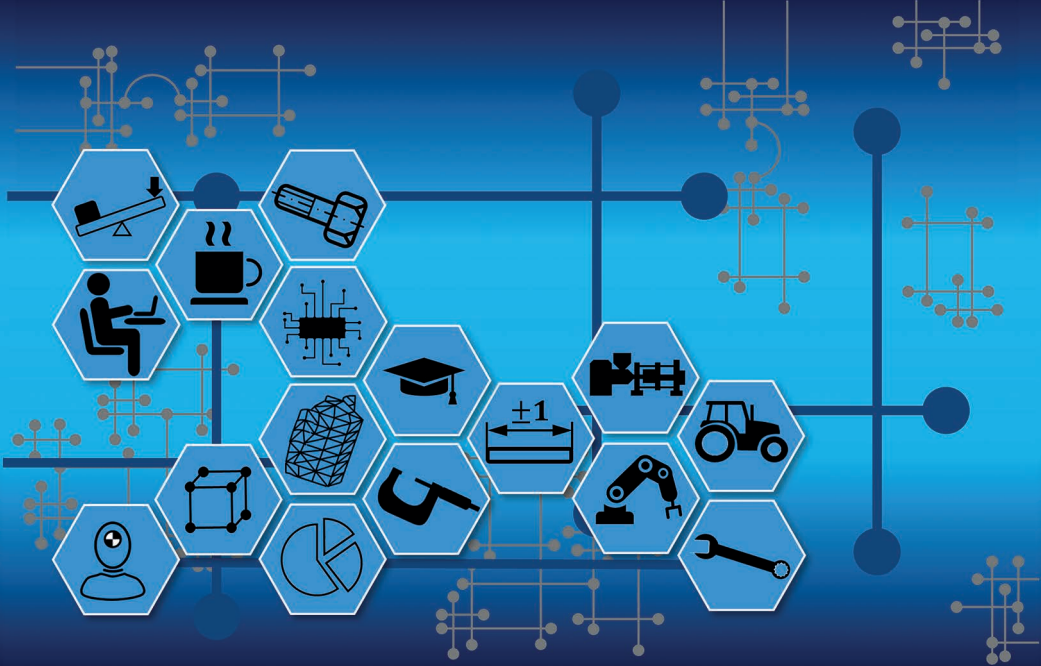




FAU Studien aus dem Maschinenbau 381

Björn Heling

Einsatz und Validierung
virtueller Absicherungsmethoden für
abweichungsbehaftete Mechanismen
im Kontext des Robust Design

Björn Heling

Einsatz und Validierung virtueller Absicherungsmethoden für
abweichungsbehaftete Mechanismen im Kontext des Robust Design

FAU Studien aus dem Maschinenbau

Band 381

Herausgeber der Reihe:

Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke

Prof. Dr.-Ing. Nico Hanenkamp

Prof. Dr.-Ing. habil. Tino Hausotte

Prof. Dr.-Ing. habil. Marion Merklein

Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt

Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartzack

Björn Heling

**Einsatz und Validierung
virtueller Absicherungsmethoden für
abweichungsbehaftete Mechanismen
im Kontext des Robust Design**

Dissertation aus dem Lehrstuhl für Lehrstuhl für
Konstruktionstechnik (KTmfk)
Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartzack

Erlangen
FAU University Press
2021

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

Bitte zitieren als

Heling, Björn. 2021. *Einsatz und Validierung virtueller Absicherungsmethoden für abweichungsbehaftete Mechanismen im Kontext des Robust Design*. FAU Studien aus dem Maschinenbau Band 381. Erlangen: FAU University Press. DOI: 10.25593/978-3-96147-488-2

Das Werk, einschließlich seiner Teile, ist urheberrechtlich geschützt.
Die Rechte an allen Inhalten liegen bei ihren jeweiligen Autoren.
Sie sind nutzbar unter der Creative-Commons-Lizenz BY-NC.

Der vollständige Inhalt des Buchs ist als PDF über den OPUS-Server der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg abrufbar:
<https://opus4.kobv.de/opus4-fau/home>

Verlag und Auslieferung:

FAU University Press, Universitätsstraße 4, 91054 Erlangen

Druck: docupoint GmbH

ISBN: 978-3-96147-487-5 (Druckausgabe)
eISBN: 978-3-96147-488-2 (Online-Ausgabe)
ISSN: 2625-9974
DOI: 10.25593/978-3-96147-488-2

**Einsatz und Validierung virtueller Absicherungsme-
thoden für abweichungsbehaftete Mechanismen im
Kontext des Robust Design**

Der Technischen Fakultät
der Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg

zur
Erlangung des Doktorgrades Dr.-Ing.

vorgelegt von

Björn Heling, M. Sc.

aus Stuttgart

Als Dissertation genehmigt
von der Technischen Fakultät
der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Tag der mündlichen

Prüfung: 17.09.2021

Vorsitzender des

Promotionsorgans: Prof. Dr.-Ing. habil. Andreas Paul Fröba

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartzack

Prof. Dr.-Ing. Stephan Husung, TU Ilmenau

Vorwort

„Das Wichtigste ist, dass man nicht aufhört zu fragen.“

Albert Einstein

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Konstruktionstechnik, wobei wesentliche Erkenntnisse der Arbeit im Rahmen der DFG-Forschungsgruppe FOR 2271 „Prozessorientiertes Toleranzmanagement mit virtuellen Absicherungsmethoden“ entstanden sind. Für die vielfältige Unterstützung, die maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen hat, möchte ich mich an dieser Stelle herzlich bedanken.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartack. Durch deine Zuversicht, deinen Optimismus und deine mitreißende Art hast du mich immer motiviert. Darüber hinaus hast du mir die notwendigen Freiräume ermöglicht, sodass ich meine Ideen in der Forschung stets umsetzen konnte. Vielen Dank Sandro!

Bei Prof. Dr.-Ing. Stephan Husung möchte ich mich für das Interesse an meiner Arbeit und die Übernahme des Zweitgutachtens bedanken.

Des Weiteren bedanke ich mich bei Prof. Dr.-Ing. Tobias Günther für das Engagement als fachfremder Prüfer sowie bei Prof. Dr.-Ing. habil. Tino Hausotte für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Bei allen ehemaligen und aktiven Kollegen möchte ich mich für den einmaligen Zusammenhalt und die gemeinsamen Erlebnisse bedanken. Besonders hervorheben möchte ich dabei die „Toleranzler“ Alexander, Stefan, Martin und Paul. Danke euch für die vielen Diskussionen und die gemeinsamen Stunden! Besonders möchte ich mich bei Dir Michl bedanken! Durch deine offene wertschätzende Herangehensweise hast du mir immer wieder neue Sichtweisen auf unterschiedlichste Problemstellungen offenbart und mich motiviert meinen Weg zu gehen. Danke Dir Benni! Durch deine analytische, hinterfragende Denkweise hast du mich ganz wesentlich unterstützt.

Weiterhin danke ich denjenigen Studierenden, die mich im Rahmen von wissenschaftlichen Arbeiten und Tätigkeiten am Lehrstuhl unterstützt haben. Ganz besonders freut mich, dass ich den ein oder anderen von Euch als Kollegen gewinnen konnte.

Da es mich begeistert neue Ideen aus der Forschung in die Industrie zu übertragen, möchte ich mich explizit für die Diskussionen im Arbeitskreis APo7 des Toleranz-Forums und den Austausch bei unterschiedlichen Tagungen bedanken.

Meiner gesamten Familie – insbesondere meinen Eltern, die mir die akademische Karriere ermöglichten – gebührt meine tiefe Dankbarkeit. Darüber hinaus möchte ich mich bei allen Freunden für das Verständnis bedanken.

Mein größter Dank gilt jedoch meiner Frau Johanna und meinen Kindern. Ohne euren Rückhalt und die Freiräume, die ihr mir eingeräumt habt, hätte ich diese Arbeit nie vollenden können.

Gräfenberg, den 17.10.2021

Björn Heling

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnis		ix
1	Einleitung	1
1.1	Motivation und Handlungsbedarf	2
1.2	Zielsetzung und Aufbau der Arbeit	4
1.3	Einordnung der Arbeit	5
2	Stand der Forschung und Technik	7
2.1	Robust Design	7
2.1.1	Robust Design in der Produktentwicklung	8
2.1.2	Robust Design Optimierung	10
2.1.3	Robust Design für Mechanismen	12
2.1.4	Ishikawa-Diagramm	14
2.1.5	Klassifizierung von Unsicherheiten.....	15
2.2	Toleranzmanagement.....	16
2.2.1	Statistische Grundlagen	18
2.2.2	Rechnerinterne Erzeugung von Zufallszahlen	20
2.2.3	Toleranzspezifikation	21
2.2.4	Toleranzanalyse	23
2.2.5	Toleranzrepräsentation	27
2.2.6	Beitragsleisteranalyse	29
2.2.7	Einbindung fertigungsspezifischer Abweichungsinfor- mationen	33
2.2.8	Metamodellierung	34
2.3	Validierung und Verifikation	35
2.3.1	Vorgehen bei der Validierung.....	36
2.3.2	Ähnlichkeitskennzahlen.....	39
2.3.3	Validierung im Kontext des Robust Design.....	42
2.3.4	Messtechnische Grundlagen	44
3	Ableitung des Handlungsbedarfs	47
3.1	Fazit zum Stand der Forschung	47
3.2	Handlungsbedarf aus industrieller Sicht	48
3.3	Handlungsbedarf für den Einsatz und die Validierung virtueller Absicherungsmethoden für Mechanismen im Kontext des Robust Design	54

4	Einsatz und Validierung virtueller Absicherungsmethoden für Mechanismen	57
4.1	Einflussanalyse	59
4.2	Nennmaßoptimierung für abweichungsbehaftete Mechanismen	61
4.2.1	Formulierung des Optimierungsproblems	61
4.2.2	Auswahl und Anwendung eines Optimierungsalgorithmus.....	63
4.2.3	Auswertung der Ergebnisse.....	66
4.3	Durchführung der Toleranzanalysen	67
4.3.1	Eingangsgrößen der Toleranzanalyse	68
4.3.2	Hybride Toleranzrepräsentation	70
4.3.3	Ergebnisinterpretation und Handlungsmöglichkeiten....	71
4.4	Validierung von Toleranzanalysen für Mechanismen	73
4.4.1	Entwicklung eines Validierungsprüfstands	75
4.4.2	Vorgehen bei der Validierung.....	77
4.4.3	Aufbereitung der Primärdaten.....	79
4.4.4	Auswahl und Bestimmung einer geeigneten Ähnlichkeitskennzahl zur Quantifizierung der Vorhersagegüte	81
4.4.5	Anpassung des Toleranzanalysemodells.....	83
4.5	Einbindung spezifischer Abweichungsinformationen	84
4.6	Beitragsleisteranalyse	88
4.7	Zielabgleich und weitere Schritte	89
5	Praktische Umsetzung des Vorgehens	91
5.1	Einflussanalyse	92
5.2	Nennmaßoptimierung der Röntgenblendenkinematik.....	94
5.2.1	Formulierung des Optimierungsproblems	94
5.2.2	Anwendung eines Optimierungsalgorithmus und Ergebnisinterpretation	97
5.3	Toleranzanalysemodelle der Röntgenblendenkinematik.....	99
5.3.1	Hybrides Toleranzanalysemodell	100
5.3.2	Hybrides Toleranzanalysemodell mit Lochspiel	102
5.3.3	Toleranzanalysemodell auf Basis von Skin Model Shapes	102

5.4	Validierung der Toleranzanalyse	105
5.4.1	Beschreibung des Prüfstands	105
5.4.2	Bestimmung der Messunsicherheit des Prüfstands	107
5.4.3	Ergebnisse und Interpretation der Prüfstandunter- suchungen	108
5.4.4	Vergleich der Ergebnisse und Bestimmung der Ähnlichkeitskennzahlen	111
5.4.5	Gegenüberstellung der Ähnlichkeitskennzahlen und Bewertung der Toleranzanalysemodelle	114
5.5	Abgleich mit den geforderten Qualitätszielen und poten- tielle Maßnahmen zur Zielerreichung	115
5.6	Diskussion der Ergebnisse und des Vorgehens	119
6	Zusammenfassung und Ausblick.....	123
7	Summary and outlook.....	127
8	Anhang.....	131
8.1	Messwerte und Kombinationen der Hebel	131
8.2	Standardunsicherheit der Wiederholversuche	136
8.3	Ähnlichkeitskennzahlen und deren Korrelationen.....	137
8.3.1	Ähnlichkeitskennzahlen für unterschiedliche Simulationen	137
8.3.2	Korrelationen der Ähnlichkeitskennzahlen.....	143
8.4	Eingesetzte Hard- und Software	146
8.5	Ausgewählte Prüfstandskomponenten	147
	Literaturverzeichnis	149

Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnis

Formelzeichen

Variable	Einheit	Beschreibung
A	mm	Maß
B	mm	Maß
C	mm	Maß
Corr		Korrelation
Cov		Kovarianz
D	mm	Maß
E		Erwartungswert/Maß
b		Variable
$\tilde{d}_{0,5}$		mittlere absolute Abweichung
dist		Abstand
f		Funktion
F		Laufgrad
g		Funktion
IA		Index of Agreement
iq		Ungleichheitsbedingung
J		Anzahl Elementpaare
L		Verlustfunktion
MAD		mittlere absolute Abweichung vom Median
N	mm	Nennmaß
n	„Stück“	Anzahl der Samples
n		Anzahl der Gelenke
NRMSE	%	Normalized Root Mean Squared Error (Normierte Wurzel der mittleren Fehlerquadratsumme)
NSE		Nash–Sutcliffe model efficiency coefficient
Q ₁ , Q ₃		Bezeichnung für erstes und drittes Quantil
RMSE		Root Mean Squared Error (Wurzel der mittleren Fehlerquadratsumme)
S _i		Haupteffekt
SM	mm	Schließmaß
S _{Ti}		Totaleffekt
u	„Stück“	Anzahl notwendiger Samples

u_p		Standardunsicherheit
U		Messunsicherheit
Var		Varianz
x		Variable
X		Variable
y		Variable
Y		Variable
z	„Stück“	Ausschussrate
$\hat{z}$	„Stück“	Geschätzte Ausschussrate
Z		Verlustkoeffizient
γ	°	Winkel
δ		Beitragsleister/Winkel
Δ	mm/°	Streubreite/Optimierungsvariable
ι	°	Winkel
μ	mm	Mittelwert
σ	mm	Standardabweichung
ϕ	°	Winkel/Schwingungsdauer
ω	Hz	Frequenz

Indizes

Index		Beschreibung
1, 2, 3, ...		Zählindex
h	„Stück“	Index höherer Elementpaare
high		Höchster Wert
Hüll		Hüllkreis
i		Zählindex
I		Index
j		Zählindex
J		Index
k		Zählindex
K		Index
low		niedrigster Wert
max		maximal
norm		normiert
p		Index niedriger Elementpaare
Pferch		Pferchkreis
planar		Index für planare Systeme

S		Simulierter/berechneter Wert
T		Totaleffekt
V		Versuchswert
zul		zulässig

Abkürzungen

Variable	Einheit	Beschreibung
ASME		American Society of Mechanical Engineers
CAD		Computer-Aided-Design
CAT		Computer-Aided-Tolerancing
EFAST		Extended-Fourier-amplitude-sensitivity-testing
HLM		High-Low-Median
DP		Design Parameter
FEM		Finite-Elemente-Methode
IA		Index of Agreement
ISO		Internationale Organisation für Normung
$K_{A,norm}$		Normiertes Flächenmaß
ME		Mean Error
NSE		Nash-Sutcliffe model efficiency coefficient
OFAT		one factor at a time
OSG		obere Spezifikationsgrenze
ppm		parts per million (deutsch: Teile von einer Million")
R^2		Bestimmtheitsmaß
RMSE		Root Mean Squared Error
SM		Schließmaß
T-Map [®]		Tolerance-Maps (Art der Toleranzrepräsentation)
TRIZ		Teoria reschenija isobretatjelskich sadatsch (Theorie des erfinderischen Problemlösens)
TTRS		Topological and Technological Related Surfaces (Art der Toleranzrepräsentation)
U		Messunsicherheit
USG		Untere Spezifikationsgrenze
V&V		Verifizierung und Validierung
V	mm	Varianz
$\mathbb{R}$		Menge der reellen Zahlen

1 Einleitung

Die Globalisierung bietet dank weltwirtschaftlicher Verflechtungen eine gesteigerte Innovationsdynamik und führt durch die internationale Arbeitsteilung zu einer bemerkenswerten Effizienzsteigerung. Aus ökonomischer Sicht bietet die Globalisierung daher ein enormes Potential, das gleichzeitig mit unterschiedlichen Herausforderungen einhergeht. So werden beispielsweise international verknüpfte Wertschöpfungsketten nicht nur komplexer, sondern zudem empfindlicher gegenüber unvorhersehbaren Ereignissen [1].

Abgesehen von ökonomischen Gesichtspunkten, die bei jedem Unternehmen eine entscheidende Rolle spielen, wirkt sich die Globalisierung zudem unmittelbar auf die Produktentwicklung aus. Neben immer komplexeren Produkten und einer steigenden Variantenvielfalt, die bei der Entwicklung eine interdisziplinäre Zusammenarbeit voraussetzen, erfordern drastisch verkürzte Produktlebenszyklen Vorgehensweisen, die eine effiziente und schnelle Produktentwicklung ermöglichen. Galt bis vor wenigen Jahren noch die Serienfertigung als das Maß aller Dinge, erfordert der Markt heute unter dem Schlagwort „batch size one“ maßgeschneiderte Produkte, die individuelle Kundenbedürfnisse erfüllen. Die Produktentwicklung muss folglich sehr flexibel sein, sodass maßgeschneiderte Produkte für unterschiedlichste Losgrößen entwickelt werden können.

Dabei stellt sich die Frage, wie deutsche Unternehmen es immer wieder schaffen sich erfolgreich am internationalen Wettbewerb zu behaupten? Der Erfolg deutscher Unternehmen ist nicht nur auf die Innovationskraft, die hohe Exportquote und eine Vorreiterrolle in vielen Schlüsselindustrien zurückzuführen. Besonders die hohe Qualität der entwickelten und hergestellten Produkte trägt maßgeblich zum Erfolg der deutschen Wirtschaft bei. So stellt die Bezeichnung „Made in Germany“ – insbesondere auch wegen der Qualität – weltweit die beste Herkunftsbezeichnung dar [2].

“Cost is more important than quality
but quality is the best way to reduce cost.”

(GEN'ICHI TAGUCHI)

Die internationale Organisation für Normung (ISO) definiert in [3] Qualität als den „Grad, in dem ein Satz inhärenter Merkmale eines Objekts Anforderungen erfüllt“. Diese abstrakte Definition geht auf eine Klassifizierung von GARVIN zurück, der zum einen die Sichtweise des Marketings

und zum anderen die der Produktion hervorhebt [4]. Die Herausforderung bei der Entwicklung neuer Produkte liegt darin, alle relevanten Kundenanforderungen zu identifizieren und anschließend in die Sprache der Produktentwickler zu überführen. So gilt es beispielsweise, die von Kunden subjektiv wahrgenommene Qualität eines Fahrzeugs in quantifizierbare Merkmale und Eigenschaften zu überführen.

Es genügt jedoch nicht, die idealen Merkmale und Eigenschaften eines Produktes zu spezifizieren, da aufgrund des Axioms der Fertigungsungenauigkeit [5], gefertigte Produkte stets von ihrem Ideal abweichen. Infolgedessen werden beispielsweise in der Automobilindustrie die von Kunden teilweise unterbewusst wahrgenommenen Fugen- und Versatzmaße in quantifizierbare Größen überführt [6]. Neben den idealen Sollmaßen werden hierbei zusätzlich die zulässigen geometrischen Abweichungen in Form von Toleranzen spezifiziert [7].

1.1 Motivation und Handlungsbedarf

Für die Gewährleistung einer gleichbleibend hohen Produktqualität trägt die Produktentwicklung eine besondere Verantwortung. Während der Entwicklung von Produkten werden einzelne Bauteile konstruiert, Materialien definiert und Herstellverfahren ausgewählt. Entsprechend werden bereits sehr früh während der Produktentstehung ca. 70 % der Herstellungskosten festgelegt [8]. Für die Qualität gefertigter Produkte haben Entscheidungen während der Produktentwicklung ebenfalls langfristige Auswirkungen, da mit jedem Fertigungs-, Füge- und Montageverfahren spezifische Prozessstreuungen einhergehen, die schlussendlich zu einer schwankenden Produktqualität führen. Es ist daher unerlässlich, dass Produkte möglichst früh abgesichert werden, sodass Produktentwickler den größtmöglichen Handlungsspielraum für etwaige konstruktive Anpassungen zur Verfügung haben. Nur so kann innerhalb eines definierten Kostenrahmens die bestmögliche Produktqualität gewährleistet werden.

Ein Blick in die Automobilindustrie zeigt, dass Hersteller heute immer mehr Derivate in kürzeren Abständen auf den Markt bringt, während deren Mitarbeiteranzahl kaum steigt. Bild 1 zeigt diesen Zusammenhang für die BMW Group. Konsequenterweise müssen Produkte effizienter entwickelt und abgesichert werden, da weniger Zeit für die gesamte Entwicklung zur Verfügung steht [9].

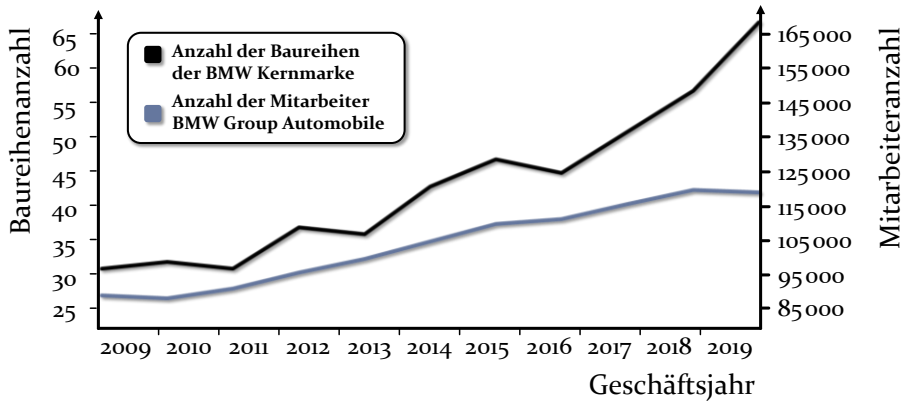


Bild 1: Entwicklung der Derivat- und Mitarbeiteranzahl der BMW Group ([10-13])

Physikalische Prototypen spielen nach wie vor – besonders am Ende der Produktentwicklung – eine entscheidende Rolle. So ist beispielsweise für eine allgemeine Betriebserlaubnis eines Fahrzeugs ein Crashtest mit serien-nahen Prototypen obligatorisch [14]. Allerdings resultiert aus der stark verkürzten Entwicklungszeit, dass weniger Zeit für eine Absicherung mit physikalischen Prototypen zur Verfügung steht, was im Umkehrschluss die Bedeutung der simulationsunterstützten virtuellen Absicherung signifikant erhöht. In Bild 2 ist der Anteil der virtuellen und der physikalischen Absicherung an der Entwicklungszeit schematisch veranschaulicht.

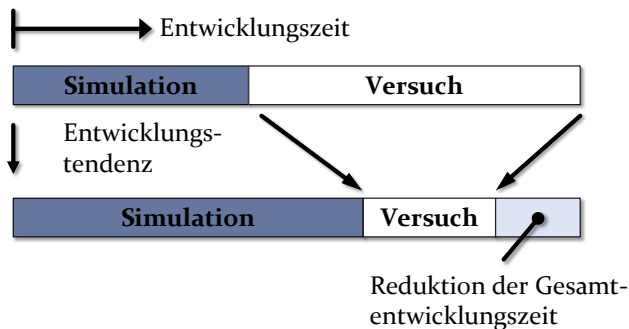


Bild 2: Reduktion der Gesamtentwicklungszeit durch den verstärkten Einsatz von Simulationen nach [15]

Sollen Entscheidungen, welche die Kosten des später gefertigten Produktes merklich beeinflussen, auf Basis von Simulationen getroffen werden, müssen zwei Voraussetzungen erfüllt sein: Zum einen sollten validierte Simulationsverfahren verwendet werden. Nur so kann sichergestellt werden, dass ein virtuelles Abbild die Realität für den zu untersuchenden Aspekt hinrei-

chend genau beschreibt und so auf Basis von Simulationsergebnissen belastbare Rückschlüsse auf die Realität gezogen werden können. Zum anderen müssen die virtuellen Werkzeuge innerhalb einer definierten Vorgehensweise systematisch verknüpft werden, sodass sie effektiv eingesetzt werden können [16]. Dadurch wird sichergestellt, dass die virtuelle Absicherung zum richtigen Zeitpunkt erfolgt und Produktentwickler zum richtigen Zeitpunkt die wesentlichen Entscheidungen treffen können.

1.2 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit

Im Rahmen dieser Arbeit wird der Einsatz und die Validierung virtueller Absicherungsmethoden für abweichungsbehaftete Mechanismen erforscht. Daraus resultiert eine systematische Vorgehensweise, die Produktentwickler zur Entwicklung robuster geometrisch abweichungsbehafteter Mechanismen befähigt.

Unter einem Mechanismus wird im Rahmen dieser Arbeit eine kinematische Kette aus mindestens drei Gliedern verstanden, wobei eines dieser Glieder als Gestell fungiert [17]. Für die Einordnung und die Abgrenzung der Vorgehensweise von bereits bestehenden Ansätzen wird im Stand der Technik (Kapitel 2) auf ausgewählte relevante Grundlagen und wissenschaftliche Erkenntnisse eingegangen. Wie in Bild 3 dargestellt, wird in Kapitel 3 der Handlungsbedarf abgeleitet. Ergänzend werden Defizite aus der industriellen Praxis anhand einer Umfrage unter Toleranzexperten diskutiert. In Kapitel 4 wird die Vorgehensweise für die Anwendung und Validierung virtueller Absicherungsmethoden für Mechanismen im Kontext des Robust Design theoretisch beschrieben und im darauffolgenden Kapitel 5 praktisch umgesetzt. Abschließend erfolgt eine Zusammenfassung der Arbeit und ein Ausblick auf weitere Forschungsfragen, die aus den Erkenntnissen der Arbeit erwachsen.

Hierfür wird eine methodische Vorgehensweise vorgestellt, die den Produktentwickler in die Lage versetzt, die zur Verfügung stehenden Informationen für die robuste Gestaltung abweichungsbehafteter Mechanismen bestmöglich zu nutzen. In dieser Arbeit werden neue virtuelle Werkzeuge entwickelt und deren praktischer Einsatz demonstriert. Um die Aussagekraft der virtuellen Absicherung zu untermauern, wird zusätzlich eine Möglichkeit aufgezeigt, wie Toleranzsimulationsmodelle validiert werden können und so die Ergebnisgüte virtueller Absicherungsmethoden bewertet werden kann.

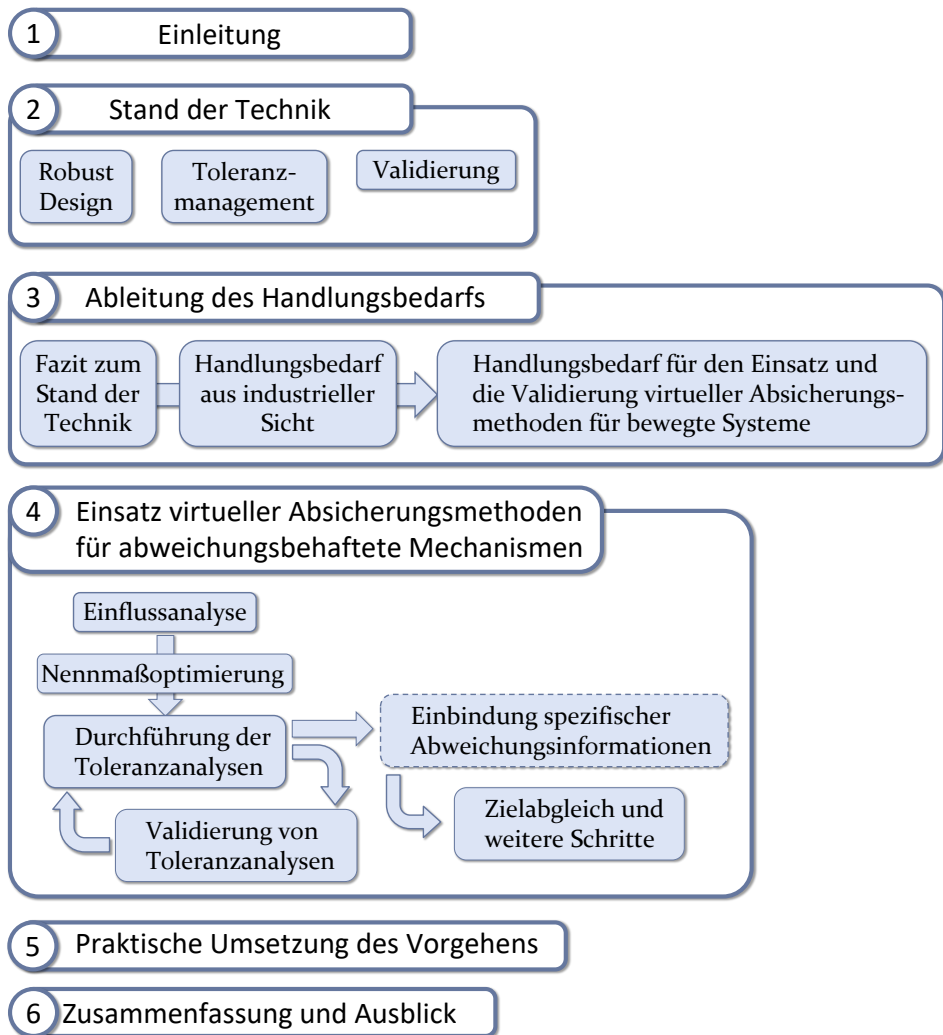


Bild 3: Aufbau der Arbeit

1.3 Einordnung der Arbeit

Die Ausführungen im Folgenden stellen stets die Sichtweise der Produktentwicklung dar. Daher wird das Vorgehen für die Produktentwicklung nach VDI 2221 [18], mit den darin definierten spezifischen Begrifflichkeiten zu Grunde gelegt. Des Weiteren basiert die Bauteiltolerierung auf dem ISO-GPS-Konzept, wobei diese Arbeit nicht den Anspruch erhebt vollumfänglich auf das ISO-GPS-Konzept einzugehen. Vielmehr wird eine neuartige übertragbare Vorgehensweise für die virtuelle Produktabsicherung vorge-

stellt, für die im Stand der Technik auf ausgewählte relevante Literatur eingegangen wird. Zusätzlich zu dem theoretischen Beitrag, den diese akademische Arbeit liefert, soll auch anhand der empirischen Evaluation mittels eines Demonstrators die Übertragbarkeit in die industrielle Praxis demonstriert werden. Dadurch wird der praktische Nutzen, der aus der Arbeit resultiert sichergestellt. Darüber hinaus wird anhand einer Expertenurfrage die Relevanz der Fragestellung, die der Arbeit zu Grunde liegt, aus industrieller Sicht diskutiert.

Wenngleich der Autor sich bewusst ist, dass Produkte heute nicht durch Einzelpersonen, sondern durch gemischtgeschlechtliche Teams entwickelt werden, wird aufgrund der besseren Lesbarkeit in der vorliegenden Arbeit die männliche Form Singular verwendet.

2 Stand der Forschung und Technik

Für das Verständnis und die Einordnung der vorliegenden Arbeit wird im Folgenden auf die relevanten theoretischen Grundlagen eingegangen. Dazu wird sowohl ein Überblick über den Stand der Forschung, als auch über den Stand der Technik gegeben. In Kapitel 3 erfolgt anschließend eine kurze Diskussion über den Stand der Forschung und Technik, um den Handlungsbedarf aufzuzeigen.

In diesem Kapitel erfolgt die Darstellung des Standes der Forschung und der Technik, wobei im Speziellen auf Aspekte des Robust Design in der Produktentwicklung mit dem Schwerpunkt auf Mechanismen eingegangen wird. Im Anschluss werden unterschiedliche Facetten des Toleranzmanagements, die innerhalb der virtuellen Produktabstimmung Verwendung finden, dargestellt. Am Ende des Kapitels werden Grundlagen der Validierung erläutert, wobei neben dem grundsätzlichen Vorgehen, Metriken zur Quantifizierung der Vorhersagegüte beschrieben werden, bevor Validierungsansätze im Kontext des Robust Design diskutiert werden.

2.1 Robust Design

Mitte der 1950er Jahre wurde unter dem Schlagwort *Robust Design* eine neue Qualitätsphilosophie durch den japanischen Ingenieur GEN'ICHI TAGUCHI geprägt [19]. Der Grundgedanke des *Robust Designs* basiert auf der Annahme, dass sämtliche Prozesse Schwankungen unterworfen sind und somit von ihrem Ideal abweichen. Ziel des *Robust Designs* ist es, Produkte beziehungsweise Prozesse so zu gestalten, dass unweigerlich auftretende Schwankungen verschiedener Einflussgrößen die Funktionen eines Produktes, respektive Prozesses, kaum negativ beeinflussen. Ohne die Ursachen der Schwankungen zu beeinflussen kann, kann ein System robuster gestaltet werden indem die Sensitivität des Systems gegenüber der Schwankungen minimiert wird. [20]

Dieser Grundgedanke ist in Bild 4 dargestellt. In der Darstellung sind zwei unterschiedliche Systeme A und B dargestellt, deren Designparameter unterschiedlich stark streuen. Obwohl bei System B die Streuung des Designparameters deutlich größer ist, stellt sich auch bei diesem System eine gleich große Streuung bei der Systemantwort (angetragen auf der Ordinate) ein. Folglich ist System B nach TAGUCHI robuster, da die streuenden Eingangsgrößen sich weniger stark auf die Systemantwort auswirken.

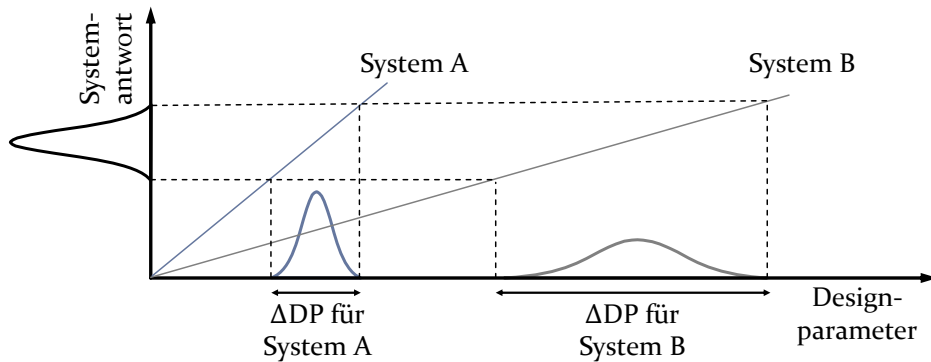


Bild 4: Gegenüberstellung zweier unterschiedlich robuster Systeme nach [21]

Nicht nur bei der Einteilung in robuste und nicht-robuste Systeme spielen Wahrscheinlichkeitsverteilungen bei der Bewertung nach TAGUCHI eine zentrale Rolle. Auch bei der Bewertung der Qualität spielen Wahrscheinlichkeitsverteilungen eine entscheidende Rolle. So stellt, wie in Bild 5 am Beispiel einer Maßabweichung veranschaulicht, jede Abweichung vom Zielwert einen Qualitätsverlust dar, der mit einer Verlustfunktion mathematisch beschrieben werden kann. Deutlich erkennbar ist, dass der Ausschuss bei der rechten Verteilung aufgrund einer geringeren Standardabweichung deutlich geringer ist.

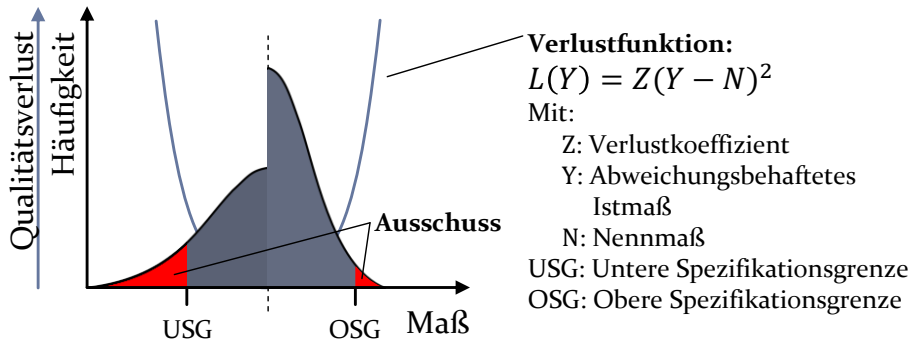


Bild 5: Qualitätsverlust nach TAGUCHI bei unterschiedlichen Streubreiten

2.1.1 Robust Design in der Produktentwicklung

Die TAGUCHI Methode wurde ursprünglich für Prozesse (als On-Line Qualitätslenkung) entwickelt und wird dem *Design-of-Experiment* zugeordnet [21]. Die TAGUCHI Methode wurde anschließend unter den Schlagworten Off-Line Qualitätslenkung oder *Robust Engineering* [20] auf die Entwick-

lung von Produkten erweitert. Das Vorgehen bei der Produktentwicklung wird dabei in die chronologisch aufeinander folgenden Schritte des System Design, Parameter Design und Toleranz Design aufgeteilt [20]:

System Design

Während des *System Design* werden unterschiedliche Konzepte entwickelt. In der Produktentwicklung haben sich dabei verschiedene Methoden auf unterschiedlichen Abstraktionsebenen etabliert. Als zwei Vertreter können hier exemplarisch das *Axiomatic Designs* [22] und die Theorie des erfinderischen Problemlösens (*TRIZ*) [23] genannt werden. Anschließend wird auf System- und Bauteilebene die Komplexität analysiert und danach durch Designanpassungen reduziert. [21]

Parameter Design

Nach der Wahl eines geeigneten Konzeptes, werden beim *Parameter Design* geeignete Nennwerte ausgewählt und dadurch eine Verbesserung der Robustheit des Systems erreicht. Dazu werden Faktoren, die das Systemverhalten eines Produktes oder Prozesses beeinflussen in einem *P-Diagramm* geclustert. Neben Stellgrößen (Inputs) und der Systemantwort ((un-)desired Outputs) unterteilt TAGUCHI die Parameter zusätzlich in Steuergrößen (Control Factors) und Störgrößen (Noise Factors). Durch die Wahl geeigneter Steuergrößen kann der Konstrukteur das gewünschte Systemverhalten sicherstellen, obwohl nicht kontrollierbare Störgrößen das System (negativ) beeinflussen [21]. In Bild 6 ist schematisch ein P-Diagramm mit je einem Parameter für ein Bremssystem dargestellt.

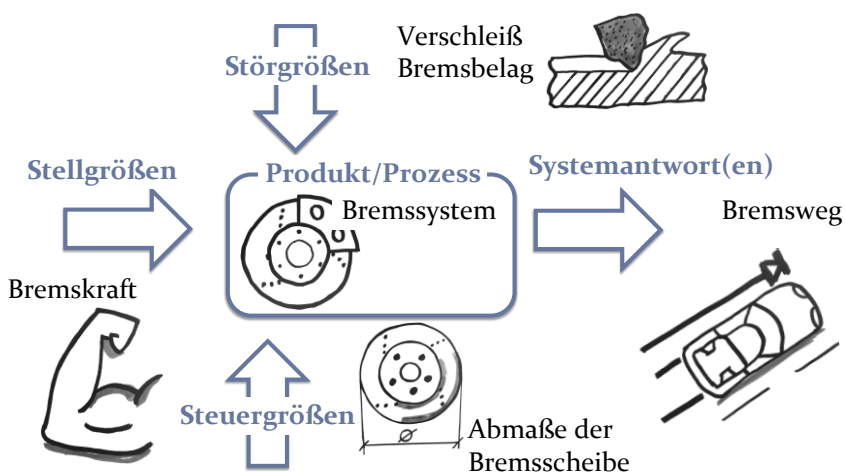


Bild 6: Parameter-Diagramm eines Systems nach [24]

Toleranz Design

Das *Toleranz Design* stellt den letzten Schritt der TAGUCHI-Methode dar, bei dem die zulässigen Abweichungen der beim *Parameter-Design* gewählten Nennmaße spezifiziert werden. Bei diesem Schritt werden Toleranzen für die Parameter mit dem größten Einfluss tendenziell klein gewählt, während bei weniger relevanten Parametern relativ große Abweichungen zulässig sind. Für die Quantifizierung des Einflusses einzelner Parameterschwankungen haben sich unterschiedliche Methoden zur Beitragsleistungs- oder Sensitivitätsanalyse etabliert. Zusätzlich können mithilfe der *Qualitätsverlustfunktion* (siehe Bild 5) die Herstellkosten bestimmt werden. [21]

2.1.2 Robust Design Optimierung

Die *Robust Design Optimierung* ist eine Vorgehensweise, bei der mit Hilfe von mathematischen Optimierungstechniken die Werte der Optimierungsparameter so gewählt werden, dass eine Zielfunktion optimiert wird, wobei definierte Robustheitseigenschaften erfüllt werden [25]. Um ein solches Optimierungsproblem zu lösen können Optimierungen auf Basis von Antwortflächen, stochastische Optimierungsverfahren oder eine Kombination dieser Verfahren verwendet werden [26]. **Antwortflächen** approximieren dazu den Optimierungsraum mittels expliziter Funktionen, die den Zusammenhang zwischen Optimierungsparametern und der oder den Zielgrößen beschreiben [27]. Typischerweise werden dazu Polynome verwendet, die eine recheneffiziente Bestimmung der lokalen und globalen Extrema erlauben [28].

Im Gegensatz dazu wird bei **stochastischen Optimierungsverfahren** der Suchraum mittels Lösungen, die auf Basis von Zufallszahlen erzeugt werden, exploriert [29]. Oftmals werden dazu naturinspirierte Algorithmen, wie die Partikelschwarmoptimierung [30] oder der Ameisenkolonialgorithmus [31] eingesetzt, die durch natürliche Vorgänge inspiriert sind. Da im Rahmen der Arbeit ein Partikelschwarmoptimierer genutzt wird, wird ausgehend von der grundsätzlichen Beschreibung der mathematischen Optimierung auf die Partikelschwarmoptimierung eingegangen.

Bei der mathematischen Optimierung werden mit einem geeigneten Verfahren (bspw. einem Optimierungsalgorithmus) die idealen Designvariablen für ein Problem (Zielfunktion) bei optional gegebenen Nebenbedingungen bestimmt [32].

Für eine Optimierungsaufgabe gilt nach somit für die Zielfunktion $f_i(x)$:

$$\text{Minimiere: } f_i(x), \text{ mit } i = 1, 2, \dots, I, \quad (1)$$

für die Designvariablen:

$$\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T, \quad (2)$$

wobei zusätzlich Gleichheits- und Ungleichheitsbedingungen erfüllt sein müssen [33].

Je nachdem, wie die Gleichheits- und Ungleichheitsbedingungen definiert sind, ob Designvariablen kontinuierliche, beziehungsweise diskrete Werte annehmen können und ob die Zielfunktion stetig ist, ist der Einsatz spezifischer Optimierungsalgorithmen erforderlich. In [34] wird ein Überblick und eine Klassifizierung von Optimierungsproblemen im Kontext des Toleranzmanagements gegeben. Darauf basierend werden auch Lösungsansätze aufgezeigt und diskutiert.

Da in Kapitel 5 für die Nennmaßoptimierung ein Partikelschwarmoptimierer gewählt wurde, soll anhand dieses Algorithmus das prinzipielle Vorgehen bei der Optimierung veranschaulicht werden. Bei dem Optimierer handelt es sich um einen genetischen Algorithmus, der den evolutionären Algorithmen zuzuordnen ist [35]. Bei evolutionären Algorithmen wird die natürliche Evolution nachgebildet, sodass eine definierte Anzahl an Individuen durch eine Anpassung (Vererbung, Kreuzung und Mutation) ein immer besseres Individuum in jeder Generation hervorbringt. Dies wird solange fortgesetzt, bis ein Abbruchkriterium erreicht wird. Ein solches Abbruchkriterium kann beispielsweise eine Anzahl an zulässigen Generationen oder das Unterschreiten eines Schwellwertes bei der Verbesserung der Zielfunktion sein [35].

Partikelschwarmoptimierung

Bei der Partikelschwarmoptimierung, die erstmals 1995 von KENNEDY in [30] vorgestellt wurde, wird das Verhalten von Vogel- und Fischeschwärmen nachgeahmt.

Zuzuordnen ist der Algorithmus den metaheuristischen Verfahren, die aus einer definierten Abfolge an Schritten bestehen und sich dadurch auszeichnen, dass die Lösung eines Optimierungsproblems näherungsweise erfolgt. Diese Eigenheit führt dazu, dass metaheuristischen Verfahren nicht-problemspezifisch eingesetzt werden können [36]. Bei diesem Algorithmus nimmt jeder Partikel, die in ihrer Gesamtheit die Population darstellen, eine definierte Position im n -dimensionalen Suchraum ein. Danach wird für jeden Partikel die Zielfunktion ausgewertet und überprüft, ob die Nebenbedingungen erfüllt werden. Anschließend bewegen sich alle Partikel mit einer individuellen Geschwindigkeit in Richtung des Füh-

rungspartikels, der die beste Lösung für das Optimierungsproblem liefert. Bei der Geschwindigkeitsbestimmung spielen neben der aktuellen Geschwindigkeit eines Partikels und dessen aktuellen Position auch Zufallszahlen eine Rolle, sodass der Suchraum bestmöglich durchsucht wird. Nach jedem Iterationsschritt wird der nächste Führungspartikel bestimmt und alle weiteren Partikel bewegen sich erneut im Suchraum weiter auf den mitunter neuen Führungspartikel zu, bis ein Abbruchkriterium den iterativen Prozess beendet. [37]

2.1.3 Robust Design für Mechanismen

Ein Mechanismus ist der Teil einer Maschine, der Bewegungen und Kräfte von einer Energiequelle auf einen Ausgang überträgt und gegebenenfalls modifiziert [38]. Es handelt sich dabei um eine kinematische Kette, die aus mindestens drei über Gelenke verbundenen Gliedern besteht. Ein Glied der kinematischen Kette dient dabei als Gestell [17].

Obwohl kleine elastische Verformungen möglich sind, werden Gelenke als starr betrachtet. Infolgedessen stellen alle elastischen Teile, wie Dämpfer oder Federn, keine Glieder dar. Die starren Getriebeglieder sind mit beweglichen Gelenken verbunden, die Relativbewegungen zwischen den starren Körpern ermöglichen. Diese Gelenke können, wie in Bild 7 dargestellt, in niedrige und höhere Elementpaare eingeteilt werden.

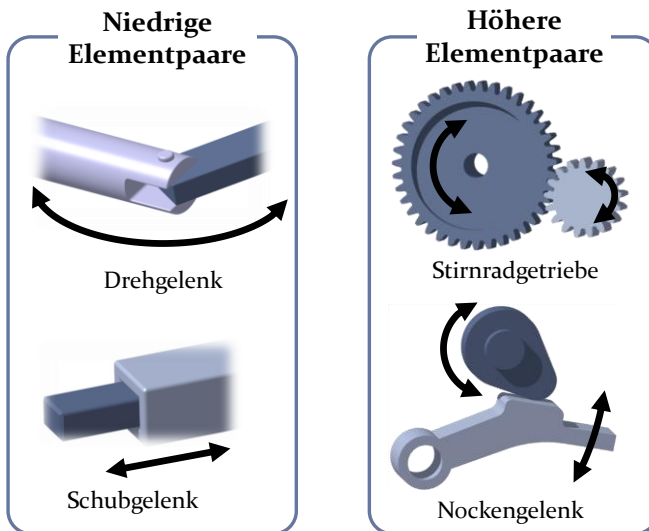


Bild 7: Beispiele für niedrige und höhere Elementpaare

Bei niedrigen Elementpaaren (engl. lower pairs), die auch als Standardgelenke bezeichnet werden, haben die sich relativ zu einander beweglichen Körper eine Flächenberührung. Höhere Elementpaare (engl. higher pairs), die auch als komplexe Gelenke bezeichnet werden, weisen hingegen einen Linien- oder Punktkontakt zwischen den Körper auf. [39]

Die robuste Gestaltung von Mechanismen stellt eine besondere Herausforderung dar, da qualitätsrelevante Merkmale meist zeitlich veränderlich sind und nicht nur durch geometrische Bauteilabweichungen beeinflusst werden [40]. Allgemeine Hinweise für die robuste Gestaltung von Mechanismen werden in [41] beschrieben. Dabei spielt der Laufgrad F eine wichtige Rolle, da mit ihm die Anzahl möglicher relativer Bewegungen mit der so genannten GRÜBLER-Gleichung berechnet werden können. Für planare Mechanismen, die lediglich drei Freiheitsgrade zulassen, gilt [38]:

$$F_{\text{planar}} = 3(n - 1) - 2j_p - j_h, \quad (3)$$

mit:

n : Anzahl der Gelenke

j_p : Anzahl niedriger Elementpaare (engl. primary joints)

j_h : Anzahl höhere Elementpaare (engl. higher order joints)

Der Laufgrad eines Mechanismus ist somit abhängig von den Getriebegliedern, den Gelenken und deren Freiheitsgraden. Obgleich Bauteilmaße für die GRÜBLER-Gleichung irrelevant sind, spielen sie eine wichtige Rolle. So kann es dazu kommen, dass ein Mechanismus aufgrund von geometrischen Bauteilabweichungen klemmt. Weitere Einflussfaktoren, wie beispielsweise das Spiel in den Gelenken und elastische, beziehungsweise plastische Bauteilverformungen können beim Laufgrad ebenfalls eine entscheidende Bedeutung haben [42].

Grundsätzliche Richtlinien für die Konzeptionierung von Mechanismen werden von MATTHIASSEN in [41] kategorisiert und diskutiert. Für verschiedene Aspekte, wie beispielsweise die Wahl geeigneter Gelenke, werden Vor- und Nachteile diskutiert, wobei der Hauptfokus auf dem System Design liegt.

EBRO ET AL. Fokussieren in [43] ebenfalls den Beginn des Robust Design Prozesses, indem sie ein Vorgehen vorstellen, dass die Prinzipien des *kine-matic design* mit dem Anspruch eine eindeutiges Gestaltung nach PAHL/BEITZ [44] zu kombinieren. Ein Schwerpunkt der Arbeit liegt auf der

eindeutigen Gestaltung der Schnittstellen, sodass ein robustes Verhalten erreicht werden kann.

Eine Möglichkeit sowohl die Robustheit, als auch die Zuverlässigkeit eines Systems zu erhöhen sieht die *SMART Methode* vor. Unter dem Schlagwort der Robusten Zuverlässigkeit wird eine methodische Entwicklungsabfolge vorgestellt, die Produktentwickler bei der Entwicklung robuster und zuverlässiger Produkte unterstützt. Die Methode sieht ein Sampling der Unsicherheiten beim *Parameter Design* vor, um den Versuchsraum möglichst vollständig abzudecken [25].

Mit der *First-Order Reliability Method* (kurz: *FORM*) wird ein weiterer Ansatz bereitgestellt, der den Reifegrad von Fahrzeugmodulen in frühen Entwicklungsphasen erhöhen soll. Dazu werden Robustheitsfaktoren ermittelt, die anschließend unter Berücksichtigung von Design Parametern optimiert werden, wobei eine Minimierung der Ausfallwahrscheinlichkeit angestrebt wird [26].

Für mechatronische Systeme stellt BILEL eine Methode zur Reduktion der Sensibilitäten gegenüber Schwankungen vor. Dabei werden Schwankungen der Design Parameter im Rahmen einer Mehrzieloptimierung berücksichtigt, wobei die Ergebnisse der Optimierung anschließend als Pareto-Front (Menge der Optimalen Lösungen) dem Produktentwickler zur Verfügung gestellt werden. [45]

2.1.4 Ishikawa-Diagramm

Für die Erfassung und Gruppierung von Ursachen und Einflussgrößen hat sich das ISHIKAWA- (auch Ursache-Wirkungs- oder Fischgräten-) Diagramm etabliert. Das ISHIKAWA-Diagramm zählt zu den sieben Werkzeugen des Qualitätsmanagements, die von ISHIKAWA KAORU 1943 zusammengestellt wurden [46]. Dabei stellt das ISHIKAWA-Diagramm, wie in Bild 8 gezeigt, eine systematische Sammlung von Ursachen dar, die sich auf ein System auswirken und infolgedessen zu Problemen führen können. Basierend auf Haupteinflussgrößen können Einflussgrößen aus unterschiedlichen Domänen mit einem Diagramm geclustert werden [47], wobei in der Literatur verschiedene Ansätze für diese Clusterung und die Anzahl der Kategorien existieren [48].

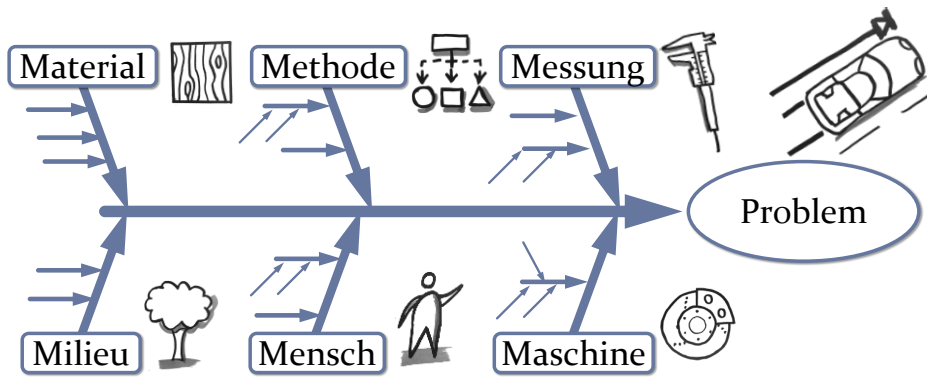


Bild 8: ISHIKAWA-Diagramm nach [47]

2.1.5 Klassifizierung von Unsicherheiten

Innerhalb der Produktentwicklung gibt es unterschiedliche Klassifikationen der Unsicherheiten, die teils kontrovers diskutiert werden [49]. Im Rahmen dieser Arbeit wird die Klassifikation nach THUNNISSEN [50] herangezogen, da anhand dieser die Validierung der virtuellen Toleranzanalysen anschaulich diskutiert werden kann. Dazu ist die Klassifizierung der Unsicherheiten nach THUNNISSEN in Bild 9 dargestellt.

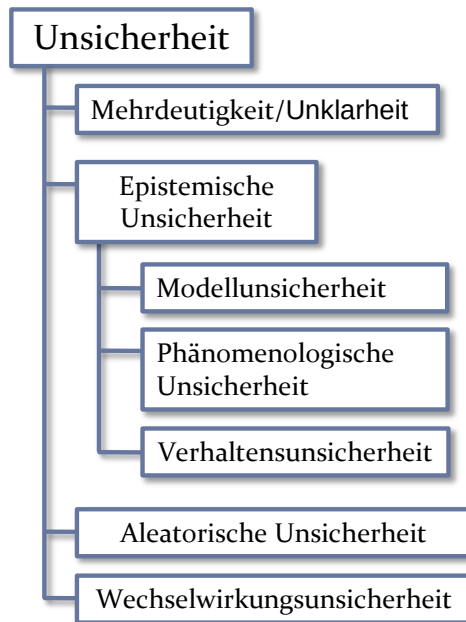


Bild 9: Klassifizierung von Unsicherheiten nach [50]

Der Aspekt der **Mehrdeutigkeit/Unklarheit** (engl. Ambiguity) bezieht sich auf sprachliche und konstruktive Ungenauigkeiten, impliziert aber zudem beispielsweise Aspekte einer uneindeutigen Toleranzspezifikation. [50]

Unter dem Sammelbegriff der **epistemischen Unsicherheit**, werden Aspekte zusammengefasst, die auf nicht vollständiges Wissen über ein System und dessen Umwelt zurückzuführen sind. Dieses unvollständige Wissen kann in drei Unterkategorien eingeteilt werden [50]:

Unter **Modellunsicherheit** werden Aspekte der Modellbildung in Form von (mathematischen) Beschreibungen des realen Systems verstanden. Ebenfalls werden numerische Probleme, Programmierfehler oder Approximationsfehler dieser Kategorie zugeordnet. [50]

Der Einfluss von Umwelteinflüssen, die dazu führen, dass sich ein System anders verhält als es vorgesehen ist. Dies wird den **phänomenologischen Einflüssen** zugerechnet. [50]

Unsicherheiten die auf Individuen oder auf die Organisation zurückzuführen sind werden als **Verhaltensunsicherheit** bezeichnet. Dabei werden sowohl Entscheidungen während der Produktentwicklung, als auch nicht berücksichtigte Szenarien der Produktnutzung dieser Kategorie zugeordnet. [50]

Unvermeidbare, inhärente Unsicherheiten, die jedem physikalischen System und dessen Umwelt innewohnen, zählen zu den **aleatorischen Unsicherheiten**, die mit Hilfe von stochastischen Prozessen beschrieben werden. [50]

Unerwartete Wechselwirkungen, die sich teilweise über unterschiedliche Domänen auswirken, werden als **Wechselwirkungsunsicherheit** bezeichnet. [50]

2.2 Toleranzmanagement

Da heute Produkte mit immer höherer Komplexität, bei gleichzeitig steigenden Qualitätsanforderungen durch den Einsatz von Concurrent, beziehungsweise Simultaneous Engineering [51] in immer kürzeren Zeiträumen entwickelt werden, ist es entscheidend, dass die geometrischen Schnittstellen zwischen den Bauteilen und Baugruppen mit Hilfe von geometrischen Toleranzen eindeutig spezifiziert sind.

Nach DANTAN hat das Wort Tolerierung in diesem Kontext zwei unterschiedliche Bedeutungen. Zum einen wird damit die Symbolsprache,

welche zulässige Abweichungen beschreibt und einschränkt bezeichnet (siehe Abschnitt 2.1.1). Zum anderen wird darunter auch die Steuerung unterschiedlicher Aktivitäten im Kontext der Tolerierung während der Produktentwicklung bezeichnet. [52]

Für die Spezifikation von Toleranzen kann entweder auf ASME-Richtlinien [53] oder auf das System der Geometrischen Produktspezifikation (GPS) [54] zurückgegriffen werden. Dieses vereint neben der Spezifikation von zulässigen Bauteilabweichungen auch deren Verifikation in Form von Vorschriften für die Bauteilprüfung.

Ausgangspunkt der unterschiedlichen Aktivitäten des Toleranzmanagements (engl. *dimensional management*) ist dabei die Beschreibung und Quantifizierung der zu untersuchenden Schließmaße (siehe Abschnitt 2.2.4) und deren Eigenschaften (siehe Bild 10). In der Wissenschaft haben sich für diesen Schritt unterschiedliche Vorgehen etabliert [55, 56].

Basierend auf einer (vorläufigen) Toleranzspezifikation, innerhalb der neben Bezugssystem(en) auch die Toleranzarten spezifiziert werden, erfolgt anschließend im Rahmen der Toleranzallokation die Festlegung der Toleranzwerte für die einzelnen Toleranzen [57]. Mit Hilfe der Toleranzanalyse (siehe Abschnitt 2.2.4) werden im Anschluss die Folgen der Überlagerung der geometrischen Abweichungen quantifiziert. Optional folgt eine Toleranzsynthese, bei der Toleranzen derart angepasst werden, dass entweder Qualitätsziele besser erfüllt oder Produktionskosten gesenkt werden. Aufgrund der starken Wechselwirkungen der Einflussfaktoren hat sich hier der Einsatz von Optimierungsalgorithmen bei der Toleranzsynthese als adäquates Mittel herausgestellt [34]. Können Fertigungskosten nicht exakt quantifiziert werden oder soll das Verständnis für das Gesamtsystem und die auftretenden Wechselwirkungen verbessert werden, hat sich im akademischen Umfeld und besonders in der industriellen Praxis der Einsatz von Beitragsleistanalysen als probates Mittel herausgestellt. Mit diesen wird quantifiziert, welchen Einfluss einzelne geometrische Abweichungen auf die Streuung des Schließmaßes haben [P21]. Da einige Verfahren zur Bestimmung der Beitragsleiste auch die Wechselwirkungen zwischen streuenden Größen quantifizieren können, kann durch deren Einsatz ergänzend ein besseres Systemverständnis gewonnen werden.

In den folgenden Abschnitten wird detailliert auf ausgewählte Teilaspekte des Toleranzmanagements eingegangen.

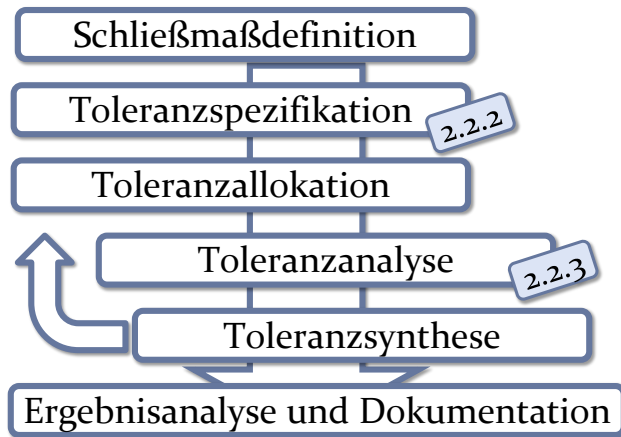


Bild 10: Schritte des Toleranzmanagements

2.2.1 Statistische Grundlagen

Da das gesamte Vorgehen zum Einsatz und zur Validierung virtueller Absicherungsmethoden für Mechanismen auf der Annahme aufbaut, dass geometrische Größen von ihrem Ideal abweichen und diese Abweichung mit statistischen Verfahren abgebildet werden können, wird an dieser Stelle auf ausgewählte statistische Grundlagen eingegangen. Nachdem die Normalverteilung die bedeutendste Verteilungsform ist, sollen die statistischen Grundlagen an ihr diskutiert werden. Weisen Zufallszahlen keine Normalverteilung auf, was beispielsweise mit einem KOLMOGOROW-SMIRNOW-Test überprüft werden kann [58], erfolgt die Bestimmung der nachstehend dargestellten Kennwerte teilweise anders.

Für Wahrscheinlichkeitsverteilungen können mit der induktiven Statistik quantitative Merkmale bestimmt werden. So lassen sich die vier statistischen Momente (Mittelwert μ , Standardabweichung σ , Schiefe γ und Wölbung τ) für eine Stichprobe mit n Werten x_i berechnen [59]. Für die im Rahmen der Arbeit relevanten Momente Mittelwert μ und Standardabweichung σ gilt:

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (4)$$

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \mu)^2}{n - 1}} \quad (5)$$

Da im Kontext des Toleranzmanagements die Folgen von Streuungen bei der Fertigung oder der Montage untersucht werden, spielen neben den vier statistischen Momenten noch weitere Kennzahlen, die die Güte eines streuenden Prozesses quantifizieren, eine wichtige Rolle. Zu den wichtigsten Vertretern der Prozessfähigkeitsindizes, von denen es eine Vielzahl gibt [60], zählen der Prozessfähigkeitsindex C_p und der kleinste Prozessfähigkeitsindex C_{pk} . Diese Indices quantifizieren die Sicherheit, mit der bei einem streuenden Prozess die spezifizierten Ziele erreicht werden. Für die Berechnung beider Indizes wird die beobachtete Streuung in Relation zur Spezifikation gesetzt. Dabei stellt USG die untere und OSG die obere Spezifikationsgrenze dar, die zusammen den Bereich, innerhalb dessen sich die Gutteile befinden, begrenzen [61]:

$$C_p = \frac{OSG - USG}{6\sigma} \quad (6)$$

$$C_{pk} = \frac{\min(\mu - USG, OSG - \mu)}{3\sigma}. \quad (7)$$

Mit Hilfe der Kennwerte können, wie in Bild 11 illustriert, in Abhängigkeit vom Sigma-Level (bspw. $\pm 3\sigma$) die Gutteilquoten und Ausschussraten bestimmt werden. [59]

Gefertigte Bauteile oder Baugruppen, deren erfasste Merkmale oder Eigenschaften außerhalb der Spezifikationsgrenzen liegen, werden als Ausschuss bezeichnet. Ihr Anteil wird an der Gesamtheit der gefertigten Bauteile als Ausschussrate z bezeichnet und wird oft in „parts per million“ (kurz: ppm) angegeben. Die Gesamtheit der Gutteile wird hingegen als Prozessausschuss bezeichnet [19].

Im Kontext der statistischen Toleranzrechnung werden sowohl die Eingangs- als auch die Ausgangsgrößen der Berechnung/Simulation ausgehend von statistischen Verteilungen beschrieben. Meist wird vereinfacht die Annahme getroffen, dass Toleranzen symmetrisch um einen Mittelwert μ , normalverteilt mit einer Streubreite von $\pm 3\sigma$ streuen.

