

# **Kunden- und umweltorientierte Bewertung in der Produktentwicklung**

**Dem Fachbereich Maschinenbau  
der Universität Hannover  
zur Erlangung des akademischen Grades  
Doktor-Ingenieur  
vorgelegte Dissertation**

**von**

**Dipl.-Ing. Steffen Christian Sprenger**

**geboren am 02. September 1971  
in Kassel**

**2002**

**1. Referent:** Prof. Dr.-Ing. G. Redeker  
**2. Referent:** Prof. Dr.-Ing. H.-H. Gatzen  
**Vorsitzender:** Prof. Dr.-Ing. M. Gietzelt

**Tag der Promotion:** 08. Oktober 2002

Hannoversche Berichte zum Qualitätsmanagement

Band 10

**Steffen Christian Sprenger**

**Kunden- und umweltorientierte Bewertung  
in der Produktentwicklung**

Shaker Verlag  
Aachen 2002

Die Deutsche Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme

*Sprenger, Steffen Christian:*

Kunden- und umweltorientierte Bewertung in der Produktentwicklung/  
Steffen Christian Sprenger. Aachen: Shaker, 2002

(Hannoversche Berichte zum Qualitätsmanagement; Bd. 10)

Zugl.: Hannover, Univ., Diss., 2002

ISBN 3-8322-0827-5

Copyright Shaker Verlag 2002

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 3-8322-0827-5

ISSN 1435-6694

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

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

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • eMail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

# Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als Graduierte der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) am Institut für Qualitätssicherung der Universität Hannover. Die entwickelten Modelle und Systeme entstammen der Forschungsanstrengungen des Graduiertenkollegs 240 „Vernetzte Entwicklung umweltgerechter Produkte und Prozesse“ und dem Kooperationsprojekt der Firma RUMED mit dem Institut für Qualitätssicherung, welches von der Bundesstiftung Umwelt gefördert wurde.

Ich danke Herrn Prof. Dr.-Ing. Georg Redeker, dem Leiter des Instituts, für die hilfreichen Anregungen sowie für die eingehende Durchsicht der Ausarbeitungen. Durch seine Unterstützung meiner Tätigkeit am Institut wurde diese Arbeit erst ermöglicht. Herrn Prof. Dr.-Ing. Hans Heinrich Gatzen, dem Leiter des Instituts für Mikrotechnologie der Universität Hannover und des Graduiertenkollegs, danke ich für die Übernahme des Korreferats. Herrn Prof. Dr.-Ing. Gietzelt danke ich für die Übernahme des Vorsitzes meines Promotionsverfahrens sowie für das der Arbeit entgegengebrachte Interesse.

Allen Kolleginnen und Kollegen am Institut für Qualitätssicherung sowie im Graduiertenkolleg, die mich freundschaftlich, engagiert aber auch kritisch hinterfragt haben, danke ich für die gute Zusammenarbeit. Hervorheben möchte ich dabei Herrn Dipl.-Ing. Lars Keunecke, Herrn Dipl.-Ing. Ulrich Krick, Herrn Dipl.-Ing. Roy Sauer sowie Herrn Dipl.-Ing. Gunnar Wald. Weiterhin möchte ich mich bei Frau Ursula Gilke sowie Herrn Thomas Meyer bedanken, die für die notwendige organisatorische und technische Unterstützung gesorgt haben.

Meine besonderer Dank gilt dem Herrn Dipl.-Ing. Frank Podzelny, der mir bei der Präzisierung und Ausarbeitung meiner Arbeit sehr geholfen hat. Meinen fleißigen Korrekturlesern Tanja Schwerdtner und Simon Batzdorfer danke ich für die stilistischen Verbesserungen meiner Arbeit. Ebenso geht ein Dankeswort an die Mitglieder der Saalgemeinschaft Kette, die mich in der abschließenden „heißen“ Phase meiner Arbeit motiviert haben.

Meiner Frau Galina danke ich für die stete Unterstützung meiner Arbeit trotz der damit verbundenen langjährigen Trennung.

Danken möchte ich auch meinen Eltern, sie haben mir diesen Weg erst ermöglicht.

