

**Auswirkung unsicherheitsbehafteter Bauteilattribute
auf funktionale Eigenschaften**

Vom Fachbereich Maschinenbau
an der Technischen Universität Darmstadt
zur
Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte

D I S S E R T A T I O N

vorgelegt von
Dipl.-Ing. Lucia Mosch (geb. Kobza)
aus Handlová

Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Reiner Anderl
Mitberichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Eberhard Abele
Tag der Einreichung: 20.01.2015
Tag der mündlichen Prüfung: 28.04.2015

Darmstadt 2015

D17

Forschungsberichte aus dem Fachgebiet
Datenverarbeitung in der Konstruktion

Band 52

Lucia Mosch

**Auswirkung unsicherheitsbehafteter
Bauteilattribute auf funktionale Eigenschaften**

D 17 (Diss. TU Darmstadt)

Shaker Verlag
Aachen 2015

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.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2015

Copyright Shaker Verlag 2015

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-3840-8

ISSN 1435-1129

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

GELEITWORT DES HERAUSGEBERS

Die moderne Informations- und Kommunikationstechnologie (IKT) bietet vielfältige Innovations- und Leistungspotenziale, die im Entstehungsprozess neuer Produkte auszuschöpfen sind. Dies setzt jedoch voraus, dass die wissenschaftlichen Grundlagen zum Einsatz der modernen IKT in der Produktentstehung vorliegen und neue Methoden wissenschaftlich abgesichert sind. Darüber hinaus stellen die wissenschaftliche Durchdringung und die Bereitstellung wissenschaftlicher Forschungsergebnisse eine abgestimmte Kooperation zwischen Forschung und Industrie dar.

Vor diesem Hintergrund informiert diese Schriftenreihe über aktuelle Forschungsergebnisse des Fachgebiets Datenverarbeitung in der Konstruktion (DiK) des Fachbereichs Maschinenbau an der Technischen Universität Darmstadt.

Ziel der Forschungsarbeiten ist die wissenschaftliche Durchdringung innovativer, interdisziplinärer und integrierter Produktentstehungsprozesse und darauf aufbauend die Konzeption neuer Methoden für die Entwicklung, Konstruktion, Arbeitsvorbereitung und Herstellung neuer Produkte.

Die Diskrepanz zwischen den in der Phase der Produktentwicklung festgelegten sowie numerisch exakten Werten und den real auftretenden streuenden Prozesseigenschaften in Herstellung und Nutzung führt zu hohen Sicherheitsaufschlägen. Die Integration dieser unsicherheitsbehafteten Prozesseigenschaften aus Herstellung und Nutzung in die Produktentwicklung sowie deren Wirkzusammenhänge untereinander stellen die Grundlage für die Beherrschung der Unsicherheit und angemessene Reduzierung hoher Sicherheitsaufschläge dar.

Frau Lucia Mosch entwickelt in ihrer Dissertation einen neuen Ansatz zur Ermittlung der Auswirkung unsicherheitsbehafteter Bauteilattribute auf funktionale Eigenschaften des Produkts. Der wissenschaftliche Kern liegt in der Nutzung von Wirkzusammenhängen zwischen unsicherheitsbehafteten Bauteilattributen und funktionalen Eigenschaften. Ein daraus resultierendes Beziehungsnetzwerk dient der Repräsentation der Wirkzusammenhänge, aus denen sich Wirkgraphen ableiten lassen. Wirkgraphen stellen die Grundlage zur Ermittlung der unsicherheitsbehafteten Bauteilattribute. Zusammen mit der Nutzung der Regressionsanalyse erlaubt das Konzept dieser Dissertation, quantifizierte Aussagen über die Höhe des Einflusses der unsicherheitsbehafteten

ten Bauteilattribute zu treffen und deren Auswirkung auf die funktionalen Eigenschaften des Produkts zu bewerten. Diese Dissertation liefert einen Beitrag zur Beherrschung von Unsicherheit im Maschinenbau.

