

# **Ein Cognitive-Engineering-Ansatz zur Unterstützung der Produktentwicklung**

Von der Fakultät für Maschinenwesen  
der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen  
zur Erlangung des akademischen Grades  
eines Doktors der Ingenieurwissenschaften  
genehmigte Dissertation

vorgelegt von  
Dipl.-Ing. Ludger Schmidt  
aus Süchteln, jetzt Viersen

Berichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt.-Ing. Holger Luczak  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jörg Feldhusen  
Priv.-Doz. Dr.-Ing. Johannes Springer

Tag der mündlichen Prüfung: 27. Mai 2004

D 82 (Diss. RWTH Aachen)



Schriftenreihe Rationalisierung und Humanisierung

Band 62

**Ludger Schmidt**

**Ein Cognitive-Engineering-Ansatz  
zur Unterstützung der Produktentwicklung**

D 82 (Diss. RWTH Aachen)

Shaker Verlag  
Aachen 2004

**Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek**

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Zugl.: Aachen, Techn. Hochsch., Diss., 2004

Copyright Shaker Verlag 2004

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

Printed in Germany.

ISBN 3-8322-2911-6

ISSN 1434-8519

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)

*Herzlich danken möchte ich allen, die diese „Produktentwicklung“ ermöglicht haben, indem sie mir mit Geduld und Verständnis die nötigen Freiräume gewährt, mich tatkräftig unterstützt und positiven Einfluss auf die Entstehung genommen haben.*



# Vorwort

Die Entwicklung von Produkten wird heute in vielfältiger Art und Weise mit rechnerbasierten Werkzeugen unterstützt. Mit der modernen Informationstechnik wurde die Voraussetzung geschaffen, auch eine Fülle miteinander vernetzter Daten komplexer technischer Produkte beherrschen zu können.

Versteht man Konstruieren als das Vorausdenken eines zu schaffenden technischen Objektes unter Berücksichtigung vorgegebener Nebenbedingungen, dann sind für solche Arbeitsprozesse die kognitive Leistungsfähigkeit, Flexibilität und Kreativität zentrale Anforderungen. Trotz der informationstechnischen Weiterentwicklung bleibt daher der Mensch auch zukünftig unverzichtbares Element eines jeden Produktentwicklungsprozesses.

Der in dieser Publikation vorgestellte Gestaltungsansatz greift die Schwachpunkte bisheriger Konzepte auf und orientiert sich an der Rolle des Menschen als interaktiver Problemlöser in der Produktentwicklung. Dabei wird das Ziel verfolgt, zum einen durch eine aufgabenangemessene Wissensrepräsentation die menschliche Informationsverarbeitung zu unterstützen, zum anderen aber auch Aspekten kooperativer Tätigkeitszusammenhänge im interdisziplinären Produktentwicklungsteam im Sinne des Simultaneous Engineering gerecht zu werden.

Der Autor nutzt dazu Erkenntnisse der Kognitionsergonomie, der klassischen Konstruktionsmethodik sowie Ergebnisse empirischer Untersuchungen von Konstruktionsprozessen und setzt sich kritisch mit Expertensystemen und Konzepten der Künstlichen Intelligenz auseinander. Die als Ergebnis abgeleitete Architektur eines Konstruktionssystems und der aufgabenorientierten Wissensrepräsentation ist in zwei Gestaltungszyklen Gegenstand der prototypischen Umsetzung. Mit der umfassenden Evaluation durch zahlreiche Produktentwicklungsexperten unterschiedlichen fachlichen Hintergrunds liefert der Verfasser den Nachweis der Tragfähigkeit des gewählten Cognitive-Engineering-Ansatzes.

Die erreichte kognitiv-ergonomische Systemgestaltung verbindet somit Ergebnisse arbeitswissenschaftlicher Forschung mit den anwendungsorientierten Anforderungen der Praxis für eine interdisziplinäre Zusammenarbeit in der Produktentwicklung.

*Holger Luczak*



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1	Problemstellung und Zielsetzung.....	2
1.2	Vorgehensweise .....	3
<b>2</b>	<b>Grundlagen</b> .....	<b>7</b>
2.1	Anforderungen an Benutzungskomponenten rechnerunter- stützter und produktmodellierender Konstruktionssysteme .....	7
2.2	Wahrnehmungs- und Kognitionsergonomie .....	9
2.3	Aufgaben und systematisches Problemlösen .....	10
2.4	Kognitive Strategien .....	15
2.5	Ebenenmodelle menschlicher Informationsverarbeitung und Handlung.....	21
2.6	Mentale Modelle und kognitive Systemgestaltung.....	24
2.7	Anforderungen an die Wissensrepräsentation .....	31
2.8	Modelle und Applikationen zur Wissensrepräsentation .....	35
2.8.1	Analoge (direkte) Repräsentation .....	38
2.8.2	Natürliche Sprache.....	39
2.8.3	Produktionssysteme .....	40
2.8.4	Fuzzy-Set-Theorie.....	42
2.8.5	Frames und Skripte .....	46
2.8.6	Assoziative semantische Netze .....	49
2.8.7	Klassifizierende (taxonomische) semantische Netze.....	51
2.8.8	Abstraktionshierarchien .....	53
2.9	Bewertung und Beurteilung .....	56
<b>3</b>	<b>Entwicklung einer Referenzstruktur</b> .....	<b>61</b>
3.1	Individualperspektive.....	61
3.1.1	Bezug zwischen Problemlösen in der Konstruktion und der Abstraktionshierarchie .....	61
3.1.2	Technische Funktionserfüllung und Partialmodelle .....	67

