

***Kennzahlenbasierte Beurteilung
der verwertungsgerechten Produktgestaltung
mit der Trennfähigkeitsanalyse***

Vom Fachbereich Maschinenbau
der Universität Hannover
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur
genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Ing. Jens Fritz Bollmann

geboren am 04.07.1970
in Gronau/Leine

2001

1. Referent: Prof. Dr.-Ing. G. Redeker

2. Referent: Prof. Dr.-Ing. H.-H. Gatzert

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. H.-P. Wiendahl

Tag der Promotion: 19. Januar 2001

Hannoversche Berichte zum Qualitätsmanagement

Band 6

Jens Bollmann

**Kennzahlenbasierte Beurteilung
der verwertungsgerechten Produktgestaltung
mit der Trennfähigkeitsanalyse**

Shaker Verlag
Aachen 2001

Die Deutsche Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme

Bollmann, Jens:

Kennzahlenbasierte Beurteilung der verwertungsgerechten
Produktgestaltung mit der Trennfähigkeitsanalyse/

Jens Bollmann. Aachen : Shaker, 2001

(Hannoversche Berichte zum Qualitätsmanagement ; Bd. 6)

Zugl.: Hannover, Univ., Diss., 2001

ISBN 3-8265-9028-7

Copyright Shaker Verlag 2001

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen
oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungs-
anlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 3-8265-9028-7

ISSN 1435-6694

Shaker Verlag GmbH • Postfach 1290 • 52013 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • eMail: info@shaker.de

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Qualitätssicherung der Universität Hannover. Dem Leiter des Instituts, Herrn Prof. Dr.-Ing. Georg Redeker, danke ich für die Unterstützung und die Anregungen sowie die eingehende Durchsicht der Ausarbeitung. Mit seinem Engagement und Interesse für die Unterstützung klein- und mittelständischer Unternehmen bei der recyclinggerechten Produktgestaltung war er steter Förderer der vorliegenden Arbeit.

Herrn Prof. Dr.-Ing. H.-H. Gatzert, dem Leiter des Instituts für Mikrotechnologie der Universität Hannover, danke ich für die Übernahme des Korreferats und die daraus resultierenden wertvollen Hinweise. Ebenso möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. H.-P. Wiendahl, dem Leiter des Instituts für Fabrikanlagen der Universität Hannover, für das meiner Arbeit entgegengebrachte Interesse danken.

Die Entwicklung der Trennfähigkeitsanalyse bis hin zu dem vorliegenden Status wäre ohne Produktmodelle und Produktdaten aus der Industrie nicht möglich gewesen. Aus diesem Grund gilt mein Dank den Mitarbeitern der Firma RUMED Rubarth Apparate GmbH und im besonderen Herrn Dipl.-Ing. V. Rubarth für die gute Zusammenarbeit und die rückhaltlose Bereitstellung der notwendigen Informationen. Die Aufnahme und die Aufbereitung dieser Daten wäre ohne die Mithilfe von Diplomanden, Studienarbeitern und studentischen Hilfskräften nur schwer durchführbar gewesen. Den Studenten, die mich dabei unterstützt haben, möchte ich für ihre Mitarbeit danken.

Allen Kolleginnen und Kollegen, die mich während meiner Institutszeit freundschaftlich begleitet haben und durch engagierte Diskussionen sowie konstruktive Kritik zum Gelingen der Arbeit beitrugen, danke ich für die sehr gute Zusammenarbeit. Stellvertretend für alle seien hier Frau U. Gilke und Herr T. Meyer sowie die Herren Dipl.-Ing. R. Sauer, Dipl.-Ing. F. Niemeier, Dipl.-Ing. U. Krick, Dipl.-Ing. L. Keunecke, Dipl.-Ing. G. Wald, Dipl.-Ing. S. Sprenger und Dipl.-Ing. U. Karock genannt.

Für ihr Verständnis und ihre Unterstützung in den zurückliegenden arbeitsreichen Monaten möchte ich besonders Andrea danken.