Reiner Anderl

VORWORT DES AUTORS

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Fachgebiet Datenverarbeitung in der Konstruktion (DiK) der Technischen Universität Darmstadt.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Reiner Anderl, Leiter des Fachgebiets DiK, für das mir entgegengebrachte Vertrauen sowie seinen wissenschaftlichen Weitblick, mit dem er meine wissenschaftliche Arbeit begleitete. Seine fachlich konstruktiven Anregungen in Verbindung mit den mir gestatteten wissenschaftlichen Freiräumen stellten die Grundlage für die Erstellung und das Gelingen meiner Dissertation dar.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Eberhard Abele, Leiter des Fachgebiets Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen (PTW), danke ich für die Übernahme des Korreferates, der fachlichen Diskussion und der kritischen Durchsicht meiner Dissertation.

Mein besonderer Dank gilt meinem Kollegen aus der Mathematik Herrn Dr. Kai Habermehl, der mich bei dem mathematischen Teil meiner Dissertation mit seinem Fachwissen und wertvollen Ideen unterstützte. Herrn Dr. Roland S. Nattermann und Reinhard Heister danke ich für die Motivation und den Wissensaustausch während und auch außerhalb der DiK-Zeit. Ebenso gilt mein Dank meinem ehemaligen Kollegen Jochen Raßler, der mir in der Anfangszeit mit seinen fachlichen Ratschlägen und seinem Humor zur Seite stand. Bei den oben genannten Personen möchte ich mich für die Freundschaft, die in vielen Momenten meine Stütze war, sowie ihre Ehrlichkeit bedanken. Meinen weiteren Kollegen des Fachgebiets DiK danke ich für die freundschaftliche Atmosphäre sowie die gute Zusammenarbeit in Projekten, Forschung und Lehre.

Diese Dissertation entstand während der Elternzeit mit meinem zweiten Kind Dominik. Ohne massenweise Organisation und Disziplin wäre diese niemals zustande gekommen. Daher geht mein tiefster Dank an meine gesamte Familie, ohne deren Unterstützung, Motivation und Hilfe die Erstellung nicht möglich gewesen wäre. Meinen Eltern und Schwiegereltern danke ich besonders für den selbstlosen Rückhalt während der Zeit des Schreibens und der Vorbereitung auf meine Disputation. Meiner

Schwester Petra danke ich für die außerfachliche Ablenkung in dieser Zeit. Insbesondere meinem Mann Christian danke ich für die Geduld, das Verständnis gepaart mit Entbehrungen und der Aufopferung seiner wenigen Zeit, sowie die unzähligen fachlichen Diskussionen, die den Großteil unseres Privatlebens eingenommen haben. Ebenso danke ich ihm für seine Selbstverständlichkeit, mit der er meine Ziele genauso wie seine verfolgt.

Ein ganz besonderer Dank geht an meine zwei kleinen Kinder Luisa und Dominik, die mir gezeigt haben, worauf es im Leben wirklich ankommt und welches Ausmaß die eigene Stärke, Liebe und Erschöpfung annehmen kann.

Lucia Mosch

INHALTSVERZEICHNIS

1	Einleitung.....	1
1.1	Motivation.....	2
1.2	Zielsetzung.....	3
1.3	Aufbau.....	5
2	Stand der Technik.....	7
2.1	Das Produkt und der Produktlebenszyklus.....	8
2.2	Unsicherheit im Produktlebenszyklus.....	11
2.3	Volumenmodellierung.....	14
2.3.1	Datenstruktur der Volumenmodelle.....	15
2.3.2	Strategien der Volumenmodellierung.....	17
2.4	Integration von Informationen in die Volumenmodellierung.....	22
2.4.1	Design for X (DfX).....	25
2.4.2	Produkt- und Prozessmodellierung auf Basis von Produktmerkmalen und –eigenschaften.....	27
2.4.3	Dokumentation streuender Prozesseigenschaften.....	28
2.5	Umgang mit streuenden Prozesseigenschaften.....	30
2.5.1	Tolerierung im Produktentstehungsprozess.....	30
2.5.2	Prozessfähigkeit.....	40
2.5.3	Monte-Carlo-Methode.....	42
2.6	Qualitative Methoden zur Repräsentation von Ursache-Wirkzusammenhängen.....	42
2.6.1	Ursache-Wirkungs-Diagramm.....	43
2.6.2	Design Structure Matrix (DSM).....	44
2.6.3	Repräsentation von Matrizen und Visualisierung von Graphen.....	51
2.6.4	Algorithmen zur Strukturauswertung von Matrizen und Graphen.....	53
2.7	Quantitative Methoden zur Repräsentation von Ursache-Wirkzusammenhängen.....	56

