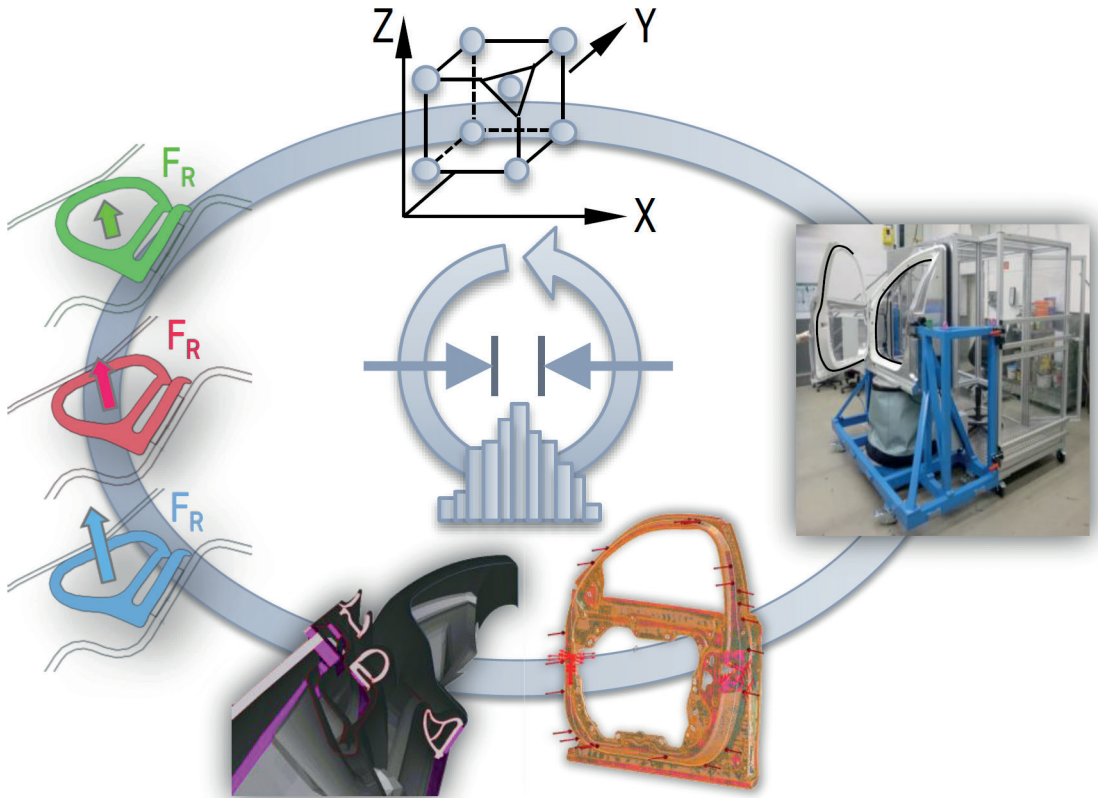




FAU Studien aus dem Maschinenbau 348

Matthias Ehlert

Simulationsunterstützte funktionale
Grenzlagenabsicherung

Matthias Ehlert

Simulationsunterstützte funktionale Grenzlagenabsicherung

FAU Studien aus dem Maschinenbau

Band 348

Herausgeber der Reihe:

Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke

Prof. Dr.-Ing. Nico Hanenkamp

Prof. Dr.-Ing. habil. Marion Merklein

Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt

Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartzack

Matthias Ehlert

**Simulationsunterstützte
funktionale
Grenzlagenabsicherung**

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

Erlangen
FAU University Press
2020

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

Ehlert, Matthias. 2020. *Simulationsunterstützte funktionale
Grenzlagenabsicherung*. FAU Studien aus dem Maschinenbau 348.
Erlangen: FAU University Press. DOI: 10.25593/978-3-96147-329-8.

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: 978-3-96147-328-1 (Druckausgabe)
eISBN: 978-3-96147-329-8 (Online-Ausgabe)
ISSN: 2625-9974
DOI: 10.25593/978-3-96147-329-8

Simulationsunterstützte funktionale Grenzlagenabsicherung

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

zur
Erlangung des Doktorgrades Dr.-Ing.

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Matthias Ehlert

aus Pritzwalk

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

Tag der mündlichen

Prüfung: 06.09.2019

Vorsitzender des

Promotionsorgans: Prof. Dr.-Ing. Reinhard Lerch

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartzack
Prof. Dr.-Ing. Rainer Stark, TU Berlin

Vorwort und Danksagung

Die vorliegende Promotionsschrift entstand während meiner Tätigkeit als Doktorand in Zusammenarbeit zwischen dem LEHRSTUHL FÜR KONSTRUKTIONSTECHNIK KTMFK der FRIEDRICH-ALEXANDER-UNIVERSITÄT ERLANGEN-NÜRNBERG und der Gruppe TOLERANZMANAGEMENT GESAMTFAHRZEUG des FORSCHUNGS- UND INNOVATIONSZENTRUMS der BMW GROUP in München.

An dieser Stelle möchte ich all meinen Wegbegleitern, die auf so vielfältige Art und Weise zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben, nur das Eine sagen:
Danke.

Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartack • Prof. Dr.-Ing. Rainer Stark • Prof. Dr.-Ing. habil. Kai Willner • Prof. Dr. Lutz Schröder • Dr.-Ing. Stephan Tremmel • Prof. Dr.-Ing. Michael Walter • Dr.-Ing. Benjamin Schleich • Philipp Ziegler • Björn Heling • Alexander Aschenbrenner • Dr.-Ing. Thilo Breitsprecher • Dr.-Ing. Stephan Husung • Dr.-Ing. Tobias Eifler • Gabriele Stingl • Evelyn Weyrich • KTMfk

Dr.-Ing. Andreas Stockinger • Markus Niederprüm • Dr.-Ing. Senol Kapici • Klaus Sammer • Michael Schneider • Dr.-Ing. Robert Kahlenberg • Michael Weiß • Dr.-Ing. Udo Hänle • Kathrin Schmidberger • Nicole Vogt • Katrin Lohmaier • Sabine Mulkens • Claudia Rackl • Dr. oec. publ. Till Werneck • Dr.-Ing. Christopher Schwenk • Dr.-Ing. Daniel Zielinski • Dr.-Ing. Nicolas Hofheinz

Helmut Putter • Timm Schyluk • Anett Saplata • Markus Herde • Johannes Hölzle • TI-521 • Sina Kalberg • Jan Wiedemann • Laurenz Fischer • Sophia Köhling • Martin Blumreiter • Stefan Krojer • Andrea Neumüller • Nicole Reitmeier

Christoph Epple • Maximilian Stampoulidis • Björn Heling • Mohamed Battel • Markus Müller • Sören Hoppe • Andreas Rohling • Robert Hofmann • Peter Exner • Merve Kadir

Michael Borisch • Martin Schlechtriemen • Richard Zepp • Martin Hinfurtner • Ingo Paul • Michael Krause • Paul Pfeufer • Blerim Bajrami

Sophie & Martin • Marius & Sabrina • Steppo & Dani • Katy & Michi • T & Uli • Joschi & Julia • Tom • Melissa & Andreas • Jesko • Susi • Timo • Iris

Helena & Ole & Eike & Arne • Susi & Bernd • Christian P. • Michnea • Mario • Benjamin • Sonja • Dirk • Nathalie & Peter • Bianca & Thilo • Sebastian & Martina • Anni & Daniel • Christian B. • Christian F. • Christian L. • Sara • Kathrin & Philipp • Dina • Annika • Maria • Schwester Brigitte • WG & Freunde • Christin • Serena

Für ihre fortwährende und ausdauernde Unterstützung gilt meinen Eltern, Großeltern und meiner Schwester Ulrike der größte Dank.

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnis	ix
1 Einleitung	1
1.1 Herausforderung: Robuste Konstruktion im Kontext der Funktionserfüllung	5
1.2 Aufgabenstellung: Erarbeitung einer Methodik zur virtuellen Absicherung funktionsrelevanter Grenzlagen durch einen simulationsunterstützten Ansatz - insbesondere für Systeme, die nichtlinearen Effekten unterliegen	8
2 Stand der Forschung und Technik	11
2.1 Toleranzmanagement/ <i>Dimensional Management</i>	13
2.1.1 Toleranzspezifikation und Bezugssysteme	14
2.1.2 Basismethoden der Toleranzrechnung	17
2.1.3 Toleranzanalyse und Toleranzsynthese	24
2.2 Wahrscheinlichkeitsrechnung und Statistik im Kontext des Toleranzmanagements	25
2.2.1 Dichte- und Wahrscheinlichkeitsfunktionen	26
2.2.2 Statistische Tests zur Beurteilung von vorliegenden Verteilungen bzw. Versuchsergebnissen	34
2.3 Virtuelle Bausteine zur Absicherung von Toleranzlagen	39
2.3.1 Kommerzielle Simulationsprogramme für die Toleranzanalyse	42
2.3.2 Statistische Versuchsplanung/ <i>Design of Experiments</i>	46
2.3.3 Finite-Elemente-Methode/ <i>Finite Element Method</i>	60
2.3.4 Kopplungsstrategien	76
2.3.5 Methoden einer robusten konstruktiven Auslegung/ des <i>Robust Design</i>	81
3 Ableitung des Handlungsbedarfs	91
3.1 Prämissen einer Grenzlagermittlung unter Anwendung des Starrkörperansatzes	91
3.2 Anforderungen an eine Grenzlagermittlung unter Ausschluss des Starrkörperansatzes	92
3.3 Ableitung des Handlungsbedarfs hinsichtlich der Erarbeitung einer Methodik zur virtuellen Absicherung funktionsrelevanter Grenzlagen – insbesondere für Systeme, die nichtlinearen Effekten unterliegen	93

4	Ansatz zur simulationsunterstützten funktionalen Grenzlagenabsicherung	95
4.1	Der Begriff Grenzlage	95
4.1.1	Definition	95
4.1.2	Unterscheidung funktionaler und optischer Grenzlagen	98
4.2	Grundidee des Ansatzes und Vorgehensmodell	100
4.3	Vorstellung des Demonstrators	103
4.4	Einflussfaktoren auf das funktionale Kriterium Dichtheit am Fahrzeugeinstieg	104
4.5	Virtuelle Absicherung funktionaler Grenzlagen	104
4.5.1	Grenzlagenermittlung auf Basis einer starren Toleranzsimulation	106
4.5.2	Ableitung einer statistischen Versuchsmethodik zur Validierung funktionaler Grenzlagen	112
4.5.3	Grenzlagenermittlung auf Basis einer elastischen Toleranzsimulation	119
4.5.4	Grenzlagenermittlung mittels eines gekoppelten Simulationsansatzes	137
4.5.5	Robustheitsuntersuchungen für die probabilistische funktionale Grenzlagenabsicherung	143
4.6	Ansatz zur simulationsunterstützten funktionalen Grenzlagenabsicherung	148
5	Experimentelle Validierung des Ansatzes am Demonstrator	151
5.1	Zielsetzungen an das Experiment und den zugehörigen Prüfstand	151
5.2	Anforderungen an das Experiment und den zugehörigen Prüfstand	152
5.2.1	Ableiten von Einflussgrößen auf Grundlage des ISHIKAWA-Diagramms	152
5.2.2	Klärung der technischen Anforderungen	156
5.3	Ableitung sowie Bewertung von Prüfstandskonzepten unter Anwendung des FORFLOW Prozessmodells	156
5.3.1	Das FORFLOW-Prozessmodell – eine Übersicht	158
5.3.2	Ermitteln von Funktionen und deren Struktur	159
5.3.3	Suche nach Lösungsprinzipien und deren Strukturen	162
5.3.4	Gesamtkonzept entwickeln	166
5.4	Umsetzung des Prüfstandkonzeptes	176

5.5	Wiederholgenauigkeits-/Reproduzierbarkeits-Studien im Rahmen der Inbetriebnahme	178
5.5.1	Randbedingungen	179
5.5.2	Studien zur Qualifizierung des Prüfstands hinsichtlich der Wiederholgenauigkeit	181
5.5.3	Erkenntnisse aus den Studien	185
5.6	Grenzlagenuntersuchungen am Prüfstandsaufbau	185
5.6.1	Prinzipielles Vorgehen beim Vergleich der virtuellen mit den experimentellen Grenzlagenuntersuchungen	185
5.6.2	Ermittlung des Gesamtversuchsplans	187
5.6.3	Virtuelle Absicherung des Gesamtversuchsplans hinsichtlich der Vermeidung von Kollisionen zwischen nichtelastischen Bauteilen	188
5.6.4	Experimentelle Randbedingungen bei der Versuchsdurchführung	191
6	Gegenüberstellung der virtuellen und experimentellen funktionalen Grenzlagenabsicherung auf Basis der Ergebnisse	195
6.1	Korrelationsuntersuchungen zwischen den Ergebnissen der starren Toleranzrechnung und denen des Experiments unter Verwendung einer Cubing-Tür sowie unter Ausschluss des Dichtsystems (3DCS vs. CToD)	197
6.2	Korrelationsuntersuchungen zwischen den Ergebnissen der starren Toleranzrechnung und denen des Experiments unter Verwendung einer Real-Tür sowie bei installiertem Mehrebenen-Dichtsystem (3DCS vs. RTmD)	199
6.3	Korrelationsuntersuchungen zwischen den Ergebnissen der elastischen Toleranzrechnung und denen des Experiments unter Verwendung einer Real-Tür sowie bei installiertem Mehrebenen-Dichtsystem (FEM vs. RTmD)	201
6.4	Interpretation der Ergebnisse der Korrelationsuntersuchungen	204

7	Integration der simulationsunterstützten funktionalen Grenzlagenabsicherung in den Produktentwicklungsprozess	207
7.1	Das Vorgehensmodell aus den VDI-RICHTLINIEN 2221, 2222 BLATT 1 und 2223 – eine Übersicht	208
7.2	Einordnung der Teilschritte des Ansatzes in das Vorgehensmodell aus den VDI-RICHTLINIEN	212
7.3	Monadischer Produkttest hinsichtlich der vorgeschlagenen Verortung des Ansatzes innerhalb des Produktentwicklungs- prozesses	217
7.3.1	Qualitativer Evaluationstest auf Expertenbasis (Pro- bandenstudie)	218
7.3.2	Referenzlösung und Ergebnis der Probandenstudie	219
8	Zusammenfassung und Ausblick	223
9	Summary and Outlook	229
	Anhang	235
	Anhang A: Ergänzungen zu Kapitel 1	235
	Anhang B: Ergänzungen zu Kapitel 2	236
	Anhang C: Ergänzungen zu Kapitel 3	237
	Anhang D: Ergänzungen zu Kapitel 4	237
	Anhang E: Ergänzungen zu Kapitel 5	244
	Anhang F: Ergänzungen zu Kapitel 6	270
	Anhang G: Ergänzungen zu Kapitel 7	270
	Anhang H: Ergänzungen zu Kapitel 8	276
	Literaturverzeichnis	277

Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnis

Lateinische Symbole

Symbol	Einheit	Beschreibung
A, B, C	1	Faktoren [DoE, D-Optimale Versuchspläne]
A_i, B_i, C_i	1	Faktorstufen [DoE, D-Optimale Versuchspläne]
C_{ijk}	1	Materialparameter der Formänderungsenergiedichte W bei hyperelastischen Materialmodellen
C_p	1	Prozessfähigkeitsindize für Prozessgenauigkeit engl.: <i>Process Precision</i>
C_{pk}	1	Prozessfähigkeitsindize für Prozessaußermittigkeit engl.: <i>Process Decentering</i>
E	N/m^2	Elastizitätsmodul (E -Modul)
F	N	Kraft
$F_{N,G}$	N	Normalkraft bei Gleitreibung
$F_{R,G}$	N	Reibungskraft bei Gleitreibung
G	m	Fehlergrenze
G	N/m^2	Schubmodul
H_0	1	Nullhypothese
H_A	1	Shore-A-Härte
H_a	1	Alternativhypothese / Gegenhypothese
I_i	1	Invarianten [Finite-Elemente-Methode / <i>Finite Element Method</i>]
IP -Code	1	Schutzart nach DIN EN 60529 „Schutzarten durch Gehäuse“; engl.: <i>International Protection</i> ; teils auch mit <i>Ingress Protection</i> (Schutz gegen Eindringen) übersetzt
$IP66$	1	Schutzart nach DIN EN 60529 „Schutz gegen starkes Strahlwasser“
L	m	Endlänge

Symbol	Einheit	Beschreibung
L_0	m	Anfangslänge
ΔL	m	Längenänderung / Verschiebung
LE	m	Längeneinheit
M	m	Messbereich
N	1	Grundgesamtheit / geplante Stückzahl des herzustellenden Produktes [Der Begriff Grenzlage, Definition]
N	1	Ordnungsgrad des Polynoms [Finite-Elemente-Methode / <i>Finite Element Method</i> , ODGEN-Modell]
P	1	Wahrscheinlichkeit
S_0	m	Anfangsquerschnitt
$T_{a,a}$	m	analytische arithmetische Schließtoleranz
$T_{a,s}$	m	analytische statistische Schließtoleranz
T_i	m	Einzeltoleranz(en)
T_w	m	erwartete (wahrscheinliche) Schließtoleranz
U	m	Messungenauigkeit
W	J/m^3	Formänderungsenergiedichte
X, Y	1	Zufallsvariable
X, Y, Z	1	Achsenhaupttrichtungen
X_K, Y_K, Z_K	1	Achsenhaupttrichtungen des Fahrzeugkoordinatensystems
Z	1	standardnormalverteilte Zufallsvariable
Z	1	Ziffernschritt看
a, b, c	1	Merkmalspunkte von Dreieck- und Rechteckverteilungen
c_o	1	obere Grenze von χ^2 [χ^2 -TEST]
c_u	1	untere Grenze von χ^2 [χ^2 -TEST]
d	1	Substitutionsvariable [t -TEST]
f	1	Anzahl der Freiheitsgrade: $f = n - 1$
i	1	Index bzw. Laufvariable
k	kg/s^2	Federsteifigkeit

Symbol	Einheit	Beschreibung
k	1	Multiplikationsfaktor [Der Begriff Grenzlage, Definition]
l_i	m	abweichungsbehaftete Beitragsleister einer Schließmaßberechnung (Formtoleranzen/-abweichungen) [industrielle Praxis: „Bauteiltoleranzen“]
$l_{M,i}$	m	abweichungsbehaftete Beitragsleister einer Schließmaßberechnung (Lagetoleranzen/-abweichungen) [industrielle Praxis: „Montagetoleranzen“]
n	1	Stichprobenumfang / Anzahl der Versuche / Anzahl der Beitragsleister
n	1	Mindest-Gesamtversuchsanzahl [DoE, D-Optimale Versuchspläne]
p	1	Anzahl Faktoren (Haupteffekte) [DoE, D-Optimale Versuchspläne]
p	1	Prüfgröße [Test auf Normalverteilung]
p_i	1	Wahrscheinlichkeiten [χ^2 -TEST]
p^*	1	einfache Wechselwirkungen [DoE, D-Optimale Versuchspläne]
s	1	Standardabweichung (Schätzwert)
t	1	Testgröße [t -TEST]
v	1	Schiefte (engl. <i>skewness</i>)
w	1	Wölbung (engl. <i>kurtosis</i>)
x, y, z	1	diskrete(r) Wert(e)
$\bar{x}, \bar{y}$	m	arithmetischer Mittelwert von X bzw. Y
1, 2	1	Indizes

Griechische Symbole

Symbol	Einheit	Beschreibung
α	1	α -Fehler, Fehler erster Art, Fehlerwahrscheinlichkeit
α, β, γ	°	Winkel um X-, Y- und Z-Achse
α_i	1	Materialkonstanten [Finite-Elemente-Methode / <i>Finite Element Method</i> , ODGEN-Modell]
β	1	β -Fehler, Fehler zweiter Art
β	1	Konfidenzniveau
χ^2	1	Testgröße [χ^2 -TEST]
ε	1	Abweichung bzw. Approximationsfehler [Methoden einer robusten konstruktiven Auslegung / des <i>Robust Design</i>]
ε	1	Dehnung [Finite-Elemente-Methode / <i>Finite Element Method</i>]
λ	1	Streckung
μ	m	Mittelwert (Erwartungswert)
μ_i	1	Materialkonstanten [Finite-Elemente-Methode / <i>Finite Element Method</i> , ODGEN-Modell]
μ_G	1	Gleitreibungskoeffizient
σ	1	radizierte Varianz
σ	N/m^2	Spannung
σ	1	Standardabweichung
σ^2	1	Varianz
$c(\alpha)$	1	Quantil [t -TEST]
$c(\beta)$	1	Quantil [t -TEST]
x_β	1	Quantil [Normalverteilung]

Vektoren, Matrizen und Tensoren

Abkürzung	Beschreibung
C	CAUCHY-GREEN-Tensor
F	Vektor der äußeren Einzelkräfte an den Knoten

Abkürzung	Beschreibung
K	symmetrische Gesamtsteifigkeitsmatrix
X	Design-Matrix [DoE, D-Optimale Versuchspläne]
u	Gesamtvektoren der Knotenverschiebungen

mathematische Zeichen und Operatoren

Abkürzung	Beschreibung
$F(\cdot)$	kumulative Verteilungsfunktion von $(\cdot)$
Spur $(\cdot)$	Summe der Hauptdiagonalelemente einer quadratischen Matrix $(\cdot)$
$\det(\cdot)$	Determinante von $(\cdot)$
$\exp$	e - Funktion, d.h. $\exp(x) = e^x$
$f(\cdot)$	Funktion von $(\cdot)$
$\lim(\cdot)$	Grenzwert bzw. Limes von $(\cdot)$
$\forall$	für alle
$\frac{d(\cdot)}{dt}$	Ableitung einer Variablen $(\cdot)$ nach der Zeit t
$\frac{d(\cdot)}{dx}$	Ableitung einer Variablen $(\cdot)$ nach dem Ort x
$\in$	Element
$\Sigma(\cdot)$	Summe von $(\cdot)$
$\pm\infty$	$\pm$ unendlich
$\int(\cdot)$	Integral von $(\cdot)$
$\sim$	proportional
$\wedge$	logisches <i>und</i>

Mengen und Zufallsvariablen

Abkürzung	Beschreibung
$\mathcal{N}$	normalverteilte Zufallsvariable
$\mathbb{R}$	reelle Zahlen
$\mathbb{Z}$	ganze Zahlen

Abkürzungen und Eigennamen

Abkürzung	Beschreibung
AP	Ausrichtpunkt
CAA	rechnerunterstützte (numerische) Aeroakustik engl.: <i>Computational AeroAcoustics</i>
CAD	rechnerunterstütztes Konstruieren engl.: <i>Computer-Aided Design</i>
CAPP	engl.: <i>Computer-Aided Process Planning</i>
CAT	engl.: <i>Computer-Aided Tolerancing</i>
CAX	engl.: <i>Computer-Aided x</i>
CEN	Europäisches Komitee für Normung engl.: <i>European Committee for Standardization</i> französisch: <i>Comité Européen de Normalisation</i>
CTmD	Cubing-Tür mit Dichtsystem
CToD	Cubing-Tür ohne Dichtsystem
DfSS	engl.: <i>Design for Six Sigma</i>
DIN	Deutsches Institut für Normung
DIN EN	Deutsche Übernahme einer Europäischen Norm (EN)
DIN EN ISO	Deutsche Übernahme einer unter Federführung von ISO oder CEN entstandenen Norm, welche von beiden Organisationen veröffentlicht wurde.
DO	D-Optimaler Versuchsplan
DoE	statistische Versuchsplanung, engl.: <i>Design of Experiments</i>
EG	Erfüllungsgrad
EN	Europäische Normung
FD	Fugendichtung
FEA	Finite-Elemente-Analyse bzw. FE-Analyse, engl.: <i>Finite Element Analysis</i>
FEM	Finite-Elemente-Methode bzw. Methode der finiten Elemente, engl.: <i>Finite Element Method</i>
FHG	Freiheitsgrad
GL	Grenzlage

Abkürzung	Beschreibung
GPS	Geometrische Produktspezifikation (Umsetzung der ISO-Normen in DIN)
GUI	Grafische Benutzeroberfläche engl.: <i>Graphical User Interface</i>
ISO	Internationale Organisation für Normung engl.: <i>International Organization for Standardization</i>
OEM	Erstausrüster / Hersteller von Komponenten oder Produkten, engl.: <i>Original Equipment Manufacturer</i>
KB	Karosseriebau
KIV	Kunststoffinnenverkleidung
KPC	Schließmaß engl.: <i>Key Product Characteristic</i>
KS	Kantenschutz
KS-Test	KOLMOGOROV-SMIRNOV-Test
MatLab®	engl.: <i>Matrix Laboratory</i>
MCS	engl.: <i>Monte Carlo Simulation / Sampling</i>
MIC	Methode der Einflusskoeffizienten engl.: <i>Method of Influence Coefficients</i>
NM	Nennmaß
OGL	Obere Grenzlage
OTG	Obere Toleranzgrenze
PEP	Produktentwicklungsprozess / Produktentstehungsprozess
PKW	Personenkraftwagen
ProStaV	Problemlösungszyklus Statistische Versuchsplanung
RSM	Antwortflächenmethode engl.: <i>Respond Surface Method</i>
RSS	<i>Root-Sum-Square</i> -Verfahren engl.: <i>Root Sum Square Method</i>
RTmD	Real-Tür mit Dichtsystem
RToD	Real-Tür ohne Dichtsystem
Siemens PLM	Siemens <i>Product Lifecycle Management</i>
SM	Schließmaß

Abkürzung	Beschreibung
SOVA	engl.: <i>Stream-Of-Variation-Analysis</i>
SR	Seitenrahmen, engl.: <i>Side Frame</i>
STA-DEF	Statistische Toleranzanalyse und Deformationsanalyse, engl.: <i>Statistical Tolerance Analysis and Deformation Analysis</i>
SVP	Statistischer Versuchsplan
TA	TAGUCHI Versuchsplan
TG	Toleranzgrenze
THD	Türhauptdichtung
TM	Toleranzmanagement engl.: <i>Dimensional Management</i>
TQM	engl.: <i>Total Quality Management</i>
TRIZ	sinngemäße Übersetzung aus dem russischen: „Theorie zur Lösung erfinderischer Probleme“
UGL	Untere Grenzlage
UTG	Untere Toleranzgrenze
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VisVSA	3D-Toleranzsimulationswerkzeug (Variation Systems Analysis GmbH)
VP	Versuchsplan
ZB	Zusammenbau
i.O.	in Ordnung
n.i.O.	nicht in Ordnung
3DCS	3D-Toleranzsimulationswerkzeug 3DCS Variation Analyst (Dimensional Control Systems (DCS))

Anmerkung

Verschiedene Modellkonstanten werden an den entsprechenden Stellen in der Arbeit eingeführt und benannt. Zur Vermeidung von Doppeldefinitionen innerhalb des Symbolverzeichnisses, werden diese hier nicht aufgeführt.

1 Einleitung

Ob im modernen Karosseriebau, bei der Erforschung neuer Fertigungsverfahren im Teilebau oder beim Verbinden von Baugruppen - dem Toleranzmanagement als moderne Ingenieursdisziplin wird in vielen Industriezweigen, so auch in der Automobilindustrie, eine immer größere Aufmerksamkeit entgegengebracht. Ein wesentlicher Fakt, der diese erhöhte Aufmerksamkeit zwingend notwendig macht, ergibt sich aus dem Bestreben, die Stückzahlproduktion des jeweiligen Produktes, im Folgenden die des Automobils, bei nicht benötigter Nacharbeit nachhaltig zu steigern. In Bild 1 sind die Verkaufszahlen der Jahre 2009 bis 2015 namhafter internationaler Automobilhersteller, bezogen auf produzierte Personenkraftwagen (PKW's), dargestellt^{1,2}.

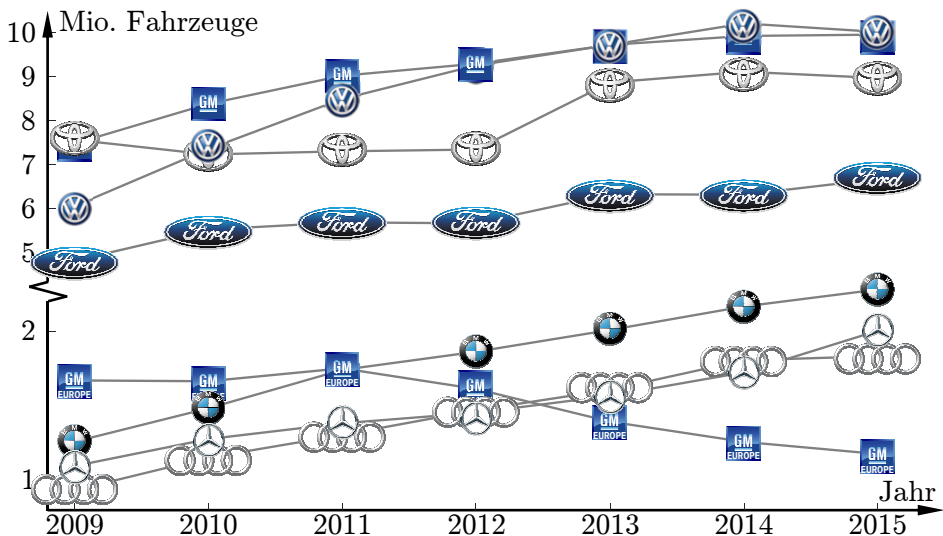


Bild 1: Verkaufte Fahrzeuge internationaler Automobilhersteller im Vergleich als ein Motivator für das Toleranzmanagement, vgl. [1] bis [43]

In der Gesamtheit lässt sich ein Trend erkennen, welcher durch ein nahezu kontinuierliches Wachstum bei allen OEMs (Erstausruster bzw. Hersteller von Komponenten oder Produkten, engl.: *Original Equipment Manufacturer*) gekennzeichnet ist.

¹ Quellen zu den Geschäftsberichten/*Annual Reports*: [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8], [9], [10], [11], [12], [13], [14], [15], [16], [17], [18], [19], [20], [21], [22], [23], [24], [25], [26], [27], [28], [29], [30], [31], [32], [33], [34], [35], [36], [37], [38], [39], [40], [41], [42], [43]; Die konkreten Verkaufszahlen sind mit Bezug auf diese Geschäftsberichte in Anhang A dargestellt.

² Der Automobilhersteller FIAT ist von der Betrachtung ausgeschlossen, da aus den Geschäftsberichten keine genauen Verkaufszahlen ersichtlich sind, vgl. [44], [45], [46], [47], [48] [49].

Die mit diesem Trend einhergehende Notwendigkeit einer statistisch abgesicherten Produkt- als auch Prozessqualität/ -fähigkeit rückt somit immer mehr in den Fokus der Hersteller von in Serie gefertigten Premiumprodukten, wobei diese jedoch auch anderen Ansprüchen gerecht werden müssen. So gilt es einerseits maßgeblich, die Wirtschaftlichkeit eines Unternehmens sowohl über den Zeitraum der Produktentwicklung bzw. -entstehung als auch über den gesamten Produktlebenszyklus hinweg zu gewährleisten. Andererseits ist es das Ziel, ein kundenorientiertes Produkt entstehen zu lassen. Für die Erreichung einer nachhaltig positiven Wechselwirkung mit dem Kunden können aus Unternehmenssicht vielfältige Maßnahmen am Produkt und in dessen Vermarktung ergriffen werden.

Die direkt vom Kunden wahrgenommenen und hoch priorisierten Aspekte eines Produkts beziehen sich auf dessen Optik und Funktionalität. Im Rahmen der vorgestellten Arbeit wird der Fokus auf funktionale Aspekte, im Besonderen auf das kundenwertige Kriterium Dichtheit, gelegt. Als Demonstrator dient hierbei der Einstiegsbereich eines Automobils. Jener setzt sich in seinen funktionsrelevanten Hauptbestandteilen aus dem Seitenrahmen, den Türen und dem Dichtsystem zusammen, siehe Bild 2.

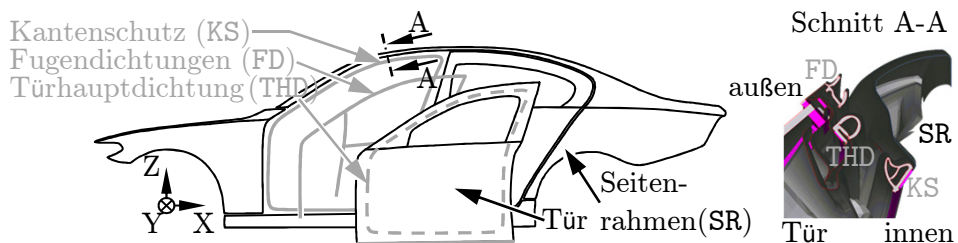


Bild 2: Demonstrator Fahrzeugeinstieg mit relevanten Beitragsleistern hinsichtlich der simulationsunterstützten Absicherung funktionaler Grenzlagen des Kriteriums Dichtheit

Generell lassen sich funktionale Ansprüche als diejenigen beschreiben, welche einen Einfluss auf kundenrelevante Funktionen besitzen. Bild 3 veranschaulicht die prominentesten Vertreter dieser Ansprüche.

Aus Kundensicht stellt das Kriterium Dichtheit einen entscheidenden funktionalen Aspekt dar, da es für jeden Kunden aktiv wahrnehmbar und beurteilbar ist. So ist es stets das Ziel einer Auslegung und Absicherung auf diesem Gebiet, die Dichtheit des Systems gegenüber Wasser, Staub oder anderen Medien zu gewährleisten. Dieses Kriterium wird im Rahmen der Arbeit herausgegriffen.

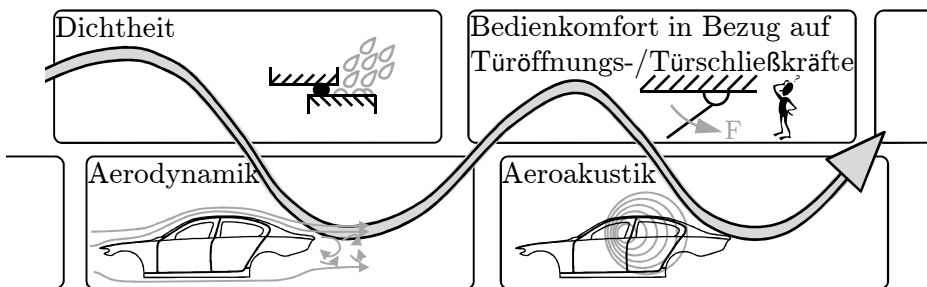


Bild 3: Auswahl funktionaler Kriterien am Demonstrator Fahrzeugeinstieg

Alle in Bild 3 dargestellten funktionalen Kriterien, sowie auch andere, werden sowohl durch die konzipierte Nenngeometrie als auch unter anderem durch das Zusammenspiel der in der Realität in Form und Lage abweichungsbehafteten Geometrien beeinflusst. Diese Abweichungen sind die Folge systematischer und/oder zufälliger Einflüsse und werden in der Produktentwicklung durch die Tolerierung funktionswichtiger Merkmale eingeschränkt, vgl. [50].

Unabhängig von der Tolerierung (Ermittlung des Einflusses von geometrischen Einzelteilabweichungen, Fügefolgen sowie Ausricht-/Montagekonzepten auf das Gesamtprodukt bzw. auf dezidierte Produktmerkmale) ist es im Rahmen der Auslegung möglich, eine virtuelle Absicherung des betrachteten Produktes hinsichtlich der Empfindlichkeit gegenüber streuenden Merkmaleigenschaften (Materialparameter wie bspw. Materialdicken, Elastizitätsmodule, Reibungsbeiwerte, Shore-Härten, etc.) durchzuführen. Absicherungen dieser Art werden als Robustheitsuntersuchungen bezeichnet. Anders formuliert implizieren jene „stets die Betrachtung von Abweichungen, da diese die sichere Erfüllung der Produktfunktion beeinträchtigen“, vgl. [50]. Für die Sicherstellung dieser Produktfunktionserfüllung werden daher ein stabiler bzw. eingeschwungener Produktionsprozess und somit ein Produkt verzielt, welches bei streuenden Eingangsgrößen ein möglichst gleichbleibendes (robustes) Ergebnis zur Folge hat.³

Für die Robustheitsbetrachtung eines technischen Systems ist es folglich notwendig, die geometrisch mitunter vielfältigen Ausprägungen eines Produktes hinsichtlich einer uneingeschränkten Funktionserfüllung zu bewerten. Die Grundlage einer solchen Bewertung ist damit sinnigerweise das Wissen sowohl über die Nenngeometrie als auch über die auftretenden Abweichun-

³ Eine Übersicht zu vorhandenen Definitionen des Robustheitsbegriffes im Kontext der Funktionserfüllung folgt in Abschnitt 1.1. Allgemein kann formuliert werden, dass unter „dem Begriff Robustheit (...) die Variabilität der Güte auf Unsicherheiten verstanden (wird)“, vgl. [51, S. 2].

gen. Diese werden über probabilistische Ansätze ermittelt. Das Ziel ist es dann einerseits, für die mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit auftretenden simulativ bzw. virtuell ermittelten extremalen Abweichungen, eine Aussage zur Funktionserfüllung zu erhalten. Diese werden im Folgenden als „Grenzlagen“ bezeichnet, siehe Abschnitt 4.1. Andererseits ist es das Ziel, eine Aussage darüber zu erarbeiten, ab welchem Grad der Geometrieabweichung die Funktionserfüllung nicht mehr gegeben ist oder nicht mehr garantiert werden kann.

Zur Erfüllung dieser und anderer Anforderungen wurden über die vergangenen Jahre und Jahrzehnte vielfältige rechnerunterstützte Simulationsmethoden entwickelt. Diese sind in der modernen Produkt- und Prozessentwicklung tagtäglich im Einsatz und nicht mehr wegzudenken. Durch den steigenden Verständnisgrad mathematisch-physikalischer Zusammenhänge, konsequent steigende und verfügbare Rechenleistungen und -kapazitäten, welche wiederum die Implementierung immer komplexerer Simulationsverfahren gestatten, werden die damit einhergehenden Vorhersagegüten der korrespondierenden Simulationen qualitativ immer hochwertiger. Es lässt sich jedoch erwartungsgemäß feststellen, dass rechnerunterstützte Methoden reproduzierbare Ergebnisse bei nicht veränderlichen Randbedingungen liefern. Dies ist allerdings nicht immer gewünscht. Soll das Ergebnis einer Fragestellung realistischerweise einen streuenden Charakter aufweisen, so gilt es, Unsicherheiten bzw. statistische Annahmen, welche die Folge von variierenden Eingangsparametern, systematischen und/oder zufälligen Einflüssen sein können, zu berücksichtigen. Als Beispiele für variierende bzw. nur schwer beherrschbare Randbedingungen in der Produktentstehung können die Temperatur während der Fertigung, welche beispielsweise einen signifikanten Einfluss auf die Materialparameter biegeschlaffer Bauteile (bspw. Dichtungen, Schläuche, etc.) hat, das Abnutzungsverhalten von Werkzeugen sowie die Montage von Systemkomponenten genannt werden.

Es lässt sich festhalten, dass es eine wesentliche Zielsetzung in der modernen Produktentwicklung ist, Produkte und Prozesse virtuell durch den Einsatz rechnerunterstützter Methoden abzubilden und zu optimieren, vgl. [52]. Dadurch rückt das Streben der (Automobil-)Industrie nach einer durchgängigen Prozesskette vom digitalen Produkt zur realen Fabrik immer mehr in den Rahmen des Möglichen, vgl. [50]. „In dieser Prozesskette werden CAx-Applikationen zur Produkt-, Fertigungs- und Ressourcenabsicherung eingesetzt (...). Hierbei kann auf eine große Anzahl an Absicherungsmethoden, wie z. B. statische und dynamische Performanzanalysen, Fügesimulationen, Toleranzsimulationen und etwa Ablaufsimulationen zurückgegriffen werden“, vgl. [50], [53]. Auf diesem Wege lassen sich nicht nur Wechselwirkungen zwischen den Anforderungen, der Realisierbarkeit und dem Aufwand dahinter,

sondern auch einhergehende Kosten genauer prognostizieren. Diese Senkung des Kostenniveaus aufwendiger Entwicklungen, welche im Prototypenstadium zumeist durch hohe finanzielle Belastungen bei Anfertigung und Test geprägt sind, ist einer der größten Treiber und Förderer auf dem Weg zur simulationsunterstützten Entwicklung und Absicherung, vgl. [54].

Die vorliegende Arbeit soll dazu beitragen, die simulationsunterstützte funktionale Grenzlagenabsicherung am Fahrzeugeinstieg, welcher hier als Demonstrator verwendet wird, durch die Erarbeitung und Validierung eines Prozessvorschlages für eben diese voranzutreiben. In Kapitel 1 werden im Rahmen der Einleitung zunächst die bestehenden Herausforderungen einer robusten Konstruktion mit Bezug zum genannten Demonstrator aufgezeigt. Aus diesen leitet sich die Aufgabenstellung zum Thema ab. Die fachlichen Grundlagen schließen sich in Kapitel 2 an. An dieser Stelle wird auf den aktuellen Stand der Forschung und Technik der relevanten Teilgebiete eingegangen. Aus den ersten beiden Kapiteln leitet sich der in Kapitel 3 dargestellte Handlungsbedarf bezüglich einer simulationsunterstützten funktionalen Grenzlagenabsicherung ab. Kapitel 4 befasst sich daraus resultierend mit der Erarbeitung eines Ansatzes zur simulationsunterstützten funktionalen Grenzlagenabsicherung. Dieser virtuelle Ansatz wird im Laufe des Kapitels exemplarisch für den betrachteten Demonstrator angewandt. Sowohl die Umsetzung der experimentellen Validierung des Simulationsansatzes als auch deren Ergebnisse für den gewählten Demonstrator werden in Kapitel 5 dargestellt. Mit Blick auf die virtuellen und experimentellen Untersuchungen erfolgt deren Gegenüberstellung in Kapitel 6. Als Folge der Erkenntnisse aus diesen Kapiteln sowie aus der Zielsetzung erfolgt die Ableitung eines Prozessvorschlages für die Integration der simulationsunterstützten funktionalen Grenzlagenabsicherung in den Produktentwicklungsprozess in Kapitel 7. Klassischerweise wird im letzten und sich an dieser Stelle anschließenden Kapitel 8 sowohl eine Zusammenfassung zur vorliegenden Arbeit gegeben, als auch auf zukünftige Potentiale der funktionalen Grenzlagenabsicherung eingegangen.

1.1 Herausforderung: Robuste Konstruktion im Kontext der Funktionserfüllung

Werden neben streuenden geometrischen Abweichungen auch schwankende Materialeigenschaften betrachtet, vergrößert sich folglich zumindest der virtuelle Absicherungsumfang eines Produktes. Die wissenschaftlich-technische Betrachtung der Auswirkungen zugehöriger Tolerierungs-, Ausricht-/Montage- und Fügekonzepte erweitert sich um den Bereich der sogenannten Robustheitsuntersuchungen.

Beim Blick in die Literatur lässt sich erkennen, dass der Begriff der Robustheit im Kontext der technischen Absicherung funktionaler Kriterien vielfältig definiert und/oder abgegrenzt ist. In den nachfolgenden Absätzen werden die unterschiedlichen Beschreibungen zunächst vorgestellt. Anschließend erfolgt die Darstellung des Grundgedankens bzgl. einer robusten funktionalen Produktgestaltung, welchen alle Beschreibungen gemein haben, sowie ein Exkurs in den Bereich der (Mehrkriterien-) Optimierung. Abschließend wird auf die in dieser Arbeit verwendete Beschreibung eingegangen.

Robustheitsbegriff gemäß TAGUCHI

In [55] wird die TAGUCHI-Methodik einer robusten Auslegung als ein Prozess dargestellt, „bei dem Entwurfsvariablen gesucht werden, für welche die Systemleistungsfähigkeit möglichst unempfindlich gegenüber denkbaren Streuungen ist. Damit steigen gleichzeitig Qualität und Zuverlässigkeit, wobei keine expliziten Aussagen zur Zuverlässigkeit im Sinne von Ausfallwahrscheinlichkeiten getroffen werden. Dies ist Ziel von klassischen, strukturellen Zuverlässigkeitsanalysen, bei denen Ausfallwahrscheinlichkeiten bezüglich fundamentaler Restriktionen oder Mindestanforderungen zu ermitteln sind (...)“ (vgl. [56], [57])“, vgl. [51]. Auf den Grad der Empfindlichkeit der von der Eingangsstreuung abhängigen Systemantwort wird an diesen Stellen nicht eingegangen.

Robustheitsbegriff gemäß *Design for Six Sigma*-Logik

Wie in [58] beschrieben, existiert auch eine Möglichkeit, die Robustheit einer Konstruktion über die Standardabweichung Sigma (σ) zu definieren. Bei diesem Vorgehen wird anhand des Sigma-Levels eine Unterscheidung zwischen der Robustheit (Zwei-Sigma-Level = $\pm 1\sigma$) und der Zuverlässigkeit (Sechs-Sigma-Level = $\pm 3\sigma$) getroffen. Ein nach dieser Definition zuverlässiger Entwurf erfüllt somit per se den Anspruch, auch ein robuster Entwurf zu sein. Als kategorischer Oberbegriff zu diesem Ansatz hat sich der Begriff *Design for Six Sigma* (DfSS) etabliert, vgl. [59].

Übergeordnete Beschreibung des Robustheitsbegriffes

In [60] und [50] wird auf die übergeordnete Beschreibung von [61] verwiesen, welche besagt: „Robustness means finding an acceptable balance between the scatter of the input (=system parameters) and the scatter of the performance.“

Beschreibung des Robustheitsbegriffes über den Zeitaspekt

Laut [62] kann eine Konstruktion dann als robust angesehen werden, wenn die Güte der Systemantwort über die Lebensdauer bei vorhandener Streuung der Eingangsgrößen nicht wesentlich abnimmt.

Grundgedanke bzgl. einer robusten funktionalen Produktgestaltung

Es kann allgemein festgehalten werden, dass sich hinter der Begrifflichkeit einer robusten Konstruktion (engl.: *Robust Design*) eine Vielzahl an direkten und indirekten Anforderungen verbergen können. Diese sollen sicherstellen, dass sich spezifizierte Produkt- und/oder Prozesseigenschaften weitestgehend unanfällig gegenüber Systemschwankungen verhalten. Grundlegend unterstützen mathematische (Ersatz-) Modelle hinter Beschreibungen bzw. Definitionen dieser Art folglich das Ziel, unsichere Systemgrößen in der Auslegung bzw. im Entwurfsprozess möglichst präzise abzuschätzen. Hierfür betrachten bzw. analysieren sie den Effekt von Parametervariationen innerhalb eines Entwurfsraums auf deren zugehörigen Abbildungen im Kriterienraum, wobei dieses Ergebnis wesentlich davon abhängt, wie gut die modellierten Unsicherheiten der Realität entsprechen und wie genau die streuenden Größen angegeben werden können, vgl. [63]. Jenes Ergebnis einer solchen Analyse kann dann einerseits eine Aussage bezüglich der Machbarkeit einer jeden gefundenen Lösung im Kriterienraum liefern sowie andererseits eine Gewichtung dieser gefundenen gültigen Lösungen ermöglichen. Durch genannte Gewichtung erfolgt an dieser Stelle dann der Sprung hin zur (Mehrkriterien-)Optimierung. Moderne Optimierungsverfahren verfolgen maßgeblich den Ansatz, „gezielt Systemparameter zu variieren und den Einfluss dieser Variation auf das System zu erkennen und zu bewerten. Ziel ist, die Parameter so zu verändern, dass im Ergebnis die Optimierungsziele bestmöglich erfüllt werden bzw. die Qualität des Systems maximal ist (...)“, vgl. [63]. In der Praxis erfolgt die Implementierung solcher Optimierungsprobleme über stochastische Suchverfahren, welche sich häufig sogenannter genetischer Algorithmen bedienen. Diese der biologischen Evolution nachempfundenen Algorithmen setzen sich aus den Vorgängen Rekombination, Mutation und Selektion zusammen (vgl. [64, S. 42 ff.]) und können zu einer robusten Produktgestaltung beitragen.

Im Rahmen der Arbeit erfolgt die Robustheitsbewertung auf Grundlage des *Six-Sigma*-Ansatzes. Jene Entscheidung begründet sich durch den Anspruch, eine funktional robuste Absicherung hinsichtlich des beschriebenen kundenrelevanten Kriteriums Dichtheit am Demonstrator Fahrzeugeinstieg vornehmen zu können. Da dieses Absicherungsbestreben in der Praxisanwendung stückzahlabhängig realisiert wird (funktionaler Absicherungsaufwand $f_{\text{funkt.Abs.}} = f_{\text{funkt.Abs.}}(\text{Stückzahl})$), eignet sich der Sigma-Level-Ansatz. Nähere Ausführungen hierzu finden sich in Abschnitt 4.1.

1.2 Aufgabenstellung: Erarbeitung einer Methodik zur virtuellen Absicherung funktionsrelevanter Grenzlagen durch einen simulationsunterstützten Ansatz - insbesondere für Systeme, die nichtlinearen Effekten unterliegen

Als Folge einer Toleranzrechnung sollen u. a. Aussagen bzw. Vorhersagen bzgl. der sogenannten funktionsrelevanten Grenzlagen (siehe Abschnitt 4.1) eines Systems resultieren. Die Herausforderung besteht hierbei darin, möglichst alle relevanten Beitragsleister in die Berechnung auf geeignete Art und Weise einfließen zu lassen, um die Güte dieser Vorhersage auf ein Maximum zu heben. Dies hat mehrere positive Effekte zur Folge:

- Frühzeitige virtuelle Beurteilung der Grenzlagen hinsichtlich sowohl funktionaler Kritikalität als auch optischem Erscheinungsbild,
- Kürzere und/oder weniger Iterationszyklen,
- Sicherstellung der angestrebten und/oder verzielten Produktqualität durch eine zweckmäßige virtuelle Absicherung,
- Daraus resultierende Kosteneinsparungen für den Werkzeug- und Prototypenbau, etc.
- usw.

Für das moderne Toleranzmanagement stellt sich nun die Frage, wie die relevanten Beitragsleister für funktional kritische Schließmaße (und somit auch optische) in einer Toleranzrechnung berücksichtigt werden können.

Es ist Zielsetzung dieser Arbeit, die Beantwortung jener Frage zu unterstützen. Hierfür soll ein Prozessvorschlag respektive eine Methodik zur virtuellen Absicherung funktionsrelevanter Grenzlagen erarbeitet werden, welche(r) sich durch die Einbeziehung elastischer und nichtlinearer Effekte auf das Systemverhalten von bestehenden Ansätzen abhebt, siehe Bild 4.

Zur Validierung des Prozessvorschlages respektive der Methodik ist es zudem das Ziel, diese(n) durch den Abgleich mit belastbaren Ergebnissen eines geeigneten Experimentes zu bestätigen.

Für den zu erarbeitenden simulationunterstützten Ansatz und das validierende Experiment ist ein geeigneter Demonstrator auszuwählen: Wie bereits in der Einleitung beschrieben und in Bild 2 gezeigt, soll der Einstiegsbereich eines Automobils im Rahmen dieser Arbeit als Demonstrator dienen.

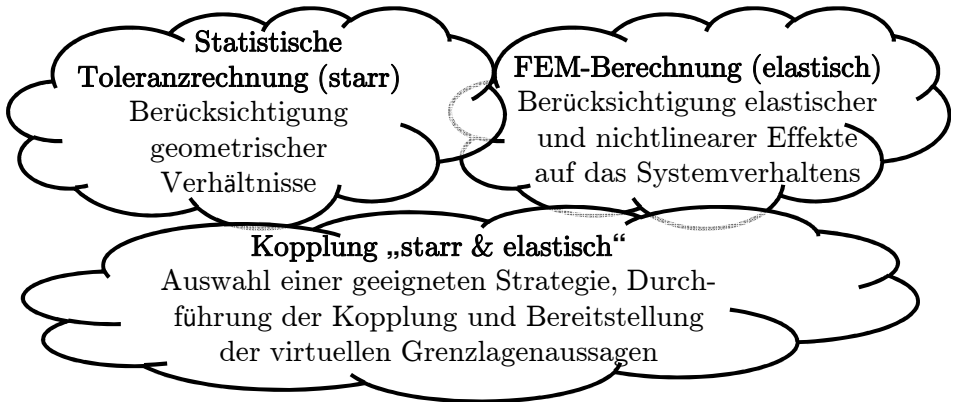


Bild 4: Berücksichtigung elastischer und nichtlinearer Effekte auf das Systemverhalten bei einer gekoppelten Toleranzrechnung

2 Stand der Forschung und Technik

In Abschnitt 1.2 wurde in Bild 4 die Aufgabenstellung hinsichtlich der Berücksichtigung elastischer und nichtlinearer Effekte auf das Systemverhalten bei einer gekoppelten Toleranzrechnung aufgezeigt. Für die Ausdetaillierung ist es unabdinglich, sich mit dem Stand der Forschung und Technik der verschiedenen zu berücksichtigenden Teilgebiete vertraut zu machen. Ziel dieses Kapitels ist es, die entsprechenden Grundlagen zu vermitteln, um somit die Basis für die sich in Kapitel 3 anschließende Ableitung des Handlungsbedarfes geschaffen zu haben.

Bild 5 gibt einen Überblick über die Inhalte dieses Kapitels.

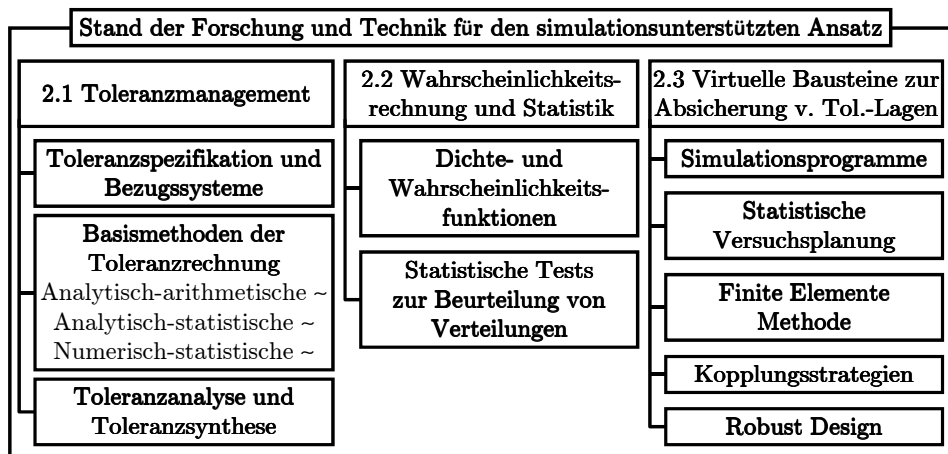


Bild 5: Übersicht zum Stand der Forschung und Technik für den simulationsunterstützten Ansatz zur Berücksichtigung elastischer und nichtlinearer Effekte auf das Systemverhalten bei einer gekoppelten Toleranzrechnung

In diesem Bild lässt sich eine grundlegende Unterteilung des zweiten Kapitels in drei Teile erkennen. In **Abschnitt 2.1** wird auf die verschiedenen Bereiche des Toleranzmanagements eingegangen, welche in ihrer Kombination eine wesentliche Grundlage für die Ermittlung der starren extremalen Toleranzlagen (Grenzlagen) bilden. Im Besonderen wird in diesem Abschnitt auf die Themen „Toleranzspezifikation und Bezugssysteme“, „Basismethoden der Toleranzrechnung“ sowie „Toleranzanalyse und Toleranzsynthese“ eingegangen. Weitere wesentliche Grundlagen für die Ermittlung der starren Grenzlagen werden in **Abschnitt 2.2** vermittelt. Dieser Abschnitt setzt sich thematisch mit Wahrscheinlichkeitsrechnung und Statistik auseinander. In

ihm soll das Grundverständnis sowohl für „Dichte- und Wahrscheinlichkeitsfunktionen“ als auch für „Statistische Tests zur Beurteilung von Verteilungen“ geschärft werden. Jene Tests sind beispielsweise dann von Nöten, wenn es zunächst darum geht, den erwarteten Typ einer Wahrscheinlichkeitsverteilung mit begründeten Annahmen auf Grundlage einer belastbaren Datenbasis zu plausibilisieren, um ihn anschließend mit den wissenschaftlich korrekt ermittelten Ausprägungen der entsprechenden Merkmale, wie zum Beispiel Mittelwert, Standardabweichung, Schiefe und Wölbung zu charakterisieren. Der letzte **Abschnitt 2.3** gibt einen Überblick über virtuelle Bausteine zur Absicherung von Toleranzlagen. Zunächst werden in diesem kommerzielle Simulationsprogramme für die Toleranzanalyse vorgestellt, welche ein statistisch belastbares Vorhersageergebnis für vorherrschende starre Toleranzsituationen der jeweilig betrachteten Baugruppe ermöglichen sollen. Diese liefern den *Input* für das im nachfolgenden Teilabschnitt vorgestellte Themengebiet der statistischen Versuchsplanung (DoE, engl.: *Design of Experiments*). Dieses Themengebiet versucht durch immer neue bzw. stetig verbesserte Ansätze, optimale Versuchskombinatoriken zu finden, die es bei minimalen Aufwand erlauben, „Zusammenhänge einer Funktion oder eines Prozesses bestmöglich durch eine spätere (statistische) Auswertung“ wiedergeben zu können, vgl. [65]. Gelingt es, diese konfliktären Ziele in Einklang zu bringen, können folglich sowohl virtuelle als auch experimentelle Aufwände durch die Methoden der statistischen Versuchsplanung auf ein Mindestmaß reduziert werden, welches dennoch statistisch belastbar ist. Der dritte Teilabschnitt behandelt als übergeordnetes Themengebiet die Methode der finiten Elemente (FEM). Hierin wird ein besonderes Augenmerk auf die Berücksichtigung elastischer und nichtlinearer Effekte auf das Systemverhalten gelegt. Jener Fokus wird gewählt, da sich der im Rahmen dieser Arbeit vorgestellte Ansatz, wie bereits in Abschnitt 1.2 erläutert, durch die Einbeziehung elastischer und nichtlinearer Effekte von bestehenden Ansätzen abheben soll. Die in diesem Teilabschnitt angestellten FEM-Simulationen fußen auf den statistischen Versuchsplänen zur Absicherung der vorab ermittelten starren Grenzlagen, mit dem Ziel, einer jeden starren Toleranzsituation ein entsprechendes FEM-Berechnungsergebnis gegenüberstellen zu können. Für die vorliegenden starren und elastischen Simulationsergebnisse wird nachfolgend ein Ansatz zu deren Kopplung gesucht. Das vierte Themengebiet in diesem Abschnitt befasst sich aus diesem Grund mit der Vorstellung sogenannter Kopplungsstrategien bzw. -ansätze. Bestehende Ansätze werden an dieser Stelle mit dem Ziel gegenübergestellt, eine Auswahl bzgl. eines Vorgehens zur Überlagerung der verschiedenen Simulationsergebnisse treffen zu können. Bei der Methode der finiten Elemente werden deterministische Algorithmen zur Lösung der definierten Problemstellungen verwendet. Für einen nicht veränderlichen *Input* ergibt sich somit stets derselbe reproduzier-

bare *Output*. Die vorliegende Problemstellung fordert jedoch eine Prognose bezüglich eines Systemverhaltens, welches statistischen Effekten unterliegt. Folglich werden Methoden benötigt, die statistische Effekte abbilden. In Verbindung mit FEM-Berechnungen gelingt dies über das Forschungsfeld des *Robust Design*, auf welches im fünften und letzten Teilabschnitt von Abschnitt 2.3 eingegangen wird.

Wie bereits in Abschnitt 1.2 beschrieben, sollen die Simulationsergebnisse durch statistisch belastbare Ergebnisse eines vergleichenden Experimentes bestätigt werden. Um sowohl diese statistische Belastbarkeit gewährleisten zu können, als auch den experimentellen Aufwand auf ein Mindestmaß zu reduzieren, werden im Rahmen der praktischen Phase (Kapitel 5) die Methoden aus Kapitel 2 angewandt. Im Wesentlichen bedeutet dies, dass zum einen in Abschnitt 5.5 die in Abschnitt 2.2 vorgestellten statistischen Tests Anwendung finden. Zum anderen werden die in Abschnitt 2.3 vorgestellten Methoden der statistischen Versuchsplanung in Abschnitt 5.6 genutzt.

2.1 Toleranzmanagement/Dimensional Management

Das moderne Toleranzmanagement (engl.: *Dimensional Management*) sucht unter diesem Begriff derzeit noch nach einer mehr oder weniger eindeutigen Definition. In Anlehnung an das Qualitätsmanagement erfolgt diese zumeist analog zu den DIN-Normen oder VDI-Richtlinien DIN EN ISO 9000, DIN ISO 8402, DIN 55350 T1 bzw. VDI 2247, vgl. [66, S. 22]. Allgemein kann festgestellt werden, dass das Toleranzmanagement als Teil des Entwicklungsprozesses das Ziel verfolgt, „die Funktionserfüllung eines Produktes mittels Managementmethoden bei möglichst geringen Herstellungskosten durch ein optimales Toleranzkonzept sicherzustellen“, vgl. [67]. Folglich ist auch der Sprung hin zu einer robusten Auslegung und Absicherung (engl.: *Robust Design*) nicht weit, verantwortet die Tolerierung im Rahmen des Produktentstehungsprozesses (PEP) einer Serienfertigung doch maßgeblich das Ziel, ein hinsichtlich seiner Funktion, als auch Optik, robustes Produkt sicherzustellen.

Eine weiterführende Abgrenzung und Einordnung findet sich in [68], worin auch der Begriff *Variation Risk Management* geprägt wird. „Demzufolge ist das *Variation Risk Management* ein kontinuierlicher Prozess der Identifikation (*identification*), Prüfung und Beurteilung (*assessment*), sowie (...) (zur) Verringerung (*mitigation*) des durch Abweichungen hervorgerufenen Risikos, dass Herstellungsprozesse die endgültige Produktqualität beeinflussen und damit viele Kosten verursachen“, vgl. [50, S. 11].

Jene aus dem Produktionsprozess resultierende Abweichungen realitätsnah vorherzusagen stellt, als wesentlicher Bestandteil des Toleranzmanagements, eine nicht zu unterschätzende Hürde dar, da Baugruppen gerade in den frühen Phasen des PEP durch signifikante Unsicherheiten bzgl. deren geometrischer Gestalten gekennzeichnet sind. Und gerade diese Unsicherheiten beeinflussen die darauffolgenden Prozessphasen, bishin zu denjenigen Prozessphasen nach der Fertigung des Produkts, immens.

Für diese Toleranzmanagement-basierte Arbeit werden in den folgenden Abschnitten relevante Begrifflichkeiten eingeführt. Diese grenzen u. a. die Bereiche Toleranzspezifikation, Toleranzallokation und Toleranzanalyse entsprechend einer am LEHRSTUHL FÜR KONSTRUKTIONSTECHNIK KTMFK der FRIEDRICH-ALEXANDER-UNIVERSITÄT ERLANGEN-NÜRNBERG entstandenen Einordnung voneinander ab, vgl. [69, Figure 2.16], siehe Bild 6.

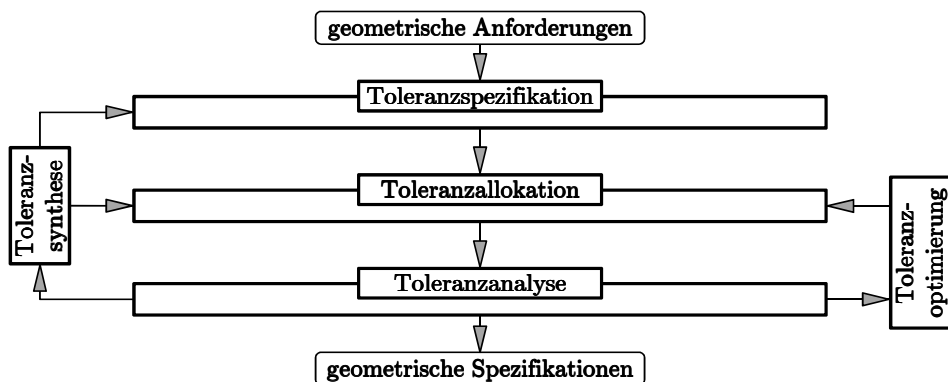


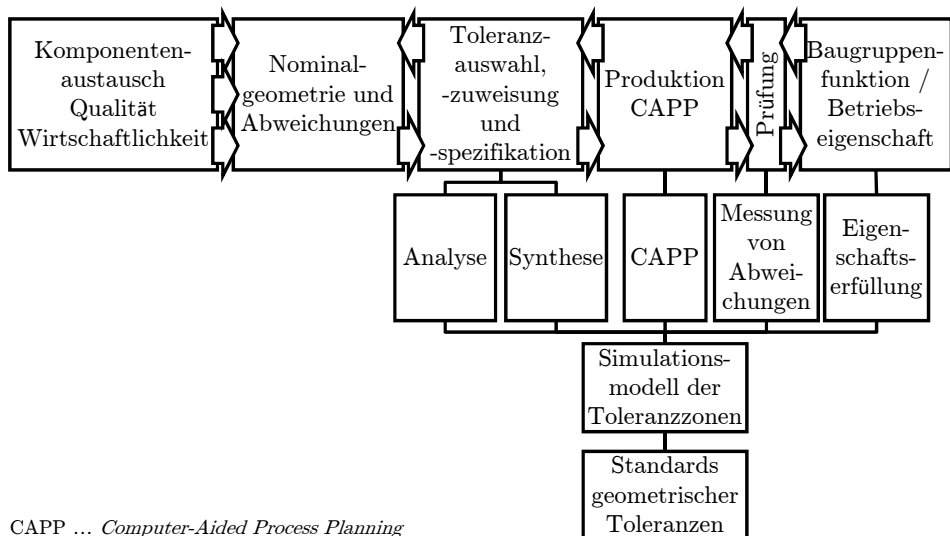
Bild 6: Tolerierung im Überblick, vgl. [69, Figure 2.16], eigene Darstellung

2.1.1 Toleranzspezifikation und Bezugssysteme

Mit der Toleranzspezifikation beginnt der Prozess der Tolerierung. Jene erlaubt die Beschreibung (über eine einheitliche und eindeutige Syntax) einer/eines von der Nominalgestalt abweichenden geometrischen Produktspezifikation/Produktes. Diese Beschreibung kann wie folgt unterschieden werden, vgl. [70] und [50]:

- Spezifikation der Toleranzart,
- Spezifikation des Toleranzwertes,
- Spezifikation der Verwendung von Prozessinformationen.

Für die Toleranzspezifikation existieren Normen und Standards, welche stets durch geeignete Forschungsarbeiten in ihrer Beschreibungsform verbessert werden sollen. Das DEUTSCHE INSTITUT FÜR NORMUNG (DIN) hat hierfür die sogenannten GPS-Normen veröffentlicht (Umsetzung der ISO- in DIN-Normen). Die internationale Norm DIN EN ISO 1101, vgl. [71] und [72] beinhaltet die wesentlichen Informationen rund um die Tolerierung von Form, Richtung, Ort und Lauf. Sie „(...) enthält die grundlegende Information für die geometrische Bestimmung der Werkstücke. Sie ist die Ausgangsbasis und beschreibt die Grundlagen für die Form- und Lagetolerierung“, vgl. [71], C.2. Ein Verständnis für den Einfluss von Toleranzspezifikationen auf das fertige Produkt erhält man, wenn man sich vor Augen führt, dass Toleranzspezifikationen über den gesamten PEP hinweg editiert, ausgetauscht und genutzt werden. Eine passende Veranschaulichung hierzu liefert [50] in Anlehnung an [73], siehe Bild 7.



CAPP ... *Computer-Aided Process Planning*

Bild 7: Toleranzinformationsnutzung und -transfer im Unternehmen, nach [73] und [50], eigene Darstellung

Toleranzarten

Für die Umsetzung einer eindeutigen Tolerierung wurde eine Nomenklatur für die verschiedenen Toleranzarten/Qualitätsmerkmale geschaffen. Einzig die Gruppierung jener weicht bei den verschiedenen Quellen (bspw. [71], [74], [75]) voneinander ab. Mit Bezug auf die GPS-Norm DIN EN ISO 1101 kann die Gruppierung der Toleranzen wie nachfolgend dargestellt vorgenommen werden.

Form

- ☐ Geradheit
- ☐ Ebenheit
- ☐ Rundheit
- ☐ Zylindrizität
- ☐ Profil einer beliebigen Linie
- ☐ Profil einer beliebigen Fläche

Richtung

- ☐ Parallelität
- ☐ Rechtwinkligkeit
- ☐ Neigung
- ☐ Profil einer beliebigen Linie
- ☐ Profil einer beliebigen Fläche

Ort

- ☐ Position
- ☐ Konzentrizität (Mittelpunkte)
- ☐ Koaxialität (Achsen)
- ☐ Symmetrie
- ☐ Profil einer beliebigen Linie
- ☐ Profil einer beliebigen Fläche

Lauf

- ☐ Rundlauf/Planlauf/kreisförmiger Lauf, radial, axial in beliebiger oder vorgegebener Richtung
- ☐ Gesamtlauf/Gesamtrundlauf/Gesamtplanlauf

Weiterführende Informationen zum Thema finden sich in der genannten Literatur.

Bezugssysteme/Ausrichtkonzepte

Beim kontrollierten Fügen mehrerer Bauteile zueinander wird die Positionierung dieser zueinander durch ein Ausrichtkonzept bzw. Bezugssystem beschrieben. In diesem ist dargestellt, welche Bezugsstellen zueinander ausgerichtet werden. Beziehungen dieser Art treten sowohl zwischen Bauteilen, als auch zwischen Bauteilen und Vorrichtungen auf, vgl. [67]. Die hierbei auftretende Abfolge, in welcher die Bauteile aneinander gefügt werden, wird als Fügefolge bezeichnet. Sie definiert resultierend, welche Bauteile die Baugruppe bzw. den Zusammenbau bilden.

Die Bestimmung und Verwendung von Bezugssystemen ist ein wichtiger Bestandteil der Toleranzspezifikation, da sie statisch bestimmte Verbindungen zwischen Bauteilen sicherstellen sollen; siehe auch *statically determinate assemblies, kinematic design* ([76], [77], [78]), *minimum constraint design* (*minCD* [79]), *exact constraint design* ([80], [81]), vgl. [82] und [50].

