

Modularisierung komplexer Produkte anhand technischer und betriebswirtschaftlicher Komponentenkopplungen

Vom Promotionsausschuss der
Technischen Universität Hamburg-Harburg
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieurin
genehmigte Dissertation

von
Birgit Koeppen
aus Berlin

2007

1. Gutachter: Prof. Dr. rer. pol. Wolfgang Kersten
Institut für Logistik und Unternehmensführung
Technische Universität Hamburg-Harburg
2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Dieter Krause
Institut für Produktentwicklung und Konstruktionstechnik
Technische Universität Hamburg-Harburg

Tag der mündlichen Prüfung: 27.11.2007

Produktentwicklung

Birgit Koeppen

**Modularisierung komplexer Produkte
anhand technischer und betriebswirtschaftlicher
Komponentenkopplungen**

Shaker Verlag
Aachen 2008

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

Zugl.: Hamburg-Harburg, Techn. Univ., Diss., 2007

Copyright Shaker Verlag 2008

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-6979-1

ISSN 1866-1742

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

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

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Logistik und Unternehmensführung der Technischen Universität Hamburg-Harburg.

Bei allen, die mich bei der Erstellung meiner Arbeit direkt oder indirekt unterstützt haben, möchte ich mich herzlich bedanken. Mein erster Dank geht an Herrn Prof. Dr. rer. pol. Wolfgang Kersten für die Betreuung meiner Arbeit und für das große Vertrauen, mit dem mir akademische Freiräume zugestanden und Verantwortung übertragen wurden. Herrn Prof. Dr.-Ing. Dieter Krause und Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Christian Nedeß danke ich für die Übernahme des Korreferats bzw. des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Bei meinen Kollegen am Institut für Logistik und Unternehmensführung bedanke ich mich herzlich für die gute Zusammenarbeit und angenehme Arbeitsatmosphäre. Insbesondere erwähnen möchte ich hier meine langjährigen Kollegen Nizar Abdelkafi, Jan Koch, Christian Meyer, Marc Winter und Thomas Zink. Außerdem möchte ich Jendrik Schmidt danken, der im Rahmen seiner Studienarbeit meine Arbeit unterstützt hat.

Die Anwendung der von mir entwickelten Methodik erfolgte in einer Fallstudie bei der Airbus Deutschland GmbH. Für diese Gelegenheit und die Unterstützung bei der Durchführung möchte ich Herrn Dipl.-Ing. Martin Schimmöller und seinem Team Dank sagen.

Mein ganz besonderer Dank gilt meiner Familie, ohne deren Unterstützung diese Arbeit nicht möglich gewesen wäre.

Hamburg im Dezember 2007

Birgit Koeppen

Inhaltsverzeichnis

ABKÜRZUNGEN	V
FORMELZEICHEN.....	VIII
BILD- UND TABELLENVERZEICHNIS	XV
1. EINLEITUNG.....	1
1.1 Ausgangssituation	2
1.2 Zielsetzung	3
1.3 Aufbau der Arbeit.....	4
2. GRUNDLAGEN DER MODULARISIERUNG.....	7
2.1 Definition und Abgrenzung verwendeter Begriffe	7
2.1.1 Komponente	7
2.1.2 Kopplungen	8
2.1.3 Komplexität.....	9
2.1.4 Modul / Modularisierung	10
2.1.5 Modultreiber / Modularisierungsziel	13
2.1.6 Design Structure Matrix	13
2.2 Einordnung der Modularisierung in das Komplexitätsmanagement.....	14
2.3 Modularisierung technischer Produkte	19
2.4 Abhängigkeiten zwischen dem Wertschöpfungsprozess eines Produkts und dessen Modularisierung.....	21
2.5 Generelle Vorgehensweise bei einer Modularisierung	28
2.5.1 Schritt 1: Zerlegung des Produkts in Komponenten	28
2.5.2 Schritt 2: Abbildung der Kopplungen zwischen den Komponenten	29
2.5.3 Schritt 3: Bildung von Modulen auf Grundlage der Kopplungen	30
3. STAND DER WISSENSCHAFT: MODULARISIERUNGSMETHODEN	33
3.1 Methoden zur Modularisierung von Produkten	34
3.1.1 Methoden auf Basis von Funktionsstrukturen	34
3.1.2 Methoden auf Basis von Kopplungsmatrizen	39
3.2 Vergleich der Modularisierungsmethoden	51
3.3 Forschungsbedarf für eine Methodik zur Modularisierung	55
4. METHODIK ZUR MODULARISIERUNG KOMPLEXER PRODUKTE.....	57
4.1 Ziel der Methodik	57
4.2 Voraussetzungen für die Anwendung der Methodik	59
4.3 Vorgehensweise bei der Anwendung der Methodik.....	59
4.3.1 Schritt 2a: Identifikation der wesentlichen Modultreiber	60

4.3.2	Schritt 2b: Abbildung der Kopplungen für jeden Modultreiber	62
4.3.3	Schritt 2c: Zusammenfassung der Kopplungswerte zu einem Gesamtwert.....	65
4.3.4	Vorgehensweise bei der Analyse der Ergebnisse	67
4.4	Analyse und Kategorisierung verschiedener Kopplungsarten	70
4.4.1	Modultreiber aus der Phase „Konzeptentwicklung“	74
4.4.2	Modultreiber aus der Phase „Detailentwicklung“	77
4.4.3	Modultreiber aus der Phase „Beschaffung“	78
4.4.4	Modultreiber aus der Phase „Produktion“	79
4.4.5	Modultreiber aus der Phase „Logistik“	80
4.4.6	Modultreiber aus der Phase „Vertrieb“	81
4.4.7	Modultreiber aus der Phase „After Sales“	81
4.5	Implementation der Methodik in einem Software-Programm	82
4.6	Ablauf der Methodikanwendung in einem Unternehmen	86