2.7.1	Statistische Versuchsplanung	56
2.7.2	Multivariate Verfahren zur statistischen Auswertung	58
2.8	Bestehende relevante wissenschaftliche Arbeiten	63
2.9	Fazit	67
3	Anforderungsprofil	71
3.1	Zieldefinition	71
3.2	Betrachtete Anwendungsfälle	72
3.2.1	Beziehungsnetzwerk zwischen unsicherheitsbehafteten Bauteilattributen und funktionalen Eigenschaften	73
3.2.2	Auswirkung unsicherheitsbehafteter Bauteilattribute auf funktionale Eigenschaften	77
3.2.3	Anforderungen an das Beziehungsnetzwerk zwischen unsicherheitsbehafteten Bauteilattributen und funktionalen Eigenschaften	78
3.2.4	Anforderungen an die Auswirkung unsicherheitsbehafteter Bauteilattribute auf funktionale Eigenschaften	82
3.3	Übersicht der Anforderungen	83
4	Konzept	85
4.1	Überblick über das Konzept	86
4.2	Begriffliche Grundlagen	93
4.2.1	Funktionale Eigenschaften	93
4.2.2	Konstruktionselemente	95
4.2.3	Konstruktive Attribute	96
4.2.4	Bedingungen	98
4.2.5	Prozesse	99
4.2.6	Werte der unsicherheitsbehafteten Prozesseigenschaft	102
4.3	Integration unsicherheitsbehafteter Prozesseigenschaften	102
4.3.1	Abbildung unsicherheitsbehafteter Prozesseigenschaften	103
4.3.2	Verknüpfung der unsicherheitsbehafteten Prozesseigenschaft mit dem Volumenmodell	105
4.4	Integration der Wirkzusammenhänge unsicherheitsbehafteter Prozesseigenschaften	109
4.4.1	Übersicht über die ausgewählten Matrizen	110

4.4.2	Repräsentation von Netzwerken durch Matrizen und deren Matrixoperationen	113
4.4.3	Abbildung der Produktmodellsicht und deren Beziehungen.....	118
4.4.4	Abbildung der unsicherheitsorientierten Sicht und deren Beziehungen	126
4.4.5	Visualisierung der Wirkzusammenhänge unsicherheitsbehafteter Prozesseigenschaften.....	130
4.5	Analyse und Auswertung der Wirkzusammenhänge unsicherheitsbehafteter Prozesseigenschaften	135
4.5.1	Auswertung des Einflusses der identifizierten Variablen.....	135
4.5.2	Auswertung der Wechselwirkung zwischen zwei Variablen	142
4.6	Fazit und Verifikation.....	143
5	Implementierung.....	147
5.1	Architektur der prototypischen Implementierung.....	147
5.1.1	Systembaustein 1: Erstellung des Wirkgraphen	149
5.1.2	Systembaustein 2: Volumenmodellierung.....	149
5.1.3	Systembaustein 3: Regressionsanalyse.....	150
5.2	Wahl der eingesetzten IT-Werkzeuge	150
5.2.1	Wahl des CAD-Systems	151
5.2.2	Wahl des Tabellenkalkulationsprogramms.....	151
5.2.3	Wahl des Visualisierungswerkzeuges	151
5.2.4	Wahl der Programmierumgebung.....	152
5.3	Prototypische Implementierung des Assistenzsystems IWIP.....	152
5.3.1	Implementierung des Systembausteins 1: Erstellung des Wirkgraphen	153
5.3.2	Implementierung des Systembausteins 2: Volumenmodellierung	158
5.3.3	Implementierung des Systembausteins 3: Regressionsanalyse	159
5.4	Fazit	161
6	Validierung.....	163
6.1	Untersuchung der Tragfähigkeit mittels der Cognitive Walkthrough-Methode.....	164
6.2	Fazit	191
7	Ausblick.....	193
8	Zusammenfassung.....	195
9	Literatur	199