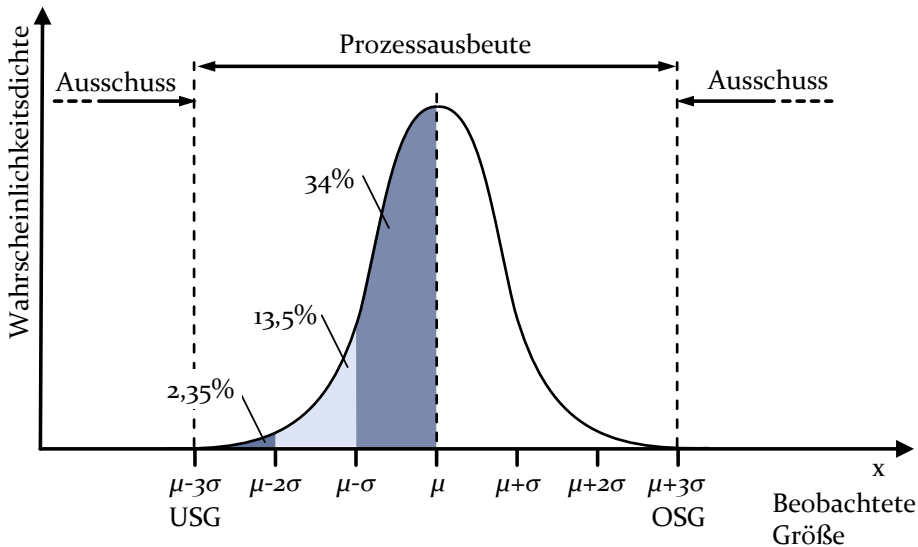


Bild 11: Normalverteilung und für streuende Größen bei langzeitfähigen Prozessen

Liegen keine normalverteilten Ausgangsgrößen vor – dies kann beispielsweise die Folge von Sortierprozessen während der Montage sein – erfolgt die Auswertung der Ausschussquoten und der Prozessfähigkeitsindizes mit Hilfe der *Percentil-Methode*. [61]

2.2.2 Rechnerinterne Erzeugung von Zufallszahlen

Sollen die Streuungen einzelner Bauteil- und Prozessabweichungen innerhalb des Toleranzmanagements berücksichtigt werden, erfolgt dies mittels statistischen Toleranzsimulationen, für die stochastische Verfahren eingesetzt werden. Oft wird dazu die 1953 vorgestellte Monte-Carlo-Methode [62] verwendet. Das Gesetz der großen Zahlen besagt, dass bei n -maligem Wiederholen eines Experimentes der arithmetische Mittelwert an den theoretischen Erwartungswert konvergiert, wenn n groß genug ist. Die Monte-Carlo-Methode macht sich dieses Gesetz zu Nutze, indem analytisch aufwendig lösbare Probleme mit numerischen Verfahren dadurch gelöst werden, dass stochastische Techniken eingesetzt werden. Diese Herangehensweise hat den Vorteil, dass der Zeitaufwand für die Lösung eines Problems reduziert wird. [63]

Monte-Carlo-Simulation

Die Monte-Carlo Simulation, die in der statistischen Toleranzanalyse verwendet wird, bezeichnet die computerinterne Umsetzung der Monte-Carlo

Methode, bei der eine analytische Lösung eines mathematisch beschreibbaren Problems zu aufwändig wäre. Dabei umfasst die Monte-Carlo Simulation das Berechnungsmodell, dessen Eingangsgrößen (mathematisch beschreibbare Zufallszahlen) und die sich iterativ wiederholenden Modellauswertungen. Bei diesem numerischen Verfahren muss daher jeweils definiert werden, wie oft jeder Simulationsschritt wiederholt wird. Dabei wird die Anzahl der Wiederholungen als Iteration bezeichnet, während die Stichprobe (engl. Sample) eine Menge der Objekte ist, die mit Hilfe von Sampling-Verfahren aus der statistischen Grundgesamtheit ausgewählt wurden. [64, 65]

Stichprobenerhebung

Die Erhebung einer Stichprobe aus einer statistischen Grundgesamtheit wird als Sampling bezeichnet, wobei diese aus n Samples (Stichproben) besteht. Rechnerintern können mit geeigneten Algorithmen für die Erzeugung von Pseudozufallszahlen unterschiedliche Verfahren eingesetzt werden. [66]

Beim Monte-Carlo-Probenerhebungsverfahren wird dazu eine Zufallszahl zwischen 0 und 1 generiert. Anschließend wird mit dieser Zahl mit Hilfe einer individuellen kumulierten Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion eine Zufallszahl in einem definierten Bereich überführt. [67]

Im Gegensatz dazu wird beim **Latin-Hypercube-Sampling** (kurz: LHS) der zur Verfügung stehende Bereich in Bereiche gleicher Wahrscheinlichkeit eingeteilt, wobei die Anzahl der Bereiche der Anzahl der Iterationen entspricht. Anschließend wird für jeden zur Verfügung stehenden Bereich eine Zufallszahl erzeugt, sodass der gesamte Bereich der zur Verfügung steht systematisch genutzt wird. Dies hat den Vorteil, dass weniger Iterationsschritte notwendig sind, um ein numerisch stabiles Ergebnis zu erhalten. [68]

2.2.3 Toleranzspezifikation

Die Toleranzspezifikation von Bauteilen und Baugruppen dient dazu, die geometrischen Eigenschaften, die über eine Beschreibung der Idealgeometrie hinausgehen zu beschreiben und zulässige Abweichungen einzuschränken [69]. Das ISO GPS-Konzept [70] bildet mit seinem hierarchischen Normenkonzept den Rahmen für die Produktspezifikation und -verifikation. Wie in Bild 12 dargestellt, werden für neun geometrische Merkmale spezifische Kettenglieder definiert. Diese Kettenglieder dienen sowohl der Spezifikation, als auch der Verifikation. Ausgehend von der

Matrix werden den einzelnen Kategorien entsprechende Normen zugeordnet.

Geometrische Merkmale	Kettenglieder						
	A	B	C	D	E	F	G
	Symbole und Angaben	Anforderungen an Geometrieelemente	Merkmale von Geometrieelementen	Übereinstimmung und Nicht-Übereinstimmung	Messung	Messgerät	Kalibrierung
Größenmaß							
Abstand							
...							



Spezifikation



Verifikation

Bild 12: Allgemeine GPS-Matrix mit ihren Kettengliedern nach [70]

Die Möglichkeiten, wie unterschiedliche Geometrieelemente spezifiziert werden können, sind in Bild 13 dargestellt.

Ausgehend von der Unterteilung in Größenmaß- und Nicht-Größenmaßelemente, können die Oberflächenbeschaffenheit, Form-, Richtungs-, Orts- und Lauftoleranzen spezifiziert werden. Dabei erfordern einige Toleranzen einen Bezug oder mehrere Bezüge, die die Invarianz der Geometrieelemente spezifizieren.

Im akademischen Umfeld gibt es unterschiedliche Herangehensweisen, die Toleranzspezifikation zu systematisieren. Die von SCHÜTTE in [72] entwickelte Vorgehensweise zur Maß-, Form- und Lagetolerierung wurde beispielsweise von SCHMIDT in [73] weiterentwickelt. Neben diesen übertragbaren Vorgehen gibt es auch Softwarelösungen die eine (teil)automatisierte Toleranzvergabe ermöglichen [74].

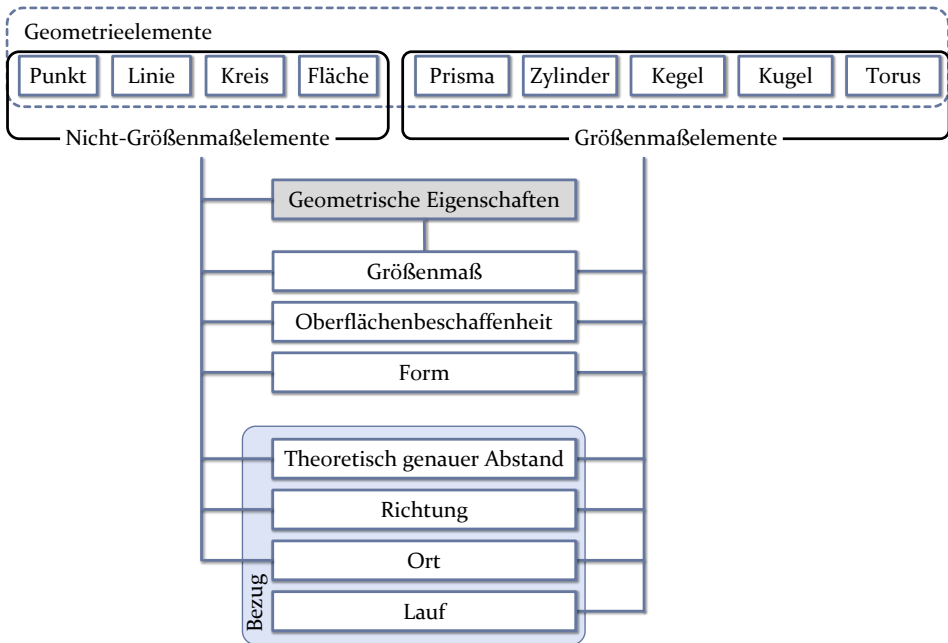


Bild 13: Unterteilung der geometrischen Eigenschaften nach [71]

2.2.4 Toleranzanalyse

Ziel der Toleranzanalyse ist eine systematische Untersuchung innerhalb welcher Grenzen ein zu untersuchendes Schließmaß SM variiert [75]. Dabei repräsentiert das Schließmaß oder Funktionsmaß (engl. (*Functional*) *Key Characteristic*) [56] ein funktionales oder ästhetisches Qualitätskriterium. Da das Schließmaß in den meisten Fällen eine geometrische Kenngröße ist, werden neben geometrischen Bauteil- und Baugruppenabweichungen, Prozessschwankungen bei der Montage [76] oder bei Fügeprozessen [77] berücksichtigt.

Bild 14 stellt einen Überblick über wesentliche Aspekte der mathematischen Modellbildung innerhalb der Toleranzanalyse dar. Zunächst folgt eine Systembeschreibung, die identifiziert, welche Einflussgrößen berücksichtigt werden sollen. Anschließend gilt es eine geeignete Repräsentationsform für die geometrischen Abweichungen zu wählen. In Abschnitt 2.2.5 wird dazu auf ausgewählte Möglichkeiten eingegangen. Neben der Repräsentationsform ist es für das Ergebnis der Toleranzanalyse entscheidend, wie die geometrischen Abweichungen überlagert werden.

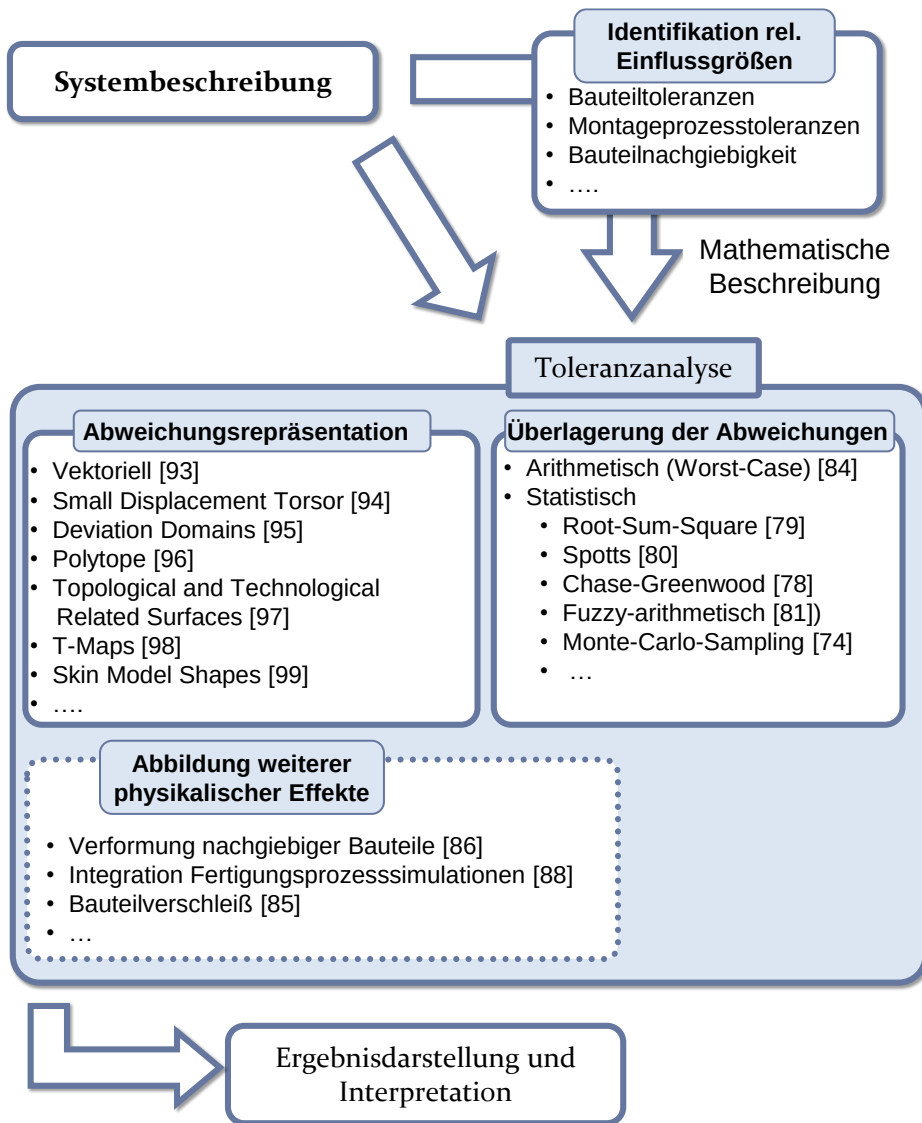


Bild 14: Modellbildung im Rahmen der Toleranzanalyse

Ausgehend von arithmetischen (*Worst-Case*)-Ansätzen, die die ungünstigste Überlagerung der Einzelteilabweichungen darstellen [78], wurden unterschiedliche statistische Verfahren entwickelt. Diese basieren oft auf mathematischen Vereinfachungen der statistischen Zusammenhänge. Dies geht zwar mit einem deutlich reduzierten Berechnungsaufwand einher, führt jedoch aufgrund der statistischen Vereinfachungen zu Ungenauigkeiten. So setzt beispielsweise die *Root-Sum-Square* Methode voraus, dass

sämtliche Eingangsgrößen nicht korreliert, normalverteilt streuen und die Mittelwertlage im Toleranzzentrum liegt [79]. SPOTTS [80], CHASE und GREENWOOD [78] nutzen die *Root-Sum-Square Methode* und erweitern diese. SPOTTS bildet dazu den Mittelwert aus einer *Worst-Case* und der *Root-Sum-Square* Berechnung, während CHASE und GREENWOOD eine Verschiebung der Mittelwerte berücksichtigen. Darüber hinaus gibt es auch Ansätze, die eine Überlagerung der geometrischen Abweichungen mathematisch mit der Fuzzy-Arithmetik beschreiben [81].

Da sowohl bei kommerziellen Tools, als auch in der Forschung, meist auf sampling-basierte Verfahren zurückgegriffen wird [82], soll das Prinzip der sampling-basierten Verfahren detailliert betrachtet werden. In Bild 15 ist dazu ein abstrahiertes Vorgehen für die sampling-basierte Toleranzanalyse dargestellt, auf das im Folgenden eingegangen wird. Die Schließmaßdefinition stellt den Ausgangspunkt dar. Bei ihr werden neben dem Nennmaß auch die zulässigen Abweichungen spezifiziert und quantifiziert. Anschließend erfolgt die mathematische Beschreibung des Schließmaßes. Dies kann entweder mit einer expliziten Formel, beispielsweise bei einer vektoriellen Toleranzanalyse, oder implizit erfolgen. Implizit kann die Schließmaßbeschreibung dann erfolgen, wenn diese nicht in Form einer Gleichung vorliegt. Dies ist beispielsweise bei kommerziellen Tools der Fall, wenn geometrische Abweichungen beispielsweise punkt- oder featurebasiert repräsentiert werden [83]. Anschließend können, ausgehend von einer (vorläufigen) Toleranzspezifikation und einer Spezifikation der Montagestreuungen, n spezifische Zufallszahlen für jede Toleranz erzeugt werden [84]. Nach der n -fachen Auswertung der Schließmaßgleichung beziehungsweise des Simulationsmodells erfolgt die Darstellung und Interpretation der Ergebnisse. Bei statistischen Verfahren kann für den Abgleich mit den Qualitätszielen die Fehlerrate bestimmt und mit der geforderten Fehlerrate abgeglichen werden [P13]. Optional schließt sich an die Toleranzanalyse die Toleranzsynthese an, bei der die Toleranzen derart angepasst werden, dass entweder Qualitätsziele erreicht werden können oder toleranzbedingte Kosten reduziert werden können [85].

Darüber hinaus können physikalische Effekte, wie beispielsweise der Einfluss von Kräften auf nachgiebige Bauteile [86], der Einfluss von anisotropem Materialverhalten [87], die Folgen von Fertigungsprozessschwankungen [88] oder Verschleißeffekte [85] abgebildet werden.

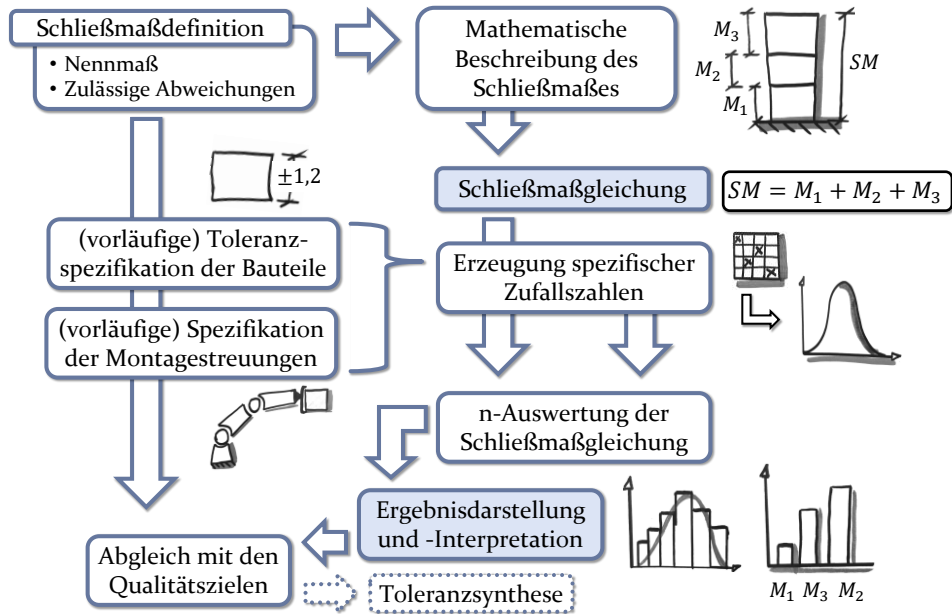


Bild 15: Vorgehen für sampling-basierte Toleranzanalysen

Toleranzanalyse für Mechanismen

Bei Mechanismen kann das Schließmaß zeitlich veränderlich sein, was unter anderem zu Nichtlinearitäten führen kann. Es ist daher nicht ausreichend, eine diskrete Stellung eines Mechanismus zu untersuchen, da das extremale Schließmaß nicht immer bei einer bestimmten Stellung des Mechanismus vorliegen muss. Ein solches zeitlich veränderliches Schließmaß kann beispielsweise der Abstand zwischen einem bewegten Glied der kinematischen Kette und dem Gestell oder einem Referenzkoordinatensystem sein.

Mit der VDI 2730 wird Produktentwicklern und Toleranzexperten eine Richtlinie zur Verfügung gestellt, die ein allgemeingültiges Vorgehen für die Toleranzanalyse von Gelenkgetrieben beschreibt. Mit Hilfe von Checklisten kann der Anwender die einzelnen Schritte der Toleranzanalyse und -synthese durchlaufen, wobei zusätzlich eine lokale Beitragsleisteranalyse, auf Basis von Differenzenquotienten vorgesehen ist. [89]

Die Norm schließt jedoch die Berücksichtigung von Gelenkspiel explizit aus. Soll das Spiel innerhalb der Gelenke, welches konstruktiv vorgesehen sein kann oder sich aufgrund von geometrischen Abweichungen ergibt, bei der Toleranzanalyse berücksichtigt werden, sind oft numerische Verfahren zur Lösung der Bewegungsgleichungen notwendig [90]. Spielen darüber

hinaus die wirkenden Kräfte, aufgrund von bewegten Massen eine Rolle, gibt es Ansätze, die eine Kopplung von Mehrkörper- und Toleranzsimulationen vorsehen [85]. Ein Rahmenwerk, das es erlaubt neben Bauteilabweichungen und dem Einfluss von Lochspiel auch elastische Verformungen bei der statistischen Toleranzanalyse zu berücksichtigen wird von STUPPY in [91] vorgestellt. Bei höheren Elementpaaren, bei denen Formabweichungen einen signifikanten Einfluss haben können, hat sich eine Geometrieabbildung mit Skin Model Shapes als zielführend erwiesen [92].

2.2.5 Toleranzrepräsentation

Unabhängig davon, welche mathematischen Modelle für die Überlagerung der Einflussfaktoren verwendet werden, können für die virtuelle Repräsentation der geometrischen Abweichungen unterschiedliche Repräsentationsmodelle herangezogen werden. Auf ausgewählte Repräsentationsmodelle wird in diesem Abschnitt eingegangen:

Bei der **Vektoriellen Abbildung**, wird das Schließmaß, welches untersucht werden soll, durch eine Verkettung von Vektoren, die abweichungsbehaftete Bauteile repräsentieren, beschrieben. Dabei variieren Länge und Orientierung der einzelnen Vektoren. Dadurch können auf Bauteilebene Maß- und Lageabweichungen durch eine systematische Translation und Rotation geometrisch idealer Geometrieelemente abgebildet werden [93].

In der Forschungslandschaft gibt es weitere Berechnungsansätze, wie beispielsweise den **Small Displacement Torsor**, der auf der vektoriellen Repräsentation basiert. Dieser Ansatz fußt auf der Annahme, dass die Verschiebung von Geometrieelementen mittels kleiner Translationen und Rotationen beschrieben werden kann. Mathematisch wird dies mit Translationsvektoren und linearisierten Rotationsmatrizen umgesetzt [94].

Jedes tolerierte Geometrieelement kann sich innerhalb seiner spezifischen Toleranzzone in m verschiedenen Freiheitsgraden bewegen. Eine Repräsentationsform die darauf beruht, stellen die **Deviation Domains**, die einen m -dimensionalen Raum aufspannen, dar. Die Mathematik erlaubt eine Überlagerung dieser Deviation Domains durch den Einsatz von Minkowski-Summen. [95]

Eine Weiterentwicklung dieses Modells sind **Polytope**, die sich dadurch unterscheiden, dass nicht-lineare Randbedingungen durch lineare Randbedingungen ersetzt werden. Aus dieser Vereinfachung resultieren kürzere Rechenzeiten bei den Modellauswertungen. [96]

Für die drei-dimensionale Repräsentation der Abweichungen dienen beim **Topological and Technological Related Surfaces** (kurz: **TTRS**)-Ansatz sieben Oberflächentypen, die jeweils eine spezifische Anzahl an Freiheitsgraden im Raum haben. Bei der Toleranzanalyse werden die Oberflächen als Objekte betrachtet, die jeweils mit einem anderen TTRS, beziehungsweise einer Oberfläche gepaart werden können. Durch Translationen und Rotationen entlang der Freiheitsgrade der einzelnen Toleranzzonen, können für die Auswertung der Toleranzanalyse abschließend potentielle Überlagerungen der Einzelabweichungen berechnet werden. [97]

Eine weitere Möglichkeit potentielle Abweichungen abzubilden, stellen **Tolerance-Maps®** (kurz: **T-Maps**) dar. Diese Abbildungsform, die mathematisch ähnlich wie Polytope und Deviation Domains sind, gehen auf die Arbeiten von DAVIDSON zurück. Diese Abbildungsform, die dabei ist eine T-Map ein hypothetisches, euklidisches Volumen an Punkten, welche die Toleranzzone repräsentieren. [98]

In Einklang mit dem ISO-GPS-Standard [70], ist durch den Einsatz von **Skin Model Shapes** die Abbildung von Formabweichungen möglich [99]. Ausgangspunkt ist dabei das Skin Model (Oberflächenmodell), für welches jede Toleranz als eine Bedingung an ein oder mehrere Merkmale definiert ist. Ausgehend von der allgemeinen Beschreibung erfolgt mittels geeigneter Algorithmen die Erzeugung einzelner konkreter Ausprägungen des tolerierten Modells durch sogenannte Skin Model Shapes. Dazu werden die Bauteile mit Punktwolken und Oberflächennetzen diskretisiert, sodass für die Erzeugung der Skin Model Shapes auf CAD-Daten zurückgegriffen werden kann. Alternativ können Messdaten von gefertigten, gemessenen Bauteilen oder Simulationsdaten eingebunden werden [100]. Aufgrund der diskreten Repräsentation der Bauteile durch Punktwolken, ist nicht nur die Erzeugung, sondern auch die Simulation von Montagevorgängen und die Auswertung der Modelle rechenintensiv und nur teilautomatisiert möglich.

Obwohl einige der oben beschriebenen Ansätze bei kommerzieller Software verwendet werden, wird bei der überwiegenden Mehrheit der kommerziellen Software auf **parametrische Ansätze** zurückgegriffen. Bei diesen werden die Montagebedingungen und die zulässigen Geometrieabweichungen mit Parametern quantifiziert, sodass das Schließmaß durch ein Gleichungssystem beschrieben werden kann. Dieser Ansatz kann darüber hinaus mit der Parametrik von CAD-Systemen gekoppelt werden, sodass neben punktbasierten auch featurebasierte Ansätze umgesetzt werden können, bei denen CAD-Features innerhalb ihrer Toleranzzonen verschoben beziehungsweise verschoben und verkippt werden. [101]

2.2.6 Beitragsleisteranalyse

Beitragsleisteranalysen dienen dazu, den Einfluss von Eingangsgrößen und deren Wechselwirkungen auf die Ausgangsgröße eines Modells zu quantifizieren [102]. Da in anderen Forschungsbereichen der Begriff der Sensitivitätsanalyse gebräuchlich ist, werden im Folgenden die Begriffe Beitragsleister- und Sensitivitätsanalyse synonym verwendet. Im Kontext des Toleranzmanagements beeinflusst eine Toleranz mit einem großen Beitragsleister die Streuung des Schließmaßes stark, während eine Toleranz mit einem kleinen Beitragsleister einen kleinen Einfluss auf die Streuung des Schließmaßes hat. Die Beitragsleisteranalysen können daher systematisch eingesetzt werden, um bei einer Verfehlung der Qualitätsziele Toleranzen gezielt einzuschränken, wenn sie einen großen Beitragsleister besitzen. Weisen Toleranzen im Gegensatz dazu einen kleinen Beitragsleister auf, sollte geprüft werden, ob diese Toleranzen aufgeweitet werden können [103].

Im akademischen Umfeld gibt es unterschiedliche Verfahren zu Beitragsleisterbestimmung, die auf unterschiedlichen mathematischen Grundannahmen beruhen. Nach SALTELLI [102] lassen sich die Verfahren in lokale und globale Methoden einteilen. Während lokale Methoden in der Lage sind, die direkten Auswirkungen der Änderung einer Eingangsgröße bei einem Modell zu quantifizieren, sind globale Methoden in der Lage zusätzlich auch die Wechselwirkungen, die zum Teil einen erheblichen Einfluss haben können zu quantifizieren [103], 59]. Der direkte Einfluss einer Toleranz auf die Streuung des Schließmaßes wird in diesem Zusammenhang als Haupteffekt S_i bezeichnet, während Nebeneffekte S_{ij} auf die Wechselwirkung von Toleranzen zurückzuführen sind. Die jeweilige Summe aus Haupt- und Nebeneffekt wird als Totaleffekt S_{Ti} bezeichnet. [102]

Im Folgenden wird auf vier ausgewählte Methoden eingegangen, die in [P9] und [P21] untersucht und einander gegenübergestellt werden. Darüber hinaus gibt es sowohl weitere lokale und globale Methoden [104].

High-Low-Median Methode

Die *High-Low-Median* (HLM) *Methode*, die auf der *One-factor-at-a-time* (OFAT) *Methode* basiert [105], dient der Berechnung der Haupteffekte. Hierzu wird jeweils das obere (High) und das untere Grenzmaß (Low) jedes einzelnen Maßes x_i analysiert. Alle anderen Maße $x_{\sim i}$ nehmen den Median an und bleiben während einer Analyse unverändert. Wird das Toleranzanalysemodell gelöst, ergeben sich für das Schließmaß jeweils das obere und

untere Schließmaß $y_{x,high}$, beziehungsweise $y_{x,low}$, sodass die Varianz jeder Eingangsgröße bestimmt werden kann [102]:

$$V_{SM,xi} = \frac{y_{xi,high} - y_{xi,low}}{36} \quad (8)$$

Aus dem Verhältnis der Varianz einer spezifischen Eingangsgröße und der Gesamtvarianz lässt sich der Beitragsleister der i -ten x_i Eingangsgröße wie folgt bestimmen [102]:

$$S_{i,HLM} = \frac{V_{SM,xi}}{\sum_{j=1}^n V_{FKX,xi}}. \quad (9)$$

Neben der einfachen Implementierung bietet die HLM-Methode den Vorteil, dass sie einen geringen numerischen Aufwand erfordert, weshalb diese Methode in vielen kommerziellen Tools implementiert ist. Nachteilig ist jedoch, dass Wechselwirkungen der Eingangsvariablen nicht erfasst und analysiert werden. Zudem kann diese Methode nur dann eingesetzt werden, wenn alle Eingangs- und Ausgangsparameter unabhängig voneinander normalverteilt streuen [88, 106].

Varianzbasierte Beitragsleisteranalyse

Die varianzbasierte Beitragsleisteranalyse bietet als so genannte globale Methode die Möglichkeit, dass neben den Haupteffekten auch die Nebeneffekte berechnet werden können. Das Konzept der varianzbasierten Sensitivitätsanalyse geht auf CUKIER ET AL. [107] zurück und wurde später von SOBOLEW verallgemeinert. Dabei wird das Prinzip der *high-dimensional model representation* (HDMR) zugrunde gelegt, bei der die zu untersuchende Funktion in einzelne Terme, die wiederum integrierbar sind, zerlegt wird [107]:

$$f(x) = f_0 + \sum_{i=1}^n f_i(x_i) + \sum_{i,j=1 \atop i < j}^n f_{ij}(x_i, x_j) + \dots + f_{1,2,\dots,n}(x_1, x_2, \dots, x_n). \quad (10)$$

Durch die Nutzung des Erwartungswertes E , anstelle von f_0 kann der Haupteffekt S_i aus dem Verhältnis der Varianz eines Beitragsleisters $V[E(Y|X_i)]$ zu der Varianz der Ausgangsgröße $V(Y)$ bestimmt werden [107]:

$$S_i = \frac{V[E(Y|X_i)]}{V(Y)}. \quad (11)$$

Ausgehend von der Bestimmung der Haupteffekte, wurde die Methode derart erweitert, dass zusätzlich die Wechselwirkungen zwischen zwei Faktoren bestimmt werden können. Dabei basiert das Vorgehen ebenfalls auf einer Zerlegung der Varianz der Ausgangsgröße, wobei bis auf Parameter i sämtliche Parameter variiert werden, sodass sich der Totaleffekt mit [107]

$$S_{Ti} = 1 - \frac{V[E(Y|X_{\sim i})]}{V(Y)} \quad (12)$$

bestimmen lässt.

Für die Berechnung der Haupt- und Totaleffekte kann entweder auf ein Monte-Carlo Sampling oder auf spezifische Sampling-Verfahren, wie sie beispielsweise beim SOBOL und JANSEN Algorithmus genutzt werden, zurückgegriffen werden. Neben diesen beiden Ansätzen hat sich ein Ansatz bewährt, der auf ein systematisches Sampling, ausgehend von periodischen Frequenzen, zurückgreift. Dieses Verfahren wird beim (*Extended*-)Fourier-amplitude-sensitivity-testing, kurz (E)FAST, und beim *random-balanced-design* verwendet. [102]

Da in Kapitel 5 die EFAST-Methode Anwendung findet, soll auf die Besonderheiten dieser varianzbasierten Sensitivitätsanalyse eingegangen werden. Bei der von CUKIER ET AL. in [107] vorgestellten Methode werden N Design-Punkte in einem k -dimensionalen Raum verteilt, wobei jeder dieser Punkte eine individuelle Frequenz ω_i besitzt. Diese Frequenzen sind bis zu einer definierten Ordnung m linear unabhängig, sodass sich die minimale Anzahl der notwendigen Samples u_{min} mit der höchsten Frequenz ω_{max} berechnen lässt [108]:

$$u_{min} = 2m\omega_{max} + 1. \quad (13)$$

Bemerkenswert ist, dass die minimale Anzahl der notwendigen Samples unabhängig von der Anzahl der Eingangsgrößen des Modells ist, was beim Modell mit vielen Eingangsgrößen einen entscheidenden Vorteil darstellt kann. Weiterführende Untersuchungen in wie weit sich die Anzahl der Samples auf unterschiedliche Sensitivitätsmaße auswirken können [P21] entnommen werden.

Dichtebasierte Beitragsleisteranalysen

Dichtebasierte Methoden sind in der Lage die Größe eines Beitragsleister, ausgehend von dem Verhältnis von Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen, unabhängig von statistischen Momenten (siehe Abschnitt 2.1.1) zu bestimmen [109, 110]. Das Verfahren, dass auf BORGONOVO zurückgeht, basiert

darauf, dass zwei Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen eingeführt werden, wobei beide die Ausgangsgröße $Y = g(X)$ der zu untersuchenden Funktion in Abhängigkeit von streuenden Eingangsgrößen beschreiben. Die erste Funktion beschreibt die unbedingte Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion $f_Y(y)$, wobei alle Größen innerhalb ihrer Grenzen streuen [109]:

$$\underline{X} = (X_1, X_2, \dots, X_n) \in \mathbb{R}^2, \quad (14)$$

Dabei stellt $\underline{x}$ eine Realisierung von $\underline{X}$ dar [109]:

$$\underline{x} = (x, x_2, \dots, x_n), \quad (15)$$

Für jede Eingangsgröße ergibt sich damit die bedingte Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion $f_{Y|X_i}(y)$, bei der jede Eingangsgröße $\underline{X}$ einen definierten Wert $\underline{x}$ annimmt.

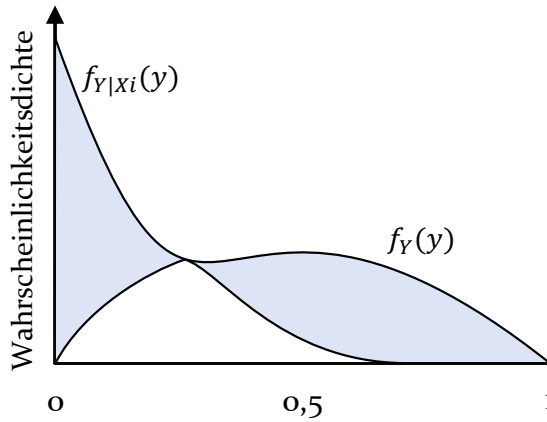


Bild 16: Bedingte und unbedingte Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion

In Bild 16 sind eine bedingte und eine unbedingte Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion dargestellt. Aus der eingeschlossenen Fläche, lassen sich für jede Eingangsgröße die Beitragsleister bestimmen [109]:

$$E_{X_i}[s(X_i)] = \int f_{X_i}(X_i) \left[\int |f_Y(y) - f_{Y|X_i}(y)| dy \right] dX_i \quad (16)$$

mit:

$$s(X_i) = \int |f_Y(y) - f_{Y|X_i}(y)| dy. \quad (17)$$

Dies ermöglicht die Berechnung der einzelnen Beitragsleister, die Werte im Intervall $[0,1]$ annehmen können [109]:

$$\delta_i = \frac{1}{2} E_{X_i}[s(X_i)] \quad (18)$$

Der Hauptvorteil der dichte-basierten Verfahren ist, dass sie unabhängig von statistischen Momenten sind, sodass mit ihnen beliebige statistische Daten analysiert werden können. Es können also beispielsweise auch Versuchsdaten, für die kein mathematisches Modell zur Verfügung steht, analysiert werden. [111]

Beitragsleisterbestimmung mit Fuzzy-Arithmetischen Ansätzen

Die 1965 von ZADEH vorgestellte Fuzzy-Arithmetik ist eine Form der Intervallmathematik, die zur Abbildung unscharfer Mengen verwendet wird [112]. Unsichere Größen werden dazu mit Fuzzy-Zahlen unter Zuhilfenahme von Zugehörigkeitsfunktionen abgebildet. Grundsätzlich können einfache Rechenoperationen auf Basis der *Set-Theorie* durchgeführt werden. Für weitere Rechenoperationen, kann eine Diskretisierung der Fuzzy-Zahlen mit Hilfe von α -Schnitten erfolgen. [113]

Für die Bestimmung der Beitragsleister mit Hilfe der Fuzzy-Arithmetik wird ausgehend von der *extended transformation method* für unterschiedliche Kombinationen der globale Differenzquotient genutzt. Die mathematischen Grundlagen dazu werden in [P14] beschrieben.

2.2.7 Einbindung fertigungsspezifischer Abweichungsinformationen

Das Konzept des interdisziplinären prozessorientierten Toleranzmanagement sieht vor, dass fertigungsspezifische Abweichungen in die virtuellen Toleranzanalysen eingebunden werden [P22]. Diese Herangehensweise hat den Vorteil, dass für ein Fertigungsverfahren charakteristische geometrische Abweichungen in die Toleranzsimulationen mit einbezogen werden. Darüber hinaus resultiert aus diesem Vorgehen eine Unabhängigkeit von Expertenwissen und das in Normen oder Tabellenwerken dokumentierte Wissen. Die Berücksichtigung von geometrischen Abweichungen, die von Experten abgeschätzt werden, ist gängige Praxis in der Industrie und hat sich für etablierte Fertigungsverfahren als probates Mittel herausgestellt. Werden jedoch neuartige Fertigungsverfahren verwendet oder Geometrien gefertigt, die bisher noch nicht mit einem Fertigungsverfahren gefertigt wurden, stößt diese Herangehensweise an ihre Grenzen. Auch der Einsatz

von Tabellen und Normenwerken stößt bei technologischen Neuerungen in der Fertigung und bei spezifischen Bauteilgeometrien an seine Grenzen. [114]

STOCKINGER stellt in [115] ein Vorgehen vor, dass die Einbindung von fertigungsspezifischen Abweichungen für die Blechumformung erlaubt. Auch für andere Fertigungsverfahren existieren bereits erste Vorgehen. So stellt LORIN in [116] einen Ansatz vor, der ausgehend von mehreren Simulationen ein Regressionsmodell erzeugt, dass anschließend analysiert werden kann. WÄRMEFJORD legt in [117] den Hauptfokus auf ein anderes Fertigungsverfahren, indem sie den Einfluss der Schweißreihenfolge beim Punktschweißen auf die Maßhaltigkeit von Baugruppen untersucht. Anschließend wird ein Ansatz vorgestellt, bei dem die Punktschweißreihenfolge derart angepasst wird, dass die geometrischen Abweichungen der geschweißten Baugruppe reduziert werden.

Ein erstes übertragbares Vorgehen für die Berücksichtigung fertigungsspezifischer Abweichungen stellen SCHLEICH und WARTZACK in [118] vor. Demonstriert wird die Umsetzbarkeit dieses Vorgehens anhand einer Spritzgussimulation.

Diese Arbeiten zeigen, dass die Integration fertigungsspezifischer Informationen in die Toleranzanalyse aus wissenschaftlicher Sicht relevant und möglich ist. Die Arbeiten legen zusätzlich den Schluss nahe, dass ein übertragbares Vorgehensmodell, bei dem fertigungsspezifische Abweichungen, ausgehend von validierten Fertigungsprozesssimulationen integriert werden, die ideale Herangehensweise darstellt.

2.2.8 Metamodellierung

Die Verwendung von numerischen Verfahren kann, wenn komplexe mathematische Modelle zugrunde liegen, mit einem enormen Rechenaufwand einhergehen. Werden diese komplexen Modelle mehrfach mit unterschiedlichen Eingangsgrößen ausgewertet, bietet sich der Einsatz von Metamodellen (engl. Surrogate Models) an, da diese den notwendigen Rechenaufwand drastisch reduzieren können, ohne das große numerische Ungenauigkeiten resultieren würden. Ein typischer Anwendungsfall sind Finite-Elemente(FE)-Simulationen, die für unterschiedliche Eingangsgrößen mehrfach ausgewertet werden. Ein Metamodell stellt dabei ein mathematisches Ersatzmodell dar, das den mathematischen Zusammenhang von Eingangs- und Ausgangsgrößen approximiert. [119]

Ausgehend von einer Beschreibung mit Polynomen, wie sie beispielsweise bei der *Response Surface Methodology* Anwendung findet [120], wurden weitere Verfahren wie die *Kriging Interpolation* entwickelt, bei der unter Berücksichtigung der räumlichen Varianz eine Interpolation mit Hilfe von Messwerten erfolgt. [121]. Darüber hinaus finden auch mathematisch komplexere Verfahren des maschinellen Lernens, wie die *Support Vector Regression* [122] und *Künstliche Neuronale Netze* [123] Verwendung im Bereich der Toleranzsimulation [85].

2.3 Validierung und Verifikation

In der Literatur gibt es unterschiedliche Definitionen des Begriffs „Validierung“, die mitunter grundlegende Unterschiede aufweisen (bspw. in: [123] und [125]). Im Folgenden wird die Definition gemäß der American Society of Mechanical Engineers (kurz: ASME) genutzt, da diese ein systematisches, übertragbares Vorgehen vorsieht.

Da jedes Simulationsmodell ein idealisiertes, beziehungsweise vereinfachtes Abbild der Realität darstellt, bedarf es einer Verifizierung und Validierung (V&V) des Simulationsmodells. Dies stellt sicher, dass das Modell innerhalb definierter Grenzen, für getroffene Annahmen eingesetzt werden kann. Eine Validierung ist daher nicht nur notwendig um die Glaubwürdigkeit eines Simulationsmodells zu gewährleisten, sie ermöglicht ferner die Fehler- und Unsicherheitsabschätzung eines Simulationsverfahrens [16].

Die Validierung stützt sich hierbei auf zwei zentrale Säulen. Zum einen gilt es sicherzustellen, dass die Physik mit mathematischen Modellen hinreichend genau beschrieben werden kann (Validierung). Zum anderen muss sichergestellt werden, dass die mathematischen Gleichungen anschließend korrekt implementiert und mit einem möglichst kleinen numerischen Fehler gelöst werden kann (Verifikation). Durch einen Vergleich zwischen experimentellen und numerischen Daten wird abschließend sichergestellt, dass die beiden Voraussetzungen erfüllt werden.

In den 1980er Jahren nahm der Einsatz und der Stellenwert von numerischen Simulationsverfahren deutlich zu. Zeitgleich entstand eine wissenschaftliche Debatte über die Notwendigkeit von Verifikation und Validierung von Simulationsmodellen für die Strömungsmechanik, die schlussendlich in die erste Richtlinie für eine Verifikation und Validierung mündete [126].

2.3.1 Vorgehen bei der Validierung

Die ASME-Normen [127, 128] definieren wesentliche Begrifflichkeiten für die Verifikation und Validierung. Darüber hinaus stellen sie auch ein Rahmenkonzept für die Durchführung von Verifikationen und Validierungen zur Verfügung. Das zugrundeliegende Konzept ist derart gestaltet, dass eine Übertragung auf weitere Anwendungsfälle, abgesehen von der Validierung von FE-Simulationen, möglich ist.

Modellbildung und Simulation

Ausgangspunkt für die Validierung ist nach der **ASME** ein konzeptionelles Modell, welches ein physikalisches System beschreibt. Dabei berücksichtigt dieses konzeptionelle Modell bereits sämtliche Informationen und besteht aus mathematischen Gleichungen, die das Systemverhalten beschreiben. Um eine rechnerinterne Auswertung zu ermöglichen, erfolgt eine Überführung in ein computergestütztes Modell, beziehungsweise einen Quelltext. [127]

Die **Verifizierung** bezeichnet, wie in Bild 17 veranschaulicht, den Prozess, bei dem bestimmt wird, ob eine Modellimplementierung die konzeptionelle Beschreibung des mathematischen Modells genau wiedergibt [127]. Hierbei ist es nicht relevant, in welchem Umfang die Realität durch das mathematische Modell beschrieben wird. Aufbauend auf einer erfolgreichen Verifikation, bezeichnet die **Validierung** den Prozess, bei dem bestimmt wird, inwieweit ein Modell eine ausreichend gute Darstellung der tatsächlichen Welt aus der Perspektive der beabsichtigten Verwendungszwecke darstellt. [127]. Für eine Validierung wird somit die Verifikation vorausgesetzt.

An dieser Stelle sei hervorgehoben, dass sowohl die Verifikation als auch die Validierung fortlaufende Prozesse sind, die keinen definierten Abschluss besitzen [5]. In der Praxis werden beide Prozesse daher durch die zur Verfügung stehenden Ressourcen, wie beispielsweise Zeit oder Budget, limitiert. Darüber hinaus kann die generelle Gültigkeit eines Modells nicht bewiesen werden, da lediglich bewiesen werden kann, dass ein Modell für einen spezifischen Fall keine Gültigkeit besitzt [125]. Konsequenterweise werden für die Validierung ausgewählte Benchmark-Fälle verwendet, für die eine Gültigkeit des Modells nachgewiesen werden kann.

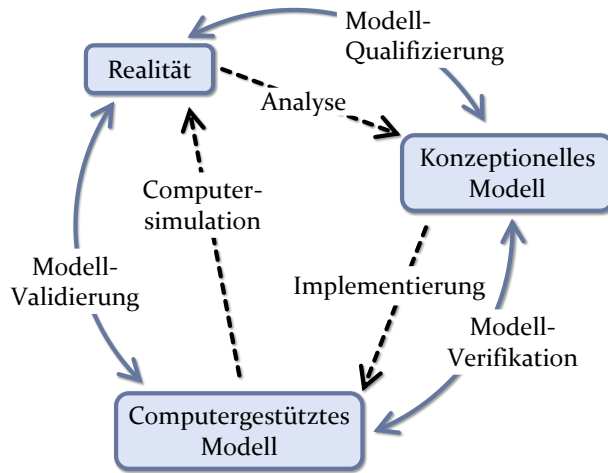


Bild 17: Phasen der Modellierung und Simulation nach [129]

Besondere Bedeutung haben in diesem Zusammenhang die beiden Begriffe Unsicherheit und Fehler, die klar voneinander abgegrenzt werden. Ein potentiell Defizit in jeder Phase oder Aktivität des Modellierungsprozesses, das auf mangelndes Wissen zurückzuführen ist, wird als **Unsicherheit** (siehe Abschnitt 2.1.5) bezeichnet. Im Gegensatz dazu, stellt eine erkennbare Unzulänglichkeit in jeder Phase oder Aktivität der Modellierung und Simulationen, die nicht auf mangelndes Wissen zurückzuführen ist, einen Fehler dar. [127]

Der ASME-Standard „Guide for the Verification and Validation of Computational Fluid Dynamics Simulations“ [127] schlägt für die Validierung einen mehrstufigen Prozess vor, der ausgehend von einem konzeptionellen Modell über das computergestützte Modell kontinuierlich Vergleiche mit Benchmark-Lösungen oder Subsystemen vorsieht [127]. Liegen keine Benchmark-Lösungen vor, kann das in Bild 18 dargestellte Vorgehen nach [128] verwendet werden.

Bei diesem Vorgehen wird das zu validierende System abstrahiert und in Subsysteme gegliedert. Im Anschluss kann die Validierung dieser Subsysteme erfolgen.

Für die **Verifikation** (links in Bild 18 dargestellt) erfolgt die Quellcode-Verifikation auf mathematischer Ebene, bei der Simulationsergebnisse beispielsweise mit analytischen Lösungen abgeglichen werden. Bei der anschließenden Verifizierung der Berechnung entsteht eine Unsicherheit, aufgrund von numerischen Randbedingungen oder Diskretisierungen, wie

sie beispielsweise beim numerischen Lösen von Differentialgleichungen auftreten. [127]

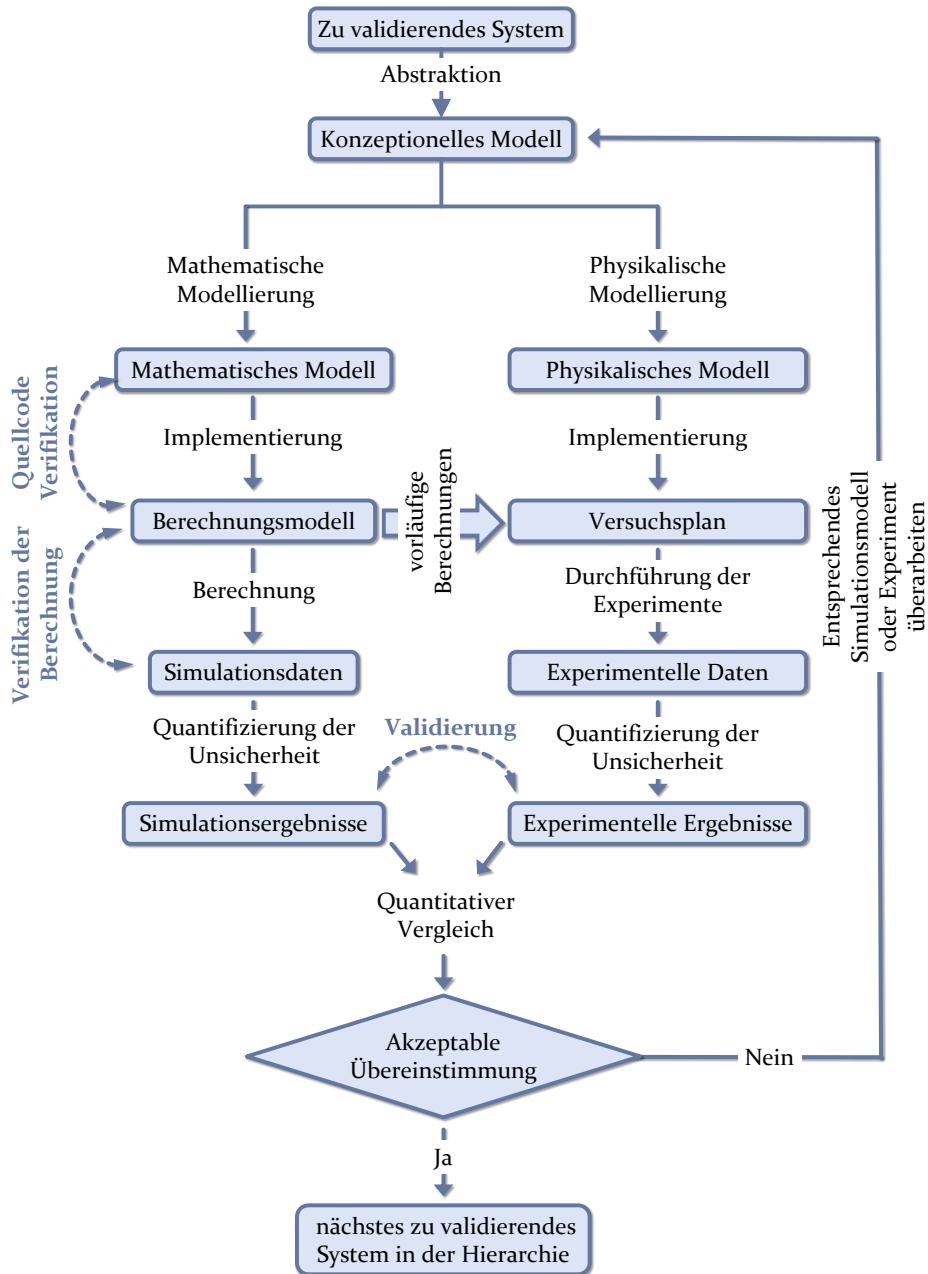


Bild 18: Verifizierungs- und Validierungsaktivitäten und deren Ergebnisse [127]

In Bild 18 ist der **Validierungsprozess** gezeigt, der die Bewertung der Prognosefähigkeit des Simulationsmodells zum Ziel hat. Dazu erfolgt ein Vergleich der Simulationsdaten mit Ergebnissen, die aus ausgewählten Experimenten gewonnen werden. Bei der Validierung kann und soll ausdrücklich nicht der gesamte Versuchsraum untersucht werden. Zum einen könnten dafür nie die notwendigen Ressourcen aufgebracht werden. Zum anderen würde es den Einsatz von Simulationen ad absurdum führen, da durch den Einsatz von Simulationen die Anzahl von Prototypen und damit durchgeführten physikalischen Versuchen reduziert werden sollen. [127]

Nach der Validierung der physikalischen Modellbildung, die in Form eines Prüfstands realisiert werden kann, gilt besonderes Augenmerk der Versuchsplanung. Nachfolgend werden, ausgehend von diesem Versuchsplan, Untersuchungen durchgeführt, wobei eine Quantifizierung der Unsicherheit, basierend auf Wiederholmessungen erfolgen sollte. [127]

Abgeschlossen wird das Vorgehen zur Verifikation und Validierung mit einem quantitativen Vergleich der Ergebnisse der virtuellen und der physikalischen Experimente. Wird hier eine akzeptable Übereinstimmung erreicht, gilt die Validierung des (Sub-)Systems als erfolgreich. Ergibt sich bei dem Vergleich ein nicht zufriedenstellendes Ergebnis, ist es erforderlich die Simulation, respektive den Versuch zu überarbeiten. [127]

2.3.2 Ähnlichkeitskennzahlen

Ziel der unterschiedlichen Kennzahlen ist eine Quantifizierung der Anpassungsgüte eines mathematischen Modells in Bezug zu Messdaten (engl. Goodness-of-fit statistics) [130]. In diesem Abschnitt werden ausgewählte Kennzahlen beschrieben und näher betrachtet.

In den folgenden Formeln stellen Y_S die virtuell erzeugten Daten dar, während die physikalisch gemessenen Daten als Y_V bezeichnet werden.

Verzerrung

Die Verzerrung (engl. *Mean Error/bias*) die wie folgt definiert ist [131]:

$$ME = \langle Y_S - Y_V \rangle = \langle Y_S \rangle - \langle Y_V \rangle \quad (19)$$

stellt eine Möglichkeit dar, die Güte einer Schätzfunktion zu beschreiben. Negative Werte weisen auf eine Unterprognose hin, während positive Werte auf eine Überprognose hinweisen. Je kleiner der Betrag des mittleren absoluten Fehlers ist, desto besser ist die Übereinstimmung des mathematischen Modells und der gemessenen Werte. Der mittlere absolute Fehler ist einheitenbehaftet und keine absolute Kenngröße. [131]

Wurzel der mittleren Fehlerquadratsumme

Die Wurzel der mittleren Fehlerquadratsumme (engl. *Root Mean Squared Error*, kurz: RMSE) stellt eine weitere einheitenbehaftete relative Kennzahl dar [131]:

$$RMSE = \sqrt{\langle (Y_S - Y_V)^2 \rangle} \quad (20)$$

Kleine Werte weisen auf eine bessere Übereinstimmung hin, während größere Werte für eine schlechtere Übereinstimmung sprechen [131]. Ausgehend vom RMSE gibt es unterschiedliche Normierungsansätze [131]:

$$NRMSE = \frac{RMSE}{DE}, \text{ mit:} \quad (21)$$

$$DE = \begin{cases} \overline{Y_V} \\ Y_{V,max} - Y_{V,min} \\ \sigma_{Y_V} \\ Q1 - Q3 \end{cases} \quad (22)$$

Diese Normierungen führt zu einer Dimensionslosigkeit der Kennzahl, womit ein problemunabhängiger Vergleich ermöglicht wird.

Nash–Sutcliffe model efficiency coefficient

1970 wurde der *Nash–Sutcliffe model efficiency coefficient* (NSE) vorgestellt, der ursprünglich für hydrologische Modelle entwickelte Koeffizient, lässt sich wie folgt bestimmen [132]:

$$NSE = 1 - \frac{\langle (Y_S - Y_V)^2 \rangle}{\langle (Y_V - \overline{Y_V})^2 \rangle} \quad (23)$$

Der NSE stellt somit ein Verifikationsmaß dar, das eine absolute Bewertung der Güte erlaubt.

Nachteilig bei der Verwendung des NSE ist, dass der Unterschied zwischen gemessenen und simulierten Werten quadriert wird, was zur Folge hat, dass die Werte in Abhängigkeit ihrer absoluten Größe gewichtet werden. Des Weiteren ist diese Kennzahl nicht sensitiv gegenüber einer systematischen Über- beziehungsweise Unterschätzung der Prognosegüte. [133]. Die Kennzahl hat jedoch den Vorteil, dass in der Literatur Werte angegeben sind, die eine Einordnung der Ergebnisse ermöglichen. So wird von einer sehr guten Übereinstimmung gesprochen, wenn der NSE einen Wert größer als 0,75 [134], beziehungsweise 0,9 [135] hat.

Index of Agreement

Eine weitere einheitenlose Kennzahl zur Beschreibung der Prognosegüte stellt der Index of Agreement (kurz: IA) dar:

$$IA = 1 - \frac{\langle (Y_S - Y_V)^2 \rangle}{\langle (|Y_S - \langle Y_S \rangle| + |Y_V - \langle Y_V \rangle|)^2 \rangle} \quad (24)$$

Diese Kennzahl kann ebenfalls maximal den Wert 1 annehmen, was der bestmöglichen Übereinstimmung entspricht. [136]

Bestimmtheitsmaß

Die Anpassungsgüte einer Regression kann ebenfalls mit dem Bestimmtheitsmaß R^2 quantifiziert werden. Dazu erfolgt für die Berechnung des Bestimmtheitsmaßes R^2 eine Quadratsummenzerlegung [131]:

$$R^2 = \frac{\langle Y_V Y_S \rangle - \langle Y_V \rangle \langle Y_S \rangle}{\sqrt{\langle Y_V^2 \rangle - \langle Y_V \rangle^2} \sqrt{\langle Y_S^2 \rangle - \langle Y_S \rangle^2}} \quad (25)$$

Normiertes Flächenmaß $K_{A,norm}$

Neben unterschiedlichen Metriken, die allgemein für die Quantifizierung der Vorhersagegüte herangezogen werden können, bietet sich bei Validierung von Toleranzanalysen für Mechanismen eine Betrachtung der von der Bewegungskurve eingeschlossenen Fläche (für planare Mechanismen), beziehungsweise des eingeschlossenen Raums (für räumliche Mechanismen) an. Dazu werden die Funktionen $f_V(x)$ und $f_S(x)$ eingeführt, die das Verhältnis einer Eingangsgröße und einer Ausgangsgröße für die Versuchs-, beziehungsweise Simulationsdaten beschreiben. Für einen planaren Mechanismus soll somit:

$$K_{A,norm} = 1 - \frac{\int_{x_0}^{x_{max}} |f_V(x) - f_S(x)| dx}{b} \quad (26)$$

mit:

$$b = \begin{cases} \int_{x_0}^{x_{max}} |f_V(x)| dx & , \text{für } \int_{x_0}^{x_{max}} |f_V(x)| dx > \int_{x_0}^{x_{max}} |f_S(x)| dx \\ \int_{x_0}^{x_{max}} |f_S(x)| dx & , \text{sonst} \end{cases} \quad (27)$$

gelten.

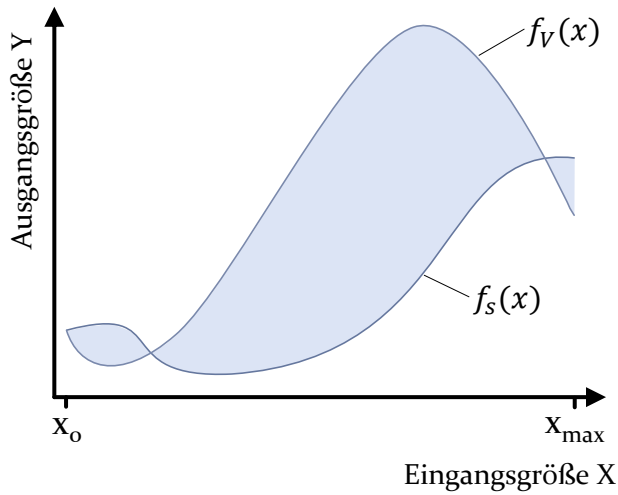


Bild 19: Eingeschlossene Fläche durch Versuchs- und Simulationsdaten zur Ermittlung $K_{A,norm}$

Tabelle 1: Gegenüberstellung ausgewählter Metriken zur Quantifizierung der Vorhersagegüte

Metrik	Dimensionslos	Wertebereich
Verzerrung (Bias)	Nein	
RMSE	Nein	Problemabhängig
NRMSE	Ja	[0,1] bzw. [-1,1]
Nash-Sutcliffe model efficiency coefficient	Ja	[0,1]
Index of Agreement	Ja	[0,1]
Bestimmtheitsmaß R^2	Ja	[-1,1]
Normiertes Flächenmaß $K_{A,norm}$	Ja	[0,1]

Wie in Bild 19 dargestellt, wird bei $K_{A,norm}$ die Fläche, die durch die Versuchsdaten und Simulationsdaten eingeschlossen wird, ermittelt. Anschließend wird sie normiert und von 1 abgezogen. So ergibt sich eine

dimensionslose Metrik, die auf unterschiedliche Problemstellung übertragen werden kann.

In Tabelle 1 sind die oben beschriebenen Metriken aufgelistet und wesentliche Eigenschaften für die Bewertung dargestellt.

2.3.3 Validierung im Kontext des Robust Design

Im Kontext des Toleranzmanagements gibt es bereits wissenschaftliche Arbeiten, welche die Validierung von speziellen Toleranzsimulationen fokussieren. Es sollen daher nachfolgend für unterschiedliche Forschungsfelder repräsentative Arbeiten vorgestellt und diskutiert werden.

In [137] stellte SCHLUER einen Ansatz vor, der eine Kopplung von FEM- und Toleranzsimulation vorsieht, wobei zyklisch belastete Bolzenverbindungen untersucht werden. Für den Abgleich zwischen Simulation und Realität, werden in der Arbeit Prüfstandsuntersuchungen unterschiedlichen Simulationsmodellen gegenübergestellt. Bei dem qualitativen Vergleich der Simulations- und Versuchsergebnisse konnte gezeigt werden, dass die Folgen von geometrischen Abweichungen auf die ertragbaren Lastwechsel der Bolzenverbindung ähnlich sind.

Mit der Kopplung von FEM- und Toleranzsimulation beschäftigen sich noch weitere Wissenschaftler. In [138] wird beispielsweise die Verformung von dünnwandigen Karosseriebauteilen untersucht. EHLERT untersucht in [139] eine Kopplung von FEM und Toleranzsimulation, bei der die Folgen von nicht-linearem Materialverhalten auf geometrisch nicht-ideale Bauteile analysiert wird. Die Ergebnisse der Simulationen werden anschließend mit Ergebnissen aus Prüfstandsuntersuchungen abgeglichen. Für den Abgleich zwischen den Ergebnissen wurde der lineare Korrelationskoeffizient herangezogen. Bei der Betrachtung der Ergebnisse kann festgehalten werden, dass durch die Kopplung von FEM- und Toleranzsimulation die Folgen, die in Realität auftretenden Wechselwirkungen virtuell sehr gut abgebildet werden konnten.

STOCKINGER stellt in [88] ebenfalls die Ergebnisse von Toleranzsimulationen und Prüfstandsuntersuchungen gegenüber, wobei er unterschiedliche tiefgezogene Bauteile zu Baugruppen assembliert und messtechnisch erfasst. Die Übereinstimmung der virtuell und experimentell ermittelten Daten wird in der Arbeit auf Basis von Boxplots ausgewertet.

BARBERO stellt in [140] einen Ansatz vor, der die Validierung einer Computer Aided Tolerancing (kurz: CAT) Software für starre Bauteile fokussiert. Im Rahmen dieser Arbeit wurden $n=50$ Schließmechanismen gefertigt und

gemessen, sodass die Ergebnisse einer Toleranzsimulation gegenübergestellt werden konnten. Der Vergleich zwischen experimentellen und virtuellen Messdaten erfolgt hier auf Basis von statistischen Momenten. Es werden beispielsweise die Mittelwerte und die Standardabweichungen der jeweiligen Stichproben verglichen.

Die ausgewählten Arbeiten unterstreichen zum einen die Relevanz der Validierung im Kontext von Toleranzsimulationen. Zum anderen zeigen die Arbeiten auch, welcher enormer Aufwand für die Validierung vermeintlich einfacher Problemstellungen betrieben werden muss.