Mein größter Dank gilt an dieser Stelle meinen Eltern. Sie haben mich in den zurückliegenden Jahren stets unterstützt und mir diesen Weg erst ermöglicht.

Hannover im März 2001

Jens Bollmann

Kurzfassung

Der effiziente Umgang mit Rohstoffen gewinnt durch die anhaltende Verkürzung der Produktlebenszeiten technischer Gebrauchsgüter immer mehr an Bedeutung. Zur Schonung der natürlichen Ressourcen ist es daher erforderlich, technische Produkte frühzeitig auf die Nachnutzungsphase vorzubereiten. Ein wesentlicher Aspekt dabei ist die Integration der Recyclinggerechtheit als Gestaltungskriterium in den Entwicklungsprozeß, um auf diese Weise die Recyclingfähigkeit der Produkte präventiv verbessern zu können.

Die Umsetzung der recyclinggerechten Produktgestaltung stellt sich vor allem in klein- und mittelständischen Unternehmen problematisch dar. Hier können oftmals keine personellen und finanziellen Ressourcen dafür bereitgestellt werden, so daß Schwierigkeiten hauptsächlich durch ungeeignete Hilfsmittel bei der verwertungsgerechten Werkstoffwahl, durch fehlende recyclingrelevante Materialinformationen sowie durch die ungenügende Kommunikation zwischen Hersteller, Zulieferer und Recyclingexperten hervorgerufen werden.

Die aufgezeigte Problematik wird in der vorliegenden Arbeit aufgegriffen und mit der Methodik der Trennfähigkeitsanalyse ein allgemein anwendbares Hilfsmittel zur kennzahlenbasierten und präventiven, d. h. entwicklungsbegleitenden Beurteilung der verwertungsgerechten Produktgestaltung entwickelt. Die Methodik basiert darauf, die Verwertungseignung anhand der Trennfähigkeit einer Werkstoffkombination hinsichtlich physikalischer Sortierprozesse zu beurteilen. Dazu wird der ideale Trennprozeß definiert, unter dessen Annahme das Trennverhalten einer Werkstoffkombination ausschließlich von den Merkmalsunterschieden bzw. -differenzen der Materialien bei den ausgewählten Trennparametern abhängig ist.

Zur Vereinfachung der Durchführung der Trennfähigkeitsanalyse wird ein rechnerbasiertes Hilfsmittel in Form eines internetgestützten Informationssystems vorgestellt. Die Funktionalität dieses Softwareprototyps umfaßt neben der Möglichkeit der Bewertung der Produktentwürfe die Bereitstellung recyclingrelevanter Materialinformationen. Dadurch werden die Voraussetzungen geschaffen, die recyclinggerechte Produktgestaltung auf einfache Weise in die Entwicklungsprozesse klein- und mittelständischer Unternehmen zu integrieren.

Abstract

Considering the continuous reduction of product-life-time, the efficient utilization of raw materials becomes more and more important. In order to protect natural resources it is necessary to prepare technical products in due time to their own end-of-life stage. A substantial aspect in this case is the preventive improvement of the recyclability of these products in the development process.

Because of missing personal and financial resources, especially small and medium enterprises have problems with integrating the recycling considerations in their development processes. This is due to unsuited methods to support the choice of recyclable combinations of material, missing recycling relevant information of material as well as a lack of communication between producer, supplier and recycling experts.

For solving these problems in this thesis the method "separation capability analysis" for a preventive improvement of the recyclability of technical products has been developed. This method can be used in the whole development process and enables the designer to make objective assessments with characteristic values from blueprints to products. The assessment is based on the ability of materials to be separated by recycling processes. Therefore, the ideal separation process is defined, which assumes that the separation of a material combination only depends on the difference of characteristic values of materials concerning the chosen separation parameters.