5.	SYSTEMATISCHE ABBILDUNG VON KOPPLUNGEN ZWISCHEN	
	KOMPONENTEN	89
5.1	Abbildungsfunktionen der Phase „Konzeptentwicklung“	91
5.1.1	Geometrische Abhängigkeiten.....	92
5.1.1.1	Größe.....	92
5.1.1.2	Form	95
5.1.1.3	Lage.....	98
5.1.1.4	Art	101
5.1.2	Energieübertragung.....	102
5.1.2.1	Thermische Energie	103
5.1.2.2	Mechanische Bewegungsenergie	105
5.1.2.3	Mechanische Ruheenergie.....	107
5.1.2.4	Energie elektrischer Ströme	108
5.1.2.5	Energie elektromagnetischer Strahlung und Felder	110
5.1.3	Materieübertragung	112
5.1.4	Informationsübertragung.....	113
5.1.4.1	Inhalt der Information.....	114
5.1.4.2	Übertragungsfrequenz.....	117
5.2	Abbildungsfunktionen der Phase „Detailentwicklung“	118
5.2.1	Zeitliche Stabilität	118
5.2.2	Organisation der Produktentwicklung	121
5.2.3	Entwicklungsrisiko	123
5.3	Abbildungsfunktionen der Phase „Beschaffung“	125
5.3.1	Lieferant	125
5.3.2	Beschaffungsstrategie	127
5.4	Abbildungsfunktionen der Phase „Produktion“	128
5.4.1	Standardisierung	128
5.4.2	Separater Funktionstest.....	130
5.4.3	Produktionsprozess	131

5.4.3.1	Fertigungszeit	131
5.4.3.2	Fertigungsverfahren	132
5.4.3.3	Montagezeitpunkt	134
5.5	Abbildungsfunktionen der Phase „Logistik“	136
5.5.1	Transportvolumen	136
5.5.2	Transportgewicht	138
5.6	Abbildungsfunktionen der Phase „Vertrieb“	139
5.7	Abbildungsfunktionen der Phase „After Sales“	142
5.7.1	Wartung und Instandsetzung	142
5.7.2	Verbesserung	144
5.7.3	Recycling	145
6.	ANWENDUNG UND ANALYSE DER METHODIK: MODULARISIERUNG	
	EINES FLUGZEUGFAHRWERKS.....	147
6.1	Kurzbeschreibung des Produkts „Hauptfahrwerksbein“	148
6.2	Schritt 1: Zerlegung des Produkts in Komponenten	151
6.3	Schritt 2a: Identifikation der wesentlichen Modultreiber	152
6.4	Schritt 2b: Abbildung der Kopplungen für jeden Modultreiber	153
6.4.1	Ergebnisse der Phase „Konzeptentwicklung“	153
6.4.1.1	Geometrische Abhängigkeiten	153
6.4.1.2	Energieübertragung	157
6.4.1.3	Materieübertragung	164
6.4.1.4	Informationsübertragung	165
6.4.2	Ergebnisse der Phase „Detailentwicklung“	169
6.4.3	Ergebnisse der Phase „Beschaffung“	171
6.4.4	Ergebnisse der Phase „Produktion“	172
6.4.5	Ergebnisse der Phase „Logistik“	175
6.4.6	Ergebnisse der Phase „Vertrieb“	177
6.4.7	Ergebnisse der Phase „After Sales“	179
6.5	Schritt 2c: Zusammenfassung der Kopplungswerte zu einem Gesamtwert	181
6.6	Schritt 3: Bildung von Modulen auf Grundlage der Kopplungen	184
6.7	Analyse und Bewertung der Ergebnisse	186
7.	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	193
LITERATUR		197
A.	ANHANG: DATEN ZUR FALLSTUDIE	213
A.1	Daten der Phase „Konzeptentwicklung“	213
A.1.1	Geometrische Abhängigkeiten	213
A.1.2	Energieübertragung	221
A.1.3	Materieübertragung	226
A.1.4	Informationsübertragung	227

A.2 Daten der Phase „Detailentwicklung“	229
A.3 Daten der Phase „Beschaffung“	232
A.4 Daten der Phase „Produktion“	233
A.5 Daten der Phase „Logistik“	237
A.6 Daten der Phase „Vertrieb“	239
A.7 Daten der Phase „After Sales“	241
A.8 Gesamtkopplungsmatrizen	245

Abkürzungen

Allgemeine Abkürzungen

Beschaff.	Beschaffung
Beschl.	Beschleunigung
dreh.	drehendes / drehenden
DSM	Design Structure Matrix
elektr.	elektrischer
elektr.-magn.	elektromagnetischer
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit
Entw.	Entwicklung
FMEA	Fehlermöglichkeiten- und -einfluss-Analyse
Fo	Formschluss
FW	Fahrwerk
Geschw.	Geschwindigkeit
IBM	International Business Machines Corporation
ILS	Instrumentenlandesystem
K	Komponente
Komp.	Komponente
Konstr.	Konstruktion
Kr	Kraftschluss
Kundenanford.	Kundenanforderung
li.	links
Log.	Logistik
max.	maximal
mech.	mechanische
MFD	Modular Function Deployment
MIM	Module Indication Matrix
MT	Modultreiber
PAD	Product Architecture Design
PE	Produkteigenschaften
PTM	Projektteammitglieder
PTM _{VE}	Projektteammitglieder aus der Vorentwicklungsabteilung
QFD	Quality Function Deployment
re.	rechts
rotier.	rotierenden
ruhend.	ruhendes / ruhenden

St	Stoffschluss
Syst.	System
TF	Teilfunktion
TL	Technische Lösung
Transform.	Transformation
Vent.	Ventilator
Vertr.	Vertrieb
Vibr. dämpfer	Vibrationsdämpfer
2D	zwei-dimensional
3D	drei-dimensional