Für die Analyse von Mechanismen sind dem Autor jedoch keine wissenschaftlichen Arbeiten bekannt, die sich vertieft mit der Validierung von Toleranzanalysen beschäftigen. Darüber hinaus erfolgt zwar bei einigen Wissenschaftlern ein quantitativer Vergleich zwischen Simulation und Versuch, dieser ist jedoch stets problemspezifisch, was eine Übertragbarkeit auf andere Anwendungsfelder einschränkt.

2.3.4 Messtechnische Grundlagen

Um Messdaten, die mit experimentellen Untersuchungen gewonnen werden, bewerten zu können, sind elementare Grundlagen der Messtechnik für das Verständnis notwendig. Daher wird auf die Messunsicherheit, die Bestimmung der Standardunsicherheit und das Erkennen von Ausreißern in einer Messreihe eingegangen.

Messunsicherheit

Wird im Rahmen einer Messung ein Messergebnis bestimmt, ist dieses stets ein Näherungswert an den wahren Wert der Messgröße, da jede Messung mit einer Unsicherheit behaftet ist. Infolgedessen liegt der wahre Wert einer Messgröße innerhalb eines Wertebereichs um das Messergebnis, das als Messunsicherheit bezeichnet wird [141]. Daraus resultiert, wie in Bild 20 dargestellt, dass es bei Messungen von Merkmalen neben einem Übereinstimmungs- und nicht-Übereinstimmungsbereich stets einen Unsicherheitsbereich gibt.

Bei Messergebnissen in diesem Unsicherheitsbereich kann keine Aussage darüber getroffen werden, ob einem Merkmal sich innerhalb seines Toleranzbereichs befindet. Die Konsequenz daraus ist, dass für das Verhältnis von Messunsicherheit U zu Toleranz T $U/T \leq 0,2$ sein sollte [143].

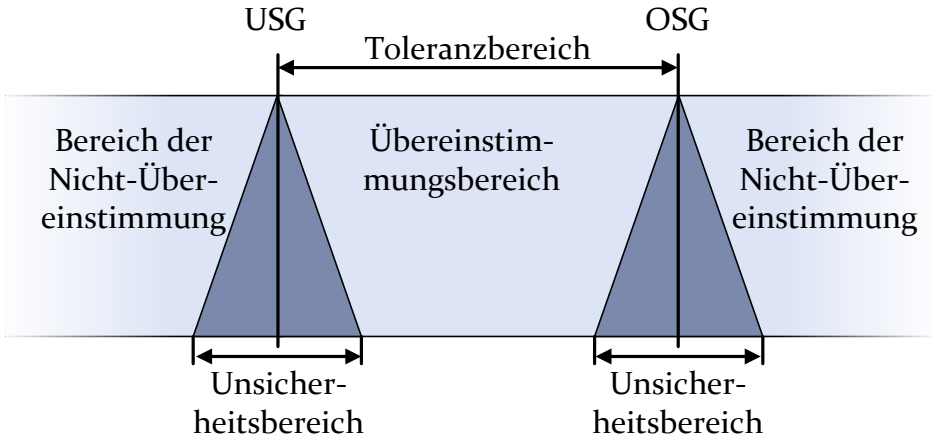


Bild 20: Übereinstimmungs- und Nicht-Übereinstimmungsbereich nach [142]

Bestimmung der Standardunsicherheit

Die Bestimmung der Messunsicherheit des Prüfstands erfolgt gemäß der DIN EN ISO 15530-3 [144]. In dieser ist die Standardunsicherheit u_p eines Messverfahrens wie folgt definiert:

$$u_p = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}. \quad (28)$$

Dabei ist $\bar{y}$ der arithmetische Mittelwert, der Messwerte und n die Anzahl der durchgeführten Wiederholmessungen. Bei der Bestimmung der Standardunsicherheit u_p , die die zufällige Abweichung des Messverfahrens quantifiziert, sollte die Anzahl der Wiederholmessungen $n \geq 20$ sein [144].

Bestimmung von Ausreißern

Liegt ein Wert außerhalb des Erwartungsbereich, der aus der Gesamtheit der Werte einer Messreihe resultiert, handelt es sich um einen Ausreißer [145]. Dabei wird der Erwartungsbereich ausgehend von einem Erwartungswert und einem Streubereich beschrieben. Da der Erwartungsbereich, außerhalb dessen sich ein Ausreißer befindet, mathematisch unterschiedlich beschrieben werden kann, haben sich im wissenschaftlichen Umfeld unterschiedliche Verfahren zur Bestimmung von Ausreißern etabliert [146]. In dieser Arbeit wird ein Verfahren verwendet, bei dem potentielle Ausreißer in Relation zur mittleren absoluten Abweichung gesetzt werden. Dieses Verfahren wird deshalb im Folgenden als ein repräsentativer

Vertreter der Verfahren zur Bestimmung von Ausreißern beschrieben. Dabei wird zunächst die mittlere absolute Abweichung vom Median $\tilde{x}$ (kurz: MAD) bestimmt:

$$\tilde{d}_{0,5} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - \tilde{x}|. \quad (29)$$

Ausgehend davon wird jeder Wert, der mehr als das Dreifache der mittleren absoluten Abweichung vom Median von seinem Erwartungswert entfernt ist, als Ausreißer bezeichnet [147].

3 Ableitung des Handlungsbedarfs

Der dargestellte Stand der Forschung umfasst somit bedeutende Vorarbeiten, die die Relevanz des Forschungsfeldes untermauern und bekräftigen. Dennoch gibt es aus akademischer Sicht Defizite, die im Folgenden diskutiert werden müssen. Um ergänzend die industrielle Perspektive zu berücksichtigen, wurde unter Experten aus dem Bereich Toleranzmanagement eine Umfrage durchgeführt. Ergebnisse dieser Umfrage werden vorgestellt und im Anschluss kritisch diskutiert. Am Ende des Kapitels werden das resultierende übergeordnete Ziel und zentrale wissenschaftliche Fragestellungen, die dieser Arbeit zu Grunde liegen, aufgezeigt.

3.1 Fazit zum Stand der Forschung

In Anbetracht dessen, dass die Sicherstellung einer hohen Produktqualität an Bedeutung gewinnt, gibt es einen Konsens darüber, dass dies nicht nur durch eine Verbesserung der Produktion erreicht werden kann [148]. Eine Möglichkeit dieser Herausforderung zu begegnen besteht darin, dass mit Hilfe des *Robust Designs* Konzepte entwickelt werden, die sich unempfindlich gegenüber Schwankungen verhalten. Konsequenterweise ist es notwendig Werkzeuge des *Robust Designs* systematisch zu nutzen und flexibel an spezifische Problemstellungen anzupassen [149]. Sammlungen von Prinzipien des *Robust Designs* [150] und generelle Handlungsempfehlungen für den Einsatz von *Robust Design* Werkzeugen bei der Entwicklung von Mechanismen [41] sind bereits im akademischen Umfeld bekannt. Im Kontext der *Robust Design Optimierung* gibt es darüber hinaus bereits Ansätze, die eine Optimierung unter Berücksichtigung von schwankenden Design-Parametern vorsehen [45]. Allerdings existiert bisher kein übertragbares Vorgehen, dass Produkentwickler bei der Wahl von Nennmaßen von Mechanismen systematisch unterstützt.

Folglich ist aus akademischer Sicht, ein computerunterstütztes Vorgehen wünschenswert, das Produktentwickler bei der Spezifikation der Nominalgeometrie eines Mechanismus, unter Berücksichtigung von geometrischen Abweichungen, unterstützt.

Eine Grundvoraussetzung für den Einsatz rechnerunterstützter Methoden ist es, dass die Ergebnisse von Simulationen belastbare Ergebnisse liefern [151]. Infolgedessen stellt die Validierung von Simulationen einen integralen, unverzichtbaren Bestandteil der virtuellen Absicherung dar, da nur ausgehend von einem validen Simulationsmodell belastbare Entscheidungen

gen getroffen werden können [152]. Dass eine Validierung von Simulation im Kontext des Toleranzmanagements relevant ist, zeigen unterschiedliche Ansätze, die eine Validierung einzelner Simulationsmodelle fokussieren (siehe Abschnitt 2.3.3). Bisher existiert jedoch kein übertragbares Vorgehensmodell für die Validierung von Toleranzanalysemodellen. Darüber hinaus gibt es bisher keine Ansätze, die eine systematische Quantifizierung der Güte einer Validierung von Toleranzanalysemodellen ermöglichen.

Die einzelnen Schritte des Toleranzmanagements werden zu bestimmten Zeitpunkten im Produktentwicklungsprozess durchlaufen [153]. Meist erfolgt das Toleranzmanagement im Rahmen der virtuellen Produktabsicherung und stellt sicher, dass bei einer Einhaltung der spezifizierten Toleranzen, die gewünschten Qualitätsanforderungen erreicht werden. Es gibt jedoch im akademischen Umfeld kein allgemeingültiges Vorgehen für das Toleranzmanagement, das ausgehend von der Spezifikation der Nennmaße, über die Validierung eines Toleranzanalysemodells, bis hin zur Ableitung geeigneter Handlungsoptionen, bei einer Verfehlung der Qualitätsziele, spezifische Handlungsschritte vorsieht.

3.2 Handlungsbedarf aus industrieller Sicht

Unabhängig davon, welche Beweggründe Forscher bei Kooperationen mit der Industrie haben – sei es um neue Ideen zur Marktreife zu führen oder um sich gegenseitig bei der Erforschung von wissenschaftlichen Grundlagen zu unterstützen – ist eine Verknüpfung von Forschung und Industrie in vielen Bereichen der Wissenschaft unerlässlich [154].

Wenngleich diese Arbeit akademischer Natur ist, soll der Handlungsbedarf aus industrieller Sicht erfasst und diskutiert werden. Folgende Hypothesen werden dabei zu Grunde gelegt:

- **Hypothese 1:** Aus industrieller Sicht ist es sinnvoll, Nennmaße so zu wählen, dass geometrische Bauteilabweichungen möglichst geringe Folgen für die Produktqualität haben.
- **Hypothese 2:** Es gibt in der industriellen Praxis kein universelles, virtuelles Werkzeug für ein durchgängiges virtuelles Toleranzmanagement.
- **Hypothese 3:** Es ist sinnvoll und notwendig spezifische Fertigungsprozessinformationen im Toleranzmanagement zu berücksichtigen.

Durchführung der Umfrage

Innerhalb der empirischen Sozialforschung, die in ihrer Gesamtheit Methoden, Techniken und Instrumente zur wissenschaftlichen Untersuchung

von menschlichem Verhalten umfasst, dienen Umfragen zur systematischen Datenerfassung [155]. Bei einer Umfrage handelt es sich dabei um eine quantitative Erhebung von Primärdaten mittels einer standardisierten schriftlichen Befragung [156]. Dabei wird aus einer grundlegenden Annahme (Axiom) eine Hypothese abgeleitet. Aus einer solchen Hypothese kann anschließend ein besonderer Satz oder ein Basissatz deduziert werden, der wiederum verifiziert oder falsifiziert werden kann [124].

Im Wintersemester 2017/18 wurde für diese Arbeit eine anonymisierte Online-Umfrage durchgeführt. Dabei wurden die Zugangsdaten zur Umfrage ausschließlich Experten aus dem Bereich Toleranzmanagement zugänglich gemacht, von denen sich 17 an der Umfrage beteiligten.

Für die Auswertung der Umfrageergebnisse erfolgt zunächst eine Einordnung der Befragten und deren Arbeitsumfeld. Im Anschluss wird auf ausgewählte Umfrageergebnisse eingegangen, die den Hypothesen zugeordnet sind. Darauf aufbauend wird diskutiert, inwieweit die Hypothesen durch die Umfrageergebnisse bestätigt oder widerlegt werden.

Ausgewählte Ergebnisse der Umfrage

Die Selbsteinschätzung der Umfrageteilnehmer (Bild 21, links) zeigt, dass die Experten ihre eigenen Fähigkeiten als (sehr) gut einschätzen.

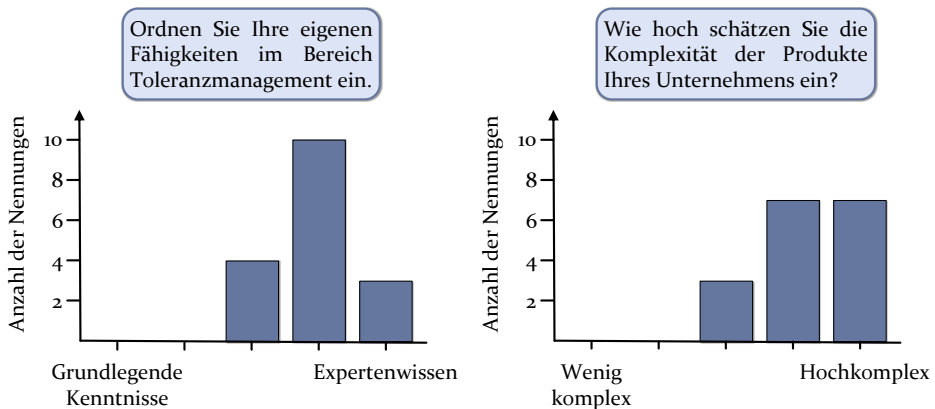


Bild 21: Selbsteinschätzung der Umfrageteilnehmer und Komplexität der Produkte ihres Unternehmens

Die Teilnehmer der Umfrage, die sich überwiegend mit komplexen Produkten beschäftigen (Bild 21, rechts), arbeiten im Mittel seit 8,5 Jahren (Median: 5 Jahre) im Bereich Toleranzmanagement.

Es kann davon ausgegangen werden, dass die Umfrageteilnehmer über ein fundiertes Wissen verfügen, da sie über eine langjährige Berufserfahrung

und ausgeprägte Expertise im Bereich des Toleranzmanagements verfügen. Hinzu kommt, dass ca. 93 % der Umfrageteilnehmer in einem interdisziplinären Umfeld arbeiten, sodass sie mit den Problemstellungen bei der Produktentwicklung vertraut sind. Sie sind somit prädestiniert, wenn es darum geht, den Handlungsbedarf aus industrieller Sicht einzuschätzen.

Hypothese 1: „Einfluss der Nennmaße“

Aus akademischer Sicht scheint es sinnvoll zu sein, die negativen Folgen von Bauteilabweichungen durch die gezielte Wahl von Nennmaßen zu reduzieren. Ob dies aus Sicht von Toleranzexperten, die sich tagtäglich mit den Folgen von geometrischen Abweichungen beschäftigen, sinnvoll ist, wird anhand der Umfrageergebnisse (Bild 22 und Bild 23) deutlich.

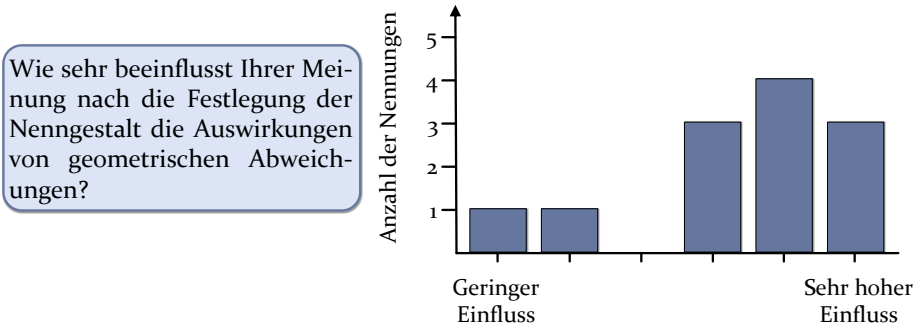


Bild 22: Einfluss der Nenngestalt auf Auswirkungen geometrischer Abweichungen

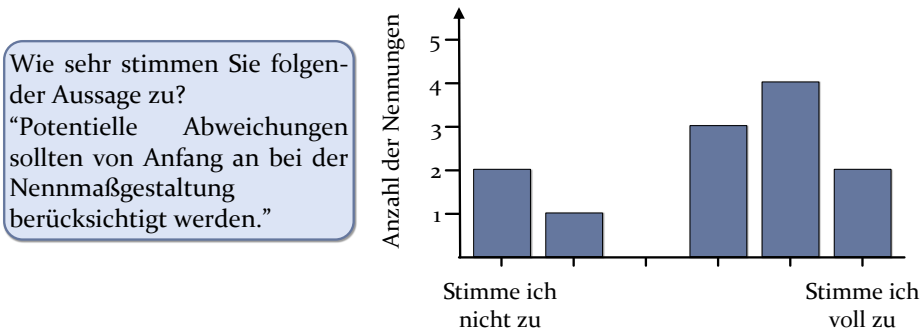


Bild 23: Berücksichtigung potentieller Abweichungen bei Nennmaßgestaltung

Bei der Betrachtung der Ergebnisse kann festgehalten werden, dass die überwiegende Mehrheit den Einfluss der Nennmaße als hoch bis sehr hoch einschätzt. Darüber hinaus hält es die Mehrheit der Befragten als zielführend, bereits bei der Wahl der Nennmaße potentielle Abweichungen zu berücksichtigen.

Hypothese 2: „Universelles virtuelles Werkzeug“

Zur virtuellen Abbildung von geometrischen Abweichungen wurden in den letzten Jahrzehnten unterschiedliche Verfahren entwickelt, die jeweils für bestimmte Anwendungsfälle spezifische Vorteile aufweisen. Im Rahmen der Umfrage sollte überprüft werden, ob sich im industriellen Umfeld ein spezielles, virtuelles Werkzeug etablieren konnte.

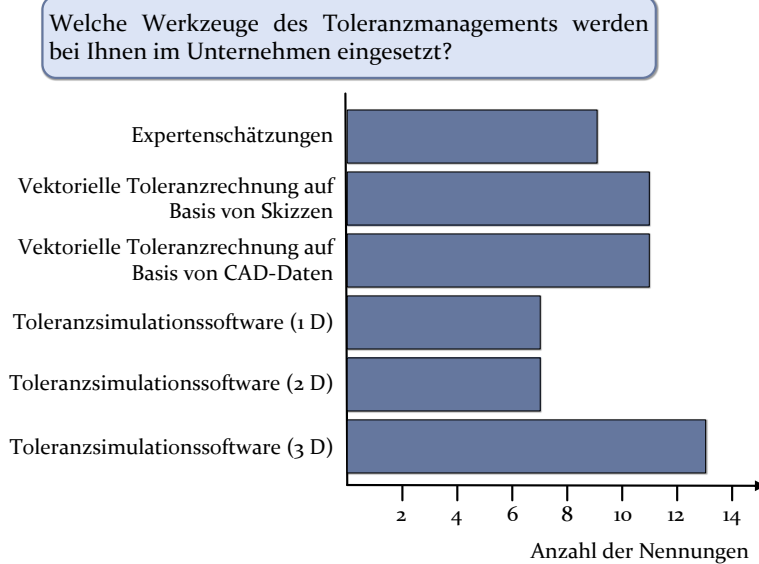


Bild 24: Einsatz unterschiedlicher Toleranzanalyseverfahren

Die in Bild 24 und Bild 25 dargestellten Umfrageergebnisse zeigen zum einen, dass während der Produktabsicherung viele unterschiedliche Simulationswerkzeuge (durchschnittlich 2,7) Anwendung finden. Zum anderen zeigt sich, dass die einzelnen Werkzeuge nicht spezifischen Phasen innerhalb der Produktentwicklung zugeordnet werden können. Es gibt lediglich die Tendenz, dass die meisten Werkzeuge im ersten Viertel des Produktentwicklungszyklus eingesetzt werden.

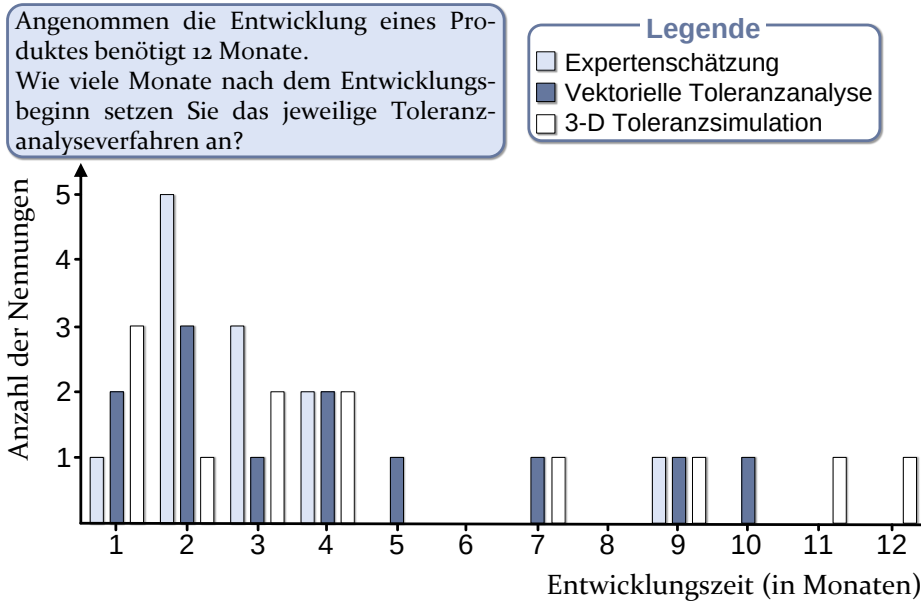


Bild 25: Zeitpunkt des Einsatzes unterschiedlicher Simulationswerkzeuge im Toleranzmanagement

Hypothese 3: „Integration von Fertigungsprozessinformationen“

Geometrische Bauteilabweichungen sind zu großen Teilen auf Streuungen bei Fertigungsprozessen zurückzuführen. Allerdings liegen Daten über den Einfluss von nicht konstanten Fertigungsprozessen frühestens bei der (Vor-)Serienfertigung vor. Da zu diesem Zeitpunkt der Handlungsspielraum hinsichtlich der Gestaltung und Tolerierung der Bauteile sehr eingeschränkt und eine Anpassung mit großen Änderungskosten verbunden ist, wäre eine prädiktive Prognose der auftretenden Abweichungen wünschenswert. Daher wurde, wie in Bild 26 und Bild 27 dargestellt, überprüft, ob aus industrieller Sicht eine Einbeziehung von Fertigungsprozesssimulationen sinnvoll ist.

Obwohl momentan nur ca. 30% der Umfrageteilnehmer fertigungsspezifische Einflüsse explizit im Rahmen der Toleranzsimulationen berücksichtigen, halten es knapp 90% für sinnvoll, diese Informationen im Rahmen der Simulationen zu berücksichtigen.

Werden bei Toleranzberechnungen variierende Einflüsse auf den Fertigungsprozess (schwankende Temperatur, chargenbedingte Schwankungen, etc.) berücksichtigt?

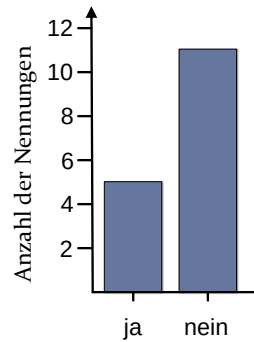


Bild 26: Berücksichtigung spezifischer Fertigungsprozesseinflüsse in der Toleranzrechnung

Wäre es aus Ihrer Ansicht sinnvoll, Fertigungsprozesssimulationen schon in frühen Phasen der Produktentwicklung bei der Toleranzsimulation zu berücksichtigen?

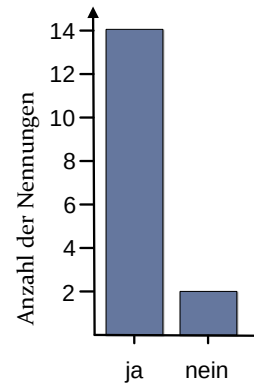


Bild 27: Berücksichtigung von Fertigungsprozesssimulationen in der Toleranzsimulation

Diskussion der Umfrageergebnisse

Auf Basis der in Bild 21 dargestellten Umfrageergebnisse kann die erste Hypothese bestätigt werden. Folglich ist die Wahl der Nennmaße entscheidend, wenn die negativen Auswirkungen geometrischer Bauteilabweichungen möglichst klein sein sollen.

Die zweite Hypothese, dass es in der Industrie kein universelles Simulationstool gibt, konnte ebenfalls bestätigt werden, da eine Vielzahl an Methoden und Werkzeugen zu unterschiedlichen Zeitpunkten Verwendung finden. Dabei deckt sich das Ergebnis dieser Umfrage mit früheren Umfragen [85]. Es existiert demzufolge noch kein Simulationstool, das ein durchgängiges virtuelles Toleranzmanagement erlaubt.

Auch die dritte Hypothese hinsichtlich der Fertigungsprozessinformationen wird durch die Umfrageergebnisse gestützt. Obwohl momentan

nur eine Minderheit der Unternehmen solche Informationen erheben und berücksichtigen, erachten es nahezu alle Umfrageteilnehmer als sinnvoll diese Informationen bei Toleranzanalysen zu berücksichtigen.

3.3 Handlungsbedarf für den Einsatz und die Validierung virtueller Absicherungsmethoden für Mechanismen im Kontext des Robust Design

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass sowohl aus wissenschaftlicher als auch aus industrieller Sicht die Notwendigkeit besteht, sich mit dem Einsatz und der Validierung virtueller Absicherungsmethoden grundlagenwissenschaftlich auseinander zu setzen. Im Einzelnen wurden dabei folgende Defizite identifiziert:

- Bisher gibt es keine systematische Vorgehensweise, die Produktentwicklern bei der Wahl optimaler Nennmaßen von Mechanismen unter Berücksichtigung von geometrischen Unsicherheiten ermöglicht. Die durchgeführte Umfrage unterstreicht die Relevanz dieses Punktes aus industrieller Sicht. Da die Wahl der Nennmaße das Verhalten eines Mechanismus stark beeinflussen kann, sollten laut Experten die Nennmaße bereits früh im Produktentwicklungsprozess unter Berücksichtigung geometrischer Abweichungen gezielt ausgewählt werden.
- Darüber hinaus liegt bisher kein übertragbares Vorgehensmodell für die Validierung von Toleranzanalysen vor, das eine systematische Quantifizierung der Güte der Simulationen erlauben würde.
- Da neben der Güte der Simulationsmodelle, die Eingangsgrößen die Aussagekraft der Simulationsergebnisse bestimmen, ist es unerlässlich, die auftretenden geometrischen Abweichungen möglichst genau zu beschreiben. Auch aus industrieller Sicht besteht hier Handlungsbedarf, da es bisher keine zufriedenstellenden Lösungen gibt, spezifische Fertigungsinformationen in Toleranzsimulationen virtuell einzubinden.
- Erschwerend kommt hinzu, dass es in der industriellen Praxis eine Vielzahl an Simulationswerkzeugen zu unterschiedlichen Zeitpunkten im Produktentwicklungsprozess verwendet werden. Dies zeigt, dass ein universelles Vorgehensmodell, das einen stringenten Toleranzmanagementprozess erlaubt, notwendig ist.

Aus den beschriebenen Defiziten resultiert das übergeordnete Ziel der Arbeit:

Die Unterstützung des Produktentwicklers bei der Entwicklung robuster Mechanismen durch den Einsatz validierter, virtueller Absicherungsmethoden.

Um dieses Ziel zu erreichen, ergeben sich aus dem Ziel drei konkrete Fragestellungen, die im Rahmen dieser Arbeit beantwortet werden:

1. Wie können Nennmaße bei abweichungsbehafteten Mechanismen gewählt werden, sodass diese Mechanismen ein robustes Bewegungsverhalten aufweisen?
2. Wie können Toleranzanalysemodelle für Mechanismen validiert und die Validierungsgüte quantifiziert werden?
3. Wie können Methoden und virtuelle Werkzeuge des Toleranzmanagements systematisch eingesetzt werden, sodass Mechanismen mit validierten Toleranzanalysemodellen effizient virtuell abgesichert werden können?

Um das übergeordnete Ziel zu erreichen und um die daraus resultierenden Fragestellungen beantworten zu können, wird im nächsten Kapitel ein übertragbares, anpassungsfähiges Vorgehen vorgestellt, das Produktentwickler bei der geometrischen Absicherung von Mechanismen unterstützt. Anschließend wird auf die unterschiedlichen Teilaspekte eingegangen, die im Detail beschrieben werden. Die Anwendung des Vorgehens wird im Anschluss exemplarisch für die Kinematik einer Röntgenblende durchlaufen. Dies ermöglicht nicht nur eine Überprüfung der vorgestellten Werkzeuge und Methoden auf ihre Anwendbarkeit. Darüber hinaus stellt es den Grundstein für die Validierung und die Diskussion des Vorgehens dar, die abschließend erfolgt.

4 Einsatz und Validierung virtueller Absicherungsmethoden für Mechanismen

Dieses Kapitel präsentiert erstmalig ein Vorgehensmodell, das als Rahmenwerk für den systematischen Einsatz und die Validierung von Absicherungsmethoden fungiert. Das neuartige Vorgehen ist von zentraler Bedeutung, da es die effiziente virtuelle Absicherung von abweichungsbehafteten Mechanismen ermöglicht.

Produktentwicklern wird damit ein allgemeingültiger, anpassbarer Ansatz zur Verfügung gestellt, der sie befähigt virtuelle Absicherungsmethoden zielgerichtet einzusetzen und deren Aussagekraft mit Hilfe von Validierungen kritisch zu bewerten.

Um die praktische Umsetzung des Ansatzes zu demonstrieren und zum besseren Verständnis der einzelnen Schritte, wird das Vorgehen in Kapitel 5 für die Kinematik einer Röntgenblende, die als praxisrelevanter Demonstrator dient, angewendet.

Wie in Bild 28 dargestellt, wird für den Mechanismus, welchen es zu untersuchen gilt, in einem ersten Schritt ein initiales kinematisches Analysemodell erstellt. Dieses beschreibt, in Abhängigkeit von geometrischen Größen mathematisch das zu untersuchende Funktionsmaß. Zeitgleich erfolgt eine Sammlung und Klassifizierung möglicher Einflussfaktoren, die das Bewegungsverhalten des Mechanismus beeinflussen können. Dazu wird eine Einflussanalyse (Abschnitt 4.1), die eine Erweiterung der ISHIKAWA-Analyse darstellt, verwendet. Anschließend wird eine Optimierung der Nennmaße für den Mechanismus durchgeführt, wobei hier unweigerlich auftretende geometrische Abweichungen der Einzelteile bereits berücksichtigt werden.

Mit den optimierten Nennmaßen erfolgt nachfolgend eine erste Toleranzanalyse des Mechanismus. Hierbei können sowohl einfache Vektormodelle, für die nicht zwingend eine Detailkonstruktion der Bauteile von Nöten ist, als auch Toleranzanalysemodelle, die beispielsweise auf dem Konzept der Skin Model Shapes basieren, verwendet werden. Je nachdem wie viele Informationen zu dem Zeitpunkt im Produktentwicklungsprozess vorliegen, sollte eine entsprechend detaillierte Toleranzanalyse durchgeführt werden, die diese Informationen berücksichtigen kann.

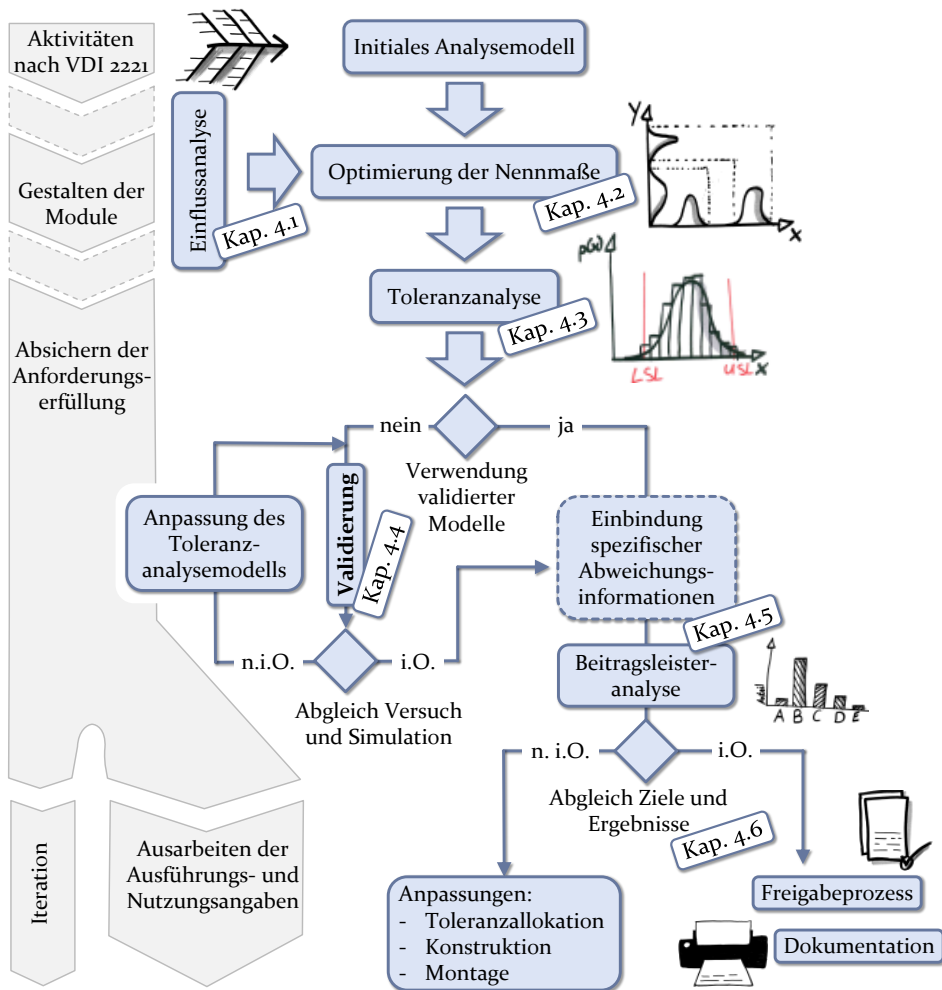


Bild 28: Einsatz und Validierung virtueller Absicherungsmethoden für Mechanismen

In Abhängigkeit davon, ob für einen spezifischen Anwendungsfall validierte Simulationsmodelle für die Toleranzanalyse verwendet werden, erfolgt die Entscheidung darüber, ob das Simulationsmodell validiert werden muss. Für den Fall das nicht-validierte Verfahren für die Toleranzanalysen verwendet werden, gilt es diese zu validieren. Diese Validierung (Abschnitt 4.4) stellt dabei sicher, dass das verwendete Modell, welches ein vereinfachtes Abbild der Realität darstellt, innerhalb definierter Grenzen für getroffene Annahmen verwendet werden kann. Bei einer erfolgreichen Validierung werden die Toleranzanalyseergebnisse mit den geforderten Zielwerten abgeglichen, während bei einem nicht validierten Simulationsmodell das Simulationsmodell angepasst werden sollte. Da die Validierung

auf einem Abgleich zwischen realen und virtuellen Toleranzanalysen basiert, ist es in der Regel erforderlich, einen Prüfstand für die physikalischen Toleranzanalysen zu nutzen. Daher erfolgt die Validierung des Simulationsmodells für den Prüfstand, der das reale System hinreichend genau abbildet.

Für den Fall, dass für den spezifischen Anwendungsfall bereits validierte Simulationsmodelle verwendet werden, ist keine Validierung notwendig und die Modelle können für die virtuelle Absicherung verwendet werden. Liegen dabei im Verlauf des Entwicklungsprozesses detaillierte Informationen über zu erwartende Abweichungen vor, sollten diese wie in Abschnitt 4.3 beschrieben, sukzessive in das Simulationsmodell überführt werden. Nach der Durchführung der Toleranzanalysen erfolgt ein Abgleich zwischen Analyseergebnissen und geforderten Qualitätszielen. Werden die Ziele erreicht, erfolgt der Freigabeprozess und die Toleranzanalysemodelle mit deren Eingangs- und Ergebnisgrößen können dokumentiert werden.

Werden die geforderten Ziele nicht erreicht, können entweder die Ziele oder die Bauteil-, beziehungsweise Prozessausgestaltung angepasst werden. Dabei stehen dem Konstrukteur unterschiedliche Möglichkeiten zur Verfügung, die jeweils mit einem unterschiedlichen Aufwand und Kosten einhergehen. So können beispielsweise im Rahmen von Toleranzsynthese die Einzelteiltoleranzen derart angepasst werden, dass die gewünschten Qualitätsziele erreicht werden. Ergänzend können auch Montageverfahren oder die Fügereihenfolgen derart angepasst werden, dass trotz gleichbleibender Einzelteiltoleranzen die geforderte Qualität erreicht werden kann. Bei der Identifikation der Toleranzen, beziehungsweise der Nennmaße, die angepasst werden sollten, spielt die Beitragsleisteranalyse eine entscheidende Rolle. Mit Hilfe von ihren Ergebnissen kann quantifiziert werden welche Einflussgröße sich in welchem Maße auf die Streuung des Schließmaßes auswirkt. Die Ergebnisse der Beitragsleisteranalyse können zusätzlich verwendet werden, wenn bei der Erreichung der Qualitätsziele die Kosten reduziert werden sollen, indem bestimmte Toleranzen gezielt aufgeweitet werden.

4.1 Einflussanalyse

Das primäre Ziel der Einflussanalyse ist eine Sammlung und Klassifizierung der Einflussgrößen, die das Bewegungsverhalten des zu untersuchenden Mechanismus (negativ) beeinflussen können. Aus Gründen der Übersichtlichkeit haben sich graphische Darstellungen, in Anlehnung an das ISHIKAWA-Diagramm (Abschnitt 2.1.3) als geeignete Werkzeuge herausgestellt.

In einem ersten Schritt gilt es die Systemgrenzen zu definieren, innerhalb derer ein System abgesichert werden soll. Da beim komplexen System nicht nur die Entwicklung in Subsystem mit definierten Grenzen erfolgt, ist auch eine Absicherung der Subsysteme sinnvoll. Für jedes Subsystem, welches als Black-Box angesehen werden kann, sollte daher geklärt werden, welche Energien, Stoffe und Informationen in das Subsystem, bei welchen Randbedingungen unter welchen Störgrößen einfließen [8].

Aufbauend auf der Sammlung und Zuordnung der Einflussfaktoren, erfolgt eine Klassifizierung, welche die Einflussgröße kategorisiert. Bei der Klassifizierung wird, wie in Bild 29 dargestellt, unterschieden, ob eine Analyse virtuell (mit Hilfe von virtuellen Toleranzanalysen) oder physikalischen Analysen mittels Experimenten durchgeführt werden kann. Sowohl die Sammlung, als auch die Klassifizierung sollte aufgrund von potentiellen Wechselwirkungen innerhalb der gesamten Produktentwicklungsteams geschehen. Im Kontext der Toleranzanalyse lassen sich beispielsweise geometrische Abweichungen in Prüfstandsversuchen nur bedingt steuern, da es aufgrund des Axioms der Fertigungsungenauigkeit [5] unmöglich ist, Bauteile mit definierten geometrischen Abweichungen herzustellen. Dennoch lassen sich, wie Kapitel 5 beschrieben, geometrische Bauteilabweichungen im Rahmen von Prüfstandsversuchen realisieren.

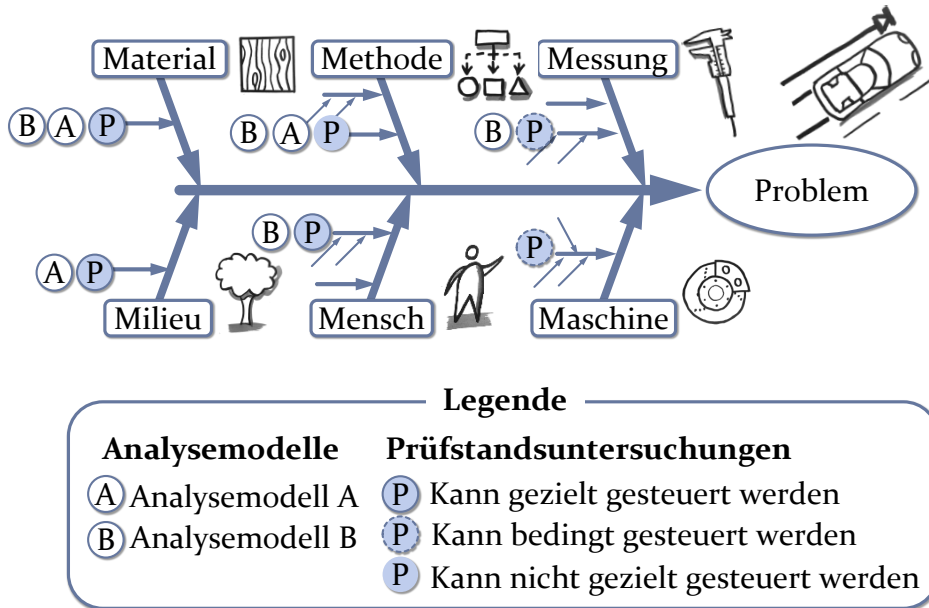


Bild 29: Schematische Darstellung einer Einflussanalyse

Bei der Sammlung der Einflussgrößen sollte im Sinne einer ganzheitlichen Herangehensweise nicht nur auf das Wissen und die Erfahrung des Produktentwicklers zurückgegriffen werden. Eine interdisziplinäre Sammlung der Einflussgrößen, bei der weiterer Personengruppen, beispielsweise Anwender, mit einbezogen werden, sollte angestrebt werden.

4.2 Nennmaßoptimierung für abweichungsbehaftete Mechanismen

Aufgrund unterschiedlicher Einflüsse herrschen bei der Herstellung von Produkten nie ideale invariante Bedingungen. Dies hat unter anderem zur Folge, dass zwangsläufig geometrische Bauteilabweichungen während der Produktion auftreten [5]. Das Ziel der Nennmaßoptimierung ist, Nennmaße systematisch so zu wählen, dass unweigerlich auftretende geometrische Abweichungen keine oder möglichst geringe Folgen auf das kinematische Verhalten eines Mechanismus haben.

Die Neuheit und damit der Beitrag zum bestehenden Stand der Forschung besteht darin, dass erstmalig potentielle geometrische Abweichungen beim Gestalten der Module nach VDI 2221 [18] für Mechanismen systematisch berücksichtigt werden. Das übertragbare Vorgehen, welches im Folgenden vorgestellt wird, ist die konsequente Weiterentwicklung der Vorarbeiten des Autors [P3] und [P15]

Die Optimierung der Nennmaße erfolgt jedoch nicht für einen einzelnen Mechanismus und nur bestimmte Bedingungen. Vielmehr wird ein statistischer Ansatz gewählt, der sicherstellt, dass die gewünschten Qualitätsanforderungen für die überwiegende Mehrheit (beispielsweise 99 %) produzierter Mechanismen sichergestellt werden kann. Analog zur statistischen Toleranzanalyse werden dazu n Baugruppen aus abweichungsbehafteten Bauteilen virtuell assembliert und auf Erfüllung der geforderten Qualitätsanforderungen geprüft.

4.2.1 Formulierung des Optimierungsproblems

Ausgangspunkt für die Optimierung der Nennmaße ist, wie in Bild 30 dargestellt, ein Konzept des Mechanismus, der optimiert werden soll. Dies bedeutet, dass sowohl die Art und Anzahl der kinematischen Glieder, als auch die Anzahl und Art der Gelenke, die diese Glieder verbinden, definiert sind. Dieses Konzept wird genutzt, um das kinematische Analysemodell zu erstellen. In Anbetracht dessen, dass bei der Wahl der Nennmaße noch keine detaillierten Abweichungsinformationen vorliegen, haben sich

Vektormodelle als eine geeignete Beschreibungsform für die Getriebeglieder herausgestellt.

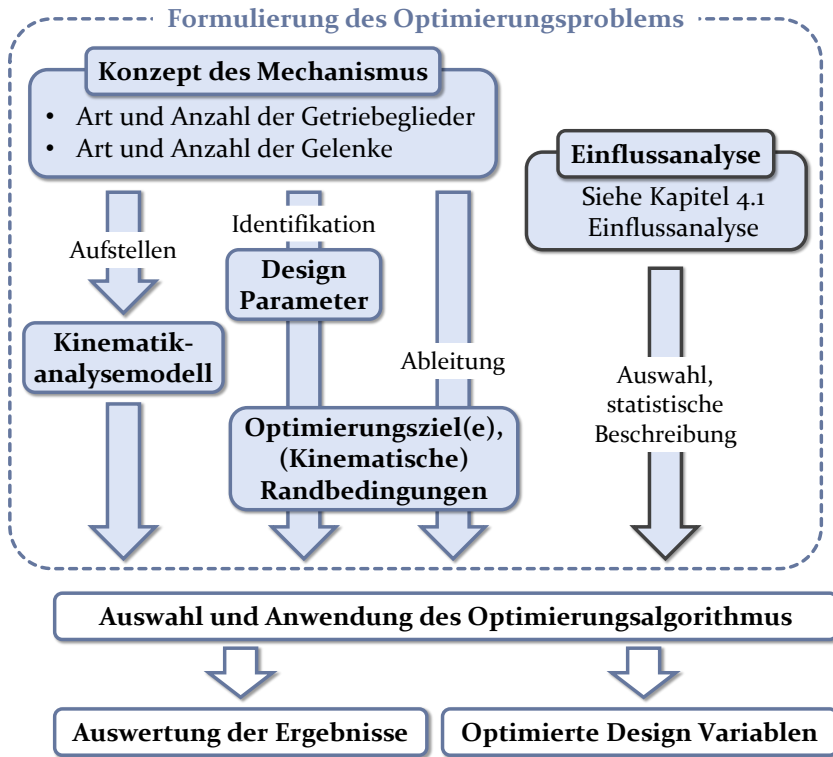


Bild 30: Vorgehen bei der Parameteroptimierung von Mechanismen

Beginnend mit der Einflussanalyse werden relevante Einflussgrößen ausgewählt und deren Unsicherheit im Anschluss quantifiziert. Da bei der Optimierung stochastische Verfahren wie beispielsweise LHS-Sampling verwendet werden, müssen die Unsicherheiten mit stochastischen Streuungsmaßen (wie bspw. dem Mittelwert μ und der Standardabweichung σ) beschrieben werden. Durch diese Herangehensweise werden nicht nur Informationen über die Unsicherheitsbereiche, sondern auch über die zu erwartenden statistischen Streuungen berücksichtigt.

Haupteinflussgrößen auf das kinematische Verhalten eines Mechanismus sind die zu erwartenden geometrischen Abweichungen der einzelnen Bauteile. Darüber hinaus können Temperatureinflüsse, die sich indirekt auf maßliche Abweichungen auswirken, eine Rolle spielen [P15]. Weitere kinetische Einflüsse, die beispielsweise zu Bauteilverformungen führen, werden

nicht berücksichtigt, da in der Phase „Gestalten der Module“ [18] wesentliche Informationen noch nicht vorliegen.

Anschließend gilt es das/die Optimierungsziel(e) und die Randbedingung(en) mathematisch zu beschreiben. Ein mögliches Optimierungsziel könnte die Maximierung der Geschwindigkeit eines Bauteils sein, wobei als Nebenbedingung ein Klemmen eines Mechanismus ausgeschlossen werden muss. Somit muss der Laufgrad $F = 1$ sein und die Lösung sämtliche Bewegungsgleichungen muss mit reellen Zahlen möglich sein.

Die Optimierung soll mit statistischen Methoden für die Gesamtheit von n Mechanismen erfolgen. Daher wird ein bestimmtes Qualitätsniveau, was beispielsweise mit einer Ausschussrate quantifiziert werden kann, gefordert. Infolgedessen muss die geforderte Ausschussrate z bei der Optimierung stets größer gleich der geschätzten Ausschussrate $\hat{z}$ sein:

$$z \geq \hat{z}, \quad (30)$$

wobei sich diese bei n Samples und m Nebenbedingungen wie folgt bestimmen lässt:

$$\hat{z} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n \prod_{k=1}^m iq(k,i)}{n}. \quad (31)$$

Die einzelnen Nebenbedingungen können entweder den Wert 1 (bei einer Erfüllung der Nebenbedingung) oder den Wert 0 (bei einem Nichterfüllen) annehmen:

$$iq(k,i) = \begin{cases} 1 & \text{wenn Nebenbedingung } k \text{ erfüllt ist} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}. \quad (32)$$

Der zulässige Ausschuss muss mathematisch ebenfalls als Randbedingung bei der Optimierung beschrieben werden. Um ein Über- beziehungsweise Unterschätzen des Ausschusses sicherzustellen, werden in [P13] wertvolle Empfehlungen gegeben, wie die Ausschussrate bei einer Sampling-basierenden Optimierung in Abhängigkeit der Streuung der zu untersuchenden Größe berechnet werden kann.

4.2.2 Auswahl und Anwendung eines Optimierungsalgorithmus

Nach der vollständigen mathematischen Beschreibung des Optimierungsproblems, kann dieses mit Hilfe eines geeigneten Algorithmus gelöst werden, sodass die idealen Nennmaße identifiziert werden. Bei der Anwendung müssen jedoch einige problemspezifische und numerische Parameter gewählt werden:

Zeitliche Diskretisierung

Um eine kontinuierliche Bewegung für das Analysemodell numerisch zu verarbeiten, muss diese diskretisiert werden. Obwohl die Modellunsicherheit durch eine feine Diskretisierung reduziert wird, steigt der numerische Aufwand an. Für rotatorische Bewegung hat sich eine Schrittweite von 1° bis 5° als geeignet erwiesen [91].

Auswahl und Skalierung einer geeigneten Stichprobe

Die Wahl der Stichprobengröße ist entscheidend, da die Nennmaßoptimierung, ausgehend von einer stochastischen Modellauswertung geschieht. Während eine zu kleine Stichprobe möglicherweise zu einer Unter- beziehungsweise Überschätzung der Ausschussrate führt, resultiert aus einer zu großen Stichprobe eine deutlich höhere Rechenzeit, die nicht zwingend zu einem besseren Ergebnis führt.

Um ein aussagekräftiges Optimierungsergebnis mit einer möglichst kleinen Stichprobe zu erhalten, ist es ratsam Zufallszahlen mit einem LHS Sampling zu erzeugen [68]. Anschließend können die für jede Eingangsgröße unabhängigen Zufallszahlen, wie in Bild 31 dargestellt, skaliert werden. Würden bei einer Optimierung mit einem methaheuristischen Optimierer immer wieder neue Stichproben erzeugt werden, kann dies dazu führen, dass es zu keiner Konvergenz bei der Optimierung kommt.

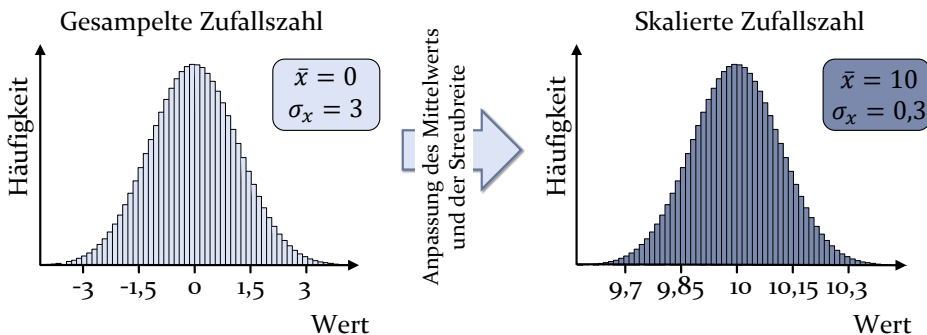


Bild 31: Skalierung einer gesampelten Zufallszahl für die Optimierung

Bei der Wahl der Größe der Stichprobe sollten, basierend auf dem Analysemodell für die Nennmaßoptimierung und einem geeigneten Startwert für die Optimierung, Voruntersuchungen durchgeführt werden, wobei das Analysemodell k -mal mit einer Stichprobengröße von n Samples ausgewertet wird. Bei dem m -maligen Auswerten des Analysemodells wird die Anzahl der Samples, wie in Bild 32 veranschaulicht, sukzessive erhöht. Führt eine weitere Erhöhung der Anzahl der Samples, wie in Bild 32

veranschaulicht, zu keiner nennenswerten Veränderung der Schließmaßstreuung ($\Delta_{ist} \leq \Delta_{soll}$), sollte diese Anzahl n im Folgenden für die Optimierung genutzt werden.

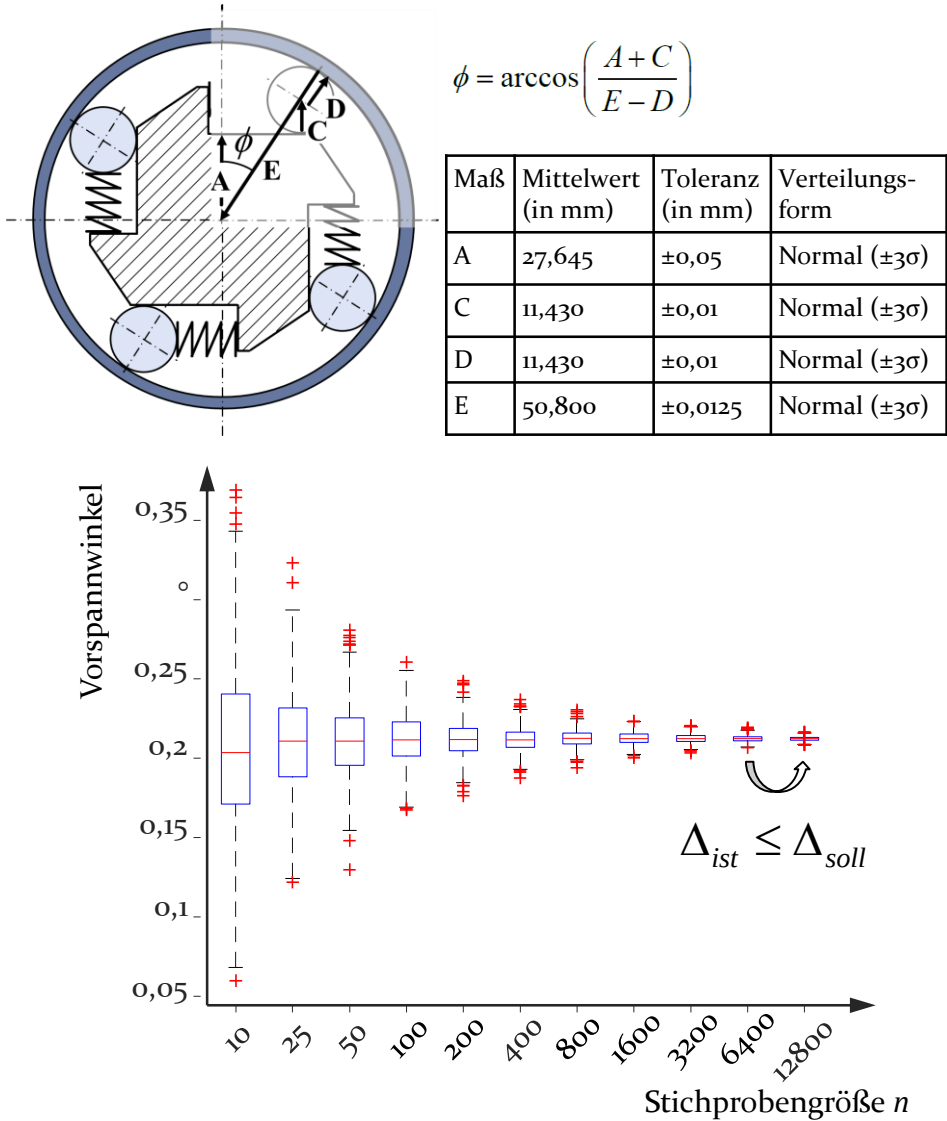


Bild 32: Wahl der Stichprobengröße für die Nennmaßoptimierung für einen Freilauf (Demonstrator nach [157])

Abbruchkriterien für die Optimierung

Um Endlosschleifen bei der Optimierung zu vermeiden, ist die Definition von Abbruchkriterien eine notwendige, aber nicht hinreichende Bedingung. Wird bei einer definierten Anzahl an Iterationen ein Grenzwert bei der Verbesserung der Zielfunktion nicht überschritten, ist die Optimierung abgeschlossen, sofern stets die Nebenbedingungen erfüllt sind.

Wahl spezifischer Optimierungsparameter

In Abhängigkeit davon, welcher Optimierungsalgorithmus verwendet wird, müssen in der Regel noch spezifische Parameter definiert werden [158]. Bei der Partikelschwarmoptimierung muss beispielsweise definiert werden, wie viele Partikel verwendet werden. Es ist allerdings kaum möglich, allgemeingültige Hinweise bei der Wahl der Parameter zu geben, da die Parameter nicht nur von dem Optimierungsalgorithmus, sondern auch von der jeweiligen Implementierung abhängen.

4.2.3 Auswertung der Ergebnisse

Nach der Optimierung liegen für das Optimierungsziel unter Berücksichtigung der Nebenbedingungen und der vorliegenden Unsicherheiten ideale Nennmaße vor, die anschließend bei der Konstruktion der Einzelteile genutzt werden können.

Neben der Betrachtung der optimierten Nennmaße ist es durchaus sinnvoll, die Veränderung der zu optimierenden Zielgröße vor und nach der Optimierung zu betrachten. So kann anschaulich die Verbesserung dargestellt werden. Darüber hinaus können mit Hilfe von Sensitivitätsanalysen [P21] bereits frühzeitig diejenigen abweichungsbehafteten Bauteile identifiziert werden, die das Bewegungsverhalten maßgeblich beeinflussen. Diesen Bauteilen sollte in den folgenden Schritten bei dem Produktentwicklungsprozess gebührende Aufmerksamkeit zukommen.

Durch die prädiktive Berücksichtigung potentieller geometrischen Abweichungen können erstmals Nennmaße für Mechanismen frühzeitig so gewählt werden, dass unweigerlich auftretende, fertigungsbedingte, geometrische Abweichungen keine gravierenden Folgen für das kinematische Verhalten von Mechanismen haben. Es kann sichergestellt werden, dass der Mechanismus, bei dem die Einzelteile von ihrem Ideal abweichen, die an ihn gestellten Anforderungen dennoch erfüllt.

4.3 Durchführung der Toleranzanalysen

Auf Basis der optimierten Nennmaße, die unter anderem die Hauptabmessungen der Bauteile und Baugruppen definieren, erfolgt nach VDI 2221 die Gestaltung der Module und die Integration des gesamten Produktes [18]. Da bei diesen Tätigkeiten nicht nur die idealen Abmessungen der Bauteile, sondern auch deren zulässige Abweichungen in Form von Toleranzen spezifiziert werden, sind ab diesem Zeitpunkt im Produktentwicklungsprozess Toleranzanalysen unerlässlich. Dieser Schritt ist dem Toleranz Design nach TAGUCHI zuzuordnen, da ab diesem Zeitpunkt im Produktentwicklungsprozess Toleranzen vergeben und angepasst werden, während die Nennmaße nur noch in Ausnahmefällen angepasst werden sollten.

Bei der Modellbildung im Rahmen der Toleranzanalyse handelt es sich stets um einen Kompromiss aus einem sehr genauen Simulationsmodell, welches in der Regel mit einer zeitaufwendigen Modellierung (die teilweise Grundlagenwissen über Programmierung erfordert), und einem weniger genauen Modell, welches sowohl bei der Modellerstellung als auch bei dessen Auswertung zeiteffizienter ist. Hinzu kommt, dass zu einem späteren Zeitpunkt im Produktentwicklungsprozess, bei dem viele Informationen über zu erwartende Abweichungen vorliegen, der Handlungsspielraum deutlich eingeschränkt ist. Bild 33 verdeutlicht diesen Zielkonflikt und stellt zusätzlich den Zeitbedarf zweier unterschiedlicher Toleranzanalysemöglichkeiten auf.

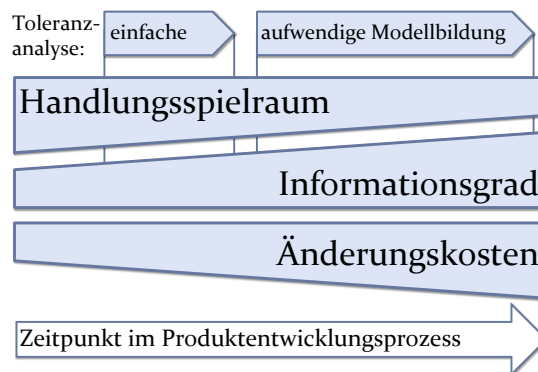


Bild 33: Zeitpunkt einer Toleranzanalyse bei steigendem Informationsgrad und sinkendem Handlungsspielraum

Zeitpunkt für die Durchführung der Toleranzanalysen

Da Toleranzanalysen zur virtuellen Produktabsicherung genutzt werden, müssen die Ergebnisse dieser Analysen zeitlich vor kostspieligen Entscheidungen, die beispielsweise die endgültige Wahl eines Fertigungs-, Prüf- oder Montageverfahrens betreffen, vorliegen.

Für die virtuelle Absicherung von abweichungsbehafteten Mechanismen können grundsätzlich alle in Abschnitt 2.2.5 dargestellten Repräsentationsformen gewählt werden. Allerdings bestehen Einschränkungen, da beispielsweise höherwertige Kontakte und Formabweichungen mit kommerziellen CAT-Tools und vektoriellen Ansätzen nicht abgebildet werden können. Das neu entwickelte Verfahren der hybriden Toleranzrepräsentation (siehe Abschnitt 4.3.2) überwindet diese Einschränkungen und kombiniert dies mit Vorteilen der vektoriellen Toleranzrepräsentation.

Zusammenfassend lässt sich für die hybride Toleranzrepräsentation festhalten, dass mit ihr sämtliche Abweichungsinformationen, die zum jeweiligen Zeitpunkt im Produktentwicklungsprozess vorliegen, genutzt werden können. Gleichzeitig können Analysemodelle mit geringem Aufwand bereits früh erstellt und sukzessive erweitert werden, sodass stets der größtmögliche Handlungsspielraum bei der Bauteil- und Prozessspezifikation ausgenutzt werden kann.

4.3.1 Eingangsgrößen der Toleranzanalyse

Neben angenommenen Bauteilabweichungen, welche mit Maß-, Form- und Lagetoleranzen spezifiziert werden, ist es ratsam weitere Einflussgrößen zu berücksichtigen. In Abschnitt 2.2.4 sind weitere mögliche Einflussgrößen, die virtuell abgebildet werden können, dargestellt. Werden nicht-validierte Simulationsverfahren verwendet, sollten bei den virtuellen Analysen lediglich die Einflussgrößen variiert werden, die im Rahmen der physikalischen Toleranzuntersuchungen kontrolliert und variiert werden können. Ist dies nicht der Fall, wäre eine Validierung des Simulationsmodells nicht möglich. Abgesehen davon, bietet es sich an, die Analysemodelle so aufzubauen, dass es möglich ist, sämtliche zur Verfügung stehende Informationen einzubinden. In Bild 34 ist schematisch dargestellt, welche unterschiedlichen Informationen während des Produktentwicklungsprozesses in ein Toleranzanalysemodell integriert werden können. Dabei können nicht nur Bauteilabweichungen, berücksichtigt werden. Auch der Einfluss von Montagevorgängen, Abweichungen aufgrund von Fügevorgängen, die wiederum zu Bauteilabweichungen führen, können

ebenso wie der Einfluss von physikalischen Größen, wie beispielsweise der Schwerkraft, virtuell berücksichtigt werden.