Stuttgart, im Oktober 2002

Steffen Christian Sprenger



## Kurzfassung

Durch den globalen Wettbewerb werden die Unternehmen gezwungen die Entwicklungszeiten weiter zu verkürzen. Unterschiedliche Aspekte erhöhen den Aufwand bei der Entwicklung neuer, umweltgerechter Produkte und führen durch zu enge Zeitvorgaben zu einer Einschränkung in der Bearbeitung umweltrelevanter Produkteigenschaften.

Die Lösung dieser Problemstellung ist durch eine ganzheitliche Unterstützung des umweltgerechten Entwicklungsprozesses möglich. Ziel der Arbeit war daher eine Methodik zu entwickeln, die eine Integration von Kundenwunsch und Umweltgerechtigkeit bietet und keinen Zusatzaufwand bei der Erzeugung von Produkten erbringt.

Die in dieser Arbeit vorgestellte Methodik der *Analytischen Produktgenerierung (APG)* stützt sich auf eine ablaufforientierte Vorgehensweise zur Erzeugung von umweltgerechten Produkten aus Bauteilkombinationen, die als Entscheidungshilfe bei der Wahl einer Produktalternative dienen. Ausgangspunkt der *APG* ist die Analyse der Kundenwünsche nach umweltrelevanten Kriterien, die in einer Befragung gewichtet werden. Dabei können beliebige umweltgerechte Kriterien genutzt werden, um die Flexibilität in der Anwendung zu gewährleisten. Das Problem der wechselseitigen Abhängigkeiten bzw. Beeinflussungen von Kriterien untereinander wird durch eine Veränderung der Kriteriengewichtung – der Kompensation – gelöst.

Durch die *APG* werden umweltrelevante Produktteile ausgewählt, die durch die Entwickler hinsichtlich der Kundenkriterien bewertet werden. Durch die Verknüpfung der kompensierten Gewichtungen mit den Produktteilbewertungen werden Produktkombinationen generiert, die dem Kundenwunsch entsprechen und hinsichtlich ihrer Umweltgerechtigkeit hierarchisiert sind.

Grundlage dieser Bewertung ist ein mathematisches Verfahren welches aus der Gruppe der Nutzwertanalysen entstammt und auf die Bedürfnisse der *APG* zugeschnitten ist. Das entwickelte Verfahren namens *Compensation Hierarchy Process* kombiniert das bestehende Verfahren des Analytical Hierarchy Process mit Elementen der französischen Entscheidungsphilosophie, um eine praxistaugliche Entscheidungsunterstützung zu erreichen.

Die Methodik wird im Praxiseinsatz mit Hilfe eines neuentwickelten Softwareprototyps (*ProGenT*), der zur Ausführung der mathematischen Berechnungen benötigt wird, bei einem Unternehmen aus dem medizinischen Apparatebau validiert.

### Stichworte:

Analytische Produktgenerierung, Compensation Hierarchy Process, Entscheidungsunterstützung, umweltgerechte Konstruktion, Analytical Hierarchy Process, ProGenT

# Abstract

By means of the global competition, companies are forced to further reduce the development times. Different aspects increase the expenditure for the development of new, ecologically beneficial products leading to a reduction in working on environmental relevant product features.

The solution of this problem definition is possible by comprehensively supporting the environmental friendly developmental process. For this reason, the intention of the paper was to develop a methodology providing an integration of customer request and environmental friendliness and not requiring additional expenditure of time for the generation of products.

The methodology of the Analytic Product Generation (Analytische Produktgenerierung) introduced in this paper is based on a operation orientated proceeding for the generation of environmental friendly products consisting of component part combinations being used as aid for choosing an alternative product. Starting point of the Analytic Product Generation (APG) is to analyse the customer requests according to environmental relevant criteria which are weighted in a survey. For this, any environmental friendly criteria may be used in order to ensure the flexibility in application. The problem of mutual dependence and/or influences of criteria one with another is solved by a change of weighting the criteria - the compensation.

By means of the APG, environmental relevant product parts are selected which are accessed by the developers regarding the customer criteria. By connecting the compensated weighting with the assessment of the product parts, product combinations are generated which correspond to the customer request and are classified regarding their environmental friendliness.

