzw. einem Produkt ausgehen, d.h. "sämtliche" Schadstoffemissionen und Energieverbräuche werden berücksichtigt, die durch den jeweiligen Herstellungsprozeß, Rohstoffgewinnung, Transport, etc., erzeugt werden. Mit Hilfe des Ressourcenkorrekturfaktors wird die Rohstoffabnahme durch den Verbrauch der natürlichen Ressourcen bewertet und mit Hilfe der Nutzungsdauer, der Einsatz des Materials im Verhältnis zur Produktlebensdauer (Nutzungszeit) relativiert.

Der **Umweltstärkekennwert (UstKw)** ist damit eine Hilfsgröße, die dem Produktplaner erlaubt, verschiedene Produktalternativen/Konstruktionsvorschläge und die dazu gehörige Materialauswahl ganzheitlich zu bewerten, d.h. Umweltauswirkungen im Verhältnis zur Nutzungsdauer relativiert, miteinander vergleichen zu können.

3.2 Konstruktionsstärke

Der Kennwert **Konstruktionsstärke** beurteilt die Demontageeignung bzw. die Materialwahl im Hinblick auf deren Recyclingerfordernisse. Zur Demontagebewertung wird der Produktaufbau und die Verbindungsstruktur herangezogen. Die Bewertung der Materialwahl erfolgt anhand der Einstoffregel.

3.2.1 Struktur- und Demontagebewertung

Die Demontagebewertung ermöglicht es, ausgehend von der Analyse der Produktstruktur, Rückschlüsse auf das Demontageverhalten des Produktes abzuleiten. Das Verfahren eignet sich damit zur Untersuchung des Demontageablaufs bereits existierender oder in der Entwicklung befindlicher Produkte und bietet die Möglichkeit den Produktaufbau unter Demontageaspekten zu bewerten und damit zu optimieren.

Die einzelnen Phasen der **Produktstrukturbewertung** unterscheiden zwischen der reinen Strukturbewertung und der Verbindungselemente-/Demontagebewertung. Beide Verfahrensschritte werden im folgenden erläutert.

Demontageanalyse

Bei der Demontageanalyse werden ausgehend von Konstruktionsdaten (z.B. CAD-Entwurf) Rangfolgen bzw. Hierarchien der Bauteile und die Abfolge von Demontageprozessen abgeleitet und in dem sog. Demontagevorranggraphen dargestellt. Die Demontagereihenfolge der Bauteile wird durch eine Zerlegung des Produktes abhängig von der zugrundeliegenden Demontagestrategie ermittelt, wie z.B. Favorisierung größerer Baugruppen, Lösen aller Verbindungen einer Art etc., die wiederum abhängig von der Entsorgungsstrategie, wie z.B. Schadstoffentfrachtung ist.

Die Bauteile, d.h. Baugruppen und Einzelteile des Produktes, sind in den einzelnen Demontageebenen angeordnet. Die Demontage von Teilen, die auf einer Demontageebene liegen, können gleichzeitig durchgeführt werden. Demontageschritte, die hintereinander abzuarbeiten sind, werden vertikal angeordnet (vgl. Abb. 6).

Da Störstoffe in einer unteren Demontageebene aufwendiger zu beseitigen sind als Störstoffe in höheren Ebenen, sind eventuell Werkstoffsubstitutionen oder Strukturveränderungen notwendig.

Demontagebeiwert

Eine wichtige Kenngröße ist die Strukturtiefe ST einer demontierten Struktur. Sie drückt aus, in wievielen aufeinanderfolgenden Demontagedurchläufen (Demontageebenen), eine Struktur vollständig demontierbar ist. Die Strukturtiefe allein sagt nicht genug über die Demontageeigenschaften aus. So kann eine Struktur mit vier Ebenen und nur wenigen Demontageoperationen günstiger sein, als eine horizontal ausgerichtete mit nur zwei Ebenen aber vielen Operationen.

Aussagekräftiger ist dagegen die Länge der Demontagepfade DP der einzelnen Bauteile, also die Anzahl der für die Demontage des betreffenden Teils notwendigen Demontageoperationen. Diese Kenngröße erfaßt dabei automatisch auch den Grad der Abhängigkeiten und Vernetzungen der Demontageoperationen untereinander. Je kürzer die Pfade, oder - auf die gesamte Struktur bezogen - je kleiner der Mittelwert aller Demontagepfade DP_m , desto geringer der Aufwand für die Demontage.

Der Strukturfaktor SF eines Bauteils markiert die Nummer der Ebene, in der es demontiert werden kann. Aus dem bisher gesagten läßt sich ableiten, daß eine Struktur um so günstiger zu demontieren ist, je geringer der mittlere Strukturfaktor SF_m ist.

