

Hans-Georg Enkler

Rechnergestützter Entwurf von Bauteilen mit stark streuenden Leitstützstrukturen am Beispiel hochbelastbarer urgeformter mikromechanischer Systeme

computer aided design of components
with channel and support structures subject
to high scatter using high strength molded
micromechanical systems as an example

Band 44

Systeme ■ Methoden ■ Prozesse

Hans-Georg Enkler

**Rechnergestützter Entwurf von Bauteilen
mit stark streuenden Leitstützstrukturen
am Beispiel hochbelastbarer urgeformter
mikromechanischer Systeme**

computer aided design of components
with channel and support structures subject
to high scatter using high strength molded
micromechanical systems as an example

Band 44

Herausgeber: o. Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. A. Albers

Copyright:

IPEK – Institut für Produktentwicklung, 2010
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Universität des Landes Baden-Württemberg und
nationales Forschungszentrum in der Helmholtz-Gemeinschaft

Alle Rechte vorbehalten

Satz:

Hans-Georg Enkler

ISSN

1615-8113

**Rechnergestützter Entwurf von Bauteilen mit
stark streuenden Leitstützstrukturen am Beispiel
hochbelastbarer urgeformter mikro-
mechanischer Systeme**

Zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften
von der Fakultät für Maschinenbau des
Karlsruher Institutes für Technologie (KIT)

genehmigte
Dissertation

von

Dipl.-Ing. Hans-Georg Enkler
aus Heidelberg/Baden-Württemberg

Tag der mündlichen Prüfung: 23. April 2010

Hauptreferent o. Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Albert Albers

Korreferent Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze

Vorwort des Herausgebers

Wissen ist einer der entscheidenden Faktoren in den Volkswirtschaften unserer Zeit. Der Unternehmenserfolg wird in der Zukunft mehr denn je davon abhängen, wie schnell ein Unternehmen neues Wissen aufnehmen, zugänglich machen und verwerten kann. Die Aufgabe eines Universitätsinstitutes ist es, hier einen wesentlichen Beitrag zu leisten. In den Forschungsarbeiten wird ständig Wissen generiert. Dieses kann aber nur wirksam und für die Gemeinschaft nutzbar werden, wenn es in geeigneter Form kommuniziert wird. Diese Schriftenreihe dient als eine Plattform zum Transfer und macht damit das Wissenspotenzial aus aktuellen Forschungsarbeiten am IPEK – Institut für Produktentwicklung Karlsruhe (ehemals: Institut für Maschinenkonstruktionslehre und Kraftfahrzeugbau) verfügbar.

Die Forschungsfelder des Institutes sind die methodische Entwicklung und das Entwicklungsmanagement, die rechnergestützte Optimierung von hochbelasteten Strukturen und Systemen, die Antriebstechnik mit einem Schwerpunkt auf den Gebieten Antriebsstrang-Engineering und Tribologie von Lager- und Funktionsreibsystemen, die Mikrosystemtechnik mit dem Focus auf die zugehörigen Entwicklungsprozesse sowie die Mechatronik. Die Forschungsberichte werden aus allen diesen Gebieten Beiträge zur wissenschaftlichen Fortentwicklung des Wissens und der zugehörigen Anwendung – sowohl den auf diesen Gebieten tätigen Forschern als auch ganz besonders der anwendenden Industrie – zur Verfügung stellen. Ziel ist es, qualifizierte Beiträge zum Produktentwicklungsprozess zu leisten.

Albert Albers

Vorwort zu Band 44

Ein Megatrend in der modernen Technik ist die Miniaturisierung. So werden technische Systeme durch eine systematische Verkleinerung der Hauptabmessungen hin zu neuen Leistungsbereichen und neuen Anwendungen geführt. Beispiele sind mechanische Sensoren zur Feststellung der Gierrate im Kraftfahrzeug, Beschleunigungssensoren und mechanische Mikroventile, die mittlerweile in großen Stückzahlen hergestellt werden.

Durch neue Design-Prinzipien, d. h. die gezielte Kopplung und Parallelschaltung von Mikrosystemen, können ganz neue Lösungen gefunden werden. Wichtige Vertreter dieser Gattung sind – neben den durch die sogenannte LIGA-Technik hergestellten zweieinhalbdimensionalen Strukturen – komplexe dreidimensionale Strukturen, wie sie in Mikroantrieben, Mikrogetrieben oder auch mikroverfahrenstechnischen Anlagen erforderlich sind. Im Sonderforschungsbereich 499 „Entwicklung, Produktion, Qualitätssicherung urgeformter Mikrobauteile aus metallischen und keramischen Werkstoffen“ der Deutschen Forschungsgemeinschaft werden daher Prozesse zur Entwicklung und Produktion von urgeformten mechanischen Mikrostrukturen erforscht und komplette Prozessketten erstellt. Hierbei kommt der Verwendung neuer anspruchsvoller und hochbelastbarer Werkstoffe eine besondere Rolle zu. Im Rahmen des Sonderforschungsbereiches werden durch Mikropulverspritzguss hergestellte Mikrobauteile aus Keramiken und durch Mikrogussverfahren hergestellte metallische Mikrobauteile betrachtet.

Ein wichtiger Aspekt bei der Miniaturisierung ist die zunehmende Relevanz geometrischer Abweichungen. Da sich die geometrischen Streuungen mit abnehmender Strukturgröße derzeit nicht im gleichen Maße herabskalieren lassen, sind neue Design-Prinzipien zur Beherrschung von Toleranzen und Fertigungsabweichungen notwendig. Gleiches gilt für die mechanisch beanspruchten Leitstützstrukturen. Hier kann nicht mehr ohne weiteres von einem isotropen Materialverhalten ausgegangen werden, da die Abmessungen der Kristallite der Kornstrukturen in einer ähnlichen Größenordnung wie die der Bauteile liegen.

Am IPEK – Institut für Produktentwicklung des Karlsruher Institutes für Technologie (KIT) wird in einer Forschungsgruppe an Herangehensweisen für die Dimensionierung derartiger Mikrosystemen gearbeitet. Hierbei muss insbesondere auch der Einfluss der durch die Kornstruktur hervorgerufenen Anisotropie in den Dimensionierungsprozessen berücksichtigt werden. An dieser Stelle setzt die wissenschaftliche Arbeit von Herrn Dr.-Ing. Hans-Georg Enkler an. Er hat sich zum Ziel gesetzt, die durch die Kornstruktur entstehenden Streuungen bei der Dimensionierung mikromechanischer Systeme zu

berücksichtigen, wobei insbesondere dem stochastischen Charakter des Aufbaus der Kornstruktur eine besondere Beachtung zukommt. Zur Lösung der sich bei der Dimensionierung ergebenden Fragestellungen erarbeitet Herr Dr.-Ing. Hans-Georg Enkler ein durchgängiges rechnergestütztes Prozessmodell zur Unterstützung des Entwurfes von Bauteilen, deren Leitstützstrukturen starken Streuungen unterliegen. Damit wird bereits im Entwurfsprozess eine frühzeitige und sichere Dimensionierung möglich. Darüber hinaus stellt Herr Dr.-Ing. Hans-Georg Enkler eine methodische Unterstützung für die Auswahl und Konfiguration eines Simulations- bzw. Optimierungsprozesses auf Basis des Contact & Channel Modells (C&CM) bereit. Aufbauend auf dieser Basis entwickelt er Ansätze zur Modellierung und Simulation komplexer dreidimensionaler Bauteile einschließlich ihrer Kornstruktur und etwaigen Defekten. Die anhand der Analyse realer Mikrosysteme gewonnenen Erkenntnisse nutzt er zur Entwicklung eines neuen Prozessmodelles zur Formoptimierung von Bauteilen mit stark streuenden Leitstützstrukturen. Am Beispiel realer Szenarien führt er eine Validierung der neuen numerischen Ansätze durch. Die Arbeit von Herrn Dr.-Ing. Hans-Georg Enkler leistet damit einen essenziellen Beitrag zur Erschließung des Potenzials hochbeanspruchter Mikrostrukturen auf Basis keramischer und metallischer Werkstoffe für die Produktentwicklung.

Albert Albers

Für Christian†

If I had sixty minutes to save the earth,
I would spend the first fifty-nine
defining what the problem was
and the last minute identifying the solution.

Albert Einstein

Kurzfassung

In den vergangenen Jahren hat die Bedeutung der virtuellen Produktentwicklung stetig zugenommen. Gesteigerte Funktionsumfänge bei kommerziell verfügbaren Softwarepaketen sowie die Weiter- und Neuentwicklung von Simulationsmethoden ermöglichen dank der wachsenden Rechnerleistung mehr und mehr eine ganzheitliche Betrachtung von Bauteilen und Systemen.

Mikromechanische Systeme stellen in mehrererlei Hinsicht eine besondere Herausforderung dar. Die nicht mehr vernachlässigbare Anisotropie des Materials und die herstellbedingten Toleranzen bringen eine große Komplexität mit sich. Der Einsatz numerischer Methoden birgt enormes Potenzial zur gezielten Analyse damit einhergehender Effekte und zur Optimierung solcher Bauteile und Systeme.

In der vorliegenden Arbeit wird ein neuer Ansatz zum Entwurf von Bauteilen, deren Kornstruktur aufgrund der geringen Bauteilabmessungen einen Einfluss auf ihr Verhalten ausübt – also Bauteilen mit stark streuenden Leitstützstrukturen –, vorgestellt. Als praxisnahe und komplexe Anwendungsbeispiele dienen Demonstratorbauteile und -systeme, die im Rahmen des durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft geförderten Sonderforschungsbereiches 499 entwickelt werden. Ein Einsatz in realen Szenarien wird durch die Integration von neu entwickelten Methoden und Werkzeugen sowie etablierter Softwarepakete erreicht.

Ausgehend von einer Einführung in die Thematik werden Grundbegriffe sowie der Stand der Forschung in den für die Arbeit relevanten Themenfeldern erläutert. Im Rahmen der Darstellung des Standes der Forschung wird insbesondere auf die theoretischen Aspekte der eingesetzten Verfahren eingegangen. Im Hauptteil der Arbeit werden neue Ansätze zur Modellierung von Bauteilen einschließlich ihrer Kornstruktur und Defekten entwickelt. Unter Einbeziehung des Gesamtsystems werden die Spannungen innerhalb eines solchen Mikrobauteiles analysiert. Aufgrund der identifizierten und die Dimensionierung solcher Bauteile erschwerenden Streuungen der lokal vorherrschenden Spannungen wird – aufbauend auf statistischen Analysen – ein Prozessmodell zur robustheitsbasierten Formoptimierung entwickelt. Notwendigkeit und Potenzial des neuen Prozessmodells werden an einem praxisnahen Szenario aus dem Sonderforschungsbereich 499 aufgezeigt. Abschließend werden die Verfahren zu einem durchgängigen Prozessmodell zur Unterstützung der Entwicklung hochbelastbarer urgeformter mikromechanischer Systeme zusammengeführt.

Abstract

In recent years, the importance of virtual product development has increased steadily. Growing computational capabilities and functional variety of commercially available software packages as well as enhanced and new simulation methods enable more and more comprehensive analyses of components and systems.

During the development of micromechanical systems, particular challenges arise—for instance, the anisotropy of the material's grain structure cannot be neglected any more. Micromechanical components' and grains' dimensions may lie in similar orders of magnitude. The application of numerical methods holds great potential to a systematic analysis of effects coming along with a microcomponent's grain structure. Furthermore, suchlike analyses provide a basis for the optimization of micromechanical components and systems.

The present work introduces a new approach for computer aided design of components whose grain structures exert a dominating influence on their behavior. Due to small component dimensions, the grain structure induces high scatter regarding the components' channel and support structures. As realistic and practically oriented examples of use, demonstrator systems developed within the scope of DFG-funded collaborative research center 499 are regarded. Applicability of the approach within the scope of real scenarios is achieved by integrating the newly developed methods and established software packages.

Starting from an introduction, an overview on the current state of research and fundamental terms in fields relevant for the work is given. Special focus is laid on theoretical aspects of the methods and processes used within this work. The main part of the work introduces a new approach including methods for modeling and analyzing components including individual grain structures and defects. Considering interactions with the system, stresses within such microcomponents are analysed. Motivated by the scattering identified during these analyses, a novel process model for robustness-based shape optimisation by means of statistical analyses is developed. Necessity and potential of this new process model are depicted within a realistic scenario—a micro turbine driven by compressed air—provided by collaborative research center 499. Finally, the procedures are conflated to a universal process model supporting the development of high strength molded micromechanical systems.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als akademischer Mitarbeiter am IPEK – Institut für Produktentwicklung des Karlsruher Institutes für Technologie (KIT).

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn o. Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Albert Albers, der mich während meiner Zeit als akademischer Mitarbeiter am IPEK – Institut für Produktentwicklung nicht nur gefördert, sondern auch geprägt hat. In unzähligen, teilweise sehr lebhaften Diskussionen nahm er durch wertvolle Anregungen großen Einfluss auf die vorliegende Forschungsarbeit. Für die mir gegebenen Gestaltungsmöglichkeiten und das entgegengebrachte Vertrauen danke ich ihm.

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze danke ich für die Übernahme des Korreferates. Er begleitete meine Arbeit im Rahmen des Sonderforschungsbereiches 499 vom ersten Tag an. Seine fachlichen Anregungen und Beiträge stellen eine wesentliche Grundlage meiner Arbeit dar.

Für ihre Offenheit und ihre Mitwirkung möchte ich mich bei allen Mitarbeitern des IPEK – Institut für Produktentwicklung, insbesondere meinen Kollegen der Forschungsgruppe CAE/Optimierung, bedanken. In vielen interessanten und ausgiebigen Diskussionen haben sich nicht nur alternative, sondern teils sogar neue wissenschaftliche Ansätze ergeben, welche Einfluss auf meine Arbeit genommen haben. Die freundliche, kollegiale Zusammenarbeit und die angenehme Arbeitsatmosphäre haben wesentlich zum Gelingen meiner Arbeit beigetragen. Des Weiteren danke ich meinen Kollegen aus dem durch die DFG geförderten Sonderforschungsbereich 499 für die vielen fachübergreifend geführten Diskussionen. Auch allen meinen wissenschaftlichen Hilfskräften, Studien- und Diplomarbeitern möchte ich für die tatkräftige Unterstützung und Motivation danken.

Mein herzlichster Dank gilt meiner Familie, die diese Arbeit durch ihre Unterstützung und ihren Rückhalt möglich gemacht haben. Meiner Mutter und meinem Vater danke ich dafür, dass sie mir meinen Weg ermöglicht und mich auf diesem stets begleitet haben. Für den Rückhalt auch in anstrengenden Zeiten und vor allem für das Verständnis und den unermüdlichen Optimismus danke ich meiner Frau Sina von ganzem Herzen.

Hans-Georg Enkler

Inhalt

Abkürzungsverzeichnis	xxiii
Symbolverzeichnis	xxvii
1 Einleitung	1
2 Grundlagen und Stand der Forschung	5
2.1 Der Produktentstehungsprozess – Grundbegriffe und Methoden	5
2.1.1 Ziel-, Handlungs- und Objektsystem	5
2.1.2 Das integrierte Produktentstehungs-Modell – iPeM	6
2.1.3 Das Contact & Channel Model – C&CM	8
2.2 Rechnerunterstützung im Produktentstehungsprozess	10
2.3 Optimierungsverfahren	11
2.3.1 Allgemeine Formulierung	12
2.3.2 Mathematische Programmierung	13
2.3.3 Optimalitätskriterien	14
2.3.4 Weitere Verfahren	15
2.4 Strukturoptimierung	16
2.4.1 Topologieoptimierung	17
2.4.2 Formoptimierung	19
2.4.3 Weitere Varianten	26
2.5 Robust Design	28
2.5.1 Deterministische und stochastische Analyse	30
2.5.2 Samplingverfahren	31
2.5.3 Antwortflächenverfahren	32
2.6 Mikrotechnik	33
2.6.1 Ausprägungen der Mikrotechnik	34
2.6.2 Forschungsbedarf	34
2.6.3 Herstellverfahren	36
2.6.4 Mikrospezifischer Produktentwicklungsprozess – μ PEP	43
2.7 Werkstoffwissenschaftliche Grundlagen	44
2.7.1 Kristallisation	44
2.7.2 Keimbildung	45

2.7.3	Keimwachstum	47
2.7.4	Erstarrung der Schmelze	48
2.7.5	Kristallisation von Legierungen	49
2.7.6	Fehlerscheinungen	50
2.7.7	Gefüge	51
2.8	Simulation und Optimierung in der Mikrotechnik	54
2.8.1	Modellierung der Kornstruktur	55
2.8.2	Simulation mikromechanischer Komponenten	56
3	Zielsetzung der Arbeit	59
4	Ein generalisierter Ansatz auf Basis des C&CM	61
4.1	Situationsanalyse und Problemeingrenzung	61
4.2	Ansatz	62
4.3	Der Contact & Channel Model Coach – C ³	66
4.4	Streuende Leitstützstrukturen	67
4.5	Streuende Leitstützstrukturen aus Sicht des generalisierten Ansatzes	70
4.5.1	Zielsystem der Optimierung	71
4.5.2	Zielsystem der Simulation	71
4.5.3	Ableitung der weiteren Vorgehensweise	72
5	Ein neuer Ansatz zur Modellierung und Simulation von Bauteilen mit stark streuenden Leitstützstrukturen	75
5.1	Genereller Ansatz	76
5.2	Das Softwarepaket G/Struct	78
5.3	Modellierung der Geometrie der Kornstruktur	80
5.3.1	Geometriebasierter Ansatz	81
5.3.2	Finite Elemente basierter Ansatz	83
5.3.3	Vergleich beider Ansätze	86
5.3.4	Generierung der Keime	89
5.4	Modellierung der Materialeigenschaften	95
5.5	Zusatzaufwand	98
6	Validierung komplexer Mikrosysteme	99
6.1	Das Demonstratorsystem	99
6.2	Modellbildung	100
6.2.1	Contact & Channel Modell des Systems	100
6.2.2	Finite Elemente Modell des Systems	102
6.3	Zeitvarianter Belastungszustand eines dynamischen Modells	106
6.3.1	Direkte Integrationsverfahren	107
6.3.2	Quasi-statischer Ansatz	110

6.4	Analyse des Demonstratorsystems	111
6.4.1	Einfluss der Kornstruktur – zweidimensionales Modell	111
6.4.2	Einfluss der Kornstruktur – dreidimensionales Modell	114
6.4.3	Einfluss der Porosität	119
6.4.4	Stabilität der Analysen	120
6.5	Fazit	121
7	Ein neues Prozessmodell zur Optimierung von Mikrobauteilen unter Robustheitsaspekten	123
7.1	Anwendbarkeit der spannungsbasierten Formoptimierung	124
7.2	Ein neues Prozessmodell zur Formoptimierung	125
7.2.1	Robustheits- und Zuverlässigkeitskriterien	126
7.2.2	Annahmen zur lokalen Spannungsverteilung	131
7.2.3	Abbruchkriterium und Konvergenzverhalten	132
7.2.4	Automatisierte Validierung eines Designvorschlages	134
7.2.5	Implementierung	135
7.3	Einordnung in das integrierte Produktentstehungs-Modell	136
7.4	Übertrag- und Erweiterbarkeit	137
8	Szenario für die robustheitsbasierte Formoptimierung	139
8.1	Das Szenario	139
8.2	Modellbildung	140
8.3	Optimierung des Rotorblattes	141
8.3.1	Gegenüberstellung der Optimierungsstrategien	142
8.3.2	Einfluss der Korngröße auf die optimale Bauteilform	147
8.3.3	Umsetzung der Ergebnisse	150
8.4	Fazit	151
9	Durchgängige Prozesskette	153
9.1	Prozesssimulation	153
9.2	Einfluss von Toleranzen auf das Systemverhalten	154
9.3	Verschleißsimulation	156
9.4	Prozesskette	157
10	Zusammenfassung und Ausblick	159
10.1	Zusammenfassung	159
10.2	Ausblick	161
A	Anhang	165
A.1	Daten der Planetenräder des DFG Sonderforschungsbereiches 499	165
A.2	Datenformat für die Kornstrukturgenerierung	166

A.2.1	G/Struct Inputfile – .gsi	166
A.2.2	Beispiel eines G/Struct Inputfiles	167
A.3	Datenformat für die automatische Validierung	168
A.3.1	G/Struct Validation Inputfile – .gsv	168
A.3.2	Beispiel eines G/Struct Validation Inputfiles	168
A.4	G/Struct Shape Datenfluss	169
A.5	Verwendete Softwarepakete	170
A.6	Materialdaten Au58Ag23Cu12Pd5 – Stabilor®G	170
A.7	Turbinenrotor – ursprüngliches Design	171
A.8	Turbinenrotor – optimiertes Design	172
Literaturverzeichnis		173
Stichwortverzeichnis		197

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Beschreibung
ASCII	American standard code for information interchange
BC	Randbedingung (boundary condition)
BF	Begrenzungsfläche
C&CM	Contact & Channel Model
C ³	Contact & Channel Model Coach
CAD	computer aided design
CAE	computer aided engineering
CAO	computer aided optimization
CAOSS	computer aided optimization system Sauter
CBN	kubisch kristallines Bornitrid (cubic boron nitride)
CFL	Courant-Friedrichs-Lewy-Bedingung
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft
DOE	design of experiments
EDM	electrical discharge machining
FE	Finite Elemente
FEA	Finite Elemente Analyse
FEM	Finite Elemente Methode
FK	Funktionskontakt
GG	Grundgesamtheit
GIWM	global incremental wear model
GS	Gesamtstruktur
gsi	Suffix für G/Struct Inputfiles
gsl	Suffix für G/Struct Logfiles
gsv	Suffix für G/Struct Validation Inputfiles

Abkürzung	Beschreibung
inp	Suffix für Abaqus Inputfile
IPEK	Institut für Produktentwicklung des Karlsruher Institutes für Technologie
iPeM	integriertes Produktentstehungs-Modell nach Albers (2010)
LHS	Latin Hypercube Sampling
LIGA	Lithographie, Galvanik und Abformung
LSS	Leitstützstruktur
MCS	Monte Carlo Simulation
MDO	multidisziplinäre Optimierung
MEMS	micro electro mechanical systems
MKL	Maschinenkonstruktionslehre
MKS	Mehrkörpersystem(-simulation)
μ CIM	Mikropulverspritzguss mit Keramiken (micro ceramic injection molding)
μ Guss	Mikroguss
μ MIM	Mikropulverspritzguss mit Metallen (micro ceramic injection molding)
μ PEP	mikrospezifischer Produktentwicklungsprozess für werkzeuggebundene Mikrotechniken nach Marz (2005)
μ PIM	Mikropulverspritzguss (micro powder injection molding)
Nd:YAG-Laser	Neodym-dotierter Yttrium-Aluminium-Granat-Laser
ODF	Orientierungsdichteverteilungsfunktion (orientation distribution function)
PCE	polynomial chaos expansion
PEP	Produktentwicklungsprozess
Pixel	Bildpunkt (picture element)
pl	Suffix für Perl Bibliotheken (libraries)
PLT	Problemlösungsteam innerhalb des Problemlösungsprozesses SPALTEN
pm	Suffix für Perl Module
RB	Randbedingung
RS	Reststruktur

Abkürzung	Beschreibung
SFB	Sonderforschungsbereich
SIMP	solid isotropic material with penalization
SPALTEN	allgemeiner Problemlösungsprozess nach Saak (2006)
SPH	smoothed particle hydrodynamics
TIM	thermoplastic injection molding
TS	Tragstruktur
UTF-8	8-Bit UCS transformation format (Kodierung für Unicode-Zeichen)
Voxel	Volumenpixel (volumetric pixel)
VRML	virtual reality modeling language
WF	Wirkfläche
WFP	Wirkflächenpaar
wrl	Suffix für VRML-Dateien
XML	extensible markup language
ZHO	Ziel-, Handlungs- und Objektsystem
ZIM	Zentrum für Integrierte Mikrofertigung

Symbolverzeichnis

Symbol	Beschreibung
α	Schrittweite bei einem Optimierungsproblem
α_{an}	Profilwinkel am Kopfzylinder
α_t	Eingriffswinkel
α_w	Betriebseingriffswinkel
β	Schrägungswinkel
$\beta^{(n)}$	Skalierungsfaktor für die n -te Iteration beim Verfahren der konjugierten Gradienten
ΔG	Änderung der freien Enthalpie
ΔG_g	Erhöhung der freien Enthalpie
ΔG_V	Umwandlungsenergie beim Phasenübergang von flüssiger zu fester Phase
Δg_v	auf Volumeneinheit bezogene freie Bildungsenthalpie der festen Phase
Δi	zusätzlich benötigte Anzahl an Iterationen
$\Delta_{min,i}$	geringster Abstand von Keim i zu einem Elementschwerpunkt
ΔT	Unterkühlung
Δt	Zeitschritt
Δt_{krit}	kritische Schrittweite
$\Delta t_{krit,mikro}$	kritische Schrittweite im Mikrobereich
ϵ	Schranke für Abbruchkriterium
ϵ	Toleranzradius für den Finite Elemente basierten Ansatz
ϵ_α	Profilüberdeckung
η_k	Lagrange-Multiplikator
Γ	Rand eines Gebietes
Γ_0	Randbereich ohne äußere Kräfte (traction-free boundary)
Γ_c	beschränkter Designrand
Γ_d	Designrand (design boundary)
$\Gamma_{d,DV}$	Berandung des Designvorschlages
Γ_f	freier Designrand
Γ_t	Randbereich mit Belastung (static boundary)

Symbol	Beschreibung
Γ_u	Randbereich mit Verschiebungsnebenbedingung (kinematic boundary)
λ_j	Lagrange-Multiplikator
μ	Mittelwert
μ_{M_i}	Mittelwert der Spannungen aller mit Modell i durchgeführten Analysen
$n_{\Gamma,d}$	Anzahl der Designknoten
Ω	Gebiet (domain) – $\Omega \in \mathbb{R}^n, n = 2, 3$
$\hat{\Omega}$	Variationsgebiet
Φ	Porosität
ϕ	Eulerwinkel
Φ_t	Porosität in Zeitschritt t
ψ	Eulerwinkel
ρ	Dichte
ρ_0	Referenzdichte
ρ_{an}	Kopfkantenrundung
$\rho(x)$	lokale Dichte
σ	Spannung
σ_{krit}	kritische Spannung
θ	Eulerwinkel
A	Randpunkt des Designrandes
A	auf Basis der Vorlage des geometriebasierten Ansatzes erstellte Instanz A
A	Twist-Transformation (Mersenne Twister)
a	Achsabstand
A'	Randpunkt des Designrandes
B	auf Basis der Vorlage des geometriebasierten Ansatzes erstellte Instanz B
b	Bitmaske für das Tempering beim Mersenne Twister
b	Zahnbreite
C	Dämpfung
C	auf Basis der Vorlage des geometriebasierten Ansatzes erstellte Instanz C
D	Korn D , Teilmenge der Instanz C
c	Bitmaske für das Tempering beim Mersenne Twister
d	Teilkreisdurchmesser
d_a	Kopfkreisdurchmesser
d_b	Grundkreisdurchmesser
d_f	Fußkreisdurchmesser

Symbol	Beschreibung
d_{Fa}	Kopf-Formkreisdurchmesser
\bar{d}_K	mittlerer Korndurchmesser
E	Elastizitätsmodul
E_0	Elastizitätsmodul des Referenzmaterials
$E(x)$	lokaler Elastizitätsmodul
f	Istwert
$F(\mathbf{X})$	Zielfunktion
G	freie Enthalpie, auch Gibbssche freie Energie
$G(x_i)$	Korn i
$g_j(\mathbf{X})$	Ungleichheitsnebenbedingungen
$\tilde{g}(\mathbf{x})$	Antwortfläche
$g(\mathbf{x}_k)$	Systemantworten
H	Enthalpie
\mathbf{H}	Hesse-Matrix
$h_{aP}^* / h_{fP}^* / \rho_{aP}^*$	Bezugsprofil
$h_k(\mathbf{X})$	Gleichheitsnebenbedingungen
I	Identitätsmatrix (Mersenne Twister)
	Laufvariablen
K	Steifigkeit
k	Spreizung
L	Lastfall
L	geringste Elementkantenlänge
$L(f)$	Verlust nach Taguchi
$L(\mathbf{X}, \mathbf{g}, \mathbf{h})$	Lagrangefunktion
M	Anzahl der Evaluationspunkte der Antwortfläche
M	Masse
m	Anzahl paralleler Sequenzen (Mersenne Twister)
m	Nennwert
$M_{Ausgang}$	Ausgangsdrehmoment
M_i	mit Kornstruktur versehenes Modell i
$\bar{W}_{M_i,ani,arith}$	Mittelwert der Dehnungsenergien aller anisotrop berechneten Modelle M_i
$W_{M_i,ani,j}$	Dehnungsenergie des mit Kornstruktur j berechneten Modells M_i
m_n	Normalmodul
N	Dimension der Antwortfläche
n	Drehzahl
n	Iteration
n	Rekursionsgrad (Mersenne Twister)

Symbol	Beschreibung
n_A	Abbruchkriterium
n_{Eingang}	Eingangsdrehzahl
n_{FE}	Anzahl der Finiten Elemente
n_g	Anzahl der Ungleichheitsnebenbedingungen
n_h	Anzahl der Gleichheitsnebenbedingungen
$n_{h,V}$	Zielvolumen
n_K	Anzahl der Keime
n_M	Anzahl der analysierten Modelle je Optimierungsiteration
$n_{M,ges}$	Anzahl aller während der Optimierung analysierten Modelle
n_S	Anzahl der während des Kornwachstums untersuchten Zeitpunkte
P	Menge an Keimen
p	Druck
p	Penalisierungsfaktor (SIMP)
p	Wahrscheinlichkeit
$Q_{p,i,k}$	p-Quantil der Spannung in Lastfall i an Knoten k
R	Rotationsmatrix im euklidischen Raum
R	Regressionsparameter, ein Maß zur Bewertung der Güte einer Antwortfläche
r	Radius
r_0	kritischer Keimradius
R^{ext}	äußere Reaktionskraft
r_{FEA}	Radius um einen Keim beim Finite Elemente basierten Ansatz
$r_{gA,temp}$	Radius der Vorlage des geometriebasierten Ansatzes
S	Entropie
S	Raum
s	Bit-Shift für das Tempering beim Mersenne Twister
s	Standardabweichung
s^2	Varianz
$s_{i,k}$	Standardabweichung der Spannung in Lastfall i an Knoten k
s_{M_i}	Standardabweichung der Spannungen aller mit Modell i durchgeführten Analysen
$\mathbf{S}^{(n)}$	Suchrichtung in n -ter Iteration
s_{ref}	Referenzwert für die Standardabweichung der Spannung
T	Temperatur
t	Bit-Shift für das Tempering beim Mersenne Twister
T_k	Kristallisationstemperatur
u	Verschiebungen

Symbol	Beschreibung
V	Lösungsraum bei einem Optimierungsproblem
V	Verschiebung
V	Volumen
V_0	Ausgangsvolumen
$V_{a,t}$	Volumen des Korns i zum Zeitschritt t
V_c	Volumen des Bauteils
V_n	Volumen in n -ter Iteration
w	Wortbreite (Mersenne Twister)
\mathbf{X}	Designvariablen
x	Profilverschiebungsfaktor
\mathbf{x}	Werte (Mersenne Twister)
$\mathbf{X}^{(0)}$	Startdesign
$x_{gA,temp}$	x-Koordinate des Mittelpunktes der Vorlage des geometrie-basierten Ansatzes
x_i	Keim i
\mathbf{x}_k	Evaluationspunkte der Antwortfläche
x^l	Bitmaske (Mersenne Twister)
X_i^l	Beschränkung der Designvariablen
x^u	Bitmaske (Mersenne Twister)
X_i^u	Beschränkung der Designvariablen
y	Punkt im Raum S
$y_{gA,temp}$	y-Koordinate des Mittelpunktes der Vorlage des geometrie-basierten Ansatzes
z	Zähnezahl
$z_{gA,temp}$	z-Koordinate des Mittelpunktes der Vorlage des geometrie-basierten Ansatzes

1 Einleitung

Die Mikrotechnologie ist eine der vielversprechendsten Technologien des neuen Jahrtausends. In den vergangenen Jahrzehnten ist sie hauptsächlich durch die rasante Entwicklung im Bereich der Computertechnologie geprägt worden. Die in diesem Umfeld etablierten Fertigungsverfahren ermöglichen die Herstellung großer Stückzahlen monolithisch aufgebauter, siliziumbasierter Mikrosysteme.¹ Bedingt durch die Forderung nach einer kontinuierlichen Miniaturisierung und Integration von mechanischen, elektrischen und optischen Komponenten gewinnen daneben in jüngster Zeit auch hybrid aufgebaute und rein mechanische Mikrosysteme zunehmend an Bedeutung.² So belegen Studien der mit Bereichen wie Sensorik, Aktorik, Mikrofluidik etc. breit gefächerten Branche eine hohe Wachstumsrate von jährlich etwa 15%.³ Die Miniaturisierung und Integration einer Vielzahl von Funktionen bei gleichzeitig immer kleiner werdendem Bauraum geht dabei oft einher mit Ansprüchen wie geringerem Gewicht, niedrigerem Energieverbrauch und geringeren Kosten.

Neben etablierten siliziumbasierten Technologien wächst daher seit einigen Jahren der Bedarf an alternativen Verfahren zur Herstellung hochbelastbarer und verschleißbeständiger dreidimensionaler Mikrobauteile aus Metall oder Keramik. Hierdurch werden Anwendungsfelder wie beispielsweise der klassische Maschinenbau oder die chemische Industrie erschlossen. Während für siliziumbasierte Technologien durchgängige Prozessketten zur Verfügung stehen, besteht bei den alternativen, in vielen Fällen hochspezialisierten Verfahren der Mikroproduktionstechnik jedoch noch erheblicher Forschungsbedarf. Liegt der Schwerpunkt im nordamerikanischen Raum vor allem auf siliziumbasierten Technologien mit dem Fokus auf Elektronik und Faseroptik, so konzentrieren sich europäische und asiatische Länder zunehmend auf miniaturisierte Komponenten, die mit Hilfe von ur- und umformenden Verfahren hergestellt werden.⁴ Urformende Technologien wie das Mikropulverspritzgießen, welches aktuell hauptsächlich in der Feinwerktechnik oder für die Mikrostrukturierung eingesetzt wird, bieten enormes Potenzial für die Herstellung von Mikrobauteilen. Für einen breiteren Einsatz im industriellen Umfeld ist jedoch die Bereitstellung einer durchgängigen Prozesskette einschließlich einer prozessbegleitenden Qualitätssicherung zur wirtschaftlichen Produktion von komplexen, dreidimensionalen Mikrobauteilen und -systemen in mittleren

¹vgl. Völklein / Zetterer (2006); Menz et al. (2005)

²vgl. Madou (2002); Büttgenbach (1994)

³vgl. Wicht / Bouchaud (2005)

⁴vgl. Löhe / Beck (2005)

und großen Stückzahlen erforderlich. Eine direkte Übertragung der Kenntnisse und Infrastrukturen aus der Mikroelektronik ist hierbei oftmals nicht oder nur eingeschränkt möglich. Werkstoffe und Produktionsprozesse, wie sie in der Mikroelektronik zum Einsatz kommen, eignen sich nur bedingt für hochbelastbare mikromechanische Bauteile und Systeme. Schnittstellen zu umgebenden Systemen in der Mikroelektronik sind meist elektrisch, nicht mechanisch. Die fortschreitende Miniaturisierung mechanischer Komponenten treibt gegenwärtige industrielle Produktionsprozesse an ihre Grenzen. Die Anwendung traditioneller und im Makrobereich erfolgreicher Entwicklungsmethoden gestaltet sich aufgrund neuer und teils anderer Anforderungen und Restriktionen ebenfalls schwierig. Neben der Adaption existierender Technologien konzentrieren sich grundlegende Forschungsarbeiten daher auch auf neue Entwicklungs- und Produktionsprozesse.

Dem dargestellten Forschungsbedarf folgend, wurden durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft mehrere Sonderforschungsbereiche eingerichtet, die sich mit der Siliziummikromechanik und deren Kopplung mit der Mikroelektronik⁵, der Montage hybrider Mikrosysteme⁶, dem Mikroumformen⁷ und -umformen⁸ und aktiven Mikrosystemen⁹ befassen. Das Ziel des Sonderforschungsbereiches 499 ist die Erarbeitung der wissenschaftlichen Grundlagen für die Entwicklung einer durchgehenden und stabilen Prozesskette zur Herstellung urgeformter Mikrobauteile aus metallischen und keramischen Werkstoffen. Dies erfolgt unter ganzheitlicher Betrachtung der Prozesskette, beginnend mit der Bauteil- und Systementwicklung über die Produktionsvorbereitung und Fertigung bis hin zur präventiven und operativen Qualitätssicherung. Zur Herstellung miniaturisierter, dreidimensionaler Bauteile aus keramischen und metallischen Werkstoffen in mittleren bis großen Stückzahlen werden die Verfahren Mikropulverspritzgießen und Mikroguss angewandt. Das IPEK – Institut für Produktentwicklung als eines der beteiligten Institute erarbeitet Methoden für den Entwurf, die Entwicklung und die Auslegung mikromechanischer Komponenten und Systeme.

Speziell für werkzeuggebundene Mikrotechniken, wie sie im Sonderforschungsbereich 499 zum Einsatz kommen, beschreibt Marz¹⁰ einen spezifischen Produktentwicklungsprozess, der die besonderen Charakteristika dieser Technologien berücksichtigt. Das von ihm vorgestellte Sichelmodell berücksichtigt die notwendige parallele Entwicklung in den drei Abstraktionsebenen System, Bauteil und Struktur. Es trägt damit den signifikanten Wechselwirkungen dieser Ebenen unter anderem aufgrund zumindest derzeit noch restringierter Produktionsprozesse Rechnung. Stärker als im Makrobereich beeinflusst der Produktionsprozess die Gestalt von Bauteil und System. So bestimmt

⁵siehe Sonderforschungsbereich 379 (2009)

⁶siehe Sonderforschungsbereich 440 (2009)

⁷siehe Sonderforschungsbereich 499 (2009)

⁸siehe Sonderforschungsbereich 747 (2009)

⁹siehe Sonderforschungsbereich 516 (2009)

¹⁰siehe Marz (2005)

beispielsweise der geringste verfügbare Fräserdurchmesser (Fertigung) den minimal möglichen Zahnkopfradius (Struktur), was das minimal mögliche Modul (Bauteil) und damit die minimale Gesamtabmessung eines Getriebes (System) begrenzt. Standards und Normen, wie sie beispielsweise für die Dimensionierung makroskopischer Getriebe vorliegen, existieren für mikromechanische Systeme nur begrenzt. Sie befinden sich – wie auch die zugrunde liegenden Entwurfs- und Produktionsmethoden – noch immer in der Entwicklung und sind damit einer gewissen Dynamik unterworfen. Beim Entwurf mikromechanischer Systeme ist daher häufig eine Vielzahl an Iterationen erforderlich, in denen funktionale Elemente entworfen, Produktionsprozesse gewählt, angepasst und verbessert sowie die Bauteile und das System validiert werden müssen.

Insbesondere dem Aspekt der Validierung kommt große Bedeutung zu, da diese sehr kostenintensiv und kompliziert sein kann.¹¹ So machen die im Bereich der werkzeuggebundenen Mikrotechnik auftretenden Streuungen – z. B. Abweichungen von der gewünschten Soll-Geometrie – eine Vielzahl von Versuchen und damit Prototypen erforderlich, um statistische Aussagen treffen zu können. Bei Unterschreiten einer gewissen Bauteilgröße gewinnen zudem Effekte an Bedeutung, die bei makroskopischen Bauteilen häufig vernachlässigt werden können. Die Herstellung von Prototypen und die Durchführung von Prüfstandsversuchen gehen jedoch insbesondere im Mikrobereich mit hohem finanziellem Aufwand einher. Dies bedingt eine simulationsgestützte Bewertung solcher Einflüsse bereits bei möglichst frühen Aktivitäten im Produktentwicklungsprozess, um mit einer möglichst geringen Anzahl an Prototypen auszukommen.

Der Fokus der vorliegenden Arbeit liegt auf der Berücksichtigung von Materialheterogenitäten bei der Simulation und damit der Entwicklung mikromechanischer Bauteile. Mikrobauteile in der hier betrachteten Größenordnung bestehen teils nur aus wenigen Kristalliten. Diese üben aufgrund ihres anisotropen Verhaltens einen mehr oder weniger großen Einfluss auf das Bauteil aus. Aufgrund des sich bei jedem Bauteil individuell einstellenden Korngefüges ergibt sich eine Herausforderung für die Dimensionierung – der Einfluss der mit dem Korngefüge einhergehenden Streuung beispielsweise der Bauteilbelastung ist zu berücksichtigen. Im Rahmen dieser Arbeit werden daher ein Prozessmodell und Methoden entwickelt, deren Ziel es ist, die durch das Korngefüge hervorgerufene Streuung des Verhaltens von mikromechanischen Bauteilen analysieren und verringern zu können. Als Basis hierzu werden Methoden zur Modellierung der Kornstruktur erarbeitet, die anschließend in einem adaptierten Verfahren zur Formoptimierung herangezogen werden. Die vorliegende Arbeit ergänzt damit die Ansätze von Leslabay¹² und Metz¹³.

Das Potenzial der in dieser Arbeit vorgestellten Methoden und Prozesse wird am Beispiel von Demonstratorsystemen, welche im Rahmen des Sonderforschungsberei-

¹¹vgl. z. B. Hauser (2007)

¹²siehe Leslabay (2009)

¹³siehe Metz (2008)

ches 499 entwickelt werden, erörtert. Die Demonstratoren umfassen eine druckluftbetriebene Mikroturbine, deren Rotor die Sonnenwelle eines einstufigen Planetengetriebes antreibt, sowie einen Mikrodispenser. Um eine möglichst hohe Belastbarkeit und Verschleißbeständigkeit zu gewährleisten, kommen metallische und keramische Werkstoffe zum Einsatz.

Umfangreiche Vorarbeiten am IPEK – Institut für Produktentwicklung im Umfeld der Methodenentwicklung sowie Arbeiten des Sonderforschungsbereiches 499 bilden das Fundament dieser Arbeit. Die hier verfolgten Ansätze stellen eine konsequente Fortführung der dort gemeinsam verfolgten Strategie der integrierten Produktentwicklung dar. Aufbauend auf dem Stand der Forschung wird zunächst die Zielsetzung der Arbeit präzisiert. Anschließend werden Methoden zur Modellierung und Simulation von Mikrobauteilen auf Basis der Finite Elemente Methode entwickelt. Als wesentlicher Baustein ermöglichen sie die im weiteren Verlauf der Arbeit vorgestellte adaptierte Formoptimierung unter Berücksichtigung mikrospezifischer Aspekte.

2 Grundlagen und Stand der Forschung

Diese Arbeit befasst sich mit der rechnergestützten Untersuchung und Optimierung von urgeformten¹⁴ Mikrobauanteilen und daraus aufgebauten Systemen. Während urformende Verfahren wie z. B. das Gießen bei der Produktion makroskopischer Systeme schon seit langem zum Einsatz kommen, sind diese im Umfeld der Mikrotechnik noch vergleichsweise wenig verbreitet. In den vergangenen Jahren sind diese wegen ihrer Vorteile in den Fokus von Untersuchungen und Anwendungen im wissenschaftlichen wie industriellen Umfeld gerückt.

Im Folgenden wird auf den allgemeinen und den mikrospezifischen Produktentwicklungsprozess sowie zugehörige Entwicklungsmethoden eingegangen. Des Weiteren werden werkstoffkundliche Aspekte sowie die gegenwärtig erforschten Herstellverfahren urgeformter Mikrobauanteile beleuchtet. Daneben werden die für die Simulation und Optimierung erforderlichen Methoden vorgestellt. Ziel des Kapitels ist es, den für diese Arbeit relevanten Stand der Forschung zusammenzufassen.

2.1 Der Produktentstehungsprozess – Grundbegriffe und Methoden

2.1.1 Ziel-, Handlungs- und Objektsystem

Die Beschreibung von Systemen ist Gegenstand unterschiedlichster Wissenschaftsdisziplinen. Mit Hilfe der Systemtechnik können sämtliche Arten von Zusammenhängen beschrieben werden. Ein System ist hierbei eine aus Elementen zusammengesetzte und von der Umwelt abgrenzbare Einheit. Beziehungen der Elemente einer solchen Einheit untereinander sind stärker ausgeprägt als zu anderen Elementen. Das System kann als eine Black Box abstrahiert werden, wodurch eine Abgrenzung von System und Umwelt vorgenommen wird. Ein- und Ausgänge für Stoff, Energie und Information werden in der Black Box über Transformationsfunktionen miteinander verknüpft. Zur

¹⁴„Urformverfahren“ sind gemäß DIN 8580 (2003–09) solche Fertigungsverfahren, bei denen aus einem formlosen Stoff ein fester Körper durch Schaffung eines Stoffzusammenhalts erzeugt wird. Ausgangsstoffe für den Urformvorgang können in fester (z. B. als Pulver), flüssiger oder gasförmiger Phase und damit mit spezifischen rheologischen Eigenschaften vorliegen.

Beschreibung der Produktentwicklung im Sinne eines soziotechnischen Systems schlägt Ropohl die drei Teilsysteme Ziel-, Handlungs- und Objektsystem (ZHO) vor.¹⁵

- » Das *Zielsystem* beschreibt die gewünschten Merkmale eines Objektsystems. Es beinhaltet relevante Ziele, deren Abhängigkeiten voneinander sowie entsprechende Randbedingungen, die zur Entwicklung des Objektsystems benötigt werden. Ausgangspunkt ist dabei der aktuelle Zustand, nicht aber die Lösung als solche. Im Verlaufe der Produktentstehung wird das Zielsystem erweitert und konkretisiert. Die Definition des Zielsystems ist ein wichtiger Faktor für den Erfolg der Produktentwicklung.
- » Ziel- und Objektsystem sind über das *Handlungssystem* miteinander verknüpft. Mit Hilfe des Handlungssystems wird eine Ausgangssituation in eine erwünschte Endsituation überführt. Das Handlungssystem selbst ist ein soziotechnisches System, das sich aus strukturierten Aktivitäten, Methoden und Prozessen sowie den dafür jeweils notwendigen Ressourcen zusammensetzt.
- » Das *Objektsystem* ist die Umsetzung des Zielsystems. Inhalt des Objektsystems ist somit das Ergebnis des mittels des Handlungssystems umgesetzten Zielsystems.

Die Produktentwicklung kann demnach als Überführung von teils auch noch unpräzise formulierten Zielen in ein konkretes Produkt verstanden werden. Diesen Grundgedanken aufgreifend, spricht Albers bei seiner Beschreibung der Produktentstehung von einem ZHO-System. Ziel-, Handlungs- und Objektsystem beeinflussen sich dabei gegenseitig. Auch die Aktivitäten innerhalb der Produktentstehung lassen sich hierarchisch mit ZHO-Systemen beschreiben.¹⁶

2.1.2 Das integrierte Produktentstehungs-Modell – iPeM

Wesentlicher Bestandteil einer erfolgreichen Produktentwicklung ist eine effiziente Zusammenarbeit aller daran beteiligter Personen. Gemeinsame Begriffe, Denkweisen und Methoden gelten daher als entscheidende Faktoren. Albers¹⁷ prägt auf Basis seiner Forschungsarbeiten das Verständnis eines *integrierten Produktentstehungs-Modells* (iPeM) und entwickelt damit eine neue, ganzheitliche Sichtweise. Mit dem iPeM erweitert Albers das Lebenszyklusmodell und passt es an die Randbedingungen moderner Produktentstehungsprozesse an. Von zentraler Bedeutung sind die sogenannten *Aktivitäten*, wobei Albers zwischen Aktivitäten der Produktentstehung und der Problemlösung unterscheidet. Die Aktivitäten der Produktentstehung des iPeM leitet Albers aus dem Lebenszyklusmodell ab. Er charakterisiert einen Produktentstehungsprozess mit Hilfe

¹⁵vgl. Ropohl (1999)

¹⁶vgl. Albers (2009)

¹⁷siehe Albers (2010); Albers / Meboldt (2006)

einer Abfolge vernetzter Aktivitäten. Eine Aktivität wird dabei „(. . .) als kleinstes Element eines Prozesses (. . .)“¹⁸ verstanden. Sie setzt sich zusammen aus einer Tätigkeit, einer ausführenden Ressource, einer zu benutzenden Ressource und einer zeitlichen Abhängigkeit. Ein wichtiges Merkmal des iPeM ist, dass die Aktivitäten der Produktentstehung keinen sequenziellen Ablauf des Entwicklungsprozesses erzwingen. Vielmehr kommen mit der Problemlösungssystematik SPALTEN¹⁹ in einer weiteren Dimension des iPeM die Aktivitäten der Problemlösung zum Tragen.

Meboldt²⁰ greift dieses neue Verständnis auf und nimmt in seiner Arbeit eine wissenschaftliche Einordnung des iPeM vor. Albers / Meboldt²¹ bündeln zahlreiche Forschungsarbeiten des IPEK – Institut für Produktentwicklung aus dem Umfeld der Entwicklungsmethodik und tragen so zu einem ganzheitlichen Modell der Produktentstehung bei. Dieses beschreibt die komplexen Zusammenhänge der Produktentstehung durch eine Modellsprache und die oben genannte zugehörige Logik (Abbildung 2.1).

Abbildung 2.1 Das integrierte Produktentstehungsmodell mit Ziel-, Handlungs- und Objektsystem sowie der Aktivitätenmatrix²²

Das iPeM baut auf einem Metamodell der Aktivitäten innerhalb der Produktentstehung auf. Durch verschiedene Modellebenen werden spezifische Sichtweisen ermöglicht, wodurch Prozessmodellierung, Projektmanagement und methodische Unterstützung gleichermaßen berücksichtigt werden können. Meboldt greift hierfür die aus der Systemtheorie bekannten Definitionen von Ziel-, Handlungs- und Objektsystem auf. Das Handlungssystem, auf welches er sich konzentriert, setzt sich im Wesentlichen aus der

¹⁸vgl. Meboldt (2008)

¹⁹siehe Albers et al. (2005, 2002)

²⁰siehe Meboldt (2008)

²¹siehe Albers / Meboldt (2006)

²²in Anlehnung an Albers (2010)

Problemlösungssystematik SPALTEN²³ und den bereits genannten Aktivitäten zusammen. Die Aktivitäten bilden das Handlungssystem, das mit dem Ziel- und Objektsystem in direkter Wechselwirkung steht.

Aktuelle Forschungsarbeiten, die diesen Ansatz weiter verfolgen, verdeutlichen, dass das Handlungssystem eine zentrale Rolle einnimmt. Innerhalb des Handlungssystems wird das Zielsystem definiert und im Verlaufe der Produktentwicklung kontinuierlich weiter konkretisiert und weiterentwickelt. Die Ziele werden somit im Handlungssystem selbst definiert, gewonnene Ergebnisse und damit Objekte werden kontinuierlich darin evaluiert. Das Handlungssystem integriert somit Ziel- und Objektsystem. Das Ressourcen- und Aktivitätensystem als Teil des Handlungssystems beinhaltet neben den Aktivitäten auch die entsprechenden Ressourcen (Energie, Information, Kapital, Material, Personal) sowie ein Phasenmodell.

2.1.3 Das Contact & Channel Model – C&CM

Produkt- und Systembeschreibungen basieren häufig auf während des Entwicklungsprozesses definierten Geometrien. Hierzu werden z. B. CAD-Modelle und technische Zeichnungen generiert. Eine vollständige Beschreibung des Produktes, insbesondere von dessen Funktion(en), ist damit jedoch nicht zwingend gegeben. Das von Albers entwickelte Contact & Channel Model (C&CM)²⁴ bietet die Möglichkeit, Funktionen eines Systems und Interaktionen innerhalb dieses Systems zu beschreiben und zu analysieren.

Das C&CM wurde ursprünglich im Umfeld der Konstruktionsmethodik zur funktionalen Beschreibung von Systemen entwickelt. Es basiert entsprechend auf Betrachtungen renommierter Forscher auf dem Gebiet der Konstruktionsmethodik wie Reuleaux / Moll²⁵, Rodenacker²⁶, Roth²⁷, Koller²⁸ und Kastrup²⁹ sowie Hubka³⁰. Diese wurden um die Zusammenhänge sogenannter Basiselemente ergänzt. Mit Hilfe dieses *Elementmodells* kann der Zusammenhang von Funktion und Gestalt auf einer abstrakten Ebene abgebildet werden. Um dies zu erreichen, wird das betrachtete System reduziert. Hierzu werden die drei zentralen Elemente *Wirkfläche*, *Wirkflächenpaar* und *Leitstützstruktur* verwendet. Sie sind wie folgt definiert:³¹

» „*Wirkflächen (WF)* sind feste Oberflächen von Körpern oder generalisierte Grenzflächen von Flüssigkeiten, Gasen oder Feldern, die dauernd oder zeitweise im

²³siehe Albers et al. (2005, 2002)

²⁴vgl. Albers et al. (2004, 2003); Albers / Matthiesen (2002); Matthiesen (2002)

²⁵siehe Reuleaux / Moll (1854)

²⁶siehe Rodenacker (1991)

²⁷siehe Roth (1994a, b)

²⁸siehe Koller (1998)

²⁹siehe Koller / Kastrup (1998)

³⁰siehe Hubka (1984)

³¹vgl. Matthiesen (2002), Kap. 3.1

Kontakt zu einer weiteren Wirkfläche stehen und am Energie-, Stoff- und Informationsaustausch des technischen Systems beteiligt sind.“

- „*Wirkflächenpaare (WFP)* werden aus genau zwei Wirkflächen gebildet, die zeitweise, ganz oder teilweise, in Kontakt stehen und zwischen denen Energie, Stoff und Information übertragen wird. Der *Funktionskontakt* ist der Teil des Wirkflächenpaars, in dem aktuell die Wechselwirkung stattfindet.“
- „*Leitstützstrukturen (LSS)* sind Volumina von Körpern, Flüssigkeiten, Gasen oder felddurchsetzte Räume, die genau zwei Wirkflächenpaare verbinden und dauernd oder zeitweise eine Leitung von Energie, Stoff oder Information zwischen den Wirkflächen eines Körpers, einer Flüssigkeit, eines Gases oder eines Feldes ermöglichen.“

Um eine Funktion erfüllen zu können, muss ein technisches System aus mindestens zwei Wirkflächenpaaren und zwei sie verbindenden Leitstützstrukturen bestehen.³² Eigenschaften und Wechselwirkungen der Wirkflächenpaare und Leitstützstrukturen bestimmen somit die Funktion. Neben der Analyse eines bestehenden Systems kann das Contact & Channel Model auch zur Systemsynthese eingesetzt werden. In beiden Fällen konnte es sich sowohl in der Lehre als auch im industriellen Umfeld bewähren.

Im Kontext der Antriebsstrangentwicklung und der zugehörigen Validierung wurde das C&CM von Albers / Schyr um eine physikalische Beschreibung hin zur Mechatronik erweitert.³³ Schyr beschreibt in seinem *Behavioral Mock-Up* die geometrischen und funktionalen Eigenschaften eines Systems zum einen mit Hilfe eines CAD-Modells, ergänzt dieses zum anderen mit einer mathematischen Beschreibung der physikalischen Eigenschaften in der Beschreibungssprache Modelica. Damit erweitert er die Wirkflächen des C&CM um die Eigenschaften der *Konnektoren* dieser Softwareumgebung. Die Modellierung der physikalischen Eigenschaften der Leitstützstrukturen erfolgt mit Hilfe der *Gleichungen*. Durch gezielte Verkettungen dieser Elemente können so Fragestellungen während der Validierung von Antriebssträngen beantwortet werden. Daneben schlägt Schyr vor, einer detaillierten geometrischen Umsetzung den Entwurf eines abstrakten Modells vorzuschalten. Die konkrete geometrische Beschreibung kann dann in einem zweiten Schritt auf Basis des erweiterten Elementmodells erfolgen.

Bei der Modellbildung, wie sie beispielsweise für eine rechnergestützte Analyse erforderlich ist, spiegeln sich die Grundhypothesen von Albers wider – Gegenstand der Modellbildung ist, wie auch im ersten Teil dieser Arbeit, die geeignete Abbildung der Eigenschaften der Wirkflächenpaare und der Leitstützstrukturen und deren Wechselwirkungen. Der Fokus des ersten Teiles dieser Arbeit liegt auf der Modellbildung und der Analyse des Einflusses streuender Eigenschaften von Leitstützstrukturen. Für die im zweiten Teil der Arbeit entwickelten Methoden zur Strukturoptimierung unter

³²vgl. Matthiesen (2002), S. 54: „Grundhypothese II“

³³vgl. Schyr (2006); Albers / Schyr (2005)

Robustheitsaspekten sind neben den bereits genannten Definitionen auch die Begriffe *Tragstruktur* und *Reststruktur* von zentraler Bedeutung.³⁴

- » „Die *Tragstruktur (TS)* ist die Menge aller möglichen Leitstützstrukturen.“
- » „*Reststrukturen (RS)* sind Volumina von Körpern, Flüssigkeiten, Gasen oder felderfüllte Räume, die nie Tragstruktur werden.“

2.2 Rechnerunterstützung im Produktentstehungsprozess

Nicht nur im Bereich der Mikrotechnik, sondern im Allgemeinen hat sich im Verlauf der vergangenen Jahre die für die Entwicklung technischer Produkte zur Verfügung stehende Zeit teilweise deutlich verkürzt. Die Gründe hierfür reichen vom stärkeren Wettbewerb auf globaler Ebene, kürzeren Produktlebenszeiten bis hin zu neuen Anforderungen seitens des Gesetzgebers, z. B. hinsichtlich der Abgasnormen für Kraftfahrzeuge. So reduzierte sich die durchschnittliche Produktlebenszeit im Maschinenbau zwischen den Jahren 1991 und 2000 von 30 Monaten um mehr als die Hälfte auf nur noch zwölf Monate.³⁵ Neben den damit einhergehenden verkürzten Innovationszyklen stehen Unternehmen vor der Herausforderung, mit der steigenden Komplexität der Produkte und Aufgaben umzugehen. Es gilt, leistungsfähigere Produkte zu entwickeln bei gleichzeitig möglichst geringen Entwicklungszeiten und Kosten. Dabei erwartet der Kunde eine hohe Produktqualität. Insbesondere bei Produkten, die dem höchsten Stand der Technik entsprechen bzw. diesen definieren, lassen sich die höchsten Marktpreise zu Beginn ihres Lebenszyklusses erzielen, wohingegen selbige gegen Ende teilweise deutlich abfallen.³⁶

In der Produktentwicklung kommt nach Ophey³⁷ aufgrund der genannten Aspekte der praktischen Anwendung moderner, effizienter und praxistauglicher Methoden zur Begleitung und Organisation der Produktentwicklung und Konstruktion sowie der Bewertung von Innovationsstrategien eine immense Bedeutung zu. Generell ist hierbei eine stetig fortschreitende Virtualisierung der Produktentstehung erkennbar. Mittlerweile ist es selbstverständlich, dass Produkte untersucht und getestet werden, noch bevor ein einziger physischer Prototyp vorliegt. Wesentlicher Impulsgeber hierfür ist das kontinuierlich wachsende Leistungsvermögen von Simulations- und Optimierungsmethoden. Mit Hilfe von Simulation und Optimierung wird es ermöglicht, innovative und immer komplexer werdende Produkte trotz der kürzer werdenden Lebenszyklen auf den Markt

³⁴vgl. Albers / Matthiesen (2002)

³⁵vgl. Fraunhofer (1996, 2000)

³⁶vgl. Fraunhofer (2004)

³⁷vgl. Ophey (2004)

zu bringen. Der Einsatz dieser Methoden hat den Produktentstehungsprozess maßgeblich beeinflusst – teilweise wird sogar von einer digitalen Revolution gesprochen.³⁸ Allgemein lässt sich festhalten, dass Simulationsmethoden heutzutage von wesentlicher Bedeutung für Unternehmen sind.

Numerische Simulationen sind mittlerweile essenzieller Bestandteil des Produktentstehungsprozesses, um das Verhalten auch komplexer Systeme vorherzusagen. Die Finite Elemente Analyse (FEA) als wohl eine der bekanntesten numerischen Simulationsmethoden konnte sich als eines der Standardwerkzeuge zur Simulation des Verhaltens komplexer Strukturen und mechanischer Systeme etablieren. Das Anwendungsspektrum reicht von vergleichsweise einfachen Finite Elemente (FE) Modellen bis hin zur Abbildung komplexer Prozesse und Systeme, bei denen mehrere Domänen betrachtet werden. Dazu zählen beispielsweise Fachgebiete wie Festkörpermechanik, Dynamik, Wärmeleitung oder Akustik.³⁹

Mit Strukturoptimierungsmethoden stehen Werkzeuge zur Verfügung, mit deren Hilfe sich teilweise wesentlich effizientere Herangehensweisen als mit traditionellen Ansätzen wie Versuchs- und Irrtums-Methoden realisieren lassen. In vielen Bereichen wie beispielsweise dem Maschinenbau konnten sie sich daher als Standard-Werkzeug etablieren.

2.3 Optimierungsverfahren

Der Begriff Optimierung bezeichnet im Allgemeinen die Suche nach dem besten erreichbaren Resultat unter gegebenen Voraus- und Zielsetzungen. Dies ist im Sinne eines Kompromisses zwischen verschiedenen Parametern zu verstehen. Übertragen auf die Entwicklung eines Produktes ist es das Ziel, einen (eventuell bereits gegebenen) Entwurf so zu generieren (verbessern), dass dieser die Anforderungen mit den verfügbaren Ressourcen auf bestmögliche Art und Weise erfüllt. Solche Anforderungen können z. B. ein maximal zulässiges Gewicht, eine minimal erforderliche Festigkeit oder eine bestimmte Lebensdauer sein.

In diesem Abschnitt wird eine Übersicht über Optimierungsverfahren gegeben, die für die anschließend vorgestellten Varianten der Strukturoptimierung herangezogen werden können. Eine gute Zusammenfassung zu diesem Thema bietet die Arbeit von Meske⁴⁰. Polak⁴¹ behandelt die Optimierung ausführlich aus mathematischer Sicht. Eine Übersicht über das Thema Strukturoptimierung bietet z. B. Vanderplaats⁴².