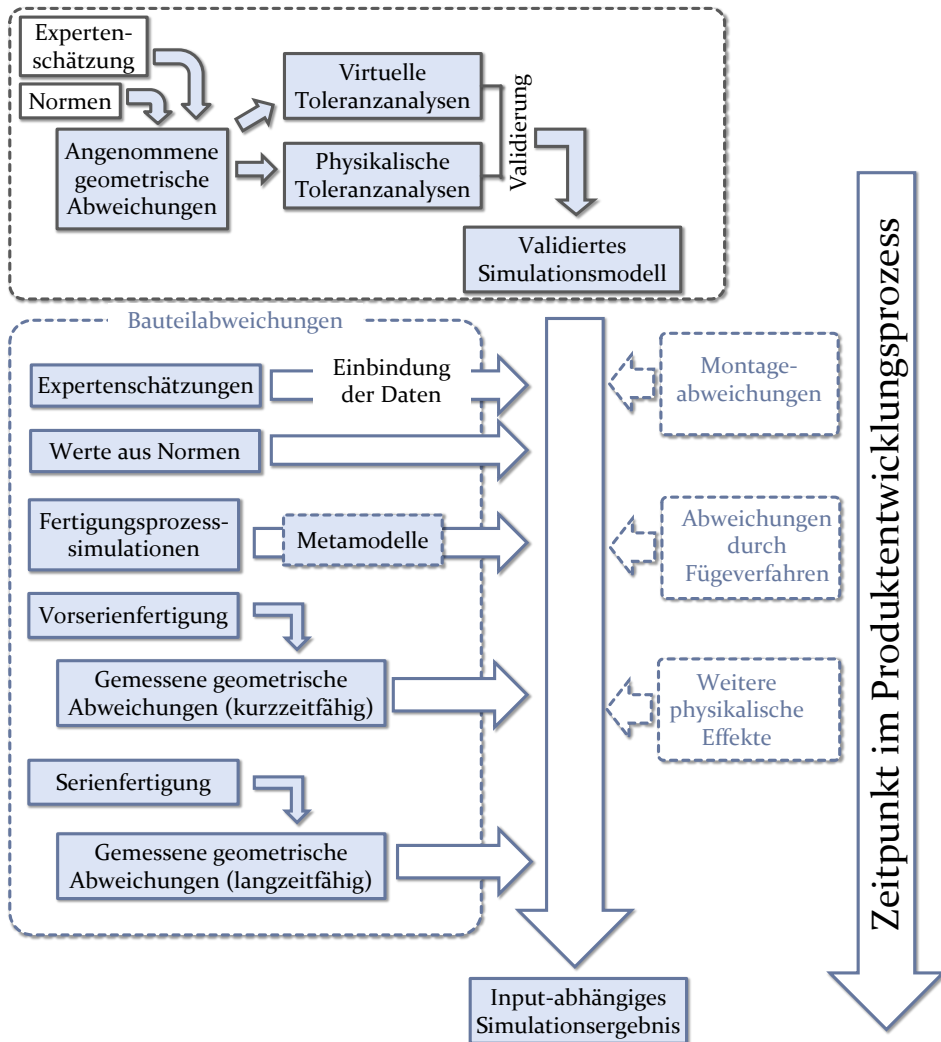


Bild 34: Berücksichtigung von Einflussgrößen in der virtuellen Toleranzanalyse

Deutlich wird, dass im Verlauf der Produktentwicklung immer genauere Informationen zur Verfügung stehen. Das betrifft zum einen die Größe und Art der geometrischen Abweichungen und zum anderen deren statistische Eigenschaften. Mit der Verbesserung der Eingangsinformationen geht jedoch eine Reduzierung der Handlungsmöglichkeiten einher (vgl. Bild 33). Daher muss je nach Einzelfall entschieden werden, zu welchem Zeitpunkt Toleranzanalysen durchgeführt werden sollten. Wie Fertigungsprozess-

simulationen und Messdaten in eine Toleranzanalyse eingebunden werden können, wird in Abschnitt 5.6 diskutiert.

4.3.2 Hybride Toleranzrepräsentation

Die hybride Toleranzrepräsentation stellt durch die Kombination bestehender Ansätze eine neuartige Möglichkeit dar, geometrische Abweichungen virtuell abzubilden und für die statistische Toleranzanalyse nutzbar zu machen [P10]. Diese Repräsentationsform stellt eine Kombination aus vektoriellen und punktbasierten Toleranzanalysen dar. Wie in Bild 35 dargestellt, werden die unterschiedlichen Bestandteile eines Mechanismus für die Toleranzanalyse unterschiedlich repräsentiert. Sämtliche Körper und die niedrigen Elementpaare werden recheneffizient mit Hilfe von Vektoren abgebildet, während höhere Elementpaare, wie sie beispielsweise bei einem Nockenkontakt oder einem Zahnradkontakt vorliegen, anhand von Punktwolken repräsentiert werden. Somit ist die hybride Toleranzrepräsentation in der Lage, geometrische Abweichungen bedarfsgerecht und detailliert zu berücksichtigen, sodass Mechanismen sowohl recheneffizient als auch sehr genau abgebildet werden können.

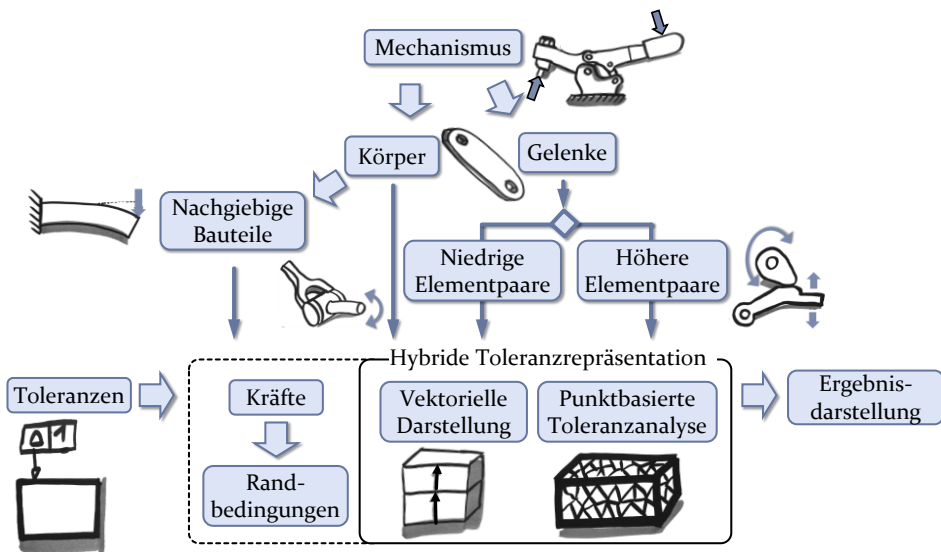


Bild 35: Wahl der Geometrirepräsentationsform bei der Vorgehen bei der hybriden Toleranzrepräsentation nach [P10]

Für die punktbasierte Toleranzanalyse innerhalb der hybriden Toleranzrepräsentation mit Skin Model Shapes erfolgt ein zweistufiges Vorgehen, dass eine Abwandlung des dreistufigen Vorgehens nach SCHLEICH [159] darstellt. Dabei erfolgt zunächst ein Pre-Processing, bei dem abweichungsbehafteten

Skin Model Shapes, die jeweils ein abweichungsbehaftetes Bauteil repräsentieren, erzeugt werden. Alternativ kann auch eine Aufbereitung von Messdaten erfolgen. Anschließend erfolgt das Processing, bei dem die Montage, beziehungsweise die Kontakt- oder Bewegungssimulation erfolgt. Abschließend erfolgt eine Integration der Ergebnisse in der hybriden Gesamtsimulation.

Darüber hinaus bietet die hybride Toleranzrepräsentation weitere Vorteile, woraus ein flexibler Einsatz resultiert. So können die Folgen von Gelenkspiel bei den durch Vektoren abgebildeten niedrigen Elementpaaren durch die Einbindung geeigneter Algorithmen berücksichtigt werden. Darüber hinaus können, sobald Messdaten von gefertigten Bauteilen vorliegen, diese in Form von Punktwolken, selbst unter Berücksichtigung von Einzelpunktmessunsicherheiten in die Toleranzanalyse integriert werden [P24].

4.3.3 Ergebnisinterpretation und Handlungsmöglichkeiten

Unabhängig vom gewählten Modellierungsverfahren, liegt nach einer statistischen Toleranzanalyse ein Ergebnis vor, welches interpretiert werden muss, sodass für die Verbesserung der Produkt- oder Prozessqualität die richtigen Schlüsse gezogen werden. Bild 36 stellt ein exemplarisches Ergebnis einer Toleranz- und Beitragsleisteranalyse dar.

Sowohl Informationen über die Schließmaßstreuung, als auch der Effekt der dazu beitragenden Einzelteiltoleranzen werden bei der Ergebnisdarstellung bereitgestellt.

Bei einer Verfehlung der Qualitätsziele stehen dem Entwickler unterschiedliche, in Tabelle 2 dargestellte Handlungsmöglichkeiten zur Verfügung. Neben der jeweiligen Handlungsmöglichkeit ist in Tabelle 2 eine qualitative Einschätzung der Änderungskosten dargestellt. Die tatsächlichen Änderungskosten hängen jedoch stark von innerbetrieblichen Abläufen und Prozessen ab. Sie sollen daher nur als Anhaltspunkt dienen, wenn mögliche Handlungsalternativen evaluiert oder bewertet werden. Die qualitative Kosteneinschätzung ist sowohl zu einem frühen Zeitpunkt im Produktentwicklungsprozess (zu Beginn der „Gestaltung der Module“ nach [18], als auch zu einem späteren Zeitpunkt (am Ende der „Gestaltung der Module“ nach [18]) dargestellt.

4.3 Durchführung der Toleranzanalysen

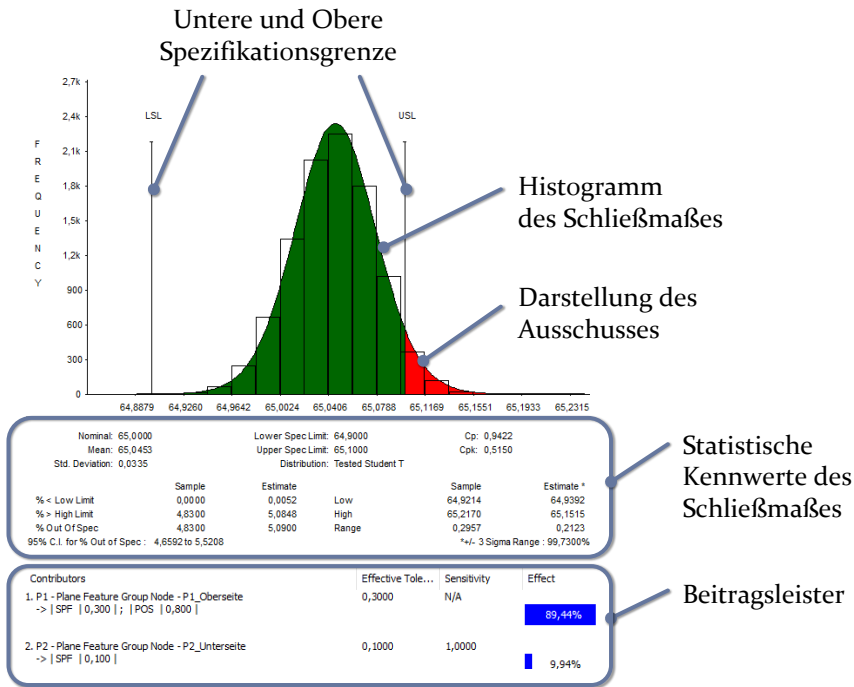


Bild 36: Exemplarisches Ergebnis einer Toleranzanalyse

Tabelle 2: Handlungsmöglichkeiten und damit einhergehende Änderungskosten bei einer Qualitätszielverfehlung

Handlungsmöglichkeit	Änderungskosten	
	früh im PEP	spät im PEP
Toleranzsynthese	meist hoch	meist hoch
Anpassung der Fügereihenfolge	gering	hoch
Anpassung des Bezugssystems	gering	mittel
Anpassung der Nennmaße	gering	hoch
Anpassung der Bauteilkontrolle	hoch	hoch
Nacharbeit am fertigen Produkt	hoch	hoch

Bei der Toleranzsynthese werden einzelne Toleranzwerte gezielt angepasst, wobei eine Einschränkung einzelner Toleranzen in der Regel mit deutlich

erhöhten Fertigungskosten einhergeht [P25]. Daher sollte eine Anpassung der einzelnen Toleranzen durch Experten erfolgen, die ihre Entscheidungen auf die Ergebnisse von Beitragsleisteranalysen stützen. Alternativ gibt es die Möglichkeit Optimierungsalgorithmen einzusetzen, sofern der Zusammenhang von Toleranzen und damit verbundenen Kosten quantifiziert werden kann [P6]. Die Kosten, die mit einer Anpassung der Fügereihenfolge einhergehen, hängen stark vom Zeitpunkt im Produktentwicklungsprozess (kurz: PEP), bei dem die Anpassung erfolgt, ab. Sind Fertigungsanalysen bereits abschließend geplant, ist eine flexible Anpassung mit erheblichen Kosten verbunden, während diese zu einem früheren Zeitpunkt mit deutlich geringeren Mehrkosten umgesetzt werden können. Eine Anpassung des Bezugssystems stellt primär keine Veränderung der Fertigungsgenauigkeit dar, kann sich jedoch sowohl in der Einzelteelfertigung, als auch bei der anschließenden Montage positiv auswirken [160]. Eine Anpassung der Nennmaße ist früh im Produktentwicklungsprozess kaum mit Mehrkosten verbunden, während die Kosten zu einem späteren Zeitpunkt aufgrund des konstruktiven Mehraufwands wesentlich höher sind. Durch eine individuelle Bauteilkontrolle nach Abschluss der Fertigung, kann sichergestellt werden, dass sich sämtliche Bauteile innerhalb ihrer Spezifikationsgrenzen befinden. Eine solche Vollprüfung ist jedoch mit einem enormen Prüfaufwand und hohen Mehrkosten verbunden [161].

Neben den oben beschriebenen Handlungsmöglichkeiten besteht zudem die Möglichkeit die Qualitätsziele nachträglich anzupassen. Während dies bei optischen Merkmalen ein probates Mittel sein kann, ist es für funktionskritische Schließmaße keine geeignete Möglichkeit, da ein Versagen eines Produktes dadurch billiger in Kauf genommen würde.

4.4 Validierung von Toleranzanalysen für Mechanismen

„Die naturwissenschaftliche Frage ist die logische Hypothese, welche von einem bekannten Gesetz durch Analogie und Induction weiter-schreitet; die Antwort darauf giebt das Experiment, welches in der Frage selbst vorgeschrieben liegt.“ [162]

Wissenschaftsphilosoph *Rudolf Virchow*

Ziel der Validierung ist der Nachweis darüber, dass ein Toleranzanalysemodell das zeitabhängige Bewegungsverhalten eines spezifischen Mechanismus bei spezifischen Umgebungseinflüssen in einem definierten Versuchsraum, hinreichend genau beschreibt. Ein so validiertes Simulati-

onsmodell kann anschließend für die statistische Toleranzanalyse verwendet werden, was Rückschlüsse über die Schließmaßstreuung untersuchter Stichproben ermöglicht. Im Folgenden wird ein Vorgehen vorgestellt, bei dem numerische Simulationsergebnisse mit korrespondierenden Daten aus Experimenten gegenübergestellt und sowohl qualitativ, als auch quantitativ bewertet werden. Die wissenschaftliche Herausforderung liegt dabei zum einen darin die Einflüsse aus der Einflussanalyse (Abschnitt 4.1) virtuell und physikalisch möglichst gut abzubilden. Zum andern, Simulations- und Versuchsergebnisse quantitativ zu beschreiben, sodass Vergleiche zwischen unterschiedlichen Simulationsmodellen vorgenommen werden können und absolute Aussagen über die Prognosegüte von Simulationsmodellen ermöglicht werden.

Wichtig ist in diesem Zusammenhang, dass keine Validierung des abzusichernden Produktes unter realen Betriebsbedingungen erfolgen kann. Dafür liegen in der Realität zu viele epistemische Unsicherheiten, beispielsweise phänomenologischer Natur vor. Infolgedessen würde aus einer solchen Validierung eine sehr geringe Aussagekraft resultieren. Es ist daher umso wichtiger, dass bei den physikalischen Toleranzanalysen die Einflussgrößen auf das Bewegungsverhalten eines Mechanismus möglichst gut abgebildet werden können.

Vorarbeiten

Vor der Durchführung der physikalischen und virtuellen Versuche für die Validierung, sind je nach vorliegenden Randbedingungen unterschiedliche Vorarbeiten notwendig. Wie in Bild 37 veranschaulicht, müssen zuerst die Voraussetzungen für die physikalischen Versuche geschaffen werden. Dazu ist es erforderlich einen Prüfstand mit geeigneter Messtechnik auszustatten, beziehungsweise zu entwickeln und zu fertigen. Anschließend müssen die Bauteile ausgewählt werden, die während der Versuche variiert werden sollen. Dies kann entweder basierend auf Expertenwissen oder ausgehend von Sensitivitätsanalysen geschehen. Sollen Beitragsleisteranalysen bei der Auswahl der Bauteile eingesetzt werden, besteht die Krux darin, dass nicht validierte Toleranzanalysen zugrunde gelegt werden. Die Beitragsleisteranalysen bieten jedoch den Vorteil, dass der gesamte Versuchsraum mit geringem Aufwand virtuell mit statistischen Toleranzanalysen untersucht werden kann. Nach der Fertigung und der messtechnischen Bauteilerfassung können Voruntersuchungen durchgeführt werden, bei denen die Auswertung der Messungen überprüft und gegebenenfalls modifiziert werden können.

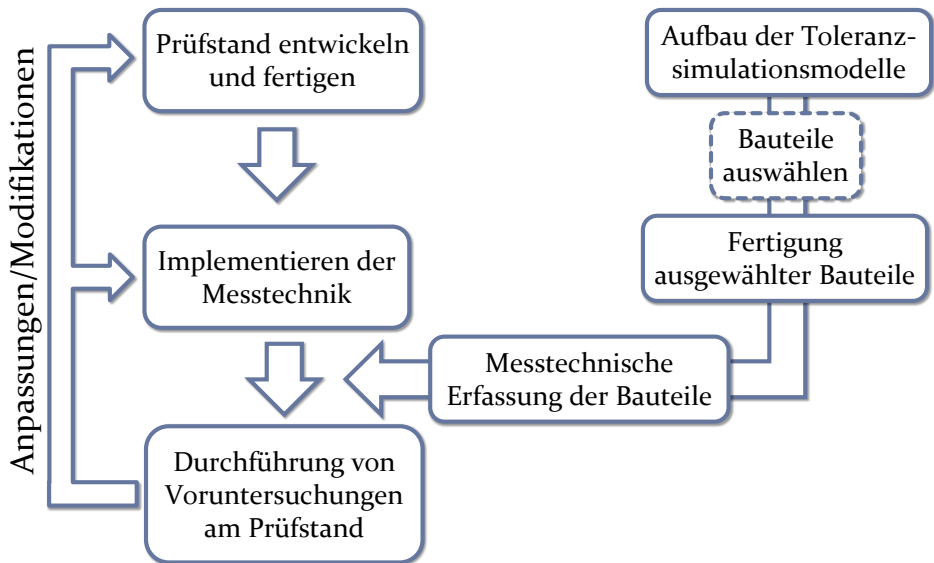


Bild 37: Vorarbeiten und deren Abhängigkeiten für die Validierung von virtuellen Toleranzanalysemodellen

Liefern die Untersuchungen plausible Ergebnisse, können die Untersuchungen für die tatsächliche Validierung durchgeführt werden. Im Folgenden wird auf die Randbedingungen und generelle Empfehlungen bei der Entwicklung eines Validierungsprüfstandes eingegangen. Anschließend wird das Vorgehen für die Validierung, die Aufbereitung der Primärdaten und die Wahl einer geeigneten Ähnlichkeitskennzahl (siehe Abschnitt 4.4.4) beleuchtet. Mit Hilfe dieser kann die Übereinstimmung der Versuchs- und Simulationsdaten quantifiziert werden, sodass ein objektiver Vergleich unterschiedlicher Simulationsmodelle erfolgen kann.

4.4.1 Entwicklung eines Validierungsprüfstands

Für die Validierung der virtuellen Toleranzanalysen ist es erforderlich einen Prüfstand zu entwickeln, beziehungsweise zu modifizieren. Zwei Anforderungen sind bei Prüfstandsentwicklungen von wesentlicher Bedeutung. Zum einen muss der Prüfstand hinsichtlich der Bewegungsart und der -richtung dem abzusichernden Mechanismus gerecht werden. Da die Validierung der Toleranzsimulationen nicht am realen System, sondern an dem Prüfstand erfolgt, hat diese Anforderung einen hohen Stellenwert. Eine Validierung des realen Systems in der Regel nicht möglich, da weder die notwendigen Messmittel zur Erfassung physikalischer Größen inte-

griert sind, noch reproduzierbare Bedingungen in der Realität geschaffen werden können.

Darüber hinaus ist es unerlässlich, dass das Bewegungsverhalten des Mechanismus messtechnisch genau erfasst wird. Hier sollte die goldene Regel der Messtechnik, berücksichtigt werden. Diese besagt, dass das Verhältnis von zu untersuchender Messunsicherheit und Toleranz U/T 1/10, im Grenzfall 1/3 betragen sollte [163]. Im Umkehrschluss ist es daher erforderlich den Prüfstand mit einer Messtechnik zu versehen, die in der Lage ist, diese Anforderung zu erfüllen. Die goldene Regel der Messtechnik beeinflusst darüber hinaus zusätzlich die Konstruktion des gesamten Prüfstands, da sämtliche epistemische Unsicherheiten, die auf die Konstruktion zurückgehen die Güte der Messergebnisse negativ beeinflussen und zu einer Erhöhung der Messunsicherheit führen. Dennoch sollte der Mechanismus, der mit Hilfe des Prüfstandes abgesichert werden soll, nach Möglichkeit nicht modifiziert werden. Jede Modifikation kann zu phänomenologischen Unsicherheiten führen, sodass Erkenntnisse aus den Prüfstandsuntersuchungen nur bedingt auf die Realität übertragen werden können.

Können physikalische Phänomene, die in der Realität eine wichtige Rolle spielen, nicht mit dem Prüfstand abgebildet werden, sollte dies ebenfalls berücksichtigt werden. Führt beispielsweise in der Realität die Schwerkraft dazu, dass Lochspiele in einem Mechanismus systematisch in eine Richtung ausgenutzt werden, sollte dies auch beim Prüfstand der Fall sein. Kann der Mechanismus jedoch nicht wie in der Realität ausgerichtet werden, ist der Einsatz von Ersatzlasten ein probates Mittel den Prüfaufbau an die Realität anzupassen und Zwangslagen beziehungsweise geometrische Randbedingungen sicherzustellen.

Neben den oben genannten Aspekten spielt die Arbeitssicherheit des Prüfstands ebenfalls eine wichtige Rolle und sollte daher den jeweiligen Anforderungen entsprechen. Daneben sollte der Austausch der zu untersuchenden Bauteile mit geringem Zeitaufwand möglich sein, sodass Versuche effizient durchgeführt werden können.

Für die Güte der Messergebnisse ist darüber hinaus der Standort von immenser Bedeutung. Nur wenn gleichbleibende, reproduzierbare Umgebungsbedingungen herrschen, können belastbare Ergebnisse erzeugt werden. Werden Versuche in einem nicht-zertifizierten Messraum durchgeführt, sollten Untersuchungen durchgeführt werden, die Aufschluss darüber geben, in welchem Maße die Messergebnisse von Umgebungseinflüssen beeinflusst werden.

4.4.2 Vorgehen bei der Validierung

Die Validierung der Toleranzanalysemodelle für Mechanismen basiert auf dem Abgleich zwischen physikalischen und virtuellen Toleranzanalysen. Dabei werden bei beiden Analysen dieselben Bauteile, beziehungsweise deren virtuelles Abbild verwendet.

In einem ersten Schritt werden die Bauteile für den Prüfstand gefertigt und anschließend messtechnisch erfasst. Um die Aussagekraft, bei der Validierung zu erhöhen, bietet es sich an, jeweils mehrere Bauteile zu fertigen. So können physikalische und virtuelle Toleranzuntersuchungen für unterschiedliche Konstellationen, basierend auf einem geeigneten Versuchsplan, durchgeführt werden. Zeigt sich anschließend, dass das Simulationsmodell für alle untersuchten Konstellationen valide Ergebnisse liefert, kann davon ausgegangen werden, dass es für den gesamten Versuchsraum gültig ist.

Über die Anzahl der gefertigten Bauteile können keine allgemeingültigen Richtlinien definiert werden, da mögliche Bauteilkombinationen von der Anzahl der für die Toleranzanalysen relevanten Merkmale verantwortlich sind. Darüber hinaus ist es aufgrund des Axioms der Fertigungsungenauigkeit [5] nicht möglich, exakt definierte Bauteilabweichungen zu fertigen. Daher müssen zuerst abweichungsbehaftete Bauteile gefertigt, gemessen und anschließend ausgewählt werden. Infolgedessen ist eine systematische Untersuchung im gesamten Versuchsraum nur bedingt möglich. Daher sollte mit Fertigungsexperten vorab abgestimmt werden, inwieweit Bauteile mit gezielt eingebrachten Abweichungen gefertigt werden können, sodass eine möglichst gute Abdeckung des Versuchsraum realisiert wird. Empfehlenswert ist es einen vollfaktoriellen Versuchsplan zu Grunde zu legen, da mit ihm einzelne Wechselwirkungen getrennt erfasst werden können [164].

Schlussendlich müssen in Abhängigkeit von dem Mechanismus, der untersucht werden soll und den zur Verfügung stehenden fertigungs- und fertigungsmesstechnischen Kapazitäten individuelle Entscheidungen getroffen werden.

Durchführung physikalischer Toleranzuntersuchungen

Bei der Durchführung der physikalischen Toleranzuntersuchung ist es erforderlich, für eine Bauteilkombination n_V Versuche durchzuführen, sodass die Wiederholversuche statistisch ausgewertet werden können. Weist der zu untersuchende Mechanismus ein zyklisches Bewegungsverhalten auf, genügt es, wenn der Mechanismus n_V Zyklen durchläuft. Weist

der Mechanismus kein zyklisches Verhalten auf, muss die Bewegung ebenfalls n_V mal wiederholt werden, wobei Start- und Endpunkt der Bewegung möglichst wiederholgenau reproduziert werden sollten. Zusätzlich müssen die Geschwindigkeit des Mechanismus und die Abtastrate der Messtechnik aufeinander abgestimmt sein, sodass eine ausreichend genaue Diskretisierung des Bewegungsverhaltens gewährleistet wird.

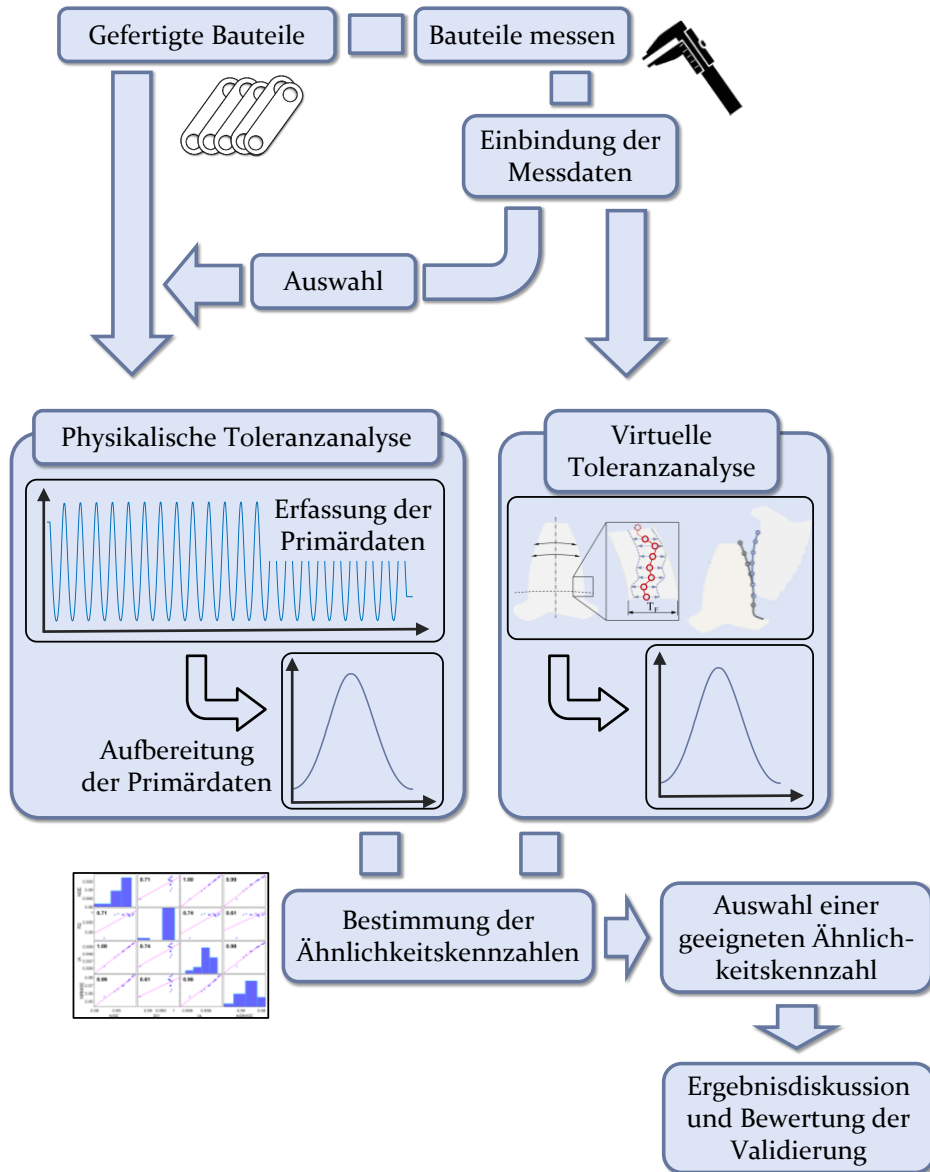


Bild 38: Schematischer Ablauf bei der Validierung

Nach der Durchführung eines Versuchs für eine Bauteilkombination werden die Primärdaten aufbereitet, indem die Signale der n_V Bewegungszyklen überlagert werden, sodass eine Analyse der Daten erfolgen kann. Um Auffälligkeiten zu identifizieren, werden die vier zentralen statistischen Momente (siehe Abschnitt 2.2.6) über den gesamten Bewegungszyklus berechnet und analysiert. Weisen die Messdaten eine verhältnismäßig große Streuung (Standardabweichung) auf, sollte geprüft werden, ob diese Streuung auf epistemische Unsicherheiten zurückzuführen ist, die gegebenenfalls reduziert werden sollten.

Parallel zu den physikalischen Toleranzuntersuchungen werden die Messdaten in das Toleranzanalysemodell des Prüfstands eingebunden. Da es sich in der Regel um deterministische Analysemodelle handelt, genügt es einen gesamten Bewegungszyklus virtuell zu betrachten. Zur Vermeidung numerischer Fehler, sollte die Diskretisierung bei den virtuellen und die Abtastraten bei den physikalischen Analysen angeglichen werden. Da die Abtastrate bei den physikalischen Untersuchungen bei einer spezifischen Sensorik limitiert ist, erfolgt die Diskretisierung der virtuellen Untersuchungen entsprechend der Abtastrate.

In Abhängigkeit von der Problemstellung die untersucht wird, kann anschließend mit der Ermittlung einer geeigneten Ähnlichkeitskennzahl erfolgen. Diese stellt abschließend die Grundlage für die Ergebnisdiskussion dar und ermöglicht die Bewertung der gesamten Validierung.

4.4.3 Aufbereitung der Primärdaten

Nach der Durchführung von physikalischen Toleranzuntersuchungen, bei denen konstante, reproduzierbare Umgebungsbedingungen herrschen sollten, müssen die Primärdaten für die Validierung aufbereitet werden.

Da für Prüfstände keine allgemeingültigen Normen vorliegen, die eine Bestimmung der Standardunsicherheit eines Messverfahrens ermöglichen, wird auf die DIN EN ISO 15530 [144] zurückgegriffen. Diese sieht unter anderem vor, dass mindestens 20 Wiederholungen einer Messung durchgeführt werden sollten. In Anlehnung an die Norm, sollte der Mechanismus mindestens 20-mal seine komplette Bewegung durchlaufen. Anschließend wird das zeitkontinuierliche periodische Messsignal überlagert. Für die Überlagerung der Messsignale ist eine konstante Schwingungsdauer Φ erforderlich, die bei den erfassten Messdaten nicht zwangsläufig gewährleistet werden kann.

Daher ist es zweckdienlich, wie in Bild 39 dargestellt, eine Fourierreihe, ausgehend von den erfassten Messdaten ($f(\phi)$), zu bestimmen, da diese bestmöglich auf die Messdaten angepasst werden kann und eine konstante Schwingungsdauer aufweist. Für J Glieder ergibt sich somit die Fourierreihe:

$$\tilde{f}(\phi) = a_0 + \sum_{j=1}^J (a_j \cos(j\phi) + b_j \sin(j\phi)) \quad (33)$$

mit der der Schwingungsdauer Φ .

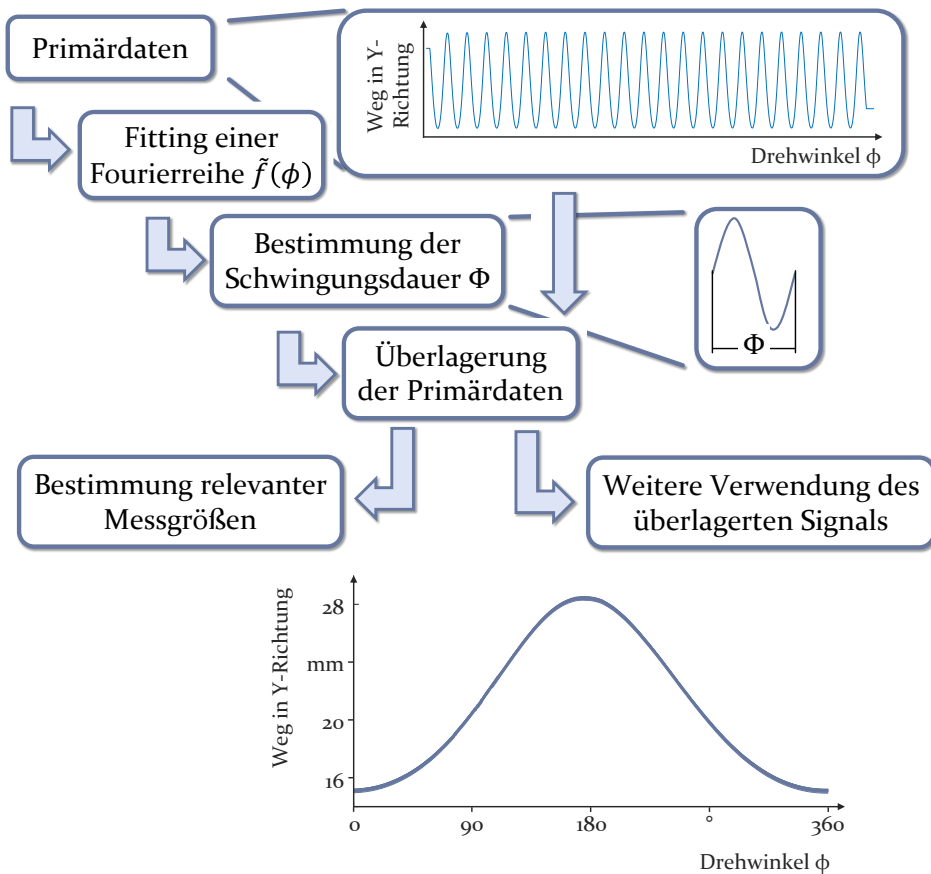


Bild 39: Aufbereitung der Primärdaten

Anschließend können die Primärdaten, welche von der Funktion $f(\phi)$ beschrieben werden in einer Matrix mit n Zeilen überführt werden, wobei n der Anzahl der Wiederholmessungen entspricht:

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} f(\phi) & \text{mit } \phi \in [(i-1)\Phi, i\Phi[\\ f(\phi) & \text{mit } \phi \in [(i)\Phi, (i+1)\Phi[\\ \vdots & \vdots \\ f(\phi) & \text{mit } \phi \in [(n-1)\Phi, n\Phi[\end{bmatrix} = (f_{kl}). \quad (34)$$

Bei dem überlagerten Signal $\mathbf{F}$, welches zeilenweise aus den einzelnen Bewegungsabläufen besteht, können schlussendlich für alle Winkelschritte l statistische Kennwerte ermittelt werden. Die gemittelten Bewegungskurve ergibt sich beispielsweise mit:

$$\bar{\mathbf{F}} = \frac{1}{n} [\sum_{n=1}^k f_{n1} \quad \sum_{n=1}^k f_{n2} \quad \dots \quad \sum_{n=1}^k f_{nl}]. \quad (35)$$

Der Vektor $\bar{\mathbf{F}}$ besteht somit aus l Einträgen, für die jeweils der Mittelwert aller Bewegungskurven bestimmt wird. Je nachdem, wie viele Messwerte mit einem Messverfahren in einem Zeitschritt erfasst werden, kann es ziel führend sein, die Anzahl der Messwerte zu reduzieren, da dadurch der numerische Aufwand reduziert wird.

Während das gemittelte Messsignal für den Abgleich zwischen Simulation und Versuch verwendet wird, können, ausgehend von der Überlagerung der Signale statistische Kennwerte der Signale bestimmt werden. So kann beispielsweise für jeden Winkelschritt die Standardabweichung berechnet werden, die darüber Aufschluss gibt, wie stark die einzelnen Versuche streuen. Außerdem kann durch die Analyse der Standardabweichungen untersucht werden, ob es Bereiche gibt in denen die Standardabweichung signifikant größer ist, im Vergleich zu anderen Bereichen. Tritt dieser Fall ein, kann es ein Indiz dafür sein, dass es epistemische Unsicherheiten gibt, die die Versuche systematisch beeinflussen. Dementsprechend sind in einem solchen Fall weitere Untersuchungen notwendig.

4.4.4 Auswahl und Bestimmung einer geeigneten Ähnlichkeitskennzahl zur Quantifizierung der Vorhersagegüte

Für die Aussagekraft der Validierung ist die Wahl einer geeigneten Ähnlichkeitskennzahl entscheidend, da sie quantifiziert, wie gut die physikalischen Toleranzuntersuchungen mit einem virtuellen Toleranzsimulationsmodell übereinstimmen. Wie Abschnitt 2.3.2 entnommen werden kann, gibt es unterschiedliche Ähnlichkeitskennzahlen, die prinzipiell verwendet werden können. Im Rahmen von Validierungen gibt es allerdings keine Kennzahl, die sich als universell einsetzbar erwiesen hat, vielmehr weisen

alle Kennzahlen spezifische Eigenheiten auf und gewichten Abweichungen zwischen zwei Datensätzen unterschiedlich.

Für die Validierung von Toleranzsimulationen für Mechanismen wird deshalb ein dreistufiger Prozess durchlaufen, der in [P30] vorgestellt wird:

1. Vorauswahl der Metriken

Beim ersten Schritt erfolgt die Vorauswahl der Metriken, wobei für eine Vergleichbarkeit der Werte ausschließlich dimensionslose, absolute Metriken berücksichtigt werden. Nach der Auswahl erfolgt die Berechnung sämtlicher Metriken.

2. Gegenüberstellung und Korrelationsbestimmung der Metriken

Im Anschluss erfolgt eine Gegenüberstellung der Metriken in einer Korrelationsmatrix, bei der sämtliche Korrelationen der unterschiedlichen Metriken dargestellt sind, wobei [165]:

$$\mathbf{P} \equiv \text{Corr}(\mathbf{X}) = \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & \dots & p_{1n} \\ p_{21} & p_{22} & \dots & p_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{n1} & p_{n2} & \dots & p_{nn} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & p_{12} & \dots & p_{1n} \\ p_{21} & 1 & \dots & p_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{n1} & p_{n2} & \dots & 1 \end{pmatrix} \quad (36)$$

mit:

$$p_{ij} = \frac{\text{Cov}(X_i, X_j)}{\sqrt{\text{Var}(X_i)\text{Var}(X_j)}} = \frac{\sigma_{ij}}{\sigma_i \sigma_j} \quad (37)$$

gilt. Anschließend wird der Mittelwert der jeweiligen Zeilensumme bestimmt und der maximale Wert bestimmt:

$$\overline{\rho}_{\max} = \max \left\{ \sum_{j=1}^n \rho_{ij} \right\} \quad (38)$$

3. Bestimmung der Metrik

Die Metrik mit dem größten Wert der Zeilensumme ist die am besten geeignete Metrik, da sie die größte Korrelation mit den anderen Metriken aufweist. Gibt es keine signifikanten Unterschiede, sind die unterschiedlichen Metriken für eine Validierung ähnlich gut geeignet.

4.4.5 Anpassung des Toleranzanalysemodells

Stellt sich im Rahmen der Validierung heraus, dass der geforderte Wert der ausgewählten Ähnlichkeitskennzahlen nicht erreicht werden kann, kann dies auf ein nicht geeignetes Toleranzanalysemodell, auf Messfehler oder auf einen ungeeigneten Prüfstand hindeuten. Um Messfehler auszuschließen sollten daher in einem ersten Schritt die Versuche wiederholt werden. Resultiert aus diesen Wiederholversuche keine Verbesserung, sollte der Prüfstand hinsichtlich epistemischer Unsicherheiten analysiert und gegebenenfalls angepasst werden. Führt dieser Schritt ebenfalls nicht zu dem erhofften Erfolg, muss für eine erfolgreiche Validierung das Toleranzanalysemodell angepasst werden. Dabei stehen dem Toleranzingenieur zwei Möglichkeiten zur Verfügung:

Berücksichtigung von weiteren physikalischen Effekten bei einem bestehenden Modell

Bestimmte physikalische Effekte werden im Rahmen der Modellbildung nicht berücksichtigt, da deren Modellierung mit einem teilweise stark erhöhten Aufwand und unter Umständen mit einer erhöhten Modellunsicherheit einhergehen. So werden beispielsweise Lochspiele bei Mechanismen selten modelliert, da aufgrund der statischen Unbestimmtheit für deren Lösungen oft numerische Verfahren verwendet werden müssen, da eine analytische Lösung des Gleichungssystems nicht immer möglich ist. Die Implementierung solcher Modelle erfordert daher einen höheren Aufwand und deren Lösung geht mit einer numerischen Unsicherheit einher. Ob sich der Mehraufwand lohnt, hängt von der jeweiligen Problemstellung ab und kann abschließend mit der Bestimmung der Ähnlichkeitskennzahl quantifiziert und bewertet werden.

Toleranzanalyse mit einem anderen Toleranzanalysemodell

Jedes Toleranzanalysemodell geht mit spezifischen Vor- und Nachteilen einher. So können beispielsweise einfache Vektormodelle sehr schnell implementiert und mit geringem rechnerischen Aufwand gelöst werden. Sie sind jedoch nicht in der Lage, höhere kinematische Elementpaare adäquat oder Formabweichungen abzubilden [166]. Genügt es nicht höhere Elementpaare vereinfacht abzubilden oder spielen Formabweichungen eine wichtige Rolle, ist es erforderlich andere Toleranzanalysemodelle zu verwenden, die in der Lage sind höhere Elementpaare, respektive Formabweichungen abzubilden. Der Einsatz der hybriden Toleranzrepräsentation hat sich in diesem Zusammenhang als probate Abbildungsform bewährt.

4.5 Einbindung spezifischer Abweichungsinformationen

Bei Toleranzanalysen ist nicht nur die Modellbildung ein wesentlicher Einflussfaktor auf die Belastbarkeit der Ergebnisse. Auch die Eingangsgrößen der Simulationen spielen eine entscheidende Rolle. Neben der Nenngeometrie, der Montagereihenfolge und damit verknüpfter Folgen auf Bauteilausrichtungen beeinflussen die angenommenen Toleranzen das Simulationsergebnis maßgeblich [167]. In der Praxis erfolgt die Toleranzallokation auf Basis von Expertenschätzungen oder mit Hilfe von Tabellenwerken, beziehungsweise spezifischen Normen (bspw. [168]). Diese Herangehensweise hat entscheidende Nachteile. So können sich Experten beispielsweise lediglich auf ihre bisher gesammelten Erfahrungen stützen. Dementsprechend schwer ist es, Toleranzen für neue Fertigungsverfahren oder Bauteile, die eine andersartige Gestalt aufweisen, abzuschätzen [169, 170]. Aktuell kann diese Entwicklung in der Additiven Fertigung beobachtet werden.

Dem Toleranzingenieur stehen zwei Möglichkeiten zur Verfügung spezifische Abweichungsinformationen in den Toleranzsimulationen zu berücksichtigen, sodass die Güte der Toleranzsimulationen verbessert wird.

Durch die **Einbindung von Messdaten** aus (Vor-)Serienmessungen in die Toleranzanalyse, können nicht nur die in der Realität auftretenden Schwankungen der geometrischen Größen, sondern auch spezifische geometrische Abweichungen, die auf ein Fertigungsverfahren zurückzuführen sind, virtuell abgebildet werden. So können die Folgen von geometrischen Abweichungen bei Fertigungswerkzeugen oder Formen erkannt und berücksichtigt werden. Soll die epistemische Unsicherheit weiter reduziert werden, ist es möglich, durch die Berücksichtigung von Einzelpunktmessunsicherheiten [171] jedem einzelnen Messpunkt eine spezifische Unsicherheit zuzuordnen und anschließend in der Toleranzsimulation zu berücksichtigen. In [P24] wird dazu ein Vorgehen vorgestellt und umgesetzt, das eine Berücksichtigung von Einzelpunktmessunsicherheiten in der Toleranzanalyse ermöglicht. Bei der einer Einzelpunktmessunsicherheit wird jedem einzelnen Messpunkt eine individuelle, ermittelte Messunsicherheit zugeordnet [172].

Bei dem in Bild 40 dargestellten Vorgehen werden im ersten Schritt für n Bauteile m Bauteilmessungen an o Messpunkten durchgeführt, sodass für jedes Bauteil an jedem einzelnen Messpunkt die Einzelpunktmessunsicherheit bestimmt werden kann. Dafür ist es notwendig, dass $m \geq 20$

Bauteilmessungen durchgeführt werden, um für jeden Messpunkt die spezifische zufällige Streuung der Messergebnisse, bestimmt werden kann.

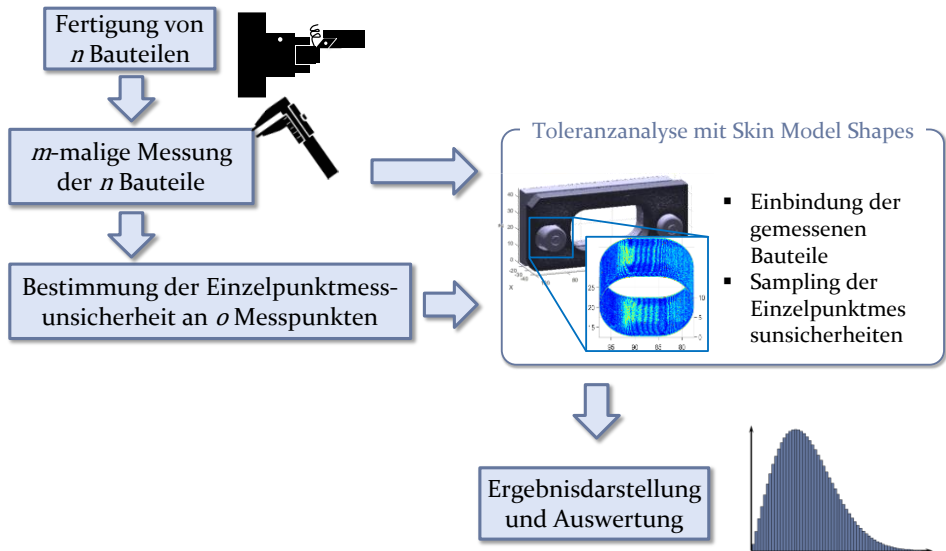


Bild 40: Einbindung von Bauteilmessungen und Berücksichtigung von Einzelpunktmessunsicherheiten in der Toleranzanalyse nach [P19]

Die ermittelten Messergebnisse können bei der sich anschließenden virtuellen Toleranzanalyse integriert werden, wobei neben den Bauteilabweichungen auch die Einzelpunktmessunsicherheiten, die an jedem einzelnen Messpunkt individuell streuen, berücksichtigt werden. Um eine Berücksichtigung der Einzelpunktmessunsicherheiten bei den virtuellen Toleranzanalysen zu ermöglichen, hat sich der Einsatz von Skin Model Shapes als sinnvoll erwiesen. Nur durch den Einsatz von punktbasierten Toleranzanalyseverfahren können unterschiedliche Einzelpunktmessunsicherheiten in den virtuellen Toleranzanalysen berücksichtigt werden, da jedem einzelnen Messpunkt, die in ihrer Gesamtheit ein Bauteil repräsentieren, Streuungen aufgrund der Messunsicherheit berücksichtigt werden können. Darüber hinaus ist es möglich, Korrelationen der Einzelpunktmessunsicherheiten zu berücksichtigen.

Nachteilig an diesem Verfahren ist, dass sich ein relativ hoher Messaufwand ergibt, um statistische Aussagen über auftretende Abweichungen und Messunsicherheiten treffen zu können. Darüber hinaus ist die Einbindung von Messdaten erst möglich, sobald Serienwerkzeuge unter Bedingungen, die in der Serienfertigung bestehen, genutzt werden können.

Da dies erst spät im Produktentwicklungsprozess möglich ist, haben Ingenieure nur noch minimalen Spielraum bei der Änderung einzelner Bauteiltolerierungen.

Neben den angesprochenen Schwächen bietet diese Herangehensweise entscheidende Vorteile. Zum einen können spezifische geometrische Bauteilabweichungen erfasst werden. Dies spielt vor allem beim Gießen eine wichtige Rolle, da bei diesen Fertigungsverfahren die Bauteilgeometrie maßgeblich durch die verwendeten Formen beeinflusst wird. Beim Spritzgießen können beispielsweise Bauteile mit einer sehr hohen Wiederholgenauigkeit produziert werden [173]. Weisen jedoch die Formen geometrische Unzulänglichkeiten auf, beeinflussen diese alle mit der Form gefertigten Bauteile.

Darüber hinaus bietet die systematische Integration von Messdaten im Kontext von Industrie 4.0 das Potential, dass durch echtzeitfähige Toleranzsimulationen die Qualität von Produkten gesteigert werden kann, indem Bauteile gezielt zusortiert und gepaart werden [P12, 174].

Wesentlich früher im Produktentwicklungsprozess können die Eingangsgrößen der Toleranzsimulation durch die **Einbindung von Fertigungsprozesssimulationen** qualitativ verbessert werden. Ein Konzept, das in [P22] vorgestellt und umgesetzt wurde ist schematisch in Bild 41 dargestellt. Dabei sieht das Vorgehen vor, dass, anhand eines spezifischen Versuchsplans, validierte Fertigungsprozesssimulationen für die virtuelle Fertigung von Bauteilen zu nutzen. Anschließend werden die für die Toleranzsimulation relevanten Größen virtuell gemessen und ein Metamodell erzeugt, das den Zusammenhang zwischen spezifischen Prozessgrößenkonstellationen und damit einhergehenden geometrischen Bauteilabweichungen mathematisch beschreibt. Danach kann das Metamodell genutzt werden um geometrische Bauteilabweichungen auf Basis einer spezifischen Prozessparameterkonstellation zu prognostizieren. Als Eingangsgrößen für das Metamodell dienen schwankende Prozessparameter. Bauteile, für die keine validierten Fertigungssimulationen vorliegen, können auf konventionelle Weise eingebunden werden, sodass bei ihnen die Toleranzwerte konventionell innerhalb der Spezifikationsgrenzen gesampelt werden.

Dieses Vorgehen kann bereits eingesetzt werden, sobald validierte Fertigungsprozesssimulationen zur Verfügung stehen. Da im Rahmen der Auslegung der Fertigungsprozesse oft Fertigungsprozesssimulationen genutzt werden, entsteht meist ein sehr geringer Mehraufwand, da diese Simulationen genutzt werden können. Darüber hinaus kann, durch die explizite

Berücksichtigung von streuenden Prozessparametern, mit Hilfe von Beitragsleisteranalysen, der Einfluss einzelner Prozessgrößen quantifiziert werden [P27]. Dies hat den Vorteil, dass hier in Absprache mit Experten aus der Fertigung die Fertigungsprozessauslegung robuster gestaltet werden kann.

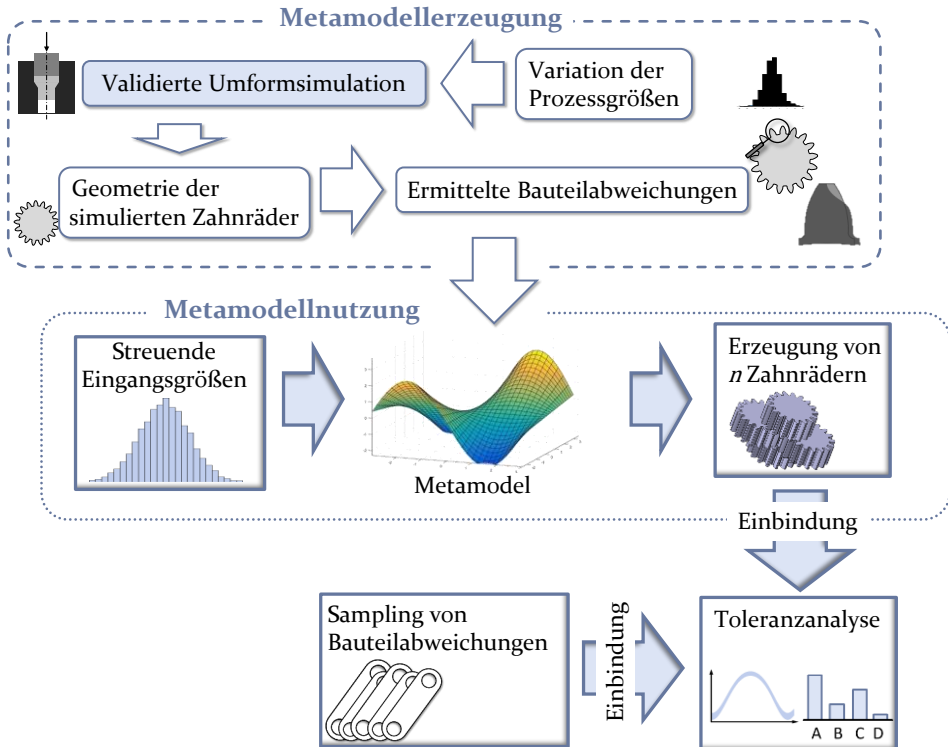


Bild 41: Berücksichtigung von fertigungsspezifischen Bauteilabweichungen in der Toleranzsimulation durch die Einbindung von Fertigungsprozesssimulationen

Eine Herausforderung bei diesem Verfahren ist, dass Fertigungsprozesssimulationen ausschließlich auf Basis von validierten Simulationen integriert werden sollten. Geschieht dies nicht, ist es unklar welchen Einfluss die Unsicherheiten bei der Simulation der Fertigungsprozesse haben und inwieweit sich diese auswirken. Darüber hinaus bietet die Integration der Fertigungsprozesssimulationen ein enormes Potential. Toleranzen können nicht nur nach dem Credo „first time right“ vergeben werden, da die Fähigkeiten eines Prozesses prädiktiv abgeschätzt werden können. Auch eine Optimierung und gezielte Steuerung der relevanten Prozessparameter, ausgehend von einer Beitragsleisteranalyse der Prozessparameter, ist denkbar.

4.6 Beitragsleisteranalyse

Für die Quantifizierung des Einflusses einzelnen Toleranzen haben sich in diesem Zusammenhang die in Abschnitt 4.6 vorgestellten Beitragsleisteranalysen als probates Mittel herausgestellt. Da jedoch unterschiedliche Verfahren, die spezifische mathematische Annahmen voraussetzen, zur Bestimmung der Beitragsleister entwickelt wurden, stellt sich die Frage, welches Verfahren für den jeweiligen Anwendungsfall am besten geeignet ist. Um dem Entwickler eine Hilfestellung zu geben, wurde in [P21], ausgehend von der systematischen Gegenüberstellung und dem Vergleich unterschiedlicher Verfahren eine Entscheidungshilfe entwickelt, die dazu dient, ein geeignetes Verfahren zur Beitragsleisterbestimmung auszuwählen.

Auf die einzelnen Schritte bei der Wahl eines geeigneten Verfahrens für die Beitragsleisteranalyse, die in Bild 42 dargestellt sind, wird im Folgenden eingegangen. Das Auswahlverfahren geht auf die theoretischen Überlegungen und die Anwendung der Verfahren für spezifische Problemstellungen in [P21] zurück. Ausgangspunkt ist dabei die Bewertung hinsichtlich des Berechnungsaufwands der Simulationen. Ist der Rechenaufwand hoch, sollte geprüft werden, ob lediglich normalverteilte Ein- und Ausgangsgrößen betrachtet werden. Ist dies der Fall, sollten Beitragsleisteranalysen mit Hilfe der Fuzzy-Arithmetik berechnet werden, sofern das zu untersuchende System statisch unbestimmt ist. Diese Methode sollte ebenfalls verwendet werden, wenn nicht-normalverteilte Größen bei einer numerisch aufwendigen Modellbildung auftreten. Ist das System statisch bestimmt, sollte im Gegensatz dazu die High-Low-Median-Methode verwendet werden, da hier die Vorteile einer einfachen Modellbildung und -auswertung überwiegen. [P21]

Ist die Modellauswertung mit einem geringen numerischen Aufwand verbunden, stellt sich die Frage ob bestehende Daten analysiert werden sollen. Dies kann beispielsweise der Fall sein, wenn Messdaten in die Simulationen integriert werden. In diesem Fall sollte auf dichte-basierte Verfahren zurückgegriffen werden, da bei dichte-basierten Verfahren das Sampling und die Auswertung der Berechnungsmodelle nicht notwendig sind. Hier können daher bereits bestehende Datensätze genutzt werden. Wird nicht auf bestehende Daten zurück gegriffen stellen Varianz-basierte Verfahren in der Regel das Mittel Wahl dar. Da hier eine ideale Stichprobengröße für ein spezifisches Simulationsmodell gewählt werden, dass bei numerisch nicht aufwendigen Simulationen schnell ausgewertet werden kann. [P21]

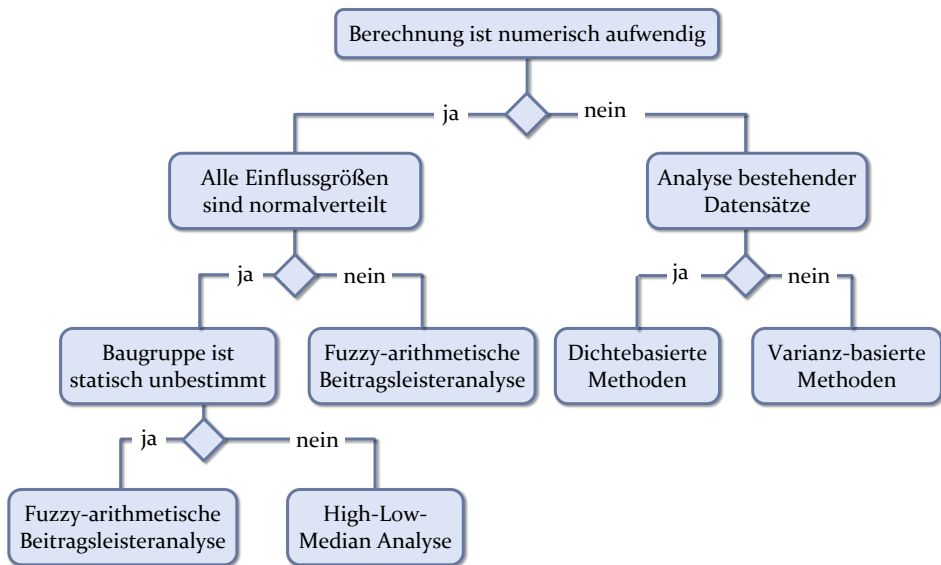


Bild 42: Auswahl eines geeigneten Verfahrens zur Beitragsleiteranalyse nach [P21]

Vorausgesetzt, dass das Sampling bei einem Toleranzanalysemodell gezielt beeinflusst werden kann, können die hier vorgestellten Methoden mit unterschiedlichen Sampling-basierten Toleranzanalysen kombiniert werden. Auch eine Kopplung mit kommerzieller CAT-Software ist dann möglich. Kann ein Sampling nicht gezielt beeinflusst werden, kann stets auf dichte-basierte Verfahren zurückgegriffen werden, da hier lediglich die Ein- und Ausgangsgrößen analysiert werden. [P21]

4.7 Zielabgleich und weitere Schritte

Nachdem der Toleranzanalyseprozess mit validierten Verfahren durchlaufen wurde und gegebenenfalls spezifische Abweichungsinformationen in die Simulation eingebunden wurden, liegt das Ergebnis der Toleranzanalyse vor. Dieses Ergebnis kann nun mit den geforderten Qualitätsanforderungen an das Schließmaß abgeglichen werden. Im Regelfall wird hierbei ein Qualitätsniveau mit einem c_{pk} von 1,0 zu Grunde gelegt [75]. Dies entspricht bei einer normalverteilten Schließmaß einer Streubreite von $\pm 3 \sigma$ und einer Fehlerrate von 0,00034% [175]. Liegt eine nicht-normalverteilte Streuung bei dem berechneten Schließmaß vor, was mit entsprechenden statistischen Tests überprüft werden sollte (bspw. in [58]), kann die Ausschussrate mit der Percentil-Methode bestimmt werden [61].

Wird das geforderte Qualitätsziel erreicht und die zulässige Ausschussquote unterschritten, kann der Freigabeprozess erfolgen und die Ergebnisse können dokumentiert werden. Zu der vollständigen Dokumentation gehört zwingend die statistische Beschreibung der Eingangs- und der Ausgangsgrößen, sowie Dokumentation des Berechnungsmodells, welches für die statistische Toleranzanalyse genutzt wurde. Idealerweise werden die erzeugten und berechneten Stichproben der Ein- und Ausgangsgrößen ebenfalls dokumentiert. Dies kann von Bedeutung sein, da bei einer erneuten statistischen Toleranzsimulation für jede Eingangsgröße erneut Zufallszahlen erzeugt werden, die von den Zufallszahlen der ursprünglichen Stichprobe abweichen.

Werden die geforderten Qualitätsziele nicht erreicht, kann auf die in Tabelle 2 dargestellten Maßnahmen zurückgegriffen werden. In Abstimmung mit dem gesamten Produktentwicklungsteam sollten stets Anpassungen gewählt werden, die mit geringen Änderungskosten einhergehen.

Das gesamte Vorgehen ist als iterativer Prozess zu verstehen, dessen Ergebnis von dem im Produktentwicklungsprozess vorhandenen Wissen und den daraus resultierenden Eingangsgrößen der Simulationen abhängt. Verändern sich die angenommenen Eingangsgrößen während des Entwicklungsprozesses oder im Serienanlauf, beziehungsweise in der Serienfertigung, ist eine Aktualisierung der Simulationen erforderlich. So kann sichergestellt werden, dass die Simulationen die Realität bestmöglich abbilden.

5 Praktische Umsetzung des Vorgehens

Das folgende Kapitel dient dazu, dem Leser die einzelnen Schritte beim Einsatz und der Validierung virtueller Absicherungsmethoden für Mechanismen an einem Anwendungsbeispiel zu verdeutlichen. Die Kinematik einer Röntgenblende (auch Kolimatorblende) dient hierbei als Demonstrator, wobei ausdrücklich darauf hingewiesen wird, dass diese Arbeit nicht den Anspruch erhebt ein Medizintechnikprodukt zu verbessern.

Wie in Bild 43 dargestellt, verlässt die fächerförmige Röntgenstrahlung die Röntgenquelle, durchstrahlt den Patienten und wird anschließend vom Detektor erfasst. Dabei befinden sich die Röntgenquelle, die Röntgenblende und der Detektor in der so genannten Gantry, die um den Patienten rotiert, während dieser auf dem Patiententisch translatorisch durch die Gantry geschoben wird. Bei einer Rotation der Gantry, die circa eine halbe Sekunde dauert [176], werden mehrere tausend Bilder erfasst. Anschließend können aus den erfassten Daten sowohl Querschnittsbilder, als auch dreidimensionale Bilder aus unterschiedlichen Blickwinkeln durch eine Überlagerung der Rohdaten erzeugt werden [177].

Da die Röntgenblende maßgeblich den Anteil der Röntgenstrahlung bestimmt, der der Patient ausgesetzt ist, ist der zeitlich Verlauf des Abstands zwischen Röntgenblende und umgebenden Bauteilen besonders relevant, da die dadurch umschlossene Fläche die Röntgenstrahlung limitiert. Daher wird dieser Abstand im Folgenden als zeitabhängiges Schließmaß untersucht.

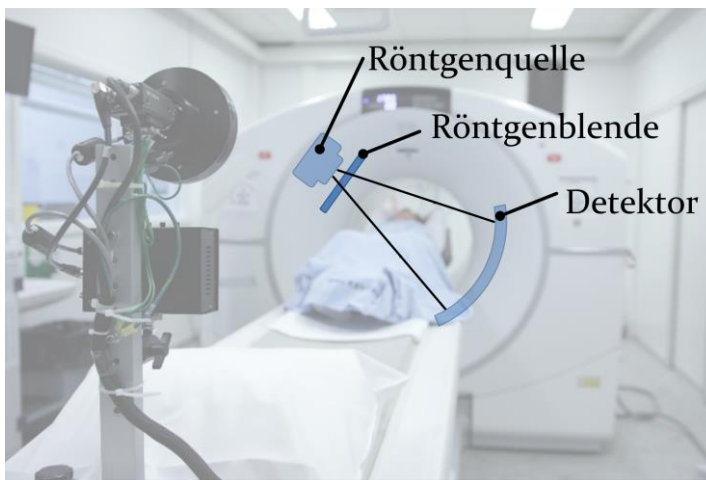


Bild 43: Anordnung der Röntgenblende in einem Computertomographen

Sämtliche Bauteile der Röntgenblendenkinematik, die in Bild 44 dargestellt sind, werden vereinfacht als Starrkörper modelliert. Darüber hinaus wird die Reibung an allen Kontaktpunkten vernachlässigt, da die Simulation von Reibungsvorgängen und die Annahme von Reibungskoeffizienten mit einer nicht unerheblichen Unsicherheit einhergeht [178]. Weiterhin wird vereinfacht angenommen, dass auf die Bauteile der Röntgenblendenkinematik keine externen Kräfte und Beschleunigungen wirken. Um dennoch untersuchen zu können, ob das Lochspiel zwischen den einzelnen Bolzen und Löchern Auswirkungen auf Bewegungsverhalten hat, wird eine Möglichkeit vorgehesehen, eine Kraft an der Röntgenblende in negativer Y-Richtung einzubringen. Dadurch kann das Lochspiel systematisch in eine Richtung ausgenutzt werden.