To simplify the application of the method an internet based information system has also been developed which allows users to assess product models and get recycling relevant material data. With the help of this software prototype suitable conditions are created to support small and medium enterprises to integrate recycling considerations into their development processes easily.

Inhaltsverzeichnis

1	<i>EINLEITUNG</i>	1
1.1	Ausgangssituation.....	1
1.2	Problemstellung und Zielsetzung der Arbeit.....	2
2	<i>UMWELTASPEKTE IM PRODUKTENTWICKLUNGSPROZEß</i>	4
2.1	Das Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz.....	4
2.2	Grundlagen und Begriffsbestimmungen des Recyclings.....	5
2.3	Die umwelt- und recyclinggerechte Produktgestaltung	8
2.3.1	Umweltgerechte Produktgestaltung.....	8
2.3.2	Recyclinggerechte Produktgestaltung	10
2.3.3	Unterschiede zwischen umwelt- und recyclinggerechter Produktgestaltung.....	14
2.4	Recyclingaspekte in den einzelnen Entwicklungsphasen.....	14
3	<i>METHODEN UND HILFSMITTEL ZUR BEURTEILUNG DER UMWELTASPEKTE IM PRODUKTENTWICKLUNGSPROZEß</i>	18
3.1	Methoden zur Beurteilung der umweltgerechten Produktgestaltung.....	18
3.1.1	Ganzheitliche Bilanzierungsverfahren.....	18
3.1.2	Ökologische Bewertungskennzahlen (Kennzahlensysteme).....	21
3.2	Methoden zur Beurteilung der recyclinggerechten Produktgestaltung	24
3.2.1	Bewertung mittels subjektiver Verfahren.....	26
3.2.2	Bewertung durch Kosten-/Erlösermittlung.....	29
3.2.3	Bewertung mit Produktkennzahlen	31
3.2.4	Zusammenfassende Betrachtung der Methoden zur Beurteilung der recyclinggerechten Produktgestaltung	32
3.3	Informationssysteme zur Unterstützung der umwelt- und recyclinggerechten Produktgestaltung.....	34
3.3.1	Informationssysteme zur umweltgerechten Produktgestaltung	34
3.3.2	Informationssysteme zur recyclinggerechten Produktgestaltung.....	36
3.3.3	Zusammenfassende Betrachtung der Informationssysteme.....	39
4	<i>PRÄZISIERUNG DER AUFGABENSTELLUNG UND ZIELSETZUNG</i>	41
4.1	Präzisierung der Aufgabenstellung.....	41
4.2	Präzisierung der Zielsetzung.....	42
5	<i>KENNZAHLENSYSTEM ZUR BEURTEILUNG DER VERWERTUNGSGERECHTEN PRODUKTGESTALTUNG</i>	44
5.1	Vorgehensweise bei der Konzeption des Bewertungsverfahrens.....	44
5.2	Analyse der Kriterien zur recyclinggerechten Werkstoffwahl.....	46
5.2.1	Verträglichkeit	46
5.2.2	Trennbarkeit.....	48
5.2.3	Ermittlung der werkstoffspezifischen Trennparameter.....	51