Abb. 7 macht deutlich, daß jeder Kennwert für sich gesehen noch keine Rückschlüsse auf das Demontageverhalten zuläßt. Es sind aber gegenseitige Abhängigkeiten und Beeinflussungen festzustellen.

Gerätetyp	n	nDO	ST	DPm	SFm	Bewertung
Kaffeemaschine	10	7	2	2,80	1,90	gut
Haartrockner	11	8	4	3,09	2,45	mäßig
Dampfbügeleisen	19	10	6	4,58	3,63	schwach
Handmixer	24	9	4	2,58	2,54	hervorragend
Heißwasserspeicher (HWS-alt)	36	17	5	6,14	3,14	mäßig
Heißwasserspeicher (HWS-V1)	33	14	4	3,77	2,55	sehr gut
Heißwasserspeicher (HWS-V2)	32	14	4	3,80	2,57	sehr gut
Heißwasserspeicher (HWS-V3)	30	14	4	3,89	2,64	sehr gut

Abb. 7: Demontagekennwerte verschiedener untersuchter Strukturen und Einschätzung ihrer Demontageeigenschaften

Aus diesen Zusammenhängen wurde als Wertungskennzahl der **Demontagebeiwert** η_D definiert, der sich folgendermaßen darstellen läßt:

$$\eta_D = K \cdot \frac{SF_m \cdot \sqrt{n}}{DP_m \cdot ST} \quad (2)$$

Der Vorfaktor K ist dabei ein Korrekturfaktor, der demontagestrategieabhängig angepaßt werden muß. Damit ist eine Möglichkeit geschaffen, die Demontageeigenschaften verschiedener Strukturen unter Zugrundelegung einer bestimmten Demontagestrategie objektiv miteinander vergleichen und bewerten zu können, da die Eigenschaften der untersuchten Struktur auf eine normierte Kenngröße mit dem Wertebereich $0 \leq \eta_D \leq 1$ abgebildet werden.

Strukturanalyse

Für die reine Strukturuntersuchung spielen weder die Art der Verbindungen noch die Anzahl der Verbindungselemente des Produktes eine wesentliche Rolle, da lediglich die Vernetzung bzw. Komplexität der Struktur festgestellt werden soll. Die Theorie der endlichen Graphen und Netzwerke stellt Ansätze zur Verfügung, Strukturen darzustellen und deren Eigenschaften zu beschreiben.

Die Strukturanalyse dient hier der genauen Untersuchung der vorliegenden Adjazenz- und Inzidenzrelationen der Struktur, also die Verknüpfung der Bauteile zu einer Struktur und die Beziehungen der Teile zu den Verknüpfungen selbst (vgl. Abb. 8).

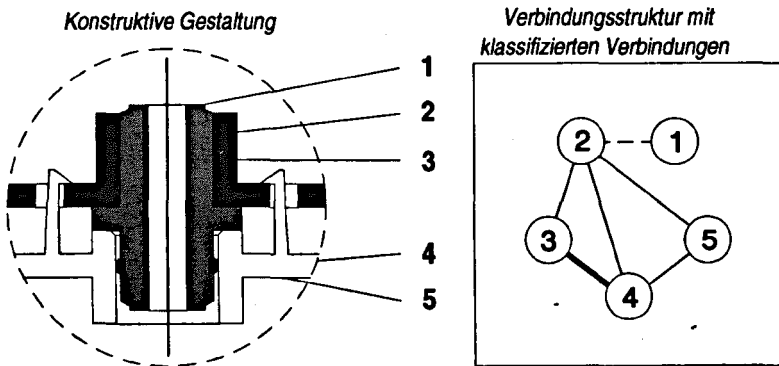


Abb. 8: Beispielstruktur (Strukturausschnitt) mit Verbindungsstrukturdiagramm

Bei der Strukturanalyse werden die Einzelteile und Einheiten als Knoten aufgefaßt. Die Abstimmungsbedingung für die durch die Kanten dargestellten Adjazenzrelationen kann dabei in Abhängigkeit verschiedener Zielsetzungen definiert und variiert werden.

- **Verbindungskontakt:**

Teile (Einheiten) gelten als miteinander verbunden, wenn sie unmittelbar durch ein Verbindungselement miteinander verknüpft sind (Schrauben, Schnapphaken etc.).

- **Körperkontakt**

Der Körperkontakt wird als Oberbegriff für Flächen-, Linien- und Punktkontakt aufgefaßt. Diese Bedingung gilt auch dann als erfüllt, wenn zwei Teile ein funktionsbedingtes Spiel aufweisen.