Abkürzungen der Komponenten in der Fallstudie

ACH	Achse
AEF	Aktuator zum Einziehen des Fahrwerksbeins
AFS	Aktuator für Feststellstrebe
BFB	Befestigungsbolzen
BFL	Bremsflansch links
BFR	Bremsflansch rechts
BLA	Bremse links (Achsteil)
BLF	Bremse links (Felgenteil)
BÖH	Befestigungsöse (Hauptbein)
BÖS	Befestigungsöse (Schleppstrebe)
BPK	Bremspedale (Flugkapitän)
BPO	Bremspedale (Erster Offizier)
BRA	Bremse rechts (Achsteil)
BRF	Bremse rechts (Felgenteil)
BSE	Bremsen-Steuerungseinheit
DRB	Drehbolzen
FEL	Felge links
FER	Felge rechts
FSE	Fahrwerk-Steuerungseinheit 1
FSF	Feststellfeder
FSS	Feststellstrebe
FSZ	Fahrwerk-Steuerungseinheit 2
FWB	Fahrwerksbetätigung
HAB	Hauptbein
HVO	Hilfsverbindung zur Kabelführung oben

HVU	Hilfsverbindung zur Kabelführung unten
MVO	Moment-Verdreh Sperre oben
MVU	Moment-Verdreh Sperre unten
QRR	Querrohr
REL	Reifen links
RER	Reifen rechts
SDB	Stoßdämpfer-Bein
SLS	Schleppstrebe
SST	Seitenstrebe
VFS	Verbindung zur Flugzeugstruktur
VHB	Verbindung zum Hauptbein
VVB	Ventilverzweigung (Bremsen)
VVF	Ventilverzweigung (Fahrwerk)

Formelzeichen

Lateinische Großbuchstaben

Zeichen	Einheit	Bedeutung, Beschreibung
A	m^2	Fläche, Oberfläche eines Körpers
A_{Kontakt}	m^2	Kontaktfläche zwischen zwei Oberflächen
A_{Proj}	m^2	Projektionsfläche eines Körpers in eine zwei-dimensionale Ebene
A_Q	m^2	Querschnittsfläche eines Rohrs oder Schlauchs
A_S	m^2	Teil der Oberfläche einer Komponente, der von außerhalb des Gesamtprodukts sichtbar ist
A_{Wirk}	m^2	Wirkfläche
A_ϕ	*	Integral der reduzierten Funktionsfähigkeit eines Produkts über der Zeit
$A_{\phi 0}$	*	Integral der ursprünglichen Funktionsfähigkeit eines Produkts über der Zeit
B	—	Maßzahl für Bewegungsrichtung
C_F	€	Kosten für einen im Produkt aufgetretenen Fehler
D_F	—	Differenz zwischen zwei Bewertungen von Fertigungsverfahren
D_L	—	Differenz zwischen zwei Bewertungen von Lieferanten
D_R	—	Differenz zwischen zwei Bewertungen der Recycling- / Materialeigenschaften
D_S	—	Differenz zwischen zwei Bewertungen der Beschaffungsstrategien
E	J	Energie
E_{rot}	J	Kinetische Energie einer rotatorischen Bewegung
E_{trans}	J	Kinetische Energie einer translatorischen Bewegung
F	N	Kraft
F_A	N	Axialkraft
F_G	N	Gewichtskraft
F_N	N	Normalkraft
F_R	N	Radialkraft
F_S	N	Durch eine Schlussart maximal erzeugbare Kraft
I	A	Elektrischer Strom
I_{eff}	A	Effektivwert eines elektrischen Wechselstroms
J	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$	Massenträgheitsmoment
K	—	Komponente

M_e	–	Menge der beteiligten Personen bei einer Produktentwicklung
M_p	–	Menge der Produkte, in denen eine Komponente eingesetzt wird
M_t	–	Menge der zu testenden Produktfunktionen
M_w	–	Menge der Wartungs- und Instandsetzungsaktionen
N_i	–	Position der ersten Komponente des i -ten Moduls in einer nach Modulen strukturierten Kopplungsmatrix
P_B	Var	Elektrische Blindleistung
P_E	W	Strahlungsleistung, die von einer Komponente empfangen wird
P_S	V · A	Elektrische Scheinleistung
P_Q	W	Strahlungsleistung, die von einer Quelle ausgesandt wird
P_W	W	Elektrische Wirkleistung
$\dot{Q}$	W	Wärmestrom
$\mathfrak{R}_0^+$	–	Menge der positiven reellen Zahlen inklusive der Null
RPZ	€	Risikoprioritätszahl
S	–	Beschaffungsstrategie
T	s	Zeitraum
T_B	s	Betriebsdauer einer Komponente
T_F	s	Fertigungszeitraum
T_L	s	Lebenszyklus einer Komponente
$T_{L,A320}$	s	Lebenszyklus des Airbus A320
T_M	s	Montagedauer eines Produkts
T_V	s	Durchschnittliche Zeit zwischen zwei Verbesserungen
U	V	Elektrische Spannung
U_{eff}	V	Effektivwert einer elektrischen Wechselspannung
V	m ³	Volumen
$V_{Kontakt}$	m ³	Durch die Kontaktfläche definiertes Volumen zwischen zwei Körpern
V_T	m ³	Fassungsvermögen eines Tanks
$\dot{V}_a$	$\frac{m^3}{s}$	Volumenstrom (Ausgang)
$\dot{V}_e$	$\frac{m^3}{s}$	Volumenstrom (Eingang)
W_A	–	Wahrscheinlichkeit, dass ein Fehler im Produkt auftritt
W_K	–	Wahrscheinlichkeit, dass eine Wärmeübertragung durch Konvektion auftritt
W_U	–	Wahrscheinlichkeit, dass ein Fehler im Produkt unentdeckt bleibt
X	–	Allgemeine Variable
Z	–	Zielfunktion einer Optimierung