5.3	Konzeption der Trennfähigkeitsanalyse zur Beurteilung der verwertungsgerechten Produktgestaltung.....	55
5.3.1	Voraussetzungen, Annahmen	55
5.3.2	Bewertungsablauf.....	57
5.4	Die einparametrische Trennfähigkeitsanalyse.....	58
5.4.1	Erstellung der Merkmalslisten	58
5.4.2	Erstellung der Differenzlisten	60
5.4.3	Ermittlung der Häufigkeitsverteilung	62
5.5	Die mehrparametrische Trennfähigkeitsanalyse.....	67
5.5.1	Aufstellung der Trennfähigkeitsmatrix	67
5.5.2	Ermittlung der anzahlbezogenen Trennfähigkeitskennwerte.....	68
5.5.3	Ermittlung der massebezogenen Trennfähigkeitskennwerte.....	70
5.5.4	Ermittlung der maximal-minimalen Trennschärfe	72
5.6	Zusammenfassende Betrachtung der Trennfähigkeitsanalyse.....	73
6	DAS INTERNETGESTÜTZTE INFORMATIONSSYSTEM ZUR RECYCLINGGERECHTEN PRODUKTGESTALTUNG IQRIS	75
6.1	Vorgehensweise bei der Entwicklung des IQRIS.....	75
6.1.1	Der Softwareentwicklungsprozeß	75
6.1.2	Vorgehensweise bei der Entwicklung des IQRIS	77
6.2	Anforderungen und Merkmale eines Informationssystems	77
6.2.1	Internetbasiertes Informationssystem.....	77
6.2.2	Modularer Aufbau der Benutzeroberfläche	79
6.2.3	Informationssystem auf Basis einer objektorientierten Datenbank.....	80
6.3	Struktureller Aufbau des IQRIS	81
6.3.1	Produktstruktur	81
6.3.2	Werkstoffdatenbank.....	86
6.3.3	Verbindungstechnik.....	88
6.3.4	Kennzahlenbasierte Bewertung der demontagegerechten Produktgestaltung	89
6.3.5	Softwareentwurf des IQRIS	94
6.4	Umsetzung in einen Prototypen.....	95
6.4.1	Das Datenmodell des IQRIS	95
6.4.2	Gestaltung der Benutzeroberfläche	96
6.4.3	Konzeptioneller Entwurf (Systemarchitektur).....	98
7	RECYCLINGGERECHTE PRODUKTGESTALTUNG AM BEISPIEL VON KLIMA-, PRÜF- UND SIMULATIONSSCHRÄNKEN	100
7.1	Klima-, Prüf- und Simulationsschranke.....	100
7.2	Vorgehensweise bei der Bewertung	102
7.2.1	Startseite des IQRIS.....	102
7.2.2	Unterstützung der recyclinggerechten Werkstoffwahl	103
7.2.3	Eingabe des Produktmodells.....	105
7.2.4	Bewertung der Werkstoffwahl	108

7.2.5	Bewertung der Baustruktur	111
7.2.6	Bewertung der Verbindungstechnik	112
7.3	Auswertung der Bewertungsergebnisse	113
7.3.1	Schwerpunkte des Entwicklungsprojekts	113
7.3.2	Beurteilung der verwertungsgerechten Produktgestaltung	114
7.3.3	Beurteilung der demontagegerechten Produktgestaltung	117
7.4	Diskussion der Praxistauglichkeit der entwickelten Komponenten	119
8	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	121
9	LITERATURVERZEICHNIS	123
10	ANHANG	133

Abkürzungen

ABS	Acrylnitril-Butadien-Styrol-Polymerisate
ASA	Styrol-Acrylnitril mit Acrylester
ATROiD	Assessment Tool for Recycling Oriented Design (Technische Universität Braunschweig)
BAT	Biologischer Arbeitsstofftoleranzwert
BT	Bauteil
BUWAL	Schweizer Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft
BWI	Betriebswissenschaftliches Institut der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich
CAD	Computer Aided Design
CAP	Computer Aided Production
CAQ	Computer Aided Quality (Assurance)
Cd	Cadmium
CH ₄	Methan
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
COMMET	Constructing and design of machines and mechanisms using environment-friendly technology (Technische Universität Dresden)
CUMPAN	Computerunterstützte umweltorientierte Produktanalyse (Daimler Benz AG)
DBU	Deutsche Bundesstiftung Umwelt
DBV	Demontage-Bewertungsverfahren (Laboratorium für Werkzeugmaschinen und Betriebslehre an der Rheinisch Westfälischen Technischen Hochschule Aachen)
DDT	Dichlor-Diphenyl-Trichlorethan
DE	Demontageebene
DGK	Demontage-Gerechtheits-Kennzahl (Laboratorium für Werkzeugmaschinen und Betriebslehre an der Rheinisch Westfälischen Technischen Hochschule Aachen)
DIN	Deutsches Institut für Normung
DisPlay	Disassembly-Planing-System (Universität Erlangen)
DTU	Technical University of Denmark
EDIP	Environmental Design of Industrial Products (Technical University of Denmark)