Damit ist bereits eine erste Klassifizierung der Verknüpfung möglich: Die Unterscheidung von Verbindungen, die durch ein Verbindungselement gebildet und dementsprechend durch eine Demontageoperation aufgetrennt werden müssen, und Körperkontaktverbindungen, die ohne zusätzliche Demontageoperation, beispielsweise durch einfaches Entnehmen des Teils, aufgelöst werden können.

Zur Abbildung demontagebezogener Eigenschaften der analysierten Struktur kann die Abstimmungsbedingung noch durch weitere sog. Inzidenzrelationen der Verbindungen nach Gesichtspunkten der demontagegerechten Gestaltung erweitert werden (vgl. Abb. 8 und 9).

Abstimmungsbedingung	Fallbeispiel
Verbindungskontakt	3-4: Verbindung durch Schnapphaken.
Körperkontakt	2-3: 2 sitzt in 3, ohne durch ein Verbindungselement verbunden zu sein.
FV Funktionsrelevante Verbindung	4-5: Dichtfunktion.
HV Halteverbindung ohne Funktionsrelevanz	3-4: Axiale Fixierung.
KV Halteverbindung mit Funktionsrelevanz	2-5: Dichtfunktion und Positionierung des Dichtings.
Lösbare Verbindung	alle Verbindungen außer 1-2.

Abb. 9: Funktionale Verbindungsklassifizierung

Komplexitätsbeiwert

Grundsätzlich eignet sich der mittlere Knotengrad, also der Mittelwert aller Einzelverknüpfungsgrade VG_i , zur Abschätzung der Komplexität einer Struktur. Darum soll dafür im folgenden auch der Begriff Komplexitätsgrad VG_m verwendet werden. Die Einzelverknüpfungsgrade werden aus dem Verbindungsstrukturdiagramm (vgl. Abb. 8) entnommen. Allgemein gilt für den mittleren Knotengrad oder Komplexitätsgrad:

$$VG_m = 2 \cdot \frac{n_v}{n} = \frac{\sum VG_i}{n} \quad (3)$$

Je stärker die Teile n einer Struktur miteinander verknüpft sind (n_v = Anzahl der Verbindungen), desto komplexer ist ihr Aufbau. Anders ausgedrückt wächst mit zunehmender Komplexität bei gleicher Teilezahl die Anzahl der Verbindungen und damit der Wert VG_m .

Der Komplexitätsgrad vermittelt mit zunehmender Teilezahl eine steigende Tendenz (vgl. Abb. 10).

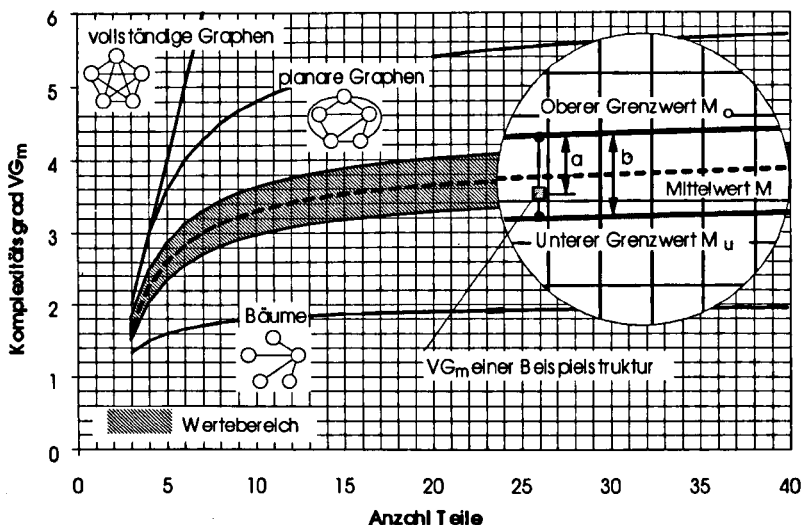


Abb. 10: Definition der Schwellenwerte und Berechnungsgrundlagen des Komplexitätsbeiwertes η_K

Um trotz der Abhängigkeit von der Teilezahl zu einer objektiven Vergleichsmöglichkeit zu gelangen, müssen die ermittelten Werte zu Schwellenwerten (Grenzkurven) in Beziehung gesetzt werden. Die Kurve der Strukturtypen, der planaren Graphen und die der Bäume schließen dabei den Bereich möglicher Komplexität für alle technischen Gebilde ein (vgl. Abb. 10).

Somit ergibt sich ein schmaler Wertebereich, dessen Mittelwert sich folgendermaßen berechnet:

$$M = \frac{VG_{m\text{baum}} + VG_{m\text{planar}}}{2} = 4 - \frac{7}{n} \quad (4)$$

Für die untersuchten Strukturen erwies sich ein - von der Teilezahl abhängiger - Wertebereich von $M \pm 0,1 \cdot M$ für eine bewertbare Abbildung der Strukturkomplexität als realistisch. Die oberen und unteren Grenzwerte M_o und M_u dieses Bereichs ergeben sich dann zu $M_o = 1,1 \cdot M$; $M_u = 0,9 \cdot M$.