³⁸vgl. ProSTEP iViP e. V. (2008)

³⁹siehe Thacker (2008)

⁴⁰siehe Meske (2007), Kap. 3

⁴¹siehe Polak (1997)

⁴²siehe Vanderplaats (2001)

2.3.1 Allgemeine Formulierung

Ein allgemeines Optimierungsproblem kann wie folgt definiert werden:

$$\text{minimiere } F(\mathbf{X}) \quad (2.1)$$

$$\text{so dass } g_j(\mathbf{X}) \leq 0, \quad j = 1 \dots n_g \quad (2.2)$$

$$h_k(\mathbf{X}) = 0, \quad k = 1 \dots n_h \quad (2.3)$$

$$X_i^l \leq X_i \leq X_i^u, \quad \mathbf{X} \in V \quad (2.4)$$

Dabei ist $F(\mathbf{X})$ die *Zielfunktion*, die es zu minimieren (oder zu maximieren) gilt. Zu beachten sind hierbei n_g Ungleichheitsnebenbedingungen $g_j(\mathbf{X})$ sowie n_h Gleichheitsnebenbedingungen $h_k(\mathbf{X})$. Die sogenannten *Designvariablen* \mathbf{X} werden in

$$\mathbf{X} = \begin{pmatrix} X_1 \\ \vdots \\ X_n \end{pmatrix} \quad (2.5)$$

zusammengefasst. Dabei handelt es sich um diejenigen Parameter des Modells, die während der Optimierung verändert werden können. Die Designvariablen werden innerhalb des Lösungsraumes V definiert und von X_i^l und X_i^u beschränkt. Häufig wird eine Unterteilung in lineare und nichtlineare Optimierungsprobleme vorgenommen, je nachdem, ob eine lineare Abhängigkeit von den Designvariablen besteht. Erfüllt ein Modell, welches durch einen Vektor \mathbf{X} beschrieben wird, alle Randbedingungen (2.2) bis (2.4), so wird von einem *feasible design*, also einem zulässigen Entwurf, gesprochen. Die Lösung des allgemeinen Optimierungsproblems (2.1) bis (2.4) kann mit Hilfe der Lagrangefunktion $L(\mathbf{X}, \mathbf{g}, \mathbf{h})$ erfolgen, sofern $F(\mathbf{X})$, $g_j(\mathbf{X})$ und $h_k(\mathbf{X})$ zweifach stetig differenzierbar hinsichtlich der Designvariablen X_i sind.

$$L(\mathbf{X}, \mathbf{g}, \mathbf{h}) = F(\mathbf{X}) + \lambda_j g_j(\mathbf{X}) + \eta_k h_k(\mathbf{X}) \quad (2.6)$$

Dabei sind λ_j und η_k die sogenannten Lagrange-Multiplikatoren. Die partiellen Ableitungen führen zu den notwendigen Bedingungen für einen Sattelpunkt der Lagrangefunktion.

$$\frac{\delta F(\mathbf{X})}{\delta \mathbf{X}} + \lambda_j \frac{\delta g_j(\mathbf{X})}{\delta \mathbf{X}} + \eta_k \frac{\delta h_k(\mathbf{X})}{\delta \mathbf{X}} = 0 \quad (2.7)$$

$$h_k(\mathbf{X}) = 0 \quad (2.8)$$

$$\lambda_j g_j(\mathbf{X}) = 0, \quad \lambda_j \geq 0 \quad (2.9)$$

Eine hinreichende Bedingung für ein lokales Optimum ist gegeben, wenn die Hesse-Matrix \mathbf{H} der Lagrangefunktion im Sattelpunkt positiv definit ist (2.10). Ein globales Optimum ist gegeben, wenn die Hesse-Matrix im gesamten Lösungsraum positiv definit

ist.

$$\mathbf{v} \frac{\delta^2 L}{\delta \mathbf{X}^2} \mathbf{v} \geq 0, \quad \mathbf{v} \neq 0 \quad (2.10)$$

Im Allgemeinen können die Gleichungen (2.1) bis (2.4) nicht direkt gelöst werden. Stattdessen werden Verfahren verwendet, bei welchen ausgehend von einem Startdesign $\mathbf{X}^{(0)}$ das Design iterativ gemäß einer sogenannten *Redesign-Regel* (2.11) angepasst wird.

$$\mathbf{X}^{(n+1)} = \mathbf{X}^{(n)} + \alpha \mathbf{S}^{(n)} \quad (2.11)$$

Die Anpassung des Designs in Iteration n basiert auf der Suchrichtung $\mathbf{S}^{(n)}$ und der Schrittweite α entlang dieser Richtung. Die Suche und damit die Optimierung erfolgt schrittweise solange, bis ein vorgegebenes Kriterium (z. B. eine maximale Anzahl an Iterationen) erreicht wird.

2.3.2 Mathematische Programmierung

Bei Verfahren der mathematischen Programmierung handelt es sich um Verfahren, mit deren Hilfe Probleme einer bestimmten mathematischen Struktur gelöst werden können. Sie bieten den Vorteil der universellen Einsetzbarkeit, sind also nicht beschränkt auf spezielle Anwendungsbereiche. So werden Verfahren der mathematischen Programmierung nicht nur in der Strukturoptimierung eingesetzt, sondern finden z. B. auch in den Wirtschaftswissenschaften Anwendung.

Es existieren verschiedene Verfahren, wobei vielen eine *Sensitivitätsanalyse* gemeinsam ist. Dies bedeutet, dass partielle Ableitungen der Zielfunktion und der Nebenbedingungen bezüglich der Designvariablen gebildet werden müssen. Daher werden diese Verfahren auch als *Gradientenverfahren* bezeichnet. Die Berechnung der Gradienten kann bei komplexen Problemen sehr zeitaufwändig werden.

Als einfaches Beispiel für ein solches Verfahren sei an dieser Stelle das Verfahren des steilsten Abstieges genannt. Ausgehend von einem Startpunkt schreitet man so lange in Richtung des steilsten Abstiegs (negativer Gradient) fort, bis keine weitere Verbesserung mehr erzielt wird.

$$\mathbf{S}^{(n+1)} = -\nabla F(\mathbf{X}^{(n)}) \quad (2.12)$$

Das Verfahren konvergiert häufig nur sehr langsam. Dies ist zum Beispiel der Fall, wenn der Betrag des Gradienten in der Nähe des Optimums sehr klein ist, was eine geringe Iterationsschrittweite zur Folge hat. Eine deutliche Verbesserung des Konvergenzverhaltens kann bereits durch eine einfache Erweiterung erreicht werden.⁴³

$$\mathbf{S}^{(n+1)} = -\nabla F(\mathbf{X}^{(n)}) + \beta^{(n)} \mathbf{S}^{(n)} \quad (2.13)$$

⁴³vgl. z. B. Fletcher / Reeves (1964)

Bei diesem sogenannten Verfahren der konjugierten Gradienten wird bei der Ermittlung der Suchrichtung Wissen aus vorangegangenen Iterationen mit einbezogen und dieses mit $\beta^{(n)}$ skaliert.

$$\beta^{(n)} = \frac{|\nabla F(\mathbf{X}^{(n)})|^2}{|\nabla F(\mathbf{X}^{(n-1)})|^2} \quad (2.14)$$

Es existiert eine Vielzahl weiterer Verfahren. Meske fasst die für den Bereich der Strukturoptimierung wichtigsten Verfahren in seiner Arbeit⁴⁴ zusammen. Eine Untersuchung verschiedener mathematischer Optimierungsverfahren hinsichtlich deren Effizienz und Zuverlässigkeit nimmt Schittkowski⁴⁵ vor.

Aufgrund ihrer Gradientenabhängigkeit ist der Einsatz von Verfahren der mathematischen Programmierung bei komplexen Modellen eingeschränkt.⁴⁶ Bei großen Modellen sind die im Folgenden vorgestellten Optimalitätskriterien-Verfahren meist effizienter.

2.3.3 Optimalitätskriterien

Optimalitätskriterien-Verfahren stellen eine Alternative zu den Verfahren der mathematischen Programmierung dar. Ihr Vorteil besteht darin, dass auf *apriorisches Wissen* über das betrachtete Problem zurückgegriffen wird. Dadurch sind Optimalitätskriterien-Verfahren im Vergleich zu Verfahren der mathematischen Programmierung in der Regel effizienter und robuster hinsichtlich ihres Konvergenzverhaltens und weniger anfällig dafür, in lokalen Minima abzubrechen.⁴⁷ Da die Formulierung eines Optimalitätskriteriums in den meisten Fällen von der spezifischen Problemstellung abhängt, sind diese Verfahren jedoch meist auf sehr spezielle Problemstellungen und Zielfunktionen beschränkt. Dadurch sind sie zudem auf Anwendungsfelder beschränkt, für die solche Optimalitätskriterien formuliert werden können. Nach Gellatly / Dupree besteht das Konzept der Optimalitätskriterien-Verfahren darin, die Generalität der Verfahren der mathematischen Programmierung zugunsten hoher Effizienz aufzugeben.⁴⁸

Ein Optimalitätskriterien-Verfahren basiert auf einem formulierten Optimalitätskriterium sowie einer Redesign-Formel. Diese ist eine definierte Formel, die anhand der Systemantwort eines vorliegenden Designs die Modifikation der Designvariablen im Sinne des Optimalitätskriteriums vornimmt.⁴⁹ Bekannte Beispiele für Optimalitätskriterien sind das Prinzip des gleichmäßig beanspruchten Tragwerkes (fully stressed design)⁵⁰ oder die Beanspruchungs-Homogenisierungshypothese⁵¹.

⁴⁴siehe Meske (2007), Kap. 3.2 und 3.3

⁴⁵siehe Schittkowski (1999)

⁴⁶vgl. z. B. Cohn (1994), S. 24

⁴⁷vgl. z. B. Häußler (2006), S. 31

⁴⁸vgl. Zitat aus Meske (2007), S. 23, nach Gellatly / Dupree (1976), S. 79

⁴⁹vgl. z. B. Prager / Taylor (1968); Venkayya et al. (1968)

⁵⁰siehe Schmidt (1958)

⁵¹siehe Baud (1934b)

Aufgrund ihrer Vorteile sind Optimalitätskriterien-Verfahren in der Praxis weit verbreitet. Durch die Unabhängigkeit der Konvergenzgeschwindigkeit von der Anzahl der Designvariablen eignen sich Optimalitätskriterien-Verfahren besonders für die parameterfreie Formoptimierung, für welche häufig eine große Anzahl an Designvariablen erforderlich ist (→ Abschnitt 2.4.2).

2.3.4 Weitere Verfahren

Neben den bereits genannten Verfahren existiert eine Reihe weiterer Möglichkeiten zur Lösung von Optimierungsproblemen. Im Folgenden werden exemplarisch verschiedene probabilistische und globale Approximationsverfahren vorgestellt.

Probabilistische Verfahren

Probabilistische Verfahren betrachten das zugrunde liegende System als Black Box. Die Designvariablen werden probabilistisch, d. h. in gewissen Grenzen zufällig, geändert. Sie eignen sich vor allem dann, wenn keine oder nur wenige Informationen über das Systemverhalten verfügbar sind und die Evaluation der Zielfunktion mit wenig Aufwand erfolgen kann. Die Anzahl erforderlicher Evaluationen ist bei probabilistischen Verfahren in der Regel jedoch deutlich höher als bei Verfahren der Mathematischen Programmierung oder Optimalitätskriterien.

Bekannt ist insbesondere die *Monte Carlo Methode*, bei der die Designvariablen zufällig gewählt werden. Die Lösung liefern diejenigen Designvariablen, mit denen – im Falle einer angestrebten Minimierung gemäß (2.1) – der niedrigste Zielfunktionswert erreicht wird. Das Verfahren kann sehr einfach verfeinert werden, z. B. indem für neue Entwürfe Designvariablen so gewählt werden, dass sie in der Nähe bereits guter Entwürfe liegen.⁵²

An das Darwinsche Prinzip des Überlebens der bestangepassten Individuen (survival of the fittest)⁵³ lehnen sich die *Evolutionären Algorithmen* an. Ausgangspunkt für derartige Algorithmen ist eine Menge zufällig gewählter Entwürfe. Die einzelnen Entwürfe werden auch als Individuen bezeichnet. Die Individuen der selben Iteration bilden eine Generation. Die Individuen werden auf ihre Fitness, d. h. ihr Potenzial zur Erreichung einer Verbesserung im Sinne der Zielfunktion, hin evaluiert. Nach der darauf basierenden Selektion der besten Individuen werden diese rekombiniert und mutiert. Bei der Mutation werden die Designvariablen zufällig verändert. Die Mutation erfolgt meist gemäß einer Normalverteilung. Geringfügige Änderungen treten damit häufiger auf als große Änderungen.

⁵²vgl. Meske (2007)

⁵³Der Ausdruck „survival of the fittest“ wurde im Jahr 1864 durch den britischen Sozialphilosophen Herbert Spencer geprägt. Vgl. Spencer (1864)

Globale Approximationsverfahren

Eines der bekanntesten globalen Approximationsverfahren ist die *Response Surface Methode* (RSM). Eine Antwortfläche (response surface) $\tilde{g}(\mathbf{x})$ wird anhand mehrerer Systemantworten $g(\mathbf{x}_k)$ aus M Evaluationspunkten \mathbf{x}_k ermittelt. Für die Wahl der Evaluationspunkte und damit der durchzuführenden Versuche wird auf die statistische Versuchsplanung (design of experiments – DOE)⁵⁴ zurückgegriffen. Ziel ist es, mit möglichst wenigen Versuchen den Zusammenhang zwischen den Designvariablen und der Systemantwort hinreichend genau zu ermitteln.

Die Anzahl der Designvariablen bestimmt die Dimension N der Antwortfläche. Die Antwortfläche ist gewöhnlich eine analytisch beschriebene Hyperfläche im Lösungsraum. Ihre Koeffizienten werden durch die Methode der kleinsten Quadrate ermittelt. Häufig werden Polynomfunktionen als Approximationsfunktion verwendet.

$$\tilde{g}(\mathbf{x}) = a + \sum_{i=1}^N b_i x_i + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N c_{ij} x_i x_j + \dots \quad (2.15)$$

Das Optimum wird anschließend durch analytische Differentiation der Antwortfläche gefunden. Da es sich bei der Antwortfläche lediglich um ein Approximationsmodell handelt, ist eine Evaluation des Optimums anhand des ursprünglichen Modells zur Verifikation erforderlich. Ist der Unterschied zwischen Approximation und ursprünglichem Modell, das Residuum, zu groß, so muss die Antwortfläche entsprechend verbessert werden. Die Güte einer Antwortfläche kann auch anhand des Regressionsparameters R bewertet werden.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{j=1}^M (g(\mathbf{x}_k) - \tilde{g}(\mathbf{x}_k))^2}{\sum_{j=1}^M (g(\mathbf{x}_k) - \bar{g})^2}, \quad \bar{g} = \frac{g_{min} + g_{max}}{2} \quad (2.16)$$

Im besten Fall nimmt dieser den Wert $R = 1$ an.⁵⁵

2.4 Strukturoptimierung

Methoden der Strukturoptimierung dienen der Suche nach optimalen Strukturen mit Hilfe von rechnerischen Verfahren. Nach Albers entspricht dies in der Regel der Minimierung der Reststruktur.⁵⁶ Während der Suche werden Eigenschaften der Struktur wie Material oder Form variiert. Mittlerweile kann auf eine Vielzahl unterschiedlicher Ansätze zurückgegriffen werden.

⁵⁴siehe z. B. Box et al. (2005)

⁵⁵vgl. Schumacher (2005)

⁵⁶vgl. Albers (2009)

Die einzelnen Aktivitäten innerhalb des Entwicklungsprozesses werden im Allgemeinen meist gesondert betrachtet und Phasen zugeordnet, in denen beispielsweise der Gesamtentwurf oder Strukturdetails betrachtet werden (→ Abschnitt 2.6.4). Die Verfahren der Strukturoptimierung bieten hierbei spezifische Unterstützung und lassen sich beispielsweise nach Ramm et al.⁵⁷ der Topologieoptimierung, der Formoptimierung, der Bemessungs- und Querschnittsoptimierung und dem Materialdesign zuordnen.

Abbildung 2.2 Einteilung der Verfahren der Strukturoptimierung⁵⁸

Aufbauend auf der allgemeinen Übersicht über Optimierungsverfahren (→ Abschnitt 2.3) werden im Folgenden verschiedene Varianten der Strukturoptimierung mit besonderem Fokus auf die für diese Arbeit relevanten Formoptimierungsverfahren vorgestellt.

2.4.1 Topologieoptimierung

Besonders bei frühen Aktivitäten in der Produktentwicklung kann die Topologieoptimierung wertvolle Hinweise zur Grobgestaltung geeigneter Tragstrukturen geben. Die Topologieoptimierung dient der Ermittlung einer optimalen Materialverteilung in einem vorgegebenen Raum, dem sogenannten Designraum. Bendsøe / Sigmund⁵⁹ definieren die Topologieoptimierung mechanischer Strukturen als die Festlegung von Merkmalen wie der Anzahl, Form und Position von Durchbrüchen und Streben.⁶⁰

Das Ziel der Topologieoptimierung ist somit die rechnergestützte Ermittlung einer optimalen Materialverteilung für eine belastete Struktur unter Berücksichtigung von Randbedingungen. Gesucht wird dabei eine diskrete Materialverteilung. Dies wird erreicht durch eine Variation der lokalen Dichte $\rho(x)$.

$$\frac{\rho(x)}{\rho_0} = \begin{cases} 1, & \text{wenn } x \in \Omega^* \\ 0, & \text{wenn } x \in \Omega \setminus \Omega^* \end{cases} \quad (2.17)$$

⁵⁷vgl. Ramm et al. (1998)

⁵⁸in Anlehnung an Ramm et al. (1998)

⁵⁹vgl. Bendsøe / Sigmund (2003)

⁶⁰„Topology optimization of solid structures involves the determination of features such as the number and location and shape of holes and the connectivity of the domain.“ Vgl. Bendsøe / Sigmund (2003)

Die lokale Steifigkeit $E(x)$ wird ausgehend von E_0 in Abhängigkeit von der lokalen Dichte $\rho(x)$ ermittelt.

$$E(x) = \frac{\rho(x)}{\rho_0} E_0 \quad (2.18)$$

Ein solches Integer-Problem (hier also die Entscheidung „Material – kein Material“ für jeden Punkt $x \in \Omega$) ist jedoch schwierig zu lösen. Mit dem SIMP-Ansatz (Solid Isotropic Material with Penalization) überführen Bendsøe / Kikuchi das diskrete Problem mit ihrer Materialinterpolation⁶¹ in ein kontinuierliches Problem. Damit kann die lokale Dichte auch Werte zwischen Null und Eins annehmen. Die Ermittlung der lokalen Steifigkeit $E(x)$ erfolgt in modifizierter Form.

$$0 \leq \frac{\rho(x)}{\rho_0} \leq 1 \quad (2.19)$$

$$E(x) = \left(\frac{\rho(x)}{\rho_0} \right)^p E_0 \quad (2.20)$$

Durch die Einführung des sogenannten Penalisierungsfaktors p (penalty factor) werden Werte zwischen Null und Eins bei der Ermittlung der lokalen Steifigkeit $E(x)$ bestraft. Mit dem Einfluss des Exponenten p auf die Ergebnisse der Optimierung befasst sich u. a. Reiter⁶². In der Regel wird der Penalisierungsfaktor p innerhalb bestimmter theoretisch vorgegebener Grenzen so gewählt, dass durch die Bestrafung von Zwischenzuständen am Ende der Optimierung eine möglichst eindeutige Materialverteilung erzielt wird.⁶³

Im Zusammenhang mit Finiten Elementen wird häufig von HARD-, TRANS- oder SOFT-Elementen gesprochen. HARD-Elemente mit einer Dichte $\rho(x_{\text{HARD}}) \approx \rho_0$ bilden mit ihrem hohen E-Modul $E(x_{\text{HARD}}) \approx E_0$ die Tragstruktur. SOFT-Elemente hingegen übernehmen aufgrund ihrer sehr geringen Dichte $\rho(x_{\text{SOFT}}) \approx 0$ und damit einem E-Modul $E(x_{\text{SOFT}}) \approx 0$ keine tragende Funktion. Die dazwischen liegenden TRANS-Elemente haben noch keine eindeutige Zuordnung. Im weiteren Verlauf der Optimierung gilt es zu klären, ob in den entsprechenden Bereichen Material angelagert werden sollte. Damit werden auch diese den HARD- oder SOFT-Elementen zugeordnet. Am Ende der Optimierung bilden die HARD-Elemente den Designvorschlag.

Generell werden für die Topologieoptimierung sowohl Verfahren der mathematischen Programmierung, wie zum Beispiel bei Svanberg⁶⁴, als auch Optimalitätskriterien-Verfahren⁶⁵ eingesetzt. Letztere eignen sich für die Topologieoptimierung wegen der in der Regel damit verbundenen großen Anzahl an Designvariablen besonders.

Für eine ausführliche Beschreibung der Topologieoptimierung sei an dieser Stelle

⁶¹siehe Bendsøe / Kikuchi (1988)

⁶²siehe Reiter (1995)

⁶³vgl. Lipka (2007)

⁶⁴siehe Svanberg (1987)

⁶⁵siehe z. B. Bendsøe / Sigmund (2003); Müller et al. (1999); Bakhtiary et al. (1996)

auf Bendsøe / Sigmund⁶⁶ verwiesen. Beispiele zur Anwendung und Erweiterung der Topologieoptimierung finden sich in den Arbeiten von Hessenauer et al.⁶⁷, Majic et al.⁶⁸ und Ottnad⁶⁹.

2.4.2 Formoptimierung

Eine der Grundlagen für die vorliegende Arbeit ist die Formoptimierung. Aus diesem Grund wird in den folgenden Abschnitten ausführlich auf den aktuellen Stand der Forschung speziell in diesem Bereich der Strukturoptimierung eingegangen. Nach einer allgemeinen Formulierung eines solchen Optimierungsproblems werden verschiedene Herangehensweisen zur Lösung vorgestellt.

Allgemeine Formulierung

Gegeben sei ein Körper P , repräsentiert durch eine Domain $\Omega \in \mathbb{R}^n, n = 2, 3$ mit einem Rand Γ . Dieser Rand kann im Allgemeinen in vier unterschiedliche Typen unterteilt werden:⁷⁰

- » $\Gamma_{t,l}$ – ein Randbereich mit Belastung (static boundary),
- » $\Gamma_{u,l}$ – ein Randbereich mit Verschiebungsnebenbedingung (kinematic boundary),
- » $\Gamma_{0,l}$ – ein Randbereich ohne äußere Kräfte (traction-free boundary) sowie
- » $\Gamma_{d,l}$ – der Designrand (design boundary).

Ein Formoptimierungsproblem mit den unterschiedlichen Randtypen zeigt Abbildung 2.3. Sämtliche Ränder zusammengenommen ergeben den gesamten Rand Γ . Dies gilt für sämtliche Lastfälle L_l und Iterationen n , auch wenn die Aufteilung des gesamten Randes in die Randbereiche jeweils unterschiedlich sein kann.

$$\Gamma_{t,l,n} \cup \Gamma_{u,l,n} \cup \Gamma_{0,l,n} \cup \Gamma_{d,l,n} = \Gamma_n \quad \forall L_l, n \quad (2.21)$$

Die Begrenzung des Designrandes $\Gamma_{d,l}$ erfolgt in obigem Beispiel durch die beiden Punkte A_l und A'_l . Der Designrand $\Gamma_{d,l}$ sowie beide Punkte A_l und A'_l müssen während des gesamten Optimierungsprozesses innerhalb des vorgegebenen Variationsgebietes $\hat{\Omega}$ liegen. Berührt der Designrand während des Verlaufes der Optimierung den Rand des Variationsgebietes, so ist es notwendig, den Designrand $\Gamma_{d,l}$ in einen freien Designrand $\Gamma_{f,l}$ und einen beschränkten Designrand $\Gamma_{c,l}$ und somit in zwei Bereiche zu unterteilen (Abbildung 2.4).

⁶⁶siehe Bendsøe / Sigmund (2003)

⁶⁷siehe Hessenauer et al. (2009)

⁶⁸siehe Majic et al. (2009)

⁶⁹siehe Ottnad (2009)

⁷⁰vgl. Häußler (2006)

Abbildung 2.3 Beispielhafte Definition eines zweidimensionalen Formoptimierungsproblems

Bei der Definition eines Formoptimierungsproblem es wird meist zusätzlich eine Volumenebenbedingung formuliert. Diese kann beispielsweise darin bestehen, dass das von der Domain Ω eingenommene Volumen V_n über die einzelnen Iterationen hinweg dem Ausgangsvolumen V_0 entsprechen und damit konstant bleiben soll.

$$V_n = V_0 = \text{const.} \quad (2.22)$$

Abbildung 2.4 Unterteilung des Designrandes in einen freien und einen beschränkten Abschnitt

Als Maß für die lokale Beanspruchung auf dem Designrand $\Gamma_{d,l}$ wird eine skalare Funktion S eingeführt, die die *Systemantwort* (design response) liefert. Üblicherweise handelt es sich bei S um eine Funktion der Verschiebungen \mathbf{u} sowie der zugehörigen Gradienten $\nabla \mathbf{u}$. Als Beispiel für eine solche Funktion sei die von Mises Vergleichsspannungsverteilung genannt. Sind im Optimierungsprozess mehrere Lastfälle zu berücksichtigen,

so sind die einzelnen Funktionen S_l geeignet miteinander zu kombinieren. Dies erfolgt beispielsweise über eine Maximumsfunktion.

Damit kann ein allgemeines Formoptimierungsproblem wie folgt formuliert werden:⁷¹

$$\text{minimiere } \max(S_l) \quad (2.23)$$

$$\text{so dass } \Gamma_d \in \hat{\Omega} \quad (2.24)$$

$$\text{und (falls gefordert) } \int_{\Omega} d\Omega - V_0 = 0 \quad (2.25)$$

Formoptimierung mit probabilistischen Verfahren

Aguayo⁷² und Albers et al.⁷³ stellen einen Formoptimierungsansatz zur Optimierung der Außenkontur von Ausgleichsgewichten einer Kurbelwelle auf Basis genetischer Algorithmen vor. Ausgangspunkt für die Optimierung ist ein CAD-Modell einer Kurbelwelle, deren Ausgleichsgewichte zweieinhalbdimensional⁷⁴ mit Hilfe von Splines abgebildet werden. Die Positionen der zugehörigen Stützstellen werden über Parameter durch einen genetischen Optimierungsalgorithmus variiert. Ziel des vorgestellten Prozessmodells ist es, gleichzeitig und vor allem automatisiert die zuvor in Form einer Straffunktion formulierten Anforderungen bezüglich der Schwerpunktlage, einer maximal zulässigen Unwucht sowie der Schmied- und damit Herstellbarkeit zu erfüllen. Anhand des gewählten Beispiels zeigt Aguayo auf, dass die Suche nach optimalen Formen für die einzelnen Ausgleichsgewichte nur wenige Stunden beträgt.⁷⁵ Die Anzahl der Parameter zur Beschreibung der Konturen fällt jedoch vergleichsweise gering aus.

Ebenfalls die Stützstellen von Splines und Polygonzügen als Parameter zur Beschreibung einer Form nutzen García / Gonzalez⁷⁶ in Kombination mit evolutionären Strategien. Bei den untersuchten Körpern handelt es sich auch hier um zweidimensionale Geometrien. Woon et al.⁷⁷ nutzen einen genetischen Algorithmus zur Lösung einer Optimierungsaufgabe, bei der eine zweidimensionale Form mit 20 Parametern als Beispiel verwendet wird. Für die Optimierung wird mit ca. 800 Generationen eine vergleichsweise große Anzahl an Finite Elemente Analysen benötigt.

Die Beispiele zeigen, dass probabilistische Verfahren prinzipiell für eine Formoptimierung verwendet werden können. Sie ermöglichen es, auch ohne apriorisches Wissen gute Ergebnisse zu erzielen. Die Anzahl der die Geometrie beschreibenden Designvariablen ist jedoch häufig stark eingeschränkt, weswegen diese Ansätze insbesondere für die Betrachtung komplexer dreidimensionaler Geometrien nur bedingt geeignet sind.

⁷¹vgl. Häußler (2006)

⁷²siehe Aguayo (2009)

⁷³siehe Albers et al. (2008d)

⁷⁴Die Splines zur Beschreibung der Konturen liegen jeweils in einer Ebene. Die Konturen werden anschließend extrudiert und damit in ein dreidimensionales Modell überführt.

⁷⁵vgl. Aguayo (2009)

⁷⁶siehe García / Gonzalez (2004)

⁷⁷siehe Woon et al. (2001)

Formoptimierung mit globalen Approximationsverfahren

Eine Optimierung von Strukturen, die großen Rotationen und großen elastischen Verformungen unterliegen, führen Ibrahimbegovic et al.⁷⁸ durch. Grundlage für die Optimierung ist eine Antwortfläche, die die Autoren aus gerastert berechneten Systemantworten ermitteln.

Madsen et al.⁷⁹ wenden ein Antwortflächenverfahren für die Formoptimierung eines Diffusors unter Berücksichtigung von Fluid-Struktur-Interaktionen an. In zwei Beispielen beschreiben sie die Form des Diffusors mit Hilfe von Polynomen und Splines, die mit Hilfe von zwei bzw. fünf Designvariablen modifiziert werden. Die eigentliche Formoptimierung erfolgt über eine mit einem D-optimalen Versuchsplan generierte Antwortfläche.

Nach Meske eignen sich globale Approximationsverfahren dann, wenn die Anzahl der Designvariablen sehr gering ist (≤ 10), keine Gradienten für die Zielfunktionen und Nebenbedingungen bestimmt werden können und keine Optimalitätskriterien für das betrachtete Problem existieren.⁸⁰ Er nennt in diesem Zusammenhang hochgradig nichtlineare Probleme wie Crash-Analysen als Beispiel.

Formoptimierung mit Optimalitätskriterien-Verfahren

Eine auf Optimalitätskriterien-Verfahren basierende Formoptimierung erfordert ein Optimalitätskriterium sowie eine Redesign-Formel, die anhand der Systemantwort eine Formänderung im Sinne des Optimalitätskriteriums vornimmt (\rightarrow Abschnitt 2.3.3).

Dass sich Kerbspannungen durch eine derart gestaltete Geometrie, dass der Spannungsverlauf an der Bauteiloberfläche konstant ist, minimieren lassen, beschreibt Baud bereits im Jahre 1934.⁸¹ Thum / Oschatz⁸² liefern die Grundlagen aus elastizitätstheoretischer Sicht. Neuber⁸³ greift den Ansatz auf und arbeitet ihn weiter aus. Nachweise zur Gültigkeit der Hypothesen für spezielle Probleme führen Wheeler⁸⁴ und Banichuk⁸⁵. Ergänzt werden diese durch den von Kikuchi et al.⁸⁶ geführten Nachweis für Probleme mit Designvariablen ohne Restriktionen. Schnack et al.⁸⁷ und Spörl⁸⁸ schlagen – ebenfalls auf Basis der Arbeiten von Baud – ein spannungsbasiertes Optimalitätskriterien-Verfahren zur *gradientenfreien Formoptimierung* vor. Grundlage für das Verfahren bildet neben der Homogenisierungshypothese von Baud die Finite Elemente Methode. Zur

⁷⁸siehe Ibrahimbegovic et al. (2004)

⁷⁹siehe Madsen et al. (2000)

⁸⁰vgl. Meske (2007)

⁸¹siehe Baud (1934a, b)

⁸²siehe Thum / Oschatz (1932)

⁸³siehe Neuber (1971, 1972)

⁸⁴siehe Wheeler (1976)

⁸⁵siehe Banichuk (1977)

⁸⁶siehe Kikuchi et al. (1986)

⁸⁷siehe Schnack (1978, 1980); Schnack et al. (1988)

⁸⁸siehe Spörl (1985)

Begründung werden die Kerbgesetze von Neuber und Thum / Oschatz – das Abklinggesetz, die Theorie der Entlastungskerbene sowie das Reaktionsgesetz der Kerbwirkung – herangezogen. Das *Abklinggesetz* besagt, dass die lokal vorliegende Krümmung einer Oberfläche für die lokale Spannungsverteilung verantwortlich ist. Dahingegen spielen weiter entfernte Bereiche eine untergeordnete Rolle. Nach der *Theorie der Entlastungskerbene* kann eine Kerbe durch eine an ihrem Rand erzeugte Spannungskonzentration das umliegende Gebiet entlasten. Das *Reaktionsgesetz der Kerbwirkung* besagt, dass durch die Anhebung eines Spannungsminimums eine Spannungsabnahme im umliegenden Gebiet erreicht werden kann. Zur Beeinflussung der Spannungsverteilung im Umfeld einer Kerbe kann somit eine Variation der Form der Berandung im Bereich der Kerbe als probates Mittel herangezogen werden.

Die Finite Elemente Methode als Grundlage verwendend, nutzen Schnack und Spörl die Position der Knoten des Netzes als Designvariablen (Designknoten). Das Iterationsverfahren von Schnack fußt auf der identischen Monotonie von Kerbspansungsverteilung und Randkrümmung. Von Spörl wird das Verfahren auf rotationssymmetrische Körper erweitert. Er beweist zudem die Existenz einer optimalen Lösung für die Minimierung der Spannungskonzentration mit Hilfe einer Modifikation der Randkontur.⁸⁹ Iancu überträgt das Verfahren zum einen auf allgemeine, dreidimensionale Formoptimierungsprobleme und führt zum anderen den Beweis, dass sich das Spannungsminimierungsverfahren nicht nur mit Hauptspannungen, sondern auch mit Vergleichsspannungshypothesen formulieren lässt.⁹⁰ Die Verschiebung der Knoten in Normalenrichtung wird bei den genannten Verfahren anhand des Spannungsmaximums und -minimums als Systemantwort ermittelt. Anhand dieser Werte wird die Verschiebung der Knoten an diesen beiden Orten berechnet und die restlichen Designknoten durch eine Auswertung der Oberflächenkrümmung nachgezogen.

Ebenfalls die Beanspruchungs-Homogenisierungshypothese nutzt Mattheck in seinem CAO-Verfahren (computer aided optimization).⁹¹ Er greift für seine These zur beanspruchungsgerechten Formfindung auf umfangreiche Untersuchungen von in der Natur auftretenden Formen, insbesondere die Form von Astwurzeln bei Bäumen, zurück. Im Gegensatz zu Schnack, Spörl und Iancu fließen in die Ermittlung der Verschiebungsvektoren nicht nur Spannungsmaximum und -minimum ein. Stattdessen wird die Verschiebung für jeden einzelnen Knoten anhand der Differenz der lokal am Knoten vorliegenden Spannung und eines Referenzwertes bestimmt. Die Richtung der Verschiebung wird durch eine fiktive und der Spannungsverteilung gleichgesetzte Temperaturverteilung berechnet. Die daraus in einer weiteren Finite Elemente Analyse resultierende thermische Ausdehnung führt zu einer neuen Oberflächenkontur, die in der folgenden Iteration wiederum für die Beanspruchungsanalyse verwendet wird.

⁸⁹siehe Spörl (1985)

⁹⁰siehe Iancu (1991)

⁹¹siehe Mattheck (1990); Mattheck / Burkhardt (1990); Mattheck et al. (1990)

Parameterfreie Formoptimierung

Die Approximation der Form eines Bauteiles erfolgt in vielen Fällen mit Hilfe mathematischer Funktionen. So nutzen beispielsweise Aguayo⁹² oder auch der Autor in weiteren Arbeiten⁹³ Splines zur Beschreibung der Außenkontur von Bauteilen. Als Designvariablen für ein Optimierungsproblem werden die Koordinaten der Stützstellen oder Koeffizienten von Polynomen herangezogen. Ein Nachteil dieser Verfahren ist, dass sie nur bei einfachen Bauteilgeometrien mit vertretbarem Aufwand einzusetzen sind.⁹⁴

Sauter⁹⁵ hingegen schlägt ein sogenanntes *parameterfreies Verfahren* vor, bei dem die Bauteilform durch nahezu beliebig viele, voneinander unabhängige Stützstellen beschrieben wird. Er greift in seiner Arbeit auf die Homogenisierungshypothese von Baud⁹⁶, das Abklinggesetz von Neuber⁹⁷ sowie die Verfahren von Schnack et al.⁹⁸ und Mattheck et al.⁹⁹ zurück. Durch die Kombination und Erweiterung dieser Verfahren entwickelt er ein neues Verfahren zur Formoptimierung, welches die Vorteile der jeweiligen Arbeiten vereint.

Die Arbeit von Baud als Grundlage nutzend, verwendet Schnack für sein Verfahren die Tangentialspannung und ist daher auf einachsige Spannungszustände beschränkt. Sauters Absatz hingegen ermöglicht die Verwendung beliebiger skalarer Größen wie beispielsweise Vergleichsspannungen. Voraussetzung ist die Formulierbarkeit einer *Homogenisierungshypothese*, um eine Redesign-Regel definieren zu können. Bei seinem Verfahren können damit auch mehrachsige Lastszenarien berücksichtigen.¹⁰⁰

Die Modifikation der Bauteiloberfläche erfolgt anhand des lokalen Beanspruchungszustandes und einer Redesign-Regel (\rightarrow Abschnitt 2.3.3) gemäß Gleichung (2.26)¹⁰¹.

$$\Delta \mathbf{u}_n = \alpha \cdot |S_n - S_{n,ref}|^\kappa \operatorname{sgn}(S_n - S_{n,ref}) \cdot \mathbf{e}_n \quad (2.26)$$

Dabei ist $\Delta \mathbf{u}_n$ der Verschiebungsvektor des n -ten Knotens, α ein globaler Skalierungsfaktor, S_n die lokale, auf einen Knoten bezogene Beanspruchung, $S_{n,ref}$ eine Referenzbeanspruchung, κ ein Exponent zur Beschreibung des Zusammenhangs zwischen der Oberflächennormalenverschiebung \mathbf{u}_n und dem Betrag der Differenz von lokaler Beanspruchung S_n und Referenzbeanspruchung $S_{n,ref}$ und \mathbf{e}_n der Einheitsvektor in Richtung der Oberflächennormalen am n -ten Knoten.

Im Gegensatz zum linearen Zusammenhang zwischen Temperatur und Verschiebung

⁹²siehe Aguayo (2009)

⁹³siehe Albers et al. (2007a)

⁹⁴vgl. Häußler (2006)

⁹⁵siehe Sauter (1991)

⁹⁶siehe Baud (1934b, a)

⁹⁷siehe Neuber (1972, 1971)

⁹⁸siehe Schnack et al. (1988); Schnack (1978)

⁹⁹siehe Mattheck / Burkhardt (1990); Mattheck et al. (1990); Mattheck (1990)

¹⁰⁰vgl. Häußler (2006)

¹⁰¹vgl. Sauter (1991)

bei Mattheck / Burkhardt ermittelt Sauter den Betrag für jeden Ort auf Basis der lokalen Beanspruchung. Die Verschiebung erfolgt in Richtung der Oberflächennormalen, wobei sich die Verschiebungsrichtung – also das lokale Wachsen oder Schrumpfen der Geometrie – aus dem Vorzeichen der Differenz von Beanspruchung und Referenzbeanspruchung ergibt. Die *Referenzbeanspruchung* ist in der Regel der mit Hilfe von Gleichung (2.27) berechnete arithmetische Mittelwert der Beanspruchungen aller $n_{\Gamma,d}$ im Designgebiet befindlichen Knoten.

$$S_{n,ref} = \frac{1}{n_{\Gamma,d}} \sum_{n=1}^{n_{\Gamma,d}} S_n \quad (2.27)$$

Durch die Verwendung der Referenzbeanspruchung S_{ref} ist das zuvor in den Gleichungen (2.23) bis (2.25) formulierte allgemeine Formoptimierungsproblem im Sinne einer Minimierungsaufgabe äquivalent zu einer Homogenisierung. Das Homogenisierungsproblem kann damit entsprechend den Gleichungen (2.28) bis (2.30) zusammengefasst werden. Ziel der Optimierung ist also eine homogene Beanspruchungsverteilung auf dem Niveau der Referenzbeanspruchung S_{ref} .

$$\text{minimiere} \quad \max |S_l - S_{l,ref}| \quad (2.28)$$

$$\text{so dass} \quad \Gamma_d \in \hat{\Omega} \quad (2.29)$$

$$\text{und (falls gefordert)} \quad \int_{\Omega} d\Omega - V_0 = 0 \quad (2.30)$$

Das Optimierungspaket TOSCA Structure.Shape

In diesem Abschnitt wird mit TOSCA Structure.Shape – einem Teil des Strukturoptimierungspaketes TOSCA Structure – ein Softwarepaket vorgestellt, das mit seinem Finite Elemente basierten, parameterfreien Optimalitätskriterienverfahren zur Formoptimierung die Grundlage für die Erweiterungen in Kapitel 7 bildet.

Der zuvor beschriebene und am IPEK – Institut für Produktentwicklung von Sauter entwickelte Ansatz zur parameterfreien Formoptimierung wird von Sauter et al.¹⁰² in Form eines *Regelkreises* dargestellt. Eine erste prototypische Implementierung namens CAOSS (computer aided optimization system Sauter) wird von Müller¹⁰³ vorgenommen. Allinger¹⁰⁴ erweitert CAOSS um die Topologie- und Größenoptimierung. Diese und weitere Aktivitäten führen 1998 zur Ausgründung der Firma FE-DESIGN GmbH, von welcher das mittlerweile in TOSCA Structure umbenannte Softwarepaket weiterentwickelt und vertrieben wird. In zahlreichen Forschungsarbeiten am IPEK – Institut für Produktentwicklung werden neue Methoden und Prozesse der Strukturoptimierung

¹⁰²siehe Sauter et al. (1992)

¹⁰³siehe Müller (1992)

¹⁰⁴siehe Allinger (1993)

entwickelt und validiert. Hierzu zählen beispielsweise die Entwicklung einer systembasierenden Komponenteoptimierung zur Unterstützung durchgängiger Analysemethoden im Produktentwicklungsprozess¹⁰⁵ und die parameterfreie Formoptimierung dynamisch beanspruchter Bauteile in mechanischen Systemen auf Basis von Lebensdaueranalysen und hybriden Mehrkörpersystemen¹⁰⁶. Auch die vorliegende Arbeit baut auf dem Optimierungspaket TOSCA Structure auf, unter anderem, um der in Kapitel 3 formulierten Zielsetzung gerecht zu werden, das in dieser Arbeit entwickelte Prozessmodell zur Formoptimierung (→ Kapitel 7) in der industriellen Praxis nutzbar zu machen.

Ausgangspunkt einer Optimierung mit TOSCA Structure.Shape ist ein Finite Elemente Modell. Der zu Beginn von Abschnitt 2.4.2 eingeführte Designrand Γ_d wird durch Berandungsknoten des Modells repräsentiert, wobei in der Regel nicht alle Knoten, sondern nur die in einem vorzugebenden Designgebiet befindlichen Knoten verwendet werden. Als Designvariablen werden die Koordinaten dieser Knoten verwendet. Im Verlaufe der Optimierung werden die Koordinaten der Knoten im Designgebiet gemäß der in Gleichung (2.27) formulierten Redesign-Regel verändert. Um eine möglichst hohe Qualität des Finiten Elemente Netzes trotz der sich ändernden Berandungsgeometrie gewährleisten zu können, kann auch die Position von Knoten im Umfeld des Designgebietes angepasst werden. Die Adaption der Knotenpositionen erfolgt in diesem Fall jedoch rein anhand geometrischer Aspekte wie z. B. der jeweiligen Lage relativ zu den Designknoten, dem Seitenverhältnis der Elementkanten und den Elementinnenwinkeln. Als Eingangsgröße für den in TOSCA Structure.Shape implementierten Regelkreis dient eine Finite Elemente Analyse. Anhand der Ergebnisse dieser Analyse wird geprüft, ob das Optimalitätskriterium erfüllt ist. Ist dies nicht der Fall, so wird die Geometrie über die Redesign-Regel modifiziert und eine weitere Iteration durchgeführt.

2.4.3 Weitere Varianten

Neben der Topologie- und Formoptimierung existiert eine Reihe weiterer Strukturoptimierungsvarianten, die diese Arbeit jedoch nicht tangieren. Um das Spektrum der Strukturoptimierung aufzuzeigen, seien an dieser Stelle exemplarisch aktuelle Arbeiten zur Optimierung der Versickerung dünnwandiger Bauteile sowie zur Strukturoptimierung und Faserorientierung von Faserverbundbauteilen umrissen.

Sickenoptimierung

Die Gestaltung dünnwandiger Blechbauteile hinsichtlich Steifigkeit und Eigenschwingungsverhalten ist seit mehreren Jahrzehnten Gegenstand zahlreicher, nahezu ausschließlich empirischer Forschungsarbeiten.¹⁰⁷ Sie basieren auf Versuchen mit einfa-

¹⁰⁵siehe Müller (2005)

¹⁰⁶siehe Häußler (2006)

¹⁰⁷siehe z. B. Widmann (1983); Oehler / Garbers (1968)

chen Geometrien, z. B. Rechteckblechen, und münden üblicherweise in Konstruktionsrichtlinien. Daneben kommen in jüngerer Zeit mehr und mehr rechnergestützte Verfahren auf, die sich neben den bereits genannten Topologie- und Formoptimierungsverfahren ebenfalls der Strukturoptimierung zuordnen lassen. Für die *Topographie-* oder *Sickenoptimierung* genannte Optimierung dünnwandiger Bauteile kommen bislang hauptsächlich Algorithmen der mathematischen Programmierung und Optimalitätskriterienverfahren zum Einsatz (→ Abschnitt 2.3).

Grundlage des am IPEK – Institut für Produktentwicklung von Emrich¹⁰⁸ vorgeschlagenen Ansatzes zur Sickenoptimierung sind Untersuchungen zur Mechanik von Versickungen. Darauf aufbauend leitet Emrich Optimalitätskriterien für eine Versickung ab. Wichtigstes Kriterium ist der Biegespannungstensor, der sich als Differenz der Tensoren zwischen den (ebenen) Spannungstensoren in Ober- und Unterschale ergibt. Da die versteifende Wirkung der Sicke senkrecht zu ihrer Längsachse am größten ist, wird die Sicke entlang der betragsmäßig größten Hauptspannung des Biegespannungstensors ausgerichtet. Des Weiteren wird z. B. aus dem Satz von Steiner geschlossen, dass eine symmetrische Flächenverteilung die maximal versteifende Wirkung besitzt und die maximal mögliche Sickentiefe die versteifende Wirkung senkrecht zur Sickenlängsachse maximiert.

Eine automatisierte Gestaltung der Versickung dünnwandiger Blechbauteile ist derzeit jedoch insbesondere aufgrund der fehlenden Einbeziehung fertigungstechnischer Aspekte nur eingeschränkt möglich.¹⁰⁹ Im Rahmen aktueller Forschungsvorhaben werden daher Ansätze entwickelt, die es ermöglichen, den *Umform-* und damit *Herstellprozess* in der Sickenoptimierung zu berücksichtigen. Ziel ist es, die mit Hilfe des Optimierungsverfahrens erzeugten Geometrien mit teils signifikant höheren Steifigkeiten durch die Berücksichtigung geeigneter Randbedingungen möglichst direkt in herstellbare Bauteile übertragen zu können.¹¹⁰

Optimierung von Faserverbundbauteilen

Der Forderung nach energieeffizienten Systemen wird in den vergangenen Jahren u. a. durch die Verwendung moderner Faserverbundwerkstoffe Rechnung getragen. Mit Hilfe neuer und weiterentwickelter textiltechnischer Verfahren können Faserverbundbauteile zunehmend kostengünstig hergestellt werden. Im Allgemeinen besteht ein Faserverbundwerkstoff aus zwei Hauptkomponenten – einer bettenden *Matrix* und verstärkenden *Fasern*. Neben einer optimalen Bauteilgestalt ist während des Entwicklungsprozesses zusätzlich eine geeignete Faserorientierung für die anisotropen Werkstoffe zu finden. Mit Hilfe der tailored fiber placement Technologie (TFP) sind bereits heute Bauteile mit

¹⁰⁸siehe Emrich (2004)

¹⁰⁹vgl. Albers et al. (2010c)

¹¹⁰siehe Hoffmann / Albers (2009)

variabelaxialer Fadenablage realisierbar.¹¹¹

Die Auslegung von Faserverbundbauteilen mit variabelaxialer Fadenablage erfordert spezifische Optimierungsstrategien. Der von Spickenheuer et al.¹¹² vorgestellte Ansatz kombiniert Methoden der Topologieoptimierung mit Verfahren der Materialoptimierung. Spickenheuer et al. führen hierzu – ausgehend von einer Topologieoptimierung und einer folgenden Hauptspannungsoptimierung – eine numerische Vorauslegung durch. Anschließend wird das Hauptspannungsvektorfeld für den Entwurf eines Stickmusters generiert. Für die Topologieoptimierung wird mit dem Verfahren der beweglichen Asymptoten (method of moving asymptotes – MMA)¹¹³ ein auf Sensitivitäten basierender Optimierungsprozess entwickelt (→ Abschnitt 2.3). Für die Materialoptimierung werden in einem Optimalitätskriterienverfahren die Hauptspannungsrichtungen herangezogen. Die Verstärkungsfasern werden dabei entsprechend der größten Beanspruchungsrichtung, der Hauptspannungsrichtung, orientiert.¹¹⁴

Ähnlich wie bei der Sickenoptimierung sind aktuell die mit Hilfe der Verfahren erzielbaren Designvorschläge aufgrund eingeschränkt implementierter Fertigungsrandbedingungen nur bedingt in reale Bauteile übertragbar. Gegenstand verschiedener Arbeiten ist daher die Integration spezifischer Fertigungsrestriktionen.

2.5 Robust Design

In der Literatur wird der Begriff der Robustheit in verschiedenen Ausprägungen verwendet. Eine der im ingenieurwissenschaftlichen Umfeld etablierten Definitionen stammt von Taguchi¹¹⁵. Er definiert die Robustheit eines Produktes als *Empfindlichkeit* oder *Sensitivität* des Produktes gegenüber streuenden Eingangsgrößen, vgl. Abbildung 2.5. Solche *Unsicherheiten* können auf unterschiedlichste Quellen zurückgeführt werden. So können Daten wie Materialeigenschaften, die als Eingangsparameter für ein Simulationsmodell herangezogen werden, Streuungen unterliegen. Als Beispiel sei der Elastizitätsmodul des Werkstoffes ein und desselben Bauteiles genannt, der sich aufgrund inhärenter Variabilität des Materials je nach untersuchter Probe mehr oder weniger unterscheiden kann.¹¹⁶ Häufig sind zudem keine oder lediglich unzureichende Eingangsinformationen verfügbar. Lasten, insbesondere, wenn sie aus Umweltbedingungen resultieren, stellen eine Unsicherheit dar. Hierzu zählen zum Beispiel Windlasten.¹¹⁷ Solche Unsicherheiten sind nicht oder nur zum Teil beeinflussbar. Zur Erstellung aussagefähiger Simulationsmodelle sind diese Aspekte möglichst zu berücksichtigen und ihr Einfluss

¹¹¹vgl. Eichhoff / Gries (2009)

¹¹²siehe Spickenheuer et al. (2009)

¹¹³siehe Svanberg (1987)

¹¹⁴vgl. Spickenheuer et al. (2008)

¹¹⁵vgl. Taguchi (2004); Bendell et al. (1989)

¹¹⁶vgl. Thacker (2008)

¹¹⁷vgl. Holmes (2001)

auf die Analyseergebnisse zu untersuchen und bewerten. Generell sind bei der Modellbildung Vereinfachungen und Annahmen zu treffen, die zu weiteren Unsicherheiten führen können.

Abbildung 2.5 Zusammenhang zwischen einer Eingangs- und Ausgangsgröße. Durch Verschieben der Lage der Streuung einer Eingangsgröße ändert sich die Streuung der Ausgangsgröße.

Die Robustheit des Produkts gegen solche Störeinflüsse soll nach Taguchis Definition möglichst hoch sein. Dabei interpretiert er Abweichungen einer Eigenschaft von den vorab formulierten, gewünschten Zielen als *Verlust*. Mittels einer *Verlustfunktion* kann dieser berechenbar gemacht und damit quantifiziert werden. Durch die Verlustfunktion werden beispielsweise Toleranzfelder nicht mehr in Form einer Sprungfunktion mit den beiden Zuständen „zulässig“ oder „unzulässig“ beschrieben. Stattdessen wird der Verlust $L(f)$ bei einem vorliegenden Istwert f ausgehend vom Nennwert m berechnet. Im einfachsten Fall wird hierzu wie in Gleichung (2.31) eine Parabel mit der Spreizung k verwendet, deren Scheitelpunkt im Nennwert liegt. Einen Vergleich mit der klassischen Betrachtung zeigt Abbildung 2.6.

$$L(f) = k(f - m)^2 \quad (2.31)$$

In Kapitel 7 wird eine rechnergestützte Robustheitsbewertung und eine darauf aufbauende Strukturoptimierung mikromechanischer Bauteile und Systeme angestrebt. Allgemein müssen, um eine Optimierung durchführen zu können, Zielfunktion(en) und Randbedingungen quantifizierbar sein (\rightarrow Abschnitt 2.3). Um den Einfluss streuender Parameter einzubeziehen, sind zudem *stochastische Methoden* vonnöten.

Abbildung 2.6 Betrachtung des Verlustes am Beispiel eines Toleranzfeldes im klassischen Sinne und nach Taguchi

2.5.1 Deterministische und stochastische Analyse

Unter einer *deterministischen Analyse* wird die Ermittlung einer Transformationsfunktion verstanden, die einen Zusammenhang zwischen Eingangs- und Ausgangsgrößen wiedergibt.¹¹⁸ In einfachen Fällen kann eine solche Transformationsfunktion analytisch beschrieben werden. Häufig ist die Herstellung dieses Zusammenhanges jedoch nur durch spezielle Verfahren möglich, z. B. durch die Finite Elemente Methode (→ Abschnitt 2.2). Da die Eingangsgrößen einer Analyse wie zuvor beschrieben in vielen Fällen Streuungen unterliegen – beispielsweise die Richtung einer angreifenden äußeren Kraft – stellt sich die Frage, wie sich selbige auf die Ausgangsgrößen auswirken. Zur Beantwortung dieser Frage wird eine Unsicherheitsanalyse durchgeführt. Dies ist insbesondere im Hinblick auf technische Systeme von Bedeutung, da – wie Formica¹¹⁹ feststellt – diese durch zunehmende Komplexität immer empfindlicher auf die Auswirkungen von Streuungen und Unsicherheiten werden. Mit Hilfe von *Robustheitsanalysen* wird daher versucht, ein Bauteil oder System so zu gestalten, dass es weniger empfindlich auf Streuungen von Eingangsgrößen reagiert. Dies bedeutet, dass die Variation des Systemverhaltens reduziert wird. Reh et al.¹²⁰ formulieren dies im Sinne einer besseren Vorhersagbarkeit des Produktverhaltens, wobei dies zu einem Optimierungsproblem führt. Zielfunktionen bzw. Zwangsbedingungen werden die Ergebnisse einer probabilistischen Analyse zugrunde gelegt. Zur Bewertung der Robustheit werden beispielsweise Größen wie Standardabweichung und Variationskoeffizient verwendet. Als probabilistische Methoden kommen unter anderem sogenannte *Monte Carlo Verfah-*

¹¹⁸vgl. Reh et al. (2005)

¹¹⁹vgl. Formica (1990)

¹²⁰vgl. Reh et al. (2006, 2005)

*ren*¹²¹ zur Anwendung, deren Grundlage ein Zufallszahlengenerator bildet. Im Bereich ingenieurtechnischer Fragestellungen hat sich hierbei insbesondere das von Matsumoto / Nishimura¹²² vorgeschlagene Verfahren etabliert. Zur Interpretation der Ergebnisse werden statistische Verfahren angewendet. Auf diese Weise sind beispielsweise die Sensitivitäten des betrachteten Bauteils oder Systems bestimmbar.

2.5.2 Samplingverfahren

Samplingverfahren dienen der Ermittlung von Stichproben. Ein einfaches und weit verbreitetes Verfahren ist die *Monte Carlo Simulation* (MCS), die auf häufig durchgeführten Zufallsexperimenten aufbaut.¹²³

Monte Carlo Verfahren

Bei Monte Carlo Verfahren werden zunächst eine oder mehrere Verteilungsfunktion(en) für die Zufallsvariable(n) festgelegt. Anschließend werden *Stichproben* der Zufallsvariablen erzeugt und Simulationen mit den Stichproben durchgeführt. Die Monte Carlo Simulation eignet sich für verschiedenste Anwendungsfälle. So kann eine näherungsweise Bestimmung der Fläche eines Viertelkreises mit Hilfe gleichverteilter Stichproben in einem diesen umhüllenden Quadrat erfolgen. Die Fläche innerhalb des Viertelkreises kann aus dem Verhältnis der inner- und außerhalb der Kreisfläche liegenden Stichproben ermittelt werden. Auf ähnliche Weise lässt sich auch die Kreiszahl π bestimmen. Grundsätzlich sind Samplingverfahren wie die Monte Carlo Simulation für Problemstellungen mit großen Parameterräumen und nichtlinearem Verhalten geeignet.¹²⁴ Allerdings bedarf es einer großen Anzahl an Stichproben, was für geringe Ausfallwahrscheinlichkeiten in der Regel wenig effizient ist. Daher kommen weitere Verfahren wie das *Importance Sampling* oder *Latin Hypercube Sampling* zum Einsatz.

Importance Sampling

Die Forderung nach hohen Zuverlässigkeiten technischer Produkte führt bei Verwendung der Monte Carlo Simulation zu der Notwendigkeit einer Vielzahl von Stichproben, um auch die interessierenden Ausfälle hinreichend genau abbilden zu können. Das Importance Sampling, auch Verfahren der wesentlichen Stichproben genannt, wird zur Effizienzsteigerung von Monte Carlo Simulationen eingesetzt. Es ist eines der am weitesten verbreiteten Verfahren zur Simulation seltener Ereignisse.¹²⁵ Das zugrunde

¹²¹siehe Ang / Tang (1984, 1975)

¹²²siehe Matsumoto / Nishimura (1998)

¹²³siehe Metropolis / Ulam (1949)

¹²⁴vgl. Albers et al. (2007a)

¹²⁵vgl. Sandmann (2004)

liegende Wahrscheinlichkeitsmaß wird hierzu so verändert, dass die interessierenden Ereignisse häufiger auftreten. Die Ergebnisse werden dadurch zunächst gezielt verfälscht und anschließend mit einem Korrekturfaktor verrechnet. Allgemein ist das Importance Sampling geeignet für eine Varianzreduktion. Daneben existiert eine Reihe weiterer Verfahren wie das *Systematic Sampling* oder das *Stratified Sampling*.¹²⁶

Latin Hypercube Sampling

Zur Steigerung der Effizienz des Verfahrens wird beim Latin Hypercube Sampling (LHS) der Abbildungsraum jeder Zufallsvariable in Intervalle gleicher Wahrscheinlichkeit unterteilt. Die Stichproben werden unter Berücksichtigung der Verteilungsdichte innerhalb des Intervalls so gewählt, dass in jedem Intervall nur jeweils eine Stichprobe liegt. Dadurch erfolgt eine gleichmäßige Abdeckung des Abbildungsraumes und eine Reduktion der Varianz der Verteilung. Abbildung 2.7 zeigt ein solches Sampling bei zwei normalverteilten Variablen und fünf Stichproben je Zufallsvariable.

Abbildung 2.7 Latin Hypercube Sampling bei zwei normalverteilten Variablen und je fünf Stichproben

2.5.3 Antwortflächenverfahren

Im Umfeld der multidisziplinären Optimierung (MDO) und zur möglichst effizienten stochastischen Analyse und Optimierung werden auch die bereits in Kapitel 2.3.4 beschriebenen Antwortflächenverfahren verwendet. Sie basieren auf einer statistischen Versuchsplanung (design of experiments – DOE), anhand derer aus einer möglichst geringen Anzahl an zu untersuchenden Stützstellen eine möglichst genaue Beschreibung

¹²⁶siehe Arouna (2004)

des Systemverhaltens ermittelt wird.¹²⁷ Bei der statistischen Versuchsplanung werden entgegen der klassischen Vorgehensweise mehrere Faktoren gleichzeitig variiert.

Für eine weitergehende Beschreibung der Methoden des Robust Designs wird an dieser Stelle auf die Arbeiten von Leslabay¹²⁸ und Reh et al.¹²⁹ verwiesen.

2.6 Mikrotechnik

Im 21. Jahrhundert gilt Marktstudien zufolge die Mikro(system)technik als eine der Schlüsseltechnologien.¹³⁰ Neben den damit möglichen, rein mikrotechnischen Anwendungen bereitet sie zusätzlich auch neu entstehenden Technologiefeldern wie der Bio- oder der Nanotechnologie den Weg zu einer wirtschaftlichen Nutzung. Die Mikrotechnik stellt die erforderlichen Schnittstellen bereit, um innovative Entwicklungen aus neuen Technologiefeldern in Produkte zu integrieren. So sind viele Entwicklungen der Nanotechnologie ohne Mikrotechnik nicht nutzbar – erst über deren Schnittstellen wird die in kleinsten Dimensionen und Strukturen operierende Nanotechnologie handhabbar und in Produkten einsetzbar.¹³¹

Bereits heute finden in vielen Bereichen mikrotechnische Produkte Verwendung. So werden im Automobilbau serienmäßig z. B. Sensoren zur Detektion einer erforderlichen Auslösung eines Airbags verbaut. In Informations- und Unterhaltungstechnik kommen sie in Form von Mikrospiegelaktoren in hochauflösenden Projektoren, in Schreib- und Leseköpfen für Festplattenspeicher, als mikrooptische Systeme zum Lesen der Daten von optischen Datenträgern zum Einsatz.¹³² In Form von intravaskulären Stents und Werkzeugen für die minimalinvasive Chirurgie sind sie wesentlicher Baustein moderner Medizintechnik. Durch ihre kleinen Strömungskanäle steigern Mikrowärmetauscher und -vermischer in der chemischen und thermischen Verfahrenstechnik im Vergleich zu konventionellen Anlagen die Effizienz der Wärme- und Stoffübergänge.¹³³

Die in vielen technischen Entwicklungen erkennbare Tendenz, Bauteile, Funktionsgruppen oder ganze Systeme zu miniaturisieren, resultiert aus dem Bestreben, kleinere, leichtere und günstigere Bauteile und -gruppen mit höherer Effektivität und größerer Funktionalität einzusetzen.¹³⁴ Daneben können mit derart miniaturisierten Systemen teilweise auch gänzlich neue Anwendungen und Produkte erschlossen werden¹³⁵ – Gad el Hak verweist als Beispiel hierfür auf die rasante Entwicklung der Mikroelektronik

¹²⁷siehe Ryan (2001); Atkinson / Donev (1992); Box et al. (1978) sowie Kapitel 2.3.4

¹²⁸siehe Leslabay (2009)

¹²⁹siehe Reh et al. (2005)

¹³⁰vgl. Hesselbach et al. (2003); Heimer / Werner (2004); Wicht / Bouchaud (2005)

¹³¹vgl. BMBF (2009)

¹³²siehe z. B. Bourne (2003); Douglass (2003)

¹³³vgl. Brandner et al. (2007)

¹³⁴vgl. Auhorn (2005)

¹³⁵vgl. Ehrfeld (2002)

im 20. Jahrhundert.¹³⁶

2.6.1 Ausprägungen der Mikrotechnik

Durch die unterschiedlichen Schwerpunkte haben sich länderspezifisch geprägte und damit unterschiedliche Definitionen des Begriffes Mikro(system)technik gebildet. Bis heute existiert daher keine einheitliche Definition dieses und damit zusammenhängender Begriffe.¹³⁷ Aus diesem Grund werden im Folgenden einige Begriffe, die für das allgemeine Verständnis der vorliegenden Arbeit von Bedeutung sind, definiert.

In den Vereinigten Staaten bezeichnet der Begriff MEMS (micro electro mechanical systems) integrierte Mikrobauteile und -systeme mit Abmessungen von mehreren Mikrometern bis hin zu wenigen Millimetern, die elektrische und mechanische Elemente kombinieren. Im japanischen Raum liegt der Schwerpunkt auf Mikrowerkzeugmaschinen. Sogenannte micromachines bezeichnen daher Systeme, die sich aus bis zu einigen Millimetern großen Komponenten zusammensetzen. In Europa und speziell Deutschland beinhaltet der Begriff Mikro(system)technik die Menge aller Techniken und Technologien für den Entwurf, die Herstellung und die Anwendung von miniaturisierten Gesamtsystemen und Systemmodulen mit mindestens einer charakteristischen, funktionsrelevanten geometrischen Abmessung im Mikrometerbereich. „Von ‚Mikrobauteilen‘ bzw. ‚Mikrostrukturen‘ wird im Allgemeinen dann gesprochen, wenn zur Größenbeschreibung der Gesamtabmessungen die Mikrometerskala herangezogen werden muss. Demgegenüber wird für Bauteile, die funktionale Strukturen im Mikrometerbereich tragen, deren Gesamtabmessungen aber in der Größenordnung von Millimetern oder darüber liegen, in der Regel der Begriff ‚mikrostrukturierte Bauteile‘ verwendet. Im Folgenden werden beide Typen unter dem Begriff ‚Mikrokomponenten‘ zusammengefasst.“¹³⁸ „Werden Mikrokomponenten über geeignete Systemtechniken derart miteinander in Beziehung gesetzt, dass ein funktionaler Verbund entsteht, der erst durch das integrative Zusammenwirken von u. a. mikrospezifischen Entwicklungs-, Fertigungs- und Montagemethoden denkbar ist und in einem übergeordneten oder autarken Gesamtsystem wirkt, spricht man von einem Mikrosystem.“¹³⁹

2.6.2 Forschungsbedarf

Derzeit erfolgt die Massenfertigung mikromechanischer Komponenten häufig über Halbleitertechniken.¹⁴⁰ Der Markterfolg der auf diese Weise hergestellten Produkte ist eng mit der Miniaturisierung mikroelektronischer Funktionselemente verknüpft. Die dort

¹³⁶vgl. Gad el Hak (2005)

¹³⁷vgl. Marz (2005)

¹³⁸vgl. Benzler (2001)

¹³⁹vgl. Marz (2005)

¹⁴⁰vgl. Schwerpunktprogramm 1012 (2009)

zur Mikrostrukturierung und Herstellung mikrotechnischer Produkte am häufigsten verwendeten Fertigungstechnologien wurden zum größten Teil aus der Mikroelektronik adaptiert. In der Regel können diese Verfahren erst bei sehr großen Stückzahlen rentabel eingesetzt werden.¹⁴¹ Die verwendeten lithografischen Verfahren und Ätztechniken erfüllen dabei jedoch nicht die Forderungen bezüglich der Klein- oder Mittelserienfertigung komplexer dreidimensionaler Strukturen. So ist die Herstellung und der Einsatz hoch belastbarer mikromechanischer Komponenten aktuell aufgrund der meist auf zwei- bis zweieinhalbdimensionalen Fertigungstechnologien noch enorm eingeschränkt. Hinzu kommt eine aufgrund der Verfahren stark begrenzte Materialpalette – die erforderliche Mikrostrukturierbarkeit bieten lediglich Silizium, ungefüllte Kunststoffe und einige Nichteisenmetalle.¹⁴² Zur Erschließung eines breiteren Anwendungsspektrums sind jedoch hochpräzise, dreidimensionale, mechanisch, tribologisch und chemisch hochbelastbare, anwendungsspezifische Mikrobauteile aus den verschiedensten Materialien erforderlich.