EPDM	Ethylen-Propylen-Terpolymerisat
FCKW	Fluorchlorkohlenwasserstoff
GDK	Gefahrstoffdatenbank des Niedersächsischen Landesverwaltungsamts
GMT	Glas-Matten-Thermoplast
IPA	Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung
IQRIS	Internetgestütztes Informationssystem zur recyclinggerechten Produktgestaltung
IR	Infrarot
KMU	Klein- und mittelständische Unternehmen
KrW-/AbfG	Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz
LCA	Life-Cycle-Assessment
MAK	Maximale Arbeitsplatzkonzentration
MIK	Maximale Immissionskonzentration
mPET	milli-person equivalent (EDIP)
MTM	Methods-Time-Measurement
NE-Metalle	Nichteisenmetalle
NOH	National Reuse of Waste Research Program, Gemeinschaftsprojekt div. niederländischer Universitäten
NO _x	Stickoxid
OMT	Objekt Modeling Technique
OOPM	Objektorientiertes Produktmodell
P	Phosphor
PAH	polyzyklische aromatische Hydrokarbone
Pb	Blei
PBDE	Polybromierte Diphenylether
PBT	Polybutylenterephthalat (Linearer Polyester)
PC	Polycarbonat
PCB	Polychlorierte Biphenyle
PCN	Polychlorierte Naphthaline
PET	Polyethylenterephthalat (Linearer Polyester)
PGÖW	Projektgruppe "Ökologische Wirtschaft", Freiburger Öko-Institut
PMMA	Polyacrylat
PP	Polypropylen
PPM	Partialproduktmodell

PPS	Produktionsplanungs- und Steuerungssystem
PROFET	Produktfolgenabschätzung für Elektrowerkzeuge (Technische Universität Berlin)
PUR	Polyurethanelastomer
PVC	Polyvinylchlorid
RecyKon	Tool zur recyclinggerechten Konstruktion bestehend aus ReGrEd und DisPlay (Universität Erlangen)
ReGrEd	Recycling-Graph-Editor (Universität Erlangen)
REKON	Programmsystem zur Unterstützung einer Recyclinggerechten Konstruktion (Universität Karlsruhe)
RKF	Ressourcenkorrekturfaktor (Öko-Portfolio)
Sero-System	Sekundärrohstoffsystem
SO ₂	Schwefeldioxid
SPC	Statistische Prozeßlenkung
SRIM	Structural Reaction Injection Moulded (Harzinjektionsverfahren)
TA-Luft	Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft
TFA	Trennfähigkeitsanalyse
TOPROCO	Total Product Life Cost Estimation (Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung)
TPE-O	Thermoplastisches Elastomer auf Olefinbasis
TPE-U	Thermoplastisches Elastomer auf Urethanbasis
TRK	Technische Richtkonzentration
UBA	Umweltbundesamt
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VOC	Volatile Organic Compounds (flüchtige organische Verbindungen)
WHG	Wasserhaushaltsgesetz
WHO	World Health Organisation

Formelzeichen

Die in der vorliegenden Arbeit verwendeten Formelzeichen sind im folgenden mit ihrer Benennung und ihrer Erläuterung aufgeführt. Ein [*] bedeutet, die Einheit des Formelzeichens ist abhängig von dem ausgewählten Trennparameter, ein [-] bedeutet, das Formelzeichen ist dimensionslos.