Als vermutlich prominentester Vertreter der Bezugssysteme kann die sogenannte 3-2-1-Ausrichtung genannt werden, welche die sechs Freiheitsgrade (FHG's) eines Körpers im Raum (3 translatorische & 3 rotatorische FHG's)

systematisch einschränkt, sodass eine statisch bestimmte Positionierung erreicht wird, siehe Bild 8. Hierin sind die Bezugsstellen gemäß DIN EN ISO 5459 mit A1, A2, A3, B1, B2 und C1 gekennzeichnet, vgl. [83]. Anschauliche Beschreibungen sowohl zu diesem als auch zu anderen Ausrichtsystemen sind in der Literatur vielfach genannt. Beispielhaft sei in der deutschsprachigen Literatur auf [67] und [50] verwiesen.

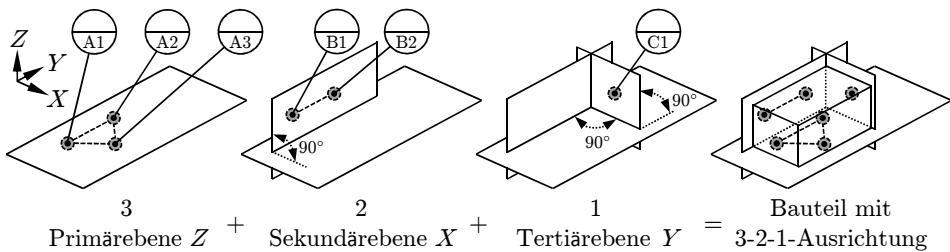


Bild 8: 3-2-1-Ausrichtsystem, vgl. [67], eigene Darstellung

Die Wahl einer geeigneten Ausrichtung kann verhältnismäßig schwierig sein, da sie einen signifikanten Einfluss auf verzielte Schließmaße haben kann. Diese Aussage wird durch einen zusätzlich dargestellten Fakt in einer aktuellen Arbeit von SCHLEICH & WARTZACK unterstrichen, vgl. [84]: Als Folge abweichungsbehafteter Geometrien „wandern“ auch die Ausrichtstellen, was Verkippungen, Verspannungen o. ä. nach sich ziehen kann und somit ggf. das betrachtete Schließmaß negativ beeinflusst.

2.1.2 Basismethoden der Toleranzrechnung

Im Rahmen der Toleranzrechnung werden konkrete Schließmaße als Folge vorliegender, abweichungsbehafteter Geometrien oder aber Einzeltoleranzen als Folge eines vorgegebenen Schließmaßes ermittelt. Die Toleranzrechnung verfolgt demnach das Ziel, Aussagen bzgl. der Sicherstellung einer definierten maximalen Zusammenbautoleranz einer Baugruppe zu ermöglichen. Diese Aussagen sind maßgeblich dann essentiell, wenn an sie sowohl Montierbarkeit als auch Funktionserfüllung der Baugruppe gekoppelt sind. Für die Lösung einer solchen Toleranzrechnung haben sich in der Historie drei maßgebliche Pfade ausgebildet: ein analytisch-arithmetischer, ein analytisch-statistischer und ein numerisch-statistischer. Gemeinsame Randbedingungen für diese Toleranzrechnungsansätze sind die folgenden:

- Ausricht-/Bezugssysteme sind bekannt,
- Fügefolgen sind bekannt,
- Einzelteile werden als ideal steif angesehen.

In Anlehnung an [67, Tabelle 3.7] können die wesentlichen Unterschiede zwischen den Ansätzen, wie in Tabelle 1 aufgezeigt, dargestellt werden.

Tabelle 1: Grundlegende Übersicht zu den Toleranzrechnungsansätzen

Toleranzrechnungsverfahren	Prämissen	Aufwand	Genauigkeit
Analytisch-arithmetische Toleranzrechnung	- keine Möglichkeit zur Nacharbeit - Merkmal (= Schließmaß) ist zu 100% zu gewährleisten - einfache geometrische Zusammenhänge	gering	eingeschränkt
Analytisch-statistische Toleranzrechnung	- alle Abweichungen sind normalverteilt - Annahme: $C_p \geq 1,0$ ²¹	gering	mittel
Numerisch-statistische Toleranzrechnung	keine	hoch	hoch

Analytisch-arithmetische Toleranzrechnung

Die analytisch-arithmetische Toleranzrechnung wird auch gerne als „worst case“-Rechnung bezeichnet, da sie den Fall beschreibt, bei dem alle extremalen Abweichungen mit gleichem Vorzeichen der Beitragsleister einer Maßkette in dieselbe Richtung auftreten. Es folgt die direkte arithmetische Addition aller Extrema/Grenzwerte, woraus sich das theoretisch größt- oder kleinstmögliche Schließmaß ergibt:

$$T_{a,a} = \sum_{i=1}^n T_i . \quad (1)$$

²¹ Das Prozessfähigkeitsindize C_p beschreibt die sogenannte Prozessgenauigkeit als Verhältnis der vorgegebenen Toleranz zur Prozessstreuung, vgl. [50].

Hierin beschreiben $T_{a,a}$ die analytisch-arithmetische Schließtoleranz und T_i die Einzeltoleranzen. Ein auf diesem Weg ermitteltes Schließmaß ist jedoch als sehr unwahrscheinlich anzusehen, da es in der Praxis zu mehr oder minder stark ausgeprägten Kompensationseffekten in Abhängigkeit der Ausprägung der Abweichungen der einzelnen Beitragsleister kommt

Analytisch-statistische Toleranzrechnung

Die analytisch-statistische Toleranzrechnung erlaubt eine Vorhersage der zu erwartenden Schließtoleranzen auf Grundlage statistischer Wahrscheinlichkeitsverteilungen. Fußend auf Verteilungsannahmen für Einzeltoleranzen ergibt sich eine korrespondierende statistisch verteilte Schließmaßtoleranz, die es mitunter erlauben kann, „die Einzeltoleranzen zugunsten der Herstellung aufzuweiten“, vgl. [50]. Es besteht jedoch im Umkehrschluss auch die Möglichkeit, dass im Rahmen einer (Groß-)Serienfertigung die jeweilig erlaubten Maxima/Minima der Schließtoleranzen T_w von einzelnen Elementen der errechneten Grundgesamtheit über- bzw. unterschritten werden. Die statistischen Eintrittswahrscheinlichkeiten für diese Unter- und/oder Überschreitungen müssen im Vorfeld bestimmt und bewertet werden. Gegebenenfalls sind Gegenmaßnahmen abzuleiten.

Die statistische Überlagerung von Einzeltoleranzen mit bekannten Verteilungsformen ist laut [85] sehr aufwendig. Näherungsverfahren unterstützen hier sowohl bei der Abschätzung des Ergebnisses als auch bei der Reduzierung des Rechenaufwandes, vgl. [86]. In diesem Zusammenhang werden die Begriffe „Faltung“ und „Root-Sum-Square-Verfahren“, in Verbindung mit Normalverteilungen, eingeführt.

Faltung

In der Stochastik bezeichnet die Faltung eine mathematische Operation, welche zwei unabhängige Wahrscheinlichkeitseinzelmäße $f(t)$ und $g(t)$ zu einem Wahrscheinlichkeitsmaß $y(t)$ überlagert. Die entsprechende Notation lautet:

$$\begin{aligned} y(t) &= f(t) * g(t) = g(t) * f(t) \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} f(\tau)g(t-\tau)d\tau = \int_{-\infty}^{+\infty} g(\tau)f(t-\tau)d\tau . \end{aligned} \quad (2)$$

Die Faltung von stochastisch unabhängigen Einzelmaßen, welche selbst nicht zwingend normalverteilt sind, führt in Anlehnung an den zentralen Grenzwertsatz der Wahrscheinlichkeitsrechnung, vgl. [87], dazu, dass sich eine annähernd normalverteilte Schließmaßverteilung ergibt. „Generell nähert sich die Schließmaßverteilung umso mehr einer Normalverteilung,

je größer die Anzahl der Einzelmaße ist, auch wenn die Einzelmaße nicht normalverteilt sind“, vgl. [88]. An dieser Stelle gilt es jedoch zu beachten, dass durch den im zentralen Grenzwertsatz beschriebenen Effekt eine potentielle Mittelwertverschiebung der resultierenden Schließmaßverteilung nicht erkannt werden kann. Zudem werden keine Aussagen zu den Streuungsparametern (Varianz, Schiefe, Wölbung) geliefert, vgl. [50]. Weiterführende Fachliteratur zum Thema Faltung ist vielfältig verfügbar und wird an dieser Stelle nicht weiter thematisiert.

Root-Sum-Square-Verfahren

Im Rahmen der analytisch-statistischen Toleranzrechnung wird häufig das *Root-Sum-Square-Verfahren* (RSS) genutzt:

$$T_{a,s} = \sqrt{\sum_{i=1}^n T_i^2} . \quad (3)$$

Hierin beschreibt $T_{a,s}$ die analytisch-statistische Schließtoleranz. Das Ergebnis für die erwartete Schließtoleranz $T_{a,s}$ fällt im Vergleich zum analytisch-arithmetischen Ergebnis $T_{a,a}$ (Gleichung (1)) bei gleichen Einzeltoleranzen geringer aus (siehe Darstellung in Bild 26 links), was zu weniger engen Anforderungen an diese Einzeltoleranzen führt.

Ein Beispiel.

Für $n = 5$ Einzeltoleranzen T_i seien die folgenden Werte gegeben: $T_1 = \pm 1,5\text{mm}$, $T_2 = \pm 0,9\text{mm}$, $T_3 = \pm 1,1\text{mm}$, $T_4 = \pm 0,9\text{mm}$ und $T_5 = \pm 1,3\text{mm}$. Entsprechend den Gleichungen (1) und (3) ergeben sich die folgenden Schließtoleranzen $T_{a,a}$ und $T_{a,s}$:

$$T_{a,a} = \sum_{i=1}^5 T_i = \pm 5,7 > T_{a,s} = \sqrt{\sum_{i=1}^5 T_i^2} = \pm 2,6 . \quad (4)$$

Für die statistische Toleranzrechnung mit diesem Ansatz gibt es dennoch Randbedingungen, die es hinsichtlich einer bestmöglichen Prognose für die erwartete Schließtoleranz zu beachten gilt:

- die Ist-Abweichungen der Einzeltoleranzen sind voneinander unabhängig,
- die Einzeltoleranzen sind normalverteilt,
- nicht mehr als 50% Unterschied zwischen den Werten der Einzeltoleranzen.

Numerisch-statistische Toleranzrechnung

Zur Ermittlung des/der Schließmaße(s) kann neben dem analytisch-arithmetischen oder analytisch-statistischen auch ein numerisch-statistischer, zufallsbasierter Ansatz verwendet werden. Toleranzsimulationen, die diesem Ansatz folgen, werden unter dem Begriff *Computer-Aided Tolerancing* (CAT) zusammengefasst.

In den vergangenen Jahren und Jahrzehnten wurden unterschiedliche CAT-Ansätze entwickelt. Auf diese wird im Folgenden eingegangen.

Integration einer Tolerierung in den simulationsunterstützten Produktionsprozess

Im Sinne einer CAT-Grundlagenarbeit benennt STARK in [89] und [90] Ansätze und Lösungen bzgl. der Integration einer Tolerierung in den simulationsunterstützten Produktionsprozess. Hierfür wird das Modell der Geometrischen Flächentolerierung (MGFT) vorgestellt, welches eine Beschreibung von Toleranzzonen durch analytisch geschlossene beschreibbare Flächen erlaubt.

Diese direkte vektorielle „Beschreibung der toleranzbehafteten charakteristischen Flächengrößen“ bietet Vorteile hinsichtlich ...

- ... einem verminderten Toleranz-Repräsentationsaufwand,
- ... einem verminderten Berechnungsaufwand,
- ... einer vergleichsweise anschaulicheren Vergabe von Richtungstoleranzen,
- ... einer vom CAD-Modell „losgelösten“ Berechnung

und unterstützt somit die numerisch-statistische Toleranzrechnung.

Abstrakte Toleranzanalyse mit Geometrieersatzelementen

Wie in [91] beschrieben, wird die entstehende Geometrie bei modernen, kommerziell gebräuchlichen *Software*-Lösungen „nicht als vollständiges Volumenmodell erzeugt, sondern es werden Auswirkungen auf abstrakte Ersatzelemente (z. B. Messpunkte) berechnet. Die Auswirkungen von Formänderungen der Bauteiloberflächen werden nicht betrachtet, beispielsweise bleiben Linien dadurch gerade, ebene Flächen bleiben perfekt eben.“ Der prinzipielle Ablauf einer solchen Toleranzsimulation wird im nachfolgenden Absatz erläutert.

Auf Basis eines konkreten CAD-Modells ist es möglich, einem jedem Bau- bzw. Einzelteil der betrachteten Baugruppe an definierten Punkten richtungsabhängige Toleranzen (Formtoleranzen) relativ zum jeweilig gültigen (Unter-)Bezugssystem zuzuweisen. In Kombination mit entsprechenden Fügefolgen sowie zugehörigen Montagetoleranzen ist eine umfassende Modellbildung, welche per se auch geometrische Effekte, wie zum Beispiel Hebelarme, berücksichtigt, möglich. Nach abgeschlossener Modellbildung werden einer jeden Form- und Lagetoleranz über einen entsprechenden virtuellen Generator Pseudozufallszahlen (siehe Abschnitt 2.3.5) im Rahmen des jeweilig definierten Toleranzfeldes zugewiesen. Anschließend wird die abweichungsbehaftete Baugruppe entsprechend der definierten Fügefolge zusammengesetzt und die gewünschten Schließmaße werden virtuell gemessen. Jener Vorgang wird derartig oft wiederholt (beispielsweise entsprechend der geplanten Stückzahl des Produktes), dass ein statistisch belastbares Ergebnis für ein jedes Schließmaß vorliegt, welches wiederum über die entsprechenden Ausprägungen der statistischen Merkmale, wie zum Beispiel Mittelwert, Standardabweichung, Schiefe und Wölbung charakterisiert werden kann. Als zugrundeliegende Methode für die Ermittlung der Pseudozufallszahlen (repräsentative Stichprobe) haben sich verschiedene Sampling-Ansätze etabliert. Als Repräsentanten dieser Sampling-Ansätze sei an dieser Stelle namentlich auf das sogenannte **MONTE CARLO-SAMPLING** (MCS) und das **LATIN HYPERCUBE-SAMPLING** (LHS) verwiesen, siehe Abschnitt 2.3.5. Neben der Berücksichtigung geometrischer Effekte und der Möglichkeit einer belastbaren Charakterisierung der Schließmaßverteilung zeichnen sich derartige numerisch-statistische Toleranzsimulationen auch dadurch aus, dass eine Aussage bzgl. des Einflusses einer jeden Toleranz auf das jeweilige Schließmaß möglich ist (Beitragsleisteranalyse).

Eine Gegenüberstellung der Vor- und Nachteile einer numerisch-statistischen Toleranzrechnung wird, wie in Tabelle 1 grundlegend gezeigt, in Tabelle 2 gegeben. Kommerziell gebräuchliche Simulationsprogramme zur Durchführung einer derartigen Toleranzrechnung werden in Abschnitt 2.3.1 vorgestellt.

Weiterentwicklung der geometrieorientierten Bauteilanalyse

Durch WITTMANN wird die Analyse von konkreten Bauteilvarianten als alternative Vorgehensweise in [91] vorgeschlagen. Bei diesem Verfahren zur Simulation und Analyse der Auswirkungen toleranzbedingter Bauteilabweichungen stehen zwei Schritte im Vordergrund: „der Aufbau von Baugruppen aus nichtidealen Einzelteilen durch relative Positionierung und Pfadplanung sowie die darauf folgenden Analyse- und Visualisierungstechniken“.

Tabelle 2: Vor- und Nachteile einer numerisch-statistischen Toleranzrechnung

Vorteile	Nachteile
⊕ Genauigkeit: hoch	⊖ Aufwand für Erstellung des Simulationsmodells: hoch
⊕ beliebige Verteilungsform je Einzeltoleranz	⊖ Rechner täuscht Genauigkeit vor, die aufgrund der Modellbildung nicht vorhanden ist, vgl. [67]
⊕ beliebige komplexe Geometrien	
⊕ Berücksichtigung von Hebelverhältnissen	
⊕ beliebige Schließmaße können berechnet werden	
⊕ Beitragsleisteranalysen (prozentualer Einfluss) können durchgeführt werden	
⊕ Beitragsleisteranalysen können als Vorarbeit für Optimierungsstrategien genutzt werden	

Zunächst werden hierbei virtuelle nichtideale Einzelteile innerhalb der zulässigen Toleranzgrenzen erzeugt. Zur Modellierung der abweichungsbehafteten Oberflächen der zufälligen Bauteilvarianten werden Dreiecksnetze vorgeschlagen, welche wiederum eine Neupositionierung der einzelnen Bauteile zueinander bedingen, „um die Einzelteile zu nichtidealen Baugruppen zusammenzusetzen“. Die Kombination aus Positionierungsaussagen zu den einzelnen Bauteilen und einer Pfadplanung ermöglichen bei dieser Vorgehensweise, „eine große Anzahl von Bauteilvarianten in kurzer Zeit auf ihre Montierbarkeit hin zu untersuchen.“ Als nachteilig wird bei diesem Ansatz „der extrem hohe Rechenaufwand im Vergleich zur abstrakten Toleranzanalyse mit Geometrieersatzelementen“ beschrieben. [91].

Skin Model Shapes – Die Repräsentation von Formabweichungen bei der Toleranzanalyse durch abweichungsbehaftete Oberflächennetze

In [69] und [92] werden Algorithmen zur Erzeugung abweichungsbehafter Punktwolken und Oberflächennetze, für deren Skalierung sowie deren Montagesimulation vorgestellt. Bei dieser Repräsentationsform wesentlich ist die Repräsentation von Formabweichungen durch sogenannte *Skin Model Shapes* in diesen abweichungsbehafteten Geometrienetzen, welche anschließend wieder in die Toleranzsimulationen eingebunden werden können, vgl. [93] und [94]. „Es wird gezeigt, dass durch die Berücksichtigung von Formabweichungen bei der Toleranzanalyse die Einflüsse von Bauteilabweichungen auf die Funktion und Qualität mechanischer Baugruppen

und bewegter Systeme deutlich realitätsnäher bestimmt und dadurch Toleranzentscheidungen optimiert werden können“, vgl. [69]. Zudem können HOCHMUTH und SCHLEICH in [95] und [96] belegen, „dass Fertigungsabweichungen das strukturmechanische Verhalten eines Bauteils (in Form der resultierenden elastischen Deformation unter Last) und damit die Ergebnisse einer Toleranzsimulation merklich beeinflussen“, vgl. [94]. Diese vergleichsweise rechenintensiven Ansätze sind derzeit noch Gegenstand der wissenschaftlichen Forschung.

2.1.3 Toleranzanalyse und Toleranzsynthese

Im Rahmen der Toleranzrechnung werden zwei konkrete Berechnungsansätze für Maßketten unterschieden, welche mit den vorangehend genannten Basismethoden ermittelt werden können: die Toleranzanalyse und die Toleranzsynthese.

Toleranzanalyse

Die Toleranzanalyse zielt grundsätzlich darauf ab, ein jeweilig konkretes Schließmaß durch die Überlagerung von bekannten Einzeltoleranzen entlang einer definierten Maßkette zu ermitteln, vgl. [88]. Nach [97] unterstützt sie zudem bei der Erreichung der folgenden Ziele, vgl. [50]:

- Aufstellen von Funktionsmaßkonzepten,
- Arithmetische/statistische Berechnung von Qualitätskriterien (Schließmaße),
- Ermittlung von toleranzkritischen Qualitätskriterien (z. B. Spiel),
- Systematische Prozessabsicherung,
- Ergebnisvisualisierung.

Toleranzsynthese

Die Toleranzsynthese ist im Rahmen der konstruktiven Auslegung einer Baugruppe zu finden, vgl. [90]. Nach [98] ist sie gar als einer der wichtigsten Aspekte der Produktentwicklung anzusehen. Sie zielt grundsätzlich darauf ab, Einzeltoleranzen entlang einer Maßkette auf Basis eines gegebenen Schließmaßes zu ermitteln bzw. diese zur Erfüllung eines funktionsbestimmenden Schließmaßes technisch und wirtschaftlich sinnvoll festzulegen/einzuschränken. Der Zielkonflikt zwischen Kostenminimierung bei gleichzeitiger Toleranzminimierung kann hierbei als größtes Hindernis bei der technischen Umsetzung der Vorgaben genannt werden. Es handelt sich also um ein Optimierungsproblem, welches u. a. durch eine robuste konstruktive Auslegung positiv in Richtung eines gültigen Kompromisses beeinflusst werden kann.

Hierbei werden die „Toleranzwerte der Einzelteile (...) als Kontrollvariablen und die Maschinenkosten als zu minimierende Zielfunktion betrachtet. Als Optimierungsrandbedingung wird das zu erreichende Schließmaß herangezogen“, vgl. [50] und [98].

2.2 Wahrscheinlichkeitsrechnung und Statistik im Kontext des Toleranzmanagements

Schwankungen beim Prozess der Fertigung eines jeden Bauteils lassen sich nicht vermeiden, je nach Willen, Geschick, Verständnis für den Fertigungsprozess und finanzieller Bereitschaft jedoch minimieren. Diese Minimierung stellt im Sinne einer robusten Tolerierung immer ein Ziel des Auslegungs- bzw. Designprozesses dar. Entscheidend hierbei ist die Wahl geeigneter Qualitätsmerkmale, welche vor bzw. zu Beginn der Entwicklung zu definieren sind und durch das Qualitätsmanagement auf Einhaltung geprüft bzw. nachgehalten werden müssen. Man spricht hierbei vom Vergleich der Soll-Toleranzvorgaben aus der Produktentwicklung mit den Ist-Abweichungen aus dem Fertigungsprozess. Das Ergebnis eines solchen Vergleiches wird über Prozessfähigkeitsindizes beschrieben, welche auf Toleranzvorgaben und Kenngrößen statistischer Verteilungen fußen. Um etwaige Toleranzvorgaben im Rahmen der Produktentwicklung realitätsnah festlegen zu können, muss es das Ziel sein, aus dem Fertigungsprozess resultierende Abweichungen (in ihrer Gesamtheit im Folgenden auch als Streuungen bezeichnet) möglichst gut vorherzusagen. Vor diesem Hintergrund bedient man sich, je nach Anwendungsfall, verschiedenster probabilistischer Verteilungsformen zur Approximation der real vorliegenden Streuungen. Ein Beispiel hierzu ist in Bild 9 gegeben.

In diesem Bild sind beispielhafte, aus dem Fertigungsprozess resultierende Abweichungen in Abhängigkeit der gewählten Klasseneinteilung (in jedem Sub-Bild: äquidistante Klassenbreite; links: 10 Klassen; mitte: 20 Klassen; rechts: 30 Klassen) über drei Häufigkeitsverteilungen dargestellt. Einer jeden Häufigkeitsverteilung ist an dieser Stelle auch eine mögliche und mathematisch eindeutig beschreibbare Approximationsfunktion zur Abbildung dieser Streuungen gegenübergestellt. Allen drei Sub-Bildern liegt dieselbe Datenbasis zugrunde. Es lässt bereits an diesem Beispiel zeigen, dass statistische Häufigkeitsverteilungen sowie deren korrespondierende Approximationsfunktionen eine wesentliche Abhängigkeit von der gewählten Klasseneinteilung besitzen. Bei der Interpretation von Häufigkeitsverteilungen gilt es, diesen Effekt zu bedenken. Die häufigsten „beschreibende(n) statistischen) Verteilungen für Maß- und Geometriemerkmale“, vgl. [99], werden in Abschnitt 2.2.1 vorgestellt.

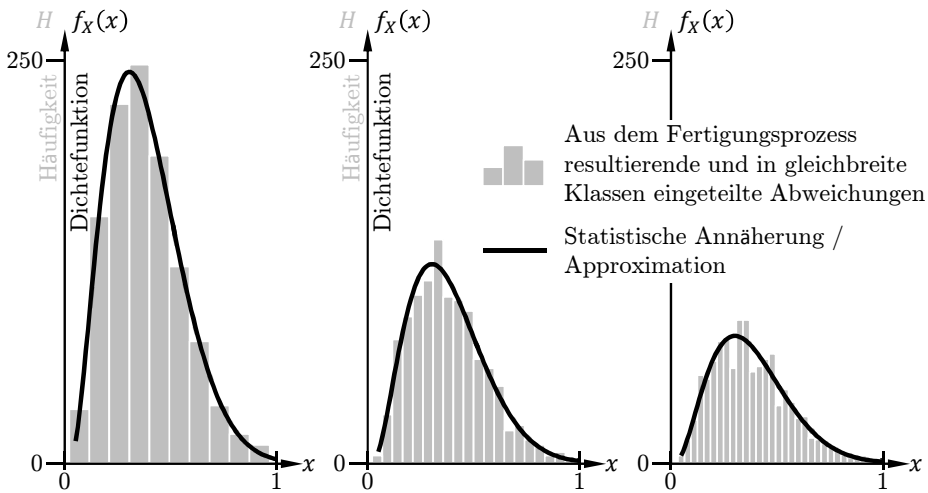


Bild 9: Beispielhafte Häufigkeitsverteilungen fertigungsprozessbedingter Abweichungen mit jeweils gleicher Datenbasis in Abhängigkeit der gewählten Klasseneinteilung (in jedem Sub-Bild: äquidistante Klassenbreite; links: 10 Klassen; mitte: 20 Klassen; rechts: 30 Klassen) sowie korrespondierende Approximationsfunktionen

2.2.1 Dichte- und Wahrscheinlichkeitsfunktionen

In Anlehnung an [71], [72], [99], [100] und [66] treten beim Fertigungsprozess vornehmlich Abweichungen auf, welche durch die in Tabelle 3 beschriebenen statistischen Verteilungstypen charakterisiert werden können.

In der realen Produktion werden Messungen zur Bestimmung dieser Abweichungen zumeist im Rahmen von Fertigungsüberwachungen bzw. Qualitätskontrollen durchgeführt. „Die empirischen Häufigkeitsverteilungen und ihre Approximation durch statistische (...) (Verteilungstypen) seien hier als Bindeglied zwischen Fertigung und Tolerierung aufgeführt“, vgl. [50]. Grafiken zur Veranschaulichung eben jener Verteilungen finden sich in Bild 10, die zugehörigen Erläuterungen in den nachfolgenden Abschnitten.

Tabelle 3: Beschreibende statistische Verteilungstypen für Maß- und Geometriemerkmale, vgl. [71], [72], [99], [100], [50], [66], eigene Darstellung

Merkmale nach DIN EN ISO 1101	
Tolerierte Eigenschaft	erwarteter Verteilungstyp
Längenmaße/Zweipunktmaße	NV (DV, RV)
Formtoleranzen	
Tolerierte Eigenschaft	erwarteter Verteilungstyp
 Geradheit	LNV/BNV ₁
 Ebenheit	LNV/BNV ₁
 Rundheit	LNV/BNV ₁
 Zylindrizität	LNV/BNV ₁
 Linienform	LNV/BNV ₁
 Flächenform	LNV/BNV ₁
Lagetoleranzen	
Tolerierte Eigenschaft	erwarteter Verteilungstyp
 Parallelität	LNV/BNV ₁
 Rechtwinkligkeit	LNV/BNV ₁
 Neigung	LNV/BNV ₁
 Position	NV/BNV ₂
 Koaxialität/Konzentrizität	NV
 Symmetrie	NV
 Lauf	LNV/BNV ₁ /BNV ₂
 Gesamtlauf	LNV/BNV ₁
Rauhheit	BNV ₁
Unwucht	BNV ₂
Kraft, Drehmoment, Reibmoment	NV

Legende: NV – Normalverteilung | LNV – Logarithmische

Normalverteilung |

BNV₁ – Betragsnormalverteilung 1. Art |BNV₂ – Betragsnormalverteilung 2. Art |

RV – Rechteckverteilung | DV – Dreiecksverteilung

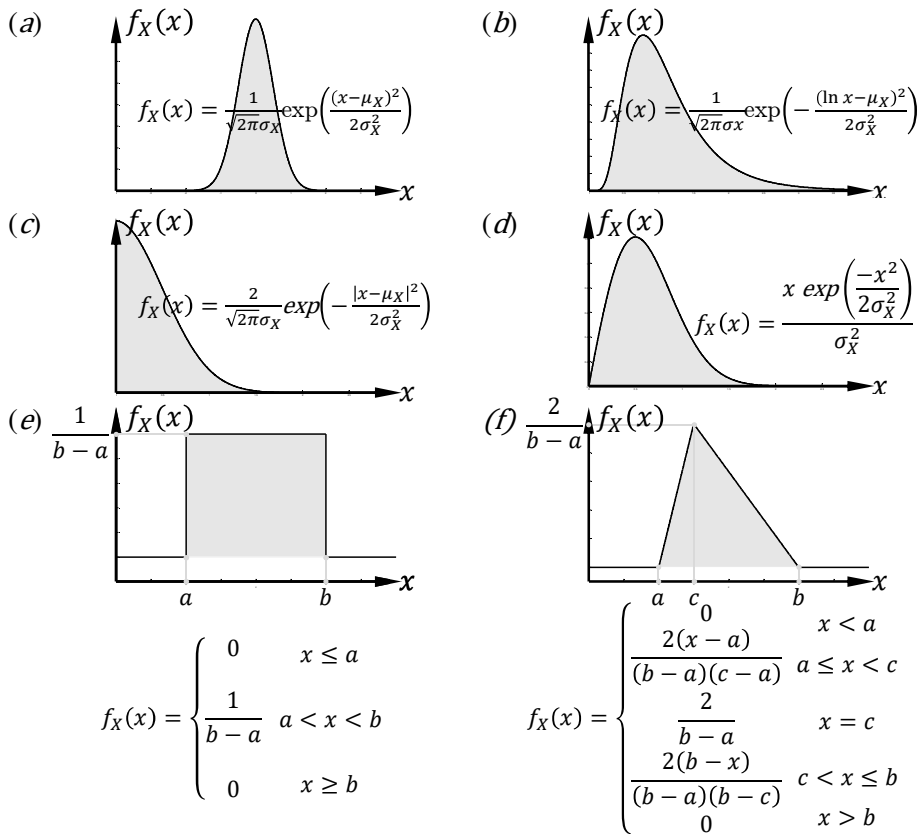


Bild 10: Dichtefunktionen der beschreibenden statistischen Verteilungen für Maß- und Geometriemerkmale, nach [50], eigene Darstellung (a) Normalverteilung; (b) Logarithmische Normalverteilung; (c) Betragsverteilung 1. Art; (d) Betragsverteilung 2. Art; (e) Rechteckverteilung; (f) Dreieckverteilung; für die Beispiele gilt: $\mu_X = 0$, $\sigma_X = 0.5$, $a = 2$, $b = 4$, $c = 2.5$

Grundlegendes zu den Verteilungen 1/2

Die zugehörige Verteilungsfunktion $F_X(x) \in [0, 1]$ zu einer stetigen Zufallsvariable $X \in \mathbb{R}$ benennt mit

$$F_X(x) = P[X \leq x] \quad (5)$$

die Wahrscheinlichkeit, dass der Wert von X kleiner x ist. Diese sog. kumulative Verteilungsfunktion lässt sich über

$$F_X(x) = \int_{-\infty}^x f_X(t) dt \quad (6)$$

für diskrete Werte von x berechnen. Somit kann dann aus den diskreten Ergebnissen ein Verlauf für $F_X(x)$ abgeleitet werden. „Eine analytische Berechnung dieser Integration ist nicht möglich. (...) Für den Fall, dass Werte für $F_X(x)$ in tabellarischer Form vorliegen, der gesuchte Punkt jedoch nicht dabei ist, kann zwischen den vorhandenen Daten interpoliert oder iterativ eine Lösung gefunden werden“, vgl. [101]. Umgedreht kann für stetige x -Punkte die Dichtefunktion

$$f_X(x) = \frac{dF_X(x)}{dx} \quad (7)$$

abgeleitet werden, so dass gilt, vgl. [51],

$$P[x \leq F_X(x) \leq x + dx] = f_X(x) dx. \quad (8)$$

In Analogie dazu ergibt sich

$$P[x_1 \leq X \leq x_2] = F_X(x_2) - F_X(x_1). \quad (9)$$

Hierin bezeichnet P die Wahrscheinlichkeit, mit der die Zufallsvariable innerhalb des Intervalls $[x_1, x_2]$ liegt.

Für das Intervall $[-\infty, +\infty]$ wird die Fläche zwischen Dichtefunktion und horizontaler Achse zu Eins. Dies entspricht der Wahrscheinlichkeit, dass die stetige Zufallsvariable innerhalb der Grenzen von diesem Intervall liegt, vgl. [51].

Die Normalverteilung

Die sicherlich bekannteste und zugleich auch am häufigsten genutzte Verteilung in der Statistik ist die Normal- bzw. GAUSS-Verteilung. Für eine stetige Zufallsvariable $X \in \mathbb{R}$ ist deren Dichtefunktion über

$$f_X(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_X} \exp\left(-\frac{(x - \mu_X)^2}{2\sigma_X^2}\right) \quad (10)$$

definiert. Hierbei ist $\mu_X \in \mathbb{R}$ der Erwartungswert (Mittelwert) und $\sigma_X \in \mathbb{R} > 0$ die zugehörige Standardabweichung. Somit ist $X \sim \mathcal{N}(\mu_X, \sigma_X)$. Der Mittelwert μ_X beschreibt denjenigen Wert, den die Zufallsvariable X mit der größten Wahrscheinlichkeit annimmt, die Standardabweichung den Wendepunkt der zugehörigen Kurve, vgl. Bild 11.

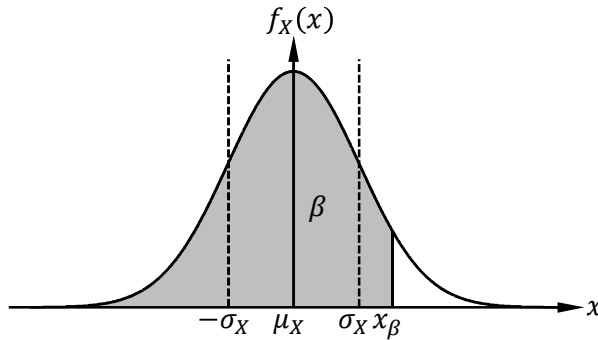


Bild 11: Dichtefunktionen der Normalverteilung $f_X(x)$

β bezeichnet hier das Konfidenzniveau, x_β das Quantil. Mit dem Konfidenzniveau wird die Wahrscheinlichkeit festgelegt, mit welcher die Schätzung eines statistischen Parameters innerhalb des Intervalls einer Stichprobe auch für die gesamte Menge zutreffend sein soll respektive inwiefern ein statistisch berechneter Wert auf Grundlage der Stichprobe innerhalb des gewählten Konfidenzintervalls liegt, vgl. [63]. Jenes Intervall wird auch als Vertrauensintervall bezeichnet, vgl. [101]. Es beschreibt im Umkehrschluss also auch, wieviel Prozent der errechneten Lösungen nicht innerhalb der gewählten Fehlergrenzen liegen und somit nicht verwertbar sind. Für eine statistische Untersuchung ist es notwendig, das frei wählbare Konfidenzniveau $\beta \sim \mathbb{R} \wedge [0, 1]$ im Vorfeld zu definieren. Auf die Wahl der Größe dieses Vertrauensintervalls in Abhängigkeit der Standardabweichung und im Kontext des Toleranzmanagements wird in Abschnitt 4.1 näher eingegangen.

„Als Quantil (...) (x_β) bezeichnet man einen bestimmten Teil der Verteilung. An diesem Punkt wird festgelegt, wie viele Werte der Verteilung über oder unter der gewählten Grenze liegen. Beispiele für Quantile sind das Quartil (Viertel), das Quintil (Fünftel) und das Percentil (Hundertstel). Wird die Verteilung beispielsweise in vier gleich große Teile (...) (partitioniert), so ist die Rede von vier Quartilen (...)“, vgl. [63].

Die Lagetoleranzen Position, Koaxialität/Konzentrität sowie Symmetrie streuen normalverteilt, vgl. Tabelle 3.

Die Standardnormalverteilung

Eine Form der Normalverteilung stellt die Standardnormalverteilung dar:

$$f_Z(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right). \quad (11)$$

„Zum Einen bildet sie die Grundlage vieler statistischer Untersuchungen, zum Anderen können über den zentralen Grenzwertsatz beliebig verteilte Zufallszahlen in die Standardnormalverteilung überführt werden“, vgl. [101]¹. Für diese Verteilungsform gilt $\mu_Z = 0$ sowie $\sigma_Z = 1$, also $Z \sim \mathcal{N}(0, 1)$. Eine Überführung der Normalverteilung in die Standardnormalverteilung und umgekehrt ist über folgende Transformation möglich:

$$x = \sigma_X Z + \mu_X \quad \text{bzw.} \quad (12a)$$

$$Z = \frac{x - \mu_X}{\sigma_X}. \quad (12b)$$

Die Logarithmische Normalverteilung

Die Dichtefunktion der Logarithmischen Normalverteilung ist über

$$f_X(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_X x} \exp\left(-\frac{(\ln x - \mu_X)^2}{2\sigma_X^2}\right) \quad (13)$$

definiert. Alle Formtoleranzen sowie die Lagetoleranzen Parallelität, Rechtwinkligkeit, Neigung, Lauf und Gesamtlauflinien streuen logarithmisch normalverteilt, vgl. Tabelle 3.

¹ Ausführungen zur Thematik „Zentraler Grenzwertsatz“ sind in Abschnitt 2.1.2 unter dem Begriff „Faltung“ dargestellt.

Die Betragsnormalverteilung 1. Art

Für die Betragsnormalverteilung 1. Art, welche über den Zusammenhang

$$\begin{aligned} f_X(x) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_X} \exp\left(-\frac{(x - \mu_X)^2}{2\sigma_X^2}\right) + \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_X} \exp\left(-\frac{(x + \mu_X)^2}{2\sigma_X^2}\right) \\ &= \frac{2}{\sqrt{2\pi}\sigma_X} \exp\left(-\frac{|x - \mu_X|^2}{2\sigma_X^2}\right) \end{aligned} \quad (14)$$

beschrieben wird, gelten dieselben Anwendungsfälle, wie auch für die Logarithmische Normalverteilung. Eine solche Verteilungsform tritt dann auf, wenn ausschließlich der positive Wert eines Merkmals von Relevanz ist ($x \geq 0$).

Diese statistische Verteilungsform wird mitunter auch als „gefaltete Verteilung“ bezeichnet (engl.: *folded (normal) distribution*). Argumentiert wird an dieser Stelle damit, dass diejenigen Anteile der Verteilung, welche sich im negativen Definitionsbereich bzw. links von $x = 0$ befinden, über diesen Punkt in den positiven Definitionsbereich bzw. nach rechts gespiegelt werden.

Die Betragsnormalverteilung 2. Art

Die Betragsnormalverteilung 2. Art beschreibt eine statistische Verteilungsform, welche per Definition ausschließlich im positiven Definitionsbereich auftritt. Sie ist über die Gleichung

$$f_X(x) = \frac{x \exp\left(\frac{-x^2}{2\sigma_X^2}\right)}{\sigma_X^2} \quad (15)$$

definiert. Als Funktion der Standardabweichung σ_X ist sie dann zu beobachten, wenn für ein geometrisches Merkmal in (den Richtungen 1 und 2) Normalverteilungen vorliegen und die Beträge des Mittelpunktabstandes zum Messpunkt betrachtet werden, vgl. [50].

Die Rechteckverteilung

Die Dichtefunktion der Rechteckverteilung beschreibt denjenigen Fall, bei dem die statistische Wahrscheinlichkeitsrechnung über den betrachteten (Toleranz-)Bereich dasselbe Ergebnis liefert. Diese wird über

$$f_X(x) = \begin{cases} 0 & x \leq a \\ \frac{1}{b-a} & a < x < b \\ 0 & x \geq b \end{cases} \quad (16)$$

beschrieben und zeigt somit den ungünstigsten Fall (engl.: *worst case*).

Die Dreieckverteilung

Ist von einer Dreieckverteilung die Rede, so spricht man von einer stetigen statistischen Wahrscheinlichkeitsverteilung, welche durch den Zusammenhang

$$f_X(x) = \begin{cases} 0 & x < a \\ \frac{2(x-a)}{(b-a)(c-a)} & a \leq x < c \\ \frac{2}{b-a} & x = c \\ \frac{2(b-x)}{(b-a)(b-c)} & c < x \leq b \\ 0 & x > b \end{cases} \quad (17)$$

definiert ist. Diese kann im Kontext der Tolerierung als Approximation der Normalverteilung auftreten.

Grundlegendes zu den Verteilungen 2/2

Ist eine statistische Wahrscheinlichkeitsverteilung als Folge einer Simulation oder Messung vorhanden, so muss deren approximierte Verteilungsfunktion bestmöglich identifiziert bzw. charakterisiert werden. Zu diesem Zwecke gibt es statistische Testverfahren, wie beispielsweise den SHAPIRO-WILKS-TEST und den *t*-TEST, vgl. [102]. In der einschlägigen Literatur zum Thema kann hierbei exemplarisch auf die Quellen [103] und [104] verwiesen werden.

2.2.2 Statistische Tests zur Beurteilung von vorliegenden Verteilungen bzw. Versuchsergebnissen

Die nachfolgenden Abschnitte thematisieren wissenschaftliche Standardmethoden bzw. -tests, welche sich im Rahmen der statistischen Versuchsplanung hinsichtlich der Beurteilung von Versuchsergebnissen sowie zur Prüfung von Hypothesen etabliert haben. Ziel dieser Tests ist es im Rahmen der Wiederholgenauigkeits- bzw. Reproduzierbarkeitsuntersuchungen einerseits, die Nullhypothese H_0 , wie sie in Gleichung (69) formuliert ist, zu widerlegen. Andererseits ist es das Ziel, eine(n) minimale(n) Versuchsanzahl bzw. Stichprobenumfang n zu ermitteln, für welche(n) die jeweilige Aussage als statistisch valide angesehen werden kann.

Test der Daten auf Normalverteilung

Um für experimentell bzw. simulationsunterstützt ermittelte Versuchsdaten statistische Aussagen treffen zu können, ist es stets notwendig, diese Daten auf deren Verteilungsform hin zu prüfen. Im Speziellen wird als statistischer Signifikanztest in den meisten Fällen ein Test auf Normalverteilung durchgeführt, „da viele statistische Verfahren auf Normalverteilungsannahmen beruhen“, vgl. [105]. Eine hohe Güte des Tests ist hierbei entscheidend, „um ein geringes Risiko für die Testentscheidung ‚Messreihe normalverteilt‘ zu haben“, vgl. [106]. Ein Blick in die vielfältig vorhandene Literatur (bspw. [107]) zeigt, dass die Tests von SHAPIRO-WILKS, SHAPIRO-FRANCIA, RYAN-JOINER, ANDERSON-DARLING und CRAMÉR-VON-MISES häufig als Tests auf Normalverteilung mit hoher Güte bezeichnet werden.

Als weniger geeignet werden der LILLIEFORS-TEST, der χ^2 -TEST und der KOLMOGOROV-SMIRNOV-TEST angesehen. In Anlehnung an [105] zeigt Tabelle 4 eine Übersicht hierzu.

Tabelle 4: Tests auf Normalverteilung, vgl. [105], eigene Darstellung

Test	Vorteile	Nachteile
χ^2 -TEST	⊕ geeignet für beliebig skalierte Variablen ⊕ Bindungen sind unproblematisch²	⊖ Gruppierung der Beobachtungen notwendig (Häufigkeiten pro Klasse müssen > 5 sein) ⊖ ungeeignet für kleine Stichproben
KOLMOGOROV-SMIRNOV-TEST (KS-TEST)	⊕ geeignet für kleine Stichproben ⊕ Bindungen sind unproblematisch² ⊕ Vergleich der Verteilung von zwei Stichproben möglich	⊖ keine kategorialen Daten³ ⊖ geringe Güte wenn Voraussetzungen nicht erfüllt
LILLIEFORS-TEST (Basis: KS-TEST)	⊕ bessere Trennschärfe als KS-TEST	⊖ keine kategorialen Daten³
CRAMÉR-VON-MISES-TEST	⊕ Vergleich der Verteilung von zwei Stichproben möglich ⊕ höhere Güte als KS-TEST	⊖ keine kategorialen Daten³
ANDERSON-DARLING-TEST	⊕ sehr hohe Güte bei Test auf Normalvert. ⊕ in den Randbereichen genauer als KS-TEST	⊖ keine kategorialen Daten³ ⊖ Stichprobenumfang muss im Bereich $n \geq 8$ liegen
SHAPIRO-WILK-TEST	⊕ hohe Aussagekraft für Stichprobenumfänge $n < 50$ ⊕ Merkmale Mittelwert und Varianz der hypothetischen Normalverteilung müssen für Testdurchführung nicht bekannt sein	⊖ ausschließlich Test auf Normalverteilung ⊖ hoher Rechenaufwand ⊖ Stichprobenumfang muss im Bereich $3 \leq n \leq 5000$ liegen ⊖ Sensibilität ggü. Bindungen ⊖ Sensibilität ggü. Ausreißern

² Bindungen treten dann auf, wenn mehrere Elemente des Stichprobenumfangs denselben Wert besitzen. Im Zusammenhang mit Rangstatistiken hat dies zur Folge, dass jenen Werten zunächst kein eindeutiger Rang zugeordnet werden kann. Diesem Problem wird durch die Zuweisung des Durchschnittswertes der hypothetischen Ränge begegnet, vgl. [108].

³ Kategoriale Daten sind per Definition diskrete (nicht kontinuierliche), nominalskalierte Daten. Anders formuliert können diese nur eine begrenzte Anzahl möglicher Werte annehmen. Daraus leitet sich ab, dass diese eine limitierte Anzahl an Ausprägungen (Kategorien) besitzen. Im Umkehrschluss bedeutet dies ebenfalls, dass ausschließlich Aussagen zum Auftreten jener Ausprägungen angestellt werden können. „Der kategoriale Merkmalstyp kann mit Hilfe des Skalenniveaus noch genauer spezifiziert werden in binär, nominal und ordinal. Wenn eine Variable nur zwei Werte annehmen kann (z. B. Geschlecht (männlich/weiblich)), so bezeichnet man sie als binär. Eine nominale Variable nimmt wenige Werte an und diese können nicht in eine Reihenfolge gebracht werden (z. B. Haarfarbe, Begleiterkrankung). Bei einer ordinalen Variablen haben die Merkmalsausprägungen eine eindeutige Reihenfolge oder Ordnung (z. B. Tumorstadium), wobei die Abstände zwischen den Merkmalsausprägungen unterschiedlich und meist auch gar nicht definiert sind“, vgl. [109].

Der Test auf Normalverteilung wird im Folgenden unter Zuhilfenahme des Programmes Visual-XSel® 13.0 durchgeführt. Für Stichproben mit einem Gesamtumfang größer 50 Elementen erfolgt hierin der Test auf Normalverteilung ausschließlich unter Anwendung des ANDERSON-DARLING-TESTS, welcher grundlegend für Stichprobenumfänge $n \geq 8$ verwendet werden kann.

Üblicherweise wird bei diesen statistischen Signifikanztests „als Nullhypothese gefordert, dass die Messwerte aus einer normalverteilten Grundgesamtheit stammen. Für das (...) festgelegte Signifikanzniveau (bzw. die gewählte Irrtumswahrscheinlichkeit für einen Fehler erster Art) α (...) (hier: $\alpha = 0.05 \hat{=} 5\%$) erhält man als Ergebnis die Prüfgröße p “, vgl. [S1, S. 32].

Für den Fall, dass $p > \alpha$ ist, bedeutet dies für die betrachtete Verteilung, dass für diese die Nullhypothese angenommen werden und von einer Normalverteilung der Daten ausgegangen werden kann.

Für den Fall, dass $p < \alpha$ ist, bedeutet dies für die betrachtete Verteilung, dass für diese die Nullhypothese verworfen werden muss. „In diesem Fall dürfen die statistischen Kenngrößen den anderen nicht unmittelbar gegenübergestellt werden und insbesondere keine Prozessfähigkeitsindizes gebildet werden“, vgl. [50].

Vergleich eines Schätzwertes $\bar{x}$ mit einem Mittelwert μ bei unbekannter Standardabweichung σ (t -TEST)

Der sogenannte „ t -TEST“ dient dem Vergleich eines Schätzwertes $\bar{x}$ mit einem Mittelwert μ bei unbekannter Standardabweichung σ , vgl. [110, S. 61]. In Anlehnung an das in [50] beschriebene Vorgehen (Zuhilfenahme der STUDENT- t -VERTEILUNG), soll dieser Test dafür verwendet werden, die minimale Versuchsanzahl n zu ermitteln.

Gemäß [110, S. 61] und als Folge des im vorangegangenen Abschnitt thematisierten Tests sei angenommen, dass der Schätzwert $\bar{x}$ aus einer normalverteilten Grundgesamtheit mit Mittelwert μ und Standardabweichung σ stammt. Für die Varianz σ^2 steht die Schätzung s^2 mit $f = n - 1$ Freiheitsgraden zur Verfügung. Primär ist es das Ziel des t -TESTS, eine auf den Mittelwert μ bezogene Nullhypothese in der Form $H_0 : \mu_1 = \dots$ zu prüfen.

Hierbei werden die Irrtumswahrscheinlichkeiten bzw. Risiken α und β angesetzt, wobei α den Fehler 1. Art und β den Fehler 2. Art mit den üblichen Annahmen

$$\alpha = 0.05 \hat{=} 5\%, \quad (18a)$$

$$\beta = 0.15 \hat{=} 15\%, \quad (18b)$$

bezeichnet. Gemäß [50] bezeichnet der „Fehler 1. Art (...) den Fall, dass die Gegenhypothese H_a für wahr gehalten wird, obwohl die Hypothese H_0 zutreffend ist. Wird hingegen H_0 für richtig erachtet, gleichwohl H_a zutrifft, kommt es zum Fehler 2. Art“, siehe Tabelle 5. Beim t -TEST wird im ersten

Tabelle 5: Zusammenhang zwischen den Irrtumswahrscheinlichkeiten α und β sowie den Hypothesen H_0 und H_a , vgl. [50], Bild 6.3

		Wahrheit	
		H_0 ist wahr	H_a ist wahr
Annahme	H_0 ist wahr	i.O.	Fehler 2. Art: β -Risiko
	H_a ist wahr	Fehler 1. Art: α -Risiko	i.O.

Schritt eine Testgröße t durch den Zusammenhang

$$\begin{aligned}
 t &= \frac{\bar{x} - \mu}{s_{\bar{x}}} = \frac{\text{Prüfwert} - \text{Sollwert}}{\text{Standardabweichung des Prüfwertes}} \\
 &\quad \vdots \text{ mit } s_{\bar{x}} = s_x \sqrt{n} = \sqrt{\sum_i (x_i - \bar{x})^2 f} \sqrt{n} \\
 t &= \frac{(\bar{x} - \mu) \sqrt{n}}{s_x} = \frac{(\bar{x} - \mu) \cdot \sqrt{n}}{\sqrt{\sum_i (x_i - \bar{x})^2 f}}
 \end{aligned} \quad (19)$$

definiert. Hierin bezeichnet x_i den jeweiligen Messwert und $\bar{x}$ den resultierenden gemittelten Schätzwert. Die Umformung nach dem Stichprobenumfang n liefert:

$$n = \left(\frac{t \sqrt{\sum_i (x_i - \bar{x})^2 f}}{\bar{x} - \mu} \right)^2 = \frac{t^2 \cdot s_x^2}{(\bar{x} - \mu)^2} = \frac{t^2 \cdot s_x^2}{d^2}. \quad (20)$$

Zur Ermittlung des Stichprobenumfangs n werden die Variablen d und t , welche in Gleichung (20) eingeführt wurden, durch geeignete anwendungsbezogene Substitutionen ersetzt.

- In Anlehnung an [50] bezeichnet die Variable d mit $d = \bar{x} - \mu$ hierbei den kleinsten relevanten Unterschied, welcher „größer als die Ungenauigkeit des Messverfahrens sein“ muss, vgl. [111].
- Die Testgröße t aus Gleichung (20) kann unter Zuhilfenahme der Quantile c der zugrunde liegenden Verteilungsform berechnet werden. Für diese ergibt sich

$$t = c(\alpha) + c(\beta) . \quad (21)$$

Nach [112] und [50] folgt für Gleichung (21) unter Einbeziehung der Quantile der STUDENT- t -VERTEILUNG

$$t = t_{n-1, 1-\frac{\alpha}{2}} + t_{n-1, 1-\beta_0} . \quad (22)$$

Für die Mindeststichprobengröße n ergibt sich folglich

$$\begin{aligned} n &= \frac{\left[t_{n-1, 1-\frac{\alpha}{2}} + t_{n-1, 1-\beta_0} \right]^2 \cdot s_x^2}{d^2} \\ &\quad \vdots \text{ mit den Gleichungen (18) und (19)} \\ n &= \frac{\left[t_{f, 0.975} + t_{f, 0.85} \right]^2 \cdot \sum_i (x_i - \bar{x})^2 f}{d^2} . \end{aligned} \quad (23)$$

Die Werte für $t_{f, 0.85}$ und $t_{f, 0.975}$ sind in Abhängigkeit des Freiheitsgrades f aus den vielfältig vorhandenen Tabellen für die KUMULATIVE t -VERTEILUNG zu entnehmen, wie z. B. aus [113, Tabelle 12] und [110, Tabelle 21]. Die in den Untersuchungen verwendeten Werte für $t_{f, 0.85}$ und $t_{f, 0.975}$ sind in Tabelle 45, Anhang B explizit aufgelistet. Die minimale Versuchsanzahl n kann somit ermittelt werden.

Vergleich eines Schätzwertes s_x^2 mit der Varianz σ^2 (χ^2 -TEST)

Nachdem der t -TEST dafür verwendet wird, eine minimale Versuchsanzahl n zu ermitteln, bedarf es nachwievord der Prüfung, inwiefern die jeweilig individuell formulierte Nullhypothese H_0 widerlegt werden kann. Hierfür wird die Testgröße χ^2 eingeführt, welche dem Vergleich einer geschätzten Varianz s_x^2

mit der Varianz σ^2 dienen soll. Gemäß [110, S. 63] wird die Testgröße χ^2 über den Zusammenhang

$$\chi^2 = f \cdot s_x^2 \sigma^2 = \frac{\sum_i (x_i - \bar{x})^2}{\sigma^2} \quad (24)$$

beschrieben.⁴

Zur Prüfung, inwiefern die Nullhypothese widerlegt werden kann, wird zudem das sogenannte Signifikanzniveau bestimmt. Gleichung (18a) liefert für dieses: Signifikanzniveau $1 - \alpha = 0.95 \hat{=} 95\%$. Jenes wird im Nachgang verwendet, um bei diesem zweiseitigen Test die untere und obere Grenze (c_u und c_o) von χ^2 aus den vielfältig vorhandenen Tabellen für die KUMULATIVE χ^2 -VERTEILUNG zu entnehmen, wie z. B. aus [113, Tabelle 8] und [110, Tabelle 22]. Die in den Untersuchungen verwendeten Werte für c_u und c_o sind in Tabelle 46, Anhang B explizit aufgelistet. Zur Ermittlung dieser Grenzen werden die Wahrscheinlichkeiten p_1 und p_2 mittels

$$\begin{aligned} \text{Untere Grenze von } \chi^2 : p_1 &= 0 + \alpha/2 \\ \text{Obere Grenze von } \chi^2 : p_2 &= 1 - \alpha/2 \end{aligned} \quad (25)$$

bestimmt, wobei gelten muss: Signifikanzniveau $1 - \alpha = p_2 - p_1$. Für den vorliegenden Fall ergeben sich $p_1 = 0.025$ und $p_2 = 0.975$. In Kombination mit dem Wissen um die Anzahl der Freiheitsgrade $f = n - 1$ können nun die Werte für c_u und c_o aus den benannten Tabellenwerken entnommen werden.

Für den Fall, dass der Vergleich $c_u < \chi^2 < c_o$ zeigt, dass χ^2 zwischen c_u und c_o liegt, bedeutet dies für die jeweilige Anwendung, dass die angestellte Nullhypothese nicht widerlegt ist.

2.3 Virtuelle Bausteine zur Absicherung von Toleranzlagen

In diesem Abschnitt werden virtuelle Bausteine zur Absicherung von Toleranzlagen thematisiert. Bevor jedoch auf diese näher eingegangen wird, soll in Addition zu den Ausführungen aus den Abschnitten 2.1.1 und 2.1.2 ein grundlegendes Verständnis zur Ausbildung von Toleranzlagen geschaffen werden. Hierfür illustriert Bild 12 die mögliche Ausbildung eines Schließmaßes (hier: Schließmaß S_X) mit entsprechenden Toleranzlagen als Folge einer geometrischen Maßkette mit mehreren Beitragsleistern.

⁴ Im Rahmen dieser Arbeit wird σ^2 mit $\sigma^2 = (1/100mm)^2$ gewählt werden. Ausführungen bzgl. der Wahl dieses Wertes sind in Abschnitt 5.5 dargestellt.

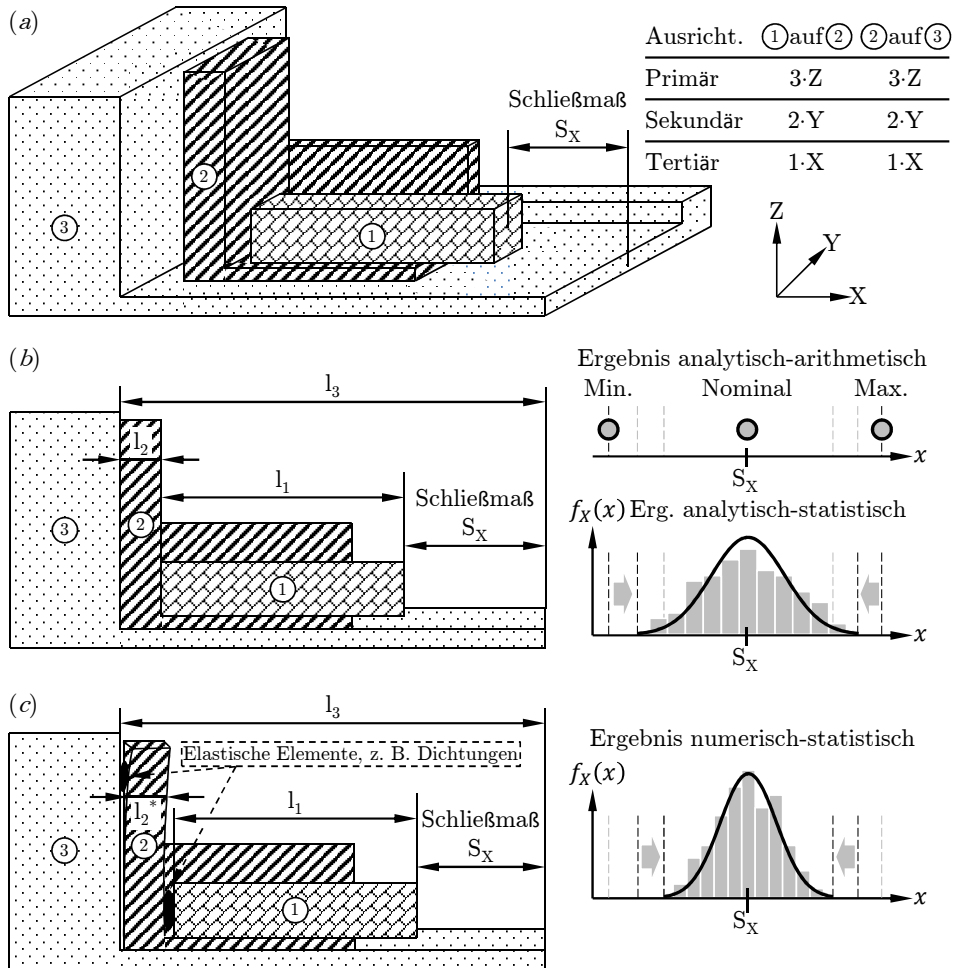


Bild 12: Schließmaßermittlung als Folge einer geometrischen Maßkette (a) Beitragsleister und Ausrichtungen für das betrachtete Beispiel (b) Mögliche Maßkette bei ideal starrer Betrachtung (c) Mögliche Maßkette bei Berücksichtigung elastischer Effekte

Bild 12 (a) zeigt das betrachtete Beispiel. Bauteil ① liegt auf Bauteil ② und wird auf diesem mit einer 3-2-1-Ausrichtung (siehe Abschnitt 2.1.1) entsprechend den Angaben der Tabelle aus Bild 12 (a) positioniert. Bauteil ② wiederum liegt auf Bauteil ③ auf, wobei die Positionierung auch hier über eine 3-2-1-Ausrichtung erfolgt. Gesucht ist das Schließmaß S_x in X-Richtung. An dieser Stelle können drei prinzipielle Berechnungswege beim Vorhandensein abweichungsbehafteter Beitragsleister gewählt werden: ein analytisch-arithmetischer, ein analytisch-statistischer und ein numerisch-statistischer, vgl. Abschnitt 2.1.2.

Die in Bild 12 (b) dargestellte Seitenansicht führt unter Einbezug der abweichungsbehafteten Beitragsleister (hier: l_1 , l_2 und l_3) zu einer analytisch-arithmetischen Schließmaßgleichung, wie in Gleichung (26a) dargestellt. Statistische Effekte werden hierbei nicht berücksichtigt – es handelt sich um eine *worst case*-Betrachtung.

Soll die Schließmaßberechnung auf statistischen Wahrscheinlichkeitsverteilungen fußen und unter der Annahme erfolgen, dass die abweichungsbehafteten Beitragsleister dazu führen, dass das Schließmaß im Rahmen einer Serienfertigung nahezu normalverteilt streut (Zentraler Grenzwertsatz, siehe Abschnitt 2.1.2), berechnet sich das analytisch-statistische Schließmaß wie in Gleichung (26b) dargestellt. Eine beispielhafte Häufigkeitsverteilung für das resultierende Schließmaß zeigt Bild 12 (b).

$$S_{X,\text{analytisch-arithmetisch}} = l_3 - (l_2 + l_1) \quad (26a)$$

$$S_{X,\text{analytisch-statistisch}} = \sqrt{l_3^2 - (l_2^2 + l_1^2)} \quad (26b)$$

Werden die an dieser Stelle betrachteten Beitragsleister (bis hierhin ausschließlich Formtoleranzen) um mögliche Lagetoleranzen (in der industriellen Praxis auch Montagetoleranzen genannt – $l_{M,12}$ und $l_{M,23}$) erweitert, berechnen sich das analytisch-arithmetische und das analytisch-statistische Schließmaß wie in den Gleichungen (27a) und (27b) dargestellt.

$$S_{X,\text{analytisch-arithmetisch}} = l_3 - (l_{M,23} + l_2 + l_{M,12} + l_1) \quad (27a)$$

$$S_{X,\text{analytisch-statistisch}} = \sqrt{l_3^2 - (l_{M,23}^2 + l_2^2 + l_{M,12}^2 + l_1^2)} \quad (27b)$$

Ist es das Ziel, geometrische Effekte, wie zum Beispiel Hebelarme, in der Schließmaßberechnung zu berücksichtigen, sollte der Sprung in die numerisch-statistische Toleranzrechnung vollzogen werden. Diese erlaubt, durch eine geeignete Kopplung mit korrespondierenden FEM-Berechnungen, zudem die Berücksichtigung elastischer Effekte sowie elastischer Beitragsleister. Bild 12 (c) veranschaulicht in diesem Zusammenhang die Defizite einer statistischen Toleranzrechnung: Das elastische Verhalten der Beitragsleister (Verformungen, Rückfederungen, etc.) wird vernachlässigt. Elastische Beitragsleister, wie zum Beispiel Dichtungen, werden bei der Schließmaßberechnung nicht betrachtet.

Vor diesem Hintergrund werden in diesem Abschnitt 2.3 virtuelle Methoden vorgestellt, welche in ihrer Kombination bzw. durch eine geeignete Kopplung dazu befähigt werden sollen, einen Beitrag zur realitätsnahen Vorhersage und Absicherung von Toleranzlagen zu leisten. Ausführungen zum gewählten Aufbau dieses Abschnittes werden in der Einleitung von Kapitel 2 gegeben.

2.3.1 Kommerzielle Simulationsprogramme für die Toleranzanalyse

In Anlehnung an [114] bedienen sich moderne Simulationsanwendungen des *Computer-Aided Tolerancing* numerischer, zufallsbasierter Ansätze, um ein statistisch belastbares Vorhersageergebnis für vorherrschende Toleranzsituationen an der betrachteten Baugruppe zu erhalten. Dieses Simulationsergebnis kann einerseits hinsichtlich der Fragestellung interpretiert werden, inwiefern Fertigungs-, Funktions- oder optische Probleme am Produkt auftreten können. Andererseits „erlauben die Systeme eine konstruktionsbegleitende Analyse der Qualitätskriterien und tragen somit zum *Total Quality Management* bei (...) [114]“, vgl. [50]. Moderne *Software*-Lösungen halten sich in der Regel an das in Tabelle 6 dargestellte achtstufige Vorgehensmodell zur Modellierung von Toleranzsimulationen.

Tabelle 6: Generisches Vorgehensmodell zur Modellierung von Toleranzsimulationen, vgl. [50]

Schritt	Beschreibung
①	Definition der Qualitätsmerkmale
②	Import/Erzeugung der Baugruppengeometrie (Zu diesem Schritt zählt die Erzeugung von Teilen, Unterbaugruppen und beispielsweise Vorrichtungen.)
③	Erzeugung funktionaler <i>Features</i> (Bei punktbasierter Modellierung werden auf den Modellreferenzen entsprechende Punkte erzeugt. Bei <i>feature</i> -basierter Modellierung sind diese <i>Features</i> auszuweisen.)
④	Zuweisung der Toleranzen für die <i>Features</i> in den Maßketten
⑤	Erzeugung der Montagereihenfolge
⑥	Anlegen v. Messungen für jedes spezifizierte Qualitätskriterium
⑦	Durchführen der Berechnung
⑧	Analyse und Dokumentation der Ergebnisse

Als CAD-System-(un-)abhängige Simulationsprogramme/-applikationen unterstützen sie den Anwender bereits ab der sogenannten frühen Phase des Produktenstehungsprozesses (PEP). Hierbei können sich diese, im Vergleich zu einem Entwicklungsprozess ohne begleitendes Toleranzmanagement, neben einer allgemein formulierten „Steigerung der Produktqualität“, nachhaltig positiv auf den gesamten PEP auswirken.

Durch deren Einsatz bieten/ergeben sich Möglichkeiten zur ...

- ... Reduzierung der Entwicklungszeiten und -kosten,
- ... Aufweitung von Einzeltoleranzen bei gleichzeitiger Einhaltung geometrischer Produktanforderungen,
- ... Vermeidung später Konzeptänderungen
⇒ Vermeidung von Werkzeugänderungen ⇒ Kosteneinsparung,
- ... Einsparung von Messmitteln,
- ... Reduzierung der Fertigungskosten,
- ... Reduzierung der Nacharbeit(-skosten),
- ... Reduzierung von Ausschuss und Garantierückläufern.

In den nachfolgenden Abschnitten werden die kommerziell gebräuchlichsten *state-of-the-art*-Toleranz-Simulationsprogramme in Kurzform mit literarischen Verweisen auf deren Hersteller vorgestellt. Umfangreiche Gegenüberstellungen und Vergleiche zwischen den verschiedenen *Software*-Lösungen werden in [115], [85] und [50] angestellt. Ein stichpunktartige Charakterisierung der *Software*-Lösungen findet sich zudem in [116].

eM-TolMate

Stammend aus der Tecnomatix-Serie von Siemens PLM, vgl. [117], repräsentiert die Applikation eM-TolMate laut Herstellerangaben ein „Software-Werkzeug für ein durchgängiges Management von Toleranzen von der Konstruktion bis in die Fertigung“, vgl. [118]. Es ist im Rahmen des Produkt- und Prozessentwurfes Bestandteil eines fünfteiligen geschlossenen Qualitätskreislaufes, welcher aus den Bausteinen

- Toleranzanalyse (eM-TolMate),
- Prüfplanung (eM-Gauge),
- CAD-basierte Offline-Programmierung von Koordinatenmessgeräten (eM-ProbeCAD),
- Messprogrammausführung & Datenmanagement (eM-Measure) und
- Analyse (eM-Insight)

besteht. Bei eM-TolMate handelt es sich um ein Toleranzanalysewerkzeug, welches auf Basis von *feature*-basierten Punktmodellen agiert. Im Jahre 2010 wurde diese Software jedoch auf Grundlage einer Siemens PLM-Entscheidung durch VisVSA abgelöst. Vorhandene Bestandskunden wurden entsprechend auf dieses System umgezogen, vgl. [50].

VisVSA

Als Produkt der Variation Systems Analysis GmbH, vgl. [119] und [120], stellt VisVSA ein 3D-Toleranzsoftwarewerkzeug zur Simulation von Produktions- und Zusammenbauprozessen dar, welches innerhalb eines Applikationspaketes in Siemens PLM, vgl. [121], implementiert ist. Die Ermittlung der Prozessgüte erfolgt über die numerisch-statistische Berechnung (siehe Abschnitt 2.1.2) von Prozessfähigkeitsindizes (C_p , C_{pk}) auf Basis von *feature*-basierten Simulationsmodellen des Montageprozesses, welche die Abbildung komplexer Einbausituationen und Bezugssysteme ohne das Vorhandensein eines auskonstruierten CAD-Modelles erlauben.

CETOL 6 σ

Als Produkt von Sigmetrix⁵, vgl. [122], ist es der Anspruch der Toleranzsoftware-Lösung CETOL 6 σ , Konstrukteuren und Entwicklern eine optimale Unterstützung während der Toleranzanalyse und -optimierung zu bieten, vgl. [123]. Diese Software, unterteilt in die Modi *Parametrik* (parametrische Modellbemaßungen werden im jeweiligen Toleranzbereich modelliert) und *Overlay* (parallel zur CAD-Geometrie wird ein *feature*-basiertes Modell erzeugt), verspricht vielfältige Möglichkeiten der Toleranzmodellierung und -auswertung, bietet aber auch Nachteile, siehe Tabelle 7.

Tabelle 7: Vor- und Nachteile der Toleranzsoftware CETOL 6 σ , vgl. [124]

Vorteile	
⊕	automatisierte Baugruppenmodellierung
⊕	präzise Prüfwerkzeuge f. Rückmeldungen zum Baugruppenverhalten
⊕	Analyse von Form- und Lagetoleranzen
⊕	reale Sensitivitäts-Animation
⊕	aktive Objektsteuerung zum Verwalten großer Modelle
⊕	vollintegrierter Network Model Graph, Modellbaum und CAD-Ansichten
⊕	Modell-Vorlagen zur Wiederverwendung von Analysen
⊕	flexible Datenspeicherung – kein Verlust der Datenintegrität
⊕	direkter Export als .html oder .csv

⁵ a group company of CYBERNET SYSTEMS CO., LTD.