This assessment is based on a mathematical process which originates from the group of efficiency analyses and is tailor-made for the needs of the APG. The developed procedure called Compensation Hierarchy Process combines the existing procedure of the Analytic Hierarchy Process with elements of the French decision philosophy in order to achieve a decision support which is practically applicable. In practice use, the methodology is validated in a company working on medical machine-making with the help of a newly developed software prototype (ProGenT) being necessary for performing the mathematical calculations.

# Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung und Zielsetzung.....	1
1.1 Einleitung.....	1
1.1.1 Ausgangssituation.....	1
1.1.1.1 Stufen der Produktentwicklung.....	2
1.1.1.2 Fokusverlagerung bei der Umweltbetrachtung.....	3
1.1.2 Problemstellung.....	5
1.2 Zielsetzung.....	10
1.2.1 Ziel der Arbeit.....	10
1.2.2 Vorgehensweise.....	11
1.2.3 Abgrenzung.....	12
2. Stand der Kenntnisse .....	14
2.1 Umweltgerechte Produktentwicklung .....	14
2.1.1 Forderungen.....	14
2.1.2 Zielkonflikte .....	15
2.1.3 Der umweltgerechte Entwicklungsprozess .....	16
2.1.3.1 Festlegung der Umweltauswirkungen.....	17
2.1.3.2 Hilfsmittel der umweltgerechten Produktentwicklung .....	18
2.1.3.3 Einsatz im Life-Cycle.....	19
2.2 Methoden zur Unterstützung der umweltgerechten Produktentwicklung.....	20
2.2.1 Wissensmanagementsysteme .....	21
2.2.1.1 Informationssysteme.....	21
2.2.1.2 Beratungssysteme.....	22
2.2.1.3 Potenziale der Wissensmanagementsysteme.....	22
2.2.2 Bewertungssysteme.....	23
2.2.2.1 öko-effektive Produktentwicklung.....	23
2.2.2.2 ATROID - Assessment Tool for Recycling Oriented Design .....	24
2.2.2.3 REKON - Recyclinggerechte Konstruktion .....	25
2.2.2.4 RecyKon.....	25
2.2.2.5 ECODESIGN.....	26
2.2.2.6 COMMET .....	27
2.2.2.7 Recyclinginformationssystem IQRIS.....	29
2.2.2.8 Potenziale der Bewertungssysteme .....	30
2.3 Entscheidungsunterstützende Systeme (EUS).....	30
2.3.1 Multikriterielle Entscheidungssysteme.....	30
2.3.1.1 Nutzwertanalyse .....	31

2.3.1.2	Analytic Hierachy Process .....	32
2.3.1.3	Multiattributive Nutzentheorie.....	36
2.3.1.4	ELECTRE-Verfahren .....	37
2.3.1.5	PROMETHEE.....	38
2.3.1.6	ARGUS.....	39
2.3.1.7	Potenziale der multikriteriellen Entscheidungssysteme .....	40
2.3.2	Value Engineering .....	41
2.3.2.1	Value Engineering Analysis.....	41
2.3.2.2	TRIZ.....	42
2.3.2.3	Potenziale der Value Analysis und TRIZ .....	47
2.3.3	Fazit der Betrachtung.....	48
3.	Analytische Produktgenerierung (APG).....	50
3.1	Funktionsweise der APG .....	51
3.2	Ablauf der Analytischen Produktgenerierung.....	53
3.2.1	Kundenbefragung.....	57
3.2.1.1	Hierarchisierende Befragung.....	57
3.2.1.2	Auswertung der Kundenbedürfnisse.....	58
3.2.2	Kompensation von Kriteriengewichtungen .....	59
3.2.2.1	Korrelation von Kriterien .....	59
3.2.2.2	Kompensation .....	61
3.2.3	Auswahl der umweltgerechten Kriterien .....	61
3.2.3.1	Integration allgemeiner Kriterien .....	62
3.2.3.2	Auswirkung auf den Bewertungsumfang .....	63
3.2.3.3	Kriterieneinschränkung nach Kompensation .....	63
3.2.3.4	Überprüfung der gewählten Kriterien .....	64
3.3	Produktauswahl .....	64
3.3.1	Auswahl der zu alternierenden Produktteile.....	66
3.3.1.1	Mind Mapping.....	66
3.3.1.2	Modifizierte Wertanalyse.....	68
3.3.1.3	Innovationsanalyse .....	69
3.3.1.4	Marktanalyse.....	70
3.3.2	Bewertung nach technischen Kennzahlen .....	72
3.3.2.1	Subjektive Bewertung .....	72
3.3.2.2	Objektive Bewertung .....	73
3.3.2.3	Auswahl von Bewertungskennzahlen .....	74
3.4	Compensation Hierarchy Process .....	75
3.4.1	Vorgehensweise des Compensation Hierarchy Process .....	75
3.4.2	Mathematische Grundlagen.....	77
3.4.2.1	Theoretische Grundlagen der Matrizenrechnung.....	77
3.4.2.2	Lösung der Inkonsistenzproblematik .....	78