* = Einheit abhängig vom jeweiligen Kontext

Lateinische Kleinbuchstaben

Zeichen	Einheit	Bedeutung, Beschreibung
a	$\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$	Beschleunigung
b	m	Breite eines Körpers
d	m	Durchmesser eines Körpers
d_m	m	Maximale Ausdehnung eines Körpers
f	Hz	Frequenz
g	$\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$	Erdbeschleunigung: $g \approx 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$
h	m	Höhe eines Körpers
i	–	Allgemeiner Laufindex
j	–	Laufindex für die Modultreiber (Der Index kann auch die Kurzbezeichnung des Modultreibers repräsentieren.)
k	*	Gesamtkopplungswert zwischen zwei Komponenten
k_j	*	Kopplungswert zwischen zwei Komponenten hervorgerufen von Modultreiber j
$\tilde{k}$	–	Normierter Gesamtkopplungswert zwischen zwei Komponenten
$\tilde{k}_j$	–	Normierter Kopplungswert zwischen zwei Komponenten hervorgerufen von Modultreiber j
$\tilde{k}_{\text{mittel}}$	–	Mittlerer Kopplungswert der normierten Gesamtkopplungsmatrix
$\tilde{k}_{\text{sum},ij}$	–	Summation der normierten Kopplungswerte von Modultreiber j im Modul i
ℓ	m	Länge eines Körpers
m	kg	Masse
m_{MTOW}	kg	Maximale Startmasse eines Flugzeugs
$\dot{m}$	$\frac{\text{kg}}{\text{s}}$	Massenstrom
n_e	–	Anzahl der Personen, die an einer Produktentwicklung beteiligt sind (= Anzahl der Elemente der Menge M_e)
n_f	–	Anzahl der möglichen Freiheitsgrade
n_g	–	Anzahl der Personen, die eine Wichtung vornehmen
n_k	–	Anzahl der Komponenten in einem Produkt
$n_{k,i}$	–	Anzahl der Komponenten im Modul i
n_{kp}	–	Anzahl der Komponentenpaare, die den gleichen Kopplungswert haben
n_ℓ	–	Anzahl der Kriterien zur Lieferantenbewertung (= Dimension des Vektors $\mathbf{u}_L$)
n_m	–	Anzahl der Module in einem Produkt

n_{mp}	–	Anzahl der unterschiedlichen Materialien im Produkt (= Dimension des Vektors $\mathbf{u}_R$)
n_{mt}	–	Anzahl der Modultreiber
n_p	–	Anzahl der Produkte, in denen eine Komponente eingesetzt wird (= Anzahl der Elemente der Menge M_p)
n_t	–	Anzahl der zu testenden Produktfunktionen (= Anzahl der Elemente der Menge M_t)
$n_{\bar{u}}$	–	Anzahl der Informationsübertragungen
n_v	–	Anzahl der verschiedenen Fertigungsverfahren (= Dimension des Vektors $\mathbf{u}_F$)
n_w	–	Anzahl der Wartungs- und Instandsetzungsaktionen (= Anzahl der Elemente der Menge M_w)
$p_{m,ji}$	–	Prozentualer Anteil von Modultreiber j an Modul i
p_{SD}	–	Prozentualer Anteil der wirkenden Kraft, der bei einem Landestoß eines Flugzeugs von einer Komponente aufgenommen wird
p_ϕ	–	Prozentuale Verringerung der Funktionalität eines Produkts
r	m	Radius eines Kreises oder einer Kugel
s	m	Abstand zwischen zwei Körpern, zurückgelegte Wegstrecke
t	s	Zeitpunkt
t_m	s	Montagezeitpunkt
$t_{m,Struktur}$	s	Montagezeitpunkt der Strukturkomponenten eines Fahrwerksbeins
$\mathbf{u}_F$	–	Vektor für den Vergleich der Fertigungsverfahren
$\mathbf{u}_L$	–	Vektor für den Vergleich von Lieferantenbewertungen
$\mathbf{u}_R$	–	Vektor für den Vergleich der Recycling- / Materialeigenschaften
v	$\frac{m}{s}$	Geschwindigkeit
v_L	$\frac{m}{s}$	Landegeschwindigkeit eines Flugzeugs
$w_{i,j}$	–	Gewichtung des Modultreibers j durch Person i
w_j	–	Gewichtung des Modultreibers j
x	–	Laufindex für die Anzahl der Komponenten
y	–	Laufindex für die Anzahl der Komponenten
z	m	Raumrichtung

* = Einheit abhängig vom jeweiligen Kontext

Griechische Großbuchstaben

Zeichen	Einheit	Bedeutung, Beschreibung
$\Delta \tilde{K}$	–	Quadratische Abweichung des normierten Gesamtkopplungswerts vom mittleren Kopplungswert
$\Delta \ell_a$	m	Verschiebung in Axialrichtung
$\Delta \ell_r$	m	Verschiebung in Radialrichtung
Δt_A	s	Ausfallzeitraum eines Produkts
$\Delta \vartheta$	K	Temperaturdifferenz
Φ	*	Reduzierte Funktionsfähigkeit eines Produkts
Φ_0	*	Ursprüngliche Funktionsfähigkeit eines Produkts
Ω	sr	Raumwinkel

* = Einheit abhängig vom jeweiligen Kontext

Griechische Kleinbuchstaben

Zeichen	Einheit	Bedeutung, Beschreibung
α	rad	Winkel
ε_e	–	Empfindlichkeitsgrad eines Körpers auf elektromagnetische Strahlung
ε_w	–	Emissionsverhältnis bzw. Absorptionsverhältnis eines Körpers bei Wärmestrahlung
ϑ	°C	Temperatur
ϑ_{ist}	°C	Tatsächlich erreichte Temperatur
ϑ_{soll}	°C	Maximal oder minimal erlaubte Temperatur
λ	$\frac{W}{m \cdot K}$	Wärmeleitfähigkeit
μ	–	Allgemeiner Laufindex
π	–	Kreiszahl $\pi \approx 3,1415$
ρ	$\frac{kg}{m^3}$	Massendichte
σ	$\frac{N}{m^2}$	Normalspannung
φ	rad	Winkel, um den sich ein Körper drehen kann
ω	$\frac{1}{s}$	Winkelgeschwindigkeit