Nachteile

⊖	Implementierung ausschließlich in PTC Creo Parametric und Pro/ENGINEER
⊖	lange Berechnungszeit für die Regenerierung der Modelle bringt einen erheblichen Nachteil für den Einsatz der MCS mit sich, vgl. [50]
⊖	keine Einbeziehung von Formtoleranzen (Sondermodellierungen möglich aber benutzerabhängig)
⊖	keine Einbeziehung von Lagetoleranzen (<i>Parametrik</i> -Modus)

enventive

Die *Software*-Lösung enventive bietet numerisch-statistische Toleranzanalysen (siehe Abschnitt 2.1.2) unter Berücksichtigung von Form- und Lagetoleranzen. Laut Herstelleraussage gehen die *Tools* dieser *Software* „weit über die Funktionalität herkömmlicher Toleranzanalyse-Softwarelösungen hinaus, indem sie helfen, eine große Bandbreite an wichtigen Kontributoren für die Schwankungen genau aufzuzeigen“, vgl. [125]. Genaue Funktionsweisen hinter diesen *Tools* werden jedoch nicht näher beleuchtet. Als betont gegensätzliche Toleranzanalyse-Lösung gegenüber den „herkömmlichen“ Mitbewerbern auf diesem Markt heißt es einzig: „Die Enventive-Modelle erfassen mithilfe von Smart Components™ sowohl die Form als auch die Funktion der Bauteile und Baugruppen und nicht nur die Geometrie. Anhand dieser Modelle können die Geometrie, Kräfte, kinematische Bewegung und alle anderen Parameter, die durch eine Gleichung definiert werden können, untersucht werden“, vgl. [126]. Die wesentlichen Stärken von enventive liegen laut [127] „in den Fähigkeiten, sämtliche auf das Produkt wirkende physikalische Eigenschaften wie Kräfte, Momente, Reibungen bzw. Druck- und Temperatur zu definieren und deren Auswirkungen auf die maßliche Qualität zu ermitteln und in Animationen darzustellen.“

3DCS Variation Analyst

Die *Software*-Lösung 3DCS Variation Analyst des US-amerikanischen Herstellers Dimensional Control Systems (DCS), vgl. [128], zielt, wie auch die Mitbewerber, darauf ab, das Toleranzmanagement möglichst anwenderorientiert zu unterstützen. Wie bereits übergeordnet erwähnt, soll es dem Anwender somit ermöglicht werden, „die Produktqualität frühestmöglich und zielgerichtet zu optimieren und die Produktkosten zu senken“, vgl. [129]. Die rechnerunterstützte 2D- und 3D-Toleranzsimulation ideal starrer und nachgiebiger Baugruppen unterstützt laut Herstellerangaben die realitätsnahe Analyse und Simulation von virtuellen Prototypen bezüglich ihrer Funktionssicherheit unter Berücksichtigung von Füge- und Montageprozessen, respektive des Fertigungsprozesses. Wie auch bei den anderen *Software*-Lösungen erfolgt

der Aufbau des Toleranzsimulationsmodells direkt innerhalb des gewählten CAD-Programmes mit uneingeschränktem Zugriff auf das jeweilig gewählte CAD-Modell. Sämtliche Toleranzsimulationsschritte können direkt in diesem Modell abgespeichert werden, was den Datenaustausch (mit beispielsweise anderen Fachabteilungen) nutzerfreundlich gestaltet. Zudem ist es möglich, reale Fertigungsdaten in die Toleranzsimulation zu importieren. Die Auswertung der durch eine numerisch-statistische Toleranzanalyse (siehe Abschnitt 2.1.2) berechneten Ergebnisse (statistische Streuungsaussagen an untersuchten Schließmaßen, Beitragsleisteranalysen, statistische Kenngrößen, Animation von Zusammenbausequenzen) kann einerseits innerhalb der Applikation über eine grafische Benutzeroberfläche (GUI, engl.: *Graphical User Interface*) erfolgen, welche durch den Anwender innerhalb bestimmter Grenzen angepasst werden kann. Auf diesem Wege können nicht bzw. weniger relevante Ergebnisgrößen ausgeblendet werden – die Übersichtlichkeit für den Anwender steigt. Andererseits ist es möglich, die Ergebnisse über verschiedene Austauschformate für eine Auswertung mit einem anderen Programm zu exportieren. Diese *Software*-Lösung kann als Applikation in verschiedene CAD-*Softwares*, wie beispielsweise CATIA V5, integriert werden.

2.3.2 Statistische Versuchsplanung/*Design of Experiments*

In Analogie zu den Ausführungen in der Einleitung von Kapitel 2 befasst sich dieser Teilabschnitt mit dem Themengebiet der statistischen Versuchsplanung (engl.: *Design of Experiments*, *DoE*). Als Bindeglied reiht sich dieser im Gesamtkontext der „Virtuellen Methoden zur Absicherung von Toleranzlagen“ zwischen den Toleranz-Simulationsprogrammen, welche ein statistisch belastbares Vorhersageergebnis für vorherrschende starre Toleranzsituationen ermöglichen sollen, und den nachfolgenden Finite-Elemente-Berechnungen ein, siehe Bild 5. Das grundlegende Ziel einer statistischen Versuchsplanung ist es, „Versuche so zu kombinieren, dass die Zusammenhänge einer Funktion oder eines Prozesses bestmöglich durch eine spätere (statistische) Auswertung wiedergegeben werden können“, vgl. [65].

Es handelt sich um ein methodisches Vorgehen, welches die konfliktären Ziele

- Aufwand der Durchführung gering halten (Versuchszahl, Simulationsaufwand, Zeit, Kosten, usw.) und
- Statistisch abgesicherte und quantifizierbare Ergebnisse bzgl. des Wirkungszusammenhangs zwischen Einflussgrößen (Unterteilung: Steuer- und Störgrößen gemäß TAGUCHI, vgl. [130]) und Zielgrößen erhalten, vgl. [131]

bestmöglich in Einklang bringen soll, vgl. [S2] und [S3], siehe Bild 13.

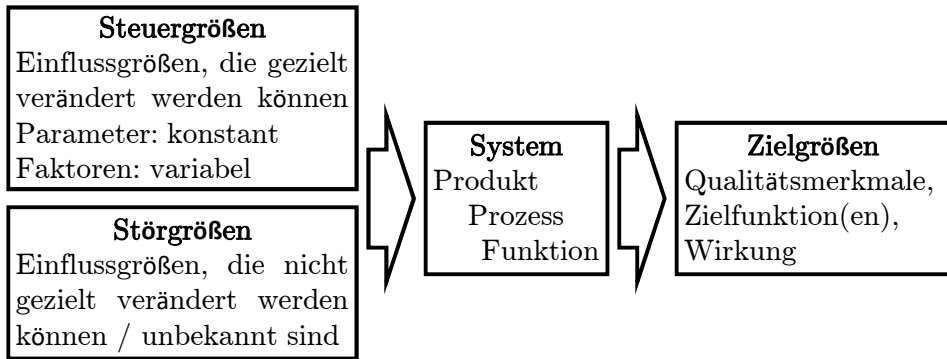


Bild 13: Zusammenhang zwischen Systemgrößen und Systemwirkung, vgl. [132] und [133], eigene Darstellung

Ein Blick in die Literatur verrät, dass erste Ansätze zur statistischen Versuchsplanung aus den 20er Jahren des 20. Jahrhunderts stammen – namentlich sei an dieser Stelle auf das Werk „*Statistical Methods for Research Workers*“ aus dem Jahr 1925 vom Briten SIR RONALD AYLMER FISHER verwiesen. Eine ansprechende Zusammenfassung zur historischen Entwicklung der statistischen Versuchsplanung ist in [134], Abschnitt 4.1 zu finden. Aktuelle, in entsprechenden Normen verankerte, Definitionen zum Themengebiet werden in den zwei nachfolgenden Absätzen wiedergegeben.

Auf internationaler Ebene ist der Begriff „*Design of Experiments (DoE)*“ in der Norm ISO 3534-3:2013 wie folgt beschrieben, vgl. [135]: „*Design of Experiments (DOE) catalyses innovation, problem solving and discovery. DOE comprises a strategy and a body of methods that are instrumental in achieving quality improvement in products, services and processes.*“.

Auf nationaler Ebene ist der Begriff „Statistische Versuchsplanung“ derzeit in keiner Norm, dafür aber in der VDI-RICHTLINIE 2247 aus dem Jahr 1994 zu finden, vgl. [136]: „Die statistische Versuchsplanung dient dazu, die Auswirkungen von metrischen oder attributiven Einflußparametern auf ein (in der Regel) metrisches Qualitätsmerkmal aufzudecken.“.

Auf den kommenden Seiten werden, neben einer einleitenden Einordnung und Anwendung der statistischen Versuchsplanung, diejenigen Versuchsplantypen thematisiert, die sich im Rahmen dieser Arbeit als relevant herausgestellt haben.

Ganzheitliches Vorgehenskonzept: In vier Schritten durch die statistische Versuchplanung (in Anlehnung an GUNDLACH [134])

Der siebenstufige Anwendungsleitfaden „Problemlösungszyklus statistische Versuchplanung“, kurz ProStaV, wird an dieser Stelle auf die vier grundlegendsten Prozessschritte reduziert, vgl. [134]. Diese werden nachfolgend in zusammengefasster Form dargestellt.

1. Systemanalyse

Im ersten Schritt wird das Problem beschrieben/konkretisiert, um darauf aufbauend das Untersuchungsziel festzulegen. Hierbei ist es wichtig, das Problem und die sich daraus resultierende Aufgabe verstanden zu haben, um einerseits eine klare Systemabgrenzung und andererseits eine Spezifikation der für das System relevanten Steuer-, Stör- und Zielgrößen zu ermöglichen, siehe Bild 13. Es soll folglich ein allgemeines Systemverständnis vorliegen.

2. Versuchsstrategie

Aufbauend auf der Systemanalyse zielt dieser Prozessschritt auf die Identifikation eines zielführenden Versuchsplans ab. In diesem werden „Nutzen und (...) Aufwand verschiedener (Verfahren) und Versuchspläne in Relation (gesetzt und) diese hinsichtlich des zu lösenden Problems“ beurteilt, vgl. [S2]. Wie in [130] und [134] erläutert, hängt der an dieser Stelle determinierte „optimale“ Versuchsplan jedoch nicht nur von der Anzahl der Faktoren und deren Stufenzahl, sondern auch vom Ziel der Untersuchung, der angestrebten Genauigkeit der Ergebnisse sowie der Größe der Zufallsstreuung ab.

3. Versuchsdurchführung

Um das Risiko zweifelhafter Ergebnisse präventiv zu minimieren, ist es für die Durchführung unabdinglich, eine ausreichend große und einwandfreie Materialversorgung für den Versuch vorzuhalten. Ist diese sichergestellt, ist einerseits darauf zu achten, dass die aus der statistischen Versuchplanung resultierende Versuchsreihenfolge bedingungslos eingehalten wird, was auch geeignet zu dokumentieren ist. Ist dies nicht der Fall, können die Ergebnisse gegebenenfalls angezweifelt werden. Andererseits ist darauf zu achten, dass die Einfluss- und Zielgrößen genau erhoben werden. Es sei zudem angemerkt, dass Kapazitäten für Wiederholversuche frühzeitig eingeplant werden sollten. „Mittels mehrfacher Wiederholungen von Einzelversuchen ist es möglich, Informationen über Fehler und Streuungen der Versuche zu gewinnen. Je mehr die Einzelversuche streuen, desto mehr sollte diese Einstellung wiederholt werden. Anders gesagt, werden Aussagen über den Effekt eines Faktors genauer, je mehr Wiederholungen durchgeführt werden“, vgl. [S2] und [130].

4. Versuchsauswertung

Unter Verwendung statistischer Methoden können die während der Versuchsdurchführung erhobenen Daten geeignet abschließend aufbereitet, ausgewertet, analysiert und dargestellt werden. Die Interpretation und das Ableiten geeigneter Maßnahmen auf Basis der Auswertung schließen den Prozess ab.

Weiterführende und detaillierte Informationen zum ProStaV sowie zu den vielfältigen Möglichkeiten und Randbedingungen einer statistischen Versuchsplanung finden sich in [130] und [134] sowie in der vielfältig vorhandenen Fachliteratur.

Wenn es eine Aufgabenstellung erfordert, sich der Methoden der statistischen Versuchsplanung zu bedienen, gilt es zunächst anwendungsabhängig zu klären (ggf. durch geeignete Studien), welcher Versuchsplantyp das zielführendste Ergebnis liefert. Wie ausführlichst in [134] beschrieben, kann eine grundlegende Unterscheidung zwischen den verschiedenen statistischen Versuchsplantypen wie folgt vorgenommen werden: Statistische Versuchspläne für einen Einflussfaktor, Faktorielle Versuchspläne (VP's erster/zweiter/dritter Ordnung), Optimale Versuchspläne, Versuchspläne für Mischungsexperimente, TAGUCHI Versuchspläne und SHAININ Versuchspläne.

In der spezifischen Anwendung zeigt sich, dass für die vorliegende Fragestellung TAGUCHI und D-OPTIMALE Versuchspläne für den Vergleich von Simulations- und Experimentaldaten durchgesetzt haben, s. Abschnitt 4.5.2, vgl. [S1], [S2], [S3] und [S4]. In den nachfolgenden Abschnitten werden diese vorgestellt.

TAGUCHI Versuchspläne

Die sogenannten TAGUCHI Versuchspläne sind nach dem japanischen Ingenieur und Statistiker TAGUCHI GEN'ICHI benannt. Im Laufe seiner beruflichen Laufbahn entwickelte sich dieser zum international anerkannten und mehrfach prämierten Fachmann für Qualitätsmethoden. Aus dieser Funktion heraus entwickelte er „die nach ihm benannte TAGUCHI-Methode zur statistischen Versuchsplanung, um die Produkte sowie Herstellungsprozesse robuster gegenüber Störeinflüssen zu gestalten“, vgl. [65]. In Erweiterung bestehender Ansätze und Definitionen zum Qualitätsbegriff eines Produktes, Prozesses oder einer Dienstleistung verbindet TAGUCHI „die Qualität eng mit dem Verlust, der durch die Abweichung der Werte der Merkmale, die die Qualität des Produktes charakterisieren, vom Sollwert verursacht wird“, vgl. [134] und [137]. Der exakte Wortlaut der Definition von Qualität ist nach TAGUCHI der Folgende:

„Qualität entspricht dem Verlust, den ein Produkt für die Gemeinschaft nach seiner Bereitstellung verursacht, im Gegensatz zu jenen Verlusten, die durch seine eigentlichen Funktionen hervorgerufen werden“, vgl. [138].

Auftretende streuende und beherrschbare Fertigungsabweichungen oder Produkteigenschaften werden folglich nicht mehr länger als (zulässige) Toleranzen angesehen, sondern vielmehr durch parabolische Verlustpolaren beschrieben, die es zu minimieren gilt. Diese Minimierung soll jedoch nicht maßgeblich durch Toleranzeinschränkungen, sondern durch eine größtmögliche Unempfindlichkeit des Produktes gegenüber auftretenden Streuungen realisiert werden. Eine vielfach verwendete Veranschaulichung zum Thema ist in Bild 14 ersichtlich.

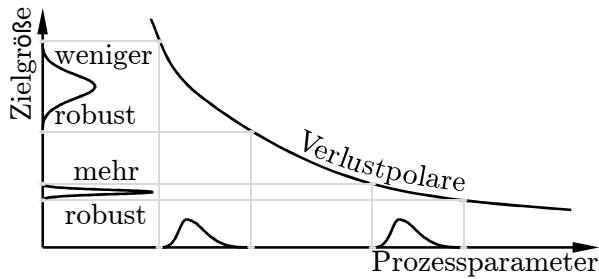


Bild 14: Einfluss streuender Prozessparameter auf die Robustheit der Zielgrößen in Abhängigkeit der Verlustpolaren, vgl. [51], [65], [132], [134]

Hierin wird deutlich, inwiefern eine auf möglichst breiter Front minimierte respektive abgeflachte Verlustpolare die Robustheit der betrachteten Zielgröße in Abhängigkeit streuender Prozessparameter positiv beeinflusst. Anwendungsfälle hierzu finden sich beispielsweise im Rahmen der robusten Optimierung aerodynamischer Profile wieder, vgl. [51]. Bei diesem Beispiel wird der aerodynamische Verlust eines Verdichterschaufelprofils eines Flugzeugstrahltriebwerks resultierend aus Fehlanströmungen untersucht und die entsprechende Verlustpolare durch neuartige Ansätze der numerischen Multikriterien-Optimierung minimiert, siehe Bild 15.

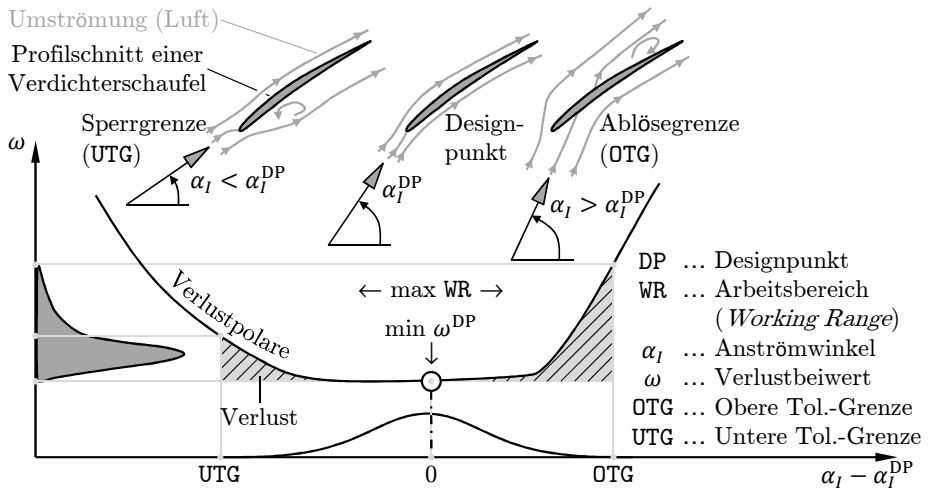


Bild 15: Veranschaulichung der Verlustpolaren einer Verdichtersektion, in Anlehnung an [51, Abb. 5.1], eigene Darstellung

Anhand dieser Beschreibungsweise über Verlustpolaren soll das Ziel einer idealen Qualität⁶ durch Streuungsminimierung (Ausrichtung des Qualitätsmerkmals auf den Nominalwert) nachhaltig anvisiert werden. Abweichungen vom Ziel können dann im Umkehrschluss auch quantifizierbar gemacht werden.

Für Produkte und Prozesse ergibt sich folgendes Verständnis:

- **Produkte sind robust**, wenn ihre Eigenschaften verhältnismäßig wenig von Fertigungs- und Einsatzbedingungen abhängen.
- **Prozesse sind robust**, wenn ihre Eigenschaften verhältnismäßig wenig und ausschließlich von unvermeidlichen Schwankungen der Prozessparameter (Umgebungsbedingungen, Materialeigenschaften, usw.) abhängen.

Für die Zielerreichung eines robusten Produktes oder Prozesses werden laut TAGUCHI folgende drei Entwicklungsschritte unterschieden, vgl. [S3], [132] und [134]:

- **Systemdesign**
 systematische Entwicklung, Konzipierung und Festlegung der Eigenschaften des Produktes, Art des Herstellungsprozesses, usw.
 ⇒ ein gut abgestimmtes Systemkonzept

⁶ „Die ideale Qualität ist wie folgt definiert: Wenn ein Produkt zu jedem Zeitpunkt seiner Verwendung die vorgegebene Leistung erbringt und zwar unter allen vorgesehenen Betriebsbedingungen und während der gesamten Lebensdauer, ohne Nebenwirkungen hervorzurufen [139]“, vgl. [134].

- **Parameterdesign**

Festlegung der Werte der Steuergrößen des Produktes/Prozesses zur Erreichung der Produktmerkmale, DoE-Einsatz zur optimalen Parameter-Gestaltung hinsichtlich kritischer Qualitätsmerkmale, usw.

⇒ Ermittlung günstiger Einstellwerte für alle Parameter eines Systems

- **Toleranzdesign**

Festlegung der Toleranzwerte der Steuergrößen des Produktes/Prozesses, Ver- oder Entschärfung der Spezifikationen, usw.

⇒ Festlegung der Toleranzgrenzen/zulässigen Streuungen eines jeden Parameters

Im Zuge des Parameterdesigns kommen die nach TAGUCHI benannten statistischen Versuchspläne zum Einsatz. Diese basieren auf teilfaktoriellen Versuchsplänen mit der Auflösung III und bauen sich auf orthogonalen Feldern, welche mit dem Buchstaben „L“ gekennzeichnet werden, auf. Die allgemeine Schreibweise eines solchen Feldes wird mit

$$L_i(j^k) \quad (28)$$

angegeben. Hierin bezeichnet i die Versuchsanzahl, j die Faktorstufenanzahl und k die Faktoranzahl. In Abhängigkeit der Faktoren und Faktorstufen ergeben sich unterschiedliche Varianten an TAGUCHI Versuchsplänen. Standardisierte Felder nach TAGUCHI sind in Tabelle 8 dargestellt, vgl. [139].

Tabelle 8: Standardisierte Felder nach TAGUCHI

2-stufige Felder	3-stufige Felder	mehrstufige Felder	gemischte 2- und 3-stufige Felder
$L_4(2^3)$	$L_9(3^4)$	$L_{16}(4^5)$	$L_{18}(2 \cdot 3^7)$
$L_8(2^7)$	$L_{27}(3^{13})$	$L_{25}(5^6)$	$L_{32}(2 \cdot 4^9)$
$L_{12}(2^{11})$	$L_{81}(3^{40})$	$L_{64}(4^{21})$	$L_{36}(2^{11} \cdot 3^{12})$
$L_{16}(2^{15})$			$L_{36}(2^3 \cdot 3^{13})$
$L_{32}(2^{31})$			$L_{50}(2 \cdot 5^{11})$
$L_{64}(2^{63})$			$L_{54}(2 \cdot 3^{25})$

Einerseits gestaltet sich die Auswertung von Versuchen vergleichsweise einfach, welche nach der TAGUCHI-Methode durchgeführt wurden, da größtenteils Haupteffekte untersucht werden. Andererseits resultiert daraus auch der vielleicht größte Nachteil: Vermengungseffekten kann nicht Rechnung getragen werden – Wechselwirkungen sind miteinander vermengt und können nicht ausgewertet werden. Folglich werden diese Pläne nur empfohlen, wenn Wechselwirkungen auszuschließen sind.

Die mathematischen Hintergründe hinter diesem Ansatz sind in der einschlägigen Literatur vielfältig auffindbar und werden daher an dieser Stelle nicht weiter erläutert. Als thematischen Abschluss zum Thema „TAGUCHI Versuchspläne“ stellt Tabelle 9 die Vor- und Nachteile von eben diesen gegenüber, vgl. [65], [132] und [134].

Tabelle 9: Vor- und Nachteile von TAGUCHI Versuchsplänen im Rahmen der statistischen Versuchsplanung

Vorteile	
⊕	vergleichsweise geringe Versuchsanzahl
⊕	Eignung als Screening-Verfahren zur Ermittlung der wichtigsten Einflussfaktoren
⊕	orthogonale Versuchsanordnung
Nachteile	
⊖	Wechselwirkungen sind miteinander vermengt Wechselwirkungen lassen sich nicht auswerten
⊖	(Ausnahme sind teilweise 3- und 4-stufige Versuchspläne, bei denen eingeschränkt Auswertungen möglich sind, vgl. [65].)

Optimale Versuchspläne

Wenn die Grenzen einer konventionellen statistischen Versuchsplanung erreicht werden, können sogenannte Optimale Versuchspläne zum Einsatz kommen. Sie bieten dem Anwender nützliche Freiheiten, wenn es darum geht, einen maßgeschneiderten Versuchsplan für spezielle Anforderungen zu finden. Die zumeist primär genannten Vorteile einer Optimalen Versuchsplanung beziehen sich einerseits darauf, dass zu untersuchende Faktoren, Effekte und Wechselwirkungen gezielt wählbar bzw. eindeutig abbildbar sind. Andererseits wird die freie Wahl der Stufen pro Einflussfaktor oftmals als wesentlicher Vorteil angeführt. Oberhalb einer Mindestanzahl gilt gleiches für die Versuchsanzahl, vgl. [53]. Zudem kommen Optimale Versuchspläne dann zum Einsatz, wenn die Ergebnisse bereits durchgeführter Versuche ergänzt oder verschiedene Kombinationen von Faktoreinstellungen untersucht werden sollen, vgl. [130].

Eine erstmalige Erwähnung eines Optimalen Versuchsdesigns stammt aus dem Jahr 1935, vgl. [140]. Laut dieser „basiert optimales Versuchsdesign darauf, die manipulierbaren Faktoren, beziehungsweise Umweltbedingungen des Experiments, für a priori bestimmte Zwecke (beispielsweise Parameterschätzung, Modelldiskriminierung) so einzustellen, dass möglichst wenige Messungen mit jeweils möglichst hohem Informationsgehalt bezüglich des Zwecks gemacht werden können [141].“, vgl. [142].

Die Bestimmung der Anzahl der Versuche eines Optimalen Versuchsplans erfolgt iterativ und in Abhängigkeit des gewählten Regressions- bzw. Beschreibungsmodells. Eine allgemeine Unterteilung der Beschreibungsmodelle Optimaler Versuchspläne kann wie in Tabelle 10 dargestellt vorgenommen werden, vgl. [130] und [S3].

Tabelle 10: Optimale Versuchspläne – ein vereinfachter Variantenvergleich, vgl. [130], eigene Darstellung

A-Optimal	Die Breite der Vertrauensbereiche für die Regressionskoeffizienten ist im Mittel so klein wie möglich (Mittelwert der Quadrate).
D-Optimal	Das Volumen des gemeinsamen Vertrauensbereiches für die Regressionskoeffizienten ist so klein wie möglich (Produkt, Determinante).
E-Optimal	Die größte Breite des Vertrauensbereiches für einen Regressionskoeffizienten ist so klein wie möglich (maximaler Eigenwert der Informationsmatrix).
G-Optimal	Die größte Breite des Vertrauensbereiches für das Regressionsmodell im Prognosebereich ist so klein wie möglich (möglichst gleicher Hebel für alle Versuchspunkte).
I-Optimal	Die mittlere Breite des Vertrauensbereiches für das Regressionsmodell im Prognosebereich ist so klein wie möglich (gewichteter Mittelwert der Quadrate) – auch IV-, V- oder Q-Optimal genannt.

Der D-Optimale Versuchsplan

Auf Basis der Erkenntnisse aus [S1] hat sich das D-Optimale⁷ Design als ein besonders vorteilhaftes für die im Rahmen dieser Arbeit untersuchte Fragestellung herausgestellt, siehe Abschnitt 4.5.2. Aus diesem Grund soll im Folgenden noch einmal auf diesen Versuchsplantyp eingegangen werden.

Laut [134] definiert [143] einen D-Optimalen Versuchsplan wie folgt: „Ein Versuchsplan heißt dann D-optimal, wenn er so ausgelegt ist, daß ein vorgegebener Satz von Einflußfaktoren ‚optimal‘, d. h. mit geringst möglicher Fehlerstreuung, quantifiziert werden kann“. Diese „Optimalität“ ist mitunter dem Fakt geschuldet, dass es auf Grundlage von Voruntersuchungen und/oder -überlegungen möglich ist, gezielte Faktorstufenkombinationen auszuschließen. Jenes ist gerade dann sinnvoll, wenn bestimmte Kombinationen von Faktorstufen ausgeschlossen werden können, da sie beispielsweise

⁷ „D“ steht für Determinante

in Realität nicht erreichbar sind und eine dementsprechende statistische Versuchsplanung daher auch keine sinnvollen Ergebnisse liefern würde. Eine Veranschaulichung hierzu liefert Bild 16.

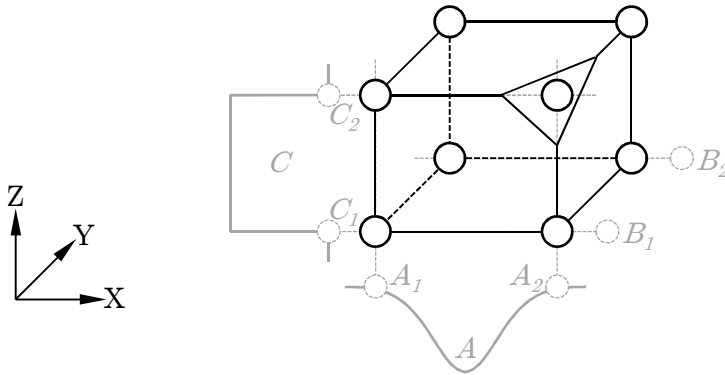


Bild 16: D-Optimaler Versuchsplan: auf Basis der Faktoren A , B und C (mit je zwei Faktorstufen) aufgespannter Versuchsraum

In diesem Bild ist ein beispielhaft aufgespannter dreidimensionaler Versuchsraum auf Basis der Faktoren A , B und C mit je zwei Faktorstufen dargestellt. Abseits bekannter Darstellungen ist in diesem Bild zu erkennen, dass die Faktorstufen nicht ausschließlich statistisch wahrscheinliche Extrema normalverteilter Faktoren sind (Faktor A) – die Faktorstufen können ebenso aus diskreten Steuergrößen resultieren (Faktor B) oder das Ergebnis anders gearterter statistischer Wahrscheinlichkeitsverteilungen sein (Beispiel hier: Gleichverteilung; Faktor C). Die Veranschaulichung in Bild 16 lässt zudem einen weiteren Vorteil einer D-Optimalen Versuchsplanung deutlich erkennen: Der Versuchsraum kann um Faktorstufenkombinationen reduziert bzw. eingeschränkt werden – hier ist jener um die Faktorstufenkombination $A_2 - B_1 - C_2$ reduziert. Einschränkungen dieser Art können in Abhängigkeit der Dimensionen des Versuchsraumes (Anzahl an Faktoren) gesetzt werden. Limitierungen bzgl. deren Quantität können zudem durch die jeweilig verwendete DoE-Software gegeben sein.

Für einen Versuchsplan mit zwei Faktorstufen pro Faktor p ergibt sich die Mindest-Gesamtversuchsanzahl n aus der Addition der drei Summanden „Anzahl Faktoren (Haupteffekte)“, „einfache Wechselwirkungen“ und „Konstante“ wie folgt:

$$\begin{aligned} \text{Anzahl Faktoren (Haupteffekte)} &= p \\ \text{einfache Wechselwirkungen } p^* &= p \cdot \frac{p-1}{2} \\ \text{Konstante} &= 1 \end{aligned} \quad (29)$$

$$n = p + p \cdot \frac{p-1}{2} + 1.$$

Bezüglich des Themas „einfache Wechselwirkungen“ sei an dieser Stelle auf die Inhalte der Tabelle 11 verwiesen. In dieser Tabelle wird exemplarisch dargestellt, was einfache Wechselwirkungen sind, wie sich deren Anzahl berechnen lässt (siehe Gleichung (29)) und wie sich die Unterscheidung gegenüber höheren Wechselwirkungen ergibt.

Tabelle 11: Darstellung und Berechnung „einfacher Wechselwirkungen“ in Abhängigkeit der Faktorenanzahl p bei je zwei Faktorstufen sowie Unterscheidung gegenüber „höheren Wechselwirkungen“

Anzahl der Faktoren p	$p = 3$ A, B, C	$p = 4$ A, B, C, D	...
Anzahl der einfachen Wechselwirkungen p^*	$p^* = 3 \cdot \frac{3-1}{2} = 3$	$p^* = 4 \cdot \frac{4-1}{2} = 6$	...
einfache Wechselwirkungen	AB, AC, BC	AB, AC, AD, BC, BD, CD	...
höhere Wechselwirkungen	ABC	ABC, ABD, ACD, BCD	...

Wenn Wechselwirkungen ausgeschlossen werden können, ergibt sich der aufgezeigte Zusammenhang aus Gleichung (29) für Versuchspläne mit 2 Faktorstufen wie folgt:

$$n = p + 1. \quad (30)$$

Wie bereits in der vorangegangenen Fußnote beschrieben, steht das „D“ bei diesem Versuchsplantyp für das Wort „Determinante“. In diesem Zusammenhang besitzen D-Optimale Versuchspläne u. a. folgende wichtige Eigenschaft, vgl. [134] und [65]:

- Maximierung der Determinante D

$$\max(D) = \max(\det(X^T \cdot X)) \quad (31)$$

bzw.

- Minimierung der Inversen der Determinante D

$$\min(D) = \min(\det(X^T \cdot X)^{-1}). \quad (32)$$

Zur Veranschaulichung dieser Eigenschaft für die konkrete Anwendung soll das bereits in Bild 16 dargestellte Beispiel dienen:

1. Gegeben seien die Faktoren A , B und C mit den Faktorstufen $A_1 = -1$, $A_1 = 2$, $B_1 = 0$, $B_2 = 1$, $C_1 = -2$ und $C_2 = 2$.
2. Aus den Faktorstufen aller Faktoren wird zunächst eine n -dimensionale Matrix generiert, welche als Design-Matrix X bezeichnet wird, siehe Gleichung (33), und einem vollfaktoriellen Versuchsplan entspricht, vgl. Tabelle 12.

Tabelle 12: Vollfaktorieller Versuchsplan basierend auf den Faktoren A , B und C

#	Faktor A	Faktor B	Faktor C
1	A_1	B_1	C_1
2	A_1	B_1	C_2
3	A_1	B_2	C_1
4	A_1	B_2	C_2
5	A_2	B_1	C_1
6	A_2	B_1	C_2
7	A_2	B_2	C_1
8	A_2	B_2	C_2

$$X = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 & C_1 \\ A_1 & B_1 & C_2 \\ A_1 & B_2 & C_1 \\ A_1 & B_2 & C_2 \\ A_2 & B_1 & C_1 \\ A_2 & B_1 & C_2 \\ A_2 & B_2 & C_1 \\ A_2 & B_2 & C_2 \end{bmatrix} \quad (33)$$

3. Da es eine der grundlegenden Bestrebungen der statistischen Versuchsplanung ist, vollfaktorielle Versuchspläne in der virtuellen aber auch in der experimentellen Welt aufgrund des gesteigerten Aufwandes zu umgehen, müssen an dieser Stelle geeignete Restriktionen für die Erstellung des D-Optimalen Versuchsplanes gefunden werden. Es kann an dieser Stelle beispielhaft gefordert sein, alle Wechselwirkungen zwischen den Faktorstufen der Faktoren A und B mit in die Versuchsplanerstellung einzubeziehen sowie einen geeigneten Zusatzversuch zuzulassen. Aus Tabelle 12 könnten als Folge dieser Forderung sowie aus dem Wissen heraus, dass die Verwendung der Faktorstufenkombination $A_2 - B_1 - C_2$ nicht zielführend ist, siehe Bild 16, die Zeilen des vollfaktoriellen Versuchsplans mit den Nummern (#) **1, 3, 5 und 7** ausgewählt werden (andere Kombinationen sind jedoch auch möglich). Der D-Optimale Versuchsplan würde an dieser Stelle wie in Tabelle 13 dargestellt aussehen.

Tabelle 13: D-Optimaler Versuchsplan basierend auf den Faktoren A , B und C : Zwischenschritt

#	Faktor A	Faktor B	Faktor C
1	A_1	B_1	C_1
3	A_1	B_2	C_1
5	A_2	B_1	C_1
7	A_2	B_2	C_1
?	$A_?$	$B_?$	$C_?$

4. Der nächste Schritt befasst sich mit der Suche nach dem optimalen Zusatzversuch. Bei diesem Minimalbeispiel stehen hierfür die Zeilen des vollfaktoriellen Versuchsplans mit den Nummern (#) **2, 4 und 8** zur Verfügung. Für die Beurteilung, welche Kombination als sinnvollste zu Erachten ist, werden nun die Determinanten auf Grundlage der entsprechend reduzierten Design-Matrizen berechnet.

$$\mathbf{X}_{1,3,5,7,2} = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 & C_1 \\ A_1 & B_2 & C_1 \\ A_2 & B_1 & C_1 \\ A_2 & B_2 & C_1 \\ A_1 & B_1 & C_2 \end{bmatrix} \Rightarrow \mathbf{X}_{1,3,5,7,2} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & -2 \\ -1 & 1 & -2 \\ 2 & 0 & -2 \\ 2 & 1 & -2 \\ -1 & 0 & 2 \end{bmatrix}$$

$$\det(\mathbf{X}_{1,3,5,7,2}^T \cdot \mathbf{X}_{1,3,5,7,2}) = 220 \quad (34)$$

$$\mathbf{X}_{1,3,5,7,4} = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 & C_1 \\ A_1 & B_2 & C_1 \\ A_2 & B_1 & C_1 \\ A_2 & B_2 & C_1 \\ A_1 & B_2 & C_2 \end{bmatrix} \Rightarrow \mathbf{X}_{1,3,5,7,4} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & -2 \\ -1 & 1 & -2 \\ 2 & 0 & -2 \\ 2 & 1 & -2 \\ -1 & 1 & 2 \end{bmatrix}$$

$$\det(\mathbf{X}_{1,3,5,7,4}^T \cdot \mathbf{X}_{1,3,5,7,4}) = 508 \quad (35)$$

$$\mathbf{X}_{1,3,5,7,8} = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 & C_1 \\ A_1 & B_2 & C_1 \\ A_2 & B_1 & C_1 \\ A_2 & B_2 & C_1 \\ A_2 & B_2 & C_2 \end{bmatrix} \Rightarrow \mathbf{X}_{1,3,5,7,8} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & -2 \\ -1 & 1 & -2 \\ 2 & 0 & -2 \\ 2 & 1 & -2 \\ 2 & 1 & 2 \end{bmatrix}$$

$$\det(\mathbf{X}_{1,3,5,7,8}^T \cdot \mathbf{X}_{1,3,5,7,8}) = 604 \quad (36)$$

5. In Gleichung (31) wurde das Ziel definiert, ein maximales Ergebnis für die Determinante nach erfolgter Matrix-Multiplikation als Entscheidungskriterium für einen optimalen Zusatzversuch zu verwenden. Ein Vergleich der Ergebnisse aus den Gleichungen (34), (35) und (36) zeigt, dass das größte Determinanten-Ergebnis bei Verwendung der achten Zeile des vollfaktoriellen Versuchsplans vorliegt. Für das betrachtete Beispiel ergibt sich unter Berücksichtigung der genannten Randbedingungen der in Tabelle 14 dargestellte D-Optimale Versuchsplan.

Tabelle 14: D-Optimaler Versuchsplan basierend auf den Faktoren A, B und C

#	Faktor A	Faktor B	Faktor C
1	A_1	B_1	C_1
3	A_1	B_2	C_1
5	A_2	B_1	C_1
7	A_2	B_2	C_1
8	A_2	B_2	C_2

Weiterführende mathematische Hintergründe zu diesem Ansatz sind vielfältig verfügbar, siehe bspw. [132], und werden an dieser Stelle nicht weiter erläutert. Als thematischen Abschluss zum Thema „Der D-Optimale Versuchsplan“ stellt Tabelle 15 dessen Vor- und Nachteile gegenüber, vgl. [S2], [S3], [132] und [134].

Tabelle 15: Vor- und Nachteile eines D-Optimalen Designs im Rahmen der statistischen Versuchsplanung

Vorteile	
⊕	Anzahl der Faktoren ist frei wählbar
⊕	Anzahl der Faktorstufen ist von Faktor zu Faktor frei wählbar
⊕	Abstände zwischen den Faktorstufen sind frei wählbar (äquidistant/nicht äquidistant)
⊕	Lage der Faktoren im n -dimensionalen Versuchsraum ist frei wählbar
⊕	Versuchsanzahl ist nahezu frei wählbar (Mindest-Versuchsanzahl muss beachtet werden)
⊕	keine Vermengung von Faktoren mit Wechselwirkungen
⊕	Wechselwirkungen können eindeutig bestimmt werden
⊕	Möglichkeit zur Erweiterung des Versuchsplans durch neue Faktoren
⊕	Möglichkeit zur Verwertung bereits durchgeführter Versuche (Ergebnisse können in den Versuchsplan mit einbezogen werden)
⊕	Möglichkeit zur Eingabe von Neben- und Zwangsbedingungen (Begrenzung d. Versuchsraums, da bestimmte Einstellungen und Kombinationen, die nicht erreichbar sind, ausgeschlossen werden können)
⊕	resultierender Versuchsaufwand ist vergleichsweise gering
Nachteile	
⊖	Erstellung des Versuchsplans erfordert geeignete Rechenalgorithmen (DoE-Software wird benötigt) ⇒ schwer nachvollziehbare Auswahl der Versuchspunkte
⊖	Orthogonalität ist keine zwingende Eigenschaft D-Optimaler VP's
⊖	Streuungen können aufgrund vergleichsweise geringer Versuchsanzahl nur schwer bestimmt werden (Zusatzversuche empfohlen)

2.3.3 Finite-Elemente-Methode/*Finite Element Method*

Entsprechend den Ausführungen von Kapitel 2 schließen sich in diesem Teilabschnitt die Inhalte zur Thematik der Finite-Elemente-Methode (FEM) an. Jene reihen sich in dieser Arbeit im Gesamtkontext der „Virtuellen Methoden zur Absicherung von Toleranzlagen“ als inhaltliches Bindeglied zwischen den Methoden der statistischen Versuchsplanung (Abschnitt 2.3.2) sowie den Methoden des *Robust Design* (Abschnitt 2.3.5) ein, siehe Bild 5.

Die Finite-Elemente-Methode wurde unter diesem Namen erstmals durch die Veröffentlichung „*The finite element method in plane stress analysis*“ des Amerikaners RAY W. CLOUGH im Jahre 1960 bekannt, vgl. [144], in welcher

er die „Modellvorstellung eines Kontinuums als eine Zusammensetzung von Teilbereichen (finiten Elementen) verband. (Vereinfacht ausgedrückt diskretisiert diese Methode in einem ersten Schritt vorliegende Geometrien sowohl auf Basis zweidimensionaler Schnitte als auch im Dreidimensionalen. Im Folgenden wird in jedem resultierenden) Teilbereich (...) das Elementverhalten durch einen Satz von Ansatzfunktionen beschrieben, die die Verschiebungen und Spannungen in diesem Teilbereich wiedergeben“, vgl. [145].

Die Finite-Elemente-Methode beschreibt ein numerisches Verfahren zur realitätsnahen Lösung definierter physikalischer Probleme, welches zumeist im Rahmen der virtuellen Produktentwicklung eingesetzt wird. Jener Einsatz ist gerade dann sinnvoll, wenn analytische Ansätze bspw. aufgrund einer vorhandenen Modell-/Geometriekomplexität oder durchzuführenden Parametervariationen eine unzureichende Ergebnisgüte aufweisen. Als „universelles Analysewerkzeug (ermöglicht es) tiefe Einblicke in die Elastik, Dynamik, Kinematik/Kinetik sowie das thermische bzw. strömungsmechanische Verhalten von Bauteilen und Systemen“, vgl. [145]. Gerade die Vorhersagegüte elastischer Effekte von Bauteilen/Baugruppen bzw. die Berücksichtigung elastischer und nichtlinearer Effekte auf das Systemverhalten stellt im Rahmen dieser Arbeit einen wesentlicher Bestandteil dar.

Entsprechende Fachliteratur sowohl zu den Grundlagen der Thematik als auch zur spezifischen Anwendung ist auf nationaler und internationaler Ebene vielfältig verfügbar. Exemplarisch sei an dieser Stelle auf die Quellen [145] und [146] verwiesen. Im Folgenden wird ausschließlich auf ausgewählte, für die Arbeit relevante Inhalte eingegangen.

Wie bereits in Kapitel 1 angesprochen, fokussiert sich diese Arbeit auf den Praxisdemonstrator Fahrzeugeinstieg, welcher sich in seinen funktionsrelevanten Hauptbestandteilen aus dem Seitenrahmen, den Türen und dem Dichtsystem zusammensetzt, siehe Bild 2. Durch das verbaute Mehr-Ebenen-Dichtsystem werden Kräfte zwischen den andernfalls nahezu kontaktfreien⁸ Baugruppen Seitenrahmen und Tür übertragen, die in der Folge zu elastischen Verformungen des Gesamtsystems führen. „Da davon ausgegangen werden kann, dass diese Effekte in Bezug auf das Gesamtsystem nicht vollständig linearer Natur sind, soll der Fokus auf die Berücksichtigung des nichtlinearen Systemverhaltens als Folge der interagierenden Beitragsleister gelegt werden“, vgl. [P1].

⁸ Auch ohne Mehr-Ebenen-Dichtsystem sind Tür und Seitenrahmen über die Türscharniere permanent und das Türschloss temporär miteinander verbunden und folglich zu keinem Zeitpunkt kinematisch vollständig voneinander entkoppelt.

Bild 17 zeigt den konventionellen FEM-Simulationsablauf in Kombination mit einer klassischen *Black Box*-Darstellung. Als *Black Box* wird an dieser Stelle die eigentliche FEM-Simulation (*Processing*) angesehen. Die aufgezeigten *In*- und *Output*-Größen in die bzw. aus der *Black Box* repräsentieren an dieser Stelle die wesentlichen Inhalte von *Pre*- und *Post-Processing*. Im Folgenden wird auf diese eingegangen.

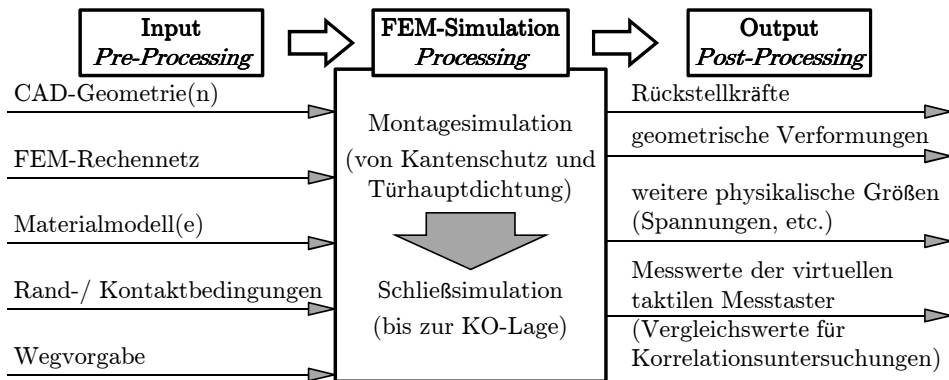


Bild 17: FEM-Simulationsablauf als *Black Box*-Darstellung

Input/Pre-Processing

Das sogenannte *Pre-Processing* respektive die Modellbildung, hat einen direkten Einfluss auf die Güte der berechneten Simulationsergebnisse (Näherungslösungen), was diesen Prozessschritt als den wichtigsten erscheinen lässt. Folglich ist dieser in der Regel auch mit einem entsprechenden Arbeitsaufwand zur Vermeidung von Modellierungsfehlern verbunden. Wesentliche Bestandteile des *Pre-Processing* werden im Folgenden aufgelistet und beschrieben.

- **CAD-Geometrie(n)**

Die zentrale Grundvoraussetzung zur Durchführung von FEM-Simulationen ist das Vorhandensein eines CAD-Modells. Bei diesem kann es sich je nach Anforderung um (ein) exakte(s) Bauteilmodell(e) oder (ein) Ersatzmodell(e) (Flächen- oder Volumenmodell(e)) handeln.

- **FEM-Rechennetz**

Wird die Voraussetzung bzgl. der Existenz eines CAD-Modells erfüllt, ist dieses vor Simulationsbeginn in ein Finite-Elemente-Rechennetz zu überführen. Bei diesem Prozessschritt gilt es zu beachten, dass „Bauteile gewisse konstruktive Gegebenheiten enthalten (können), die für das Festigkeitsverhalten von geringer Bedeutung sind, aber die Netzgenerierung erschweren

(...). Demgemäß ist zu prüfen, ob geometrische Details vernachlässigt werden können (...) oder inwiefern tatsächlich Kontakt [147] zu berücksichtigen ist“, vgl. [145]. Wesentlich ist hierbei einerseits die Wahl der Elementtypen, welche u. a. sowohl direkt vom gewählten Simulationsansatz (1D/2D/3D) als auch von den verzielten physikalischen Ergebnisgrößen abhängen. Andererseits muss an dieser Stelle für jedes Bauteil der Baugruppe eine Entscheidung getroffen werden, ob die rechnerunterstützte Vernetzung strukturiert oder unstrukturiert ausgeführt werden soll bzw. inwiefern eine Mischform (hybrides Netz) geeignet ist.

„Der Vorteil einer unstrukturierten Vernetzung (...) liegt in der Möglichkeit, diese bei Bedarf weitestgehend automatisiert ablaufen zu lassen. Nachteilig kann sich die unstrukturierte Vernetzung durch die Vielzahl von ungerichteten Gitterzellengrenzen auf die Qualität der numerischen Lösung auswirken.“, vgl. [54]. Hybride Netze ermöglichen es u. a., an den Kontaktflächen und wandnahen Bereichen von Bauteilen strukturiert zu vernetzen, was in geringerer numerischer Dissipation resultiert. Für nicht wandnahe Bereiche könnte auf eine unstrukturierte Vernetzung zurückgegriffen werden, die mit steigendem Abstand zu den Kontaktflächen durch eine stetige Aufweitung der Zellgrößen definiert sein kann. Dieses Vorgehen kann in einer Zeitersparnis sowohl bei der Erstellung des Rechnetzes (mögl. Automatisierung) als auch bei der eigentlichen Simulationsdurchführung resultieren.

Zur Minimierung von Fehlern bei der numerischen Berechnung der Näherungslösung aufgrund von „erhebliche(n) Größenunterschiede(n) bei benachbarten Zellen des Gitters“, vgl. [54], ist es bei strukturierten 2D-Netzen zudem möglich, diese Größenunterschiede zwischen benachbarten Zellen über einen iterativen Prozess zu verringern. Jener Prozess, aus der numerischen Aeroakustik stammend (CAA, engl.: *Computational AeroAcoustics*), wird als *grid spacing* bezeichnet, vgl. [148]. Dieselbe Intention verfolgend, ist es als erweiternder Schritt zudem möglich, das 2D-Rechengitter zu glätten. Dieser Iterationsprozess, ebenfalls aus der numerischen Aeroakustik stammend, wird als *grid smoothing* bezeichnet.

Bild 18 zeigt anhand eines Beispiels, wie ein strukturiertes (a), ein unstrukturiertes (b) und ein hybrides (c) 2D-FEM-Rechnetetz bzw. -gitter bei einer 2D-Anwendung aussehen kann. Zudem wird in diesem Bild ein Beispiel für die vorgestellten 2D-CAA-Anwendungen *grid spacing* und *grid smoothing* gegeben (d)-(f).

Die Entscheidung, mit welchem Aufwand welcher Vernetzungsansatz gewählt wird, beruht in der Regel entweder auf vorab durchzuführenden Parameterstudien oder auf der Expertise von Fachleuten.

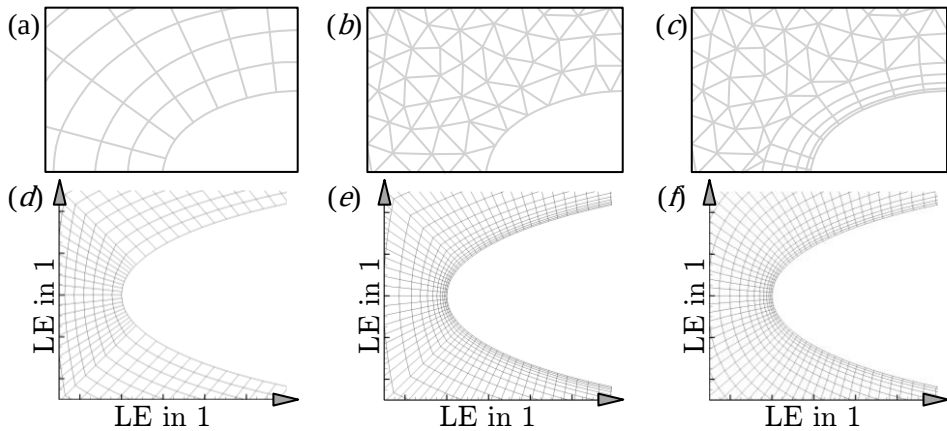


Bild 18: Vernetzungsalternativen bei 2D-FEM-Rechengittern (a) strukturiertes ~ (b) unstrukturiertes ~ (c) hybrides ~ (d) ~ vor *grid spacing* (e) ~ nach *grid spacing* (f) ~ nach *grid spacing* und *grid smoothing*

• Nichtlinearitäten

In Bild 19 wird der grundlegende Unterschied zwischen einer linearen und einer nichtlinearen Elastizität am Beispiel von Kraft-Weg-Diagrammen (F - L) bzw. Spannungs-Dehnungs-Diagrammen (σ - ϵ) in den Teilabbildungen (a) und (b) angedeutet.

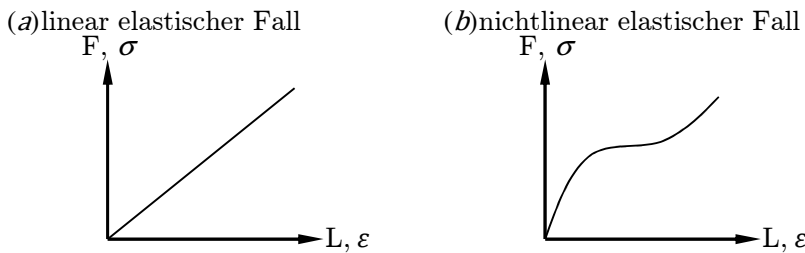


Bild 19: Exmpl. Darstellung linearer und nichtlinearer Elastizität durch Kraft-Weg- bzw. Spannungs-Dehnungs-Diagramme, vgl. [149] (a) Arbeitsdiagramm lineare Elastizität (b) Arbeitsdiagramm nichtlineare Elastizität

Lineare Systeme: Ein lineares System zeichnet sich dadurch aus, dass sich die auf eine definierte Kraft/Last F als Reaktion eintretende Verformung/ Längenänderung ΔL proportional zu eben jenem Krafteintrag verhält. „Es ist (...) nicht erforderlich, diese verschiedenen Lasten per FEM-Analyse durchzurechnen, sondern man kann das erste Berechnungsergebnis mit dem entsprechenden Faktor skalieren um die Ergebnisse für die anderen Lasten zu erhalten. Dies gilt für alle Ergebnisse der FEM-Berechnung, also nicht nur für Verformungen, sondern auch für Spannungs- und Reaktionskräfte,“ vgl. [150].

Nichtlineare Systeme: In der Realität ist ein idealisierter linearer Zusammenhang zwischen Kraft und Verformung häufig nicht gegeben. Ursächlich für nichtlineare Systeme sind geometrische Nichtlinearitäten, Kontakt-Nichtlinearitäten sowie Material-Nichtlinearitäten. Für Systeme, die derartigen Effekten unterliegen, können entgegen einer linearen Betrachtung keine gleichbleibenden Steifigkeiten angenommen werden. Die Steifigkeitsmatrizen müssen während der iterativen Lösung des nichtlinearen Gleichungssystems zur Abbildung der vorliegenden Verformungssituation mit den Iterationsschritten aktualisiert werden. Die Berücksichtigung derartiger Nichtlinearitäten steigert folglich sowohl den Aufwand, welcher beim Aufbau der FEM-Simulation betrieben werden muss, als auch die Güte der resultierenden Ergebnisse, sollen diese doch komplexe reale Effekte abbilden.

Geometrische Nichtlinearität

Sind die Deformationen eines Systems aufgrund äußerer Lasten groß, so ist von geometrischen Nichtlinearitäten die Rede. **Die vereinfachenden Annahmen**

- alle kinematischen Größen (Verschiebungen, Rotationen, Verzerrungen) sind klein und
- die Lasten wirken in der unverformten Ausgangsgeometrie

gelten nicht mehr. Die Bilanzierung muss in der aktuellen, verformten Lage des Körpers erfolgen, welche zunächst unbekannt ist. In diesem Fall ist eine geometrisch nichtlineare Beschreibung notwendig. [151]

Eine Einteilung geometrischer Nichtlinearitäten kann laut [151] in mehrere Kategorien erfolgen. Die drei häufigsten sind in Bild 20 dargestellt.

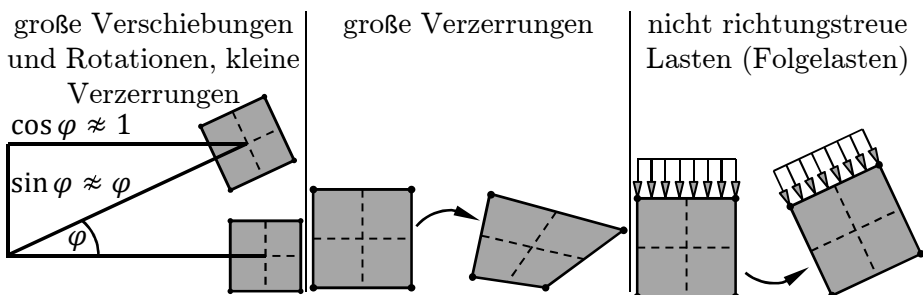


Bild 20: Unterscheidung geometrisch nichtlinearer Effekte, vgl. [151, Tabelle 9.1], eigene Darstellung

Kontakt-Nichtlinearität

Bei der FE-Analyse von Kontaktproblemen zwischen interagierenden Strukturen können auch nichtlineare Kontaktverhalten abgebildet werden. Diese Kontakt-Nichtlinearitäten beschreiben die veränderlichen Eigenschaften der Randbedingungen eben jener beteiligten Strukturen, welche sich relativ zueinander bewegen. In [152] wird dies wie folgt veranschaulicht: „Tritt während der Verformung eines Bauteils ein Kontakt bzw. Anschlag auf, wird die lineare Eigenschaft verletzt, weil ein Verdoppeln der Kraft nicht mehr zu einer Verdopplung des Verformungsweges führt. Dies kann auch so erklärt werden: Charakteristisch für Kontakt-Nichtlinearitäten ist, dass sich bei unterschiedlicher Verformung unterschiedliche Lagerbedingungen ergeben. Folglich ändert sich die Steifigkeit des realen Bauteils während der Verformung sehr abrupt. Die lineare FEM kann dies nicht berücksichtigen, weil immer die Steifigkeit der ursprünglichen Geometrie verwendet wird.“

Material-Nichtlinearität

Auf die Inhalte zum Thema Material-Nichtlinearitäten wird im Abschnitt „Modellierung von Materialmodellen“ ab Seite 71 eingegangen.

- **Materialmodell(e)**

FEM-Simulationen ermöglichen es, Bauteilen physikalische Materialeigenschaften vor der eigentlichen Simulationsdurchführung zuzuweisen. Diese Zuweisung unterstützt das Ziel, die Reaktion eines Bauteils auf externe und auch interne Einflüsse (bspw. Eigengewicht) vorherzusagen. Der andernfalls aus ideal starren Betrachtungen resultierende Lösungsraum kann folglich realitätsnäher angegeben werden. Vor diesem Hintergrund ist die Wahl geeigneter Materialmodelle als wesentliche *Input*-Größe anzusehen.

Für jene numerische Analyse des Verhaltens **metallischer Bauteile** (Stahl, Aluminium, etc.) können in den entsprechenden Materialmodellen je nach Simulationsumgebung *E*-Module, Querkontraktionszahlen, thermische Ausdehnungskoeffizienten sowie Spannungsgrenzen berücksichtigt werden, vgl. [150]. „Dies sind Werkstoffkennwerte, die die maximal zulässige Spannung bis zum Fließen (...) oder bis zum Bruch (...) sowohl für Zug (...) als auch für Druck (...) beschreiben“, [150].

Zur Ermittlung dieser Werkstoffkennwerte werden standardisierte wissenschaftliche Verfahren zur Werkstoffprüfung durchgeführt. Der prominenteste Vertreter ist an dieser Stelle der Zugversuch (zerstörendes, quasi-statisches Prüfverfahren). Unter Laborbedingungen können durch diesen genormte Metallproben mit definierten Querschnittsflächen auf Eigenschaften wie Zugfestigkeit, Bruchdehnung und Streckgrenze hin unter-

sucht werden. Für standardisierte Metalle sind die Materialdaten in Normen niedergeschrieben und aus Materialdatenbanken heraus verfügbar. Die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Werkstoffkennwerte werden in Abschnitt 4.5.5 beschrieben.

Das Materialverhalten **polymerer Materialien** wird bei FEM-Simulationen durch Gleichungssysteme (Materialmodelle) beschrieben, welche einen Zusammenhang zwischen „Spannung, Dehnung, Zeit und Temperatur in Abhängigkeit bestimmter werkstoffspezifischer Materialparameter“ als Funktion der Formänderungsenergiedichte W formulieren, vgl. [S5].

Für **Elastomere** (nichtlinear-elastisches Verhalten) wie bspw. Gummi (homogen, isotrop, inkompressibel) werden zur Abbildung quasistatischer Bauteileigenschaften hyperelastische Materialmodelle in der FEM-Simulation verwendet. Namentlich sind die drei prominentesten Vertreter das NEO-HOOKE-Modell, das MOONEY-RIVLIN-Modell und das ODGEN-Modell. Diesen Modellen zugrunde gelegt sind die Themen „Streckung“, „CAUCHY-GREEN-Tensor“ und „Formänderungsenergiedichte“, auf welche vorab eingegangen werden soll.

Mit Bezug auf Bild 21 (a) bezeichnet die **Streckung** λ das Verhältnis zwischen der Endlänge L und der Anfangslänge L_0 eines elastischen Körpers in der entsprechenden Raumrichtung:

$$\lambda = L/L_0 . \quad (37)$$

Der **CAUCHY-GREEN-Tensor**, welcher bei FEM-Berechnungen zur Beschreibung von Deformationen verwendet wird, definiert sich durch die Streckungen in den drei Raumrichtungen, siehe Gleichung (38).

$$\mathbf{C} = \begin{pmatrix} \lambda_1^2 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2^2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3^2 \end{pmatrix} \quad (38)$$

Er „kann durch seine drei Invarianten I_1 , I_2 und I_3 charakterisiert werden. Diese sind unabhängig von der Wahl des Koordinatensystems, d. h. sie verändern sich bei Transformation (Drehung) des Koordinatensystems nicht.“, vgl. [153]. Jene werden in Gleichung (39) beschrieben.

⇒ Invariante I_1 : Längenänderung der Raumdiagonalen eines kubischen Elements

⇒ Invariante I_2 : Oberflächenänderung eines kubischen Elements

⇒ Invariante I_3 : Volumenänderung eines kubischen Elements

$$\text{Spur}(\mathbf{C}) = I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \quad (39a)$$

$$I_2 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_1^2 \lambda_3^2 \quad (39b)$$

$$\det(\mathbf{C}) = I_3 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2 \quad (39c)$$

„Aufgrund der bei Elastomeren auftretenden großen Deformation kommt es zu geometrischen Nichtlinearitäten, die es nicht mehr zulassen, die Spannungs-Dehnungs-Beziehung linearisiert und über einen E -Modul zu beschreiben. Bei hyperelastischen Materialmodellen wird daher die Spannungs-Dehnungs-Beziehung aus der Formänderungsenergiedichte W abgeleitet“, vgl. [149]. Diese **Formänderungsenergiedichte** ist eine Funktion der Invarianten des CAUCHY-GREEN-Tensors, $W = f(I_1, I_2, I_3)$, und wird über folgenden Zusammenhang formuliert, vgl. [154]:

$$W = \sum_{i+j+k=1}^{\infty} C_{ijk} \cdot (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j (I_3 - 1)^k. \quad (40)$$

Hierin sind C_{ijk} Materialparameter. Für den inkompressiblen Fall ergibt sich für Gleichung (39c):

$$I_3 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2 = 1. \quad (41)$$

NEO-HOOKE-Modell

Die Formänderungsenergiedichte W wird bei diesem Materialmodell unter Berücksichtigung der ersten Invarianten des CAUCHY-GREEN-Tensors als Auszug aus Gleichung (40) über den Zusammenhang

$$\begin{aligned} W_{\text{NEO-HOOKE}} &= C_{10} (I_1 - 3) \\ &\vdots \text{ mit Gleichung (39a)} \end{aligned} \quad (42)$$

$$W_{\text{NEO-HOOKE}} = C_{10} (\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 - 3)$$

beschrieben. Hierin bezeichnet die Größe C_{10} einen konstanten Materialparameter, welcher über uniaxiale Zugversuche ermittelt werden kann. Sollten kein Probenmaterial zur Verfügung stehen oder andere Randbedingungen einen derartigen Versuch verhindern, kann dieser Parameter, wie in den Gleichungen (43a) und (43b) beschrieben, approximiert werden. In diesen bezeichnen die Variablen E und G das Elastizitäts- bzw. Schub-Modul.

$$C_{10} = E/6 \quad (43a)$$

$$C_{10} = G/2 \quad (43b)$$

Das Schubmodul selbst kann als Funktion der Shore-A-Härte H_A des zu untersuchenden Elastomers approximiert werden, vgl. [149]:

$$G(H_A) = \frac{0,07515 \cdot H_A + 0,549}{(4,1 + 3,9 \cdot \exp^{-1,397 \cdot h}) \cdot (0,395 \cdot h + 0,315 \cdot h^2)} \quad (44a)$$

$$\begin{aligned} & \vdots \text{ mit} \\ h &= 0,025 \cdot (100 - H_A) . \end{aligned} \quad (44b)$$

MOONEY-RIVLIN-Modell

Die Formänderungsenergiedichte W wird analog Gleichung (40) durch

$$\begin{aligned} W_{\text{MOONEY-RIVLIN}} &= C_1 (I_1 - 3) + C_2 (I_2 - 3) + C_3 (I_3 - 1) \\ &\vdots \text{ mit Gleichungen (39a), (39b) und (39c)} \\ W_{\text{MOONEY-RIVLIN}} &= C_1 (\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 - 3) \\ &+ C_2 (\lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_1^2 \lambda_3^2 - 3) \\ &+ C_3 (\lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2 - 1) \end{aligned} \quad (45)$$

beschrieben. Für diese Erweiterung des NEO-HOOKE-Modells, welche nun auch die zweite und dritte Invariante I_2 und I_3 des CAUCHY-GREEN-Tensors berücksichtigt, ergibt sich unter Anwendung der Inkompressibilitätsbedingung aus Gleichung (41) der Zusammenhang

$$\begin{aligned} W_{\text{MOONEY-RIVLIN, inkompr.}} &= C_1 (\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 - 3) \\ &+ C_2 \left(\frac{\lambda_1^2 \lambda_2^2}{\lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2} + \frac{\lambda_2^2 \lambda_3^2}{\lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2} + \frac{\lambda_1^2 \lambda_3^2}{\lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2} - 3 \right) \\ &= C_1 (\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 - 3) \\ &+ C_2 \left(\frac{1}{\lambda_1^2} + \frac{1}{\lambda_2^2} + \frac{1}{\lambda_3^2} - 3 \right) . \end{aligned} \quad (46)$$

Mit $C_1 = C_{10}$ und $C_2 = C_{01}$ folgt für die Formänderungsenergiedichte W

$$W_{\text{MOONEY-RIVLIN, inkompr.}} = C_{10} (I_1 - 3) + C_{01} (I_2 - 3) . \quad (47)$$

Laut [155] ist dieses Materialmodell fähig, das mechanische Werkstoffverhalten der Elastomere bis ca. 100% technische Dehnung zu beschreiben, vgl. [149].

ODGEN-Modell

Die Formänderungsenergiedichte W wird bei diesem Materialmodell mit Bezug auf die erste Invariante des CAUCHY-GREEN-Tensors durch

$$W_{\text{ODGEN}} = \sum_{i=1}^N \frac{\mu_i}{\alpha_i} (\lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + \lambda_3^{\alpha_i} - 3) \quad (48)$$

beschrieben, vgl. [156]. Hierin bezeichnet die Größe N den Ordnungsgrad des Polynoms, μ und α sind Materialkonstanten (mit $\alpha_i \cdot \mu_i > 0$). Mit diesen Größen lassen sich u. a. auch die zuvor vorgestellten Materialmodelle nach NEO-HOOKE und MOONEY-RIVLIN abbilden:

$$\begin{aligned} W_{\text{ODGEN}} (N = 1, \alpha_1 = 2) &= \frac{\mu_1}{2} (\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 - 3) \\ &= W_{\text{NEO-HOOKE}} \\ W_{\text{ODGEN}} (N = 2, \alpha_1 = 2, \alpha_2 = -2) &= \frac{\mu_1}{2} (\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 - 3) \\ &\quad + \frac{\mu_2}{-2} \left(\frac{1}{\lambda_1^2} + \frac{1}{\lambda_2^2} + \frac{1}{\lambda_3^2} - 3 \right) \\ &= W_{\text{MOONEY-RIVLIN}} \end{aligned} \quad (49)$$

Für den inkompressiblen Fall ergibt sich für Gleichung (48):

$$W_{\text{ODGEN, inkompr.}} = \sum_{i=1}^N \frac{\mu_i}{\alpha_i} (\lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + \lambda_1^{-\alpha_i} \lambda_2^{-\alpha_i} - 3) \quad (50)$$

Weitere hyperelastische Materialmodelle

Neben den benannten hyperelastischen Materialmodellen haben sich weitere in der Wissenschaft etabliert. Namentlich sollen an dieser Stelle die Materialmodelle nach KILIAN, vgl. [157], ARRUDA-BOYCE, vgl. [158], und YEOH, vgl. [159], genannt werden. Weiterführende Fachliteratur zum Thema ist vielfältig verfügbar und soll an dieser Stelle nicht weiter thematisiert werden. Exemplarisch sei auf eine ansprechende Zusammenfassung in [160] verwiesen.

In Abhängigkeit des jeweilig gewählten Modells ergeben sich Unterscheidungen bzgl. des Simulationsaufwandes, des Gültigkeitsbereiches und der Abbildungsgenauigkeit hinsichtlich realer physikalischer Eigenschaften.

Die Modellkomplexität nimmt zu, wenn sich Materialeigenschaften als Folge variierender Randbedingungen ändern. Als Beispiel kann eine mögliche Temperaturabhängigkeit der Materialeigenschaften genannt werden.