Konventionelle und für die Produktion makroskopischer Bauteile etablierte Fertigungsverfahren bieten das Potenzial, bei sehr hoher Flexibilität kostengünstig Bauteile mit hoher Qualität und geringen Abmessungen herzustellen. Dabei sind für die Entwicklung und die verschiedenen Produktionsverfahren und deren Varianten grundlegende Fragestellungen zu behandeln. Forschungsbedarf besteht vor allem für die Verfahren des Ur- und Umformens, des Trennens und des Beschichtens. Ziel verschiedener Forschungsprogramme ist daher die Erforschung, Entwicklung und Anwendung mikrospezifischer Entwicklungs- und Produktionsprozesse, die auf diesen konventionellen Fertigungsverfahren aufbauen.

Im Rahmen des von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) eingerichteten Sonderforschungsbereiches (SFB) 499¹⁴³ werden Grundlagen für eine durchgehende Prozesskette zur Entwicklung, Produktion und Qualitätssicherung urgeformter Mikrobauteile aus metallischen und keramischen Werkstoffen erarbeitet. Hierbei wird die gesamte Prozesskette, ausgehend von der Bauteil- und Systementwicklung über die Produktionsvorbereitung und Fertigung bis hin zur Qualitätssicherung betrachtet. Zur Strukturierung der Formen werden die Fertigungstechniken Mikrozerspanen, Mikroerodieren und Mikrolaserbearbeitung verwendet. Daneben bestehen Vergleichsmöglichkeiten mit dem kostenintensiven und nur für große Stückzahlen geeigneten LIGA-Verfahren¹⁴⁴, das in der Mikrotechnik als bislang wichtigste Technologie zur Herstellung von Formwerkzeugen, wie z. B. Formeinsätzen zum Spritzgießen, dient. Zur Herstellung der eigentlichen Bauteile aus keramischen und metallischen Werkstoffen in mittleren bis großen Stückzahlen werden im Rahmen des Sonderforschungsbereiches die Verfahren

¹⁴¹vgl. Ehrfeld (2002)

¹⁴²vgl. Sharpe (2005); Zorman et al. (2005)

¹⁴³siehe Sonderforschungsbereich 499 (2009)

¹⁴⁴Das LIGA-Verfahren basiert auf den namensgebenden Verfahrensschritten Lithographie, Galvanik und Abformung. Siehe z. B. Saile et al. (2009)

Mikropulverspritzgießen und *Mikroguss* angewandt. Einem industriellen Produktentstehungsprozess entsprechend, gilt es auch hier, eine zuverlässige Dimensionierung der Bauteile zu ermöglichen. Anhand von Zug- und Biegeproben mit bauteilähnlichen Abmessungen werden daher zunächst mechanische Kennwerte ermittelt. Die mit makroskopischen Probekörpern ermittelten Kennwerte erlauben keine hinreichend genaue Dimensionierung von Mikrobauteilen – so wirken sich aufgrund des wesentlich größeren Verhältnisses von Oberfläche zu Volumen Oberflächeneigenschaften stärker auf das Proben- und Bauteilverhalten aus.¹⁴⁵ Ein bei der Dimensionierung wesentlicher Aspekt stellt die über relevante Querschnittsbereiche teils deutlich geringere Kornanzahl dar. Aufgrund der Kornanisotropie können Lage und Orientierung einzelner Körner einen entscheidenden Einfluss auf das Proben- und Bauteilverhalten nehmen.¹⁴⁶

2.6.3 Herstellverfahren

Sämtliche der in dieser Arbeit betrachteten Demonstratorkomponenten und -systeme basieren auf sogenannten *werkzeuggebundenen Mikrotechniken*, wie sie im Sonderforschungsbereich 499 entwickelt werden. Im Folgenden wird eine Übersicht über diese Verfahren gegeben. Eine ausführliche Zusammenfassung der Verfahren und deren Spezifika findet sich beispielsweise in der Arbeit von Kasanická¹⁴⁷. Gemäß DIN 8580¹⁴⁸ existieren daneben weitere mechanische Herstellverfahren, die für die Produktion in der Mikrotechnik Anwendung finden, hier jedoch nicht berücksichtigt werden sollen.

Werkzeuggebundene Mikrotechniken

Eines der wesentlichen Ziele des Sonderforschungsbereiches 499 ist die Bereitstellung durchgängiger Produktionsprozessketten zur Herstellung urgeformter Mikrobauteile aus metallischen und keramischen Werkstoffen. Der Fokus liegt auf hochbelastbaren Mikrokomponenten, die später in Mittel- bis Großserie produziert werden sollen. Dies begründet auch die Wahl der näher untersuchten Werkstoffe.

Die geforderte hohe Ausbringung wird über spezifische Prozessketten erreicht, die sich aus *Formenbau* und *Abformung* zusammensetzen. Eine hohe Ausbringung in Kombination mit abrasiven metallischen und keramischen Formmassen (feedstocks) machen gegenüber Polymeren verschleißbeständige *Formeinsätze* erforderlich. Die Abformung von Komponenten erfolgt mit Hilfe des Mikro-Metallpulver- bzw. -Keramikpulverspritzgusses, respektive über verlorene Modelle und verlorene Formen im Mikroguss mit verschiedenen Legierungen.

¹⁴⁵vgl. Auhorn (2005)

¹⁴⁶vgl. Metz (2008)

¹⁴⁷siehe Kasanická (2008)

¹⁴⁸siehe DIN 8580 (2003–09)

Nachfolgend werden die in den Prozessschritten vorkommenden mechanischen Fertigungsverfahren beschrieben. Eine ausführliche, systematische Darstellung und Diskussion der technologischen Sachverhalte findet sich in der Arbeit von Schulze et al.¹⁴⁹

Prozessvorbereitung

Als Voraussetzung für die Produktion urgeformter Bauteile umfasst die Prozessvorbereitung die Herstellung verschleißbeständiger Formeinsätze und die Entwicklung von Formmassen.¹⁵⁰ In den folgenden Absätzen werden die für die Herstellung der Formeinsätze verwendeten Verfahren vorgestellt. Auf die Formmassen wird bei den jeweiligen Urformverfahren eingegangen.

Mikrofräsen Derzeit werden für die Herstellung verschleißbeständiger Formeinsätze vorrangig Stähle wie z. B. 30CrMo6 mit erhöhten Mn- und Si-Gehalten verwendet. Die klassische mikrozerspanende Fertigung verfolgt dabei den Ansatz einer Herstellung dreidimensionaler Geometrien in einem Stahlwerkstoff durch die Verwendung von Hartmetallfräsern mit möglichst geringen Abmessungen.

Kommerziell verfügbare Werkzeuge aus Hartmetall eignen sich für die Bearbeitung von Werkstoffen bis zu einer Härtegrenze von etwa 60 HRC.¹⁵¹ Je nach Fräsergeometrie sind – abhängig von der Anzahl der Schneiden – unterschiedliche minimale Durchmesser verfügbar. Die Geometrien kommerzieller Mikrofräswerkzeuge werden meist in Anlehnung an diejenigen von makroskopischen Werkzeugen entwickelt. Dabei wird die Annahme getroffen, dass sich Spanbildung und Eingriffsverhältnisse im Mikrobereich analog verhalten.¹⁵² Forschungsarbeiten befassen sich mit der Optimierung der Werkzeuggeometrie für das Mikrofräsen. So entwickeln Schulze et al.¹⁵³ und Fleischer et al.¹⁵⁴ Hartmetallwerkzeuge mit einem Durchmesser von $20\ \mu\text{m}$ mit an die Mikrospezifika angepasster einschneidiger Geometrie. Derartige Hartmetallwerkzeuge ermöglichen in Stählen Oberflächengüten von bis zu $R_z = 0,3\ \mu\text{m}$. Eine weitere Verbesserung kann im Falle von Nichteisenmetallen durch die Verwendung von mono- oder polykristallinen Diamantwerkzeugen erzielt werden. Da für ausreichende Formeinsatzstandzeiten standardmäßig Stahlwerkstoffe als Rohmaterial verwendet werden, diese jedoch aus Verschleißgründen in der Regel nicht ohne weiteres mit Diamant bearbeitbar sind, werden darüber hinaus auch spezielle, schwingungsunterstützte Prozesse erforscht.¹⁵⁵ Eine weitere Werkzeuggruppe bilden sogenannte CBN-Werkzeuge (kubisch kristallines

¹⁴⁹siehe Schulze et al. (2008)

¹⁵⁰vgl. Schneider et al. (2007)

¹⁵¹vgl. Fleischer et al. (2007)

¹⁵²vgl. Schulze et al. (2009b)

¹⁵³vgl. Schulze et al. (2009b, c)

¹⁵⁴vgl. Fleischer et al. (2008b)

¹⁵⁵vgl. Heselhaus (2009)

Bornitrid – cubic boron nitride). Diese finden Verwendung bei der Zerspaltung hochfester Stähle und bieten Vorteile bezüglich der erreichbaren Standzeiten und Zerspanvolumina, weisen jedoch Nachteile hinsichtlich der erreichbaren Oberflächengüte auf.¹⁵⁶

Zur Standzeiterhöhung von Hartmetallwerkzeugen werden im Bereich der Mikrotechnik Beschichtungen verwendet, die zwecks Vermeidung unerwünschter Verrundungen der Schneidkanten möglichst dünn sein sollten. Aktuelle Untersuchungen zeigen die Eignung von TiAlN-Beschichtungen, die in einer Stärke von unter 1 μm verfügbar sind.¹⁵⁷

Als Werkzeugmaschinen für die Mikrozerspannung werden schwingungsarme und hochpräzise Sondermaschinen mit bis zu fünf Achsen verwendet, die im Hinblick auf Achslagerung, Verfahrengenauigkeit und Spindeldrehzahlen auf die Anforderungen des Mikrobereiches zugeschnitten sind. Zur Validierung der Güte dieser Werkzeugmaschinen wird von Fleischer et al.¹⁵⁸ ein 5-Achs-Mikroprüfwerkstück entwickelt. Aktuelle Forschungsarbeiten beschäftigen sich darüber hinaus mit der Miniaturisierung makroskopischer, aber speziell für die Mikrozerspannung entwickelter Werkzeugmaschinen.¹⁵⁹

Die im Rahmen der vorliegenden Arbeit betrachteten Bauteile wurden mit Hilfe mikrozerspanend hergestellter Formeinsätze aus 30CrMo6 mit erhöhten Mn- und Si-Gehalten sowie CuZn37 unter Verwendung von Hartmetall- und CBN-Fräsern auf einer 5-Achs-Präzisions-Werkzeugmaschine hergestellt.¹⁶⁰

Mikrofunkenerosion Insbesondere bei der Herstellung von Formeinsätzen für den Pulverspritzguss sind hochfeste, gehärtete und damit meist verschleißfeste Werkstoffe wünschenswert, um so die Standzeit zu erhöhen. Bei einer Strukturierung mittels Mikrofräsen erlaubt der Prozess jedoch nur die Bearbeitung von Werkstoffen mit bestimmten Härtegraden. Berührungslose, abtragende Fertigungsverfahren gewinnen daher in der Mikrofertigung zunehmend an Bedeutung. Die Verfahren *Mikrofunkenerosion* (electrical discharge machining – EDM) und *Laserablation* eignen sich beide für einen berührungslosen Materialabtrag. Sie sind unabhängig von mechanischen Werkstoffeigenschaften wie Härte oder Festigkeit. Beide Verfahren besitzen spezifische Vor- und Nachteile, weswegen aktuelle Forschungsarbeiten eine Kombination beider Verfahren anstreben.¹⁶¹

Nach Schulze et al. werden für die Mikrofertigung derzeit verschiedene einzelne und kombinierte Verfahrensvarianten der Mikrofunkenerosion eingesetzt.¹⁶² Unter diesen zeichnen sich die *Senkerosion* mit Formelektrode und die *Mikrobahnerosion* mit rotierender Stiftelektrode durch die Möglichkeit einer dreidimensionalen Strukturierbarkeit

¹⁵⁶vgl. Schulze et al. (2008)

¹⁵⁷vgl. Schulze et al. (2009c)

¹⁵⁸vgl. Fleischer et al. (2008a)

¹⁵⁹vgl. AIST (2009)

¹⁶⁰vgl. Schulze et al. (2008)

¹⁶¹vgl. Schulze et al. (2009a)

¹⁶²ibidem

aus. Für die Herstellung zweieinhalbdimensionaler Strukturen eignet sich zudem die *Drahterosion*.

Die Elektroden für die Senkerosion weisen meist eine komplexe Geometrie auf. Die damit ausgeführten Bewegungen während des Herstellvorganges sind jedoch verhältnismäßig einfach – die Elektrode wird in das Werkstück eingesenkt. Die Herstellung der Elektroden erfolgt beispielsweise mikrozerspanend. Bei der Bahnerosion wird zur Herstellung auch komplexer, dreidimensionaler Strukturen einer um die eigene Achse rotierenden Stiftelektrode eine Planetarbewegung überlagert. Die Drahterosion ermöglicht die Herstellung von zylindrischen Elektroden und zweieinhalbdimensionalen Werkstücken. Die erzielbaren Oberflächenqualitäten liegen in Abhängigkeit von den Maschinenparametern bei $R_a < 0,1 \mu m$. Um die physikalischen Vorgänge, die für die gewünschte Abtragung erforderlich sind, zu ermöglichen, ist ein Erodierspalt von ca. $5 \mu m$ notwendig. Dies ist allen Verfahren gemein.

Die Mikrobahnerosion hat gegenüber dem Mikrofräsen Defizite bezüglich der erforderlichen Bearbeitungszeit von Bauteilen. Daher befassen sich aktuelle Forschungsarbeiten mit einer Dynamisierung des Bahnerosionsprozesses. Während des Abtragens kommt es auch zu Abbranderscheinungen und damit Verschleiß an der Elektrode selbst. Der Verschleiß ist abhängig vom jeweiligen Werkstück- und Werkzeugmaterial, dem Elektrodendurchmesser und verschiedenen Maschinenparametern. Wichtig ist daher die Ermittlung von Strategien zur Kompensation des Verschleißes. So kann dieser durch eine entsprechende Steuerung zumindest teilweise kompensiert werden. Um eine höhere Bearbeitungsgeschwindigkeit bei gleichzeitig guter Maßhaltigkeit zu gewährleisten, werden Schrupp- und Schlichtgänge miteinander kombiniert.¹⁶³

Laserablation Bei der Laserablation wird Material von einer Oberfläche durch den Beschuss mit gepulster Laserstrahlung abgetragen. Zur Herstellung von Formeinsätzen aus Hartmetall werden Neodym-dotierte Yttrium-Aluminium-Granat-Laser (Nd:YAG-Laser) in Güteschaltung (Q-Switch) verwendet. Der Vorteil dieser Laser liegt in der hohen Qualität des Strahles, der Erzeugung kurzer Pulse bei hohen Repetitionsraten und dem durch entsprechende Fokussiereinheiten erreichbaren Fokussdurchmesser von $3 - 20 \mu m$. Der Materialabtrag erfolgt vorrangig durch Sublimation, zusammen mit einem geringen Schmelzanteil. Abhängig von Pulsdauer und Leistung lassen sich sehr gute Oberflächenrauigkeiten von $R_z \approx 1 \mu m$ erreichen. Durch die Verwendung eines steuerbaren, variablen Strahlaufweiters kann der Bearbeitungsdurchmesser des Laserstrahls gezielt verändert werden. Dies bietet den Vorteil einer verringerten Bearbeitungsdauer.¹⁶⁴

Eine Herausforderung besteht in der Herstellung senkrechter Wände bei gleichzeitig angestrebter Miniaturisierung der herzustellenden Strukturen, da die Energievertei-

¹⁶³vgl. Sonderforschungsbereich 499 (2008), S. 293ff

¹⁶⁴vgl. Schulze et al. (2008)

lung im Laserstrahl einem Gaußprofil entspricht. Diese über den Fokusbereich hinausgehende inhomogene Energieverteilung führt zu einem gesteigerten Abtrag in der Fokusmitte, weswegen auf diese Weise gefertigte Strukturen bei senkrecht einfallendem Laserstrahl von der Senkrechten abweichende Wandwinkel aufweisen. Aus diesem Grund schlagen Schulze et al.¹⁶⁵ einen mehrstufigen Prozess vor, bei dem zunächst die Kavität bei senkrecht einfallendem Strahl erzeugt wird und anschließend die Seitenwände bei angestelltem Werkstück gezielt nachbearbeitet werden.

Das Verfahren bietet großes Potenzial bei der Bearbeitung von Strukturdetails kleiner $20\ \mu\text{m}$, da hierfür derzeit keine ausreichend kleinen Mikrofräser erhältlich sind und das Drahterodieren werkzeugbedingt an Grenzen stößt.¹⁶⁶

Produktion

Nach der Herstellung der Formeinsätze kann die Produktion der eigentlichen Bauteile beginnen. Produktionstechnische Kernprozesse bilden die Urformverfahren *Mikropulverspritzguss* und *Mikroguss*. Die vorgestellten Verfahren werden im Sonderforschungsbereich 499 zu Produktionsprozessketten kombiniert, mit deren Hilfe langfristig serientaugliche Prozesse für die Herstellung urgeformter Mikrobauerteile in Mittel- und Großserie etabliert werden sollen. Den Produktionsverfahren entsprechend, werden zwei Prozessketten erforscht – die Prozesskette μPIM und die Prozesskette μGuss .

Mikropulverspritzguss – μPIM Der Mikropulverspritzguss (μPIM) besitzt ein großes Potenzial für die Massenfertigung komplex geformter Mikrobauerteile sowohl aus metallischen als auch aus keramischen Werkstoffen. In Bereichen wie Mikrofluidik, Optik oder Analytik findet der Mikropulverspritzguss von Kunststoffen inzwischen breite Anwendung. Bisher wird das Pulverspritzgießen von Keramiken und Metallen jedoch vorrangig für die Produktion von größeren feinwerktechnischen Bauteilen und nur relativ selten für die Herstellung von Mikrobauerteilen angewendet. Dies ist unter anderem auf die meist kostenintensive Nacharbeit zurückzuführen.¹⁶⁷ Neben dem Sonderforschungsbereich 499 befassen sich beispielsweise im Siebten Rahmenprogramm der Europäischen Kommission weitere Forschungsarbeiten mit dem Mikrospritzguss und der Formmassenentwicklung. Gemeinsames Ziel ist die Schaffung eines Prozessverständnisses, wie es für die Herstellung makroskopischer Bauteile bereits existiert.¹⁶⁸

Voraussetzung für den Mikropulverspritzguss ist die Aufbereitung feinteiliger Metall- oder Keramikpulver mit Bindern und Zuschlagsstoffen zu einer Formmasse (feedstock). Im Rahmen des Sonderforschungsbereiches 499 werden für den *Mikropulverspritzguss mit Keramiken* (micro ceramic injection molding – μCIM) nanoskalige ZrO_2 -Pulver

¹⁶⁵vgl. Schulze et al. (2008)

¹⁶⁶vgl. Marz (2005)

¹⁶⁷vgl. Sonderforschungsbereich 499 (2008), S. 25

¹⁶⁸siehe Europäische Kommission (2009a, b)

verwendet. Für den *Mikropulverspritzguss mit Metallen* (micro metal injection molding – μ MIM) kommen die Stähle 316 L (1.4404, 1.4435) und 17-4 PH (1.4542) zum Einsatz.¹⁶⁹ Die Gemische aus Pulver und Binder werden auf eine gute Verarbeitbarkeit auf der Pulverspritzgussmaschine hin optimiert. Hierzu zählt eine möglichst vollständige Formfüllung ohne Entmischung sowie eine ausreichende Festigkeit des sogenannten *Grünlings*¹⁷⁰ für die Entnahme aus dem Werkzeug und das anschließende Umsetzen in den Sinterofen. Das darin gesinterte Bauteil sollte eine gleichmäßige Schrumpfung, hohe Dichte, keine Fehlstellen und eine gute Oberflächenqualität aufweisen. Um eine gute Formfüllung zu gewährleisten, werden die Werkzeuge evakuiert und – z. B. zur Verminderung von Rissen – über eine an die Belange der Mikrodimensionen angepasste Steuerung und Peripherie geregelt temperiert.

Werden μ PIM-hergestellte Bauteile den pulvermetallurgisch-typischen Temperaturprofilen entsprechend gesintert, so ist ein starkes Kornwachstum zu verzeichnen. In Kombination mit den geringen Bauteilabmessungen führt dies insbesondere bei metallischen Werkstoffen zu stark anisotropen Materialeigenschaften (→ Abschnitt 2.7). Die Identifikation mikrospezifischer Sinterparametersätze zur Herstellung feinkörniger Gefüge ist daher ein für die Prozessführung wesentlicher Aspekt.¹⁷¹

Zur Herstellung können einseitige Formeinsätze oder mehrteilige Werkzeuge verwendet werden. Bei der Verwendung von einseitigen Formeinsätzen werden die Bauteile auf eine Substratplatte spritzgegossen. Dies erfordert eine anschließende Vereinzelung und damit eine aufwändige Nacharbeit. Mehrteilige Werkzeuge bieten den Vorteil, dass die Bauteile direkt beim Öffnen des Werkzeuges an vordefinierten Stellen separiert werden. Ausführliche Voruntersuchungen zur Form und Lage des meist anspruchsvollen Anguss- und Verteilersystems sind hierbei jedoch unabdingbar.¹⁷²

Prozesskette μ PIM Im ersten Schritt der Produktion eines Bauteiles mit Hilfe des Mikropulverspritzgießens wird ein verschleißbeständiger Formeinsatz durch die oben genannten Verfahren der Prozessvorbereitung hergestellt. Dieser Formeinsatz wird anschließend für die Abformung von Keramik- oder Metallbauteilen verwendet. Nach der Abformung werden die Bauteile entbindert und gesintert. Begleitet wird diese Prozesskette durch eine Qualitätssicherung, bei der sowohl der Formeinsatz als auch die damit produzierten Bauteile überwacht werden.

Mikroguss – μ Guss Ausgehend von Präzisionsgussverfahren bietet der Mikroguss die Möglichkeit, eine Vielzahl schmelz- und gießbarer Metalle und Legierungen zur Produktion von Mikrobauteilen zu verwenden.

¹⁶⁹vgl. Sonderforschungsbereich 499 (2008)

¹⁷⁰Der Grünling entsteht durch Verdichten der Pulvermischung in einer Preßform. Dabei entsteht ein Formkörper mit losem Zusammenhalt.

¹⁷¹siehe Piotter et al. (2007)

¹⁷²vgl. Piotter et al. (2008)

Je nach Formfüllmethode wird unterschieden zwischen dem *Schleuderguss*, bei welchem die Zentrifugalkraft genutzt wird, und dem *Vakuum-Druckguss*, bei welchem auf einen zunächst herrschenden Unterdruck eine Druckbeaufschlagung der Schmelze erfolgt.¹⁷³ Zur Einbettung der erforderlichen und verlorenen Kunststoff- oder Wachsmodele werden keramische Formmassen verwendet. Im Anschluss an das Ausschmelzen des Modells und das Brennen der Keramik kann die entstandene Hohlform zusätzlich beschichtet werden, um Bauteile mit höherer Oberflächenqualität produzieren zu können. Die Einbettmassen sind dahingehend zu optimieren, dass die Schwindung beim Abkühlen des Gussteils weitestgehend kompensiert wird. Dies wird durch Phasenumwandlungen der Hauptbestandteile erreicht.¹⁷⁴

Der Mikroguss ermöglicht sehr filigrane und hochpräzise Strukturen mit großen Aspektverhältnissen. Als Werkstoffe werden neben der Goldbasislegierung Stabilor® G auch unedle Legierungen wie Aluminium-Bronze verarbeitet. Eine Herausforderung bei unedlen Legierungen stellt die aus Gründen der Maßhaltigkeit gewünschte Nachbearbeitungsfreiheit dar. Eine chemische Entfernung der Einbettmasse führt bei unedlen Legierungen im Allgemeinen zu Korrosion. Daher ist der Einsatz leicht lösbarer Einbettmassen notwendig. Forschungsarbeiten umfassen daher neben der Untersuchung verschiedener Prozessparameter auch die Einsetzbarkeit verschiedener Einbettmassen. Kriterien sind – ähnlich wie beim Mikropulverspritzguss – eine vollständige Formfüllung, Oberflächenrauheiten von deutlich unter $1\ \mu\text{m}$ sowie ein homogenes Gefüge und ausreichende mechanische Eigenschaften.¹⁷⁵

Prozesskette μ Guss Für den Mikroguss sind Kunststoff- oder Wachsstukturen als Modelle zu erstellen. Analog zum Mikropulverspritzguss wird daher im ersten Schritt zunächst ein einbettfähiges, verlorenes Modell erstellt. Im Gegensatz zum Mikropulverspritzguss wird das Modell in Kunststoff abgeformt (thermoplastic injection molding – TIM). Im folgenden Schritt werden Wachsangüsse montiert, das Modell in sogenannte Keramischlickermasse eingebettet. In einem Brennvorgang wird das Wachs ausgeschmolzen bzw. der Kunststoff pyrolysiert. Gleichzeitig findet eine Aushärtung der Hohlform statt. Nach erfolgtem Abguss und Abkühlen wird die Hohlform zerstört und das Bauteil entnommen. Es folgen die Reinigung des Bauteiles und die Trennung vom Anguss.¹⁷⁶ Wie beim Mikropulverspritzguss wird der gesamte Prozess von einer Qualitätssicherung begleitet.

¹⁷³vgl. Kasanická (2008)

¹⁷⁴vgl. Marz (2005)

¹⁷⁵vgl. Baumeister et al. (2004)

¹⁷⁶vgl. Baumeister et al. (2006)

2.6.4 Mikrospezifischer Produktentwicklungsprozess – μ PEP

Im Bereich der Mikrotechnik wurden verschiedene Vorgehensmodelle für die Entwicklung solcher Systeme erarbeitet. Als Beispiel sei hier Wattys „Methodik zur Produktentwicklung in der Mikrosystemtechnik“¹⁷⁷ genannt. Neben einem Vorgehensmodell erläutert Watty auch spezielle Methoden, die den Entwickler bei der Entwicklung von Mikrosystemen unterstützen. Im Folgenden wird auf den von Marz vorgeschlagenen *mikrospezifischen Produktentwicklungsprozess* (μ PEP) eingegangen.¹⁷⁸ Der μ PEP wurde insbesondere im Hinblick auf die im Sonderforschungsbereich 499 untersuchten werkzeuggebundenen Herstellverfahren entwickelt, mit deren Hilfe auch die in der vorliegenden Arbeit als Demonstratoren gewählten Bauteile und Systeme hergestellt wurden.

Der μ PEP ist ein Prozess zur Unterstützung der Entwicklung und Konstruktion von Mikrokomponenten und -systemen, welche mit Hilfe der Technologien der werkzeuggebundenen Mikrotechnik hergestellt werden. Wesentlich ausgeprägter als bei klassischer Herangehensweise wirken sich die technologischen Randbedingungen auf die eigentliche Produktentwicklung aus. Besondere Bedeutung kommt somit der hohen Technologieabhängigkeit zu. Dies resultiert in einer Parallelisierung von Produkt- und Fertigungsprozessentwicklung, für die im μ PEP spezifische methodische Hilfsmittel bereitgestellt werden. Den Prozess selbst beschreibt Marz in einem sogenannten *Sichelmodell*¹⁷⁹, in welchem Produktentwicklung und Produktionstechnik integriert sind und gleichermaßen während der Gestaltung von Bauteilen und Systemen betrachtet werden (Abbildung 2.8). Eine Besonderheit des μ PEP besteht im simultanen Top-Down- und technologiebedingten Bottom-Up-Entwurf. Damit ermöglicht der Prozess das in der werkzeuggebundenen Mikrotechnik erforderliche Einbeziehen der teils strengen Randbedingungen und Restriktionen der Produktionsprozesse in die Gestaltungsaktivitäten. Der μ PEP trägt damit den engen Wechselwirkungen zwischen den Produktionsverfahren und dem Entwurf Rechnung, da die Bauteil-/Systemgestalt stark durch die möglichen Fertigungsverfahren beschränkt ist. Die Abbildung erfolgt in den drei Entwurfsschritten des Sichelmodells. Auf der äußersten Abstraktionsebene erfolgt der Systementwurf und damit die Konzeption des Systems. Darauf folgen in Richtung der Sichelspitze der Grob- und schließlich der Feinentwurf. Die Konkretisierung findet in den Zwischenebenen am Sichelübergang im Modell statt.

Meboldt sieht die Herausforderung des μ PEP in seiner hohen Eigenkomplexität.¹⁸¹ Er überträgt diesen in Form eines Referenzprozesses in das *integrierte Produktentstehungs-Modell* (iPeM).¹⁸²

¹⁷⁷siehe Watty (2006)

¹⁷⁸siehe Marz (2005)

¹⁷⁹vgl. Marz (2005), S. 94ff

¹⁸⁰in Anlehnung an Marz (2005)

¹⁸¹vgl. Meboldt (2008), S. 214

¹⁸²siehe Meboldt (2008), S. 214ff

Abbildung 2.8 Das Sichelmodell mit Integration von Aspekten der Produktentwicklung und der Produktionstechnik¹⁸⁰

2.7 Werkstoffwissenschaftliche Grundlagen

2.7.1 Kristallisation

Viele Werkstoffe, z. B. Metalle, weisen in festem Zustand eine kristalline Struktur auf. Der Übergang vom flüssigen in den festen Zustand wird als *Kristallisation* bezeichnet. Der während der Kristallisation ablaufende Vorgang ist durch zwei Teilvorgänge, die *Keimbildung* und das *Kristallwachstum*, gekennzeichnet. Ausgangspunkt der Kristallisation sind sogenannte Keime, an denen sich Atome der flüssigen Phase anlagern. Unter Keimen versteht man feste, sehr kleine Partikel.¹⁸³ Der strukturelle Aufbau der Schmelze in der Nähe des Kristallisationspunktes ähnelt – innerhalb sehr kleiner Bereiche – stark dem Aufbau eines Festkörpers. Aufgrund der Wärmebewegung der Teilchen findet ein ständiger Aufbau und Zerfall gitterähnlicher Strukturen statt. Dadurch kann sich keine regelmäßige Struktur mit größerer räumlicher Ausdehnung bilden. Wird die Kristallisationstemperatur T_k erreicht, befinden sich feste und flüssige Phase im *thermodynamischen Gleichgewicht*. Sie existieren stabil nebeneinander. In diesem Gleichgewichtszustand gibt es viele submikroskopische Kristallisationszentren, die als Ausgangspunkt der Kristallisation dienen können. Zu einem Kristallwachstum hingegen kommt es bei dieser Temperatur nicht, da submikroskopische Kristallisationszentren keine wachstumsfähigen Keime sind. Wachstumsfähige Keime entstehen erst dann,

¹⁸³vgl. Bergmann (2005)

wenn die Schmelze um den Betrag ΔT unterkühlt wird.

$$\Delta T = T_k - T \quad (2.32)$$

2.7.2 Keimbildung

Um ein tiefergehendes Verständnis für die Keimbildung und das Keimwachstum zu schaffen, wird der Begriff der freien *Enthalpie* G eingeführt.

$$G = H - T \cdot S \quad (2.33)$$

Hierbei sind H die Enthalpie, S die Entropie und T die Temperatur. Unter dem thermodynamischen Gleichgewicht wird derjenige Zustand verstanden, bei dem die freie Enthalpie $G = G_{min}$ bei konstantem Druck p ein Minimum aufweist. Damit es zu einer Phasenumwandlung kommen kann, ist ein Ungleichgewichtszustand, ein sogenannter *metastabiler Zustand*, notwendig.¹⁸⁴ Wird die Schmelze um einen Betrag ΔT unterkühlt, so erhöht sich die freie Enthalpie um den Betrag ΔG . Dies führt schließlich – sofern ΔG groß genug ist – zum Kristallwachstum. Die Änderung der freien Enthalpie ΔG setzt sich aus zwei gegenläufig wirkenden Anteilen zusammen: Zum einen wird durch den Phasenübergang von der flüssigen zur festen Phase die Umwandlungsenergie ΔG_V gewonnen. Sie ist proportional zum Volumen des Keims. Zum Anderen wird zur Bildung der Oberfläche Energie benötigt. Dies bedeutet eine Erhöhung der freien Enthalpie um den Betrag ΔG_g . ΔG_g wirkt dem Phasenübergang entgegen und ist zur Oberfläche des Keims proportional. Geht man vereinfacht davon aus, dass sich ein kugelförmiger Keim bildet, so ergibt sich

$$\Delta G(r) = -\Delta G_V + \Delta G_g = -\frac{4}{3}\pi r^3 \Delta g_v + 4\pi r^2 \gamma \quad (2.34)$$

wobei Δg_v die auf die Volumeneinheit bezogene freie Bildungsenthalpie der festen Phase und γ die Grenzflächenenergie sind. Der Verlauf der Funktion ist in Abbildung 2.9 dargestellt. Es ist erkennbar, dass die Funktion $\Delta G(r)$ bei einem kritischen Keimradius r_0 ein Maximum ΔG_0 annimmt. Bei Keimen mit $r < r_0$ überwiegt der Oberflächenanteil ΔG_g . Solche Keime sind thermodynamisch instabil. Sie zerfallen sofort nach ihrer Bildung wieder, da ein Wachstum dieser Keime zunächst mit einer Zunahme der freien Enthalpie verbunden ist. Bis zum Einstellen kritischer Keime muss eine dem Maximalwert ΔG_0 entsprechende Keimbildungsarbeit aufgewendet werden. Diese Keimbildungsarbeit muss dem System selbst entzogen werden, womit sich die notwendige Unterkühlung der Schmelze erklären lässt. Ist $r > r_0$, wird ein Keim stabil. Er kann unter Verringerung der freien Enthalpie des Systems weiter wachsen, d. h. durch das Erstarren der Schmelze

¹⁸⁴vgl. Bergmann (2005)

strebt das System einen Zustand geringerer Energie an.¹⁸⁵

Abbildung 2.9 Freie Enthalpie eines kugelförmigen Keims in Abhängigkeit von dessen Radius¹⁸⁶

Keimbildungshäufigkeit

Mit zunehmender Unterkühlung ΔT verringern sich sowohl die erforderliche Keimbildungsarbeit als auch der kritische Keimradius r_0 . Die Anzahl der pro Zeiteinheit und Einheitsvolumen gebildeten Keime nimmt also mit ΔT zu. Eine Anhäufung einer ausreichend großen Anzahl an Teilchen zu einem submikroskopischen Keim wird durch eine Temperaturabnahme zunächst begünstigt. Ist die Unterkühlung zu groß, wird die Teilchenbewegung aufgrund der ansteigenden Viskosität der Schmelze stark eingeschränkt. Dies hat zur Folge, dass die Keimbildung erschwert wird. Die Anzahl der Keime pro Volumen und Zeiteinheit durchläuft mit zunehmender Unterkühlung ΔT somit ein Maximum.

Homogene und heterogene Keimbildung

Die Keimbildung aus der homogenen, flüssigen Anfangsphase wird als *homogene Keimbildung* bezeichnet. Eine *heterogene Keimbildung* findet statt, wenn fremde Grenzflächen – z. B. in Form von fein verteilten Kristallen eines anderen Stoffes oder in Form einer Gefäßwand – Ausgangspunkt der Kristallisation sind, vgl. Abbildung 2.10. Letztere kann bei einer deutlich geringeren Unterkühlung ΔT einsetzen, als sie für eine homogene Keimbildung notwendig wäre. Schatt / Worch begründen dies mit der Wirkung der Fremdkeime. Diese ist „(. . .) umso stärker, je kleiner die Oberflächenenergie der Keimsubstanz gegenüber der des Fremdkeims und je niedriger die Grenzflächenenergie

¹⁸⁵vgl. Schatt / Worch (2003)

¹⁸⁶in Anlehnung an Gottstein (2007)

zwischen Fremdkeim und dem an diesen aus der Flüssigkeit ankristallisierenden artigen Keim ist.“¹⁸⁷ Aus diesem Grund kristallisieren sehr reine Substanzen vorwiegend homogen, was wiederum ein grobkörniges Gefüge zur Folge hat. Keimbildung und -wachstum können durch eine sehr schnelle Abkühlung und eine große Unterkühlung unterdrückt werden.

Abbildung 2.10 Homogene und heterogene Keimbildung¹⁸⁸

2.7.3 Keimwachstum

Erreicht ein Keim den kritischen Keimradius und ist er stabil geworden, so beginnt das Keimwachstum. Dabei diffundieren Teilchen aus der flüssigen Phase an einen Keim. Die Teilchen werden an der Keimoberfläche adsorbiert und gelangen durch Oberflächendiffusion an jene Stellen, an denen sie schlussendlich in das Gitter des entstehenden Kristalls eingebaut werden. Während der Wachstumsphase eines Kristalles ändert dieser seine Gestalt so, dass energetisch günstige und somit schnell wachsende Flächen, also Flächen mit der größten freien Oberflächenenergie, als erstes verschwinden. Ein in alle Raumrichtungen gleichmäßig stattfindendes Wachstum von Keimen findet in der Regel nicht statt. Wird das Kristallwachstum nicht von Nachbarkristallen behindert, so stellt der Kristall in seiner Endform stets ein von Flächen mit geringster Verschiebungsgeschwindigkeit begrenztes Polyeder dar. Bei den Begrenzungsflächen des Polyeders handelt es sich um dichtest gepackte Flächen, weil der Kristall auf diese Weise die geringste freie Oberflächenenergie aufweist. Diese Kristallform wird

¹⁸⁷vgl. Schatt / Worch (2003)

¹⁸⁸in Anlehnung an Gottstein (2007)

als *Gleichgewichtsform* bezeichnet. Unter realen Bedingungen wird diese Kristallform jedoch aufgrund verschiedener Einflüsse meist nicht erreicht. Stattdessen entstehen normalerweise Kristalle der sogenannten *Wachstumsform*. Unter realen Bedingungen sind die Verschiebungsgeschwindigkeiten oft nicht proportional zu den jeweiligen spezifischen Grenzflächenenergien. Dies ist u. a. darauf zurückzuführen, dass die Verschiebungsgeschwindigkeit aufgrund verschiedener Störeinflüsse, hauptsächlich wegen der Adsorption von Fremdstoffen, beeinflusst wird.¹⁸⁹ Es wachsen vorrangig diejenigen Flächen, die durch die Adsorption eine minimale Energie erzwungen haben. Im Fall von kubisch erstarrenden Materialien¹⁹⁰ werden bestimmte Wachstumsrichtungen bevorzugt; es entstehen sogenannte *Dendriten*.¹⁹¹

Der Wachstumsprozess ist erst dann beendet, wenn sich die Kristalle berühren und *Korngrenzen* bilden. Für das entstehende *Gefüge* (→ Abschnitt 2.7.7) ist das Verhältnis von Keimbildungshäufigkeit zur Kristallwachstumsgeschwindigkeit von großer Bedeutung. Ist das Verhältnis groß, so ergibt sich ein feinkörniges Gefüge, ist das Verhältnis klein ergibt sich ein grobkörniges Gefüge.¹⁹²

2.7.4 Erstarrung der Schmelze

Bei der Erstarrung von metallischen Schmelzen bilden sich, wie oben bereits erläutert, Kristallite. Ihre Form wird hauptsächlich durch den Wärmefluss bestimmt. Im Falle einer isotropen Abfuhr der freiwerdenden Erstarrungswärme kommt es zur *globulitischen Erstarrung* der Schmelze. Im Falle einer anisotropen Wärmeabfuhr, z. B. durch Kristalle in Richtung der Wand der Gussform oder in die Richtung der unterkühlten Schmelze, tritt eine *transkristalline/gerichtete Erstarrung* auf.

Das Gefüge und die Eigenschaften von Gusswerkstoffen werden in großem Maß durch die Wachstumsform der Kristalle bestimmt. Beim Gießen in eine Metallform entsteht ein für diesen Vorgang typisches Gefüge, welches in drei Bereiche unterteilt werden kann. Im wandnahen *Randbereich* entstehen aufgrund starker Unterkühlung durch die Formwand sowie heterogener Keimbildung viele wachstumsfähige Keime. Dies führt zu einem feinkörnigen und gleichmäßigen Gefüge. Bei weiterer Unterkühlung entsteht eine *Transkristallisationszone* mit stängelförmigen, meist groben Kristalliten. In diesem Bereich wachsen nur noch solche Kristallite, bei denen die kristallographische Richtung mit der größten Kristallwachstumsgeschwindigkeit zufällig mit der Richtung des von innen nach außen laufenden Temperaturgefälles übereinstimmt. Dadurch entsteht auch eine Übereinstimmung zwischen der Stängelachse und der kristallographischen Orientierung, welche mit dem Begriff *Gusstextur* bezeichnet wird (→ Abschnitt 2.7.7).

¹⁸⁹vgl. Schatt / Worch (2003)

¹⁹⁰siehe z. B. Schatt / Worch (2003)

¹⁹¹vgl. Bargel / Schulze (2008)

¹⁹²vgl. z. B. Schatt / Worch (2003)

Im dritten Bereich, dem Inneren des Gussstückes, bilden sich aufgrund isotroper Wärmeabfuhr globulare Kristallite (Abbildung 2.11).

Abbildung 2.11 Gefügeausbildung in einem Gussstück¹⁹³

2.7.5 Kristallisation von Legierungen

Bei Legierungen¹⁹⁴ sowie technisch reinen Metallen finden besondere Erstarrungsvorgänge statt. Unter der Annahme, die Legierung bestehe aus A- und B-Atomen, kommt es an der Erstarrungsfront zur sogenannten *Entmischung*, da die ersten entstehenden *Mischkristalle* einen deutlich geringeren Anteil an B-Atomen (c_1) haben als die Schmelze (c_0). Die Schmelze reichert sich also im Bereich der Phasengrenze fest/flüssig mit B-Atomen an, was wiederum zu einer Verringerung der Erstarrungstemperatur T_{Li} führt. Zwischen Erstarrungsfront und dem Schnittpunkt von Erstarrungs-Temperaturkurve T_{Li} und wahrer Temperaturkurve T_{Real} entsteht ein Bereich Δx , bei dem eine unterkühlte Schmelzschicht auftritt, siehe Abbildung 2.12. Diese Erscheinung beruht auf der Entmischung der Schmelze im Bereich der Erstarrungsfront und wird als *konstitutionelle Unterkühlung* bezeichnet.

Wird die Wärme schnell abgeleitet, ist kein konstitutionell unterkühlter Bereich vorhanden, so dass schnellwachsende Kristalle in Bereiche höherer Temperatur eindringen, was eine sofortige Abnahme der Kristallisationsgeschwindigkeit mit sich bringt. Dadurch entsteht eine *ebene Erstarrungsfront*, siehe Abbildung 2.13 (oben). Im Falle kleiner konstitutioneller Unterkühlungen und geringer Verunreinigung der Schmelze bilden sich *Zellstrukturen*. Die Verunreinigungen lagern sich hauptsächlich an den Zellgrenzen ab. Das führt zu schlechten Zähigkeitseigenschaften und einer ausgeprägten Anisotropie, siehe Abbildung 2.13 (Mitte). Tritt eine sehr große konstitutionelle Unterkühlung auf, wie es bei den meisten technischen Schmelzen der Fall ist, so bildet sich eine *dendritische*

¹⁹³in Anlehnung an Gottstein (2007)

¹⁹⁴Unter einer Legierung wird ein Gemisch aus zwei oder mehreren Komponenten bezeichnet. Vgl. z. B. Föll (2009)

¹⁹⁵in Anlehnung an Bargel / Schulze (2008)

Abbildung 2.12 Konstitutionelle Unterkühlung¹⁹⁵

Kristallstruktur, da jeder in die Schmelze voreilende kristallisierte Bereich beschleunigt in Richtungen wachsen kann, in der die Temperatur abnimmt, siehe Abbildung 2.13 (unten).

2.7.6 Fehlerscheinungen

Neben der Gefügeausbildung kommt es beim Erstarrungsvorgang einer Schmelze auch zu einer Volumenkontraktion, da das spezifische Volumen metallischer Werkstoffe im flüssigen Zustand größer ist als im festen. Dieser Effekt wird als *Schwindung* bezeichnet. Dies hat zur Folge, dass sich sowohl makroskopische als auch mikroskopische Hohlräume bilden können. Makroskopische Hohlräume werden auch als *Lunker* bezeichnet. Mikroskopische Hohlräume entstehen zwischen einzelnen Kristalliten. Man spricht in ihrem Zusammenhang von Mikrolunkern oder porösem Guss.

Die flüssige Phase eines Werkstoffs kann mehr Gase aufnehmen, als die feste Phase. Daraus folgt, dass die Gase bei der Erstarrung entweichen müssen. Die ausgeschiedenen Gase vereinigen sich zu Gasblasen, die nach der Erstarrung des Werkstoffes teilweise im Gussstück eingeschlossen bleiben. Dies führt ebenfalls zu *Poren* im Gussstück.

Ist die Erstarrung abgeschlossen, kommt es – hervorgerufen durch weitere Abkühlung – zu einer weiteren Volumenkontraktion. Dieser Vorgang wird als *Schrumpfen* bezeichnet und kann bei ungleichen Querschnitten bzw. bei ungleicher Temperaturverteilung

¹⁹⁶in Anlehnung an Bargel / Schulze (2008)

Abbildung 2.13 Ausbildung der Erstarrungsfront und der Gefügeart in Abhängigkeit von der Größe der konstitutionellen Unterkühlung¹⁹⁶

zu Eigenspannungen und Rissen führen. Handelt es sich um eine Mehrkomponentenschmelze, kann es zu Entmischungserscheinungen, welche als Seigerungen bezeichnet werden, kommen. Hierbei wird zwischen der Schwerkraftseigerung, die aufgrund unterschiedlicher Dichten der beteiligten Komponenten entsteht, der Blockseigerung, einer Ansammlung von Verunreinigungen an bestimmten Stellen des Gussstücks, und der Kristallseigerung, hervorgerufen durch Konzentrationsunterschiede bei der Mischkristallbildung, unterschieden. Bestandteile, die in der Schmelze nicht lösbar sind, werden vor den Kristallisationsfronten hergeschoben und bilden die *Korngrenzsubstanz*, welche, je nach ihren Eigenschaften, zu unterschiedlichem Werkstoffverhalten führt. Im Falle verformbarer Korngrenzsubstanz bestimmen die Eigenschaften der Körner das Festigkeits- und Zähigkeitsverhalten. Eine spröde Korngrenzsubstanz führt zu einer Versprödung des gesamten Werkstoffes.¹⁹⁷

2.7.7 Gefüge

Der in dieser Arbeit synonym zu den Bezeichnungen „Kornstruktur“ oder „Korngefüge“ verwendete Begriff „Gefüge“ wird von Schatt / Worch wie folgt definiert:¹⁹⁸

„Der Begriff Gefüge kennzeichnet die Beschaffenheit der Gesamtheit jener

¹⁹⁷vgl. Schatt / Worch (2003)

¹⁹⁸ibidem

Teilvolumina eines Werkstoffs, von denen jedes hinsichtlich seiner Zusammensetzung und hinsichtlich der räumlichen Anordnung seiner Bausteine in Bezug auf ein in den Werkstoff gelegtes ortsfestes Achsenkreuz in erster Näherung homogen ist.“

Das Gefüge lässt sich durch die Art, Größe, Form, Verteilung und Orientierung der Gefügebestandteile charakterisieren. Gefügebestandteile sind Kristallite/Körner, amorphe Bereiche und Füllstoffe. Sie werden durch Gefügegrenzen, die in Form von Kristallitgrenzen, Korngrenzen sowie Phasengrenzen auftreten, voneinander getrennt. Die Gefügegrenzen können als “innere“ Oberflächen aufgefasst werden, sind aber so geschaffen, dass ein fester physikalischer Zusammenhalt der Gefügebestandteile gewährleistet wird.

Einkristalle

Unter extremen Bedingungen ist es möglich, *Einkristalle* zu züchten. Dabei geht die Kristallisation von einem – meist artfremden – Keim aus. Der Kristall wird in die flüssige Phase gebracht und die Unterkühlung so gesteuert, dass keine anderen Keime entstehen können. Ein Einkristall hat in der Regel eine Subkornstruktur, welche durch wenige, gegeneinander desorientierte Subkörner gekennzeichnet ist. Die Subkörner werden dabei durch *Kleinwinkelkorngrenzen* voneinander getrennt. Sie sind hinsichtlich der meisten ihrer Eigenschaften, wie z. B. den mechanischen Eigenschaften, anisotrop. Die Größe des jeweiligen Eigenschaftswertes ist damit von der kristallographischen Richtung, in der er ermittelt wird, abhängig. Handelt es sich um einen idealen Einkristall und weist dieser z. B. drei zueinander orthogonale Materialsymmetrieebenen auf, so besitzt dieser ein *orthotropes Materialverhalten*¹⁹⁹. Wegen ihrer reproduzierbaren Eigenschaften und ihrer hohen mechanischen Belastbarkeit bei hohen Temperaturen finden Einkristalle neben der Halbleitertechnik z. B. bei Turbinenschaufeln Anwendung.

Polykristalle

Im Allgemeinen handelt es sich bei metallischen sowie keramischen Werkstoffen um polykristalline Werkstoffe. Ein *Polykristall* ist aus vielen aneinander gekoppelten, unregelmäßig geformten Körnern aufgebaut. In einphasigen Werkstoffen werden die einzelnen Körner durch *Korngrenzen* und *Zwillingsgrenzen* voneinander getrennt. In mehrphasigen Werkstoffen treten zusätzlich *Phasengrenzen* auf, welche Körner verschiedener Phasen gegeneinander abgrenzen.

Jedes Korn eines Polykristalls weist das anisotrope Verhalten eines Einkristalls auf. Mit abnehmender Korngröße und somit zunehmender Anzahl der Körner im Werkstoff

¹⁹⁹Die Orthotropie ist eine besondere Form der Anisotropie, bei der richtungsabhängige Elastizitätseigenschaften, jedoch keine Kopplung zwischen Dehnungen und Schubverzerrungen auftreten. Vgl. z. B. Schatt / Worch (2003)

nähern sich die Orientierungen der einzelnen Körner einer statistischen Gleichverteilung. Unterschiedliche Orientierungsrichtungen in jeder makroskopischen Richtung kommen somit in gleicher Häufigkeit vor. Daraus folgt ein für jede makroskopische Prüfrichtung annähernd gleicher, statistisch gemittelter Eigenschaftskennwert. Dieses scheinbar richtungsunabhängige Verhalten wird als *Quasiisotropie* bezeichnet. Quasiisotropes Verhalten wird durch das isotrope Hooke'sche Gesetz beschrieben. Damit von Quasiisotropie ausgegangen werden kann, müssen zwei Bedingungen erfüllt sein:

- In einen Prüfvorgang müssen genügend viele Körner miteinbezogen werden.
- Eine Vorzugsorientierung der Körner (Textur) ist nicht erlaubt (→ Abschnitt Anisotropie und Textur).

Wird eine dieser Bedingungen nicht erfüllt, so kann die Annahme eines quasiisotropen Werkstoffverhaltens zu falschen Schlussfolgerungen führen.²⁰⁰

Ein Gefüge wird als *homogen* bezeichnet, wenn der Werkstoff aus Kristallen oder Mischkristallen einer Phase besteht. Enthält das Gefüge mehrere Phasen, so handelt es sich um ein *heterogenes* Gefüge. Neben einer Einordnung als homogenes oder heterogenes Gefüge wird auch eine Unterscheidung zwischen Primär-, Sekundär-, Makro- und Mikrogefüge vorgenommen. Das *Primärgefüge* entsteht beim Erstarren der Schmelze. Das *Sekundärgefüge* entsteht durch eine spätere Verformungs- und Wärmebehandlung. Enthält das Gefüge größere Inhomogenitäten, die mit dem bloßen Auge ohne Hilfsmittel erkennbar sind, so spricht man von einem *Makrogefüge*. Bei einem *Mikrogefüge* können die Gefügebestandteile hingegen nur mit Hilfe optischer Geräte mit hohem Auflösungsvermögen sichtbar gemacht werden.

Anisotropie und Textur

Viele der in technischen Produkten verwendeten Werkstoffe wie Keramiken oder Legierungen weisen einen polykristallinen Aufbau auf, d. h. sie bestehen aus vielen Kristalliten, die unterschiedliche Größen, Formen und Kristallstrukturen aufweisen können. Das Gefüge bzw. die Mikrostruktur eines solchen Werkstoffes kann dabei anhand der Merkmale Phasenstruktur, Kornstruktur und Textur charakterisiert werden. Diese drei Merkmale liefern dabei:

- eine Beschreibung der Art und des Anteils vorhandener Phasen (*Phasenstruktur*),
- eine Beschreibung von Form und Größe der Kristallite (*Kornstruktur*) und
- eine Beschreibung der Orientierungen der Kristallite (*Textur*).

Nach Wassermann sind die wichtigsten Parameter zur Beschreibung der Anisotropie polykristalliner Werkstoffe die Textur sowie die Korngrenzen.²⁰¹

²⁰⁰vgl. Bergmann (2005)

²⁰¹vgl. Wassermann / Grewen (1962); Wassermann (1939)

Eine geregelte Textur, bei der die Kristallite einer Phase bestimmte Vorzugsorientierungen innehaben, bewirkt durch die über die Gitterstruktur der Kristallite bedingte Anisotropie physikalischer Eigenschaften eine solche auch für das polykristalline Material. Ein anisotropes Verhalten können mehrere Eigenschaften des betrachteten Werkstoffes aufweisen. So können beispielsweise Elastizität, Plastizität, Härte, Festigkeit und Spaltbarkeit, thermische Ausdehnung bzw. Leitfähigkeit, Polarisation, Magnetisierung und Piezoelektrizität, Korrosionsbeständigkeit oder das Streuverhalten gegenüber Teilchen oder elektro-magnetischen Wellen anisotrop sein.²⁰² Helming veranschaulicht dies an einem Graphitkristall: Der Elastizitätsmodul eines solchen kann sich in Abhängigkeit von der Richtung um einen Faktor 22 unterscheiden. Die maximal mögliche Anisotropie des polykristallinen Materials ist somit durch die Anisotropie der entsprechenden Einkristalleigenschaft vorgegeben. Sie wird genau dann erhalten, wenn alle Kristallite die gleiche Orientierung aufweisen. Trotz gegebener Anisotropie der Kristallite kann ein daraus aufgebauter polykristalliner Werkstoff im Falle einer regellosen Textur – alle Orientierungen sind in derselben Häufigkeit vertreten – und einer ausreichend großen Anzahl an Kristalliten wie zuvor beschrieben ein isotropes Materialverhalten aufweisen.

In der Technik werden teilweise die anisotropen Eigenschaften eines Werkstoffes durch gezielte Erzeugung bestimmter Texturen innerhalb der genannten möglichen Grenzen variiert bzw. eingestellt. Somit kann eine Anpassung an die jeweiligen Randbedingungen vorgenommen werden. Hierzu werden in der Regel Verfahren mit *plastischer Deformation* (v. a. durch Entstehung und Bewegung von Versetzungen sowie Zwillingsbildung) und *Rekristallisation* (z. B. durch Glühen) eingesetzt.²⁰³

2.8 Simulation und Optimierung in der Mikrotechnik

Die im vorigen Abschnitt beschriebenen werkstoffwissenschaftlichen Grundlagen verdeutlichen, dass Werkstoffe, wie sie für technische Produkte eingesetzt werden, häufig eine *kristalline Struktur* aufweisen. Die Vorgänge bei der Ausbildung der für jedes Bauteil individuellen Kornstruktur sind äußerst komplex. Neben Versuchen kommt der Simulation vor allem in jüngerer Zeit daher eine immer größere Bedeutung zu, insbesondere da sie eine zielgerichtete Untersuchung verschiedener Parameter erlaubt.

Im Falle makroskopischer Produkte kann der Aspekt, den die *Anisotropie* der einzelnen Körner mit sich bringt, meist vernachlässigt werden. Mikromechanische Produkte hingegen können derart geringe Abmessungen aufweisen, dass sie – wie beispielsweise bei den metallischen Bauteilen im Sonderforschungsbereich 499 – aus nur noch wenigen Körnern bestehen. Forschungsarbeiten aus dem Bereich der Simulation befassen sich in diesem Kontext mit verschiedenen Aspekten, die von der Ermittlung verschie-

²⁰²vgl. Helming (1996), S. 8

²⁰³ibidem, S. 9 ff.

dener Materialparameter bis hin zur Ableitung von Kennwerten für makroskopische Untersuchungen reichen. Den Ausgangspunkt stellt in der Regel die Finite Elemente Methode dar.

2.8.1 Modellierung der Kornstruktur

Um die kristalline Struktur in den Simulationen zu berücksichtigen, werden unterschiedliche Verfahren verwendet. Eine Möglichkeit besteht in der Modellierung der Kornstruktur durch *reguläre Körper* wie Quadrate.²⁰⁴ Der hohe Symmetrieanteil einer solchen Herangehensweise bietet jedoch nur eine beschränkte Anwendbarkeit für irreguläre Polykristalle, wie sie bei den im Sonderforschungsbereich 499 verwendeten Werkstoffen auftreten. Bei Verwendung der Finite Elemente Methode besteht eine weitere Möglichkeit darin, jedes *Finite Element* als Korn anzusehen. Damit einher geht jedoch eine direkte Abhängigkeit von Netzfeinheit und damit bis zu gewissem Maße auch der Netzqualität und der Korngröße. Darüber hinaus ist hierbei die Form der Körner durch die zur Verfügung stehenden Elementtypen eingeschränkt, beispielsweise auf Tetraeder oder Hexaeder.

Wird speziell die Ausbildung der Kornstruktur untersucht, so kommen unter anderem *zelluläre Automaten* zum Einsatz.²⁰⁵ Sie dienen der Modellierung räumlich diskreter und vor allem dynamischer Systeme. Die Entwicklung einzelner Zellen erfolgt inkrementell, wobei der Zustand einer Zelle zum Zeitpunkt $t + 1$ in erster Linie von ihrem eigenen und den Zuständen umliegender Zellen zum Zeitpunkt t abhängt. Simulationen mit zellulären Automaten berechnen die Entwicklung der Kornstruktur also sowohl orts- als auch zeitaufgelöst. Sie erlauben bei der Integration physikalischer Effekte eine große Freiheit.

Wenn die Betrachtung der Auswirkungen der Kornstruktur in einem Körper im Fokus der Untersuchungen steht, werden zu deren Abbildung am häufigsten Methoden der stochastischen Geometrie genutzt. Stoyan et al.²⁰⁶ liefern einen Überblick über deren Anwendungsgebiete. Eine der am weitesten verbreiteten Methoden sind *Voronoi-Mosaik*²⁰⁷. Bei diesen Verfahren wird eine Zerlegung des Raumes in separate Bereiche anhand einer diskreten Menge an Punkten – den Zentren – dieses Raumes vorgenommen. Jeder Bereich umfasst diejenigen Punkte des Raumes, die näher dessen Zentrum liegen, als an allen anderen Zentren. Jeder Bereich wird somit durch exakt ein Zentrum festgelegt. Aus Sicht der Werkstoffwissenschaften kann ein solcher Bereich als Korn, das gesamte Mosaik als Kornstruktur betrachtet werden. Die Korngrenzsubstanz wird meist nicht betrachtet.²⁰⁸ Die Voronoi-Zerlegung führt direkt zu einem vollständig mit

²⁰⁴vgl. Hwang / McMeeking (1999)

²⁰⁵vgl. Bäker (2009); Sebald (2001); Reher (1998); Hesselbarth / Göbel (1991)

²⁰⁶siehe Stoyan et al. (1995)

²⁰⁷siehe Voronoi (1908)

²⁰⁸vgl. Kröner (1986)

Zellen gefüllten Raum. Poren und weitere Defekte müssen daher anderweitig modelliert werden. Albers / Metz²⁰⁹ fügen diese z. B. manuell an verschiedenen Stellen in einem zweidimensionalen Probekörper nach der Generierung der Kornstruktur in Form eines kreisförmigen Ausschnittes ein.

2.8.2 Simulation mikromechanischer Komponenten

Den meisten der zuvor genannten Ansätze ist gemein, dass sie sich auf die Modellierung sehr einfacher Körper beschränken. So basieren verschiedene Arbeiten auf zweidimensionalen, rechteckigen Körpern.²¹⁰ Auf Basis kleiner *repräsentativer Volumenelemente* in Form eines Würfels werden in einer Reihe von Forschungsarbeiten effektive Materialkennwerte für den Makrobereich abgeleitet. Fritzen et al.²¹¹ stellen einen Ansatz auf Basis eines Voronoi-Mosaiks vor, der es ermöglicht, periodische Volumenelemente zu generieren und dadurch eine hohe Effizienz, jedoch lediglich eine einfache Geometrie des zugrunde liegenden Körpers aufweist, vgl. Abbildung 2.14.

Abbildung 2.14 Mit Hilfe einer Voronoi-Zerlegung erstellte periodische Volumenelemente mit verschiedenen Diskretisierungsgraden²¹²

Böhlke et al.²¹³ nutzen Voronoi-Mosaik, um anhand eines quaderförmigen Probekörpers die elastischen Werkstoffkonstanten zu schätzen. Auf Basis dieser Identifikation von Materialparametern ermitteln sie die Verteilung des Elastizitätsmoduls.

Einen Ansatz für die Modellierung mikromechanischer Komponenten liefern Albers / Metz²¹⁴ und Fröhlich et al.²¹⁵. In den Arbeiten wird ein zweidimensionales Voronoi-Mosaik verwendet, um eine Kornstruktur zu erzeugen. Diese wird vernetzt und der relevante Teil des betrachteten Bauteiles ausgeschnitten. Dabei werden Elemente, die

²⁰⁹vgl. Albers / Metz (2004)

²¹⁰vgl. z. B. Albers / Metz (2008, 2006); Fröhlich et al. (2001); Nygårds (2003)

²¹¹vgl. Fritzen et al. (2009)

²¹²auf Basis von Fritzen et al. (2009)

²¹³vgl. Böhlke et al. (2010)

²¹⁴vgl. Metz (2008); Albers / Metz (2006)

²¹⁵vgl. Fröhlich et al. (2001)

außerhalb der Bauteilberandung liegen, entfernt. Um dennoch einen glatten Bauteilrand zu erhalten, werden die Randknoten anschließend auf die Bauteilkontur verschoben. Bei den Verfahren werden lediglich Ausschnitte aus Bauteilen – ein einzelner Zahn eines Zahnrades – modelliert. Metz²¹⁶ führt darüber hinaus Untersuchungen an einfachen, teils gekerbten Quadern durch. Wesentliche Erkenntnis der Analysen ist der teilweise erhebliche Einfluss der anisotropen Kristallite auf die Spannungen im Bauteil. Abbildung 2.15 zeigt einen zweidimensionalen Zugstab, der bei gleicher Kornstruktur, jedoch unterschiedlichen Kornorientierungen sowohl eine streuungsbehaftete Spannungsverteilung als auch eine höhere Maximalbelastung als das isotrope Referenzmodell aufweist.