Spezielle Indizes

hochgestellt:

x	Laufindex für die Komponenten
y	Laufindex für die Komponenten
xy	Bezogen auf die Kopplung zwischen Komponente K^x und K^y

tiefgestellt:

ges	Bezogen auf das gesamte Produkt
j	Laufindex für die Modultreiber (Der Index kann auch die Kurzbezeichnung des Modultreibers repräsentieren.)
min	Minimalwert
max	Maximalwert

Funktionen

f	Allgemeine Abbildungsfunktion
f_j	Kopplungsfunktion des Modultreibers j (Der Index j kann die Nummer oder die Kurzbezeichnung des Modultreibers repräsentieren.)
f_{agg}	Funktion zur Aggregation der einzelnen Kopplungsfunktionen

Kurzbezeichnung der Modultreiber

<i>AftSal</i>	Kopplung durch die After-Sales-Phase
<i>Art</i>	Kopplung durch die Art der geometrischen Verknüpfung
<i>Besch</i>	Kopplung durch die Beschaffungsphase
<i>Beweg</i>	Kopplung durch mechanische Bewegungsenergie
<i>DeEntw</i>	Kopplung durch die Detailentwicklungsphase
<i>Energ</i>	Kopplung durch Energieübertragung
<i>FertZt</i>	Kopplung durch die Fertigungszeit
<i>Form</i>	Kopplung durch die geometrische Form
<i>Freq</i>	Kopplung durch die Häufigkeit der Kommunikation
<i>FtVerf</i>	Kopplung durch das Fertigungsverfahren
<i>Geo</i>	Kopplung durch geometrische Abhängigkeiten
<i>Größe</i>	Kopplung durch die geometrische Größe
<i>Info</i>	Kopplung durch Informationsübertragung
<i>Inhalt</i>	Kopplung durch den Inhalt der Kommunikation
<i>KoEntw</i>	Kopplung durch die Konzeptentwicklungsphase
<i>Kunde i</i>	Kopplung durch die i -te Kundenanforderung
<i>Kunde 1</i>	Kopplung durch die erste Kundenanforderung

<i>Lage</i>	Kopplung durch die geometrische Lage
<i>Liefer</i>	Kopplung durch den Lieferanten
<i>Log</i>	Kopplung durch die Phase der Logistik
<i>Mater</i>	Kopplung durch Materieübertragung
<i>MontZp</i>	Kopplung durch den Montagezeitpunkt
<i>OrgEnt</i>	Kopplung durch die Organisation der Entwicklung
<i>Produk</i>	Kopplung durch die Produktionsphase
<i>Proz</i>	Kopplung durch den Fertigungs- und Montageprozess
<i>Recycl</i>	Kopplung durch das Recycling
<i>Risiko</i>	Kopplung durch das Entwicklungsrisiko
<i>Ruhe</i>	Kopplung durch mechanische Ruheenergie
<i>Stand</i>	Kopplung durch die Standardisierung von Komponenten
<i>Strahl</i>	Kopplung durch elektromagnetische Strahlung und Felder
<i>Strat</i>	Kopplung durch die Beschaffungsstrategie
<i>Strom</i>	Kopplung durch elektrische Ströme
<i>Test</i>	Kopplung durch das Testprogramm
<i>TrGew</i>	Kopplung durch das Transportgewicht
<i>TrVol</i>	Kopplung durch das Transportvolumen
<i>Verbes</i>	Kopplung durch eine Verbesserung der Komponenten
<i>Vertr</i>	Kopplung durch die Vertriebsphase
<i>Wärme</i>	Kopplung durch die Übertragung thermischer Energie
<i>Wart</i>	Kopplung durch Wartung und Instandsetzung
<i>ZeitSt</i>	Kopplung durch die zeitliche Stabilität der Komponenten

Bild- und Tabellenverzeichnis

Bildverzeichnis

Bild 2.1: Struktur von Systemen mit geringer und hoher Komplexität.....	9
Bild 2.2: Kategorisierung der Design Structure Matrix [23, S. 293].....	14
Bild 2.3: Spannungsfeld zwischen externer und interner Komplexität (modifiziert nach [25, S. 262]).....	15
Bild 2.4: Möglichkeiten, die Kosten der Komplexität zu beeinflussen	16
Bild 2.5: Zeitliche Einordnung der Strategien des Komplexitätsmanagements (vgl. [79, S. 327]).....	17
Bild 2.6: Struktur eines komplexen Produkts (modifiziert nach [89, S. 17])	19
Bild 2.7: Wertschöpfungsprozess eines Produkts und zeitliche Einordnung der Modularisierungsmethodik	22
Bild 2.8: Generelles Vorgehen beim Entwickeln und Konstruieren (modifiziert nach VDI 2221 [149, S. 9]).....	23
Bild 2.9: Struktur der Herstellung eines Produkts	25
Bild 2.10: Abgrenzung von Logistiksystemen (Ausschnitt aus [109, S. 18])	26
Bild 2.11: Einfluss der Kundenanforderungen	26
Bild 2.12: Verantwortungsbereich eines Produktherstellers (modifiziert nach [68, S. 512] und [143, S. 172])	27
Bild 2.13: Abbildung der Kopplungen durch eine Matrix (vgl. z. B. [89, S. 78-82])....	30
Bild 2.14: Beispiel einer nach Modulen strukturierten Matrix (vgl. z. B. [89, S. 111])	31
Bild 3.1: Beispiel einer Funktionsstruktur (Ausschnitt aus [105, S. 670])	35
Bild 3.2: Beispiel für die Abbildung eines Produkts durch einen Graphen (in Anlehnung an [95, S. 524] und [96, S. 7])	36
Bild 3.3: Heuristiken zur Bildung von Modulen [141, S. 15, 19 u. 21]	38
Bild 3.4: Beispiel einer „Vorgänger-Matrix“ [139, S. 72].....	40
Bild 3.5: Beispiel einer Design Structure Matrix [139, S. 73].....	41
Bild 3.6: Beispiel einer Interaktionsmatrix (Ausschnitt aus [112, S. 348])	42
Bild 3.7: Beispiel einer Modular Indication Matrix (Ausschnitt aus [38, S. 48])	44
Bild 3.8: Beispiel einer „Lanner-Matrix“ [97, S. 177]	45
Bild 3.9: Kategorisierung der Modultreiber im Bereich der Produktfamilienplanung (modifiziert nach [137, S. 59 + 63])	47
Bild 3.10: Kategorisierung der funktional orientierten Modultreiber (modifiziert nach [137, S. 59 + 64]).....	47