Modellierung von Materialmodellen

Ist kein geeignetes Materialmodell vorhanden, ist die Modellierung eines neuen, bspw. in Abgleich mit physischen Bauteiltests, möglich. Für Bauteile, deren Materialität elastische Geometrieveränderungen als Folge externer Krafteinwirkung(en) zulässt, muss dieses elastische Verhalten, ggf. in Kombination mit den angesprochenen variierenden Randbedingungen, im Materialmodell mit abgebildet werden.

Die Charakterisierung bzw. Klassifizierung der Elastizität beschreibt hierbei einen wesentlichen Schritt. Hierfür können Kraft-Weg-Diagramme verwendet werden, wie sie im Rahmen der Werkstoffwissenschaften in der Regel durch Zugversuche ermittelt werden. Einerseits als Symbol für die Elastizität und andererseits als Mittel der Veranschaulichung soll im Folgenden die Feder dienen (HOOKE'sches Element), siehe Bild 21 (a).

Für den **linear elastischen Fall** (siehe Bild 21 (b)) gilt für eine Kraftbeaufschlagung der Feder der Zusammenhang

$$F = k \cdot \Delta L \quad (51)$$

wobei F die angreifende (Zug-)Kraft/Last, k die Federsteifigkeit und ΔL die Längenänderung/Verschiebung der Feder ist. Im Sinne der Vergleichbarkeit ist an dieser Stelle eine kenngrößenbasierte Darstellung zuträglich. Jene wird durch Transformationen auf Spannungs-Dehnungs-Diagramme umgestellt, vgl. [161]:

Spannung σ

⇒ (Zug-)Kraft F bezogen auf Anfangsquerschnitt S_0

$$\sigma = \frac{F}{S_0} \text{ in } \frac{N}{mm^2} \text{ oder in } MPa \quad (52)$$

Dehnung ε

⇒ Längenänderung ΔL bezogen auf Anfangslänge L_0

$$\varepsilon = \frac{L - L_0}{L_0} \cdot 100 = \frac{\Delta L}{L_0} \cdot 100 \text{ in } \% \quad (53)$$

Es gilt das HOOKE'sche Gesetz:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} . \quad (54)$$

Für den **nichtlinear-elastischen Fall** (siehe Bild 21 (c)) ist das HOOKE'sche Gesetz nur bedingt in differentieller Form gültig (E-Modul E ist eine Funktion der Dehnung ε : $E = E(\varepsilon)$) oder trifft gar nicht zu:

$$E(\varepsilon) = \frac{\partial \sigma(\varepsilon)}{\partial \varepsilon} . \quad (55)$$

Ist es das Ziel, die zeitlich veränderlichen Eigenschaften von Querschnittsfläche und Anfangslänge eines Materials bei der Modellierung des Materialmodells im Rahmen der FEM-Simulation mit abzubilden (Experimentalisches Beispiel: Querschnittsverjüngung des Materials im Zugversuch), wird vorgeschlagen das wahre Spannungs-Dehnungs-Diagramm und daraus ableitbare Kennwerte zu diesem Zwecke zu nutzen.

Wahre Dehnung ε'

Die „wahre“ Dehnung ε' , welche auch als logarithmische Dehnung oder HENCKY-Dehnung bezeichnet wird, stellt einen Bezug auf die aktuelle Körperlänge her, nachdem dieser bereits durch vorangegangene Krafteinwirkungen vordeformiert ist.

⇒ natürlicher Logarithmus der Länge L bezogen auf Anfangslänge L_0

$$d\varepsilon' = \frac{dL}{L} \Rightarrow \varepsilon' = \ln\left(\frac{L}{L_0}\right) \cdot 100 \text{ in } \% \quad (56)$$

Für kleine Dehnungen besteht zwischen den Definitionen von wahrer Dehnung ε' und technischer Dehnung⁹ ε (auch CAUCHY-Dehnung genannt) der Zusammenhang

$$\varepsilon' = \ln(1 + \varepsilon) \approx \varepsilon . \quad (57)$$

Die in Bild 21 (b) und (c) aufgezeigten Kraft-Weg-Diagramme werden auch als Last-Verschiebungs-Kurven bezeichnet, vgl. [162]. Unter Zuhilfenahme von Gleichgewichtspunkten können jene Kurven und somit die nichtlinear-elastischen Materialien klassifiziert werden, siehe Bild 22.

⁹ Die technische Dehnung ε berücksichtigt mehrere (mindestens zwei) aufeinander folgende Krafteinwirkungen bezogen auf die konstante Anfangslänge L_0 . Weiterführende Fachliteratur zu diesem Thema ist vielfältig verfügbar und soll an dieser Stelle nicht weiter thematisiert werden.

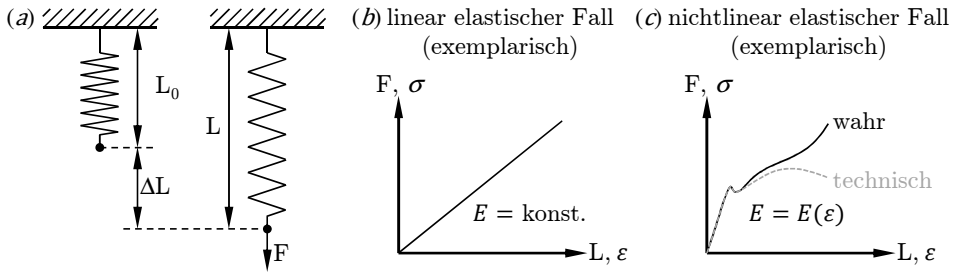


Bild 21: Exmpl. Darstellung linearer und nichtlinearer Elastizität durch Kraft-Weg- bzw. Spannungs-Dehnungs-Diagramme, vgl. [149] (a) HOOKE'sches Element „Feder“ als Symbol für die Elastizität (b) Arbeitsdiagramm lineare Elastizität (c) Arbeitsdiagramm nichtlineare Elastizität

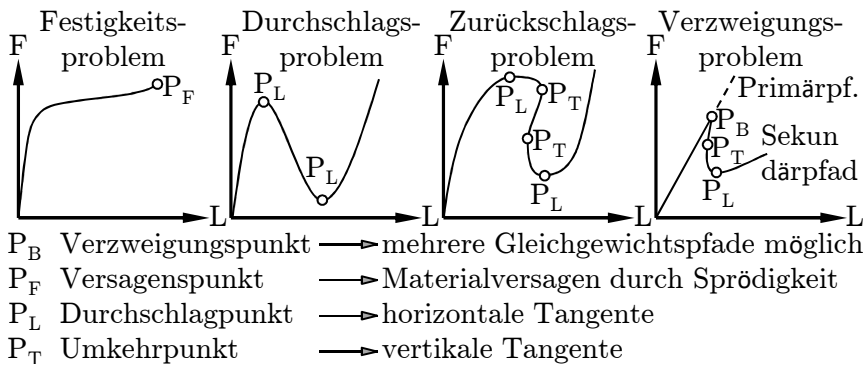


Bild 22: Darstellung von Gleichgewichtspunkten in einer Auswahl repräsentativer Last-Verschiebungs-Kurven, vgl. [S5, Abbildung 14], eigene Darstellung

Die Auswahl des verwendeten Materialmodells für die im Rahmen dieser Arbeit angestellten Untersuchungen erfolgt in Abschnitt 4.5.3.

• Rand-/Kontaktbedingungen

Ein weiterer wesentlicher Schritt befasst sich mit dem Aufprägen von Randbedingungen. „Randbedingungen sind Kontaktbedingungen (*Constraints*) zwischen einzelnen Elementen oder Knoten, Lagerungen (*Boundary Conditions*) und Kraftaufbringungen (*Loads*)“, vgl. [S6]. An dieser Stelle soll ausschließlich auf die Möglichkeit und Notwendigkeit, Randbedingungen zu definieren, verwiesen werden. Die mathematischen Hintergründe bzgl. der Umsetzung einer Aufbringung von Randbedingungen sind in der Fachliteratur vielfältig verfügbar.

• Wegvorgabe

Die *Input*-Größe „Wegvorgabe“ soll an dieser Stelle darauf verweisen, dass das Berechnungsergebnis einer FEM-Simulation nicht ausschließlich die Folge vordefinierter stationärer und/oder dynamischer Lasten ist. Vielmehr

können durch das Aufeinandertreffen von Bauteilen als Folge definierter Verschiebungen (Wegvorgaben) Lastfälle entstehen, die das Berechnungsergebnis nachhaltig beeinflussen. Exemplarisch sei an dieser Stelle auf den Demonstrator Fahrzeugeinstieg verwiesen. Durch das Eindrehen der Tür wird u. a. die Dichtebene „Kantenschutz“ sukzessive mit einer veränderlichen Last beaufschlagt, bis das Türschloss die gewünschte Lage gegenüber dem Schließbügel auf dem Seitenrahmen eingenommen hat. Die bei diesem Schließvorgang eingeleiteten Kräfte (Aktion) führen wiederum zu Gegenkräften (Reaktion) auf Seiten der Dichtebene und folglich zu einem veränderten Verformungszustand aller beteiligten Bauteile (sofern diese nicht ideal starr modelliert sind) gegenüber einem Schließvorgang ohne diese Dichtebene.

FEM-Simulation/Processing

Nach erfolgtem *Pre-Processing* erfolgt in diesem Prozessschritt das *Processing* respektive die eigentliche FEM-Simulation durch den sogenannten *Solver*. Entsprechend den einleitenden Ausführungen von Abschnitt 2.3.3 ist die Finite-Elemente-Methode ein numerisches Verfahren zur realitätsnahen Lösung definierter physikalischer Probleme durch das Aufstellen der beschreibenden partiellen Differentialgleichungen und deren numerischer Lösung.

Die Grundidee besteht zunächst darin, die betrachteten Bauteile in eine endliche Anzahl (finiter) Elemente aufzuteilen, wobei jene an den Elementrändern miteinander verknüpft sind. Für diese Elemente werden beschreibende partielle Differentialgleichungen aufgestellt und numerisch gelöst, welche die im Rahmen des *Pre-Processing* beschriebenen verschiedenen Einflüsse auf diese Elemente/das System (z. B. Lasten an den Knoten [Eckpunkte der Elementränder]) berücksichtigen. Eine solche Näherungslösung ist möglich, da die finiten Elemente komplexe Geometrien auf „einfache“ Teilgeometrien herunterbrechen, welche wiederum in ihrem physikalischen Verhalten durch bekannte Ansatzfunktionen beschrieben werden können.

Die Grundgleichung für den linear elastischen Fall (kleine Verschiebungen; linear elastisches Werkstoffverhalten) lautet:

$$\mathbf{K} \cdot \mathbf{u} = \mathbf{F} . \quad (58)$$

Hierin bezeichnet $\mathbf{K}$ die symmetrische Gesamtsteifigkeitsmatrix ($[\mathbf{K}] = \text{N/mm}$), $\mathbf{u}$ die Gesamtvektoren der Knotenverschiebungen ($[\mathbf{u}] = \text{mm}$) und $\mathbf{F}$ den Vektor der äußeren Einzelkräfte an den Knoten ($[\mathbf{F}] = \text{N}$). In dieser Gleichung (58) „macht sich diese Linearität so bemerkbar, dass bei einer

Laststeigerung auf $\alpha \cdot F$ auch die Verschiebungen um $\alpha \cdot u$ zunehmen“, vgl. [145, S. 247]. Für den nichtlinear-elastischen Fall werden entsprechende nichtlineare Gleichungssysteme aufgestellt und eine numerisch gelöst (Näherungslösung). Weiterführende Fachliteratur sowohl zu den Grundlagen der Thematik als auch zur spezifischen Anwendung ist auf nationaler und internationaler Ebene vielfältig verfügbar. Exemplarisch sei an dieser Stelle auf die Quellen [145] und [151] verwiesen.

Wie in Bild 17 aufgezeigt, beinhaltet dieser Abschnitt der Simulationdurchführung für den vorliegenden Anwendungsfall die Schritte „Montage- und Schließsimulation“. Diese werden in Abschnitt 4.5.3 vorgestellt. Grundlegend bildet die Montagesimulation den Appliziervorgang der Dichtebenen mit dem Ziel ab, die durch das Aufbringen entstehenden Deformationen der Dichtungen einer nachgeschalteten Schließsimulation als *Input*-Größen zur Verfügung zu stellen. Die Schließsimulation verfolgt das Ziel, das Verdrücken der als Folge der Montagesimulation bereits deformierten Dichtebenen als Folge des Türschließprozesses realitätsnah abzubilden.

Output/Post-Processing

Der abschließende Prozessschritt *Post-Processing* befasst sich mit der sowohl grafischen als auch numerischen Aufbereitung der Simulationsergebnisse. Je nach Fragestellung und in Abhängigkeit vorab definierter Zielgrößen erfolgt an dieser Stelle die Auswertung der Simulationsergebnisse. Dies schließt die Plausibilisierung eben jener ein.

Bei den angesprochenen Zielgrößen handelt es sich um physikalische Größen, wie sie in nachfolgender Auflistung beispielhaft genannt sind.

- Rückstellkräfte, Kraftvektoren, etc.
- Geometrische Verformungen/Deformationen, etc.
- Weitere physikalische Größen
⇒ Spannungen, Dehnungen, Temperaturen, etc.
- Abstandsmessungen zwischen Bauteilen
⇒ für den vorliegenden Anwendungsfall:
Messwerte der virtuellen taktilen Messtaster

Anwendung

Die konkrete Anwendung der Finite-Elemente-Methode im Rahmen dieser Arbeit wird in Abschnitt 4.5.3 thematisiert.

2.3.4 Kopplungsstrategien

Für eine gesamthafte Simulation des Abweichungsverhaltens einer Systems ist es wichtig, dass eine geeignete Simulationsstrategie vorhanden ist. Ist es im Rahmen einer solchen Simulation notwendig, die Ergebnisse verschiedener Simulationsschritte oder -werkzeuge überlagern zu können, wird ein geeigneter Kopplungsansatz benötigt. In Anlehnung an und mit Verweis auf [P2] beschäftigt sich dieser Abschnitt mit Simulationsstrategien zur Kopplung einer starren Toleranz- und einer korrespondierenden FEM-Simulation. Hierin sollen die wissenschaftlichen Grundlagen für die Überlagerung der Effekte und damit der simulativen Abbildung des Systemverhaltens unter Berücksichtigung der Wechselwirkungen der beteiligten Beitragsleister geschaffen werden.

Spannungsfeld Systemverhalten, Tolerierung und Unsicherheiten

Wie durch den Autor in [P2] beschrieben, bedingt die Sicherstellung toleranzverträglicher Bauteil- und Baugruppenfunktionen die Betrachtung eines komplexen Spannungsfeldes. Es gilt das Systemverhalten, Struktursteifigkeiten und damit verbundene Nachgiebigkeiten sowie Fertigungsabweichungen und vielfältige Einflüsse rund um das betrachtete System, wie etwa Temperaturschwankung, Alterung oder Verschmutzung zu berücksichtigen.

Für eine frühzeitige simulative Identifizierung der das Systemverhalten bestimmenden Einflüsse inkl. ihrer Wechselwirkungen ist es erforderlich, dass entsprechende Kopplungsstrategien existieren, die eine gesamthafte Systemsimulation unterstützen. Um bei der Systemauslegung eine gleichbleibende Produktqualität im Sinne einer robusten konstruktiven Auslegung herbeizuführen, nutzen existierende Simulationsmethoden zumeist stochastische Ansätze zur Berücksichtigung vielfältig begründeter Unsicherheiten.

In den Arbeiten von MARKVOORT [163], STOCKINGER [50], LUSTIG [164] und WÄRMEFJORD [165] werden die existierenden Kopplungsstrategien vor- und gegenübergestellt bzw. zusammengefasst. Im Kontext der vorliegenden Arbeit ist es hierbei besonders wichtig herauszustellen, inwiefern diese Strategien Nichtlinearitäten bzw. ein nichtlineares Bauteil-/Baugruppenverhalten berücksichtigen können. Tabelle 16 zeigt die existierenden Strategien im Folgenden.

Tabelle 16: Existierende Strategien zur Kopplung einer funktionsorientierten, starren Tolerierung mit einer korrespondierenden FEM-Simulation

Jahr	Name	Methode	Beschreibung	Berücksichtigung von Nicht-Linearitäten
1997	LIU & HU [166]	MIC	<i>Method of Influence Coefficients</i>	–
2002	VON PRAUN [167]		Entwicklung neuer Methoden zur Toleranzanalyse nachgiebiger, abweichungsbehafteter Baugruppen	–
			Modellierung der mechanischen Eigenschaften von Baugruppen durch FEM-Methoden	
2002	HOCHMUTH [95]		Kopplung elastischer Deformationen und Fertigungsabweichungen durch •Additive Zusammenführung •Nodale Addition •Superposition von Welligkeitsfunktionen	–
2002	enventive [168]		<i>Performance Modeling</i>	–
2003	CAMELIO ET AL. [169]	SOVA	<i>Stream-Of-Variation-Analysis</i>	–
2007	MARKVOORT [163]	STA-DEF	<i>STAtistical Tolerance Analysis taking into account DEFormations</i>	(✓)
		ITEA	Integrale Toleranz- und Elastizitätsanalyse	
2008	LUSTIG [164]		Sequentielle, systemunabhängige Analyse zur Berücksichtigung von Fertigungsabweichungen und elastischen Deformationen durch Modellierung einer automatisierten Kontaktdetektion	–

Jahr	Name	Methode	Beschreibung	Berücksich- tigung von Nicht-Li- nearitäten
2008	WÄRMEFJORD ET AL. [165]	Steigerung der Vorhersagegüte des Deformationszustandes einer Baugruppe unter Ver- wendung einer automatisierten Kontaktdetektion	—	
2010	STOCKINGER [50]	Integrativer Simulationsansatz zur Kopplung von Methoden des <i>Robust Design</i> und der Toleranzrechnung	(✓)	
2011	STUPPY [170]	Vorgehen zur frühzeitigen, inte- grierten und statistischen Tole- ranzanalyse für bewegte Systeme	(✓)	
		Integration von Abweichungen mit unterschiedlichen Ursachen (Fertigungsabweichungen, elastische Verformungen, ...)		
2015	3DCS Varia- tion Analyst [171]	3DCS FEA Compliant Modeler ⇒ <i>clamping and welding</i> <i>welding operations</i>	—	
2016	WALTER [94]	Toleranzanalyse zur Berücksich- tigung möglicher Wechselwirkun- gen zwischen Abweichungen und deren Wechselwirkungen auf den Mechanismus	(✓)	
		Entwicklung von Toleranz-Kosten- Modellen (Toleranzsynthese) zur Identifikation einer kostenopti- malen Tolerierung		
Legende:	✓ trifft zu	(✓) trifft bedingt zu	— trifft nicht zu	

Nachfolgend werden die drei für diese Arbeit relevanten Ansätze hinsichtlich der Kopplung einer funktionsorientierten, starren Tolerierung mit einer korrespondierenden FEM-Simulation zur Berücksichtigung von Nachgiebigkeiten in der Toleranzrechnung vorgestellt. Aufbauend darauf wird in Abschnitt 4.5.4 dargestellt, welche Grundkopplungsstrategien/-ansätze zur Simulation des Gesamtsystemverhaltens existieren sowie eingesetzt und welche ergänzenden Verfahren vorgeschlagen werden können. Ein fallstudienbasierter Ergebnisvergleich auf Basis funktionaler Schließmaße (KPC's [engl.: *Key Product Characteristics*], vgl. [172], [173], [174]) wird dann die Entscheidung hinsichtlich der in dieser Arbeit verwendeten Kopplungsstrategie unterstützen.

Berücksichtigung von Nachgiebigkeiten in der Toleranzrechnung **Ansatz 1: STA-DEF (von L. MARKVOORT)**

In [163] wird der von MARKVOORT vorgeschlagene Ansatz einer Überlagerung namens „STA-DEF“ vorgestellt, siehe Bild 23. Dieser gliedert sich in die Module STA (Statistische ToleranzAnalyse) und DEF (DEFormationsanalyse). Auf Basis einer MONTE CARLO-Simulation (MCS) erfolgt die statistische Toleranzanalyse und die Deformationsanalyse unter Zuhilfenahme der Finite-Elemente-Methode. Dieses iterative Vorgehen besitzt kein eindeutiges Abbruchkriterium, wie zum Beispiel ein Konvergenzkriterium, welches die Unterschiede zwischen *In-* und *Output*-Größen betrachtet. Aus diesem Grund wird der rapide ansteigende Rechenaufwand für eine gesteigerte Genauigkeit des Ergebnisses bzw. für eine erhöhte Ergebnisgüte als Argument angeführt, diesen Abbruch ggf. manuell herbeizuführen bzw. Vorgaben bei der Iterationsanzahl zu tätigen.

Nichtlinearitäten werden nicht berücksichtigt: Dieses Verfahren stellt jedoch den Anspruch an sich, eine Kopplung durchführen zu können, falls zu koppelnde Deformationsergebnisse mit nichtlinearem Verhalten vorliegen: *“It should be compatible with different requirements of deformation analysis, encompassing linear and non linear behaviors, elastic or plastic deformations, so as to comply with a variety of causes of deformations (...)”*, vgl. [163]. Es wird aber auch beschrieben, dass es bzgl. dieser Thematik keine direkte Integration und Untersuchung in STA-DEF diesbezüglich gab. Es bleibt vorerst bei einer Vermutung.

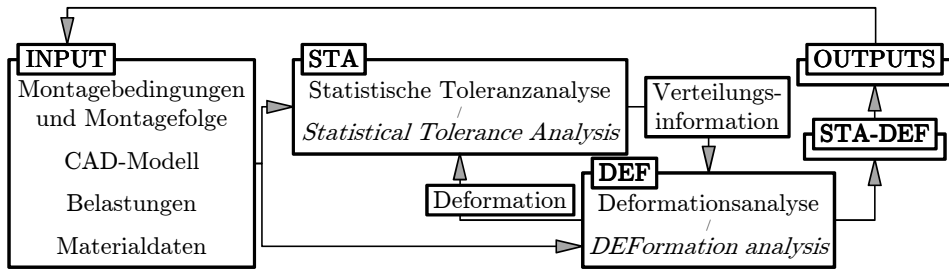


Bild 23: STA-DEF-Modell nach [163], wie in [50] beschrieben, eigene Darstellung

Berücksichtigung von Nachgiebigkeiten in der Toleranzrechnung

Ansatz 2: MIC (von s.c. LIU und s.j. HU)

Soll der elastische Einfluss eines Systems im Rahmen einer Tolerierung betrachtet werden, reichen traditionelle Methoden, wie die *Root Sum Square* Methode (RSS) oder eine MONTE CARLO-Simulation zur Durchführung von Variationsanalysen laut [166] nicht mehr aus. Vor diesem Hintergrund wird die Methode der Einflusskoeffizienten (engl.: *Method of Influence Coefficients*, MIC) vorgeschlagen, welche „einen linearen Zusammenhang zwischen (den) Einzelteilabweichungen und (dem) Rückfederungsverhalten der Baugruppe herzustellen“ versucht, vgl. [50]. Mit dem Teilziel, eine Vielzahl an FEM-Berechnungen einzusparen, wird hierbei eine Sensitivitätsmatrix auf Grundlage einer FEA ermittelt, welche, einmal aufgestellt, den angesprochenen linearen Zusammenhang Bauteil- und Baugruppenabweichungsverhalten beschreibt und für die nachfolgende Toleranzsimulation verwendet wird¹⁰. Dieser Ansatz steigert die Recheneffizienz signifikant im Bereich mehrerer Größenordnungen.

Nichtlinearitäten werden nicht berücksichtigt: Wie bereits beschrieben, liegt der Fokus dieses Verfahrens darauf, eine lineare Beziehung zwischen Bauteil- und Baugruppenabweichungsverhalten herzustellen. JARETEG ET AL. beschreiben es wie folgt: „*The main idea of their method is to find a linear relationship between part deviations and assembly spring-back deviations. A sensitivity matrix, constructed using FEA, describes that linear relationship. This sensitivity matrix is then used in the simulations, and a large number of FEA calculations can be spared*“, vgl. [175].

¹⁰ CAMELIO ET AL.: „ $[S_{uw}]$ is the sensitivity matrix, which represents how sensitive is the output assembly deviation to an input part deviation, where index u represents the input source of variation and w the output measurement points. As a result, the springback of the assembly can be represented by the mechanistic variation model as $V_w = S \cdot V_u$. The sensitivity matrix S can be determined using the method of influence coefficients as presented in LIU & HU [166]. Then, considering a linear relationship between the incoming parts deviation and the final assembly deviation for compliant parts at the station level and using finite element analysis, it is possible to construct the sensitivity matrix for a specific station configuration. Finite element methods are used to obtain the stiffness matrices for parts of complex shape“, vgl. [169].

Berücksichtigung von Nachgiebigkeiten in der Toleranzrechnung

Ansatz 3: SOVA (von J. CAMELIO, S.J. HU und D. CEGLAREK)

Die im vorangegangenen Absatz erwähnte Methode der Einflusskoeffizienten wird im Rahmen der *Stream-Of-Variation-Analysis* (SOVA) weiterverfolgt und für eine mehrstufige Anwendung (*multi-station systems*) erweitert, vgl. [172], [169], [176]. „In Ergänzung (wird) (...) die geometrische Kovarianz, das heißt die Abhängigkeit zwischen benachbarten Punkten auf den Einzelteilen berücksichtigt. Durch den Einsatz der Hauptkomponentenanalyse können Abweichungsmuster identifiziert und die Anzahl der Variablen einer Problemstellung reduziert werden“, [50]. Es wird demnach die Aufweitung der Grenzlagen (engl.: *Limiting Positions*, vgl. [P3]) diskret gewählter Schließmaße (KPC's) des betrachteten Produkts als Folge des mehrstufigen Produktionsprozesses untersucht. Somit ist es einerseits möglich, individuelle (Teilprozess-) Einflüsse auf die Einhaltung geometrischer Toleranzvorgaben an das Endprodukt zu untersuchen. Andererseits ist es möglich, eine Beitragsleisteranalyse der resultierenden Abweichungen des jeweiligen Schließmaßes vorzunehmen.

Nichtlinearitäten werden nicht berücksichtigt: Es handelt sich um eine Erweiterung der *Method of Influence Coefficients*.

2.3.5 Methoden einer robusten konstruktiven Auslegung/des Robust Design

In Anlehnung an die in Abschnitt 1.1 angesprochene Zielsetzung einer robust ausgelegten Konstruktion, befasst sich dieser Abschnitt mit dem Vergleich von Methoden für eine robuste konstruktive Systemauslegung und der anschließenden Findung eines Vorgehens zur Erfüllung dieses Anspruches.

Allgemeine Problemformulierung bei Robustheitsbewertungen

Wie bereits in Bild 14 dargestellt, lässt sich ein **robustes Design** durch eine größtmögliche Unempfindlichkeit des Produktes/der Ausgangsstreuungen (Varianzen) gegenüber vorherrschenden Eingangsstreuungen charakterisieren, vgl. [177], [51] und [S4]. Nach [177] und [S4] ist demnach „ein Gesamtsystem aus Entwurfsparametern und gewünschter Systemantwort, bei der die Systemantwort nur geringfügig durch Schwankungen der Entwurfsparameter beeinflusst wird“ das Ziel einer robusten Auslegung.

Folglich besteht das allgemeine Ziel einer **Robustheitsbewertung** eines Systems darin, einen Zusammenhang zwischen streuenden Eingangs- und resultierenden variierenden Ausgangs- bzw. Antwortgrößen zu beschreiben. Anders formuliert versucht eine „Robustheitsbewertung (...) die Probabilistik

eines unmittelbaren unsicheren Auslegungskriteriums zu charakterisieren“, vgl. [178]. Im Umkehrschluss kann, wie in [51] beschrieben, festgestellt werden, dass die exakte Kenntnis der Eingangsstreuungen immer die Grundlage einer erfolgreichen Robustheitsbewertung ist.

Schätzstrategien für statistische Größen

Durch die Wahl einer geeigneten Schätzstrategie kann die Möglichkeit geboten werden, eine gesteigerte Prognosegüte für Größen sicherstellen zu können, für welche andernfalls aufgrund von Nichtlinearitäten oder nicht integrierbaren Funktionen keine exakten Lösungen angegeben werden können, vgl. [63].

Für eine reelle stetige Zufallsgröße $X \in \mathbb{R}$ können an dieser Stelle als Beispielgrößen der Erwartungswert (Mittelwert) $\mu_X \in \mathbb{R}$ und die zugehörige Standardabweichung $\sigma_X \in \mathbb{R} > 0$ genannt werden, vgl. Abschnitt 2.2.1. „Ein erwartungstreuer und konsistenter Schätzer für den Erwartungswert ist durch den arithmetischen Mittelwert (mit)

$$\mu_X \approx \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (59)$$

gegeben(. Einen) asymptotisch erwartungstreuen Schätzer der radizierten Varianz liefert die Stichprobenstandardabweichung“, vgl. [63], mit

$$\sigma_X \approx s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}. \quad (60)$$

In Anlehnung an [63] kann gemäß [179] die Güte einer Schätzfunktion über die folgend genannten Eigenschaften bewertet werden:

- **Erwartungstreue**

„Eine Schätzfunktion, deren Erwartungswert mit dem Parameter der Grundgesamtheit bei jedem Stichprobenumfang n übereinstimmt, wird als erwartungstreu oder unverzerrt bezeichnet.“

$$\begin{aligned}\mu_X &= E[\bar{x}] \\ \sigma_X &= E[s]\end{aligned}\tag{61}$$

- **Konsistenz**

„Eine Schätzfunktion ist konsistent, wenn der Schätzwert (...) bei zunehmendem Stichprobenumfang n immer stärker gegen den zu schätzenden Parameter strebt (...).“

$$\begin{aligned}\lim_{n \rightarrow \infty} P[|\mu_X - \bar{x}| \geq \varepsilon] &= 0 \quad \forall \varepsilon > 0 \\ P[|\mu_X - \bar{x}| < \varepsilon] &\rightarrow 1 \quad \forall \varepsilon > 0\end{aligned}\tag{62}$$

ε bezeichnet hierbei die Abweichung bzw. den Approximationsfehler.

- **Wirksamkeit**

„Eine erwartungstreu Schätzfunktion (...) (μ_{X1}) heißt effizient, wenn es keine andere erwartungstreu Schätzfunktion (...) (μ_{X2}) gibt, die bei gleichem Stichprobenumfang eine geringere Varianz besitzt (...).“

$$\text{Var}(\mu_{X1}) \leq \text{Var}(\mu_{X2})\tag{63}$$

Die Wahl einer geeigneten Schätzstrategie wird wesentlich durch das Vorhandensein zweier konfliktärer Begleitumstände motiviert. Zum einen hängt die Approximationsgüte mehr oder minder direkt vom gewählten Stichprobenumfang n ab. „Im Allgemeinen gilt, je größer n , desto belastbarer die Schätzung“, vgl. [63]. Zum anderen resultieren aus großen Stichprobenumfängen n zeitaufwendige und somit teure numerische Rechenzeiten und Experimentalaufwände, welche es wiederum zu vermeiden gilt. Aus diesen konfliktären Zielen lässt sich das im Projektmanagement als „magisches Dreieck“ bekannte Optimierungsproblem der drei in Konflikt zueinander stehenden Größen Zeitaufwand, Kosten und Qualität ableiten.

Die Schätzung statistischer Größen bedingt die Generierung repräsentativer Stichproben für die unsicheren Eingangsgrößen. Heutzutage werden Pseudozufallszahlen, welche im n -dimensionalen Raum statistisch gleichverteilt vorliegen sollen, über deterministische Sampling-Ansätze erzeugt, vgl. [51].

Als Ergebnis von Voruntersuchungen, vgl. [63] und [S4], wird im Folgenden in zusammengefasster Form auf die zwei für diese Arbeit relevanten Sampling-Ansätze eingegangen, namentlich MONTE CARLO-SAMPLING (MCS) und LATIN HYPERCUBE-SAMPLING (LHS). Die mathematischen Hintergründe hinter diesen Ansätzen sind in der Fachliteratur vielfältig verfügbar und sollen an dieser Stelle nicht weiter thematisiert werden. Beispielfhaft sei auf die Quellen [180], [181], [182], [183], [184] und [185] verwiesen.

MONTE CARLO-SAMPLING (MCS)

Stochastische Simulationen, wie etwa die MONTE CARLO-Simulation¹¹, vgl. [180] und [181], zielen darauf ab, repräsentative, zufällige Stichproben entsprechend einer vorgegebenen Streuung zu generieren. Durch diese Stichproben, bestehend aus Pseudozufallszahlen, sollen die unsicheren Systemantworten hinreichend genau als Ergebnis der Simulation vorausgesagt werden. Anders formuliert handelt es sich um eine Methode zur Beurteilung der Sensitivität eines Systems unter Zuhilfenahme „variierender Parameter innerhalb statistischer Beschränkungen“, vgl.[188]. Zudem sollen auch Erkenntnisse bzgl. der Wechselwirkungen der zufälliger Größen untereinander ermöglicht werden. Die Grundlage für solche Simulationen ist zumeist durch gleichverteilte Zufallszahlen gegeben, vgl. [51]. Als Folge der Gesetze der großen Zahlen, welche vereinfacht ausgedrückt besagen, dass sich die prognostizierten Verteilungen der Zufallsergebnisse mit zunehmender Versuchswiederholung bei gleichen Randbedingungen immer genauer den realen statistischen Verteilungen annähern, ist der bereits erwähnte Stichprobenumfang n hierbei als kritisches Kriterium anzusehen, da dieser ausreichend groß sein muss, jedoch in Anbetracht des mit ihm einhergehenden numerischen Rechenaufwandes nicht beliebig groß sein darf. Entsprechende Vorabuntersuchungen zur Wahl eines einerseits minimalen und andererseits belastbaren Stichprobenumfanges können folglich problemspezifisch von Nöten sein.

¹¹ Warum „Monte Carlo“? – Ein kleiner Blick in die Geschichte:

Laut [186] war es ENRICO FERMI im Jahre 1934, der eine erst später unter dem Namen „Monte Carlo“ bekannt gewordene Simulation zur Vorhersage von Neutronenstreuungen durchführte. Die eigentliche Namensgebung geschah 12 Jahre später im Jahre 1946. Zu dieser Zeit arbeiteten STAN ULAM und JOHN VON NEUMANN gemeinsam während des zweiten Weltkrieges am sogenannten „MANHATTAN PROJECT“ in Los Alamos, New Mexico, USA – einem gemeinschaftlichen Forschungsprojekt der Vereinigten Staaten von Amerika, Kanada und dem Vereinigten Königreich von Großbritannien und Nordirland aus dem die ersten Nuklearwaffen hervorgingen. Krankheitsbedingt hatte STAN ULAM beim Karten spielen mehr oder minder zufällig erkannt, dass man komplexe Kombinationsprobleme auf Grundlage statistisch verteilter Stichproben hinreichend genau annähern und folglich vereinfachen kann, vgl. [187]. Mutmaßlicher Namensgeber war trotz des „Denkanstoßes“ von STAN ULAM jedoch JOHN VON NEUMANN, welcher den Namen mit Bezug auf das gleichnamige Casino in Monaco wählte.

Die Generierung der gleichverteilten Zufallszahlen erfolgt deterministisch. Initial wurde hierfür die VON NEUMANN'sche Mittquadratmethode (engl.: *mid-square method*) verwendet, vgl. [51]. Jene Methode hat sich jedoch trotz geringem Implementierungsaufwand nicht durchgesetzt, da sie einerseits mit einem verhältnismäßig hohen Rechenaufwand einhergeht und andererseits eine verhältnismäßig hohe Wahrscheinlichkeit mit sich bringt, bereits nach geringer Iterationszahl immer wieder dieselben Zahlen zu generieren oder bei der Zahl Null zu enden (je nach Umsetzung bei der Implementierung). Diese Phänome werden in Tabelle 17 am Beispiel aus [51, Abb. 2.5] mit der Startzahl $\tilde{U}_0 = 9942$ demonstriert.

Tabelle 17: Demonstration der Nachteile der VON NEUMANN'sche Mittquadratmethode in Abhängigkeit des Implementierungsansatzes

Implementierungsansatz A			Implementierungsansatz B		
Iterationsschritt		Ergebnis	Iterationsschritt		Ergebnis
$\tilde{U}_0^2$	=	$(9942)^2$	=	98843364	
$\tilde{U}_1^2$	=	$(8433)^2$	=	71115489	
$\tilde{U}_2^2$	=	$(1154)^2$	=	01331716	
$\tilde{U}_3^2$	=	$(3317)^2$	=	11002489	
$\tilde{U}_4^2$	=	$(24)^2$	=	0576	
$\tilde{U}_5^2$	=	$(57)^2$	=	3249	
$\tilde{U}_6^2$	=	$(24)^2$	=	0576	
$\tilde{U}_7^2$	=	$(57)^2$	=	3249	
$\vdots$					
$\tilde{U}_0^2$	=	$(9942)^2$	=	98843364	
$\tilde{U}_1^2$	=	$(8433)^2$	=	71115489	
$\tilde{U}_2^2$	=	$(1154)^2$	=	01331716	
$\tilde{U}_3^2$	=	$(3317)^2$	=	11002489	
$\tilde{U}_4^2$	=	$(24)^2$	=	576	
$\tilde{U}_5^2$	=	$(7)^2$	=	049	
$\tilde{U}_6^2$	=	$(4)^2$	=	016	
$\tilde{U}_7^2$	=	$(1)^2$	=	001	
$\tilde{U}_8^2$	=	$(0)^2$	=	000	

Zur deterministischen Erzeugung von Pseudozufallszahlen werden heutzutage verschiedenste Generatoren verwendet. Populär sind die sogenannten Kongruenzgeneratoren. Jene bedienen sich arithmetisch rekursiver Ansätze.

Abschließend lässt sich zusammenfassen, dass es bei Verwendung dieser Pseudozufallszahlen mit einer MONTE CARLO-Simulation möglich ist, numerisch Probleme durch eine näherungsweise Berechnung zu lösen, die beim Einsatz deterministischer Algorithmen schwer oder gar nicht lösbar wären. Der Begriff „Simulation“ ist hierbei jedoch nur bedingt gültig, da dynamische Prozesse explizit nicht modelliert werden.

LATIN HYPERCUBE-SAMPLING (LHS)

Bei „der Verwendung von Approximationsverfahren (hängt) die Qualität der statistischen Erhebung für die Ausgangsstreuungen im wesentlichen von der Qualität der Antwortfläche (...) (ab). Ein wichtiger Aspekt für eine hochwertige Approximation ist eine möglichst gleichverteilte Positionierung der Trainingsstellen im angestrebten Approximationsbereich“, vgl. [63]. Vor diesem Hintergrund haben sich auf Basis des MCS alternative Methoden zur Generierung von Pseudozufallszahlen entwickelt.

Für Robustheitsuntersuchungen und Sensitivitätsanalysen eines höherdimensionalen Entwurfsraumes hat sich das sogenannte „LATIN HYPERCUBE-SAMPLING“ als Sampling-Ansatz etabliert, vgl. [51] und [S4]. Es stellt den Anspruch an sich selbst, einen vorgegebenen Versuchsraum bei minimaler Stichprobengröße möglichst effektiv mit Pseudozufallszahlen zur Generierung einer belastbaren Antwortfläche zu belegen, vgl. [189]. „Als Erweiterung des STRATIFIED SAMPLING, d. h. geschichteten Abtastens“, vgl. [51] und [180], geschieht dies im Gegenzug zum MCS durch die Aufteilung des vorgegebenen Versuchsraumes in „(Teil-)Bereiche gleicher Auftretenswahrscheinlichkeit“, vgl. [S4] und [190], siehe Bild 24. Es wird demnach sichergestellt, „dass der gesamte Bereich abweichungsbehafteter Variablen abgedeckt wird“, vgl. [50]. Aus den Teil-Bereichen werden auf Basis gleichverteilter Zufallszahlen Stichprobenwerte entnommen und in Spaltenvektoren überführt. Dies geschieht für alle Eingangsparameter, sodass für jeden ein Spaltenvektor vorliegt. „Die Werte dieser Vektoren werden anschließend permutiert und zu einer Gesamtmatrix zusammengefasst, die in den Zeilen die jeweilige Versuchsreihe enthalten“, vgl. [S4], [189] und [191].

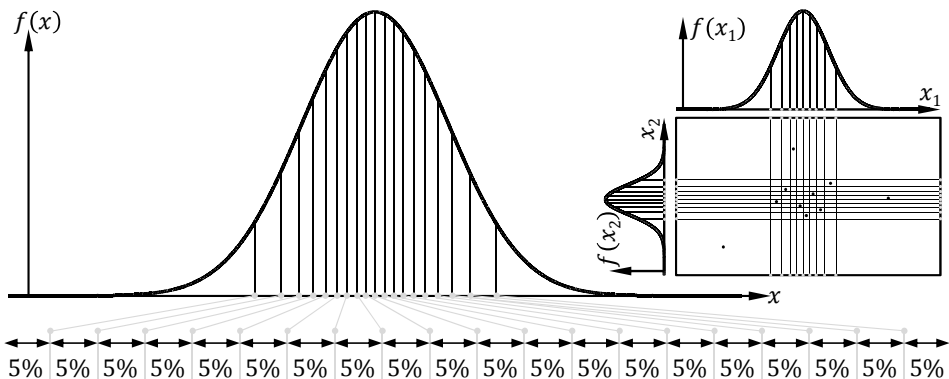


Bild 24: Unterteilung einer Normalverteilung in Bereiche gleicher Auftretenswahrscheinlichkeit, Bsp. hier: 20 Bereiche à 5%, vgl. [S4], [190] sowie Erstellung eines LATIN HYPERCUBE-SAMPLINGS aus zwei Eingangsparametern x_1 und x_2

SENSITIVITÄTSUNTERSUCHUNGEN/-ANALYSEN AUF BASIS DER GEWÄHLTEN SAMPLING-STRATEGIE

Durch Sensitivitätsanalysen können die bedeutendsten Einflussparameter eines Systems identifiziert werden. Jene Identifikation geschieht durch die Ermittlung qualitativer und quantitativer Abhängigkeiten zwischen unsicheren Eingangsparametern und resultierenden streuenden Ausgangsgrößen, vgl. [51], [192] und [193]. Die damit einhergehende Klärung des Ursache-Wirkungs-Prinzips erlaubt es folglich, statistisch belastbare Aussagen zu den zentralen Fragen einer solchen Sensitivitätsbeurteilung abzuleiten, vgl. [50]:

- Welche Modellparameter haben den größten Einfluss auf das Verhalten des Gesamtsystems?
- Welche Modellparameter haben einen vernachlässigbaren Einfluss auf das Verhalten des Gesamtsystems?
- Welche Ausprägungen besitzen die Interaktionen zwischen den Modellparametern?

Zur Ermittlung der in den ersten beiden Fragen angesprochenen qualitativen und quantitativen Abhängigkeiten zwischen unsicheren Eingangsparametern und resultierenden streuenden Ausgangsgrößen wird im Kontext der Sensitivitätsanalyse zwischen lokaler und globaler Sensitivität differenziert.

• lokale Sensitivität

- ⇒ Durchführung: Ermittlung der partiellen Ableitung, des Korrelationskoeffizienten oder des Bestimmtheitsmaßes. Variation ausschließlich eines Eingangsparameters zum jeweiligen Zeitpunkt.
- ⇒ Einschränkungen: „Nachteil dieser lokalen Kenngrößen ist, dass sie nur aussagekräftig (...) (ist), wenn das Modell linear ist“, vgl. [50]. „Wechselwirkungen innerhalb der Eingangsparameter und dessen Wirkungen auf die Ergebnisgrößen bleiben (...) unbeobachtet, weiterhin werden die Schwankungsräume nur partiell abgetastet [163]“, vgl. [S4].
- ⇒ Ergebnis: Abbildung linearer Zusammenhänge zwischen den Parametern.

• globale Sensitivität

- ⇒ Durchführung: Variation der streuenden Eingangsparameter durch Sampling-Ansätze wie bspw. MCS und LHS zur Ausnutzung des gesamten Schwankungsraumes. Berücksichtigung der Variationen aller Eingangsgrößen. Möglichkeit zur Aufstellung eines nichtlinearen Regressionsmodells auf dessen Basis die weitere Analyse erfolgt.
- ⇒ Einschränkungen: Vergleichsweise höherer numerischer Rechenbedarf. Generierung repräsentativer Stichproben notwendig.

- ⇒ Ergebnis: Abbildung nichtlinearer Zusammenhänge zwischen den Parametern. Sensitivitätsmaße sind für den gesamten Schwankungsraum gültig.
- ⇒ Für die Auswertung der globalen Sensitivität wird die varianzbasierte SOBOL-Index-Methode verwendet. Jene bildet zwei Sensitivitätsmaße (Haupt- und Totaleffekt), welche auch als SOBOL-Indizes bekannt sind, vgl. [141] und [50]:

Haupteffekt

Der Haupteffekt S_i beschreibt den Einfluss der unsicheren Eingangsparameter X_i auf die streuenden Ausgangsgrößen Y . Jener wird durch

$$S_i = \frac{\text{Var}(Y|X_i)}{\text{Var}(Y|X)} \quad (64)$$

gebildet und „quantifiziert den Anteil der Modellparametervarianz an der Gesamtvarianz des Outputs“, vgl. [194].

Totaleffekt

Der Totaleffekt S_{Ti} wird durch

$$S_{Ti} = \frac{\text{Var}(Y|X_i)}{\text{Var}(Y|X)} + \frac{\text{Var}(Y|X_i, X_j)}{\text{Var}(Y|X)} \quad (65)$$

gebildet und berücksichtigt im Gegensatz zum Haupteffekt zusätzliche Wechselwirkungen zwischen den Eingangsparametern, vgl. [195]. Jener „setzt sich aus dem Haupteffekt und den Beiträgen der einzelnen streuenden Größen (X_i, X_j) zusammen“, vgl. [50].

Eine Möglichkeit, sich der Beantwortung der dritten Frage statistisch belastbar zu nähern, besteht in der Ermittlung von Korrelationsstrukturen, welche die Beziehungen zwischen bspw. Eingangs- und Antwortgrößen abbilden. Als Darstellungsform haben sich sogenannte „*Ant-Hill-Plots*“ etabliert, siehe [50], Bilder 5.11 und 5.12.. „Dabei werden im zweidimensionalen Parameterraum alle Realisierungen eines *Samplesets* dargestellt, welche in unkorrelierten Fällen Ameisenhaufen (engl.: *Anthill*) ähneln. *Ant-Hill-Plots* ermöglichen die visuelle Beurteilung der Korrelation. In den *Ant-Hill-Plots* können darüber hinaus Häufungen (Clusterungen) oder nichtlineare Zusammenhänge zwischen der Variation von Eingangsgrößen und Antwortgrößen, deren Ursache z. B. Resonanzen sein können, identifiziert werden“, vgl. [196].

Eine typische Anwendung der *Ant-Hill-Plots* bezieht sich auf die Untersuchung der Abhängigkeiten von Eingangsparametern einer Simulation untereinander. Zielsetzung kann es hierbei sein, den Nachweis zu erbringen, dass keine Abhängigkeiten zwischen eben diesen existieren. Bei Vorhandensein von Abhängigkeiten können diese erkannt und berücksichtigt werden. Bild 25 zeigt in einer Matrixdarstellung die exemplarische Gegenüberstellung von vier streuenden Eingangsparametern für eine mögliche Simulation.

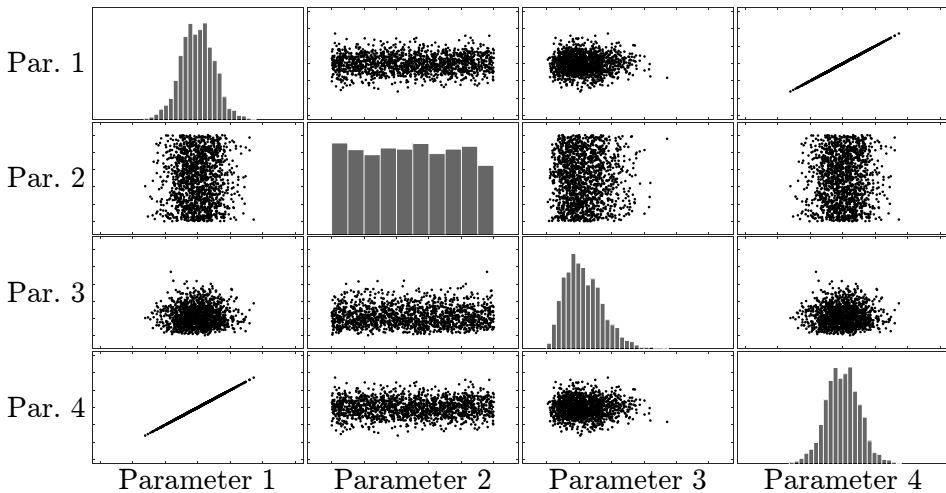


Bild 25: Bsp. für *Ant-Hill-Plots*: *Input-Input-Matrix* vierer potentieller abweichungsbehafteter Eingangsparameter

Auf den Feldern der Hauptdiagonale der Kovarianzmatrix (s. Abschnitt 4.5.2) sind die streuenden Eingangsparameter (Par.) zur Information dargestellt (Par. 1: Normalverteilung, Par. 2: Gleichverteilung, Par. 3: Linksschiefe Verteilung, Par. 4: Normalverteilung). Die anderen Felder zeigen die Beziehungen der Merkmalspunkte zwischen den Parametern, aus welchen Korrelationsausagen abgeleitet werden können. Es lassen sich keine signifikanten Kovarianzen für die Parameterkombinationen Par. 1 vs. Par. 2, Par. 1 vs. Par. 3, Par. 2 vs. Par. 3, Par. 4 vs. Par. 2 und Par. 4 vs. Par. 3 erkennen. Diese Eingangsparameter streuen nahezu unabhängig voneinander. Für die Parameterkombination Par. 1 vs. Par. 4 dieses Beispiels zeigt sich jedoch eine signifikante Korrelation. Hier besteht eine direkte Abhängigkeit der Parameter zueinander, welche es bei den nachfolgenden Simulationsschritten zu beachten gilt. Eine Vereinfachung der Modellkomplexität wäre an dieser Stelle die sinnvolle Folge.

Basierend auf dieser Identifikation der Abhängigkeiten der Modellparameter untereinander und der sich folglich ergebenden Vereinfachung der Modellkomplexität, erlaubt dies die Berechnung eines parametrischen Prozessmo-

dells im n -dimensionalen Raum dieser Einflussparameter, vgl. [50]. Jenes parametrische Prozess- bzw. Ersatzmodell kann als analytische Antwortfläche (engl.: *Response Surface*) verstanden werden, welche als mathematisch eindeutig beschreibbarer Repräsentant des Originalprozesses deutlich einfacher und somit numerisch effizienter auswertbar ist. Als kritisch sind hierbei zumeist die Anzahl an und Lage der Trainingsstellen zu sehen, auf welchen die Antwortfläche bzw. Approximation basiert, da diese maßgeblich die Güte der Approximation und somit auch deren Aussagefähigkeit beeinflussen. Geeignete Voruntersuchungen/-überlegungen, die neben DoE-basierten Ansätzen ggf. auch KRIGING-basierte Verfahren einschließen, sind an dieser Stelle stets empfehlenswert, um die Verhältnismäßigkeit zwischen Versuchsaufwand und (geforderter) Aussagegenauigkeit abzuwägen, vgl. [S4]. Aktuelle Überblicke und Vergleiche zu Antwortflächen- bzw. Approximationsverfahren sowie deren Anwendungsgebieten werden in [50], [51] und [94] gegeben.

3 Ableitung des Handlungsbedarfs

Der in diesem Kapitel beschriebene Handlungsbedarf leitet sich als Folge der in Abschnitt 1.2 genannten Aufgabenstellung bzgl. der Erarbeitung einer Methodik zur virtuellen Absicherung funktionsrelevanter Grenzlagen durch einen simulationsunterstützten Ansatz – insbesondere für Systeme, die nichtlinearen Effekten unterliegen – sowie des in Kapitel 2 vorgestellten Stands der Forschung und Technik, ab.

Im Allgemeinen kann festgestellt werden, dass heutige Berechnungs- und Simulationsvorgehen im Toleranzmanagement (engl.: *Computer-Aided Tolerancing*, CAT) den „starren Ansatz“ gemein haben. Dieses Phänomen wird auch durch BOHN und HETSCH in [67] beschrieben: „Alle Verfahren (...) können für ideal steife Bauteile verwendet werden. Für elastische Bauteile sind nur numerische Verfahren in Kopplung mit FEM-Verfahren sinnvoll.“ Vor diesem Hintergrund benennt Abschnitt 3.1 zunächst die Prämissen einer ideal starren Grenzlagermittlung. In dem sich anschließenden Abschnitt 3.2 werden allgemeine Anforderungen an einen Ansatz zur Grenzlagermittlung definiert, welcher auch elastische und nichtlineare Effekte einbeziehen kann (Ausschluss des Starrkörperansatzes). In Abgleich mit bestehenden Ansätzen, welche in Kapitel 2 vorgestellt wurden, leitet Abschnitt 3.3 abschließend den Handlungsbedarf hinsichtlich der Erarbeitung einer Methodik zur virtuellen Absicherung funktionsrelevanter Grenzlagen – insbesondere für Systeme, die nichtlinearen Effekten unterliegen – ab.

Die Definition des Begriffs „Grenzlage“ sowie die Abgrenzung des Begriffs „funktional“ kann in Abschnitt 4.1 nachgelesen werden.

3.1 Prämissen einer Grenzlagermittlung unter Anwendung des Starrkörperansatzes

Eine Aufgabe der Toleranzrechnung ist die Ermittlung einer statistischen Streuungsaussage bezüglich der Ausbildung konkreter Schließmaße zwischen Bauteilen einer Baugruppe. Deren minimale bzw. maximale Ausprägungen in Abhängigkeit definierter Wahrscheinlichkeitsniveaus werden im Kontext einer Toleranzrechnung als Grenzlagen bezeichnet. Bis dato ist die simulative Grenzlagermittlung verschiedenen Prämissen unterworfen. Jene sollen im Folgenden benannt werden:

- Als Grundlage für eine durchgängige Betrachtung der Qualitätsmerkmale wird zu Beginn der Untersuchungen ein definierter und unveränderlicher CAD-Datenstand benötigt, welcher die konzipierte Nominalmaß-Konstruktion zeigt.
- Alle relevanten Schließmaße sind definiert.
- Alle relevanten Informationen zu den Form- und Lagetoleranzen aller beitragsleistenden Bauteile, wie sie in Tabelle 3 dargestellt sind, liegen vor.
- Die Ausrichtungen aller Bauteile, wie bspw. in Bild 8 demonstriert, sind bekannt.
- Die Fügefolgen im Montageprozess sind bekannt.
- Alle physischen Bauteile werden als ideal starr angesehen (Starrkörperansatz). Elastische Effekte bleiben unberücksichtigt.
- Interaktionen zwischen benachbarten Bauteilen als Folge dieses elastischen Verhaltens bleiben unberücksichtigt.
- Elastisch konzipierte Bauteile, wie zum Beispiel Dichtungen, werden oftmals von vornherein teils nicht betrachtet bzw. nicht in den Berechnungen/Simulationen berücksichtigt.
- Das Deformationsverhalten elastisch konzipierter Bauteile nach dem Montageprozess wird nicht berücksichtigt.

3.2 Anforderungen an eine Grenzlagenermittlung unter Ausschluss des Starrkörperansatzes

In Abschnitt 3.1 wurden die Prämissen einer Grenzlagenermittlung unter Anwendung des Starrkörperansatzes für ausgewählte Schließmaße zwischen Bauteilen einer Baugruppe stichpunktartig aufgelistet. Aus den letzten vier Punkten dieser Auflistung lässt sich durch das Auflösen des Starrkörperansatzes ein Potential zur genaueren Prognose derartiger Grenzlagen im Kontext des Toleranzmanagements erkennen. Im Folgenden werden die Anforderungen an eine Grenzlagenermittlung unter Ausschluss des Starrkörperansatzes benannt.

- Als Grundlage für eine durchgängige Betrachtung der Qualitätsmerkmale wird zu Beginn der Untersuchungen ein definierter und unveränderlicher CAD-Datenstand benötigt, welcher die konzipierte Nominalmaß-Konstruktion zeigt.
- Alle relevanten Schließmaße sind definiert.
- Alle relevanten Informationen zu den Form- und Lagetoleranzen aller beitragsleistenden Bauteile, wie sie in Tabelle 3 dargestellt sind, liegen vor.
- Die Ausrichtungen aller Bauteile, wie bspw. in Bild 8 demonstriert, sind bekannt.
- Die Fügefolgen im Montageprozess sind bekannt.

- Die Toleranzberechnungsergebnisse einer ideal starren Grenzlagenermittlung für die definierten Schließmaße liegen vor.
- Auf Basis dieser Ergebnisse existiert eine Möglichkeit zur Überführung jener in ein FEM-Simulationsmodell.
- Alle relevanten (Material-)Parameter für diese FEM-Simulationen sind einerseits bekannt oder ermittelbar und andererseits in diese implementierbar.
- Eine geeignete Strategie zur Kopplung der Toleranzberechnungsergebnisse einer ideal starren Grenzlagenermittlung für die definierten Schließmaße mit denen einer korrespondierenden FEM-Simulation zur Ermittlung korrigierter Grenzlagenaussagen liegt vor.

3.3 Ableitung des Handlungsbedarfs hinsichtlich der Erarbeitung einer Methodik zur virtuellen Absicherung funktionsrelevanter Grenzlagen – insbesondere für Systeme, die nichtlinearen Effekten unterliegen

Wie sowohl bereits in der Einleitung dieses Kapitels als auch in Abschnitt 1.2 beschrieben, ist es die Zielsetzung dieser Promotionsschrift, eine Methodik zur virtuellen Absicherung funktionsrelevanter Grenzlagen durch einen simulationsunterstützten Ansatz – insbesondere für Systeme, die nichtlinearen Effekten unterliegen – zu erarbeiten. In Abschnitt 3.1 wurde hierzu zusammenfassend stichpunktartig dargestellt, unter welchen Prämissen heutige Berechnungs- und Simulationsprogramme im Toleranzmanagement eine Lösung unter Anwendung des Starrkörperansatzes generieren. Basierend darauf wurden in dem sich anschließenden Abschnitt 3.2 allgemeine Anforderungen an einen Ansatz zur Grenzlagenermittlung definiert, welcher auch elastische und nichtlineare Effekte einbeziehen kann (Ausschluss des Starrkörperansatzes).

Infolge der benannten Anforderungen ergeben sich die nachfolgend benannten Handlungsbedarfe:

- Auf Basis der Toleranzberechnungsergebnisse einer ideal starren Grenzlagenermittlung für ausgewählte Schließmaße ist eine Möglichkeit zur Überführung jener in ein FEM-Simulationsmodell darzustellen.
- Eine geeignete Strategie zur Kopplung dieser Ergebnisse mit denen einer korrespondierenden FEM-Simulation zur Ermittlung korrigierter Grenzlagenaussagen ist zu ermitteln.

- Robustheitsuntersuchungen basierend auf den gekoppelten Simulationsergebnissen hinsichtlich des probabilistischen Einflusses einzelner Beitragsleister auf das Grenzlagergebnis müssen möglich sein.
- Die Ergebnisse des zu erarbeitenden Ansatzes bzgl. einer simulationsunterstützten funktionalen Grenzlagenabsicherung sind an einem geeigneten Demonstrator experimentell zu validieren.
- Die Übertragbarkeit der Methodik auf weitere Anwendungsfälle bzw. Systeme ist durch eine Verortung des erarbeiteten Ansatzes innerhalb des Produktentwicklungsprozesses vorzubereiten.

Die augenscheinlich größte Herausforderung hierbei stellt die Auswahl und Adaption einer geeigneten Kopplungsstrategie dar. Diese soll die Grenzlagenaussagen an den betrachteten Schließmaßen derart verbessern, dass die in Abschnitt 3.1 benannten Prämissen hinsichtlich der nicht vorhandenen Berücksichtigung elastischer Effekte bzw. Bauteile/Materialien in der Folge nicht mehr gelten. In Abschnitt 2.3.4 werden diesbezüglich bestehende Ansätze mit Referenz auf entsprechende Veröffentlichungen tabellarisch gegenübergestellt, siehe Tabelle 16. Die aus der letzten Spalte dieser Tabelle zu entnehmende Erkenntnis ist diejenige, dass die Berücksichtigung von Nichtlinearitäten und in der Folge auch die Berücksichtigung elastischer und nichtlinearer Effekte auf das Systemverhalten bei keinem der Ansätze Teil der konkreten Zielsetzung ist bzw. war. Bei einem Teil der Ansätze wird jedoch einerseits angemerkt, dass eine entsprechende Erweiterung bzw. Adaption hinsichtlich der Berücksichtigung von Nichtlinearitäten nicht explizit untersucht wurde. Andererseits wird eine entsprechende Erweiterung bzw. Adaption teils nicht ausgeschlossen.

An dieser Stelle soll die vorliegende Arbeit anknüpfen. Es soll unter Berücksichtigung der in Abschnitt 3.2 beschriebenen Anforderungen eine Methodik entwickelt und an einem Demonstrator validiert werden, die einen Beitrag dazu leistet, die konstruktive Auslegung abweichungsbehafteter und nicht ideal starrer Baugruppen im Sinne des Toleranzmanagements zu verbessern. Die aus der virtuellen Absicherung heraus resultierende und belastbare Prognose funktionsrelevanter Grenzlagen bezeichnet hierbei sowohl Ziel als auch Messgröße der zu entwickelnden Methodik.

4 **Ansatz zur simulationsunterstützten funktionalen Grenzlagenabsicherung**

Das vierte Kapitel führt zum Ansatz bzgl. einer simulationsunterstützten funktionalen Grenzlagenabsicherung. Zu diesem Zwecke werden die verschiedenen relevanten Teilaspekte in den entsprechenden Abschnitten näher vorgestellt. Zunächst wird der Begriff „Grenzlage“, welcher immer häufiger in der Praxianwendung als auch im wissenschaftlichen Kontext erwähnt wird, in Abschnitt 4.1 definiert. In Abschnitt 4.2 wird anschließend auf die Grundidee des Ansatzes und das Vorgehensmodell eingegangen. Die Anwendung des Ansatzes wird unter Zuhilfenahme eines praxisnahen Demonstrators (Einstiegsbereich eines Automobils) exemplarisch durchgeführt. Dieser wird in Abschnitt 4.3 vorgestellt. Mit Bezug auf diesen Demonstrator beschreibt Abschnitt 4.4 empirisch ermittelte Einflussfaktoren auf das gewählte abzusichernde sowohl kunden- als auch funktional relevante Kriterium Dichtigkeit. Korrespondierend zur Struktur des Abschnittes 2.3 thematisiert Abschnitt 4.5 anschließend die eigentliche virtuelle Absicherung funktionaler Grenzlagen. Auf Basis der Erkenntnisse aus diesen Abschnitten fasst Abschnitt 4.6 den erarbeiteten Ansatz zur simulationsunterstützten funktionalen Grenzlagenabsicherung zusammen.

4.1 **Der Begriff Grenzlage**

In jüngster Vergangenheit taucht der Begriff der „Grenzlage“ (engl.: *limiting position*) immer häufiger sowohl im Ingenieursalltag als auch in ersten Publikationen auf. Für die vorliegende Arbeit ist dieser gar von elementarer Bedeutung. Vor diesem Hintergrund soll dieser Abschnitt in Anlehnung an die Veröffentlichungen [P4] und [P5] des Autors die bis dato fehlende Definition dieser Begrifflichkeit (Abschnitt 4.1.1) in Kombination mit einer Fallunterscheidung hinsichtlich funktionaler und optischer Grenzlagen vornehmen (Abschnitt 4.1.2).

4.1.1 **Definition**

Für die Zielerreichung einer robusten konstruktiven Auslegung wird abgesicherten Tolerierungs- bzw. Toleranzkonzepten im Rahmen von Großserienproduktionen immer größere Aufmerksamkeit entgegengebracht. In diesem Zusammenhang wird der Begriff „Grenzlage“ (engl.: *limiting position*) verwendet. Jener soll in Anlehnung an [P4] und [P5] im Folgenden definiert werden.

Als Ergebnis einer Toleranzrechnung wird eine Grenzlage im Allgemeinen als minimale bzw. maximale erwartete Abweichung eines Schließmaßes von dessen Nennmaß verstanden. Jene ist abhängig vom definierten Wahrscheinlichkeitsniveau, was bedeutet, dass es von grundlegender Wichtigkeit ist, welcher Anspruch an die jeweilige statistische Wahrscheinlichkeitsverteilung des betrachteten und resultierenden Schließmaßes gestellt wird.

Dadurch, dass die dem Schließmaß zugrunde liegende Toleranzrechnung zumeist das Resultat einer Überlagerung verteilungsformabhängiger Einzelabweichungen (siehe Abschnitt 2.2.1) ist, sei an dieser Stelle explizit erwähnt, dass die Grenzlage als solche nicht immer einem „worst case“-Ergebnis gleichzusetzen ist. Ergänzend sei darauf hingewiesen, dass sich die jeweilige Grenzlage sowohl innerhalb als auch außerhalb eines definierten bzw. geforderten Toleranzmaßes befinden kann, siehe Bild 26. Wie bereits in der Definition erwähnt, ist hierbei das Verständnis dafür, welcher Anspruch an die jeweilige statistische Wahrscheinlichkeitsverteilung des betrachteten und resultierenden Schließmaßes gestellt wird, von grundlegender Wichtigkeit, siehe Abschnitt 4.1.2:

- Funktionaler Anspruch: Alle Vorkommnisse der Grundgesamtheit müssen innerhalb der Toleranzgrenzen liegen. Die Grenzlagendefinition ergibt sich somit in Abhängigkeit der Grundgesamtheit. Ein „Ausschuss“ wird nicht zugelassen.
- Optischer Anspruch: Nicht alle Vorkommnisse müssen innerhalb der Toleranzgrenzen liegen. Die Grenzlagendefinition erfolgt beispielsweise als Funktion der k -fachen Standardabweichung σ . Ein „Ausschuss“ wird zugelassen.

Bild 26 illustriert diese Ausführungen zur Grenzlagenausbildung am Beispiel symmetrischer Standardnormalverteilungen.

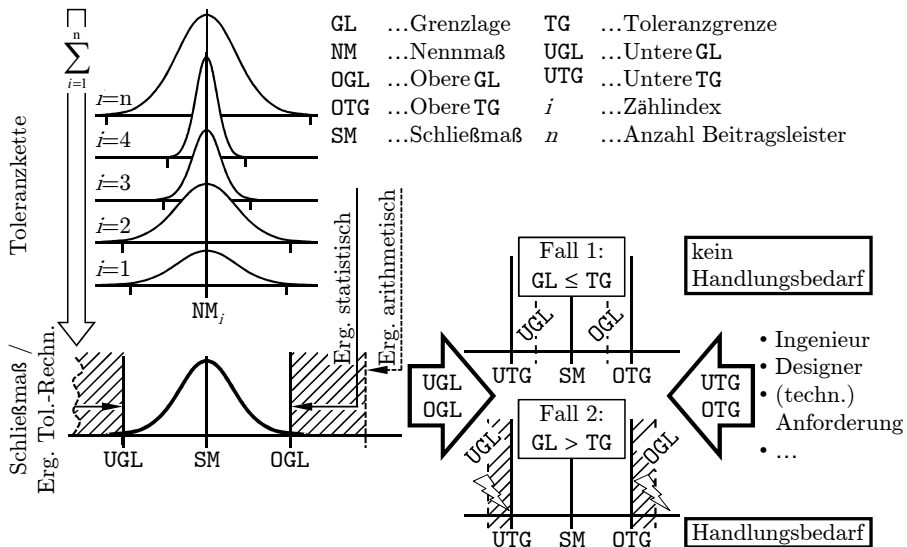


Bild 26: Grenzlagenausbildung mit Fallunterscheidungen am Beispiel von Standardnormalverteilungen, vgl. [P4], eigene Darstellung

In diesem Bild bezeichnet SM das Schließmaß. UTG und OTG stehen für die untere und obere Toleranzgrenze, UGL und OGL für die untere und obere Grenzlage. Das Bild zeigt auf der linken Seite die über das Fehlerfortpflanzungsgesetz ermittelte obere und untere Grenzlage (hier symmetrisch) als statistisches Ergebnis. Jenen Grenzlagen werden im zentralen Bildabschnitt die jeweils obere und untere Toleranzgrenze gegenübergestellt. Die zwei nahestehendsten Fälle 1 und 2 verdeutlichen, wie sich Toleranzgrenzen und Grenzlagen begegnen können. Fall 1 zeigt, dass die mithilfe der Toleranzrechnung ermittelten Grenzlagen (UGL, OGL) innerhalb der vorgeschriebenen Toleranzgrenzen (UTG, OTG) liegen. Ein technischer Handlungsbedarf ist aus dieser Betrachtung heraus nicht notwendig. Fall 2 veranschaulicht das genaue Gegenteil, da sich die obere und untere Grenzlage hier jeweils außerhalb der zugehörigen Toleranzgrenze befindet. Ein Handlungsbedarf ist hier gegeben.

Durch geeignete Maßnahmen, welche hierbei vornehmlich Einschränkungen der erlaubten Toleranzwerte der größten Beitragsleister oder auch konzeptionelle Änderungen bezeichnen, muss ein Weg gefunden werden, die ermittelten Grenzlagen in den Korridor, welcher sich aus den zulässigen Toleranzgrenzen bildet, zu bringen. Auf diesem Wege kann das Schließmaß innerhalb der Toleranzgrenzen bestätigt werden. Mischformen der beschriebenen Fälle sind denkbar und treten auch in der Anwendung auf. Sie sind durch die unterschiedlichen Toleranzspezifikationen und Verteilungsformen der Einzelschließmaße der Beitragsleister sowie asymmetrische Vorgaben bzgl. der zu erreichenden Toleranzgrenzen begründet.

4.1.2 Unterscheidung funktionaler und optischer Grenzlagen

Basierend auf der in Abschnitt 4.1.1 vorgestellten Fallunterscheidung zwischen funktionalem und optischem Anspruch an die statistische Wahrscheinlichkeitsverteilung sollen diese Fälle in diesem Abschnitt genauer erläutert werden.