Abbildung 2.15 Vergleich der Spannungen innerhalb von drei zweidimensionalen Zugproben mit gleicher Kornstruktur, jedoch unterschiedlicher Kornorientierung. Die Probe links oben zeigt die isotrope Referenz.²¹⁷

In weiteren Analysen stellen Albers / Metz fest, dass mit abnehmender Kornanzahl von einer zunehmenden Streuung der Spannungsverteilung auszugehen ist. Dies erschwert die Dimensionierung mikromechanischer Bauteile wesentlich. Sie versuchen daher, das Verhalten mit Hilfe einer spannungsbasierten Formoptimierung zu verbessern.²¹⁸ Für die Formoptimierung betrachten sie lediglich eine einzelne Kombination aus Kornstruktur und -orientierung. Der erzielte Designvorschlag ist somit ausschließlich auf exakt diese Kornstruktur und die betrachtete Kornorientierung angepasst – eine erfolgreiche Übertragung der Ergebnisse auf andere Kornstrukturen gelingt nicht.²¹⁹

²¹⁶vgl. Metz (2008)

²¹⁷auf Basis von Metz (2008)

²¹⁸vgl. Albers / Metz (2008)

²¹⁹ibidem

3 Zielsetzung der Arbeit

Die Zielsetzung dieser Arbeit leitet sich aus dem in Kapitel 2 beschriebenen Stand der Forschung und dem darin aufgezeigten Spannungsfeld in der Produktentwicklung ab. Es wurde gezeigt, dass eine Miniaturisierung mechanischer Systeme große Chancen eröffnet, gleichzeitig jedoch enorme Herausforderungen bezüglich der Entwicklung, Produktion und Qualitätssicherung mit sich bringt. Um eine erfolgreiche Erschließung und Durchdringung des Marktes zu ermöglichen und innovative Produkte hervorbringen zu können, ist die Verfügbarkeit valider Auslegungsmöglichkeiten von hoher Relevanz – insbesondere, da mikromechanische Komponenten hohen Belastungen standhalten sollen. Zur Unterstützung des Entwicklungsprozesses bedarf es daher neuer Methoden, die es dem Entwickler bereits bei frühen Aktivitäten erlauben, das spätere Bauteil- und Systemverhalten vorhersagen zu können.

Bei den im weiteren Verlauf der Arbeit vorgestellten urgeformten mikromechanischen Systemen handelt es sich um derart miniaturisierte Produkte, dass die Abmessungen der Bauteile und die Größe der Körner des Gefüges teils eng beieinander liegen. Aufgrund ihrer geringen räumlichen Ausdehnung bestehen solche Bauteile aus nur wenigen, sich anisotrop verhaltenden Körnern. Trotz prinzipiell gleicher Charakteristika – wie z. B. dem mittleren Korndurchmesser – bildet sich für jedes einzelne Bauteil bei dessen Herstellung eine individuelle Kornstruktur aus. Im weiteren Verlauf der Arbeit wird aus diesem Grund auch von Bauteilen mit *stark streuenden Leitstützstrukturen* gesprochen. Dieser Sachverhalt erschwert die Vorhersage des Bauteil- und damit auch des Systemverhaltens.

Die in Kapitel 2 beschriebenen und am IPEK – Institut für Produktentwicklung erforschten Ansätze zur Einbeziehung des Korngefüges in die Simulation zeigen auf, dass eine solche Integration großes Potenzial zur Unterstützung bei der Dimensionierung mikromechanischer Bauteile birgt. Die bislang im Stand der Forschung betrachteten Geometrien sind jedoch meist einfacher Natur und damit noch nicht direkt in die Praxis übertragbar. Ein Ziel dieser Arbeit ist es daher, die mögliche betrachtbare *Systemgrenze* bei solchen Simulationen wesentlich zu *erweitern*, so dass nicht nur komplexe, dreidimensionale Bauteile abgebildet werden können, sondern auch Wechselwirkungen mit dem System berücksichtigt werden können. Hierzu sind neue Ansätze zu entwickeln und in gängige Softwareumgebungen zu integrieren.

Um dem bereits im Stand der Forschung dargestellten Spannungsfeld aus Entwicklungszeit, Kosten und Qualität Rechnung zu tragen, soll dem Entwickler über effiziente

Analysemethoden hinaus ein *Prozessmodell* zur automatisierten *Strukturoptimierung* von Bauteilen mit stark streuenden Leitstützstrukturen bereitgestellt werden. Die in Kapitel 2 vorgestellten Methoden der virtuellen Produktentwicklung schaffen die Voraussetzungen zur Reduktion von zeit- und kostspieligen Versuchs- und Irrtums-Schleifen. Mit dem neuen Prozessmodell wird das Ziel verfolgt, die unvermeidbare Streuung durch die Kornstruktur zu reduzieren und vor allem möglichst einfach handhabbar zu machen.

Im Rahmen der Arbeit sind somit neue Methoden und Prozessmodelle für die Simulation und Optimierung zu entwickeln, bei denen unterschiedliche Verfahren miteinander verknüpft werden. Um eine einheitliche Sprache zu gewährleisten und eine Hilfestellung bei der Auswahl und Zusammenstellung eines solchen Prozesses zu leisten, wird das Contact & Channel Model nach Albers²²⁰ herangezogen. Neben umfangreichen Vorarbeiten am IPEK – Institut für Produktentwicklung im Bereich der Algorithmenentwicklung²²¹, Parametrisierung²²² und Robustheitsbewertung²²³ baut die vorliegende Arbeit auf im Rahmen des Sonderforschungsbereiches 499²²⁴ durchgeführten Forschungsarbeiten auf.

Die *Entwicklung eines durchgängigen rechnergestützten Prozessmodells zur Unterstützung des Entwurfes von Bauteilen, deren Leitstützstrukturen starken Streuungen unterliegen*, stellt den Kern dieser Arbeit dar. Dies umfasst folgende Punkte:

- » Bereitstellung einer methodischen Unterstützung für die Auswahl und Zusammenstellung eines Simulations-/Optimierungsprozesses auf Basis des Contact & Channel Models (→ Kapitel 4)
- » Entwicklung und Implementierung geeigneter Ansätze zur Modellierung und Simulation komplexer dreidimensionaler Bauteile einschließlich Kornstruktur und Defekten sowie deren Integration in gängige Simulationsprozesse (→ Kapitel 5)
- » Untersuchung komplexer Mikrobauteile unter Berücksichtigung ihrer stark streuenden Leitstützstrukturen anhand der zuvor entwickelten Ansätze (→ Kapitel 6)
- » Entwicklung und Implementierung eines numerischen Verfahrens zur Formoptimierung von Bauteilen mit stark streuenden Leitstützstrukturen (→ Kapitel 7)

Die zu entwickelnden Methoden und Prozesse sollen nicht auf akademische Beispiele beschränkt sein, sondern für einen Einsatz in der Praxis tauglich sein. Als praxisnahe und komplexe Anwendungsbeispiele sollen jeweils die im Rahmen des DFG Sonderforschungsbereiches 499²²⁵ entwickelten Demonstratorbauteile und -systeme dienen.

²²⁰siehe z. B. Albers et al. (2004)

²²¹siehe z. B. Albers et al. (2006)

²²²siehe z. B. Albers et al. (2007a)

²²³siehe z. B. Albers / Weiler (2006); Albers et al. (2007b)

²²⁴siehe Sonderforschungsbereich 499 (2008)

²²⁵ibidem

4 Ein generalisierterer Ansatz auf Basis des C&CM

Im Rahmen dieser Arbeit wird aufbauend auf neuen und etablierten numerischen Methoden ein Prozessmodell im Umfeld der virtuellen Produktentwicklung erarbeitet, das bei gegebenen Randbedingungen die rechnergestützte Ableitung eines optimalen Bauteilentwurfes ermöglicht. Bereits aus dem Stand der Forschung (→ Kapitel 2) ist ersichtlich, dass die Auswahl eines neuen Simulations- oder Optimierungsprozessmodells eine nicht zu unterschätzende Herausforderung darstellen kann. In der in Kapitel 3 dargestellten Zielsetzung wurde daher unter anderem eine methodische Unterstützung dieser Belange benannt.

Das Contact & Channel Model nach Albers et al.²²⁶ als Grundlage nutzend, entwickeln Albers, Ottnad und der Autor der vorliegenden Arbeit²²⁷ gemeinsam einen Ansatz, der diese Fragestellung aufgreift. Hierfür wird das Contact & Channel Model entsprechend adaptiert und erweitert. Im Folgenden wird der *generalisierte Ansatz auf Basis des C&CM* eingeführt, dessen Termini für die Herleitung der Methoden und das zugehörige Prozessmodell in den Kapiteln 5 und 7 herangezogen wird.

4.1 Situationsanalyse und Problemeingrenzung

Bei der Umsetzung der in den einleitenden Abschnitten dieser Arbeit genannten Ziele stehen Unternehmen im Spannungsfeld aus Reduktion von Entwicklungszeiten, Entwicklungskosten und der Anforderung, qualitativ hochwertige Produkte anzubieten. Ein wichtiger Ansatz, um in diesem Spannungsfeld erfolgreich zu sein, ist der Einsatz von Simulations- und Optimierungswerkzeugen in der Produktentwicklung. Ziel ist hierbei, bereits in frühen Phasen der Entwicklung Informationen und Erkenntnisse über das noch nicht oder nur teilweise physisch existierende Produkt zu sammeln, um so teure und zeitintensive Fehlerkorrekturen in späteren Phasen zu vermeiden bzw. die Anzahl an Entwicklungs-Iterationen an Produktkomponenten zu reduzieren. In den vorangegangenen Kapiteln konnte jedoch aufgezeigt werden, dass es hinsichtlich der Modellierung eines komplexen Sachverhaltes – beispielsweise einem aus mehreren stark toleranz-

²²⁶siehe Albers et al. (2004, 2003); Albers / Matthiesen (2002); Matthiesen (2002)

²²⁷siehe Albers et al. (2010b, 2009g)

behafteten Bauteilen zusammengesetzten System – erforderlich ist, verschiedene numerische Verfahren und damit Simulationswerkzeuge miteinander zu verknüpfen. Je nach Fragestellung – dem Zielsystem – kann für dieselbe Komponente ein jeweils eigener Simulationsprozess erforderlich sein. Für einen effektiven und effizienten Einsatz der zugrunde liegenden Methoden innerhalb der unterschiedlichen Aktivitäten, die während des Produktentstehungsprozesses durchlaufen werden, ist die Wahl eines jeweils geeigneten Simulations- und/oder Optimierungsprozesses von großer Bedeutung. Darüber hinaus lässt sich bei Betrachtung moderner Produktentstehungsprozesse feststellen, dass zwar extrem leistungsfähige Werkzeuge zur Modellierung der Geometrie von Bauteilen sowie zur Erstellung daraus aufgebauter Systeme verfügbar sind, der Übergang von einer funktionalen Beschreibung eines Systemverhaltens hin zur Gestaltung der Komponenten aber eine enorme Herausforderung darstellt. Ein weiterer Schlüsselfaktor in diesem Zusammenhang sind daher Methoden, die den Ingenieur in seiner Entwicklungs- und Konstruktionstätigkeit unterstützen. Jedoch erkennt beispielsweise Löffel²²⁸, dass in den frühen Phasen des Entwicklungsprozesses funktionale Informationen vorherrschen, eine Verarbeitung durch CAD-Systeme allerdings nicht oder nur stark eingeschränkt möglich ist. Ein integriertes Modellieren von beispielsweise der Funktionsstruktur, der Geometrie und des Zusammenhangs beider Ebenen ist daher bislang nicht möglich. Daraus leitet sich die Notwendigkeit ab, Entwicklern Methoden und Werkzeuge zur Verfügung zu stellen, die es erlauben, neben der Geometrie auch weitere Aspekte zu modellieren, um Informationen strukturiert ablegen zu können und anderen am Entwicklungsprozess beteiligten Personen sowie für spätere Aktivitäten zugänglich zu machen. Das *Contact & Channel Model*, welches 2002 von Albers und Matthiesen eingeführt wurde, unterstützt explizit auch diesen Prozess (→ Abschnitt 2.1.3). Eine Rechnerunterstützung wird aktuell durch Albers und den Autor am IPEK – Institut für Produktentwicklung vorangetrieben (→ Abschnitt 4.3).

In diesem Kapitel wird zunächst ein generalisierter Ansatz unter Nutzung des C&CM vorgestellt, für den dieses adaptiert und erweitert wird. Dieser Ansatz erlaubt zusätzlich die Beschreibung von Prozessen der virtuellen Produktentwicklung, indem sowohl geometrische Wirkflächenpaare als auch Schnittstellen in der Simulation bzw. zwischen einzelnen Werkzeugen betrachtet werden. Eine detaillierte Beschreibung der damit im Rahmen der vorliegenden Arbeit neu entwickelten Ansätze zur Simulation und Optimierung erfolgt in den anschließenden Kapiteln.

4.2 Ansatz

Das Contact & Channel Model stellt die grundlegenden Prinzipien zur Analyse und Beschreibung technischer Systeme bereit. Der generalisierte Ansatz liefert eine Hil-

²²⁸vgl. Löffel (1997)

feststellung bei der Entwicklung und Auswahl eines geeigneten Simulations- und/oder Optimierungsprozessmodells.

Zur Erstellung eines Simulationsmodells muss in einem ersten Schritt ein entsprechendes *Zielsystem*²²⁹ für die Simulation festgelegt werden, d. h. die physikalischen Effekte und benötigte Ergebnisse müssen definiert werden. Im zweiten Schritt müssen unter Berücksichtigung des Zielsystems des geplanten Produkts geeignete Simulationsmethoden und -prozesse ausgewählt werden. Dieser Auswahlprozess basiert in der Praxis häufig auf zuvor gemachten Erfahrungen und der Intuition der involvierten Personen. Die Simulationsmethoden selbst sind in der Regel bereits in der Tiefe erforscht, hingegen existiert für den Auswahlprozess noch ein großer Bedarf an methodischer Unterstützung. Darüber hinaus ist die Tatsache, dass in den meisten Fällen mehrere Personen in den Prozess involviert sind, nicht zu vernachlässigen. Aus diesem Grund stellt eine derartige Aktivitäten verbindende Sprache die Chance dar, die Effektivität und Effizienz innerhalb des Produktentwicklungsprozesses zu verbessern.

Ausgehend von einer C&CM-Beschreibung des betrachteten Systems kann eine solche Verbindung zwischen *Zielsystem*, *Handlungssystem* und *Objektsystem* erreicht werden. Ein einfaches Beispiel, bei dem das Zielsystem die Untersuchung der in einem Bauteil auftretende maximale Spannung beinhaltet, zeigt Abbildung 4.1. Für die Ermittlung des gesuchten Wertes, also die Überführung in ein Objektsystem, ist ein Handlungssystem zu wählen. Dies kann für das gezeigte Pleuel eine verhältnismäßig einfache statische Finite Elemente Analyse oder aber ein aufwändigeres Prozessmodell mit Berücksichtigung z. B. der Dynamik sein. Eignen sich mehrere Prozessmodelle, so ist das Zielsystem weiter zu konkretisieren.

Das Beispiel zeigt auf, dass der generalisierte Ansatz nicht vorrangig eine Methodik darstellt, mit deren Hilfe Prozessmodelle entwickelt werden können. Stattdessen besteht das Ziel darin, auf Basis einer Systembeschreibung und einer korrespondierenden Beschreibung der Zielsetzung unter verschiedenen zur Verfügung stehenden Prozessmodellen – den sogenannten Mustern²³⁰ – eine geeignete Auswahl treffen zu können. Als Bindeglied kann eine C&CM-Beschreibung des Systems genutzt werden. Im Kontext der Simulation wird mit dem generalisierten Ansatz angestrebt, eine zielgerichtete Auswahl eines Prozessmodells treffen zu können.

Das einfachste denkbare System, das noch eine Funktion erfüllen kann, besteht aus zwei Wirkflächenpaaren und zwei sie verbindenden Leitstützstrukturen. Nach Albers²³¹ ist die Existenz von Wirkflächenpaaren die Grundvoraussetzung für jegliche Funktion in einem technischen System oder Produkt. Auch während der Erstellung eines Simu-

²²⁹vgl. Albers (2010); Albers / Meboldt (2007) und Abschnitt 2.1

²³⁰Der Begriff Muster wird in Anlehnung an Entwurfsmuster, wie sie in der Entwicklungsmethodik verwendet werden, gewählt. Albers et al. führen diesen Begriff im Umfeld der Entwicklung mikromechanischer Systeme ein. Sie zeigen auf, wie aus einem Satz an unterschiedlichen und abstrakt formulierten Entwurfsmustern ein Problem gelöst werden kann. Siehe Albers et al. (2009e)

²³¹vgl. Albers (2010)

Abbildung 4.1 Das C&CM als verbindende Sprache zwischen dem Zielsystem der Simulation und den verfügbaren Simulationsprozessmodellen zur Überführung des Ziel- in ein Objektsystem

lationsmodells wird dieser gedankliche Vorgang – die Zerlegung eines technischen Systems in dessen Wirkflächenpaare und Leitstützstrukturen – prinzipiell stets durchlaufen, beispielsweise um die Randbedingungen für ein Finite Elemente Modell geeignet abzubilden. Im Allgemeinen stellt sich dabei die Frage, welche Simulationsmethoden für die Modellierung einer Funktion geeignet sind und ob diese innerhalb eines einzelnen Softwarepaketes abgebildet werden kann oder eine Verknüpfung mehrerer Werkzeuge erforderlich ist. In letzterem Fall ergeben sich in der Regel zwangsläufig innerhalb des Simulationsprozesses Schnittstellen, über die ein Datenaustausch der einzelnen Werkzeuge erfolgen muss. Diese Daten, z. B. mechanische Lasten, beschreiben die Wechselwirkungen zwischen den Wirkflächenpaaren. Damit können ein abstraktes Wirkflächenpaar und eine abstrakte Leitstützstruktur eingeführt werden, die es ermöglichen, sowohl den Simulationsprozess als auch das geometrische und physikalische Modell zu beschreiben. Abbildung 4.2 stellt diesen Sachverhalt schematisch dar. Hierzu wird das bestehende Elementmodell durch generalisierte Definitionen der Begriffe Wirkflächenpaar und Leitstützstruktur erweitert:

- » Mit *Wirkflächenpaaren* können nicht nur physikalische und funktionale Zusammenhänge, sondern auch *Schnittstellen zwischen Softwarewerkzeugen* beschrieben werden.
- » Die *Leitstützstrukturen* umfassen auf einer abstrakten Ebene je nach Betrachtungstiefe auch die ggf. verknüpften *Simulationsmethoden, -prozesse* und *-werkzeuge*.

In einem ersten Schritt ist das technische System mit Hilfe des Contact & Channel

Abbildung 4.2 Schema des generalisierten Contact & Channel Models

Models abzubilden. Die dabei ermittelten Wirkflächenpaare bilden im zweiten Schritt den Ausgangspunkt zur Verknüpfung von Funktion und Prozess. Das Zielsystem der Simulation wird auf diese Weise mit Hilfe der erweiterten Elemente – den abstrakten Wirkflächenpaaren und Leitstützstrukturen – definiert. Dabei kann von allen am Prozess beteiligten Personen ein und dieselbe Sprache verwendet werden, egal ob es sich um das technische System als solches oder den gewünschten Simulationsprozess handelt.

Falls beispielsweise die Verformung einer Tragstruktur innerhalb einer Mehrkörpersystem-Simulation untersucht werden soll, muss der Starrkörper durch einen flexiblen ersetzt werden. Diese scheinbar geringfügige Änderung hat für das zugrundeliegende Prozessmodell der Simulation jedoch erhebliche Auswirkungen.²³² Weitere Aspekte können z. B. Temperaturgradienten, Dynamik, Reibung, Fluid-Struktur-Interaktionen, Regelung oder auch die im weiteren Verlauf der Arbeit betrachteten Kornstrukturen umfassen. Darüber hinaus unterstützt der vorgestellte Ansatz eine Modellbildung aus *unterschiedlichen Perspektiven*. Aus Sicht der Regelungstechnik kann z. B. das Mehrkörpersystem als Eingangs-/Ausgangsmodell angesehen werden, während der Schwerpunkt auf dem Entwurf der Regelung liegt. Beim klassischen Konstrukteur verhält es sich hingegen umgekehrt – für ihn stehen nicht die Details der Regelung, sondern beispielsweise die geometrische Ausgestaltung eines Bauteils im Vordergrund.

Den zentralen Ausgangspunkt des generalisierten Ansatzes bildet damit wie beschrieben das Contact & Channel Model. Durch die Verknüpfung des Zielsystems der Simulation mit dem betrachteten technischen System wird die Auswahl eines geeigneten Prozessmodells methodisch unterstützt.

²³²vgl. Craig / Bampton (1968)

4.3 Der Contact & Channel Model Coach – C³

Gegenstand aktueller Arbeiten des Autors ist die Implementierung des beschriebenen Ansatzes in einem Softwarepaket. Abbildung 4.3 zeigt das derzeit in Entwicklung befindliche Softwarepaket *Contact & Channel Model Coach – C³*.

Die Basiselemente des Contact & Channel Modells können hierin auf einer Arbeitsfläche miteinander kombiniert werden, um das betrachtete System oder den betrachteten Prozess in dieser Sprache abzubilden. Den einzelnen Elementen können über Eigenschaften Funktionen zugewiesen werden, so dass die angestrebte Verknüpfung von Funktion, Gestalt und Prozess erreicht werden kann. Durch an das *Kammvorgehen*²³³ angelehnte Ebenen kann der Detaillierungsgrad an Orten der derzeit betrachteten Funktion erhöht werden. Um eine Modellierung unterschiedlicher Detaillierungsgrade innerhalb eines Modells zu erreichen, stehen eigene Werkzeuge zur Verfügung. Dem Grundgedanken des hier vorgestellten Ansatzes folgend, können auf diese Weise relevante Bereiche in der Tiefe, andere Teile des Systems hingegen abstrakt betrachtet werden. Jeder Entwickler kann dem Modell damit die für ihn relevanten Aspekte hinzufügen und zu einem durchgängigen Produktmodell beitragen.

Abbildung 4.3 Das Softwarepaket Contact & Channel Model Coach – C³

Das Datenformat basiert auf dem XML-Standard und erlaubt eine einfache Adaptier- und Erweiterbarkeit. Eine Integration mit CAD-Umgebungen wird angestrebt, um je nach Bedarf den Zusammenhang zwischen Funktion, Basiselementen und konkreter Geometrie zu ermöglichen. Für Details sei an dieser Stelle auf weiterführende Literatur unter Mitwirkung des Autors verwiesen.²³⁴

²³³siehe Albers et al. (2009a)

²³⁴siehe Albers et al. (2010b, 2009b, g)

Im Rahmen der weiteren Arbeit wird auf die im Contact & Channel Model Coach implementierte und vom Autor entwickelte Notation zurückgegriffen. Eine Wirkfläche wird demzufolge durch die Fläche selbst oder abstrakt – im Falle eines zweidimensionalen Modells – durch eine Linie dargestellt. In Normalenrichtung hierzu zweigt ein kurzer Ast in Form einer Linie mit einem am Ende befindlichen, kreisförmigen Konnektor ab. Dieser dient als Anbindungspunkt für eine Leitstützstruktur. Ausgehend von zwei an unterschiedlichen Punkten befindlichen Konnektoren bildet eine zwischen diesen Punkten beliebig im Raum verlaufende und symbolisch von einer Sinusfunktion überlagerte Linie eine Leitstützstruktur. Wirkflächenpaare bestehen aus zwei zumindest in einem Punkt nahe beieinander liegenden Wirkflächen. Eine gegebenenfalls eingezeichnete Systemgrenze wird durch eine gestrichelte Linie dargestellt, wobei das betrachtete Teilsystem eine (eventuell echte) Untermenge der von ihr eingeschlossenen Menge ist.

4.4 Streuende Leitstützstrukturen

Der Begriff der stark streuenden Leitstützstrukturen bezieht sich in der vorliegenden Arbeit nicht auf ein *einzelnes* Bauteil, sondern auf ein *Kollektiv* an prinzipiell identischen Bauteilen, die gemäß des zuvor definierten Zielsystems ein und dieselbe Funktion erfüllen sollen – z. B. die Planetenräder innerhalb eines Planetengetriebes.

Die im Makroskopischen meist isotrop abbildbare Leitstützstruktur ist im Falle hochbelasteter mikromechanischer Bauteile in mehrere, über Wirkflächenpaare miteinander interagierende Leitstützstrukturen in den einzelnen Kristalliten (→ Kapitel 2) zu unterteilen. So können bei Betrachtung einer Zugprobe auf Mikroebene innere Wirkflächenpaare und Leitstützstrukturen identifiziert werden, vgl. Abbildung 4.4. Lage und Form dieser sich innerhalb des Bauteilvolumens befindlichen Wirkflächenpaare sind nicht oder nur indirekt beeinflussbar und damit individuell – die diese Wirkflächenpaare verbindenden Leitstützstrukturen sind somit für jedes Bauteil ebenfalls individuell. Da sich die auf der Ebene der Kornstruktur befindlichen Wirkflächenpaare im Laufe des Herstellprozesses für jedes Bauteil unterschiedlich ausbilden, stellen sich während des Betriebes stichprobenspezifische Leitstützstrukturen ein. Dies geht bei Betrachtung des Kollektivs mit einer gewissen Streuung im Bauteilverhalten und damit einer Unsicherheit bei der Dimensionierung derartiger Bauteile einher.

Prinzipiell gilt diese Aussage sowohl für Bauteile mit makroskopischen als auch mikroskopischen Abmessungen. Während im Falle makroskopischer Bauteile dennoch häufig von einem quasiisotropen Verhalten ausgegangen werden kann, sind die hier betrachteten mikromechanischen Bauteile aus nur wenigen solcher Substrukturen aufgebaut – eine Mittelung der Eigenschaften findet daher nicht statt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Abmessungen der Mikrobauteile und diejenigen der Kristallite deutlich enger beieinander liegen als bei Bauteilen mit makroskopischen Abmessungen.

Abbildung 4.4 Verschiedene Detaillierungsgrade einer mit Hilfe des C&CM beschriebenen Mikrozugprobe – Übergang von ① makroskopischer zu ③ mikroskopischer Betrachtungsweise

Abbildung 4.5 veranschaulicht dies am Beispiel einer Zugprobe.

Um diesem Sachverhalt bei der Strukturoptimierung Rechnung zu tragen, wird das Contact & Channel Model um den Begriff der *Gesamtstruktur* (GS) ergänzt. Diese umfasst gemäß Gleichung (4.1) sowohl die Tragstruktur, also die Menge aller möglichen Leitstützstrukturen, als auch die Reststruktur.

$$\begin{aligned} \text{GS} &= \text{TS} + \text{RS} \\ &= \sum_{t=t_1}^{t_n} \text{LSS}(t) + \text{RS} \end{aligned} \quad (4.1)$$

Abbildung 4.5 Veranschaulichung der Relevanz der Bauteilabmessungen für die Zulässigkeit der Annahme eines quasiisotropen Materialverhaltens

Im mechanischen Sinne entspricht die Gesamtstruktur damit dem Bauteilvolumen. In der vorliegenden Arbeit werden die Leitstützstrukturen mit Hilfe von numerischen

Verfahren zeitlich diskret betrachtet (\rightarrow Kapitel 6). Die Abgrenzung der Leitstütz- von der restlichen Struktur zu einem Zeitpunkt t kann mit Hilfe einer *Schranke*, beispielsweise eines Spannungswertes, vorgenommen werden.

Nach Albers²³⁵ entspricht das Ziel der Strukturoptimierung – insbesondere hinsichtlich des oftmals damit angestrebten Leichtbaus – in der Regel der Minimierung der Reststruktur (\rightarrow Abschnitt 2.4). Aus Sicht des Contact & Channel Models entspricht dies der folgenden, allgemein formulierten Forderung:

$$\text{minimiere } RS \quad (4.2)$$

$$\text{so dass } GS = \sum_{t=t_1}^{t_n} LSS(t) \quad (4.3)$$

Für eine *deterministische* Formulierung des Strukturoptimierungsproblems bezieht sich diese Aussage auf ein einzelnes Bauteil. Im Sinne einer *stochastischen* Formulierung gilt dieses Ziel für das betrachtete Kollektiv an Bauteilen, jedoch nicht zwangsläufig für eine Stichprobe des Kollektivs. Abbildung 4.6 verdeutlicht dies anhand des in Kapitel 6 untersuchten Planetengetriebes.

Abbildung 4.6 Deterministische und stochastische Betrachtung eines Planetenrades in einem Planetengetriebe

Wird eines der Planetenräder mit unterschiedlichen Kornstrukturen betrachtet, so bildet sich auf Bauteilebene in einer Stichprobe i zum Zeitpunkt t_k ausgehend von den Funktionskontakten eine von den inneren Wirkflächenpaaren abhängige Leitstützstruktur LSS_i aus.²³⁶ Diese ist nicht zwangsläufig identisch mit der sich zum gleichen Zeitpunkt ausbildenden Leitstützstruktur LSS_j einer weiteren Stichprobe j . Abbildung 4.7 veranschaulicht dies am Beispiel eines zum Zeitpunkt t_k im Eingriff befindlichen Zahnes des Planetenrades. Dargestellt ist eine Detailansicht des Funkti-

²³⁵vgl. Albers (2009)

²³⁶Die die Funktionskontakte verbindende Leitstützstruktur LSS_i kann auf der Ebene der Kornstruktur wie beschrieben weiter unterteilt werden in die jeweiligen Leitstützstrukturen innerhalb der Kristallite, die über Wirkflächenpaare miteinander interagieren (vgl. auch Abschnitt 4.5).

onskontaktes $FK_{\text{Hohlr}/\text{Planet}}$. Je nach betrachtetem Modell – also je nach betrachteter Kornstruktur – stellt sich innerhalb des Planetenrades auf der Bauteilebene zwischen den Funktionskontakten eine individuelle Leitstützstruktur ein.

Abbildung 4.7 Streuende Leitstützstrukturen im Bereich des im Eingriff befindlichen Zahnes eines Planetenrades bei Betrachtung von Modellen mit unterschiedlicher Kornstruktur

Trotz identischer Gesamtstruktur bilden sich für jede Stichprobe eigene Trag- und Reststrukturen aus. Das Verhalten der einzelnen Bauteile innerhalb des betrachteten Kollektivs ist somit unterschiedlich. Es gilt der in (4.4) formulierte Sachverhalt.

$$LSS_i(t_k) \neq LSS_j(t_k) \quad \forall j \leq n_M : j \neq i \quad (4.4)$$

Ziel der Optimierung ist es aus diesem Grunde nicht, die Reststruktur für eine *einzelne* Stichprobe zu minimieren, da diese von Stichprobe zu Stichprobe unterschiedlich ausfallen kann. Stattdessen wird die Trag- und Reststruktur des *Kollektivs* – hier also einer gewissen Anzahl an Stichproben, anhand deren Eigenschaften die Charakteristika ihrer Grundgesamtheit ermittelt werden – betrachtet. Trag- und Reststruktur sind für die einzelnen Stichproben entsprechend nicht zwangsläufig identisch. Bezogen auf eine Stichprobe bedeutet dies, dass sich ihre Gesamtstruktur aus einer nur für diese Stichprobe gültigen, individuellen Trag- und Reststruktur ergibt.

4.5 Streuende Leitstützstrukturen aus Sicht des generalisierten Ansatzes

Aus den Betrachtungen in Abschnitt 4.4 und dem Stand der Forschung geht hervor, dass bei hochbelasteten mikromechanischen Bauteilen deren Werkstoff ab Unterschreiten einer gewissen Bauteilgröße nicht mehr als isotrop angenommen werden kann. Falls bei der Auslegung solcher Bauteile Spannungsverteilungen ermittelt werden müssen, sollten Kornstruktur und Kornanisotropie sowie die Porosität – also die stark streuenden Leitstützstrukturen dieser Bauteile – in der Simulation nicht vernachlässigt werden.

4.5.1 Zielsystem der Optimierung

Um die angestrebte Formoptimierung von Bauteilen mit stark streuenden Leitstützstrukturen durchführen zu können, ist ein geeignetes Prozessmodell zu entwickeln. In der Zielsetzung dieser Arbeit wurde eine möglichst praxisnahe Implementierung gefordert. Daher wird auf etablierte und kommerziell verfügbare Strukturoptimierungspakete zurückgegriffen, die auf der Finite Elemente Methode aufsetzen (→ Abschnitt 2.4). Voraussetzung für das Prozessmodell ist darüber hinaus die Abbildbarkeit der streuenden Leitstützstrukturen in der Finite Elemente Methode. Dies bildet das Zielsystem der Simulation. Innerhalb des zu erarbeitenden Handlungssystems der Optimierung ist also ein Handlungssystem zur Simulation zu entwickeln. Abbildung 4.8 spiegelt diesen *fraktalen Charakter* des generalisierten Ansatzes wider.

Abbildung 4.8 Der fraktale Charakter des generalisierten Ansatzes am Beispiel der im weiteren Verlauf der Arbeit entwickelten Handlungssysteme

4.5.2 Zielsystem der Simulation

Den zuvor geschilderten Sachverhalt – den Einfluss der stark streuenden Leitstützstrukturen – gilt es in der Simulation zu berücksichtigen. Hierzu muss eine Erweiterung des konventionellen Finite Elemente Prozessmodells vorgenommen werden. Dieses ist um

Methoden zu erweitern, die die in Abschnitt 2.7 dargestellten werkstoffwissenschaftlichen Grundlagen bezüglich der Kornstruktur hinreichend genau abzubilden in der Lage sind. Prozessseitig werden die neuen Wirkflächenpaare und Leitstützstrukturen durch zusätzliche Module zur Abbildung des Kornwachstums und der Kornorientierung implementiert.

Die Betrachtung stark streuender Leitstützstrukturen aus Sicht des technischen Systems geht also auch im Simulationsprozessmodell mit der Einführung neuer Wirkflächenpaare und Leitstützstrukturen einher. Die simulationsseitigen Wirkflächenpaare und Leitstützstrukturen werden in Kapitel 5 entwickelt. In Kapitel 6 werden auf deren Grundlage wiederum die Auswirkungen auf das betrachtete komplexe technische System – ein Mikroplanetengetriebe – untersucht. Damit wird in den beiden genannten Kapiteln das definierte Zielsystem, nämlich die Anforderung, komplexe mikromechanische Systeme einschließlich deren Kornstruktur mit Hilfe der Finiten Elemente Methode betrachten zu können, in ein Objektsystem überführt. Im Falle des Prozesses handelt es sich hierbei um ein *Softwarepaket*, im Falle der eigentlichen Simulation hingegen um – wie im obigen Beispiel dargestellt – konkrete Aussagen zum Belastungszustand eines Bauteils.

4.5.3 Ableitung der weiteren Vorgehensweise

Im Weiteren werden zunächst die für das Prozessmodell zur Optimierung von Bauteilen mit stark streuenden Leitstützstrukturen essenziellen Methoden zur Modellierung der Kornstruktur entwickelt. Dabei werden zwei alternative Vorgehensweisen vorgestellt und miteinander insbesondere unter dem Aspekt der Integrierbarkeit in das Prozessmodell zur Optimierung verglichen. Der Einfluss der Kornstruktur und damit die Relevanz deren Berücksichtigung bei der Auslegung mikromechanischer Bauteile wird im Anschluss anhand eines Planetengetriebes untersucht. Im folgenden Schritt gilt es, die Methoden zur Berücksichtigung dieser Effekte in das neue, noch zu entwickelnde Prozessmodell einzugliedern. Anhand eines realen Szenarios – einer druckluftbetriebenen Mikroturbine – wird das Potenzial des neuen Prozessmodells analysiert und bewertet. Daraus ergibt sich die folgende Struktur:

- » Kapitel 5
Entwicklung des *Handlungssystems der Simulation* von Bauteilen mit stark streuenden Leitstützstrukturen,
- » Kapitel 6
Überführung des Zielsystems der Simulation in ein *Objektsystem* anhand eines Mikroplanetengetriebes,
- » Kapitel 7
Entwicklung des *Handlungssystems der Formoptimierung* von Bauteilen mit stark

streuenden Leitstützstrukturen,

» Kapitel 8

Überführung des Zielsystems der Formoptimierung in ein *Objektsystem* anhand eines druckluftbetriebenen Mikroturbinenrotors.

Die Kapitel 5 und 6 können als ein geschlossenes Handlungssystem angesehen werden, falls ausschließlich eine Analyse erfolgen soll. Wird zusätzlich eine auf diesen Analysen basierende Optimierung angestrebt, so sind für das Handlungssystem zusätzlich die Kapitel 7 und 8 von Bedeutung.

Abschließend wird in Kapitel 9 eine durchgängige Prozesskette abgeleitet. Kapitel 10 fasst die Ergebnisse zusammen und gibt einen Ausblick auf mögliche weitere Arbeiten.

5 Ein neuer Ansatz zur Modellierung und Simulation von Bauteilen mit stark streuenden Leitstützstrukturen

Mikromechanische Systeme sind seit einigen Jahren sowohl im industriellen als auch akademischen Umfeld von Interesse. Die Miniaturisierung mechanischer Systeme bringt für Entwicklung, Produktion und Qualitätssicherung jedoch neue Herausforderungen mit sich. Aufgrund technologischer Restriktionen, insbesondere bei der Anwendung von aus der Makrowelt bekannten Fertigungsverfahren, lassen sich beispielsweise Gestaltabweichungen nicht im selben Maße wie die Bauteilgröße verringern. Die Beachtung solcher und weiterer Einflüsse ist bereits bei frühesten Aktivitäten innerhalb des Produktentstehungsprozesses von größter Wichtigkeit. Zur Unterstützung des Entwicklungsprozesses bedarf es daher neuer Methoden, die es erlauben, das spätere Bauteil- und Systemverhalten vorherzusagen. Im Rahmen des durch die DFG geförderten Sonderforschungsbereiches 499 „Entwicklung, Produktion und Qualitätssicherung urgeformter Mikrobauteile aus metallischen und keramischen Werkstoffen“ werden Grundlagen für eine durchgängige Prozesskette für Mikrobauteile erarbeitet. Neben Fragestellungen, die die Produktion solcher Bauteile betreffen, müssen diese auf ihre Belastbarkeit und Belastung während des Betriebes hin untersucht werden.

Der Simulation kommt unter anderem deshalb eine große Bedeutung zu, da der Einfluss verschiedener Parameter zielgerichtet untersucht werden kann. Eine wesentliche Grundlage und gleichzeitig Herausforderung ist die Erstellung geeigneter Simulationsmodelle. Forschungsarbeiten im Umfeld der Simulation befassen sich sowohl mit dem elastischen als auch inelastischen Verhalten zwei- oder mehrphasiger Materialien. In der Makrowelt hat sich die Finite Elemente Methode als ein zuverlässiges Werkzeug zur Analyse mechanischer Bauteile und Systeme etablieren können. Im Bereich der Mikrotechnologie treten jedoch Effekte auf, die bei makroskopischen Dimensionen vernachlässigt werden können. So gehen Finite Elemente Analysen makroskopischer Bauteile häufig von einem isotropen Materialverhalten aus. Diese Annahme lässt sich nur bedingt auf die Simulation von Mikrobauteilen übertragen. In Abhängigkeit vom gewählten Werkstoff und Herstellverfahren bestehen solche Bauteile aufgrund ihrer

geringen räumlichen Ausdehnung im Falle polykristalliner Gefüge teilweise aus nur wenigen Körnern. Diese Körner weisen in der Regel ein anisotropes Verhalten auf und beeinflussen das Verhalten eines solchen Bauteils daher in einigen Fällen deutlich.²³⁷ Damit verbunden ist eine Streuung in deren Verhalten – so stellt sich beispielsweise von Bauteil zu Bauteil ein jeweils individueller Spannungszustand ein. Um eine Dimensionierung solcher Bauteile vornehmen zu können, ist es erforderlich, Methoden zur Abbildung von Bauteilen einschließlich deren Kornstruktur und damit individuellen Leitstützstrukturen zu entwickeln und bereitzustellen. Zudem sind Defekte wie Poren zu berücksichtigen, die bei den aktuell in der Forschungsphase befindlichen Urformverfahren noch nicht vollständig vermieden werden können.²³⁸

5.1 Genereller Ansatz

Um eine möglichst frühzeitige Untersuchung²³⁹ und damit Prognosen über das Verhalten von Bauteilen mit stark streuenden Leitstützstrukturen – bei den hier betrachteten Mikrobauteilen also auch Einflüsse von deren Kornstruktur – vornehmen zu können, werden zunächst spezifische Modellierungsmethoden entwickelt und diese anschließend in einem rechnergestützten Simulationswerkzeug implementiert. Auf einer Systemebene werden beispielsweise Kontaktkräfte in Abhängigkeit verschiedener Parameter untersucht. Auf Komponentenebene wird der Spannungszustand, Kraftfluss etc. unter Berücksichtigung der Kornstruktur analysiert. Effekte und Restriktionen dieser beiden Ebenen müssen dabei untereinander berücksichtigt werden, vgl. Abbildung 5.1.

Die Arbeiten von Hauser²⁴⁰, Metz²⁴¹ und Leslabay²⁴² konzentrieren sich auf die Modellierung und/oder die Untersuchung von geometrischen Abweichungen innerhalb eines Mikrosystems. Der Fokus dieses Kapitels liegt dem Titel der Arbeit entsprechend auf der Modellierung und Simulation von Bauteilen mit stark streuenden Leitstützstrukturen. Die hier entwickelten Methoden stellen somit einerseits eine Ergänzung zu den genannten Arbeiten dar, zum anderen bilden sie die Grundlage für das im weiteren Verlauf der Arbeit entwickelte Formoptimierungsverfahren (→ Kapitel 7).

Während sich für eine Systemuntersuchung Mehrkörpersystem-Modelle und damit MKS-Softwarepakete anbieten, bauen die folgenden Methoden zur Bauteilbetrachtung mit dem Schwerpunkt der Spannungsanalyse auf der Finite Elemente Methode auf.²⁴³ Die prinzipielle Vorgehensweise bei der Erstellung eines Finite Elemente Modells wird

²³⁷siehe z. B. Albers / Metz (2008, 2006)

²³⁸siehe z. B. Kasanická (2008); Auhorn (2005)

²³⁹Insbesondere bei der Entwicklung urgeformter mikromechanischer Bauteile und Systeme ist eine frühzeitige Betrachtung von zumindest aktuell unvermeidbaren großen Toleranzen, Schwankungen in den Materialeigenschaften etc. essenziell für eine erfolgreiche Produktentwicklung. Vgl. Marz (2005)

²⁴⁰siehe Hauser (2007)

²⁴¹siehe Metz (2008)

²⁴²siehe Leslabay (2009)

²⁴³für eine ausführlichere Begründung sei an dieser Stelle auf Kapitel 6 verwiesen

Abbildung 5.1 Genereller Ansatz – Berücksichtigung von Wechselwirkungen der einzelnen Komponenten und dem daraus aufgebautem System

zur Berücksichtigung der Kornstruktur ergänzt. Zunächst wird ein geometrisches Modell, welches nicht nur die geometrischen Aspekte des Bauteiles, sondern auch die der Kornstruktur erfasst, generiert. Anschließend werden die Materialeigenschaften und die kristallographischen Orientierungen der einzelnen Körner beschrieben.

Zur rechnergestützten Analyse des Einflusses der Kornstruktur muss diese im Simulationsmodell nachgebildet werden. In einigen Arbeiten werden zu diesem Zweck zunächst *reale* Gefüge erfasst und anschließend modelliert. Die reale mikrostrukturelle Korntopologie kann mit Hilfe verschiedener Messtechniken aufgenommen werden. So wird in den Arbeiten von Ferrié et al.²⁴⁴ und Lauridsen et al.²⁴⁵ die Computertomographie (CT) zur Untersuchung von Mikrorissen verwendet. Hierfür werden mehrere Röntgenaufnahmen des Prüfkörpers aus verschiedenen Richtungen zu einer dreidimensionalen Voxelgrafik²⁴⁶ kombiniert. Zusätzlich zur Topologie der Körner werden weitere Verfahren wie in Adams / Olson²⁴⁷ zur Identifikation deren Orientierungen herangezogen. Ein Nachteil solcher Untersuchungen liegt im damit verbundenen hohen Aufwand. Insbesondere in Kombination mit einer geringen Probengröße und der damit erforderlichen hohen räumlichen Auflösung ist eine Untersuchung vieler Probekörper kaum möglich. Neuere Arbeiten²⁴⁸ basieren unter anderem auf einem fokussierten Ionenstrahl (FIB – focused ion beam). Die Datenaufbereitung und zusätzlich die Überführung in Simulationsmodelle

²⁴⁴siehe Ferrié et al. (2006)

²⁴⁵siehe Lauridsen et al. (2006)

²⁴⁶Voxel – volumetric pixel, Volumenpixel. Ein Voxel ist das dreidimensionale Äquivalent eines Pixels. Bei einer Voxelgrafik handelt es sich um einen räumlichen Datensatz. In kartesischen Koordinaten beschreibt ein Voxel den diskreten Wert an einer XYZ-Koordinate dieses Datensatzes. Anwendungen finden sich z. B. in bildgebenden Verfahren der Medizin zur Visualisierung von Fettgewebe anhand räumlicher, diskreter Dichtewerte.

²⁴⁷siehe Adams / Olson (1998)

²⁴⁸siehe Groeber et al. (2006); Bhandari et al. (2007); Ghosh et al. (2008)

ist allerdings auch hier sehr aufwändig.

Eine Möglichkeit, um den experimentellen Aufwand zu verringern und die Simulation einer großen Anzahl verschiedener Mikrostrukturen zu gewährleisten, besteht in der Erstellung *künstlicher* Mikrostrukturen. Für polykristalline Materialien basieren solche Mikrostrukturen in vielen Fällen auf Poisson-Voronoi-, Hardcore-Voronoi- und Laguerre-Voronoi-Mosaiken. Diese Verfahren sind allgemein anerkannt als probate Näherungen realer Mikrostrukturen.²⁴⁹ Künstliche Mikrostrukturen werden unter anderem im Kontext der Homogenisierung herangezogen, so z. B. für unidirektional verstärkte Verbundmaterialien.²⁵⁰ In den Arbeiten von Groeber et al.²⁵¹ wird ein Rahmen für die automatisierte Generierung von Mikrostrukturen vorgestellt. Den Aspekt der Periodizität der Kornstruktur greifen die Untersuchungen von beispielsweise Fritzen et al.²⁵² auf.

Den Arbeiten ist gemein, dass sie sich auf die Modellierung der Kornstruktur in einfachen und kleinen Volumenelementen beschränken.²⁵³ Eine Betrachtung komplexer Bauteile mit Kornstruktur wird nicht vorgenommen. Damit fehlt ein wichtiger Baustein für die Unterstützung des Entwicklungsprozesses mikromechanischer Bauteile und Systeme. Im Folgenden soll ein Beitrag zum Schließen dieser Lücke geleistet werden.

5.2 Das Softwarepaket G/Struct

Die im weiteren Verlauf der Arbeit beschriebenen Methoden sowie das in Kapitel 7 entwickelte Optimierungsverfahren werden im Rahmen der Arbeit in Form eines neuen Softwarepaketes mit der Bezeichnung *G/Struct* implementiert. Dem Entwickler wird damit eine Umgebung zur Modellierung, Simulation und Optimierung von Bauteilen mit stark streuenden Leitstützstrukturen zur Verfügung gestellt.

Das Softwarepaket G/Struct ist ein modular aufgebautes System. Es setzt auf bestehenden Finite Elemente Werkzeugen auf. G/Struct ermöglicht die Einbindung von Finite Elemente Modellen mit beliebig vielen Lastfällen und Randbedingungen. Eine Parametrisierung des Modells ist auch für das in Kapitel 7 entwickelte Formoptimierungsverfahren nicht erforderlich. Als Finite Elemente Solver können MSC.Nastran sowie Abaqus eingebunden werden. Als modular aufgebautes System können weitere Solver dank der offenen Schnittstellen problemlos eingebunden werden. Durch die Ankopplung an die kommerziellen Präprozessoren MSC.Patran und Abaqus/CAE können zudem die relevanten, im Umfeld der gängigen CAD- und CAE-Werkzeuge erforderlichen Schnittstellen verwendet werden. Damit ist es möglich, eine beliebige CAD-Geometrie einzulesen und innerhalb von G/Struct zu verwenden. Die offenen

²⁴⁹siehe z. B. Redenbach (2009); Lautensack (2007); Kumar et al. (1996); Kumar / Kurtz (1994)

²⁵⁰siehe Swaminathan et al. (2006)

²⁵¹siehe Groeber et al. (2008a, b)

²⁵²siehe Fritzen et al. (2009)

²⁵³vgl. z. B. Fritzen et al. (2009)

Schnittstellen, die Kompatibilität zu kommerziellen Finite Elemente Prä- und Postprozessoren und Solvern sowie die Möglichkeit, bereits existierende CAD-Modelle ohne die Notwendigkeit von Modifikationen direkt verwenden zu können, erlauben eine schnelle und einfache Einbindung des Softwarepaketes in reale Entwicklungsprozesse. Durch die Kopplung der Module von G/Struct wird eine geschlossene Prozesskette vom ersten Konzept bis hin zur optimierten Geometrie erreicht. In Abbildung 5.2 sind die einzelnen Module des Softwarepaketes G/Struct dargestellt.

Abbildung 5.2 Das im Rahmen der Arbeit entwickelte Softwarepaket G/Struct

Der Fokus der vorliegenden Arbeit liegt auf der Modellierung, Simulation und Optimierung von Bauteilen mit stark streuenden Leitstützstrukturen. Eine Einbeziehung von streuenden Wirkflächenpaaren, also Abweichungen von der gewünschten Soll-Geometrie, kann direkt bei der Geometrieerstellung erfolgen. Möglichkeiten hierfür zeigen unter anderem der Autor gemeinsam mit Albers et al.²⁵⁴ oder auch Leslabay²⁵⁵ auf. So können beispielsweise anhand der im Rahmen der Qualitätssicherung ermittelten geometrischen Abweichungen virtuelle, realitätsnahe Bauteile untersucht werden. In diesem Fall ist eine Parametrisierung des Modells eventuell erforderlich. Eine Einbindung von G/Struct in ein solches Prozessmodell ist ebenfalls möglich.

Die Angabe relevanter Parameter erfolgt durch den Benutzer über ein *Inputfile* mit dem Suffix *gsi*. Dieses beinhaltet sämtliche für die Generierung der Kornstruktur erforderlichen Informationen. Dem Benutzer steht mit *G/Struct GUI* eine graphische Benutzeroberfläche zur Verfügung, die eine einfache Erzeugung eines solchen Inputfi-

²⁵⁴siehe Albers et al. (2010a, 2008a, 2007a)

²⁵⁵siehe Leslabay (2009)

les ermöglicht. Über eine schnelle *Vorschaufunktion* kann die mit den vom Benutzer angegebenen Daten entstehende Kornstruktur vorab grob abgeschätzt und betrachtet werden. Die Vorschau erfolgt mit Hilfe des Standards VRML²⁵⁶. Zusätzlich bietet G/Struct zur einfachen Handhabung einer großen Anzahl an Versuchen, wie sie für statistische Analysen benötigt werden, einen *Batch-Modus* zur automatisierten Berechnung und Auswertung.

Im weiteren Verlauf werden zunächst die implementierten Methoden zur Modellierung und Simulation beschrieben und validiert. In Kapitel 7 wird eine Erweiterung des Softwarepaketes G/Struct vorgenommen, die eine Optimierung auf Grundlage der hier vorgestellten Methoden ermöglicht. Weitere Details können dem Anhang entnommen werden (→ Anhang A.2 und A.5).

5.3 Modellierung der Geometrie der Kornstruktur

Zunächst ist es erforderlich, eine geometrische Beschreibung der polykristallinen Kornstruktur innerhalb der Mikrokomponente zu erstellen. Entgegen der im Stand der Forschung beschriebenen Methoden (→ Abschnitt 2.8) sollen auch komplexe, dreidimensionale Bauteile untersucht werden können. Es wird davon ausgegangen, dass bereits eine Bauteilgeometrie in Form eines CAD-Modells aus dem Entwicklungsprozess vorliegt. Auf dieses CAD-Modell soll für die Analyse zurückgegriffen werden können. Wie bereits zuvor beschrieben, soll eine rein rechnergestützte Modellierung erfolgen können, d. h. der messtechnische Aufwand soll auf ein möglichst geringes Maß begrenzt werden. Aufgrund der notwendigen Validierung des Modells ist ein Abgleich z. B. des mittleren Korndurchmessers mit realen Kornstrukturen und damit Messergebnissen jedoch zumindest zu Beginn der Analysen nicht vermeidbar. Prinzipiell sind für die Erstellung der polykristallin aufgebauten Mikrokomponente zwei Herangehensweisen denkbar:

- » Es wird zunächst ein hinreichend in alle Raumrichtungen ausgedehntes Polykristallmodell erzeugt, aus dem im zweiten Schritt die Bauteilgeometrie ausgeschnitten wird. Im letzten Schritt erfolgt die Diskretisierung und damit Vorbereitung für die Analyse. Dieses Vorgehen wird im Folgenden als *geometriebasierter Ansatz* bezeichnet.
- » Ausgehend vom CAD-Modell wird eine Unterteilung in Finite Elemente vorgenommen. Das diskretisierte Modell wird anschließend weiter in einen Polykristall unterteilt. Dieses Vorgehen wird im Folgenden als *Finite Elemente basierter Ansatz* bezeichnet.

²⁵⁶Die Virtual Reality Modeling Language (VRML) ist eine Beschreibungssprache für dreidimensionale Szenen, welche Geometrien, Beleuchtungen, Animationen und Interaktionsmöglichkeiten beinhalten können. Die Darstellung der Daten erfolgt in Echtzeit. VRML-Dateien besitzen den Suffix wrl und sind im Klartext (ASCII bzw. UTF-8) hinterlegt.

Nach einer ausführlichen Beschreibung der beiden Ansätze sind diese zu bewerten und miteinander zu vergleichen. Wesentliche Bestandteile beider Ansätze sind die geeignete Generierung von Keimen innerhalb des Bauteilvolumens sowie die von diesen ausgehende Ermittlung individueller Kornstrukturen samt etwaiger Poren. Im weiteren Verlauf werden zunächst die beiden Ansätze für eine Übersicht vorgestellt.

5.3.1 Geometriebasierter Ansatz

Ausgangspunkt des geometriebasierten Ansatzes ist eine Menge P an Keimen in einem das Bauteil beinhaltenden Volumen (\rightarrow Abschnitt 5.3.4) und eine zuvor erstellte parametrisierte CAD-Vorlage. Für die hier betrachteten Kornstrukturen, deren Körner keine bevorzugte Wachstumsrichtung aufweisen, entspricht diese Vorlage einer Kugel, deren Mittelpunktlage $(x_{gA,temp}, y_{gA,temp}, z_{gA,temp})$ und Radius $r_{gA,temp}$ über Parameter verändert werden können. Jedem Keim wird eine Instanz der Vorlage zugewiesen und deren Parameter so angepasst, dass Keim und Mittelpunkt zusammenfallen. Die n_K Keime umfassende Menge P und die Menge der ebenfalls n_K Instanz-Mittelpunkte sind damit kongruent. Die Radien $r_{gA,temp}$ werden für alle Instanzen global festgelegt, was die gezielte Einstellung eines gewünschten Porositätsgrades Φ ermöglicht. Ein Radius $r_{gA,temp} = 0$ entspricht einer Porosität $\Phi = 100\%$. Mit zunehmendem Radius verringert sich diese bis zum Erreichen eines porositätsfreien Zustandes $\Phi = 0\%$.

Jede Instanz der Vorlage repräsentiert ein noch genauer zu definierendes Korn. Für alle Instanzen werden hierfür – beispielsweise anhand der Abstände deren Mittelpunkte zueinander und des globalen Radius – die direkt benachbarten Instanzen ermittelt. Unter Verwendung der Mengenlehre kann eine potenzielle Nachbarschaft einer Instanz A , also einem noch abstrakten Korn, und einer Instanz C über Bedingung (5.1) geprüft werden.

$$|A \setminus C| < A \quad (5.1)$$

Allerdings muss berücksichtigt werden, dass das aus A entstehende endgültige Korn B nur eine Teilmenge $B \subseteq A$ von A ist. Gleiches gilt für Korn D , welches sich als Teilmenge $D \subseteq C$ ausbildet. Sind für eine Instanz alle potenziellen Nachbarinstanzen bekannt, werden diese miteinander verschnitten, so dass alle im Ausgangsvolumen befindlichen Punkte eindeutig einem einzigen Keim zugewiesen werden. Danach wird für sämtliche Körner der so generierten Kornstruktur über Boolesche Operationen die Schnittmenge mit dem eigentlichen Bauteil gebildet. Damit liegt eine geometrische Beschreibung des aus Körnern aufgebauten Bauteils vor. Diese wird für die Erstellung eines Finite Elemente Netzes verwendet. Dabei werden benachbarte Kornoberflächen, also die späteren Korngrenzen, identifiziert und ein einzelnes, für beide Körner verwendbares Flächennetz erzeugt. Sind sämtliche Flächen vernetzt, wird für alle Körner eine Volumenvernetzung auf Basis der sie jeweils umgebenden Flächennetze durchgeführt.

Die geometrische Beschreibung des Bauteiles mit Kornstruktur und etwaigen Poren ist damit abgeschlossen.

Der Ablauf des geometriebasierten Ansatzes ist in den Abbildungen 5.3 und 5.4 dargestellt. Die Festlegung der kristallographischen Orientierungen erfolgt nach abgeschlossener Vernetzung des polykristallinen Bauteiles (→ Abschnitt 5.4).

Abbildung 5.4 Prinzipielle Vorgehensweise beim geometriebasierten Ansatz – ① Generierung der Keime → ② Zuweisung der Parameter zur Vorlage → ③ Identifikation potenzieller Nachbarn → ④ Ermittlung der Korngeometrie → ⑤ Zusammenfügen der einzelnen Körner → ⑥ Ausschneiden des Bauteils → ⑦ finales Bauteil (hier mit Ansicht der inneren Kornstruktur)

Eine Implementierung des geometriebasierten Ansatzes kann in gängigen CAD- oder CAE-Umgebungen vorgenommen werden (→ Anhang A.5). Die darin verfügbaren Werkzeuge erlauben meist auch eine einfache integrierte Ermittlung zusätzlicher Daten wie Kornvolumina oder Porosität, die für einen Abgleich mit realen Kornstrukturen notwendig sind. Ein Beispiel für einen Probekörper bestehend aus 1.500 Körnern samt mit Schlibfbildern vergleichbaren Schnitten zeigt Abbildung 5.5. Es ist erkennbar, dass der Körper neben der Kornstruktur auch Poren aufweist.

5.3.2 Finite Elemente basierter Ansatz

Für den Finite Elemente basierten Ansatz wird die CAD-Geometrie des Bauteiles direkt diskretisiert. Das Finite Elemente Netz kann auf konventionelle Weise unter Verwendung eines Finite Elemente Präprozessors erzeugt werden. Dabei ist darauf zu achten, dass das Netz sich zum Bauteilinneren hin nicht – wie teils zur Reduktion der Anzahl der Finiten Elemente vorgenommen – vergrößert. Die Größe der Finiten Elemente sollte im relevanten Bauteilvolumen in etwa gleich sein. Wie beim geometriebasierten Ansatz ist daneben eine Menge P an Keimen zu erzeugen (→ Abschnitt 5.3.4). Das diskretisierte

Abbildung 5.5 Ein Würfel bestehend aus insgesamt $n_K = 1.500$ Körnern. Im vorderen Bereich sind mehrere Poren zu erkennen. Schnitte wie die drei dargestellten ermöglichen einen Abgleich der Parameter mit realen Kornstrukturen.

Modell wird in der Folge in einen Polykristall unterteilt. Dies geschieht durch eine Zuweisung der Finiten Elemente zu den Keimen. Um dies zu erreichen, wird in einem ersten Schritt der Schwerpunkt jedes Elementes anhand dessen Knoten bestimmt. Im anschließenden Schritt wird für sämtliche Elemente der Abstand deren Schwerpunkte zu den Keimen bestimmt. Die Zuweisung eines Elementes zu einem Keim erfolgt auf Basis der geringsten Distanz. Die Gruppe der Elemente um einen Keim repräsentiert damit das aus ihm entstehende Korn. Der Grundgedanke dieser Herangehensweise entspricht damit dem des geometriebasierten Ansatzes. Über einen Radius r_{FEA} können auch hier verschiedene Porositätsgrade erzeugt werden. Elemente, deren geringster Abstand zu einem Keim größer ist als r_{FEA} , werden verworfen – es entstehen Poren. Ein zunehmender Radius r_{FEA} ermöglicht die Abbildung von Kornwachstum, wobei sich die Porosität bis zum Erreichen eines porositätsfreien Zustandes kontinuierlich verringert. Für jeden Zwischenschritt kann ein Finite Elemente Modell gesichert werden, so dass das Bauteil bei gleicher Kornstruktur, aber verschiedenen Porositätsgraden betrachtet werden kann. Abschließend werden die kristallographischen Orientierungen festgelegt (→ Abschnitt 5.4).

Abbildung 5.6 zeigt den Ablauf des Finite Elemente basierten Ansatzes. In Abbildung 5.7 ist exemplarisch eine mit Hilfe des Finite Elemente basierten Ansatzes generierte polykristalline Zugprobe mit unterschiedlichen Kornanzahlen und Porositätsgraden dargestellt.

Abbildung 5.7 Eine mit Hilfe des Finite Elemente basierten Ansatzes erzeugte Zugprobe mit 20 (links), 200 (Mitte) und 2000 (rechts) Körnern

5.3.3 Vergleich beider Ansätze

Mit dem geometriebasierten und dem Finite Elemente basierten Ansatz stehen zwei unterschiedliche Herangehensweisen zur Verfügung, deren Vor- und Nachteile für die weiteren Untersuchungen gegenüberzustellen sind. In diesem Abschnitt werden die beiden Ansätze daher verglichen.

Der Finite Elemente basierte Ansatz, insbesondere in Kombination mit einer Keimgenerierung gemäß der Methode `element` (→ Abschnitt 5.3.4), ist äußerst effizient. Dies ermöglicht die rasche Erstellung einer Vielzahl verschiedener Kornstrukturen auch mit unterschiedlichen Charakteristika wie mittlerem Korndurchmesser oder Porosität. Des Weiteren ist es auf vergleichsweise einfache Art und Weise möglich, nahezu beliebig realitätsnahe physikalische Effekte z. B. hinsichtlich des Kornwachstums zu integrieren. So kann eine Berücksichtigung der Rekristallisation auf der Basis orientierter Keimbildung und orientierten Keimwachstums nach Reher²⁵⁷ erfolgen, indem die Finiten Elemente als Zellen betrachtet werden. Darüber hinaus kann die betrachtete Komponente wie gewohnt mit einem Finite Elemente Netz versehen werden. Damit können einerseits bereits aus dem Produktentwicklungsprozess vorhandene Modelle verwendet werden, andererseits wird während aller Analysen auf dasselbe Netz zurückgegriffen. Dies ist insofern von Nutzen, als dass die Netzqualität bei allen Analysen unverändert bleibt. Zudem können bei einem Vergleich von lokal vorliegenden Größen wie Spannungen oder Deformationen exakt dieselben Knoten betrachtet werden.

²⁵⁷siehe Reher (1998)

Die Aufbereitung einer Geometrie für Finite Elemente Analysen gestaltet sich bei Verwendung des geometriebasierten Ansatzes aufwändiger. Prinzipiell stehen bei diesem ähnliche Möglichkeiten zur Verfügung wie beim Finite Elemente basierten Ansatz. Allerdings ist das Finite Elemente Netz dabei für jede einzelne Kornstruktur neu zu generieren, was zwar automatisiert abläuft, jedoch zu einem in der vorliegenden Implementierung teils mehr als doppelt so hohen Zeitaufwand führt. Ein Vorteil dieses Ansatzes ist die genauere geometrische Beschreibung der Körner, während bei Verwendung des Finite Elemente basierten Ansatzes die Korntopologie von der Vernetzung abhängig ist, vgl. Abbildung 5.8. Daneben ist eine Integration in gängige CAD-Umgebungen möglich, womit eine einfache Parametrisierbarkeit des Modells erreicht werden kann.