---

3.1.3	Zusammenfassung bezüglich Referenzstruktur für die Individualperspektive .....	70
3.2	Mehrpersonenbetrachtung .....	71
3.2.1	Nutzung qualifikationsbezogener Abstraktionshierarchien .....	73
3.2.2	Shared Mental Models und Awareness .....	76
3.2.3	Zusammenfassung bezüglich Referenzstruktur für die Mehrpersonenbetrachtung .....	80
<b>4</b>	<b>Anwendung und Evaluation .....</b>	<b>83</b>
4.1	Individualperspektive .....	83
4.1.1	Ableitung eines Benutzungsszenarios .....	83
4.1.2	Prototypische Realisierung .....	84
4.1.3	Vorgehensweise und Methoden .....	88
4.1.4	Ergebnisse und Diskussion .....	91
4.2	Mehrpersonenbetrachtung .....	101
4.2.1	Empirische Erhebung und Modellierung einer Konstruktionsaufgabe .....	101
4.2.2	Ableitung eines Benutzungsszenarios .....	104
4.2.3	Prototypische Realisierung .....	106
4.2.4	Vorgehensweise und Methoden .....	110
4.2.5	Ergebnisse und Diskussion .....	117
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>135</b>
<b>6</b>	<b>Literatur .....</b>	<b>141</b>
6.1	Allgemeine Quellen .....	141
6.2	Normen und Richtlinien .....	168
<b>7</b>	<b>Anhang .....</b>	<b>169</b>
7.1	Fragebogen (Individualperspektive) .....	169
7.2	Auswertung des Fragebogens (Individualperspektive) .....	176
7.3	Ausschnitt aus erhobenem Entwicklungsprozess .....	196

---

7.4	Unterlagen für die Erhebung der mentalen Modelle .....	200
7.4.1	Konstruktion Mechanik .....	200
7.4.2	Elektrotechnische Entwicklung .....	202
7.4.2.1	Textvariante für Versuchspersonen .....	202
7.4.2.2	Textvariante für Referenzpersonen .....	203
7.4.2.3	Erläuternde Abbildungen.....	203
7.4.3	Marketing und Vertrieb.....	205
7.4.3.1	Textvariante für Versuchspersonen .....	205
7.4.3.2	Textvariante für Referenzpersonen .....	206
7.4.3.3	Erläuternde Abbildungen.....	206
7.5	Syntax für Monte-Carlo-Studien.....	208
7.6	Fragebogen (Mehrpersonenbetrachtung) .....	209
7.6.1	Konstruktion Mechanik .....	209
7.6.2	Elektrotechnische Entwicklung .....	211
7.6.3	Marketing und Vertrieb.....	212
7.7	Auswertung des Fragebogens (Mehrpersonenbetrachtung) .....	213

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Stufenmodell menschlicher Informationsverarbeitung.....	9
Abbildung 2: TOTE-Grundeinheit zur Modellierung von Denk- und Handlungseinheiten.....	12
Abbildung 3: Grundprozesse bei einfachen Konstruktionsaufgaben und komplexeren Problemen .....	13
Abbildung 4: Regulationsebenenmodell nach Rasmussen .....	21
Abbildung 5: Regulationsebenenmodell nach Hacker.....	22
Abbildung 6: Modell kognitiver Bänder nach Newell.....	23
Abbildung 7: Interne und externe Repräsentationen.....	28
Abbildung 8: Mentales Modell des Konstrukteurs, des Benutzers und Systembild.....	30
Abbildung 9: Architektur eines Expertensystems.....	36
Abbildung 10: Architektur des Konstruktionssystems .....	38
Abbildung 11: Fuzzifizierung mit Hilfe Z-, $\Pi$ - und S-förmiger Standardzugehörigkeitsfunktionen .....	44
Abbildung 12: Defuzzifizierungsprinzipien mit der Mean-of-Maximum-, Center-of-Maximum- und Center-of-Area-Methode.....	45
Abbildung 13: Schematische Darstellung eines Frames.....	47
Abbildung 14: Skript für Restaurantbesuch.....	48
Abbildung 15: Assoziatives semantisches Netz.....	49
Abbildung 16: Beispiel für ein semantisches Netz .....	52
Abbildung 17: Abstraktionshierarchie nach Rasmussen .....	53
Abbildung 18: Bewertung und Beurteilung der Wissensrepräsentationsarten.....	59
Abbildung 19: Unterstützungsformen, Konstruktionsphasen und Hilfefunktionen .....	62
Abbildung 20: Generelles Vorgehen beim Konstruieren nach VDI 2221 und Beispiele für zugeordnete Repräsentationsformen .....	64
Abbildung 21: Anwendung der Abstraktionshierarchie auf Betrachtungsweisen in der Konstruktionslehre .....	67
Abbildung 22: Modell der technischen Funktionserfüllung und exemplarische Partialmodelle .....	69