INHALTSVERZEICHNIS

Anhang A	221
Lebenslauf	227

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1.1: Integration unsicherheitsbehafteter Prozesseigenschaften in die Produktentwicklung (in Anlehnung an [239])	1
Abbildung 2.1: Modell für die integrierte Produkt- und Prozessentwicklung [2, 104].....	9
Abbildung 2.2: Unsicherheitsmodell des SFB 805 [76, 104]	12
Abbildung 2.3: Matrixdarstellung eines Zustands [71].....	13
Abbildung 2.4: Prozessmodell des SFB 805 in Anlehnung an [71, 186, 213]	14
Abbildung 2.5: Strukturbaum einer Baugruppe.....	17
Abbildung 2.6: Modellierungsstrategien von Einzelteilen [143].....	19
Abbildung 2.7: Klassifikation integrierter CAD-Systeme [240]	22
Abbildung 2.8: Klassifikation von Merkmalen und Eigenschaften [237, 247]	28
Abbildung 2.9: Einteilung der Toleranzen nach Eigenschaften in Anlehnung an [128, 190]	31
Abbildung 2.10: Lineare (links) und nichtlineare Maßkette (rechts).....	35
Abbildung 2.11: Idealisierte Verteilungsformen in der Toleranzrechnung [137].....	38
Abbildung 2.12: Normalverteilung mit ihren 6σ Grenzen	42
Abbildung 2.13 Ursache-Wirkungs-Diagramm [41].....	44
Abbildung 2.14: Beispiel einer binären DSM (in Anlehnung an [38])	45
Abbildung 2.15: Kreisschlüsse, Hierarchien, Cluster und Brücken innerhalb der DSM [159].....	46
Abbildung 2.16: Unterschied aktiver (links) und passiver (rechts) Elemente (losgelöst von einem Beispiel)	47
Abbildung 2.17: DSM-Elemente und deren Abhängigkeiten dargestellt in einem Flussdiagramm (in Anlehnung an [38]).....	48
Abbildung 2.18: Zusammenhang der DMM und DSM [161]	49
Abbildung 2.19: MDM über mehrere Domänen hinweg [198]	50

Abbildung 2.20: Die DSM und DMM innerhalb der MDM [161]	50
Abbildung 2.21: Charakterisierung von Graphen [33]	52
Abbildung 2.22: Robustheit durch Ausnutzung der Nichtlinearitäten [138].....	57
Abbildung 2.23: Formen der Varianzanalyse nach [28]	62
Abbildung 3.1: Anwendungsfalldiagramm zum Beziehungsnetzwerk zwischen unsicherheitsbehafteten Bauteilattributen und funktionalen Eigenschaften.....	73
Abbildung 3.2: Anwendungsfalldiagramm zur Auswirkung unsicherheitsbehafteter Bauteilattribute auf funktionale Eigenschaften.....	77
Abbildung 4.1: Prozessorientierte Übersicht über das Konzept.....	87
Abbildung 4.2: Lastelement des Dreibeins in seiner Dimension.....	89
Abbildung 4.3: Prozessmodell Lastelement mit unsicherheitsbehafteten Prozesseigenschaften	90
Abbildung 4.4: Histogramm der numerisch erzeugten Werte für die Länge l (a), Breite b (b) und Höhe h (c) des Lastelements.....	91
Abbildung 4.5: Histogramm der errechneten Werte des Volumens V des Lastelements.....	92
Abbildung 4.6: Übersicht der relevanten Modellsichten mit ihren Elementen und deren Beziehungen	93
Abbildung 4.7: Ermitteln der funktionalen Eigenschaften anhand der geforderten Funktion	94
Abbildung 4.8: Ableiten der Konstruktionselemente anhand der funktionalen Eigenschaften	95
Abbildung 4.9: Herleitung der funktionalen Eigenschaften und Konstruktionselemente am Dreibein	96
Abbildung 4.10: Herleitung der konstruktiven Attribute am Dreibein	98
Abbildung 4.11: Darstellung der Bedingungen am Dreibein.....	99
Abbildung 4.12: Repräsentation der Prozesse in UML-Notation	101
Abbildung 4.13: Dreistufige Prozesskette eines Dreibeins [71]	102
Abbildung 4.14: Unsicherheitsbehaftete Prozesseigenschaft in UML-Notation	104
Abbildung 4.15: Verknüpfung der unsicherheitsbehafteten Prozesseigenschaft mit den Geometrieelementen des Volumenmodells.....	106
Abbildung 4.16: Der Zusammenhang der funktionalen Eigenschaften und konstruktiven Attribute in UML-Notation.....	108