Abbildung 5.8 Gegenüberstellung der Geometrie eines Kornes – geometriebasierter Ansatz (links) und Finite Elemente basierter Ansatz mit unterschiedlich feiner Diskretisierung (Mitte und rechts)

Da für statistische Analysen eine Vielzahl an Versuchen erforderlich ist, bietet sich die Verwendung des Finite Elemente basierten Ansatzes an. Jedoch ist zuvor zu prüfen, ob und inwieweit die damit einhergehende Korntopologie Einfluss auf die Ergebnisse ausübt. Die mit Hilfe des geometriebasierten Ansatzes erzielbare Topologie wird als Referenz herangezogen, da derartige Geometrien in der Literatur als adäquate Modelle der Realität anerkannt sind.²⁵⁸ Für einen Vergleich der Ansätze wird eine quadratische Zugprobe verwendet und drei Modelle abgeleitet. Modell M_1 wird mit Hilfe des geometriebasierten Verfahrens, die Modelle M_2 und M_3 hingegen mit dem Finite Elemente basierten Verfahren mit Kornstrukturen versehen. Die Anzahl der Elemente der beiden Modelle M_1 und M_2 entsprechen einander in etwa, wohingegen Modell M_3 aus der vierfachen Anzahl an Elementen besteht. Die für die aus $n_K = 50$ Körnern bestehenden Kornstrukturen verwendeten Keime und Kornorientierungen sind bei beiden Ansätzen der Vergleichbarkeit wegen identisch. Insgesamt werden bei jedem Modell 50 verschiedene Kornstrukturen betrachtet. Während die Vernetzung im Falle von Modell M_1 für jede Kornstruktur individuell erstellt wird, bleibt das Finite Elemente Netz der beiden Modelle M_2 und M_3 stets gleich. In Anlehnung an Metz²⁵⁹ wird als Werkstoff mit Zirkoni-

²⁵⁸siehe z. B. Fritzen et al. (2009); Redenbach (2009); Lautensack (2007); Bäker (2009); Kröner (1986)

²⁵⁹siehe Metz (2008)

umdioxid (ZrO_2) eine Hochleistungskeramik mit ausgeprägter Anisotropie eingesetzt. Abbildung 5.9 fasst die Ergebnisse der Untersuchung zusammen. Betrachtet werden die modellspezifischen Dehnungsenergien. Ähnliche Ergebnisse liefert ein Vergleich der jeweils auftretenden größten Spannungen.

Abbildung 5.9 Vergleich der Analyseergebnisse bei gleichem Korngefüge, jedoch unterschiedlichen Ansätzen – geometriebasierter Ansatz (links oben) und Finite Elemente basierter Ansatz mit unterschiedlich feiner Diskretisierung (rechts oben und links unten)

Die maximale Abweichung der Mittelwerte μ_{M_2} und μ_{M_3} der 50 Analysen im Vergleich zum Referenzwert μ_{M_1} beträgt weniger als 0,5%. Die für das in Kapitel 7 vorgestellte Prozessmodell wichtige Standardabweichung differiert ebenfalls nur geringfügig. Die maximale Abweichung von s_{M_2} und s_{M_3} im Vergleich zum Referenzwert s_{M_1} beträgt weniger als 0,1%. Mit einer maximalen Abweichung von ca. 1,5% liegen auch die Ergebnisse einzelner Analysen eng beieinander. Bereits die Vernetzung von Modell M_2 liefert nahezu die gleichen Ergebnisse wie Modell M_1 .

Mit dem Finite Elemente basierten Ansatz steht folglich ein im Vergleich zum geometriebasierten Referenzansatz hinreichend genaues und im Hinblick auf die erforderliche Rechenzeit effizientes Verfahren zur Analyse mikromechanischer Bauteile bereit.

5.3.4 Generierung der Keime

Für die Erzeugung der Keime sowie einige der in der weiteren Arbeit vorgestellten Methoden sind zufallsbehaftete Versuche, in diesem Fall Simulationen, erforderlich. Hierzu werden *Zufallszahlen* und damit entsprechende -generatoren benötigt. Werden die Zufallszahlen rechnerbasiert ermittelt, so können lediglich sogenannte *Pseudozufallszahlen* generiert werden. Die Zufallszahlen sind somit nicht wirklich zufällig, sondern werden gemäß eines bestimmten deterministischen Algorithmus und Startwerten ermittelt. Neben Anforderungen an ihre Verteilung ist daher ein entscheidendes Kriterium für die Güte von Zufallszahlen, ob das Ergebnis der Generierung als unabhängig von früheren Ergebnissen angesehen werden kann. Insbesondere im Umfeld der Simulation, z. B. bei Monte Carlo Simulationen (\rightarrow Abschnitt 2.5.1), kommt Pseudozufallszahlen eine hohe Bedeutung zu. Die mögliche Anzahl in Folge generierbarer Pseudozufallszahlen ist stets begrenzt. Aus diesem Grund muss die Generierung der (Pseudo-)Zufallszahlen auf eine für das jeweilige Problem geeignete Art und Weise erfolgen.

In dieser Arbeit wird der von Matsumoto / Nishimura vorgeschlagene *Mersenne-Twister-Algorithmus*²⁶⁰ verwendet, wobei die Variante MT19937 zum Einsatz kommt. Er basiert auf der linearen Rekursion

$$\mathbf{x}_{k+n} := \mathbf{x}_{k+m} \oplus (\mathbf{x}_k^u | \mathbf{x}_{k+1}^l)A, \quad k = 0, 1, \dots \quad (5.2)$$

wobei \mathbf{x} die Werte, n der Rekursionsgrad, m die Anzahl paralleler Sequenzen ($1 \leq m \leq n$), A eine $w \times w$ -Matrix, w die Wortbreite und \mathbf{x}^u sowie \mathbf{x}^l Bitmasken sind. Die Twist-Transformation A ist in der rationalen Normalenform definiert.

$$A = R = \begin{pmatrix} 0 & I_{w-1} \\ a_{w-1} & (a_{w-2}, \dots, a_0) \end{pmatrix} \quad (5.3)$$

Dabei sind \mathbf{a} die Koeffizienten der verdrillten Matrix in rationaler Normalenform und I_{n-1} die $(n-1) \times (n-1)$ -Identitätsmatrix. Der Mersenne Twister ist stufenförmig mit einer sogenannten Tempering-Transformation verknüpft, um die reduzierte Dimensionsgröße der Gleichverteilung zu kompensieren, vgl. Gleichungen (5.4) bis (5.7).²⁶¹

$$\mathbf{y} := \mathbf{x} \oplus (\mathbf{x} \gg u) \quad (5.4)$$

$$\mathbf{y} := \mathbf{y} \oplus ((\mathbf{y} \ll s) \text{ AND } \mathbf{b}) \quad (5.5)$$

$$\mathbf{y} := \mathbf{y} \oplus ((\mathbf{y} \ll t) \text{ AND } \mathbf{c}) \quad (5.6)$$

$$\mathbf{z} := \mathbf{y} \oplus (\mathbf{y} \gg l) \quad (5.7)$$

Bei \mathbf{b} und \mathbf{c} sowie s und t handelt es sich um für das Tempering erforderliche Bitmas-

²⁶⁰vgl. Matsumoto / Nishimura (1998)

²⁶¹vgl. Matsumoto / Kurita (1994)

ken²⁶² bzw. Bit-Shifts²⁶³. Ausführlichere Informationen zum Algorithmus finden sich in der genannten Literatur.

Der Mersenne Twister ist aufgrund seiner Eigenschaften ein in den Ingenieurwissenschaften gebräuchlicher Algorithmus. Er ermöglicht die schnelle Erzeugung hochwertiger Pseudozufallszahlen-Sequenzen mit einer Periode von $2^{19937} - 1$. Die Sequenzen sind hochgradig gleichverteilt²⁶⁴, was in einer sehr kleinen Korrelation zwischen den Folgen der Ausgabesequenz resultiert.

Für die Generierung der Keime innerhalb einer gegebenen Geometrie werden in G/Struct mehrere Methoden zur Verfügung gestellt. Alle der im Folgenden vorgestellten Methoden beruhen auf mit Hilfe des Mersenne-Twister-Algorithmus erstellten Zufallspunkten. Ebenfalls gemein ist allen Methoden, dass vor der eigentlichen Keimerzeugung für jedes Finite Element anhand dessen Knoten der Schwerpunkt ermittelt wird. Für jedes Element wird anhand des Abstandes zwischen sämtlichen erzeugten Keimen und dem jeweiligen Elementschwerpunkt dessen Zugehörigkeit zu einem Korn definiert. Jedem Keim werden diejenigen Finiten Elemente zugeordnet, die zu ihm den geringsten Abstand aufweisen.

Allgemein erfordert die Unterteilung eines gegebenen Raumes S in n_K Körner, dass sich diese nicht durchdringen und – falls keine Porosität berücksichtigt werden soll – spätestens nach der letzten Iteration den gesamten Raum S einnehmen. Ausgehend von n_K Keimen, die der Anzahl der gewünschten Körner entspricht, wird jedem Keim eine Menge $G(x_i)$ zugewiesen, welche aus Punkten besteht, deren Abstand zu Keim x_i kleiner oder gleich zu jedem anderen Keim der Menge P ist, vgl. Gleichungen (5.8) und (5.9). Die Punkte der Menge P werden im Folgenden auch als *Keime* bezeichnet.

$$P = \{x_1, x_2, \dots, x_{n_K}\} \subset S \quad (5.8)$$

$$G(x_i) = \bigcap_{x_j \in P \setminus \{x_i\}} \{y \in S \mid \|y - x_i\| \leq \|y - x_j\|\} \quad (5.9)$$

Ein distanzbasierter Algorithmus ermöglicht die Abbildung des *Kornwachstums* durch Zuweisung der Finiten Elemente zu den gegebenen Keimen nach obigem Verfahren. Bei Betrachtung einer gegebenen Anzahl an Körnern n_K kann das Gesamtvolumen $V_{a,t}$, welches von den Körnern zu einem bestimmten Zeitpunkt t eingenommen wird, nach Gleichung (5.10) ermittelt werden. Die zum Zeitschritt t dem Korn i zugeordnete Anzahl

²⁶²Eine Bitmaske ist eine mehrstellige Binärzahl, mit deren Hilfe (Teil-)Informationen aus einer anderen Binärzahl gelesen oder gespeichert werden können.

²⁶³Bei einem Bit-Shift werden Bits um eine definierte Anzahl an Stellen nach links oder rechts verschoben (geschiftet). Ein Links-Shift wird durch den Operator \ll , ein Rechts-Shift durch den Operator \gg gekennzeichnet. Links davon steht die Zahl, deren Bits verschoben werden sollen, rechts davon die Anzahl der Stellen.

²⁶⁴eine Gleichverteilung wurde bis zur Dimension 623 bewiesen

an Elementen mit dem Volumen V_j entspricht $m_{i,t}$.

$$V_{a,t} = \sum_{i=1}^{n_K} \sum_{j=1}^{m_{i,t}} V_j \quad (5.10)$$

Die Porosität Φ_t kann gemäß Gleichung (5.11) mit Gleichung (5.10) und dem Gesamtvolumen V_c des Bauteiles, welches aus n_{FE} Elementen besteht, mittels des Verhältnisses von noch nicht zugewiesenem Volumen zum Gesamtvolumen ermittelt werden.

$$\Phi_t = 1 - \frac{V_{a,t}}{V_c}, \quad V_c = \sum_{k=1}^{n_{FE}} V_k \quad (5.11)$$

Im Folgenden werden die im Rahmen der Arbeit entwickelten und im Softwarepaket G/Struct implementierten Methoden zur Generierung der Kornstrukturen mit besonderem Fokus auf den Finite Elemente basierten Ansatz vorgestellt. Sämtliche Angaben erfolgen in Form eines Inputfiles. Details zum Aufbau eines solchen Inputfiles können dem Anhang entnommen werden (\rightarrow Anhang A.2).

Die Methode hardcore

Für jeden neu erzeugten Keim x_i kann über den Parameter `hardcore` optional geprüft werden, ob zu den bereits erzeugten Keimen ein zu definierender *Mindestabstand* r_{min} eingehalten wird. Die erzeugten Keime erfüllen damit Bedingung (5.12).

$$\|x_i - x_j\|_2 > r_{min} \quad \forall x_i, x_j \in P : x_i \neq x_j \quad (5.12)$$

Liegt der neu erzeugte Keim zu nahe bei einem oder mehreren anderen, so wird er verworfen, ein neuer Keim erzeugt und die Prüfung erneut durchgeführt. Wird diese Schleife zu häufig durchlaufen, ist davon auszugehen, dass der gewünschte minimale Keimabstand nicht einhaltbar ist. Die Generierung wird daher unterbrochen und der Mindestabstand nach unten korrigiert. Abbildung 5.10 zeigt die Prüfung der Einhaltung des Mindestabstandes r_{min} eines neu erzeugten Keimes in einem Umfeld mit bereits für die Verwendung akzeptierten Keimen.

Diese Anlehnung an *Hardcore-Voronoi-Mosaik*²⁶⁵ bietet die Möglichkeit, die Keimverteilung so zu steuern, dass im Vergleich zu einer nicht restringierten Keimerzeugung regelmäßigerer Körner erzeugt werden können. Insbesondere die hier betrachteten Mikrobauteile besitzen aufgrund ihres großen Verhältnisses von Oberfläche zu Volumen tendenziell eher regelmäßige Körner.²⁶⁶

²⁶⁵siehe Fritzen et al. (2009); Lautensack (2007)

²⁶⁶vgl. z. B. Ksanická (2008); Auhorn (2005)

Abbildung 5.10 Überprüfung des Mindestabstandes der Keime zueinander. Der hier zu prüfende Keim wird im weiteren Verlauf verworfen.

Die Methode `box`

Bei der Methode `box` wird im Falle eines dreidimensionalen Modells ein Quader, im Falle eines zweidimensionalen Modells ein Rechteck um das betrachtete Bauteil gelegt. Lage und Größe des Quaders bzw. des Rechtecks sind vorab über den Parameter `boxsize` zu definieren. Ansonsten erfolgt eine automatische Ermittlung des kleinstmöglichen Quaders bzw. Rechtecks um das Bauteil, wobei die Kanten ausschließlich parallel zu den Hauptkoordinatenachsen des Modells ausgerichtet werden. Innerhalb des Quaders bzw. Rechtecks wird anschließend die gewünschte Anzahl n_K an Keimen erzeugt.

Abbildung 5.11 zeigt die Keimgenerierung anhand eines einfachen Körpers. Die Koordinaten der Keime liegen innerhalb des Quaders bzw. Rechtecks, jedoch können Keime entstehen, die soweit von den das Bauteil beschreibenden Finiten Elementen entfernt sind, dass ihnen später keine Finiten Elemente zugewiesen werden. Aus diesem Grund kann bei Verwendung dieser Methode nicht garantiert werden, dass die im Bauteil generierte Kornanzahl der Anzahl der Keime entspricht.

Die Methode kann zur Erzeugung einer regelmäßigen Kornstruktur mit der Methode `hardcore` kombiniert werden.

Die Methode `auto`

Ähnlich wie bei der Methode `box` wird bei der Methode `auto` zunächst automatisch ein Quader bzw. ein Rechteck um das mit Kornstruktur zu versehenende Bauteil gelegt. Zusätzlich wird anhand des Parameters ϵ ein *Toleranzradius* definiert. Mit diesem wird gewährleistet, dass die erzeugten Keime mit einer definierten Toleranz innerhalb des Bauteiles liegen. Der Methode `box` entsprechend, wird eine bestimmte Menge n_K von Keimen innerhalb der Box erzeugt. Ein Keim i wird jedoch nur dann beibehalten, wenn

Abbildung 5.11 Keimerzeugung innerhalb eines vorgegebenen Rechtecks

gemäß Bedingung (5.13) der Abstand $\Delta_{min,i}$ zu mindestens einem der Elementschwerpunkte gleich oder geringer ist als ϵ .

$$\Delta_{min,i} \leq \epsilon \quad \forall x_i \in P \quad (5.13)$$

Ist diese Bedingung nicht erfüllt, so wird der Keim verworfen und ein neuer Keim erzeugt. Auf diese Weise wird gewährleistet, dass keine Keime entstehen, denen im weiteren Verlauf keine Elemente zugewiesen werden. Abbildung 5.12 zeigt einen Keim x_i , dessen geringster Abstand zu einem Elementschwerpunkt $\Delta_{min,i}$ größer ist als ϵ . Aus diesem Grund wird der Keim im weiteren Verlauf verworfen und ein neuer Keim generiert.

Abbildung 5.12 Keimerzeugung mit Toleranzradius

Die zusätzliche Prüfung, ob ein Keim innerhalb des Bauteiles liegt, macht die Methode aufwändiger als die zuvor genannte Methode `box`. Ergänzend kann wie zuvor beschrieben für jeden neu erzeugten Keim ein Mindestabstand zu den bereits erzeugten Keimen überprüft werden.

Die Methode `element`

Bei der Methode `element` werden keine zusätzlichen Parameter benötigt. Die Keime werden im Gegensatz zu den Methoden `box` und `auto` nicht durch zufällige Koordinaten erzeugt, sondern anhand der zuvor berechneten *Elementschwerpunkte*, vgl. Abbildung 5.13. Es werden n_K Zufallszahlen im Zahlenbereich der Anzahl der Finiten Elemente erzeugt. Die Schwerpunkte derjenigen Elemente, deren individuelle Identifikationsnummer mit den erzeugten Zufallszahlen übereinstimmen, dienen als Keime für die Körner. Damit wird auf einfache Weise sichergestellt, dass sämtliche Keime innerhalb des Bauteilvolumens S liegen. Wie bei den Methoden `box` und `auto` kann für ein vorgegebener Mindestabstand zu den bereits erzeugten Keimen überprüft werden.

Abbildung 5.13 Keimerzeugung mit direkter Verwendung der Elementschwerpunkte

Die auf Elementschwerpunkten basierende Methode ist äußerst effizient und eignet sich damit besonders dann, wenn wie z. B. in Kapitel 7 eine große Anzahl an Kornstrukturen erzeugt werden soll.

Die Methode `import`

Bei dieser Methode werden die Koordinaten der Keime aus einer zuvor erstellten Datei importiert. Dadurch kann auch bei verschiedenen Analysen eine stets gleiche Kornstruktur verwendet werden.

Steuerung der Keimverteilung

Bei den im Rahmen des Sonderforschungsbereiches 499 betrachteten Bauteilen entstehen aufgrund des großen Verhältnisses von Oberfläche zu Volumen nahezu keine

unterschiedlich ausgeprägten Zonen (→ Abschnitt 2.7.4). Stattdessen bildet sich eine über das gesamte Bauteil gleichmäßige Kornstruktur aus. Aus diesem Grund sind für die im Rahmen der vorliegenden Arbeit betrachteten Bauteile die in diesem Abschnitt beschriebenen Aspekte nur von geringerer Bedeutung. Der modulare Aufbau des Softwarepaketes G/Struct ermöglicht jedoch auch die Generierung derartiger Kornstrukturen.

Sind unterschiedliche Korngrößen und etwaige Zonen abzubilden, so kann die Keimverteilung mit Hilfe von Funktionen über zusätzliche Module gesteuert werden. Abbildung 5.14 zeigt zwei sich ausbildende Kornstrukturen innerhalb eines einfachen dreidimensionalen Probekörpers mit den Abmaßen $30 \times 10 \times 10 \mu\text{m}^3$. Innerhalb des aus $n_{FE} \approx 500.000$ Tetraederelementen bestehenden Probekörpers werden mit Hilfe des Finite Elemente basierten Ansatzes $n_K = 100$ Keime generiert. Die Keimbildungswahrscheinlichkeit ist im unteren der beiden Probekörper als Funktion einer Raumkoordinate vorgegeben. Trotz gleicher Anzahl an Keimen führt dies zu unterschiedlichen Verteilungen selbiger. Hieraus resultieren entsprechend unterschiedlich ausgebildete Kornstrukturen. Zur Charakterisierung der Kornstrukturen kann – wie in der Kristallographie üblich – die Häufigkeit der auftretenden Kornvolumina in Form von Histogrammen herangezogen werden, vgl. Abbildung 5.15.

Des Weiteren ist es prinzipiell möglich, Kornstrukturen mit bevorzugter Wachstumsrichtung zu erzeugen. In Kombination mit einer entsprechend angepassten Kornorientierung kann so eine Textur erzeugt werden.

5.4 Modellierung der Materialeigenschaften

Neben der geometrischen Beschreibung der Kornstruktur muss das Verhalten des Materials abgebildet werden. Für die Modellierung des Materialverhaltens der Polykristalle werden in Anlehnung an die Arbeiten von Weyer²⁶⁷, Fröhlich²⁶⁸ und Metz²⁶⁹ zunächst einige Annahmen getroffen. So wird davon ausgegangen, dass die betrachteten Körner ein ausreichendes Volumen einnehmen, so dass sie mit Hilfe der *Kontinuumsmechanik* beschrieben werden können. Zusätzlich wird vorausgesetzt, dass die Körner keine Fehler beinhalten, so dass die Materialeigenschaften mit idealen *Einkristallparametern* abgebildet werden können. Die Orientierung benachbarter Körner wird als unabhängig voneinander angenommen. Zur Beschreibung der Kornorientierung wird – wie in der Kristallographie üblich²⁷⁰ – auf die *Eulerschen Winkel* zurückgegriffen. Diese stellen neben anderen Möglichkeiten wie z. B. Quaternionen eine einfache Beschreibung der Orientierung von Objekten im dreidimensionalen Raum mit Hilfe von drei Winkeln dar.

²⁶⁷siehe Weyer (2001)

²⁶⁸siehe Fröhlich (2001)

²⁶⁹siehe Metz (2008)

²⁷⁰vgl. Bunge (1983)

Abbildung 5.14 Steuerung der Keimverteilung

Abbildung 5.15 Histogramme des Kornvolumens bezogen auf das Bauteilvolumen bei Verwendung unterschiedlicher Keimverteilungen ($30 \times 10 \times 10 \mu\text{m}^3$, $n_K = 100$, $\Phi = 0\%$)

Die Winkel definieren jeweils eine Rotation um festgelegte Achsen und damit eine Transformation zwischen zwei (kartesischen) Koordinatensystemen. Die Rotationsmatrix gemäß der (Z, X', Z'')-Konvention entspricht Gleichung (5.14). Bei dieser Definition wird der Körper zunächst um einen Winkel ψ um die z-Achse Z des globalen Koordinatensystems gedreht. Anschließend wird um die auf diese Weise neu orientierte x-Achse X' eine Rotation um den Winkel θ durchgeführt. Zuletzt erfolgt eine Drehung um den Winkel ϕ um die durch die beiden zuvor vorgenommenen Rotationen neu erhaltene z-Achse Z''.²⁷¹

$$R = \begin{pmatrix} \cos \psi \cos \phi - \cos \theta \sin \phi \sin \psi & -\sin \psi \cos \phi - \cos \theta \sin \phi \cos \psi & \sin \theta \sin \phi \\ \cos \psi \sin \phi + \cos \theta \cos \phi \sin \psi & -\sin \psi \sin \phi + \cos \theta \cos \phi \cos \psi & -\sin \theta \cos \phi \\ \sin \psi \sin \theta & \cos \psi \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \quad (5.14)$$

Die Körner werden als Einkristalle mit anisotropem, linear-elastischem Verhalten angenommen. Die Korngrenzen können prinzipiell als separate Phase im Modell betrachtet werden. Nach Kröner²⁷² nehmen die Korngrenzen jedoch nur einen sehr geringen Volumenanteil ein, so dass sie in den meisten Fällen vernachlässigt werden können.²⁷³

Materialeigenschaften wie die Dichte können in der Regel durch die Angabe eines numerischen Wertes beschrieben werden. Dahingegen wird die Textur aufgrund ihrer Komplexität – es sind die räumlichen Orientierungen mehrerer hundert bis hin zu Millionen einzelner Körner zu charakterisieren – mit Hilfe von Diagrammen repräsentiert. Neben Polfiguren werden zur quantitativen Beschreibung der Textur eines polykristallinen Körpers die Orientierungsdichteverteilungsfunktion (ODF – Orientation Distribution Function) verwendet.²⁷⁴ Für die einzelnen Kristallite wird dabei eine Transformation zwischen proben- und kristallfestem Koordinatensystem vorgenommen. Hierzu werden die o. g. Eulerschen Winkel $g = (\psi, \theta, \phi)$ herangezogen. Die Menge aller Orientierungen g spannt dann den sogenannten Euler- oder G-Raum auf. Der Volumenanteil der Kristallite mit Orientierung g kann mit Hilfe des Funktionswertes

$$ODF(g) = \frac{1}{V} \frac{dV(g)}{dg} \quad (5.15)$$

angegeben werden. Häufig wird dieser auf rechtwinkligen Koordinatenachsen als Menge von Schnitten durch den dreidimensionalen G-Raum dargestellt. Anhand des Diagramms kann beispielsweise der regellose Anteil der Textur, also der Anteil der zufällig orientierten Kristallite an der Gesamttextur, ermittelt werden.

²⁷¹Die hier dargestellte Definition stellt lediglich eine von mehreren möglichen Definitionen für die Eulerschen Winkel dar. Die Definitionen unterscheiden sich in der Wahl und Reihenfolge der Drehachsen. Die den Definitionen zugehörigen Drehmatrizen transformieren die Koordinaten des zu rotierenden Körpers. Bei der hier angegebenen Drehmatrix handelt es sich um eine der etablierten Definitionen.

²⁷²vgl. Kröner (1986)

²⁷³vgl. auch Metz (2008)

²⁷⁴siehe Wassermann / Grewen (1962); Bunge (1983); Helming (1996)

5.5 Zusatzaufwand

Insbesondere aufgrund der z. B. für Monte Carlo Simulationen erforderlichen großen Anzahl an Analysen mit jeweils individuellen Kornstrukturen muss der für Modellierung und Simulation entstehende zusätzliche Aufwand berücksichtigt werden. Die für die Modellierung einer einzelnen Kornstruktur notwendige Zeit hängt bei den vorgestellten Methoden von Parametern wie beispielsweise der Anzahl der Keime ab. Die eigentliche Analyse nimmt im Vergleich zu einer konventionellen, mit isotropem Materialverhalten durchgeführten Analyse aufgrund der gestiegenen Komplexität ebenfalls mehr Zeit in Anspruch. Generell kann der Zusatzaufwand für eine einzelne Analyse zwar nicht vernachlässigt, jedoch gut gehandhabt und abgeschätzt werden.

Im Allgemeinen kann für eine konservative Abschätzung mit einem Zuschlag von ca. einem Drittel auf die für die Analyse eines isotrop angenommenen Materialverhaltens notwendige Zeit getroffen werden. Für eine ausführlichere Beschreibung des Zusatzaufwandes, z. B. in Abhängigkeit der Anzahl der Keime, sei an dieser Stelle auf Albers / Enkler²⁷⁵ verwiesen.

²⁷⁵siehe Albers / Enkler (2007)

6 Validierung komplexer Mikrosysteme

Im vorangegangenen Kapitel wurden Methoden zur Berücksichtigung des Einflusses der Kornstruktur, der damit verbundenen Anisotropie und Defekten bei der Auslegung von komplexen, dreidimensionalen Mikrobauteilen entwickelt. Zunächst wurden diese zwecks Validierung zur Analyse einfacher Probekörper eingesetzt. Im Folgenden wird ein auf diesen Methoden aufbauender Prozess durchlaufen, der zusätzlich die Wechselwirkungen in einem realen System bei gesteigerter Modellkomplexität berücksichtigt. Damit wird in diesem Kapitel die Anwendbarkeit der Methode bei realen und komplexen Systemen aufgezeigt und die Nutzung und Einbindung während des Entwicklungsprozesses demonstriert. Als Beispiel wird das Planetengetriebe als Teil eines Gesamtdemonstratorsystems des Sonderforschungsbereiches 499 herangezogen.

6.1 Das Demonstratorsystem

In der ersten der insgesamt vier Phasen des Sonderforschungsbereiches 499 wurde mit den in Abschnitt 2.6.3 vorgestellten Urformtechnologien die Grundlage für die anschließenden Phasen gelegt. Während der folgenden Phase wurde am IPEK – Institut für Produktentwicklung zur Darstellung des Potenzials und der Einschränkungen dieser Herstellverfahren mit der Entwicklung eines Mikrosystems begonnen. Dabei wurden unter anderem neue Entwicklungsmethoden erarbeitet, die mikrospezifische Belange adressieren (→ Abschnitt 2.6.4). Ergebnis der zweiten Phase war ein Mikroaktor – ein Demonstratorsystem bestehend aus zwei miteinander verbundenen funktionalen Einheiten. Der Rotor einer druckluftbetriebenen *Mikroturbine* als erste Einheit treibt, verbunden über eine Welle, das Sonnenrad eines einstufigen *Mikroplanetengetriebes* als zweite Einheit an. Der Abtrieb erfolgt über den sogenannten Trägergrund, den Steg des Planetengetriebes. Abbildung 6.1 zeigt eine Explosionsdarstellung des Systems, Tabelle 6.1 fasst die wichtigsten Daten des im Folgenden betrachteten Planetengetriebes zusammen. Weitere Details können dem Anhang entnommen werden (→ Anhang A.1).

Das Planetengetriebe eignet sich aus verschiedenen Gründen für die folgenden Untersuchungen besonders. Einerseits bietet es ein ausgeglichenes Verhältnis von Designparametern, Ausgangsstreuungen und Modellierungskomplexität der einzelnen

Bauteile. Andererseits handelt es sich um ein auf makroskopischer Größenskala weit erforschtes System. Somit liegen typische Charakteristika aus der Literatur vor. Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass das Planetengetriebe physikalisch existiert und damit zumindest teilweise realen Versuchen unterzogen werden kann. Das Planetengetriebe und insbesondere die Planetenräder sind Gegenstand verschiedener Arbeiten²⁷⁶. Unter Mitarbeit des Autors vergleichen z. B. Albers et al.²⁷⁷ Prüfstands- und Simulationsergebnisse für Ein- und Zweiflankenwälzprüfungen der Planetenräder.

Abbildung 6.1 Das Demonstratorsystem bestehend aus druckluftbetriebener Turbine und Planetenstufe

Tabelle 6.1 Daten des Planetengetriebes

		Sonne	Planet	Hohlrad	Steg
Modul	[mm]	0,169	0,169	0,169	5,64 ¹
Zähnezahl	[–]	14	12	37	–
Tiefe	[mm]	0,156	0,156	0,200	0,140
Masse	[mg]	5,54	2,79	–	24,73

¹ Außendurchmesser des Steges

6.2 Modellbildung

6.2.1 Contact & Channel Modell des Systems

Gegenstand der Untersuchungen in diesem Kapitel ist ein mit Kornstruktur und Defekten versehenes Planetenrad des vorgestellten Demonstratorgetriebes. Zur Erstellung eines

²⁷⁶siehe z. B. Leslabay (2009); Albers et al. (2009c, 2008a); Metz (2008); Hauser (2007)

²⁷⁷siehe Albers et al. (2010a)

Simulationsmodells wird zunächst ein Modell mit Hilfe des C&CM generiert, anhand dessen anschließend das eigentliche Simulationsmodell abgeleitet werden kann.

Um komplexe Strömungssimulationen zu vermeiden, wird die Systemgrenze so gewählt, dass die Turbineneinheit außerhalb selbiger liegt. Die Untersuchungen fokussieren damit das Verhalten des Planetengetriebes. Die Auswirkungen von durch die druckluftbetriebene Antriebseinheit hervorgerufenen Effekten, z. B. ein aus weiteren Untersuchungen bekanntes und zeitlich nicht konstantes Drehmoment, sollen prinzipiell über den Systemeingang an der Sonnenwelle abgebildet werden können. Des Weiteren verläuft die Systemgrenze durch die Anbindung des Hohlrades an dessen Umwelt und die Welle des Trägergrundes als Systemausgang.

Das innerhalb der Systemgrenze befindliche Teilsystem – das einstufige Planetengetriebe bestehend aus Sonne, Planeten, Hohlrad und Trägergrund – gilt es im Folgenden detailliert zu beschreiben. Das Contact & Cannel Modell ist in Abbildung 6.2 dargestellt.

Das an der Welle des Steges gewünschte Ausgangsdrehmoment wird mit $M_{Ausgang} = 20 \text{ mNm}$ definiert. Dieser im Vergleich zum Stand der Technik²⁷⁸ ambitionierte Zielwert resultiert aus verschiedenen zuvor durchgeführten statischen Versuchen, bei welchen die Festigkeit der Zähne von Planetenrädern aus mehreren Produktionschargen ermittelt wurden. Die Drehzahl der Sonnenwelle wird als konstant angenommen, während das für das gewünschte Abtriebsdrehmoment erforderliche, an der Sonnenwelle anliegende Eingangsdrehmoment frei variieren kann. Diese Konfiguration zeigte sich in vorangegangenen Untersuchungen als vorteilhaft für die Simulation. Die Eingangsdrehzahl wird mit nur $n_{Eingang} = 10 \text{ min}^{-1}$ sehr niedrig gehalten, da dynamische Effekte nicht Gegenstand dieser Untersuchungen sind. In Abschnitt 6.3 wird zudem gezeigt, dass diese aufgrund der geringen Massen auch bei großen Beschleunigungen nur gering ausfallen.

Um die Belastung eines Planetenrades während des Betriebes möglichst realitätsnah abbilden zu können, werden innerhalb der Systemgrenze die direkt mit dem Planetenrad in Kontakt stehenden und damit am Belastungszustand beteiligten Komponenten – Sonnen- und Hohlrad sowie Trägergrund – modelliert. Da die Belastung dieser Komponenten hier jedoch nicht von Interesse ist, werden deren Tragstrukturen vereinfacht abgebildet. Im Falle des Sonnen- und Hohlrades wird ein isotropes Materialverhalten zur Annäherung des Verhaltens angenommen. Die in Voruntersuchungen²⁷⁹ identifizierten geringen Deformationen des Trägergrundes werden in diesem Modell vernachlässigt. Die Komponente Trägergrund und damit deren $LSS_{\text{Trägergrund}}$ wird daher als unendlich steif angenommen. Um die für die statistischen Analysen erforderliche möglichst geringe Simulationsdauer zu gewährleisten, werden ausschließlich ein einzelner Planet und relevante Segmente der Komponenten betrachtet. Sämtli-

²⁷⁸vgl. z. B. maxon motor GmbH (2010)

²⁷⁹Der Trägergrund wurde im Rahmen der Voruntersuchungen separat mit Hilfe der Finite Elemente Methode analysiert. Es wurde der ungünstigste Fall – die Übertragung des gesamten Drehmomentes über nur einen einzigen Lagerzapfen – betrachtet. Die Randbedingungen wurden aus einer vorangegangenen Systemsimulation ermittelt. Vgl. Maier (2006), Kap. 6

che Komponenten können sich ausschließlich planar, nicht jedoch in axialer Richtung bewegen. Die Übertragung der eingangsseitigen Drehbewegung erfolgt über die in Form einer steifen Leitstützstruktur $LSS_{\text{Sonnenwelle}}$ abgebildeten Sonnenwelle. Diese bildet mit dem innenliegenden Zylindermantel des Sonnenrades ein reibschlüssig verbundenes Wirkflächenpaar $WFP_{\text{Sonnenwelle/Sonne}}$. Über die sich mit der Drehbewegung ausbildende zeitvariante Leitstützstruktur des Sonnenrades LSS_{Sonne} wird die Last über das Wirkflächenpaar $WFP_{\text{Sonne/Planet}}$ in das Planetenrad eingeleitet. Ausgehend vom Funktionskontakt $FK_{\text{Sonne/Planet}}$ bildet sich in diesem eine ebenfalls zeitvariante und von der individuellen Kornstruktur geprägte Leitstützstruktur LSS_{Planet} aus. Die Lagerfläche des Planetenrades ist über das Wirkflächenpaar $WFP_{\text{Lagerzapfen/Planet}}$ und die als unendlich steif approximierte Leitstützstruktur $LSS_{\text{Lagerzapfen}}$ mit der Achse des Lagerzapfens verbunden. Das Planetenrad wird auf diese Weise frei drehbar auf dem Lagerzapfen gelagert, der wiederum fest mit der gleichfalls steifen Leitstützstruktur des Trägergrundes $LSS_{\text{Trägergrund}}$ verknüpft ist. Der Trägergrund selbst ist drehbar gelagert; die Drehachse fällt mit der des Sonnenrades zusammen und wird wie beschrieben mit dem Abtriebsmoment beaufschlagt. Das Planetenrad stützt sich über das Wirkflächenpaar $WFP_{\text{Hohlrad/Planet}}$ an der Innenverzahnung des Hohlrades ab. Die Anbindung an die Umwelt erfolgt über die sich zeitlich ändernde Leitstützstruktur LSS_{Hohlrad} und das daran anschließende Wirkflächenpaar $WFP_{\text{Hohlrad/Umwelt}}$. Durch dieses Wirkflächenpaar wird das Hohlrad fest mit der Umwelt verbunden. Das Planetengetriebe wird im Trockenlauf betrieben – im Falle einer Schmierung sind zusätzlich die Leitstützstruktur des Schmierstoffes und die weiteren Wirkflächenpaare zu berücksichtigen. Ergänzende Details des Modells können Abbildung 6.2 entnommen werden.

Lage und Form sämtlicher Wirkflächen entsprechen in den Analysen den den technischen Zeichnungen entnehmbaren idealen Soll-Vorgaben. Das beschriebene Modell bietet die Basis für eine Vielzahl weiterer Analysen, die z. B. die in der Realität ebenfalls streuenden Wirkflächenlagen und -formen berücksichtigen können. Diese sind jedoch nicht Bestandteil der vorliegenden Arbeit, deren Schwerpunkt auf den Auswirkungen materialbezogener Streuungen der Leitstützstrukturen liegt. Weitere anhand der Demonstratorkomponenten durchgeführte Analysen mit nicht idealer Bauteilgeometrie können zusätzlichen Untersuchungen des Autors entnommen werden.²⁸⁰

6.2.2 Finite Elemente Modell des Systems

Die Erstellung des Finite Elemente Modells erfolgt auf Basis des zuvor erstellten Contact & Channel Modells. Bei der Überführung in ein Finite Elemente Modell werden die näher zu untersuchenden Leitstützstrukturen mit Hilfe eines Finite Elemente Netzes repräsentiert. Hierzu wird die in Form von CAD-Daten vorliegende Geometrie herangezogen. Das Netz wird während der Studien nicht verändert. Zur automatisierten Modellierung

²⁸⁰siehe Albers et al. (2009c, d, f, 2008a, b, c)

Abbildung 6.2 Modellbildung des Planetengetriebes – Contact & Channel Modell von Sonne, Planet und Hohlrad einschließlich des in den Analysen herangezogenen LSS-Bereiches des Planeten

von Kornstruktur und Defekten innerhalb des Planetenrades wird die in Kapitel 5 vorgestellte Finite Elemente basierte Methode herangezogen. Die Untersuchungen werden anhand von zwei- und dreidimensionalen Modellen durchgeführt. Die Geometrie der betrachteten Bauteile erlaubt für die Erstellung des dreidimensionalen Modells eine Extrusion des zweidimensionalen Modells. Der Planet als untersuchtes Bauteil besteht im Falle des zweidimensionalen Modells aus insgesamt $n_{FE,2d} \approx 21.000$ linearen Viereckselementen, im Falle des dreidimensionalen Modells aus $n_{FE,3d} \approx 86.000$ linearen Hexaederelementen. Die aufgebrachten Randbedingungen und Lasten entsprechen denen des zuvor erstellten Contact & Channel Modells. Abbildung 6.3 zeigt das Netz des dreidimensionalen Modells. Es ist erkennbar, dass nur die für das betrachtete Zeitfenster relevanten Bereiche mit einem Netz versehen sind. Von den vernetzten Bauteilen wird ausschließlich das Planetenrad mit Kornstruktur betrachtet. Einen Ausschnitt aus einem Zahn und dessen Kornstruktur zeigt Abbildung 6.4.

Die Geometrie des Planeten entspricht der gewünschten Soll-Geometrie. Während aller in diesem Kapitel durchgeführten Analysen wird dessen Gesamtstruktur stets unverändert beibehalten. Um auch sonstige geometriebedingte Einflüsse ausschließen zu können, werden sämtliche Lagerstellen als ideal angenommen, d. h. sie werden ohne Spiel modelliert und in ihrer Nennlage positioniert. Die Rotationsachsen von Sonne, Steg und Hohlrad sind damit kollinear. Eine Rotation kann nur in derjenigen Ebene erfolgen, in der auch der Planet liegt.

Zur Abbildung der Wirkflächenpaare, die an den Zahneingriffen beteiligt sind, wird eine Kontaktformulierung ohne Reibung verwendet. Insbesondere im Bereich des Funktionskontaktes und damit dem wirksamen Bereich des betrachteten Wirkflächenpaars sind nur unzureichend genaue Analyseergebnisse zu erwarten.²⁸¹ Aus diesem Grund erfolgt eine Auswertung der Belastung ausschließlich im Bereich der Zahnfüße des Planetenrades. Hierzu werden statische und für die einzelnen Eingriffe relevante Teilbereiche der sich ausbildenden Leitstützstruktur definiert (vgl. Abbildung 6.2, Bereiche 1–4).

Als Material wird aufgrund der verhältnismäßig großen Körner und des zu erwartenden großen Einflusses der Kornstruktur Stabilor®G verwendet.²⁸² Auhorn²⁸³ untersucht in seiner Arbeit fünf solcher Chargen, deren mittlere Korndurchmesser zwischen $\bar{d}_{K,min} \approx 11 \mu m$ (Schleuderguss) und $\bar{d}_{K,max} \approx 64 \mu m$ (Vakuum-Druckguss) variieren. Werden alle fünf Chargen gemittelt, so ergibt sich ein mittlerer Korndurchmesser von $\bar{d}_{K,arith} \approx 35 \mu m$. Für die folgenden Untersuchungen wird daher von diesem mittleren Korndurchmesser ausgegangen. Das Material wird als linear-elastisch angenommen. Die Porositäten für diesen Werkstoff liegen in der Regel bei $\Phi \leq 3,5\%$, in Ausnahmefällen auch bei $\Phi > 6\%$.²⁸⁴

²⁸¹Der Friktionskontakt selbst steht nicht im Fokus der vorliegenden Arbeit. Eine detaillierte, Betrachtung des Friktionskontaktes zur Ermittlung des Reibwertes nimmt z. B. Nowicki vor. Vgl. Nowicki (2008)

²⁸²Die Materialdaten von Stabilor®G – Au58Ag23Cu12Pd5 – können Anhang A.6 entnommen werden.

²⁸³vgl. Auhorn (2005)

²⁸⁴ibidem

Abbildung 6.3 Modellbildung des Planetengetriebes – reduzierte Finite Elemente
Repräsentation von Sonne, Planet und Hohlrad

Abbildung 6.4 Modellbildung des Planetengetriebes – Detailansicht der Kornstruktur im Bereich eines Zahnes des Planetenrades

6.3 Untersuchung des zeitvarianten Belastungszustandes eines dynamischen Modells

In der Regel wird für die Simulation eines Systems auf ein *Mehrkörpersystemsimulation*-Softwarepaket zurückgegriffen. Auf diese Weise wurde beispielsweise das hier untersuchte Planetengetriebe von Metz²⁸⁵ und Maier²⁸⁶ hinsichtlich einer Variation geometrischer Parameter analysiert. In diesen Arbeiten werden in den Mehrkörpersystemen dem klassischen Sinne folgend ausschließlich Starrkörper zur Modellierung verwendet. Ist wie im vorliegenden Fall der Spannungszustand innerhalb der sich bewegenden Bauteile von Interesse, so ist der klassische Ansatz jedoch nicht mehr ausreichend. Durch die Integration deformierbarer Körper in die Mehrkörpersystemsimulation können auch die Belastungen innerhalb eines Bauteiles angenähert werden. Mit einem solchen *flexiblen Mehrkörpersystem* können somit Wechselwirkungen zwischen Bauteil und System erfasst werden. Ein Ansatz hierfür ist beispielsweise die von Craig / Bampton²⁸⁷ beschriebene gemischt statisch-modale Reduktion. Für Voruntersuchungen zu dieser Arbeit wurde ebenfalls ein Mehrkörpersystemsimulationsmodell entwickelt. Da die Un-

²⁸⁵siehe Metz (2008)

²⁸⁶siehe Maier (2006)

²⁸⁷siehe Craig / Bampton (1968)

tersuchung des Spannungszustandes innerhalb des Planetenrades im Vordergrund steht, wird im Folgenden mit der Finite Elemente Methode auf das Standardverfahren zur Berechnung flexibler Strukturen zurückgegriffen.

Um die den Bauteilen vom System aufgebrachten Lasten abzubilden, ist dieses auch bei der Erstellung des Finite Elemente Modells zu berücksichtigen. Traditionell sind die hierfür entwickelten Solver allerdings nicht in der Lage, mit den erforderlichen Starrkörperbewegungen umzugehen. Dennoch verfügen einige – wie auch der hier verwendete – Solver über integrierte Algorithmen, die die damit einhergehenden Belange abdecken.²⁸⁸

Die hier durchgeführten Untersuchungen konzentrieren sich im Sinne einer strukturdynamischen Analyse mit Hilfe der Finiten Elemente Methode auf eine sich zeitlich verändernde Antwort, beispielsweise einem sich zeitlich ändernden Spannungsverlauf.²⁸⁹ Diese resultiert aus sich während der Simulation ändernden Lasten, die z. B. während eines Zahneingriffes oder bei Stößen aufgrund von Spiel auftreten.

Für lineare Problemstellungen eignen sich modal-basierte Ansätze zur Ermittlung solcher Verläufe. Sie bieten sich aufgrund der vergleichsweise geringen Rechenzeiten u. a. bei der Betrachtung mehrerer Lastfälle an. In vielen Anwendungen sind sie eine der effizientesten der hierzu verfügbaren Methoden.²⁹⁰ In der in diesem Kapitel durchgeführten Studie treten lediglich geringe Deformationen der einzelnen Bauteile auf. Darüber hinaus wird für sämtliche Bauteile ein rein elastisches Materialverhalten angenommen. Dennoch liegt aufgrund der gewünschten Interaktion der Flanken der Zahnräder – z. B. des WFP_{Sonne/Planet} – und der damit verbundenen Einführung von Kontaktflächen ein nichtlineares Problem vor. Daher ist der modale Ansatz für die hier durchgeführten Analysen ungeeignet.

Erforderlich ist ein direktes Integrationsverfahren²⁹¹, welches die sukzessive Lösung der dynamischen Gleichung (6.1) zu n Zeitpunkten, unterteilt in Inkremente der Größe Δt , ermöglicht.

$$\left[M \right] \left\{ \ddot{D} \right\}_n + \left[C \right] \left\{ \dot{D} \right\}_n + \left[K \right] \left\{ D \right\}_n = \left\{ R^{ext} \right\}_n \quad (6.1)$$

6.3.1 Direkte Integrationsverfahren

Erfolgt die Berechnung der Bewegungen des Systems mit Hilfe eines numerischen Schritt-Verfahrens ohne vorige Transformation der Bewegungsgleichungen, so spricht man von einer *direkten Integrationsmethode*. Für die Lösung existieren implizite und explizite Verfahren, die im Folgenden näher beschrieben werden. Die Bewegungsgleichungen werden bei diesen Verfahren nicht zwingend für jeden Zeitpunkt t exakt

²⁸⁸vgl. Bathe (1996)

²⁸⁹siehe Cook et al. (2002)

²⁹⁰vgl. Belytschko (1983, 1976)

²⁹¹vgl. Cook et al. (2002); Crisfield (1991)

erfüllt, sondern nur in diskreten Zeitintervallen Δt . Die Genauigkeit der Lösung ist daher abhängig von der Wahl des Zeitschrittes Δt .

Expliziter Ansatz

Beim expliziten Ansatz wird die in Gleichung (6.2) dargestellte Formulierung verwendet.

$$\{D\}_{n+1} = f\left(\{D\}_n, \{\dot{D}\}_n, \{\ddot{D}\}_n, \{D\}_{n-1}, \dots\right) \quad (6.2)$$

Es existiert eine Vielzahl möglicher Differenzenverfahren für die Implementierung der Zeitintegration. In den meisten Fällen wird das zentrale Differenzenverfahren, ein Sonderfall des Newmark-Verfahrens, in Form von Gleichung (6.3) verwendet. Es zählt zu den sogenannten Mehrschrittverfahren, da für die Berechnung bereits bekannte Werte mehrerer Schritte erforderlich sind.

$$u_{n+1}^N = u_n^N + \Delta t_{n+1} \dot{u}_{n+1/2}^N \quad (6.3)$$

Für die Berechnung des neuen Zustandes des Systems wird somit auf bereits aus vorangegangenen Iterationen bekannte Werte zurückgegriffen. Die zu berechnenden Werte zum neuen Zeitpunkt befinden sich auf der linken Seite von Gleichung (6.3), wohingegen sich die rechte Seite aus bekannten Größen der vorangegangenen Iteration zusammensetzt. In diesem Sinne wird dieses Verfahren auch *explizites Verfahren* genannt. Der Vorteil dieses Ansatzes liegt in dessen Effizienz hinsichtlich des Rechenaufwandes. Allerdings wird dieser Vorteil durch die Notwendigkeit hinreichend kleiner Zeitschritte Δt zur Gewährleistung der Stabilität gegebenenfalls stark eingeschränkt. Um die Konvergenz des Verfahrens sicherzustellen, darf daher ein maximal zulässiger Zeitschritt Δt_{krit} nicht überschritten werden. Die kritische Schrittweite Δt_{krit} ist eng mit der Wellenausbreitungsgeschwindigkeit im Werkstoff verknüpft und kann mit Hilfe der Courant-Friedrichs-Lewy-Bedingung (CFL)²⁹² gut geschätzt werden.

$$\Delta t_{krit} \leq L / \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (6.4)$$

Dabei ist L die geringste Elementkantenlänge, E der Elastizitätsmodul und ρ die Dichte des Werkstoffes.

Im Falle mikroungeformter Bauteile führt die Kombination aus geringen Bauteil- und damit Elementabmessungen und sehr steifen Werkstoffen zu äußerst geringen kritischen Schrittweiten im Bereich von $1 \cdot 10^{-9} \text{ s} \leq \Delta t_{krit,mikro} \leq 3 \cdot 10^{-9} \text{ s}$. Damit wird die Verwendung eines expliziten Ansatzes unpraktikabel. Selbst bei Verwendung extrem grober Finite-Elemente-Netze lässt sich die Schrittweite zwar um etwa zwei Zehnerpo-

²⁹²siehe Courant et al. (1928); Isaacson / Keller (1966)

tenzen und damit deutlich, jedoch nur auf $\Delta t_{krit,mikro} \approx 2 \cdot 10^{-7} \text{ s}$ anheben. Einerseits ist die damit verbundene Netzfeinheit und -qualität für die vorgesehenen Untersuchungen nicht genügend, andererseits benötigt ein einzelner Analyselauf mit der verfügbaren Rechenkapazität noch immer mehr als einen Tag. Sie eignet sich daher nicht für eine größere Anzahl an Analysen mit individuellen Kornstrukturen, bei denen das zu untersuchende Zeitintervall – hier mehrere Zahneingriffe – um einige Größenordnungen über der kritischen Schrittweite liegt.

Impliziter Ansatz

Für eine implizite Herangehensweise wird eine Formulierung gemäß Gleichung (6.5) verwendet.

$$\{D\}_{n+1} = f\left(\{\dot{D}\}_{n+1}, \{\ddot{D}\}_{n+1}, \{D\}_n, \{\dot{D}\}_n, \{\ddot{D}\}_n, \dots\right) \quad (6.5)$$

Es existiert eine Vielzahl unterschiedlicher Implementierungen impliziter Algorithmen, die ohne weitere Bedingungen stabil sind oder zumindest stabil gemacht werden können.²⁹³ Die einzige verbleibende Beschränkung für die Festlegung der Schrittweite Δt liegt in der gewünschten Ergebnisqualität. Allerdings enthält Gleichung (6.5) zu lösende zeitliche Ableitungen, die zu einer nur geringfügig kürzeren Berechnungsdauer im Vergleich zur Lösung einer Serie statischer Probleme führen.

Die mit einem impliziten Ansatz durchgeführten Analyseläufe deuten auf eine Schwierigkeit mit Kontakten hin, die ein Ausschöpfen des vorhandenen Potentials der Herangehensweise verhindern. In Testläufen arbeitet der verwendete Solver stabil bis zu im Vergleich zu expliziten Verfahren großen Schrittweiten von $\Delta t \approx 5 \cdot 10^{-3} \text{ s}$. Dies gilt bis zum Erreichen eines Kontaktpunktes, bei dem zwei Knoten benachbarter Kontaktflächen an der Lastübertragung beteiligt sind, vgl. Abbildung 6.5. Die implementierte Kontaktformulierung erfordert bis zur Überwindung dieses Punktes wesentlich geringere Zeitschritte. Liegt keine ausreichende Konvergenz vor, kann der verwendete Solver nur einen begrenzten Zeitschritt zurückgehen. Die Verwendung einer großen und vor und nach dem kritischen Kontaktpunkt prinzipiell geeigneten Schrittweite führt daher zu einem zu schnellen Eintritt in diese Zone – der Algorithmus ist nicht mehr in der Lage, einen neuen Gleichgewichtszustand zu finden, und die Berechnung bricht ab. Durch eine Reduktion der Schrittweite auf maximal $\Delta t \approx 1,5 \cdot 10^{-4} \text{ s}$ kann dieses Problem zwar umgangen werden, indes sinkt jedoch auch die mit dem impliziten Ansatz erzielbare Effizienz. Im Vergleich zum expliziten Ansatz wird für einen einzelnen Analyselauf weitaus weniger Zeit benötigt, die gewünschte Effizienz aber noch nicht erreicht.

²⁹³vgl. Bathe (1996); Hughes (1983); Hilber et al. (1977); Newmark (1959)

Abbildung 6.5 Abbildung des Zahneingriffes. Der verwendete Solver benötigt ca. 130 Iterationen, um von ① → ② 0,0054 s durch den kritischen Bereich zu kommen. Anschließend sind ca. 660 weitere Iterationen für die Simulation der folgenden 0,25 s von ② → ③ erforderlich.

6.3.2 Quasi-statischer Ansatz

Die Massen der betrachteten Demonstratorbauteile sind sehr gering (→ Abschnitt 6.1). Weitere Untersuchungen konzentrieren sich daher auf den Einfluss von Beschleunigungen und Trägheiten auf die Belastung solcher Bauteile. Hierzu werden die Zahnräder unter verschiedenen Szenarien ohne externe Lasten getestet: In Szenario 1 wird das System einer Beschleunigung von $n_{t=0} = 0$ auf $n_{t=0,1s} = 10.000 \text{ min}^{-1}$ innerhalb $\Delta t = 0,1 \text{ s}$ ausgesetzt. Bei Szenario 2 wird hingegen von einer konstanten Rotation mit $n = 10.000 \text{ min}^{-1}$ ausgegangen. Szenario 3 kombiniert die beiden zuvor genannten Lastfälle und bildet damit die Situation am Ende der Beschleunigungsphase ab. In sämtlichen Szenarien wird die Bewegung des Planeten in die beiden Basisrotationen – um sich selbst und um die Stegachse – zerlegt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 6.2 zusammengefasst.

Die Studie bestätigt den äußerst geringen Beitrag der auftretenden Beschleunigungen und Trägheiten auf die Belastung der Bauteile. Es wird daher davon ausgegangen, dass deren Einfluss vernachlässigt werden kann. Darüber hinaus wird in den Untersuchungen keine Reibung berücksichtigt. Die Lagerdämpfung kann aufgrund der geringen Rotationsgeschwindigkeiten niedrig gehalten werden. Das Verhalten des Werkstoffes

Tabelle 6.2 Aus Beschleunigungen und Trägheit resultierende Belastungen

		maximale Hauptspannung in MPa		
		Beschleunigung	Trägheit	kombiniert
Sonne	um eigene Achse	$1,40 \cdot 10^{-4}$	$5,56 \cdot 10^{-3}$	$5,56 \cdot 10^{-3}$
	um eigene Achse	$3,82 \cdot 10^{-4}$	$1,77 \cdot 10^{-2}$	$1,99 \cdot 10^{-2}$
Planet	um Stegachse	$1,34 \cdot 10^{-4}$	$2,51 \cdot 10^{-3}$	

wird als anisotrop, aber linear-elastisch angenommen. Mit diesen Annahmen kann das ursprünglich dynamische Problem in ein quasi-statisches Problem und damit eine Serie statisch betrachteter Situationen überführt werden. Damit kann als wesentlicher Vorteil des Verfahrens der in seiner Bedeutung reduzierte Zeitschritt Δt frei gewählt werden. Mit Hilfe dieses Ansatzes liegen die Rechenzeiten auf einem für statistische Analysen mit Kornstruktur akzeptablen Niveau.

6.4 Analyse des Demonstratorsystems unter Berücksichtigung von Kornstruktur und Defekten

Auf Basis der in Kapitel 5 entwickelten Methoden und dem vorgestellten quasi-statischen Ansatz werden im Folgenden mehrere Untersuchungen anhand des Modells des Planetengetriebes durchgeführt. Insbesondere die Auswirkungen individueller Kornstrukturen und Porositäten auf ein Planetenrad stehen im Fokus der Analysen.

6.4.1 Einfluss der Kornstruktur – zweidimensionales Modell

Zunächst wird ein zweidimensionales Finite Elemente Modell betrachtet. Es werden insgesamt 200 individuelle Kornstrukturen betrachtet. Die Modelle setzen sich zusammen aus insgesamt acht verschiedenen geometrischen Strukturen, denen jeweils 25 zufällige Materialorientierungen zugewiesen werden. Der Planet wird bei allen Modellen im vernetzten Bereich mit insgesamt 300 Körnern versehen.

Die folgenden Abbildungen fassen die wichtigsten Ergebnisse der Analysen zusammen. Um eine Vergleichbarkeit mit den im isotropen Fall zu erwartenden Spannungsverlauf zu gewährleisten, ist dieser durchgängig in Form des schwarz und strichpunktiert dargestellten Kurvenverlaufes abgebildet.

Der Verlauf der maximalen Vergleichsspannung in $LSS_{\text{Planet, Bereich } 1/2}$ – also im Bereich des Zahnfußes, vgl. Abbildung 6.2 – für drei verschiedene Kornstrukturen ist in Abbildung 6.6 dargestellt. Die beiden gestrichelt dargestellten Kurvenverläufe mit dem höchsten und niedrigsten Spannungsniveau repräsentieren die Einhüllenden, d. h. sämtliche Kurvenverläufe liegen innerhalb dieser Einhüllenden und damit der hervorgehobenen Fläche.

Abbildung 6.6 Exemplarische Verläufe der von Mises Vergleichsspannung während eines Zahneingriffes im Bereich des Zahnfußes ($LSS_{\text{Planet, Bereich } 1/2}$) – zweidimensionales Modell

Abbildung 6.7 zeigt mit $LSS_{\text{Planet, Bereich } 3/4}$ die Ergebnisse für den gegenüberliegenden, sich am Hohlrad abstützenden Zahn.

Das betrachtete Zeitfenster, welches die Abbildungen umspannen, entspricht dem Zeitraum, in dem die genannten Zähne im Eingriff sind. Innerhalb der Zeitfenster kann jeweils ein Bereich identifiziert werden, in dem nur ein einzelner Zahn die Last überträgt. In diesem Bereich durchläuft die Spannung im Zahnfuß ein Maximum, bevor sie aufgrund des beginnenden Eingriffs des benachbarten Zahnes abnimmt. Bei Berücksichtigung der Kornstruktur werden maximale Spannungen erreicht, die um bis zu 40% über der im isotropen Fall erwarteten Spannung liegen können.

Abbildung 6.8 und Abbildung 6.9 zeigen den zeitlichen Verlauf des Mittelwertes und die jeweils zugehörigen Standardabweichungen für die beiden Zahnfußbereiche in denselben Zeitfenstern wie zuvor. Die von den beiden gestrichelt dargestellten Einhüllenden eingeschlossene Fläche beinhaltet auch hier alle ermittelten Kurvenverläufe. Es ist erkennbar, dass der generelle Verlauf des Mittelwertes der Spannungen im Wesentlichen dem isotropen Fall entspricht, jedoch deutlich zu einem höheren Spannungsniveau hin verschoben ist. Der Abstand zwischen den beiden Kurvenverläufen entspricht in etwa den Beträgen der ermittelten Standardabweichungen. Die Wahrscheinlichkeit, dass die bei einem zufällig gewählten Planeten auftretenden Spannungen höher als beim isotropen Fall sind, ist damit sehr groß.

Die beschriebenen Effekte sind nicht nur für duktile, sondern auch spröde Werkstoffe

Abbildung 6.7 Exemplarische Verläufe der von Mises Vergleichsspannung während eines Zahneingriffes im Bereich des Zahnfußes ($LSS_{\text{Planet, Bereich } 3/4}$) – zweidimensionales Modell

Abbildung 6.8 Verlauf des Mittelwertes und der Standardabweichung im Bereich des Zahnfußes ($LSS_{\text{Planet, Bereich } 1/2}$) für sämtliche zweidimensionalen Analysen

Abbildung 6.9 Verlauf des Mittelwertes und der Standardabweichung im Bereich des Zahnfußes ($LSS_{\text{Planet, Bereich } 3/4}$) für sämtliche zweidimensionalen Analysen

relevant. Die in Abbildung 6.10 gezeigten Kurvenverläufe entsprechen denen aus Abbildung 6.6, jedoch wird hier der Verlauf der maximalen Hauptspannung abgebildet. Es sind ähnliche Tendenzen wie zuvor erkennbar. Auch eine Wiederholung der in den Abbildungen 6.7 bis 6.9 durchgeführten Analysen führt zu ähnlichen Ergebnissen.

Die in weiteren Studien untersuchten Einflüsse der Kornstruktur auf die Verformung der Kontaktflächen – $WFP_{\text{Sonne/Planet}}$ und $WFP_{\text{Hohlrاد/Planet}}$ – und damit der Winkellage des Steges sind nur von geringer Bedeutung.

6.4.2 Einfluss der Kornstruktur – dreidimensionales Modell

Die zuvor beschriebenen Untersuchungen wurden anhand eines zweidimensionalen Modells mit dem Vorteil einer vergleichsweise geringen Rechenzeit durchgeführt. Aufgrund des anisotrop betrachteten Planetenrades ist jedoch davon auszugehen, dass sich die Orientierungen der Körner auch entlang der Planetenachse und somit in allen drei Raumrichtungen auswirken. Die in Kapitel 5 vorgestellten Methoden wurden mit besonderem Fokus auf die Modellierung komplexer, dreidimensionaler Bauteile entwickelt. In diesem Abschnitt werden sie daher in Kombination mit einem erweiterten, dreidimensionalen Finite Elemente Modell des Planetengetriebes eingesetzt.

Die Modelle setzen sich zusammen aus insgesamt fünf verschiedenen geometrischen Strukturen, denen jeweils acht zufällige Materialorientierungen zugewiesen werden.

Abbildung 6.10 Exemplarische Verläufe der maximalen Hauptsspannung während eines Zahneingriffes im Bereich des Zahnfußes (LSS_{Planet} , Bereich 1/2)

Aufgrund des gestiegenen Rechenaufwandes werden folglich insgesamt 40 individuelle Kornstrukturen betrachtet. Um eine Vergleichbarkeit mit den zweidimensionalen Analysen zu gewährleisten, entsprechen die Charakteristika der Kornstrukturen mit 400 Körnern denen des zweidimensionalen Modells.