Grundlegend erfolgt die Unterscheidung dieser zwei Fälle durch die Festlegung, inwieweit geometrische Abweichungen des jeweiligen Schließmaßes von dessen Nominalwert als Folge eines Produktionsprozesses akzeptabel sind bzw. hingenommen werden können. Unter der Annahme, dass die das jeweilige Schließmaß repräsentierende Wahrscheinlichkeitsverteilung normalverteilt um einen Erwartungswert μ_X streut, wird ein $\pm\sigma_X$ -Wert zur Grenzlagenermittlung dieser Verteilung definiert (Fall 1) oder stückzahlabhängig ermittelt (Fall 2).

Fall 1

Wird der $\pm\sigma_X$ -Wert für die Ermittlung der Grenzlagen definiert, sind hierbei folgende Zuordnungen denkbar: $UGL = -k \cdot \sigma_X$ und $OGL = +k \cdot \sigma_X$ mit $k \in [0, \infty]$.

Fall 2

Wird der $\pm\sigma_X$ -Wert für die Ermittlung der Grenzlagen stückzahlabhängig ermittelt, muss zunächst ein Bewertungskriterium für die Ermittlung dieses Wertes definiert werden. Für die nachfolgenden Berechnungen wird die Anforderung definiert, dass die Absicherung so zu gestalten ist, dass weniger als ein Fehler für die Grundgesamtheit auftritt.

Für eine stetige normalverteilte Zufallsvariable $X \in \mathbb{R}$ ist deren Dichtefunktion wie in Gleichung (10) beschrieben definiert – für die Standardnormalverteilung besteht der in Gleichung (11) aufgezeigte Zusammenhang. Die Verteilungsfunktion der Standardnormalverteilung ist analog Gleichung (6) gegeben durch

$$F_Z(z) = \int_{-\infty}^z f_Z(t)dt = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^z \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right)dt \quad (66)$$

und gibt an, mit welcher Wahrscheinlichkeit die Zufallsvariable einen Wert kleiner oder gleich z annimmt.

Sei N die geplante Stückzahl des herzustellenden Produktes. Für diesen Fall sollte die Fehlerwahrscheinlichkeit α des jeweilig betrachteten Schließmaßes kleiner als $\alpha < 1/N$ sein, damit insgesamt weniger als 1 Fehler für die Grundgesamtheit zu erwarten ist und somit funktional alles i. O. ist. Daher sollte die Wahrscheinlichkeit, dass die Zufallsvariable im Intervall $[-k\sigma, k\sigma]$ liegt, größer als $1 - 1/N$ sein, wobei $\sigma = 1$ die Standardabweichung und k der gesuchte Faktor ist. Folglich ist die Gleichung

$$\begin{aligned} F(k) - F(-k) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \left(\int_{-\infty}^k \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) dt - \int_{-\infty}^{-k} \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) dt \right) \\ &= 1 - \frac{1}{N} \end{aligned} \quad (67)$$

nach k aufzulösen. Bild 27 zeigt das Ergebnis dieser Auflösung. In diesem Bild ist die Grundgesamtheit bzw. Stückzahl N auf der horizontalen Achse aufgetragen. Die senkrechte Achse zeigt die $\pm k$ -fache Standardabweichung σ . Der dargestellte Kurvenverlauf repräsentiert die Grenze ab welcher das abzusichernde Kriterium erfüllt ist.

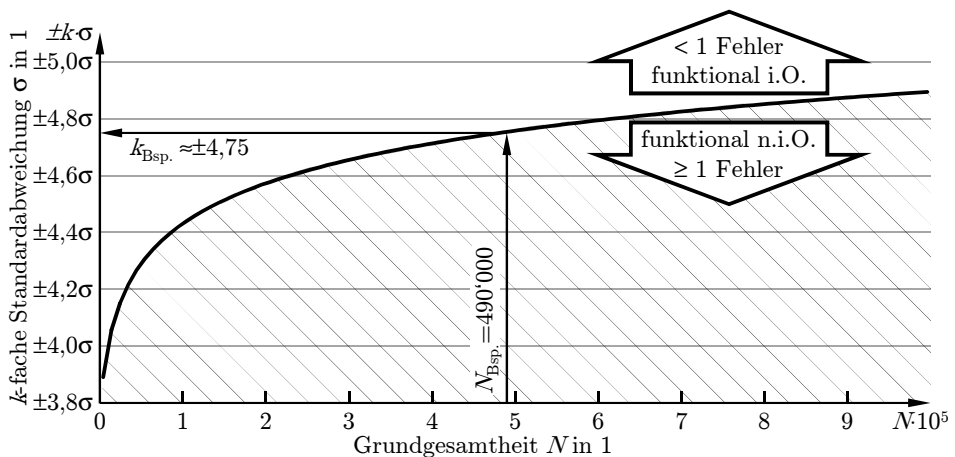


Bild 27: Abgrenzung funktionaler von optischen Grenzlagen, vgl. [P3], eigene Darstellung

Für eine beispielhaft angenommene Grundgesamtheit von $N_{Bsp.} = 490.000$ Einheiten lässt sich somit durch Ablesen in Bild 27 erkennen oder durch eine Berechnung ermitteln, dass mit einer $\pm 4,75$ -fachen Standardabweichung σ abgesichert werden muss, wenn es das Ziel ist, alle Ausprägungen des jeweilig betrachteten Schließmaßes zwischen oberer und unterer Toleranzgrenze zu halten.

4.2 Grundidee des Ansatzes und Vorgehensmodell

Auf Grundlage der Grenzlagenergebnisse einer starren 3D-Toleranzrechnung an definierten Schließmaßen soll ein simulationsunterstütztes Vorgehen für diesen und vergleichbare Anwendungsfälle erarbeitet und abgesichert werden, welches die Überlagerung dieser „starken Grenzlagen“ dem bis dato unberücksichtigten elastischen und nichtlinearen Verhalten der Beitragsleister ermöglicht. Auf diesem Wege soll eine korrigierte/realitätsnähere Grenzlagenaussage begünstigt werden. In Bild 28 ist die Grundidee des Ansatzes skizziert.

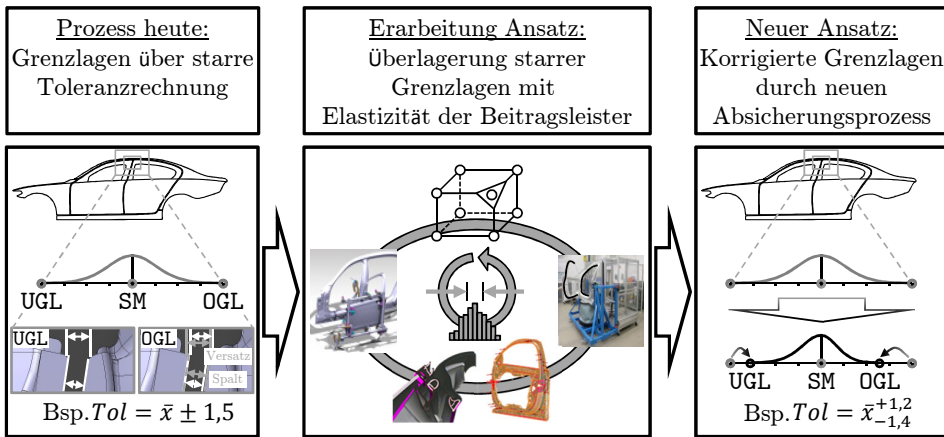


Bild 28: Grundidee des Ansatzes

Dieses Bild zeigt drei wesentliche Bestandteile hinsichtlich der Grundidee des Ansatzes. Beginnend mit dem aktuellen/heutigen Prozess (linker Block), welcher die Grenzlagenberechnung im Wesentlichen als Ergebnis einer starren Toleranzrechnung beschreibt, soll ein Ansatz erarbeitet werden (mittlerer Block), welcher die beschriebene Überlagerung dieser starren Toleranzrechnung mit den Ergebnissen einer korrespondierenden FEM-Berechnung ermöglicht. Auf diesem Wege sollen aus wissenschaftlicher Sicht, anders als bei anderen Ansätzen, die elastischen und nichtlinearen Effekte der Beitragsleister bei der Grenzlagenermittlung berücksichtigt werden. Neben der Einbeziehung dieser Bauteileffekte stellt auch die genannte Überlagerung bzw. Kopplung einen wesentlichen Bestandteil des im Rahmen dieser Arbeit erarbeiteten Ansatzes dar (siehe Abschnitt 4.5.4). Im Ergebnis soll der simulationsunterstützte Ansatz korrigierte/realitätsnähere Grenzlagenaussagen für die jeweilig betrachteten Schließmaße liefern (rechter Block).

Die Umsetzung dieses simulationsunterstützten Ansatzes wird in seinen grundlegenden Zügen, wie in Bild 29 dargestellt, durchgeführt. In diesem Bild sind vier wesentliche Blöcke zu erkennen.

Wie bereits in Abschnitt 1.2 kurz umrissen, dienen die Blöcke 3 und 4 der einmaligen Validierung des erarbeiteten Ansatzes. Diese Blöcke sollen kein Bestandteil des Prozessvorschlages sein, welcher im Rahmen dieser Arbeit erarbeitet wird.

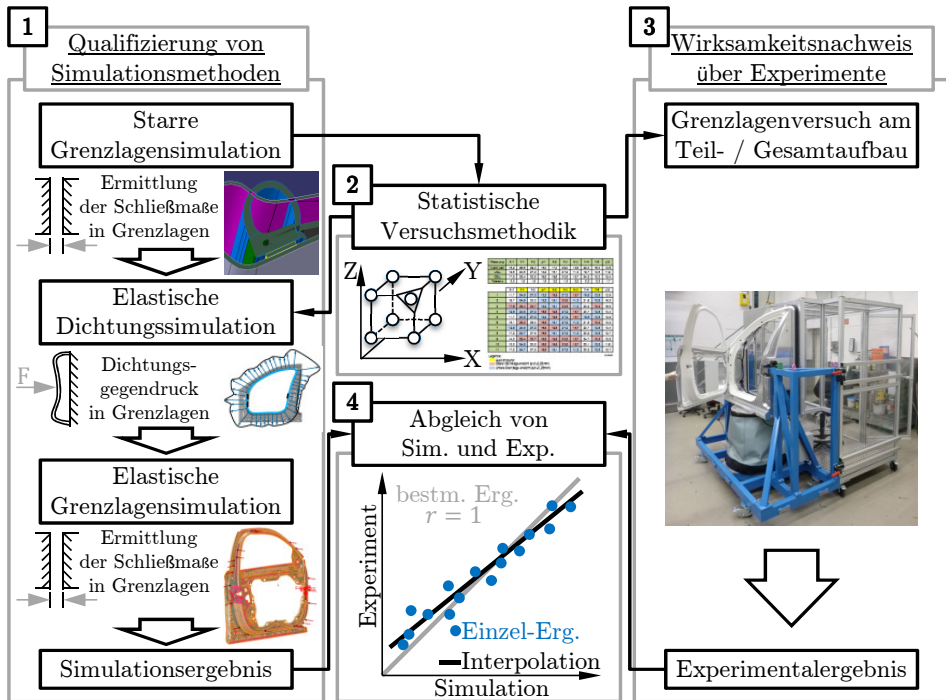


Bild 29: Vorgehensmodell

Block 1: Qualifizierung von Simulationsmethoden

Im ersten Block „Qualifizierung von Simulationsmethoden“ wird ein mehrstufiger Prozess durchlaufen. Im ersten Schritt werden die „starrten Grenzlagen“ für die betrachteten Schließmaße unter Zuhilfenahme der *Computer-Aided Tolerancing-Software* (CAT) 3DCS Variation Analyst ermittelt, siehe Abschnitt 2.3.1. Können diese Grenzlagen als bekannt vorausgesetzt werden, erfolgt die Übergabe dieser an den zweiten Block „Statistische Versuchsmethodik“, dessen *Output* wiederum als *Input* weiterverwendet wird. Im zweiten Schritt des ersten Blockes wird der erste Teil der FEM- Berechnungen durchgeführt. Mithilfe des zugehörigen FEM-Modells werden in diesem

die ermittelten starren Grenzlagen unter Ausschluss von elastischen Verformungen per Zwangsbedingung herbeigeführt. Ausgenommen von dieser Starrkörperbetrachtung ist das Dichtsystem. Von diesem ausgehend resultieren, je nach betrachteter Grenzlagensituation, entsprechende Rückstellkräfte, welche auf die angrenzenden Bauteile wirken. Im dritten Schritt (zweiter Teil der FEM-Berechnungen) wirken diese Rückstellkräfte auf die nun elastisch verformbaren Bauteile der Baugruppe, woraufhin sich entsprechende geometrische Deformationen (Rückstellungen) ausbilden. Jene, sich auf Basis der FEM-Berechnungen ergebenden Rückstellungen, werden abschließend unter Anwendung einer geeigneten Kopplungsstrategie mit den CAT-Grenzlagen überlagert werden, siehe Abschnitt 4.5.4. Dieses Ergebnis wird dem vierten Block „Abgleich von Simulation und Experiment“ zur Verfügung gestellt¹.

Block [2]: Statistische Versuchsmethodik

Im zweiten Block „Statistische Versuchsmethodik“ wird auf Basis der starren Grenzlagen ein statistischer Versuchsplan erstellt, siehe Abschnitt 4.5.2, welcher als *Input* sowohl für die FEM-Berechnungen in Block 1 als auch für die experimentelle Absicherung in Block 4 dient¹.

Block [3]: Wirksamkeitsnachweis über Experimente¹

Der dritte Block befasst sich mit der Absicherung der Grenzlagen im Experiment, siehe Abschnitt 5.6. Als *Input* für das Experiment dient derselbe statistische Versuchsplan, wie er auch bei den FEM-Berechnungen verwendet wird. Auf diesem Wege sollen reale Vergleichswerte zu den Simulationsergebnissen ermittelt werden.

Block [4]: Abgleich von Simulation und Experiment¹

Der finale vierte Block beinhaltet den Abgleich der Simulations- und Experimentalergebnisse, siehe Abschnitt 6. Durch die Ermittlung von Korrelationskoeffizienten zwischen Simulation und Experiment sollen sowohl das Simulationsergebnis als auch der Simulations- und Kopplungsansatz aus dem ersten Block validiert werden.

¹ Wie bereits in Abschnitt 1.2 kurz umrissen, dienen die Blöcke 3 und 4 der einmaligen Validierung des erarbeiteten Ansatzes. Diese Blöcke sollen kein Bestandteil des Prozessvorschlages sein, welcher im Rahmen dieser Arbeit erarbeitet wird.

4.3 Vorstellung des Demonstrators

Für die vorliegende Arbeit wird der Einstiegsbereich eines Automobils als praxisnaher Demonstrator ausgewählt, welcher sich in seinen funktionsrelevanten und abweichungsbehafteten Hauptbestandteilen im wesentlichen aus dem Fahrzeugseitenrahmen, der/den Rahmentür(en)², dem Mehr-Ebenen-Dichtsystem sowie verschiedenen Anbau- bzw. Verkleidungsteilen zusammensetzt, siehe Bild 30. Das Mehr-Ebenen-Dichtsystem bezieht sich bei diesem auf die drei größten Dichtebenen – den Kantenschutz (KS), die Türhauptdichtung (THD) und die Fugendichtung (FD). Die Dichtung zwischen Tür und Türscheibe wird als interne Dichtung der Baugruppe „Tür“ nicht betrachtet. Auch ohne Mehr-Ebenen-Dichtsystem sind Tür und Seitenrahmen über die Türscharniere permanent und das Türschloss temporär miteinander verbunden und folglich zu keinem Zeitpunkt kinematisch vollständig voneinander entkoppelt.

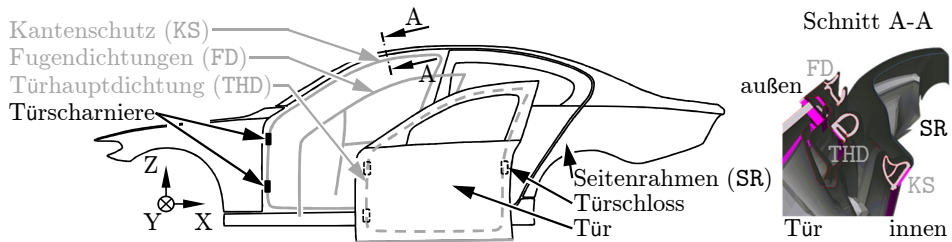


Bild 30: Praxisdemonstrator: Fahrzeugeinstieg

Wahl des Koordinatensystems

Das fortan verwendete Haupt-Koordinatensystem (X, Y, Z) ist das Fahrzeugkoordinatensystem wie in Bild 30 dargestellt. Die Y -Achse dieses Koordinatensystems verläuft positiv entlang der Vorderachse der Fahrzeuges in Beifahrerrichtung (Linkslenker), mit dem Nullpunkt in der Mitte der Vorderachse. Die positive X -Richtung verläuft entgegen der Fahrtrichtung von diesem Nullpunkt ausgehend, die positive Z -Richtung senkrecht nach oben.

² Eine Fahrzeugtür wird dann als Rahmentür bezeichnet, wenn eine umlaufende Struktur, typischerweise aus Metall, türseitig umgesetzt ist.

4.4 Einflussfaktoren auf das funktionale Kriterium Dichtheit am Fahrzeugeinstieg

Das sowohl kunden- als auch funktional relevante Kriterium Dichtheit rund um den Fahrzeugeinstieg wird in dieser Arbeit priorisiert. Für den betrachteten Umfang umfasst dieses die Dichtheit gegenüber Wasser, Staub und anderen Medien. In Hinblick auf dieses aber auch auf andere funktionale Kriterien, wie etwa den Bedienkomfort beim Öffnen oder Schließen einer Fahrzeugtür, sind insbesondere die Wechselwirkungen zwischen Dichtungsverhalten, Struktursteifigkeit und resultierender funktionaler Toleranzsituation im funktionsrelevanten Dichtspalt von Interesse.

Mithilfe eines Ursache-Wirkungs-Diagramms, in diesem Fall wird ein ISHIKAWA-Diagramm herangezogen, werden die Einflussfaktoren auf dieses Kriterium transparent dargestellt, siehe Bild 31, vgl. [S7]. Die in diesem Bild enthaltenen Einflussfaktoren sind das Ergebnis einer zweiteiligen Workshop-Reihe (Februar 2014), in welcher Expertenwissen empirisch erhoben/zusammengetragen wurde. Teilnehmer waren 20 Fachingenieure und -spezialisten eines deutschen Automobil- und Motorradherstellers, welche verschiedene Funktionen in der Entwicklung, Absicherung, Versuchsdurchführung und Montage rund um den Fahrzeugeinstieg verantworten.

Sowohl die Vielzahl an Einflussfaktoren als auch der Fakt, dass einige von ihnen derzeit weder virtuell noch experimentell absicherbar sind, zeigen, dass die umfassende qualifizierte Absicherung des betrachteten funktionalen Kriteriums als durchaus kompliziert angesehen werden kann. Es ist zudem davon auszugehen, dass die Einflussfaktoren teils miteinander korrelieren, was vor- und nachteilig sein kann. Inwiefern diese Einflussfaktoren in die Untersuchungen mit einbezogen werden können, wird in den Abschnitten 4.5 (Simulation) und 5.1 (Experiment) thematisiert.

4.5 Virtuelle Absicherung funktionaler Grenzlagen

Virtuelle Verfahren bieten anwendungsabhängige Möglichkeiten, die es u. a. erlauben können, Konstruktionen rechnerunterstützt auszulegen, abzusichern und hinsichtlich potentieller Verbesserungspotentiale zu untersuchen. Getrieben wird dieses Vorgehen einerseits durch das Bestreben, Zeitbedarfe und Kosten sowohl beim Prototypenbau als auch bei der möglichen Fehlersuche in der Serienbauphase zu minimieren. Andererseits „steigert ein Produkt, welches durch Zuverlässigkeit beeindruckt, die Kundenzufriedenheit“ nachhaltig, vgl. [S6]. Laut [197] entstehen während des Produktentwicklungsprozesses 75 % der Fehler in den Produktphasen „Definition“, „Entwicklung“ und „Arbeitsvorbereitung“, siehe Bild 32. Die virtuelle Absicherung funktionaler Grenzlagen unterstützt durch Anwendung eines gekoppelten Simulationsansatzes das Ziel, diese Fehlerquote zu verringern.

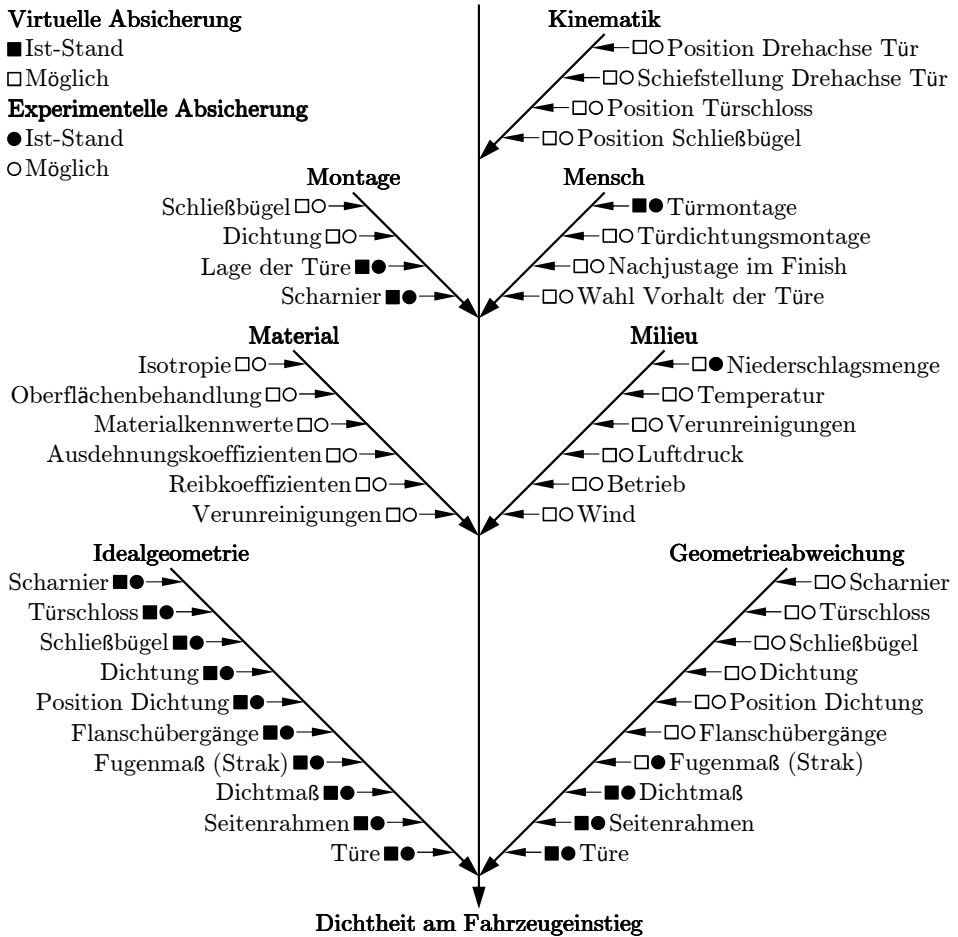


Bild 31: ISHIKAWA-Diagramm bzgl. der Einflussfaktoren auf die Dichtheit am Fahrzeugeinstieg inkl. Zuordnung virtueller/experimenteller Absicherungsaktivitäten

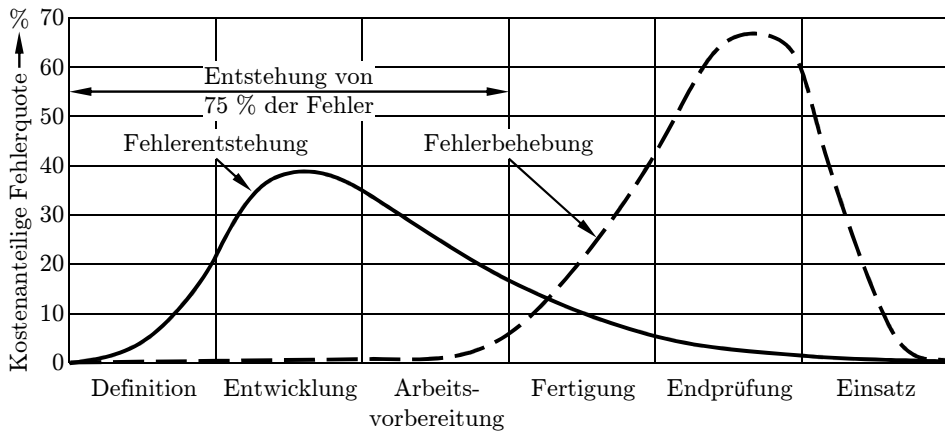


Bild 32: „Übliche Fehlerentstehung und -behebung in den Produktphasen“, vgl. [197, Bild 2-2A], eigene Darstellung

Wie bereits in der Einleitung von Kapitel 2 beschrieben, soll dieser Ansatz Simulationsergebnisse auf Basis einer gekoppelten Toleranzrechnung, zur Berücksichtigung elastischer und nichtlinearer Effekte auf das Systemverhalten, liefern. In den folgenden Abschnitten 4.5.1 bis 4.5.4 wird dieser Prozess in Analogie zu den entsprechenden theoretischen Ausführungen in Abschnitt 2.3 beschrieben. Abschnitt 4.5.5 thematisiert die sich anschließenden Robustheitsuntersuchungen.

4.5.1 Grenzlagenermittlung auf Basis einer starren Toleranzsimulation

Bezugnehmend auf das in Abschnitt 4.2 vor- und in Bild 29 dargestellte Vorgehensmodell ist es der erste Schritt des Ansatzes zur simulationsunterstützten funktionalen Grenzlagenabsicherung, die starren Grenzlagen für die betrachteten Schließmaße zu bestimmen. Im Rahmen dieser Arbeit wird für diese Bestimmung die Toleranzsimulationssoftware 3DCS Variation Analyst (3DCS) des US-amerikanischen Herstellers Dimensional Control Systems (DCS), vgl. [128], verwendet, siehe Abschnitt 2.3.1. Die mit jener *Software* ermittelten Grenzlagen werden für zweierlei Folgeschritte benötigt. Einerseits stellen sie die Grundlage für die nachgeschalteten FEM-Berechnungen und die sich anschließende Kopplungsthematik dar. Andererseits werden jene zur Validierung des zugehörigen Experiments benötigt, siehe Abschnitt 6.1.

In Anlehnung an die in Abschnitt 2.3.1 angesprochene und in Tabelle 6 aufgezeigte achtschrittige, generische Vorgehensweise zur Modellierung von Toleranzsimulationen erfolgt der grundlegende Aufbau der Toleranzsimulation, vgl. [P4]. Unter der Voraussetzung, dass ein geeignetes CAD-Modell existiert, wird an dieser Stelle mit Punkt ④ begonnen. Der Aufbau gestaltet sich demnach wie nachfolgend dargestellt.

4 Zuweisung der Toleranzen für die Features in den Maßketten

Die durch den entsprechenden Lieferanten bzw. Monteur zu bestätigenden Beitragsleister Form- und Lageabweichungen, welche über Bauteil- und Montagetoleranzen repräsentiert und eingeschränkt werden sollen, werden an definierten, diskreten Bauteilpunkten in die Simulation implementiert. Es ist an dieser Stelle sinnvoll, realitätsgetreue Beziehungen hinsichtlich des Streuverhaltens der Elemente der Stichprobe an den jeweilig gewählten Bauteilpunkten herzustellen. Hierbei können in 3DCS drei wesentliche Optionen unterschieden werden, siehe Bild 33:

- **Independent-Toleranz**

Für die ausgewählten abweichungsbehafteten Bauteilpunkte „streuen“ die korrespondierenden Elemente der Stichprobe jeweils unabhängig voneinander im Rahmen des erlaubten Toleranzfeldes.

- **Group-Toleranz**

Für die ausgewählten abweichungsbehafteten Bauteilpunkte „streuen“ die korrespondierenden Elemente der Stichprobe mit demselben Wert in dieselbe Richtung im Rahmen des erlaubten Toleranzfeldes.

- **Composite-Toleranz**

Die Stichprobenelemente eines abweichungsbehafteten Bauteilpunktes „streuen“ im Rahmen des erlaubten Toleranzfeldes. Die Elemente der Stichprobe aller anderen abweichungsbehafteten Bauteilpunkte „streuen“ ausgehend von diesem ersten „unabhängigen“ Bauteilpunkt innerhalb eines zweiten Toleranzfeldes um diesen Bauteilpunkt.

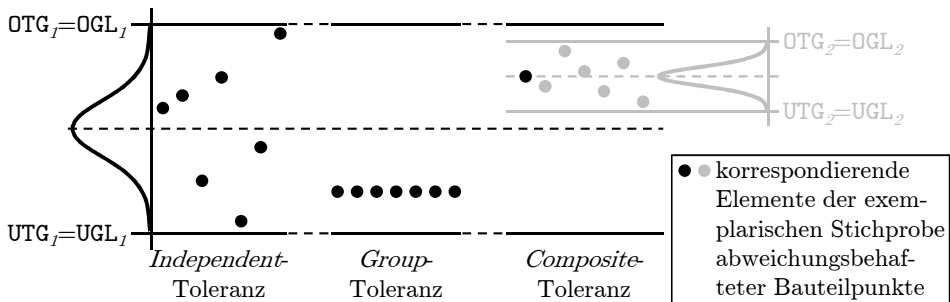


Bild 33: Grundlegende Toleranzklassifizierungen in 3DCS für korrespondierende Elemente einer Stichprobe abweichungsbehafteter Bauteilpunkte am Beispiel symmetrischer Standardnormalverteilungen für einen exemplarischen Simulationsdurchlauf

5 Erzeugung der Montagereihenfolge

Sowohl auf Grundlage der jeweiligen Bauteilausrichtung (zur Einschränkung der sechs Freiheitsgrade im Raum) als auch auf Grundlage der zugehörigen Tolerierung erfolgt die Abbildung des virtuellen Montageprozesses unter Einhaltung der real geplanten Fügefolgen, siehe Bild 34. Bereits an dieser Stelle kann festgestellt werden, dass die sich anschließende Toleranzsimulation eine frühzeitige Untersuchung und Optimierung der Toleranz- und Ausrichtkonzepte im PEP ermöglicht.

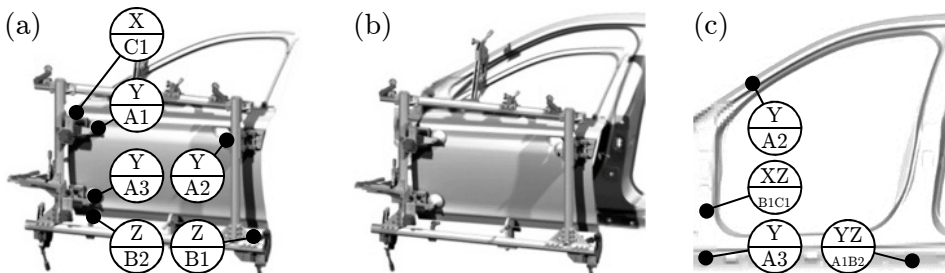


Bild 34: Mögliche Montagereihenfolge: (a) Ausrichtung der Tür auf dem Werkstückträger; (b) & (c) Ausrichtung des Werkstückträgers an der Karosserie, vgl. [S1] und [P4], eigene Darstellung

Der in diesem Bild dargestellte 3-2-1-Verbau der Tür, siehe Abschnitt 2.1.1, an den Seitenrahmen im Karosseriebau erfolgt nicht zwingend manuell unter Verwendung eines Werkstückträgers. Ein automatisierter Verbau unter Anwendung des sogenannten *BestFit*-Verfahrens, welches grundlegend auf optischen Messungen an dediziert betrachteten Schließmaßen mit einer anschließenden Ausmittlung eben jener durch Neupositionierung eines Bauteils (bspw. der Tür) beruht, ist ebenfalls denkbar. Zur Sicherstellung der Vergleichbarkeit von Realität und Simulation wird für den gewählten Demonstrator der 3-2-1-Verbau der Tür in der Simulation umgesetzt.

6 Anlegen von Messungen für jedes spezifizierte Qualitätskriterium

Das Festlegen der Positionen der Messstellen erfolgt auf Basis konkreter anwendungsbezogener Anforderungen und/oder auf Grundlage von Erkenntnissen aus empirischen Daten. Für den vorliegenden Anwendungsfall erfolgen 19 Messungen, wie sie in Bild 35 dargestellt sind.

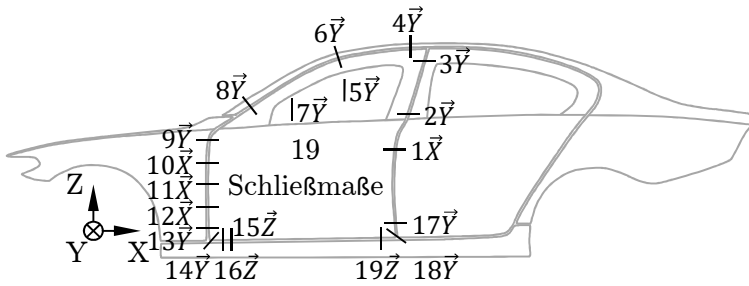


Bild 35: Verortung der 19 betrachteten Schließmaße

Wenn sich auch die meisten im verdeckten Bereich befinden, so sind diese dennoch als kundenrelevant anzusehen, da sie eine Aussage bzgl. des erklärten funktionalen Zieles einer Dichtigkeitsabsicherung gegenüber Wasser, Staub oder anderen Medien für den Demonstrator Fahrzeugeinstieg ermöglichen sollen. Die in Simulation und Experiment vergleichbar ausgeführten taktilen Messungen werden wie folgt umgesetzt: Unmittelbar neben der Türhauptdichtung werden die Messtaster seitenrahmenseitig derart verbaut, dass eine möglichst senkrechte Messung auf eine jeweilig gegenüberliegende Oberfläche der Türstruktur durchgeführt werden kann, siehe Bild 36. Ist eine solche senkrecht zum Messtaster stehende Oberfläche aus konstruktiven Gründen beim realen Demonstrator nicht gegeben, erfolgt auch in der Simulation keine Messung in diesem Bereich, da die Messergebnisse aufgrund zu erwartender Ungenauigkeiten bei den realen Messungen nicht verglichen werden könnten. Wie bereits erwähnt, werden die realen taktilen Messtaster im Rahmen der virtuellen Betrachtungen über entsprechende Geometrien und Messungen nachgebildet. Jene liefern in beiden Welten (Realität und Simulation) reine Entfernungsaussagen. Es lassen sich mit diesen weder Kraft- noch Verformungsmessungen durchführen. Um etwaige Verkippungen der Tür gegenüber dem Seitenrahmen messtechnisch erfassen zu können, sind, wenn möglich, mehrere Messtaster entlang nahezu gerader Flanschbereiche positioniert. Von den 19 Messtastern messen 2 auf die Seitenscheibe. Die verbleibenden 17 Messtaster sind umlaufend um den Einstiegsbereich zwischen Tür und Seitenrahmen in der beschriebenen Nähe zur Türhauptdichtung verortet. Bezogen auf die jeweilige Hauptvektorrichtung messen von diesen 17 Messtastern 4 in X-Richtung, 10 in Y-Richtung und 3 in Z-Richtung. Die verbleibenden 2 Messtaster auf der Seitenscheibe dienen als Kontrollmessungen in Y-Richtung.

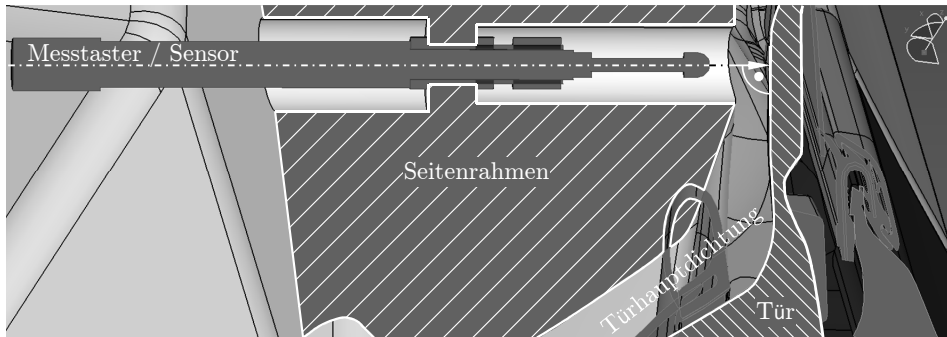


Bild 36: Beispielhafte Verortung eines Messtasters im Seitenrahmen

7 Durchführen der Berechnung

Alle definierten Form- und Lagetoleranzen werden in diesem Schritt im Rahmen ihres jeweilig zugewiesenen Toleranzfeldes variiert. Realisiert werden diese Variationen unter Zuhilfenahme einer MONTE CARLO-Simulation (MCS). Jene generiert statistisch gleichverteilte Zufallszahlen, „welche jeweilig auf die entsprechend vorgegebene Verteilung transformiert werden ([180], [181])“, vgl. [P4]. Anschließend erfolgen der virtuelle Zusammenbau der betrachteten Baugruppe entsprechend Montagereihenfolge und Ausrichtkonzepten sowie die Messung und Speicherung der Schließmaße an den vorab definierten Messstellen. Dieses Vorgehen wird entsprechend der gewünschten Stichprobengröße, welche ein gewisses Mindestmaß hinsichtlich einer statistischen Auswertung nicht unterschreiten sollte (bspw. 10'000-fach, Gesetz der großen Zahlen, vgl. [198]), wiederholt, damit einer jeden Messstelle eine der Stichprobengröße äquivalente Anzahl an gemessenen Schließmaßen zugeordnet werden kann. Hierbei ist jedoch stets auch der steigende Rechenaufwand bei steigender Iterationszahl in die Aufwand-Nutzen-Rechnung mit einzubeziehen.

8 Analyse und Dokumentation der Ergebnisse

Der Simulationsdurchführung schließt sich eine Analyse – in diesem Fall eine statistische Auswertung – der virtuellen Messdaten an. Diese Auswertung kann einerseits innerhalb 3DCS erfolgen, andererseits ist auf Basis eines Rohdatenexportes auch eine Auswertung mit anderen *Software*-Lösungen denkbar. Es resultieren u.a. die „starren Grenzlagen“ sowie eine zugehörige Beitragsleisteranalyse für eine jede Messstelle, vgl. [199]. Diese quantifiziert den prozentualen Einfluss einer jeden Form- und Lageabweichung auf die vorherrschende Toleranzsituation (Streuung) an der entsprechen-

de Messstelle (Schließmaß). Zudem unterstützt sie den Fachmann bei der Plausibilisierung der Toleranzsimulationen, da sich aufgrund unerwartet vorhandener und/oder offensichtlich fehlender Beitragsleister Fehler bei der simulativen Umsetzung erkennen lassen. Bei Erreichung der verzielten statistisch maximalen Schließmaßtoleranzen ist es aus Herstellersicht sinnvoll, „insbesondere kleinere (...) (und/oder) sekundäre Toleranzen (zu detektieren und) aufzuweiten, wodurch sich Fertigungskosten senken lassen. Bei Nichterreichung des Schließmaßziels sollte hingegen die Reduzierung des größten Beitragsleisters Vorrang haben, da dieser den größten Einfluss auf die Schließmaßtoleranz hat“, vgl. [Si].

Als statistischer Signifikanztest zur Prüfung der Messergebnisse auf Normalverteilung, siehe Abschnitt 2.2.2, wird der ANDERSON-DARLING-Test verwendet. Bei einem Signifikanzniveau von $\alpha = 5\%$ zeigt dieser für alle Messstellen, vgl. Bild 35, dass von Normalverteilungen ausgegangen werden kann. Für den in dieser Arbeit behandelten Demonstrator sind die ermittelten starren Grenzlagen den Messstellen zugeordnet in Tabelle 18 dargestellt.

Tabelle 18: Ergebnisse der starren Grenzlagenberechnungen für die betrachteten Messstellen

KPC #	1	2	3	4	5	6	7	8
UGL	17,61	17,56	17,13	17,23	17,50	17,71	17,92	17,96
$\bar{x}$	18,60	18,60	18,60	18,60	18,60	18,60	18,60	18,60
OGl	19,59	19,64	20,07	19,97	19,70	19,49	19,28	19,24
$\pm n \cdot s$	$\pm 0,99$	$\pm 1,04$	$\pm 1,47$	$\pm 1,37$	$\pm 1,1$	$\pm 0,89$	$\pm 0,68$	$\pm 0,64$
KPC #	9	10	12	13	14	15	17	19
UGL	18,10	17,61	17,57	16,88	17,61	18,05	18,10	17,97
$\bar{x}$	18,60	18,60	18,60	17,72	18,57	18,60	18,60	18,60
OGl	19,10	19,59	19,63	18,55	19,53	19,15	19,10	19,23
$\pm n \cdot s$	$\pm 0,5$	$\pm 0,99$	$\pm 1,03$	$\pm 0,84$	$\pm 0,96$	$\pm 0,55$	$\pm 0,5$	$\pm 0,63$

in mm

4.5.2 Ableitung einer statistischen Versuchsmethodik zur Validierung funktionaler Grenzlagen

Es ist das Ziel, die funktionsrelevanten Grenzlagen, welche in Abschnitt 4.5.1 ermittelt wurden, in der Simulation zu betrachten. Hierfür stellt sich die Frage nach einer geeigneten Vorgehensweise bzw. nach einem geeigneten Versuchsplan. Ziel dieses Unterkapitels soll es sein, „eine geeignete statistische Versuchsplanung (...) abzuleiten, welche bei minimalem Aufwand den größtmöglichen Erfüllungsgrad³ hinsichtlich der Erreichung aller Grenzlagen für den betrachteten Demonstrator liefert“, vgl. [P6].

Ermittlung und Vergleich der Erfüllungsgrade auf Basis relevanter statistischer Versuchsplantypen

Auf Basis der Vorarbeiten von EPPLE, vgl. [S1], und ROHLING, vgl. [S2], kann eine Vorauswahl hinsichtlich zweier potentiell geeigneter Versuchsplantypen für den vorliegenden Fall mit zwei Faktorstufen (untere/obere Grenzlage: UGL/OGL) getroffen werden: TAGUCHI Versuchspläne und D-Optimale Versuchspläne. Diese werden in Abschnitt 2.3.2 vorgestellt.

Bei den beiden genannten Vorarbeiten lautet die Empfehlung, einen D-Optimalen Versuchsplan zu erstellen. Wesentliches Entscheidungsgrundlage ist hierbei das Ergebnis einer Nutzwertanalyse, welche die Kriterien

- Variable Parameteranzahl (beliebig viele Einfluss- und Zielgrößen definierbar),
- Möglichst geringer Versuchsumfang (Basis: zehn Einflussfaktoren),
- Auswertbarkeit von Wechselwirkungen möglich,
- Möglichkeit, Faktorkombinationen auszuschließen bzw. einzugrenzen,
- Möglichst geringer Planungsaufwand,

berücksichtigt, siehe Tabelle 47. Nichtsdestotrotz erfolgt an dieser Stelle eine erneute Bewertung und abschließende Auswahl zwischen den beiden erwähnten Versuchsplantypen.

Schritt 1: Erstellung d. Kovarianzmatrix f. D-Optimale Versuchspläne

Bevor der TAGUCHI oder der D-Optimale Versuchsplan hinsichtlich ihrer Erfüllungsgrade für den thematisierten Demonstrator verglichen werden können, müssen für den Fall „D-Optimaler Versuchsplan“ noch weitere Vorarbeiten durchgeführt werden: es gilt, Abhängigkeiten zwischen den betrachteten Schließmaßen zu ermitteln, da diese in die Versuchsplaner-

³ Definition Erfüllungsgrad: Verhältnis von untersuchter zu maximal möglicher Grenzlagenanzahl

stellung mit einbezogen werden können, siehe Tabelle 15. Hierfür wird die 3DCS -Toleranzsimulation mit 100'000 Iterationen durchgeführt und an den betrachteten Messstellen ausgewertet, siehe Bild 35, vgl. Abschnitt 4.5.1. Als Ergebnis dieser Simulationen resultiert eine Ergebnismatrix mit 16 Spalten (3 Messstellen bleiben unberücksichtigt, da sie als reine Referenzmessungen in X , Y und Z dienen) und 100'000 Zeilen. Aus dieser wird eine symmetrische Kovarianzmatrix, vgl. [50], abgeleitet, welche die Wechselwirkungen zwischen den Schließmaßen aufschlüsselt. Eine solche Matrix ist in Bezug auf deren Hauptdiagonale stets symmetrisch. Auf dieser Hauptdiagonalen selbst finden sich die Varianzen (quadrierte Standardabweichungen) der betrachteten Merkmale. Jene Elemente werden jedoch nicht betrachtet. Die Kovarianzen zwischen zwei betrachteten Merkmalen beschreiben deren jeweiligen und vorzeichenabhängigen Wirkzusammenhang:

- positives Vorzeichen: gleichsinnige Wirkung,
- negatives Vorzeichen: gegensinnige Wirkung.

Die symmetrische und auf zwei Nachkommastellen gerundete Kovarianzmatrix für den vorliegenden Fall ist in Tabelle 19 dargestellt. Hierin wurden alle Werte mit dem Faktor für die Standardabweichung $k_{\text{Bsp.}} = 2 \cdot |\pm 4,75| = 9,5$ multipliziert – entsprechend der angenommenen exemplarischen Stichprobengröße von $N_{\text{Bsp.}} = 490'000$ Einheiten, siehe Bild 27.

Typischerweise werden an dieser Stelle die betragsmäßig größten Wechselwirkungen in die weiteren Betrachtungen eingeschlossen. Aufgrund realer Randbedingungen gibt es an dieser Stelle jedoch Einschränkungen, die dies teils verhindern. So zeigen sich verhältnismäßig große Werte bei den Messtastern/KPC's 5 und 7. Diese dienen jedoch, wie in Abschnitt 4.5.1 beschreiben, als reine Kontrollmessungen in Y -Richtung, und werden daher von dieser Betrachtung ausgeschlossen. Die 10 betragsmäßig größten verbleibenden Korrelationen werden anschließend für die Erstellung des D-Optimalen Versuchsplans verwendet. In Tabelle 19 sind diese markiert. Aufgrund der Symmetrieeigenschaft der Kovarianzmatrix sind die Ergebniswerte oberhalb der Hauptdiagonalen „nur“ in einem leichten Grauton dargestellt. Man hätte diese oder die Ergebniswerte unterhalb der Hauptdiagonalen bei der Darstellung auch entfallen lassen können.

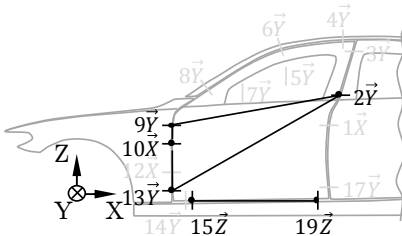
Tabelle 19: Symmetrische Kovarianzmatrix für die betrachteten Messstellen

KPC #	1	2	3	4	5	6	7	8
1		1,60	1,95	1,75	1,37	1,17	0,98	0,78
2	1,60		2,16	2,00	1,64	1,51	1,35	1,19
3	1,95	2,16		2,45	1,97	1,73	1,51	1,28
4	1,75	2,00	2,45		1,86	1,71	1,53	1,37
5	1,37	1,64	1,97	1,86		1,56	1,46	1,38
6	1,17	1,51	1,73	1,71	1,56		1,52	1,48
7	0,98	1,35	1,51	1,53	1,46	1,52		1,48
8	0,78	1,19	1,28	1,37	1,38	1,48	1,48	
9	0,30	0,81	0,71	0,94	1,12	1,27	1,33	1,38
10	-0,85	-1,31	-1,41	-1,40	-1,19	-1,24	-1,16	-1,08
12	-1,08	-1,55	-1,71	-1,67	-1,41	-1,42	-1,31	-1,21
13	-1,16	-1,65	-1,80	-1,76	-1,49	-1,48	-1,36	-1,25
14	-1,34	-1,67	-2,01	-1,84	-1,41	-1,25	-1,02	-0,77
15	-0,94	-1,05	-1,37	-1,16	-0,74	-0,26	0,48	0,71
17	0,33	-0,24	-0,76	-0,70	-0,64	-0,58	-0,55	-0,54
19	-0,38	-0,60	-0,97	-0,90	-0,80	-0,73	-0,69	-0,65
KPC #	9	10	12	13	14	15	17	19
1	0,30	-0,85	-1,08	-1,16	-1,34	-0,94	0,33	-0,38
2	0,81	-1,31	-1,55	-1,65	-1,67	-1,05	-0,24	-0,60
3	0,71	-1,41	-1,71	-1,80	-2,01	-1,37	-0,76	-0,97
4	0,94	-1,40	-1,67	-1,76	-1,84	-1,16	-0,70	-0,90
5	1,12	-1,19	-1,41	-1,49	-1,41	-0,74	-0,64	-0,80
6	1,27	-1,24	-1,42	-1,48	-1,25	-0,26	-0,58	-0,73
7	1,33	-1,16	-1,31	-1,36	-1,02	0,48	-0,55	-0,69
8	1,38	-1,08	-1,21	-1,25	-0,77	0,71	-0,54	-0,65
9		-0,75	-0,84	-0,87	0,53	0,94	-0,26	-0,38
10	-0,75		1,70	1,77	1,62	1,08	0,92	1,02
12	-0,84	1,70		1,95	1,82	1,22	0,95	1,07
13	-0,87	1,77	1,95		1,92	1,31	0,97	1,11
14	0,53	1,62	1,82	1,92		1,53	1,01	1,11
15	0,94	1,08	1,22	1,31	1,53		0,90	0,98
17	-0,26	0,92	0,95	0,97	1,01	0,90		1,07
19	-0,38	1,02	1,07	1,11	1,11	0,98	1,07	

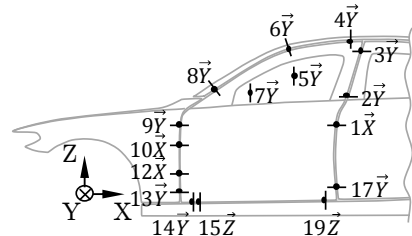
Schritt 2: Erstellung der statistischen Versuchspläne und Ermittlung der Erfüllungsgrade

Für die statistische Versuchsplanerstellung wird die Software VISUAL-XSEL 13.0 sowohl für die Option „TAGUCHI“ als auch für die Option „D-Optimal“ verwendet. Hierbei werden jeweils zwei Ansätze unterschieden. „Zum einen werden 6 und zum anderen 16 Faktoren (/Ausrichtpunkte) (entsprechend den Schließmaßen) (an den Messstellen) verwendet“, vgl. [P6], siehe Tabelle 20.

Tabelle 20: Vor- und Nachteile von Versuchsplänen mit 6 oder 16 Faktoren (/Ausrichtpunkten)



Versuchsplan mit 6 Faktoren



Versuchsplan mit 16 Faktoren

⊕ Das Ausrichtsystem der Rahmentür am Seitenrahmen wird durch die entsprechenden Schließmaße an den Messstellen nachempfunden.	⊖ Es können Versuche resultieren, bei denen die 10 verbleibenden Schließmaße unzulässige Werte außerhalb ihres jeweiligen Grenzlagen zugewiesen bekommen, was zu Bauteilkollisionen führen kann.
⊕ Eine mögliche Kollisionsgefahr zwischen Rahmentür u. Seitenrahmen wird ausgeschlossen.	⊖ Die Anzahl an Versuchen ist vergleichsweise erhöht.

Für die insgesamt vier Fallunterscheidungen werden in VISUAL-XSEL Versuchspläne erstellt. Grundlegend ist es das Ziel, eine minimale Versuchsanzahl bei maximalem Erfüllungsgrad zu erreichen. In [S2] wird ein Verfahren beschrieben, wie über sogenannte *Deviation-Files* (*.dev) Daten zurück in die 3DCS-Toleranzsimulation in CATIA V5 importiert werden können. Es wird sich dieses Vorgehens bedient. Für die Toleranzsimulation bedeutet dies, dass sich an den Messstellen nun nicht per MONTE CARLO-Algorithmus und Zusammenbausimulation Schließmaße ergeben. Im Gegenteil werden nun den 6 bzw. 16 Ausrichtpunkten direkt diejenigen Schließmaße aus der statistischen Versuchsplanung zugewiesen. Die Ausrichtung der betrachteten Bauteile zueinander ändert sich folglich entsprechend des konkreten Versuchs. Die Schließmaße aller anderen Messstellen, die nicht als Ausrichtpunkte fungieren, ergeben sich aufgrund der nicht-elastischen Eigenschaften des Systems direkt und werden gemessen.

Ein Abgleich dieser Messergebnisse mit den oberen und unteren Grenzlagen einer jeden Messstelle gibt Aufschluss darüber, mit welcher relativen Abweichung die Grenzlagen getroffen werden. Da das 100%-ige Treffen einer Grenzlage nahezu nicht realistisch ist, muss eine tolerierte Abweichung der erreichten Toleranzlagen von ihren Vorgabewerten definiert werden. Sinnigerweise wird ein Erfüllungsgrad von 100% mit steigender Größe der tolerierten Abweichung vom Vorgabewert schneller erreicht als umgekehrt. Es kann jedoch fallabhängig auch realistisch sein, dass das 100%-Ziel als Folge des gewählten Ausrichtsystems oder wegen vorausgehenden Bauteilkollisionen gar nicht bei vertretbaren tolerierten Abweichungen erreicht werden kann.

Ein Beispiel.

Man könnte eine Grenzlage an einer Messstelle beispielsweise als erfolgreich eingestellt betrachten, wenn man weniger als $\pm 0,5\text{mm}$ vom Vorgabewert entfernt ist. Die Anzahl der erfüllten Grenzlagen ($\sum GL$) pro Versuchsplan in Relation zur Gesamtheit aller Grenzlagen definiert den Erfüllungsgrad (EG), siehe Tabelle 21.

Tabelle 21: Ermittlung des Erfüllungsgrades auf Basis eines in 3DCS importierten statistischen Versuchsplans mit einer tolerierten Abweichung von $\pm 0,5\text{mm}$

	KPC 1	KPC 2	KPC 3	...	KPC 17	KPC 19		
UGL	17,61	17,56	17,13	...	18,10	17,97		
OGL	19,59	19,64	20,07	...	9,10	19,23		

	KPC 1	KPC 2	KPC 3	...	KPC 17	KPC 19	$\sum GL$	EG
Versuch 1	18,06	19,64	20,61	...	18,29	19,23	5	41,67
Versuch 2	18,64	19,64	19,47	...	17,99	17,97	6	50,00
Versuch 3	17,69	17,56	19,25	...	15,30	17,97	7	58,33
Versuch 4	19,75	17,56	19,33	...	15,44	19,23	8	66,67
Versuch 5	17,06	19,64	16,50	...	23,59	17,97	9	75,00
Versuch 6	19,89	19,64	19,31	...	20,05	19,23	9	75,00
Versuch 7	18,98	17,56	19,08	...	17,39	19,23	9	75,00
Versuch 8	18,75	17,56	15,17	...	20,82	17,97	9	75,00
						in mm	in 1	in %

Für den in dieser Tabelle beispielhaft dargestellten achtzeiligen Versuchsplan zeigt sich bei ausschließlicher Betrachtung der sechs darin dargestellten Messstellen, dass spätestens nach dem fünften Versuch keine neuen Grenzlagen mehr mit der beschriebenen Genauigkeit und mit dem gewählten

Ausrichtsystem erreicht werden (grau hinterlegte Felder). Zur Erreichung der verbleibenden Grenzlagen müsste das Ausrichtsystem geändert werden – die Versuchsanzahl steigt.

Für den vorliegenden Demonstrator werden nun die Versuchspläne wie beschrieben ermittelt und in CATIA 3DCS zur Bestimmung des korrespondierenden Erfüllungsgrades simuliert. Hierbei wird von der kleinstmöglichen Versuchsanzahl ausgehend eine „Versuchsplanerweiterung um bis zu fünf Zusatzversuche (...) durchgeführt (...), um den Zusammenhang zwischen erhöhter Versuchsanzahl und Erfüllungsgrad sichtbar zu machen“, vgl. [P6]. Dieses Vorgehen wird 30-fach wiederholt, woraufhin eine gemittelte Aussage zum Erfüllungsgrad eines jeden Versuchsplanmodells resultiert.

Bild 37 zeigt den Ergebnisvergleich der Erfüllungsgrade in Abhängigkeit der tolerierten Abweichung der erreichten Toleranzlage von der Vorgabe für die vier benannten Fälle bei jeweilig variierender Versuchsanzahl.

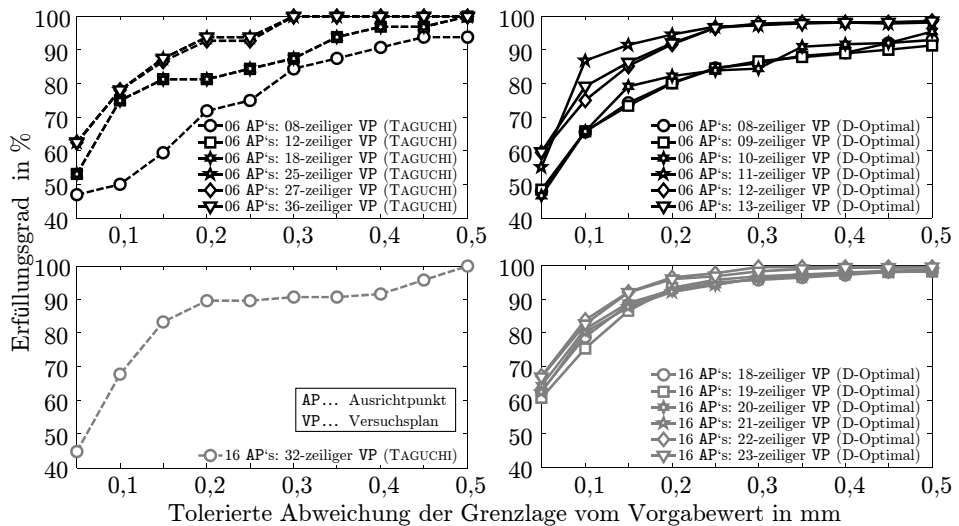


Bild 37: Vergleich der Erfüllungsgrade bei einer D-Optimalen und TAGUCHI Versuchsplanung in Abhängigkeit der tolerierten Abweichung der erreichten Toleranzlage von der Vorgabe, vgl. [P6], eigene Darstellung

Erwartungsgemäß lässt sich in den Teilabbildungen von Bild 37 erkennen, dass die Erfüllungsgrade einen steigenden Trend bei steigender tolerierter Abweichung haben. AP steht in diesem Bild für Ausrichtpunkt, VP für Versuchsplan. Weitere Ausführungen zum Thema folgen im nächsten Abschnitt.

Ableitung des Versuchsplans

In diesem Abschnitt wird auf die in Bild 37 dargestellten Ergebnisse näher eingegangen. Da es das erklärte Ziel ist, ein Vorgehen für die statistische Versuchsplanung zu finden, welches einen möglichst hohen Erfüllungsgrad bei gleichzeitig minimalem Versuchsaufwand ermöglicht, werden aus jeder Teilabbildung gezielt Versuchspläne herausgegriffen. In Bild 38 sind die gewählten Versuchspläne zum Vergleich gegenübergestellt. „Hierin sind (als Vertreter) für die D-Optimalen Versuchspläne jeweils der (kürzeste) (...) Versuchsplan sowie derjenige mit dem besten Erfüllungsgrad für die anvisierte höchstzulässige Abweichung (als graue senkrechte Linie im Hintergrund dargestellt) übernommen. Als Vertreter der TAGUCHI Versuchspläne geht jeweils derjenige mit dem besten Erfüllungsgrad ein“, vgl. [P6].

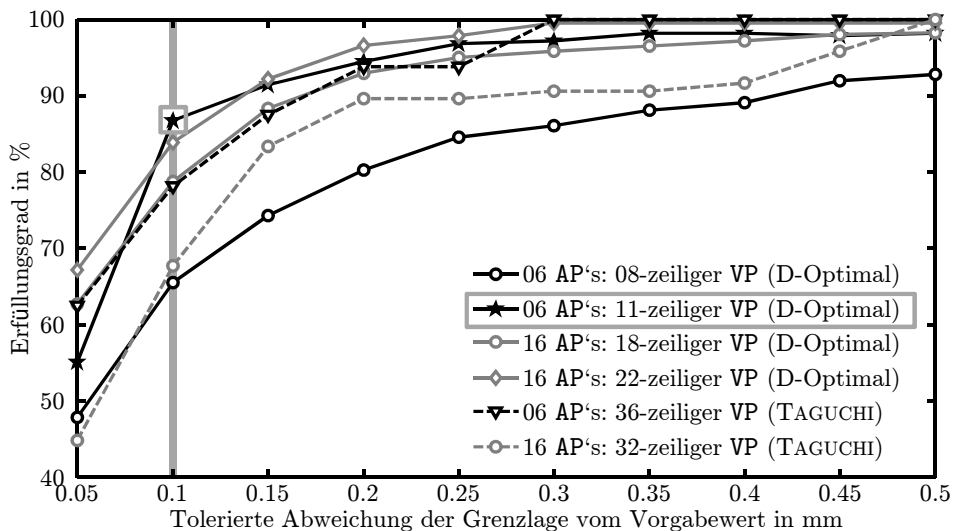


Bild 38: Auswahl eines Vorgehens für die statistische Versuchsplanung auf Grundlage von ausgewählten D-Optimalen und TAGUCHI Versuchsplänen

Für den Vergleich der Ergebnisse in Bild 38 wird zunächst festgelegt, dass eine tolerierte Abweichung der Grenzlage vom Vorgabewert von 0,1mm als Grenzwert angesehen wird. Größere Zugeständnisse an eine tolerierte Abweichung sind im Gesamtkontext nicht sinnvoll. Als erste Erkenntnis des Ergebnisvergleiches zeigt sich, dass D-Optimale Versuchspläne für die vorliegende Anwendung vergleichsweise höhere Erfüllungsgrade bei gleichzeitig geringerer Versuchsanzahl ermöglichen.

Diese sind hier den TAGUCHI Versuchsplänen vorzuziehen. Es lässt sich schlussfolgern, dass das Einbeziehen der Wechselwirkungen bei den D-Optimalen Versuchsplänen, siehe Abschnitt 4.5.2, an dieser Stelle einen positiven Einfluss auf die Maximierung des Erfüllungsgrades hat.

Die Empfehlung für die weiteren Untersuchungen lautet abschließend, einen 11-zeiligen D-Optimalen Versuchsplan auf Basis von 6 Ausrichtpunkten zu verwenden. Vor der experimentellen Versuchsdurchführung ist jedoch durch ein präventives virtuelles „Abfahren“ des Versuchsplans sicherzustellen, dass Bauteilkollisionen ausgeschlossen sind.

4.5.3 Grenzlagenermittlung auf Basis einer elastischen Toleranzsimulation

In Abschnitt 2.3.3 wurde der konventionelle FEM-Simulationsablauf in Verbindung mit Bild 17 dargestellt. Korrespondierend behandelt dieser Abschnitt die entsprechende Umsetzung für den gewählten Demonstrator Fahrzeug-einstieg im Rahmen dieser Arbeit.

Input/Pre-Processing

• CAD-Geometrie(n)

Wie in Abschnitt 2.3.3 beschrieben, ist das Vorhandensein eines CAD-Modells eine zentrale Grundvoraussetzung zur Durchführung von FEM-Simulationen. Bezugnehmend auf die Bilder 2 und 30 zeigt Bild 39 ein mögliches CAD-Modell des Praxisdemonstrators mit den zugehörigen Hauptbestandteilen Seitenrahmen, Tür, Scheibe und Dichtsystem, vgl. [P3].

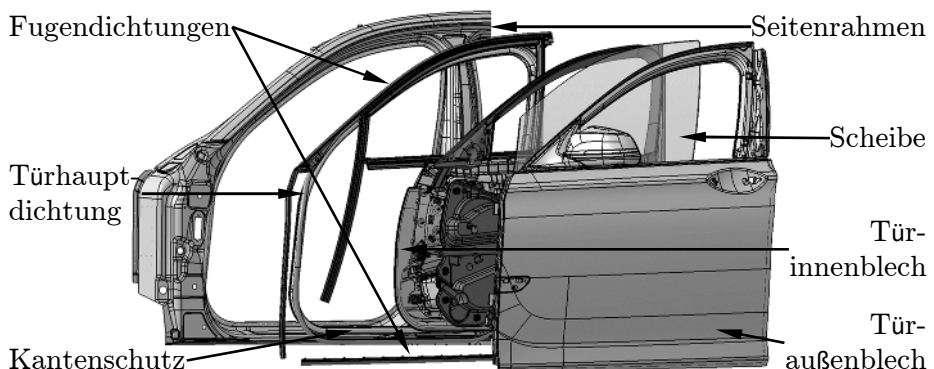


Bild 39: Praxisdemonstrator: CAD-Modell des Einstiegsbereichs eines Automobils, vgl. [P3], eigene Darstellung

- **FEM-Rechennetz**

Bei der Übergabe der CAD-Daten an eine FEM-Software „ist im Besonderen auf eine korrekte Überführung der Bauteilpositionen und -ausrichtungen im globalen Koordinatensystem zu achten“, vgl. [P4]. Die eigentliche Vernetzung erfolgt sowohl geometrie- als auch belastungsabhängig. Auf diese Punkte soll im Folgenden eingegangen werden.

Seitenrahmen

Der Seitenrahmen ist unstrukturiert vernetzt und wird als starrer Körper mit in die Berechnung aufgenommen. Einerseits sind als Ergebnis von Voruntersuchungen seitenrahmenseitig aufgrund der Steifigkeiten keine signifikanten Deformationen zu erwarten; andererseits ist die Vergleichbarkeit zum Experiment (siehe Kapitel 5) durch diese Umsetzung gegeben.

Tür

Die Tür sowie alle steifigkeitsrelevanten Anbauteile werden unstrukturiert vernetzt. „Alle Baukomponenten wurden mit jeweiligen Materialien und Steifigkeitseigenschaften gemäß einer Zuschlagsimulation vernetzt und miteinander verbunden. Die jeweiligen Anlageflächen zu den Dichtungen wurden entsprechend fein vernetzt“, vgl. [200]⁴

Scheibe

„Die Scheibe wurde als deformierbar mit dazugehörigen Scheibendichtungen modelliert, damit ist auch die Scheibensteifigkeit im Prozess mitberücksichtigt“, vgl. [200]⁴.

Dichtsystem

Die einzelnen Bestandteile des Mehrebenen-Dichtsystems werden strukturiert mit Hexaeder-Volumenelementen vernetzt. Bild 40 zeigt diese Vernetzung für diejenigen zwei Dichtebenen, die den größten Beitrag in Bezug auf auftretende Rückstellkräfte liefern – den Kantenschutz und die Türhauptdichtung, vgl. [201]⁴.

⁴ Mit freundlicher Genehmigung der ISKO ENGINEERS AG vom 18.12.2017.

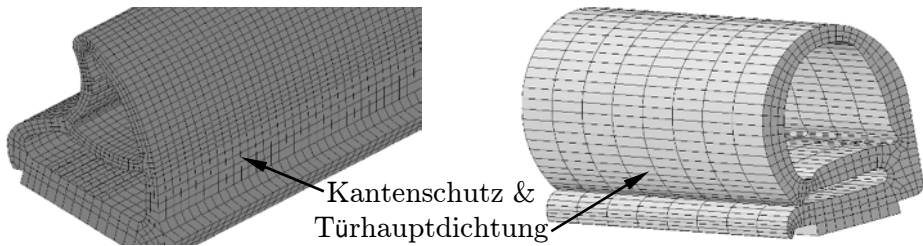


Bild 40: FEM: strukturierte Vernetzung der Dichtebenen Kantenschutz und Türhauptdichtung¹⁵

• Materialmodell(e)

In Abschnitt 2.3.3 werden verschiedene hyperelastische Materialmodelle vorgestellt. Begründet durch die Eigenschaft, das mechanische Werkstoffverhalten von Elastomeren bis ca. 100% technische Dehnung zu beschreiben, fällt die Wahl für die Untersuchungen, welche im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt werden, auf das MOONEY-RIVLIN-Modell. Bei angenommener Inkompressibilität der Elastomere berechnet sich die Formänderungsenergiegedichte $W_{\text{MOONEY-RIVLIN, inkompr.}}$ wie in den Gleichungen (46) und (47) beschrieben. Die hierin aufgeführten hyperelastischen Materialparameter C_{10} und C_{01} des zwei-parametrischen Materialmodells gilt es nun zu bestimmen. Da herstellerseitig keine konkreten Angaben zur Verfügung gestellt werden, erfolgt diese Bestimmung experimentell.

Zielsetzung

Als Zielsetzung wird die Kalibrierung der hyperelastischen Materialparameter C_{10} und C_{01} von Türhauptdichtung und Kantenschutz definiert.

Kalibrierungsansatz

Die Kalibrierung der für die FEM-Simulationen erforderlichen Materialparameter soll durch vergleichende Experimente erfolgen. Hierfür werden in Simulation und Experiment Kraft-Weg-Diagramme auf vergleichbare Weise aufgenommen und durch simulationsseitige Anpassungen der hyperelastischen Materialparameter bestmöglich aufeinander abgestimmt (engl.: *Matching*).

Versuchsaufbau

Für die Ermittlung der Kraft-Weg-Diagramme im Experiment wird zu diesem Zweck das Zug- und Druckprüfsystem MULTITEST 2.5-1 des Herstellers MECMESIN verwendet, siehe Bild 41.

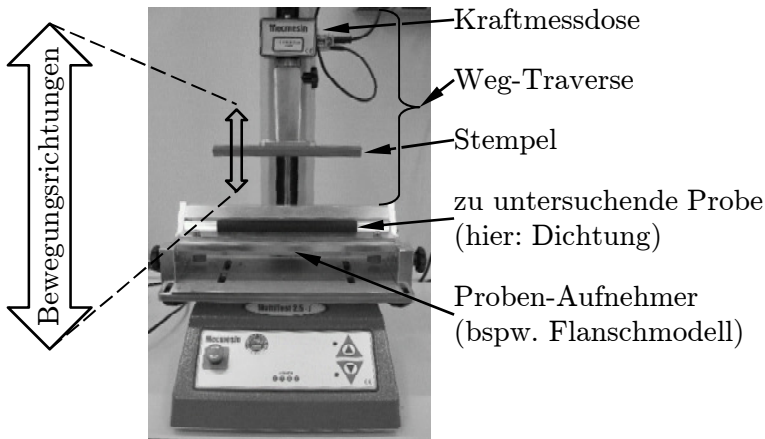


Bild 41: Ermittlung der hyperelastischen Materialparameter: Experimentalaufbau: Zug- und Druckprüfsystem MULTITEST 2.5-1 des Herstellers MECMESIN

Durch Adaption eines Proben-Aufnehmers ist es mit diesem möglich, Kraft-Weg-Diagramme aus verschiedenen Kraftangriffsrichtungen zu ermitteln. Im Gegensatz zu einer Umsetzung mit ausschließlich einer Kraftangriffsrichtung steht bei diesem Vorgehen, bei erfolgreichem *Matching* der virtuellen Kraft-Weg-Diagramme mit den korrespondierenden Experimentaldaten, eine vergleichsweise belastbare Datenbasis zur Verfügung. Es werden drei Kraftangriffsrichtungen zwischen 0° und 90° realisiert, welche im Folgenden als „Richtung 1“, „Richtung 2“ und „Richtung 3“ bezeichnet werden. Bild 42 zeigt diese Kraftangriffsrichtungen sowohl für den experimentellen Versuchsaufbau als auch für die Simulation am Beispiel der Dichtebene „Türhauptdichtung“.