Abbildung 4.17: Abbildung der unsicherheitsbehafteten Prozesseigenschaft und dessen Referenzierung	109
Abbildung 4.18: Typen von DSM klassifiziert nach ihren Anwendungen [38, 48, 49, 80, 81, 167]	110
Abbildung 4.19: Abbildung aller Beziehungen mittels MDM	112
Abbildung 4.20: Für die Abbildung der Wirkzusammenhänge der unsicherheitsbehafteten Prozesseigenschaften relevante Beziehungsnetzwerke	113
Abbildung 4.21: Eigenschaften von Beziehungen	114
Abbildung 4.22: Bimodale Beziehung zwischen Baugruppe und Einzelteil.....	115
Abbildung 4.23: Multiplikation einer Matrix mit ihrer transponierten Matrix (in Anlehnung an Abbildung 4.22).....	117
Abbildung 4.24: Multiplikation zweier Matrizen in Anlehnung an [215]	118
Abbildung 4.25: Darstellung der n:m-Beziehungen der funktions- und bauteilorientierten Sicht.....	119
Abbildung 4.26: Instanziiertes Beziehungsnetzwerk 1	120
Abbildung 4.27: Instanziiertes Beziehungsnetzwerk 2	121
Abbildung 4.28: Instanziiertes Beziehungsnetzwerk 3	122
Abbildung 4.29: Instanziiertes Beziehungsnetzwerk 4	124
Abbildung 4.30: Beziehungsnetzwerk 4 als UML-Klassendiagramm	125
Abbildung 4.31: Instanziiertes Beziehungsnetzwerk 5	127
Abbildung 4.32: Beziehungsnetzwerk 5 als UML-Klassendiagramm	127
Abbildung 4.33: Instanziiertes Beziehungsnetzwerk 6	128
Abbildung 4.34: Instanziiertes Beziehungsnetzwerk 7	129
Abbildung 4.35: Aus den Beziehungsnetzwerken und deren Beziehungen resultiertes Netzwerk	131
Abbildung 4.36: Ebenenvisualisierung unsicherheitsbehafteter Prozesseigenschaften und deren Elemente	133
Abbildung 4.37: Einfache lineare Regression mit ihrer Regressionsgeraden.....	137
Abbildung 4.38: Matrixdiagramm der paarweisen Zusammenhänge.....	141
Abbildung 4.39: Regressionskoeffizient-Varianz-Diagramm	142
Abbildung 5.1: Architektur der prototypischen Implementierung	148
Abbildung 5.2: Das Assistenzsystem IWIP	153
Abbildung 5.3: Die DSM (links) und DMM (rechts) in Microsoft Excel	155