3.4.3	Verfahren der Kompensation .....	81
3.4.3.1	Ablauf der Kompensation.....	82
3.4.3.2	Beispiel einer Kompensation .....	84
3.4.4	Bewertung der alternativen Produktteile .....	85
3.4.4.1	Paarweiser Vergleich .....	85
3.4.4.2	Berechnung der Produktbewertungen.....	87
3.4.5	Hierarchische Liste .....	90
3.4.5.1	Aufbau der Liste.....	91
3.4.5.2	Interpretation der Ergebnisse .....	93
3.4.6	Zusammenfassung der APG.....	95
4.	Praktische Umsetzung der APG.....	96
4.1	ProGenT - Product Generation Tool .....	96
4.1.1	Forderungen an ProGenT.....	96
4.1.2	Funktionsweise von ProGenT.....	97
4.1.2.1	Vorgehensweise von ProGenT .....	98
4.1.2.2	Zusammenfassung der Softwareeigenschaften .....	102
4.2	Beispielanwendung der APG.....	103
4.2.1	Kundenforderungen.....	103
4.2.1.1	Diskussion der Umfrageergebnisse .....	104
4.2.2	Saatgutprüfgerät Serie 5000 .....	105
4.2.2.1	Innovationsanalyse .....	107
4.2.2.2	Auswahl der Bauteile.....	108
4.2.2.3	Kompensation der Kriterien .....	110
4.2.2.4	Bewertung der Bauteile .....	111
4.2.2.5	Hierarchische Liste .....	111
4.2.3	Fazit der praktischen Umsetzung .....	112
5.	Zusammenfassung und Ausblick .....	113
6.	Quellenverzeichnis.....	115
6.1	Literatur.....	115
6.2	Webadressen.....	128
7.	Anhang.....	130
7.1	Ablauf der Analytischen Produktgenerierung.....	130
7.2	ProGenT: AHP-Matrizen .....	131
7.3	Auswertung der hierarchisierenden Bewertung.....	132

# Symbolliste

## Abkürzungen und Akronyme

Abk.	Abkürzung
AHP	Analytic Hierarchy Process
APG	Analytische Produktgenerierung
ARGUS	Achieving Respect for Grades by Using ordinal Skales
ATROID	Assessment Tool for Recycling Oriented Design
CAD	Computer Aided Design
CE	Concurrent Engineering
CHP	Compensation Hierarchy Process
CM	Conjoin Measurement
COMMET	Construction and design of machines and mechanisms using environmental-friendly technology
CPW	Combined Preference with Weights
Data Mining	Computergestützte Suchen von Daten und Zusammenhängen in vernetzten Datenbanken
DBU	Deutsche Bundesstiftung Umwelt
DIN	Deutsches Institut für Normung
ECODESIGN	Verbund zum umweltgerechten Konstruieren
ECM	ECODESIGN-Checklisten-Methode
EG	Europäische Gemeinschaft
ELECTRE	ELimination Et Choice Translation REALity
EWG	alte Abk. für EG - siehe dort
Excel	Tabellenkalkulation von Microsoft®
FEM	Finite Elemente Methode / Finite Elements Method
FMEA	Fehler-Möglichkeits- und Einfluss-Analyse / Failure Mode and Effect Analysis
GUI	Graphical User Interface
IQRIS	Internetgestütztes Informationssystem
ISO	International Standard Organization
ISTA	International Seed Testing Associaton
KMU	Kleine und mittlere Unternehmen
KrW-/AbfG	Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz
LCA	Life Cycle Assessment - Ökobilanz
MADA	Multiattributive Decision Aid
MADM	Multiattributive Decision Making-Methods