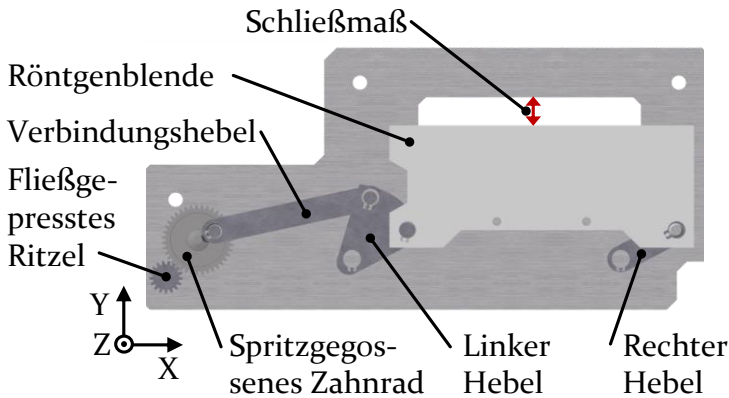


Bild 44: Einzelteile der Röntgenblendenkinematik

Ausgehend von einer Einflussanalyse wird im Folgenden eine Nennmaßoptimierung und anschließend eine virtuelle Toleranzanalyse durchgeführt und validiert. Am Ende des Kapitels werden die Ergebnisse und die Übertragbarkeit des Vorgehens auf unterschiedliche Anwendungsfälle diskutiert.

5.1 Einflussanalyse

Bei der Einflussanalyse, die eine Sammlung und Klassifizierung relevanter Einflussgrößen darstellt, wird erfasst welche Einflussfaktoren das zeitabhängige Schließmaß beeinflussen. Bei der Betrachtung der in Bild 45 dargestellten Einflussanalyse wird deutlich, dass die unterschiedlichen Toleranzanalysemodelle, auf die in Abschnitt 5.3 detailliert eingegangen wird, nicht alle Einflussgrößen abbilden können. Prinzipiell können mit dem Konzept der Skin Model Shapes die meisten Einflussfaktoren abgebildet

werden, gefolgt von dem vektoriellen Modell, bei dem Lochspiele berücksichtigt werden. Die wenigsten Einflussgrößen können mit dem vektoriellen Toleranzanalysemodell abgebildet werden. Inwieweit sich dies in der Güte der Modellbildung widerspiegelt, wird im Rahmen der Validierung im Folgenden analysiert und diskutiert.

Weiterhin können bei den physikalischen Toleranzuntersuchungen mit dem Prüfstand nicht alle Einflussgrößen gezielt gesteuert werden. Die idealen Bauteilabmaße können beispielsweise nicht untersucht werden, da eine Fertigung ohne Abweichungen nicht möglich wäre. Andere Einflussgrößen können bei den physikalischen Untersuchungen nur bedingt analysiert werden. So kann beispielsweise der Einfluss der Schwerkraft nur durch die Einbringung einer Ersatzlast repräsentiert werden, da die Bauteilausrichtung innerhalb des Prüfstands nicht beliebig möglich ist..

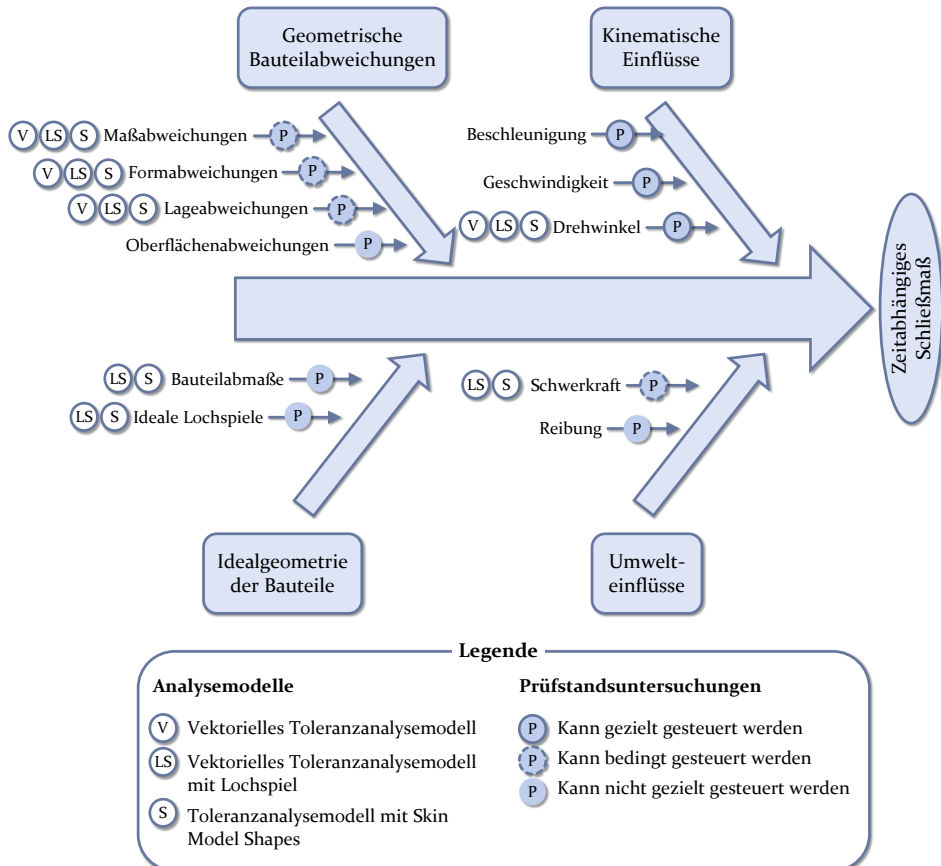


Bild 45: Einflüsse auf das Schließmaß der Röntgenblendenkinematik

5.2 Nennmaßoptimierung der Röntgenblendenkinematik

Bei der Nennmaßoptimierung werden die in Bild 46 dargestellten Design Variablen (a_1, a_2, b, c und d) optimiert. Die Getriebestufe, bestehend aus Ritzel und Zahnrad, wird bei dieser Nennmaßoptimierung nicht untersucht, da Übersetzungsfehler nur einen indirekten Einfluss auf das zyklische Bewegungsverhalten der Röntgenblende haben. Somit wird ein idealer gleichförmiger Drehwinkel φ_2 angenommen.

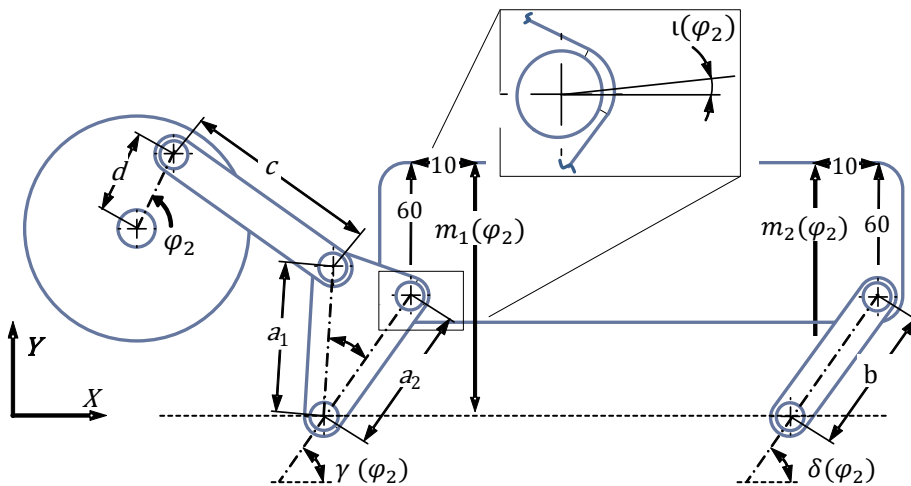


Bild 46: Maße des Demonstrators

Für die Optimierung wird im Folgenden die Schließmaßgleichung aufgestellt und das Optimierungsproblem beschrieben. Anschließend erfolgt, nach der Auswahl eines geeigneten Optimierungsalgorithmus, die Optimierung der Nennmaße und die Ergebnisinterpretation.

5.2.1 Formulierung des Optimierungsproblems

Da das Konzept des Mechanismus bereits vollständig definiert ist, die Umgebungsbauteile jedoch noch nicht konstruiert worden sind, werden die beiden Maße m_1 und m_2 , die den Abstand in Y-Richtung beschreiben, eingeführt. Unter der Annahme, dass die Gelenke spielfrei sind gilt:

$$m_1(\varphi_2) = \sin(\gamma(\varphi_2)) * a_2 + \cos\left(\frac{\pi}{2} - \text{atan}\left(\frac{10}{60}\right) - \iota(\varphi_2)\right) * \sqrt{60^2 + 10^2} \quad (39)$$

$$m_2(\varphi_2) = \sin(\delta(\varphi_2)) * b + \cos\left(\frac{\pi}{2} + \text{atan}\left(\frac{10}{60}\right) + \iota(\varphi_2)\right) * \sqrt{60^2 + 10^2}. \quad (40)$$

In Tabelle 4 sind neben den initialen und den optimierten Bauteil-Nennmaßen (Design-Variablen) auch deren Unsicherheiten, sowie deren Optimierungsbereiche dargestellt. Innerhalb der Optimierung streuen die Design-Variablen symmetrisch um ihr Nennmaß normalverteilt mit einer Streubreite von $\pm 3 \sigma$. Um recheneffizient zu einem ein stabilen Optimierungsergebnis zu gelangen, wird ein skaliertes LHS-Sampling mit 10 000 Samples verwendet. Bei der Optimierung wird eine Verbesserung des Optimierungsziels angestrebt, wobei eine Gutteilrate von 95 % gefordert wird. Dies bedeutet, dass bei lediglich 5 % der virtuell erzeugten Baugruppen eine oder mehrere Nebenbedingungen verletzt werden dürfen. Bei den Nebenbedingungen, die bei der Optimierung sichergestellt werden müssen, ist es erforderlich kontinuierliche Größen, wie beispielsweise den Weg, den die Röntgenblende zurücklegt, ebenso wie binäre Zustände, wie beispielsweise ein Klemmen des Mechanismus, zu berücksichtigen. Dies hat zur Folge, dass die Ausschussrate durch ein empirisches Schätzverfahren [P13] ermittelt wird.

Optimierungsziel

Um die Position der Röntgenblende möglichst genau einstellen zu können soll sich bei einem vorgegebenen Drehwinkel der Abstand der Röntgenblende zu den Umgebungsbauteilen möglichst geringfügig ändern. Daher wird eine Minimierung der maximalen Geschwindigkeit an beiden Schließmaßen gefordert:

$$\langle \min \left(\max \left(\frac{d}{d\varphi_2} m_{k,i}(\varphi_2) \right) \right) \rangle. \quad (41)$$

Dabei gilt sowohl beim Optimierungsziel als auch bei den Nebenbedingungen:

$$\varphi_2 \in [0, 2\pi[\quad (42)$$

$$k \in [1, 2] \quad (43)$$

$$i \in [1, n], \text{ für } n \text{ samples} \quad (44)$$

Neben dem Optimierungsziel wird bei der Optimierung die Erfüllung der folgenden Nebenbedingungen gefordert:

- **Mindesthub der Blende:** Die Röntgenblende muss in der Lage sein einen Mindesthub von 14 mm zurück zu legen, sodass eine angemessene Bestrahlung des Patienten sichergestellt wird:

$$iq(1, i) = \begin{cases} 1, & \text{für } m_{k,i,max} - m_{k,i,min} \geq 14mm \\ 0, & \text{sonst} \end{cases} \quad (45)$$

- **Ausschluss lokaler Extrema der Bewegungskurve:** Es muss gewährleistet werden, dass die Bewegungskurve innerhalb eines Bewegungszyklus zwischen dem unteren und dem oberen Umkehrpunkt streng monoton steigt, beziehungsweise fällt:

$$iq(2, i) = \begin{cases} 1, & \text{für } m_{k,i}(\varphi_{i,0}) < m_{k,i}(\varphi_{i,1}) \wedge m_{k,i}(\varphi_{i,1}) > m_{k,i}(2\pi + \varphi_{i,0}) \text{ für } \varphi_{i,0} < \varphi_{i,1} \\ 1, & \text{für } m_{k,i}(\varphi_{i,0}) < m_{k,i}(2\pi + \varphi_{i,1}) \wedge m_{k,i}(\varphi_{i,1}) > m_{k,i}(\varphi_{i,0}) \text{ für } \varphi_{i,0} > \varphi_{i,1} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases} \quad (46)$$

Mit diesen Extrema:

$$m_{k,i}(\varphi_{i,0}) \leq m_{k,i}(\varphi) \text{ und} \quad (47)$$

$$m_k(\varphi_{i,1}) \geq m_{k,i}(\varphi) \quad (48)$$

- **Parallelität der Röntgenblende:** Um eine gleichmäßige Bestrahlung zu gewährleisten, wird eine maximale Parallelitätsabweichung von 1 mm zugelassen:

$$iq(3, i) = \begin{cases} 1, & \text{wenn } |m_{1,i}(\varphi) - m_{2,i}(\varphi)| \leq 1 \text{ mm} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases} \quad (49)$$

- **Mechanismus klemmt nicht.** Nur wenn sichergestellt ist, dass der Laufgrad des Mechanismus $F = 1$ ist, ist gewährleistet, dass der Mechanismus sich dreht. Bei abweichungsbehafteten Bauteilen müssen zusätzlich die Ergebnisse der Nennmaßoptimierung reelle Zahlen. So kann mathematisch ein Klemmen ausgeschlossen werden.

$$iq(4, i) = \begin{cases} 1, & \text{wenn } a_{1,i,opt}, a_{2,i,opt}, b_{i,opt}, c_{i,opt}, d_{i,opt}, e_{i,opt} \in \mathbb{R} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases} \quad (50)$$

Wie den Formeln entnommen werden kann, wird die Erfüllung jeder Nebenbedingung für jedes Sample durchgeführt. Anschließend kann die Ausschussrate $\hat{z}$ bestimmt werden, wobei diese kleiner gleich der maximal geforderten Ausschussrate z_{zul} sein muss:

$$1 - \frac{\sum_{i=1}^n \prod_{k=1}^4 iq(k, i)}{n} = \hat{z} \leq z_{zul} \quad (51)$$

Für die Nennmaßoptimierung der Röntgenblendenkinematik wird eine maximale Ausschussrate von $z_{zul} = 5\%$ gefordert. Nach der Implementierung der Zielfunktion und der Nebenbedingungen können mit einem geeigneten Optimierungsalgorithmus die optimalen Nennmaße identifiziert werden.

5.2.2 Anwendung eines Optimierungsalgorithmus und Ergebnisinterpretation

Für die Optimierung wird ein Partikelschwarmoptimierer [179] verwendet, für den die in Tabelle 3 genannten Einstellungen gewählt wurden. Da es sich bei dem Optimierungsalgorithmus um einen problemunabhängiges Optimierungsverfahren handelt, wurde dieses metaheuristische Verfahren gewählt.

Tabelle 3: Optimierungsparameter bei der Nennmaßoptimierung

Parameter	Wert
Größe der Stichprobe bei Optimierungsvorgang	10 000
Anzahl der Partikel der Population	100
Tolerierte Verletzung der Zielfunktion	1×10^{-3}
Tolerierte Verletzung der Nebenbedingungen	1×10^{-6}

Tabelle 4: Design Variablen des Mechanismus und deren Eigenschaften

Nennmaß	Ursprüngliches Nennmaß	Optimierungsbereich	Unsicherheiten	Optimiertes Nennmaß
a ₁	35 mm	[30, 40] mm	±0,3 mm	35,1 mm
a ₂	35 mm	[30, 40] mm	±0,1 mm	34,5 mm
b	35 mm	[30, 40] mm	±0,1 mm	34,5 mm
c	80 mm	[70, 90] mm	±0,3 mm	89,8 mm
d	16 mm	[10, 30] mm	±0,2 mm	10,3 mm
ε	45°	[30, 50] °	±0,5°	44,7 °

In Tabelle 4 sind die ursprünglichen Nennmaße, deren Optimierungsbereiche und die spezifischen Nennmaßunsicherheiten dargestellt. Darüber hinaus sind ebenfalls die Nennmaße nach der Optimierung dargestellt.

Bei der Betrachtung der einzelnen Maße wird deutlich, dass nach der Anwendung des Optimierungsalgorithmus Nennmaße gewählt wurden, die auf den ersten Blick nicht intuitiv erscheinen. So wurde beispielsweise beim linken Hebel für den linken Lochabstand a_1 ein anderes Maß, als beim rechten Lochabstand a_2 gewählt. Offensichtlich führt diese Veränderung jedoch zu einem robusteren Systemverhalten.

Um zu verdeutlichen welchen Einfluss die Nennmaßoptimierung auf das Bewegungsverhalten des Mechanismus hat, ist der Weg- und der Geschwindigkeitsverlauf für den linken Untersuchungspunkt vor (Bild 47) und nach (Bild 48) der Nennmaßoptimierung dargestellt.

Bei der Darstellung ist jeweils das Spektrum der 10 000 betrachteten Samples dargestellt, wobei in Rot die Bewegungs- und Geschwindigkeitskurven der Nennmaßkonfiguration dargestellt sind. Aufgrund der geometrischen Unsicherheiten ergeben sich $n = 10\,000$ individuelle Kurven. Nach der Nennmaßoptimierung (Bild 48) konnte zum einen die Ausschussrate auf unter fünf Prozent reduziert werden.

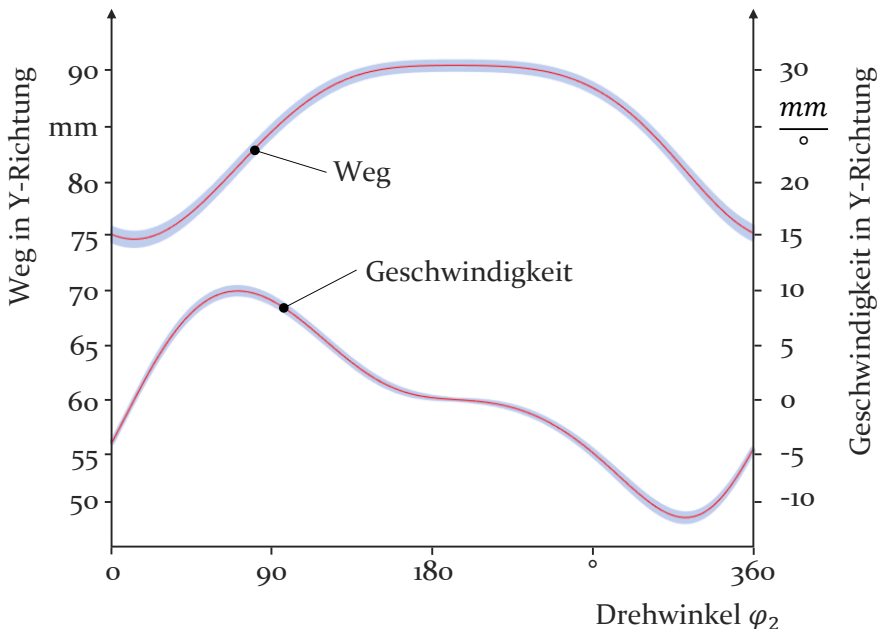


Bild 47: Weg- und Geschwindigkeitsverlauf vor der Nennmaßoptimierung

Zum anderen ist deutlich erkennbar, dass die Geschwindigkeitskurve gleichmäßiger verläuft, was dazu führt, dass die Wegkurve kein Plateau

beschreibt. Zusätzlich kommt hinzu, dass aufgrund des gleichmäßigeren Verlaufs der Geschwindigkeitskurve die Beschleunigungen geringer sind.

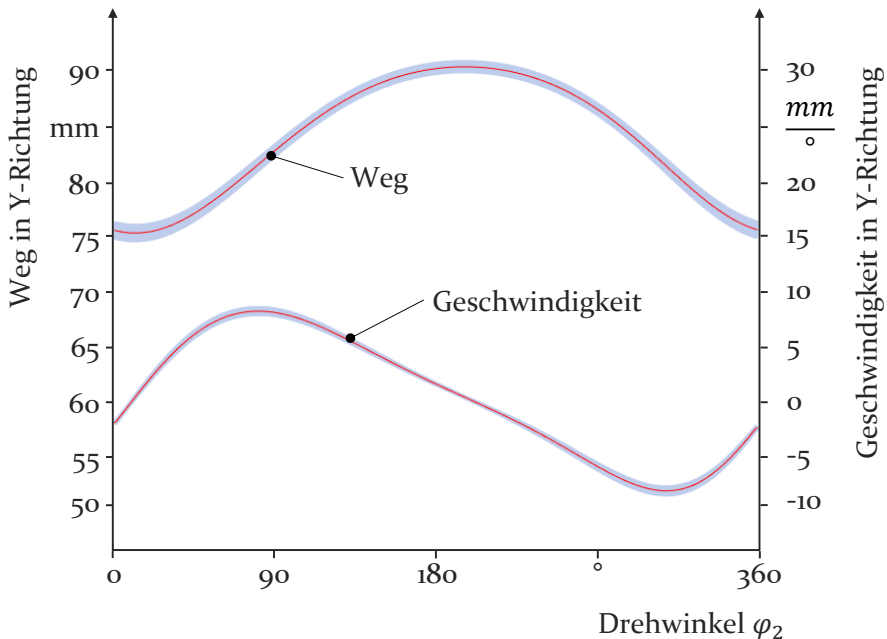


Bild 48: Weg- und Geschwindigkeitsverlauf nach der Nennmaßoptimierung

Das zentrale Ergebnis der Nennmaßoptimierung ist, dass die Nennmaße der Hebel derart gewählt werden, dass trotz unvermeidbarer geometrischer Abweichungen, sämtliche kinematische Anforderungen an den Mechanismus erfüllt werden. Im Sinne des *Robust Design* nach TAGUCHI ist dies die ideale Ausgangssituation, da sich die Eigenschaften des Mechanismus durch eine systematische Nennmaßspezifikation gezielt einstellen lassen.

5.3 Toleranzanalysemodelle der Röntgenblendenkinematik

Im Rahmen der Validierung werden drei unterschiedliche Toleranzanalysemodelle, auf die im Folgenden eingegangen wird, einander gegenübergestellt.

5.3.1 Hybrides Toleranzanalysemodell

Zum einen kommt ein **hybrides Toleranzanalysemodell** zum Einsatz, bei dem die Getriebestufe entsprechend dem in Abschnitt 4.3.2 vorge-

stellten Vorgehen mit Hilfe von Punktwolken diskretisiert und abgebildet wird, während die Hebel der Kinematik mit Vektoren repräsentiert werden.

Da es sich um einen planaren Mechanismus handelt, erfolgt die Repräsentation der Evolvente vereinfacht für den 2-dimensionalen Fall. Dazu wird die Evolvente jedes Zahnrads zunächst mit äquidistant über die Evolvente verteilten Punkten diskretisiert. In einem Pre-Processing-Schritt werden Zahnräder, mit spezifischen Abweichungen virtuell erzeugt, sodass sich wie in Bild 49 veranschaulicht eine geometrische Abweichung der Evolvente innerhalb der Toleranzzone ergibt.

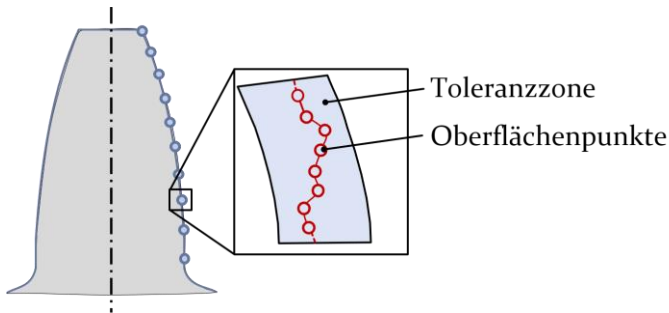


Bild 49: Abweichungsbehaftete Evolvente

Die Kontaktberechnung erfolgt nach dem von NAESCHER in [180] und von SCHLEICH in [166] verwendetem Vorgehen, bei dem die Zahnräder zunächst initial positioniert werden, sodass die Getriebestufe sich im Eingriff befindet. Anschließend rotieren, bei dem in Bild 50 schematisch dargestellten, Kontaktalgorithmus alle Punkte $P_{Ritzel,i}$, die das Ritzel repräsentieren, um einen kleinen Winkel φ_1 um die Achse des Ritzels. Um den initialen Zustand, bei dem beide Zahnräder im Eingriff sind, ohne sich virtuell zu durchdringen, wiederherzustellen, wird der Winkel φ_2 , um den sich das Zahnrad dreht bestimmt. Dazu wird der Abstand zwischen den Punkten des Ritzels und der Evolvente des Zahnrads bestimmt. Bei der Abstandsbestimmung wird der Abstand auf einem Kreisbogen bestimmt, wobei die Achse des Ritzels als Kreismittelpunkt dient. Der Anfangspunkt ist jeweils ein Punkt $P_{Ritzel,i}$, während der Endpunkt der Schnittpunkt des Kreisbogens mit der Zahnradevolvente ist. Verbindet der Kreisbogen keine zwei Punkte, wird zwischen den nächstgelegenen Punkten linear interpoliert, sodass ein Schnittpunkt, der auf der Interpolationsgeraden liegen muss, bestimmt werden kann. Ergibt sich kein Schnittpunkt mit der Zahnradevolvente wird kein Abstand bestimmt.

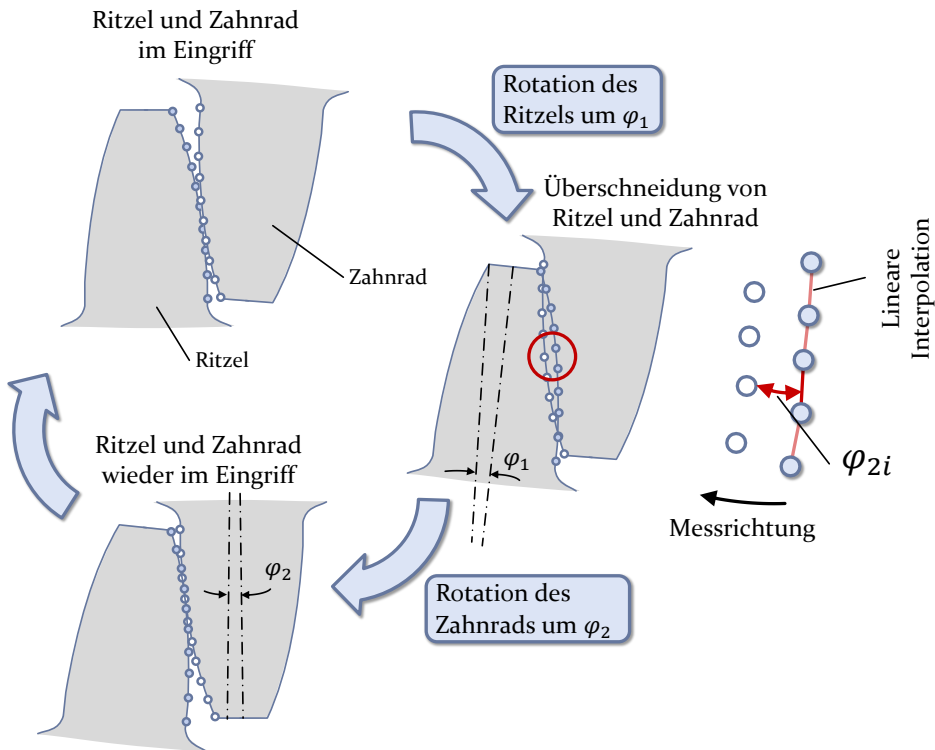


Bild 50: Schematische Darstellung der Kontaktalgorithmus der Getriebestufe

Aus den so berechneten Abständen kann anschließend jeweils ein Drehwinkel φ_{2i} bestimmt werden. Für die Bestimmung des Zahnradrehwinkels φ_2 , wird der maximale Drehwinkel bestimmt:

$$\varphi_2 = \max(\varphi_{2i}) . \quad (52)$$

Eine detailliertere Beschreibung des Kontaktalgorithmus und eine Möglichkeit zur Erzeugung von abweichungsbehafteten Evolventen kann [S1] entnommen werden. Nach der Bestimmung des Zahnradrehwinkels φ_2 , wird dieser als Eingangsgröße für das vektorielle Teilmodell verwendet. Neben dem Drehwinkel werden die zulässigen Abweichungen der Hebel und der Anschlussgeometrie, an der die Hebel befestigt sind, als Eingangsgrößen für die vektorielle Toleranzanalyse verwendet. Für diese Repräsentationsform werden die Längen und die Ausrichtung der Vektoren variiert, sodass geometrische Abweichungen abgebildet werden können.

5.3.2 Hybrides Toleranzanalysemodell mit Lochspiel

Zusätzlich wird ein **hybrides Toleranzanalysemodell**, bei dem das **Lochspiel** berücksichtigt wird, zum Einsatz kommen. Das an den Hebeln auftretende Lochspiel wird systematisch in negativer Y-Richtung ausgenutzt. Da aus der Berücksichtigung von Lochspielen in der Bewegungsgleichung ein Gleichungssystem resultiert, dass analytisch nicht gelöst werden kann, wird der in MATLAB implementierte Solver „fsolve“ für die numerische Lösung des Gleichungssystems genutzt. Als Startwert wird für jeden Winkelschritt die Lösung des hybriden Toleranzanalysemodells verwendet.

5.3.3 Toleranzanalysemodell auf Basis von Skin Model Shapes

Neben diesen beiden oben beschriebenen Modellen kommt ebenfalls ein Toleranzanalysemodell auf Basis von **Skin Model Shapes** zum Einsatz, bei denen sämtliche Bauteile mit Hilfe von Punktwolken diskretisiert werden. Bei diesem Modell wirkt ebenfalls eine virtuelle Kraft in negativer Y-Richtung, sodass sämtliche Bauteile des Mechanismus ausgerichtet werden. Da es sich um einen planaren Mechanismus handelt, erfolgt bei sämtlichen Modellen eine 2-dimensionale Abbildung der abweichungsbehafteten Bauteile.

Die Modellbildung bei dem Toleranzanalysemodell mit Skin Model Shapes werden nach [181] drei aufeinander folgende Schritte durchlaufen, die in Bild 51 veranschaulicht sind. Nach der Vormontage, bei der die virtuellen Bauteile initial positioniert werden, erfolgt die Kontaktsimulation, bei der die Bauteile final positioniert werden. Beim letzten Schritt erfolgt die Bestimmung des zu untersuchenden Schließmaßes. Dabei werden diese drei Schritte für alle Drehwinkel des Ritzels φ_{1i} mit $i \in [0^\circ, 826^\circ]$ durchlaufen. Der Drehwinkel des Ritzels φ_{1i} resultiert aus dem Übersetzungsverhältnis $i = \frac{39}{17}$ und entspricht somit einer vollständigen Drehung des Zahnrads mit dem Drehwinkel φ_2 .

Für die Vormontage wird das hybride Toleranzanalysemodell genutzt, wobei die Messwerte der einzelnen Bauteile in Form von Maßen eingebunden sind. Anschließend erfolgt die initiale Positionierung der Hebel, wobei die Mittelpunkte der Bolzen und Bohrungen genutzt werden.

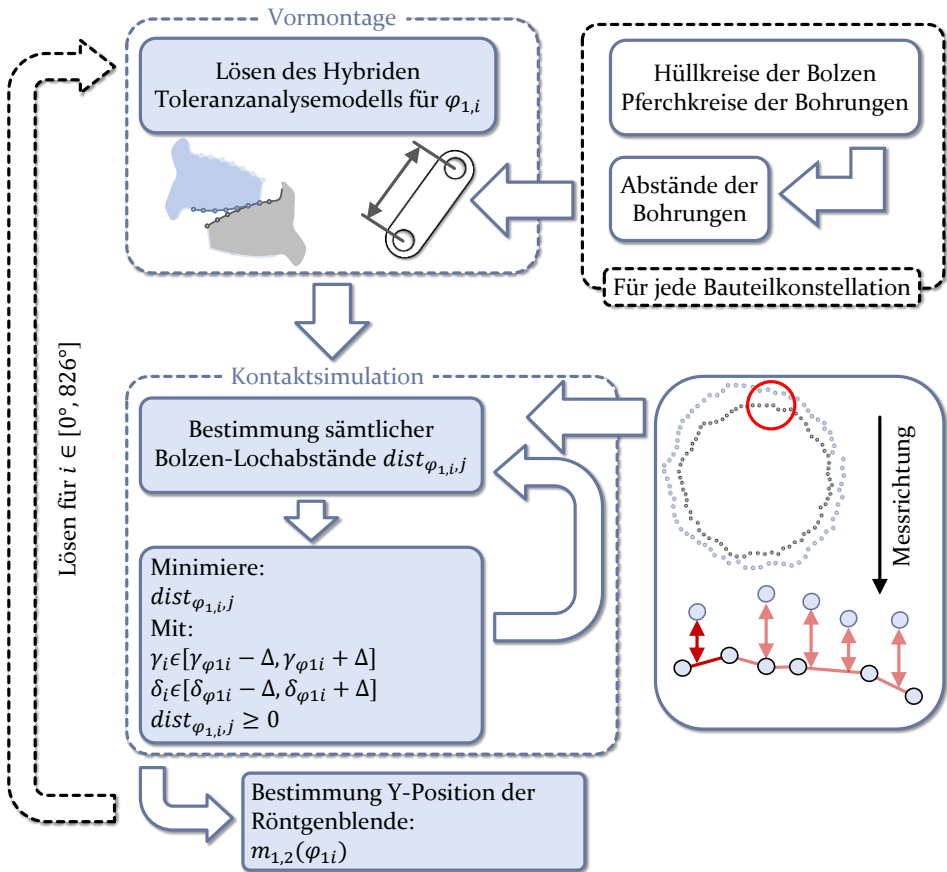


Bild 51: Modellbildung des Toleranzanalysemodells mit auf Basis von Skin Model Shapes

In Bild 52 ist dargestellt, wie dazu jeweils der kleinste eingeschriebene Kreis („Pferchkreis“), beziehungsweise der kleinste umschriebene Kreis („Hüllkreis“) für die Bohrungen und die Bolzen ermittelt werden [182].

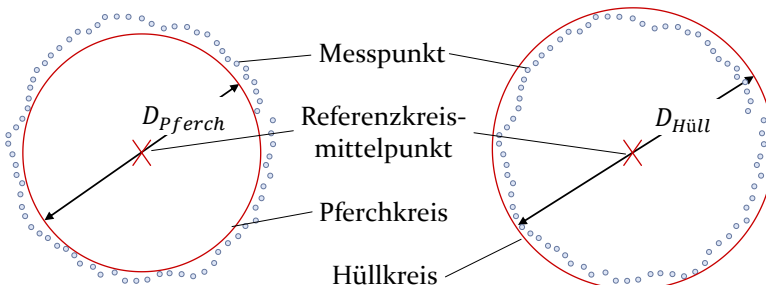


Bild 52: Hüll- und Pferchkreis als Referenzkreis nach [182]

Nach der initialen Positionierung der Bauteile erfolgt die Bestimmung sämtlicher Bolzen-Lochabstände $dist_{\varphi 1,i,j}$, die darauf basiert, dass in einer definierten Messrichtung der Abstand zwischen einem Messpunkt des Lochs zu den Messpunkten des Bolzens ermittelt wird:

$$dist_{\varphi 1,i,j} = \min (dist_{\varphi 1,i,j,k}) \quad (53)$$

$$\text{für } D_{Hüll,j} > D_{Pferch,j} \quad (54)$$

sonst:

$$dist_{\varphi 1,i,j} = 0. \quad (55)$$

Aufgrund der in negativer Y-Richtung eingebrachten Kraft, ist bei dem Demonstrator die Messrichtung auch in negativer Y-Richtung definiert. Wie in Bild 53 veranschaulicht erfolgt dazu eine lineare Interpolation zwischen den beiden nächstgelegenen Messpunkten des Bolzens, sodass der Abstand zwischen der sich ergebenden Geraden und dem Messpunkt des Lochs bestimmt werden kann.

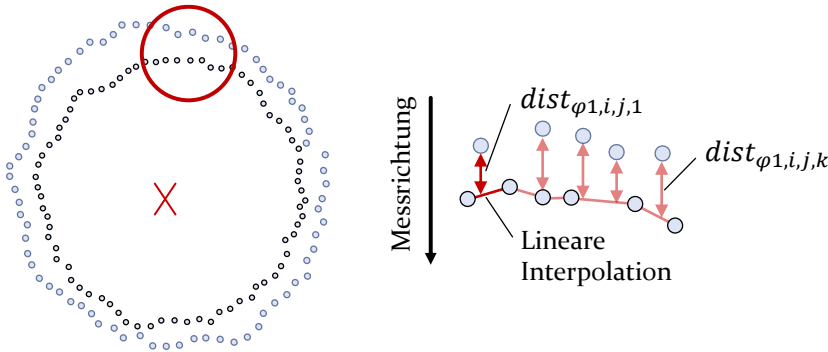


Bild 53: Bestimmung der Abstände zwischen Bolzen und Loch

Der minimale Bolzen-Lochabstand wird im Anschluss für jedes Loch (j) ermittelt. Für die Kontaktsimulation wird ein Optimierungsproblem formuliert, bei dem sämtliche Lochabstände minimiert werden sollen:

$$\min (dist_{\varphi 1,i,j}) \quad (56)$$

Mit:

$$\gamma_i \in [\gamma_{\varphi 1,i} - \Delta_\gamma, \gamma_{\varphi 1,i} + \Delta_\gamma] \quad (57)$$

$$\delta_i \in [\delta_{\varphi 1,i} - \Delta_\delta, \delta_{\varphi 1,i} + \Delta_\delta] \quad (58)$$

wobei

$$dist_{\varphi 1,i,j} \geq 0 \quad (59)$$

sein muss.

Anschließend werden sämtliche Hebel und die Röntgenblende durch Translationen und Rotation final ausgerichtet und das Schließmaß für den jeweiligen Winkelschritt ermittelt.

Im Rahmen der Validierung werden die Ergebnisse der drei Toleranzanalysemodelle den Versuchsergebnissen gegenübergestellt, sodass mit Hilfe der berechneten Ähnlichkeitskennzahlen ein Modellvergleich und eine Auswahl erfolgen kann.

Anschließend wird ein Modell ausgewählt, für das im Rahmen der Arbeit weitere spezifische Abweichungsinformationen integriert werden und der Toleranzmanagementprozess bis zur Erfüllung der Qualitätsziele durchlaufen wird.

5.4 Validierung der Toleranzanalyse

Die Validierung der oben beschriebenen Toleranzanalysemodelle stellt eine wesentliche Neuheit dar, da es kein allgemeingültiges, übertragbares Vorgehen für die Validierung von Toleranzanalysenmodellen gibt.

Sie basiert auf dem Abgleich zwischen den Ergebnissen von physikalischen und virtuellen Versuchen. Die Berechnungsmodelle, welche bei der Toleranzanalyse verwendet werden, wurden bereits in Abschnitt 5.3 eingegangen. Auf die physikalische Modellbildung, den Versuchsplan und die Ergebnisse der virtuellen und der physikalischen Untersuchungen wird im Folgenden eingegangen.

5.4.1 Beschreibung des Prüfstands

Der Prüfstand, welcher zur Validierung der virtuellen Toleranzuntersuchungen genutzt wird, soll in der Lage sein, möglichst viele der in Abschnitt 5.1 gesammelten Einflussgrößen abbilden zu können, ohne das unnötige Unsicherheiten Einfluss auf die physikalischen Toleranzuntersuchungen haben.

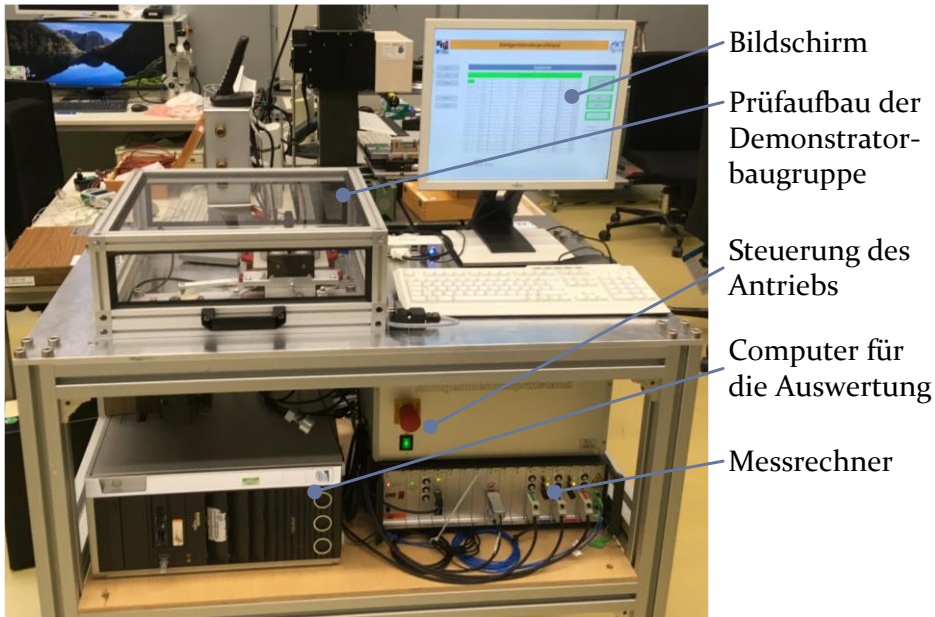


Bild 54: Prüfstand für die physikalischen Toleranzuntersuchungen

Der Prüfstand, der in Bild 54 dargestellt ist, besteht aus einem Tisch aus Aluminiumprofilen, auf dessen Oberseite sich die Demonstratorbaugruppe unter einer Schutzhaube befindet. Angetrieben wird die Kinematik von einem gesteuerten Servomotor, dessen Stellung von einem zusätzlichen Drehgeber erfasst wird. Das Bewegungsverhalten der Röntgenblende wird mit einem Doppelinterferometer, für das in Abschnitt 5.4.2 die Standardunsicherheit des Messverfahrens nach [144] bestimmt wird, erfasst. Die einzelnen Hebel, in die Gleitlager eingepresst wurden, können nach dem Entfernen von Sicherungsringen ausgetauscht werden, ohne dass die Kinematik zusätzlich beeinflusst wird. Um sicherzustellen, dass lediglich die planare Bewegung der Röntgenblende erfasst wird, ist diese in Z-Richtung auf einer PTFE-Platte abgestützt.

Sämtliche Versuche wurden im Messraum des Messzentrums (am Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik der FAU) durchgeführt. Der Messraum, der eine Temperatur von $20\text{ °C} \pm 0,2\text{ K}$ (Temperaturklasse A nach [183]) und eine relative Luftfeuchte von $45\text{ \%} \pm 10\text{ \%}$ (Feuchtekategorie A nach [183]) aufweist, besitzt eine entkoppelte Bodenplatte, sodass Messungen im Mikro- und Submikrometerbereich möglich sind. Um weitere epistemische Unsicherheiten zu reduzieren, wurden sämtliche Prüfstandsversuche vom Autor selbst durchgeführt.

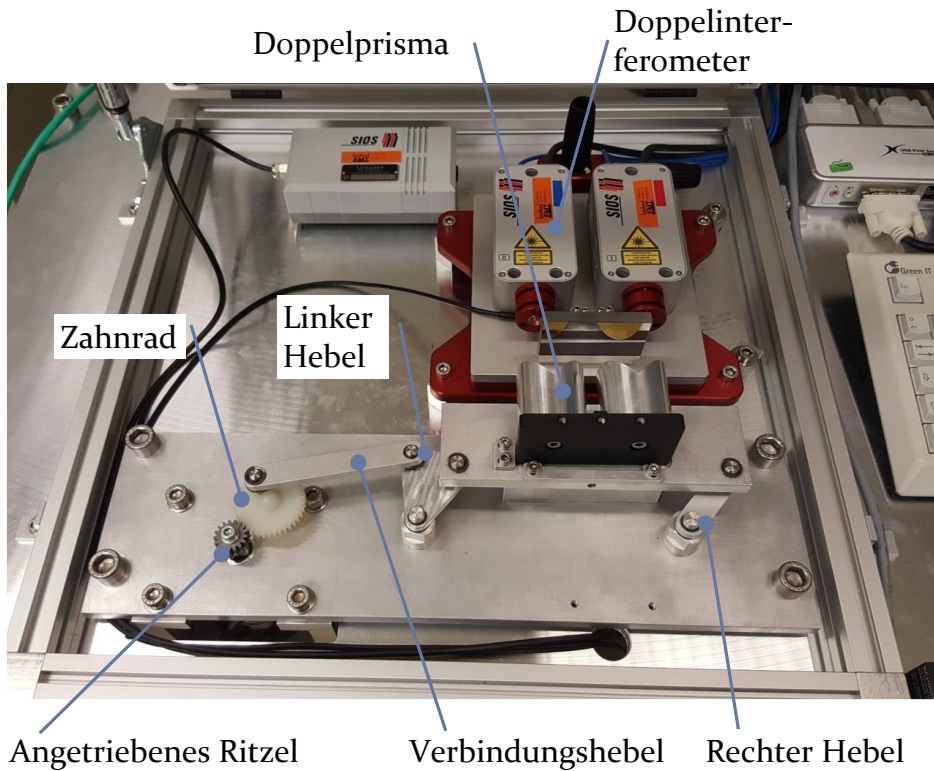


Bild 55: Prüfaufbau der Demonstratorbaugruppe im Prüfstand

5.4.2 Bestimmung der Messunsicherheit des Prüfstands

Für den verwendeten Prüfstand wird die Standardunsicherheit u_p (siehe Abschnitt 2.3.4) des Doppelinterferometers an beiden Interferometern für jeweils $n = 100$ Messungen bestimmt. Um den gesamten Prüfbereich untersuchen zu können, erfolgt die Bestimmung der Messunsicherheit mit und ohne Krafteinbringung an drei unterschiedlichen Stellungen des Mechanismus. Hierzu werden Messungen in der Nähe der Mittellage und in der Nähe des oberen und unteren Umkehrpunktes durchgeführt. Bei der Betrachtung der in Tabelle 5 dargestellten Ergebnisse ist erkennbar, dass eine maximale Standardunsicherheit von ca. 14 nm auftritt. Außerdem kann festgehalten werden, dass die Standardunsicherheit ohne Krafteinwirkung geringer ist, als mit Krafteinwirkung.

Tabelle 5: Standunsicherheit u_p des Messsystems am Prüfstand

		„unterer Umkehrpunkt“	„Mittellage“	„Oberer Umkehrpunkt“
Ohne Krafteinwirkung	Interferometer 1	3,5869 nm	3,1906 nm	3,4001 nm
	Interferometer 2	3,6138 nm	3,3707 nm	3,4741 nm
Mit Krafteinwirkung	Interferometer 1	11,2920 nm	6,7768 nm	13,6141 nm
	Interferometer 2	11,7862 nm	6,5893 nm	14,2519 nm

Da das Verhältnis von Messunsicherheit zu Toleranz $U/T \leq 0,2$ sein sollte [143], können mit dem Prüfstand Bauteile mit Abweichungen im μm untersucht werden, was für den Anwendungsfall ausreichend ist.

5.4.3 Ergebnisse und Interpretation der Prüfstanduntersuchungen

Bei Voruntersuchungen am Prüfstand wird überprüft, inwieweit die einzelnen kinematischen Glieder sich auf das Bewegungsverhalten auswirken. Dabei stellt sich heraus, dass lediglich die Hebel der Kinematik das Bewegungsverhalten signifikant beeinflussen, während Abweichungen an Zahnrad und Ritzel kaum ins Gewicht fallen. Dies liegt zum einen daran, dass sowohl durch Fließpressen, als auch durch Spritzgießen prozesssicher mit kleinen Abweichungen Zahnräder gefertigt werden, sodass die Unterschiede der gefertigten Zahnräder sehr gering sind. Zusätzlich besitzt die Getriebestufe eine Profilüberdeckung von 1,37, was eine gleichförmige Bewegungsübertragung sicherstellt.

Für die Prüfstandsuntersuchungen wurden die drei in Bild 58 dargestellten Hebel je 20 mal mit unterschiedlichen Abweichungen gefertigt und anschließend mit einem taktilen Portalkoordinatenmessgerät (Zeiss UPMC 1200 CARAT S-ACC) messtechnisch erfasst. Die Messergebnisse der gefertigten Hebel können Tabelle 11 bis Tabelle 13 im Anhang entnommen werden.

Anschließend wurde jeweils der Hebel mit den kleinsten und größten Loch/Bolzen-Abständen ermittelt (siehe Anhang). Diese wurden in einem

OFAT-Versuchsplan [105] kombiniert, sodass 16 unterschiedliche Kombinationen untersucht wurden. Dabei wurden die Versuche zunächst ohne eine zusätzliche eingebrachte Kraft durchgeführt. Anschließend wurden die Versuche wiederholt, wobei gezielt eine Kraft (ca. 2 N) mit einer Schnur in negativer Y-Richtung eingebracht wurde, die dazu führt, dass das Lochspiel an den Gelenken systematisch in eine Richtung ausgenutzt wird.

Tabelle 6: OFAT-Versuchsplan der physikalischen Toleranzuntersuchungen

Nr. des Versuchs	Verbindungshebel	Linker Hebel	Rechter Hebel
1	4	8	2
2	17	8	2
3	4	8	19
4	17	8	19
5	4	4	2
6	17	4	2
7	4	4	19
8	17	4	19
9	4	13	2
10	17	13	2
11	4	13	19
12	17	13	19
13	4	16	2
14	17	16	2
15	4	16	19
16	17	16	19

Um zu überprüfen ob die Einbringung einer Kraft in negativer Y-Richtung einen systematischen Einfluss auf das Bewegungsverhalten hat, wurden die

Versuche ohne Krafteinbringung (gekennzeichnet mit „A“) und mit Krafteinbringung (gekennzeichnet mit „B“) durchgeführt. Sämtliche Versuche wurden 20 mal wiederholt, was 20 Bewegungszyklen entspricht, sodass ausgehend von einer Überlagerung der Ergebnisse (siehe Abschnitt 4.4.4) neben einer Bewegungskurve der Mittelwerte auch die Standardunsicherheit u_p (siehe Abschnitt 2.3.4) für jede Hebelkombination über den Bewegungsverlauf (siehe Anhang) bestimmt werden kann. Anschließend werden die Standardunsicherheiten auf Ausreißer überprüft (siehe Abschnitt 2.3.4), sodass abschließend bewertet werden kann, wie große Toleranzen des Schließmaßes wiederholgenau mit dem Prüfstand untersucht werden können.

Bei drei Ergebnissen ist die mittleren absoluten Abweichung vom Median von seinem Erwartungswert um mehr als das Dreifache überschritten. Folglich handelt es sich bei diesen Werten um Ausreißer. Aus den anderen mittleren Standardunsicherheiten resultiert eine maximale mittlere Standardunsicherheit $u_{p,max}$ für die durchgeführten Versuche:

$$u_{p,max} = 160\mu m \quad (60)$$

Daraus folgt gemäß [143] für die minimale Schließmaßtoleranz $T_{SM,min}$, die mit dem Prüfstand ausgewertet werden kann:

$$T_{SM,min} \geq 800\mu m \quad (61)$$

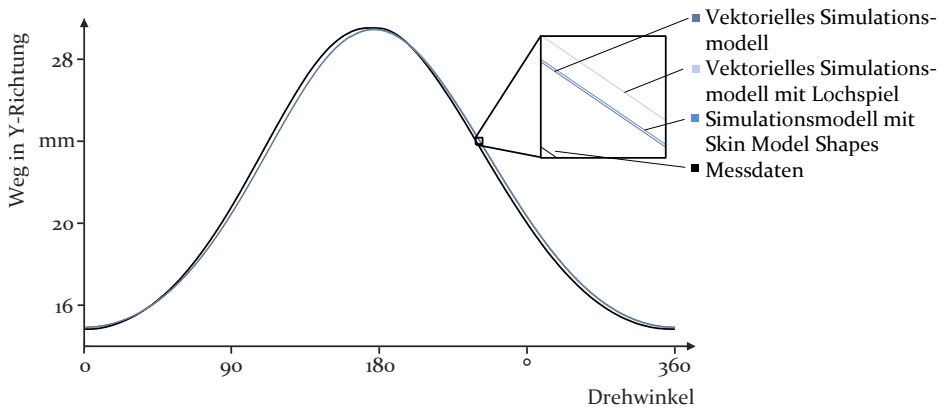


Bild 56 Gegenüberstellung der Bewegungsverläufe (Versuch 1 B)

Um eine Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Versuche und einen Abgleich mit den Simulationen zu ermöglichen, werden die Messsignale in $0,5^\circ$ -Schritten diskretisiert. Exemplarisch sind die unterschiedlichen

Bewegungskurven der drei Simulationen und die des Versuchs in Bild 56 dargestellt. Erkennbar ist, dass die Kurven optisch eine große Übereinstimmung aufweisen. Inwieweit diese qualitative Übereinstimmung sich quantifizieren lässt, wird im Folgenden untersucht.

5.4.4 Vergleich der Ergebnisse und Bestimmung der Ähnlichkeitskennzahlen

Die Ergebnisse der physikalischen und der drei unterschiedlichen Toleranzanalysemodelle dienen dazu Ähnlichkeitskennzahlen für jede Bauteilkombination zu berechnen (siehe Anhang). Für den Vergleich der unterschiedlichen Kennzahlen werden diese anschließend für jede Konstellation in eine Korrelationsmatrix überführt, sodass diese verglichen und die Ähnlichkeitskennzahl mit der größten absoluten Korrelation bestimmt werden kann. Exemplarisch wird das Vorgehen für das hybride Toleranzanalysemodell für Versuche ohne Krafteinwirkung dargestellt. Bei allen weiteren Versuchen können die Ähnlichkeitskennzahlen dem Anhang entnommen werden.

Hybrides Toleranzanalysemodell

Die Bestimmung der in Abschnitt 2.3.2 beschriebenen Ähnlichkeitskennzahlen, erfolgt ausgehend von den aus 20 Wiederholversuchen errechneten Bewegungskurven. Sämtliche Ähnlichkeitskennzahlen weisen durchweg sehr hohe Werte auf. Dies spricht für eine sehr hohe Korrelation von Versuchs- und Simulationsdaten. Der Index of Agreement IA liefert die höchste Übereinstimmung, während der NRMSE die kleinste Übereinstimmung quantifiziert, die jedoch mit einem minimalen Wert von $\sim 0,959$ dennoch sehr hoch ist. Innerhalb einer Kennzahl sind die Schwankungen zwischen den unterschiedlichen Versuchen sehr gering. Dies lässt den Schluss zu, dass das Simulationsmodell für sämtliche verwendete Hebel valide Ergebnisse liefert.

Um die Validierung abzuschließen, wird die Ähnlichkeitskennzahl ausgewählt, die die größte Korrelation mit den anderen Ähnlichkeitskennzahlen aufweist und abschließend bewertet. Für das hybride Toleranzanalysemodell ist die Korrelation in Bild 57 und Tabelle 8 dargestellt.

Tabelle 7: Ähnlichkeitskennzahlen für das hybride Simulationsmodell ohne Krafteinwirkung

Num- mer des Ver- suchs	NSE	R ²	IA	NRMSE	KA _{norm}
1 A	0,99780	0,99810	0,99944	0,98328	0,99007
2 A	0,99791	0,99866	0,99946	0,98372	0,99006
3 A	0,99839	0,99869	0,99959	0,98553	0,99218
4 A	0,99876	0,99948	0,99968	0,98743	0,99227
5 A	0,99944	0,99953	0,99986	0,99159	0,99498
6 A	0,99908	0,99911	0,99977	0,98923	0,99372
7 A	0,99856	0,99909	0,99964	0,98627	0,99234
8 A	0,99834	0,99888	0,99959	0,98520	0,99159
9 A	0,99848	0,99853	0,99962	0,98615	0,99179
10 A	0,99838	0,99848	0,99959	0,98570	0,99133
11 A	0,99848	0,99853	0,99962	0,98615	0,99179
12 A	0,99840	0,99904	0,99960	0,98550	0,99204
13 A	0,99823	0,99847	0,99955	0,98506	0,99089
14 A	0,98694	0,98701	0,99668	0,95946	0,97696
15 A	0,99803	0,99944	0,99952	0,98391	0,98978
16 A	0,99740	0,99895	0,99937	0,98145	0,98917
Mittel- wert	0,99766	0,99812	0,99941	0,98410	0,99069

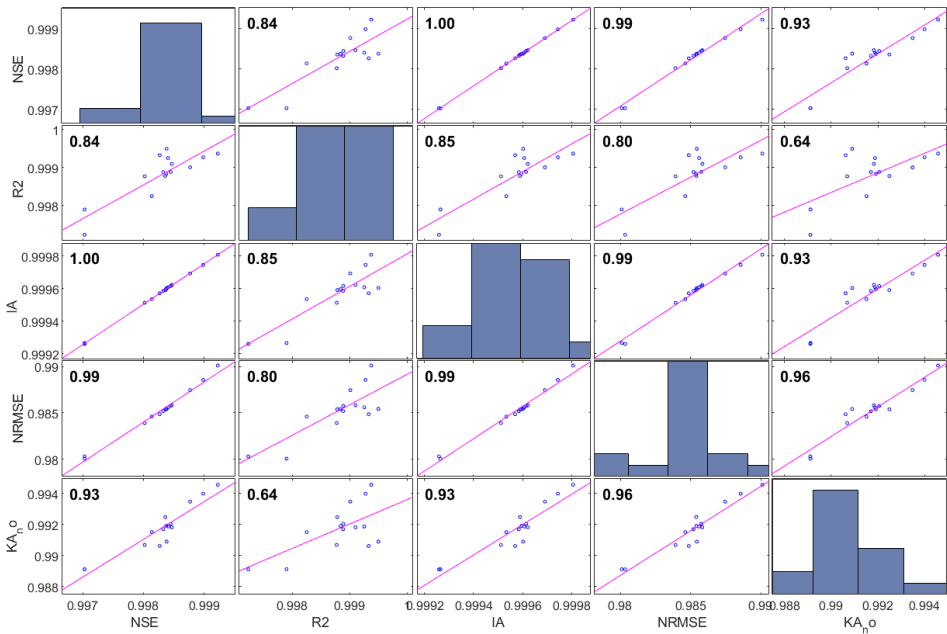


Bild 57: Korrelation der Ähnlichkeitskennzahlen für das hybride Toleranzanalysemodell

Tabelle 8: Korrelation der Ähnlichkeitskennzahlen für das hybride Toleranzanalysemodell ohne Krafteinwirkung

	NSE	R ²	IA	NRMSE	KA _{norm}	Aktivsumme
NSE		0,8426	0,9998	0,9921	0,9341	3,7686
R ²	0,8426		0,8515	0,7983	0,6384	3,1308
IA	0,9998	0,8515		0,9909	0,9293	3,7715
NRMSE	0,9921	0,7983	0,9909		0,9569	3,7382
KA _{norm}	0,9341	0,6384	0,9293	0,9569		3,4587

Die größte Korrelation im Vergleich zu den anderen Ähnlichkeitskennzahlen weist der Index of Agreement (IA) auf.

Da der IA und alle weiteren berechneten Ähnlichkeitskennzahlen sehr hohe Werte aufweisen, kann das hybride Toleranzanalysemodell innerhalb seiner Grenzen als validiert angesehen werden. Abgesehen davon, dass das

Toleranzanalysemodell von einem Starrkörpermodell ohne Reibung ausgeht, sind die Hebelabmaße die ausschlaggebende Limitierung und stellen somit die Grenzen dar, innerhalb derer die Simulationsmodelle verwendet werden sollten. Sollen mit dem Toleranzanalysemodell Hebel abgesichert werden, die in ihren Abmaßen deutlich von den hier verwendeten Abmaßen abweichen, sind weitere Prüfstandsuntersuchungen und eine erneute Validierung ratsam.

5.4.5 Gegenüberstellung der Ähnlichkeitskennzahlen und Bewertung der Toleranzanalysemodelle

In Tabelle 9 sind die Mittelwerte der Ähnlichkeitskennzahlen von allen untersuchten Toleranzanalysemodellen dargestellt.

Tabelle 9: Gegenüberstellung der Ähnlichkeitskennzahlen der unterschiedlichen Simulationsmodelle

	Kraft	NSE	R ²	IA	NRMSE	KA _{norm}
Hybrid	Nein	0,9977	0,9981	0,9994	0,9841	0,9907
Hybrid mit Lochspiel	Nein	0,9976	0,9981	0,9994	0,9839	0,9906
Skin Model Shapes	Nein	0,9975	0,9981	0,9994	0,9835	0,9904
Hybrid	Ja	0,9983	0,9988	0,9996	0,9852	0,9917
Hybrid mit Lochspiel	Ja	0,9982	0,9987	0,9996	0,9850	0,9916
Skin Model Shapes	Ja	0,9979	0,9988	0,9995	0,9839	0,9911

Bei der Betrachtung wird deutlich, dass die ermittelten Ähnlichkeitskennzahlen stets größer als 0,98 sind, was für eine ausgesprochen gute Korrelation spricht (Vgl. [134] und [135]). Bemerkenswert ist darüber, dass die Ähnlichkeitskennzahlen bei einer genaueren Modellbildung keine signifikanten Unterschiede aufweisen. So ergibt sich durch eine Toleranzrepräsentation mit Hilfe von Skin Model Shapes für den dargestellten Anwendungsfall keine Verbesserung der Genauigkeit. Dies könnte darauf zurückzuführen sein, dass die Lochspiele und die Formabweichungen an den Verbindungsstellen relativ klein sind.

Auf Basis der Ähnlichkeitskennzahlen sind somit sämtliche Toleranzanalyseverfahren validiert. Würden bei dem Mechanismus größere Lochspiele oder größere Formabweichungen vorhanden sein, würden die Ergebnisse vermutlich größere Unterschieden aufweisen. Da dies bei den untersuchten Bauteilen nicht der Fall ist, können für die Toleranzanalyse der Kinetik der Röntgenblende alle untersuchten Simulationsmodelle verwendet werden.

5.5 Abgleich mit den geforderten Qualitätszielen und potentielle Maßnahmen zur Zielerreichung

Nachdem alle drei Toleranzanalysemodelle validiert wurden, gilt es ein Modell für die Toleranzanalyse auszuwählen. Anschließend können die mit dem Modell erzielten Ergebnisse mit den Qualitätsanforderungen abgeglichen werden und eventuell notwendige Anpassungen bei der Tolerierung durchgeführt werden. Da bei der Fallstudie ausschließlich die in Tabelle 10 und den Bildern 59 bis 61 dargestellten Toleranzen berücksichtigt werden sollen, ist die Verwendung eines hybriden Toleranzanalysemodells sinnvoll. Die beiden anderen Toleranzanalysemodelle könnten prinzipiell ebenso verwendet werden, allerdings müssten Annahmen über die Loch- und Bolzendurchmesser, respektive deren Formabweichungen getroffen werden. Da darüber keine Informationen vorliegen, ist es nicht zielführend Toleranzanalysemodelle zu verwenden, die auf diesen Informationen beruhen würden.