Die Abbildungen 6.11 und 6.12 zeigen den Abbildungen 6.6 und 6.7 äquivalente Ergebnisse. Die Ergebnisse der dreidimensionalen Analysen zeigen einen ähnlichen Verlauf. Die ermittelten Spannungen bzw. deren Mittelwerte und Standardabweichungen liegen jedoch geringfügig höher als zuvor. Allerdings lagen in den zweidimensionalen Analysen noch einige der Kurvenverläufe auf einem niedrigeren Spannungsniveau als im isotropen Fall. Die mit Hilfe des dreidimensionalen Modells gewonnenen Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Wahrscheinlichkeit eines höheren Spannungsverlaufes als bei isotrop angenommenem Material noch größer ist, als durch das zweidimensionale Modell vorhergesagt. Der Abstand zwischen dem Verlauf der Mittelwerte der Spannungen beträgt bei den dreidimensionalen Analysen deutlich mehr als die jeweils zugehörigen Beträge der Standardabweichungen. Eine Ursache hierfür könnte die im Vergleich zu den zweidimensionalen Analysen rechenzeitbedingte geringere Anzahl an Stichproben sein.

Die in den Abbildungen 6.13 und 6.14 dargestellten Ergebnisse sind analog zu denjenigen in den Abbildungen 6.8 und 6.9. Obwohl der isotrope Kurvenverlauf eine niedrigere Spannung aufweist, stimmen die Mittelwerte der zwei- und dreidimensionalen Studien nahezu überein. Die zweidimensionale Approximation liefert also für diese Art

von Geometrie hinreichend genaue Ergebnisse.

Abbildung 6.11 Exemplarische Verläufe der von Mises Vergleichsspannung während eines Zahneingriffes im Bereich des Zahnfußes ($LSS_{\text{Planet, Bereich } 1/2}$) – dreidimensionales Modell

Die bereits anhand des zweidimensionalen Modells durchgeführte Analyse bezüglich des Einflusses der Kornstruktur auf die Verformung der Kontaktflächen kann auch mit Hilfe des dreidimensionalen Modells bestätigt werden. Die Auswirkungen auf die Winkellage fällt in letzterem Fall noch etwas geringer aus.

Eine Untersuchung der an der vereinfacht als Drehgelenk abgebildeten Planetenlagerstelle angreifenden Reaktionskräfte zeigt einen weiteren Einfluss der Kornstruktur. Durch die von der Kornstruktur hervorgerufene Anisotropie verändern sich die Funktionskontakte $FK_{\text{Sonne/Planet}}$ und $FK_{\text{Hohlrad/Planet}}$ im Vergleich zum isotropen Fall nur geringfügig, jedoch derart, dass eine entlang der Lagerachse angreifende Kraft resultiert. Abbildung 6.15 zeigt beispielhaft fünf solcher Kraftverläufe. Dadurch neigt der Planet dazu, sich aus seiner eigentlichen Rotationsebene zu drehen. Im Simulationsmodell wird diese Bewegung unterbunden. Um dies auch in der Realität zu erreichen, befinden sich in axialer Richtung auf beiden Seiten des Planeten zusätzliche Wirkflächen, die bei Bedarf mit den beiden Planetenflächen Wirkflächenpaare bilden können und damit ebenfalls diese Bewegung unterbinden.

Abbildung 6.12 Exemplarische Verläufe der von Mises Vergleichsspannung während eines Zahneingriffes im Bereich des Zahnfußes ($LSS_{\text{Planet, Bereich 3/4}}$) – dreidimensionales Modell

Abbildung 6.13 Verlauf des Mittelwertes und der Standardabweichung im Bereich des Zahnfußes ($LSS_{\text{Planet, Bereich 1/2}}$) für sämtliche dreidimensionalen Analysen

Abbildung 6.14 Verlauf des Mittelwertes und der Standardabweichung im Bereich des Zahnfußes ($LSS_{\text{Planet, Bereich } 3/4}$) für sämtliche dreidimensionalen Analysen

Abbildung 6.15 Exemplarische Verläufe der Reaktionskraft entlang der Planetenachse am Drehgelenk des Planeten

6.4.3 Einfluss der Porosität

Wie in den Abschnitten 2.6.3 und 2.7.6 bereits erläutert, sind die derzeit hergestellten Mikrobauteile noch nicht frei von unerwünschten Poren und damit streuenden internen Defekten. Von einer weiteren Beeinträchtigung des Bauteilverhaltens ist daher auszugehen. Das dreidimensionale Modell wird entsprechend für eine weitere Studie herangezogen, in der die zuvor genannten Versuche erneut, jedoch unter Einbeziehung der Porosität, durchgeführt werden.

Aus den im Sonderforschungsbereich 499 angesiedelten werkstoffwissenschaftlichen Teilprojekten ist bekannt, dass je nach Herstellverfahren von Porositäten im Bereich von $1\% \leq \Phi \leq 3\%$ auszugehen ist. Es werden daher drei verschiedene Porositätsgrade – 1%, 2% und 3% – betrachtet. Die folgenden Abbildungen zeigen die Ergebnisse dieser Untersuchungen.

Abbildung 6.16 entspricht den ohne Porosität durchgeführten Analysen in Abbildung 6.14. Im direkten Vergleich zeigt sich ein aufgrund der Porosität generell höheres Spannungsniveau sowie eine größere Standardabweichung und damit Streuung der auftretenden Belastungen. Durch die Porosität wird die Robustheit des Planeten – zusätzlich zum bereits vorhandenen Einfluss der Kornstruktur – also weiter verringert.

Abbildung 6.16 Verlauf des Mittelwertes und der Standardabweichung im Bereich des Zahnfußes ($LSS_{\text{Planet, Bereich } 3/4}$) für sämtliche dreidimensionalen Analysen bei einer Porosität von $\Phi = 1\%$

Die Verläufe der Mittelwerte der Spannungen bei verschiedenen Porositäten zeigt Abbildung 6.17. Eine mit zunehmender Porosität deutliche Verschiebung der Kurvenver-

läufe hin zu höheren Spannungsniveaus ist erkennbar.

Abbildung 6.17 Verlauf der Vergleichsspannung im Bereich des Zahnfußes ($LSS_{\text{Planet, Bereich 3/4}}$) bei Porositäten von $1\% \leq \Phi \leq 3\%$ im Vergleich zu den porositätsfreien isotropen und anisotropen Fällen

6.4.4 Stabilität der Analysen

Um sicherzustellen, dass die genannten Effekte nicht von numerischen Instabilitäten hervorgerufen werden, sondern ausschließlich aus der Kornstruktur und der Porosität resultieren, werden zusätzlich die durch den Solver bereitgestellten Statistiken ausgewertet.

Die erste herangezogene Statistik betrifft die Anzahl der für die Lösung der Aufgabe benötigten Iterationen, die maximale Anzahl an Iterationen je Inkrement und die insgesamt benötigte Berechnungszeit. Tabelle 6.3 fasst die Ergebnisse zusammen. Es ist erkennbar, dass das Verhalten des Solvers in allen Fällen stabil ist.

Tabelle 6.3 Solverstatistik der Analysen

Analyse-reihe	Anzahl Läufe	gesamte Iterationen	max. Iter./Inkr.	Berechnungszeit in s
2d	200	481 ± 2	3 ± 1	1034 ± 15
3d	40	488 ± 4	3 ± 1	52.620 ± 5.450

Zusätzlich wird der Ort der höchsten Belastung anhand der betreffenden Elemente während der Simulation verfolgt. Es ist zu erwarten, dass sich diese im Bereich des

jeweiligen Zahnfußes befinden und der Ort sich während des Zahneingriffes, d. h. von Inkrement zu Inkrement, nicht sprunghaft ändert. Beide Annahmen werden von den Analysen bestätigt.

Die mit dem Ansatz durchgeführten Analysen werden damit als stabil angesehen.

6.5 Fazit

Ein polykristallines Material besteht aus Körnern, die verschiedene Materialorientierungen aufweisen können. Da die hier betrachteten mikromechanischen Bauteile möglichst hohen Belastungen standhalten sollen, jedoch je nach Abmessungen und Werkstoff im Gegensatz zu makroskopischen Bauteilen aus nur wenigen Körnern aufgebaut sind, ist die Kornstruktur in ein Analysemodell einzubeziehen.

Die in diesem Kapitel durchgeführten Studien zeigen, dass die Kornstruktur einen deutlichen Einfluss auf die Spannungsverteilung innerhalb eines Mikrobauteiles ausüben kann, falls dieses aus nur wenigen Körnern besteht. Dies ist bei der Dimensionierung mikromechanischer Bauteile zu berücksichtigen. Metz zeigt, dass durch die von ihm untersuchten geometrischen Streuungen des Planeten – also zusätzlich zu den hier identifizierten und aus der Kornstruktur resultierenden Streuungen – eine Lastüberhöhung um den Faktor drei auftreten kann.²⁹⁴ In Kombination mit den vorliegenden Ergebnissen liegen die bei idealer Geometrie für das betrachtete Planetenrad ermittelten Spannungen damit bereits in einem kritischen Bereich. Diese Erkenntnisse sind bei der Auslegung zu berücksichtigen.

Der vorgestellte Ansatz ermöglicht die Untersuchung von für mikromechanische Bauteile und Systeme spezifischen Einflüssen und trägt damit zum Verständnis des Bauteil- und Systemverhaltens bei. Die Einbeziehung von im Mikrobereich mit der Kornstruktur und Defekten einhergehenden Auswirkungen in die Dimensionierung und die rechnergestützte Validierung kann bereits vor der Existenz realer Prototypen erfolgen. Dennoch steht der Entwickler weiterhin vor der Fragestellung, wie eine optimale Bauteilform im Sinne einer Reduktion dieser Einflüsse gefunden werden kann.

²⁹⁴vgl. Metz (2008)

7 Ein neues Prozessmodell zur Optimierung von Mikrobauteilen unter Robustheitsaspekten

In den vergangenen Kapiteln wurde die Auswirkung der Kornstruktur und der Anisotropie auf die mechanische Beanspruchung urgeformter Mikrobauteile aufgezeigt und damit deren Bedeutung für die Dimensionierung herausgearbeitet. Die bisher beschriebenen Methoden konzentrierten sich dabei auf die zuverlässige Abbildung urgeformter Mikrobauteile einschließlich der in Studien als relevant identifizierten Kornstruktur samt möglichen Defekten wie z. B. Poren in der Simulation. Zudem beinhalteten die Arbeiten die Modellierung eines einstufigen Planetengetriebes, einem der Demonstratorsysteme des Sonderforschungsbereiches 499. Anhand dieses Systems konnte aufgezeigt werden, dass die entwickelten und im Softwarepaket G/Struct implementierten Methoden eine Analyse des Einflusses von Kornstruktur und Porosität direkt im System ermöglichen. Dieses Wissen sowie die entstandenen Methoden und Werkzeuge fließen im aktuellen Kapitel in ein *Prozessmodell* zur automatisierten Optimierung der Bauteilform unter Berücksichtigung von Robustheitsaspekten ein. Ziel ist es, eine Herangehensweise zur Verfügung zu stellen, mittels derer ein robustes Bauteilverhalten trotz der auftretenden Streuungen aufgrund von Kornstruktur und Porosität erreicht werden kann.

In den folgenden Abschnitten wird ein neuer, iterativer Ansatz zur rechnergestützten *Formoptimierung unter Robustheitsaspekten* vorgestellt, der die oben genannten Einflüsse berücksichtigt und deren Auswirkungen vermindern soll. Auf Basis einer gegebenen Geometrie werden hierzu mehrere Finite Elemente Analysen durchgeführt, bei denen jeweils Bauteile mit individuellen Kornstrukturen und/oder Porositäten untersucht werden. Anhand der Ergebnisse dieser Analysen werden lokal statistische Daten wie die Standardabweichung oder der Variationskoeffizient der Spannung ermittelt. In einer nachgeschalteten Formoptimierungsiteration werden diese Daten herangezogen, um die Form des Bauteiles geeignet zu variieren. Die Formoptimierung wird mit Hilfe eines Optimalitätskriterien-Verfahrens durchgeführt. Anschließend wird erneut das nun modifizierte Bauteil wie oben beschrieben untersucht und ein weiterer Optimierungsschritt angeschlossen. Dieser iterative Prozess wird bis zum Erreichen eines Abbruchkriteriums durchgeführt. Die Bauteilform wird damit schrittweise auf Basis von Finite Elemente Analysen und daraus gewonnener statistischer Daten modifiziert. Ergebnis ist eine

optimierte Bauteilform, die – trotz Kornstruktur etc. – ein robusteres Verhalten als das Ausgangsdesign aufweist.

Der Prozess wird automatisiert und in Form eines Moduls für das Softwarepaket G/Struct implementiert. Der hier vorgestellte Ansatz ermöglicht somit durch eine Formoptimierung die Reduktion z. B. des Einflusses der aufgrund der Anisotropie für Mikrobauteile relevanten Kornstruktur. Mit Hilfe des Ansatzes kann so die Robustheit von Bauteilen mit *stark streuenden Leitstützstrukturen* erhöht und ein Beitrag für die Dimensionierung solcher Bauteile geleistet werden.

7.1 Anwendbarkeit der spannungsbasierten Formoptimierung

In den meisten Fällen basieren Verfahren der Formoptimierung, wie sie in Kapitel 2 vorgestellt wurden, auf Kenngrößen wie beispielsweise Spannungskomponenten, Vergleichsspannungen oder Dehnungsenergien. In der industriellen Praxis werden insbesondere spannungsbasierte Optimalitätskriterien-Verfahren eingesetzt, wie sie z. B. Sauter et al., Iancu, Mattheck et al. oder Spörl²⁹⁵ vorstellen. Bei statisch beanspruchten Bauteilen ist dieses Vorgehen weit verbreitet. Häußler²⁹⁶ zeigt in seiner Arbeit, dass damit auch bei dynamisch beanspruchten Bauteilen Verbesserungen erzielt werden können. Da neben den auftretenden Maximalspannungen aber auch weitere Faktoren wie Lastzeitreihen maßgeblichen Einfluss auf die Betriebsfestigkeit haben, stellt er ein neues Prozessmodell vor, das diese Aspekte mit einbezieht. In diesem wird ebenfalls ein Optimalitätskriterienverfahren zur Erhöhung der Betriebsfestigkeit herangezogen.

Kritisch wird die Anwendung einer spannungsbasierten Formoptimierung bei stochastisch und/oder komplex belasteten Bauteilen. Eine aufgrund der Kornstruktur und Porosität streuende Leitstützstruktur von Mikrokomponenten kann sich erheblich auf Ort und Höhe von deren maximaler Belastung auswirken – die lokal auftretenden Spannungen als Eingangsgröße für ein solches spannungsbasiertes Verfahren unterliegen damit ebenfalls Streuungen. Die bereits von Albers / Metz²⁹⁷ durchgeführte spannungsbasierte Formoptimierung von Mikrobauteilen liefert für ein einziges, jedoch mit individuellen Kornstrukturen analysiertes Bauteil unterschiedliche optimale Bauteilformen. Sie verwenden in einem Optimierungslauf lediglich ein Modell mit einer stets gleichen Kornstruktur. Dies schränkt eine erfolgreiche Übertragung der Ergebnisse der spannungsbasierten Formoptimierung somit letztendlich ein.²⁹⁸

Entscheidend für die Verbesserung eines Entwurfes, bei dem von stark streuenden

²⁹⁵siehe Sauter et al. (2000); Sauter (1991); Iancu (1991); Mattheck / Burkhardt (1990); Mattheck et al. (1990); Spörl (1985) und Abschnitt 2.4

²⁹⁶siehe Häußler (2006)

²⁹⁷vgl. Albers / Metz (2008) und Abschnitt 2.8

²⁹⁸ibidem

Leitstützstrukturen auszugehen ist, ist nicht nur die anhand einer einzelnen Stichprobe ermittelbare Belastung. Ein Prozessmodell, welches die Robustheit und Zuverlässigkeit eines solchen Bauteiles durch geometrische Modifikationen erhöhen soll, muss demnach auf *statistischen Parametern* der Belastung aufbauen. Im Folgenden wird daher ein Prozessmodell für eine Formoptimierung entwickelt, welches direkt auf Ergebnissen, wie sie in Kapitel 6 vorgestellt wurden, basiert und somit bei Bauteilen mit stark streuenden Leitstützstrukturen angewendet werden kann.

7.2 Ein neues Prozessmodell zur Formoptimierung

Auf Basis der zuvor definierten Kriterien gilt es, ein Prozessmodell zu entwickeln, das es ermöglicht, eine bereits gegebene Form eines Bauteiles entsprechend mit einem rechnergestützten Verfahren optimieren zu können. Entgegen der deterministischen, spannungsbasierten Formoptimierung (→ Abschnitt 2.4.2) sollen die mit Hilfe der in Kapitel 6 vorgestellten Herangehensweise erzielbaren Erkenntnisse in das Prozessmodell einfließen. Um diesem Ziel gerecht zu werden, wird in jeder Iteration der Optimierung eine Monte Carlo Simulation durchgeführt. Sie dient der Ermittlung statistischer Parameter der lokal herrschenden Spannungen aus einer virtuellen Versuchsreihe, d. h. die Stichproben werden mit Hilfe einer definierten Anzahl an Finite Elemente Berechnungen generiert. Das Prozessmodell setzt sich damit zusammen aus einem äußeren, iterativen Teil, in welchem die eigentliche Formoptimierung durchgeführt wird, und einem inneren, Monte Carlo basierten Teil zur Bestimmung statistischer Parameter.

Eingangsdaten für die Monte Carlo Simulation sind ein Finite Elemente Modell, in welchem relevante Daten wie z. B. die durch das Netz repräsentierte Geometrie, Randbedingungen und Lastfälle hinterlegt sind, sowie Daten zur Generierung der Kornstruktur. Für jede der generierten Kornstrukturen wird ein individuelles Simulationsmodell erstellt. Sämtliche Kornstrukturen bestehen aus einer vorab definierten und damit stets gleichen Anzahl n_K an Körnern. Deren individuelle Lage, Form und Orientierung werden mit Hilfe der in Kapitel 5 vorgestellten Verfahren automatisiert generiert.

Für jedes der n_M deterministischen Modelle wird eine Strukturanalyse durchgeführt mit dem Ziel, die lokal an den Knoten herrschenden Spannungen zu berechnen. Damit sind für jeden einzelnen Knoten n_N des Modells n_M Spannungswerte bekannt, die als Grundlage für eine anschließende statistische Analyse zur Bestimmung der Parameter der Verteilung der Grundgesamtheit dienen. Die Parameter werden anschließend für die Berechnung *virtueller Knotenspannungen*²⁹⁹ anhand einer Zielfunktion herangezogen und der der aktuellen Iteration zu Beginn zur Verfügung gestellten Ausgangsgeometrie in Form eines Analyseergebnisses zugeordnet. Das im weiteren Verlauf verwendete

²⁹⁹Da das verwendete Strukturoptimierungspaket in der Regel Spannungswerte als Eingangsgröße erwartet, wird der Begriff der virtuellen Knotenspannung gewählt.

Analyseergebnis enthält damit die Ergebnisse aller n_M in der Iteration durchgeführten Analysen in Form der in der Zielfunktion verrechneten statistischen Parameter.

Die virtuellen Spannungen wiederum werden im äußeren Teil des Prozessmodells, der Optimierungsschleife, für die Modifikation der dem Designbereich zugehörigen Geometrie entsprechend einer Redesign-Regel im Rahmen einer parameterfreien Formoptimierung verwendet. Als Designvariablen dienen die Positionen der den Designrand Γ_d beschreibenden Knoten. Dies bietet neben dem damit einhergehenden großen Lösungsraum den Vorteil, dass keine Parametrisierung des Modells notwendig ist (\rightarrow Abschnitt 2.4.2). Die Nutzung etablierter Homogenisierungsverfahren bietet sich aus verschiedenen Gründen an. Einerseits handelt es sich um in der Praxis bereits erfolgreich angewendete, effiziente Verfahren. Andererseits kann auch bei Verwendung anderer Beanspruchungsgrößen – wie z. B. Häußler³⁰⁰ in seiner Arbeit anhand von Lebensdauerkenntwerten belegt – ein gutes Konvergenzverhalten erreicht werden. Darüber hinaus wird bei Verwendung von Optimalitätskriterien-Verfahren der Forderung nach einer Anwendbarkeit auch bei *komplexen und praxisnahen Modellen* Rechnung getragen. Gegebenenfalls wird aufgrund der modifizierten Lage der Designknoten eine Glättung des bauteilinneren Netzes durchgeführt, um eine hohe Elementqualität gewährleisten zu können.

Nach Prüfung eines Abbruchkriteriums wird entweder eine weitere Iteration, also ein Durchlaufen einer weiteren inneren und äußeren Schleife, angestoßen oder der Prozess beendet. Das Ergebnis wird in Form eines Designvorschlages, dessen neue Berandung $\Gamma_{d,DV}$ innerhalb des Variationsgebietes $\hat{\Omega}$ durch die modifizierten Knotenpositionen beschrieben wird, bereitgestellt.

Die Gesamtstruktur des zu optimierenden Bauteiles wird somit während des Prozesses gezielt variiert. Abbildung 7.1 fasst die dabei zu durchlaufenden Schritte zusammen.

7.2.1 Kriterien zur Beschreibung der Robustheit und der Zuverlässigkeit

Prinzipiell sind für jeden Punkt, der Element des Designrandes Γ_d ist, dessen statistische Parameter zu ermitteln. Während der Erstellung der Simulationsmodelle wird dieser Designrand einer Diskretisierung unterworfen. Die Ermittlung der statistischen Parameter erfolgt entsprechend an diesen Stützstellen und damit einer finiten Anzahl an Punkten der Berandung. Für alle den Designrand Γ_d beschreibenden Knoten wird aus den anhand der berechneten n_M Modelle ermittelten lokalen Spannungen eine *Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion* ermittelt. Hierzu werden – analog zu den in Kapitel 6 durchgeführten Analysen – n_M Monte Carlo Simulationen durchgeführt. Deren Ergebnisse bilden die Basis für die Ermittlung der statistischen Parameter.

³⁰⁰siehe Häußler (2006)

Abbildung 7.1 Das Prozessmodell zur Formoptimierung von Bauteilen mit stark streuenden Leitstützstrukturen

In der Praxis ist es – wie auch hier – nicht möglich, eine unendliche Anzahl an Messdaten zu erzeugen. Die Ermittlung der statistischen Parameter auf Grundlage einer endlichen Anzahl an Messdaten ist daher mit einer Unsicherheit behaftet. Die Parameter der *Grundgesamtheit* werden über entsprechende Verfahren geschätzt. Eine zentrale Rolle bei der Durchführung einer solchen statistischen Analyse von Messdaten nimmt die Kenntnis über die den Daten zugrunde liegende Verteilung ein. Ziel der statistischen Analyse ist es, Schätzwerte für die diese Verteilung charakterisierenden Parameter zu ermitteln. Für die im Rahmen dieser Arbeit betrachteten lokalen Spannungen wird

angenommen, dass diese *normalverteilt* sind (\rightarrow Abschnitt 7.2.2). Im Falle einer Normalverteilung kann diese eindeutig durch die Parameter Varianz s^2 und Mittelwert μ beschrieben werden. Die Schätzung der beiden Parameter erfolgt in dieser Arbeit über eine *Intervallschätzung*.

Für jeden der beiden Parameter wird ein sogenanntes Konfidenzintervall konstruiert. Dieses umfasst ein um den geschätzten Parameter gelegtes Intervall, das die wahre Lage des Parameters mit einem definierten Konfidenzniveau, also einer bestimmten Wahrscheinlichkeit, enthält. Für die Untersuchungen in Kapitel 8 wird ein Konfidenzniveau von 99,9% gewählt. Zur Bestimmung der Modifikationen der Bauteilform wird jeweils die obere Grenze dieses Intervalls herangezogen. Für die Konstruktion eines Konfidenzintervalls für den Mittelwert der Grundgesamtheit wird die sich aus der Varianz s^2 und dem Mittelwert μ der Stichprobe ergebende t-Verteilung verwendet. Die Konstruktion eines Konfidenzintervalls für die Varianz der Grundgesamtheit wird über die Chi-Quadrat-Verteilung realisiert. Die Werte der verwendeten Verteilungen sind entweder in tabellarischer Form hinterlegt oder können durch eine Vorschrift berechnet werden. Diese Vorgehensweise ermöglicht bei Kenntnis der Varianz s^2 und des Mittelwertes μ der Stichprobe, entsprechende Vertrauensintervalle für die ihr zugrunde liegende Grundgesamtheit zu konstruieren.

Hypothesen bezüglich einer optimalen Bauteilform

Bei der in Abschnitt 2.4.2 vorgestellten Formoptimierung auf Grundlage von Optimalitätskriterien-Verfahren wird zum Erzeugen einer optimalen Bauteilform ein Kriterium herangezogen, von dem a priori bekannt ist, dass dieses zu einem optimalen Design führt. Im Rahmen dieser Arbeit wird angenommen, dass eine geringe und entlang des Designrandes Γ_d möglichst homogen verlaufende Standardabweichung s zu einem robusten Design führt. Ein zuverlässiges Design wird erreicht, wenn entlang des Designrandes Γ_d das p-Quantil Q_p unterhalb eines zu definierenden kritischen Wertes liegt und ebenfalls möglichst homogen verläuft. Darüber hinaus wird die Hypothese aufgestellt, dass die genannten Kriterien erreicht werden können, indem in Bereichen, in denen die Kriterien nicht erfüllt sind, Material hinzugefügt wird und in Bereichen, in denen die Kriterien erfüllt sind, Material entfernt werden kann. Daraus ergibt sich für die Modifikation der Position des sich auf dem Designrand befindenden Knotens i allgemein formuliert:

$$\text{Robustheit} \begin{cases} s_i > s_{ref} & \rightarrow \text{Material hinzufügen} \\ s_i \leq s_{ref} & \rightarrow \text{Material entfernen} \end{cases} \quad (7.1)$$

$$\text{Zuverlässigkeit} \begin{cases} Q_{p,i} > \sigma_{krit} & \rightarrow \text{Material hinzufügen} \\ Q_{p,i} \leq \sigma_{krit} & \rightarrow \text{Material entfernen} \end{cases} \quad (7.2)$$

Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt auf der Erhöhung der Robustheit mikromecha-

nischer Bauteile. Aus diesem Grund wird dieser Aspekt eingehend untersucht. Eine zuverlässigkeitsbasierte und kombinierte Formoptimierung wird zwecks Vergleichsmöglichkeit dennoch integriert. Für eine zuverlässigkeitsbasierte Formoptimierung sind jedoch aufgrund der gewünschten geringen Ausfallswahrscheinlichkeit in der Regel bei Verwendung der Monte Carlo Simulation sehr viele Analysen erforderlich. Daher sind für tiefergehende Untersuchungen der zuverlässigkeitsbasierten Formoptimierung effizientere Samplingverfahren zu wählen. Im Rahmen der Untersuchungen wird aus diesem Grund das 90%-Quantil $Q_{.9}$ betrachtet, für welches die durchgeführte Anzahl an Simulationen hinreichend genaue Aussagen liefert. Anhand der aufgestellten Hypothesen können im weiteren Verlauf der Arbeit drei verschiedene Strategien verfolgt werden. Dies sind

- » die *robustheitsbasierte* Formoptimierung als relevantester Teil dieser Arbeit,
- » die *zuverlässigkeitsbasierte* Formoptimierung und
- » die *kombinierte* zuverlässigkeits- und robustheitsbasierte Formoptimierung.

Robustheitsbasierte Formoptimierung

Die Zielfunktion für die robustheitsbasierte Formoptimierung lautet

$$\min(|\max\{s_{i,k}, k \in \Gamma_d\} - s_{ref}|). \quad (7.3)$$

Dabei entspricht $s_{i,k}$ der im i -ten Lastfall ermittelten Standardabweichung der Spannungen $\sigma_{i,j,k}$ eines Designknotens k , der Bestandteil des Designrandes Γ_d ist. Die Standardabweichung $s_{i,k}$ wird anhand von j erstellten Modellen mit unterschiedlichen Kornstrukturen ermittelt. Der Referenzwert s_{ref} kann entweder vom Benutzer vorgegeben werden oder direkt durch das im verwendeten Softwarepaket enthaltene Verfahren ermittelt werden. Hierzu wird der Referenzwert s_{ref} entsprechend Gleichung (7.4) aus allen n_{Γ_d} vorkommenden Standardabweichungen im Design-Bereich berechnet.

$$s_{ref} = \frac{1}{n_{\Gamma_d}} \sum_{i=1}^{n_{\Gamma_d}} s_i \quad (7.4)$$

Im Verlauf der Optimierung wird also angestrebt, die lokal vorliegende Standardabweichung s_k der dort vorherrschenden Spannungen $\sigma_{i,j,k}$ an den Referenzwert anzunähern, um so einen homogenen Verlauf der Standardabweichung im Designbereich zu erzeugen. Gemäß der oben genannten Hypothesen werden Knoten, deren Standardabweichung der Spannungen unterhalb dieses Referenzwertes liegen, nach innen verschoben – also Material entfernt – und umgekehrt Knoten, deren Standardabweichung der Spannungen den Referenzwert überschreiten, nach außen geschoben – also Material hinzugefügt. Das Verfahren kann Abbildung 7.2 entnommen werden.

Abbildung 7.2 Qualitative Darstellung des Vorgehens bei der robustheitsbasierten Formoptimierung – $s_i > s_{ref}$ (links), $s_i \leq s_{ref}$ (rechts)

Zuverlässigkeitsbasierte Formoptimierung

Die Zielfunktion für die zuverlässigkeitsbasierte Formoptimierung lautet

$$\min(|\max \{Q_{p,i,k}, k \in \Gamma_d\} - \sigma_{krit}|). \quad (7.5)$$

Im Falle der in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen handelt es sich bei Q_p um das 90%-Quantil $Q_{.9}$ der Spannungsverteilung eines Designknotens k im i -ten Lastfall. Für den Referenzwert der zuverlässigkeitsbasierten Optimierung gelten zur der robustheitsbasierten Formoptimierung analoge Bedingungen. Auch hier wird im Verlaufe der Formoptimierung durch die Modifikation der Lage der Designknoten eine Annäherung von Q_p an den Referenzwert σ_{krit} angestrebt. Liegt Q_p unterhalb des Referenzwertes, so wird versucht, die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion in Richtung des Referenzwertes zu verschieben. Andernfalls, wenn die Zuverlässigkeit nicht ausreichend ist, wird versucht, die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion aus dem kritischen Bereich zu verschieben. Abbildung 7.3 zeigt das Vorgehen bei der zuverlässigkeitsbasierten Formoptimierung.

Abbildung 7.3 Qualitative Darstellung des Vorgehens bei der zuverlässigkeitsbasierten Formoptimierung – $Q_p > \sigma_{krit}$ (links), $Q_p \leq \sigma_{krit}$ (rechts)

Kombination aus zuverlässigkeits- und robustheitsbasierter Formoptimierung

Allgemein ist eine Kombination aus zuverlässigem und robustem Bauteilverhalten erwünscht. Ziel dieser Kombination ist es, zu gewährleisten, dass die auftretenden Spannungswerte nicht in einem versagenskritischen Bereich liegen und dabei gleichzeitig die Streuung der Spannungswerte zu reduzieren. Einerseits wird also versucht, die Spannungswerte anhand des Indikators Q_p in einem ausreichenden Abstand zum kritischen Bereich zu halten und dabei andererseits eine möglichst geringe Streuung der Spannungen zu erreichen. Eine strikte Trennung beider Aspekte ist in der Regel nicht möglich – eine Beeinflussung der Robustheit geht gleichzeitig mit einer Veränderung der Zuverlässigkeit und umgekehrt einher. So führen die o. g. robustheits- und zuverlässigkeitbasierten Ansätze bei den in Kapitel 8 durchgeführten Untersuchungen auch zu einer Verbesserung des jeweils anderen Kriteriums. Die grundlegende Herangehensweise des kombinierten Verfahrens ist in Abbildung 7.4 dargestellt.

Abbildung 7.4 Qualitative Darstellung des Vorgehens bei der Kombination aus zuverlässigkeits- und robustheitsbasierter Formoptimierung

Die eigentliche Zielfunktion für dieses Verfahren kann auf verschiedene Art und Weise formuliert werden. In der vorliegenden Arbeit wird ein Strafterm vorgeschlagen, in welchen beide Kenngrößen eingehen. Der Strafterm wird so definiert, dass zunächst ein zuverlässiges Design angestrebt wird. Bei Erreichen eines solchen Designs wird der Schwerpunkt anschließend auf die Robustheit gelegt.

7.2.2 Annahmen zur lokalen Spannungsverteilung

Soll eine Reihe von Messdaten in die statistischen Parameter ihrer Verteilung überführt werden, so sind Annahmen bezüglich der Verteilung dieser Messdaten zu treffen. Im Falle der hier betrachteten Mikrobauteile wird davon ausgegangen, dass die Grundgesamtheit der Spannungen an jedem Punkt des Bauteiles *normalverteilt* ist.³⁰¹ Abbildung 7.5

³⁰¹Diese Annahme basiert auf dem zentralen Grenzwertsatz, der besagt, dass die Summe einer großen Zahl unabhängiger und identisch verteilter Zufallsvariablen annähernd (standard)normalverteilt ist.

zeigt am Beispiel des zuvor betrachteten Planetenrades die Auftretenshäufigkeiten der lokal an den Knoten des Finite Elemente Netzes ermittelten Spannungswerte sowie die daraus ermittelten Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen der Normalverteilung. Es ist erkennbar, dass die Beschreibung der lokal auftretenden Spannungen mit Hilfe einer Normalverteilung möglich erscheint.³⁰² Dem zentralen Grenzwertsatz folgend ist davon auszugehen, dass mit zunehmender Anzahl an Stichproben der Grad der Überdeckung weiter zunimmt.

7.2.3 Abbruchkriterium und Konvergenzverhalten

Um festzulegen, wann der Optimierungsprozess beendet werden soll, ist ein Kriterium zu definieren. Dieses Abbruchkriterium ist nach jedem Durchlaufen des Optimierungsprozesses zu prüfen und zu entscheiden, ob eine weitere Iteration gestartet oder der Prozess beendet wird. Ein einfaches Kriterium ist die Anzahl der zu durchlaufenden Iterationen. Eine Angabe erfolgt in diesem Fall durch den Benutzer. Wesentlicher Nachteil eines solchen Abbruchkriteriums ist, dass nicht immer bekannt ist, ob und wie sich die Güte des Designvorschlages bei einer größeren Anzahl an Iterationen verändert hätte. Wird die Anzahl der zu durchlaufenden Iterationen zu hoch gewählt, wird der Prozess weiter durchlaufen, obwohl keine oder nur geringfügige Verbesserungen erzielt werden können. Daher werden meist aufwändigere Abbruchkriterien herangezogen. Das verwendete Softwarepaket zur Strukturoptimierung (→ Anhang A.5) ermöglicht beispielsweise die Formulierung eines Abbruchkriteriums, welches die Unterschiede der Systemantwort zweier aufeinander folgender Iterationen prüft. Seitens des Benutzers wird als Referenzwert eine entsprechende Schranke ϵ definiert. Der Optimierungsprozess gilt als beendet, wenn der Unterschied der beiden Systemantworten und damit die Designverbesserung geringer ist als ϵ .

Hinsichtlich des Konvergenzverhaltens gilt es zu prüfen, wie sich die Einbeziehung der statistischen Parameter in ein ursprünglich spannungsbasiertes Formoptimierungsverfahren auswirkt. Aus den Untersuchungen in Kapitel 8 wird deutlich, dass die Systemantwort meist monoton fällt. Dies lässt auf eine gute Konvergenz des Verfahrens schließen. Eine deutliche Verschlechterung des Konvergenzverhaltens gegenüber der spannungsbasierten Formoptimierung, wie sie Häußler³⁰³ bei der Verwendung von Lebensdauerkenngößen feststellt³⁰⁴, tritt im Rahmen der hier durchgeführten Untersuchungen nicht auf. Bei allen betrachteten Beispielen wird eine bessere Lösung gefunden und damit ein positives Ergebnis erreicht.

³⁰²siehe hierzu auch Schirmaier (2009)

³⁰³siehe Häußler (2006)

³⁰⁴Erst nach Einführung einer Erweiterung seines Prozessmodells um eine Oberflächenglättung erreicht Häußler ein gutes Konvergenzverhalten. Er führt dies auf die Entstehung sekundärer Kerbgebiete zurück, auf welche die betrachteten Lebensdauerkenngößen sehr sensitiv reagieren.

Abbildung 7.5 Auftretenshäufigkeiten lokal ermittelter Spannungswerte und daraus ermittelte Normalverteilungen am Beispiel des Planetenrades

7.2.4 Automatisierte Validierung eines Designvorschlages

Um die Güte eines mit Hilfe des vorgestellten Prozessmodells generierten Designvorschlages zu prüfen und damit eine Validierung durchzuführen, wird dieser mit dem ursprünglichen und nicht optimierten Entwurf und einem auf konventionelle Weise spannungsbasiert optimierten Designvorschlag verglichen. Für eine möglichst einfache und effiziente Validierung wird dieser Schritt automatisiert – als vorteilig erweist sich insbesondere die zentrale, strukturierte Datenablage und vergleichsweise wenige zusätzliche Angaben durch den Benutzer. Der prinzipielle Ablauf der automatisierten Validierung ist in Abbildung 7.6 dargestellt. Über die Benutzerangaben für das eigentliche Prozessmodell hinaus sind in einem weiteren Inputfile Angaben über die durchzuführenden Vergleiche machen (→ Anhang A.3).

Abbildung 7.6 Integration des neuen Prozessmodells zur Formoptimierung in die automatisierte Validierung

7.2.5 Implementierung

Die Implementierung des Prozessmodells erfolgt anhand des Moduls *G/Struct Validation*. G/Struct Validation integriert die zuvor entwickelten Methoden zur Kornstrukturgenerierung, einen Finite Elemente Solver, die genannten Methoden zur Ermittlung der lokalen statistischen Parameter und eine Umgebung zur Formoptimierung. Damit beinhaltet G/Struct Validation sämtliche im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Methoden und setzt das in diesem Kapitel vorgestellte Prozessmodell programmtechnisch um.

Das Softwarepaket G/Struct bietet die Möglichkeit, mehrere Analysen parallel durchzuführen, sofern die Infrastruktur dies zulässt. Neben einer Verwendung auf einem einzelnen Arbeitsplatzrechner ist auch der Betrieb auf einem Cluster möglich, was dank der nicht mehr streng sequenziell, sondern auch parallel ablaufenden Analysen zu einem erheblichen Zeitgewinn führt. In einer eigenen Konfigurationsdatei kann durch den Benutzer die Anzahl der gleichzeitig durchzuführenden Analysen angegeben werden. Alternativ kann das Softwarepaket G/Struct diesen Wert auch anhand der verfügbaren Anzahl an freien Lizenzen des Finite Elemente Solvers dynamisch bestimmen.

Bei der Verwendung wird zwecks Verwaltung der anfallenden Daten automatisch eine Datenstruktur angelegt.

Alle für die Optimierung benötigten und vom Benutzer zu spezifizierenden Inputfiles – das Analysemodell sowie die Parameter für die Kornstrukturerstellung und Optimierung – werden in einem Inputordner hinterlegt. Der Name dieses Inputordners ist als einer der Parameter im G/Struct Validation Inputfile anzugeben (→ Anhang A.3). Die im Laufe der Formoptimierung von G/Struct angelegten Dateien und Ordner werden derart benannt, dass die wichtigsten Eigenschaften der durchgeführten Analysen und Optimierungsläufe direkt aus dem jeweiligen Namen ersichtlich sind. Eine solche Bezeichnung setzt sich zusammen aus dem Namen des Modells, der Anzahl s der verwendeten Keime (seeds), dem Zielvolumen v_R bezogen auf das Ausgangsvolumen (volume restriction) und der Optimierungsstrategie. Wird kein Zielvolumen vorgegeben, wird anstelle der Zahl der String `noVR` verwendet. Die robustheitsbasierte Optimierungsstrategie wird mit `rob` (robust), die zuverlässigkeitsbasierte mit `rel` (reliable) und die Kombination mit `relrob` (reliable and robust) gekennzeichnet.

Für jeden Optimierungslauf wird in einem Ausgabeverzeichnis `output` ein Verzeichnis aller für die Auswertung benötigten Dateien angelegt. Der Ordner beinhaltet die für die jeweilige Optimierungsstrategie erzeugten Dateien. Falls erforderlich, kann so auch eine gezielte nachträgliche Analyse einzelner Modelle und ein separates Postprocessing erfolgen.

Das verwendete Softwarepaket für die Strukturoptimierung benötigt eingangsseitig zur Berechnung der Modifikationen des Designrandes Γ_d Ergebnisse im Format eines gängigen Finite Elemente Solvers. Die statistischen Parameter, die anhand von Monte Carlo Simulationen ermittelt werden, werden entsprechend in einem kompatiblen

Datenformat abgelegt.

Anhang A.4 fasst den Datenfluss innerhalb des entwickelten Softwarepaketes zusammen. Für weitere Details bezüglich der Implementierung sei an dieser Stelle auf Schirmaier³⁰⁵ und Horst³⁰⁶ verwiesen.

7.3 Einordnung in das integrierte Produktentstehungs-Modell

Zur Einordnung der neuen Methoden zur Modellierung und Simulation von Mikrobauteilen und -systemen sowie des adaptierten Formoptimierungsprozesses wird das integrierte Produktentstehungs-Modell herangezogen, welches in Abschnitt 2.1.2 vorgestellt wurde. Das Prozessmodell zur adaptierten Formoptimierung setzt auf der Ebene der Produktentstehung am Ende der Aktivität *Prinzipmodellierung* an und umfasst insbesondere die *Gestaltmodellierung* sowie die *Validierung* (Abbildung 7.7). Letztere erfolgt in diesem Fall nicht experimentell, sondern ausschließlich mit Hilfe rechnergestützter Simulationen.

Abbildung 7.7 Einordnung der Aktivitäten des neuen Optimierungsprozesses in das integrierte Produktentstehungs-Modell

Ausgangspunkt für die Ermittlung eines Designvorschlages zur Gestaltung eines hochbelasteten mikromechanischen Bauteils ist die Abbildung des Mikrosystems oder einer geeigneten Vereinfachung dessen. Die Modellierung erfolgt unter Zuhilfenahme der

³⁰⁵siehe Schirmaier (2009)

³⁰⁶siehe Horst (2009)

Finiten Elemente Methode und der im Softwarepaket G/Struct implementierten Methoden zur Abbildung der Kornstruktur. Gegebenenfalls liefert bereits eine ausschließliche Betrachtung des Bauteiles ohne konkrete Abbildung des weiteren Systems hinreichend genaue Ergebnisse. Generell gelten bei der Modellerstellung die im Makrobereich gängigen Richtlinien. Daneben gilt es zu entscheiden, welche Bauteile einschließlich des Korngefüges zu betrachten sind. Auf der Ebene der Aktivitäten der Problemlösung sind somit gemäß des Problemlösungsprozesses SPALTEN zunächst die Schritte Situationsanalyse und Problemeingrenzung zu durchlaufen und anschließend die Ableitung von alternativen Lösungen sowie deren Auswahl notwendig (→ Abschnitt 2.1.2). Je nach Komplexität des Systems sollte dies gemeinsam mit Experten aus Entwicklung, Versuch und Werkstoffwissenschaften in einem Problemlösungsteam (PLT)³⁰⁷ erfolgen.

Erweist sich ein näher betrachtetes Bauteil als kritisch, so ist zu prüfen, ob durch gezielte Modifikation der Bauteilform eine Verbesserung erzielt werden kann. Mit dem hier vorgestellten Prozessmodell steht hierfür eine Möglichkeit zur automatischen Formoptimierung bereit. Ergebnis einer solchen Formoptimierung ist ein Designvorschlag, der zur Aktivität Gestaltmodellierung beiträgt. Für die anschließend erforderliche Validierung steht mit dem Softwarepaket ein Werkzeug für eine automatische rechnergestützte Validierung auf Basis eines Vergleiches verschiedener Bauteilformen zur Verfügung. Dies kann für das Bauteil separat, im Kontext des Gesamtsystems oder einer geeigneten Abstraktion davon erfolgen. Während des Prozesses werden innerhalb der Aktivitäten der Produktentstehung jeweils Aktivitäten des Problemlösungsprozesses SPALTEN durchlaufen. Es werden zunächst anhand der gegebenen Bauteilform eine Situationsanalyse vollzogen, kritische Stellen identifiziert, über eine gezielte Modifikation der Bauteilform nach alternativen Lösungen gesucht und in Form einer weiteren Situationsanalyse die Tragweite analysiert.

Dem Grundgedanken des integrierten Produktentstehungs-Modells folgend leistet die vorliegende Arbeit einen Beitrag zur Überführung eines Zielsystems in ein Objektsystem durch Bereitstellung eines *Handlungssystems* in Form des vorgestellten Prozessmodells. Dieses gliedert sich in die in Kapitel 9 vorgestellte Prozesskette ein, die weitere Aspekte, die es bei der Entwicklung mikromechanischer Systeme zu berücksichtigen gilt, abdeckt.

7.4 Übertrag- und Erweiterbarkeit

Das in diesem Abschnitt vorgestellte Prozessmodell zur Formoptimierung eignet sich speziell für die Optimierung von Bauteilen mit stark streuenden Leitstützstrukturen. In Kapitel 8 wird der Einfluss dieser Streuungen auf die im Sinne der hier definierten Kriterien optimale Form eines solchen Bauteiles aufgezeigt. Die Methoden zur Modellierung derartiger Leitstützstrukturen sind daher einer der wesentlichen Bausteine innerhalb

³⁰⁷siehe Saak (2006)

des Prozessmodells. Das Prozessmodell an sich ist jedoch prinzipiell übertrag- und erweiterbar. Bei der Ermittlung der virtuellen Spannungen (→ Abschnitt 7.2) kann beispielsweise eine Streuung von Berandungen von Leitstützstrukturen³⁰⁸ berücksichtigt werden. Denkbar ist auch eine Einbeziehung von Wechselwirkungen zwischen Bauteil und System, wie sie bereits in Kapitel 6 durchgeführt wurde. Darüber hinaus ist eine Einbeziehung weiterer Aspekte, wie die von Ottnad³⁰⁹ berücksichtigte Regelung des Systems, möglich.

Die mit Hilfe des hier vorgestellten Prozessmodells im weiteren Verlauf der Arbeit ermittelten Ergebnisse bestätigen Meske³¹⁰, der – falls ein Optimalitätskriterium und eine Redesign-Regel definiert werden kann – ein Optimalitätskriterien-Verfahren empfiehlt. Sowohl die Effizienz- als auch die Konvergenzanforderungen werden bei den im folgenden Kapitel durchgeführten Untersuchungen erfüllt. Eine Erweiterung hin zu weiteren Aspekten, wie z. B. streuenden Lasten, erscheint daher vielversprechend. Untersuchungen zu Effizienz, Konvergenzverhalten und Ergebnisgüte sind dabei individuell zu prüfen. Da für die durchzuführenden statistischen Analysen eine Vielzahl an Berechnungen erforderlich wird, bestimmt die Grenzen der Anwendbarkeit meist nicht das vorgestellte Prozessmodell, sondern die zur Verfügung stehende Rechnerkapazität. Aktuelle Arbeiten befassen sich mit Formoptimierung unter Berücksichtigung streuender Berandungen von Leitstützstrukturen und der Optimierung der Nennmaßlage stark toleranzbehafteter Wirkflächenpaare³¹¹. Künftig wird am IPEK – Institut für Produktentwicklung eine Integration von streuenden Leitstützstrukturen und Wirkflächenpaaren unter Verwendung des hier vorgestellten Prozessmodells angestrebt.

³⁰⁸siehe Leslabay (2009)

³⁰⁹siehe Ottnad (2009)

³¹⁰siehe Meske (2007)

³¹¹siehe Leslabay (2009)

8 Szenario für die robustheitsbasierte Formoptimierung

Im vorangegangenen Kapitel wurde ein neues Prozessmodell zur Formoptimierung von Bauteilen mit stark streuenden Leitstützstrukturen entwickelt. Die Modifikation der Form soll dabei insbesondere im Sinne einer Erhöhung der Robustheit gegenüber der Kornstruktur erfolgen. Das Ziel dieses Kapitels ist die Anwendung des neuen Prozessmodells in einem möglichst realitätsnahen Szenario, d. h. einem Szenario, das typische Fragestellungen aus der Praxis aufweist. Neben der Güte der erreichbaren Ergebnisse wird daher auch der Aufwand für deren Generierung beurteilt. Im Rahmen einer Gegenüberstellung des ursprünglichen Designs, des konventionell mit Hilfe der isotropen Formoptimierung erzielbaren Entwurfes und des über den neuen Ansatz gewonnenen Designvorschlages wird das Potenzial des Prozessmodells erörtert.

Anhand des gewählten Demonstratorsystems – der in Kapitel 6 vorgestellten Mikroturbine des Sonderforschungsbereiches 499 – wird die Einbindung des Verfahrens in den Entwicklungsprozess dargestellt. Dem hier betrachteten Szenario gehen eine Reihe weiterer Untersuchungen des Autors voraus, bei denen anhand einer einfachen Lochplatte bereits Verbesserungen hinsichtlich der genannten Belange erzielt werden konnten.³¹²

8.1 Das Szenario

Die in diesem Szenario betrachtete druckluftbetriebene Mikroturbine besteht aus einem Rotor, einer Düsenplatte, einem Turbinengehäuse und einem Medienanschluss, vgl. Abbildung 6.1. Der Rotor dient, verbunden mit dem Sonnenrad, dem Antrieb des zuvor untersuchten Planetengetriebes. Der Spalt zwischen der Düsenplatte und den Enden der Rotorblätter ist von den verantwortlichen Entwicklern zwecks einer hohen Leistungsausbeute sehr gering gewählt. Die Gleitlagerung der Rotor- und Sonnenwelle erfordert ihrerseits jedoch ein gewisses Maß an Spiel. Dies kann zu einem Verklemmen der Bauteile führen. Im praktischen Einsatz der Prototypen zeigt sich, dass in einigen Fällen die Rotorblätter bereits während des normalen Betriebes brechen – das technische System kann seine Funktion nicht mehr erfüllen. Die Übertragung des aus

³¹²siehe z. B. Albers / Enkler (2009)

dem Zielsystem bekannten und gewünschten maximalen Moments kann daher nicht gewährleistet werden. Um die erzielbare Leistung nicht einschränken zu müssen, soll das Problem mit Hilfe einer geeigneten Formvariation gelöst werden.

8.2 Modellbildung

Der im Rahmen des Sonderforschungsbereiches 499 bereits prototypisch umgesetzte Entwurf berücksichtigt gemäß des Sichelmodells produktionstechnische Aspekte. Eine konkrete Auslegung hinsichtlich des oben beschriebenen Lastfalles erfolgte dabei jedoch nicht. Für die Modellbildung wird, wie in Kapitel 6 beschrieben und in Abbildung 8.1 dargestellt, ein Modell auf Basis des C&CM erstellt und dieses anschließend in ein Simulationsmodell überführt. Aufgrund der großen Anzahl an Analysen, die für die Durchführung der Optimierung erforderlich sind, wird eine Modellreduktion angestrebt. Der mit elf Blättern versehene Rotor ermöglicht die Begrenzung des betrachteten Bereiches auf ein einzelnes Schaufelblatt. Aufgrund der nur zweieinhalbdimensionalen Geometrie wird zudem das Modell auf zwei Dimensionen reduziert. Bereits in den Abschnitten 6.4.1 und 6.4.2 konnte gezeigt werden, dass dieses Vorgehen bei zweieinhalbdimensionalen Bauteilen hinreichend genaue Ergebnisse hinsichtlich der lokal herrschenden Spannungen liefert. Die Verbindung zur Sonnenwelle wird über das fest eingespannte Wirkflächenpaar $WFP_{\text{Sonnenwelle}}$ abgebildet. Die Einleitung der Kraft erfolgt in der Realität flächig über eine Seite des Rotorblattes. Im Modell wird die Kraft gleichmäßig entlang dieser Berandung aufgebracht, also entlang des $WFP_{\text{Krafteinleitung}}$ zwischen Druckluft und Rotorblatt. Die gegenüberliegende Seite des Rotorblattes wird für die Optimierung freigegeben.

Abbildung 8.1 Modellbildung des Turbinenrotors – Contact & Channel Model einer einzelnen Turbinenschaufel

8.3 Optimierung des Rotorblattes

Gesucht ist eine für die oben genannten Randbedingungen taugliche Berandung der Leitstützstruktur des Bauteiles. Das Material entspricht dem in Kapitel 6 verwendeten Stabilor®G. Im Folgenden werden die verschiedenen Optimierungsstrategien einander gegenübergestellt und im Hinblick auf das erzielbare Ergebnis sowie ihr Konvergenzverhalten untersucht und bewertet. Darüber hinaus wird der Einfluss der Korngröße auf eine optimale Bauteilform aus Robustheitssicht analysiert. Die durchgeführten Optimierungsläufe erfolgen mit Hilfe des Softwarepaketes G/Struct Validation, das im vorigen Kapitel entwickelt wurde. Um eine Vergleichbarkeit gewährleisten zu können, werden sämtliche Analysen – sofern nicht anders angegeben – mit einer Kornanzahl von $n_K = 30$ durchgeführt. Es werden in jedem Optimierungslauf insgesamt $n_A = 50$ Iterationen durchgeführt, in denen wiederum jeweils $n_M = 200$ Stichproben³¹³, also $n_M = 200$ individuelle Kornstrukturen, generiert werden. Für die Generierung eines Designvorschlages werden demzufolge jeweils $n_{M,ges} = 10.000$ Modelle berechnet. Die insgesamt ca. $n_{\Gamma,d} \approx 85$ Designknoten sind ausgehend vom Rotorfuß beginnend bei Eins durchnummeriert, vgl. Abbildung 8.2. Zwecks Vergleichbarkeit wird bei allen Optimierungsläufen ein Zielvolumen von $n_{h,V} = 105\%$ bezogen auf das Ausgangsvolumen angestrebt. Das Variationsgebiet $\hat{\Omega}$ wird nicht beschränkt.

Abbildung 8.2 Modellbildung des Turbinenrotors – Finite Elemente Modell samt der für die Optimierung freigegebenen Designknoten

³¹³In vorangegangenen Untersuchungen wurde ermittelt, dass die Formoptimierung mit Hilfe des neuen Ansatzes ab ca. 100 Stichproben gut reproduzierbare Ergebnisse liefert.

8.3.1 Gegenüberstellung der Optimierungsstrategien

Abbildung 8.3 stellt den nicht optimierten Ausgangsentwurf des Rotors und zwei unterschiedliche Designvorschläge gegenüber. Die in der Mitte dargestellte Bauteilform repräsentiert das Ergebnis des neuen Ansatzes unter Verwendung des im Fokus dieser Arbeit stehenden robustheitsbasierten Kriteriums. Die rechts abgebildete Kontur entspricht dem anhand einer isotropen spannungsbasierten Formoptimierung ermittelten Optimierungsergebnis. Bei den beiden letztgenannten Entwürfen zeigt die gestrichelte Kontur die ursprüngliche Geometrie zum Vergleich.

Abbildung 8.3 Gegenüberstellung des Ausgangsentwurfes und den auf Basis des konventionellen und neuen Ansatzes ermittelten Designvorschlägen

Es ist erkennbar, dass sich die beiden Designvorschläge deutlich voneinander unterscheiden. Während sich beim neuen Ansatz vornehmlich Material am Fuß des Rotorblattes anhäuft und hierfür sogar Material am Ende des Blattes abgebaut wird, wächst das konventionell optimierte Modell von der Mitte bis zum Fuß des Blattes nahezu gleichmäßig an. Die Bauteilkontur weist im Falle des neuen Ansatzes im Fußbereich einen wesentlich größeren Radius auf.

Einen Vergleich des Verlaufes der an einem Designknoten vorherrschenden Standardabweichung der Spannung als Maß für die Robustheit zeigt Abbildung 8.4. Die Werte sind auf die beim neuen Ansatz maximal auftretende Standardabweichung im Designvorschlag normiert.

Bereits mit der konventionellen Formoptimierung kann eine Reduktion der maximalen Standardabweichung um etwa ein Drittel erreicht werden. Der inhomogene Verlauf über

Abbildung 8.4 Vergleich der normierten lokalen Standardabweichung der an den Knoten ermittelten Spannungen für den Ausgangsentwurf und die Designvorschläge bei Verwendung des konventionellen und neuen Optimierungsansatzes

die Designknoten, also die Bauteilberandung vom Fuß bis zum Ende des Rotorblattes, bleibt dabei tendenziell erhalten. Der in Kapitel 7 entwickelte Ansatz führt zu einer weiteren Reduktion der maximal auftretenden Standardabweichung. Im direkten Vergleich liegt die maximal auftretende Standardabweichung beim Ausgangsmodell um etwa den Faktor drei höher. Diese deutliche Verbesserung geht gleichzeitig mit der gewünschten Homogenisierung der Streuung der Spannungen entlang des Bauteilrandes einher. Ähnlich verhält es sich mit dem jeweils lokal errechneten Mittelwert der Spannung, der für die drei Modelle in Abbildung 8.5 dargestellt ist.

Zwecks Untersuchung des Konvergenzverhaltens wird für jeden Designknoten der Verlauf der an seiner Position errechneten Standardabweichung und dem zugehörigen Mittelwert über den einzelnen Optimierungsiterationen verfolgt. Die Abbildungen 8.6 und 8.7 zeigen die jeweiligen Werte der zugehörigen Grundgesamtheit (GG). Wie zuvor beziehen sich die dargestellte Standardabweichung und der Mittelwert auf den im Designrand des finalen Vorschlages maximal auftretenden Wert. Die in der letzten Iteration aufgetragenen Verläufe entlang des Designrandes entsprechen denen in den Abbildungen 8.4 und 8.5. Das Konvergenzverhalten kann als gut bewertet werden – im Wesentlichen verbessern sich für alle Designknoten deren statistischen Parameter von Iteration zu Iteration. Nach etwa 30 bis 35 Iterationen hat sich der spätere Designvorschlag bereits nahezu vollständig ausgebildet.

Abbildung 8.5 Vergleich des normierten lokalen Mittelwertes der an den Knoten ermittelten Spannungen für den Ausgangsentwurf und die Designvorschläge bei Verwendung des konventionellen und neuen Optimierungsansatzes

Abbildung 8.6 Verlauf der Grundgesamtheit der normierten Standardabweichung der Spannung über den Optimierungsiterationen bei Verwendung des neuen Prozessmodells

Abbildung 8.7 Verlauf der Grundgesamtheit des normierten Mittelwertes der Spannung über den Optimierungsiterationen bei Verwendung des neuen Prozessmodells

Die Abbildungen 8.8, 8.9 und 8.10 zeigen über die neue robustheitsbasierte Formoptimierung und damit den Kern der Arbeit hinaus einen Vergleich der in Kapitel 7 entwickelten Strategien. Wie Abbildung 8.4 zeigt das Diagramm den Verlauf der normierten Standardabweichung der Spannungen entlang der Designknoten. Es ist erkennbar, dass hinsichtlich des Robustheitskriteriums wie gefordert die robustheitsbasierte Formoptimierung den niedrigsten und homogensten Verlauf aufweist. Die Kombination aus robustheits- und zuverlässigkeitsbasierter Formoptimierung liefert einen im Vergleich dazu allgemein zu höheren Werten hin verschobenen Verlauf. Ausgehend von einem Maximum fällt die Standardabweichung zum Ende des Rotorblattes hin etwas ab. Die zuverlässigkeitsbasierte Formoptimierung ist von den neuen Verfahren in ihrem Verlauf dem konventionell ermittelten Designvorschlag am ähnlichsten – auch der Designvorschlag selbst ist bis auf einen größeren Radius am Fuß nahezu identisch, vgl. Abbildung 8.8. Allen mit Hilfe des neuen Ansatzes erzeugten Designvorschlägen ist gemein, dass sie eine im kritischen Bereich des Ausgangsentwurfes niedrigere Standardabweichung aufweisen als der konventionell ermittelte Designvorschlag.

Sowohl der in Kapitel 7 vorgestellte Ansatz auf Basis des 90%-Quantils $Q_{.9}$ der Spannungen als auch das kombinierte Verfahren mittels eines Strafterms führen hinsichtlich des Zuverlässigkeitsmaßes aus den dort genannten Gründen bislang zu keiner so deutlichen Verbesserung wie der robustheitsbasierte Ansatz, vgl. Abbildung 8.10. Das beste Ergebnis liefert auch hier der robustheitsbasierte Ansatz, der zwar einen weniger homogenen, dafür aber um mindestens 8% niedrigeren Verlauf des 90%-Quantils der Spannungen entlang der Designknoten aufweist. Dies wird vorrangig auf

die noch zu bewältigenden Herausforderungen bei der Suche eines geeigneten Strafterms beim kombinierten Verfahren zurückgeführt. Dennoch führen auch bezüglich des 90%-Quantils die zuverlässigkeitsbasierte und kombinierte Formoptimierung zu besseren Ergebnissen als die konventionelle Herangehensweise. Das Konvergenzverhalten bei der zuverlässigkeitsbasierten und kombinierten Formoptimierung ist ebenfalls gut – in beiden Fällen stellt sich der Designvorschlag nach etwa 30 bis 35 Iterationen ein.

Abbildung 8.8 Gegenüberstellung der auf Basis der robustheitsbasierten, zuverlässigkeitsbasierten und kombinierten Formoptimierung ermittelten Designvorschläge

Insbesondere die im Fokus dieser Arbeit stehenden Robustheitsforderungen werden somit sehr gut erfüllt. Der robustheitsbasierte Ansatz liefert im Vergleich zu den übrigen Optimierungsläufen wesentliche Verbesserungen sowohl hinsichtlich des Robustheits- als auch Zuverlässigkeitskriteriums. Die weiteren Untersuchungen werden daher mit dem robustheitsbasierten Ansatz durchgeführt.

Es bleibt festzuhalten, dass das neue Prozessmodell für das betrachtete Szenario sehr gute Ergebnisse liefert. Sowohl die Reduktion als auch die Homogenisierung der als Robustheitsmaß verwendeten Standardabweichung der lokal auftretenden Spannungen gelingt. Auch gegenüber dem konventionellen Vorgehen, bei dem nur ein einziges, isotropes Modell je Optimierungsiteration berechnet wird, liefert der neue Ansatz bessere Ergebnisse. Das Konvergenzverhalten ist ebenfalls zufriedenstellend, wobei zu berücksichtigen ist, dass einer Iteration bei Verwendung des vorgestellten Prozessmodells zwecks Ermittlung der statistischen Parameter wesentlich mehr Analysen zugrunde liegen müssen. Trotz einer annähernd gleichen Anzahl an für die Designfindung benö-

Abbildung 8.9 Vergleich der normierten lokalen Standardabweichung der an den Knoten ermittelten Spannungen des neuen Optimierungsansatzes bei Verwendung des robustheitsbasierten, des zuverlässigkeitsbasierten und des kombinierten Kriteriums

tigten Iterationen ist daher ein höherer Aufwand erforderlich.

8.3.2 Einfluss der Korngröße auf die optimale Bauteilform

Bei der Entwicklung mikromechanischer Systeme im Rahmen des Sonderforschungsbereiches 499 wird unter anderem angestrebt, die Bauteile und Systeme kontinuierlich weiter zu miniaturisieren. Dies wirft aus Sicht der in dieser Arbeit formulierten Zielstellung die Frage nach dem Einfluss der Korngröße auf die jeweils optimale Form auf. Bei einer Miniaturisierung vergrößert sich der mittlere Korndurchmesser in Relation zu den Bauteilabmessungen. Um diesen Aspekt zu beleuchten, werden mehrere Designvorschläge mit dem robustheitsbasierten Ansatz erstellt, bei denen bis auf die variierte Korngröße alle Parameter konstant gehalten werden. Einfluss auf die Korngröße wird durch die Anzahl der im Bauteil erzeugten Körner genommen. Diese wird in diskreten Schritten zwischen $10 \leq n_K \leq 500$ gewählt. Bei allen Optimierungsläufen wird wie beschrieben ein Zielvolumen von $n_{h,V} = 105\%$ bezogen auf das Ausgangsvolumen gefordert.