Bild 3.11: Beispiel für die Bestimmung der Matricelemente (modifiziert nach [17, S. 68])	49
Bild 3.12: Struktur der Methode Modular Engineering (modifiziert nach [77, S. 12])	51
Bild 4.1: Struktur der entwickelten Methodik.....	60
Bild 4.2: Gewichtung der Ziele der Modularisierung (Beispiel)	61
Bild 4.3: Kopplungsmatrix für Modultreiber j	63
Bild 4.4: Vereinfachte Kopplungsmatrix für Modultreiber j	64
Bild 4.5: Beispiel für Normierung der Kopplungswerte	66
Bild 4.6: Beispiel für die Vorgehensweise bei der Analyse der Modulaufteilungen...	69
Bild 4.7: Phasen des Wertschöpfungsprozesses und Verfügbarkeit der Produktdaten.....	70
Bild 4.8: Strukturierung der Abbildung technischer Kopplungen.....	74
Bild 4.9: Benutzeroberfläche für Schritt 1 der Methodik.....	83
Bild 4.10: Benutzeroberfläche für Schritt 2 der Methodik.....	84
Bild 4.11: Ausgabe der nicht normierten und normierten Kopplungsmatrix	84
Bild 4.12: Benutzeroberfläche für Schritt 3 der Methodik.....	85
Bild 4.13: Ablauf der Methodikanwendung in einem Unternehmen	87
Bild 5.1: Kopplung durch die Größe der Wirkfläche.....	93
Bild 5.2: Ergebnisse der Kopplungsfunktion „Größe“.....	94
Bild 5.3: Analyse der Kopplungsfunktion „Größe“.....	94
Bild 5.4: Definition des Kontaktvolumens (2D-Ansicht von oben)	95
Bild 5.5: Trivialfall für die Kopplung durch das Kontaktvolumen: $V_{\text{Kontakt}} = 0 \text{ m}^3$	96
Bild 5.6: Allgemeiner Fall für die Kopplung durch das Kontaktvolumen: $V_{\text{Kontakt}} \neq 0 \text{ m}^3$	96
Bild 5.7: Kopplung durch verzahnte Komponenten.....	97
Bild 5.8: Ergebnisse der Kopplungsfunktion „Form“	97
Bild 5.9: Analyse der Kopplungsfunktion „Form“.....	98
Bild 5.10: Kopplung durch die Zahl der Freiheitsgrade (Beispiel 1: $n_f = 3,5$)	99
Bild 5.11: Kopplung durch die Zahl der Freiheitsgrade (Beispiel 2: $n_f = 1,5$)	99
Bild 5.12: Ergebnisse der Kopplungsfunktion „Lage“.....	101
Bild 5.13: Kopplung durch Wärmeleitung	104
Bild 5.14: Kopplung durch translatorische Bewegung	106
Bild 5.15: Kopplung durch rotatorische Bewegung	107
Bild 5.16: Kopplung durch Normalspannung	108
Bild 5.17: Kopplung durch elektrische Ströme.....	109
Bild 5.18: Kopplung durch Strahlung und Felder	111
Bild 5.19: Kopplung durch Materieübertragung	113
Bild 5.20: Reduktion der Funktionsfähigkeit (allgemein).....	114
Bild 5.21: Reduktion der Funktionsfähigkeit (Spezialfall).....	115

Bild 5.22: Ergebnisse der Kopplungsfunktion „Inhalt“	116
Bild 5.23: Analyse der Kopplungsfunktion „Inhalt“	117
Bild 5.24: Bestimmung der Übertragungsfrequenz	118
Bild 5.25: Ergebnisse der Kopplungsfunktion „Zeitliche Stabilität“	120
Bild 5.26: Analyse der Kopplungsfunktion „Zeitliche Stabilität“	121
Bild 5.27: Ergebnisse der Kopplungsfunktion „Organisation der Entwicklung“	122
Bild 5.28: Analyse der Kopplungsfunktion „Organisation der Entwicklung“	123
Bild 5.29: Ergebnisse der Kopplungsfunktion „Entwicklungsrisiko“	124
Bild 5.30: Analyse der Kopplungsfunktion „Entwicklungsrisiko“	125
Bild 5.31: Analyse der Kopplungsfunktion „Standardisierung“	130
Bild 5.32: Analyse der Kopplungsfunktion „Separater Funktionstest“	131
Bild 5.33: Analyse der Kopplungsfunktion „Fertigungszeit“	132
Bild 5.34: Analyse der Kopplungsfunktion „Fertigungsverfahren“	134
Bild 5.35: Ergebnisse der Kopplungsfunktion „Montagezeitpunkt“	135
Bild 5.36: Analyse der Kopplungsfunktion „Montagezeitpunkt“	136
Bild 5.37: Ergebnisse der Kopplungsfunktion „Transportvolumen“	137
Bild 5.38: Analyse der Kopplungsfunktion „Transportvolumen“	138
Bild 5.39: Analyse der Kopplungsfunktion „Transportgewicht“	139
Bild 5.40: Analyse der Kopplungsfunktion „Kundenanforderung 1“	141
Bild 5.41: Analyse der Kopplungsfunktion „Wartung und Instandsetzung“	143
Bild 5.42: Analyse der Kopplungsfunktion „Verbesserung“	145
Bild 5.43: Analyse der Kopplungsfunktion „Recycling“	146
Bild 6.1: Zwei-Seitenansicht der Fahrwerkskonfiguration beim Airbus A320 [69, S. 187]	148
Bild 6.2: Linkes Fahrwerksbein des Airbus A320 [2]	149
Bild 6.3: Komponenten für die Ansteuerung des Fahrwerks (Position der Komponenten nach [3], Darstellung des Flugzeugs [69, S. 187])	150
Bild 6.4: Bremse an einem Fahrwerksbein [123, S. 59]	150
Bild 6.5: Eingabe der Fallstudientdaten in das Software-Programm	157
Bild 6.6: Statische Zustände des linken Fahrwerks mit Blick in Fahrtrichtung (Darstellung nach [86, S. 150])	160
Bild 6.7: Benötigte Energie zum Lösen der Feststellstrebe	162
Bild 6.8: Informationsübertragung beim Ein- und Ausfahren des Fahrwerks (aus [3] ermittelt)	166
Bild 6.9: Informationsübertragung beim Bremsen (aus [3] ermittelt)	166
Bild 6.10: Gesamtkopplungsmatrix für das Modularisierungsziel „Fokussierung auf die technische Funktion“	182
Bild 6.11: Verteilung der Kopplungswerte	183