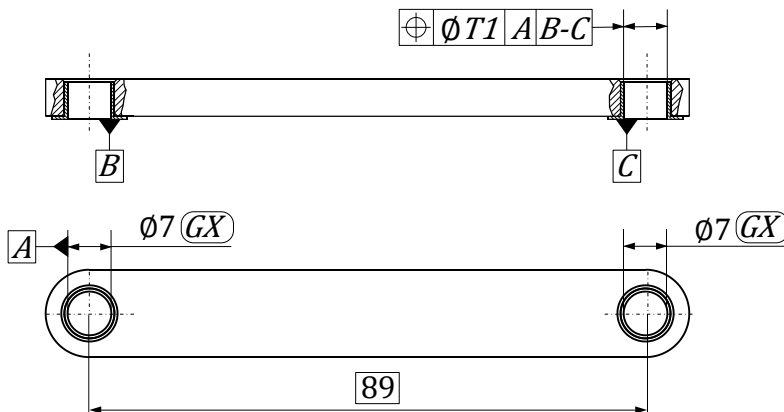


Bild 58: Tolerierter Verbindungshebel (Tolerierungsgrundsatz ISO 8015 [184])

5.5 Abgleich mit den geforderten Qualitätszielen und potentielle Maßnahmen zur Zielerreichung

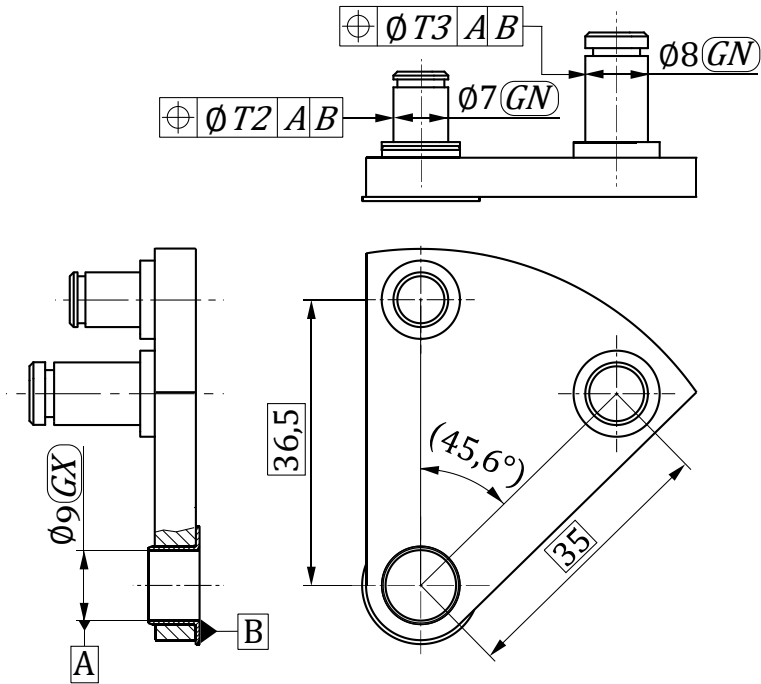


Bild 59: Tolerierter linker Hebel (Tolerierungsgrundsatz ISO 8015 [184])

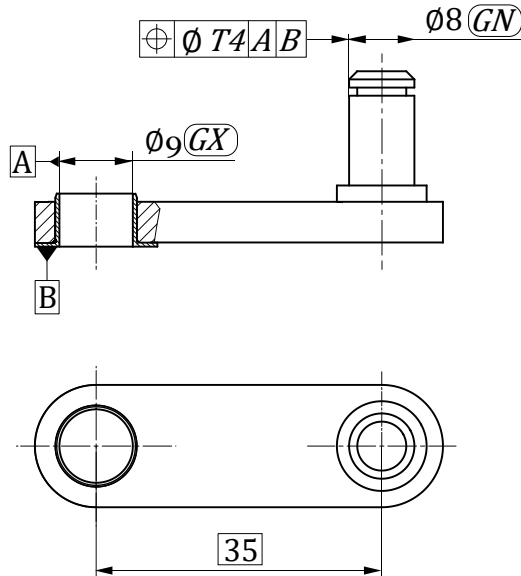


Bild 60: Tolerierter rechter Hebel (Tolerierungsgrundsatz ISO 8015 [184])

Angenommen wird darüber hinaus, dass sämtliche Größen normalverteilt (mit $\pm 3\sigma$) um ihr Nennmaß streuen. Anschließend wird die Toleranzanalyse mit $n = 10\,000$ Samples durchgeführt. Als zusätzliches Qualitätsziel soll eine Streuung des Schließmaßes T_{SM} , bei einer Standardabweichung von $\pm 3\sigma$ während des gesamten Bewegungsablaufs maximal $\pm 0,5\text{ mm}$ betragen. Gemäß dem zentralen Grenzwertsatz [185] ergibt sich somit auch für das Schließmaß eine Normalverteilung, woraus folgt:

$$\sigma_{SM,max,soll} = \frac{T_{SM,max}}{6} = \frac{\pm 0,5\text{ mm}}{6} = \frac{1}{6} \text{ mm} . \quad (62)$$

Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass diese Forderung nicht den tatsächlichen Anforderungen an eine Röntgenblende entspricht. Vielmehr dient die Anforderung zur Veranschaulichung des Vorgehens.

Tabelle 10: Toleranzen der Hebel der Röntgenblendenkinematik

Toleranz	Initiale Toleranzwerte	Angepasste Toleranzwerte
T ₁	0,3 mm	0,3 mm
T ₂	1 mm	1 mm
T ₃	0,2 mm	0,2 mm
T ₄	0,6 mm	0,4 mm
Schließmaßstreuungen		
$\sigma_{SM,max}$	0,189 mm	0,1473 mm
T _{SM,max}	1,131 mm	0,884 mm

In Bild 61 ist der Verlauf des Schließmaßes mit der initialen Toleranzspezifikation dargestellt. Deutlich ist zu erkennen, dass die Streubreite des Schließmaßes in Abhängigkeit vom Drehwinkel unterschiedlich stark streut.

Die Simulationsergebnisse (siehe Bild 63 und *Tabelle 10*) zeigen, dass die geforderte maximale Streubreite von $\sigma_{SM,max,soll} = \frac{1}{6} \text{ mm}$ nicht eingehalten wird. Es soll daher der Einfluss der einzelnen Toleranzen während des Bewegungszyklus bestimmt werden, um im Anschluss die Toleranzen mit dem größten Einfluss zielgerichtet anzupassen. Da es sich um eine numerisch nicht aufwendige Berechnung handelt, bei der nicht auf bestehende Datensätze zurückgegriffen wird, wird eine varianzbasierte Sensitivitäts-

analyse mit der EFAST-Methode [186] durchgeführt. Die Ergebnisse der Analyse werden in Bild 62 gezeigt.

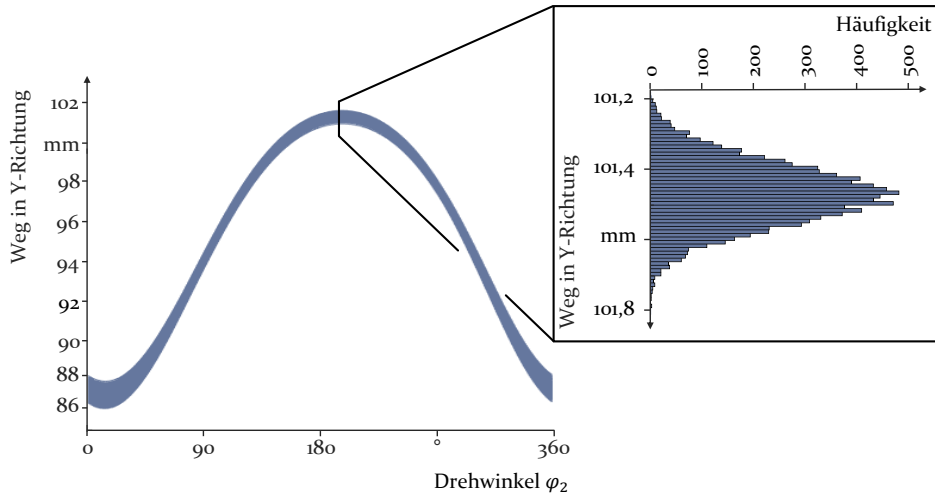


Bild 61: Schließmaßverlauf bei initialer Toleranzspezifikation

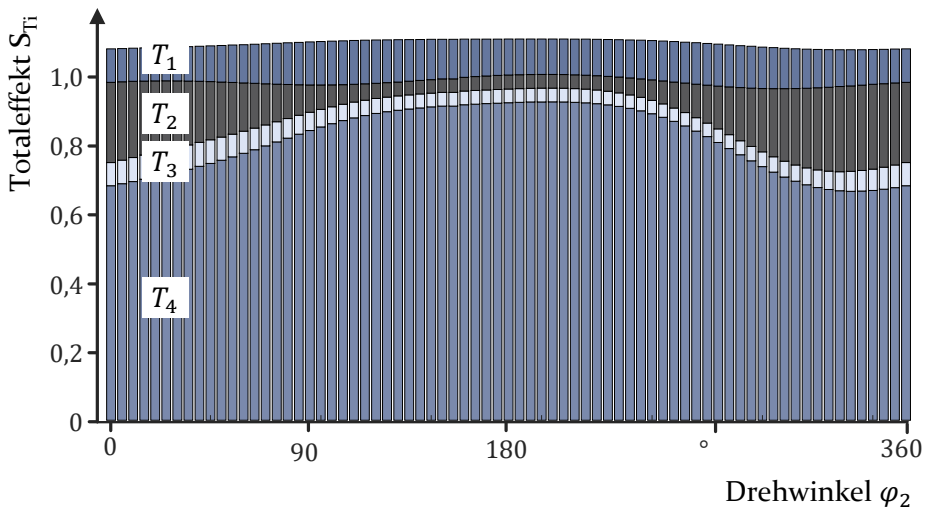


Bild 62: Drehwinkelabhängige Beitragsleistanalyse (EFAST)

Bei der Betrachtung der Beitragsleister wird deutlich, dass sich die einzelnen Toleranzen unterschiedlich auf die Schließmaßstreuung auswirken. Dabei dominiert der Beitrag der Toleranz T_4 über den gesamten Bewegungszyklus hinweg, wobei der absolute Einfluss zwischen 90° und

270° deutlich höher ist. Bemerkenswert ist darüber hinaus, dass Toleranz T_3 über den gesamten Bewegungszyklus hinweg nahezu den selben Beitragsleister hat, während der Einfluss der Toleranzen T_1 und T_2 sich drehwinkelabhängig verändert.

Da Toleranz T_4 den größten Einfluss hat, wird diese angepasst (siehe Tabelle 10). Mit der angepassten Toleranz ergibt sich eine maximale Standardabweichung von 0,1473 mm, sodass das geforderte Qualitätsziele erreicht werden können.

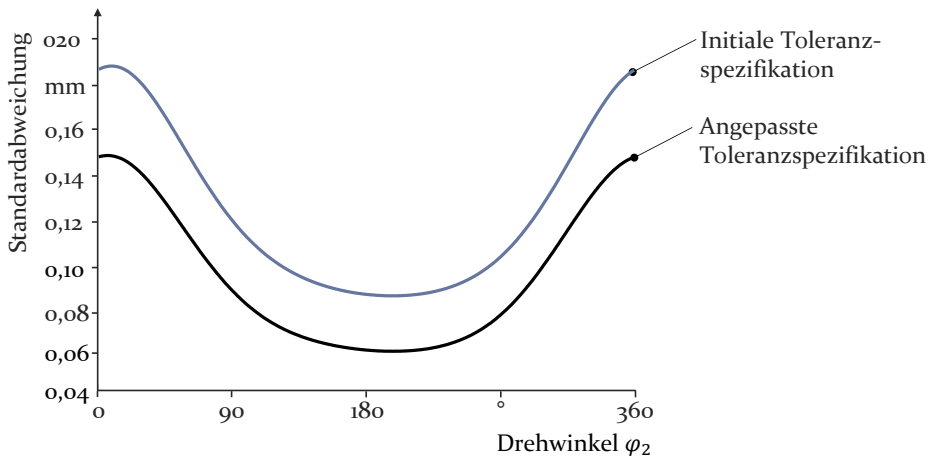


Bild 63: Drehwinkelabhängige Standardabweichung des Schließmaßes

5.6 Diskussion der Ergebnisse und des Vorgehens

Ausgehend von der Einflussanalyse, über die Nennmaßoptimierung, die Toleranzanalyse und deren Validierung bis hin zur Anpassung der Toleranzen auf Basis von Beitragsleisteranalysen erfolgt in diesem Abschnitt die Diskussion mit Bezug auf die praktische Umsetzung des Vorgehens.

Die Einflussanalyse stellt bei der gesamten Vorgehensweise den Ausgangspunkt für alle weiteren Tätigkeiten dar. Folglich hängt das weitere Vorgehen und damit die Aussagekraft der Erkenntnisse, die im Rahmen der virtuellen Absicherung gewonnen werden, von der Einflussanalyse ab.

Daher ist eine Definition der Systemgrenzen und die systematische Sammlung und Clusterung von Einflussgrößen unabdingbar. Bei der praktischen Umsetzung des Vorgehens wurde die Einflussanalyse immer wieder, beispielweise bei der Entwicklung der virtuellen Toleranzanalyseverfahren, als

auch bei der Entwicklung des Validierungsprüfstands genutzt. Auch bei der Identifikation von Unsicherheiten, sowohl bei der physikalischen, als auch bei der virtuellen Modellbildung liefert die Einflussanalyse wertvolle Hinweise.

Auf Basis der Einflussanalyse erfolgt die Nennmaßoptimierung des Mechanismus, bei der Nennmaße so gewählt werden, dass ein Mechanismus, trotz zwangsläufig auftretender geometrischer Abweichungen maximal insensitive auf diese reagiert und somit ein robustes Bewegungsverhalten aufweist. Das dazu entwickelte übertragbare Vorgehen, sieht dafür die Formulierung eines Optimierungsproblems vor, bei dem die Anforderungen an den Mechanismus entweder als Optimierungsziel(e), oder als Nebenbedingungen formuliert werden. Mit Hilfe eines geeigneten Optimierungsalgorithmus werden anschließend die Nennmaße identifiziert, die ein robustes Bewegungsverhalten gewährleisten. Für den Demonstrator konnte gezeigt werden, dass das Bewegungs- und Beschleunigungsverhalten wesentlich verbessert werden konnte. Somit konnte ein robustes Optimum auf Basis der optimierten Nennmaße erreicht werden. Der wesentliche Beitrag zum Stand der Technik des Vorgehens liegt darin, dass die Optimierung nicht für einen einzelnen Mechanismus erfolgt, sondern, dass bei der Optimierung einer Stichprobe mehrerer Mechanismen, deren Nennmaße vom Ideal abweichen, untersucht wird. Damit kann sichergestellt werden, dass nicht nur ein einzelner idealer Mechanismus ein definiertes Bewegungsverhalten aufweist, sondern, dass real gefertigte Mechanismen mit Abweichungen die geforderten Eigenschaften aufweisen. Das entwickelte Vorgehen lässt sich darüber hinaus erweitern, sodass auch anderen Einflussgrößen auf einen Mechanismus, wie schwankende Temperaturen, mitberücksichtigt werden können [P15].

Nach der Nennmaßoptimierung erfolgt der Aufbau von Toleranzanalysemodellen, die ausgehend von einer Toleranzspezifikation der einzelnen Bauteile, die Folgen von schwankenden Bauteilgeometrien auf ein Schließmaß abbilden. Im Rahmen der Arbeit wird dazu ein neuartiges Verfahren – die hybride Toleranzrepräsentation – vorgestellt, die eine Kombination aus vektorieller und punktbasierter Toleranzanalyse, auf Basis von Skin Model Shapes darstellt. Dabei vereint die hybride Toleranzrepräsentation, die Vorteile einer geringen Rechenzeit für vektorielle Modelle mit der Möglichkeit einer sehr genauen Geometriebeschreibung mit Hilfe von Punkten und Oberflächennetzen, sodass beispielsweise Formabweichungen dargestellt werden können. Bei der praktischen Umsetzung des Vorgehens wurden drei Toleranzanalyseverfahren verwendet. So wurden neben einem hybriden Modell und einem hybriden Analysemodell, welches den

Einfluss von Lochspielen abbilden kann, auch ein Modell auf Basis von Skin Model Shapes verwendet. Anschließend wurden die drei Modelle einander gegenübergestellt und validiert.

Die Validierung der Simulationsmodelle nimmt eine zentrale Stellung in der Arbeit ein und stellt somit einen wesentlichen Kernaspekt dar, da die Validierung eines Simulationsmodells enorm wichtig ist. Nur auf Basis eines validierten Simulationsmodells können belastbare Ergebnisse erzielt und zuverlässig Erkenntnisse abgeleitet werden. Das Fundament bei der Validierung stellt die Konzeption und die konstruktive Umsetzung des Prüfstands, sowie die Qualifizierung der Messtechnik dar. Dabei konnte für den entwickelten Prüfstand gezeigt werden, dass eine maximale Standardunsicherheit von ca. 14 nm erreicht werden kann, sodass er für die Validierung der Toleranzanalysen geeignet ist. Diese geringe Standardunsicherheit konnte jedoch nur mit einer sehr präzisen Messtechnik und mit Versuchen, die in einem Messraum durchgeführt wurde, erreicht werden. Es zeigt sich an dieser Stelle, dass für die Validierung von Toleranzsimulationsmodellen ein nicht unerheblicher Aufwand betrieben werden muss. Nach der Qualifizierung der Messtechnik erfolgen virtuelle und physikalische Toleranzuntersuchungen, bei denen ein definierter Versuchsplan den Ausgangspunkt darstellt. Bei den physikalischen Untersuchungen stellt die Aufbereitung der Versuchsdaten, bei der unter anderem die Streuung der Versuchsdaten untersucht wird, einen zentralen Aspekt dar. Für den Demonstrator, der ein zyklisches Bewegungsverhalten aufweist wurde im Rahmen der Arbeit ein Weg vorgestellt, der die Datenaufbereitung ermöglicht. In wie weit dieses Vorgehen auf nicht-zyklische Bewegungsabläufe übertragen werden kann, muss jedoch noch in weiteren Forschungsarbeiten untersucht werden.

Um mit Hilfe einer ausgewählten spezifischen Kennzahl die Güte der Validierung zu quantifizieren, erfolgt die Berechnung ausgewählten Kennzahlen und die Analysen deren Korrelationen. Bei der praktischen Umsetzung stellt sich heraus, dass sämtliche verwendete Analysemodelle eine sehr gute Übereinstimmung mit den Versuchsdaten aufweisen. Dies lässt den Schluss zu, dass sämtliche verwendete Modelle prinzipiell gut geeignet sind. An dieser Stelle kann jedoch nicht der Schluss gezogen werden, dass hybride Toleranzsimulationsmodelle, die kein Lochspiel berücksichtigen stets geeignet sind. Bei der Betrachtung von Mechanismen, bei denen Formabweichungen oder größere Lochspiele das Bewegungsverhalten

maßgeblich beeinflussen, sind hybride Modell vermutlich weniger gut geeignet.

Im Rahmen der praktischen Umsetzung des Vorgehens erfolgt eine Toleranzanalyse, ausgehend von einer vorläufigen Toleranzspezifikation. Aufgrund einer Verfehlung der gewünschten Qualitätsziele erfolgt die Anpassung der Toleranzen, sodass die geforderten Qualitätsziele erreicht werden können. Eine varianzbasierte Beitragsleisteranalyse, die den Einfluss der einzelnen Toleranzen und deren Wechselwirkungen quantifiziert, stellt die Grundlage für diese Anpassung der Toleranzwerte dar und ermöglicht eine zielgerichtete Anpassung der Werte.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Die Komplexität der Aufgaben bei der Produktentwicklung ist heute größer denn je. Dies ist unter anderem darauf zurück zu führen, dass die Anzahl relevanter Aspekte zugenommen hat und die Abhängigkeiten und die daraus resultierenden Wechselwirkungen von Subsystemen enorm hoch sind. Gleichzeitig herrscht ein enormer Innovations-, Zeit- und Kostendruck, während zahlreiche Unsicherheiten bei der Produktentwicklung allgegenwärtig sind.

Hinzu kommt, dass sämtliche Prozesse unweigerlich Variationen unterworfen sind, sodass für die Eigenschaften gefertigter Produkte zwangsläufig gewisse Qualitätsschwankungen resultieren. Das *Robust Design* bietet an dieser Stelle eine Methodik, die die Variation einzelner Prozesse systematisch in die Produktentwicklung einfließen lässt. Das Ziel des *Robust Designs* ist dabei die systematische Reduktion von qualitätsmindernden Schwankungen relevanter Produkteigenschaften. Um die Folgen von Schwankungen bei Produkten und Prozessen frühestmöglich im Produktentwicklungsprozess virtuell zu untersuchen und die Folgen bewerten zu können, bieten virtuelle Absicherungsmethoden ein enormes Potential, da sie früh im Produktentwicklungsprozess genutzt werden können. In der Großserienfertigung – speziell im Automotive Bereich – werden bereits eine Vielzahl virtueller Absicherungsmethoden verwendet, um sicherzustellen, dass die funktionalen und ästhetischen Qualitätsanforderungen in der Serienfertigung erreicht werden.

Obwohl es unterschiedliche Forschungsfelder gibt, die sich damit beschäftigen, wie Produkte robust gestaltet und virtuell abgesichert werden können, gibt es in der Forschungslandschaft und der industriellen Praxis einen deutlichen Handlungsbedarf, der zu folgenden, in Abschnitt 3.3 diskutierten, wissenschaftlichen Fragestellungen führt:

1. Wie können Nennmaße bei abweichungsbehafteten Mechanismen gewählt werden, sodass diese Mechanismen ein robustes Bewegungsverhalten aufweisen?
2. Wie können Toleranzanalysemodelle für Mechanismen validiert und die Validierungsgüte quantifiziert werden?
3. Wie können Methoden und virtuelle Werkzeuge des Toleranzmanagements systematisch eingesetzt werden, sodass Mechanismen mit validierten Toleranzanalysemodellen effizient virtuell abgesichert werden können?

Die vorliegende Arbeit erforscht den Einsatz und die Validierung virtueller Absicherungsmethoden für abweichungsbehaftete Mechanismen. Aus den theoretischen Überlegungen resultiert eine methodische Vorgehensweise, die erstmalig den zielgerichteten Einsatz von Absicherungsmethoden und deren Validierung erlaubt.

Da die Eigenschaften eines Produktes maßgeblich durch seine geometrischen Nennmaße und deren Abweichungen beeinflusst werden, hat die Wahl der Nennmaße bei der Ausgestaltung von Produkten weitreichende Folgen. Bei der Wahl der Nennmaße werden jedoch nicht nur die idealen Eigenschaften eines Produkts, wie beispielsweise dessen Masse, beeinflusst. Auch auf die Folgen von unweigerlich auftretenden geometrischen Abweichungen haben die gewählten Nennmaße einen signifikanten Einfluss. Dass aus Sicht des Toleranzmanagements die Wahl der Nennmaße einen großen Einfluss haben, wird durch die Umfrageergebnisse unter den Toleranzexperten unterstrichen. In dieser Arbeit wird daher ein übertragbares Vorgehen für die Wahl optimaler Nennmaße, unter Berücksichtigung von geometrischen Abweichungen, für Mechanismen vorgestellt. Bei der Anwendung dieser Nennmaßoptimierung an der Demonstratorbaugruppe konnte sowohl die prinzipielle Anwendbarkeit, als auch die Verbesserung der Eigenschaften eindrücklich demonstriert werden. Dieses Vorgehen zur Nennmaßoptimierung versetzt somit Produktentwickler in die Lage Nennmaße so zu wählen, dass ein robustes Bewegungsverhalten frühzeitig im Produktentwicklungsprozess sichergestellt werden kann.

Darüber hinaus wird in der Arbeit die Frage beantwortet, wie Toleranzanalysemodelle für Mechanismen validiert werden können. Dazu wird erstmals ein universelles, an die jeweiligen Gegebenheiten anpassbares Vorgehen für die Validierung vorgestellt. Um den Abgleich zwischen physikalischer und virtueller Welt zu realisieren, wird ausgehend von der Konzeption eines Validierungsprüfstands, über die Auswahl der zu prüfenden Bauteile, bis hin zur Auswertung der Versuchsergebnisse, das tatsächliche Bewegungsverhalten eines Systems experimentell bestimmt. Auf der virtuellen Ebene wird dieses Bewegungsverhalten ebenfalls abgebildet, wobei bei der praktischen Umsetzung der Validierung unterschiedliche Toleranzanalysemodelle bewertet und einander gegenübergestellt werden. Um schlussendlich die Frage beantworten zu können, ob ein Simulationsmodell valide ist, werden ausgewählte Ähnlichkeitskennzahlen einander gegenübergestellt und bewertet. Für Toleranzanalysemodelle von Mechanismen konnte damit erstmals gezeigt werden, wie diese Modelle systematisch validiert werden können.

Die Validierung der Toleranzanalysemodelle stellt darüber hinaus einen Kernaspekt dar, wenn es darum geht die Frage zu beantworten, wie Methoden und Werkzeuge des Toleranzmanagements systematisch eingesetzt werden können, sodass Mechanismen effizient virtuell abgesichert werden können.

Um die dritte Fragestellung zu beantworten wird im Rahmen dieser Arbeit dem Produktentwickler ein Vorgehen zur Verfügung gestellt, das den systematischen Einsatz und die Validierung virtueller Absicherungsmethoden für Mechanismen erlaubt. Dieses Vorgehen ist derart gestaltet, dass es universell auf unterschiedliche Toleranzanalyseverfahren übertragen werden kann, was sowohl aus wissenschaftlicher, als auch aus industrieller Sicht relevant ist, da in beiden Umfeldern unterschiedliche Toleranzanalyseverfahren verwendet werden.

Resümierend kann daher festgehalten werden, dass das übergeordnete Ziel, die Unterstützung des Produktentwicklers bei der Entwicklung robuster Mechanismen durch den Einsatz validierter virtueller Absicherungsmethoden, erreicht wurde.

Aus den Erkenntnissen der gesamten Arbeit, resultieren weitere wissenschaftliche Fragestellungen. Ausgewählte potentielle Forschungsfelder sollen abschließend kurz umrissen werden:

In dieser Arbeit wurden unterschiedliche Toleranzanalyseverfahren verwendet, die bei der Modellbildung zwangsläufig vereinfachende Annahmen voraussetzen. So wurde beispielsweise die Starrkörperhypothese und eine reibungs- und verschleißfreie Bewegung vorausgesetzt. Da alle diese Annahmen zu einer epistemischen Unsicherheit führen, sollte zukünftig untersucht werden, welche weiteren Einflussfaktoren bei virtuellen Toleranzanalysen zusätzlich berücksichtigt werden können. Darüber hinaus wäre ebenfalls eine Toleranzbetrachtung über den gesamten Lebenszyklus eines Produktes – von der Entstehung, über den Betrieb, bis hin zum Wartungs- oder Reparaturfall – ein weiteres potentielles Forschungsfeld. Mit der Integration von fertigungsspezifischen Abweichungsinformationen wurde dafür schon ein Grundstein gelegt. Die vollständige Validierung auf Produktebene und die Integration von weiteren Einflussgrößen bietet das Potential für weitere grundlagenwissenschaftliche Untersuchungen.

7 Summary and outlook

The complexity of the tasks involved during product development is nowadays greater than ever. This is partly due to the fact that the number of relevant aspects has increased and the dependencies and the resulting interactions of subsystems are enormously high. At the same time, there is enormous innovation, time and cost pressure, while numerous uncertainties in product development are omnipresent.

In addition, all processes are inevitably subject to variations, which inevitably results in certain quality fluctuations for the properties of manufactured products. At this point, *Robust Design* offers a methodology that allows the variation of individual processes to be systematically incorporated into product development. The aim of the *Robust Design* is the systematic reduction of quality-deriving fluctuations of relevant product properties. In order to virtually examine the consequences of product and process variations as early as possible in the product development process and to be able to evaluate the consequences, virtual validation methods offer an enormous potential, since they can be used early in the product development process. In mass production – especially in the automotive sector – a multitude of virtual validation methods are already used to ensure that the functional and aesthetic quality requirements are met in mass production.

Although there are different fields of research dealing with the question how products can be designed robustly and secured virtually, there is a clear need for action in the research landscape and in industrial practice, which leads to the following scientific questions discussed in Section 3.3:

1. How can nominal dimensions of mechanisms be selected so that these mechanisms have a robust motion behavior?
2. How can tolerance analysis models for mechanisms be validated and how can the validation quality be quantified?
3. How can methods and virtual tools of dimensional management be used systematically, so that mechanisms can be validated efficiently with validated tolerance analysis models?

The present work researches the use and validation of virtual validation methods for deviation-afflicted mechanisms. The theoretical considerations result in a methodological approach that allows the targeted use of validation methods and their validation for the first time.

Since the properties of a product are significantly influenced by its geometric nominal dimensions and their deviations, the choice of nominal dimensions has far-reaching consequences for the design of products. However, not only the ideal properties of a product, such as its mass, are influenced by the choice of nominal dimensions. The selected nominal dimensions also have a significant influence on the consequences of unavoidable geometric deviations. The fact that, from the point of view of dimensional management, the choice of nominal dimensions has a great influence is underlined by the results of a survey among tolerance experts. Therefore, this thesis presents a transferable procedure for the selection of optimal nominal dimensions, considering geometrical deviations, for mechanical systems. The application of this nominal dimension optimization on the demonstrator assembly demonstrated the principle applicability as well as the improvement of the properties. This procedure for nominal dimension optimization enables product developers to select nominal dimensions in such a way that a robust motion behavior can be established early in the product development process.

In addition, the thesis answers the question of how to validate models of relevance for mechanisms. For the first time, a universal validation procedure that can be adapted to the respective conditions is presented. In order to realize the comparison between the physical and virtual world, the actual motion behavior of a system is experimentally determined starting from the conception of a validation test bench, over the selection of the components to be tested, up to the evaluation of the test results. On the virtual level, this motion behavior is also mapped. During the practical implementation of the validation, different tolerance analysis models are evaluated and compared. To finally answer the question whether a simulation model is valid, selected similarity indices are compared and evaluated. For tolerance analysis models of mechanisms it could be shown for the first time how these models can be systematically validated.

The validation of the tolerance analysis models is also a key aspect in answering the question of how tolerance management methods and tools can be systematically applied so that mechanisms can be efficiently secured virtually.

In order to answer the third question, the product developer is provided with a procedure that allows the systematic use and validation of virtual security methods for mechanisms. This procedure is designed in such a way that it can be universally transferred to different tolerance analysis methods. This is relevant from a scientific as well as from an industrial point of

view, since different tolerance analysis methods are used in both environments.

In conclusion, the overall goal of supporting the product developer in the development of robust mechanisms by using validated virtual security methods has been achieved.

From the findings of the entire work, further scientific questions arise. Finally, selected potential fields of research will be briefly outlined:

In this thesis, different tolerance analysis methods were used, which inevitably require simplifying assumptions for the model building. For example, the rigid body hypothesis and a friction- and wear-free movement were assumed. Since all these assumptions lead to an epistemic uncertainty, it should be investigated in the future, which further influencing factors can be additionally considered in virtual tolerance analyses. In addition, a tolerance analysis over the entire life cycle of a product - from its creation, through operation, to maintenance or repair - would also be a further potential field of research. The integration of production-specific deviation information has already laid the foundation for this. The complete validation on product level and the integration of further influencing variables offers the potential for further basic scientific investigations.

8 Anhang

8.1 Messwerte und Kombinationen der Hebel

Tabelle 11: Messwerte der Verbindungshebel

Bauteil	Durchmesser linkes Loch (in mm)	Durchmesser rechtes Loch (in mm)	Lochabstand (in mm)
1	7,0664	7,0412	88,8590
2	7,0639	7,0692	89,0296
3	7,0549	7,0642	89,0940
4	7,0726	7,0594	89,2059
5	7,0620	7,0518	89,0793
6	7,0594	7,0615	89,0215
7	7,0673	7,0543	89,1420
8	7,0620	7,0644	89,0856
9	7,0493	7,0680	88,9705
10	7,0545	7,0602	89,0016
11	7,0395	7,0529	88,8708
12	7,0540	7,0666	88,9961
13	7,0624	7,0732	89,1550
14	7,0600	7,0539	89,0812
15	7,0655	7,0498	89,1919
16	7,0525	7,0591	89,0381
17	7,0553	7,0498	88,8576
18	7,0480	7,0471	88,9902

8.1 Messwerte und Kombinationen der Hebel

19	7,0534	7,0565	89,1049
20	7,0598	7,0684	89,0051

Tabelle 12: Messwerte der linken Hebel

Bauteil	Durchmes- ser Boh- rung (in mm)	Durchmes- ser linker Bolzen (in mm)	Durchmes- ser rechter Bolzen (in mm)	Abstand linker Bolzen (in mm)	Abstand rechter Bolzen (in mm)
1	9,0296	6,9989	7,9871	36,8599	34,8458
2	8,9826	6,9992	8,0055	36,5362	34,7044
3	8,9913	7,0082	8,0020	36,5922	35,0565
4	9,0620	7,0307	8,0032	36,9435	35,1583
5	9,0140	6,9962	8,0058	36,4536	34,9806
6	9,0221	7,0055	7,9886	36,0330	35,1064
7	9,0477	6,9802	7,9962	36,3914	34,8699
8	9,0721	7,0670	7,9892	36,8347	35,2031
9	9,0511	6,9887	7,9918	36,7756	34,8548
10	8,9943	7,0150	7,9958	36,0507	35,0267
11	9,0137	7,0241	7,9994	36,2941	35,0312
12	9,0428	7,0211	8,0305	36,6162	34,6721
13	9,0394	7,0112	7,9903	36,2790	34,9583
14	8,9950	7,0123	7,9852	36,4538	34,7487
15	8,9864	7,0003	7,9968	36,8333	35,2482
16	9,0264	7,0188	8,0795	35,9814	34,6193
17	8,9873	6,9933	8,0290	36,5296	34,6972
18	9,0528	7,0102	7,9915	36,5400	34,8831
19	9,0106	7,0038	8,0399	36,6782	35,1432
20	9,0650	7,0821	7,9916	36,5875	35,0487

Tabelle 13: Messwerte rechter Hebel

Bauteil	Durchmesser linkes Loch (in mm)	Durchmesser rechtes Loch (in mm)	Lochabstand (in mm)
1	8,9944	8,0134	35,1137
2	8,9842	8,0210	35,4793
3	8,9859	7,9987	35,1527
4	8,9807	8,0066	35,1397
5	8,9982	8,0090	35,3039
6	8,9905	8,0136	34,9814
7	9,0314	8,0782	35,1447
8	8,9767	8,9767	34,7801
9	8,9912	8,0147	35,0124
10	8,9939	8,0197	35,1787
11	8,9952	8,1271	34,9611
12	8,9804	8,0280	35,2741
13	9,0484	7,8787	34,9190
14	8,9845	8,0223	35,0909
15	9,0011	8,0244	35,2014
16	9,0145	8,0053	35,0424
17	8,9970	8,0502	34,7036
18	8,9774	8,0658	34,7935
19	8,9860	8,0239	34,5532
20	8,9895	8,0119	34,9067

Tabelle 14: OFAT Versuchsplan der Validierung

Nr. des Versuchs	Linker Hebel	Rechter Hebel	Verbindungshebel
1	8	2	4
2	8	2	17
3	8	19	4
4	8	19	17
5	4	2	4
6	4	2	17
7	4	19	4
8	4	19	17
9	13	2	4
10	13	2	17
11	13	19	4
12	13	19	17
13	16	2	4
14	16	2	17
15	16	19	4
16	16	19	17

8.2 Standardunsicherheit der Wiederholversuche

Ausreißer sind gemäß Abschnitt 2.3.4 ermittelt worden und sind in Klammern dargestellt. Diese wurde bei der Bestimmung der Mittelwerte nicht berücksichtigt.

Tabelle 15: Standardunsicherheit der Wiederholversuche

Nummer des Versuchs	Mittlere Standardunsicherheit u_p (in μm)	Nummer des Versuchs	Mittlere Standardunsicherheit u_p (in μm)
1 A	(225,12)	1 B	(199,67)
2 A	158,31	2 B	103,71
3 A	33,94	3 B	49,76
4 A	160,36	4 B	(272,78)
5 A	22,11	5 B	25,91
6 A	118,78	6 B	132,16
7 A	22,11	7 B	76,72
8 A	26,22	8 B	16,16
9 A	58,42	9 B	20,42
10 A	33,11	10 B	58,69
11 A	58,15	11 B	20,42
12 A	35,00	12 B	19,48
13 A	84,87	13 B	40,41
14 A	30,63	14 B	33,32
15 A	55,14	15 B	73,90
16 A	69,40	16 B	76,81
Mittelwert	64,44	Mittelwert	53,42

8.3 Ähnlichkeitskennzahlen und deren Korrelationen

Im Folgenden sind die bestimmten Ähnlichkeitskennzahlen dargestellt.

8.3.1 Ähnlichkeitskennzahlen für unterschiedliche Simulationen

Hybrides Toleranzanalysemodell ohne Lochspiel

Tabelle 16: Ähnlichkeitskennzahlen für das **hybride Toleranzanalysemodell ohne Lochspiel, ohne Krafteinwirkung**

Nummer des Versuchs	NSE	R ²	IA	NRMSE	KA _{norm}
1 A	0,99703	0,99723	0,99926	0,98033	0,9891
2 A	0,99703	0,99790	0,99927	0,98009	0,98911
3 A	0,99899	0,99927	0,99974	0,98855	0,99399
4 A	0,99827	0,99933	0,99957	0,98486	0,99061
5 A	0,99814	0,99825	0,99953	0,98461	0,99151
6 A	0,99923	0,99937	0,99981	0,99009	0,99457
7 A	0,99814	0,99825	0,99953	0,98461	0,99151
8 A	0,99845	0,99889	0,99961	0,98575	0,99205
9 A	0,99877	0,99901	0,99969	0,98745	0,99348
10 A	0,99836	0,99878	0,99959	0,98539	0,99249
11 A	0,99833	0,99888	0,99958	0,98519	0,99170
12 A	0,99838	0,99884	0,99960	0,98540	0,99191
13 A	0,99841	0,99925	0,99961	0,98560	0,99187
14 A	0,99802	0,99877	0,99951	0,98392	0,99068
15 A	0,99838	0,99950	0,99960	0,98543	0,99090
16 A	0,99847	0,99910	0,99962	0,98582	0,99182
Mittelwert	0,99828	0,99879	0,99957	0,98519	0,99171

Tabelle 17: Ähnlichkeitskennzahlen für das **hybride Toleranzanalysemodell ohne Lochspiel, mit Krafteinwirkung**

Nummer des Versuchs	NSE	R ²	IA	NRMSE	KA _{norm}
1 A	0,99780	0,99810	0,99944	0,98328	0,99007
2 A	0,99791	0,99866	0,99946	0,98372	0,99006
3 A	0,99839	0,99869	0,99959	0,98553	0,99218
4 A	0,99876	0,99948	0,99968	0,98743	0,99227
5 A	0,99944	0,99953	0,99986	0,99159	0,99498
6 A	0,99908	0,99911	0,99977	0,98923	0,99372
7 A	0,99856	0,99909	0,99964	0,98627	0,99234
8 A	0,99834	0,99888	0,99959	0,98520	0,99159
9 A	0,99848	0,99853	0,99962	0,98615	0,99179
10 A	0,99838	0,99848	0,99959	0,98570	0,99133
11 A	0,99848	0,99853	0,99962	0,98615	0,99179
12 A	0,99840	0,99904	0,99960	0,98550	0,99204
13 A	0,99823	0,99847	0,99955	0,98506	0,99089
14 A	0,98694	0,98701	0,99668	0,95946	0,97696
15 A	0,99803	0,99944	0,99952	0,98391	0,98978
16 A	0,99740	0,99895	0,99937	0,98145	0,98917
Mittelwert	0,99766	0,99812	0,99941	0,98410	0,99069

Hybrides Toleranzanalysemodell mit Lochspiel

Tabelle 18: Ähnlichkeitskennzahlen für das **hybride Toleranzanalysemodell mit Lochspiel, ohne Krafteinwirkung**

Nummer des Versuchs	NSE	R ²	IA	NRMSE	KA _{norm}
1 A	0,99686	0,99706	0,99922	0,97977	0,98884
2 A	0,99695	0,99781	0,99924	0,97982	0,98901
3 A	0,99888	0,99919	0,99972	0,98799	0,99369
4 A	0,99825	0,99931	0,99956	0,98478	0,99065
5 A	0,99799	0,99811	0,99950	0,98401	0,99117
6 A	0,99917	0,99931	0,99979	0,98972	0,99438
7 A	0,99799	0,99811	0,99950	0,98401	0,99117
8 A	0,99839	0,99882	0,99960	0,98547	0,99194
9 A	0,99865	0,9989	0,99966	0,98686	0,99317
10 A	0,99828	0,99871	0,99957	0,98505	0,99233
11 A	0,99824	0,99878	0,99956	0,9848	0,99153
12 A	0,99831	0,99877	0,99958	0,98510	0,99179
13 A	0,99869	0,99952	0,99968	0,98696	0,99243
14 A	0,99796	0,9987	0,99950	0,98367	0,99058
15 A	0,99845	0,99954	0,99962	0,98576	0,99079
16 A	0,99842	0,99904	0,99961	0,98562	0,99174
Mittelwert	0,99822	0,99873	0,99956	0,98496	0,99158

Tabelle 19: Ähnlichkeitskennzahlen für das **hybride Toleranzanalysemodell mit Lochspiel, mit Krafteinwirkung**

Nummer des Ver- suchs	NSE	R ²	IA	NRMSE	KA _{norm}
1 A	0,99761	0,99795	0,99939	0,98260	0,98964
2 A	0,99778	0,99857	0,99943	0,98326	0,98977
3 A	0,99824	0,99857	0,99956	0,98490	0,99182
4 A	0,99868	0,99943	0,99966	0,98701	0,99200
5 A	0,99938	0,99946	0,99985	0,99115	0,99478
6 A	0,99901	0,99904	0,99975	0,98881	0,99347
7 A	0,99849	0,99901	0,99962	0,98590	0,99220
8 A	0,99828	0,99882	0,99957	0,98495	0,99148
9 A	0,99834	0,99840	0,99958	0,98550	0,99137
10 A	0,99827	0,99839	0,99956	0,98525	0,99104
11 A	0,99834	0,99840	0,99958	0,98550	0,99137
12 A	0,99835	0,99898	0,99959	0,98526	0,99195
13 A	0,99870	0,99898	0,99967	0,98722	0,99213
14 A	0,98717	0,98725	0,99673	0,95981	0,97717
15 A	0,99805	0,99943	0,99952	0,98398	0,98966
16 A	0,99738	0,99890	0,99936	0,98136	0,98913
Mittelwert	0,99763	0,99810	0,99940	0,98390	0,99056

Toleranzanalysemodell mit Skin Models Shapes

Tabelle 20: Ähnlichkeitskennzahlen für das Toleranzanalysemodell mit Skin Model Shapes, mit Lochspiel ohne Krafteinwirkung

Nummer des Versuchs	NSE	R ²	IA	NRMSE	KA _{norm}
1 A	0,99699	0,99723	0,99925	0,98021	0,98900
2 A	0,99697	0,99790	0,99925	0,97990	0,98896
3 A	0,99860	0,99930	0,99964	0,98653	0,99178
4 A	0,99868	0,99940	0,99967	0,98677	0,99322
5 A	0,99800	0,99824	0,99950	0,98406	0,99096
6 A	0,99905	0,99936	0,99977	0,98904	0,99381
7 A	0,99800	0,99824	0,99950	0,98406	0,99096
8 A	0,99872	0,99893	0,99968	0,98704	0,99282
9 A	0,99830	0,99890	0,99958	0,98526	0,99314
10 A	0,99777	0,99864	0,99944	0,98296	0,99174
11 A	0,99825	0,99886	0,99956	0,98484	0,99246
12 A	0,99816	0,99881	0,99953	0,98446	0,99214
13 A	0,99673	0,99919	0,99921	0,97937	0,98796
14 A	0,99640	0,99872	0,99913	0,97830	0,98701
15 A	0,99822	0,99950	0,99956	0,98472	0,99046
16 A	0,99835	0,99910	0,99959	0,98529	0,99149
Mittelwert	0,99795	0,99877	0,99949	0,98393	0,99112

Tabelle 21: Ähnlichkeitskennzahlen für das **Toleranzanalysemodell mit Skin Model Shapes, mit Lochspiel, mit Krafteinwirkung**

Nummer des Ver- suchs	NSE	R ²		IA	NRMSE	KA _{norm}
1 A	0,99783	0,99810		0,99945	0,98340	0,99020
2 A	0,99796	0,99866		0,99947	0,98392	0,99022
3 A	0,99782	0,99872		0,99944	0,98319	0,98970
4 A	0,99768	0,99948		0,99939	0,98279	0,98906
5 A	0,99917	0,99953		0,99979	0,98974	0,99367
6 A	0,99898	0,99911		0,99975	0,98869	0,99336
7 A	0,99885	0,99914		0,99971	0,98772	0,99328
8 A	0,99865	0,99893		0,99966	0,98668	0,99254
9 A	0,99837	0,99850		0,99959	0,98565	0,99192
10 A	0,99830	0,99844		0,99957	0,98537	0,99145
11 A	0,99837	0,99850		0,99959	0,98565	0,99192
12 A	0,99819	0,99900		0,99954	0,98457	0,99245
13 A	0,99842	0,99848		0,99961	0,98587	0,99149
14 A	0,98674	0,98695		0,99670	0,95914	0,97685
15 A	0,99786	0,99944		0,99948	0,98320	0,98934
16 A	0,99719	0,99895		0,99932	0,98070	0,98873
Mittelwert	0,99752	0,99812		0,99938	0,98352	0,99039

8.3.2 Korrelationen der Ähnlichkeitskennzahlen

Im Folgenden sind die Korrelationen der unterschiedlichen Simulationsmodelle tabellarisch dargestellt.

Hybrides Toleranzanalysemodell ohne Lochspiel

Tabelle 22: Korrelation der Ähnlichkeitskennzahlen für das **hybride Toleranzanalysemodell ohne Lochspiel, ohne Krafteinwirkung**

	NSE	R ²	IA	NRMSE	KA _{norm}	Aktivsumme
NSE		0,8426	0,9998	0,9921	0,9341	3,7686
R ²	0,8426		0,8515	0,7983	0,6384	3,1308
IA	0,9998	0,8515		0,9909	0,9293	3,7715
NRMSE	0,9921	0,7983	0,9909		0,9569	3,7382
KA _{norm}	0,9341	0,6384	0,9293	0,9569		3,4587

Tabelle 23: Korrelation der Ähnlichkeitskennzahlen für das **hybride Toleranzanalysemodell ohne Lochspiel, mit Krafteinwirkung**

	NSE	R ²	IA	NRMSE	KA _{norm}	Aktivsumme
NSE		0,9878	0,9999	0,9840	0,9756	3,9473
R ²	0,9878		0,9889	0,9547	0,9418	3,8732
IA	0,9999	0,9889		0,9832	0,9748	3,9468
NRMSE	0,9840	0,9547	0,9832		0,9953	3,9172
KA _{norm}	0,9756	0,9418	0,9748	0,9953		3,8875

Hybrides Toleranzanalysemodell mit Lochspiel

Tabelle 24: Korrelation der Ähnlichkeitskennzahlen für das **hybride Toleranzanalysemodell mit Lochspiel, ohne Krafteinwirkung**

	NSE	R ²	IA	NRMSE	KA _{norm}	Aktiv- summe
NSE		0,8752	0,9998	0,993	0,9244	3,7924
R ²	0,8752		0,8831	0,8389	0,6644	3,2616
IA	0,9998	0,8831		0,9919	0,9191	3,7939
NRMSE	0,993	0,8389	0,9919		0,9452	3,7690
KA _{norm}	0,9244	0,6644	0,9191	0,9452		3,4531

Tabelle 25: Korrelation der Ähnlichkeitskennzahlen für das **hybride Toleranzanalysemodell ohne Lochspiel, mit Krafteinwirkung**

	NSE	R ²	IA	NRMSE	KA _{norm}	Aktiv- summe
NSE		0,9877	0,9999	0,9844	0,9752	3,9472
R ²	0,9877		0,9889	0,9553	0,9408	3,8727
IA	0,9999	0,9889		0,9836	0,9744	3,9468
NRMSE	0,9844	0,9553	0,9836		0,994	3,9173
KA _{norm}	0,9752	0,9408	0,9744	0,994		3,8844

Toleranzanalysemodell mit Skin Models Shapes

Tabelle 26: Korrelation der Ähnlichkeitskennzahlen für das **Toleranzanalysemodell mit Skin Model Shapes, ohne Lochspiel, ohne Krafteinwirkung**

	NSE	R ²	IA	NRMSE	KA _{norm}	Aktivsumme
NSE		0,5376	0,9992	0,9954	0,9427	3,4749
R ²	0,5376		0,5601	0,5556	0,4233	2,0766
IA	0,9992	0,5601		0,9967	0,9362	3,4922
NRMSE	0,9954	0,5556	0,9967		0,9336	3,4813
KA _{norm}	0,9427	0,4233	0,9362	0,9336		3,2358

Tabelle 27: Korrelation der Ähnlichkeitskennzahlen für das **Toleranzanalysemodell ohne Lochspiel, mit Krafteinwirkung**

	NSE	R ²	IA	NRMSE	KA _{norm}	Aktivsumme
NSE		0,9792	0,9999	0,986	0,9686	3,9337
R ²	0,9792		0,979	0,9415	0,9113	3,8110
IA	0,9999	0,979		0,9863	0,9693	3,9345
NRMSE	0,986	0,9415	0,9863		0,9893	3,9031
KA _{norm}	0,9686	0,9113	0,9693	0,9893		3,8385

8.4 Eingesetzte Hard- und Software

Hardware

PC mit i5 Prozessor, 3,2 GHz, 8 GB RAM, Windows 7

PC mit i5 Prozessor, 3,3 GHz, 16 GB RAM, Windows 10

Software-Werkzeuge

- Implementierung der Simulationen und der Auswertung der Messdaten: MATLAB R2016a, 2019a
- Verwendung der Partikelschwarm-Optimierungstoolbox: Another Particel Swarm Toolbox [179]
- Verwendung der „Eikos: A Simulation Toolbox for Sensitivity Analysis“ [186]

8.5 Ausgewählte Prüfstandskomponenten

Antrieb

- Beckhoff Servomotor AM 8122-1J20-0000(0,8 Nm; $n=4500$; $I=8,0A$)
- Beckhoff Servomotorklemme OCT (50V DC; 4,5A; 1DO 24V DC für Bremse; STO)
- Beckhoff 7-Toll-“Economy“-Panel PC (CP6606-0001-0020)

Drehgeber Heidenhain ERN 480

- Inkrementaler Drehgeber mit Eigenlagerung
- Strichzahl: 5000
- Schutzart: IP 64 (EN 60529)
- Arbeitstemperatur: $-40/+100\text{ }^{\circ}\text{C}$

Doppelinterferometer der Firma SIOS (Einzelanfertigung)

Getriebestufe des Prüfstands (geradverzahnt, Evolventenverzahnung)

	Ritzel	Zahnrad
Modul	1 mm	1 mm
Anzahl der Zähne	17	39
Teilkreis	17 mm	39 mm
Profilverschiebung	0,2045 mm	-0,3135 mm
Eingriffswinkel	20°	20°
Radbreite	8 mm	6 mm
Material	16CrMoS5	PA66 Ultramid A3K

Literaturverzeichnis

- [1] PONOMAROV, S.Y.; HOLCOMB, M.C.: Understanding the concept of supply chain resilience. The International Journal of Logistics Management, Vol. 20 Nr. 1, S. 124-143, 2009.
- [2] LOOSE, N.: Made-In-Country-Index (MICI) 2017 : Country Brands im weltweiten Vergleich. URL <https://de.statista.com/page/Made-In-Country-Index> – Überprüfungsdatum 2020-03-18.
- [3] DIN EN ISO 9000. 2015-11. Qualitätsmanagementsysteme - Grundlagen und Begriffe, Berlin: Beuth, 2015.
- [4] GARVIN, D.: Whats Does "Product Quality" Really Mean? In: Sloan Management Review, 1984, S. 25-41.
- [5] SRINIVASAN, V.: Computational Metrology for the Design and Manufacture of Product Geometry : A Classification and Synthesis. In: Journal of Computing and Information Science in Engineering 7, Nr. 1, 2007, S. 3-9.
- [6] STYLIDIS, K.: PerceivedQuality of Cars : A Novel Framework and Evaluation Methodology. Göteborg, 2019.
- [7] KLEIN, B.: Toleranzdesign im Maschinen- und Fahrzeugbau : Dimensionelle und geometrische Toleranzen (F+L), CAD-Tolerierung, Tolerierungsprinzipien, Maßketten und Oberflächen. 4., aktualisierte Auflage. Berlin, Boston : De Gruyter Oldenbourg, 2018.
- [8] EHRENSPIEL, K.; MEERKAMM, H.: Integrierte Produktentwicklung : Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit. 6., überarbeitete und erweiterte Auflage. München : Hanser, 2017.
- [9] LINDEMANN, U.: Methodische Entwicklung technischer Produkte : Springer Berlin Heidelberg, 2009.
- [10] NN: Geschäftsbericht 2013 : BMW Group. 2013.
- [11] NN: Geschäftsbericht 2015 : BMW Group. 2015.
- [12] NN: Geschäftsbericht 2019 : BMW Group. 2019.
- [13] NN: Geschäftsbericht 2017 : BMW Group. 2017.
- [14] KRAMER, F.: Passive Sicherheit von Kraftfahrzeugen. Wiesbaden : Springer Fachmedien (ATZ / MTZ-Fachbuch), 2009.
- [15] HERFELD, U.: Matrix-basierte Verknüpfung von Komponenten und Funktionen zur Integration von Konstruktion und numerischer Simulation. München : Techn. Univ., Dissertation, 2007.

- [16] RABE, M.; SPIEKERMANN, S.; WENZEL, S.: Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik : Vorgehensmodelle und Techniken. Berlin, Heidelberg: Springer, 2008.
- [17] GROTE, K.-H.: Dubbel : Taschenbuch für den Maschinenbau. 22. Aufl. FELDHUSEN, Jörg (Hrsg.). s.l. Berlin, Heidelberg: Springer, 2007.
- [18] VDI 2221: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte Blatt 1, Berlin: Beuth, 2019.
- [19] KIRAN, D. R.: Total Quality Management : Key Concepts and Case Studies. Amsterdam, Boston : Elsevier, 2017.
- [20] TAGUCHI, G.; CHOWDHURY, S.; TAGUCHI, S.: Robust engineering. New York : McGraw-Hill, 2000.
- [21] PARK, G.-J.; LEE, T.-H.; LEE, K. H.; HWANG, K.-H.: Robust Design: An Overview. In: AIAA Journal 44, Nr. 1, 2006, S. 181–191.
- [22] SUH, N. P.: Axiomatic design : Advances and applications. New York, Oxford : Oxford University Press, op. 2001.
- [23] KLEIN, B.: TRIZ/TIPS : Methodik des erfinderischen problemlösens. 2., verbesserte und erweiterte Auflage. München, Germany: Oldenbourg, 2007.
- [24] TAGUCHI, G.; ELSAYED, E. A.; HSIANG, T. C.: Quality engineering in production systems. New York : McGraw-Hill, 1988.
- [25] KEMMLER, S.: Integrale Methodik zur Entwicklung von robusten, zuverlässigen Produkten. Stuttgart : Institut für Maschinenelemente, Universität Stuttgart. Dissertation. 2018.
- [26] WUTTKE, F.: Robuste Auslegung von Mehrkörpersystemen : Frühzeitige Robustheitsoptimierung von Fahrzeugmodulen im Kontext modulbasierter Entwicklungsprozesse, Dissertation., 2012. Hannover, Karlsruhe: KIT Scientific Publishing, 2012.
- [27] SCHMOLDT, A.; BENTHE, H. F.; HABERLAND, G.: Digitoxin metabolism by rat liver microsomes. In: Biochemical pharmacology 24, 1975, S. 1639–1641.
- [28] BOX, G. E. P.; DRAPER, N. R.: Empirical model-building and response surfaces. [7. Dr.]. New York : Wiley, 1987.
- [29] ROBBINS, H.; MONRO, S.: A Stochastic Approximation Method. In: The Annals of Mathematical Statistics 22, Nr. 3, 1951, S. 400–407.
- [30] KENNEDY, J.; EBERHART, R.: Particle swarm optimization. In: Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks : IEEE, 1995, S. 1942–1948.

- [31] DORIGO, M.; COLORNI, A.: The Ant System: Optimization by a colony of cooperating agents, Bd. 26. In: IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics–Part B, 1996, S. 1–13.
- [32] RAO, S. S.: Engineering optimization : Theory and practice. Fifth edition. Hoboken, NJ : Wiley, 2020.
- [33] YANG, X.-S.: Nature-inspired metaheuristic algorithms. Second edition. Frome, UK : Luniver Press, 2010.
- [34] HALLMANN, M.; SCHLEICH, B.; WARTZACK, S.: From tolerance allocation to tolerance-cost optimization: a comprehensive literature review. In: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 7, Nr. 1, S. 3, 2020.
- [35] GRIFFITHS, A. J. F.; WESSLKER, S. R.; CARROLL, S. B.; DOEBLEY, J.: An introduction to genetic analysis. Eleventh edition, 2015.
- [36] BIANCHI, L.; DORIGO, M.; GAMBARDELLA, L. Maria GUTJAHR, W. J.: A survey on metaheuristics for stochastic combinatorial optimization. In: Natural Computing 8, Nr. 2, 2009, S. 239–287.
- [37] KENNEDY, J.; EBERHART, R. C.; SHI, Y.: Swarm intelligence : Collective, adaptive. San Francisco : Morgan Kaufman Publishers, 2001.
- [38] MYSZKA, D. H.: Machines and mechanisms : Applied kinematic analysis. 4th ed. Upper Saddle River, N.J. : Pearson Prentice Hall, 2012.
- [39] SCHRAMM, D.; HILLER, M.; BARDINI, R.: Modellbildung und Simulation der Dynamik von Kraftfahrzeugen. Berlin : Springer, 2010.
- [40] WALTER, M.; SPRÜGEL, T.; WARTZACK, S.: Tolerance analysis of systems in motion taking into account interactions between deviations. In: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture 227, Nr. 5, 2013 S. 709–719.
- [41] MATTHIASSEN, B.: Design for Robustness and Reliability: Improving the Quality Consciousness in Engineering Design. Technical University of Denmark. 1997.
- [42] SHIGLEY, J. E.; UICKER, J. J.; PENNOCK, G. R.: Theory of machines and mechanisms. 4th ed. New York : Oxford University Press, 2011.
- [43] EBRO, M.; HOWARD, T. J.; RASMUSSEN, J. Juul: The foundation for robust design: Enabling robustness through kinematic design and design clarity. In: International Design Conference - DESIGN 2012.
- [44] FELDHUSEN, J. (Hrsg.); GROTE, K.-H. (Hrsg.): Pahl/Beitz Konstruktionslehre : Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktent-

- wicklung. 8., vollständig überarbeitete Auflage. Berlin, Heidelberg : Springer Vieweg, 2013.
- [45] BILEL, N.; MOHAMED, N.; ZOUHAIER, A.; LOTFI, R.: Multi-objective robust design optimization of a mechatronic system with uncertain parameters, using a polynomial chaos expansion method. In: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering 231, Nr. 9, 2017, S. 729–739.
- [46] BICHENO, J.; ELLIOT, B. B. R.: Operations management : An active learning approach. Oxford, UK, Malden, MA : Blackwell Publishers, 2002.
- [47] ISHIKAWA, K.: Guide to quality control. 2nd rev. ed., 14th printing. Tokyo, etc. : Asian Productivity Organization, 1998.
- [48] LILIANA, L.: A new model of Ishikawa diagram for quality assessment. In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 161, 2016.
- [49] MORSE, E.; DANTAN, J.-Y.; ANWER, N.; SÖDERBERG, R.; MORONI, G.; QURESHI, A.; JIANG, X.; MATHIEU, L.: Tolerancing : Managing uncertainty from conceptual design to final product. In: CIRP Annals 67, Nr. 2, 2018, S. 695–717.
- [50] THUNNISSEN, D. P.: Uncertainty Classification for the Design and Development of Complex Systems. In: 3rd Annual Predictive Methods Conference, Newport Beach, California, 2003..
- [51] VAJNA, S., WEBER, C., ZEMAN, K., HEHENBERGER, P., GERHARD, D., WARTZACK, S: CAx für Ingenieure : Springer Berlin Heidelberg, 2018.
- [52] DANTAN, J.-Y.; ANWER, N.; MATHIEU, L.: Integrated Tolerancing Process for conceptual design. In: CIRP Annals 52, Nr. 1, 2003, S. 135–138.
- [53] AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS: Dimensioning and tolerancing : Engineering drawing and related documentation practices. New York : American Society of Mechanical Engineers, 2019
- [54] DIN EN ISO 14638 Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Matrix-Modell, Berlin: Beuth, 2015.
- [55] MEJBRI, H.; ANSELMETTI, B.; MAWUSSI, K.: Functional tolerancing of complex mechanisms: Identification and specification of key parts. In: Computers & Industrial Engineering 49, Nr. 2, 2005, S. 241–265.
- [56] THORNTON, A. C.: A Mathematical Framework for the Key Characteristic Process. In: Research in Engineering Design 11, Nr. 3, 1999, S. 145–157.

- [57] ARMILLOTTA, A.: A method for computer-aided specification of geometric tolerances. In: *Computer-Aided Design* 45, Nr. 12, 2013, S. 1604–1616.
- [58] SACHS, L.; HEDDERICH, J.: *Angewandte Statistik : Methodensammlung mit R. 12., vollständig neu bearbeitete Aufl.* Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2006.
- [59] DIETRICH, E.; SCHULZE, A.: *Statistische Verfahren zur Maschinen- und Prozessqualifikation* : Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2014.
- [60] PEARN, W. L.; KOTZ, S.: *Encyclopedia and handbook of process capability indices : A comprehensive exposition of quality control measures.* Singapore, Hackensack, N.J : World Scientific Pub, 2006.
- [61] DIN ISO 22514-2. 2019 - 07. *Statistische Verfahren im Prozessmanagement Fähigkeit und Leistung Teil 2: Prozessleistungs- und Prozessfähigkeitskenngrößen von zeitabhängigen Prozessmodellen*, Berlin: Beuth, 2019.
- [62] METROPOLIS, N.; ROSENBLUTH, A. W.; ROSENBLUTH, M. N.; TELLER, A. H.; TELLER, E.: *Equation of State Calculations by Fast Computing Machines.* In: *The Journal of Chemical Physics* 21, Nr. 6, 1953, S. 1087–1092.
- [63] SCHMIDT, K. D.: *Maß und Wahrscheinlichkeit.* Berlin, Heidelberg: Springer, 2009.
- [64] HOFSTADLER, C.; KUMMER, M.: *Chancen- und Risikomanagement in der Bauwirtschaft : Für Auftraggeber und Auftragnehmer in Projektmanagement, Baubetrieb und Bauwirtschaft.* Berlin : Springer Vieweg, 2017.
- [65] PECK, R.; OLSEN, C.; DEVORE, J. L.: *Introduction to statistics and data analysis.* 3rd ed. Belmont, CA : Brooks/Cole, Cengage Learning, 2008.
- [66] LANCE, P. M.; HATTORI, A.: *Sampling and Evaluation : A Guide to Sampling for Programm Impact Evaluation.* Chapel Hill, North Carolina: University of North Carolina, 2016.
- [67] LEMIEUX, C.: *Monte Carlo and quasi-Monte Carlo sampling.* New York, NY : Springer, 2009.
- [68] MCKAY, M. D.; BECKMAN, R. J.; CONOVER, W. J.: *A Comparison of Three Methods for Selecting Values of Input Variables in the Analysis of Output from a Computer Code.* In: *Technometrics* 21 1979

- [69] JORDEN, W.; SCHÜTTE, W.: Form- und Lagetoleranzen : Handbuch für Studium und Praxis : Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2017.
- [70] DIN EN ISO 14638:2015-12, Geometrische Produktspezifikation_(GPS)_- Matrix-Modell (ISO_14638:2015), Berlin: Beuth, 2015.
- [71] GRÖGER, S.: Funktionsgerechte Spezifikation geometrischer Eigenschaften mit dem System der Geometrischen Produktspezifikation und -verifikation. Chemnitz, Technische Universität Chemnitz. Habilitation. 2013.
- [72] SCHÜTTE, W.: Methodische Form- und Lagetolerierung : Ein Werkzeug zur qualitätsgerechten Produktbeschreibung. Paderborn, Universität Paderborn. Dissertation. 1995.
- [73] SCHMIDT, A.: Ein Ansatz zur ganzheitlichen Maß-, Form- und Lage-tolerierung. Paderborn, Universität Paderborn. 1998.
- [74] ANSELMETTI, B.: Generation of functional tolerancing based on positioning features. In: Computer-Aided Design 38, Nr. 8, 2006, S. 902–919.
- [75] KLEIN, B.: Toleranzmanagement im Maschinen- und Fahrzeugbau : De Gruyter, 2012.
- [76] WANG, Y.; LI, L.; HARTMAN, N. W.; SUTHERLAND, J. W.: Allocation of assembly tolerances to minimize costs. In: CIRP Annals 68, Nr. 1, 2019, S. 13–16.
- [77] SÖDERBERG, R.; WÄRMEFJORD, K.; LINDKVIST, L.; BERLIN, R.: The influence of spot weld position variation on geometrical quality. In: CIRP Annals 61, Nr. 1, 2012, S. 13–16.
- [78] CHASE, K. W.; GREENWOOD, W. H.: Design Issues in Mechanical Tolerance Analysis : ADCATS Report No. 87-5. 1988, S. 50–59.
- [79] EPSTEIN, B.: Tolerances on Assemblies, Bd. 90. In: American Machinist, 1946.
- [80] SPOTTS, M. F.: How to Use Wider Tolerances, Safely, in Dimensioning Stacked Assemblies. In: Machine Design, 1978, S. 60–63.
- [81] KHODAYGAN, S.; MOVAHHEDY, M. R.: A comprehensive fuzzy feature-based method for worst case and statistical tolerance analysis. In: International Journal of Computer Integrated Manufacturing 5, Nr. 4, 2015, S. 1–22.
- [82] CAO, Y.; LIU, T.; YANG, J.: A comprehensive review of tolerance analysis models. In: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 97, 5-8, 2018, S. 3055–3085.