Die Lage des ermittelten Strukturkennwertes innerhalb dieses Bereichs läßt nun vergleichende skalierbare Aussagen über unterschiedliche Strukturen zu. Dafür wurde als Wertungskenngröße der **Komplexitätsbeiwert** η_K eingeführt, der folgendermaßen definiert ist:

$$\eta_K = \frac{a}{b} = \frac{M_o - VG_m}{M_o - M_u} = \frac{1,1 \cdot M - VG_m}{0,2 \cdot M} \quad (5)$$

Damit ist eine Möglichkeit geschaffen, die Komplexität verschiedener Strukturen trotz unterschiedlicher Teilezahl objektiv miteinander vergleichen und bewerten zu können, da der Komplexitätsgrad der Struktur auf eine normierte Kenngröße mit dem Wertebereich $0 \leq \eta_K \leq 1$ abgebildet wird.

Verbindungsstrukturbeiwert

Die Abstimmungsbedingungen "Körperkontakt" und "Verbindungskontakt" sind bereits durch den oben definierten Komplexitätsbeiwert η_K erfaßt, denn ihr Beitrag zur Demontagefreundlichkeit der Produktstruktur liegt in der mehr oder weniger starken Verknüpfung der einzelnen Komponenten.

Bei der Analyse von Verbindungsstrukturen fiel auf, daß die einzelnen Verbindungen für die Funktionserfüllung des Produktes unterschiedliche Bedeutung haben und dadurch zu den Eigenschaften der Struktur unterschiedliche Beiträge leisten. Einige sind

lediglich dazu da, Teile an einer bestimmten Stelle geometrisch zu positionieren ohne jede Funktionsrelevanz (Beispiel: Befestigung einer Signalleuchte im Gehäusedeckel), andere sind unmittelbarer Bestandteil der Funktionsstruktur.

Bei gegebener Funktion unter Beibehaltung der verwendeten Wirkprinzipien ist die Anzahl unmittelbar an der Funktion beteiligter Verbindungen nur in geringem Umfang veränderbar. Das liegt daran, daß sie den Stoff-, Energie- und Signalumsatz zwischen den Funktionsträgern ermöglichen. Eine Reduzierung dieser Verbindungen ist nur durch Funktionsintegration, d.h. die Bündelung mehrerer Funktionen oder Teilfunktionen in einem Bauteil, oder Veränderung des Wirkprinzips möglich.

Die minimal mögliche Anzahl der Verbindungen und damit die geringst mögliche Strukturkomplexität bei gegebener Teilezahl ist also dann erreicht, wenn die Struktur nur aus funktionsrelevanten Verbindungen (FV) besteht. Dabei müssen auch die kombinierten Verbindungen (KV) mit berücksichtigt werden, die sowohl Bestandteil der Funktionsstruktur sind, als auch Haltefunktionen übernehmen. Bei dem Versuch, die Strukturkomplexität durch Reduzierung der Anzahl der Verbindungen zu verringern, sind also insbesondere die Verbindungen interessant, die keinen Beitrag zur Funktionsstruktur leisten (HV).

Die Anteile der funktionsrelevanten (FV, KV) bzw. nicht funktionsrelevanten Verbindungen (HV) an der Gesamtzahl aller Verbindungen n_V sind ein aussagekräftiges Merkmal, um das Verbesserungspotential der Funktions- und Verbindungsstruktur beurteilen zu können. Dafür wurde als Wertungskenngröße der **Verbindungsstrukturbeiwert** η_V eingeführt, für den sich folgender formelmäßiger Zusammenhang ergibt:

$$\eta_V = \frac{\sum (FV_i + KV_i)}{2 \cdot n_V} = 1 - \frac{\sum HV_i}{2 \cdot n_V} \quad (6)$$

Damit ist eine Möglichkeit geschaffen, die Funktions- und Verbindungsstruktur verschiedener Produktstrukturen auch bei unterschiedlichen Funktionen und Wirkprinzipien objektiv miteinander vergleichen und bewerten zu können, da die Funktionsstruktur des untersuchten Produkts auf eine normierte Kenngröße mit dem Wertebereich $0 \leq \eta_V \leq 1$ abgebildet wird.

3.2.2 Materialbewertung

Eine wichtige Forderung des recyclinggerechten Konstruierens ist die Beachtung der Einstoffregel, d.h. die Reduzierung der Materialvielfalt innerhalb der Konstruktion. Diese wesentliche Forderung dient im folgenden als Grundlage für die Bewertung der Produktentwürfe im Hinblick auf eine recyclinggerechte Materialwahl.