Bild 6.12: Permutierte Gesamtkopplungsmatrix für das Modularisierungsziel „Fokussierung auf die technische Funktion“ ($Z = 18,1$)	186
Bild A.1: Kopplungsmatrix für den Modultreiber „Größe“	219
Bild A.2: Kopplungsmatrix für den Modultreiber „Form“	219
Bild A.3: Kopplungsmatrix für den Modultreiber „Lage“	220
Bild A.4: Kopplungsmatrix für den Modultreiber „Art“	220
Bild A.5: Kopplungsmatrix für den Modultreiber „Thermische Energie“	224
Bild A.6: Kopplungsmatrix für den Modultreiber „Ruheenergie“	224
Bild A.7: Kopplungsmatrix für den Modultreiber „Bewegungsenergie“	225
Bild A.8: Kopplungsmatrix für den Modultreiber „Elektrische Ströme“	225
Bild A.9: Kopplungsmatrix für den Modultreiber „Strahlung und Felder“	226
Bild A.10: Kopplungsmatrix für den Modultreiber „Materie“	226
Bild A.11: Kopplungsmatrix für den Modultreiber „Inhalt der Information“	228
Bild A.12: Kopplungsmatrix für den Modultreiber „Übertragungsfrequenz“	228
Bild A.13: Kopplungsmatrix für den Modultreiber „Zeitliche Stabilität“	231
Bild A.14: Kopplungsmatrix für den Modultreiber „Organisation der Entwicklung“ ..	231
Bild A.15: Kopplungsmatrix für den Modultreiber „Lieferant“	232
Bild A.16: Kopplungsmatrix für den Modultreiber „Standardisierung“	235
Bild A.17: Kopplungsmatrix für den Modultreiber „Separater Funktionstest“	236
Bild A.18: Kopplungsmatrix für den Modultreiber „Montagezeitpunkt“	236
Bild A.19: Kopplungsmatrix für den Modultreiber „Transportvolumen“	238
Bild A.20: Kopplungsmatrix für den Modultreiber „Transportgewicht“	238
Bild A.21: Kopplungsmatrix für den Modultreiber „Kundenanford. 1: Stoßdämpfung“	239
Bild A.22: Kopplungsmatrix für den Modultreiber „Kundenanford. 2: Gewicht“	240
Bild A.23: Kopplungsmatrix für den Modultreiber „Kundenanford. 3: Leistungsbedarf“	240
Bild A.24: Kopplungsmatrix für den Modultreiber „Wartung und Instandsetzung“ ...	244
Bild A.25: Kopplungsmatrix für den Modultreiber „Recycling“	244
Bild A.26: Gesamtkopplungsmatrix für das Modularisierungsziel „Optimierung der Organisation der Entwicklung“	245
Bild A.27: Gesamtkopplungsmatrix für das Modularisierungsziel „Optimierung der Beschaffung, Produktion und Logistik“	246
Bild A.28: Gesamtkopplungsmatrix für das Modularisierungsziel „Fokussierung auf den Kunden“	246
Bild A.29: Permutierte Gesamtkopplungsmatrix für das Modularisierungsziel „Optimierung der Organisation der Entwicklung“ ($Z = 82,3$)	247
Bild A.30: Permutierte Gesamtkopplungsmatrix für das Modularisierungsziel „Optimierung der Beschaffung, Produktion und Logistik“ ($Z = 88,1$)	247

Bild A.31: Permutierte Gesamtkopplungsmatrix für das Modularisierungsziel „Fokussierung auf den Kunden“ ($Z = 86,3$)	248
---	-----