MTM	Mean Time Measurement
NWA	Nutzwertanalyse
Office Suite	Programmpaket für Büroanwendungen von Microsoft®
OLAP	On-Line Analytical Processing
ProGenT	Product Generation Tool
PROMETHEE	Preference Ranking Organisation Method for Enrichment Evaluations
TQM	Total Quality Management
QM	Qualitätsmanagement / Quality Management
RecyKon	Tool zur recyclinggerechten Konstruktion bestehend aus ReGrEd und DisPlay
REKON	Recyclinggerechte Konstruktion
RUMED	Rubarth Apparatebau GmbH
SMART	Simple Multi-Attribute Rating Technique
UBA	Umweltbundesamt
UM	Umweltmanagement / Environmental Management
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
Visual Basic	Programmiersprache für Microsoft®-Programme
VR	Virtual Reality
WEEE	Waste from Electrical and Electronic Equipment

## Formelzeichen

### AHP

$A_k$	Ergebnismatrix in Bezug auf das Bewertungskriterium
$a_{ij}$	Element der Matrix A
$w_i$	Wert der Alternative i
$w_j$	Wert der Alternative j

### ARGUS

$f_i$	Kriterienbedeutung
$g_a$	kumulierte Kriterienbedeutung für Alternative a
$h_b$	kumulierte Kriterienbedeutung für Alternative b

### CHP

$a_{ij}$	Element der quadratischen Matrix A
$b$	Spaltenvektor
$C$	Konsistenzindex
$\vec{C}$	Vektor der kompensierten Kundengewichtung
$\vec{K}$	Vektor der Kundengewichtung
$k_i$	algebraische Vielfachheit
$n$	Anzahl der paarweisen Vergleiche
$u$	Eigenvektor zur Berechnung der Konsistenz
$u_n$	Wert des Eigenvektors u
$w_i$	Wert der Alternative i
$w_j$	Wert der Alternative j
$\alpha$	Alpha-Kriterium
$\alpha'$	kompensiertes Alpha-Kriterium
$\beta$	Beta-Kriterium
$\beta'$	kompensiertes Beta-Kriterium
$\chi$	Chi-Kriterium
$\chi'$	kompensiertes Chi-Kriterium
$\kappa$	Gewichtungsfaktor
$\lambda$	Eigenwert der Matrix A

### ELECTRE

$c_j$	Glaubwürdigkeit eines Kriteriums
$d$	Dominanzwert
$p_j$	Präferenzschwelle
$q_j$	Indifferenzschwelle

NWA

$NG(A)$	Gesamtnutzen einer Alternative
$NT_i(A)$	Einzelnutzen einer Alternative

PROMETHEE

$d_j$	Präferenz
$f_j$	Bewertungskriterium
$k_j$	normalisierte Kriteriengewichte
$P_j$	Präferenzfunktion
$p$	Präferenzschwelle
$q$	Präferenzschwelle
$\pi(a, b)$	Präferenzindex

SMART

$1 + \epsilon$	Progressionsfaktor
$e_0$	Minimal- und Maximalausprägung der Progression
$R_{max}$	Maximalwert
$R_{min}$	Minimalwert
$v$	Klassennummer

TRIZ

$NF$	nützliche Funktion
$PNF$	primäre nützliche Funktion
$PSF$	primäre schädliche Funktion
$SF$	schädliche Funktion
$SS$	Supersystem

Value Engineering Analysis

$C$	Cost/Kosten
$F$	useful Function/nützliche Funktion
$V$	Value/Wert