Abbildung 5.4: Ebenenvisualisierung des Wirkgraphen samt unsicherheitsbehafteten Prozesseigenschaften und den Prozessinformationen.....	157
Abbildung 5.5: Volumenmodellierung in CATIA V5	158
Abbildung 5.6: Regressionsanalyse im Assistenzsystem IWIP	160
Abbildung 6.1: Darstellung des Dreibeins als Volumenmodell nach [186]	164
Abbildung 6.2: Repräsentation der Teilfunktionen und deren funktionaler Eigenschaften an das Dreibein durch Eintragen in das Assistenzsystem IWIP	168
Abbildung 6.3: DSM zum Abbilden der Beziehungen zwischen funktionalen Eigenschaften und funktionalen Eigenschaften (Beziehungsnetzwerk 1)	169
Abbildung 6.4: Erstelltes parametrisches und constraintbasiertes Volumenmodell des Dreibeins	170
Abbildung 6.5: DMM zum Abbilden der Beziehungen zwischen funktionalen Eigenschaften und konstruktiven Attributen (Beziehungsnetzwerk 2)	171
Abbildung 6.6: DMM zum Abbilden der Beziehungen zwischen Konstruktionselementen und konstruktiven Attributen (Beziehungsnetzwerk 3)	171
Abbildung 6.7: DSM zum Abbilden der Beziehungen zwischen konstruktiven Attributen und konstruktiven Attributen (Beziehungsnetzwerk 4)	172
Abbildung 6.8: Schnittstelle zwischen CATIA V5 und dem Assistenzsystem IWIP....	174
Abbildung 6.9: Eintragen weiterer Elemente und deren Beziehungen in eine DSM.	175
Abbildung 6.10.: Eintragen weiterer Elemente und deren Wirkzusammenhänge in eine DMM	176
Abbildung 6.11: Fall PMI „Neigung“ und die Erweiterung der DSM um weiterführende konstruktive Attribute und deren Beziehungen	177
Abbildung 6.12: DSM zum Abbilden der Beziehungen zwischen Prozess und Prozess (Beziehungsnetzwerk 7).....	178
Abbildung 6.13: Ergebnisse der gemessenen Lastverteilungen in den Beinen je Bein bei Annahme eines Bohrungsdurchmessers von 15,0 mm .	179
Abbildung 6.14: DMM zum Abbilden der Beziehungen zwischen funktionale Eigenschaften und Prozessen (Beziehungsnetzwerk 5)	180
Abbildung 6.15: Messergebnisse des Prozesses „Lastverteilung“ und dessen Prozessattribute	181

Abbildung 6.16: DMM zum Abbilden der Beziehungen zwischen konstruktiven Attributen und Prozessen (Beziehungsnetzwerk 6)	183
Abbildung 6.17: Darstellung des vollständigen Wirkgraphs nach Erstellung aller Beziehungen	184
Abbildung 6.18: Identifizierte Einflussfaktoren auf den Prozess „Lastverteilung“	185
Abbildung 6.19: Vom Unsicherheitsexperten lokalisierte Ursachen für die unsicherheitsbehaftete Prozesseigenschaft „Aufnahmekraft“ bei der „Lastverteilung“ in den Beinen (1. Grad)	185
Abbildung 6.20: Vom Unsicherheitsexperten lokalisierte Ursachen für die für die unsicherheitsbehaftete Prozesseigenschaft „Aufnahmekraft“ bei der „Lastverteilung“ in den Beinen (2. Grad)	186
Abbildung 6.21: Auswahl der Ursachen für die für die unsicherheitsbehaftete Prozesseigenschaft „Aufnahmekraft“ bei der „Lastverteilung“ in den Beinen als Vorbereitung für die Regressionsanalyse	187
Abbildung 6.22: Vom Unsicherheitsexperten durchgeführte Regressionsanalyse zwischen der funktionalen Eigenschaft „Aufnahmekraft $F_1 = 15 \text{ N}$ “ und dem konstruktiven Attribut „D1_Durchmesser = 15 mm“	189
Abbildung A.1: Darstellung des Lastelements und dessen konstruktive Attribute.. .	221
Abbildung A.2: Beziehungen zwischen funktionalen Eigenschaften am Beispiel des Dreibeins.....	225
Abbildung A.3: Beziehungen zwischen Prozessen am Beispiel des Dreibeins.....	225
Abbildung A.4: Beziehungen zwischen konstruktiven Attributen am Beispiel des Dreibeins.....	226

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 2.1: Zusammenhang topologischer und geometrischer Elemente	16
Tabelle 2.2: Geometrisch-technischen Begriffe für geometrisch-technische Anordnungsfunktionen nach [13, 101, 140]	21
Tabelle 2.3: Lage- und Formtoleranzen [52]	33
Tabelle 2.4: Beurteilung der Prozessfähigkeit	41
Tabelle 2.5: Übersicht über die zulässige Abweichung in σ , der Prozessfähigkeitsindex C_{pk} und der Anteil zu erwartender fehlerfreier Werkstücke (in Anlehnung an [232])	41
Tabelle 2.6: Methoden zur Abbildung nicht quantifizierter Ursache-Wirkzusammenhänge	43
Tabelle 2.7: Methoden zur Abbildung mathematisch quantifizierter Beziehungen	56
Tabelle 2.8: Strukturentdeckende und strukturprüfende Verfahren	59
Tabelle 2.9: Die drei Skalenniveaus der Statistik [172]	59
Tabelle 2.10: Einteilung der strukturentdeckenden Verfahren nach deren Skalenniveaus nach [145]	60
Tabelle 2.11: Einteilung der strukturprüfenden Verfahren nach deren Skalenniveaus nach [136]	61
Tabelle 3.1: Überblick über das Anforderungsprofil	83
Tabelle 4.1: Einflussgrößen der Herstellungs- und Nutzungsprozesse	100
Tabelle 4.2: Kennzahlen zur Ermittlung Steigung β und des Achsenabschnitts α	139
Tabelle 4.3: Abhängige und identifizierte unabhängige Variablen der Ursache-Wirkbeziehung	140
Tabelle 4.4: Matrix der Korrelationskoeffizienten	142
Tabelle A.1: Werte für die Länge, Breite, Höhe und das Volumen des Lastelements	222-224