Abbildung 23: Gemeinsame mentale Modelle und Betrachtungsebenen von Arbeitsprozessen .....	78
Abbildung 24: Exemplarische Verknüpfung benutzergruppenspezifischer Abstraktionshierarchien über einen Kooperationskanal .....	80
Abbildung 25: Exemplarische Benutzungsschnittstelle des Prototyps: Funktionsstruktur .....	86
Abbildung 26: Exemplarische Benutzungsschnittstelle des Prototyps: Prinzipskizze .....	87
Abbildung 27: Exemplarische Benutzungsschnittstelle des Prototyps: Baustuktur .....	87
Abbildung 28: Zustandsübergangsdiagramm für einen Ausschnitt aus der Teilaufgabe „Lagerauslegung“ .....	88
Abbildung 29: Versuchsanordnung .....	90
Abbildung 30: Medien für den Informationszugriff .....	91
Abbildung 31: Ergebnis der Frage: „Was halten Sie von der im Prototyp vorgestellten Struktur hinsichtlich der Unterscheidung verschiedener Abstraktionsstufen?“ .....	92
Abbildung 32: Ergebnis der Frage: „Was halten Sie von der im Prototyp vorgestellten Struktur hinsichtlich der Unterscheidung verschiedener Zerlegungsstufen?“ .....	93
Abbildung 33: Gesamtbewertung des vorgestellten Konzepts .....	93
Abbildung 34: Ergebnis der Frage: „Wie beurteilen Sie die Verbindung zwischen den Objekten auf der Arbeitsfläche und den zugeordneten Informationen?“ .....	94
Abbildung 35: Zuordnung der 16 Zustände, die für die Videoanalyse unterschieden wurden, zu den im Prototyp realisierten Abstraktions- und Zerlegungsstufen .....	95
Abbildung 36: Sequenzen der Versuchspersonen .....	95
Abbildung 37: Levenshtein-Distanzmatrix für Sequenzen der Versuchspersonen .....	96
Abbildung 38: Matrix der Sequenzlängenunterschiede zwischen den Versuchspersonen .....	97
Abbildung 39: Rangreihe der Sequenzen entsprechend der in Spalte vier dargestellten Summe der quadrierten Levenshtein-Distanzen $\sum LD^2$ einer Sequenz gegenüber den übrigen Sequenzen .....	97
Abbildung 40: Dendrogramm der hierarchischen Clusteranalyse .....	99

---

Abbildung 41: Struktogramm der hierarchischen Clusteranalyse .....	99
Abbildung 42: Ereignisorientierte Modellierung kooperativer Arbeitsprozesse über UML-Aktivitätsdiagramm .....	103
Abbildung 43: Grundelemente und zeitliche Ablauf-Abstraktion schwach strukturierter oder wenig determinierter Arbeits- prozesse .....	104
Abbildung 44: Wissensrepräsentation mit Abstraktionshierarchien für SE-Kernteams .....	105
Abbildung 45: Exemplarische Benutzungsschnittstelle des Prototyps mit Landkarte und selektierbarem Teilbereich „Einspül- schale“ des Subsystems „Bedienelemente“ .....	108
Abbildung 46: Kooperationsanfrage an den für die Bedienblenden- baugruppe zuständigen Konstrukteur .....	109
Abbildung 47: Verankerung der Kooperationsanfrage im Bereich der elektrotechnischen Entwicklung .....	109
Abbildung 48: Möglichkeit der wechselseitigen Exploration von Arbeitsbereichen .....	110
Abbildung 49: Einordnung der jeweils zwölf exemplarischen Konzepte in die drei anhand der Referenzstruktur systematisierten Wissensdomänen .....	116
Abbildung 50: Gruppenbezogene Rangkorrelation der Wissensnähe- Matrizen .....	117
Abbildung 51: Graphische Darstellung der reziproken Anpassungsgüte gegenüber der Konfigurationsdimensionalität .....	120
Abbildung 52: Ergebnisse der Monte-Carlo-Studien .....	123
Abbildung 53: Wert der Verlustfunktion L für die gewichtete MDS und seine Beurteilung anhand des jeweiligen Rückweisungspunktes aus den Monte-Carlo-Studien .....	124
Abbildung 54: Gewichtete MDS für alle 32 Versuchspersonen hinsichtlich der Stimuli für die Mechanik-Konstruktion .....	125
Abbildung 55: Gewichtete MDS für alle 32 Versuchs- und 11 Referenzpersonen hinsichtlich der Stimuli für die elektrotechnische Entwicklung .....	127
Abbildung 56: Gewichtete MDS für alle 32 Versuchs- und 11 Referenzpersonen hinsichtlich der Stimuli für Marketing und Vertrieb .....	129

---

Abbildung 57: Von den Versuchspersonen aus der Mechanik- Konstruktion aufgebaute Kooperationskanäle.....	131
---	-----