- [83] PRISCO, U.; GIORLEO, G.: Overview of current CAT systems. In: Integrated Computer-Aided Engineering 9, Nr. 4, 2002, S. 373–387.
- [84] GROSSMAN, D. D.: Monte Carlo Simulation of Tolerancing in Discrete Parts Manufacturing and Assembly. Stanford, CA, USA, 1976.
- [85] WALTER, M. S. J.: Toleranzanalyse und Toleranzsynthese abweichungsbehafteter Mechanismen. Düsseldorf : VDI Verlag, 2016.
- [86] SÖDERBERG, R.; LINDKVIST, L.; DAHLSTRÖM, S.: Computer-aided robustness analysis for compliant assemblies. In: Journal of Engineering Design 17, Nr. 5, 2006, S. 411–428.
- [87] STEINLE, P.: Toleranzmanagement für Bauteile aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff. Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Dissertation. 2015.
- [88] STOCKINGER, A.: Computer aided robust design, Verknüpfung rechnerunterstützter Entwicklung und virtueller Fertigung als Baustein des Toleranzmanagements. Düsseldorf : VDI-Verlag, 2011.
- [89] VDI 2730 Blatt 1. Toleranzen und Toleranzmanagement bei Gelenkgetrieben - Checklisten - Vorgehen und Werkzeuge, Berlin: Beuth, 2019.
- [90] SCHAECHTL, P.; HALLMANN, M.; SCHLEICH, B.; WARTZACK, S.: Tolerance Analysis of Additively Manufactured Non-assembly Mechanisms considering Joint Clearance. In: Procedia CIRP 92, 2020, S. 27–32.
- [91] STUPPY, J.: Methodische und rechnerunterstützte Toleranzanalyse für bewegte technische Systeme. Düsseldorf : VDI-Verlag, 2011.
- [92] MAKAR, A. B.; McMARTIN, K. E.; PALESE, M.; TEPHLY, T. R.: Formate assay in body fluids: application in methanol poisoning. In: Biochemical medicine 13, Nr. 2, 1975, S. 117–126.
- [93] WEBER, C.; BRITTEN, W.; THOME, O.: Conversion of Geometrical Tolerances into Vectorial Tolerance Representations - A Major Step Towards Computer Aided Tolerancing. In: Proceedings of the 5th International Design Conference, Dubrovnik 1998.
- [94] BOURDET, P.; MATHIEU, L. LARTIGUE, C.; BALLU, A.: The Concept of Small Displacement Torsor in Metrology. In: Advanced Mathematical Tool in Metrology II, 1996, S. 110–122.
- [95] AMETA, G.; SERGE, S.; GIORDANO, M.: Comparison of Spatial Math Models for Tolerance Analysis : Tolerance-Maps, Deviation Domain, and TTRS. In: Journal of Computing and Information Science in Engineering 11, Nr. 2, 2011, S. 21004.

- [96] TEISSANDIER, D.; DELOS, V.: Algorithm to calculate the Minkowski sums of 3-polytopes based on normal fans. In: *Computer-Aided Design* 43, Nr. 12, 2011, S. 1567–1576.
- [97] DESROCHERS, A.; CLÉMENT, A.: A dimensioning and tolerancing assistance model for CAD/CAM systems. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 9, Nr. 6, 1994, S. 352–361.
- [98] DAVIDSON, J. K.; MUJEZINOVIĆ, A.; SHAH, J. J.: A New Mathematical Model for Geometric Tolerances as Applied to Round Faces. In: *Journal of Mechanical Design* 124, 2002.
- [99] SCHLEICH, B.; WARTZACK, S.: Gap hull estimation for rigid mechanical joints considering form deviations and multiple pairs of mating surfaces. In: *Mechanism and Machine Theory* 128, Nr. 1, 2018 S. 444–460.
- [100] SCHLEICH, B.; ANWER, N.; MATHIEU, L.; WARTZACK, S.: Skin Model Shapes : A new paradigm shift for geometric variations modelling in mechanical engineering. In: *Computer-Aided Design* 50, 2014, S. 1–15.
- [101] SHEN, Z.; AMETA, G; SHAH, J. J.; DAVIDSON, J. K.: A Comparative Study Of Tolerance Analysis Methods. In: *Journal of Mechanical Design* 5, Nr. 3, 2005, S. 247–256.
- [102] SALTELLI, A.: Sensitivity analysis of scientific models. Hoboken, N.J., Chichester : Wiley; John Wiley, 2007.
- [103] WALTER, M.S.J.; SPRÜGEL, T. C.; ZIEGLER, P.; WARTZACK, S.: Berücksichtigung von Wechselwirkungen zwischen Abweichungen in der statistischen Toleranzanalyse. In: *Konstruktion* 2015, Nr. 67, 2015 S. 88–92.
- [104] MANNEWITZ, F.: Baugruppenfunktions- und prozessorientierte Toleranzaufweitung (Teil 1). In: *Konstruktion*, Nr. 10, 2005, S. 87–93
- [105] CZITROM, V.: One-Factor-at-a-Time versus Designed Experiments. In: *The American Statistician* 53, Nr. 2, 1999.
- [106] LIN, C.-Y.; HUANG, W.-H.; JENG, M.-C.; DOONG, J.-L.: Study of an assembly tolerance allocation model based on Monte Carlo simulation. In: *Journal of Materials Processing Technology* 70, 1-3, 1997, S. 9–16.
- [107] CUKIER, R. I.; FORTUIN, C. M.; SHULER, K. E.; PETSCHKE, A. G.; SCHAIBLY, J. H.: Study of the sensitivity of coupled reaction systems

- to uncertainties in rate coefficients. I Theory. In: The Journal of Chemical Physics 59, Nr. 8, 1973, S. 3873–3878.
- [108] SALTELLI, A.; TARANTOLA, S.; CHAN, K. P.-S.: A Quantitative Model-Independent Method for Global Sensitivity Analysis of Model Output. In: Technometrics 41, Nr. 1, 1999, S. 39–56.
 - [109] BORGONOVO, E.: A new uncertainty importance measure. In: Reliability Engineering & System Safety 92, Nr. 6, 2007, S. 771–784.
 - [110] PLISCHKE, E.; BORGONOVO, E.; SMITH, C. L.: Global sensitivity measures from given data. In: European Journal of Operational Research 226, Nr. 3, 2013, S. 536–550.
 - [111] BORGONOVO, E.; PLISCHKE, E.: Sensitivity analysis : A review of recent advances. In: European Journal of Operational Research 248, Nr. 3, 2016, S. 869–887.
 - [112] ZADEH, L. A.: Fuzzy sets. In: Information and Control 8, Nr. 3, 1965, S. 338–353.
 - [113] HANSS, M.: Applied Fuzzy Arithmetic : An Introduction with Engineering Applications. Berlin, Heidelberg : Springer 2005.
 - [114] SCHLEICH, B.; WARTZACK, S.: Process-oriented tolerancing - A discrete geometry framework. In: Proceedings of the 19th International Conference on Engineering Design. Glasgow, Scotland : Design Society, 2013, S. 61–70.
 - [115] STOCKINGER, A.; MEERKAMM, H.: Concept for the Integration of Manufacturing Simulations into Tolerance Analysis. In: Proceedings of the 11th CIRP Conference on Computer Aided Tolerancing, 2009.
 - [116] LORIN, S.; SÖDERBERG, R.; CARLSON, J.; EDELVIK, F.: Simulating Geometrical Variation in Injection Molding. In: NordDesign 2010.
 - [117] WÄRMEFJORD, K.; SÖDERBERG, R.; LINDKVIST, L.: Simulation of Variation in Assembly Forces Due to Variation in Spot Weld Position. In: ABRAMOVICI, Michael; STARK, Rainer (Hrsg.): Smart Product Engineering. Berlin, Heidelberg : Springer, 2013, S. 473–482.
 - [118] SCHLEICH, B.; WARTZACK, S.: A generic approach to sensitivity analysis in geometric variations management. In: Proceedings of the International Conference on Engineering Design, ICED, 2015, S. 343–352.
 - [119] SINSBECK, M.; Universität Stuttgart: Uncertainty quantification for expensive simulations : Optimal surrogate modeling under time constraints. 2017.

- [120] BOX, G. E. P.; WILSON, K. B.: On the Experimental Attainment of Optimum Conditions, Bd. 13. In: Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological), 1951 S. 1–45.
- [121] KRIGE, D. G.: A statistical approach to some basic mine valuation problems on the Witwatersrand. In: Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, Nr. 52, 1951, S. 119–139.
- [122] CORTES, C.; VAPNIK, V. In: Machine Learning 20, Nr. 3, 1995 S. 273–297.
- [123] BISHOP, C. M.: Neural networks for pattern recognition. Oxford : Oxford University Press; Clarendon Press, 1995.
- [124] ALBERS, A.; BEHRENDT, M.; KLINGLER, S.; MATROS, K.: Verifikation und Validierung im Produktentstehungsprozess. In: Handbuch Produktentwicklung. Hrsg.: Udo Lindemann : Hanser, München, 2016, S. 541–569.
- [125] MURRAY-SMITH, D. J.: Testing and Validation of Computer Simulation Models : Principles, Methods and Applications. 1st ed. 2015. Cham : Springer International Publishing; Imprint: Springer, 2015.
- [126] OBERKAMPF, W. L.; SINDIR, M.; CONLISK, A. T.: Guide for the verification and validation of computational fluid dynamics simulations. In: Am Inst. Aeronaut. G-077-1998-1-29, 1998.
- [127] Guide AIAA G-077-1998 (2002). 2002. Guide for the Verification and Validation of Computational Fluid Dynamics Simulations, 2002.
- [128] Codes and Standards. 2007. Guide for Verification and Validation in Computational Solid Mechanics, 2007.
- [129] NN: Terminology for model credibility. In: SIMULATION 32, Nr. 3, 1979, S. 103–104.
- [130] HUBER-CAROL, C.; BALAKRISHNAN, N.; NIKULIN, M. S.; MESBAH, M.: Goodness-of-Fit Tests and Model Validity. Boston, MA : Birkhäuser Boston, 2002.
- [131] MURPHY, A.; KATZ, RICHARD, W.: Probability, statistics and decision making in the atmospheric sciences. [S.l.] : CRC PRESS, 2019.
- [132] NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V.: River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. In: Journal of Hydrology 10, Nr. 3, 1970, S. 282–290.
- [133] KRAUSE, P.; BOYLE, D. P.; BÄSE, F.: Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. In: Advances in Geosciences 5, 2005, S. 89–97.

- [134] MORIASI, D. N.; ARNOLD, J. G.; VAN LIEW, M. W.; BINGNER, R. L.; HARMEL, R. D.; VEITH, T. L.: Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. In: Transactions of the ASABE 50, Nr. 3, 2007, S. 885–900.
- [135] RITTER, A.; MUÑOZ-CARPENA, R.: Performance evaluation of hydrological models: Statistical significance for reducing subjectivity in goodness-of-fit assessments. In: Journal of Hydrology 480, 2013, S. 33–45.
- [136] WILLMOTT, C. J.; ACKLESON, S. G.; DAVIS, R. E.; FEDDEMA, J. J.; KLINK, K. M.; LEGATES, D. R.; O'DONNELL, J.; ROWE, C. M.: Statistics for the evaluation and comparison of models. In: Journal of Geophysical Research 90, C5, 1985.
- [137] SCHLUER, C.: Ein geometriebasierter Ansatz zur Toleranzanalyse. Dissertation. Düsseldorf : VDI Verlag, 2016.
- [138] ZHENG, H.; LITWA, F.; REESE, B.; LI, C.; BOHN, M.; PAETZOLD, K.: A Modeling Approach for Elastic Tolerance Simulation of the Body in White Hang-On Parts. In: Proceedings of the Design Society: International Conference on Engineering Design 1, Nr. 1, 2019, S. 3461–3470.
- [139] EHLERT, M.: Simulationsunterstützte funktionale Grenzlagenabsicherung. Erlangen : FAU University Press, 2020.
- [140] BARBERO, B. Ramos; ARAGÓN, A. Cristóbal; PEDROSA, C. Melgosa: Validation of a tolerance analysis simulation procedure in assemblies. In: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 76, 5–8, 2015, S. 1297–1310.
- [141] DIN 1319-1:1995-01. 1995-01. Grundlagen der Meßtechnik - Teil 1: Grundbegriffe, Berlin: Beuth, 1995.
- [142] DIN EN ISO 14253-1:2018-07. 2018-07. Geometrische Produktspezifikationen (GPS) - Prüfung von Werkstücken und Messgeräten durch Messen - Teil 1: Entscheidungsregeln für den Nachweis von Konformität oder Nichtkonformität mit Spezifikationen, Berlin: Beuth, 2018.
- [143] LINß, G.: Qualitätsmanagement für Ingenieure. 4., aktualisierte und erweiterte Auflage. München : Hanser Carl, 2018.
- [144] DIN EN ISO 15530-3. 2018-09. Geometrische Produktspezifikation und -prüfung (GPS) - Verfahren zur Ermittlung der Messunsicherheit von Koordinatenmessgeräten (KMG) - Teil 3: Anwendung von kalibrierten Werkstücken oder Normalen, 2018.

- [145] GRUBBS, F. E.: Procedures for Detecting Outlying Observations in Samples. In: *Technometrics* 11, Nr. 1, 1969, S. 1–21.
- [146] CHEN, S.; WANG, W.; VAN ZUYLEN, H.: A comparison of outlier detection algorithms for ITS data. In: *Expert Systems with Applications* 37, Nr. 2, 2010, S. 1169–1178.
- [147] LEYS, C.; LEY, C.; KLEIN, O.; BERNARD, P.; LICATA, L.: Detecting outliers: Do not use standard deviation around the mean, use absolute deviation around the median. In: *Journal of Experimental Social Psychology* 49, Nr. 4, 2013, S. 764–766.
- [148] BOOKER, J.: A survey-based methodology for prioritising the industrial implementation qualities of design tools. In: *Journal of Engineering Design* 23, Nr. 7, 2012, S. 507–525.
- [149] EIFLER T, EBRO M, HOWARD T: A classification of the industrial relevance of robust design methods. In: *Proceedings of International Conference on Engineering Design—ICED’13*, Seoul, 2013.
- [150] EBRO, M.; HOWARD, T. J.: Robust design principles for reducing variation in functional performance. In: *Journal of Engineering Design* 27, 1-3, 2016, S. 75–92.
- [151] FUCHS, T.: Objektivierung der Modellbildung von verletzungsmechanischen Experimenten für die Validierung von Finite-Elemente Menschmodellen. München, Ludwig-Maximilians-Universität München, Dissertation. 2018.
- [152] GERBERICH, T.: *Lean oder MES in der Automobilzulieferindustrie*. Wiesbaden : Gabler, 2011.
- [153] VICHARE, P.; MARTIN, O.; JAMSHIDI, J.: Dimensional management for aerospace assemblies: framework implementation with case-based scenarios for simulation and measurement of in-process assembly variations. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 70, 1-4, 2014, S. 215–225.
- [154] PERKMANN, M.; WALSH, K.: University–industry relationships and open innovation : Towards a research agenda. In: *International Journal of Management Reviews* 9, Nr. 4, 2007, S. 259–280.
- [155] ALBERS, S.: *Methodik der empirischen Forschung*. Wiesbaden : Springer Fachmedien, 2007.
- [156] HOMBURG, C.; KROHMER, H.; HOMBURG-KROHMER: *Marketingmanagement : Strategie - Instrumente - Umsetzung - Unternehmensführung*. Studienausg., 1. Aufl., Nachdr. Wiesbaden : Gabler, 2005.

- [157] CHARLES G. GLANCY: A second-order method for assembly tolerance analysis. Provo, Brigham Young University. MS Thesis. 1994.
- [158] RAO, R. V.; MORE, K. C.: Advanced optimal tolerance design of machine elements using teaching-learning-based optimization algorithm. In: Production & Manufacturing Research 2, Nr. 1, 2014, S. 71–94.
- [159] SCHLEICH, B.: Skin model shapes. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg. Dissertation, Düsseldorf : VDI Verlag, 2017.
- [160] SÖDERBERG, R.; LINDKVIST, L.; CARLSON, J. S.: Managing physical dependencies through location system design. In: Journal of Engineering Design 17, Nr. 4, 2006, S. 325–346.
- [161] BRÜGGEMANN, H.; BREMER, P.: Grundlagen Qualitätsmanagement : Von den Werkzeugen über Methoden zum TQM. Wiesbaden : Springer Vieweg, 2012.
- [162] VIRCHOW, R.: Die naturwissenschaftliche Methode und die Standpunkte in der Therapie, 1849.
- [163] KEFERSTEIN, C. P.: Fertigungsmesstechnik : Praxisorientierte Grundlagen, moderne Messverfahren. 7., erw. Aufl. Wiesbaden : Vieweg + Teubner, 2011.
- [164] BANDEMER, H.; BELLMANN, A.; BANDEMER-BELLMANN: Statistische Versuchsplanung. 4., neubearb. Aufl. Stuttgart : Teubner, 1994.
- [165] RENCHER, A. C.; SCHAALJE, G. Bruce: Linear models in statistics. 2. ed. Hoboken, NJ : Wiley-Interscience, 2008.
- [166] SCHLEICH, B.; WARTZACK, S.: A discrete geometry approach for tolerance analysis of mechanism. In: Mechanism and Machine Theory 77, 2014, S. 148–163.
- [167] BOHN, M.: Toleranzmanagement im Entwicklungsprozess: Reduzierung der Auswirkungen von Toleranzen auf Zusammenbauten der Automobil-Karosserien, Dissertation, Karlsruhe: Universität Karlsruhe, 1998.
- [168] DIN ISO 20457. 2018 - 03. Kunststoff-Formteile -Toleranzen und Abnahmebedingungen, Berlin: Beuth, 2018.
- [169] MORONI, G.; SYAM, W. P.; PETRÒ, S.: Towards Early Estimation of Part Accuracy in Additive Manufacturing. In: Procedia CIRP 21, 2014, S. 300–305.
- [170] LIENEKE, T.; DENZER, V.; ADAM, G. A.O.; ZIMMER, D.: Dimensional Tolerances for Additive Manufacturing: Experimental Investigation

- for Fused Deposition Modeling. In: Procedia CIRP 43, 2016, S. 286–291.
- [171] MÜLLER, A. M.I; HAUSOTTE, T.: Determination of the single point precision associated with tactile gear measurements in scanning mode. In: Journal of Sensors and Sensor Systems 9, Nr. 1, 2020, S. 61–70.
- [172] MÜLLER, A. M. (Hrsg.); METZNER, S. (Hrsg.); HAUSOTTE, T. (Hrsg.); AMA Association For Sensors And Measurement: P2.18 Characterization of the single point precision of steel gear wheel measurements using tactile coordinate measurement machines in scanning mode, 2019.
- [173] STEINBICHLER, G.: Methoden und Verfahren zur Optimierung der Bauteilentwicklung für die Spritzgießfertigung. Erlangen, FAU Erlangen-Nürnberg, Dissertation, 2008.
- [174] ASCHENBRENNER, A.; SCHLEICH, B.; WARTZACK, S.: Der Einfluss der Sortierung auf das statistische Verhalten von Funktionsmaßen. In: Design for X. Beiträge zum 28. DfX-Symposium, 2017, S. 75–86.
- [175] TÖPFER, A.: Six Sigma : Konzeption Und Erfolgsbeispiele Für Praktizierte Null-Fehler-Qualität. Dordrecht : Springer, 2007.
- [176] NN: Das meistverkaufte CT in der Welt : SOMATOM Emotion, 2009.
- [177] BUZUG, T. M.: Einführung in die Computertomographie : Mathematisch-physikalische Grundlagen der Bildrekonstruktion. 1. Nachdr. Berlin : Springer, 2005.
- [178] OSTERMEYER, G.-P.; MUELLER, M.; SRISUPATTARAWANIT, T.; VOELPEL, A.: On Uncertainty in Friction Measurements. In: PAMM 17, Nr. 1, 2017, S. 63–66.
- [179] SAM: Constrained Particle Swarm Optimization. URL <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/25986>. – Aktualisierungsdatum: 2018-11-05 – Überprüfungsdatum 2020-08-09.
- [180] NAESCHER, J.: Die rechnerische Simulation und die Messung der Einflanken-Wälzabweichung geradverzahnter Stirnräder. Braunschweig, Technische Universität Carola-Wilhelmina zu Braunschweig, 1977.
- [181] SCHLEICH, B.; ANWER, N.; MATHIEU, L.; WARTZACK, S.: Contact and Mobility Simulation for Mechanical Assemblies Based on Skin

- Model Shapes. In: Journal of Computing and Information Science in Engineering 15, Nr. 2, 2015.
- [182] DIN EN ISO 12181-1. 2011-07. Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Rundheit - Teil 1: Begriffe und Kenngrößen der Rundheit, Berlin: Beuth, 2011.
- [183] VDI/VDE 2627 Blatt 1, Berlin: Beuth, 2015.
- [184] DIN EN ISO 8015:2011-09. Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Grundlagen - Konzepte, Prinzipien und Regeln, Berlin: Beuth, 2011.
- [185] WALZ. GUIDO: Lexikon der Mathematik : Inkl. Register. s.l. : Spektrum Akadem. Verl., 2003.
- [186] EKSTRÖM, P.-A.: Eikos : A Simulation Toolbox for Sensitivity Analysis. In: Faculty of Science and Technology, Universität Uppsala, Schweden, 2005.

Verzeichnis promotionsbezogener, eigener Publikationen

- [P1] HELING, B.: Einfluss verschiedener Wahrscheinlichkeitsverteilungen bei der varianzbasierten Sensitivitätsuntersuchung, in Summer School Toleranzmanagement Beiträge zur 1. Summer School September 2013, S. 22–25, 2013.
- [P2] WARTZACK, S.; WALTER, M.; SCHLEICH, B.; ASCHENBRENNER, A.; Heling, B.: Der KTmfk und die Arbeitsgruppe Toleranzmanagement, in Summer School Toleranzmanagement - Beiträge zur 2. Summer School - September 2015, S. 3–8, 2015.
- [P3] EHLERT, M.; HELING, B.; WARTZACK, S.: Virtual validation of functional automotive door assembly properties by means of superposed cat and FEM analysis, in Proceedings of the 20th International Conference on Engineering Design (ICED 15) Vol 4: Design for X, Design to X, 2015.
- [P4] HELING, B.; ASCHENBRENNER, A.; WARTZACK, S.: Statistische Toleranzanalyse verknüpfter Schließmaße, in Summer School Toleranzmanagement - Beiträge zur 2. Summer School - September 2015, S. 51–56, 2015.
- [P5] ASCHENBRENNER, A.; HELING, B.; WARTZACK, S.: Auswirkungen von passungsbedingten Deformationen auf das Radialspiel von Wälzlagerungen, in Summer School Toleranzmanagement - Beiträge zur 2. Summer School - September 2015, S. 106–113, 2015.
- [P6] HELING, B.; ASCHENBRENNER, A.; WALTER M.; WARTZACK, S.: On Connected Tolerances in Statistical Tolerance-Cost-Optimization of Assemblies with Interrelated Dimension Chains, in 14th CIRP CAT 2016 - CIRP Conference on Computer Aided Tolerancing, S. 262–267, 2016.
- [P7] HELING, B.; WARTZACK, S.: Methode zur Parameteroptimierung komplexer Mechanismen hinsichtlich kinematischer Anforderungen, in Design for X - Beiträge zum 27. DfX-Symposium, S. 111–122, 2016.
- [P8] WARTZACK, S.; SCHLEICH, B.; HELING, B.; ASCHENBRENNER, A.; GÖTZ, S.: Toleranzmanagement am Lehrstuhl für Konstruktionstechnik, in Summer School Toleranzmanagement - Beiträge zur 3. Summer School - September 2017, S. 3–10, 2017.
- [P9] HELING, B.; OBERLEITER, T.; SCHLEICH, B.; WILLNER, K.; WARTZACK, S.: Comparison of Different Sensitivity Analysis Methods in the

- Context of Dimensional Management“ in ASME 2017 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Volume 2: Advanced Manufacturing, 2017.
- [P10] HELING, B.; HALLMANN, M.; WARTZACK, S.: Hybrid Tolerance Representation of Systems in Motion, in 27th CIRP Design Conference, S. 50–55, 2017.
 - [P11] HELING, B.; SCHLEICH, B.; WARTZACK, S.: Interdisziplinäres prozessorientiertes Toleranzmanagement – ein Konzept, in Summer School Toleranzmanagement Beiträge zur 3. Summer School, S. 93–96, 2017.
 - [P12] WARTZACK, S.; SCHLEICH, B.; ASCHENBRENNER, A.; HELING, B.: Toleranzmanagement im Kontext von Industrie 4.0, Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Jg. 112, S. 170–172, 2017.
 - [P13] HALLMANN, M.; SCHLEICH, B.; HELING, B.; ASCHENBRENNER, A.; WARTZACK, S.: Comparison of different methods for scrap rate estimation in sampling-based tolerance-cost-optimization, in Procedia CIRP, Volume 75, S. 51–56, 2018.
 - [P14] OBERLEITER, T.; HELING, B.; SCHLEICH, B.; WILLNER, K.; WARTZACK, S.: Fuzzy Sensitivity Analysis in the Context of Dimensional Management, ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part B: Mechanical Engineering, Volume 5, 2018.
 - [P15] HELING, B.; SCHLEICH, B.; WARTZACK, S.: Robust-Design-Optimization of mechanisms based on kinematic requirements considering uncertainties, Procedia CIRP, Jg. 75, S. 27–32, 2018.
 - [P16] HELING, B.; SCHLEICH, B.; WARTZACK, S.: Virtuelle und experimentelle Toleranzuntersuchungen abweichungsbehafteter Baugruppen, in Industriekolloquium der Forschergruppe FOR 2271, S. 8–11, 2019.
 - [P17] HELING, B.; OBERLEITER, T.; ROHRMOSER, A.; KIENER, C.; SCHLEICH, B.; HAGENAH, H.; MERKLEIN, M.; WILLNER, K.; WARTZACK, S.: Berücksichtigung von produktionsspezifischen Abweichungen im interdisziplinären Toleranzmanagement, in Industriekolloquium der Forschergruppe FOR 2271, S. 36–45, 2019.
 - [P18] SAUER, C.; HELING, B.; SCHMUTZLER, S.; SCHLEICH, B.: A knowledge-based engineering workbench for automated tolerance specification, in ASME 2019 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, 2019.

- [P19] MÜLLER, A. M.; HELING, B.; SCHLEICH, B.; OBERLEITER, T.; WILLNER, K.; WARTZACK, S.; HAUSOTTE, T.: Methoden zur Reduzierung und Berücksichtigung der Unsicherheiten von dimensionellen Messgrößen in der Toleranzanalyse, in Industriekolloquium der Forschergruppe FOR 2271, S. 64–73, 2019.
- [P20] WARTZACK, S.; HELING, B.; SCHLEICH, B.: Vorstellung der Forschergruppe "Prozessorientiertes Toleranzmanagement mit virtuellen Absicherungsmethoden, in Industriekolloquium der Forschergruppe FOR 2271, S. 1–4, 2019.
- [P21] HELING, B.; OBERLEITER, T.; SCHLEICH, B.; WILLNER, K.; WARTZACK, S.: On the Selection of Sensitivity Analysis Methods in the Context of Tolerance Management, Journal of Verification, Validation and Uncertainty Quantification, Jg. 4, Nr. 1, S. 145, 2019.
- [P22] HELING, B.; OBERLEITER, T.; ROHRMOSER, A.; KIENER, C.; SCHLEICH, B.; HAGENAH, H.; MERKLEIN, M.; WILLNER, K.; WARTZACK, S.: A Concept for Process-Oriented Interdisciplinary Tolerance Management Considering Production-Specific Deviations, Proc. Int. Conf. Eng. Des., Jg. 1, Nr. 1, S. 3441–3450, 2019.
- [P23] ROHRMOSER, A.; HELING, B.; SCHLEICH, B.; KIENER, C.; HAGENAH, H.; WARTZACK, S.; MERKLEIN, M.: „A methodology for the application of virtual evaluation methods within the design process of cold forged steel pinions“ in Proceedings of the 22nd International Conference on Engineering Design (ICED19), S. 3451–3460, 2019.
- [P24] HELING, B.; MÜLLER, A. M.; SCHLEICH, B.; HAUSOTTE, T.; WARTZACK, S.: „Consideration and Impact Assessment of Measurement Uncertainty in the Context of Tolerance Analysis“ in Advanced Manufacturing Volume 2B, 2019.
- [P25] BRÜCKNER, K.; STORCH, M.; HALLMANN, M.; HELING, B.; SCHLEICH, B.; WARTZACK, S.: Ansatz zur Ermittlung von Toleranz-Kosten-Kurven in der Serienproduktion, Konstruktion, Jg. 71, S. 84–90, 2019.
- [P26] HELING, B.; MÜLLER, A. M.; SCHLEICH, B.; HAUSOTTE, T.; WARTZACK, S.: Bestimmung und Berücksichtigung der Einzelpunktmessunsicherheit in virtuellen Toleranzanalysen, in Summer School Toleranzmanagement - Beiträge zur 4. Summer School - September 2020, 2020.

- [P27] HELING, B.; SCHLEICH, B.; WARTZACK, S.: An approach for determining the influence of manufacturing process parameters on product quality characteristics, *Procedia CIRP*, Jg. 92, S. 212–217, 2020.
- [P28] WARTZACK, S.; B. SCHLEICH, HELING, B.; GÖTZ, S.; HALLMANN, M.; SCHÄCHTL, P.; FRANZ, M.; KRAMER, V.: Durchgängiges Toleranzmanagement aus Sicht des Lehrstuhls für Konstruktionstechnik, in *Summer School Toleranzmanagement - Beiträge zur 4. Summer School - September 2020*, S. 3–13, 2020.
- [P29] WALTER, M.; KLEIN, C.; HELING, B.; WARTZACK, S.: Statistical Tolerance Analysis—A Survey on Awareness, Use and Need in German Industry, *Applied Sciences*, Jg. 11, 2021.
- [P30] HELING, B.; SCHLEICH, B.; WARTZACK, S.: Vorgehen zur Validierung von Toleranzanalyseverfahren von Mechanismen. *Konstruktion*, 73, S. 66–69., 2021.

Verzeichnis promotionsbezogener, studentischer Arbeiten

- [S1] HALLMANN, M.: Toleranzanalyse einer geradverzahnten Stirnradstufe basierend auf vektoriell repräsentierten Abweichungen. Projektarbeit. Erlangen: Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2016.
- [S2] PHAM, H.-D.: Konstruktion eines Prüfstandes zur experimentellen Toleranzanalyse einer Röntgenblende. Bachelorarbeit. Erlangen: Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2016.
- [S3] SELMAIER, A.: Vorgehen zur Abbildung abweichungsbehafteter niedriger Elementpaare mit Simulink. Projektarbeit. Erlangen: Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2016.
- [S4] HARTUNG, J.: Robust Design - Optimierung von Nennmaßen bewegter Mechanismen. Projektarbeit. Erlangen: Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2017.
- [S5] HALLMANN, M.: Handlungsempfehlung zur Auswahl von Optimierungsalgorithmen für die Toleranz-Kosten-Optimierung. Masterarbeit. Erlangen: Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2017.
- [S6] KLIPPSTEIN, M.: Aufbereitung von Messdaten für die netzbasierte Toleranzanalyse. Projektarbeit. Erlangen: Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2017.
- [S7] KRIEGLMEIER, D.: Vergleich unterschiedlicher globaler Sensitivitätsanalysen im Kontext der statistischen Toleranzrechnung. Masterarbeit. Erlangen: Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2017.
- [S8] SCHLEGL, C.: Verfahren zur Berücksichtigung von Lochspielen abweichungsbehafteter Systeme mittels diskreter Geometrien. Bachelorarbeit. Erlangen: Friedrich-Alexander -Universität Erlangen-Nürnberg, 2017.
- [S9] WINKLER, A.: Statistische Toleranzanalyse mithilfe von Familientabellen-basierten Skelettmodellen. Masterarbeit. Erlangen: Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2017.
- [S9] EMILIUS, L., A.: Comparison of different modeling methods of geometric deviations in statistical tolerance analysis. Bachelorarbeit. Erlangen: Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2018.

- [S10] SEITZ, M.: Untersuchung des Einflusses von streuenden Einflussgrößen bei der Spritzgussimulation. Bachelorarbeit. Erlangen: Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2018.
- [S11] PFÄFFLE, B.: Relative Positionierung starrer abweichungs-behafteter Bauteile unter Berücksichtigung von Lochspielen. Projektarbeit. Erlangen: Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2019.

Reihenübersicht

Koordination der Reihe (Stand 2021):

Geschäftsstelle Maschinenbau, Dr.-Ing. Oliver Kreis, www.mb.fau.de/diss/

Im Rahmen der Reihe sind bisher die nachfolgenden Bände erschienen.

Band 1 – 52

Fertigungstechnik – Erlangen

ISSN 1431-6226

Carl Hanser Verlag, München

Band 53 – 307

Fertigungstechnik – Erlangen

ISSN 1431-6226

Meisenbach Verlag, Bamberg

ab Band 308

FAU Studien aus dem Maschinenbau

ISSN 2625-9974

FAU University Press, Erlangen

Die Zugehörigkeit zu den jeweiligen Lehrstühlen ist wie folgt gekennzeichnet:

Lehrstühle:

FAPS	Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik
FMT	Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik
KTmfk	Lehrstuhl für Konstruktionstechnik
LFT	Lehrstuhl für Fertigungstechnologie
LPT	Lehrstuhl für Photonische Technologien
REP	Lehrstuhl für Ressourcen- und Energieeffiziente Produktionsmaschinen

Band 1: Andreas Hemberger
Innovationspotentiale in der
rechnerintegrierten Produktion durch
wissensbasierte Systeme
FAPS, 208 Seiten, 107 Bilder. 1988.
ISBN 3-446-15234-2.

Band 2: Detlef Classe
Beitrag zur Steigerung der Flexibilität
automatisierter Montagesysteme
durch Sensorintegration und erweiterte
Steuerungskonzepte
FAPS, 194 Seiten, 70 Bilder. 1988.
ISBN 3-446-15529-5.

Band 3: Friedrich-Wilhelm Nolting
Projektierung von Montagesystemen
FAPS, 201 Seiten, 107 Bilder, 1 Tab. 1989.
ISBN 3-446-15541-4.

Band 4: Karsten Schlüter
Nutzungsgradsteigerung von
Montagesystemen durch den Einsatz
der Simulationstechnik
FAPS, 177 Seiten, 97 Bilder. 1989.
ISBN 3-446-15542-2.

Band 5: Shir-Kuan Lin
Aufbau von Modellen zur Lageregelung
von Industrierobotern
FAPS, 168 Seiten, 46 Bilder. 1989.
ISBN 3-446-15546-5.

Band 6: Rudolf Nuss
Untersuchungen zur Bearbeitungsquali-
tät im Fertigungssystem Laserstrahl-
schneiden
LFT, 206 Seiten, 115 Bilder, 6 Tab. 1989.
ISBN 3-446-15783-2.

Band 7: Wolfgang Scholz
Modell zur datenbankgestützten Planung
automatisierter Montageanlagen
FAPS, 194 Seiten, 89 Bilder. 1989.
ISBN 3-446-15825-1.

Band 8: Hans-Jürgen Wißmeier
Beitrag zur Beurteilung des Bruchverhal-
tens von Hartmetall-Fließpreßmatrizen
LFT, 179 Seiten, 99 Bilder, 9 Tab. 1989.
ISBN 3-446-15921-5.

Band 9: Rainer Eisele
Konzeption und Wirtschaftlichkeit von
Planungssystemen in der Produktion
FAPS, 183 Seiten, 86 Bilder. 1990.
ISBN 3-446-16107-4.

Band 10: Rolf Pfeiffer
Technologisch orientierte
Montageplanung am Beispiel der
Schraubtechnik
FAPS, 216 Seiten, 102 Bilder, 16 Tab. 1990.
ISBN 3-446-16161-9.

Band 11: Herbert Fischer
Verteilte Planungssysteme zur
Flexibilitätssteigerung der
rechnerintegrierten Teilefertigung
FAPS, 201 Seiten, 82 Bilder. 1990.
ISBN 3-446-16105-8.

Band 12: Gerhard Kleineidam
CAD/CAP: Rechnergestützte Montage-
feinplanung
FAPS, 203 Seiten, 107 Bilder. 1990.
ISBN 3-446-16112-0.

Band 13: Frank Vollertsen
Pulvermetallurgische Verarbeitung eines
übereutektoiden verschleißfesten Stahls
LFT, XIII u. 217 Seiten, 67 Bilder, 34 Tab.
1990. ISBN 3-446-16133-3.

Band 14: Stephan Biermann
Untersuchungen zur Anlagen- und
Prozeßdiagnostik für das Schneiden
mit CO₂-Hochleistungslasern
LFT, VIII u. 170 Seiten, 93 Bilder, 4 Tab.
1991. ISBN 3-446-16269-0.

Band 15: Uwe Geißler
Material- und Datenfluß in einer flexib-
len Blechbearbeitungszelle
LFT, 124 Seiten, 41 Bilder, 7 Tab. 1991.
ISBN 3-446-16358-1.

Band 16: Frank Oswald Hake
Entwicklung eines rechnergestützten
Diagnosesystems für automatisierte
Montagezellen
FAPS, XIV u. 166 Seiten, 77 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-16428-6.

Band 17: Herbert Reichel
Optimierung der Werkzeugbereitstellung
durch rechnergestützte
Arbeitsfolgenbestimmung
FAPS, 198 Seiten, 73 Bilder, 2 Tab. 1991.
ISBN 3-446-16453-7.

Band 18: Josef Scheller
Modellierung und Einsatz von
Softwaresystemen für rechnergeführte
Montagezellen
FAPS, 198 Seiten, 65 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-16454-5.

Band 19: Arnold vom Ende
Untersuchungen zum Biegeumforme mit
elastischer Matrize
LFT, 166 Seiten, 55 Bilder, 13 Tab. 1991.
ISBN 3-446-16493-6.

Band 20: Joachim Schmid
Beitrag zum automatisierten Bearbeiten
von Keramikguß mit Industrierobotern
FAPS, XIV u. 176 Seiten, 111 Bilder, 6 Tab.
1991. ISBN 3-446-16560-6.

Band 21: Egon Sommer
Multiprozessorsteuerung für
kooperierende Industrieroboter in
Montagezellen
FAPS, 188 Seiten, 102 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-17062-6.

Band 22: Georg Geyer
Entwicklung problemspezifischer
Verfahrensketten in der Montage
FAPS, 192 Seiten, 112 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-16552-5.

Band 23: Rainer Flohr
Beitrag zur optimalen
Verbindungstechnik in der
Oberflächenmontage (SMT)
FAPS, 186 Seiten, 79 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-16568-1.

Band 24: Alfons Rief
Untersuchungen zur Verfahrensfolge
Laserstrahlschneiden und -schweißen
in der Rohkarosseriefertigung
LFT, VI u. 145 Seiten, 58 Bilder, 5 Tab.
1991. ISBN 3-446-16593-2.

Band 25: Christoph Thim
Rechnerunterstützte Optimierung
von Materialflußstrukturen in der
Elektronikmontage durch Simulation
FAPS, 188 Seiten, 74 Bilder. 1992.
ISBN 3-446-17118-5.

Band 26: Roland Müller
CO₂-Laserstrahlschneiden von
kurzglasverstärkten Verbundwerkstoffen
LFT, 141 Seiten, 107 Bilder, 4 Tab. 1992.
ISBN 3-446-17104-5.

Band 27: Günther Schäfer
Integrierte Informationsverarbeitung
bei der Montageplanung
FAPS, 195 Seiten, 76 Bilder. 1992.
ISBN 3-446-17117-7.

Band 28: Martin Hoffmann
Entwicklung einer
CAD/CAM-Prozeßkette für die
Herstellung von Blechbiegeteilen
LFT, 149 Seiten, 89 Bilder. 1992.
ISBN 3-446-17154-1.

Band 29: Peter Hoffmann
Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden
und -schweißen: Prozeßführung und
Systemtechnik in der 3D-Laserstrahlbear-
beitung von Blechformteilen
LFT, 186 Seiten, 92 Bilder, 10 Tab. 1992.
ISBN 3-446-17153-3.

Band 30: Olaf Schrödel
Flexible Werkstattsteuerung mit
objektorientierten Softwarestrukturen
FAPS, 180 Seiten, 84 Bilder. 1992.
ISBN 3-446-17242-4.

Band 31: Hubert Reinisch
Planungs- und Steuerungswerkzeuge zur
impliziten Geräteprogrammierung
in Roboterzellen
FAPS, XI u. 212 Seiten, 112 Bilder. 1992.
ISBN 3-446-17380-3.

Band 32: Brigitte Bärnreuther
Ein Beitrag zur Bewertung des Kommuni-
kationsverhaltens von Automatisierungs-
geräten in flexiblen Produktionszellen
FAPS, XI u. 179 Seiten, 71 Bilder. 1992.
ISBN 3-446-17451-6.

Band 33: Joachim Hutfless
Laserstrahlregelung und Optikdiagnostik
in der Strahlführung einer
CO₂-Hochleistungslaseranlage
LFT, 175 Seiten, 70 Bilder, 17 Tab. 1993.
ISBN 3-446-17532-6.

Band 34: Uwe Günzel
Entwicklung und Einsatz eines Simula-
tionsverfahrens für operative und
strategische Probleme der
Produktionsplanung und -steuerung
FAPS, XIV u. 170 Seiten, 66 Bilder, 5 Tab.
1993. ISBN 3-446-17604-7.

Band 35: Bertram Ehmann
Operatives Fertigungscontrolling durch
Optimierung auftragsbezogener Bearbei-
tungsabläufe in der Elektronikfertigung
FAPS, XV u. 167 Seiten, 114 Bilder. 1993.
ISBN 3-446-17658-6.

Band 36: Harald Kolléra
Entwicklung eines benutzerorientierten
Werkstattprogrammiersystems für das
Laserstrahlschneiden
LFT, 129 Seiten, 66 Bilder, 1 Tab. 1993.
ISBN 3-446-17719-1.

Band 37: Stephanie Abels
Modellierung und Optimierung von
Montageanlagen in einem integrierten
Simulationssystem
FAPS, 188 Seiten, 88 Bilder. 1993.
ISBN 3-446-17731-0.

Band 38: Robert Schmidt-Hebbel
Laserstrahlbohren durchflußbestimmen-
der Durchgangslöcher
LFT, 145 Seiten, 63 Bilder, 11 Tab. 1993.
ISBN 3-446-17778-7.

Band 39: Norbert Lutz
Oberflächenfeinbearbeitung
keramischer Werkstoffe mit
XeCl-Excimerlaserstrahlung
LFT, 187 Seiten, 98 Bilder, 29 Tab. 1994.
ISBN 3-446-17970-4.

Band 40: Konrad Grampp
Rechnerunterstützung bei Test und
Schulung an Steuerungssoftware von
SMD-Bestücklinien
FAPS, 178 Seiten, 88 Bilder. 1995.
ISBN 3-446-18173-3.

Band 41: Martin Koch
Wissensbasierte Unterstützung der
Angebotsbearbeitung in der
Investitionsgüterindustrie
FAPS, 169 Seiten, 68 Bilder. 1995.
ISBN 3-446-18174-1.

Band 42: Armin Gropp
Anlagen- und Prozeßdiagnostik beim
Schneiden mit einem gepulsten
Nd:YAG-Laser
LFT, 160 Seiten, 88 Bilder, 7 Tab. 1995.
ISBN 3-446-18241-1.

Band 43: Werner Heckel
Optische 3D-Konturerfassung und
on-line Biegewinkelmessung mit
dem Lichtschnittverfahren
LFT, 149 Seiten, 43 Bilder, 11 Tab. 1995.
ISBN 3-446-18243-8.

Band 44: Armin Rothhaupt
Modulares Planungssystem zur
Optimierung der Elektronikfertigung
FAPS, 180 Seiten, 101 Bilder. 1995.
ISBN 3-446-18307-8.

Band 45: Bernd Zöllner
Adaptive Diagnose in der
Elektronikproduktion
FAPS, 195 Seiten, 74 Bilder, 3 Tab. 1995.
ISBN 3-446-18308-6.

Band 46: Bodo Vormann
Beitrag zur automatisierten
Handhabungsplanung komplexer
Blechbiegeteile
LFT, 126 Seiten, 89 Bilder, 3 Tab. 1995.
ISBN 3-446-18345-0.

Band 47: Peter Schnepf
Zielkostenorientierte Montageplanung
FAPS, 144 Seiten, 75 Bilder. 1995.
ISBN 3-446-18397-3.

Band 48: Rainer Klotzbücher
Konzept zur rechnerintegrierten
Materialversorgung in flexiblen
Fertigungssystemen
FAPS, 156 Seiten, 62 Bilder. 1995.
ISBN 3-446-18412-0.

Band 49: Wolfgang Greska
Wissensbasierte Analyse und
Klassifizierung von Blechteilen
LFT, 144 Seiten, 96 Bilder. 1995.
ISBN 3-446-18462-7.

Band 50: Jörg Franke
Integrierte Entwicklung neuer
Produkt- und Produktionstechnologien
für räumliche spritzgegossene
Schaltungsträger (3-D MID)
FAPS, 196 Seiten, 86 Bilder, 4 Tab. 1995.
ISBN 3-446-18448-1.

Band 51: Franz-Josef Zeller
Sensorplanung und schnelle
Sensorregelung für Industrieroboter
FAPS, 190 Seiten, 102 Bilder, 9 Tab. 1995.
ISBN 3-446-18601-8.

Band 52: Michael Solvie
Zeitbehandlung und
Multimedia-Unterstützung in
Feldkommunikationssystemen
FAPS, 200 Seiten, 87 Bilder, 35 Tab. 1996.
ISBN 3-446-18607-7.

Band 53: Robert Hopperdietzel
Reengineering in der Elektro- und
Elektronikindustrie
FAPS, 180 Seiten, 109 Bilder, 1 Tab. 1996.
ISBN 3-87525-070-2.

Band 54: Thomas Rebhahn
Beitrag zur Mikromaterialbearbeitung
mit Excimerlasern - Systemkomponenten
und Verfahrensoptimierungen
LFT, 148 Seiten, 61 Bilder, 10 Tab. 1996.
ISBN 3-87525-075-3.

Band 55: Henning Hanebuth
Laserstrahlhartlöten mit
Zweistrahlschweißtechnik
LFT, 157 Seiten, 58 Bilder, 11 Tab. 1996.
ISBN 3-87525-074-5.

Band 56: Uwe Schönherr
Steuerung und Sensordatenintegration
für flexible Fertigungszellen mit
kooperierenden Robotern
FAPS, 188 Seiten, 116 Bilder, 3 Tab. 1996.
ISBN 3-87525-076-1.

Band 57: Stefan Holzer
Berührungslose Formgebung mit
Laserstrahlung
LFT, 162 Seiten, 69 Bilder, 11 Tab. 1996.
ISBN 3-87525-079-6.

Band 58: Markus Schultz
Fertigungsqualität beim
3D-Laserstrahlschweißen von
Blechformteilen
LFT, 165 Seiten, 88 Bilder, 9 Tab. 1997.
ISBN 3-87525-080-X.

Band 59: Thomas Krebs
Integration elektromechanischer
CA-Anwendungen über einem
STEP-Produktmodell
FAPS, 198 Seiten, 58 Bilder, 8 Tab. 1997.
ISBN 3-87525-081-8.

Band 60: Jürgen Sturm
Prozeßintegrierte Qualitätssicherung
in der Elektronikproduktion
FAPS, 167 Seiten, 112 Bilder, 5 Tab. 1997.
ISBN 3-87525-082-6.

Band 61: Andreas Brand
Prozesse und Systeme zur Bestückung
räumlicher elektronischer Baugruppen
(3D-MID)
FAPS, 182 Seiten, 100 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-087-7.

Band 62: Michael Kauf
Regelung der Laserstrahlleistung und
der Fokusparameter einer
CO₂-Hochleistungslaseranlage
LFT, 140 Seiten, 70 Bilder, 5 Tab. 1997.
ISBN 3-87525-083-4.

Band 63: Peter Steinwasser
Modulares Informationsmanagement
in der integrierten Produkt- und
Prozeßplanung
FAPS, 190 Seiten, 87 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-084-2.

Band 64: Georg Liedl
Integriertes Automatisierungskonzept
für den flexiblen Materialfluß in der
Elektronikproduktion
FAPS, 196 Seiten, 96 Bilder, 3 Tab. 1997.
ISBN 3-87525-086-9.

Band 65: Andreas Otto
Transiente Prozesse beim
Laserstrahlschweißen
LFT, 132 Seiten, 62 Bilder, 1 Tab. 1997.
ISBN 3-87525-089-3.

Band 66: Wolfgang Blöchl
Erweiterte Informationsbereitstellung
an offenen CNC-Steuerungen zur
Prozeß- und Programmoptimierung
FAPS, 168 Seiten, 96 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-091-5.

Band 67: Klaus-Uwe Wolf
Verbesserte Prozeßführung und
Prozeßplanung zur Leistungs- und
Qualitätssteigerung beim
Spulenwickeln
FAPS, 186 Seiten, 125 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-092-3.

Band 68: Frank Backes
Technologieorientierte Bahnplanung
für die 3D-Laserstrahlbearbeitung
LFT, 138 Seiten, 71 Bilder, 2 Tab. 1997.
ISBN 3-87525-093-1.

Band 69: Jürgen Kraus
Laserstrahlumformen von Profilen
LFT, 137 Seiten, 72 Bilder, 8 Tab. 1997.
ISBN 3-87525-094-X.

Band 70: Norbert Neubauer
Adaptive Strahlführungen für
CO₂-Laseranlagen
LFT, 120 Seiten, 50 Bilder, 3 Tab. 1997.
ISBN 3-87525-095-8.

Band 71: Michael Steber
Prozeßoptimierter Betrieb flexibler
Schraubstationen in der
automatisierten Montage
FAPS, 168 Seiten, 78 Bilder, 3 Tab. 1997.
ISBN 3-87525-096-6.

Band 72: Markus Pfestorf
Funktionale 3D-Oberflächenkenngrößen
in der Umformtechnik
LFT, 162 Seiten, 84 Bilder, 15 Tab. 1997.
ISBN 3-87525-097-4.

Band 73: Volker Franke

Integrierte Planung und Konstruktion von Werkzeugen für die Biegebearbeitung

LFT, 143 Seiten, 81 Bilder. 1998.

ISBN 3-87525-098-2.

Band 74: Herbert Scheller

Automatisierte Demontagesysteme und recyclinggerechte Produktgestaltung elektronischer Baugruppen

FAPS, 184 Seiten, 104 Bilder, 17 Tab. 1998.

ISBN 3-87525-099-0.

Band 75: Arthur Meßner

Kaltmassivumformung metallischer Kleinstteile – Werkstoffverhalten, Wirkflächenreibung, Prozeßauslegung

LFT, 164 Seiten, 92 Bilder, 14 Tab. 1998.

ISBN 3-87525-100-8.

Band 76: Mathias Glasmacher

Prozeß- und Systemtechnik zum Laserstrahl-Mikroschweißen

LFT, 184 Seiten, 104 Bilder, 12 Tab. 1998.

ISBN 3-87525-101-6.

Band 77: Michael Schwind

Zerstörungsfreie Ermittlung mechanischer Eigenschaften von Feinblechen mit dem Wirbelstromverfahren

LFT, 124 Seiten, 68 Bilder, 8 Tab. 1998.

ISBN 3-87525-102-4.

Band 78: Manfred Gerhard

Qualitätssteigerung in der Elektronikproduktion durch Optimierung der Prozeßführung beim Löten komplexer Baugruppen

FAPS, 179 Seiten, 113 Bilder, 7 Tab. 1998.

ISBN 3-87525-103-2.

Band 79: Elke Rauh

Methodische Einbindung der Simulation in die betrieblichen Planungs- und Entscheidungsabläufe

FAPS, 192 Seiten, 114 Bilder, 4 Tab. 1998.

ISBN 3-87525-104-0.

Band 80: Sorin Niederkorn

Meßeinrichtung zur Untersuchung der Wirkflächenreibung bei umformtechnischen Prozessen

LFT, 99 Seiten, 46 Bilder, 6 Tab. 1998.

ISBN 3-87525-105-9.

Band 81: Stefan Schuberth

Regelung der Fokusslage beim Schweißen mit CO₂-Hochleistungslasern unter Einsatz von adaptiven Optiken

LFT, 140 Seiten, 64 Bilder, 3 Tab. 1998.

ISBN 3-87525-106-7.

Band 82: Armando Walter Colombo

Development and Implementation of Hierarchical Control Structures of Flexible Production Systems Using High Level Petri Nets

FAPS, 216 Seiten, 86 Bilder. 1998.

ISBN 3-87525-109-1.

Band 83: Otto Meedt

Effizienzsteigerung bei Demontage und Recycling durch flexible Demontagetechnologien und optimierte Produktgestaltung

FAPS, 186 Seiten, 103 Bilder. 1998.

ISBN 3-87525-108-3.

Band 84: Knuth Götz

Modelle und effiziente Modellbildung zur Qualitätssicherung in der Elektronikproduktion

FAPS, 212 Seiten, 129 Bilder, 24 Tab. 1998.

ISBN 3-87525-112-1.

Band 85: Ralf Luchs
Einsatzmöglichkeiten leitender Klebstoffe zur zuverlässigen Kontaktierung elektronischer Bauelemente in der SMT
FAPS, 176 Seiten, 126 Bilder, 30 Tab. 1998.
ISBN 3-87525-113-7.

Band 86: Frank Pöhlau
Entscheidungsgrundlagen zur Einführung räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3-D MID)
FAPS, 144 Seiten, 99 Bilder. 1999.
ISBN 3-87525-114-8.

Band 87: Roland T. A. Kals
Fundamentals on the miniaturization of sheet metal working processes
LFT, 128 Seiten, 58 Bilder, 11 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-115-6.

Band 88: Gerhard Luhn
Implizites Wissen und technisches Handeln am Beispiel der Elektronikproduktion
FAPS, 252 Seiten, 61 Bilder, 1 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-116-4.

Band 89: Axel Sprenger
Adaptives Streckbiegen von Aluminium-Strangpreßprofilen
LFT, 114 Seiten, 63 Bilder, 4 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-117-2.

Band 90: Hans-Jörg Pucher
Untersuchungen zur Prozeßfolge Umformen, Bestücken und Laserstrahllöten von Mikrokontakten
LFT, 158 Seiten, 69 Bilder, 9 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-119-9.

Band 91: Horst Arnet
Profilbiegen mit kinematischer Gestalterzeugung
LFT, 128 Seiten, 67 Bilder, 7 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-120-2.

Band 92: Doris Schubart
Prozeßmodellierung und Technologieentwicklung beim Abtragen mit CO₂-Laserstrahlung
LFT, 133 Seiten, 57 Bilder, 13 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-122-9.

Band 93: Adrianus L. P. Coremans
Laserstrahlsintern von Metallpulver - Prozeßmodellierung, Systemtechnik, Eigenschaften laserstrahlgesinterter Metallkörper
LFT, 184 Seiten, 108 Bilder, 12 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-124-5.

Band 94: Hans-Martin Biehler
Optimierungskonzepte für Qualitätsdatenverarbeitung und Informationsbereitstellung in der Elektronikfertigung
FAPS, 194 Seiten, 105 Bilder. 1999.
ISBN 3-87525-126-1.

Band 95: Wolfgang Becker
Oberflächenausbildung und tribologische Eigenschaften excimerlaserstrahlbearbeiteter Hochleistungskeramiken
LFT, 175 Seiten, 71 Bilder, 3 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-127-X.

Band 96: Philipp Hein
Innenhochdruck-Umformen von Blechpaaren: Modellierung, Prozeßauslegung und Prozeßführung
LFT, 129 Seiten, 57 Bilder, 7 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-128-8.

Band 97: Gunter Beitinger
Herstellungs- und Prüfverfahren für
thermoplastische Schaltungsträger
FAPS, 169 Seiten, 92 Bilder, 20 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-129-6.

Band 98: Jürgen Knobloch
Beitrag zur rechnerunterstützten
verursachungsgerechten
Angebotskalkulation von Blechteilen
mit Hilfe wissenschaftlicher Methoden
LFT, 155 Seiten, 53 Bilder, 26 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-130-X.

Band 99: Frank Breitenbach
Bildverarbeitungssystem zur Erfassung
der Anschlußgeometrie elektronischer
SMT-Bauelemente
LFT, 147 Seiten, 92 Bilder, 12 Tab. 2000.
ISBN 3-87525-131-8.

Band 100: Bernd Falk
Simulationsbasierte
Lebensdauervorhersage für Werkzeuge
der Kaltmassivumformung
LFT, 134 Seiten, 44 Bilder, 15 Tab. 2000.
ISBN 3-87525-136-9.

Band 101: Wolfgang Schlögl
Integriertes Simulationsdaten-Management für Maschinenentwicklung und
Anlagenplanung
FAPS, 169 Seiten, 101 Bilder, 20 Tab. 2000.
ISBN 3-87525-137-7.

Band 102: Christian Hinsel
Ermüdungsbruchversagen
hartstoffbeschichteter Werkzeugstähle
in der Kaltmassivumformung
LFT, 130 Seiten, 80 Bilder, 14 Tab. 2000.
ISBN 3-87525-138-5.

Band 103: Stefan Bobbert
Simulationsgestützte Prozessausslegung
für das Innenhochdruck-Umformen
von Blechpaaren
LFT, 123 Seiten, 77 Bilder. 2000.
ISBN 3-87525-145-8.

Band 104: Harald Rottbauer
Modulares Planungswerkzeug zum
Produktionsmanagement in der
Elektronikproduktion
FAPS, 166 Seiten, 106 Bilder. 2001.
ISBN 3-87525-139-3.

Band 105: Thomas Hennige
Flexible Formgebung von Blechen
durch Laserstrahlumformen
LFT, 119 Seiten, 50 Bilder. 2001.
ISBN 3-87525-140-7.

Band 106: Thomas Menzel
Wissenschaftsbasierte Methoden für die
rechnergestützte Charakterisierung
und Bewertung innovativer
Fertigungsprozesse
LFT, 152 Seiten, 71 Bilder. 2001.
ISBN 3-87525-142-3.

Band 107: Thomas Stöckel
Kommunikationstechnische Integration
der Prozeßebene in Produktionssysteme
durch Middleware-Frameworks
FAPS, 147 Seiten, 65 Bilder, 5 Tab. 2001.
ISBN 3-87525-143-1.

Band 108: Frank Pitter
Verfügbarkeitssteigerung von
Werkzeugmaschinen durch Einsatz
mechatronischer Sensorlösungen
FAPS, 158 Seiten, 131 Bilder, 8 Tab. 2001.
ISBN 3-87525-144-X.

Band 109: Markus Korneli
Integration lokaler CAP-Systeme in
einen globalen Fertigungsdatenverbund
FAPS, 121 Seiten, 53 Bilder, 11 Tab. 2001.
ISBN 3-87525-146-6.

Band 110: Burkhard Müller
Laserstrahljustieren mit Excimer-Lasern -
Prozeßparameter und Modelle zur
Aktorkonstruktion
LFT, 128 Seiten, 36 Bilder, 9 Tab. 2001.
ISBN 3-87525-159-8.

Band 111: Jürgen Göhringer
Integrierte Telediagnose via Internet
zum effizienten Service von
Produktionssystemen
FAPS, 178 Seiten, 98 Bilder, 5 Tab. 2001.
ISBN 3-87525-147-4.

Band 112: Robert Feuerstein
Qualitäts- und kosteneffiziente Integra-
tion neuer Bauelementetechnologien in
die Flachbaugruppenfertigung
FAPS, 161 Seiten, 99 Bilder, 10 Tab. 2001.
ISBN 3-87525-151-2.

Band 113: Marcus Reichenberger
Eigenschaften und Einsatzmöglichkeiten
alternativer Elektroniklote in der
Oberflächenmontage (SMT)
FAPS, 165 Seiten, 97 Bilder, 18 Tab. 2001.
ISBN 3-87525-152-0.

Band 114: Alexander Huber
Justieren vormontierter Systeme mit dem
Nd:YAG-Laser unter Einsatz von Aktoren
LFT, 122 Seiten, 58 Bilder, 5 Tab. 2001.
ISBN 3-87525-153-9.

Band 115: Sami Krimi
Analyse und Optimierung von Montage-
systemen in der Elektronikproduktion
FAPS, 155 Seiten, 88 Bilder, 3 Tab. 2001.
ISBN 3-87525-157-1.

Band 116: Marion Merklein
Laserstrahlumformen von
Aluminiumwerkstoffen - Beeinflussung
der Mikrostruktur und der mechanischen
Eigenschaften
LFT, 122 Seiten, 65 Bilder, 15 Tab. 2001.
ISBN 3-87525-156-3.

Band 117: Thomas Collisi
Ein informationslogistisches
Architekturkonzept zur Akquisition
simulationsrelevanter Daten
FAPS, 181 Seiten, 105 Bilder, 7 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-164-4.

Band 118: Markus Koch
Rationalisierung und ergonomische
Optimierung im Innenausbau durch
den Einsatz moderner
Automatisierungstechnik
FAPS, 176 Seiten, 98 Bilder, 9 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-165-2.

Band 119: Michael Schmidt
Prozeßregelung für das Laserstrahl-
Punktschweißen in der Elektronikpro-
duktion
LFT, 152 Seiten, 71 Bilder, 3 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-166-0.

Band 120: Nicolas Tiesler
Grundlegende Untersuchungen zum
Fließpressen metallischer Kleinstteile
LFT, 126 Seiten, 78 Bilder, 12 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-175-X.

Band 121: Lars Pursche
Methoden zur technologieorientierten
Programmierung für die
3D-Lasermikrobearbeitung
LFT, 111 Seiten, 39 Bilder, 0 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-183-0.

Band 122: Jan-Oliver Brassel
Prozeßkontrolle beim
Laserstrahl-Mikroschweißen
LFT, 148 Seiten, 72 Bilder, 12 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-181-4.

Band 123: Mark Geisel
Prozeßkontrolle und -steuerung beim
Laserstrahlschweißen mit den Methoden
der nichtlinearen Dynamik
LFT, 135 Seiten, 46 Bilder, 2 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-180-6.

Band 124: Gerd Eßer
Laserstrahlunterstützte Erzeugung
metallischer Leiterstrukturen auf
Thermoplastsubstraten für die
MID-Technik
LFT, 148 Seiten, 60 Bilder, 6 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-171-7.

Band 125: Marc Fleckenstein
Qualität laserstrahl-gefügter
Mikroverbindungen elektronischer
Kontakte
LFT, 159 Seiten, 77 Bilder, 7 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-170-9.

Band 126: Stefan Kaufmann
Grundlegende Untersuchungen zum
Nd:YAG- Laserstrahlfügen von Silizium
für Komponenten der Optoelektronik
LFT, 159 Seiten, 100 Bilder, 6 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-172-5.

Band 127: Thomas Fröhlich
Simultanes Löten von Anschlußkontak-
ten elektronischer Bauelemente mit
Diodenlaserstrahlung
LFT, 143 Seiten, 75 Bilder, 6 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-186-5.

Band 128: Achim Hofmann
Erweiterung der Formgebungsgrenzen
beim Umformen von
Aluminiumwerkstoffen durch den Ein-
satz prozessangepasster Platinen
LFT, 113 Seiten, 58 Bilder, 4 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-182-2.

Band 129: Ingo Kriebitzsch
3 - D MID Technologie in der
Automobilelektronik
FAPS, 129 Seiten, 102 Bilder, 10 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-169-5.

Band 130: Thomas Pohl
Fertigungsqualität und Umformbarkeit
laserstrahlgeschweißter Formplatinen
aus Aluminiumlegierungen
LFT, 133 Seiten, 93 Bilder, 12 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-173-3.

Band 131: Matthias Wenk
Entwicklung eines konfigurierbaren
Steuerungssystems für die flexible
Sensorführung von Industrierobotern
FAPS, 167 Seiten, 85 Bilder, 1 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-174-1.

Band 132: Matthias Negendanck
Neue Sensorik und Aktorik für
Bearbeitungsköpfe zum
Laserstrahlschweißen
LFT, 116 Seiten, 60 Bilder, 14 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-184-9.

Band 133: Oliver Kreis
Integrierte Fertigung - Verfahrensin-
tegration durch Innenhochdruck-Umfor-
men, Trennen und Laserstrahlschweißen
in einem Werkzeug sowie ihre tele- und
multimediale Präsentation
LFT, 167 Seiten, 90 Bilder, 43 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-176-8.

Band 134: Stefan Trautner
Technische Umsetzung produktbezoge-
ner Instrumente der Umweltpolitik bei
Elektro- und Elektronikgeräten
FAPS, 179 Seiten, 92 Bilder, 11 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-177-6.