Bei diesem Bewertungsschritt wird die Materialvielfalt des zu untersuchenden Entwurfs, d.h. die mittlere Teileanzahl pro Material auf eine vorgegebene Grenzfunktion normiert (vgl. Abb. 11). Die Einhaltung der Einstoffregel wird über den **Monostrukturbeiwert** bewertet. Der **Monostrukturbeiwert** η_M ist als die mittlere Teileanzahl pro Materialanzahl (-vielfalt) (nMT) wie folgt definiert.

$$\eta_M = mMT \cdot \frac{1}{F_G(n)} \quad (7)$$

Die Grenzfunktion ergibt sich aus der als optimal erachteten Materialvielfalt von Produkten unterschiedlicher Teileanzahl. Die Grenzfunktion liegt somit immer unterhalb der Kurve des 100% reinen Stoffes.

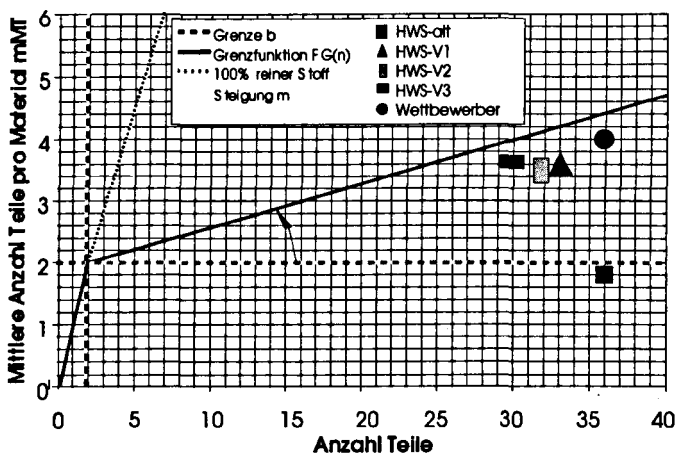


Abb. 11: Darstellung der Grenzfunktion in Abhängigkeit von der Teileanzahl

Es ergibt sich darüber hinaus die Möglichkeit, über die Reduzierung der Steigung der Grenzgeraden, die Bewertung weniger stark von der Teileanzahl n abhängig zu

machen. Somit werden Konstruktionen mit größerer Teileanzahl im Verhältnis zu Konstruktionen mit kleinerer Teileanzahl (bei gleicher Materialanzahl) "weniger stark bewertet", d.h. der prozentuale Unterschied eines Entwurfs hoher Teileanzahl zu einem geringer Teileanzahl nimmt zu.

3.2.3 Berechnung der Konstruktionsstärke

Im Rahmen der „Öko“-Portfolio Methode wird zur Gewichtung der Bewertungskenngrößen des Kennwerts **Konstruktionsstärke** das Verfahren nach *Breiting* eingesetzt. Dieses Verfahren ist das Ergebnis einer Analyse der wichtigsten bekannten Bewertungsmethoden und basiert auf der Festlegung von verhältnismäßigen Wichtigkeiten und deren Umrechnung in normierte Wichtigkeiten. Als verhältnismäßige Wichtigkeiten wurden in folgenden Beispiel festgelegt:

$$p_{D,V} = \frac{1}{2} = 0,5; \quad p_{D,K} = \frac{1}{4} = 0,25; \quad p_{D,M} = \frac{1}{6} = 0,167$$

Normierte Wichtigkeiten					
	Dem.	Verb.	Komp.	Mono.	Gew.
Dem.	0,00	0,33	0,20	0,14	0,67
Verb.	0,67	0,00	0,33	0,25	1,25
Komp.	0,80	0,67	0,00	0,39	1,86
Mono.	0,86	0,75	0,61	0,00	2,22
					$\Sigma = 6,00$

Abb. 12: Normierte und verhältnismäßige Wichtigkeiten der Beiwerte

Die Gewichtungsfaktoren ergeben sich aus obiger Gewichtungsmatrix zu: $G_K=1,86$, $G_M=2,22$, $G_V=1,25$ und $G_D=0,67$. Für die Gesamtbewertung müssen nun die entwickelten Beiwerte mit den ermittelten Gewichtungsfaktoren zu einem Endwert zusammengefaßt werden. Der Endwert wird daher auf die Summe der Gewichtungsfaktoren G_i normiert und in Abhängigkeit von der Ideallösung ausgedrückt.