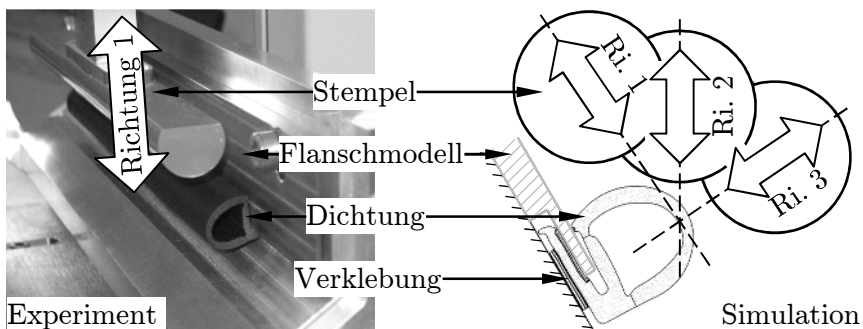


Bild 42: Ermittlung der hyperelastischen Materialparameter: Darstellung der Kraftangriffsrichtungen am Beispiel Türhauptdichtung

In diesem lassen sich der experimentelle und der simulativ nachempfundene Versuchsaufbau zur Ermittlung der Kraft-Weg-Diagramme erkennen.

Versuchsdurchführung Allgemein

In Tabelle 22 sind die zu untersuchenden Kraftangriffsrichtungen für Experiment und Simulation mit einem **x** gekennzeichnet. Für diese Untersuchungen wird eine zu testende Probenlänge (Dichtungslänge) von 200mm festgelegt.

Tabelle 22: Ermittlung der hyperelastischen Materialparameter: untersuchte Kraftangriffsrichtungen in Experiment und Simulation

	Türhauptdichtung	Kantenschutz
Richtung 1	x	/
Richtung 2	x	/
Richtung 3	x	x

Versuchsdurchführung Experiment

Die experimentelle Aufnahme der Kraft-Weg-Diagramme wird mehrfach durchgeführt, siehe Bild 43. Die Wiederholung dieser Messungen wird aufgrund des zu erwartenden sogenannten Setzverhaltens des Elastomers durchgeführt. Dies bedeutet für den vorliegenden Fall, dass davon ausgegangen werden kann, dass sich eine neue Dichtung anders verhält als eine Dichtung, die bereits mehrfach beansprucht wurde. Die Kraft-Weg-Diagramme in Bild 43 lassen dieses Verhalten deutlich erkennen. Repräsentativ sind in diesem Bild jeweilig drei Messungen pro Angriffsrichtung aufgezeigt. Mit Blick auf die schwarzen und hellgrauen Verläufe, welche die jeweilig erste und letzte Messung markieren, erkennt man für alle Kraftangriffsrichtungen eine signifikant sinkende Rückstellkraft der Dichtung nach mehreren Versuchsdurchläufen, welche sich einem Minimum annähert. Jenes Minimum markiert den „eingeschwungenen Zustand“, wird jeweilig als „Messung 3“ bezeichnet und bildet die Grundlage für die Kalibrierung der hyperelastischen Materialparameter C_{10} und C_{01} in der korrespondierenden Simulation.

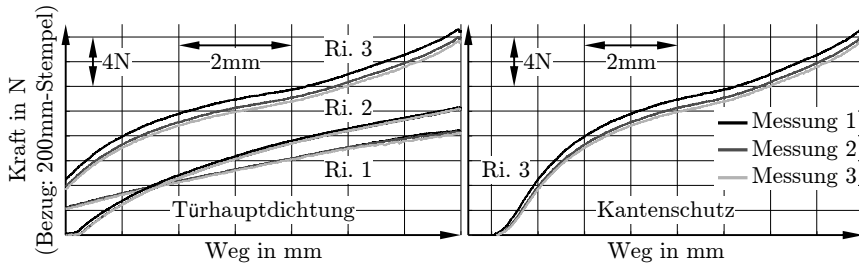


Bild 43: Ermittlung der hyperelastischen Materialparameter: experimentelle Ermittlung der Kraft-Weg-Diagramme

Versuchsdurchführung Simulation

Die simulative Aufnahme der Kraft-Weg-Diagramme wird einmalig für jede Materialparameter-Variante durchgeführt. Dies genügt, da rechnerunterstützte Methoden reproduzierbare Ergebnisse bei nicht veränderlichen Randbedingungen liefern. Die hyperelastischen Materialparameter werden bei jedem Simulationsdurchlauf iterativ angepasst, bis die Kraft-Weg-Diagramme denen aus dem Experiment entsprechen. Am Beispiel der Türhauptdichtung wird ein Simulationsdurchlauf schematisch in Bild 44 dargestellt.

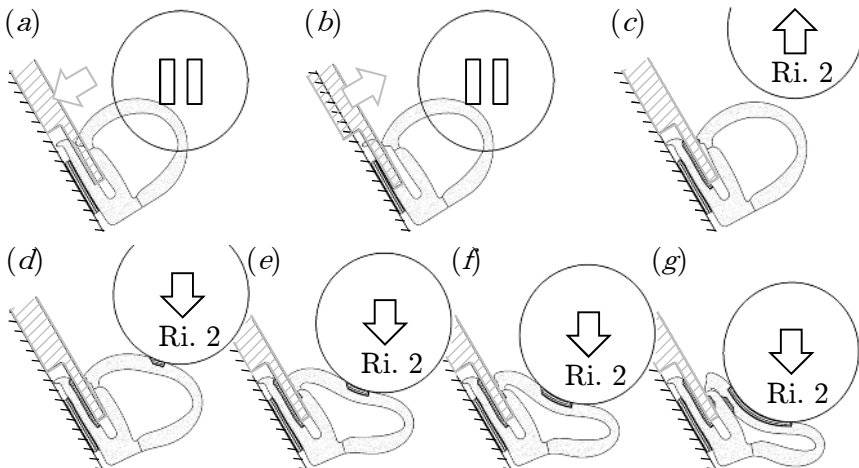


Bild 44: Ermittlung der hyperelastischen Materialparameter: simulative Ermittlung der Kraft-Weg-Diagr. am Beispiel Türhauptdichtung (a)–(c) virtuelles Aufspannen der Dichtung auf den Flanschadapter sowie Lösen d. Durchdringung von Stempel und Dichtung (d)–(g) elastische Verformung der Türhauptdichtung als Folge d. Kraftbeaufschlagung durch d. Stempel; Aufzeichnung von Weg (Stempel entlang Traverse) und Kraft (Gegenkraft der Dichtung)

In diesem Bild wird das virtuelle Aufspannen der Dichtung auf den Flanschadapter sowie das Lösen der virtuellen Durchdringung von Stempel und Dichtung in den Schritten (a)–(c) aufgezeigt. Die Schritte (d)–(g) veranschaulichen das Verpressen der Dichtung durch den Stempel. Jene wird in Summe um 3mm entlang der gewählten Kraftangriffsrichtung über die Nominanallage hinaus verpresst. Als Folge der Kraftbeaufschlagung kommt es zur elastischen Verformung der Dichtung bevor die anschließende Entspannung jener durch das Zurückfahren des Stempels erfolgt. Während des gesamten Ablaufs erfolgt die Aufzeichnung von zurückgelegtem Weg (des Stempels) und resultierender Gegenkraft (der Dichtung).

Ergebnisse

Bild 45 zeigt die Ergebnisse der Untersuchungen für die Dichtebenen „Türhauptdichtung“ und „Kantenschutz“, vgl. [202]⁴. Es wird erstmalig deutlich, dass beide Dichtungen jeweils zwei elastische Materialien als Bestandteil haben. Für beide werden die hyperelastischen Materialparameter C_{10} und C_{01} beschrieben. Jene werden fortan im Rahmen dieser Arbeit verwendet.

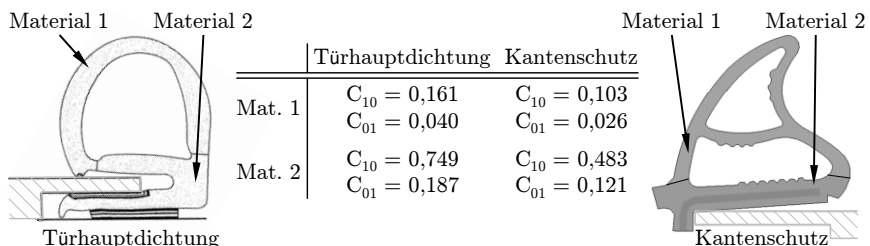


Bild 45: Ermittlung der hyperelastischen Materialparameter: Ergebnisse der Untersuchung¹⁶

• Rand-/Kontaktbedingungen

Durch das Schließen der Tür entstehen dynamische Kontaktsituationen zwischen den Dichtungen und den durch sie kontaktierten Anlageflächen auf (Karosserie-) Bauteilen sowie durch Eigenkontakte der jeweiligen Dichtungen im deformierten Zustand. Jene durch Gleitreibung charakterisierten Kontakte treten zwischen den in Tabelle 23 beschriebenen interagierenden Bauteilen auf. Eigenkontaktbedingte Reibungen von Karosseriebauteilen, wie sie während des Schließvorgangs beispielsweise am Türnscharnier auftreten, werden nicht berücksichtigt.

Tabelle 23: Kontaktpaare während und nach dem Schließen der Tür

	Seiten- rahmen	Tür- innen- blech	Verklei- dungs- tafel	Fenster- rahmen- abdeckung	Eigen- kontakt
Kanten- schutz			✓	✓	✓
Türhaupt- dichtung	✓	✓	✓	✓	✓
Fugen- dichtungen	✓				✓

Legende: ✓ Kontaktpartner

In der vorangegangenen Passage wurde aufgezeigt, wie die hyperelastischen Materialparameter mit dem Ziel bestimmt wurden, die Dichtungen durch geeignete Materialmodelle realitätsnah in der Simulation abzubilden. Diese Abbildung geschieht wie im Folgenden beschrieben.

1. Da der Simulationsaufwand bei durchgehender 3D-Modellierung der Dichtungen unverhältnismäßig teuer werden würde, findet zunächst eine Segmentierung der Dichtungen in durchschnittlich 200mm lange Teilstücke statt. In Bild 46 sind die Segmente, in welche Kantenschutz, Türhauptdichtung und Fugendichtungen unterteilt werden, ersichtlich.

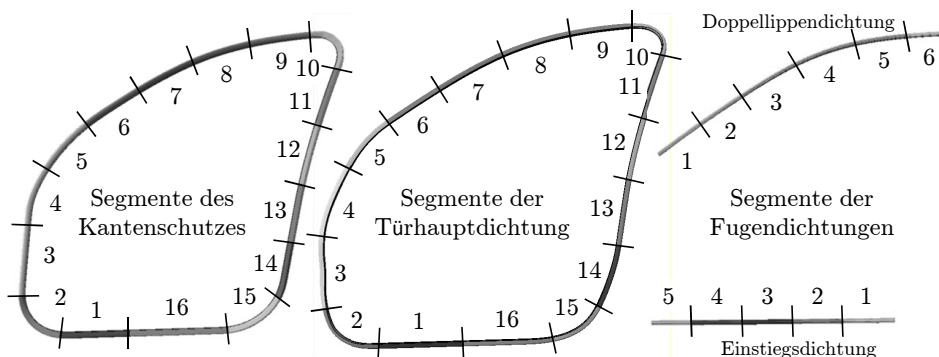


Bild 46: Segmentierung der Dichtungen in ca. 200mm lange Teilstücke

2. Durch die Umsetzung einer strukturierten Vernetzung der Dichtungen ist es nun möglich, ein jedes Segment in Knotenreihen zu unterteilen, welche wiederum einzeln ausgewertet werden. Ausgewertet wird die aufsummierte Kontaktkraft einer jeden Knotenreihe unter Berück-

sichtigung des hyperelastischen Materialmodells sowie des jeweiligen Abstandes zur bzw. Drehwinkels um die Scharnierachse (Drehachse). Bild 47 verdeutlicht dies am Beispiel der umlaufenden Dichtung „Kantenschutz“.

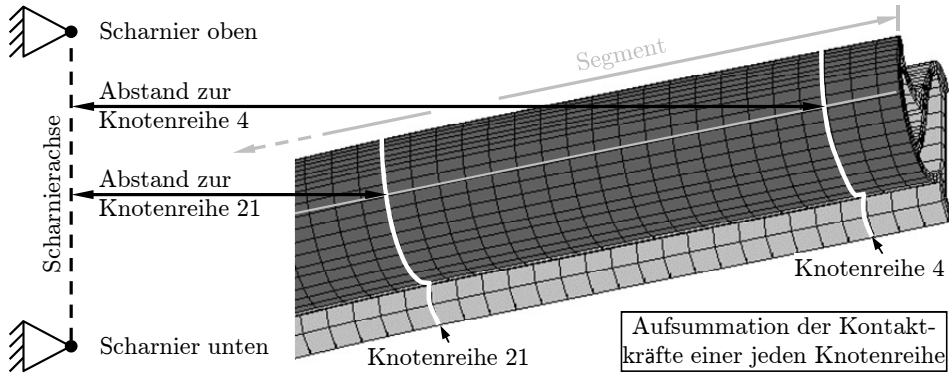


Bild 47: Unterteilung der Segmente einer jeden Dichtung in Knotenreihen mit jeweils spezifischem Abstand zur Scharnier- bzw. Drehachse am Beispiel der umlaufenden Dichtebene „Kantenschutz“

3. Die Ergebniskurven der Knotenreihen werden abschließend als Summenkurve für das entsprechende Segment zusammengefasst. Zwischen den Knotenreihen wird interpoliert. Eine entsprechende exemplarische Veranschaulichung findet sich in Bild 51.

In der Folge ist es möglich, Aussagen hinsichtlich der umlaufenden vektoriellen Kontaktkräfte einer jeden Dichtung für die jeweilige Toleranzsituation zu treffen. Diese wirken als Rückstellkräfte auf Tür und Seitenrahmen bzw. entsprechende Anbauteile, was zu Änderungen des Schließmaßes führt. Bevor derartige Auswertungen jedoch durchgeführt werden, gilt es die in den nachfolgenden Schritten beschriebenen Montage- und Schließsimulationen zur Steigerung der Ergebnisgüte durchzuführen.

- **Wegvorgabe**

In Anlehnung an die Ausführungen aus Abschnitt 2.3.3 bezeichnet die Begrifflichkeit „Wegvorgabe“ bei der FEM-Simulation definierte Relativbewegungen zwischen den interagierenden Bauteilen. Für die vorliegende Anwendung bedeutet dies das Eindrehen der Tür um die Scharnierachse. Durch dieses Eindrehen legt die Tür einen vorgegebenen Weg zurück, welcher in dem Moment endet, in dem die jeweilig zu untersuchende starre Grenzlage⁵ als Folge der toleranzbehafteten Beitragsleister erreicht ist.

⁵ In diesem Zusammenhang bezieht sich der Begriff Grenzlage auf das Ergebnis der starren Toleranzrechnung. Die resultierende Grenzlage als Folge der Kopplung von starrer Toleranzrechnung und elastischer FEM-Simulation ergibt sich anschließend.

FEM-Simulation/Processing

• Montagesimulation

Die Montagesimulation bildet den Appliziervorgang der Dichtebenen „Türhauptdichtung“ (THD) und „Kantenschutz“ (KS) realitätsnah ab, siehe Bilder 2 und 48⁴. Zielsetzung dieser Teilsimulation ist es, die durch das Aufbringen entstehenden Deformationen der Dichtungen (bspw. Querschnittsänderungen inkl. der auftretenden Spannungen und Dehnungen) einer nachgeschalteten Schließsimulation als *Input*-Größen zur Verfügung zu stellen. Hierfür wird in MARC/MENTAT[®] eine FEM-Simulation umgesetzt, welche den Appliziervorgang der Dichtebenen auf das Türinnenblech respektive den Seitenrahmenflansch entlang der MontageReferenzlinien nachbildet. Entsprechend dem realen Montageprozess werden die vorgespannten Dichtungen teils erst aufgespreizt, um über die entsprechenden Flansche gestülpt werden zu können, und anschließend wieder an- und zusammengepresst.

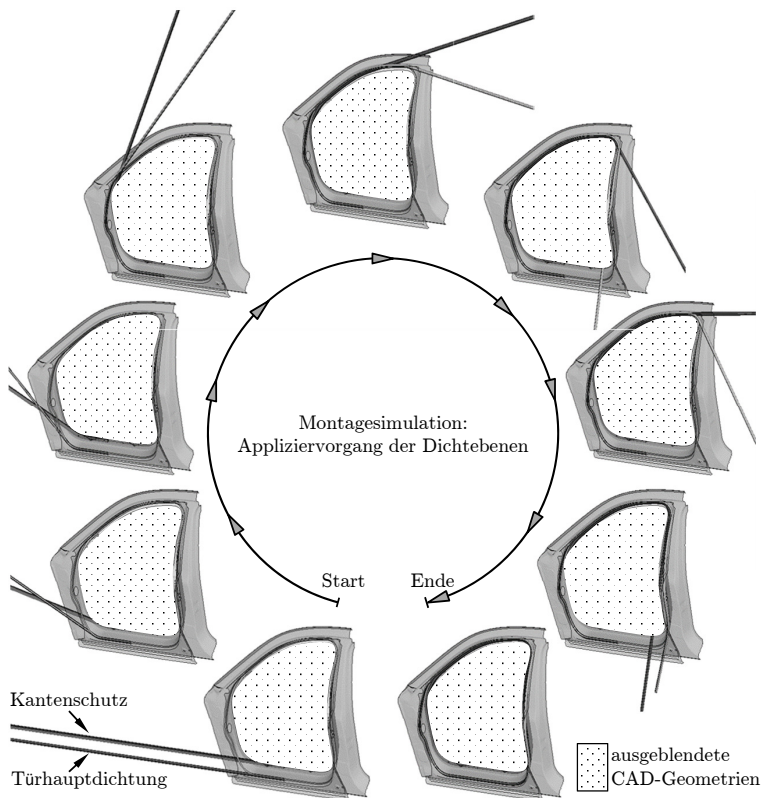


Bild 48: Montagesimulation: Appliziervorgang der Dichtebenen „Türhauptdichtung“ (THD) und „Kantenschutz“ (KS), vgl. [200]⁴, eigene Darstellung

• Schließsimulation

Als Schließsimulation wird im Wesentlichen eine FEM-Simulation verstanden, bei welcher die Türe solange um die Scharnierachse aufgedreht wird, bis die Dichtungen kontaktfrei⁶ sind. Im Anschluss wird die Türe um diese Achse zurückgedreht bis die gewünschte Endlage (bspw. Nominallage oder extremale Toleranzlage) an den Anbindungspunkten erreicht ist, siehe Bild 49. Die fünf Schritte dieses Simulationsprozesses sind die Folgenden, vgl. [200]⁴:

1. Automatisierte Übertragung der vorgespannten Dichtungsgeometrie (inkl. deformierter Struktur, Spannungen und Dehnungen) aus Montagesimulation,
2. Montage der Anbauteile,
3. Aufbringen des Eigengewichts,
4. Aufdrehen d. Tür um Scharnierachse bis Dichtungen kontaktfrei sind,
5. Zudrehen der Türe um die Scharnierachse bis die gewünschte Endlage (bspw. Nominallage oder Toleranzlage) an den Anbindungspunkten erreicht ist. „Bei dieser Lage werden die Kontaktkräfte der Dichtungen in Schließrichtung⁷, Schloßkraft und Deformationen der Tür ermittelt“, vgl. [200]⁴.

Zielsetzung dieser Teilsimulation ist es, das Verdrücken der infolge der Montagesimulation bereits deformierten Dichtebenen inkl. potentieller Scherbeanspruchungen (bspw. in Scharniernähe) abzubilden. In der Folge werden die resultierenden Rückstellkräfte, Kraftvektoren, etc. realitätsnah im *Post-Processing* ermittelt.

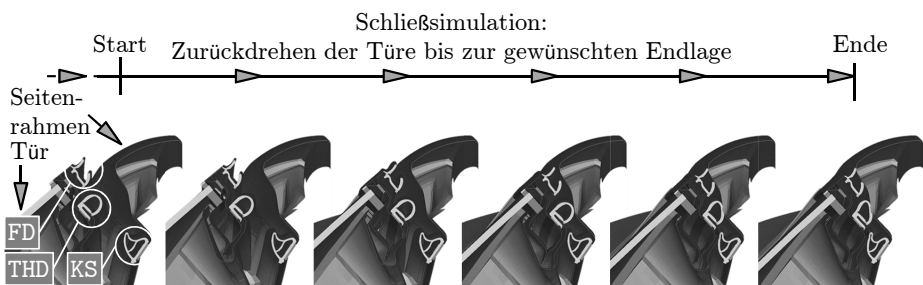


Bild 49: Schließsimulation: Zurückdrehen der Türe bis zur gewünschten Endlage, vgl. [200]⁴, eigene Darstellung

⁶ Türhauptdichtung und Fugendichtung sind gegenüber dem Seitenrahmen kontaktfrei; der Kantenschutz gegenüber der Türe.

⁷ Schließrichtung: Die Dichtkräfte werden immer auf die Normale jener Ebene projiziert, welche über die Anbindungspunkte (zwei Türscharnierpunkte und ein Türschloßpunkt) definiert ist.

Während der Schließsimulation werden die den Dichtebenen zugehörigen Rechnernetze in Abhängigkeit der vorliegenden Kontakttrandbedingungen lokal zur Steigerung der Güte der Simulationsergebnisse an diesen Stellen verfeinert. Eine exemplarische Umsetzung dieser Netzverfeinerung wird in Bild 50 am Beispiel der Türhauptdichtung aufgezeigt. In diesem Bild ist die zunehmende Deformation dieser Dichtebene mit der einhergehenden Netzverfeinerung als Folge des Schließvorganges und der sich einstellenden Kontaktsituation mit dem Seitenrahmen ersichtlich. Der Seitenrahmen als Kontaktpartner ist in diesem Bild nicht dargestellt.

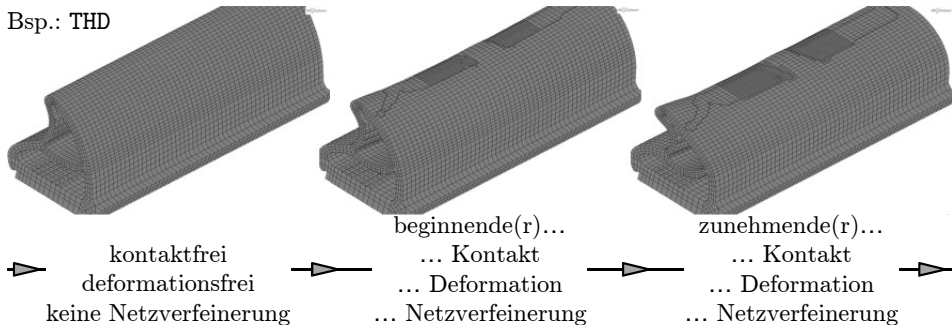


Bild 50: Darstellung lokaler Netzverfeinerungen während der Schließsimulation am Beispiel der Türhauptdichtung, vgl. [201]⁴

Software-seitig kommt hier die GLOBAL_2_LOKAL-Analyse zum Einsatz, welche in MARC/MENTAT® (Software-Lösung des Herstellers MSC SOFTWARE CORPORATION) unter Zuhilfenahme der Funktion *Mesh Adaptivity* umgesetzt ist. Hierbei wird im Bereich des Kontaktes eine lokale Netzverfeinerung auf das nächstfeinere Gitter durchgeführt ohne die Simulation wiederholen zu müssen. Den Grenzknoten des dediziert betrachteten Bereiches werden relevante Modellrandbedingungen (Verschiebungen, Rotationen, etc.) zugewiesen, woraufhin die Rahmenbedingungen für ein korrektes Simulationsergebnis (mit-)gegeben sind und eine Verkürzung der Rechenzeit gegenüber einer Neuberechnung erzielt wird.

Output/Post-Processing

Als Ergebnis der FEM-Simulationen können all diejenigen physikalischen Größen ausgewertet werden, die explizit vor Simulationsdurchführung zu diesem Zwecke bestimmt wurden. Die grafische und numerische Aufbereitung der Simulationsergebnisse ermöglicht für den vorliegenden Anwendungsfall Aussagen zu den verschiedensten optischen (o) oder funktionalen (f) Kriterien. Es können u.a. geometrische Deformationsaussagen getroffen (o),

Kraft- und Druckverläufe aufgezeigt (f) oder auch explizite Kontakt- und Reaktionskräfte ausgewertet werden (f). Gerade die beispielhaft genannten funktionalen Ergebnisgrößen können an dieser Stelle auch einen Beitrag dazu leisten, kundenrelevante Eigenschaften, wie etwa auftretende Öffnungs- und Schließkräfte in Kombination mit extremalen Toleranzsituationen virtuell zu beurteilen. Bild 51 veranschaulicht an dieser Stelle eine mögliche Druckverteilungen als Folge einer exemplarischen Toleranzsituation.

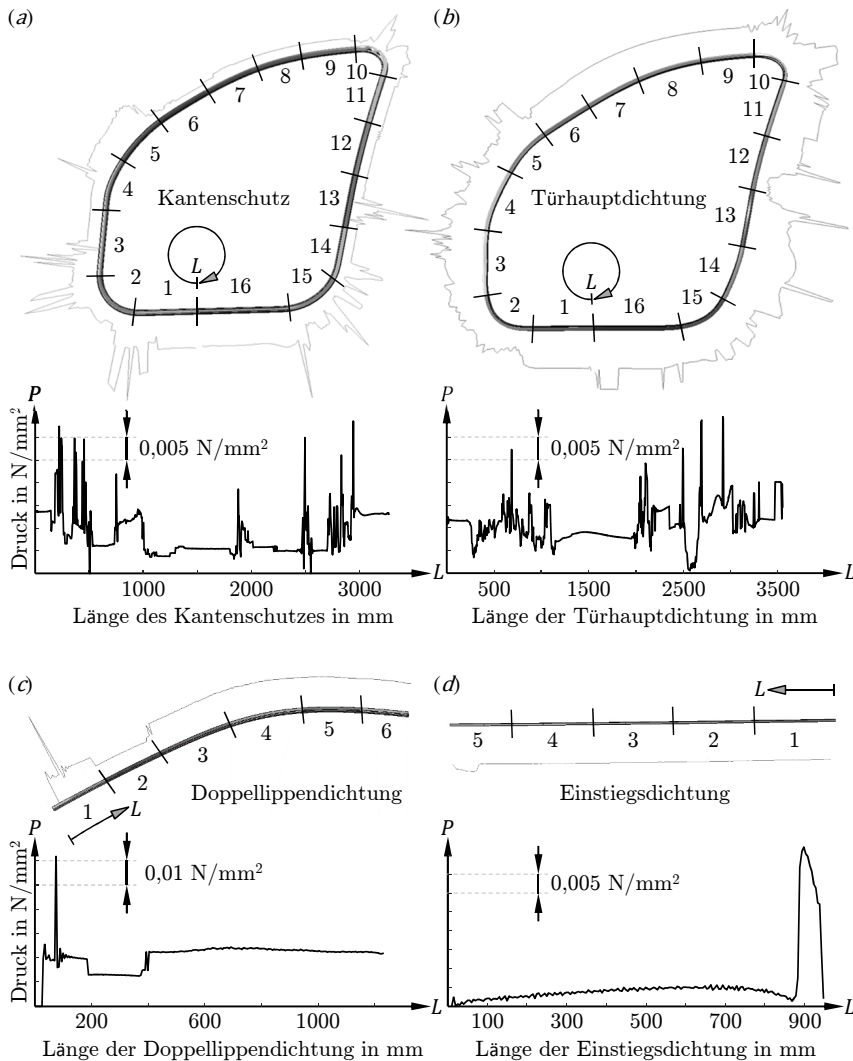


Bild 51: Mögliche Druckverteilungen an den Dichtebenen als Folge einer exemplarischen Toleranzsituation

In diesem Bild sind in den Bildabschnitten (a)–(d) (umlaufende) Druckverteilungen in Folge einer exemplarischen Toleranzsituation in Kombination mit korrespondierenden klassischen Kurvenverläufen für die Dichtebenen dargestellt. Diese Möglichkeit einer grafischen Auswertung ist in ähnlicher Art und Weise auch für beispielsweise Kraftverläufe darstellbar. Der Vorteil hierin liegt in der direkten visuellen Zuordnung der Charakteristika der Verläufe zu den entsprechenden Stellen auf der jeweiligen Dichtung. Bei Absinken des Dichtungsdruck unter einen definierten Schwellenwert könnten hieraus unter anderem mögliche Stellen für einen Wassereintritt bei Regen detektiert werden. Die vielfältigen Möglichkeiten, die sich durch entsprechende Auswertungen bieten, sollen an dieser Stelle jedoch nicht weiter erörtert werden, da der Fokus dieser Arbeit ein anderer ist.

Mit Bezug auf die letzten Zeilen des dritten Kapitels ist es bei dieser Arbeit das Ziel, belastbare Prognosen hinsichtlich funktionsrelevanter Grenzlagen zu ermöglichen. Im Sinne der Sicherstellung einer Validierbarkeit werden hierfür sowohl in der Simulation und als auch beim vergleichenden Experiment (Kapitel 5) gleichartig ausgeführte taktile Messungen umgesetzt. Bild 52 zeigt das CAD-Modell der betrachteten Fahrzeugtür sowie die virtuellen taktile Messtaster, welche im Folgenden auch als Sensoren bezeichnet werden. Der Seitenrahmen des Fahrzeugs, welcher die Sensoren aufnimmt, ist nicht dargestellt.

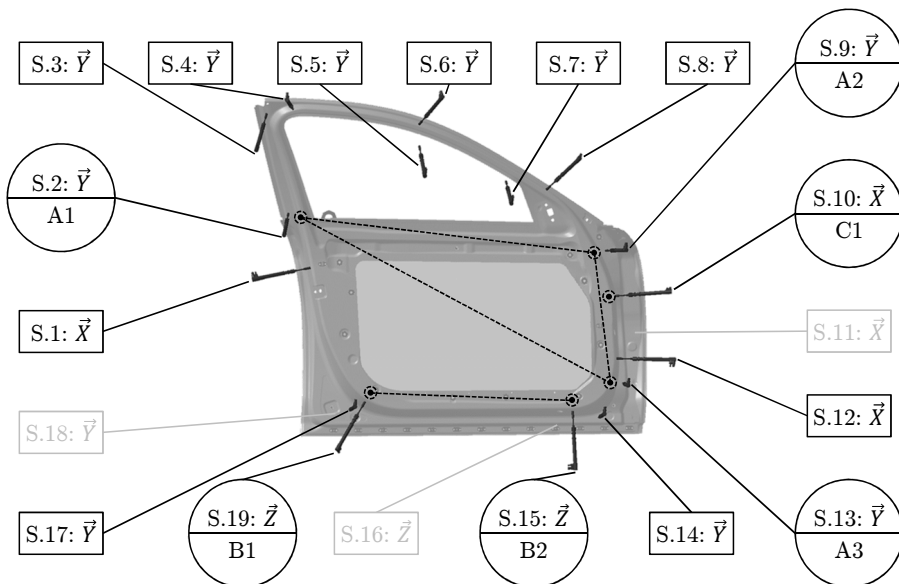


Bild 52: Verortung der taktile Messtaster/Sensoren 1 bis 19 unter Angabe der vektoriellen Hauptmessrichtung

Das Bild zeigt neben der Verortung der Sensoren auch deren vektorielle Hauptmessrichtungen sowie die gewählte schließmaßbasierte 3-2-1-Ausrichtung, vgl. Bild 8 und Tabelle 20. Die reinen „Kontrollsensoren“ $11(\vec{X})$, $16(\vec{Z})$ und $18(\vec{Y})$ entlang der Hauptachsen des Koordinatensystems sind nicht dargestellt und werden auch nicht in den Auswertungen berücksichtigt. Ihre Position wird lediglich angedeutet.

Als Ergebnis der Ausführungen des Abschnittes 4.5.2 wurde die Handlungsempfehlung ausgesprochen, einen 11-zeiligen D-Optimalen Versuchsplan auf Basis von 6 Ausrichtpunkten für den Abgleich der Simulations- mit den Experimentalergebnissen zu verwenden. Dieser Handlungsempfehlung wird im Folgenden entsprochen. Für die in Tabelle 18 dargestellten Ergebnisse der starren Grenzlagenberechnung an den betrachteten Schließmaßen ergibt sich korrespondierend ein statistischer Versuchsplan. Dieser wird in der Art umgesetzt, als dass die Relativ-Positionierung zwischen Tür und Seitenrahmen (3-2-1-Ausrichtung) über diejenigen 6 Schließmaße gesteuert wird, welche von den Sensoren 2, 9, 13 ($3 \cdot \vec{Y}$), 15, 19 ($2 \cdot \vec{Z}$) und 10 ($1 \cdot \vec{X}$) taktil gemessen werden. Alle anderen Schließmaße, welche durch die verbleibenden Sensoren zurückgemeldet werden, ergeben sich folglich.

Exemplarische FEM-Simulationsergebnisse für die Sensoren 1–3 sind in Tabelle 24 dargestellt. Eine komplette Ergebnisübersicht ist in den Tabellen 48 bis 54 in Anhang D aufgeführt.

Für die Sensoren 1–3 beinhaltet die Tabelle die FEM-Simulationsergebnisse nach Durchlauf des 11-zeiligen D-Optimalen Versuchsplans. Die jeweilig 1. Spalte zeigt hierbei das initiale Messergebnis des Sensors zu Beginn der FEM-Untersuchung entsprechend der ausgewählten Zeile des statistischen Versuchsplans⁸. Die jeweilig 2. Spalte zeigt den korrespondierenden Messwert, welcher an dieser Stelle, nach Montage- und Schließsimulation sowie unter Berücksichtigung der Materialitäten und Kontaktsituationen, das Ergebnis der FEM-Simulation ist. Für eine anwenderfreundliche Auswertung sind in diesen Spalten all diejenigen Zellen markiert, deren Messwerte die aus der CAT-Simulation jeweilig prognostizierte untere Grenzlage (UGL) unterschreiten (hellgrau) oder obere Grenzlage (OGL) überschreiten (dunkelgrau). Zum direkten Vergleich sind diese „starren“ Grenzlagenergebnisse, welche gesamthaft in Tabelle 18 dargestellt sind, nochmals im oberen Teil der Tabelle ersichtlich. Die jeweilig 3. Spalte verdeutlicht als Differenzbetrachtung den Unterschied zwischen den Messwerten der jeweilig 1. und 2. Spalte.

⁸ An dieser Stelle sei noch einmal daran erinnert, dass die statistische Versuchsplanung auf den starren Grenzlagenergebnissen der CAT-Simulation basiert.

Tabelle 24: Ergebnisse der elastischen Grenzlagenberechnungen für die betrachteten Messstellen 1, 2 und 3

KPC	1			2			3		
UGL	17,61			17,56			17,13		
OGL	19,59			19,64			20,07		
DoE	FEM			FEM			FEM		
	Anf.	Ende	Δ	Anf.	Ende	Δ	Anf.	Ende	Δ
1	19,654	19,461	-0,192	19,840	19,674	-0,166	20,879	20,981	0,102
2	17,378	17,232	-0,146	18,947	18,824	-0,122	19,249	19,404	0,155
3	19,913	19,671	-0,241	20,017	19,936	-0,081	19,358	19,810	0,452
4	19,283	19,085	0,198	19,265	19,147	0,118	18,941	19,191	-0,250
5	19,557	19,356	-0,201	18,089	17,942	-0,146	19,488	19,780	0,292
6	17,622	17,450	-0,172	19,128	19,073	-0,055	18,510	18,876	0,367
7	19,419	19,199	-0,220	17,718	17,646	-0,072	17,650	18,160	0,510
8	17,665	17,489	0,176	17,757	17,634	0,123	18,995	19,308	-0,313
9	17,772	17,577	-0,195	19,483	19,380	-0,103	19,537	19,827	0,290
10	17,926	17,694	-0,232	17,932	17,918	-0,014	17,459	18,186	0,727
11	17,295	17,113	-0,182	17,178	17,130	-0,048	17,017	17,538	0,521
		<UGL	min		<UGL	min		<UGL	min
			-0,241			-0,166			-0,313
		>OGL	max		>OGL	max		>OGL	max
			0,198			0,123			0,727
in mm									

ca. 1,9mm prognostiziert, siehe Tabelle 55. Mit dem Ziel, die Inhalte der benannten Ergebnistabellen greifbar zu machen, visualisiert Bild 53 die den Schließmaßen zugehörigen Über- und Unterschreitungen von oberer und unterer Grenzlage im Vergleich zu den CAT-Ergebnissen aus Abschnitt 4.5.1.

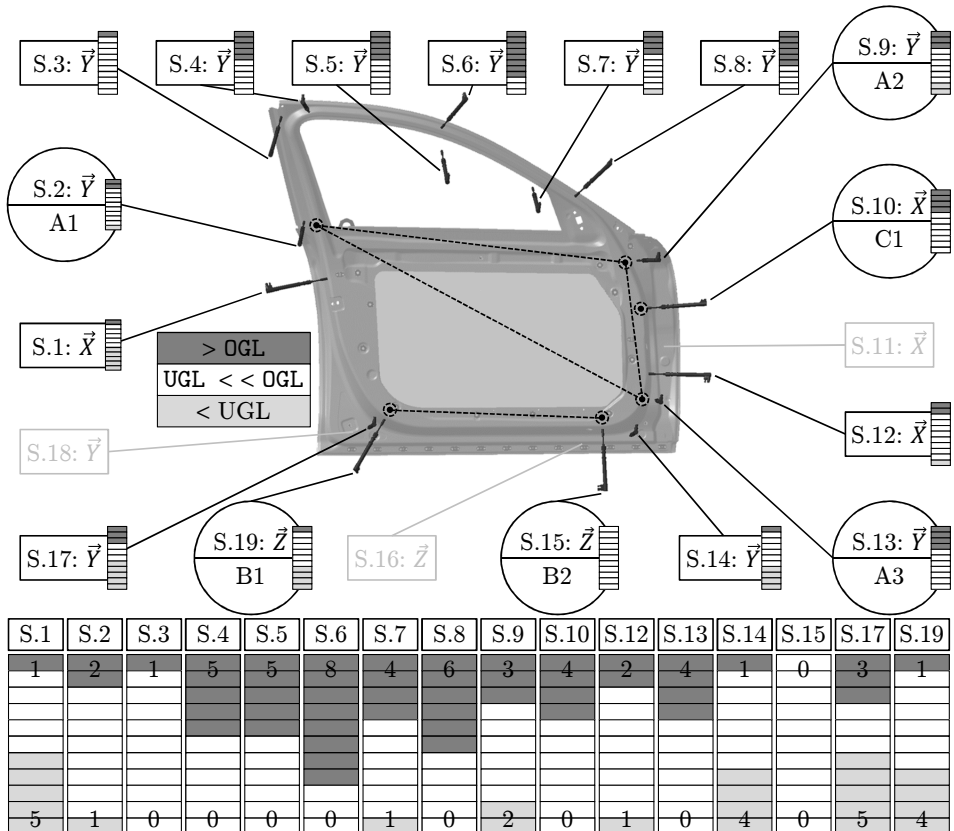


Bild 53: Über- und Unterschreitungen der oberen bzw. unteren Grenzlagen (relativ zu den starren Toleranzsimulationen) an den betrachteten Schließmaßen basierend auf den Ergebnissen der zugehörigen FEM- Berechnungen, siehe Tabellen 48 bis 54

Analog der anhand von Tabelle 24 vorgestellten Graustufen sind in diesem Bild neben den Sensorbezeichnungen Balken mit einer jeweiligen vertikalen Unterteilung in 11 gleichgroße Felder ersichtlich. Jedes dieser Felder repräsentiert eine Zeile des D-Optimalen Versuchsplans, wobei eine Sortierung vorgenommen wird:

- Mit dem jeweils obersten Feld beginnend sind die Felder entsprechend der Anzahl an prognostizierten Überschreitungen der oberen Grenzlage (OGL) gegenüber dem CAT-Ergebnis dunkelgrau für ein jedes Schließmaß gefüllt.

- Die weißen Felder bezeichnen diejenigen virtuellen Messtasterergebnisse, bei denen das FEM-Ergebnis innerhalb der prognostizierten CAT-Grenzen für obere und untere Grenzlage liegt.
- Mit dem jeweils untersten Feld beginnend sind die Felder entsprechend der Anzahl an prognostizierten Unterschreitungen der unteren Grenzlage (UGL) gegenüber dem CAT-Ergebnis hellgrau für jedes Schließmaß gefüllt.
- $\Rightarrow$ Im unteren Bildabschnitt sind diese Balken in vergrößerter Form unter Nennung der Anzahl an Über- und Unterschreitungen dargestellt.

Grundlegend lässt sich eine stärkere Tendenz zur Überschreitung der oberen als zur Unterschreitung der unteren Grenzlagen erkennen. In Zahlen ausgedrückt stehen einer 50-fachen Überschreitung (28,4%) eine 23-fache Unterschreitung (13,1%) bei gesamthaft $16 \cdot 11$ Messungen = 176 Messungen gegenüber. Bei 103 Messungen (58,5%) liegt das FEM-Simulationsergebnis innerhalb der vorhergesagten Grenzen der starren Toleranzsimulation (CAT). Augenscheinlich ist in dem Bild ersichtlich, dass der größte Teil der Überschreitungen im Bereich oberhalb der Türbrüstung zwischen A- und B-Säule auftritt (Sensoren 2–9). Dies scheint sowohl in Anbetracht der gewählten Ausrichtung und der damit einhergehenden Hebelverhältnisse als auch begründet durch die vergleichsweise schwache und folglich nachgiebige Blechstruktur in diesem Bereich plausibel. Zudem entspricht es den empirischen Erfahrungen des Autors. Unterschreitungen der unteren starren Grenzlage sind in diesem Bereich nur vereinzelt ersichtlich. Im Gegenzug dazu häufen sich diese Unterschreitungen unterhalb der Y-Primärebene, welche durch die Sensoren 2, 9 und 13 aufgespannt wird. Für die Sensoren 14–19 sowie 1 zeigt sich die größte Anhäufung an Unterschreitungen. Auch dies scheint plausibel, bedenkt man die Hebelwirkung von „oben“ nach „unten“ um die feste Verbindung zwischen Tür und Seitenrahmen – das Türschloss. Bezugnehmend auf die Überschreitungen in diesem Bereich ist es an dieser Stelle zudem vorstellbar, dass die sich verdünnende Blechstruktur im Bereich der Sensoren 17–19 eben jene Überschreitungen, respektive vergrößerte Schließmaße, begünstigt.

Wie bereits festgestellt, lässt sich an dieser Stelle die Schlussfolgerung ziehen, dass die Berücksichtigung elastischer Effekte und nichtlinearer Wechselwirkungen einen signifikanten Einfluss auf die prognostizierte Grenzlagenausbildung hat. Dieser ist als signifikant zu bezeichnen, da es die Anforderung des automobilen Toleranzmanagements ist, Toleranzfelder im Zehntelmillimeterbereich zu prognostizieren, vgl. Abschnitt 5.5, wohingegen die Erkenntnisse aus Tabelle 55 zeigen, dass hier ein Potential zur Korrektur im teils einstelligen unteren Millimeterbereich besteht.

4.5.4 Grenzlagenermittlung mittels eines gekoppelten Simulationsansatzes

Mit Bezug auf den gewählten Demonstrator thematisierten die vorangegangenen Abschnitte 4.5.1 bis 4.5.3, beginnend mit der Ermittlung funktionaler Grenzlagen auf Basis einer starren Toleranzsimulation, die Ableitung einer statistischen Versuchsmethodik zur Validierung eben dieser sowie deren korrespondierende Ermittlung auf Basis einer elastischen Toleranzsimulation. In Anlehnung an und mit Verweis auf [P2] und [P7] beschäftigt sich dieser Abschnitt mit der Wahl einer Kopplungsmethodik zur Berücksichtigung von Nachgiebigkeiten in der Toleranzrechnung.

In einem ersten Schritt werden abgeleitete Ansätze, basierend auf den Ausführungen des Abschnittes 2.3.4, vorgestellt. Im Anschluss erfolgt ein qualitativer Vergleich dieser Ansätze unter Nennung der Vor- und Nachteile der einzelnen Herangehensweisen. Diesem schließt sich eine Fallstudie am Demonstrator auf Basis der funktionalen Qualitätskriterien (Schließmaße, engl.: KPC's [*Key Product Characteristics*], vgl. [172], [173], [174]) des Produkts an. Jene resultiert in einem quantitativen Vergleich der Ansätze, welcher mit einer Aussage hinsichtlich der Frage endet, welcher der Ansätze sich für das Simulationskonzept am besten eignet.

Vorstellung abgeleiteter Ansätze

Ausgehend von den Ausführungen aus Abschnitt 2.3.4 sowie durch den Autor in [P2] und [P7] beschrieben, kann abgeleitet werden, dass verschiedene Grundstrategien existieren, um die Ergebnisse aus Simulationen zu koppeln. Es ist zu unterscheiden, ob dies mit Hilfe der statistischen Momente⁹, d. h. in diesem Fall dem Mittelwert, der Standardabweichung oder beiden, erfolgt, durch die Einzelüberlagerung von Simulationsdaten oder etwa durch die direkte Integration der Simulationsverfahren. Während sich letztere Methode wegen des erforderlichen direkten Quellcodeeingriffs und des extremen Simulationsaufwands infolge der im Toleranzmanagement eingesetzten MONTE CARLO-Methode verbietet, können aus diesen Grundstrategien die in Bild 54 dargestellten und im Folgenden beschriebenen Ansätze abgeleitet werden. Es sei darauf hingewiesen, dass die MIC (engl.: *Method of Influence Coefficients*, siehe Abschnitt 2.3.4) beim betrachteten Umfang des Fahrzeug-einstiegs infolge geometrischer, kontaktbedingter und materialbedingter Nichtlinearitäten nach [50] nicht mehr einsetzbar ist.

⁹ Als zentrale Momente werden in der Statistik die folgenden bezeichnet: Mittelwert μ (Erwartungswert, engl. *mean*), Varianz σ^2 (engl. *variance*), Schiefe v (engl. *skewness*) und Wölbung w (engl. *kurtosis*)

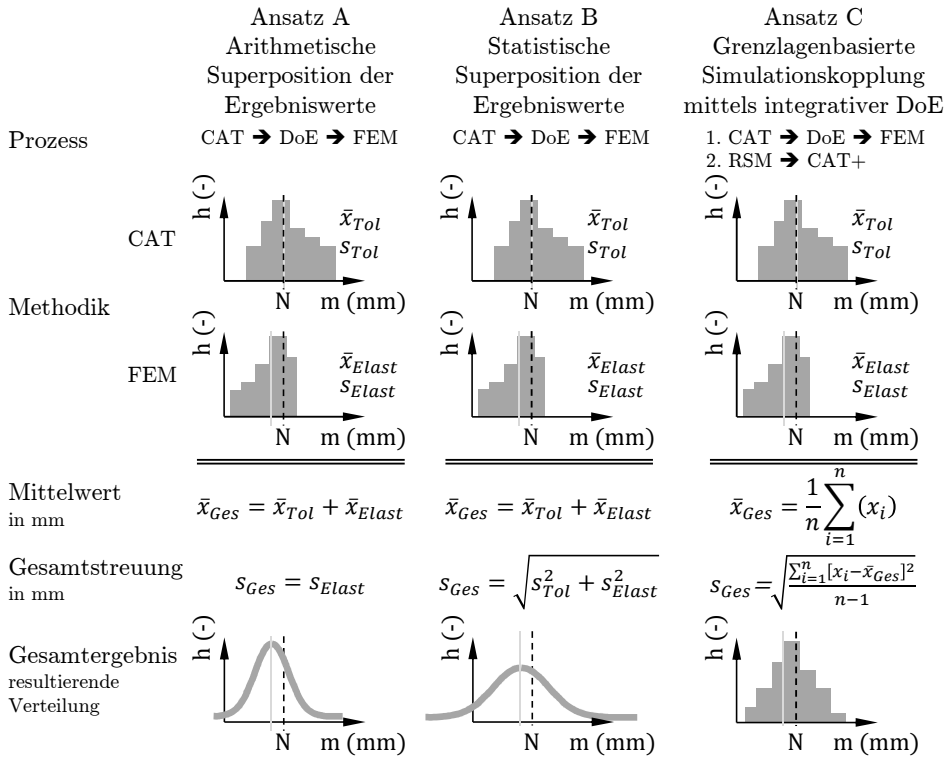


Bild 54: Ansätze zur Kopplung statistischer Simulationen, vgl. [P2], eigene Darstellung

Den dargestellten Ansätzen ist gemein, dass Sie auf einem Basisprozess zur Berücksichtigung der Wechselwirkung zwischen geometrischen Abweichungen und Systemsteifigkeit aufbauen, siehe Bild 55. Das heißt, ausgehend von einer statistischen Betrachtung des starren Gesamtsystems werden die zu erwartenden Grenzlagen ermittelt. Aus diesen Simulationen können an den system-funktionsrelevanten Messtellen (KPC's) die zu erwartenden Grenzlagen ermittelt werden. Durch eine Transformation können die Grenzlageninformationen der Ausrichtpunkte eindeutig in eine Zwangsverschiebungsrandbedingung für die FEM-Simulation umgerechnet werden. Dabei wird der die Grenzlage nachbildende Körper in der FEM-Simulation sowohl translatorisch als auch rotatorisch bewegt. Es entstehen die abgeleiteten Grenzlagenvorgaben.

Diese Vorgaben werden gemeinsam mit den für eine FEM typisch variierbaren Eingangsparametern, wie etwa Shore Härte der Dichtung, E -Modul der beteiligten Bauteile, Reibkoeffizient zur Abbildung des Schließverhaltens der Türe, variiert. Das heißt, es entsteht ein Set an Parametern, das abgeleitete Grenzlagen und steifigkeitsbeeinflussende Parameter enthält.

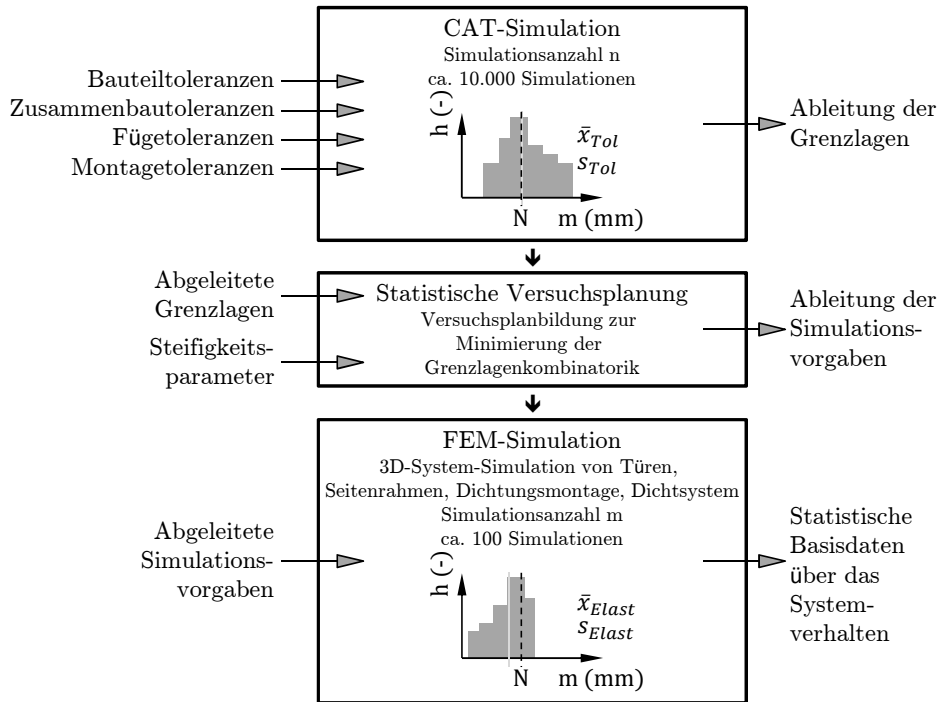


Bild 55: Basisprozess zur Berücksichtigung der Wechselwirkungen zwischen geometrischen Abweichungen und Systemsteifigkeiten, vgl. [P2], eigene Darstellung

Um die Anzahl der erforderlichen Simulationsläufe in der FEM klein zu halten, wird zur Variation DoE eingesetzt, siehe Abschnitt 2.3.2. Untersuchte, einsetzbare Verfahren sind hierbei D-Optimale Designs oder auch das LATIN HYPERCUBE-SAMPLING. Simulationsparameter und Grenzlageninformationen liefern über die DoE Vorgaben für die durchzuführenden Simulationsläufe, siehe Abschnitte 2.3.5, 4.5.5 und 4.5.2.

In der FEM-Simulation werden die Baugruppen Seitenrahmen, Türe, Dichtsystem sowie weitere steifigkeitsbestimmende Bauteile abgebildet. Auch der Montageeinfluss beim Applizieren der Dichtungen wird berücksichtigt, indem eine Montagesimulation der Primär- und Sekundärdichtung durchgeführt wird, siehe Bild 48.

Schlussendlich entsteht ein Set an Eingangsparametern (*Input-Matrix*) zuordenbarer Datensatz (*Output-Matrix*), der das Systemverhalten auf Basis der Steifigkeiten, des Dichtungsverhaltens und der Grenzlagen beschreibt. Diese Ergebnisse werden durch folgende drei Ansätze weiterverarbeitet und eine statistische Gesamtaussage gebildet.

Ansatz A: Arithmetische Superposition der Ergebniswerte

Durch die arithmetische Superposition der Mittelwerte und der Auswahl der in Toleranz- und FEM-Simulation ermittelten maximalen (bzw. der das Systemverhalten am besten beschreibenden) Streuung, kann eine gegenüber der starren CAT-Simulation mittelwertverschobene Gesamtergebnisverteilung ermittelt werden. Ergebnis ist eine durch die Parameter Mittelwert und Streuung beschriebene Ersatzverteilung, das heißt eine Modellverteilung, die es erlaubt, die Überschreitungsanteile zu prognostizieren. Diesem Ansatz liegt die Hypothese zugrunde, dass die elastische Verformung gegenüber dem starren System keine Streuungssteigerung oder auch -minderung einbringt.

Ansatz B: Statistische Superposition der Ergebniswerte

Durch eine statistische Superposition der Mittelwerte und der Streuung mit Hilfe der *Root Sum Square*-Methode (RSS), vgl. [203], kann eine mittelwertverschobene Gesamtergebnisverteilung ermittelt werden. Ergebnis ist analog zu Ansatz A eine durch die Parameter Mittelwert und Streuung beschriebene Ersatzverteilung. Hier liegt die Hypothese zugrunde, dass die elastische Verformung gegenüber dem starren System einen Streuungszuwachs bewirkt, der sich über die RSS-Methode als Beitragsleister in die Schließmaßgleichung des KPC einreicht. Voraussetzung dafür ist, dass der Beitragsleister als unabhängiges Element der Kette wirkt (Fehlerfortpflanzungsgesetz, [204]).

Ansatz C: Grenzlagenbasierte Simulationskopplung mittels integrativer DoE

Liegen die Simulationsergebnisse aus CAT- und FEM-Simulation in Form von zuordenbaren Datenreihen vor, so kann eine direkte numerische Superposition der Quelldaten erfolgen. Durch die direkte Verrechnung der gekoppelten Datenreihen wird eine Verteilung erzeugt (z. B. sichtbar durch ein Histogramm), die gegenüber der starren CAT-Simulation sowohl eine Mittelwertverschiebung als auch eine Streuungssteigerung oder auch -minderung beinhaltet. Ergebnis ist eine direkte Ergebnisverteilung, die wiederum durch die Parameter Mittelwert, Streuung, Schiefe und Wölbung beschrieben werden kann. Hier liegt – wie in den anderen Ansätzen A und B auch – die Hypothese zugrunde, dass die elastische Verformung gegenüber dem starren System nicht so extrem mit der Abweichungssituation wechselwirkt, dass die in der starren CAT-Simulation ermittelten geometrischen Zustände falsch sind. Denn der *Input* für die FEM-Simulationen wird auf Basis der CAT-Simulation generiert.

Mit dieser Vorgehensweise werden nun wenige Hundert Eingangsdatensätze berechnet und es entstehen damit wenige hundert Ergebnisdatensätze. Somit liegt ein relativ kleiner und damit statistisch wenig belastbarer Ergebnismfang vor. Um die statistische Aussagefähigkeit zu erhöhen, kann nun folgende Vorgehensweise eingesetzt werden: Da ein statistischer Versuchsplan (engl.: *Design of Experiments*, DoE) [134] zugrunde liegt, wird das Systemverhalten an diskreten Punkten im n -dimensionalen Raum der Eingangs- und Ergebnisparameter beschrieben. Der Versuchsplan bringt eine positive Eigenschaft mit sich: Er spannt einen homogenen Raum an Stützstellen auf, der es gemeinsam mit den Stützstellenergebnissen erlaubt, eine Interpolation mittels Ersatzfunktionen zu erzeugen. Die Methode wird als *Response Surface*-Methode, RSM bezeichnet. Ergebnis ist also hierbei eine das Gesamtsystemverhalten beschreibende Ersatzfunktion, mit der eine direkte Ergebnisverteilung erzeugt werden kann. Werden die CAT-Simulationen nun wiederholt ausgeführt, so können die Ergebnisse an den KPCs online korrigiert werden. Es resultiert eine Gesamtergebnisverteilung, die wiederum durch die Parameter Mittelwert, Streuung, Schiefe und Wölbung beschrieben werden kann und damit potentiell ein höheres Aussagenniveau als die Ansätze A und B besitzt.

Qualitativer Vergleich der Ansätze

Aus wissenschaftlicher Sicht lassen sich die Ansätze bereits qualitativ auf Basis ihrer Grundzüge bewerten. Tabelle 25 zeigt die Gegenüberstellung.

Der Vergleich zeigt deutlich, welcher Kompromiss zwischen numerischem Simulationsaufwand und gesteigerter Ergebnisgüte getätigt werden muss. Demzufolge haben für den Praxiseinsatz alle Methoden – einfache Ansätze, die dennoch gegenüber einer starren Toleranzanalyse eine gesteigerte Präzision mit sich bringen, bis hin zum integrativen DoE-Ansatz, der simulativ aufwendig ist, aber höchste Präzision ermöglicht – ihre Berechtigung.

Quantitativer Vergleich der Ansätze

In Bild 56 ist rechts der Ergebnisvergleich zwischen den drei Ansätzen hinsichtlich der Aussagen zu den resultierenden Mittelwerten und Streuungen dargestellt. Die beiden linken Teilabbildungen zeigen die Wahrscheinlichkeitsverteilungen für ein ausgewähltes Schließmaß (Fallstudie) auf Grundlage der Basissimulationen. Hierbei sind in a) die Ergebnisse der 3DCS-Toleranzsimulationen und in b) diejenigen der DoE-basierten FEM-Simulationen dargestellt. Diese sind die zu koppelnden Größen. Die Ergebnisse für Mittelwerte (durchgezogene Linie) und Standardabweichungen (gestrichelte Linie), als Folge des jeweiligen Ansatzes, sind rechts in Bild 56 aufgezeigt.

Tabelle 25: Qualitative Vor- und Nachteile der Ansätze, vgl. [P2], eigene Darstellung

	Vorteile	Nachteile
Ansatz A Arithmetische Superposition	$\oplus$ numerisch günstig $\oplus$ schnelle Ergebnisüberlagerung $\oplus$ Aufwand FEM kann mit nur wenigen Simulationen erzeugt werden	$\ominus$ keine Erhaltung der Korrelation $\ominus$ keine Streuungsaussagen d. elastischen Systemverhaltens aus FEM (Hypothese des Ansatzes ist experimentell nachzuweisen)
Ansatz B Statistische Superposition	$\oplus$ numerisch günstig $\oplus$ schnelle Ergebnisüberlagerung $\odot$ Aufwand FEM steigt (Konfidenzintervall Standardabweichung)	$\ominus$ keine Erhaltung der Korrelation $\ominus$ Verlust der Ergebnisverteilung (kritisch: RSS mit 2 Beitragsleistern) und damit Unschärfe bei der Bestimmung der Ergebnisverteilungen
Ansatz C integrative DoE	$\oplus$ Erhaltung der Korrelationen und Ergebnisverteilungen zur Bestimmung der Überschreitungssanteile $\oplus$ einfache, direkte datenreihenbasierte Superposition	$\ominus$ numerisch teuer $\ominus$ hohe Konsistenzanforderung der DoE $\ominus$ Einfluss Güte Ersatzmodell RSM

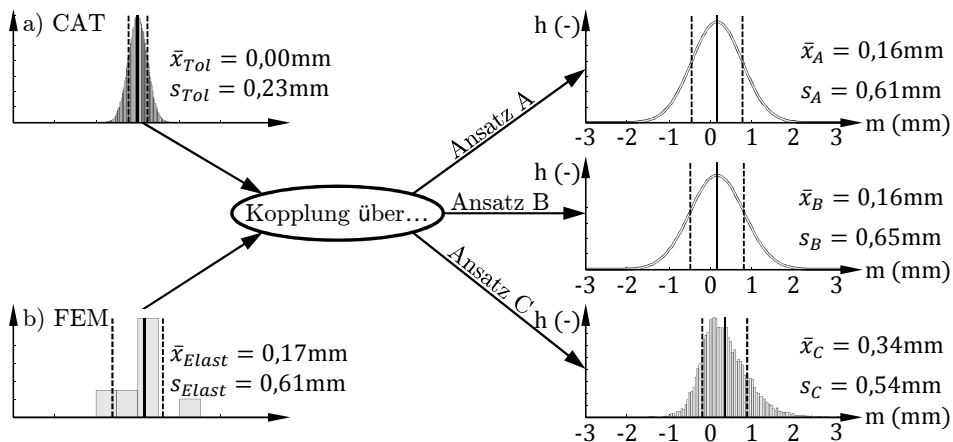


Bild 56: Ergebnisvergleich zwischen den drei Ansätzen für ein exemplarisches ausgewähltes Schließmaß (Fallstudie), vgl. [P2], eigene Darstellung

Die Ergebnisse dieser Fallstudie zeigen erwartungsgemäß unterschiedliche Ausprägungen hinsichtlich der Merkmale Mittelwert, Standardabweichung, Schiefe und Wölbung. Ansatz C ist einerseits aufgrund der direkten numerischen Superposition der Quelldaten und andererseits aufgrund der Erhaltung der Charakteristik der Verteilungsform des betrachteten Schließmaßes über die Simulationskette hinweg als der vielversprechendste anzusehen. Es handelt sich hierbei aber auch um den teuersten Ansatz. Der Vergleich mit den weniger teuren Ansätzen A und B zeigt, dass sich die Mittelwerte durch die in der FEM Simulation ermittelten Nachgiebigkeiten deutlich verschieben, jedoch in Folge der fehlenden integrativen Betrachtung nicht das Niveau des Ansatzes C erreichen. Bezüglich der Streuungen zeigt sich, dass die Hypothese des Streuungszuwachses aus Ansatz B durch Vergleich mit der resultierenden Streuung des Ansatzes C nicht bestätigt wird. Hierfür wird angenommen, dass die Präzision des Ansatzes C am höchsten ist. Auch im Vergleich der Ansätze A und C ist auffällig, dass sich die Streuungen signifikant unterscheiden. Darüber hinaus eröffnet sich aus der Streuungsreduzierung von Ansatz C ein deutliches Potential für die konstruktive Dichtungslegung.

4.5.5 Robustheitsuntersuchungen für die probabilistische funktionale Grenzlagenabsicherung

Für die Durchführung von Robustheitsuntersuchungen ist es zumeist unabdinglich, das betrachtete System durch eine möglichst kleine Auswahl repräsentativer Einflussfaktoren zu beschreiben. Eine solche Auswahl soll einen bestmöglichen Kompromiss zwischen getätigtem Simulationsaufwand und generierter Ergebnisgüte unterstützen. Für den vorliegenden Anwendungsfall werden alle identifizierten Einflussfaktoren durch ein ISHIKAWA-Diagramm in Bild 31 verdeutlicht. Mit der Prämisse, Einflussfaktoren in einer Simulation abbilden zu können, werden die bedeutendsten identifiziert und in das Ersatzmodell überführt. Im Kontext der Zielsetzung, belastbare Prognosen hinsichtlich funktionsrelevanter Grenzlagen zu ermöglichen, fällt die Vorauswahl auf die Inhalte der übergeordneten Felder „Geometrieabweichung“ und „Material“.

Umfänge der Robustheitsuntersuchungen: Geometrieabweichungen

Seitenrahmen

Wie bereits in Abschnitt 4.5.3 beschrieben, wird der Seitenrahmen simulationsseitig als starrer Körper betrachtet. Einerseits sind als Ergebnis von Voruntersuchungen seitenrahmenseitig aufgrund der Steifigkeiten keine signifikanten Deformationen zu erwarten; andererseits ist die Vergleichbarkeit zum Experiment (siehe Kapitel 5) durch diese Umsetzung gegeben.

Tür

Das System „Karosseriebau Tür“ besteht aus verschiedenen Aluminiumblechen mit Blechdicken zwischen 1,0 mm und 1,2 mm. Die tolerierte Dicken-schwankung jener beträgt gemäß DIN EN 485-4 $\pm 0,05$ mm, vgl. [205].

Dichtsystem

Die deformierbaren Geometrien der Dichtebenen „Kantenschutz“, „Tür-hauptdichtung“ und „Fugendichtungen“, siehe Bild 46, werden als nicht abweichungsbehaftet in die Simulationen aufgenommen.

Umfänge der Robustheitsuntersuchungen: Materialien

Tür

Die Aluminiumblech-Umfänge des Systems „Karosseriebau Tür“ werden einmalig durch den Materialparameter Elastizitätsmodul (E -Modul) E berücksichtigt. Nominal hat jener einen Wert von $E_{Alu} = 70.000 \text{ N/mm}^2$. Auf Grundlage empirischen Wissens wird dessen Schwankungsbreite bei Normalverteilungsannahme auf $\pm 1.000 \text{ N/mm}^2$ festgelegt.

Die Materialeigenschaften der Kunststoffinnenverkleidungsteile (KIV-Teile) des Systems „Anbauteile Tür“ werden ebenfalls zusammengefasst durch einen E -Modul mit Nominalwert $E_{KIV} = 2.800 \text{ N/mm}^2$ berücksichtigt. Die tolerierte Schwankung wird mit $\pm 5\%$, respektive $E_{KIV} = [2.660 \text{ N/mm}^2, 2.940 \text{ N/mm}^2]$, bei angenommener Normalverteilung definiert.

Dichtsystem

Bei gleichbleibendem geometrischen Erscheinungsbild reagieren die Materialeigenschaften von Elastomerbauteilen sensitiv auf streuende Produktionsrandbedingungen, wie zum Beispiel variierende Mischungsverhältnisse des Granulats oder auch schwankende Umgebungstemperaturen beim Aushärten. Vor diesem Hintergrund können variierende Materialparameter als wesentliche Einflussgrößen auf die Ergebnisse der Robustheitsuntersuchungen angenommen werden – gerade auch dann, wenn ein nichtlinear-elastisches Materialverhalten vorliegt, siehe Abschnitt 4.5.3 sowie Bilder 43 und 45.

In Abschnitt 4.5.3 wurde das zwei-parametrische hyperelastische Materialmodell nach MOONEY-RIVLIN vorgestellt, welches im Rahmen dieser Arbeit zur Abbildung quasistatischer Bauteileigenschaften von Elastomeren verwendet wird. Die zwei Parameter in diesem Modell (C_{10} und C_{01}) sind Funktionen der Shore-A-Härte H_A . Jene wird im Folgenden mit einer zulässigen Toleranz von ± 5 Shore-Punkten bezogen auf den Zeichnungseintrag respektive den ermittelten Wert (siehe Bild 45) unter Annahme einer Normalverteilung berücksichtigt.

Reibungskoeffizienten

Die dynamischen Kontaktsituationen zwischen den Dichtungen und den durch sie kontaktierten Anlageflächen auf (Karosserie-) Bauteilen werden als Gleitreibung charakterisiert. Jene Reibkontakte treten zwischen den in Tabelle 23 beschriebenen interagierenden Bauteilen auf. Die Reibungseffekte werden bei den Robustheitsuntersuchungen unter Zuhilfenahme des dimensionslosen Gleitreibungskoeffizienten μ_G berücksichtigt. Jener wird als Quotient aus Reibungs- ($F_{R,G}$) und Normalkraft ($F_{N,G}$) mit der Prämisse, dass $F_{R,G} < F_{N,G}$ gilt, im Intervall zwischen $\mu_G = [0, 1]$ angenommen. Grundlegend kann der Reibungskoeffizient bei entsprechenden Materialpaarungen jedoch auch größer Eins sein.

Für den vorliegenden Anwendungsfall im Rahmen dieser Arbeit wird die Annahme getroffen, dass der Reibungskoeffizient je Dichtebene gleichverteilt im Intervall $\mu_G = [0.1, 0.5] := \{\mu_G \in \mathbb{R} \mid 0.1 \leq \mu_G \leq 0.5\}$ streut.

Das Set an Eingangsparametern wird demnach einerseits durch materialspezifische Kennwerte und Bauteil-Reibkoeffizienten sowie andererseits durch Toleranzlagen des abweichungsbehafteten Systems beschrieben. Tabelle 26 zeigt eine Übersicht der zu berücksichtigten Eingangsparameter.

Als Ausgangsparameter werden die Sensormessstellen gewählt, welche taktil gemessene Abstandsinformationen an den betrachteten Schließmaßen liefern, siehe Bild 52. Simulationsseitig wird diese Abstandsmessung durch eine Projektion des jeweiligen Messvektors vom Seitenrahmen auf die gegenüberliegende Tür bzw. das gegenüberliegende Türanbauteil umgesetzt. Der Schnittpunkt aus projiziertem Vektor und Tür (-Anbauteil) definiert denjenigen Messpunkt, dessen Abstand zum jeweiligen Nullpunkt auf dem Seitenrahmen bestimmt wird.