a	[-]	Ausprägung des Beobachtungswerts
BV	[-]	Verbindung durch Bauteilkontakt
DP _m	[-]	mittlere Demontagepfadlänge
DP _{max}	[-]	maximale Demontagepfadlänge
DZ	[-]	Demontagezahl
$\Delta\xi$	[*]	Merkmalsunterschied, Merkmalsdifferenz
$\Delta\xi_j$	[*]	minimale Merkmalsunterschiede der Trennparameter
$\Delta\xi_{\text{norm},j}$	[-]	normierte minimale Merkmalsdifferenz
$\Delta\xi_{j,\text{WST}i}$	[*]	Beobachtungswert eines Werkstoffes
E _T	[-]	Ecart de Terra
FV	[-]	Funktionsrelevante Verbindung
G _i	[-]	absolute Häufigkeitssumme
H _i	[-]	Anteil der trennbaren Werkstoffe der i-ten Klasse
HV	[-]	Halteverbindung ohne Funktionsrelevanz
h _i	[-]	relative Häufigkeit
η_v	[-]	Verbindungsstrukturbeiwert
k	[-]	Anzahl der Ausprägungen
κ	[%]	Kornstreuung
KV	[-]	Halteverbindung mit Funktionsrelevanz
LV	[-]	lösbare Verbindung
λ	[W/mK]	Wärmeleitfähigkeit
$\lambda_{K\alpha}$	[nm]	Wellenlänge der K _{α} -Strahlung
λ_{IR}	[nm]	Wellenlänge der Infrarot-Strahlung
m _i	[kg]	Masse eines Werkstoffes
m _{obj}	[kg]	Gesamtmasse des Bewertungsobjekts
m _{sep}	[kg]	trennbare Masse
m _{sep,ξ_j}	[kg]	trennbare Masse pro Sortierverfahren
μ	[H/m]	Permeabilität
n	[-]	Anzahl

n_v	[-]	Anzahl der Verbindungen
N_i	[-]	Anzahl der trennbaren Werkstoffe der i-ten Klasse
n_i	[-]	absolute Häufigkeit
$n_i(\Delta\xi_{\text{norm},i})$	[-]	Trennfähigkeit einer Merkmalsdifferenz
n_{sep,ξ_j}	[-]	Anzahl der trennbaren Werkstoffe
NV	[-]	nicht lösbare Verbindung
Φ_i	[-]	relative Häufigkeitssumme
R_m	[kg]	Masseausbringung
ρ	[g/cm ³]	Dichte
ρ_{20}	[$\Omega\text{mm}^2/\text{m}$]	spezifischer elektrischer Widerstand
ST	[-]	Strukturtiefe
ST_m	[-]	mittlere Strukturtiefe
ST_{max}	[-]	maximale Strukturtiefe
T_{100,ξ_j}	[*]	maximal-minimale Trennschärfe der Sortierprozesse
$T_{m,\text{ges}}$	[-]	Trennfähigkeitsquote
T_{m,ξ_j}	[-]	Einzeltrennfähigkeitsquote
$T_{n,\text{ges}}$	[-]	Trennfähigkeitsindex
T_{n,ξ_j}	[-]	Einzeltrennfähigkeitsindex
T_S	[*]	Trennschärfe
T_{S,ξ_j}	[*]	Trennschärfen der eingesetzten Sortierprozesse
T_{WST}	[-]	Trennfähigkeit eines Werkstoffes
$T(\xi)$	[-]	Verteilungsfunktion eines Trennmerkmals
x_i	[-]	Beobachtungswert
χ	[1/ Ωm]	elektrische Leitfähigkeit
VG_i	[-]	Einzelverknüpfungsgrad
VG_m	[-]	mittlerer Komplexitätsgrad/Knotengrad
$VG_{m,\text{baum}}$	[-]	mittlere Komplexitätsgrad des Typs Baumstruktur
$VG_{m,\text{planar}}$	[-]	mittlere Komplexitätsgrad des Typs Planarstruktur
VT	[-]	Verbindungstechnikbeiwert
ξ	[*]	Trennparameter
ξ_T	[*]	Merkmalswert des Trennmerkmals
ξ_{WST}	[*]	Beobachtungswert eines Werkstoffes