Der **Konstruktionsstärkekennwert** wird wie folgt definiert:

$$\text{KstKw} = \frac{\sum (G_i \cdot \eta_i)}{\sum (G_i \cdot \eta_{i,\text{ideal}})} = \frac{(G_D \cdot \eta_D + G_V \cdot \eta_V + G_K \cdot \eta_K + G_M \cdot \eta_M)}{\sum G_i} \quad (8)$$

Die **Konstruktionsstärkekennwert** KstKw ist der gewichtete Mittelwert aus den Wertungskenngrößen **Komplexitätsbeiwert** η_K , **Verbindungsstrukturbeiwert** η_V **Demontagebeiwert** η_D und **Monostrukturbeiwert** η_M .

In der **Konstruktionsstärke** liegen damit Bewertungen von Eigenschaften vor, die für ein optimales Produktrecycling erforderlich sind. Einerseits ist die Demontierbarkeit eine Voraussetzung des Recyclens, andererseits muß bzgl. der Aufwandsminimierung für das Recycling technischer Produkte die Materialvielfalt verringert werden.

4. „Öko“-Portfolio

Die gesamten Wertungskenngrößen dieses Bewertungsverfahrens sind in zwei unterschiedlichen Bereiche aufgeteilt und zu je einem Stärkekenwert zusammengefaßt worden. Diese Werte - **Konstruktionsstärke** und **Umweltstärke** - lassen sich in "actio und reactio" unterscheiden. Mit anderen Worten sind die in der Konstruktionsstärke zusammengefaßten Einflüsse diejenigen, die von einem Konstrukteur direkt beeinflußt werden können. Während der Konstruktionsphase werden z.B. Materialwahl, Verbindungswahl, Montage-/Demontage und die Strukturzusammenhänge entsprechend den Anforderungen festgelegt. Aus diesen Festlegungen ergeben sich dann die lebenszyklusbezogenen Umweltauswirkungen ausgedrückt im Umweltstärkekenwert. Zur Darstellung dieser zwei nicht direkt miteinander korrelierenden Bewertungsbereiche wurde das „Öko“-Portfolio entwickelt (vgl. Abb. 13).

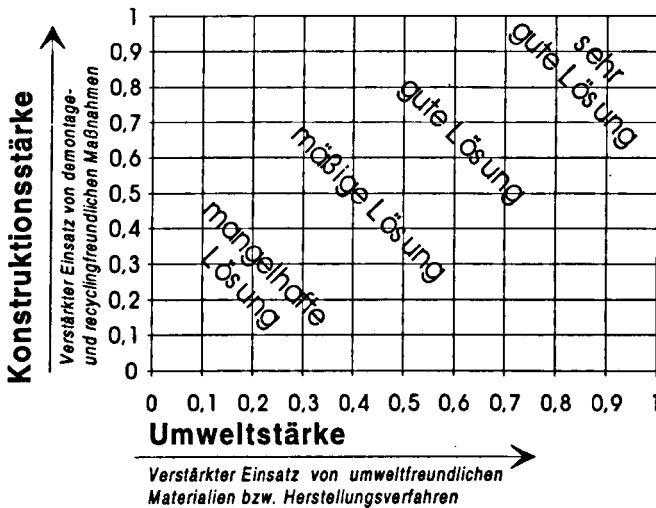


Abb. 13: Darstellung des „Öko“-Portfolio

5. Anwendungsbeispiel der „Öko“-Portfolio Methode

Bei den Produktbeispielen zur Validierung des Bewertungssystems handelt es sich um Produkte der „weißen“ Ware. Im Rahmen eines Entwicklungsprojektes für ein Neukonzept eines Heißwasserspeichers werden im folgenden die drei Neukonzepte mit dem Altprodukt und einen Wettbewerber bewertet und untereinander verglichen.

5.1 Berechnung der Umweltstärke

Die Ökofaktoren wurden mit Hilfe der Emissionsdaten aus der Ökobilanz der kritischen Belastung berechnet und in der folgenden Tabelle dargestellt.

Luft	NO _x	SO _x	CO _x	HC	HCL	FCKW
PP	6,41	3,403	0,25	11,936	0	
PVC	4,78	6,258	1,4	10,54	0,169	
PS	10,09	9,371	2,96	26,65	0	
Weißblech	2,73	8,45	1,38	16,53		

Wasser	DOC	COD	P	Cl-	NO ₃	SO ₄	NH ₄
PP	25,67	0		0			0,00
PVC	31,38	0		0,015			
PS	48,61	0,001		0			
Weißblech	0,0004	0,013		0	0,0003	0,0002	

Abfall/Energie	Deponie	Verbrennung	E _{eq} [MJ]
PP	211	20,8	50
PVC	370,3	20,8	42,5
PS	313,8	20,8	56,2
Weißblech	598,5	800	33,5

alle Werte ohne Angabe in g/kg Kunststoff bzw. Blech

Ökopunkte für verschiedene Packstoffe (Massen)				
PP	1333,97	Ökopkt/kg	1,33	Ökopkt/g
PVC	1411,13	Ökopkt/kg	1,41	Ökopkt/g
PS	2130,04	Ökopkt/kg	2,13	Ökopkt/g
Weißblech	16951,48	Ökopkt/kg	16,95	Ökopkt/g

Abb. 14: Darstellung der Emissionen und der berechneten Ökofaktoren

Die Ergebnisse der Umweltstärkebewertung sind in Abb. 15 dargestellt.