Sampling

Für höherdimensionale Entwurfsräume hat sich das „LATIN HYPERCUBE-SAMPLING“ zur Durchführung einer stochastischen Versuchsplanung für die Robustheitsuntersuchungen im Rahmen dieser Arbeit als geeignet herausgestellt, vgl. [S4], siehe Abschnitt 2.3.5. Auf Basis von 100 Simulationsdurchläufen liefert dieser Sampling-Ansatz eine 100×12 -Matrix für die 12 Eingangsparameter aus Tabelle 26. Deren Darstellung in Form von *Ant-Hill-Plots* (siehe Abschnitt 2.3.5) ist in Bild 57 ersichtlich.

Tabelle 26: Eingangsparmeter der Robustheitsuntersuchungen inkl. Kennwerten

	Bezeichnung der Eingangsparameter	Einheit	Mittel- wert μ_X	statist. Verteil.- annahme	Min.	Max.
1	Grenzlage (GL)	1	/	Gleichver- teilung	1	11
2	Türhauptdichtung Shore-A-Härte (THD ShA)	ShA	35	Normal- verteilung	30	40
3	Türhauptdichtung Gleitreibungskoeffizient (THD μ_G)	1	/	Gleichver- teilung	0,1	0,5
4	Kantenschutz Shore-A-Härte (KS ShA)	ShA	25	Normalver- teilung	20	30
5	Kantenschutz Gleitreibungskoeffizient (KS μ_G)	1	/	Gleich- verteilung	0,1	0,5
6	Doppellippendichtung Shore-A-Härte (DLD ShA)	ShA	60	Normal- verteilung	55	65
7	Einstiegsdichtung Shore-A-Härte (ED ShA)	ShA	30	Normal- verteilung	25	35
8	Fugendichtungen Gleitreibungskoeffizient (FD μ_G)	1	/	Gleich- verteilung	0,1	0,5
9	Türinnenverkleidung E-Modul (TIV E)	N/mm ²	2.800	Normal- verteilung	2.660	2.940
10	Fensterrahmenabdeckung E-Modul (FRA E)	N/mm ²	2.800	Normal- verteilung	2.660	2.940
11	Karosseriebau Tür E-Modul (KBT E)	N/mm ²	70.000	Normal- verteilung	69.000	71.000
12	Karosseriebau Tür Blechdicke (KBT BD)	mm	1,2	Normal- verteilung	1,15	1,25

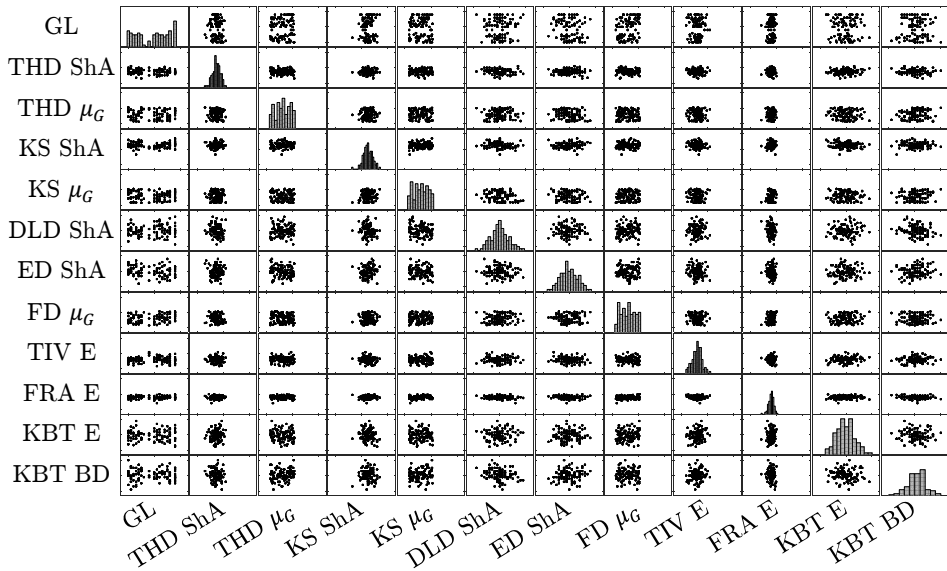


Bild 57: Ant-Hill-Plots: Input-Input-Matrix der Eingangsparameter aus Tabelle 26 nach LATIN HYPERCUBE-SAMPLING

In diesem Bild werden die potentiell abweichungsbehafteten Eingangsparameter in einer *Input-Input-Matrix* gegenübergestellt, wobei die streuenden Eingangsparameter auf den Feldern der Hauptdiagonale der Kovarianzmatrix zur Information dargestellt sind. Eine derartige grafische Veranschaulichung der Korrelationsstrukturen ermöglicht eine visuelle Beurteilung eben dieser ohne Anwendung statistischer Signifikanztests. Augenscheinliche Korrelationen bzw. Abhängigkeiten zwischen den Eingangsparametern sind in diesem Bild bei entsprechend vergrößerter Betrachtung der einzelnen Korrelationsstrukturen nicht erkennbar. Es zeigt sich, dass die vorgegebenen Toleranzbereiche bei allen Parametern vollständig belegt sind. Dies „gewährleistet, dass alle zur Erstellung der Antwortflächen notwendigen Stützstellen berechnet werden können“, vgl. [S4].

4.6 Ansatz zur simulationsunterstützten funktionalen Grenzlagenabsicherung

Mit Blick auf das in Bild 29 aufgezeigte Vorgehensmodell sowie die Inhalte und Erkenntnisse der vorangegangenen Abschnitte zeigt Bild 58 in einem Prozessschaubild im Folgenden die Hauptprozessschritte für den vorgeschlagenen virtuellen Ansatz hinsichtlich einer simulationsunterstützten funktionalen Grenzlagenabsicherung.

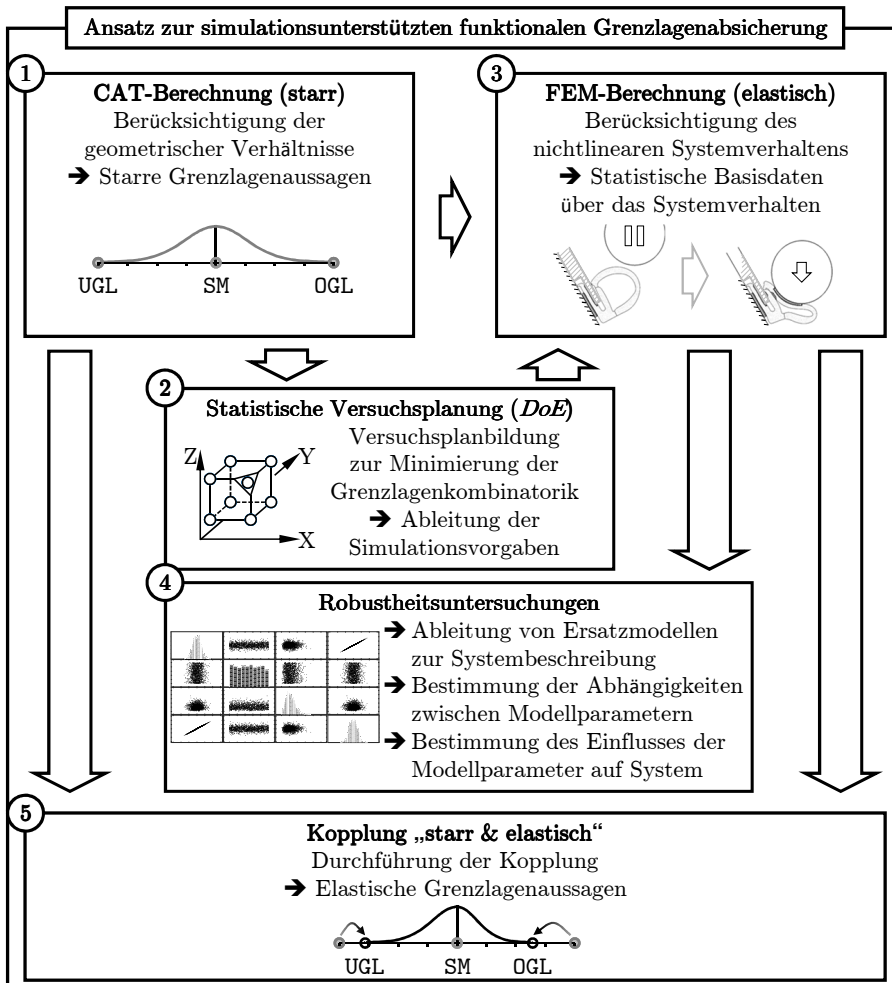


Bild 58: Ansatz zur simulationsunterstützten funktionalen Grenzlagenabsicherung

Der Ansatz lässt sich zusammenfassend wie folgt beschreiben:

Schritt 1: Statistische CAT-Berechnung (starr)

Der erste Schritt bezeichnet die Ermittlung der starren Grenzlagen. In diesem werden unter Zuhilfenahme der Methoden der rechnerunterstützten Toleranzrechnung (engl.: *Computer-Aided Tolerancing*, CAT) numerisch Aussagen bezüglich möglicher Toleranzsituationen (Grenzlagen) an den betrachteten Schließmaßen unter Berücksichtigung geometrischer Verhältnismäßigkeiten getroffen. Wesentliche Grundlagen für die numerische Toleranzrechnung werden in Abschnitt 2.1.2 aufgezeigt. Eine anwenderorientierte Einführung in die Grenzlagenermittlung auf Basis einer starren Toleranzsimulation wird in Abschnitt 4.5.1 gegeben. Kennzeichnende Randbedingung zur Ermittlung dieser „starren“ Grenzlagenaussagen ist der Fakt, dass die Methoden der rechnerunterstützten Toleranzrechnung den „starren Ansatz“ gemein haben. Alle in die Rechnung einbezogenen Beitragsleister werden als ideal starr angesehen.

Schritt 2: Statistische Versuchsplanung (DoE)

Der zweite Schritt bezeichnet die Durchführung einer statistischen Versuchsplanung. Basierend auf den Ergebnissen der starren Grenzlagenberechnung wird ein statistischer Versuchsplan erstellt. Jener bedient die Anforderung, die Grenzlagenkombinatorik zu minimieren. Anders ausgedrückt ist es an dieser Stelle das Ziel, optimale Versuchskombinatoriken zu finden, die es bei minimalen Aufwand erlauben, „Versuche so zu kombinieren, dass die Zusammenhänge einer Funktion oder eines Prozesses bestmöglich durch eine spätere (statistische) Auswertung wiedergegeben werden können“, vgl. [65]. Die theoretischen Grundlagen zur statistischen Versuchsplanung werden in Abschnitt 2.3.2 vorgestellt. Abschnitt 4.5.2 zeigt die Umsetzung für den gewählten Demonstrator im Rahmen dieser Arbeit.

Schritt 3: FEM-Berechnung (elastisch)

Im dritten Schritt werden, basierend auf den starren Grenzlagenergebnissen und denen der statistischen Versuchsplanung, FEM-Berechnungen durchgeführt. Diese integrieren elastische und nichtlineare Bauteileigenschaften sowie bis dato unberücksichtigte Bauteile (Dichtungen) in das Berechnungsmodell. Die auf diesem Wege berücksichtigten Wechselwirkungen (bspw. Rückstellkräfte) zwischen den verformbaren Bauteilen fließen nun als statistische Basisdaten bzgl. des Systemverhaltens in die Grenzlagenprognosen ein, welche nun die Folge elastischer Verformungen des Gesamtsystems sind. In Abschnitt 2.3.3 finden sich die theoretischen Inhalte zur Thematik der Finite-Elemente-Methode. Korrespondierend behandelt Abschnitt 4.5.3 deren entsprechende Umsetzung am Beispiel des gewählten Demonstrators.

Schritt 4: Robustheitsuntersuchungen

Im vierten Schritt werden auf Basis der FEM-Berechnungsergebnisse Robustheitsuntersuchungen durchgeführt. Diese sollen dem Anwender vielfältige Auswertungen ermöglichen. Einerseits sei an dieser Stelle auf Untersuchungen hinsichtlich der Robustheit (im Sinne einer Unempfindlichkeit) einer streuenden Systemantwort auf unsichere Modellparameter verwiesen. Diese sollen die Frage beantworten, welche Modellparameter den kleinsten/größten Einfluss auf das Verhalten des Gesamtsystems ausüben. Andererseits ist es jedoch auch möglich, derartige Aussage zwischen den Modellparametern zu generieren, um etwaige Korrelationen erkennen oder ausschließen zu können. Öftmals können Robustheitsuntersuchungen erst auf Basis eines geeigneten systembeschreibenden Ersatzmodells durchgeführt werden, da der Aufwand hinsichtlich einer Evaluierung auf dem Originalmodell numerisch zu teuer ist. Vor diesem Hintergrund werden als Teil der theoretischen Grundlagen in Abschnitt 2.3.5 auch sogenannte *Sampling*-Ansätze zur Generierung bestmöglich gleichverteilter Trainingsstellen im angestrebten Approximationsbereich thematisiert. Abschnitt 4.5.5 stellt die zugehörigen Robustheitsuntersuchungen im Zusammenhang mit dieser Arbeit vor.

Schritt 5: Kopplung „starr & elastisch“

Im fünften Schritt wird die Kopplung/Überlagerung einer starren Toleranzmit einer korrespondierenden elastischen FEM-Berechnung durchgeführt. Dies geschieht im Sinne einer gesamthaften Simulation des Abweichungsverhaltens des betrachteten Systems. Mit Bezug auf die starren Grenzlagenaussagen resultiert als Ergebnis eine korrigierte Grenzlagenaussage unter Berücksichtigung der elastischen und nichtlinearen Effekte. Eine wesentliche Voraussetzung zur Durchführung einer derartigen Kopplung ist es hierbei, dass die Ergebnisse der verschiedenen Simulationsstadien in Form von einander eindeutig zuordenbaren Datenreihen vorliegen. Weitere wissenschaftliche Grundlagen für eine dementsprechende Überlagerung, unter Berücksichtigung der Wechselwirkungen der beteiligten Beitragsleister, werden in Abschnitt 2.3.4 aufgezeigt. Darauf fußend sind die Ableitung verschiedener Grundstrategien sowie deren qualitativer und quantitativer Vergleich Thema von Abschnitt 4.5.4.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden zur Validierung des Ansatzes experimentelle Untersuchungen durchgeführt, siehe Kapitel 5. Deren Einordnung in den Ansatz im Kontext der einmaligen Durchführung wird in Abschnitt 5.6 dargestellt.

5 Experimentelle Validierung des Ansatzes am Demonstrator

Aufgeteilt in sechs Abschnitte thematisiert dieses Kapitel die experimentelle Validierung des Ansatzes am Demonstrator. Beginnend mit den Zielsetzungen an das Experiment und den zugehörigen Prüfstand in Abschnitt 5.1 beschreibt Abschnitt 5.2 die zugehörigen Anforderungen zur Erfüllung dieser Ziele. Abschnitt 5.3 thematisiert die Ableitung sowie Bewertung von Prüfstandskonzepten unter Anwendung des FORFLOW-Prozessmodells bevor Abschnitt 5.4 auf die konkrete Umsetzung des gewählten Prüfstandkonzeptes eingeht. Begründet durch die Neuartigkeit des Prüfstandkonzeptes werden die unverzichtbaren Wiederholgenauigkeits- und Reproduzierbarkeitsstudien im Rahmen der Inbetriebnahme des Prüfstandes in Abschnitt 5.5 vorgestellt. Stützend auf den in diesem Abschnitt gewonnenen Erkenntnissen beschreibt Abschnitt 5.6 das Vorgehen zur Durchführung der Grenzlagenuntersuchungen am Prüfstandsaufbau.

5.1 Zielsetzungen an das Experiment und den zugehörigen Prüfstand

Als experimenteller Demonstrator zur Validierung des simulationsunterstützten Ansatzes bzgl. der Absicherung funktionsrelevanter Grenzlagen wird ein Prüfstandsaufbau gewählt. Jener soll zwei übergeordnete Zielsetzungen verfolgen, wobei die zweite Zielsetzung als Randbedingung zur Umsetzung der ersten zu verstehen ist:

1) Allgemeine Zielsetzung

- Es ist die allgemeine Zielsetzung des Experimentes, die Absicherung funktionsrelevanter Grenzlagen zwischen dem Seitenrahmen eines Fahrzeugeinstiegs und der Fahrertüre unter Beaufschlagung durch Wasser im Duschversuch in Abgleich mit virtuellen Messdaten durchzuführen.

2) Zielsetzungen an experimentelle Randbedingungen

- Die mit diesem Aufbau zu ermöglichenden Relativpositionierungen zwischen Fahrertüre und Seitenrahmen sollen die aus den entsprechenden Simulationen ermittelten Grenzlagen im Einstiegsbereich abbilden.
- Als Schnittstelle zwischen virtueller und experimenteller Absicherung soll der Prüfstandsaufbau einen bis dato „händischen Prozess zum Einstellen von Grenzlagen hinsichtlich der Zeit und der präzisen (und wiederholgenauen) Positionierung (...) verbessern“, [S2].

5.2 Anforderungen an das Experiment und den zugehörigen Prüfstand

Die nachfolgenden zwei Abschnitte unterstützen das Klären der Anforderungen an das Experiment und den zugehörigen Prüfstand. Zu diesem Zwecke werden zunächst in Abschnitt 5.2.1 Einflussgrößen auf das abzusichernde Kriterium Dichtheit auf Grundlage des in Abschnitt 4.4 erarbeiteten ISHIKAWA-Diagramms abgeleitet. Anschließend werden die technischen Anforderungen an den Versuchsaufbau in Abschnitt 5.2.2 zusammengetragen und tabellarisch dargestellt.

5.2.1 Ableiten von Einflussgrößen auf Grundlage des ISHIKAWA-Diagramms

Fußend auf dem ISHIKAWA-Diagramm, welches als vollständige Sammlung der Einflussgrößen auf die Dichtheit am Fahrzeugeinstieg in Abschnitt 4.4, Bild 31 vorgestellt wurde, leitet sich auf Basis einer Intensitäts-Beziehungsmatrix (siehe Tabellen 57 bis 66, Anhang E), vgl. [S7, Anhang C], das in Bild 60 dargestellte Portfolio-Diagramm bzgl. der Dichtheit am Fahrzeugeinstieg ab, vgl. [134], [206] und [207]. Dieses soll die Identifizierung relevanter Einflussgrößen weiter einschränken, um diese anschließend bei der experimentellen Absicherung berücksichtigen zu können.

In diesem Portfolio-Diagramm ist zunächst eine Einteilung in Aktiv- und Passivsumme ersichtlich. Jene Größen ergeben sich, wie bereits angesprochen, als Folge einer Intensitäts-Beziehungsmatrix. Eine solche ist exemplarisch in Tabelle 27 dargestellt, vgl. [134, Abb. 11.13].

Tabelle 27: Generische Intensitäts-Beziehungsmatrix, vgl. [134, Abb. 11.13], eigene Darstellung

Wirkung auf von $\rightarrow$	Stellgröße Nr.						Aktivsumme
		x_1	x_2	x_3	...	x_n	
	x_1						
	x_2						
	x_3						
	...						
	x_n						
Passivsumme							

In dieser zweidimensionalen Matrix (beide Dimensionen sind mit den zu analysierenden Stellgrößen belegt) werden sowohl die Stellgrößen, als auch deren Wirkung untereinander dargestellt. Fokussiert wird hierbei stets die Zielgröße des Systems. „Führt beispielsweise eine Temperaturabweichung (Einflussgröße eins) zu einer Geometrieabweichung eines Bauteils (Einflussgröße zwei) so wird die Zielgröße des Systems (zum Beispiel eine Karosserie-fuge) beeinflusst. Aus diesem Zusammenhang kann jedoch nicht geschlossen werden, dass eine Geometrieabweichung, obwohl sie Einfluss auf die die Karosserie-fuge hat, einen Einfluss auf die Temperatur hat. Somit ist die Intensitäts-Beziehungsmatrix unsymmetrisch und jede Beeinflussung bedarf einer gesonderten Untersuchung. [134]“, vgl. [S7]. Für eine jede Zielgröße ist folglich eine gesonderte Matrix zu erstellen. In Anlehnung an die Arbeit von GUNDLACH erfolgt die Abschätzung der Wirkungen im Rahmen dieser Arbeit über ein festgelegtes fünfstufiges Punktesystem (Intensitäten) nach Wirkstufen:

- 0 ... keine Wirkung erwartet,
- 1 ... schwache Wirkung erwartet,
- 2 ... mittlere Wirkung erwartet,
- 3 ... stärkere Wirkung erwartet,
- 4 ... starke Wirkung erwartet.

Zur Befüllung der Intensitäts-Beziehungsmatrix stellt GUNDLACH zudem recht anschaulich mit Bezug auf zwei fiktive Stellgrößen $i \Rightarrow x_1$ und $j \Rightarrow x_2$ dar, vgl. [134]: „Da es sich bei den Intensitäten um Wechselwirkungen handelt, müsste rein theoretisch demnach das Feld der Zeile ‚ x_1 ‘ und Spalte ‚ x_2 ‘ den gleichen Schätzwert aufweisen, wie das Feld ‚ x_2 ‘ der Spalte ‚ x_1 ‘, da es sich um die gleiche Wechselwirkung handelt. Durch vollständiges Ausfüllen der Matrix lassen sich nun Unsicherheiten bezüglich der getroffenen Abschätzungen aufschlüsseln. Je größer die Abweichung zwischen Feld ‚ x_{12} ‘ und ‚ x_{21} ‘, desto größer ist auch die Unsicherheit. Daher sollte die Matrix immer vollständig ausgefüllt werden.“ Nach erfolgter Befüllung der Intensitäts-Beziehungsmatrix wird die Aktivsumme (Quantifizierung des Einflusses einer Stellgröße auf eine Zielgröße) durch spaltenweises und die Passivsumme (Quantifizierung des Einflusses aller Stellgrößen x_i auf eine Stellgröße x_j mit $i \neq j$) durch zeilenweises Aufsummieren gebildet. Zur grafischen Veranschaulichung der Ergebnisse einer derartigen Matrix wird das sogenannte Portfolio-Diagramm verwendet. Ein solches ist in seiner generischen Form in Bild 59 dargestellt.

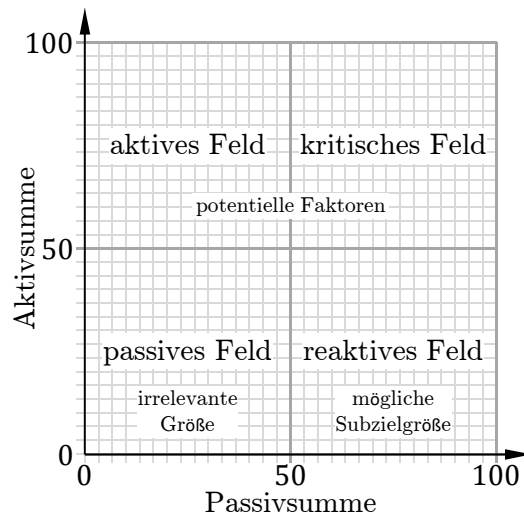


Bild 59: Portfolio-Diagramm auf Basis Intensitäts-Beziehungsmatrix, vgl. [134, Abb. 11.13], eigene Darstellung

In diesem Diagramm zeigen Ordinate und Abszisse Aktiv- und Passivsumme. Angelehnt an [134, Abb. 11.13] kann hierin eine Unterteilung in vier Felder vorgenommen werden. Potentielle Stellgrößen können im aktiven und kritischen Feld verortet werden, wohingegen im reaktiven Feld mögliche Subzielgrößen und im passiven Feld eher irrelevante Größen abgebildet werden.

Für den im Rahmen dieser Arbeit thematisierten Fall ergibt sich als Ergebnis einer Mitarbeiterbefragung (Fachspezialisten) die in Anhang E dargestellte Intensitäts-Beziehungsmatrix. Aufgrund der Größe dieser Matrix ist diese in 10 Teilmatrizen aufgeteilt (Tabellen 57 bis 66, vgl. [S7, Anhang C]). Die grafischen Aufbereitung der Ergebnisse dieser Matrix erfolgt, wie im Vorfeld beschrieben, über das sogenannte Portfolio-Diagramm (siehe Bild 60).

In diesem erfolgt die Einteilung der unterschiedlichen Felder sowohl bei der Aktiv- als auch bei der Passivsumme im vorliegenden Fall bei der Wertigkeit 15. Aus diesem Grund sind ausschließlich diejenigen Stellgrößen mit Wertigkeiten größer 15 beschriftet. Dieser Wert ist bei $\approx 50\%$ der maximalen Wertigkeit (31 bei Aktivsumme) gewählt. Die Lage der Feldgrenzen muss jedoch nicht symmetrisch erfolgen. Eine Anpassung an spezifische Gegebenheiten ist möglich.

Entsprechend dieser Einteilung des Portfolio-Diagramms in vier Quadranten, vgl. [134, Abb. 11.13], ergibt sich die folgende Zuordnung.

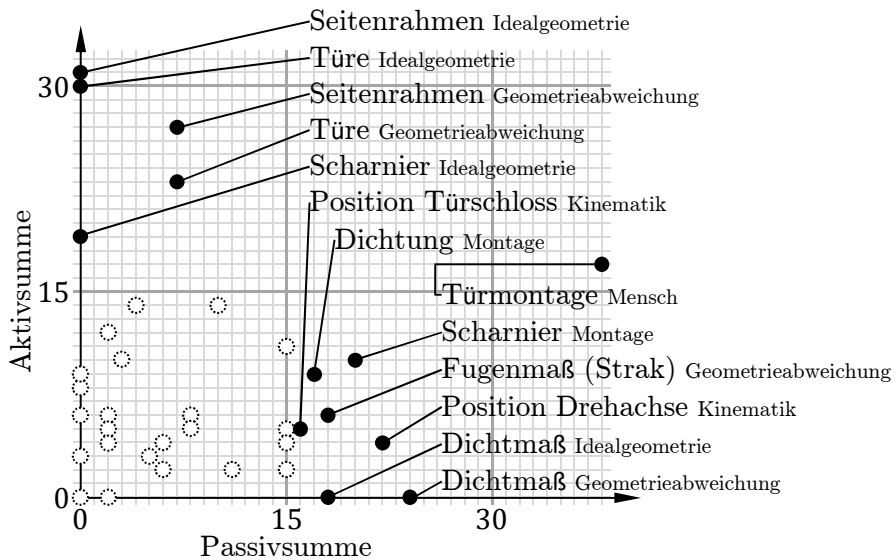


Bild 60: Portfolio-Diagramm bzgl. der Dichtigkeit am Fahrzeugeinstieg, vgl. [S7, Bild 3.6], eigene Darstellung

- **aktives Feld**
 - Seitenrahmen Idealgeometrie
 - Türe Idealgeometrie
 - Seitenrahmen Geometrieabw.
 - Türe Geometrieabweichung
 - Scharnier Idealgeometrie
- **passives Feld**
 - irrelevante Größen
 - (alle verbleibenden Größen)
- **kritisches Feld**
 - Türmontage Mensch
- **reaktives Feld**
 - Position Türschloss Kinematik
 - Dichtung Montage
 - Scharnier Montage
 - Fugenmaß (Strak) Geometrieabw.
 - Position Drehachse Kinematik
 - Dichtmaß Idealgeometrie
 - Dichtmaß Geometrieabweichung

Auf Grundlage dieser Zuordnung resultieren die folgenden Ausführungen. Die reaktiven Größen können durch die Stellgrößen mit hoher Aktivsumme (aktives & kritisches Feld) beeinflusst werden. Diese reaktiven Größen können als Indikatoren für das gewählte funktionale Kriterium betrachtet werden und sind somit als Messgrößen prädestiniert, „da hier von einer Korrelation mit der Dichtigkeit des Systems ausgegangen wird. Die Stellgrößen (hohe Aktivsumme), zu denen neben der Türmontage ausschließlich Geometrie-Größen zählen, sollten (...) (im Experiment) idealerweise auch als Stellgrößen umgesetzt werden“, vgl. [S7].

Das Augenmerk wird auf die Geometrieabweichungen der Bauteile gelegt, welche, neben den zu erwartenden Rückstelleffekten, als wesentliche Beitragsleister für die abzusichernden Grenzlagen angenommen werden.

5.2.2 Klärung der technischen Anforderungen

In Tabelle 28 ist die Anforderungsliste aufgezeigt. Diese resultiert sowohl aus dem Portfolio-Diagramm als auch aus Hauptmerkmalslisten, vgl. [208], sowie aus Abstimmungsrunden mit Fachspezialisten aus den Bereichen Entwicklung und Absicherung/Produktion, siehe [S7]. Um eine Gliederung der Anforderungen vornehmen zu können, wird gemäß [209] eine Einteilung vorgenommen in:

- FF ... Festforderung,
- IF ... Intervallforderung,
- MiF ... Minimalforderung und
- MaF ... Maximalforderung.

Weiterführende Informationen zu möglichen Detail-Anforderungen an den Experimentalaufbau sind in einem Lastenheft aus dem Jahr 2014 festgehalten. Auf dieses wird an dieser Stelle nicht näher eingegangen.

5.3 Ableitung sowie Bewertung von Prüfstandskonzepten unter Anwendung des FORFLOW-Prozessmodells

Auf Grundlage der erarbeiteten Anforderungen wurden „Konzeption und Entwurf eines Prüfstandes zur funktionalen Grenzlagenabsicherung eines abweichungsbehafteten Fahrzeugeinstiegs“ durch HELING im Rahmen dieser Arbeit getrieben, vgl. [S7]. Als wissenschaftlich-methodisches Werkzeug zur Unterstützung dieses Produktentwicklungsprozesses wurde sich hierbei am FORFLOW-Prozessmodell orientiert. Folglich wird das FORFLOW-Prozessmodell in diesem Teil der Arbeit in Abschnitt 5.3.1 mit Verweis auf entsprechende Veröffentlichungen kurz vorgestellt. In Abschnitt 5.3.2 werden, dem zweiten Schritt des Prozessmodells entsprechend, (Haupt-)Funktionen und deren Struktur hinsichtlich der Prüfstandsentwicklung abgeleitet. Fußend darauf werden prinzipielle Lösungen, respektive potentielle Prüfstandskonzepte, passend zu diesen (Haupt-)Funktionen in Abschnitt 5.3.3 erarbeitet. Abschnitt 5.3.4 beschäftigt sich mit der Ableitung und Auswahl von Gesamtkonzeptalternativen.

Tabelle 28: Anforderungsliste bzgl. des Prüfstandaufbaus

Anf.	Bezeichnung	konkr. Vorgabe
Kräfte		
MiF	Aufnahme der Gewichtskraft der bewegten Baugruppe (translatorisch)	186kg
MiF	Aufnahme der Gewichtskraft der bewegten Baugruppe (rotatorisch)	186kg
Energie		
FF	Bereitstellung Energie für Messeinrichtungen (in Bezug auf Systemgrenze)	230V
Signal		
FF	Messsignal zum Messrechner übertragen	
Sicherheit		
FF	Elektrische Sicherheit ausgehend von EN 60947-5: Niederspannungsschaltgeräte	
Instandhaltung		
MaF	Wiederherstellung des ursprünglichen Zusandes (in Bezug auf Messtechnik)	Innerhalb von acht Stunden
Recycling		
FF	Eine Wiederverwendung großer Teile der Messtechnik ist anzustreben.	
FF	Bei Wechsel des (Fahrzeug-)Projektes soll die Integration einer vergleichbar dimensionierten Geometrie (hinsichtl. Seitenrahmen und Tür) in das bestehende Prüfstandkonzept möglich sein.	
Mess-(Technik)		
FF	Verbau Hexapod als Aktuator von Firma PHYSIK INSTRUMENTE (PI) GMBH & CO. KG	1× H-845
FF	Messschnitte sind auf Grundlage der Arbeiten von EPPLE und HELING vorzusehen, vgl. [S1] und [S7]. Hier sollen die betrachteten Schließmaße verortet werden und die Messungen erfolgen, siehe Bild 78.	
FF	Verbau taktiler Messtaster von Firma MAGNESCALE CO., LTD.	19× DKSVRB10
IF	Genauigkeit prozesssicherer Messung. Range maximal:	±0,01mm
FF	Eine ergänzende Fugen- u. Versatzmessung soll möglich sein (kein Bestandteil des Prüfstandes)	
FF	Prüfung d. Anlage d. Dichtung soll möglich sein.	
Versuch		
FF	Aluminiumfrästeile (Cubing-Umfänge)	Seitenrahmen, Tür
FF	Anlage muss BMW GROUP Standard 97004-2 „Kraftfahrzeugdichtheit gegen Wasser“ genügen.	
FF	Anlage muss im Stande sein, reale Grenzlagen, korrespondierend zu den virtuellen Ergebnissen der Toleranzsimulation, einstellen zu können.	

Hierfür werden in diesem Abschnitt zunächst messtechnische Randbedingungen hinsichtlich der Realisierung der taktilen Messsysteme thematisiert. Anschließend erfolgen eine Vorstellung der Gesamtkonzepte sowie die finale Auswahl des taktilen Messsystems. Als letzter Schritt wird die technisch-wirtschaftliche Bewertung der Gesamtkonzepte in diesem Abschnitt vorgestellt und mit der Auswahl eines Prüfstandkonzeptes abgeschlossen.

5.3.1 Das FORFLOW-Prozessmodell – eine Übersicht

Als „dynamische Unterstützung“ für die multidisziplinäre Produktentwicklung ist das FORFLOW-Prozessmodell das Entwicklungsergebnis der öffentlich geförderten¹ Zusammenarbeit zwischen sechs Instituten bayerischer Universitäten, vgl. [210]. Es stellt den Anspruch an sich selbst, ein „detailliertes, aber dennoch variables und allgemein einsetzbares Modell des Produktentwicklungsprozesses“ zu sein. Bild 61 zeigt einen Auszug des Modells in Anlehnung an Darstellungen aus [211], [210] und [212].

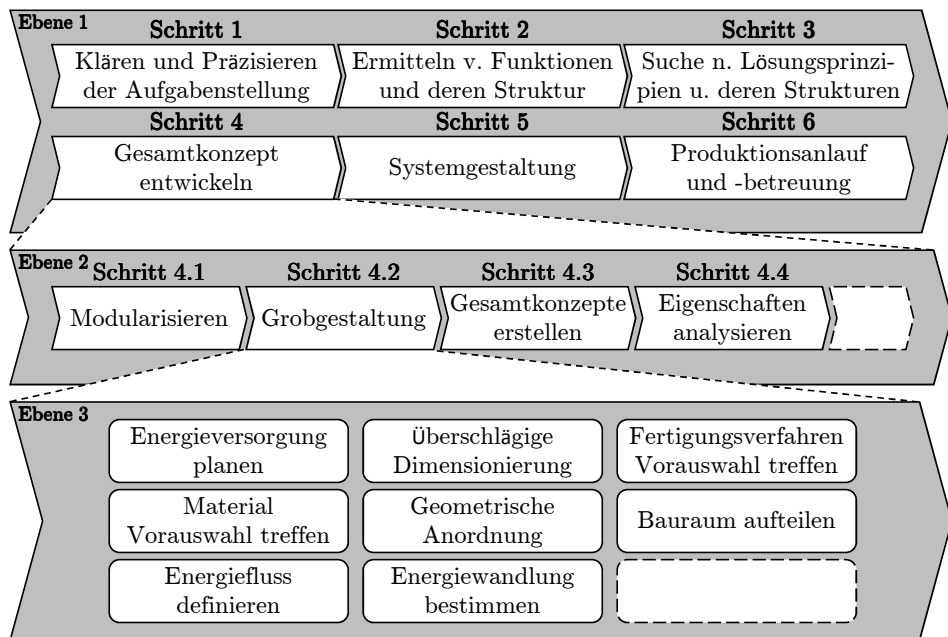


Bild 61: Auszug aus dem FORFLOW-Prozessmodell in Anlehnung an [211], [210] und [212]

¹ Von Ende 2006 bis Anfang 2010 förderte die Bayerische Forschungsförderung den Forschungsverbund FORFLOW (Bayerischer Forschungsverbund für Prozess- und Workflow-Unterstützung zur Planung und Steuerung der Abläufe in der Produktentwicklung). <https://www.forschungsforderung.de/index.php/Projekte/Details/FORFLOW-Flexible-Prozessunterstuetzung-in-der-Produktentwicklung.html>.

In der Hauptstruktur sind drei Ebenen ersichtlich. Die oberste und erste Ebene gliedert sich in Anlehnung an das Vorgehensmodell nach VDI-RICHTLINIE 2221, vgl. [213], in sechs statt sieben Phasen. Auf den zwei weiteren Ebenen werden feingliedrig aus diesen nahezu 90 Teilprozessschritte abgeleitet. Charakteristisch hierbei ist der Fakt, dass die ersten beiden Ebenen eine Abarbeitungsreihenfolge vorgeben, während in der dritten Ebene Teilprozessschritte umsortiert und/oder ausgelassen werden können. Dies stellt einen Tribut an die unterschiedlichen Anforderungen der verschiedenen Produkte dar – dem Anwender soll ein gewisser Handlungsspielraum gelassen werden. „Zudem wird die situationsspezifische Prozessplanung unterstützt, indem drei Arten von Schritten unterschieden werden: (1) zwingend auszuführende, (2) nicht unbedingt notwendige, aber empfohlene und (3) besonders bei Entwicklung neuer Produkte zu durchlaufende Prozessschritte [211], [210]“, vgl. [212]. Weiterhin gestattet dieses Modell dem Anwender ein zielgerichtetes Einsteigen und frühzeitiges Verlassen des Prozesses an definierten Stellen.

Bei Interesse sind weiterführende Informationen zum FORFLOW-Prozessmodell den Veröffentlichungen [211], [210] und [212] von KREHMER zu entnehmen. Das vollständige FORFLOW-Prozessmodell nach KREHMER ist in Anhang E dargestellt, vgl. [214].

5.3.2 Ermitteln von Funktionen und deren Struktur

Der zweite Schritt des FORFLOW-Prozessmodells beinhaltet die Subschritte „Lastenheft erstellen“, „Funktionen ermitteln“, „Funktionsstruktur aufbauen“ und „Erkenntnisgewinn dokumentieren“, siehe Bild 94. Das Erarbeiten und Verknüpfen von Funktionen steht an dieser Stelle zunächst im Vordergrund. Als Hauptfunktionen des Systems Prüfstand ergeben sich auf Basis der Anforderungen die folgenden:

- Lage der Türe in Bezug auf Seitenrahmen einstellen und sicherstellen
⇒ Kinematik ermöglichen,
- Überprüfung der Grenzlagen
⇒ Messung durchführen.

Angelehnt an die von EHRENSPIEL vorgeschlagene Darstellungsform, vgl. [209] werden diese in Bild 62 gezeigt, vgl. [S7, Bild 4.2]. Sowohl in diesem Bild als auch in den darauf folgenden Bildern werden Ein- und Ausgangsgrößen mit dem Ziel einer schlankeren Darstellung teils nicht explizit genannt.

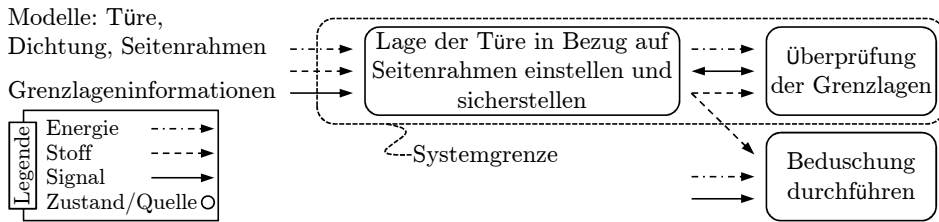


Bild 62: Hauptfunktionen des Systems Prüfstand, vgl. [S7, Bild 4.2]

Im Sinne einer Vereinfachung werden die benannten Hauptfunktionen im Folgenden als die Funktionen „Kinematik ermöglichen“ und „Messung durchführen“ bezeichnet, wobei eine weitere Unterteilung in Subfunktionen möglich ist. Durch die unabhängige Betrachtung der beiden Hauptfunktionen soll einer möglichen vorzeitigen Teillösungsfixierung aus dem Weg gegangen werden. „Bei potentiellen Zielkonflikten von Teilfunktionen wird der Lösungsraum (...) (bereits in der) frühen Phase der Produktentwicklung durch den Einsatz der Widerspruchsmatrix nach ALTSCHULLER gezielt erweitert. Basierend auf dem Ist-Zustand kann beispielsweise davon ausgegangen werden, dass sich die bewegliche Türe am Seitenrahmencubing (...) ausrichtet. Dass diese Annahme eine Lösungsfixierung impliziert, kann durch ALTSCHULLERS Prinzip der Funktionsumkehr verdeutlicht werden. Funktionsumkehr bedeutet, dass unbewegliche Teile beweglich gestaltet werden sollen, während bewegliche Teile unbeweglich ausgeführt werden sollen. Bei der Prüfstandkonzeption führt dies dazu, dass anstatt der Türe, der Seitenrahmen beweglich gestaltet (werden kann)“, vgl. [S7].

Wie bereits vorab beschrieben, ist eine weitere Unterteilung der Funktionen in Subfunktionen möglich. In Bild 63 wird dieses am Beispiel der Funktion „**Kinematik ermöglichen**“ zuerst deutlich.

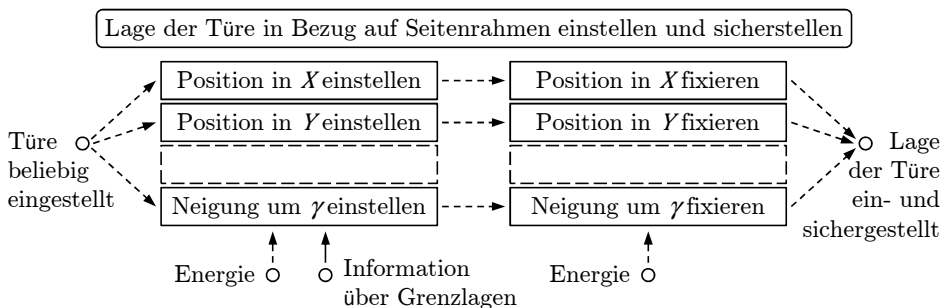


Bild 63: Funktion „Kinematik ermöglichen“, vgl. [S7, Bild 4.3]

Diese unterteilt sich für die sechs Freiheitsgrade eines Körpers im Raum (translatorisch: X, Y, Z sowie rotatorisch: α, β, γ) jeweils in die Subfunktion „Position (der Grenzlage) in ... (statisch bestimmt) einstellen“ und „Position (der Grenzlage) in ... fixieren“. Wesentlich ist hierbei zudem folgendes:

- Eine statische Über-/Unterbestimmung ist zu vermeiden.
 ⇒ Eine akkurate Grenzlageneinstellung ist ggf. nicht gewährleistet.
 ⇒ Eine Analysefähigkeit ist gegebenenfalls nicht gewährleistet.
- Eine Einschränkung der Freiheitsgrade durch eine entsprechende Kinematik impliziert keine Einschränkung der Kinematik selbst.

Bild 64 zeigt die Subfunktionen der Funktion „Messung durchführen“.

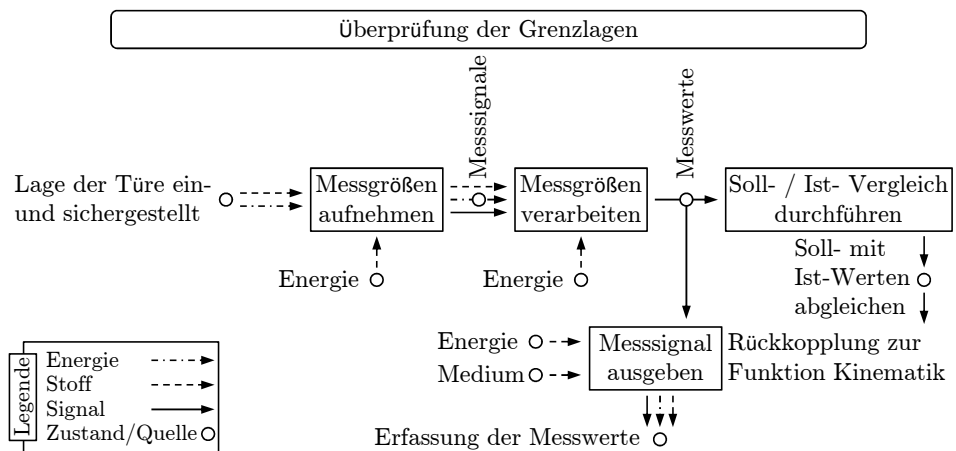


Bild 64: Funktion „Messung durchführen“, vgl. [S7, Bild 4.4]

Beginnend mit der erfolgreichen Rückmeldung der Funktion „Kinematik ermöglichen“, dass die angestrebte Grenzlagensituation zwischen Türe und Seitenrahmen eingestellt ist, erfolgt Aufnahme und Verarbeitung der Messgrößen in Abgleich mit der angestrebten Grenzlagensituation. Ist diese doch nicht korrekt eingestellt, erfolgt eine Rückkopplung an die Funktion „Kinematik ermöglichen“. Die Energie zum Aufnehmen und Verarbeiten der Messgrößen kann sowohl mechanisch aufgebracht (z. B. bei Verwendung einer Messuhr) als auch von einer externen Energiequelle zur Verfügung gestellt werden (z. B. zur Versorgung entsprechend verbauter Sensorik).

5.3.3 Suche nach Lösungsprinzipien und deren Strukturen

Beim dritten Schritt des FORFLOW-Prozessmodells stehen die prinzipiellen Lösungen im Vordergrund, vgl. [S7]. In Abhängigkeit der Fragestellung, ob für ein existierendes Problem bereits eine bekannte Lösung existiert, oder auch nicht, ist dieser Schritt „geprägt von der Recherche zu vorhandenen Lösungsmöglichkeiten und möglichen Alternativen“, vgl. [50]. Vor diesem Hintergrund erfolgt eine Aufgliederung in Lösungs- und Wirkprinzipien. Ist es das Ergebnis dieses iterativen Schrittes (ein Rücksprungpunkt ist vorhanden), dass alle Anforderungen abgedeckt sind, so werden die Teillösungsprinzipien strukturiert, woraufhin alternative Gesamtkonzepte abgeleitet werden können, siehe Bild 95.

Im weiteren Verlauf dieses Abschnittes erfolgt die thematische Aufteilung analog dem vorangegangenen Abschnitt 5.3.2 über die zwei Hauptfunktionen des Systems Prüfstand. Unabhängig von diesen zwei Hauptfunktionen sei an dieser Stelle angemerkt, dass die Zugänglichkeit zum Dichtspalt zwischen Tür und Seitenrahmen von der Fahrgastzelle aus (Fahrzeuginnenseite) bei allen Konzepten zu gewährleisten ist. Diese Anforderung entstammt der Notwendigkeit, die Dichtheit des Einstiegsbereiches beim Duschversuch bei allen eingestellten Toleranzsituationen durch eine Person innerhalb der Fahrgastzelle beurteilen und dokumentieren zu können.

Funktion „Kinematik ermöglichen“

Aus dem vorangegangenen Abschnitt 5.3.2 ist bekannt, dass eine ergebnisoffene Suche nach möglichen Lösungsprinzipien und deren Strukturen hinsichtlich der Kinematik zur Grenzlageneinstellung anzustreben ist. Durch den Einsatz der TRIZ-Prinzipien nach ALTSCHULLER, vgl. [215], kann der Lösungsraum gegebenenfalls bereits bei der Funktionsstruktur durch das Prinzip der Funktionsumkehr erweitert werden. Exemplarisch bedeutet dies für den vorliegenden Fall eine mögliche Alternative zum Ist-Stand, bei welchem die bewegliche Tür relativ zum unbeweglichen (fixierten) Seitenrahmen positioniert wird. Diese und andere Szenarien hinsichtlich der Umsetzung einer geeigneten Kinematik werden in Anlehnung an die Ausführungen von HELING in [S7] im folgenden in Kurzform vorgestellt.

Lösungsprinzip „Verbesserter Ist-Stand“

Bei diesem Lösungsprinzip erfolgt die verbesserte Grenzlageneinstellung durch eine Verschiebung der Scharnieranbindung mittels Lineareinheiten, siehe Bild 65.

- ⊕ Einstellung der translatorischen Freiheitsgrade möglich
- ⊖ Ausschließlich eingeschränkte rotatorische Einstellung um die Z-Achse durch eine Anpassung der Türschlossposition möglich

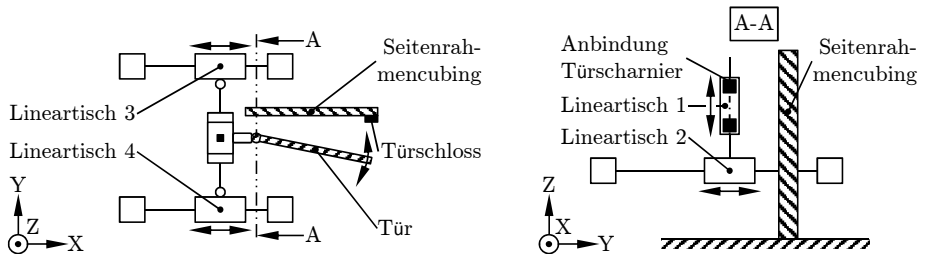


Bild 65: Funktion „Kinematik ermöglichen“: Schematische Darstellung der Lösungsprinzipien, vgl. [S7, Bild 5.2], eigene Darstellung, „Verbesserter Ist-Stand“

Lösungsprinzip „segmentierter Seitenrahmen“

Bei diesem Lösungsprinzip bleibt die Tür inkl. ihrer Kinematik erhalten. Der Seitenrahmen wird durch einen segmentierten unbeweglichen (fixierten) Cubing-Seitenrahmen substituiert (Definition „Cubing“ siehe Abschnitt 5.4). Jener erlaubt die Grenzlageneinstellung durch den Austausch einzelner Segmente, siehe Bild 66.

- ⊕ Einstellung beliebiger Grenzlagen möglich
sofern passende Segmente vorhanden
- ⊕ Abbildung tatsächlicher Formabweichungen durch Segmente
- ⊖ Zeitaufwand bei Umbau
- ⊖ Verortung der Messtechnik

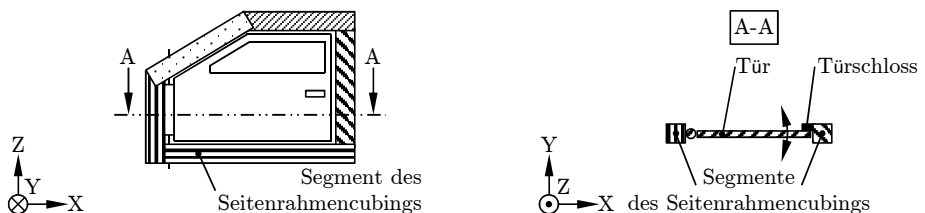


Bild 66: Funktion „Kinematik ermöglichen“: Schematische Darstellung der Lösungsprinzipien, vgl. [S7, Bild 5.3], eigene Darstellung, „segmentierter Seitenrahmen“

Lösungsprinzip „Roboter“

Bei diesem Lösungsprinzip wird die Scharnieranbindung mit einer Roboterkinematik kombiniert, siehe Bild 67. Der Seitenrahmen wird durch einen unbeweglichen (fixierten) Cubing-Seitenrahmen substituiert.

- ⊕ Einschränkung aller Freiheitsgrade des Systems durch anthropomorphe² Kinematik des Roboters möglich
- ⊕ Seitenrahmen kann großteils übernommen werden
- ⊕ Alle Freiheitsgrade können systematisch eingestellt werden
- ⊖ Steuerungsaufwand
- ⊖ Platzbedarf des Aufbaus
- ⊖ Kosten des Aufbaus

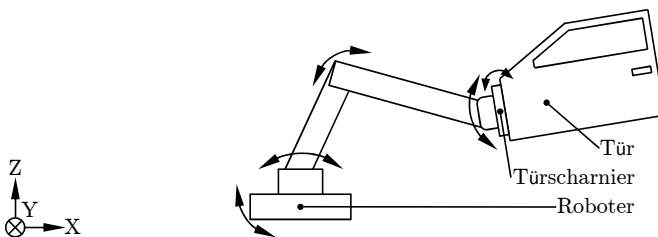


Bild 67: Funktion „Kinematik ermöglichen“: Schematische Darstellung der Lösungsprinzipien, vgl. [S7, Bild 5.4], eigene Darstellung, „Roboter“

Lösungsprinzip „Hexapod“

Bei diesem Lösungsprinzip wird der Cubing-Seitenrahmen relativ zu den starr ausgeführten Aufhängungspunkten der Tür (Scharniere und Türschloss) und damit zur Tür positioniert. Diese Positionierung des Hexapoden erfolgt unterhalb des Schwerpunktes des Seitenrahmens, siehe Bild 68. Für die Grenzlageneinstellung müssen die Hebelverhältnisse zwischen dem Hexapoden und den seitenrahmenseitigen Geometriemerkmale (an den Schließmaßen) berücksichtigt werden.

- ⊕ Positionierung des Hexapoden unterhalb des Schwerpunktes des Seitenrahmens begünstigt maximal kleinen Hexapoden
- ⊕ Alle Freiheitsgrade können systematisch eingestellt werden
- ⊕ Tür wird unabhängig vom Hexapoden durch dessen Aufhängungspunkte ausgerichtet
- ⊕ Türschließkinematik bleibt erhalten da von der Kinematik des Hexapoden entkoppelt

² „Ein Bewegungsapparat heißt anthropomorphe Kinematik, falls er allgemein ‚dem Menschen nachempfunden‘ ist [254][117]. Während serielle Kinematiken als offene kinematische Ketten modelliert sind, ist es ein charakteristisches Merkmal anthropomorpher Kinematiken, dass sie den menschlichen Bewegungsapparat ganz oder in Teilen auf eine kinematische Baumstruktur abbilden [163]“, vgl. [216, S. 5].

- ⊕ Hebelverhältnisse zwischen Hexapoden und zu betrachtenden seitenrahmenseitigen Geometriemerkmale (an Schließmaßen) können sich positiv auf Grenzlageneinstellung auswirken
- ⊖ Hebelverhältnisse als Beitragsleister zur Grenzlageneinstellung bringen gegebenenfalls erhöhte Anforderungen an die Präzision und Wiederholgenauigkeit der Einstellung des Hexapoden mit sich
- ⊖ Kosten des Aufbaus

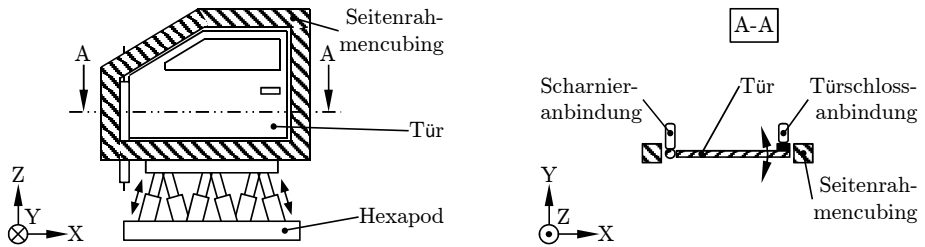


Bild 68: Funktion „Kinematik ermöglichen“: Schematische Darstellung der Lösungsprinzipien, vgl. [S7, Bild 5.5], eigene Darstellung, „Hexapod“

Lösungsprinzip „Lineartisch“

Bei diesem Lösungsprinzip handelt es sich um das Ergebnis einer Konstruktion mit Konstruktionskatalogen nach ROTH, vgl. [217]. Die Einschränkung der Freiheitsgrade wird hierbei auf zwei unabhängige Kinematiken aufgeteilt. Eine der beiden Kinematiken bewegt den Seitenrahmen, während die andere Kinematik (um 90° gedreht) die Türanbindung positioniert, siehe Bild 69.

- ⊕ lineare Kinematiken ermöglichen in Kombination sowohl translatorische als auch rotatorische Einstellungen

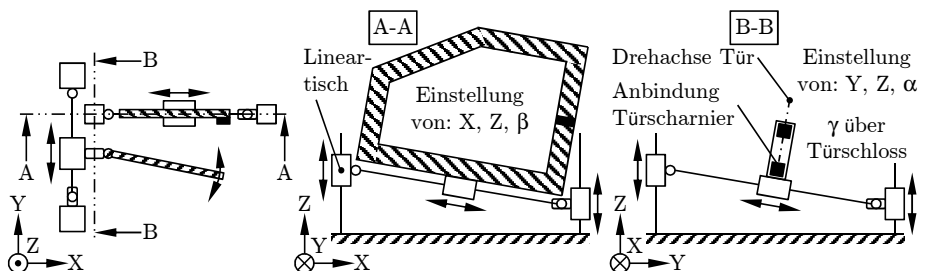


Bild 69: Funktion „Kinematik ermöglichen“: Schematische Darstellung der Lösungsprinzipien, vgl. [S7, Bild 5.6], eigene Darstellung, „Lineartisch“

Funktion „Messung durchführen“

Bereits in Abschnitt 4.5.3 wurde beschrieben, dass es die Anforderung des automobilen Toleranzmanagements ist, Toleranzfelder im Zehntelmillimeterbereich zu prognostizieren. Im Verlauf von Abschnitt 5.5 wird sich daraus folgend die Zielvorgabe ableiten, eine Wiederholgenauigkeit bei der Grenzlageneinstellung im Hundertstelmmillimeterbereich durch ein geeignetes Vorgehen zu realisieren. Für Messungen mit dieser Genauigkeit stehen grundlegend bereits vielfältige, auf unterschiedlichen physikalischen Wirkprinzipien basierende, Systemlösungen zur Verfügung. Diese müssen die in Tabelle 29 aufgezeigten Auswahlkriterien an das Messsystem erfüllen.

Tabelle 29: Auswahlkriterien ans Messsystem, vgl. [S7, Tabelle 5.1]

Anf. Bezeichnung	konkr. Vorgabe
MaF Fehlergrenze	$G \leq 0,01mm$
MiF Messbereich (aufgrund Bauraumsituation und der zu erwartenden Dimension der Grenzlagenausprägungen)	$M \geq 25mm$
MaF Ziffernschritt看rt	$Z \leq 0,001mm$
MiF Schutzart nach DIN EN 60529 zur Sicherheit und Verträglichkeit bei bzw. mit starkem Strahlwasser (Kontakt mit Wasser bei Duschversuch möglich)	IP66

5.3.4 Gesamtkonzept entwickeln

Auf Grundlage der in Abschnitt 5.3.3 aufgezeigten prinzipiellen Lösungen zum Prüfstandsaufbau erfolgt in diesem Abschnitt die Auswahl von Gesamtkonzeptalternativen. Die korrespondierende virtuelle konstruktive Umsetzung, welche die Grundlage für die Konzeptbewertungen sein soll, geschieht über CAD-Modelle in CATIA V5. „Bei den unterschiedlichen Kinematiken handelt es sich entweder um rein mechanischen Lösungen oder (...) um Systemlösungen, die keiner detaillierten Betrachtung bedürfen“, vgl. [S7]. Bevor auf die Gesamtkonzeptalternativen näher eingegangen wird, beschreibt die folgende Auflistung Randbedingungen hinsichtlich der Realisierung der taktilen Messsysteme.

Randbedingungen hinsichtlich d. Realisierung taktiler Messsysteme

- **Allgemeine Verortung der Sensoren**

Die Sensoren sind im Seitenrahmen zu verorten, um diese einerseits beim Öffnen und Schließen der Tür keinen unnötigen Beschleunigungskräften auszusetzen. Andererseits wird durch dieses Vorgehen ein Wechsel zwischen verschiedenen Cubing- und Real-Türen problemlos ermöglicht. Damit einhergehend wird auf diesem Wege die Gefahr einer Beschädigung der Sensoren minimiert.

- **Bauraumverortung der Sensoren**

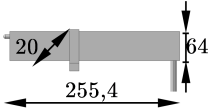
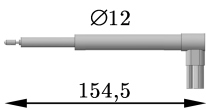
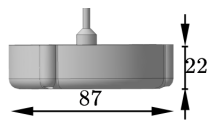
Der Spagat zwischen der Absicherung eines detaillierten (zumeist zeitaufwendig) oder abstrakten (möglicherweise zu ungenauen) Prüfstandkonzeptes wirft vorab die Frage auf, welches Sensormodell bzw. taktils Messsystem für eben diese Absicherung verwendet werden soll. Basierend auf den definierten Anforderung an die Hauptfunktion „Messung durchführen“ werden drei Sensormodelle bzw. taktile Messsysteme ausgewählt und entsprechende Informationen und Angebote eingeholt, siehe Tabelle 30. Aufgrund der zu diesem Zeitpunkt noch nicht feststehenden Anzahl benötigter Sensoren, sind verschiedene Mengenangaben aufgelistet. Die aufgezeigten Preise berücksichtigen neben den eigentlichen Sensoren auch entsprechende Zusatzgerätschaften zur Betriebsdurchführung.

Die Kombination aus den fünf Lösungsprinzipien (Konzeptalternativen Prüfstand) und drei potentiellen Messsystemen liefert, unter der vorab genannten Randbedingung einer seitenrahmenseitigen Verortung der Sensoren, in Summe 15 potentiell zu untersuchende Varianten. Da Bauraumuntersuchungen für jede diese Varianten zeitaufwendig und nicht zwingend sinnvoll sind, erfolgt lediglich eine entsprechende Bauraumuntersuchung kritischer Bereiche. Da die taktilen Sensoren der Firma Mitutoyo den größten Bauraumbedarf haben, werden diese im Sinne eines *Worst Case*-Szenarios für die entsprechenden Untersuchungen verwendet.

- **Sensorfixierung über Zusatzkonstruktion**

Der Einsatz einer sensorfixierenden Zusatzkonstruktion wird als nicht zielführend erachtet, da es das Ziel ist, umlaufend senkrecht auf dem Türflansch zu messen. In der Folge werden die Sensoren in den Seitenrahmen integriert, um sowohl die Dichtheit des Systems, als auch die Ausrichtung der Sensoren (wenn möglich senkrecht zum jeweilig gegenüberliegenden Türflansch) zu gewährleisten.

Tabelle 30: Gegenüberstellung taktiler Messsysteme, vgl. [S7, Tabelle 6.1], eigene Darstellung

Hersteller	Mitutoyo	WayCon	WayCon
Bezeichnung Sensor	LGF-150L-B	DK830SVRB10	T40-DSC-KA-V3
Messprinzip	taktil, photoelektrische Abtastung	taktil, magnetische Abtastung	nicht-taktil Wirbelstromsensor
Bauraum			
Preis einzelner Sensor	1.028,16€	1.002,38€	638,40€
Preis Messsystem			
10 Sensoren	16.821,66€	14.364,62€	15.789,66€
16 Sensoren	21.558,29€	20.455,23€	17.950,00€
22 Sensoren	29.224,73€	28.301,63€	24.622,00€
Fehlergrenze	2,5μm	1,7μm	10μm
Messbereich	50mm	30mm	40mm
Auflösung	1μm	1μm	1μm
Schutzart	IP66	IP67	IP68
Schnittstelle	USB	Ethernet	Ethernet

Der vierte Schritt des FORFLOW-Prozessmodells beginnt unter der Voraussetzung, dass alternative Gesamtkonzepte (mindestens jedoch eines) vorhanden sind. Durch die Überführung in modulare Strukturen können diese folgend auf Subsystemebene detailliert betrachtet werden (Schnittstellen, Verantwortlichkeiten von Teillösungsprinzipien), um deren prinzipielle Umsetzbarkeit zu überprüfen. Wesentliche Inhalte befassen sich hierbei u. a. mit der überschlägigen Dimensionierung, der zugehörigen Aufteilung des Bauraums, der Vorauswahl von Fertigungsverfahren, der geometrischen Anordnung sowie der Vorauswahl von Materialien. Die sich aus den Teilschritten ergebenden Gesamtkonzepte werden anschließend einer Eigenschaftsanalyse unterzogen, was wiederum in einer Konzeptbewertung resultiert. Bei positivem Ergebnis schließt sich die Dokumentation verwendeter Lösungsprinzipien und genutzter Produktschnittstellen an, siehe Bilder 96 und 97.

Gemeinsamkeiten der Gesamtkonzepte

Die Gesamtkonzepte besitzen Gemeinsamkeiten, welche über nachfolgende Auflistung einmalig benannt werden, siehe Bild 70.

- Die Darstellung der Anbindung an ein Grundgestell, welches die Kinematik aufnehmen soll, entfällt zugunsten der Übersichtlichkeit und da keine kritische Bauraumsituation vorliegt.
- Die Darstellung der Bauteile, die beim Duschversuch vor Wasser schützen, entfällt.
- Strangpressprofile um den Seitenrahmen dienen der Befestigung der Sensoren und der Versteifung.
- Die Darstellung der Tür geschieht exklusive der Türaußenhaut.
- Die Messungen mit den taktilen Messsystemen finden an fünf Messschnitten in je zwei Raumrichtungen statt. Bauraumbedingt können diese zumeist nicht direkt „nebeneinander“ messen.
- Die Verortung der Sensoren erfolgt in der Nähe der Türhauptdichtung, da diese die primäre Dichtebene ist.
- Die Masse der Cubingtür wird mit $m_{\text{Tür,Cubing}} = 30\text{kg}$ angenommen.

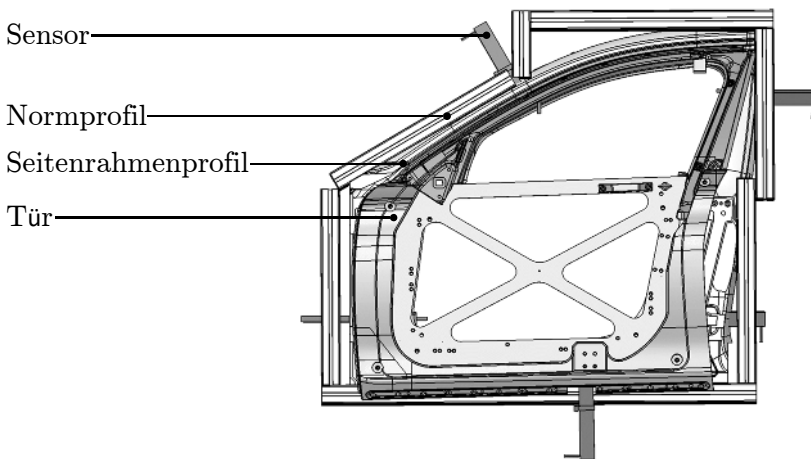


Bild 70: Gemeinsame Umfänge der Gesamtkonzepte, vgl. [S7, Bild 6.2], eigene Darstellung

Gesamtkonzept „Verbesserter Ist-Stand“

Bei diesem Gesamtkonzept, siehe Bild 71, wird die Kinematik über Lineartische realisiert, welche über quaderförmige Bauraummodelle abgebildet werden. Die Türscharniere verbinden die Cubingtür mit der Kinematik. Eine überschlägige Berechnung zur Vorauswahl der Lineartische kann [S7, Anhang B] entnommen werden und führt zu dem Ergebnis, den Präzisionslineartisch LTP(G)₁₅₋₁₈₅ von Schaeffler, vgl. [218], zu verwenden.

⊕ Keine Bauraumkollisionen ersichtlich: keine kritischen Bereiche.

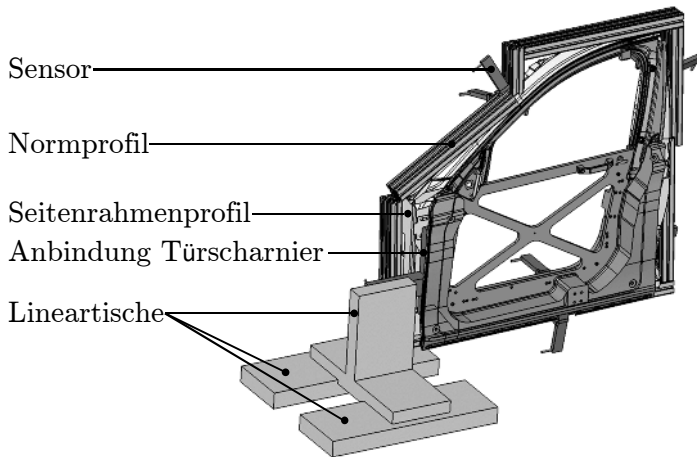


Bild 71: Gesamtkonzept „Verbesserter Ist-Stand“, vgl. [S7, Bild 6.3], eigene Darstellung

Gesamtkonzept „Segmentierter Seitenrahmen“

Bei diesem Gesamtkonzept, siehe Bild 72, erfolgt die Grenzlageneinstellung über eine Geometrie Anpassung des Seitenrahmenausschnittes. Die fünf Segmente können hierzu ausgetauscht und mit den Sensoren ausgestattet werden. Die Seitenrahmensegmente werden an den Strangpressprofilen fixiert und ausgerichtet.

⊕ Die Türkinematik bleibt erhalten.

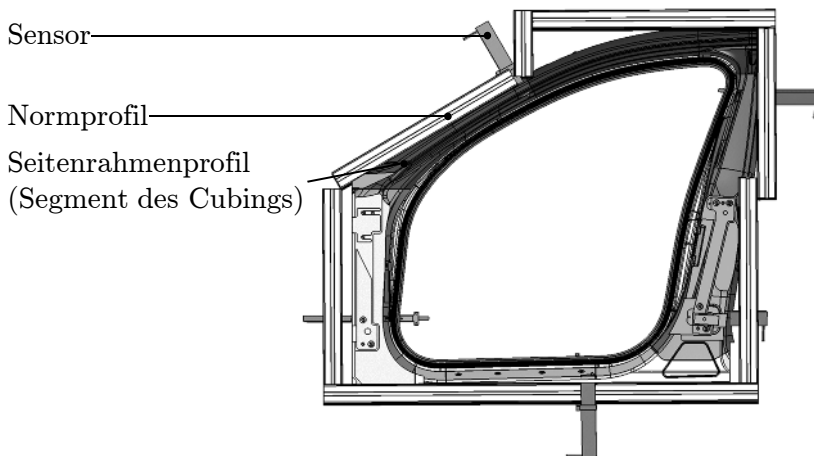


Bild 72: Gesamtkonzept „Segmentierter Seitenrahmen“, vgl. [S7, Bild 6.4], eigene Darstellung

Gesamtkonzept „Roboter“

Bei diesem Gesamtkonzept, siehe Bild 73, positioniert ein an das Türscharnier angebundener Industrieroboter die Tür relativ zum Seitenrahmen. Bei der Dimensionierung des Roboters sind die Momente um das Türscharnier als Folge des Türgewichtes zu berücksichtigen. Eine überschlägige Betrachtung führt zu dem Ergebnis, den Industrieroboter KR-30-3 von KUKA, vgl. [219], zu verwenden.