In Abbildung 8.11 wird deutlich, dass sich mit zunehmender Kornanzahl der jeweils ermittelte Designvorschlag immer mehr dem isotropen und über das konventionelle Verfahren erhaltenen Entwurf nähert. Etwa in der Mitte der Schaufel ist erkennbar,

Abbildung 8.10 Vergleich des normierten lokalen 90%-Quantils der an den Knoten ermittelten Spannungen des neuen Optimierungsansatzes bei Verwendung des robustheitsbasierten, des zuverlässigkeitsbasierten und des kombinierten Kriteriums

dass bei geringer werdender Kornanzahl der im isotropen Fall deutlich ausgebildete Knick nach und nach abgebaut wird. Das Material häuft sich hingegen am Fuß der Turbinenschaufel an. Insgesamt führt dies zu einer Vergrößerung des Radius der dort befindlichen Verrundung.

Bezüglich des Konvergenzverhaltens lässt sich feststellen, dass mit zunehmender Anzahl an Körnern der finale Designvorschlag schneller gefunden werden kann. Im Falle von nur $n_K = 10$ Körnern werden im Vergleich zu $n_K = 500$ Körnern ca. $\Delta i \approx 10$ Optimierungsiterationen mehr benötigt, bis sich eine nur noch geringfügige Änderung der Systemantwort ergibt.

Aus den Analysen geht hervor, dass mit zunehmender Korngröße die Streuung der Spannung innerhalb des Bauteiles zunimmt. Dennoch gelingt es mit dem neuen Ansatz, die als Robustheitsmaß herangezogene Standardabweichung s der lokalen Spannung in allen betrachteten Fällen weitestgehend auf den automatisch ermittelten Referenzwert s_{ref} zu homogenisieren. Die durchgehend feststellbaren Tendenzen sowohl bei der sich ausbildenden Bauteilform als auch bei den Systemantworten über die unterschiedlichen Kornanzahlen hinweg deuten auf einen stabilen Prozess hin. Für die Entwicklung mikromechanischer Bauteile ist damit davon auszugehen, dass bei einer Miniaturisierung nicht nur eine einfache Skalierung der Geometrie vorgenommen, sondern das Design nach Möglichkeit adaptiert werden sollte.

Abbildung 8.11 Designvorschläge bei unterschiedlicher Anzahl an Körnern – mit zunehmender Anzahl an Körnern nähert sich der Designvorschlag des neuen Ansatzes dem konventionell und isotrop ermittelten Entwurf an

8.3.3 Umsetzung der Ergebnisse

Die gewonnenen Erkenntnisse aus der Optimierung werden im Rahmen des Sonderforschungsbereiches 499 bei der Weiterentwicklung des Demonstratorsystems berücksichtigt. Die Gestalt des Rotors wird den Ergebnissen entsprechend angepasst und zusammen mit weiteren Forschungsergebnissen in Form mehrerer Prototypen umgesetzt. So wird neben der neuen Bauteilform anhand der Bauteildicke auch das Aspektverhältnis variiert.³¹⁴ Abbildung 8.12 zeigt eine Gegenüberstellung des alten und neuen Rotor designs, Abbildung 8.13 die entsprechenden Prototypen. Weitere Details zur technischen Umsetzung können dem Anhang unter A.7 und A.8 entnommen werden.

Abbildung 8.12 Gegenüberstellung des ursprünglichen (links) und des mit Hilfe des vorgestellten Ansatzes optimierten Designs (rechts)

Abbildung 8.13 Von der rechnergestützten Optimierung bis hin zur Umsetzung in ein physisches Objektsystem³¹⁵

³¹⁴vgl. Bauer et al. (2009)

³¹⁵vgl. Sonderforschungsbereich 499 (2008)

8.4 Fazit

Die in diesem Kapitel auf Basis des neuen Ansatzes zur Formoptimierung im Kontext eines Szenarios aus dem Sonderforschungsbereich 499 erzielten Ergebnisse verdeutlichen die Relevanz der virtuellen Produktentwicklung. Die erzielten Ergebnisse deuten darauf hin, dass die in der Zielsetzung der Arbeit gestellten Anforderungen erfüllt werden. Hinsichtlich des gewählten Robustheitsmaßes (\rightarrow Kapitel 7) führt der neue Ansatz zu deutlich besseren Ergebnissen als die rein isotrope, spannungsbasierte Formoptimierung, die im betrachteten Beispiel ebenfalls eine Verbesserung ermöglicht. Das Konvergenzverhalten des Ansatzes ist bei allen durchgeführten Optimierungsläufen gut. Festzuhalten bleibt jedoch, dass aufgrund der großen Anzahl an Simulationen Einschränkungen bezüglich der Modellkomplexität in Kauf genommen werden müssen. Die Integration von Zuverlässigkeit und Robustheit liefert prinzipiell gute Ergebnisse, der bislang dafür erforderliche Aufwand im Vergleich zur separaten robustheits- und zuverlässigkeitsbasierten Formoptimierung ist jedoch hoch. Insbesondere die Wahl eines geeigneten Straftermes stellt sich als Herausforderung dar. Zwar steht eine solche kombinierte Betrachtung nicht im Fokus dieser Arbeit, die Ergebnisse deuten jedoch auf ein noch großes Forschungspotenzial hin. Das eigentliche Ziel – die Verbesserung und Homogenisierung der Robustheit – wird bei allen mit dem neuen robustheitsbasierten Ansatz durchgeführten Optimierungsläufen sehr gut erfüllt.

Mit den entwickelten und im Prozessmodell integrierten Methoden stehen dem Anwender leistungsfähige Werkzeuge zur Verfügung, um mechanisch hochbelastete Mikroteile zu entwerfen. Wesentliches Merkmal des Prozessmodells ist, dass sämtliche zu durchlaufenden Schritte vollständig rechnerunterstützt und damit im Sinne eines durchgängig virtuellen Entwicklungsprozesses erfolgen können. Ausgehend von einem CAD-Modell kann ein Bauteilentwurf abgeleitet werden, dessen Form den Spezifika der Mikrotechnik Rechnung trägt. Das Beispiel zeigt, dass eine sich an den gegebenen Fertigungsrestriktionen orientierende Konzeption der Bauteilgestalt als Ausgangspunkt für die Festlegung einer konkreten Bauteilform mit Hilfe des in Kapitel 7 vorgestellten Prozessmodells eignet. Durch dessen Einsatz kann in vergleichsweise kurzer Zeit ein Entwurf abgeleitet werden, ohne die im Bereich der urformenden Mikrotechnik kostenintensiven Versuchsreihen mit Prototypen durchführen zu müssen. Diese werden erst im folgenden Schritt zur versuchsgestützten Validierung benötigt – aufgrund der noch immer begrenzten Realitätstreue von Simulationsmodellen und -methoden sind sie jedoch unerlässlich. Die Reduktion und die Homogenisierung der Streuung der in den Bauteilen auftretenden Spannungen erleichtern deren Auslegung. Die vorgestellten Methoden ergänzen somit den Entwicklungsprozess und ermöglichen eine zielgerichtete Gestaltung mikromechanischer Bauteile.

9 Durchgängige Prozesskette

Neben den in den vorangegangenen Kapiteln erläuterten Aspekten existieren weitere Einflüsse, die sich auf Eigenschaften wie die Robustheit und Zuverlässigkeit urgeformter mikromechanischer Bauteile und Systeme auswirken. Im Folgenden werden daher exemplarisch drei weitere relevante Einflüsse beschrieben, deren rechnergestützte Untersuchung Gegenstand des Sonderforschungsbereiches 499 ist. Aufgrund der zumindest aktuell auf die Fragestellungen spezifisch zugeschnittenen Simulationsmethoden und -prozesse sowie wegen der erforderlichen hohen Rechenkapazitäten werden diese Themenfelder derzeit in mehreren Arbeiten einzeln betrachtet. Die separaten Untersuchungen geben gezielt Einblick in die Auswirkungen des jeweils betrachteten Aspektes. Sämtliche vorgestellten Methoden und Prozesse stehen im Rahmen des Zentrums für Integrierte Mikrofertigung (ZIM) zur Verfügung.

9.1 Prozesssimulation

Bereits während des *Herstellprozesses* werden wesentliche Merkmale der Bauteile festgelegt. In Teilprojekt A4 wird daher eine universelle Simulationsumgebung für die beiden zentralen Abformprozesse des Sonderforschungsbereiches 499 entwickelt: das Mikropulverspritzgießen (micro powder injection molding – μ PIM) pulvergefüllter Formmassen sowie den Mikroguss (μ Guss) von metallischen Legierungen (→ Abschnitt 2.6.3).

Für das μ PIM-Verfahren werden Ansätze mit eigenen, neu entwickelten Modellen verwendet. Dies ist darauf zurückzuführen, dass heutige kommerziell erhältliche Simulationswerkzeuge für das Spritzgießen – beispielhaft seien hier Autodesk's Moldflow³¹⁶ oder ProCAST³¹⁷ der ESI Group genannt – nur begrenzt in der Lage sind, die *Abformung* in Mikrodimensionen und das *Spritzgießen* hoch gefüllter Formmassen zuverlässig zu beschreiben.³¹⁸ Dies ist insbesondere auf die drastisch erhöhten Verhältnisse von Oberfläche zu Volumen im Bereich der Mikrotechnik in Verbindung mit einer in kommerziell erhältlichen Softwarepaketen unzureichenden Repräsentation der Oberflächen und deren starke Verformungen zurückzuführen. Darüber hinaus eignen sich diese Werkzeuge nicht für die Simulation mehrphasiger Kompositsysteme aus anorganischen

³¹⁶siehe Autodesk Inc. (2009)

³¹⁷siehe ESI Group (2009)

³¹⁸vgl. Sonderforschungsbereich 499 (2008), S. 195ff

Füllstoffen und thermoplastischen Binderkomponenten. Wechselwirkungsbeziehungen der Komponenten untereinander können nicht berücksichtigt werden.³¹⁹

Im Falle des μ Gusses stellt neben den fluidischen Effekten die *Temperaturdynamik*, welche entscheidenden Einfluss auf den Erfolg des Prozesses und die Eigenschaften des späteren Bauteils ausübt, eine Herausforderung dar. So hängt beispielsweise die sich ausbildende Mikrostruktur von der thermischen Vorgeschichte ab. Von der Mikrostruktur selbst hängt wiederum – wie in den vorangegangenen Kapiteln gezeigt – das Bauteil- und damit Systemverhalten ab.

Die im Sonderforschungsbereich 499 erarbeiteten Methoden basieren auf den *smoothed particle hydrodynamics*³²⁰. Das in Entwicklung befindliche Simulationspaket berücksichtigt unter anderem die Pulvermigration, die Viskoelastoplastizität und die Orientierung wachsender Kristallite. Über Makromodelle besteht zudem die Möglichkeit, Gefügeeigenschaften zu prognostizieren. Zur Abbildung des Fluids wird eine Fluidpartikelmethode gewählt, da diese bezüglich großen Verformungen und freien Oberflächen Vorteile gegenüber gitterbasierten Verfahren aufweist. Die Fluidpartikelmethode wird damit als zentrales Gerüst einer Prozesssimulation nicht nur auf das μ PIM-Verfahren, sondern auch als Basis für die Simulation des μ Gusses verwendet. Aufbauend auf einem Füllsimulator³²¹ für das μ PIM-Verfahren werden die weiteren Prozessschritte Entformung und Entbindern abgebildet, ebenso wie der Befüllvorgang im μ Guss. Bei Letzterem wird das während des Herstellprozesses entstehende Gefüge vorhergesagt, wobei mit Hilfe des oben genannten Makromodells die Temperaturen von Muffel und Befüllmaterial miteinander gekoppelt werden.³²²

9.2 Einfluss von Toleranzen auf das Systemverhalten

In Kapitel 5 wurden Methoden zur Modellierung und Simulation komplexer, dreidimensionaler Mikrobauteile vorgestellt. Die Methoden adressieren die für urgeformte mikromechanische Komponenten relevante Kornstruktur und die derzeit noch vergleichsweise hohe Porosität. Bereits in Kapitel 5 wurde bei der Modellbildung des Technologiedemonstrators darauf eingegangen, dass neben den aus der Leitstützstruktur resultierenden Streuungen auch die *Wirkflächenpaare* und damit die Bauteilgeometrie bei realen Bau-

³¹⁹vgl. Sonderforschungsbereich 499 (2008), S. 195ff

³²⁰Mit Hilfe der smoothed particle hydrodynamics (SPH) wird die zu simulierende Flüssigkeit in Elemente unterteilt. Relevante Größen, wie z. B. die Dichte, werden durch Summation über alle Teilchen berechnet, wobei jedes einzelne Teilchen einen Anteil in Form eines Skalars mit sich trägt. Damit können neben globalen Größen auch lokale Effekte analysiert werden. Der wichtigste Parameter ist der mittlere Abstand h der Elemente, auch Glättungslänge (smoothing length) genannt. Zwischen den Teilchen wird eine Glättung (smoothing) vorgenommen. Diese Herangehensweise ermöglicht es, die partiellen Differentialgleichungen der Hydrodynamik in gewöhnliche Differentialgleichungen zu überführen, was eine effizientere Handhabung ermöglicht. Vgl. Liu / Liu (2007)

³²¹siehe Kauzlaric et al. (2009); Heldele et al. (2006)

³²²vgl. Lienemann et al. (2009)

teilen nicht ideal sind. Dies ist besonders insofern von Bedeutung, weil die gegenwärtig noch in Erforschung befindlichen Produktionsverfahren es nicht ermöglichen, Toleranzen in gleichem Maße wie die Bauteilabmessungen zu miniaturisieren.

Auf Basis desselben Grundmodelles befasst sich Leslabay³²³ mit rechnergestützten Methoden zur Minimierung der Sensitivität des Systemverhaltens gegenüber unvermeidbaren, geometrischen Abweichungen. Wie in der vorliegenden Arbeit ist daher eine Bestimmung der Robustheit – in diesem Fall des Systems – erforderlich. Ziel ist die Verbesserung der Ausgangseigenschaften des Systems unter Betrachtung stochastischer Einflüsse. Die Minimierung wird bei dem von Leslabay vorgestellten Prozess ausschließlich durch eine Änderung der Lage der *Nennmaße* der Wirkflächen erreicht. Die Toleranzfeldbreite selbst bleibt hierbei stets gleich und damit eine rein produktionstechnisch vorgegebene Eingangsgröße für den Prozess. Für die Untersuchungen verwendet Leslabay ebenfalls das Planetengetriebe als Demonstratorsystem (→ Kapitel 6).

Der Prozess gliedert sich in vier Schritte. Im ersten Schritt steht die *Erstellung eines geeigneten Simulationmodelles* und dessen Validierung im Vordergrund, wobei letzteres wie gemeinsam mit dem Autor beschrieben z. B. anhand von Messdaten erfolgt.³²⁴ Ähnlich wie in Kapitel 5 ist auch hier zu beachten, dass bei der Modellbildung nur die für die Analysen benötigten Details abgebildet werden, um eine möglichst niedrige Rechenzeit zu erzielen. Darüber hinaus ist eine parametrische Modellierung erforderlich, um Proben mit individuellen Geometrien analysieren zu können.

Der zweite Schritt dient der *Identifikation relevanter Parameter*, d. h. derjeniger Parameter, die einen hinreichend großen Einfluss auf die betrachteten Ausgangsgrößen ausüben. Da in dieser Phase nicht gewährleistet werden kann, dass die relevanten Parameter für alle interessierenden Ausgangsgrößen miteinander übereinstimmen, ist der Identifikationsschritt für jede Ausgangsgröße separat durchzuführen. Grundlage für die Identifikation sind gängige Verfahren der statistischen Versuchsplanung, die jeweils Vor- und Nachteile aufweisen.

Eine *Bestimmung der Robustheit und Zuverlässigkeit* der Systeme erfolgt im dritten Schritt mit Hilfe der zuvor abgeleiteten Parametersätze.

Im vierten und letzten Schritt erfolgt die Integration der aus der Parameteranalyse und der Robustheitsbestimmung bekannten Ergebnisse in einen *Optimierungsprozess*. Ziel der Optimierung ist die Erhöhung der Robustheit des Systems hinsichtlich der zuvor definierten Ausgänge.

Die genannten Schritte sollten in der dargestellten Reihenfolge durchgeführt werden, jedoch ist es – je nach Problemstellung – nicht zwingend erforderlich, alle Schritte zu durchlaufen. Dennoch empfiehlt Leslabay zur Gewinnung aller relevanter Informationen, alle vier Schritte durchzuführen.

³²³siehe Leslabay (2009)

³²⁴siehe Albers et al. (2010a, 2009c)

9.3 Verschleißsimulation

Die Arbeiten des Teilprojektes D4 des Sonderforschungsbereiches 499 konzentrieren sich auf Simulationen zur Vorhersage der Veränderungen von Bauteilgeometrien aufgrund von Verschleiß. Dabei werden neben geometrisch einfachen Proben auch komplexe Bauteile wie Zahnräder unter quasistatischen Randbedingungen untersucht. Basis für die Simulationen bilden – wie in der vorliegenden Arbeit – Finite Elemente Analysen. In einem Postprocessing-Schritt wird die *Druckverteilung* und der *Schlupf* während eines Lastzyklusses aus einer oder mehreren solcher Analysen ermittelt. Unter einem Lastzyklus wird z. B. eine Umdrehung eines Getriebes verstanden. Er liefert die entsprechenden Spannungsverteilungen über eine volle Periode. Es wird angenommen, dass die Kontaktbelastungen, also die Oberflächenpressungen sowie der Schlupf, für eine gewisse Anzahl an Lastzyklen nahezu konstant bleiben. Damit kann der an den Knoten des Finite Elemente Netzes vorliegende lokale Materialabtrag mit Hilfe des *Archad-Verschleißmodells* errechnet werden. Die räumliche Position der Knoten und damit die Randgeometrie des Probekörpers wird anschließend entsprechend der Vorhersage modifiziert, d. h. der verschlissene Anteil wird von der ursprünglichen Geometrie entfernt. Die nun vorliegende Geometrie wird erneut dem Lastzyklus unterworfen und wie beschrieben modifiziert.

Hegadekatte³²⁵ entwickelt einen Verschleißprozessor, der sowohl im Falle zwei- als auch dreidimensionaler Geometrien anwendbar ist. Der Verschleißprozessor stellt eine Implementierung des Archad-Modells dar. Gemeinsam mit Kurzenhäuser et al.³²⁶ wird eine Validierung über im Forschungsfeld Tribologie etablierte Standardversuche durchgeführt. Das von Hegadekatte vorgeschlagene *globale inkrementelle Verschleißmodell* (global incremental wear model – GIWM) ist zudem in der Lage, auch komplexe und zeitintensive Versuche abzubilden. Die Untersuchungen befassen sich mit zwei unterschiedlichen tribologischen Zuständen, die separat betrachtet werden. Dies sind

- » reines einsinniges Gleiten, welches z. B. in den Achsen und Lagern des Planetengetriebes auftritt, und
- » gemischtes Gleiten und Wälzen, welches z. B. mit zeitlich veränderlichen Kontaktpressungen und Schlupfen an den Zahnflanken des Planetengetriebes auftritt.

Für die Untersuchungen stehen drei unterschiedliche Methoden bereit. Der Verschleißprozessor kann bei zwei in Kontakt stehenden und elastisch deformierbaren Körpern angewendet werden. Dem guten Vorhersagevermögen des Verschleißes steht jedoch der hohe numerische Aufwand gegenüber. Die Implementierung des Verschleißprozessors mit Hilfe einer im verwendeten Finite Elemente Softwarepaket enthaltenen Benutzerroutine zur Modifikation des Netzes führt bei der zweiten Methode zu einer

³²⁵siehe Hegadekatte (2006)

³²⁶vgl. Kurzenhäuser et al. (2008)

geringeren Rechenzeit. Allerdings geht dieser Vorteil insbesondere im Falle hoher Abtragsraten mit einem systematischen und vor allem nicht konservativen Fehler bei der Verschleißvorhersage einher. Des Weiteren kann der Materialabtrag lediglich für eines der in Kontakt stehenden Bauteile ermittelt werden. Als effiziente dritte Methode steht das GIWM zur Verfügung, das – ausgehend von einem Modellversuch – eine hinreichend gute Aussage bei niedrigem numerischem Aufwand liefert. Eine allgemeine Anwendbarkeit ist in diesem Falle nicht gegeben. Dennoch eignet sich diese Methode für eine schnelle Bereitstellung valider Ergebnisse oder zur Durchführung einer statistischen Versuchsplanung.

Die entwickelten Methoden beschränken sich, wie auch die Arbeiten von Leslabay³²⁷, ausschließlich auf den Fall quasistatischer Lasten. Eine Erweiterung des Verschleißprozessors hin zur Berücksichtigung transienter Lastfälle ist Gegenstand aktueller Arbeiten. Auch hierfür werden kommerziell verfügbare Finite Elemente Softwarepakete als Basis herangezogen. Die beschriebene Vereinfachung, dass in einem bestimmten zeitlichen Rahmen von gleich bleibenden Bedingungen ausgegangen werden kann, wird hierfür jedoch aufgegeben. Daher ist von einem höheren numerischen Aufwand auszugehen. Erste Vergleiche mit einfachen Versuchen zeigen das Potenzial der erweiterten Methode.³²⁸

9.4 Prozesskette

Für den Entwurf von Bauteilen mit stark streuenden Leitstützstrukturen wird auf Basis der vorgestellten Ansätze eine Vorgehensweise vorgeschlagen, bei der erste *Bauteilentwürfe* für ein daraus aufzubauendes System den Ausgangspunkt darstellen. Im Falle mikromechanischer Systeme können solche Entwürfe anhand des mikrospezifischen Produktentwicklungsprozesses³²⁹ erstellt werden. Die so erzeugten Entwürfe sollten mögliche Restriktionen aus der Produktion bereits weitestgehend berücksichtigen. Die Herstellbarkeit der entworfenen Bauteile sollte bereits in diesem Stadium mit Hilfe von *Prozesssimulationen* untersucht werden. Falls erforderlich, ist die Grobgestalt gemäß der so ermittelten Restriktionen aus Sicht der Herstellbarkeit anzupassen. Anschließend werden die die Leistungsgrenze bestimmenden, hochbelasteten mikromechanischen Komponenten des Systems einer *Betriebsanalyse* unterzogen, wie sie in Kapitel 6 beschrieben wurde. Kritisch erscheinende Bauteile werden – sofern dies die Randbedingungen aus Produktion etc. zulassen – einer gezielten *Formoptimierung* unterzogen (→ Kapitel 8). Sollten sich dabei wesentliche Formänderungen ergeben haben, können für die jeweiligen Bauteile weitere Prozesssimulationen zur Sicherstellung der Herstellbarkeit erforderlich sein. Steht die endgültige Bauteilform fest, so gilt es, die Lage

³²⁷vgl. Leslabay (2009)

³²⁸vgl. Hegadekatte (2006)

³²⁹siehe Marz (2005) und Abschnitt 2.6.4

der *Nennmaße* zu optimieren. Abschließend kann anhand einer *Verschleißsimulation* der während des Betriebes auftretende Verschleiß untersucht und daraus die dadurch bestimmte Lebensdauer einzelner Bauteile ermittelt werden, vgl. Abbildung 9.1.

Abbildung 9.1 Qualitativ dargestellte Prozesskette

10 Zusammenfassung und Ausblick

10.1 Zusammenfassung

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde ein neues Prozessmodell zur Analyse und Strukturoptimierung von Bauteilen mit stark streuenden Leitstützstrukturen am Beispiel hochbelasteter mikromechanischer Komponenten entwickelt. Die in dieser Arbeit betrachteten urgeformten Mikrobauteile weisen Dimensionen auf, in denen die Bauteile je nach Material und Herstellverfahren nur noch aus einer vergleichsweise geringen Anzahl an Körnern bestehen. Das anisotrope Materialverhalten der einzelnen Körner wirkt sich somit teilweise erheblich auf den Spannungs- und Verformungszustand eines solchen Bauteiles aus. Hinzu kommen Poren, die ebenfalls Einfluss auf das Bauteil nehmen. Aufgrund der sich in jedem Bauteil individuell ausbildenden Kornstruktur und damit der jeweils spezifischen Verteilung und Orientierung der einzelnen Körner sowie eventuell unvermeidbarer Fehlstellen steht der Entwickler vor der Herausforderung, diese Einflüsse bereits beim Entwurf solcher Bauteile zu berücksichtigen. Die vorgestellten numerischen Methoden und Ansätze unterstützen den Entwickler in genau diesem Punkt und ergänzen somit Versuche, die beispielsweise in den werkstoffwissenschaftlichen Teilprojekten des DFG Sonderforschungsbereiches 499 durchgeführt werden. Die Arbeit leistet damit einen Beitrag zum Ausbau der Methoden und Prozesse der virtuellen Produktentwicklung.

In Kapitel 2 wurde mit einer Analyse des Standes der Forschung und den dort vorgestellten theoretischen Grundlagen die Basis für die in Kapitel 3 abgeleitete Zielsetzung gelegt. Im Rahmen der im Stand der Forschung durchgeführten Situationsanalyse zeigte sich, dass die gesteigerte Leistungsfähigkeit und Komplexität moderner Simulationsmethoden unter anderem auch dazu geführt hat, dass die Entwicklung und Auswahl der jeweils geeigneten Prozesse immer schwieriger geworden ist. In Kapitel 4 wurde das von Albers entwickelte Contact & Channel Modell daher zu einem generalisierten Ansatz erweitert. Dieses bietet die Möglichkeit, durch eine das System und den Simulationsprozess verbindende Sprache sowohl funktionale und physikalische Zusammenhänge als auch Schnittstellen im Simulationsprozess darzustellen. Damit ist eine durchgängige Beschreibung vom Produkt bis hin zum Zielsystem der Simulation gegeben, was die Auswahl eines geeigneten Simulationsprozesses unterstützt.

Auf Basis des generalisierten Ansatzes mit dem Contact & Channel Model wurden

die in den folgenden Kapiteln vorgestellten Ansätze entwickelt. Mit deren Hilfe wird eine möglichst frühzeitige rechnergestützte Untersuchung von Bauteilen unter Berücksichtigung des Einflusses der Kornstruktur und Defekten – also von Bauteilen mit stark streuenden Leitstützstrukturen – möglich. Einerseits können damit kostspielige Versuche teils eingespart, andererseits können Bauteile und Systeme untersucht werden, noch bevor ein einziger realer Prototyp existiert. Im Bereich urgeformter Mikrobau- teile ist dieser Aspekt von besonderer Bedeutung, da die erforderliche Herstellung von Formeinsätzen mit einem hohen Aufwand und damit Kosten einhergeht. Zudem ist aus den o. g. Gründen eine ausreichende Anzahl an Versuchen erforderlich. Die Bereitstel- lung geeigneter Methoden stellt damit einen essenziellen Schritt hin zur erfolgreichen Markteinführung urgeformter Mikrosysteme dar.

Im Gegensatz zu numerischen Simulationen von Bauteilen mit Abmessungen im Makrobereich kann das dort häufig angenommene isotrope Materialverhalten wie be- schrieben nicht unbedingt auf Mikrobau- teile übertragen werden. Aus diesem Grund wurden in Kapitel 5 neue Methoden zur Modellierung von Bauteilen einschließlich deren Kornstruktur und Defekten entwickelt. Die Methoden erlauben eine statistische Untersuchung einzelner, komplexer dreidimensionaler Bauteile und daraus aufgebauter Systeme. Die Basis für die Implementierung der Methoden in Form des Softwarepa- ketes G/Struct bildeten bereits am Markt etablierte und kommerziell verfügbare Finite Elemente Pre-/Postprozessoren und Solver. Der Anwender wird durch eine grafische Benutzeroberfläche geführt, kann aber auch durch die Definition der Parameter in einer Input-Datei auf einen Batch-Modus zurückgreifen. In Kapitel 6 wurde mit der entwickel- ten Software ein Mikroplanetengetriebe und damit ein komplexes System untersucht. Bei dem Getriebe handelt es sich um eines der Demonstratorsysteme des Sonderfor- schungsbereiches 499. Die Studien zeigen, dass die Kornstruktur und insbesondere die Porosität bei der Auslegung solcher Mikrobau- teile und daraus aufgebauter Systeme berücksichtigt werden müssen. Aus diesem Grund wurde in Kapitel 7 ein neues Prozessmodell zur Optimierung von Mikrobau- teilen unter Robustheitsaspekten entwi- ckelt. Hierzu wurde ein rechnergestütztes Formoptimierungsverfahren vorgeschlagen, welches die durch die Kornstruktur und Porosität hervorgerufene Variabilität des Bauteil- verhaltens in einem iterativen Verfahren reduziert. In jeder Iteration werden zunächst unter Anwendung der vorgenannten Methoden statistische Analysen des Bauteils oder Systems durchgeführt. Die so ermittelten statistischen Größen dienen als Eingangsda- ten für die nachgeschaltete Formoptimierung. Der gesamte Prozess wurde vollständig automatisiert.

Die durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass die konventionelle, deterministische Strukturoptimierung die Robustheit eines Bauteils bereits verbessern kann. Anhand der betrachteten Beispiele konnte darüber hinaus gezeigt werden, dass die Berück- sichtigung von Robustheitskenngrößen in der Optimierung bei dieser Art von Bauteilen zu anderen, in der Regel besseren Ergebnissen führt als bei einer rein deterministi-

schen Formulierung des Optimierungsproblems. Die Einbeziehung der im Fokus dieser Arbeit stehenden Robustheit wird für die Strukturoptimierung derartiger Bauteile und Systeme daher empfohlen. Nach Kang wird die Berücksichtigung der Robustheit bei der Strukturoptimierung künftig generell an Bedeutung gewinnen, um einen zu hohen Grad an Spezialisierung zu vermeiden.³³⁰ Das vorgeschlagene Prozessmodell bietet die Möglichkeit, dem Entwickler ein tieferes Verständnis für einen optimalen Bauteilentwurf zu verschaffen. Damit erweitert die Arbeit die Anwendbarkeit bisheriger Ansätze durch die Erfassung der Einflüsse von Unsicherheiten bei der Optimierung.

Anhand des Rotors der Turbine – der Antriebseinheit für das Planetengetriebe – wurde in Kapitel 8 das Potenzial des Verfahrens anhand eines realen Beispiels aufgezeigt. Aktuelle Versuche im Rahmen des Sonderforschungsbereiches 499 bestätigen, dass die Robustheit des Rotors mit Hilfe des hier entwickelten Formoptimierungsverfahrens wesentlich verbessert werden konnte.³³¹ Dieses Beispiel spiegelt das Potenzial und die Relevanz der entwickelten Ansätze für einen durchgängigen virtuellen Produktentwicklungsprozess wider.

10.2 Ausblick

In dieser Arbeit wurde mit den vorgestellten Methoden und Prozessen ein wesentlicher Baustein für ein Dimensionierungskonzept für mikromechanische Bauteile und Systeme entwickelt. Der Schwerpunkt der entwickelten Ansätze liegt auf den Belastungen von Bauteilen mit nicht-idealen Leitstützstrukturen. Sowohl die Ansätze an sich als auch deren Implementierung eignen sich für Betrachtungen solcher Bauteile und Systeme aus weiteren Blickwinkeln. Bereits in Voruntersuchungen zu dieser Arbeit konnte anhand einfacher Probegeometrien gezeigt werden, dass die Kornstruktur auch einen Einfluss auf Eigenfrequenzen und -formen ausübt. Weitere Aspekte wie das Verhalten bei harmonischer Anregung sollten daher Gegenstand weiterer Untersuchungen sein. Insbesondere aufgrund der bei Mikrosystemen teils sehr hohen Drehzahlen erscheinen solche Studien sinnvoll.

Der in Kapitel 6 vorgestellte Prozess ermöglicht die Betrachtung von Bauteilen einschließlich Kornstruktur und Defekten innerhalb eines Mikrosystems und damit bereits einschließlich der Wechselwirkungen zwischen Bauteil und System. Neben diesen den Bauteilen anhaftenden, materialbedingten Streuungen unterliegt auch die Bauteilgeometrie einer Variabilität. Eine Übertragung des Ergebnisses der Formoptimierung in ein reales Bauteil stellt aus diesem Grund eine Herausforderung dar, da bereits die im Bereich urgeformter Mikrobauteile üblichen Fertigungstoleranzen und Variationen der Werkstoffeigenschaften zu deutlichen Abweichungen von den berechneten Beanspru-

³³⁰vgl. Kang (2005)

³³¹vgl. Bauer et al. (2009)

chungen führen können. Leslabay³³² konzentriert sich in seiner Arbeit auf letztgenannten Aspekt, speziell die Optimierung der Lage der Nennmaße eines Bauteiles bei gegebener Toleranzfeldbreite mit dem Ziel eines robusten Bauteil- und Systemverhaltens. Die Integration beider Ansätze – und damit von werkstoff- und geometriebedingten Streuungen – würde eine ganzheitliche Betrachtung ermöglichen. Eine hierfür mögliche Vorgehensweise kann Abbildung 10.1 entnommen werden.

Abbildung 10.1 Mögliche Umsetzung einer Integration von geometrie- und materialbedingten Streuungen

Aufgrund der bereits in den beiden einzelnen Prozessen erforderlichen hohen Rechnerkapazität wird für deren Verknüpfung eine geeignete Vorgehensweise zur Reduktion der Anzahl der Analysen erforderlich werden. Ein Ansatz für die Steigerung der Effizienz des in dieser Arbeit vorgestellten Formoptimierungsprozesses könnte die Arbeit von Kim et al.³³³ sein. Die Autoren konzentrieren sich auf die Effizienzsteigerung einer Formoptimierung mit Hilfe der sogenannten polynomial chaos expansion (PCE) und

³³²siehe Leslabay (2009)

³³³siehe Kim et al. (2006)

Antwortflächenverfahren (→ Kapitel 2).

Die Betrachtung der Bauteile im System nicht nur während der Analyse, sondern auch während der Optimierung, ginge mit einem weiteren Aspekt einher. Eine Abweichung von der gewünschten Geometrie führt in vielen Fällen zusätzlich zu veränderten Lasten und/oder Lastrichtungen. Bereits in der vorliegenden Arbeit wurde ein Bauteil einschließlich Kornstruktur und Defekten samt dessen Wechselwirkungen in einem System untersucht. Das vorgestellte Prozessmodell zur Formoptimierung ermöglicht in der vorliegenden Form auch den Umgang mit einem solchen Systemmodell. Eine effiziente Systemsimulation wäre hier jedoch ebenfalls unabdingbar, da die statistischen Analysen in jeder Iteration der Optimierung – und damit mehrfach – durchgeführt werden müssten.

Wird in das Zielsystem der Optimierung die Betrachtung des Bauteils innerhalb des Systems mit einbezogen – beispielsweise zur oben genannten zusätzlichen Berücksichtigung geometrischer Formabweichungen auf das System –, so ergeben sich auch aus Sicht des Prozessmodells neue Wirkflächenpaare und Leitstützstrukturen. Mit dem in Kapitel 4 vorgestellten generalisierten Ansatz auf Basis des C&CM können auch solche neuen Aspekte sowohl im realen Produkt als auch im Prozessmodell der Optimierung beschrieben werden.

Die Verknüpfung von materialbedingten und geometrischen Streuungen würde zu einem ganzheitlichen und durchgängigen Prozessmodell zur Auslegung von Mikrobau- teilen führen. Die vorliegende Arbeit liefert hierzu mit den vorgestellten Methoden und dem entwickelten Formoptimierungsprozessmodell einen Beitrag und damit zur Entwick- lung komplexer, hochbelastbarer, urgeformter Mikrobau- teile und daraus aufgebauter Systeme.

A Anhang

A.1 Daten der Planetenräder des DFG Sonderforschungsbereiches 499

Verzahnungsdaten		
Normalmodul	m_n	0,169 mm
Schrägungswinkel	β	0°
Zähnezahl	z	12
Zahnbreite	b	0,156 mm
Bezugsprofil	$h_{aP}^* / h_{fP}^* / \rho_{fP}^*$	1,0 / 1,25 / 0,25
Eingriffswinkel	α_t	26,0°
Profilverschiebungsfaktor	x	-0,142
Kopfkantenrundung	ρ_{an}	0,039 mm
Teilkreisdurchmesser	d	2,028 mm
Grundkreisdurchmesser	d_b	1,823 mm
Kopfkreisdurchmesser	d_a	2,301 mm
Fußkreisdurchmesser	d_f	1,558 mm
Profilwinkel am Kopfzylinder	α_{an}	37,6° ¹
Kopf-Formkreisdurchmesser	d_{Fa}	2,271 mm ²

¹ nach DIN 3960 (1987–03), Gl. 3.3.07: $\tan \alpha_{at} = \left(\frac{z}{|z|} \cdot \sqrt{\left(\frac{d_a}{d_b}\right)^2 - 1} \right)$

² nach DIN 3960 (1987–03), Gl. 3.6.07: $d_{Fa} = d_a - 2 \cdot \rho_{an} \cdot (1 - \sin \alpha_{an})$

Eigenpaarung		
Achsabstand	a	1,977 mm
Betriebseingriffswinkel	α_w	22,8°
Profilüberdeckung	ϵ_α	1,23

A.2 Datenformat für die Kornstrukturgenerierung

A.2.1 G/Struct Inputfile – .gsi

Schlüssel	Datentyp	Beschreibung
##	string	Kommentar
fe_model	string	zu verwendendes Finite Elemente Modell
directory	string	Arbeitsverzeichnis
seeds	integer	Anzahl der zu erzeugenden Keime
generation	string	Verfahren zur Erzeugung der Keime; mögliche Angaben: auto, box, element, import
epsilon ¹	double	Toleranzradius um einen Elementschwerpunkt bei Verwendung von generation = auto zur Erzeugung der Keime ²
boxsize ¹	double	Abmessungen der Box bei Verwendung von generation = box zur Erzeugung der Keime; Trennung der Abmessungen durch , ²
hardcore ¹	double	Mindestabstand zwischen zwei Keimen ²
growth	string	Verfahren zur Abbildung des Keimwachstums; mögliche Angaben: direct, spherical
steps ¹	integer	Anzahl der durchzuführenden Schritte bei Verwendung von growth = spherical
growth_rate ¹	double	Wachstumsrate bei Verwendung von growth = spherical; Angabe in Wachstum/Schritt ²
grain_volume ¹	boolean	Protokollierung des aktuell vorliegenden Kornvolumens bei Verwendung von growth = spherical in Form einer .csv-Datei; mögliche Angaben: 0 ³ , 1
avg_volume ¹	boolean	Protokollierung des aktuell vorliegenden mittleren Kornvolumens bei Verwendung von growth = spherical in Form einer .csv-Datei; mögliche Angaben: 0 ³ , 1
material	string	Elastizitätstensor eines Kornes; Trennung der Elemente durch : ²
orientation	integer	Anzahl der für jede Kornstruktur zu erzeugenden, individuellen Kornorientierungen
composition	integer	Anzahl der zu erzeugenden, individuellen Kornstrukturen
sollpor ¹	double	Parameter für den Porositätsgrad; keine Porosität ³ oder Angabe in Prozent
solver ¹	string	zu verwendender Solver; mögliche Angaben: abaqus ³ , nastran
rand_gen ¹	string	zu verwendender Pseudozufallszahlengenerator; mögliche Angaben: mersenne twister, standard ³

¹ optionaler Parameter oder Parameter, der nur in Kombination mit spezifischen Verfahren ausgewertet wird (z. B. auto + epsilon)

² Angabe in Einheiten und Koordinaten des Finite Elemente Modells

³ Standardwert, falls keine Angabe erfolgt

A.2.2 Beispiel eines G/Struct Inputfiles

```
##
## G/Struct Inputfile
##
fe_model      = planet.inp
directory     = c:/work
##
seeds         = 300
generation    = element
hardcore      = 0.01
##
growth        = direct
grain_volume  = 0
avg_volume    = 0
##
material      = :449e3:89e3:449e3:53e3:53e3:285e3:46e3:46e3:47e3:
##
orientation   = 10
composition   = 20
##
solver        = abaqus
rand_gen      = mersenne twister
##
```

A.3 Datenformat für die automatische Validierung

A.3.1 G/Struct Validation Inputfile – .gsv

Schlüssel	Datentyp	Beschreibung
##	string	Kommentar
directory	string	Ordner, in dem sich alle benötigten Inputdateien befinden
rob	boolean	robustheitsbasierte Optimierung; mögliche Angaben: 0 ¹ , 1
rel	boolean	zuverlässigkeitsbasierte Optimierung; mögliche Angaben: 0 ¹ , 1
relrob	boolean	Kombination aus robustheits- und zuverlässigkeitsbasierter Optimierung; mögliche Angaben: 0 ¹ , 1
valid	boolean	Vergleich der angeforderten Ergebnisse untereinander sowie mit dem ursprünglichen Entwurf und dem Designvorschlag der spannungsbasierten Formoptimierung; mögliche Angaben: 0 ¹ , 1
seeds	integer	Liste mit Keimanzahlen, für die jeweils eine Formoptimierung durchgeführt werden soll; Trennung der Elemente durch , ²
vcon	double	Liste mit Volumenrestriktionen, die bei der Optimierung berücksichtigt werden sollen; der Wert 0 bedeutet, dass keine Volumenrestriktion aufgebracht wird; der Wert 1 bedeutet, dass das Ausgangsvolumen beibehalten werden soll; Trennung der Elemente durch ,

¹ Standardwert, falls keine Angabe erfolgt

² optionaler Parameter; wird mit G/Struct Validation gearbeitet, so wird der im G/Struct Inputfile .gsi angegebene Parameter `seeds` überschrieben

A.3.2 Beispiel eines G/Struct Validation Inputfiles

```
##
## G/Struct Validation Inputfile
##
directory    = c:/work
##
rob          = 1
rel          = 0
relrob       = 0
valid        = 1
##
seeds        = 20,40
vcon         = 0,1,1.05
##
```

A.4 G/Struct Shape Datenfluss

Abbildung A.1 G/Struct Shape Datenfluss

A.5 Verwendete Softwarepakete

Softwarepaket	Verwendungszweck
Abaqus ¹	Finite Elemente Solver
CATIA ¹	geometriebasierte Methode zur Generierung der Kornstruktur
MATLAB ²	Ermittlung statistischer Parameter, Auswertung
Perl	Implementierung des Softwarepakets G/Struct
Python	Verarbeitung und Aufbereitung der virtuellen Spannungen
TOSCA.Structure ³	Paket zur Formoptimierung
Visual Basic ⁴	Implementierung der geometriebasierten Methode

¹ Ein Produkt der Firma Dassault Systèmes

² Ein Produkt der The MathWorks, Inc.

³ Ein Produkt der FE-DESIGN GmbH

⁴ Ein Produkt der Microsoft Corporation

A.6 Materialdaten Au58Ag23Cu12Pd5 – Stabilor®G

elastische Konstante	Wert ¹
C_{1111}	255,3 <i>GPa</i>
C_{1122}	218,0 <i>GPa</i>
C_{1212}	54,8 <i>GPa</i>

¹ vgl. Böhlke et al. (2010)

A.8 Turbinenrotor – optimiertes Design

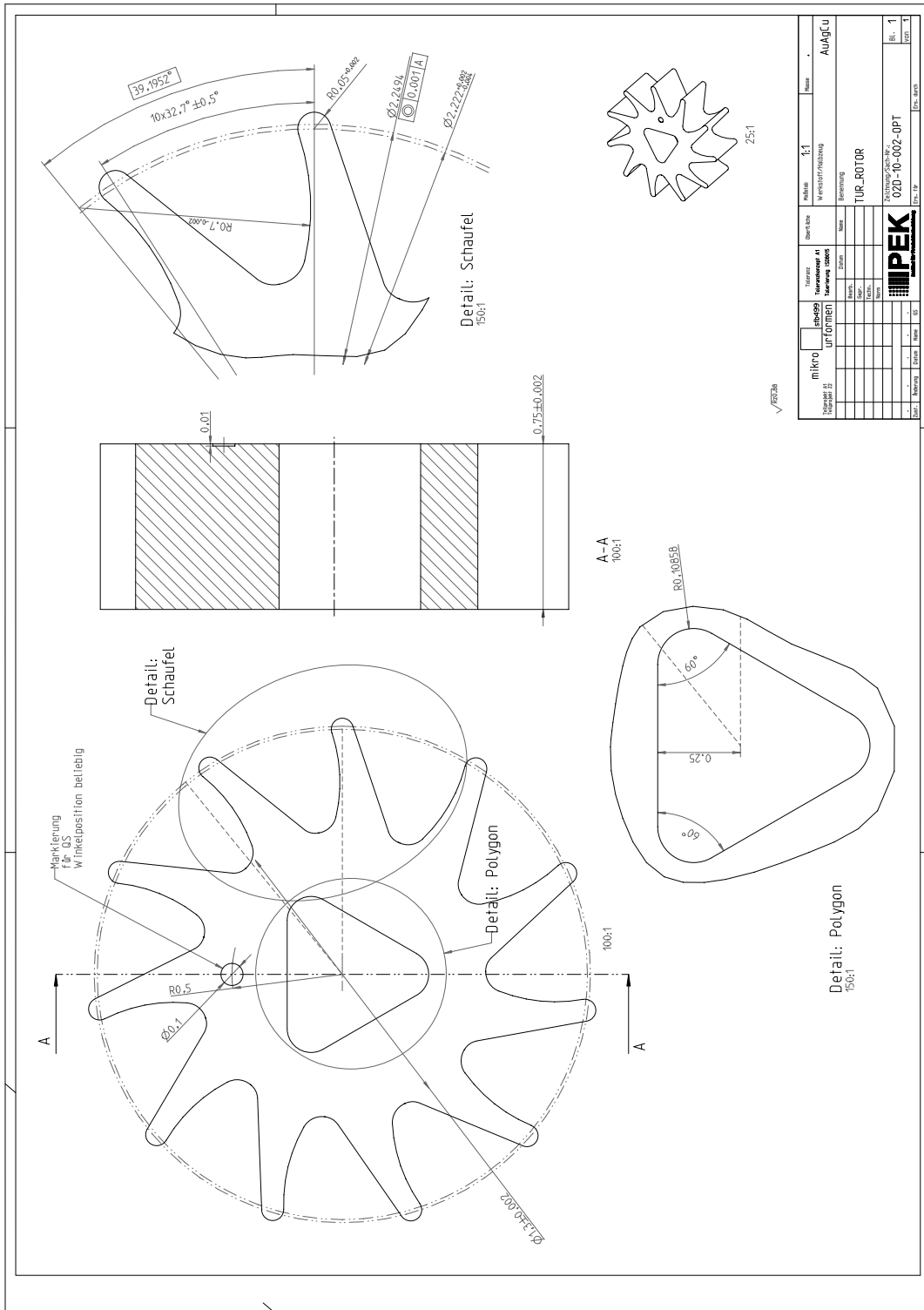


Abbildung A.3 Turbinenrotor – optimiertes Design

Literaturverzeichnis

- Adams / Olson 1998** ADAMS, B. L. ; OLSON, T.: The mesostructure – properties linkage in polycrystals. In: *Progress in Materials Science* 43 (1998), S. 1–87
- Aguayo 2009** AGUAYO, Humberto: *A contribution to the optimization and innovation of an engine crankshaft by defining a method for product development using genetic algorithms*. ITESM Tecnológico de Monterrey, Mexico, Technische Hochschule, Engineering and Architecture Division, Dissertation, 2009
- AIST 2009** National Institute of Advanced Industrial Science and Technology – Advanced Manufacturing Research Institute. <http://unit.aist.go.jp/amri/en/index.html>. – Zugriffsdatum: 2009-09-09
- Albers 2010** ALBERS, Albert: The Integrated Product Engineering Model (iPeM) and its Central Hypotheses (eingereicht). In: HORVATH, Imre (Hrsg.): *Tools and Methods of Competitive Engineering – TMCE 2010* (Ancona, Italien, 12. – 16. April 2010). Delft, Holland : TMCE, 2010
- Albers et al. 2010a** ALBERS, Albert ; BÖRSTING, Peter ; ENKLER, Hans-Georg ; LESLABAY, Pablo: Micro Gear Validation – Improving the Correlation between Virtual and Physical Testing. In: *Microsystem Technologies Online First™* (2010)
- Albers et al. 2010b** ALBERS, Albert ; ENKLER, Hans-Georg ; OTTNAD, Jens: Managing Complex Simulation Processes – the Generalized Contact and Channel Model (eingereicht). In: *International Journal of Product Development* tbd (2010), Nr. tbd
- Albers et al. 2010c** ALBERS, Albert ; MAJIC, Neven ; KRÖNAUER, Benedikt ; HOFFMANN, Hartmut: Manufacturing aspects in simulation based bead optimization. In: FKFS (Hrsg.): *10. Internationales Stuttgarter Symposium „Automobil- und Motorentechnik“* (Stuttgart, 16. – 17. März 2010). Stuttgart : FKFS, 2010
- Albers 2009** ALBERS, Albert: *Skriptum – Produktentstehung (PE)*. Universität Karlsruhe (TH), Sommersemester 2009
- Albers / Enkler 2009** ALBERS, Albert ; ENKLER, Hans-Georg: An approach to increase robustness of molded micro components subject to high scatter using adapted

shape optimization. In: *Eighth World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization – WCSMO-8* (Lissabon, Portugal, 01.–05. Juni 2009). Lissabon, Portugal : ISSMO, 2009. – ISBN 90-5966-018-8

Albers et al. 2009a ALBERS, Albert ; ALINK, Thomas ; MATTHIESEN, Sven ; THAU, Sebastian: Support of System Analyses and Improvement in Industrial Design through the Contact & Channel Model. In: D., Marjanovic (Hrsg.) ; M., Storga (Hrsg.) ; N., Pavkovic (Hrsg.) ; N., Bojcetic (Hrsg.): *10th International Design Conference – DESIGN 2008* (Dubrovnik, Kroatien, 19.–22. Mai 2009). Glasgow : The Design Society, 2009, S. 245–252. – ISBN 978-9-5363-1389-1

Albers et al. 2009b ALBERS, Albert ; BRAUN, Andreas ; CLARKSON, P. J. ; ENKLER, Hans-Georg ; WYNN, David C.: Contact and Channel Modeling to Support Early Design of Technical Systems. In: NORELL BERGENDAHL, M. (Hrsg.) ; GRIMHEDEN, M. (Hrsg.) ; LEIFER, L. (Hrsg.) ; SKOGSTAD, P. (Hrsg.) ; LINDEMANN, U. (Hrsg.): *17th International Conference on Engineering Design – ICED'09* Bd. 5 (Stanford, CA, USA, 24.–27. August 2009). Glasgow : The Design Society, 2009, S. 61–72

Albers et al. 2009c ALBERS, Albert ; BÖRSTING, Peter ; DEIGENDESCH, Tobias ; ENKLER, Hans-Georg ; LESLABAY, Pablo: Micro Gear Validation – Improving the Correlation between Virtual and Physical Testing. In: *8th International Workshop on High Aspect Ratio Micro Structure Technology* (Saskatoon, Kanada, 25.–28. Juni 2009), 2009

Albers et al. 2009d ALBERS, Albert ; BÖRSTING, Peter ; ENKLER, Hans-Georg ; LESLABAY, Pablo: Validierung von Mikrogetrieben – Erhöhte Korrelation zwischen Simulation und Prüfstandsversuch. In: VDE (Hrsg.): *MikroSystemTechnik Kongress 2009* (Berlin, 12.–14. Oktober 2009). Frankfurt : VDE, 2009

Albers et al. 2009e ALBERS, Albert ; DEIGENDESCH, Tobias ; TURKI, Tarak: Design Patterns in Microtechnology. In: NORELL BERGENDAHL, M. (Hrsg.) ; GRIMHEDEN, M. (Hrsg.) ; LEIFER, L. (Hrsg.) ; SKOGSTAD, P. (Hrsg.) ; LINDEMANN, U. (Hrsg.): *17th International Conference on Engineering Design – ICED'09* Bd. 5 (Stanford, CA, USA, 24.–27. August 2009). Glasgow : The Design Society, 2009, S. 385–396

Albers et al. 2009f ALBERS, Albert ; ENKLER, Hans-Georg ; LESLABAY, Pablo: Methods for Simulating and Optimizing Moulded Micro Components and Systems. In: *8th International Workshop on High Aspect Ratio Micro Structure Technology* (Saskatoon, Kanada, 25.–28. Juni 2009), 2009

Albers et al. 2009g ALBERS, Albert ; ENKLER, Hans-Georg ; OTTNAD, Jens: Die Herausforderung komplexer Simulationsprozesse – Ein methodischer Ansatz mit dem generalisierten Contact & Channel Model. In: *6. Paderborner Workshop Entwurf*

mechatronischer Systeme Bd. 250 (Paderborn, 02./03. April 2009), Heinz Nixdorf Institut, 2009

Albers / Metz 2008 ALBERS, Albert ; METZ, Daniel: *Advanced Micro and Nano-systems*. Bd. 3: *Microengineering of Metals and Ceramics : Design, Tooling and Injection Molding*. Kap. 2 : Modeling and Validation in Design, S. 29–50. Weinheim : Wiley-VCH, 2008. – ISBN 978-3-5276-1672-5

Albers et al. 2008a ALBERS, Albert ; DEIGENDESCH, Tobias ; ENKLER, Hans-Georg ; HAUSER, Stefan ; LESLABAY, Pablo ; OERDING, Jochen: An integrated approach for validating micro mechanical systems based on simulation and test. In: *Microsystem Technologies* 14 (2008), Nr. 12, S. 1781–1787

Albers et al. 2008b ALBERS, Albert ; FLEISCHER, Jürgen ; ENKLER, Hans-Georg ; LESLABAY, Pablo ; SCHLIPF, Matthias: Dealing with Uncertainty of Micro Gears – Integration of Dimensional Measurement, Virtual and Physical Testing. In: ASME (Hrsg.): *ASME IMECE2008, Volume 13: Nano-Manufacturing Technology and Micro and Nano Systems, Parts A and B* (Boston, Massachusetts, 31. Oktober–06. November 2008), ASME, 2008, S. 257–265. – ISBN 978-0-7918-4874-6

Albers et al. 2008c ALBERS, Albert ; LANZA, Gisela ; FLEISCHER, Jürgen ; OERDING, Jochen ; DEIGENDESCH, Tobias ; ENKLER, Hans-Georg ; LESLABAY, Pablo ; SCHLIPF, Matthias: Prediction of Functionality and Life Cycle Performance of Microgears. In: EUSPEN (Hrsg.): *European Society for Precision Engineering and Nanotechnology – euspen 10th Anniversary International Conference* (Zürich, Schweiz, 18.–22. Mai 2008). Cranfield, Bedfordshire : euspen, 2008

Albers et al. 2008d ALBERS, Albert ; ROVIRA, Noel L. ; AGUAYO, Humberto ; MAIER, Thomas: Optimization with Genetic Algorithms and Splines as a way for Computer Aided Innovation. In: CASCINI, Gaetano (Hrsg.): *Computer-Aided Innovation (CAI) – IFIP 20th World Computer Congress* (Mailand, Italien, 07.–10. September 2008). New York, NY, USA : Springer, 2008, S. 7–18. – ISBN 978-0-3870-9696-4

Albers / Enkler 2007 ALBERS, Albert ; ENKLER, Hans-Georg: Methods for the Simulation of Micro Components with respect to the Grain Structure. In: ASME (Hrsg.): *ASME IDETC2007, Volume 3: 1st International Conference on Micro- and Nanosystems, Parts A and B* (Las Vegas, Nevada, 04.–07. September 2007), ASME, 2007, S. 889–896. – ISBN 978-0-7918-4804-3

Albers et al. 2007a ALBERS, Albert ; ENKLER, Hans-Georg ; MAIER, Thomas ; WEILER, Helge: Robust Design Processes with CAD based Finite Element Models. In: BOCQUET, J.-C. (Hrsg.): *16th International Conference on Engineering Design – ICED'07* (Paris, Frankreich, 28.–31. August 2007). Glasgow : The Design Society, 2007, S. 103–104 (exec. summ.). – full paper no. DS42_P_531

- Albers et al. 2007b** ALBERS, Albert ; WEILER, Helge ; BANGERT, Claudia ; PULS, Christoph: Robustheits- und Zuverlässigkeitsanalysen zur Optimierung eines Planetengetriebes unter realitätsnahen Randbedingungen. In: VDI (Hrsg.): *23. Tagung Technische Zuverlässigkeit TTZ – Entwicklung und Betrieb zuverlässiger Produkte* (Stuttgart, 22./23. März 2007). Düsseldorf : VDI, 2007
- Albers / Meboldt 2007** ALBERS, Albert ; MEBOLDT, Mirko: Integrated Product Development Process Management Model, Based on Systems Engineering and Systematic Problem Solving. In: BOCQUET, J.-C. (Hrsg.): *16th International Conference on Engineering Design – ICED’07* (Paris, Frankreich, 28. – 31. August 2007). Glasgow : The Design Society, 2007, S. 611–612 (exec. summ.). – full paper no. DS42_P_537
- Albers et al. 2006** ALBERS, Albert ; ENKLER, Hans-Georg ; NOWICKI, Lukas: Development of a Method for the Analysis of Mixed Friction Problems. In: *International Journal of Applied Mechanics and Engineering* 11 (2006), Nr. 3, S. 479–490
- Albers / Meboldt 2006** ALBERS, Albert ; MEBOLDT, Mirko: A New Approach in Product Development based on Systems Engineering and Systematic Problem Solving. In: HOSNEDL, Stanislav (Hrsg.) ; VANĚK, Václav (Hrsg.): *The 15th Workshop on Applied Engineering Design Science – AEDS 2006 Workshop* (Pilsen, Tschechische Republik, 27. – 28. Oktober 2006). Glasgow : The Design Society, 2006, S. 5–12
- Albers / Metz 2006** ALBERS, Albert ; METZ, Daniel: Influence of the microstructure on the strain of micro components. In: *Microsystem Technologies* 12 (2006), Nr. 7, S. 685–690
- Albers / Weiler 2006** ALBERS, Albert ; WEILER, Helge: Impact of Distribution Functions of Input Parameters on the Quality of Robustness Analysis in Simulation. In: NAFEMS (Hrsg.): *Seminar : Virtual Testing – Simulation Methods as Integrated Part of an Efficient Product Development* (Wiesbaden, 10./11. Mai 2006). München : NAFEMS, 2006. – ISBN 1-874376-14-X
- Albers et al. 2005** ALBERS, Albert ; BURKARDT, Norbert ; MEBOLDT, Mirko ; SAAK, Marcus: SPALTEN Problem Solving Methodology in the Product Development. In: SAMUEL, A. (Hrsg.) ; LEWIS, W. (Hrsg.): *15th International Conference on Engineering Design – ICED’05* (Melbourne, Australien, 15. – 18. August 2005). Glasgow : The Design Society, 2005, S. 553–554 (exec. summ.). – full paper no. DS35_317.49
- Albers / Schyr 2005** ALBERS, Albert ; SCHYR, Christian: Model Based Verification of Automotive Powertrains. In: SAMUEL, A. (Hrsg.) ; LEWIS, W. (Hrsg.): *15th International Conference on Engineering Design – ICED’05* (Melbourne, Australien, 15. – 18. August 2005). Glasgow : The Design Society, 2005, S. 465–466 (exec. summ.). – full paper no. DS35_312.49

- Albers et al. 2004** ALBERS, Albert ; BURKARDT, Norbert ; OHMER, Manfred: Principles for Design on the Abstract Level of the Contact & Channel Model. In: HORVÁTH, Imre (Hrsg.) ; XIROUCHAKIS, Paul (Hrsg.): *Fifth International Symposium on Tools and Methods of Competitive Engineering – TMCE 2004* Bd. 1 (Lausanne, Schweiz, 13.–17. April 2004). Rotterdam : Millpress, 2004, S. 87–94. – ISBN 90-5966-018-8
- Albers / Metz 2004** ALBERS, Albert ; METZ, Daniel: Influence of the Grain Structure on the Dimensioning of Micro Components. In: *4th Annual FENet Industry Meeting & AGM – Materials Modelling* (Lissabon, 02./03. Dezember 2004), FENet, 2004
- Albers et al. 2003** ALBERS, Albert ; MATTHIESEN, Sven ; OHMER, Manfred: An innovative new basic model in design methodology for analysis and synthesis of technical systems. In: FOLKESON, A. (Hrsg.) ; GRALEN, K. (Hrsg.) ; NORELL, M. (Hrsg.) ; SELLGREN, U. (Hrsg.): *14th International Conference on Engineering Design – ICED'03* (Stockholm, Schweden 2003). Glasgow : The Design Society, 2003, S. 147–148 (exec. summ.). – full paper no. DS31_1228FPB
- Albers et al. 2002** ALBERS, Albert ; SAAK, Marcus ; BURKARDT, Norbert: Gezielte Problemlösung bei der Produktentwicklung mit Hilfe der SPALTEN-Methode. In: *47. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium* (Ilmenau, 23.–26. September 2002), Ilmenau, Technische Universität, 2002
- Albers / Matthiesen 2002** ALBERS, Albert ; MATTHIESEN, Sven: Konstruktionsmethodisches Grundmodell zum Zusammenhang von Gestalt und Funktion technischer Systeme – Das Elementmodell "Wirkflächenpaare & Leitstützstrukturen" für Analyse und Synthese technischer Systeme. In: *Konstruktion – Zeitschrift für Produktentwicklung* 7/8 (2002), S. 55–60
- Allinger 1993** ALLINGER, Peter: *Untersuchung und Implementierung von verschiedenen Algorithmen zur Topologie- und Schalendickenoptimierung auf Basis von Regelstrategien und Optimalitätskriterien in das Programmsystem CAOSS*, Universität Karlsruhe (TH), Studienarbeit, 1993
- Ang / Tang 1975** ANG, Alfredo H.-S. ; TANG, Wilson H.: *Probabilistic concepts in engineering planning and design*. Bd. 1: Basic principles. New York, NY, USA : John Wiley & Sons, 1975. – ISBN 978-0-4710-3200-7
- Ang / Tang 1984** ANG, Alfredo H.-S. ; TANG, Wilson H.: *Probabilistic concepts in engineering planning and design*. Bd. 2: Decision, risk and reliability. New York, NY, USA : John Wiley & Sons, 1984. – ISBN 978-0-4718-0533-5
- Arouna 2004** AROUNA, Bouhari: Adaptive Monte Carlo Method, A Variance Reduction Technique. In: *Monte Carlo Methods and Applications* 10 (2004), Nr. 1, S. 1–24

- Atkinson / Donev 1992** ATKINSON, Anthony C. ; DONEV, Alexander N.: *Optimum Experimental Designs*. New York, NY, USA : Oxford University Press, 1992 (Oxford Statistical Science Series). – ISBN 978-0-1985-2254-6
- Auhorn 2005** AUHORN, Markus U.: *Mechanische Eigenschaften urgeformter Mikroproben aus Au58Ag23Cu12Pd5 und ZrO₂*. Karlsruhe, Universität (TH), Fakultät für Maschinenbau, Dissertation, 2005
- Autodesk Inc. 2009** Autodesk Moldflow Insight. <http://www.moldflow.com/>. – Zugriffsdatum: 2009-07-02
- Bäker 2009** BÄKER, Martin: *Braunschweiger Schriften des Maschinenbaus*. Bd. 8: *Numerische Methoden in der Materialwissenschaft*. Braunschweig : Technische Universität Braunschweig, Fachbereich Maschinenbau, 2009. <http://www.digibib.tu-bs.de/?docid=00026725>. – ISBN 3-936-14808-2
- Bakhtiary et al. 1996** BAKHTIARY, Nima ; ALLINGER, Peter ; FRIEDRICH, Matthias ; MULFINGER, Fritz ; SAUTER, Jürgen ; MÜLLER, Ottmar ; PUCHINGER, Martin: A New Approach for Sizing, Shape and Topology Optimization. In: *SAE International Congress and Exposition 1996* (Detroit, Michigan, USA, 26.–29. Februar 1996), 1996
- Banichuk 1977** BANICHUK, N. V.: Optimality conditions in the problem of seeking the hole shapes in elastic bodies. In: *PMM* 41 (1977), Nr. 5, S. 920–925
- Bargel / Schulze 2008** BARGEL, Hans-Jürgen (Hrsg.) ; SCHULZE, Günter (Hrsg.): *Werkstoffkunde*. 10. Aufl. Berlin : Springer, 2008. – ISBN 978-3-5407-9296-3
- Bathe 1996** BATHE, Klaus-Jürgen: *Finite Element Procedures*. 2. Aufl. Upper Saddle River, NJ, USA : Prentice Hall, 1996. – ISBN 978-0-1330-1458-7
- Baud 1934a** BAUD, R. V.: *Beiträge zur Kenntnis der Spannungsverteilung in prismatischen und keilförmigen Konstruktionselementen mit Querschnittsübergängen, Report 29*. Zürich, Schweiz : Verband für Metallprüfung in der Technik (Bericht 83 der Eidgenössischen Materialprüfanstalt), 1934
- Baud 1934b** BAUD, R. V.: Fillet profiles for constant stress. In: *Product Engineering* 5 (1934), Nr. 4, S. 133–134
- Bauer et al. 2009** BAUER, Werner ; MÜLLER, Marcus ; KNITTER, Regina ; BÖRSTING, Peter ; ALBERS, Albert ; DEUCHERT, Marco ; SCHULZE, Volker: Design and prototyping of a ceramic micro turbine : a case study. In: *Microsystem Technologies Online First™* (2009)