Das überraschend "schlechte" Abschneiden des gut demontierbaren Wettbewerbers ist auf das Gehäuse aus Polystyrol PS zurückzuführen. Der Kunststoff PS hat den höchsten Ökofaktor aller untersuchten Kunststoffe und deshalb ergibt sich, durch den hohen Gewichtsanteil des Gehäuses, eine hohe Anzahl an Ökopunkten.

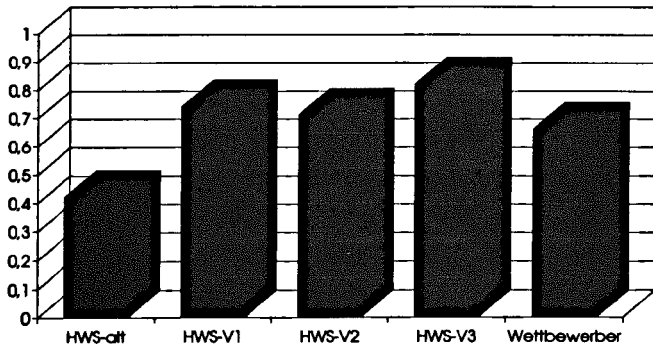


Abb. 15: Grafische Darstellung der Umweltstärken

Der Kennwert ist im hohem Maß von der jeweiligen Masse des untersuchten Produktes abhängig. Daraus ergibt sich die Forderung, daß nur Produkte die eine vergleichbare Funktionserfüllung haben, miteinander verglichen werden dürfen. Es folgt daraus aber auch ein stärkere, absolute Umweltbelastung, die einen größeren Wert in Ökopunkten zur Folge hat bzw. durch einen kleineren Umweltstärkekennwert abgebildet wird.

5.2 Berechnung der Konstruktionsstärke

Der Konstruktionsstärkekennwert (KstKw) wird aus der Summe der vier gewichteten Beiwerte (η_M , η_D , η_K , η_V) gebildet. Für die Einstellungen der Bewertungssystematik wurden die Gewichtungsfaktoren aus Abb. 12 gewählt. Die Festlegung der verhältnismäßigen Wichtigkeiten erfolgt i.d.R. im Planungsteam und orientiert sich an den bereits gemachten Erfahrungen durch Anwendung der Methode. Das Ergebnis der Konstruktionsstärkebewertung ist in Abb. 16 dargestellt.

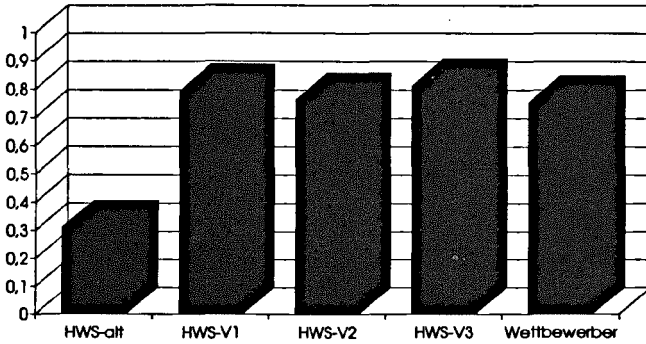


Abb. 16: Grafische Darstellung der Konstruktionsstärke

5.3 Ergebnisbetrachtung im „Öko“-Portfolio

Zum Abschluß des Bewertungsverfahrens erfolgt die Auswertung im „Öko“-Portfolio:

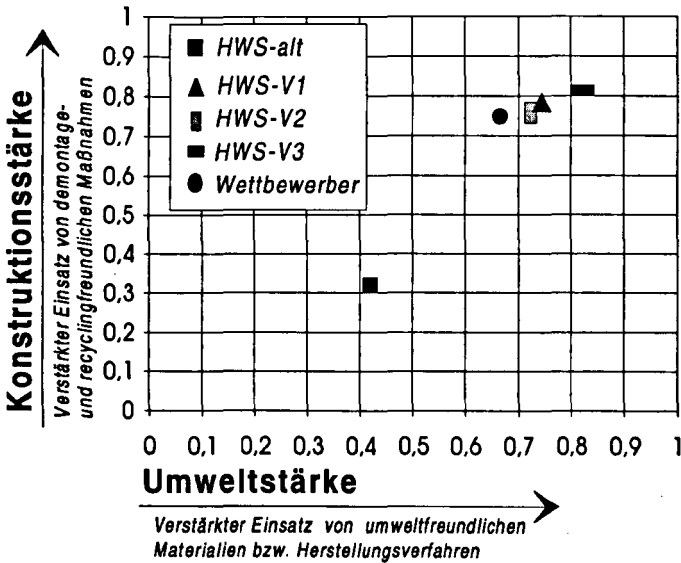


Abb. 17: Bewertungsergebnisse im „Öko“-Portfolio

Aus dem „Öko“-Portfolio ist deutlich sichtbar, daß die Konstruktionsvariante V3 die insgesamt beste Lösung darstellt. Sie ist einerseits demontagefreundlich und hat dabei noch die geringsten Umweltauswirkungen. Der Heißwasserspeicher des Wettbewerbers weist besonders auf der konstruktiven Seite, eine sehr hohe Demontagefreundlichkeit auf und hat durch eine ökologisch bedenklichere Kunststoffwahl zu dem schlechteren Umweltstärkekennwerte geführt.

6. Zusammenfassung und Ausblick

Das vorgestellte Bewertungsverfahren „Öko“-Portfolio unterstützt die Produktplanung bei der Beurteilung der lebenszyklusorientierten Auswirkungen von Konstruktionsvarianten durch die systematische, objektive Berechnung der Bewertungskenngrößen **Umweltstärke** und **Konstruktionsstärke**. In der Konstruktionsstärke eines Entwurfs sind nach dem heutigen Stand der Technik die direkt vom Entwickler beeinflussbaren Produktmerkmale, die für das demontage- und recyclinggerechte Gestalten eines Produktes von Bedeutung sind, zusammengefaßt. Durch den Umweltstärkekennwert werden darüberhinaus die lebenszyklusorientierten Auswirkungen des Produktes ermittelt. Diese Kennzahl gibt an, wie stark die Umwelt durch ein Produkt belastet wird bzw. die nicht-regenerativen Ressourcen abnehmen, bei gleichzeitiger Relativierung auf die Nutzungsdauer.

Die „Öko“-Portfolio Methode zeichnet sich besonders durch eine einfache Durchführbarkeit ohne zeitraubende, komplizierte Methoden der Entscheidungsfindung aus. Durch den weitgehend automatisierten Ablauf werden subjektive Einflüsse nahezu vollständig ausgeschlossen. Da die zugrundeliegende Methodik im wesentlichen auf mathematischen Zusammenhängen beruht, eignet es sich sehr gut für die rechnergestützte Durchführung und entwicklungsbegleitende Anwendung in Verbindung mit CAD-Systemen bzw. DFA-Werkzeugen. Damit ist es möglich, bereits vor der Detailkonstruktion "angedachte" Entwürfe direkt miteinander zu vergleichen.

Am wbk wird derzeit die Einbindung des Bewertungsverfahrens in das rechnergestützte System REKON (Softwaresystem zur REcyclinggerechten KONstruktion) vorgenommen.

Zukünftige Erweiterungen dieser Methode zielen auf die monetäre Bewertung der Entscheidungen im Entwicklungsprozeß hinsichtlich der lebensphasenbezogenen Kosten von Produkten, d.h. der Bewertung der Demontage- und Recyclingeignung

bezogen auf Kostenparameter wie z.B. die Demontagezeit und die Sekundärrohstoffverluste. Diese Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für die Lebensphase der Entsorgung avanciert zukünftig zu einer an Bedeutung gewinnenden Zielgröße beim Für oder Wider einer Produktentscheidung.

7. Referenzen

- /1/ *Weule, Hartmut; Spath, Dieter; Hartel, Marko; Tritsch, Christian:*
The Utilization of Hypermedia Based Information Systems for Developing Recyclable Products and for Disassembly Planning.
CIRP General Assembly '94. CIRP Annals 43/1 1994.
- /2/ *Hartel, Marko:*
Bewertung der Demontageeignung komplexer Produktstrukturen in der Entwurfsphase als Element des Life-Cycle-Designs.
Umwelt Wirtschafts Forum 2(1994)4.
- /3/ *Spath, Dieter; Tritsch, Christian; Hartel, Marko:*
Multimedia Unterstützung in der Demontage.
VDI-Z Integrierte Produktion 136(1994)6.
- /4/ *Spath, Dieter; Hartel, Marko:*
Der Weg zum schlanken „Öko“-Produkt.
Logistik Heute (1994)6.
- /5/ *Spath, Dieter, Hartel, Marko:*
Recyclinggerechtes Konstruieren- Element moderner Produktentwicklung.
Tagungsband der 1. Chemnitzer Konstrukteurstage 09/1993.