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Verwendung des Begriffs „Modul“ in der Literatur.....	11
Tabelle 3.1: Beurteilungskriterien für Wartungsfaktoren [57, S. 393].....	46
Tabelle 3.2: In der Literatur betrachtete Schritte des Modularisierungsprozesses ...	52
Tabelle 3.3: In der Literatur betrachtete Phasen des Wertschöpfungsprozesses.....	54
Tabelle 4.1: Modultreiber aus der Phase „Konzeptentwicklung“	72
Tabelle 4.2: Modultreiber aus den übrigen Phasen des Wertschöpfungsprozesses	73
Tabelle 5.1: Hierarchische Strukturierung der Abbildungsfunktionen	90
Tabelle 5.2: Eigenschaften von unterschiedlichen Schlussarten [105, S. 583-588]	102
Tabelle 5.3: Kopplungswerte für unterschiedliche Schlussarten.....	102
Tabelle 5.4: Beispiele für Berechnung des Kopplungswerts „Lieferant“	127
Tabelle 5.5: Beispiele für Berechnung des Kopplungswerts „Fertigungsverfahren“	134
Tabelle 5.6: Abbildungsfunktionen für typische Kundenanforderungen.....	142
Tabelle 6.1: Komponenten des Hauptfahrwerksbeins	151
Tabelle 6.2: Gewichtungen der Modularisierungsziele	152
Tabelle 6.3: Oberfläche und Volumen der Komponenten (Ausschnitt), siehe auch Tabelle A.2	154
Tabelle 6.4: Kontaktfläche und Kontaktvolumen für relevante Komponentenpaare (Ausschnitt), siehe auch Tabelle A.4	155
Tabelle 6.5: Freiheitsgrade und Schlussart für relevante Komponentenpaare (Ausschnitt), siehe auch Tabelle A.5	156
Tabelle 6.6: Parameter der Wärmeleitung für relevante Komponentenpaare (Ausschnitt), siehe auch Tabelle A.7	159
Tabelle 6.7: Parameter der mechanischen Ruheenergie für relevante Komponentenpaare.....	161
Tabelle 6.8: Parameter für systeminterne Strahlung und Felder für relevante Komponentenpaare (Ausschnitt), siehe auch Tabelle A.10	164
Tabelle 6.9: Kopplung durch Materialübertragung (Hydraulik) für relevante Komponentenpaare.....	165
Tabelle 6.10: Teilfunktionen des Fahrwerksbeins mit Informationstransfer	167
Tabelle 6.11: Inhalt der Informationsübertragung für relevante Komponentenpaare (Ausschnitt), siehe auch Tabelle A.11	168
Tabelle 6.12: Entwicklungsteams	170
Tabelle 6.13: Organisationsstruktur der Entwicklung (Ausschnitt), siehe auch Tabelle A.14	170
Tabelle 6.14: Parameter für die Kopplung durch den Lieferanten (Ausschnitt), siehe auch Tabelle A.15.....	171

Tabelle 6.15: Parameter für die Kopplung durch Standardisierung (Ausschnitt), siehe auch Tabelle A.16	173
Tabelle 6.16: Zu testende Teilfunktionen des Fahrwerksbeins	174
Tabelle 6.17: Tests der relevanten Komponenten (Ausschnitt), siehe auch Tabelle A.17	174
Tabelle 6.18: Montagezeitpunkte der Komponenten (Ausschnitt), siehe auch Tabelle A.18	175
Tabelle 6.19: Komponenten mit direkt bestimmter Masse (Ausschnitt), siehe auch Tabelle A.19	176
Tabelle 6.20: Komponenten mit indirekt bestimmter Masse (Ausschnitt), siehe auch Tabelle A.20, (Gesamtmasse aus [3] entnommen)	176
Tabelle 6.21: Eigenschaften der „Stoßdämpfung“ für relevante Komponenten	178
Tabelle 6.22: Elektrische und hydraulische Leistungsbedarfe relevanter Komponenten (Ausschnitt), siehe auch Tabelle A.21	178
Tabelle 6.23: Wartungsvorgänge (Ausschnitt), siehe auch Tabelle A.22	179
Tabelle 6.24: Wartungsarbeiten an den Komponenten (Ausschnitt), siehe auch Tabelle A.23	180
Tabelle 6.25: Hauptmaterialien des Fahrwerksbeins	181
Tabelle 6.26: Hauptmaterialien der Komponenten (Ausschnitt), siehe auch Tabelle A.24	181
Tabelle 6.27: Modulaufteilung für das Ziel „Fokussierung auf die technische Funktion“	187
Tabelle 6.28: Modulaufteilung für das Ziel „Optimierung der Organisation der Entwicklung“	187
Tabelle 6.29: Modulaufteilung für das Ziel „Optimierung der Beschaffung, Produktion und Logistik“	188
Tabelle 6.30: Modulaufteilung für das Ziel „Fokussierung auf den Kunden“	189
Tabelle A.1: Berechnungsformeln für Oberfläche und Volumen der Komponenten	213
Tabelle A.2: Oberfläche und Volumen der Komponenten	214
Tabelle A.3: Berechnungsformeln für Kontaktfläche und -volumen der Komponentenpaare	215
Tabelle A.4: Kontaktfläche und Kontaktvolumen für relevante Komponentenpaare	216
Tabelle A.5: Freiheitsgrade und Schlussart für relevante Komponentenpaare	218
Tabelle A.6: Minimal und maximal erreichte Temperatur sowie die maximal erlaubte Temperatur für relevante Komponenten	221
Tabelle A.7: Parameter der Wärmeleitung für relevante Komponentenpaare	222
Tabelle A.8: Parameter der mechanischen Bewegung für relevante Komponentenpaare	222
Tabelle A.9: Elektrische Leistungsübertragung für relevante Komponentenpaare .	223

Tabelle A.10: Parameter für systeminterne Strahlung und Felder für relevante Komponentenpaare.....	223
Tabelle A.11: Inhalt der Informationsübertragung für relevante Komponentenpaare.....	227
Tabelle A.12: Parameter der Übertragungsfrequenz für relevante Komponentenpaare.....	227
Tabelle A.13: Lebenszyklus der Komponenten	229
Tabelle A.14: Organisationsstruktur der Entwicklung	230
Tabelle A.15: Parameter für die Kopplung durch den Lieferanten	232
Tabelle A.16: Parameter für die Kopplung durch Standardisierung.....	233
Tabelle A.17: Tests der relevanten Komponenten.....	234
Tabelle A.18: Montagezeitpunkt der Komponenten.....	235
Tabelle A.19: Komponenten mit direkt bestimmter Masse	237
Tabelle A.20: Komponenten mit indirekt bestimmter Masse (Gesamtmasse aus [3] übernommen).....	237
Tabelle A.21: Elektrische und hydraulische Leistungsbedarfe relevanter Komponenten.....	239
Tabelle A.22: Wartungsvorgänge	241
Tabelle A.23: Wartungsarbeiten an den Komponenten	242
Tabelle A.24: Hauptmaterialien der Komponenten	243