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

3D	Dreidimensional
AP	Anwendungsprotokoll
ASME	American Society of Mechanical Engineers
B-Rep	Boundary Representation
CAD	Computer Aided Design
CAROD	Computer Aided Robust Design
CAT	Computer Aided Tolerancing
CATIA	Computer Aided Three-Dimensional Interactive Application
CAX	Computer Aided x
CEN	Europäische Komitee für Normung
COPE	Collaborative Ontology-based Property Engineering
C_p	Prozessfähigkeitsindex
C_{pk}	Kritischer Prozessfähigkeitsindex
CSG	Constructive Solid Geometry
DDL	Data Definition Language
DfA	Design for Assembly
DfC	Design for Cost
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft
DfM	Design for Manufacture
DfQ	Design for Quality
DfX	Design for X
DIN	Deutsches Institut für Normung
DML	Data Manipulation Language
DMM	Domain Mapping Matrix
DSM	Design Structure Matrix
EN	Europäische Norm
FEM	Finite Elemente Methode
FMEA	Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse
FT&A	Functional Tolerancing & Annotation

GD&T	Geometric Dimensions & Tolerances
HoQ	House of Quality
ID	Identifikation
ISO	International Organization for Standardization
IT	Informationstechnologie
IWiP	Assistenzsystem zur Integration der Wirkzusammenhänge in die Produktentwicklung
JT	Jupiter Tessellation
JVM	Java Virtual Machine
KVP	kontinuierlicher Verbesserungsprozess
LML	Minimum-Material-Grenzmaß
M_0	Schließmaß
MDM	Multiple Domain Matrix
MML	Maximum-Material-Grenzmaß
MMVL	Maximum Material Virtual Limit
M_S	Statistisches Schließmaß
NC	Numerical Control
N_S	Statistisches Nennschließmaß
OSG	Obere Spezifikationsgrenze
PDD	Property-Driven Development
PDF	Portable Document Format
PDM	Produktdatenmanagement
PEP	Produktentstehungsprozess
PLM	Product Lifecycle Management
PLZ	Produktlebenszyklus
PMI	Product and Manufacturing Information
QFD	Quality Function Deployment
SADT	Structured Analysis and Design Technique
SE	Systems Engineering
SFB 805	Sonderforschungsbereich 805
S_N	Nennschließmaß
S_o	Höchstschließmaß
STEP	Standard for the Exchange of Product Model Data
S_u	Mindestschließmaß
T_{a1}	Oberes Abmaß
T_{a2}	Unteres Abmaß
T_{SA}	Arithmetische Schließmaßtoleranz
T_{SS}	Statistische Schließmaßtoleranz

TU	Technische Universität
T _w	Wahrscheinlich auftretende Schließtoleranz
UDT	Unsicherheitsdatentyp
UML	Unified Modeling Language
USG	Untere Spezifikationsgrenze
VB	Visual Basic
VBA	Visual Basic for Applications
VBScript	Visual Basic Script
VDA	Verband der Automobilindustrie
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VDMA	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau
VS	Virtual Size
VS	Wirksames Istmaß
WiRPro	Wissensbasierte Rückführung von Produktnutzungsinformationen in die Produktentwicklung
XML	Extensible Markup Language
XSL	Extensible Stylesheet Language
XSLT	Extensible Stylesheet Language Transformation