Band 135: Roland Meier
Strategien für einen produktorientierten
Einsatz räumlicher spritzgegossener
Schaltungsträger (3-D MID)
FAPS, 155 Seiten, 88 Bilder, 14 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-178-4.

Band 136: Jürgen Wunderlich
Kostensimulation - Simulationsbasierte
Wirtschaftlichkeitsregelung komplexer
Produktionssysteme
FAPS, 202 Seiten, 119 Bilder, 17 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-179-2.

Band 137: Stefan Novotny
Innenhochdruck-Umformen von Blechen
aus Aluminium- und Magnesiumlegie-
rungen bei erhöhter Temperatur
LFT, 132 Seiten, 82 Bilder, 6 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-185-7.

Band 138: Andreas Licha
Flexible Montageautomatisierung zur
Komplettmontage flächenhafter Produkt-
strukturen durch kooperierende
Industrieroboter
FAPS, 158 Seiten, 87 Bilder, 8 Tab. 2003.
ISBN 3-87525-189-X.

Band 139: Michael Eisenbarth
Beitrag zur Optimierung der Aufbau- und
Verbindungstechnik für mechatronische
Baugruppen
FAPS, 207 Seiten, 141 Bilder, 9 Tab. 2003.
ISBN 3-87525-190-3.

Band 140: Frank Christoph
Durchgängige simulationsgestützte
Planung von Fertigungseinrichtungen der
Elektronikproduktion
FAPS, 187 Seiten, 107 Bilder, 9 Tab. 2003.
ISBN 3-87525-191-1.

Band 141: Hinnerk Hagenah
Simulationsbasierte Bestimmung der
zu erwartenden Maßhaltigkeit für das
Blechbiegen
LFT, 131 Seiten, 36 Bilder, 26 Tab. 2003.
ISBN 3-87525-192-X.

Band 142: Ralf Eckstein
Scherschneiden und Biegen metallischer
Kleinstteile - Materialeinfluss und
Materialverhalten
LFT, 148 Seiten, 71 Bilder, 19 Tab. 2003.
ISBN 3-87525-193-8.

Band 143: Frank H. Meyer-Pittroff
Excimerlaserstrahlbiegen dünner
metallischer Folien mit homogener
Lichtlinie
LFT, 138 Seiten, 60 Bilder, 16 Tab. 2003.
ISBN 3-87525-196-2.

Band 144: Andreas Kach
Rechnergestützte Anpassung von
Laserstrahlschneidbahnen
an Bauteilabweichungen
LFT, 139 Seiten, 69 Bilder, 11 Tab. 2004.
ISBN 3-87525-197-0.

Band 145: Stefan Hierl
System- und Prozeßtechnik für das
simultane Löten mit Diodenlaserstrah-
lung von elektronischen Bauelementen
LFT, 124 Seiten, 66 Bilder, 4 Tab. 2004.
ISBN 3-87525-198-9.

Band 146: Thomas Neudecker
Tribologische Eigenschaften keramischer
Blechumformwerkzeuge- Einfluss einer
Oberflächenendbearbeitung mittels
Excimerlaserstrahlung
LFT, 166 Seiten, 75 Bilder, 26 Tab. 2004.
ISBN 3-87525-200-4.

Band 147: Ulrich Wenger
Prozessoptimierung in der Wickeltechnik
durch innovative maschinenbauliche und
regelungstechnische Ansätze
FAPS, 132 Seiten, 88 Bilder, 0 Tab. 2004.
ISBN 3-87525-203-9.

Band 148: Stefan Slama
Effizienzsteigerung in der Montage durch
marktorientierte Montagestrukturen und
erweiterte Mitarbeiterkompetenz
FAPS, 188 Seiten, 125 Bilder, 0 Tab. 2004.
ISBN 3-87525-204-7.

Band 149: Thomas Wurm
Laserstrahljustieren mittels Aktoren-Ent-
wicklung von Konzepten und Methoden
für die rechnerunterstützte Modellierung
und Optimierung von komplexen
Aktorsystemen in der Mikrotechnik
LFT, 122 Seiten, 51 Bilder, 9 Tab. 2004.
ISBN 3-87525-206-3.

Band 150: Martino Celeghini
Wirkmedienbasierte Blechumformung:
Grundlagenuntersuchungen zum Einfluss
von Werkstoff und Bauteilgeometrie
LFT, 146 Seiten, 77 Bilder, 6 Tab. 2004.
ISBN 3-87525-207-1.

Band 151: Ralph Hohenstein
Entwurf hochdynamischer Sensor- und
Regelsysteme für die adaptive
Laserbearbeitung
LFT, 282 Seiten, 63 Bilder, 16 Tab. 2004.
ISBN 3-87525-210-1.

Band 152: Angelika Hutterer
Entwicklung prozessüberwachender
Regelkreise für flexible
Formgebungsprozesse
LFT, 149 Seiten, 57 Bilder, 2 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-212-8.

Band 153: Emil Egerer
Massivumformen metallischer Kleinst-
teile bei erhöhter Prozesstemperatur
LFT, 158 Seiten, 87 Bilder, 10 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-213-6.

Band 154: Rüdiger Holzmann
Strategien zur nachhaltigen Optimierung
von Qualität und Zuverlässigkeit in
der Fertigung hochintegrierter
Flachbaugruppen
FAPS, 186 Seiten, 99 Bilder, 19 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-217-9.

Band 155: Marco Nock
Biegeumformen mit
Elastomerwerkzeugen Modellierung,
Prozessauslegung und Abgrenzung des
Verfahrens am Beispiel des Rohrbiegens
LFT, 164 Seiten, 85 Bilder, 13 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-218-7.

Band 156: Frank Niebling
Qualifizierung einer Prozesskette zum
Laserstrahlsintern metallischer Bauteile
LFT, 148 Seiten, 89 Bilder, 3 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-219-5.

Band 157: Markus Meiler
Großserientauglichkeit trockenschmier-
stoffbeschichteter Aluminiumbleche im
Presswerk Grundlegende Untersuchun-
gen zur Tribologie, zum Umformverhal-
ten und Bauteilversuche
LFT, 104 Seiten, 57 Bilder, 21 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-221-7.

Band 158: Agus Sutanto
Solution Approaches for Planning of
Assembly Systems in Three-Dimensional
Virtual Environments
FAPS, 169 Seiten, 98 Bilder, 3 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-220-9.

Band 159: Matthias Boiger
Hochleistungssysteme für die Fertigung
elektronischer Baugruppen auf der Basis
flexibler Schaltungsträger
FAPS, 175 Seiten, 111 Bilder, 8 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-222-5.

Band 160: Matthias Pitz
Laserunterstütztes Biegen höchstfester
Mehrphasenstähle
LFT, 120 Seiten, 73 Bilder, 11 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-223-3.

Band 161: Meik Vahl
Beitrag zur gezielten Beeinflussung des
Werkstoffflusses beim Innenhochdruck-
Umformen von Blechen
LFT, 165 Seiten, 94 Bilder, 15 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-224-1.

Band 162: Peter K. Kraus
Plattformstrategien - Realisierung
einer varianz- und kostenoptimierten
Wertschöpfung
FAPS, 181 Seiten, 95 Bilder, 0 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-226-8.

Band 163: Adrienn Cser
Laserstrahlschmelzabtrag - Prozessana-
lyse und -modellierung
LFT, 146 Seiten, 79 Bilder, 3 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-227-6.

Band 164: Markus C. Hahn
Grundlegende Untersuchungen zur
Herstellung von Leichtbauverbundstruk-
turen mit Aluminiumschaumkern
LFT, 143 Seiten, 60 Bilder, 16 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-228-4.

Band 165: Gordana Michos
Mechatronische Ansätze zur Optimie-
rung von Vorschubachsen
FAPS, 146 Seiten, 87 Bilder, 17 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-230-6.

Band 166: Markus Stark
Auslegung und Fertigung hochpräziser
Faser-Kollimator-Arrays
LFT, 158 Seiten, 115 Bilder, 11 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-231-4.

Band 167: Yurong Zhou
Kollaboratives Engineering Management
in der integrierten virtuellen Entwicklung
der Anlagen für die Elektronikproduktion
FAPS, 156 Seiten, 84 Bilder, 6 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-232-2.

Band 168: Werner Enser
Neue Formen permanenter und lösbarer elektrischer Kontaktierungen für mechatronische Baugruppen
FAPS, 190 Seiten, 112 Bilder, 5 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-233-0.

Band 169: Katrin Melzer
Integrierte Produktpolitik bei elektrischen und elektronischen Geräten zur Optimierung des Product-Life-Cycle
FAPS, 155 Seiten, 91 Bilder, 17 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-234-9.

Band 170: Alexander Putz
Grundlegende Untersuchungen zur Erfassung der realen Vorspannung von armierten Kaltfließpresswerkzeugen mittels Ultraschall
LFT, 137 Seiten, 71 Bilder, 15 Tab. 2006.
ISBN 3-87525-237-3.

Band 171: Martin Prechtel
Automatisiertes Schichtverfahren für metallische Folien - System- und Prozesstechnik
LFT, 154 Seiten, 45 Bilder, 7 Tab. 2006.
ISBN 3-87525-238-1.

Band 172: Markus Meidert
Beitrag zur deterministischen Lebensdauerabschätzung von Werkzeugen der Kaltmassivumformung
LFT, 131 Seiten, 78 Bilder, 9 Tab. 2006.
ISBN 3-87525-239-X.

Band 173: Bernd Müller
Robuste, automatisierte Montagesysteme durch adaptive Prozessführung und montageübergreifende Fehlerprävention am Beispiel flächiger Leichtbauteile
FAPS, 147 Seiten, 77 Bilder, 0 Tab. 2006.
ISBN 3-87525-240-3.

Band 174: Alexander Hofmann
Hybrides Laserdurchstrahlsschweißen von Kunststoffen
LFT, 136 Seiten, 72 Bilder, 4 Tab. 2006.
ISBN 978-3-87525-243-9.

Band 175: Peter Wölflick
Innovative Substrate und Prozesse mit feinsten Strukturen für bleifreie Mechatronik-Anwendungen
FAPS, 177 Seiten, 148 Bilder, 24 Tab. 2006.
ISBN 978-3-87525-246-0.

Band 176: Attila Komlodi
Detection and Prevention of Hot Cracks during Laser Welding of Aluminium Alloys Using Advanced Simulation Methods
LFT, 155 Seiten, 89 Bilder, 14 Tab. 2006.
ISBN 978-3-87525-248-4.

Band 177: Uwe Popp
Grundlegende Untersuchungen zum Laserstrahlstrukturieren von Kaltmassivumformwerkzeugen
LFT, 140 Seiten, 67 Bilder, 16 Tab. 2006.
ISBN 978-3-87525-249-1.

Band 178: Veit Rückel
Rechnergestützte Ablaufplanung und Bahngenerierung Für kooperierende Industrieroboter
FAPS, 148 Seiten, 75 Bilder, 7 Tab. 2006.
ISBN 978-3-87525-250-7.

Band 179: Manfred Dirscherl
Nicht-thermische Mikrojustiertechnik mittels ultrakurzer Laserpulse
LFT, 154 Seiten, 69 Bilder, 10 Tab. 2007.
ISBN 978-3-87525-251-4.

Band 180: Yong Zhuo
Entwurf eines rechnergestützten integrierten Systems für Konstruktion und Fertigungsplanung räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3D-MID)
FAPS, 181 Seiten, 95 Bilder, 5 Tab. 2007.
ISBN 978-3-87525-253-8.

Band 181: Stefan Lang
Durchgängige Mitarbeiterinformation zur Steigerung von Effizienz und Prozesssicherheit in der Produktion
FAPS, 172 Seiten, 93 Bilder. 2007.
ISBN 978-3-87525-257-6.

Band 182: Hans-Joachim Krauß
Laserstrahlinduzierte Pyrolyse präkeramischer Polymere
LFT, 171 Seiten, 100 Bilder. 2007.
ISBN 978-3-87525-258-3.

Band 183: Stefan Junker
Technologien und Systemlösungen für die flexibel automatisierte Bestückung permanent erregter Läufer mit oberflächenmontierten Dauermagneten
FAPS, 173 Seiten, 75 Bilder. 2007.
ISBN 978-3-87525-259-0.

Band 184: Rainer Kohlbauer
Wissensbasierte Methoden für die simulationsgestützte Auslegung wirkmedienbasierter Blechumformprozesse
LFT, 135 Seiten, 50 Bilder. 2007.
ISBN 978-3-87525-260-6.

Band 185: Klaus Lamprecht
Wirkmedienbasierte Umformung tiefgezogener Vorformen unter besonderer Berücksichtigung maßgeschneiderter Halbzeuge
LFT, 137 Seiten, 81 Bilder. 2007.
ISBN 978-3-87525-265-1.

Band 186: Bernd Zolleiß
Optimierte Prozesse und Systeme für die Bestückung mechatronischer Baugruppen
FAPS, 180 Seiten, 117 Bilder. 2007.
ISBN 978-3-87525-266-8.

Band 187: Michael Kerausch
Simulationsgestützte Prozessauslegung für das Umformen lokal wärmebehandelter Aluminiumplatten
LFT, 146 Seiten, 76 Bilder, 7 Tab. 2007.
ISBN 978-3-87525-267-5.

Band 188: Matthias Weber
Unterstützung der Wandlungsfähigkeit von Produktionsanlagen durch innovative Softwaresysteme
FAPS, 183 Seiten, 122 Bilder, 3 Tab. 2007.
ISBN 978-3-87525-269-9.

Band 189: Thomas Frick
Untersuchung der prozessbestimmenden Strahl-Stoff-Wechselwirkungen beim Laserstrahlschweißen von Kunststoffen
LFT, 104 Seiten, 62 Bilder, 8 Tab. 2007.
ISBN 978-3-87525-268-2.

Band 190: Joachim Hecht
Werkstoffcharakterisierung und
Prozessauslegung für die wirkmedienba-
sierte Doppelblech-Umformung von
Magnesiumlegierungen
LFT, 107 Seiten, 91 Bilder, 2 Tab. 2007.
ISBN 978-3-87525-270-5.

Band 191: Ralf Völkl
Stochastische Simulation zur Werkzeug-
lebensdaueroptimierung und Präzisions-
fertigung in der Kaltmassivumformung
LFT, 178 Seiten, 75 Bilder, 12 Tab. 2008.
ISBN 978-3-87525-272-9.

Band 192: Massimo Tolazzi
Innenhochdruck-Umformen verstärkter
Blech-Rahmenstrukturen
LFT, 164 Seiten, 85 Bilder, 7 Tab. 2008.
ISBN 978-3-87525-273-6.

Band 193: Cornelia Hoff
Untersuchung der Prozesseinflussgrößen
beim Presshärten des höchstfesten
Vergütungsstahls 22MnB5
LFT, 133 Seiten, 92 Bilder, 5 Tab. 2008.
ISBN 978-3-87525-275-0.

Band 194: Christian Alvarez
Simulationsgestützte Methoden zur
effizienten Gestaltung von Lötprozessen
in der Elektronikproduktion
FAPS, 149 Seiten, 86 Bilder, 8 Tab. 2008.
ISBN 978-3-87525-277-4.

Band 195: Andreas Kunze
Automatisierte Montage von makrome-
chatronischen Modulen zur flexiblen
Integration in hybride
Pkw-Bordnetzsysteme
FAPS, 160 Seiten, 90 Bilder, 14 Tab. 2008.
ISBN 978-3-87525-278-1.

Band 196: Wolfgang Hußnätter
Grundlegende Untersuchungen zur
experimentellen Ermittlung und zur
Modellierung von Fließortkurven bei
erhöhten Temperaturen
LFT, 152 Seiten, 73 Bilder, 21 Tab. 2008.
ISBN 978-3-87525-279-8.

Band 197: Thomas Bigl
Entwicklung, angepasste Herstellungs-
verfahren und erweiterte Qualitätssiche-
rung von einsatzgerechten elektroni-
schen Baugruppen
FAPS, 175 Seiten, 107 Bilder, 14 Tab. 2008.
ISBN 978-3-87525-280-4.

Band 198: Stephan Roth
Grundlegende Untersuchungen zum
Excimerlaserstrahl-Abtragen unter
Flüssigkeitsfilmen
LFT, 113 Seiten, 47 Bilder, 14 Tab. 2008.
ISBN 978-3-87525-281-1.

Band 199: Artur Giera
Prozesstechnische Untersuchungen
zum Rührreibschweißen metallischer
Werkstoffe
LFT, 179 Seiten, 104 Bilder, 36 Tab. 2008.
ISBN 978-3-87525-282-8.

Band 200: Jürgen Lechler
Beschreibung und Modellierung
des Werkstoffverhaltens von
presshärtbaren Bor-Manganstählen
LFT, 154 Seiten, 75 Bilder, 12 Tab. 2009.
ISBN 978-3-87525-286-6.

Band 201: Andreas Blankl
Untersuchungen zur Erhöhung der
Prozessrobustheit bei der Innenhoch-
druck-Umformung von flächigen Halb-
zeugen mit vor- bzw. nachgeschalteten
Laserstrahlfügeoperationen
LFT, 120 Seiten, 68 Bilder, 9 Tab. 2009.
ISBN 978-3-87525-287-3.

Band 202: Andreas Schaller
Modellierung eines nachfrageorientierten
Produktionskonzeptes für mobile
Telekommunikationsgeräte
FAPS, 120 Seiten, 79 Bilder, 0 Tab. 2009.
ISBN 978-3-87525-289-7.

Band 203: Claudius Schimpf
Optimierung von Zuverlässigkeitsunter-
suchungen, Prüfabläufen und Nachar-
beitsprozessen in der Elektronikproduk-
tion
FAPS, 162 Seiten, 90 Bilder, 14 Tab. 2009.
ISBN 978-3-87525-290-3.

Band 204: Simon Dietrich
Sensoriken zur Schwerpunktslagebestim-
mung der optischen Prozessemissionen
beim Laserstrahl-tiefschweißen
LFT, 138 Seiten, 70 Bilder, 5 Tab. 2009.
ISBN 978-3-87525-292-7.

Band 205: Wolfgang Wolf
Entwicklung eines agentenbasierten
Steuerungssystems zur
Materialflussorganisation im
wandelbaren Produktionsumfeld
FAPS, 167 Seiten, 98 Bilder. 2009.
ISBN 978-3-87525-293-4.

Band 206: Steffen Polster
Laserdurchstrahl-schweißen
transparenter Polymerbauteile
LFT, 160 Seiten, 92 Bilder, 13 Tab. 2009.
ISBN 978-3-87525-294-1.

Band 207: Stephan Manuel Dörfler
Rührreibschweißen von walzplattiertem
Halbzeug und Aluminiumblech zur
Herstellung flächiger Aluminiumschaum-
Sandwich-Verbundstrukturen
LFT, 190 Seiten, 98 Bilder, 5 Tab. 2009.
ISBN 978-3-87525-295-8.

Band 208: Uwe Vogt
Seriennahe Auslegung von Aluminium
Tailored Heat Treated Blanks
LFT, 151 Seiten, 68 Bilder, 26 Tab. 2009.
ISBN 978-3-87525-296-5.

Band 209: Till Laumann
Qualitative und quantitative Bewertung
der Crashtauglichkeit von höchstfesten
Stählen
LFT, 117 Seiten, 69 Bilder, 7 Tab. 2009.
ISBN 978-3-87525-299-6.

Band 210: Alexander Diehl
Größeneffekte bei Biegeprozessen-
Entwicklung einer Methodik zur
Identifikation und Quantifizierung
LFT, 180 Seiten, 92 Bilder, 12 Tab. 2010.
ISBN 978-3-87525-302-3.

Band 211: Detlev Staud
Effiziente Prozesskettenauslegung für das
Umformen lokal wärmebehandelter und
geschweißter Aluminiumbleche
LFT, 164 Seiten, 72 Bilder, 12 Tab. 2010.
ISBN 978-3-87525-303-0.

Band 212: Jens Ackermann
Prozesssicherung beim Laserdurchstrahl-
schweißen thermoplastischer Kunststoffe
LPT, 129 Seiten, 74 Bilder, 13 Tab. 2010.
ISBN 978-3-87525-305-4.

Band 213: Stephan Weidel
Grundlegende Untersuchungen zum
Kontaktzustand zwischen Werkstück
und Werkzeug bei umformtechnischen
Prozessen unter tribologischen
Gesichtspunkten
LFT, 144 Seiten, 67 Bilder, 11 Tab. 2010.
ISBN 978-3-87525-307-8.

Band 214: Stefan Geißdörfer
Entwicklung eines mesoskopischen Modells zur Abbildung von Größeneffekten in der Kaltmassivumformung mit Methoden der FE-Simulation
LFT, 133 Seiten, 83 Bilder, 11 Tab. 2010.
ISBN 978-3-87525-308-5.

Band 215: Christian Matzner
Konzeption produktspezifischer Lösungen zur Robustheitssteigerung elektronischer Systeme gegen die Einwirkung von Betaung im Automobil
FAPS, 165 Seiten, 93 Bilder, 14 Tab. 2010.
ISBN 978-3-87525-309-2.

Band 216: Florian Schüssler
Verbindungs- und Systemtechnik für thermisch hochbeanspruchte und miniaturisierte elektronische Baugruppen
FAPS, 184 Seiten, 93 Bilder, 18 Tab. 2010.
ISBN 978-3-87525-310-8.

Band 217: Massimo Cojutti
Strategien zur Erweiterung der Prozessgrenzen bei der Innhochdruck-Umformung von Rohren und Blechpaaren
LFT, 125 Seiten, 56 Bilder, 9 Tab. 2010.
ISBN 978-3-87525-312-2.

Band 218: Raoul Plettke
Mehrkriterielle Optimierung komplexer Aktorsysteme für das Laserstrahljustieren
LFT, 152 Seiten, 25 Bilder, 3 Tab. 2010.
ISBN 978-3-87525-315-3.

Band 219: Andreas Dobroschke
Flexible Automatisierungslösungen für die Fertigung wickeltechnischer Produkte
FAPS, 184 Seiten, 109 Bilder, 18 Tab. 2011.
ISBN 978-3-87525-317-7.

Band 220: Azhar Zam
Optical Tissue Differentiation for Sensor-Controlled Tissue-Specific Laser Surgery
LPT, 99 Seiten, 45 Bilder, 8 Tab. 2011.
ISBN 978-3-87525-318-4.

Band 221: Michael Rösch
Potenziale und Strategien zur Optimierung des Schablonendruckprozesses in der Elektronikproduktion
FAPS, 192 Seiten, 127 Bilder, 19 Tab. 2011.
ISBN 978-3-87525-319-1.

Band 222: Thomas Rechtenwald
Quasi-isothermes Laserstrahlsintern von Hochtemperatur-Thermoplasten - Eine Betrachtung werkstoff-prozessspezifischer Aspekte am Beispiel PEEK
LPT, 150 Seiten, 62 Bilder, 8 Tab. 2011.
ISBN 978-3-87525-320-7.

Band 223: Daniel Craiovan
Prozesse und Systemlösungen für die SMT-Montage optischer Bauelemente auf Substrate mit integrierten Lichtwellenleitern
FAPS, 165 Seiten, 85 Bilder, 8 Tab. 2011.
ISBN 978-3-87525-324-5.

Band 224: Kay Wagner
Beanspruchungsangepasste
Kaltmassivumformwerkzeuge durch
lokal optimierte Werkzeugoberflächen
LFT, 147 Seiten, 103 Bilder, 17 Tab. 2011.
ISBN 978-3-87525-325-2.

Band 225: Martin Brandhuber
Verbesserung der Prognosegüte des Ver-
sagens von Punktschweißverbindungen
bei höchstfesten Stahlgüten
LFT, 155 Seiten, 91 Bilder, 19 Tab. 2011.
ISBN 978-3-87525-327-6.

Band 226: Peter Sebastian Feuser
Ein Ansatz zur Herstellung von
pressgehärteten Karosseriekomponenten
mit maßgeschneiderten mechanischen
Eigenschaften: Temperierte Umform-
werkzeuge. Prozessfenster, Prozess-
simulation und funktionale Untersuchung
LFT, 195 Seiten, 97 Bilder, 60 Tab. 2012.
ISBN 978-3-87525-328-3.

Band 227: Murat Arbak
Material Adapted Design of Cold Forging
Tools Exemplified by Powder
Metallurgical Tool Steels and Ceramics
LFT, 109 Seiten, 56 Bilder, 8 Tab. 2012.
ISBN 978-3-87525-330-6.

Band 228: Indra Pitz
Beschleunigte Simulation des
Laserstrahlumformens von
Aluminiumblechen
LPT, 137 Seiten, 45 Bilder, 27 Tab. 2012.
ISBN 978-3-87525-333-7.

Band 229: Alexander Grimm
Prozessanalyse und -überwachung des
Laserstrahlhartlötens mittels optischer
Sensorik
LPT, 125 Seiten, 61 Bilder, 5 Tab. 2012.
ISBN 978-3-87525-334-4.

Band 230: Markus Kaupper
Biegen von höhenfesten Stahlblechwerk-
stoffen - Umformverhalten und Grenzen
der Biegebarkeit
LFT, 160 Seiten, 57 Bilder, 10 Tab. 2012.
ISBN 978-3-87525-339-9.

Band 231: Thomas Kroiß
Modellbasierte Prozessauslegung für
die Kaltmassivumformung unter
Brücksichtigung der Werkzeug- und
Pressenauffederung
LFT, 169 Seiten, 50 Bilder, 19 Tab. 2012.
ISBN 978-3-87525-341-2.

Band 232: Christian Goth
Analyse und Optimierung der Entwick-
lung und Zuverlässigkeit räumlicher
Schaltungsträger (3D-MID)
FAPS, 176 Seiten, 102 Bilder, 22 Tab. 2012.
ISBN 978-3-87525-340-5.

Band 233: Christian Ziegler
Ganzheitliche Automatisierung
mechatronischer Systeme in der Medizin
am Beispiel Strahlentherapie
FAPS, 170 Seiten, 71 Bilder, 19 Tab. 2012.
ISBN 978-3-87525-342-9.

Band 234: Florian Albert
Automatisiertes Laserstrahllöten
und -reparaturlöten elektronischer
Baugruppen
LPT, 127 Seiten, 78 Bilder, 11 Tab. 2012.
ISBN 978-3-87525-344-3.

Band 235: Thomas Stöhr
Analyse und Beschreibung des
mechanischen Werkstoffverhaltens
von presshärtbaren Bor-Manganstählen
LFT, 118 Seiten, 74 Bilder, 18 Tab. 2013.
ISBN 978-3-87525-346-7.

Band 236: Christian Kägeler
Prozessdynamik beim
Laserstrahlschweißen verzinkter
Stahlbleche im Überlappstoß
LPT, 145 Seiten, 80 Bilder, 3 Tab. 2013.
ISBN 978-3-87525-347-4.

Band 237: Andreas Sulzberger
Seriennahe Auslegung der Prozesskette
zur wärmeunterstützten Umformung
von Aluminiumblechwerkstoffen
LFT, 153 Seiten, 87 Bilder, 17 Tab. 2013.
ISBN 978-3-87525-349-8.

Band 238: Simon Opel
Herstellung prozessangepasster
Halbzeuge mit variabler Blechdicke
durch die Anwendung von Verfahren
der Blechmassivumformung
LFT, 165 Seiten, 108 Bilder, 27 Tab. 2013.
ISBN 978-3-87525-350-4.

Band 239: Rajesh Kanawade
In-vivo Monitoring of Epithelium
Vessel and Capillary Density for the
Application of Detection of Clinical
Shock and Early Signs of Cancer Develop-
ment
LPT, 124 Seiten, 58 Bilder, 15 Tab. 2013.
ISBN 978-3-87525-351-1.

Band 240: Stephan Busse
Entwicklung und Qualifizierung eines
Schneidclinchverfahrens
LFT, 119 Seiten, 86 Bilder, 20 Tab. 2013.
ISBN 978-3-87525-352-8.

Band 241: Karl-Heinz Leitz
Mikro- und Nanostrukturierung mit kurz
und ultrakurz gepulster Laserstrahlung
LPT, 154 Seiten, 71 Bilder, 9 Tab. 2013.
ISBN 978-3-87525-355-9.

Band 242: Markus Michl
Webbasierte Ansätze zur ganzheitlichen
technischen Diagnose
FAPS, 182 Seiten, 62 Bilder, 20 Tab. 2013.
ISBN 978-3-87525-356-6.

Band 243: Vera Sturm
Einfluss von Chargenschwankungen
auf die Verarbeitungsgrenzen von
Stahlwerkstoffen
LFT, 113 Seiten, 58 Bilder, 9 Tab. 2013.
ISBN 978-3-87525-357-3.

Band 244: Christian Neudel
Mikrostrukturelle und mechanisch-
technologische Eigenschaften
widerstandspunktgeschweißter
Aluminium-Stahl-Verbindungen für
den Fahrzeugbau
LFT, 178 Seiten, 171 Bilder, 31 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-358-0.

Band 245: Anja Neumann
Konzept zur Beherrschung der
Prozessschwankungen im Presswerk
LFT, 162 Seiten, 68 Bilder, 15 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-360-3.

Band 246: Ulf-Hermann Quentin
Laserbasierte Nanostrukturierung mit
optisch positionierten Mikrolinsen
LFT, 137 Seiten, 89 Bilder, 6 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-361-0.

Band 247: Erik Lamprecht
Der Einfluss der Fertigungsverfahren
auf die Wirbelstromverluste von
Stator-Einzelzahnblechpaketen für
den Einsatz in Hybrid- und Elektrofahr-
zeugen
FAPS, 148 Seiten, 138 Bilder, 4 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-362-7.

Band 248: Sebastian Rösel
Wirkmedienbasierte Umformung von
Blechhalbzeugen unter Anwendung
magnetorheologischer Flüssigkeiten als
kombiniertes Wirk- und Dichtmedium
LFT, 148 Seiten, 61 Bilder, 12 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-363-4.

Band 249: Paul Hippchen
Simulative Prognose der Geometrie
indirekt pressgehärteter Karosseriebau-
teile für die industrielle Anwendung
LFT, 163 Seiten, 89 Bilder, 12 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-364-1.

Band 250: Martin Zubeil
Versagensprognose bei der Prozess
simulation von Biegeumform- und Falz-
verfahren
LFT, 171 Seiten, 90 Bilder, 5 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-365-8.

Band 251: Alexander Kühl
Flexible Automatisierung der
Statorenmontage mit Hilfe einer
universellen ambidexteren Kinematik
FAPS, 142 Seiten, 60 Bilder, 26 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-367-2.

Band 252: Thomas Albrecht
Optimierte Fertigungstechnologien
für Rotoren getriebeintegrierter
PM-Synchronmotoren von
Hybridfahrzeugen
FAPS, 198 Seiten, 130 Bilder, 38 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-368-9.

Band 253: Florian Risch
Planning and Production Concepts for
Contactless Power Transfer Systems for
Electric Vehicles
FAPS, 185 Seiten, 125 Bilder, 13 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-369-6.

Band 254: Markus Weigl
Laserstrahlschweißen von Mischverbindungen aus austenitischen und ferritischen korrosionsbeständigen Stahlwerkstoffen
LPT, 184 Seiten, 110 Bilder, 6 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-370-2.

Band 255: Johannes Noneder
Beanspruchungserfassung für die Validierung von FE-Modellen zur Auslegung von Massivumformwerkzeugen
LFT, 161 Seiten, 65 Bilder, 14 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-371-9.

Band 256: Andreas Reinhardt
Ressourceneffiziente Prozess- und Produktionstechnologie für flexible Schaltungsträger
FAPS, 123 Seiten, 69 Bilder, 19 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-373-3.

Band 257: Tobias Schmuck
Ein Beitrag zur effizienten Gestaltung globaler Produktions- und Logistiknetzwerke mittels Simulation
FAPS, 151 Seiten, 74 Bilder. 2014.
ISBN 978-3-87525-374-0.

Band 258: Bernd Eichenhüller
Untersuchungen der Effekte und Wechselwirkungen charakteristischer Einflussgrößen auf das Umformverhalten bei Mikroumformprozessen
LFT, 127 Seiten, 29 Bilder, 9 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-375-7.

Band 259: Felix Lütteke
Vielseitiges autonomes Transportsystem basierend auf Weltmodellerstellung mittels Datenfusion von Deckenkameras und Fahrzeugsensoren
FAPS, 152 Seiten, 54 Bilder, 20 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-376-4.

Band 260: Martin Grüner
Hochdruck-Blechumformung mit formlos festen Stoffen als Wirkmedium
LFT, 144 Seiten, 66 Bilder, 29 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-379-5.

Band 261: Christian Brock
Analyse und Regelung des Laserstrahltiefschweißprozesses durch Detektion der Metaldampffackelposition
LPT, 126 Seiten, 65 Bilder, 3 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-380-1.

Band 262: Peter Vatter
Sensitivitätsanalyse des 3-Rollen-Schubbiegens auf Basis der Finite Elemente Methode
LFT, 145 Seiten, 57 Bilder, 26 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-381-8.

Band 263: Florian Klämpfl
Planung von Laserbestrahlungen durch simulationsbasierte Optimierung
LPT, 169 Seiten, 78 Bilder, 32 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-384-9.

Band 264: Matthias Domke
Transiente physikalische Mechanismen
bei der Laserablation von dünnen
Metallschichten
LPT, 133 Seiten, 43 Bilder, 3 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-385-6.

Band 265: Johannes Götz
Community-basierte Optimierung des
Anlagenengineerings
FAPS, 177 Seiten, 80 Bilder, 30 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-386-3.

Band 266: Hung Nguyen
Qualifizierung des Potentials von
Verfestigungseffekten zur Erweiterung
des Umformvermögens aushärtbarer
Aluminiumlegierungen
LFT, 137 Seiten, 57 Bilder, 16 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-387-0.

Band 267: Andreas Kuppert
Erweiterung und Verbesserung von Ver-
suchs- und Auswertetechniken für die
Bestimmung von Grenzformänderungs-
kurven
LFT, 138 Seiten, 82 Bilder, 2 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-388-7.

Band 268: Kathleen Klaus
Erstellung eines Werkstofforientierten
Fertigungsprozessfensters zur Steigerung
des Formgebungsvermögens von Alumi-
niumlegierungen unter Anwendung einer
zwischengeschalteten Wärmebehandlung
LFT, 154 Seiten, 70 Bilder, 8 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-391-7.

Band 269: Thomas Svec
Untersuchungen zur Herstellung von
funktionsoptimierten Bauteilen im
partiellen Presshärtprozess mittels lokal
unterschiedlich temperierter Werkzeuge
LFT, 166 Seiten, 87 Bilder, 15 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-392-4.

Band 270: Tobias Schrader
Grundlegende Untersuchungen zur
Verschleißcharakterisierung beschichte-
ter Kaltmassivumformwerkzeuge
LFT, 164 Seiten, 55 Bilder, 11 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-393-1.

Band 271: Matthäus Brela
Untersuchung von Magnetfeld-Messme-
thoden zur ganzheitlichen Wertschöp-
fungsoptimierung und Fehlerdetektion
an magnetischen Aktoren
FAPS, 170 Seiten, 97 Bilder, 4 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-394-8.

Band 272: Michael Wieland
Entwicklung einer Methode zur Prognose
adhäsiven Verschleißes an Werkzeugen
für das direkte Presshärten
LFT, 156 Seiten, 84 Bilder, 9 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-395-5.

Band 273: René Schramm
Strukturierte additive Metallisierung
durch kaltaktives
Atmosphärendruckplasma
FAPS, 136 Seiten, 62 Bilder, 15 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-396-2.

Band 274: Michael Lechner
Herstellung beanspruchungsangepasster
Aluminiumblechhalbzeuge durch
eine maßgeschneiderte Variation der
Abkühlgeschwindigkeit nach
Lösungsglühen
LFT, 136 Seiten, 62 Bilder, 15 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-397-9.

Band 275: Kolja Andreas
Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit
auf das Werkzeugeinsatzverhalten beim
Kaltfließpressen
LFT, 169 Seiten, 76 Bilder, 4 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-398-6.

Band 276: Marcus Baum
Laser Consolidation of ITO Nanoparticles
for the Generation of Thin Conductive
Layers on Transparent Substrates
LPT, 158 Seiten, 75 Bilder, 3 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-399-3.

Band 277: Thomas Schneider
Umformtechnische Herstellung
dünnwandiger Funktionsbauteile
aus Feinblech durch Verfahren der
Blechmassivumformung
LFT, 188 Seiten, 95 Bilder, 7 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-401-3.

Band 278: Jochen Merhof
Sematische Modellierung automatisierter
Produktionssysteme zur Verbesserung
der IT-Integration zwischen Anlagen-
Engineering und Steuerungsebene
FAPS, 157 Seiten, 88 Bilder, 8 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-402-0.

Band 279: Fabian Zöller
Erarbeitung von Grundlagen zur
Abbildung des tribologischen Systems
in der Umformsimulation
LFT, 126 Seiten, 51 Bilder, 3 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-403-7.

Band 280: Christian Hezler
Einsatz technologischer Versuche zur
Erweiterung der Versagensvorhersage
bei Karosseriebauteilen aus höchstfesten
Stählen
LFT, 147 Seiten, 63 Bilder, 44 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-404-4.

Band 281: Jochen Böning
Integration des Systemverhaltens von
Automobil-Hochvoltleitungen in die
virtuelle Absicherung durch
strukturmechanische Simulation
FAPS, 177 Seiten, 107 Bilder, 17 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-405-1.

Band 282: Johannes Kohl
Automatisierte Datenerfassung für
diskret ereignisorientierte Simulationen
in der energieflexiblen Fabrik
FAPS, 160 Seiten, 80 Bilder, 27 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-406-8.

Band 283: Peter Bechtold
Mikroschockwellenumformung mittels
ultrakurzer Laserpulse
LPT, 155 Seiten, 59 Bilder, 10 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-407-5.

Band 284: Stefan Berger
Laserstrahlschweißen thermoplastischer
Kohlenstofffaserverbundwerkstoffe mit
spezifischem Zusatzdraht
LPT, 118 Seiten, 68 Bilder, 9 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-408-2.

Band 285: Martin Bornschlegl
Methods-Energy Measurement - Eine
Methode zur Energieplanung für
Fügeverfahren im Karosseriebau
FAPS, 136 Seiten, 72 Bilder, 46 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-409-9.

Band 286: Tobias Rackow
Erweiterung des Unternehmenscontrol-
lings um die Dimension Energie
FAPS, 164 Seiten, 82 Bilder, 29 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-410-5.

Band 287: Johannes Koch
Grundlegende Untersuchungen zur
Herstellung zyklisch-symmetrischer
Bauteile mit Nebenformelementen durch
Blechmassivumformung
LFT, 125 Seiten, 49 Bilder, 17 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-411-2.

Band 288: Hans Ulrich Vierzigmann
Beitrag zur Untersuchung der
tribologischen Bedingungen in der
Blechmassivumformung - Bereitstellung
von tribologischen Modellversuchen und
Realisierung von Tailored Surfaces
LFT, 174 Seiten, 102 Bilder, 34 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-412-9.

Band 289: Thomas Senner
Methodik zur virtuellen Absicherung
der formgebenden Operation des
Nasspressprozesses von
Gelege-Mehrschichtverbunden
LFT, 156 Seiten, 96 Bilder, 21 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-414-3.

Band 290: Sven Kreitlein
Der grundoperationsspezifische
Mindestenergiebedarf als Referenzwert
zur Bewertung der Energieeffizienz in
der Produktion
FAPS, 185 Seiten, 64 Bilder, 30 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-415-0.

Band 291: Christian Roos
Remote-Laserstrahlschweißen verzinkter
Stahlbleche in Kehlnahtgeometrie
LPT, 123 Seiten, 52 Bilder, 0 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-416-7.

Band 292: Alexander Kahrmanidis
Thermisch unterstützte Umformung von
Aluminiumblechen
LFT, 165 Seiten, 103 Bilder, 18 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-417-4.

Band 293: Jan Tremel
Flexible Systems for Permanent
Magnet Assembly and Magnetic Rotor
Measurement / Flexible Systeme zur
Montage von Permanentmagneten und
zur Messung magnetischer Rotoren
FAPS, 152 Seiten, 91 Bilder, 12 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-419-8.

Band 294: Ioannis Tsoupis
Schädigungs- und Versagensverhalten
hochfester Leichtbauwerkstoffe unter
Biegebeanspruchung
LFT, 176 Seiten, 51 Bilder, 6 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-420-4.

Band 295: Sven Hildering
Grundlegende Untersuchungen zum
Prozessverhalten von Silizium als
Werkzeugwerkstoff für das
Mikroscherschneiden metallischer Folien
LFT, 177 Seiten, 74 Bilder, 17 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-422-8.

Band 296: Sasia Mareike Hertweck
Zeitliche Pulsformung in der
Lasermikromaterialbearbeitung –
Grundlegende Untersuchungen und
Anwendungen
LPT, 146 Seiten, 67 Bilder, 5 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-423-5.

Band 297: Paryanto
Mechatronic Simulation Approach for
the Process Planning of Energy-Efficient
Handling Systems
FAPS, 162 Seiten, 86 Bilder, 13 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-424-2.

Band 298: Peer Stenzel
Großorientaugliche Nadelwickeltechnik
für verteilte Wicklungen im
Anwendungsfall der E-Traktionsantriebe
FAPS, 239 Seiten, 147 Bilder, 20 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-425-9.

Band 299: Mario Lušić
Ein Vorgehensmodell zur Erstellung
montageführender Werkerinformations-
systeme simultan zum
Produktentstehungsprozess
FAPS, 174 Seiten, 79 Bilder, 22 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-426-6.

Band 300: Arnd Buschhaus
Hochpräzise adaptive Steuerung und
Regelung robotergeführter Prozesse
FAPS, 202 Seiten, 96 Bilder, 4 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-427-3.

Band 301: Tobias Laumer
Erzeugung von thermoplastischen
Werkstoffverbunden mittels simultanem,
intensitätsselektivem
Laserstrahlschmelzen
LPT, 140 Seiten, 82 Bilder, 0 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-428-0.

Band 302: Nora Unger
Untersuchung einer thermisch unter-
stützten Fertigungskette zur Herstellung
umgeformter Bauteile aus der höherfes-
ten Aluminiumlegierung EN AW-7020
LFT, 142 Seiten, 53 Bilder, 8 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-429-7.

Band 303: Tommaso Stellin
Design of Manufacturing Processes for
the Cold Bulk Forming of Small Metal
Components from Metal Strip
LFT, 146 Seiten, 67 Bilder, 7 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-430-3.

Band 304: Bassim Bachy
Experimental Investigation, Modeling,
Simulation and Optimization of Molded
Interconnect Devices (MID) Based on
Laser Direct Structuring (LDS) / Experi-
mentelle Untersuchung, Modellierung,
Simulation und Optimierung von Molded
Interconnect Devices (MID) basierend
auf Laser Direktstrukturierung (LDS)
FAPS, 168 Seiten, 120 Bilder, 26 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-431-0.

Band 305: Michael Spahr
Automatisierte Kontaktierungsverfahren
für flachleiterbasierte
Pkw-Bordnetzsysteme
FAPS, 197 Seiten, 98 Bilder, 17 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-432-7.

Band 306: Sebastian Suttner
Charakterisierung und Modellierung
des spannungszustandsabhängigen
Werkstoffverhaltens der Magnesium-
legierung AZ31B für die numerische
Prozessauslegung
LFT, 150 Seiten, 84 Bilder, 19 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-433-4.

Band 307: Bhargav Potdar
A reliable methodology to deduce
thermo-mechanical flow behaviour of
hot stamping steels
LFT, 203 Seiten, 98 Bilder, 27 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-436-5.

Band 308: Maria Löffler
Steuerung von Blechmassivumformpro-
zessen durch maßgeschneiderte
tribologische Systeme
LFT, viii u. 166 Seiten, 90 Bilder, 5 Tab.
2018. ISBN 978-3-96147-133-1.

Band 309: Martin Müller
Untersuchung des kombinierten Trenn-
und Umformprozesses beim Fügen art-
ungleicher Werkstoffe mittels
Schneidclinchverfahren
LFT, xi u. 149 Seiten, 89 Bilder, 6 Tab.
2018. ISBN: 978-3-96147-135-5.

Band 310: Christopher Kästle
Qualifizierung der Kupfer-Drahtbond-
technologie für integrierte Leistungs-
module in harschen Umgebungs-
bedingungen
FAPS, xii u. 167 Seiten, 70 Bilder, 18 Tab.
2018. ISBN 978-3-96147-145-4.

Band 311: Daniel Vipavc
Eine Simulationsmethode für das
3-Rollen-Schubbiegen
LFT, xiii u. 121 Seiten, 56 Bilder, 17 Tab.
2018. ISBN 978-3-96147-147-8.

Band 312: Christina Ramer
Arbeitsraumüberwachung und autonome
Bahnplanung für ein sicheres und
flexibles Roboter-Assistenzsystem
in der Fertigung
FAPS, xiv u. 188 Seiten, 57 Bilder, 9 Tab.
2018. ISBN 978-3-96147-153-9.

Band 313: Miriam Rauer
Der Einfluss von Poren auf die
Zuverlässigkeit der Lötverbindungen
von Hochleistungs-Leuchtdioden
FAPS, xii u. 209 Seiten, 108 Bilder, 21 Tab.
2018. ISBN 978-3-96147-157-7.

Band 314: Felix Tenner

Kamerabasierte Untersuchungen der Schmelze und Gasströmungen beim Laserstrahlschweißen verzinkter Stahlbleche

LPT, xxiii u. 184 Seiten, 94 Bilder, 7 Tab.
2018. ISBN 978-3-96147-160-7.

Band 315: Aarief Syed-Khaja

Diffusion Soldering for High-temperature Packaging of Power Electronics

FAPS, x u. 202 Seiten, 144 Bilder, 32 Tab.
2018. ISBN 978-3-87525-162-1.

Band 316: Adam Schaub

Grundlagenwissenschaftliche Untersuchung der kombinierten Prozesskette aus Umformen und Additive Fertigung

LFT, xi u. 192 Seiten, 72 Bilder, 27 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-166-9.

Band 317: Daniel Gröbel

Herstellung von Nebenformelementen unterschiedlicher Geometrie an Blechen mittels Fließpressverfahren der Blechmassivumformung

LFT, x u. 165 Seiten, 96 Bilder, 13 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-168-3.

Band 318: Philipp Hildenbrand

Entwicklung einer Methodik zur Herstellung von Tailored Blanks mit definierten Halbzeugeigenschaften durch einen Tausalprozess

LFT, ix u. 153 Seiten, 77 Bilder, 4 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-174-4.

Band 319: Tobias Konrad

Simulative Auslegung der Spann- und Fixierkonzepte im Karosserierohrbau: Bewertung der Baugruppenmaßhaltigkeit unter Berücksichtigung schwankender Einflussgrößen

LFT, x u. 203 Seiten, 134 Bilder, 32 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-176-8.

Band 320: David Meinel

Architektur applikationsspezifischer Multi-Physics-Simulationskonfiguratoren am Beispiel modularer Triebzüge

FAPS, xii u. 166 Seiten, 82 Bilder, 25 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-184-3.

Band 321: Andrea Zimmermann

Grundlegende Untersuchungen zum Einfluss fertigungsbedingter Eigenschaften auf die Ermüdungsfestigkeit kaltmassivumgeformter Bauteile

LFT, ix u. 160 Seiten, 66 Bilder, 5 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-190-4.

Band 322: Christoph Amann

Simulative Prognose der Geometrie nassgepresster Karosseriebauteile aus Gelege-Mehrschichtverbunden

LFT, xvi u. 169 Seiten, 80 Bilder, 13 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-194-2.

Band 323: Jennifer Tenner

Realisierung schmierstofffreier Tiefziehprozesse durch maßgeschneiderte Werkzeugoberflächen

LFT, x u. 187 Seiten, 68 Bilder, 13 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-196-6.

Band 324: Susan Zöller

Mapping Individual Subjective Values to Product Design

KTmfk, xi u. 223 Seiten, 81 Bilder, 25 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-202-4.

Band 325: Stefan Lutz
Erarbeitung einer Methodik zur
semiempirischen Ermittlung der
Umwandlungskinetik durchhärtender
Wälzlagerstähle für die Wärme-
behandlungssimulation
LFT, xiv u. 189 Seiten, 75 Bilder, 32 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-209-3.

Band 326: Tobias Gnibl
Modellbasierte Prozesskettenabbildung
rührreibgeschweißter Aluminium-
halbzeuge zur umformtechnischen
Herstellung höchstfester Leichtbau-
strukturteile
LFT, xii u. 167 Seiten, 68 Bilder, 17 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-217-8.

Band 327: Johannes Bürner
Technisch-wirtschaftliche Optionen zur
Lastflexibilisierung durch intelligente
elektrische Wärmespeicher
FAPS, xiv u. 233 Seiten, 89 Bilder, 27 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-219-2.

Band 328: Wolfgang Böhm
Verbesserung des Umformverhaltens von
mehrlagigen Aluminiumblechwerk-
stoffen mit ultrafeinkörnigem Gefüge
LFT, ix u. 160 Seiten, 88 Bilder, 14 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-227-7.

Band 329: Stefan Landkammer
Grundsatzuntersuchungen, mathemati-
sche Modellierung und Ableitung einer
Auslegungsmethodik für Gelenkantriebe
nach dem Spinnenbeinprinzip
LFT, xii u. 200 Seiten, 83 Bilder, 13 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-229-1.

Band 330: Stephan Rapp
Pump-Probe-Ellipsometrie zur Messung
transienter optischer Materialeigen-
schaften bei der Ultrakurzpuls-Laser-
materialbearbeitung
LPT, xi u. 143 Seiten, 49 Bilder, 2 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-235-2.

Band 331: Michael Scholz
Intralogs Execution System mit
integrierten autonomen, servicebasierten
Transportentitäten
FAPS, xi u. 195 Seiten, 55 Bilder, 11 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-237-6.

Band 332: Eva Bogner
Strategien der Produktindividualisierung
in der produzierenden Industrie im Kon-
text der Digitalisierung
FAPS, ix u. 201 Seiten, 55 Bilder, 28 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-246-8.

Band 333: Daniel Benjamin Krüger
Ein Ansatz zur CAD-integrierten
muskuloskelettalen Analyse der Mensch-
Maschine-Interaktion
KTmfk, x u. 217 Seiten, 102 Bilder, 7 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-250-5.

Band 334: Thomas Kuhn
Qualität und Zuverlässigkeit laserdirekt-
strukturierter mechatronisch integrierter
Baugruppen (LDS-MID)
FAPS, ix u. 152 Seiten, 69 Bilder, 12 Tab.
2019. ISBN: 978-3-96147-252-9.

Band 335: Hans Fleischmann
Modellbasierte Zustands- und Prozess-
überwachung auf Basis sozio-cyber-phy-
sischer Systeme
FAPS, xi u. 214 Seiten, 111 Bilder, 18 Tab.
2019. ISBN: 978-3-96147-256-7.

Band 336: Markus Michalski
Grundlegende Untersuchungen zum
Prozess- und Werkstoffverhalten bei
schwingungsüberlagerter Umformung
LFT, xii u. 197 Seiten, 93 Bilder, 11 Tab.
2019. ISBN: 978-3-96147-270-3.

Band 337: Markus Brandmeier
Ganzheitliches ontologiebasiertes
Wissensmanagement im Umfeld der
industriellen Produktion
FAPS, xi u. 255 Seiten, 77 Bilder, 33 Tab.
2020. ISBN: 978-3-96147-275-8.

Band 338: Stephan Purr
Datenerfassung für die Anwendung
lernender Algorithmen bei der Herstel-
lung von Blechformteilen
LFT, ix u. 165 Seiten, 48 Bilder, 4 Tab.
2020. ISBN: 978-3-96147-281-9.

Band 339: Christoph Kiener
Kaltfließpressen von gerad- und schräg-
verzahnten Zahnrädern
LFT, viii u. 151 Seiten, 81 Bilder, 3 Tab.
2020. ISBN 978-3-96147-287-1.

Band 340: Simon Spreng
Numerische, analytische und empirische
Modellierung des Heißscrimpprozesses
FAPS, xix u. 204 Seiten, 91 Bilder, 27 Tab.
2020. ISBN 978-3-96147-293-2.

Band 341: Patrik Schwingenschlögl
Erarbeitung eines Prozessverständnisses
zur Verbesserung der tribologischen
Bedingungen beim Presshärten
LFT, x u. 177 Seiten, 81 Bilder, 8 Tab.
2020. ISBN 978-3-96147-297-0.

Band 342: Emanuela Affronti
Evaluation of failure behaviour
of sheet metals
LFT, ix u. 136 Seiten, 57 Bilder, 20 Tab.
2020. ISBN 978-3-96147-303-8.

Band 343: Julia Degner
Grundlegende Untersuchungen zur
Herstellung hochfester Aluminiumblech-
bauteile in einem kombinierten Umform-
und Abschreckprozess
LFT, x u. 172 Seiten, 61 Bilder, 9 Tab.
2020. ISBN 978-3-96147-307-6.

Band 344: Maximilian Wagner
Automatische Bahnplanung für die Auf-
teilung von Prozessbewegungen in syn-
chrone Werkstück- und Werkzeugbewe-
gungen mittels Multi-Roboter-Systemen
FAPS, xxi u. 181 Seiten, 111 Bilder, 15 Tab.
2020. ISBN 978-3-96147-309-0.

Band 345: Stefan Härter
Qualifizierung des Montageprozesses
hochminiaturisierter elektronischer Bau-
elemente
FAPS, ix u. 194 Seiten, 97 Bilder, 28 Tab.
2020. ISBN 978-3-96147-314-4.

Band 346: Toni Donhauser
Ressourcenorientierte Auftragsregelung
in einer hybriden Produktion mittels
betriebsbegleitender Simulation
FAPS, xix u. 242 Seiten, 97 Bilder, 17 Tab.
2020. ISBN 978-3-96147-316-8.

Band 347: Philipp Amend
Laserbasiertes Schmelzkleben von Thermoplasten mit Metallen
LPT, xv u. 154 Seiten, 67 Bilder.
2020. ISBN 978-3-96147-326-7.

Band 348: Matthias Ehlert
Simulationsunterstützte funktionale Grenzlagenabsicherung
KTmfk, xvi u. 300 Seiten, 101 Bilder, 73 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-328-1.

Band 349: Thomas Sander
Ein Beitrag zur Charakterisierung und Auslegung des Verbundes von Kunststoffsubstraten mit harten Dünnschichten
KTmfk, xiv u. 178 Seiten, 88 Bilder, 21 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-330-4.

Band 350: Florian Pilz
Fließpressen von Verzahnungselementen an Blechen
LFT, x u. 170 Seiten, 103 Bilder, 4 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-332-8.

Band 351: Sebastian Josef Katona
Evaluation und Aufbereitung von Produktsimulationen mittels abweichungsbehafteter Geometriemodelle
KTmfk, ix u. 147 Seiten, 73 Bilder, 11 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-336-6.

Band 352: Jürgen Herrmann
Kumulatives Walzplattieren. Bewertung der Umformeigenschaften mehrlagiger Blechwerkstoffe der ausscheidungshärtbaren Legierung AA6014
LFT, x u. 157 Seiten, 64 Bilder, 5 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-344-1.

Band 353: Christof Küstner
Assistenzsystem zur Unterstützung der datengetriebenen Produktentwicklung
KTmfk, xii u. 219 Seiten, 63 Bilder, 14 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-348-9.

Band 354: Tobias Gläsel
Prozessketten zum Laserstrahlschweißen von flachleiterbasierten Formspulenwicklungen für automobiler Traktionsantriebe
FAPS, xiv u. 206 Seiten, 89 Bilder, 11 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-356-4.

Band 355: Andreas Meinel
Experimentelle Untersuchung der Auswirkungen von Axialschwingungen auf Reibung und Verschleiß in Zylinderrollenlagern
KTmfk, xii u. 162 Seiten, 56 Bilder, 7 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-358-8.

Band 356: Hannah Riedle
Haptische, generische Modelle weicher anatomischer Strukturen für die chirurgische Simulation
FAPS, xxx u. 179 Seiten, 82 Bilder, 35 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-367-0.

Band 357: Maximilian Landgraf
Leistungselektronik für den Einsatz dielektrischer Elastomere in aktorischen, sensorischen und integrierten sensomotorischen Systemen
FAPS, xxiii u. 166 Seiten, 71 Bilder, 10 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-380-9.

Band 358: Alireza Esfandiyari
Multi-Objective Process Optimization for Overpressure Reflow Soldering in Electronics Production
FAPS, xviii u. 175 Seiten, 57 Bilder, 23 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-382-3.

Band 359: Christian Sand
Prozessübergreifende Analyse komplexer
Montageprozessketten mittels
Data Mining
FAPS, XV u. 168 Seiten, 61 Bilder, 12 Tab.
2021. ISBN 978-3-96147-398-4.

Band 360: Ralf Merkl
Closed-Loop Control of a Storage-Sup-
ported Hybrid Compensation System for
Improving the Power Quality in Medium
Voltage Networks
FAPS, xxvii u. 200 Seiten, 102 Bilder, 2
Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-402-8.

Band 361: Thomas Reitberger
Additive Fertigung polymerer optischer
Wellenleiter im Aerosol-Jet-Verfahren
FAPS, xix u. 141 Seiten, 65 Bilder, 11 Tab.
2021. ISBN 978-3-96147-400-4.

Band 362: Marius Christian Fechter
Modellierung von Vorentwürfen in der
virtuellen Realität mit natürlicher
Fingerinteraktion
KTmfk, x u. 188 Seiten, 67 Bilder, 19 Tab.
2021. ISBN 978-3-96147-404-2.

Band 363: Franziska Neubauer
Oberflächenmodifizierung und Entwick-
lung einer Auswertemethodik zur Ver-
schleißcharakterisierung im Presshär-
teprozess
LFT, ix u. 177 Seiten, 42 Bilder, 6 Tab.
2021. ISBN 978-3-96147-406-6.

Band 364: Eike Wolfram Schäffer
Web- und wissensbasierter Engineering-
Konfigurator für roboterzentrierte Auto-
matisierungslösungen
FAPS, xxiv u. 195 Seiten, 108 Bilder, 25
Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-410-3.

Band 365: Daniel Gross
Untersuchungen zur kohlenstoffdioxid-
basierten kryogenen Minimalmengen-
schmierung
REP, xii u. 184 Seiten, 56 Bilder, 18 Tab.
2021. ISBN 978-3-96147-412-7.

Band 366: Daniel Junker
Qualifizierung laser-additiv gefertigter
Komponenten für den Einsatz im Werk-
zeugbau der Massivumformung
LFT, vii u. 142 Seiten, 62 Bilder, 5 Tab.
2021. ISBN 978-3-96147-416-5.

Band 367: Tallal Javied
Totally Integrated Ecology Management
for Resource Efficient and Eco-Friendly
Production
FAPS, xv u. 160 Seiten, 60 Bilder, 13 Tab.
2021. ISBN 978-3-96147-418-9.

Band 368: David Marco Hochrein
Wälzlager im Beschleunigungsfeld – Eine
Analysestrategie zur Bestimmung des
Reibungs-, Axialschub- und Temperatur-
verhaltens von Nadelkränzen –
KTmfk, xiii u. 279 Seiten, 108 Bilder,
39 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-420-2.

Band 369: Daniel Gräf
Funktionalisierung technischer Oberflächen mittels prozessüberwachter aerosolbasierter Drucktechnologie
FAPS, xxii u. 175 Seiten, 97 Bilder, 6 Tab.
2021. ISBN 978-3-96147-433-2.

Band 370: Andreas Gröschl
Hochfrequent fokusabstandsmodulierte Konfokalsensoren für die Nanokoordinatenmesstechnik
FMT, x u. 144 Seiten, 98 Bilder, 6 Tab.
2021. ISBN 978-3-96147-435-6.

Band 371: Johann Tüchsen
Konzeption, Entwicklung und Einführung des Assistenzsystems D-DAS für die Produktentwicklung elektrischer Motoren
KTmfk, xii u. 178 Seiten, 92 Bilder, 12 Tab.
2021. ISBN 978-3-96147-437-0.

Band 372: Max Marian
Numerische Auslegung von Oberflächenmikrostrukturen für geschmierte tribologische Kontakte
KTmfk, xviii u. 276 Seiten, 85 Bilder, 45 Tab.
2021. ISBN 978-3-96147-439-4.

Band 373: Johannes Strauß
Die akustooptische Strahlformung in der Lasermaterialbearbeitung
LPT, xvi u. 113 Seiten, 48 Bilder.
2021. ISBN 978-3-96147-441-7.

Band 374: Martin Hohmann
Machine learning and hyper spectral imaging: Multi Spectral Endoscopy in the Gastro Intestinal Tract towards Hyper Spectral Endoscopy
LPT, x u. 137 Seiten, 62 Bilder, 29 Tab.
2021. ISBN 978-3-96147-445-5.

Band 375: Timo Kordaß
Lasergestütztes Verfahren zur selektiven Metallisierung von epoxidharzbasierten Duromeren zur Steigerung der Integrationsdichte für dreidimensionale mechanische Package-Baugruppen
FAPS, xviii u. 198 Seiten, 92 Bilder, 24 Tab.
2021. ISBN 978-3-96147-443-1.

Band 376: Philipp Kestel
Assistenzsystem für den wissensbasierten Aufbau konstruktionsbegleitender Finite-Elemente-Analysen
KTmfk, xviii u. 209 Seiten, 57 Bilder, 17 Tab.
2021. ISBN 978-3-96147-457-8.

Band 377: Martin Lerchen
Messverfahren für die pulverbettbasierte additive Fertigung zur Sicherstellung der Konformität mit geometrischen Produktspezifikationen
FMT, x u. 150 Seiten, 60 Bilder, 9 Tab.
2021. ISBN 978-3-96147-463-9.

Band 378: Michael Schneider
Inline-Prüfung der Permeabilität in weichmagnetischen Komponenten
FAPS, xxii u. 189 Seiten, 79 Bilder, 14 Tab.
2021. ISBN 978-3-96147-465-3.

Band 379: Tobias Sprügel

Sphärische Detektorflächen als Unterstützung der Produktentwicklung zur Datenanalyse im Rahmen des Digital Engineering

KTmfk, xiii u. 213 Seiten, 84 Bilder, 33 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-475-2.

Band 380: Tom Häfner

Multipulseffekte beim Mikro-Materialabtrag von Stahllegierungen mit Pikosekunden-Laserpulslen

LPT, xxviii u. 159 Seiten, 57 Bilder, 13 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-479-0.

Band 381: Björn Heling

Einsatz und Validierung virtueller Absicherungsmethoden für abweichungsbehaftete Mechanismen im Kontext des Robust Design

KTmfk, xi u. 169 Seiten, 63 Bilder, 27 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-487-5

Abstract

Manufacturing processes are inevitably subject to variations that cause the quality of manufactured products to vary. Since quality fluctuations have a negative impact on the properties of products, Robust Design aims to minimize fluctuations. To accomplish this goal, various virtual validation tools can be used during product development.

In the context of this work, a holistic approach model is presented that provides a framework for the systematic use and validation of virtual validation methods. This novel approach enables the targeted use of different virtual validation tools that can be applied during product development. Furthermore, for the first time it is shown how tolerance analysis models for mechanisms can be validated.

Product developers are thus provided with a generally applicable, adaptable approach that enables them to use virtual validation methods in a systematic way and to critically evaluate their validity with the help of validations.

The author also demonstrates how the procedure model can be adapted to practical problems. This is illustrated using the kinematics of an X-ray shutter, which serves as a demonstrator.

Fertigungsprozesse unterliegen zwangsläufig Schwankungen, die dazu führen, dass die Qualität gefertigter Produkte variiert. Da sich Qualitätsschwankungen negativ auf die Eigenschaften von Produkten auswirken, strebt das Robust Design eine Minimierung der Schwankungen an. Um dieses Ziel zu erreichen, können während der Produktentwicklung unterschiedliche virtuelle Absicherungswerkzeuge eingesetzt werden.

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein holistisches Vorgehensmodell präsentiert, das als Rahmenwerk für den systematischen Einsatz und die Validierung von virtuellen Absicherungsmethoden dient. Dieses neuartige Vorgehen ermöglicht den zielgerichteten Einsatz unterschiedlicher virtueller Absicherungswerkzeuge, die während der Produktentwicklung eingesetzt werden. Darüber hinaus wird erstmalig aufgezeigt, wie Toleranzanalysemodelle für Mechanismen validiert werden können.

Produktentwicklern wird damit ein allgemeingültiger, anpassbarer Ansatz zur Verfügung gestellt, der sie befähigt virtuelle Absicherungsmethoden zielgerichtet einzusetzen und deren Aussagekraft mit Hilfe von Validierungen kritisch zu bewerten.

Der Autor zeigt darüber hinaus, wie das Vorgehensmodell an praxisrelevante Problemstellungen angepasst werden kann. Anhand der Kinematik einer Röntgenblende, die als Demonstrator dient, wird dies veranschaulicht.