- Baumeister et al. 2006** BAUMEISTER, Gundi ; RATH, S. ; HAUSSELT, Jürgen: Microcasting of Al bronze and a gold base alloy improved by plaster-bonded investment. In: *Microsystem Technologies* 12 (2006), Nr. 8, S. 773–777
- Baumeister et al. 2004** BAUMEISTER, Gundi ; RUPRECHT, Robert ; HAUSSELT, Jürgen: Microcasting of parts made of metal alloys. In: *Microsystem Technologies* 10 (2004), Nr. 3, S. 261–264
- Belytschko 1983** BELYTSCHKO, Ted: *Computational methods for transient analysis*. Bd. 1. Kap. 1: An overview of semidiscretization and time integration procedures, S. 1–66. Amsterdam : North-Holland, 1983. – ISBN 978-0-4448-6479-6
- Belytschko 1976** BELYTSCHKO, Ted: A survey of numerical methods and computer programs for dynamic structural analysis. In: *Nuclear Engineering and Design* 37 (1976), S. 23–34
- Bendell et al. 1989** BENDELL, A. (Hrsg.) ; DISNEY, J. (Hrsg.) ; PRIDMORE, W. A. (Hrsg.): *Taguchi Methods: Applications in World Industry*. Kempston, England : IFS Publishing, 1989 (The IFS series in industrial management). – ISBN 978-0-3875-0657-9
- Bendsøe / Kikuchi 1988** BENDSØE, Martin P. ; KIKUCHI, Noboru: Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method. In: *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 71 (1988), Nr. 2, S. 197–224
- Bendsøe / Sigmund 2003** BENDSØE, Martin P. ; SIGMUND, Ole: *Topology Optimization – Theory, Methods and Applications*. 2. Aufl. Berlin : Springer, 2003. – ISBN 978-3-5404-2992-0
- Benzler 2001** BENZLER, Tobias: *Pulverspritzgießen in der Mikrotechnik*. Freiburg im Breisgau, Albert-Ludwigs-Universität, Fakultät für Angewandte Wissenschaften, Dissertation, 2001
- Bergmann 2005** BERGMANN, Wolfgang: *Werkstofftechnik*. Bd. 1: Grundlagen. 5. Aufl. München : Hanser, 2005. – ISBN 978-3-4462-1927-4
- Bhandari et al. 2007** BHANDARI, Y. ; SARKAR, S. ; GROEBER, M. ; UCHIC, M. ; DIMIDUK, D. ; GHOSH, S.: 3D polycrystalline microstructure reconstruction from FIB generated serial sections for FE analysis. In: *Computational Materials Science* 41 (2007), Nr. 2, S. 222–235
- BMBF 2009** Rahmenprogramm Mikrosysteme. <http://www.bmbf.de/de/5701.php>. – Zugriffsdatum: 2009-09-12

- Böhlke et al. 2010** BÖHLKE, Thomas ; JÖCHEN, Katja ; KRAFT, Oliver ; SCHULZE, Volker: Elastic properties of polycrystalline microcomponents. In: *Mechanics of Materials* 42 (2010), Nr. 1, S. 11–23
- Bourne 2003** BOURNE, Marlene: On the Road to Success with MEMS. In: *mstnews* (2003), Nr. 1, S. 42
- Box et al. 2005** BOX, George E. P. ; HUNTER, J. S. ; HUNTER, William G.: *Statistics for experimenters – design, innovation, and discovery*. 2. Aufl. Hoboken, NJ, USA : Wiley-Interscience, 2005. – ISBN 978-0-4717-1813-0
- Box et al. 1978** BOX, George E. P. ; HUNTER, William G. ; HUNTER, J. S. ; HUNTER, William G.: *Statistics for Experimenters : An Introduction to Design, Data Analysis, and Model Building*. Hoboken, NJ, USA : John Wiley & Sons, 1978. – ISBN 978-0-4710-9315-2
- Brandner et al. 2007** BRANDNER, Jürgen J. ; BOHN, Lothar ; HENNING, Torsten ; SCHYGULLA, Ulrich ; SCHUBERT, Klaus: Microstructure heat exchanger applications in laboratory an industry. In: *Heat Transfer Engineering* 28 (2007), Nr. 8-9, S. 761–771
- Bunge 1983** BUNGE, Hans J.: *Texture Analysis in Materials Science : Mathematical Methods*. 2. London : Butterworth, 1983. – ISBN 978-0-4081-0642-9
- Büttgenbach 1994** BÜTTGENBACH, Stephanus: *Mikromechanik : Einführung in Technologie und Anwendungen*. 2. Aufl. Stuttgart : Teubner, 1994. – ISBN 978-3-5191-3071-0
- Cohn 1994** COHN, M. Z.: Theory and practice of structural optimization. In: *Structural and Multidisciplinary Optimization* 7 (1994), Februar, Nr. 1-2, S. 20–31
- Cook et al. 2002** COOK, Robert D. ; MALKUS, David S. ; PLESHA, Michael E. ; WITT, Robert J.: *Concepts and Applications of Finite Element Analysis*. 4. Aufl. Hoboken, NJ, USA : John Wiley & Sons, 2002. – ISBN 978-0-4713-5605-9
- Courant et al. 1928** COURANT, Richard ; FRIEDRICHS, Kurt ; LEWY, Hans: Über die partiellen Differenzengleichungen der mathematischen Physik. In: *Mathematische Annalen* 100 (1928), Nr. 1, S. 32–74
- Craig / Bampton 1968** CRAIG, Roy R. J. ; BAMPTON, Mervyn C. C.: Coupling of Substructures for Dynamic Analyses. In: *AIAA Journal* 6 (1968), Nr. 7, S. 1313–1319
- Crisfield 1991** CRISFIELD, M. A.: *Non-Linear Finite Element Analysis of Solids and Structures*. Chichester, England : John Wiley & Sons, 1991. – ISBN 978-0-4719-7059-0

- DIN 3960 1987–03** DIN 3960: *Begriffe und Bestimmungsgrößen für Stirnräder (Zylinderräder) und Stirnradpaare (Zylinderradpaare) mit Evolventenverzahnung*. 1987-03
- DIN 8580 2003–09** DIN 8580: *Fertigungsverfahren – Begriffe, Einteilung*. 2003-09
- Douglass 2003** DOUGLASS, Michael R.: DMD reliability: a MEMS success story. (2003), Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers – SPIE, 2003, S. 1–11. – ISBN 978-0-8194-5251-1
- Ehrfeld 2002** EHRFELD, Wolfgang (Hrsg.): *Handbuch Mikrotechnik*. München : Hanser, 2002. – ISBN 978-3-4462-1506-1
- Eichhoff / Gries 2009** EICHHOFF, Julian ; GRIES, Thomas: Three-dimensional tailored fibre placement. In: *JEC Composites* 46 (2009), Nr. 52, S. 40–41
- Emmrich 2004** EMMRICH, Dieter: *Entwicklung einer FEM-basierten Methode zur Gestaltung von Sicken für biegebeanspruchte Leitstützstrukturen im Konstruktionsprozess*. Karlsruhe, Universität (TH), Fakultät für Maschinenbau, Dissertation, 2004
- ESI Group 2009** ProCAST. <http://www.esi-group.com/products/casting/procast>. – Zugriffsdatum: 2009-07-02
- Europäische Kommission 2009a** 7th Framework Programme: Nanosciences, nanotechnologies, materials & new production technologies. Converging technologies for micro systems manufacturing. <http://cordis.europa.eu/>. – Zugriffsdatum: 2009-09-11
- Europäische Kommission 2009b** 7th Framework Programme: Nanosciences, nanotechnologies, materials & new production technologies. Rolled multi material layered 3D shaping technology. <http://cordis.europa.eu/>. – Zugriffsdatum: 2009-09-11
- Ferrié et al. 2006** FERRIÉ, E. ; BUFFIÈRE, J. ; LUDWIG, W. ; GRAVOUIL, A. ; EDWARDS, L.: Fatigue Crack Propagation : In Situ Visualization using X-Ray Microtomography and 3D Simulation using the Extended Finite Element Method. In: *Acta Materialia* 54 (2006), Nr. 4, S. 1111–1112
- Fleischer et al. 2008a** FLEISCHER, Jürgen ; DEUCHERT, Marco ; CHLIPALA, Mateusz: Development of a 5-Axis Micro-Test-Work Piece for Micro-Milling Machine Tools. In: BYRNE, Gerry (Hrsg.) ; O'DONNELL, Garret (Hrsg.): *3rd CIRP International Conference High Performance Cutting* (Dublin, Irland, 12.–13. Juni 2008). Paris, Frankreich : CIRP, 2008
- Fleischer et al. 2008b** FLEISCHER, Jürgen ; DEUCHERT, Marco ; RUHS, Christoph ; KÜHLEWEIN, Christoph ; HALVADJIYSKY, Grosdan ; SCHMIDT, Carsten: Design and manufacturing of micro milling tools. In: *Microsystem Technologies* 14 (2008), Nr. 9-11, S. 1771–1775

- Fleischer et al. 2007** FLEISCHER, Jürgen ; SCHLIPF, Matthias ; DEUCHERT, Marco ; DIECKMANN, Adam-Mwanga: Process Chain for the Manufacturing of Micro Parts and Molds. In: EUSPEN (Hrsg.): *European Society for Precision Engineering and Nanotechnology – euspen 7th International Conference* (Bremen, 20.–24. Mai 2007). Cranfield, Bedfordshire : euspen, 2007
- Fletcher / Reeves 1964** FLETCHER, R. ; REEVES, C. M.: Function minimization by conjugate gradients. In: *The Computer Journal* 7 (1964), Nr. 2, S. 149–154
- Föll 2009** FÖLL, Helmut: *Skriptum – Einführung in die Materialwissenschaft I*. Christian-Albrechts-Universität Kiel, Sommersemester 2009
- Formica 1990** FORMICA, A.: *Computational stochastic mechanics in a meta-computing perspective*. Kap. A science based approach to engineering stochastic simulations, S. 19–38. Barcelona, Spanien : International Center for Numerical Methods in Engineering – CIMNE, 1990
- Fraunhofer 2004** FRAUNHOFER, IPA: *Mehr Methode im Anlauf*. Stuttgart : Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA, 2004
- Fraunhofer 2000** FRAUNHOFER, IAO: *Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO) – Studie 2000*. München : Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e. V., 2000
- Fraunhofer 1996** FRAUNHOFER, IAO: *Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO) – Studie 1996*. München : Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e. V., 1996
- Fritzen et al. 2009** FRITZEN, Felix ; BÖHLKE, Thomas ; SCHNACK, Eckart: Periodic three-dimensional mesh generation for crystalline aggregates based on Voronoi tessellations. In: *Computational Mechanics* 43 (2009), S. 701–713
- Fröhlich 2001** FRÖHLICH, Andreas: *Mikromechanisches Modell zur Ermittlung effektiver Materialeigenschaften von piezoelektrischen Polykristallen*. Karlsruhe, Universität (TH), Fakultät für Maschinenbau, Dissertation, 2001
- Fröhlich et al. 2001** FRÖHLICH, Andreas ; WEYER, Stefan ; METZ, Daniel ; MÜLLER, Ottmar ; BRÜCKNER-FOIT, Angelika ; ALBERS, Albert: Investigations on the Reliability of FEA Calculations on the Microscopic Scale. In: *2001 International Conference on Computational Nanoscience – ICCN 2001* (Hilton Head Island, SC, USA, 19.–21. März 2001), 2001
- Gad el Hak 2005** GAD EL HAK, Mohamed (Hrsg.): *The MEMS Handbook*. 2. Aufl. Boca Raton : CRC Press, 2005. – ISBN 978-0-8493-2106-1

- García / Gonzalez 2004** GARCÍA, Manuel J. ; GONZALEZ, Carlos A.: Shape optimisation of continuum structures via evolution strategies and fixed grid finite element analysis. In: *Structural and Multidisciplinary Optimization* 26 (2004), Nr. 1-2, S. 92–98
- Gellatly / Dupree 1976** GELLATLY, R. A. ; DUPREE, D. M.: Examples of computer-aided optimal design of structures. In: *10th Congress of the International Association for Bridge and Structural Engineering – IABSE* (Tokio, Japan 1976), 1976, S. 77–105
- Ghosh et al. 2008** GHOSH, Somnath ; BHANDARI, Y. ; GROEBER, Michael: CAD-based reconstruction of 3D polycrystalline alloy microstructures from FIB generated serial sections. In: *Computer-Aided Design* 40 (2008), Nr. 3, S. 293–310
- Gottstein 2007** GOTTSTEIN, Günter: *Physikalische Grundlagen der Materialkunde*. 3. Aufl. Berlin : Springer, 2007. – ISBN 978-3-5407-1104-9
- Groeber et al. 2008a** GROEBER, Michael A. ; GHOSH, Somnath ; UCHIC, Michael D. ; DIMIDUK, Dennis M.: A framework for automated analysis and simulation of 3D polycrystalline microstructures. Part 1 : Statistical characterization. In: *Acta Materialia* 56 (2008), Nr. 6, S. 1257–1273
- Groeber et al. 2008b** GROEBER, Michael A. ; GHOSH, Somnath ; UCHIC, Michael D. ; DIMIDUK, Dennis M.: A framework for automated analysis and simulation of 3D polycrystalline microstructures. Part 2 : Synthetic structure generation. In: *Acta Materialia* 56 (2008), Nr. 6, S. 1274–1287
- Groeber et al. 2006** GROEBER, Michael A. ; HALEY, B. K. ; UCHIC, Michael D. ; DIMIDUK, Dennis M. ; GHOSH, Somnath: 3D reconstruction and characterization of polycrystalline microstructure using a FIB-SEM. In: *Mater Characterization* 57 (2006), Nr. 4-5, S. 259–273
- Hauser 2007** HAUSER, Stefan: *Konzepte zur Validierung geometrischer Charakteristika von Mikroverzahnungen und -getrieben*. Karlsruhe, Universität (TH), Fakultät für Maschinenbau, Dissertation, 2007
- Häußler 2006** HÄUSSLER, Pascal: *Ein neuer Prozess zur parameterfreien Formoptimierung dynamisch beanspruchter Bauteile in mechanischen Systeme auf Basis von Lebensdaueranalysen und hybriden Mehrkörpersystemen*. Karlsruhe, Universität (TH), Fakultät für Maschinenbau, Dissertation, 2006
- Hegadekatte 2006** HEGADEKATTE, Vishwanath: *Modeling and Simulation of Dry Sliding Wear for Micro-machine Applications*. Karlsruhe, Universität (TH), Fakultät für Maschinenbau, Dissertation, 2006

- Heimer / Werner 2004** HEIMER, Thomas ; WERNER, Matthias: *Die Zukunft der Mikrosystemtechnik – Chancen, Risiken, Wachstumsmärkte*. 1. Aufl. Weinheim : WILEY-VCH, Juli 2004. – ISBN 978-3-5273-1053-1
- Heldele et al. 2006** HELDELE, Richard ; SCHULZ, Michael ; KAUZLARIC, David ; KORVINK, Jan G. ; HAUSSELT, Jürgen: Micro powder injection molding : process characterization and modeling. In: *Microsystem Technologies* 12 (2006), Nr. 10-11, S. 941–946
- Helming 1996** HELMING, Kurt: *Texturapproximation durch Modellkomponenten*. 1. Aufl. Göttingen : Cuvillier, 1996. – ISBN 978-3-8958-8617-1
- Heselhaus 2009** HESELHAUS, Michael: *Unidirektionale schwingungsunterstützte Ultrapräzisionszerspanung eisenhaltiger Werkstoffe mit definierter Schneidteilgeometrie*. Aachen, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule, Dissertation, 2009
- Hesselbach et al. 2003** HESSELBACH, Jürgen ; RAATZ, Annika ; WREGE, Jan ; HERRMANN, Hartwig ; WEULE, Hartmut ; BUCHHOLZ, Carsten ; TRITSCHLER, Hanno ; KNOLL, Michaela ; ELSNER, Judith ; KLOCKE, Fritz ; WECK, Manfred ; BODENHAUSEN, Jörgen v. ; KLITZING, Andreas v.: mikroPRO : Untersuchung zum internationalen Stand der Mikroproduktionstechnik. In: *wt Werkstattstechnik online* 93 (2003), Nr. 3, S. 119–128
- Hesselbarth / Göbel 1991** HESSELBARTH, Hanfried W. ; GÖBEL, I. R.: Simulation of recrystallization by cellular automata. In: *Acta Metallurgica et Materialia* 39 (1991), Nr. 9, S. 2135–2143
- Hessenauer et al. 2009** HESSENAUER, Benjamin ; PEDERSEN, Claus ; SIGMUND, Ole ; ALBERS, Albert: Topology Optimization of Dynamically Loaded Structures with Respect to Issues of Noise, Vibration and Harshness (NVH). In: *NAFEMS World Congress 2009 – NWC09* (Kreta, Griechenland, 16.–19. Juni 2009). Glasgow : NAFEMS, 2009
- Hilber et al. 1977** HILBER, Hans M. ; HUGHES, Thomas J. R. ; TAYLOR, Robert L.: Improved numerical dissipation for time integration algorithms in structural dynamics. In: *Earthquake Engineering & Structural Dynamics* 5 (1977), Nr. 3, S. 283–292
- Hoffmann / Albers 2009** DFG EINZELFÖRDERUNG: *Entwicklung eines Algorithmus zur Optimierung der Versickerung von Blechbauteilen unter Berücksichtigung von Fertigungsrestriktionen*. <http://gepris.dfg.de/gepris/>. – Zugriffsdatum: 2009-10-27
- Holmes 2001** HOLMES, John D.: *Wind loading of structures*. London : Spon Press, 2001. – ISBN 0-419-24610-X

- Horst 2009** HORST, Gerald: *Optimierung von Zuverlässigkeit und Robustheit mikromechanischer Bauteile*, Karlsruhe, Universität (TH), Fakultät für Maschinenbau, Studienarbeit, 2009
- Hubka 1984** HUBKA, Vladimir: *Theorie technischer Systeme. Grundlagen einer wissenschaftlichen Konstruktionslehre*. 2. Aufl. Berlin : Springer, 1984. – ISBN 978-3-5401-2953-0
- Hughes 1983** HUGHES, Thomas J. R.: *Computational methods for transient analysis*. Bd. 1. Kap. 2: Analysis of transient algorithms with particular reference to stability behaviour, S. 67–155. Amsterdam : North-Holland, 1983. – ISBN 978-0-4448-6479-6
- Hwang / McMeeking 1999** HWANG, Stephen C. ; MCMEEKING, Robert M.: A finite element model of ferroelastic polycrystals. In: *International Journal of Solids and Structures* 36 (1999), Nr. 10, S. 1541–1556
- Iancu 1991** IANCU, Gabriela: *Spannungskonzentrationsminimierung dreidimensionaler elastischer Kontinua mit der FEM*. Karlsruhe, Universität (TH), Fakultät für Maschinenbau, Dissertation, 1991
- Ibrahimbegovic et al. 2004** IBRAHIMBEGOVIC, Adnan ; KNOFF-LENOIR, Catherine ; KUČEROVÁ, Anna ; VILLON, Pierre: Optimal design and optimal control of structures undergoing finite rotations and elastic deformations. In: *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 61 (2004), Nr. 14, S. 2428–2460
- Isaacson / Keller 1966** ISAACSON, Eugene ; KELLER, Herbert B.: *Analysis of Numerical Methods*. New York, USA : John Wiley & Sons, 1966. – ISBN 978-0-4866-8029-3
- Kang 2005** KANG, Zhan: *Robust Design Optimization of Structures under Uncertainties*. Stuttgart, Universität, Fakultät Luft- und Raumfahrttechnik und Geodäsie, Dissertation, 2005
- Kasanická 2008** KASANICKÁ, Barbora: *Prozess-Gefüge-Eigenschafts-Beziehungen für das Urformen von Mikroproben*. Karlsruhe, Universität (TH), Fakultät für Maschinenbau, Dissertation, 2008
- Kauzlaric et al. 2009** KAUZLARIC, David ; GREINER, Andreas ; KORVINK, Jan G.: *Ceramics Processing in Microtechnology*. Kap. Process simulation with particle methods : micro powder injection moulding and hot embossing. Dunbeath, Caithness, Schottland : Whittles Publishing, 2009. – ISBN 978-1-904-44584-5
- Kikuchi et al. 1986** KIKUCHI, Noboru ; CHUNG, Kyoonyoung ; TORIGAKI, Toshikazu ; TAYLOR, John E.: Adaptive finite element methods for shape optimization of linearly

- elastic structures. In: *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 57 (1986), Nr. 1, S. 67–89
- Kim et al. 2006** KIM, Nam H. ; WANG, Haoyu ; QUEIPO, Nestor V.: Efficient Shape Optimization Under Uncertainty Using Polynomial Chaos Expansions and Local Sensitivities. In: *AIAA Journal* 44 (2006), Nr. 5, S. 1112–1115
- Koller 1998** KOLLER, Rudolf: *Konstruktionslehre für den Maschinenbau : Grundlagen zur Neu- und Weiterentwicklung technischer Produkte mit Beispielen*. 4. Aufl. Berlin : Springer, 1998. – ISBN 3-540-63037-6
- Koller / Kastrup 1998** KOLLER, Rudolf ; KASTRUP, Norbert: *Prinziplösungen zur Konstruktion technischer Produkte*. 2. Aufl. Berlin : Springer, 1998. – ISBN 978-3-5406-3060-9
- Kröner 1986** KRÖNER, E.: *Modeling Small Deformations of Polycrystals*. Kap. Statistical Modeling, S. 229–291. New York, NY, USA : Elsevier Applied Science Publishers, 1986
- Kumar / Kurtz 1994** KUMAR, Susmit ; KURTZ, Stewart K.: Simulation of material microstructure using a 3D voronoi tessellation: Calculation of effective thermal expansion coefficient of polycrystalline materials. In: *Acta Metallurgica et Materialia* 42 (1994), Nr. 12, S. 3917–3927
- Kumar et al. 1996** KUMAR, Susmit ; KURTZ, Stewart K. ; AGARWALA, Vijay K.: Micro-stress distribution within polycrystalline aggregate. In: *Acta Mechanica* 114 (1996), Nr. 1-4, S. 203–216
- Kurzenhäuser et al. 2008** KURZENHÄUSER, Sven ; HEGADEKATTE, Vishwanath ; SCHNEIDER, Johannes ; HUBER, Norbert ; KRAFT, Oliver ; GAHR, Karl-Heinz zum: Tribological characterization and numerical wear simulation of microcomponents under sliding and rolling conditions. In: *Microsystem Technologies* 14 (2008), Nr. 12, S. 1839–1846
- Lauridsen et al. 2006** LAURIDSEN, E. ; SCHMIDT, S. ; NIELSEN, S. ; MARGULIES, L. ; POULSEN, H. ; JENSEN, D.: Non-destructive characterization of recrystallization kinetics using three-dimensional X-ray diffraction microscopy. In: *Scripta Materialia* 55 (2006), Nr. 1, S. 51–56
- Lautensack 2007** LAUTENSACK, Claudia: *Random Laguerre Tessellations*. Karlsruhe, Universität (TH), Fakultät für Mathematik, Dissertation, 2007
- Leslabay 2009** LESLABAY, Pablo: *Ein Beitrag zur Weiterentwicklung von robustheitsbasierten Optimierungsmethoden für mechanische Systeme beeinträchtigt von*

großer Streuung. Karlsruhe, Universität (TH), Fakultät für Maschinenbau, Dissertation, 2009

Lienemann et al. 2009 LIENEMANN, Jan ; CENOVA, Iva ; KAUZLARIC, David ; GREINER, Andreas ; KORVINK, Jan G.: Coupling of Smoothed Particle Hydrodynamics and Reduced Order Heat Transfer Model for Casting Simulation. In: TROCH, I. (Hrsg.) ; BREITENECKER, F. (Hrsg.): *6th International Conference on Mathematical Modelling – MATHMOD 2009* (Wien, Österreich, 11.–13. Februar 2009). Wien : ARGESIM, 2009, S. 1287–1292. – ISBN 978-3-901608-35-3

Lipka 2007 LIPKA, Andreas: *Verbesserter Materialeinsatz innovativer Werkstoffe durch die Topologieoptimierung*. Stuttgart, Universität, Fakultät Bau- und Umweltingenieurwissenschaften, Dissertation, 2007

Liu / Liu 2007 LIU, Gui-Rong ; LIU, M. B.: *Smoothed particle hydrodynamics : a meshfree particle method*. Repr. New Jersey ; London : World Scientific Publishing, 2007. – ISBN 978-9-8123-8456-0

Löffel 1997 LÖFFEL, Christoph: *Integration von Berechnungswerkzeugen in den rechnerunterstützten Konstruktionsprozess*. Erlangen-Nürnberg, Universität, Lehrstuhl für Konstruktionstechnik, Dissertation, 1997

Löhe / Beck 2005 LÖHE, Detlef ; BECK, Tillmann: Mikro-Urformen – Der SFB 499. In: DILTHEY, Ulrich (Hrsg.) ; DORFMÜLLER, Thomas (Hrsg.): *Kolloquium Mikroproduktion – Fortschritte, Verfahren, Anwendungen* (Aachen, 02./03. März 2005). Aachen : Mainz Verlag, 2005, S. 23–31. – ISBN 3-86130-999-8

Madou 2002 MADOU, Marc J.: *Fundamentals of Microfabrication : The Science of Miniaturization*. 2. Aufl. Boca Raton : CRC Press, 2002. – ISBN 978-0-8493-0826-0

Madsen et al. 2000 MADSEN, Jens I. ; SHYY, Wei ; HAFTKA, Raphael T.: Response Surface Techniques for Diffuser Shape Optimization. In: *AIAA Journal* 38 (2000), Nr. 9, S. 1512–1518

Maier 2006 MAIER, Patrick: *Modellierung eines mikromechanischen Systems und simulationsgestützte Untersuchung der Einflüsse von Geometrieabweichungen auf dessen Betrieb*, Karlsruhe, Universität (TH), Fakultät für Maschinenbau, Studienarbeit, 2006

Majic et al. 2009 MAJIC, Neven ; OTTNAD, Jens ; ALBERS, Albert ; SPICKENHEUER, Axel ; UHLIG, Kai ; HEINRICH, Gert: 3-D topology optimisation in combination with fibre alignment for composite structures. In: *Eighth World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization – WCSMO-8* (Lissabon, Portugal, 01.–05. Juni 2009). Lissabon, Portugal : ISSMO, 2009. – ISBN 90-5966-018-8

- Marz 2005** MARZ, Jochen: *Mikrospezifischer Produktentwicklungsprozess (μ PEP) für werkzeuggebundene Mikrotechniken*. Karlsruhe, Universität (TH), Fakultät für Maschinenbau, Dissertation, 2005
- Matsumoto / Kurita 1994** MATSUMOTO, Makoto ; KURITA, Yoshiharu: Twisted GFSSR generators II. In: *ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation* 4 (1994), Juli, Nr. 3, S. 254–266
- Matsumoto / Nishimura 1998** MATSUMOTO, Makoto ; NISHIMURA, Takuji: Mersenne Twister : A 623-Dimensionally Equidistributed Uniform Pseudo-Random Number Generator. In: *ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation* 8 (1998), Januar, Nr. 1, S. 3–30
- Mattheck 1990** MATTHECK, Claus: Why they grow, how they grow – the mechanics of trees. In: *Arboricultural Journal* 14 (1990), S. 1–17
- Mattheck / Burkhardt 1990** MATTHECK, Claus ; BURKHARDT, S.: A new method of structural shape optimization based on biological growth. In: *International Journal of Fatigue* 12 (1990), S. 185–190
- Mattheck et al. 1990** MATTHECK, Claus ; BURKHARDT, S. ; ERB, D.: Shape optimization of engineering components by adaptive biological growth. In: ESCHENAUER, H. A. (Hrsg.) ; MATTHECK, Claus (Hrsg.) ; OLHOFF, N. (Hrsg.): *Engineering Optimization in Design Processes : Proceedings of the International Conference* (Kernforschungszentrum Karlsruhe, 03./04. September 1990). Berlin : Springer, 1990, S. 15–24. – ISBN 978-0-3875-3589-0
- Matthiesen 2002** MATTHIESEN, Sven: *Ein Beitrag zur Basisdefinition des Elementmodells „Wirkflächenpaare & Leitstützstrukturen“ zum Zusammenhang von Funktion und Gestalt technischer Systeme*. Karlsruhe, Universität, Fakultät für Maschinenbau, Dissertation, 2002
- maxon motor GmbH 2010** Hochpräzise Antriebe und Systeme – maxon micro drive. <http://www.maxonmotor.de>. – Zugriffsdatum: 2010-02-01
- Meboldt 2008** MEBOLDT, Mirko: *Mentale und formale Modellbildung in der Produktentstehung – als Beitrag zum integrierten Produktentstehungs-Modell (iPeM)*. Karlsruhe, Universität (TH), Fakultät für Maschinenbau, Dissertation, 2008
- Menz et al. 2005** MENZ, Wolfgang ; MOHR, Jürgen ; PAUL, Oliver: *Mikrosystemtechnik für Ingenieure*. 3. Aufl. Weinheim : Wiley-VCH, 2005. – ISBN 978-3-5273-0536-0
- Meske 2007** MESKE, Ralf: *Non-parametric gradient-less shape optimization in solid mechanics*. Aachen : Shaker, 2007. – ISBN 978-3-8322-6373-7

- Metropolis / Ulam 1949** METROPOLIS, Nicholas ; ULAM, Stanislaw: The Monte Carlo Method. In: *Journal of the American Statistical Association* 44 (1949), Nr. 247, S. 335–341
- Metz 2008** METZ, Daniel: *Entwicklung einer simulationsgestützten Methode zur Unterstützung der Auslegung von urgeformten hochbeanspruchbaren Mikrobauteilen*. Karlsruhe, Universität (TH), Fakultät für Maschinenbau, Dissertation, 2008
- Müller 2005** MÜLLER, Ottmar: *Entwicklung der systembasierenden Komponentenoptimierung zur Unterstützung durchgängiger Analysemethoden im Produktentwicklungsprozess*. Karlsruhe, Universität (TH), Fakultät für Maschinenbau, Dissertation, 2005
- Müller 1992** MÜLLER, Ottmar: *Konzeption und Entwicklung eines FE-Zusatzmoduls zur Gestaltoptimierung nach dem Vorbild biologischer Strukturen unter Einbeziehung von neuen Optimalitätskriterien*, Universität Karlsruhe (TH), Studienarbeit, 1992
- Müller et al. 1999** MÜLLER, Ottmar ; ALBERS, Albert ; SAUTER, Jürgen ; ALLINGER, Peter: Topology Optimization of Large Real World Structures. In: *NAFEMS World Congress 1999 – NWC99* (Newport, Rhode Island, USA, 26.–28. April 1999). Glasgow : NAFEMS, 1999
- Neuber 1972** NEUBER, Heinz: Zur Optimierung der Spannungskonzentration. In: *Continuum Mechanics and Related Problems of Analysis* (1972), S. 375–380
- Neuber 1971** NEUBER, Heinz: *Zur Optimierung der Spannungskonzentration*. München : Bayerische Akademie der Wissenschaften, 1971 (Sitzungsberichte der Bayerischen Akademie der Wissenschaften : Mathematisch-Naturwissenschaftliche Klasse). – ISBN 978-3-7696-4613-9
- Newmark 1959** NEWMARK, Nathan M.: A method of computation for structural dynamics. In: *ASCE Journal of the engineering mechanics division* 5 (1959), Nr. EM3, S. 67–94
- Nowicki 2008** NOWICKI, Lukas: *Raue Oberflächen in geschmierten Tribokontakten*. Karlsruhe, Universität (TH), Fakultät für Maschinenbau, Dissertation, 2008
- Nygårds 2003** NYGÅRDS, Mikael: *Microstructural Finite Element Modeling of Metals*. Schweden, Royal Institute of Technology, Department of Solid Mechanics, Dissertation, 2003
- Oehler / Garbers 1968** OEHLER, Gerhard W. ; GARBERS, Friedrich: *Forschungsberichte des Landes Nordrhein-Westfalen*. Bd. 1918: *Untersuchung der Steifigkeit und Tragfähigkeit von Sicken*. Westdeutscher Verlag, 1968

- Ophey 2004** OPHEY, Lothar: *Entwicklungsmanagement – Methoden in der Produktentwicklung*. 1. Aufl. Berlin : Springer, 2004. – ISBN 978-3-5402-0652-1
- Ottnad 2009** OTTNAD, Jens: *Topologieoptimierung von Bauteilen in dynamischen und geregelten Systemen*. Karlsruhe, Universität (TH), Fakultät für Maschinenbau, Dissertation, 2009
- Piotter et al. 2008** PIOTTER, Volker ; BAUER, Werner ; HANEMANN, Thomas ; HECKELE, Mathias ; MÜLLER, Claas: Replication technologies for HARM devices : status and perspectives. In: *Microsystem Technologies* 14 (2008), Nr. 9-11, S. 1599–1605
- Piotter et al. 2007** PIOTTER, Volker ; FINNAH, G. ; ZEEP, B. ; RUPRECHT, Robert ; HAUSSELT, Jürgen: Metal and Ceramic Micro Components Made by Powder Injection Molding. In: *Materials Science Forum* 534-536 (2007), S. 373–376
- Polak 1997** POLAK, Elijah: *Optimization : algorithms and consistent approximations*. New York, NY : Springer, 1997. – ISBN 0-387-94971-2
- Prager / Taylor 1968** PRAGER, W. ; TAYLOR, J. E.: Problems of optimal structural design. In: *Journal of Applied Mechanics* 35 (1968), S. 102–106
- ProSTEP iViP e. V. 2008** PROSTEP iViP e. V.: *SimPDM – Integration der Simulation und Berechnung in eine PDM-Umgebung (White Paper)*. März 2008
- Ramm et al. 1998** RAMM, Ekkehard ; MAUTE, Kurt ; SCHWARZ, Stefan: Conceptual design by structural optimization. In: DE BORST, R. (Hrsg.) ; BICANIC, N. (Hrsg.) ; MANG, H. (Hrsg.) ; MESCHKE, G. (Hrsg.): *Computational Modeling of Concrete Structures – EURO-C 1998* (Bad Gastein, Österreich, 31. März–03. April 1998). Rotterdam : Balkema, 1998, S. 879–896
- Redenbach 2009** REDENBACH, Claudia: Microstructure models for cellular materials. In: *Computational Materials Science* 44 (2009), S. 1397–1407
- Reh et al. 2006** REH, Stefan ; BELEY, Jean-Daniel ; MUKHERJEE, Siddhartha ; KHOR, Eng H.: Probabilistic finite element analysis using ANSYS. In: *Structural Safety* 28 (2006), Nr. 1-2, S. 17–43
- Reh et al. 2005** REH, Stefan ; BELEY, Jean-Daniel ; MUKHERJEE, Siddhartha ; KHOR, Eng H.: Design for Six Sigma und Robust Design. In: *Weimarer Optimierungs- und Stochastiktag 2.0* (Weimar, 01./02. Dezember 2005). Weimar : DYNARDO, 2005
- Reher 1998** REHER, Frank R.: *Simulation der Rekristallisation auf der Basis orientierter Keimbildung und orientierten Keimwachstums mittels modifizierter zellulärer Automaten : Morphologie, Textur, Kinetik*. Düsseldorf : VDI-Verlag, 1998 (Fortschritt-Berichte VDI. Reihe 5, Grund- und Werkstoffe 523). – ISBN 3-183-52305-1

- Reiter 1995** REITER, Thomas J.: *Functional Adaptation of Bone and Application in Optimal Structural Design*. Wien, Universität, Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften, Dissertation, 1995
- Reuleaux / Moll 1854** REULEAUX, Franz ; MOLL, Carl L.: *Konstruktionslehre für den Maschinenbau*. Braunschweig : Vieweg, 1854
- Rodenacker 1991** RODENACKER, Wolf G.: *Methodisches Konstruieren. Grundlagen, Methodik, praktische Beispiele*. 4. Aufl. Berlin : Springer, 1991. – ISBN 978-3-5405-3977-3
- Ropohl 1999** ROPOHL, Günter: *Eine Systemtheorie der Technik : Zur Grundlegung der Allgemeinen Technologie*. 2. Aufl. München : Hanser, 1999. – ISBN 978-3-4461-2801-9
- Roth 1994a** ROTH, Karlheinz: *Konstruieren mit Konstruktionskatalogen I. Konstruktionslehre*. Bd. 1. 2. Aufl. Berlin : Springer, 1994. – ISBN 978-3-5405-7324-1
- Roth 1994b** ROTH, Karlheinz: *Konstruieren mit Konstruktionskatalogen II. Konstruktionskataloge*. Bd. 2. 2. Aufl. Berlin : Springer, 1994. – ISBN 978-3-5405-7656-3
- Ryan 2001** RYAN, Thomas P.: *Statistical Methods for Quality Improvement*. 2. Aufl. Hoboken, NJ, USA : John Wiley & Sons, 2001 (Wiley Series in Probability and Statistics). – ISBN 978-0-4711-9775-1
- Saak 2006** SAAK, Marcus: *Entwicklung eines Konzeptes und eines Prototypen für ein rechnergestütztes Werkzeug zum effizienten Einsatz der Problemlösungsmethodik „SPALTEN“*. Karlsruhe, Universität (TH), Fakultät für Maschinenbau, Dissertation, 2006
- Saile et al. 2009** SAILE, Volker (Hrsg.) ; WALLRABE, Ulrike (Hrsg.) ; TABATA, Osamu (Hrsg.) ; KORVINK, Jan G. (Hrsg.): *LIGA and its Applications*. Weinheim : Wiley-VCH, 2009 (Advanced Micro and Nanosystems). – ISBN 978-3-5273-1698-4
- Sandmann 2004** SANDMANN, Werner: *Simulation seltener Ereignisse mittels Importance Sampling unter besonderer Berücksichtigung Markovscher Modelle*. Bonn, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität, mathematisch-naturwissenschaftliche Fakultät, Dissertation, 2004
- Sauter 1991** SAUTER, Jürgen: CAOS – Beanspruchungsminimierung von Bauteilen durch Gestaltoptimierung mit biologischer Intelligenz. In: *ANSYS Users' Meeting* (Bamberg, 23.–25. Oktober 1991). Grafing bei München : CADFEM, 1991
- Sauter et al. 2000** SAUTER, Jürgen ; HOLGER FRICKE, Holger ; GÜNGÖR, Zeynel ; HIMMLER, Gerald ; HOUGARDY, Peter ; LAUBER, Boris ; MÜLLER, Ottmar ;

- NEITHARDT, Wolfgang ; SCHIRRMACHER, Roland: Integrierte Topologie- und Gestaltoptimierung im virtuellen Produktentstehungsprozess – Einbindung in die iViP Architektur und industrielle Anwendung. In: *Berechnung und Simulation im Fahrzeugbau* (Würzburg, 14./15. September 2000). Düsseldorf : VDI-Verlag, 2000 (VDI-Berichte 1559), S. 499–530. – ISBN 3-18-091559-5
- Sauter et al. 1992** SAUTER, Jürgen ; MULFINGER, Fritz ; MÜLLER, Ottmar: Neue Entwicklungen im Bereich der Gestalt- und Topologieoptimierung. In: *ANSYS Users' Meeting* (Arolsen, 28.–30. Oktober 1992). Grafing bei München : CADFEM, 1992
- Schatt / Worch 2003** SCHATT, Werner (Hrsg.) ; WORCH, Hartmut (Hrsg.): *Werkstoffwissenschaft*. 9. Aufl. Weinheim : Wiley-VCH, 2003. – ISBN 978-3-5273-0535-3
- Schirmaier 2009** SCHIRMAIER, Fabian: *Formoptimierung urgeformter mikromechanischer Bauteile unter Berücksichtigung statistischer Einflüsse*, Karlsruhe, Universität (TH), Fakultät für Maschinenbau, Studienarbeit, 2009
- Schittkowski 1999** SCHITTKOWSKI, Klaus: *Mathematische Grundlagen von Optimierungsverfahren*. Universität Bayreuth : Mathematisches Institut, 1999
- Schmidt 1958** SCHMIDT, L. C.: Fully stressed design of elastic redundant trusses under alternative loading systems. In: *Australian Journal of Applied Science* 9 (1958), S. 337–348
- Schnack 1980** SCHNACK, Eckart: Optimierung von Spannungskonzentrationen bei Viellastbeanspruchung. In: *ZAMM* 60 (1980), S. 151–152
- Schnack 1978** SCHNACK, Eckart: *Ein Iterationsverfahren zur Optimierung von Kerboberflächen*. VDI-Forschungsheft 589. 1978
- Schnack et al. 1988** SCHNACK, Eckart ; SPÖRL, Uwe ; IANCU, Gabriela: *Gradientless Shape Optimization with FEM*. VDI Forschungsheft 647. 1988
- Schneider et al. 2007** SCHNEIDER, Johannes ; KIENZLER, Andreas ; DEUCHERT, Marco ; SCHULZE, Volker ; KOTSCHENREUTHER, Jan ; ZUM GAHR, Karl-Heinz ; LÖHE, Detlef ; FLEISCHER, Jürgen: Formeinsätze aus Stahl für das Mikro-Pulverspritzgießen: mechanische Strukturierung, Oberflächenbehandlung und tribologische Charakterisierung. In: KRAFT, Oliver (Hrsg.) ; EMMERICH, Barbara (Hrsg.): *Kolloquium Mikroproduktion – Fortschritte, Verfahren, Anwendungen* (Karlsruhe, 22./23. November 2007). Eggenstein-Leopoldshafen : Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, 2007, S. 143–149. – ISBN 978-3-923-70461-3
- Schulze et al. 2009a** SCHULZE, Volker ; HAUPT, Sebastian ; WEBER, Patricia: Hybrid machining of microstructures using a combination of electrical discharge machi-

ning milling and laser ablation. In: *Journal of Vacuum Science & Technology B – Microelectronics and Nanometer Structures* 27 (2009), Nr. 3, S. 1327–1329

Schulze et al. 2009b SCHULZE, Volker ; RUHS, Christoph ; KÜHLEWEIN, Christoph ; DEUCHERT, Marco: Geometrieoptimierung von Mikrofräsern. In: *Mikroproduktion* (2009), Nr. 2, S. 40–44

Schulze et al. 2009c SCHULZE, Volker ; RUHS, Christoph ; KÜHLEWEIN, Christoph ; DEUCHERT, Marco: Simulationsgestützte Entwicklung von Mikrofräswerkzeugen. In: *MM MaschinenMarkt* (2009), Nr. 32, S. 14–18

Schulze et al. 2008 SCHULZE, Volker ; WEBER, Patricia ; DEUCHERT, Marco ; HAUPT, Sebastian ; RUHS, Christoph ; KIENZLER, Andreas: Limits and challenges of manufacturing micro molds. In: *6th International Symposium on Nanomanufacturing – ISNM-6* (Athen, Griechenland, 12. – 14. November 2008). Griechenland : Laboratory for Manufacturing Systems and Automation (LMS), 2008

Schumacher 2005 SCHUMACHER, Axel: *Optimierung mechanischer Strukturen – Grundlagen und industrielle Anwendungen*. Berlin : Springer, 2005. – ISBN 978-3-540-21887-6

Schwerpunktprogramm 1012 2009 SCHWERPUNKTPROGRAMM 1012: *Mikromechanische Produktionstechnik*. <http://www.wzl.rwth-aachen.de/>. – Zugriffsdatum: 2009-09-12

Schyr 2006 SCHYR, Christian: *Modellbasierte Methoden für die Validierungsphase im Produktentwicklungsprozess mechatronischer Systeme am Beispiel der Antriebsstrangentwicklung*. Karlsruhe, Universität (TH), Fakultät für Maschinenbau, Dissertation, 2006

Sebald 2001 SEBALD, Roland: *Modellierung der Rekristallisationstextur: Wechselwirkung zwischen Keimbildung und Keimwachstum*. Aachen, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule, Dissertation, 2001

Sharpe 2005 SHARPE, William N. J.: *The MEMS Handbook*. Bd. 1. Kap. Mechanical Properties of MEMS Materials. Boca Raton : CRC Press, 2005. – ISBN 978-0-8493-2106-1

Sonderforschungsbereich 379 2009 SONDERFORSCHUNGSBEREICH 379: *Mikromechanische Sensor- und Aktorarrays*. http://www.zfm.tu-chemnitz.de/sfb379_de.php. – Zugriffsdatum: 2009-08-23

Sonderforschungsbereich 440 2009 SONDERFORSCHUNGSBEREICH 440: *Montage hybrider Mikrosysteme – Handhabungs- und Fügetechniken für die Klein-*

und Mittelserienfertigung. <http://www.isf.rwth-aachen.de/sfb440/>. – Zugriffsdatum: 2009-08-23

Sonderforschungsbereich 499 2009 SONDERFORSCHUNGSBEREICH 499: *Entwicklung, Produktion und Qualitätssicherung urgeformter Mikrobauteile aus metallischen und keramischen Werkstoffen*. <http://www.sfb499.de>. – Zugriffsdatum: 2009-08-23

Sonderforschungsbereich 499 2008 SONDERFORSCHUNGSBEREICH 499: *Entwicklung, Produktion und Qualitätssicherung urgeformter Mikrobauteile aus metallischen und keramischen Werkstoffen – Finanzierungsantrag 2009, 2010, 2011*. Bd. 1. 2008

Sonderforschungsbereich 516 2009 SONDERFORSCHUNGSBEREICH 516: *Konstruktion und Fertigung aktiver Mikrosysteme*. <http://www.sfb516.tu-bs.de/>. – Zugriffsdatum: 2009-08-23

Sonderforschungsbereich 747 2009 SONDERFORSCHUNGSBEREICH 747: *Mikrokalturnformen – Prozesse, Charakterisierung, Optimierung*. <http://www.sfb747.uni-bremen.de/>. – Zugriffsdatum: 2009-08-23

Spencer 1864 SPENCER, Herbert: *The Principles of Biology*. London : Williams & Norgate, 1864. – ISBN 978-0-898-75794-1

Spickenheuer et al. 2009 SPICKENHEUER, Axel ; UHLIG, Kai ; ALBERS, Albert ; MAJIC, Neven ; GLIESCHE, Konrad: Steifigkeitsoptimierung von Faserverbundbauteilen für den extremen Leichtbau. In: CETEX (Hrsg.): *12. Chemnitzer Textiltechnik-Tagung* (Chemnitz, 30. September – 01. Oktober 2009). Chemnitz : Cetex, 2009

Spickenheuer et al. 2008 SPICKENHEUER, Axel ; SCHULZ, Martin ; GLIESCHE, Konrad ; HEINRICH, Gert: Using tailored fibre placement technology for stress adapted design of composite structures. In: *Plastics, Rubber and Composites: Macromolecular Engineering* 37 (2008), Nr. 5/6, S. 227–232

Spörl 1985 SPÖRL, Uwe: *Spannungsoptimale Auslegung elastischer Strukturen*. Karlsruhe, Universität (TH), Fakultät für Maschinenbau, Dissertation, 1985

Stoyan et al. 1995 STOYAN, Dietrich ; KENDALL, Wilfrid S. ; MECKE, Joseph: *Stochastic Geometry and its Applications*. 2. Aufl. New York, NY, USA : John Wiley & Sons, 1995. – ISBN 978-0-4719-5099-8

Svanberg 1987 SVANBERG, Krister: The method of moving asymptotes – a new method for structural optimization. In: *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 24 (1987), S. 359–373

Swaminathan et al. 2006 SWAMINATHAN, Shriram ; GHOSH, Somnath ; PAGANO, N. J.: Statistically equivalent representative volume elements for unidirectional

composite microstructures. Part 1 : without damage. In: *Journal of Composite Materials* 40 (2006), Nr. 7, S. 583–604

Taguchi 2004 TAGUCHI, Genichi: *Taguchi's Quality Engineering Handbook*. Hoboken, NJ, USA : John Wiley & Sons, 2004. – ISBN 978-0-4714-1334-9

Thacker 2008 THACKER, Ben H.: *Why do Probabilistic Finite Element Analysis?* Glasgow : NAFEMS, 2008. – ISBN 978-1-8743-7631-6

Thum / Oschatz 1932 THUM, A. ; OSCHATZ, H.: Steigerung der Dauerfestigkeit bei Rundstäben mit Querbohrungen. In: *Forschung im Ingenieurwesen* 3 (1932), Nr. 5, S. 87

Vanderplaats 2001 VANDERPLAATS, Garret N.: *Numerical optimization techniques for engineering design*. 3. Aufl. Vanderplaats R&D, Inc., 2001. – ISBN 978-0-944-95601-4

Venkayya et al. 1968 VENKAYYA, V. B. ; KHOT, N. S. ; REDDY, V. S.: Optimization of structures based on the study of energy distribution. In: *Proceedings of the Conference on Matrix Methods in Structural Mechanics* (Wright-Patterson Air Force Base, Ohio, USA, 15.–17. Oktober 1968), 1968, S. 111–153

Völklein / Zetterer 2006 VÖLKLEIN, Friedemann ; ZETTERER, Thomas: *Praxiswissen Mikrosystemtechnik : Grundlagen – Technologien – Anwendungen*. 2. Aufl. Wiesbaden : Vieweg, 2006. – ISBN 978-3-5281-3891-2

Voronoi 1908 VORONOI, M. G.: Nouvelles applications des paramètres continus a la théorie des formes quadratiques. In: *Journal für die reine und angewandte Mathematik* (1908), S. 198–287

Wassermann 1939 WASSERMANN, Günter: *Texturen metallischer Werkstoffe*. 1. Aufl. Berlin : Springer, 1939

Wassermann / Grewen 1962 WASSERMANN, Günter ; GREWEN, Johanna: *Texturen metallischer Werkstoffe*. 2. Aufl. Berlin : Springer, 1962

Watty 2006 WATTY, Robert: *Modellbasierte Methoden für die Validierungsphase im Produktentwicklungsprozess mechatronischer Systeme am Beispiel der Antriebstrangentwicklung*. Stuttgart, Universität, Fakultät Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik, Dissertation, 2006

Weyer 2001 WEYER, Stefan: *Mikromechanisches Modell zur Ermittlung effektiver Materialeigenschaften von geschädigten Polykristallen*. Karlsruhe, Universität (TH), Fakultät für Maschinenbau, Dissertation, 2001

- Wheeler 1976** WHEELER, L. J.: On the role of constant-stress surfaces in the problem of minimizing elastic stress concentration. In: *International Journal of Solids and Structures* 12 (1976), Nr. 11, S. 779–789
- Wicht / Bouchaud 2005** WICHT, Henning ; BOUCHAUD, Jérémie: The world market for microsystems and MEMS 2005 - 2009 : NEXUS Market Analysis for MEMS and Microsystems III. In: ZENGERLE, Roland (Hrsg.): *Mikrosystemtechnik Kongress 2005* (Freiburg, 10. – 12. Oktober 2005). Berlin : VDE, 2005, S. 475–478. – ISBN 978-3-8007-2926-5
- Widmann 1983** WIDMANN, Michael: *Herstellung und Versteifungswirkung von geschlossenen Halbrundsicken*. Stuttgart, Universität, Fakultät für Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik, Dissertation, 1983
- Woon et al. 2001** WOON, Soon Y. ; QUERIN, Osvaldo M. ; STEVEN, Grant P.: Structural application of a shape optimization method based on a genetic algorithm. In: *Structural and Multidisciplinary Optimization* 22 (2001), Nr. 1, S. 57–64
- Zorman et al. 2005** ZORMAN, Christian A. ; MEHREGANY, Mehran ; MCMAHON, J. J.: *The MEMS Handbook*. Bd. 2. Kap. Materials for Microelectromechanical Systems. Boca Raton : CRC Press, 2005. – ISBN 978-0-8493-2106-1

Stichwortverzeichnis

Hinweis

Werden für einen Begriff mehrere Seiten genannt, so verweist die fett gedruckte Seitenzahl auf die für das Verständnis der Arbeit relevante Hauptnennung.

A

- Abbruchkriterium 123, 126, **132**
- Abformung 36
- Abklinggesetz 23 f
- Aktivität 6
- Aluminium-Bronze 42
- Analyse
 - deterministische 30
 - stochastische 29 f
- Anisotropie 49, **53**
- Ansatz
 - Finite Elemente basierter 83
 - geometriebasierter 81
- Antwortfläche . *siehe* Response Surface Methode
- Approximationsverfahren, globale *siehe* Optimierungsverfahren
- auto (Methode) 92

B

- Bauteile, mikrostrukturierte 34
- Binder *siehe* Mikropulverspritzguss box (Methode) 92

C

- Computertomographie 77

- Contact & Channel Model 8
- Coach 66
- generalisierter Ansatz 61

D

- Dendriten 48
- design of experiments *siehe* Versuchsplanung, statistische
- Designgebiet 26
- Designknoten 23
- Designrand 19
- Designvariablen **12**, 26
- Diffusion 47
- Drahterosion 39

E

- Eigenspannung 51
- Einkristall **52**, 97
- Einkristallparameter 95
- element (Methode) 94
- Elementmodell 8
- Elementschwerpunkt 94
- Enthalpie 45
- Entmischung 41, **49**
- Entropie 45
- Erstarrung 49
- Erstarrungsfront 49
- Eulersche Winkel 95
- Evolutionäre Algorithmen 15

F

- Faser *siehe* Faserverbundbauteil

- Faserverbundbauteil 27
 feedstock *siehe* Formmasse
 Fehlerscheinung 50
 Fitness *siehe* Evolutionäre Algorithmen
 Formeinsatz **36**, 41
 Formenbau 36
 Formfüllung 41
 Formmasse **36**, 40
 Formoptimierung 19
 globale Approximationsverfahren 22
 gradientenfreie 22
 kombinierte 129, **131**
 Optimalitätskriterien-Verfahren .. 22
 parameterfreie 24
 probabilistische Verfahren 21
 robustheitsbasierte 129
 zuverlässigkeitsbasierte 129 f
- G**
- G/Struct . **78 ff**, 90 f, 95, 123 f, 135, 137,
 141
 Gefüge 48, **51**
 heterogenes 53
 homogenes 53
 Generation *siehe* Evolutionäre
 Algorithmen
 Gesamtstruktur **68 ff**, 104, 126
 Gleichgewicht
 thermodynamisches 44 f
 Gleichgewichtsform 48
 Gleiten 156
 Grünling 41
 Gradientenverfahren 13
 Grenzflächenenergie 48
 Grundgesamtheit .. 125, **127 f**, 131, 143
- H**
- Handlungssystem 5 f, 137
 hardcore (Methode) 91
 Hardcore-Voronoi-Mosaik 91
- Homogenisierungshypothese .. 14, **22 ff**
- I**
- import (Methode) 94
 Importance Sampling 31
 Individuen *siehe* Evolutionäre
 Algorithmen
 Integrationsverfahren
 direkte 107
 explizite 108
 implizite 109
 Intervallschätzung 128
 Ionenstrahl, fokussierter 77
 iPeM **6**, 136
- K**
- Keim **44**, 90
 Keimbildung *siehe* Kristallisation
 heterogen 46
 homogen 46
 Keimbildungsarbeit 45 f
 Keimbildungshäufigkeit 46
 Keimradius, kritischer 45 ff
 Keimverteilung 94, *siehe auch*
 Keimbildungshäufigkeit
 Keimwachstum 45, **47**, 90
 Kleinwinkelkorngrenze 52
 Konfidenzintervall 128
 Kontinuumsmechanik 95
 Korngefüge *siehe* Gefüge
 Korngrenze **48**, 52 f, 97
 Korngrenzsubstanz 51
 Kornstruktur *siehe* Gefüge
 Kornwachstum ... *siehe* Keimwachstum
 Kristallisation 44
 Kristallisationsgeschwindigkeit 49
 Kristallstruktur, dendritische 50
 Kristallwachstum ... *siehe* Kristallisation

L

Laserablation 39
 Latin Hypercube Sampling 31 f
 Legierung 49
 Leitstützstruktur 8
 Leitstützstrukturen
 streuende 67 – 72
 Lunker *siehe* Fehlerscheinung

M

Makrogefüge *siehe* Gefüge
 Matrix *siehe* Faserverbundbauteil
 Mehrkörpersystem, flexibles 106
 Mehrkörpersystemsimulation 106
 MEMS 34
 Mersenne Twister .. *siehe* Zufallszahlen
 Methode der kleinsten Quadrate 16
 micromachines *siehe*
 Mikrowerkzeugmaschinen
 Mikrobahnerosion 38
 Mikrobauteil 34
 Mikrofräsen 37
 Mikrofunkenerosion 38
 Mikrogefüge *siehe* Gefüge
 Mikroguss 41
 Prozesskette 42
 Mikrokomponente 34
 Mikrolunke *siehe* Fehlerscheinung
 Mikroplanetengetriebe 99
 Mikropulverspritzguss 40
 Prozesskette 41
 Mikrostruktur 34
 Mikrosystem 34
 Mikrotechnik *siehe* Mikrosystemtechnik,
 33 f
 Ausprägungen 34
 werkzeuggebundene **36**, 43
 Mikroturbine 99
 Mikrowerkzeugmaschinen 34

Mischkristall 49
 Monte Carlo Verfahren 15, **31**, 125 f, 129,
 135

Mutations*siehe* Evolutionäre Algorithmen

N

Netzglättung 126
 Normalverteilung 131 f

O

Oberflächenenergie 47
 Objektsystem 5 f, 137
 Optimalitätskriterium 14
 Optimierungsverfahren 11
 Approximationsverfahren 16
 mathematische Programmierung 13
 Optimalitätskriterien-Verfahren .. 14
 probabilistische Verfahren 15
 Orientierungsdichteverteilung 97
 Orthotropie 52

P

Parameter, statistische 125
 Phase 44 f
 Phasenübergang *siehe*
 Phasenumwandlung
 Phasengrenze *siehe* Korngrenze
 Phasenstruktur 53
 Phasenumwandlung 45
 Polykristall 52
 Pore *siehe* Fehlerscheinung
 Primärgefüge *siehe* Gefüge
 Problemlösungssystematik **7**, 137
 Produktentstehung, integrierte ... *siehe*
 Produktentwicklungsprozess
 Produktentstehungs-Modell, integriertes
 6, 136
 Produktentstehungsprozess 5
 Produktentwicklungsprozess
 mikrospezifischer 43

- Programmierung, mathematische *siehe*
 Optimierungsverfahren
 Prozessmodell 60
 Pseudozufallszahlen *siehe* Zufallszahlen
 Pulver *siehe* Mikropulverspritzguss
- Q**
- Quasiisotropie 53
- R**
- Randbereich 19
 Reaktionsgesetz der Kerbwirkung... 23
 Redesign-Formel 14, 22, **24 ff**, 126
 Referenzbeanspruchung 25
 Regelkreis 25
 Rekombination *siehe* Evolutionäre
 Algorithmen
 Rekristallisation 54
 Residuum 16
 Response Surface Methode 16, **32**
 Reststruktur 10
 Riss *siehe* Fehlerscheinung
 Robust Design 28
 Robustheitsanalyse 30
- S**
- Samplingverfahren **31 f**, 129
 Schleuderguss *siehe* Mikroguss
 Schlupf 156
 Schmelze 44 f
 Erstarrung 48
 Verunreinigung 49
 Viskosität 46
 Schrumpfung 41, **50**
 Schwindung 50
 Seigerung *siehe* Entmischung
 Sekundärgefüge *siehe* Gefüge
 Selektion *siehe* Evolutionäre
 Algorithmen
 Senkerosion 38
- Sensitivität 28
 Sensitivitätsanalyse 13
 Sichelmodell 2, **43**
 Sickenoptimierung 26 f
 SPALTEN *siehe*
 Problemlösungssystematik
 Spannung, virtuelle **125**, 138
 Spannungskonzentration 23
 Stabilor® G 42
 Starrkörper *siehe*
 Mehrkörpersystems simulation
 Stichprobe ... *siehe* Samplingverfahren
 Stratified Sampling 32
 Strukturoptimierung 11, **16**, 60
 survival of the fittest. *siehe* Evolutionäre
 Algorithmen
 Systemantwort 14, 16, **20**, 22 f, 132
 Systematic Sampling 32
 Systemtechnik 5
- T**
- Teilchen-Hydrodynamik, geglättete . 154
 Textur 48, **53 f**, 97
 Theorie der Entlastungskerven 23
 Toleranzradius 92
 Topographieoptimierung *siehe*
 Sickenoptimierung
 Topologieoptimierung 17
 Tragstruktur 10
- U**
- Umformprozess 27
 Unsicherheiten 28
 Unterkühlung, konstitutionelle 49
- V**
- Vakuum-Druckguss ... *siehe* Mikroguss
 Validierung 9, **99 – 121**, 134, 136
 Verfahren der konjugierten Gradienten

Verfahren des steilsten Abstieges ...	13
Vergleichsspannungshypothese	23
Verlustfunktion	29
Verschiebungsgeschwindigkeit	47
Verschleiß	156
Verschleißmodell	156
Versuchsplanung, statistische ...	16, 32
Vorzugsorientierung	<i>siehe</i> Textur
Voxel	77

W

Wälzen	156
Wärmebewegung	44
Wachstumsbehinderung	47
Wachstumsform	48
Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion .	126 , 130, 132
Wirkfläche	8
Wirkflächenpaar	8

Z

Zellstruktur	49
Zielfunktion	12
Zielsystem	5 f , 71, 137
Zufallszahlen	89 f
Zuschlagsstoff	<i>siehe</i> Mikropulverspritzguss
Zustand, metastabiler	45
Zwillingsgrenze	<i>siehe</i> Korngrenze

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name	Hans-Georg Enkler
geboren	am 14. Mai 1980 in Heidelberg
Staatsangehörigkeit	deutsch

Bildungsweg

08/1986 - 07/1990	Bolandenschule Wiesental, Grundschule
08/1990 - 07/1999	Copernicus-Gymnasium Philippsburg
09/1999 - 07/2000	Arbeiter-Samariter-Bund Bruchsal, Zivildienst
08/2000 - 09/2000	EnBW Kraftwerke AG, Kernkraftwerk Philippsburg, Grundpraktikum
10/2000 - 12/2005	Studium der Fahrzeugtechnik an der Universität Karlsruhe (TH) Diplomprüfung am 16. Dezember 2005
10/2001 - 05/2004	Wissenschaftliche Hilfskraft am Institut für Werkstoffkunde I der Universität Karlsruhe (TH)
05/2002 - 07/2002	Wissenschaftliche Hilfskraft am IPEK – Institut für Produktentwicklung der Universität Karlsruhe (TH)
11/2002 - 10/2003	
04/2004 - 03/2005	Wissenschaftliche Hilfskraft am IFKM – Institut für Kolbenmaschinen der Universität Karlsruhe (TH)
09/2004 - 01/2005	DaimlerChrysler AG, Mercedes-Benz Truck, Werk Wörth, Industriepraktikum
03/2005 - 04/2005	DaimlerChrysler AG, Mercedes-Benz Truck, Werk Wörth, Werkstudententätigkeit

Berufstätigkeit

seit 01/2006	Akademischer Mitarbeiter der Forschungsgruppe CAE/Optimierung am IPEK – Institut für Produktentwicklung des Karlsruher Institutes für Technologie (KIT)
seit 04/2008	Leiter der Forschungsgruppe CAE/Optimierung am IPEK – Institut für Produktentwicklung des Karlsruher Institutes für Technologie (KIT)