- ⊕ Die Regelungssoftware ist Teil des Lieferumfangs des Industrieroboters.
- ⊕ Der Roboter kann alternativ auch direkt mit Tür verbunden werden. Das Türscharnier würde dann entfallen. Das abweichungsbehaftete Verhalten der Türkinematik könnte dann im Experiment mit berücksichtigt werden.

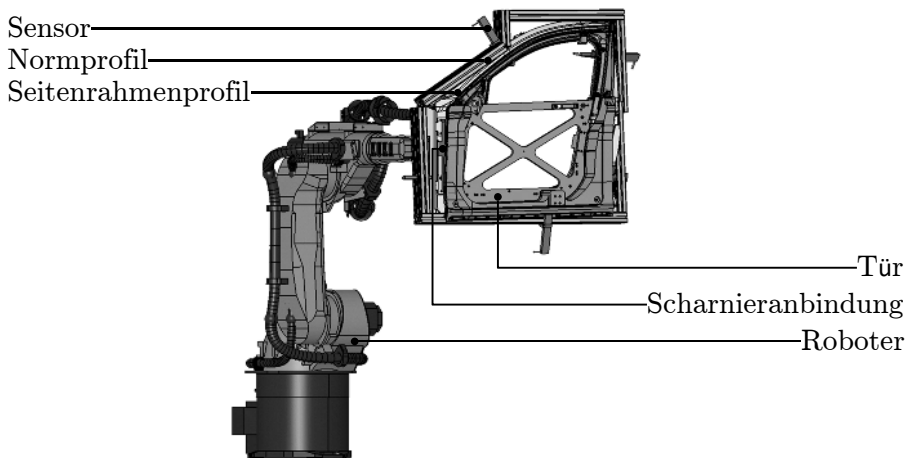


Bild 73: Gesamtkonzept „Roboter“, vgl. [S7, Bild 6.5], eigene Darstellung

Gesamtkonzept „Hexapod“

Bei diesem Gesamtkonzept, siehe Bild 74, wird der Cubing-Seitenrahmen relativ zur unbeweglichen Tür über einen Hexapoden positioniert. Die Verortung des Hexapoden (in Bild 74 über Hüllgeometrie dargestellt) erfolgt unterhalb des Schwerpunktes des Seitenrahmens. Eine detaillierte Betrachtung führt zu dem Ergebnis, den Hexapoden H-845 von PI (Physik Instrumente), vgl. [220], zu verwenden.

- ⊕ Die Regelungssoftware ist Teil des Lieferumfangs des Hexapoden.
- ⊕ Das mitgelieferte Software-Paket erlaubt eine virtuelle Vorab-Absicherung mit einem digitalen Modell des Hexapoden. Dies minimiert die Gefahr von Kollisionen zwischen Bauteilen im Experiment.

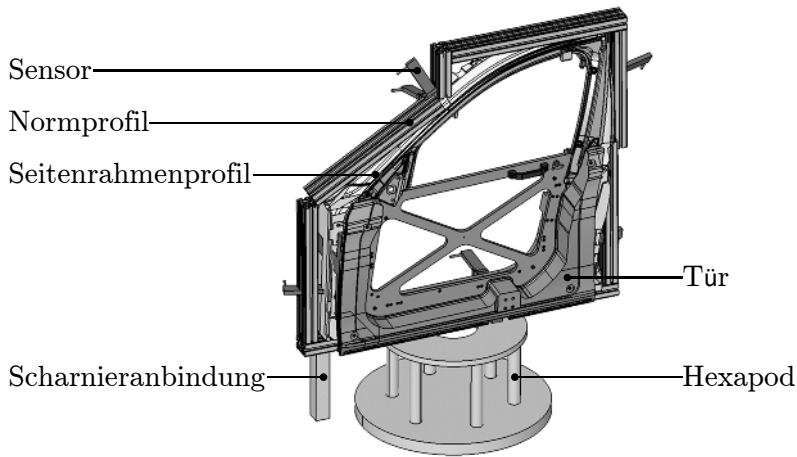


Bild 74: Gesamtkonzept „Hexapod“, vgl. [S7, Bild 6.6], eigene Darstellung

Gesamtkonzept „Lineartisch“

Bei diesem Gesamtkonzept, siehe Bild 75, erfolgt die Grenzlageneinstellung über zwei Lineartische. Der eine Lineartisch positioniert den Seitenrahmen, der andere die Tür. Eine überschlägige Berechnung zur Vorauswahl der Lineartische kann [S7, Anhang B] entnommen werden und führt zu dem Ergebnis, die Präzisionslineartische LTP(G)25-325 (Positionierung des Seitenrahmens) und LTP(G)15-185 (Positionierung der Tür) von Schaeffler, vgl. [218], zu verwenden.

⊕ Keine Bauraumkollisionen ersichtlicht: keine kritischen Bereiche.

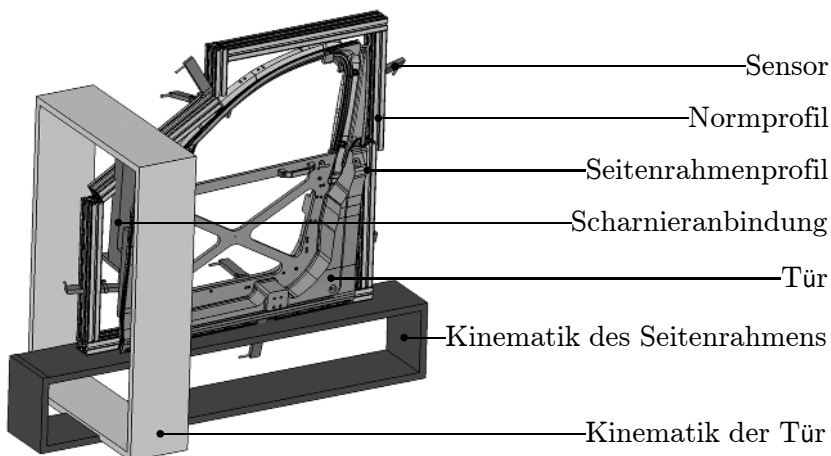


Bild 75: Gesamtkonzept „Lineartisch“, vgl. [S7, Bild 6.7], eigene Darstellung

Auswahl des taktilen Messsystems

Als Ergebnis der untersuchten Gesamtkonzepte und der zur Verfügung stehenden taktilen Messsysteme fällt die Entscheidung hinsichtlich der Wahl eines taktilen Messtasters zugunsten des Modells DK830SVRB10 von WayCon aus. Diese Entscheidung wird maßgeblich durch das Kriterium „Bauraumbedarf“ mitgetragen. Der taktile Messtaster DK830SVRB10 von WayCon „bietet aufgrund seines rotationssymmetrischen Aufbaus und seines (verhältnismäßig) geringen Außendurchmessers Vorteile und wird deshalb ausgewählt“, vgl. [S7].

Technisch-wirtschaftliche Bewertung der Gesamtkonzepte

In der Einleitung zu Abschnitt 5.3.4 wurde bereits darauf verwiesen, dass es ein Teil des Umfanges dieses Abschnittes ist, Konzeptbewertungen durchzuführen. Die fünf vorgestellten Prüfstands-Gesamtkonzepte werden aus diesem Grund im Folgenden einer technisch-wirtschaftlichen Bewertung unterzogen. Jene Bewertung wird im Rahmen einer Gruppen-Mitarbeiterbefragung von ausgewiesenen Fachspezialisten auf diesem Gebiet durchgeführt. Auf diesem Wege können subjektive Einflüsse eines einzelnen Bewerter minimiert und Schwachstellen der einzelnen Gesamtkonzepte besser detektiert werden.

• Auswahl und Gewichtung der Bewertungskriterien

Auf Grundlage der Anforderungsliste aus Tabelle 28 leiten sich technische und wirtschaftliche Kriterien ab. Diese werden auf Basis der zwei Präferenzmatrizen (Tabellen 31 und 32) gewichtet, vgl. [134]. Eine detaillierte Betrachtung von Teilaspekten ist explizit nicht das Ziel, da dies die Gefahr einer unausgewogenen Gewichtung in sich birgt. Vielmehr geht es hier um die übergeordneten Anforderungen bzw. Auswahlkriterien an den Prüfstand.

Technische Kriterien

• Spritzwasserschutz	• Bauraum Messtechnik
• Einstellung aller FHG's	• Raumbedarf Prüfstand
• Genauigkeit	

Wirtschaftliche Kriterien

• Kosten Invest	• Einsatz Fachpersonal
• Weitere Nutzung	• Zeitaufwand
• Laufende Kosten	

Die Tabellen 31 und 32 zeigen die Gegenüberstellung dieser technischen und wirtschaftlichen Kriterien in Form von Präferenzmatrizen, welche zudem die erarbeiteten Gewichtungen zeigen. Beide Matrizen haben gemein, dass jeweils ein Kriterium mit „Null“ bewertet wurde. Diese werden aufgrund dieser „Null-Relevanz“ im Folgenden nicht weiter betrachtet.

Tabelle 31: Präferenzmatrix technische Systeme, vgl. [S7, Tabelle 6.2], eigene Darstellung

	Spritzwasserschutz	Einstellung aller FHG's	Genauigkeit	Bauraum Messtechnik	Raumbedarf Prüfstand	Anzahl der „ $\oplus$ “	Gewichtung in %
Spritzwasserschutz		$\ominus$	$\ominus$	$\ominus$	$\oplus$	1	10
Einstellung aller FHG's	$\oplus$		$\ominus$	$\oplus$	$\oplus$	3	30
Genauigkeit	$\oplus$	$\oplus$		$\oplus$	$\oplus$	4	40
Bauraum Messtechnik	$\oplus$	$\ominus$	$\ominus$		$\oplus$	2	20
Raumbedarf Prüfstand	$\ominus$	$\ominus$	$\ominus$	$\ominus$		0	0
Anzahl der „ $\ominus$ “	1	3	4	2	0		

Tabelle 32: Präferenzmatrix wirtschaftliche Kriterien, vgl. [S7, Tabelle 6.3], eigene Darstellung

	Kosten Invest	Weitere Nutzung	Laufende Kosten	Einsatz Fachpersonal	Zeitaufwand	Anzahl der „ $\oplus$ “	Gewichtung in %
Kosten Invest		$\oplus$	$\oplus$	$\oplus$	$\ominus$	3	30
Weitere Nutzung	$\ominus$		$\ominus$	$\oplus$	$\ominus$	1	10
Laufende Kosten	$\ominus$	$\oplus$		$\oplus$	$\ominus$	2	20
Einsatz Fachpersonal	$\ominus$	$\ominus$	$\ominus$		$\ominus$	0	0
Zeitaufwand	$\oplus$	$\oplus$	$\oplus$	$\oplus$		4	40
Anzahl der „ $\ominus$ “	3	1	2	0	4		

• Technisch-wirtschaftliche Bewertung

In Anhang E sind in den Tabellen 67 und 68 sowohl die technische als auch die wirtschaftliche Bewertung abgebildet und kommentiert. Bild 76 visualisiert diese Ergebnisse. Das Ziel verfolgend, sowohl die technische als auch die wirtschaftliche Wertigkeit zu maximieren, zeigt dieses Bild zwei Kompromisslösungen („Verbess. Ist-Stand“ und „Hexapod“) bzgl. der zur Verfügung stehenden Gesamtkonzepte.

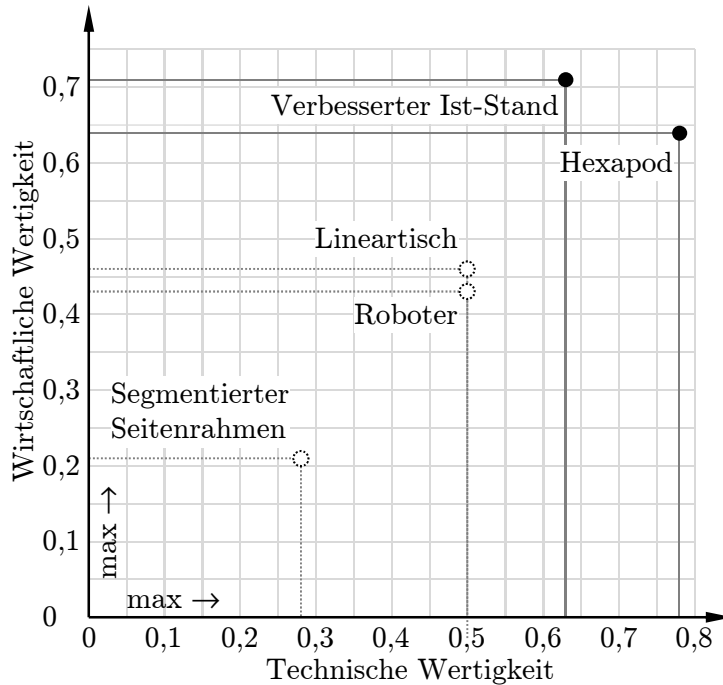


Bild 76: Gegenüberstellung der Gesamtkonzepte auf Basis der ermittelten technischen und wirtschaftlichen Wertigkeiten

Die Auswahl bzgl. der besten Kompromisslösung wird durch Anwendung des Hyperbelverfahrens getroffen, vgl. [208]. Tabelle 33 fasst die Berechnungsergebnisse hinsichtlich der Gesamtwertigkeiten der Gesamtkonzepte nach dem Hyperbelverfahren zusammen.

Im Ergebnis zeigen sich beim Gesamtkonzept „Hexapod“ die höchsten Gesamtwertigkeiten. Aus diesem Grund wird dieses Konzept ausgewählt und umgesetzt.

Tabelle 33: Gesamtwertigkeit der Gesamtkonzepte nach Hyperbelverfahren, vgl. [S7, Tabelle 6.6], eigene Darstellung

Variante	Technische Wertigkeit	Wirtschaftliche Wertigkeit	Gesamtwertigkeit nach Hyperbelverfahren S_H
Verbesserter Ist-Stand	0,63	0,71	0,67
Segmentierter Seitenrahmen	0,28	0,21	0,24
Roboter	0,50	0,43	0,46
Hexapod	0,78	0,64	0,71
Lineartisch	0,50	0,46	0,48

5.4 Umsetzung des Prüfstandkonzeptes

Als Folge der Ausarbeitung und einer technisch-wirtschaftlichen Bewertung von fünf verschiedenen Prüfstandkonzepten, siehe [S7], Abschnitt 6.8, ergibt sich der in Bild 77 dargestellte Prüfstandsaufbau, auf welchem alle Fahrzeugkomponenten im Maßstab 1 : 1 montiert sind. Eine Patentanmeldung beim DEUTSCHEN PATENT- UND MARKENAMT bzgl. des Anspruches auf ein mehrachsiges Positionierverfahren ist am 28.08.2014 erfolgt (amtliches Aktenzeichen: 102014217136.9).

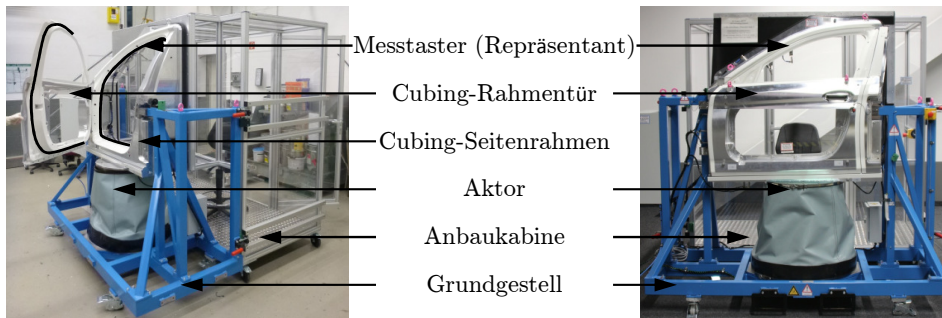


Bild 77: Aufbau des Prüfstands

Die in diesem Bild mit den Worten „Cubing“ beschrifteten Komponenten sind aus Aluminium mit einer maximalen Fertigungstoleranz von $\pm 0,2\text{mm}$ gefräst. Entsprechende Messprotokolle bestätigen dies.

Bei diesem Prüfstandsaufbau wird der Seitenrahmen eines Fahrzeuges um die im Raum fest verankerte Tür bewegt. Diese Bewegung soll durch einen Aktor realisiert werden, welcher unterhalb des Schwerpunktes des Seitenrahmenausschnittes mit diesem Seitenrahmenausschnitt verbunden ist. Die Tür ist an den drei Anbindungspunkten (2x Scharnier, 1x Türschloss) aufgehängt. Diese Anbindungspunkte werden originalgetreu abgebildet und durch Durchbrüche im Seitenrahmen mit der äußeren Struktur verbunden. Einerseits bleibt somit die Kinematik erhalten (die Tür kann geöffnet und geschlossen werden). Andererseits können verschiedene Türen des selben Fahrzeugmodells verbaut werden. Die mit diesem Aufbau möglichen Relativbewegungen zwischen Tür und Seitenrahmen sollen es ermöglichen, die aus entsprechenden Simulationen ermittelten Grenzlagen am Einstieg nachzustellen. Seitenrahmenseitig verbaute taktile Messtaster dienen hierbei der Kontrolle der eingestellten relativen Lage des Seitenrahmens zur Tür an den betrachteten Schließmaßen, siehe Bild 78.

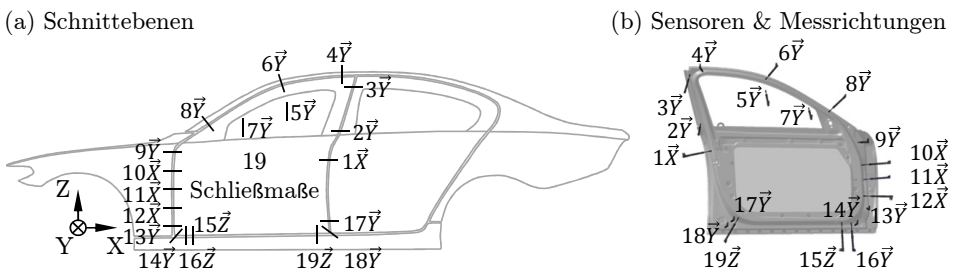


Bild 78: Verortung der betrachteten Schließmaße: (a) Schnittebenen & (b) Sensoren und Messrichtungen

An den Prüfstand ist eine Anbaukabine montiert, welche es einem Menschen erlaubt, sich während der entsprechenden Grenzlagenuntersuchungen im Duschversuch in dieser, vor eindringendem Niederschlag geschützt, aufzuhalten. Diese Anbaukabine garantiert einen bestmöglich optischen Zugang auf die funktional relevanten Übergangsbereiche zwischen Seitenrahmen und Tür zum Zwecke der Beurteilung der Dichtheit. Weiterführende Informationen zum Prüfstand können den Arbeiten von ROHLING, vgl. [S2], und EXNER, vgl. [S3], entnommen werden.

5.5 Wiederholgenauigkeits-/Reproduzierbarkeits-Studien im Rahmen der Inbetriebnahme

Bevor Untersuchungen am Prüfstand vorgenommen werden können, gilt es diesen zu qualifizieren. Bei dieser Qualifizierung soll gezeigt werden, dass eine wiederholgenaue und reproduzierbare Einstellung der zu prüfenden Toleranzlagen (im Wesentlichen Grenzlagen) zwischen Seitenrahmen und Türe möglich ist, mit dem Ziel, eine statistisch abgesicherte Aussage der sicherzustellenden Funktion Dichtigkeit zu ermöglichen.

In einem ersten Schritt wird für die Wiederholgenauigkeit eine Annahme getroffen, welche im Rahmen der sogenannten Nullhypothese H_0 auf deren Gültigkeit geprüft werden soll. Diese Annahme ergibt sich in diesem Fall aus der Anforderung des automobilen Toleranzmanagements, Toleranzvorgaben im Zehntelmillimeterbereich in Realität zu realisieren. In Kombination mit der „Goldenen Regel der Messtechnik“, welche besagt, dass die Unsicherheit der verwendeten Messtechnik ein Zehntel der gewählten Toleranz nicht überschreiten sollte (vgl. [221], „*gage maker's rule*“), ergibt sich daher die Zielvorgabe, eine Wiederholgenauigkeit bei der Durchführung im Hundertstelmillimeterbereich durch ein geeignetes Vorgehen zu realisieren. Demnach soll der Schätzwert der Standardabweichung ein Verhalten wie folgt zeigen:

$$s \leq 1/100\text{mm} . \quad (68)$$

Beim Aufstellen der Nullhypothese H_0 ist darauf zu achten, dass diese unter der Annahme formuliert wird, sie als Folge des Ergebnisses der entsprechenden Untersuchung zu widerlegen. Dieses Vorgehen entstand vor dem Hintergrund, dass es prinzipiell leichter ist, eine Annahme zu widerlegen, als diese zu beweisen, vgl. [110, S. 57]. Durch dieses Vorgehen muss allerdings auch das Verständnis für den Sachverhalt geschärft werden, dass eine nicht gelungene Widerlegung der Nullhypothese im Umkehrschluss nicht per se bedeutet, dass diese wahr ist und damit die sogenannte Alternativhypothese H_a als nicht erwiesen gilt. Für den vorliegenden Anwendungsfall wird die Nullhypothese wie in Gleichung (69) beschrieben formuliert.

$$H_0 : s > 1/100\text{mm} \quad (69)$$

Die nachfolgenden Abschnitte thematisieren die angesprochene Qualifizierung. Zunächst wird auf Randbedingungen bei der Versuchsdurchführung eingegangen. Anschließend werden Studien zur Qualifizierung des Prüfstandes hinsichtlich der Widerlegung der in Gleichung (68) beschriebenen Nullhypothese H_0 vorgestellt. Eine abschließende Aussage bezüglich der Erkenntnisse aus den Studien schließt diesen Abschnitt ab.

5.5.1 Randbedingungen

(Mess-)Technik

Die Wiederholgenauigkeitsuntersuchungen im Rahmen der Inbetriebnahme sollen Aufschluss darüber geben, mit welcher Genauigkeit der Seitenrahmen durch die Bewegungen des Hexapoden gegenüber der fixierten Tür positioniert werden kann. Um hierbei sicherzustellen, dass möglichst wenige Beitragsleister Einfluss auf das Ergebnis dieser Untersuchungen nehmen, wird einerseits das Mehrebenen-Dichtsystem, bestehend aus Kantenschutz (KS), Türhauptdichtung (THD), Fugendichtungen (FD), nicht verbaut sowie andererseits die Anbaukabine abgekoppelt (keine Kraftübertragung zwischen Anbaukabine und Seitenrahmen durch dazwischen befindliches Dichtsystem). Die Messungen selbst erfolgen durch die seitenrahmenseitig verbauten taktilen Messtaster, siehe Bild 78, welche eine Messungenauigkeit im Bereich von $U_{\text{Messtaster}} \approx 2\mu\text{m}$ aufweisen und damit hinreichend genau sind – Ergebnisse von Voruntersuchungen bestätigen hierbei die offiziellen Herstellerangaben, vgl. [222]. Die nachfolgende Auflistung fasst die wesentlichen Punkte zu den (mess-)technischen Randbedingungen noch einmal zusammen:

- Aluminiumfrästeile (Cubing-Umfänge): Seitenrahmen, Rahmentür,
- Aktuator: Hexapod H-845 (PHYSIK INSTRUMENTE (PI) GMBH & CO. KG),
- Messtechnik: 19 taktile Messtaster DKSVRB10 (MAGNESCALE CO., LTD.),
- Dichtsystem zwischen Seitenrahmen und Tür (KS, THD, FD): nicht verbaut,
- Anbaukabine: abgekoppelt.

Positionen der Wiederholgenauigkeitsmessungen

Basierend auf der konstruktiven Umsetzung des Prüfstandkonzeptes ist bekannt, dass die engste Stelle zwischen Seitenrahmen und Tür auf Höhe des Seitenrahmendurchbruchs für das Türschloss in Y -Richtung nominal drei Millimeter breit ist. Aufgrund dieser Tatsache wird zur Kollisionsvermeidung bei den Inbetriebnahmeversuchen ein rechteckiger Würfel virtuell um die Nullposition mit einer Kantenlänge von 4mm entlang der Hauptachsen des Koordinatensystems aufgespannt. Im Zentrum dieses Würfels ist der Nullpunkt (0, 0, 0), welcher zugleich der Referenzpunkt für die Kalibrierung des Hexapoden ist. Die Eckpunkte dieses Würfels markieren diejenigen acht Punkte, welche durch den Hexapoden angefahren werden sollen und an welchen folglich auch die Messungen stattfinden, siehe Bild 79.

Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass sich das Koordinatensystems des verbauten Hexapoden (Hauptachsen X_H, Y_H, Z_H) durch eine 90° -Drehung um die Z -Achse vom Fahrzeugkoordinatensystem unterscheidet (Hauptachsen $X, Y, Z = Z_H$), siehe Bild 79.

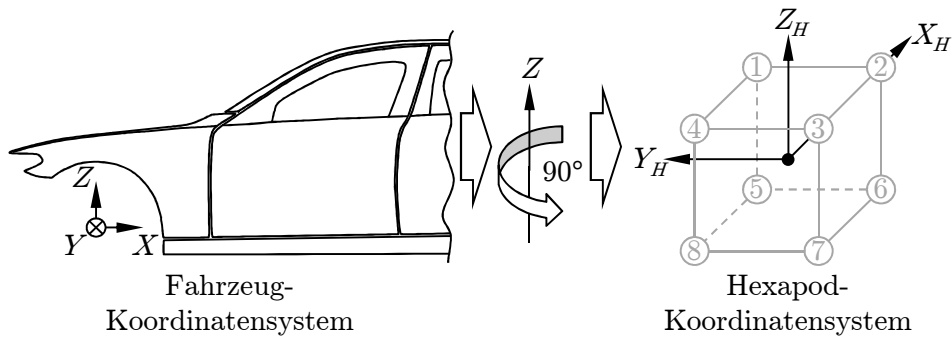


Bild 79: Koordinatensysteme und Messpositionen

Dementsprechend ergeben sich die in Tabelle 34 dargestellten Koordinaten der Positionen 1 bis 8 aus Bild 79 für die Wiederholgenauigkeitsuntersuchungen.

Tabelle 34: Messpositionen für Wiederholgenauigkeitsuntersuchungen im Rahmen der Inbetriebnahme

Position	Koordinate		
	X_H	Y_H	Z_H
1	+2mm	+2mm	+2mm
2	+2mm	-2mm	+2mm
3	-2mm	-2mm	+2mm
4	-2mm	+2mm	+2mm
5	+2mm	+2mm	-2mm
6	+2mm	-2mm	-2mm
7	-2mm	-2mm	-2mm
8	-2mm	+2mm	-2mm

Ermittlung des Mindeststichprobenumfangs n (Ergänzung zu Abschnitt 2.2.2)

Als Folge der Zielvorgabe aus Gleichung (68) soll die Messungenauigkeitsvariable d (Abweichung des Schätzwertes $\bar{x}$ von μ) nicht größer sein als $d_{\text{Ziel}} \leq 1/100\text{mm}$. Die Messtaster, mit welchen die Messungen erfolgen, weisen laut [222] eine Messungenauigkeit von $U_{\text{Messtaster}} = 0.0017\text{mm}$ auf. Aufgrund dieser messtechnischen Übererfüllung des vorgegebenen Zielwertes von $1/100\text{mm}$ wird festgelegt, einen Messungenauigkeitsfaktor $U_F = 5.5$ einzuführen. Durch die Festlegung ergibt sich für die Messungenauigkeitsvariable d

$$d = U \cdot U_F = 0.00935\text{mm} \leq 1/100\text{mm} . \quad (70)$$

Für den Mindeststichprobenumfang n aus Gleichung (23) folgt somit

$$\begin{aligned}
 n &= \frac{[t_{f,0.975} + t_{f,0.85}]^2 \cdot \sum_i (x_i - \bar{x})^2 / f}{d^2} \\
 &\quad \vdots \text{ mit Gleichung (70)} \\
 n &= \frac{[t_{f,0.975} + t_{f,0.85}]^2 \cdot \sum_i (x_i - \bar{x})^2 / f}{(0.00935mm)^2} .
 \end{aligned} \tag{71}$$

Die sich damit ergebenden konkreten fallstudienabhängigen Ergebnisse für den Mindeststichprobenumfang n aus Gleichung (71) werden in Abschnitt 5.5.2 dargestellt.

5.5.2 Studien zur Qualifizierung des Prüfstands hinsichtlich der Wiederholgenauigkeit

Die in den nachfolgenden Abschnitten vorgestellten Studien dokumentieren das Vorgehen bei den Inbetriebnahmeversuchen des Prüfstandes. Sie haben einerseits das Ziel, die Nullhypothese H_0 aus Gleichung (69) zu widerlegen. Andererseits sollen sie aufzeigen, wieviele Versuche beim jeweilig gewählten Vorgehen mindestens nötig sind, um eine statistisch valide Aussage zu erlauben. Klares Ziel ist es hierbei, diese Versuchsanzahl hinsichtlich der späteren Produktivanzwendung des Prüfstandes in der Serienabsicherung auf ein Mindestmaß zu reduzieren.

Hinweise zur Versuchsdurchführung:

- Die Messwerte der Messtaster 5 und 7 sind von der Auswertung ausgeschlossen, da sich diese aufgrund der vorerst nicht montierten Dichtebenen und Seitenscheibe auf „Parkpositionen“ befinden.
- Der Referenzpunkt $[X_H \ Y_H \ Z_H]^T = [0 \ 0 \ 0]^T$ wird am Anfang einer jeden Studie angefahren, woraufhin dieser als Ausgangspunkt kalibriert ist.
- Die Bewegungsgeschwindigkeit des Hexapoden in dessen Pivotpunkt wird auf $v_H = 0.5mm/s$ festgelegt. Mit zunehmender Entfernung der verschiedenen Geometriemerkmale zum Pivotpunkt die Bewegungsgeschwindigkeit lokal an diesen Merkmalen größer sein (Hebelverhältnisse).

Studie 1: Randomisiertes Anfahren der acht Positionen

Für die erste Studie wird festgelegt, dass jeder Punkt aus Tabelle 34 genau 30 Mal $n_{Exp., Pos. i, Studie 1} = 30$ in zufälliger/randomisierter Reihenfolge angefahren wird, . Durch dieses Vorgehen soll eine mögliche „systematische Verfälschung der Versuchsergebnisse reduziert werden“, vgl. [50]. Nach erfolgtem

Anfahren der einzelnen Positionen wird jeweils genau eine Messung an den Messtastern durchgeführt, bevor die nächste Position direkt angefahren wird. Es werden somit 240 Messungen während der ersten Studie durchgeführt. Tabelle 35 veranschaulicht den Versuchsplan.

Tabelle 35: Studie 1: Versuchsplan

Versuch	Pos.	Versuch	Pos.	Versuch	Pos.	Versuch	Pos.
1	1	9	2	17	1	25	6
2	6	10	7	18	5	26	5
3	8	11	8	19	8	27	3
4	5	12	3	20	3		
5	4	13	4	21	2	⋮	⋮
6	6	14	3	22	7	238	4
7	7	15	6	23	1	239	2
8	8	16	7	24	7	240	8

Als Ergebnis der Studie lässt sich unter Annahme normalverteilter Ergebnisse mit $[t_{29,0.975} \ t_{29,0.85}]^T = [2.045 \ 1.055]^T$, siehe Anhang B, eine maximale Standardabweichung von $s_{\text{Studie 1,max}} = 0.155\text{mm}$ » s feststellen, siehe Anhang E, was im Umkehrschluss bedeutet, dass die Nullhypothese nicht widerlegt werden kann. Auf eine Ergebnisdarstellung wird an dieser Stelle verzichtet. Der Vollständigkeit halber sei erwähnt, dass sich bei den vorliegenden Daten eine minimale Versuchsanzahl von $n_{\text{Studie 1}} = 2627$ ergibt. Da dieses Ergebnis nicht den Erwartungen entspricht, wird dieses Vorgehen verworfen. Es folgt Studie 2.

Studie 2: Randomisiertes Anfahren der 8 Punkte mit jeweiligem Durchfahren des Referenzpunktes

In Studie 2 wiederholt sich der Ansatz aus Studie-1, $n_{\text{Exp., Pos. i, Studie 2}} = 30$, mit dem Unterschied, dass nach einem jeden Anfahren einer Position eine Referenzfahrt über den Kalibrierpunkt des Hexapoden durchgeführt wird. Es werden folglich 480 Messungen während der zweiten Studie durchgeführt. Tabelle 36 veranschaulicht den Versuchsplan.

Mit $[t_{29,0.975} \ t_{29,0.85}]^T = [2.045 \ 1.055]^T$ ergibt sich eine minimale Versuchsanzahl von $n_{\text{Studie 2}} = 151$ bei einer maximalen Standardabweichung von $s_{\text{Studie 2,max}} = 0.037\text{mm} > s$, was darauf hindeutet, dass eine „Nulldurchfahrt“ als sinnvoll für die Zielerreichung (Widerlegung der Nullhypothese) anzusehen ist. Es folgt Studie 3a.

Tabelle 36: Studie 2: Versuchsplan

Versuch	Pos.	Versuch	Pos.	Versuch	Pos.	Versuch	Pos.
1	1	17	2	33	1	49	6
2	0	18	0	34	0	50	0
3	6	19	7	35	5	51	5
4	0	20	0	36	0	52	0
5	8	21	8	37	8	53	3
6	0	22	0	38	0	54	0
7	5	23	3	39	3		
8	0	24	0	40	0	⋮	⋮
9	4	25	4	41	2	473	7
10	0	26	0	42	0	474	0
11	6	27	3	43	7	475	4
12	0	28	0	44	0	476	0
13	7	29	6	45	1	477	2
14	0	30	0	46	0	478	0
15	8	31	7	47	7	479	8
16	0	32	0	48	0	480	0

Studie 3a: Wiederholtes aufeinanderfolgendes Anfahren der 8 Punkte mit jeweiligem Durchfahren des Referenzpunktes

Studie 3a unterscheidet sich bei gleicher Versuchsanzahl von Studie 2 dadurch, dass die einzelnen Positionen nun mehrfach direkt nacheinander angefahren werden (ausgehend vom Kalibrierpunkt, $n_{\text{Exp., Pos. i, Studie 3a}} = 30$), vgl. Tabelle 37.

Tabelle 37: Studie 3a: Versuchsplan

Ver- such	Pos.	Ver- such	Pos.	Ver- such	Pos.	...	...	Ver- such	Pos.
1	1	61	2	121	3	...	...	421	8
2	0	62	0	122	0	...	...	422	0
3	1	63	2	123	3	...	...	423	8
4	0	64	0	124	0	...	...	424	0
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
57	1	117	2	177	3	...	...	477	8
58	0	118	0	178	0	...	...	478	0
59	1	119	2	179	3	...	...	479	8
60	0	120	0	180	0	...	...	480	0

Mit $[t_{29,0.975} \ t_{29,0.85}]^T = [2.045 \ 1.055]^T$ ergibt sich als Ergebnis dieser Studie eine minimale Anzahl von $n_{\text{Studie 3a}} = 88$ Versuchen bei einer maximalen Standardabweichung $s_{\text{Studie 3a,max}} = 0.028\text{mm} > s$. Dieser Ansatz liefert das beste Ergebnis und wird daher verwendet. Da die errechnete minimale Versuchsanzahl für eine statistisch belastbare Aussage oberhalb der aktuell durchgeführ-

ten Versuchsanzahl liegt, wird Studie 3a mit gesteigerter Versuchsanzahl in Studie 3b wiederholt. Zudem kann durch eine statistisch belastbarere Stichprobe ggf. auch mit einer weiteren Verkleinerung der Standardabweichung der korrespondierenden Verteilung gerechnet werden.

Studie 3b: Wiederholtes aufeinanderfolgendes Anfahren der 8 Punkte mit jeweiligem Durchfahren des Referenzpunktes b. erhöhter Versuchsanzahl

Als Wiederholung von Studie 3a wird die Versuchsanzahl in Studie 3b erhöht auf $n_{\text{Exp., Pos. i, Studie 3b}} = 75$, siehe Tabelle 38.

Tabelle 38: Studie 3b: Versuchsplan

Ver- such	Pos.	Ver- such	Pos.	Ver- such	Pos.	...	...	Ver- such	Pos.
1	1	151	2	301	3	...	...	1051	8
2	0	152	0	302	0	...	...	1052	0
3	1	153	2	303	3	...	...	1053	8
4	0	154	0	304	0	...	...	1054	0
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
147	1	297	2	447	3	...	...	1197	8
148	0	298	0	448	0	...	...	1198	0
149	1	299	2	449	3	...	...	1199	8
150	0	300	0	450	0	...	...	1200	0

Mit $[t_{75,0.975} \ t_{75,0.85}]^T = [1.993 \ 1.044]^T$ ergibt sich als Ergebnis dieser Studie eine minimale Anzahl von $n_{\text{Studie 3b}} = 64$ Versuchen bei einer maximalen Standardabweichung $s_{\text{Studie 3b,max}} = 0.025\text{mm} > s$. Da die errechnete minimale Versuchsanzahl kleiner ist als die durchgeführte Anzahl an Versuchen, kann das Ergebnis dann als statistisch belastbar angesehen werden, wenn auch die Normalverteilungsannahme bestätigt ist. Zu diesem Zweck wird der Test auf Normalverteilung, wie in Abschnitt „Test der Daten auf Normalverteilung“ beschrieben, unter Zuhilfenahme des ANDERSON-DARLING-Tests durchgeführt, Tabelle 73.

Für die $8 \cdot (19 - 2) = 136$ Sensormessreihen zeigt sich als Ergebnis des Auswertung, dass 69% dieser Messreihen auf Daten basieren, für welche die Nullhypothese, dass die Daten normalverteilt sind, nicht verworfen werden kann. Die Normalverteilungsannahme kann somit für mehr als 2/3 der vorliegenden Daten bestätigt werden.

Da sowohl die errechnete minimale Versuchsanzahl mit $n_{\text{Studie 3b}} = 64$ kleiner ist als die hier durchgeführte Anzahl an Versuchen ($n_{\text{Exp., Pos. i, Studie 3b}} = 75$) als auch die Normalverteilungsannahme bestätigt werden kann, wird das Ergebnis als statistisch belastbar angesehen. Das in Studie 3b beschriebene Vorgehen wird im Folgenden verwendet.

5.5.3 Erkenntnisse aus den Studien

- Die Nullhypothese aus Gleichung (69) kann nicht widerlegt werden. Die angestrebte Größenordnung wird jedoch erreicht.

$$s_{\text{Studie 1,max}} > s_{\text{Studie 2,max}} > s_{\text{Studie 3a,max}} > s_{\text{Studie 3b,max}} = 0.025\text{mm} > s$$
- Das in Studie 3b beschriebene Vorgehen liefert Ergebnisse bzgl. der reproduzierbaren Einstellung möglicher Toleranzlagen, welche als ausreichend wiederholgenau und statistisch belastbar eingestuft werden.
- Die Einstellung der Toleranz- bzw. Grenzlagen ist mit dem Vorgehen aus Studie 3b durchzuführen. Dies bedeutet, dass eine jede Toleranz- bzw. Grenzlage vor der korrespondierenden funktionalen Bewertung mehrmalig (mindestens fünffach) vom Kalibrierpunkt/Nullpunkt aus anzufahren ist. Auf diesem Wege wird die größtmögliche Genauigkeit bei der reproduzierbaren Einstellung der jeweilig gewünschten Toleranzlage ermöglicht.

5.6 Grenzlagenuntersuchungen am Prüfstands Aufbau

Die folgenden Abschnitte thematisieren die Grenzlagenuntersuchungen am Prüfstands Aufbau. Das prinzipielle Vorgehen bei diesen experimentellen Grenzlagenuntersuchungen in Abgleich mit den entsprechenden virtuellen Vorarbeiten und Zwischenschritten wird in Abschnitt 5.6.1 erklärt. Fortfahrend mit der Ermittlung des Gesamtversuchsplans zur effizienten und ressourcensparenden Versuchsdurchführung in Abschnitt 5.6.2, schließt sich daran die virtuelle Absicherung eben jenes Versuchsplans hinsichtlich der Untersuchung von Kollisionen zwischen nichtelastischen Bauteilen in Abschnitt 5.6.3 an. Dieser Schritt verfolgt die zwingende Versuchsrandbedingung, derartige Kollisionen im Experiment ausschließen zu können, ggf. durch Entfall der entsprechenden Zeilen des Gesamtversuchsplans. Additiv dokumentiert Abschnitt 5.6.4 experimentelle Randbedingungen bei der Versuchsdurchführung.

5.6.1 Prinzipielles Vorgehen beim Vergleich der virtuellen mit den experimentellen Grenzlagenuntersuchungen

In Folge an das in Abschnitt 4.5.2 beschriebene Vorgehen zur Ableitung einer statistischen Versuchsmethodik, wird in diesem Abschnitt auf das prinzipielle Vorgehen beim Vergleich der virtuellen mit den experimentellen Grenzlagenuntersuchungen eingegangen, siehe Bild 80.

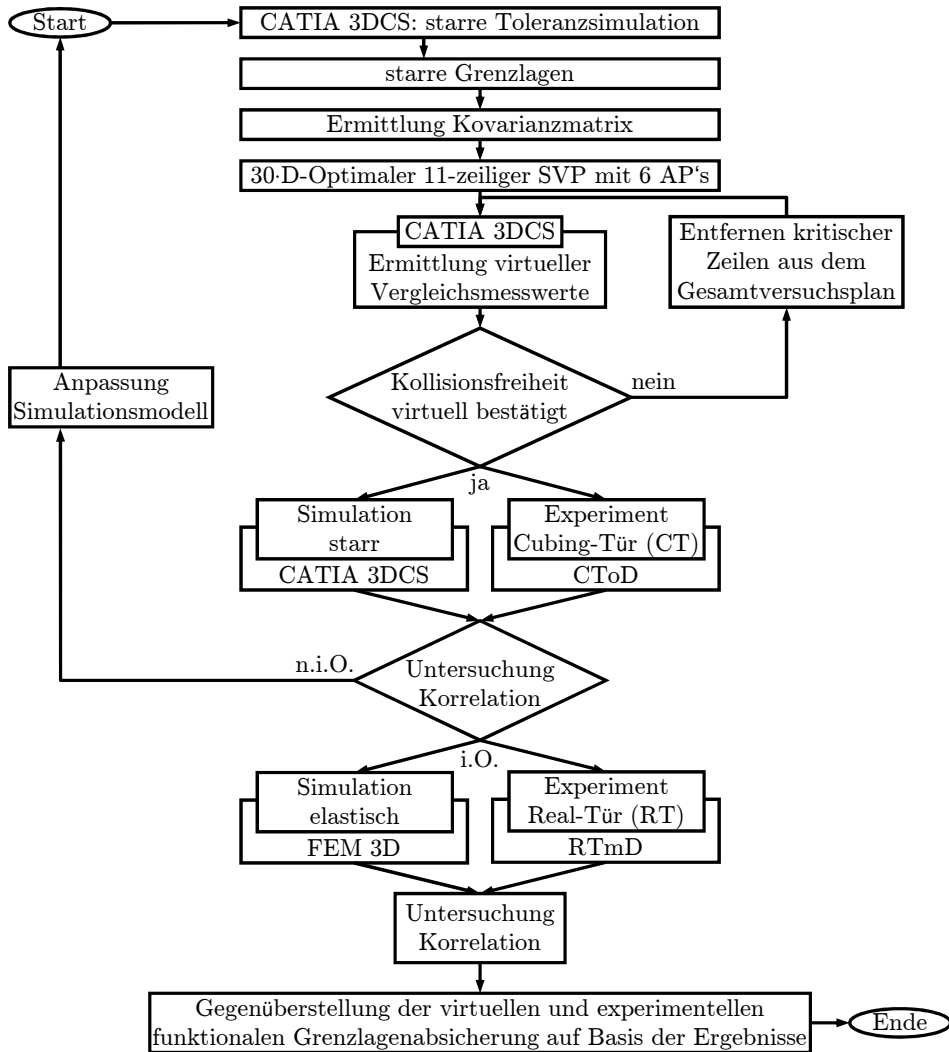


Bild 8o: Prinzipielles Vorgehen beim Vergleich der virtuellen mit den experimentellen Grenzlagenuntersuchungen

Die aus diesem Vorgehen resultierenden Untersuchungen verfolgen gesamthaft das Ziel, den Ansatz zur simulationsunterstützten funktionalen Grenzlagenabsicherung durch das Experiment zu bestätigen. Die grundlegenden Schritte sind die Folgenden:

- Auf Basis der starren Toleranzsimulation wird der Gesamtversuchsplan erstellt. Anschließend wird dieser, wie in Abschnitt 5.6.2 beschrieben, virtuell „abgefahren“, um die Kollisionsfreiheit zwischen den nicht-elastischen Bauteilen zu bestätigen, respektive um diesen für das Experiment freizugeben. Sobald diese Freigabe erfolgt ist, erfolgen die Korrelationsuntersuchungen zur Bestimmung der Korrelationskoeffizienten, siehe Kapitel 6, an den Messstellen.
- Die erste Korrelationsuntersuchung vergleicht die Messdaten der virtuellen Messtaster aus den 3DCS-Simulationen mit den Messdaten der realen Messtaster im Experiment unter Verwendung einer Cubing-Tür und unter Ausschluss des Dichtsystems (CToD ...Cubing-Tür ohne Dichtsystem) (siehe Abschnitt 6.1). Diese Untersuchung verfolgt zweierlei Ziele. Einerseits sollen die starren 3DCS-Ergebnisse validiert werden. Daraus folgend soll andererseits das Vorgehen beim experimentellen Einstellen der Toleranzlagen nochmals bestätigt werden. Fällt das Ergebnis dieser Korrelationsuntersuchung positiv aus, wird der zweite Block an Korrelationsuntersuchungen durchgeführt.
- Der zweite Block an Korrelationsuntersuchungen vergleicht die Messdaten der virtuellen Messtaster aus den FEM-Simulationen mit den Messdaten der realen Messtaster im Experiment unter Verwendung einer Real-Tür und unter Einbeziehung des Dichtsystems (RTmD ...Real-Tür mit Dichtsystem) (siehe Abschnitt 6.3). Wie bereits einleitend erwähnt, verfolgen diese Untersuchungen gesamthaft das Ziel, den Ansatz zur simulationsunterstützten funktionalen Grenzlagenabsicherung durch das Experiment zu bestätigen.

Die Ergebnisse dieser Korrelationsuntersuchungen sind Kapitel 6 zu entnehmen.

5.6.2 Ermittlung des Gesamtversuchsplans

Als Ergebnis der Ausführungen in Abschnitt 4.5.2 wurde die Handlungsempfehlung ausgesprochen, einen elfzeiligen D-Optimalen Versuchsplan für den Abgleich der Simulations- mit den Experimentalergebnissen zu verwenden. Dieser Handlungsempfehlung wird im Folgenden entsprochen. Um eine statistisch belastbare Aussage zu ermöglichen, wird die Versuchsplanerstellung ähnlich den Voruntersuchungen zur Erfüllungsgradthematik aus Abschnitt 4.5.2 30-fach wiederholt, woraufhin 30 elfzeilige Versuchspläne resultieren. Aufgrund von 220 Zeilendoppelungen in diesen Versuchsplänen ergibt sich ein 110-zeiliger Gesamtversuchsplan, welcher für die nachfolgenden Betrachtungen herangezogen werden soll. Bild 81 verdeutlicht das Beschriebene.

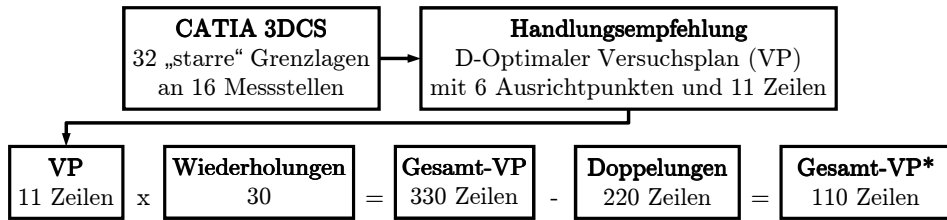


Bild 81: Herleitung des 110-zeiligen Gesamtversuchsplans

Entsprechend der Handlungsempfehlung wird dieser 110-zeilige Gesamtversuchsplan virtuell „abgefahren“. Dieses Abfahren verfolgt zweierlei Ziele.

Zum einen sollen virtuelle Referenzmessungen bzgl. der starren Grenzlagen für die Messstellen ermittelt werden. Zum anderen soll sichergestellt werden, dass keine Kollisionen zwischen nichtelastischen Bauteilen im Experiment zu erwarten sind – die Grenzen des eingeschränkten Arbeitsraumes dürfen nicht verletzt werden, siehe nachfolgender Abschnitt 5.6.3, vgl. [S2].

5.6.3 Virtuelle Absicherung des Gesamtversuchsplans hinsichtlich der Vermeidung von Kollisionen zwischen nichtelastischen Bauteilen

Auf Basis des virtuellen, ideal starren Prüfstandmodells erfolgt das Abtasten des möglichen Arbeitsraumes in CATIA v5. Folgende Randbedingungen sind hierbei zu beachten, vgl. [S2]:

- Die Untersuchungen basieren auf den Nominalgeometrien aller Bauteile.
- Alle bauteileigenen Koordiantensysteme werden überlagert und sind mit der Nulllage deckungsgleich.
- Als Bezugssystem für den bewegten Seitenrahmen wird das in der Nulllage fixierte Kooordinatensystem der Tür verwendet.

Das inkrementelle translatorische Abtasten des möglichen Arbeitsraumes entlang der Hauptachsen X , Y und Z erfolgt mit einer Schrittweite von 0, 1mm, bis durch die in CATIA v5 implementierte „DMU-Kollisionsuntersuchung“ eine Kollision zwischen der Rahmentür und dem Seitenrahmen und/oder dem Grundgestell detektiert wird, vgl. Bild 77. In diesem Fall springt die Anwendung um eine Schrittweite zurück und speichert die entsprechende Position als Grenze ab. Da Hinterschneidungen innerhalb des möglichen Arbeitsraumes nicht ausgeschlossen werden können und mit dem einmaligen durchführen dieses Verfahrens nicht erkannt werden können, wird dieses Verfahren für die drei denkbaren Kombinationen durchgeführt:

- Schrittweises Verfahren entlang der X -Achse.
⇒ Zwischen den Schritten: Schrittweises Abtasten der Y - Z -Ebene.
- Schrittweises Verfahren entlang der Y -Achse.
⇒ Zwischen den Schritten: Schrittweises Abtasten der X - Z -Ebene.
- Schrittweises Verfahren entlang der Z -Achse.
⇒ Zwischen den Schritten: Schrittweises Abtasten der X - Y -Ebene.

Es besteht dennoch die Möglichkeit, dass potentielle Hinterschnidungen, welche zur Erweiterung des möglichen Arbeitsraumes führen würden, nicht erkannt werden. Derartige Bereiche des möglichen Arbeitsraumes werden in diesem Fall bewusst ignoriert, da ein Anfahren dieser Positionen wegen der erhöhten Gefahr potentieller Bauteilkollisionen im Experiment nicht durchgeführt werden würde.

Die Ergebnisse der drei Abtastvorgänge des möglichen Arbeitsraumes werden überlagert, respektive in einem Modell zusammengeführt. Das Ergebnis dieser Überlagerung ist in Bild 82 dargestellt.

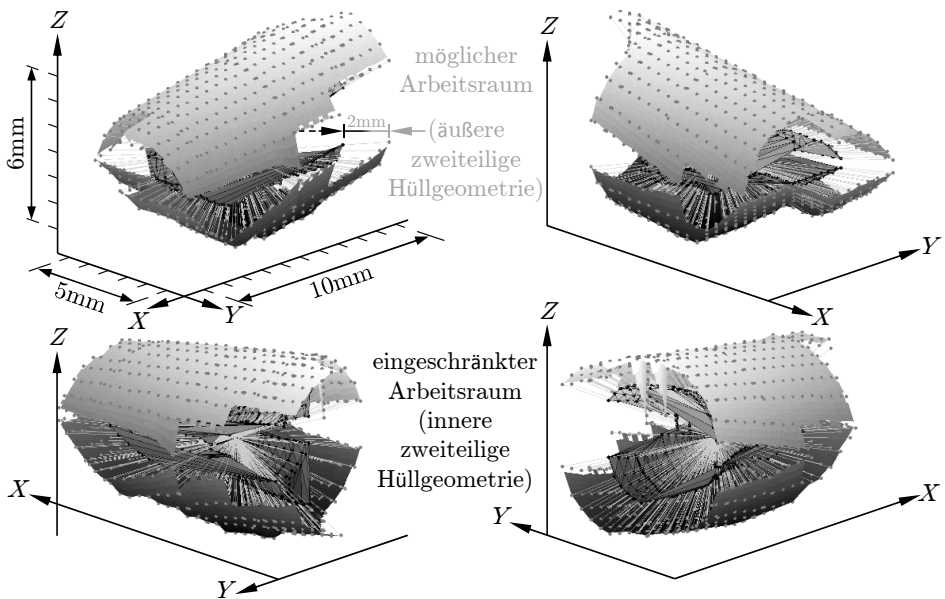


Bild 82: Darstellung des möglichen und des eingeschränkten Arbeitsraumes aus vier Blickwinkeln als Ergebnis virtueller Untersuchungen

In diesem Bild ist der mögliche Arbeitsraum (graue Punktwolke mit daraus abgeleiteter oberer und unterer Hüllgeometrie) aus vier verschiedenen Blickwinkeln dargestellt. Innerhalb dieser grauen Punktwolke ist eine weitere Wolke schwarzer Punkte zu sehen (inkl. den zwei korrespondierenden Hüllgeometrien), welche den eingeschränkten Arbeitsraum beschreibt.

Der eingeschränkte Arbeitsraum ergibt sich durch die Definition eines frei wählbaren Sicherheitsabstandes (hier 2mm) entlang der konzentrisch verlaufenden grauen Linien zu den Grenzen des möglichen Arbeitsraumes. Solange im Rahmen der Versuchsdurchführung keine Verletzungen dieses eingeschränkten Arbeitsraumes vorliegen, können Kollisionen zwischen nichtelastischen Bauteilen im Experiment ausgeschlossen werden.

Nachdem der eingeschränkte Arbeitsraum bekannt ist, wird der Gesamtversuchsplan, wie auch schon in Abschnitt 5.6.2 beschrieben, virtuell in CATIA v5 abgefahren, um für diesen konkreten Versuchsplan eine Verletzung der Grenzen des eingeschränkten Arbeitsraumes auszuschließen. Bild 83 veranschaulicht am Beispiel eines Messtasters das Ergebnis einer solchen Untersuchung.

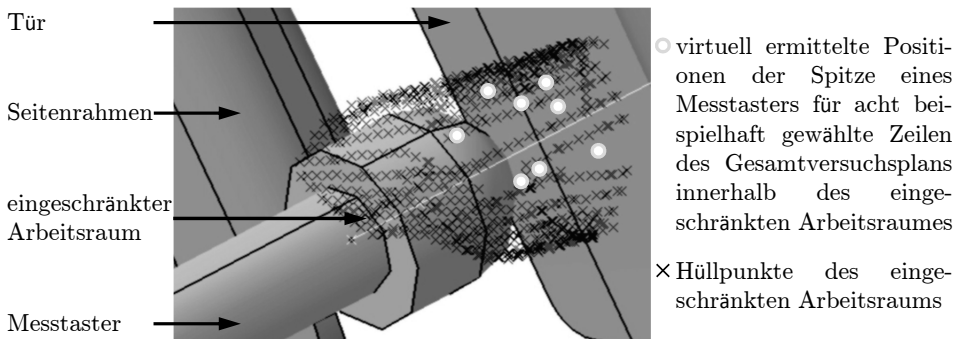


Bild 83: Darstellung exemplarischer Ergebnisse an einem Messtaster hinsichtlich der Verletzung der Grenzen des eingeschränkten Arbeitsraumes für die hier betrachteten Zeilen des Gesamtversuchsplans, vgl. [S2, Abb. 54], eigene Darstellung

In dem Bild ist zu erkennen, dass für den vorliegenden exemplarischen Fall (8 Versuche = 8 weiß-graue Punkte) alle weiß-grauen Punkte innerhalb der Punktwolke liegen, welche den eingeschränkten Arbeitsraum beschreibt. Kollisionen zwischen den nichtelastischen Bauteilen können im Experiment in diesem Bereich für diese Zeilen des Gesamtversuchsplans ausgeschlossen werden.

Das Validierungsexperiment darf folglich für die korrespondierenden Versuche durchgeführt werden, wenn diese Bestätigung nicht nur für den Bereich um diesen konkreten Messtaster sondern für alle Bereiche um alle Messstellen des Gesamtaufbaus gilt. Dies ist für alle Zeilen des Versuchsplans an allen Messstellen der Fall.

5.6.4 Experimentelle Randbedingungen bei der Versuchsdurchführung

Bei der Versuchsdurchführung gilt es einige Randbedingungen zu beachten, damit die Experimente einerseits sowohl untereinander als auch mit den korrespondierenden Simulationen vergleichbar sind. Andererseits sollen die Experimente in der Duschkabine in bestmöglicher Annäherung an den für Duschtests vorgesehenen BMW Group Standard „Kraftfahrzeugdichtheit gegen Wasser“ durchgeführt werden. Allgemein sei auf die folgenden Punkte hingewiesen:

- **Aufgaben der verwendeten Sensoren/Messtaster**

Bei den Sensoren handelt es sich um taktile Messtaster, die eine Entfernungsaussage liefern. Es lassen sich mit ihnen weder Kraft- noch Verformungsmessungen durchführen.

- **Messtaster ohne Einfluss auf das Korrelationsergebnis**

Die CToD-Experimente werden unter Ausschluss der Messtaster-5 und 7 durchgeführt, da in diesem Fall keine Scheibe in der Cubing-Tür verbaut ist. Generell dienen die Messtaster 11, 16 und 18 der Kontrolle bzgl. der Einstellungen mit dem Aktor. Sie sind im Simulationsmodell nicht vorhanden und werden folglich bei keiner der Korrelationsuntersuchungen betrachtet.

- **Tausch der verwendeten Messtaster**

Während einer geschlossenen Versuchsreihe ist es nicht zulässig, die Messtaster zu tauschen. Dies zieht eine Wiederholung der kompletten Versuchsreihe nach sich. Zwischen den Versuchsreihen ist ein Tausch der Messmittel möglich.

- **Optische Einsichtsmöglichkeiten**

Es besteht keine Möglichkeit, eventuelle Verformungen des Dichtsystems optisch zu bewerten. Der Abgleich zwischen Simulation und Experiment geschieht rein auf Basis der Messdaten der Messtaster.

- **Zeitpunkt der Applikation des Dichtsystems**

Zunächst werden alle Versuche ohne Dichtsystem durchgeführt und ausgewertet. Werden die Daten für „i. O.“ befunden, wird das Dichtsystem verbaut. Der Hintergrund bei diesem Vorgehen ist, dass das Dichtsystem nur ein einziges Mal appliziert wird. Eine zerstörungsfreie Demontage ist nicht möglich.

- **Einfluss der Anbaukabine auf die Ergebnisse**

Die vor Wassereintritt geschützte Anbaukabine hat den Zweck, einen Menschen während der Duschversuche zu beherbergen, damit dieser die Sichtprüfung bzgl. des möglichen Wassereintritts durchführen kann. Diese Anbaukabine ist über eine verhältnismäßig dünne und stark elastische Membran mit dem beweglichen Seitenrahmen verbunden. Ein die Messdaten beeinflussender Kraftfluss zwischen Anbaukabine und Seitenrahmen ist minimiert.

- **Transport des Prüfstandes**

Während einer geschlossenen Versuchsreihe sollte der mobile Prüfstand aufgrund des gesteigerten Kalibrieraufwandes zu Beginn der jeweiligen Versuchsreihe nicht bewegt werden. Zwischen den Versuchsreihen ist ein Transport (beispielsweise zwischen einem Labor für die Trockenversuche und einer Duschanlage für die Nassversuche) möglich. Prinzipiell ist ein permanenter Standort jedoch als am Sinnvollsten zu erachten.

- **Vor Beginn einer Versuchsreihe**

Bevor ein neuer Versuchsplan im Experiment „abgefahren“ wird, sind die folgenden Schritte durchzuführen:

- Ein Verletzen des Arbeitsraumes (Kollision nicht-elastischer Bauteile) ist virtuell auszuschließen, vgl. [S2], Abschnitt 5.2.
- Die Bewegungen des Aktors sind auf eine Geschwindigkeit von 0,5 mm/s zu begrenzen.
- Vor dem erstmaligen Anfahren einer Toleranzlage ...

- 1) ... ist die verbaute Cubing- oder Real-Tür zu schließen,
 - 2) ... ist eine Kalibrierung des Aktors in dessen Nullpunkt durchzuführen,
 - 3) ... ist eine Nullmessung für alle Messtaster im ausgefahrenen Zustand und in Kontakt zur jeweilig verbauten Fahrzeugtür durchzuführen.
- Auf diese Weise sind die Nulllagen aller Messtaster im Experiment bekannt.

- **Ort der Versuchsdurchführung bei den Duschversuchen**

Die Beduschungs-Experimente werden in bestmöglicher Annäherung an den für Duschtests vorgesehenen BMW Group Standard „Kraftfahrzeugdichtheit gegen Wasser“ durchgeführt werden. Hierfür werden Duschanlagen, wie sie in Bild 84 dargestellt sind, verwendet.



Bild 84: Dichtheitsprüfanlage (a) am Realfahrzeug & (b) im Experiment, vgl. [S3, Abbildungen 53 und 59], eigene Darstellung

• Generische Durchführung der Duschversuche

Die Durchführung im Duschversuch folgt für eine jede Toleranzlage generisch dem Vorgehen aus Bild 85, vgl. [S3, Abbildung 54]. Gemäß der aus der statistischen Versuchsplanung vorgegebenen Reihenfolge werden die Toleranzlagen dem Duschversuch unterzogen. Generell ist ein jeder Duschversuch pro Toleranzlage in zwei Teilversuche gegliedert – einen 2-minütigen Vorversuch und einen 8-minütigen Hauptversuch. Vor einer jeden Beduschung wird die entsprechende Toleranzsituation analog den Erkenntnissen aus Abschnitt 5.5.3 mindestens 5-malig, hier 7-malig, zur Sicherstellung einer größtmöglichen Genauigkeit bei der reproduzierbaren Einstellung der gewünschten Toleranzlage angefahren. Sowohl nach dem Vorversuch als auch nach dem Hauptversuch wird die Dichtheit bewertet. Falls direkt nach dem Vorversuch ein negativer Befund (Wassereintritt) vorliegt, kann der Hauptversuch entfallen. Ergebnisoffen erfolgt nach jedem Duschversuch die Abfrage, ob dies der letzte Duschversuch entsprechend der statistischen Versuchsplanung war. Falls nicht, beginnt der Duschversuch für die nächste Toleranzlage.

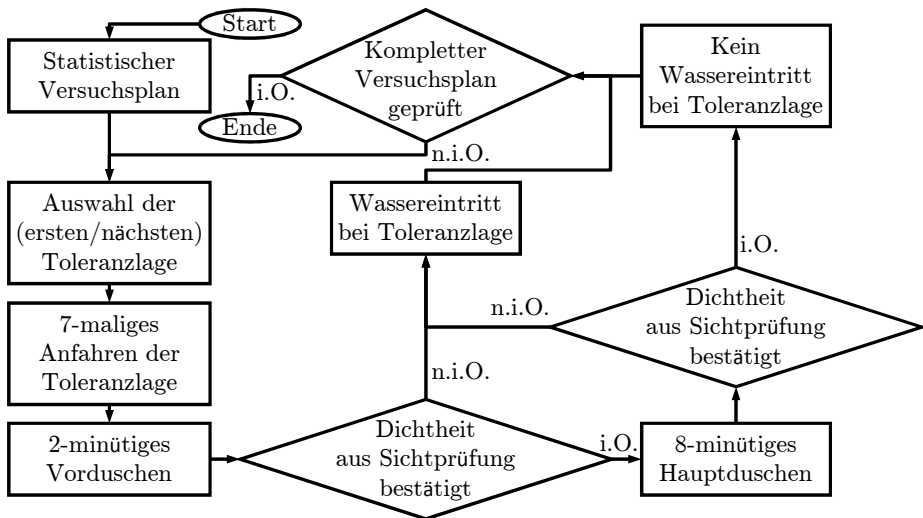


Bild 85: Generik bei der Durchführung der Duschversuche, in Anlehnung an [S3, Abbildung 54], eigene Darstellung

6 Gegenüberstellung der virtuellen und experimentellen funktionalen Grenzlagenabsicherung auf Basis der Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse aus Simulation und Experiment gegenübergestellt. Auf Basis der Ergebnisse werden die in Bild 80 beschriebenen Vergleiche mittels Korrelationsuntersuchungen durchgeführt. Verglichen werden hierbei die Messdaten der virtuellen taktilen Messtaster (3DCS & FEM) mit den Messdaten der realen taktilen Messtaster (CToD & RTmD). Bei diesen Messdaten handelt es sich, wie bereits in Abschnitt 5.6.4 dargestellt, um Entfernungsmessungen. Kraft- oder Verformungsmessungen stehen nicht zur Verfügung. Zur Bewertung des Zusammenhanges zwischen virtuellen (X) und Mess-Daten (Y) wird der lineare Korrelationskoeffizient r_{XY} als Maß herangezogen:

$$\begin{aligned}
 r_{XY} &= \text{Kor}(X, Y) = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \\
 r_{YX} &= \text{Kor}(Y, X) = r_{XY} \\
 &\quad \vdots \quad \text{mit } \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \bar{y} \text{ analog.}
 \end{aligned} \tag{72}$$

Hierin bezeichnen $x_1 \dots x_n$ und $y_1 \dots y_n$ die Messwerte der intervallskalierten Merkmale X und Y ; $\bar{x}$ und $\bar{y}$ sind die zugehörigen arithmetischen Mittel.

Auf Grundlage normalverteilter Daten bewertet der lineare Korrelationskoeffizient r_{XY} (nach AUGUSTE BRAVAIS und KARL PEARSON, vgl. [223]) den linearen Zusammenhang zwischen zwei stetigen Merkmalen, welche über dieselben *Input*-Daten (hier: statistischer Versuchsplan) auf verschiedenen Wegen ermittelt wurden (hier: Simulation und Experiment), über ein dimensionsloses Maß, welches zwischen den Werten -1 und 1 liegt:

- $r_{XY} = +1$

Es besteht ein **vollständig positiver linearer Zusammenhang** zwischen den betrachteten Merkmalen X und Y .

- $r_{XY} = 0$

Es besteht **kein linearer Zusammenhang** zwischen den betrachteten Merkmalen X und Y . Im Umkehrschluss kann jedoch nicht ausgeschlossen werden, dass ein nichtlinearer Zusammenhang besteht.

- $r_{XY} = -1$

Es besteht ein **vollständig negativer linearer Zusammenhang** zwischen den betrachteten Merkmalen X und Y .

Bild 86 beschreibt exemplarisch, wie eine entsprechende grafische Darstellung für einen positiven linearen Zusammenhang aussehen kann.

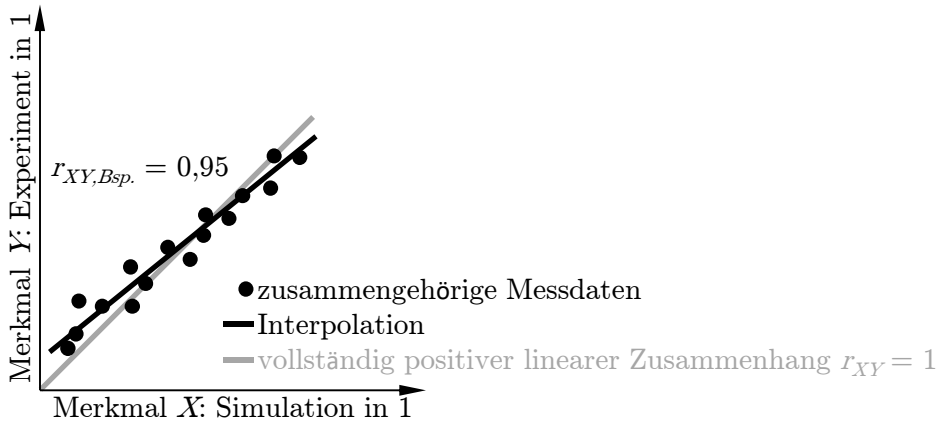


Bild 86: Linearer Korrelationskoeffizient r_{XY} : Exemplarische Darstellung eines positiven linearen Zusammenhangs

Bezüglich der Bewertung des mathematischen Ergebnisses einer Korrelationsuntersuchung lassen sich in der prinzipiell vielfältig vorhandenen Literatur nur vereinzelt konkrete Aussagen finden. Eine grundlegende Möglichkeit, jene Ergebnisse zu unterteilen, wird in [196] vorgestellt:

- $r_{XY} \geq 0,90$

Zwischen den betrachteten Merkmalen X und Y besteht eine nahezu lineare Korrelation.

- $r_{XY} \geq 0,70$

„Korrelationskoeffizienten $\geq 0,70$ werden i.d.R. als auffällig bezeichnet.“

- $r_{XY} \geq 0,50$

„Es wird empfohlen, auch Parameterkombinationen bis $\geq 0,50$ auf Auffälligkeiten zu untersuchen.“

Entsprechende weiterführende Fachliteratur zum Thema ist, wie bereits beschrieben, vielfältig verfügbar, weshalb auf diese an dieser Stelle nicht weiter eingegangen wird. Exemplarisch sei auf eine ansprechende Zusammenfassung in [224] verwiesen.

6.1 Korrelationsuntersuchungen zwischen den Ergebnissen der starren Toleranzrechnung und denen des Experiments unter Verwendung einer Cubing-Tür sowie unter Ausschluss des Dichtsystems (3DCS vs. CToD)

Die erste Korrelationsuntersuchung vergleicht die Messdaten der virtuellen Messtaster aus den 3DCS-Simulationen mit den Messdaten der realen Messtaster im Experiment unter Verwendung einer Cubing-Tür und unter Ausschluss des Dichtsystems (CToD). Diese Untersuchung verfolgt zweierlei Ziele. Einerseits sollen die starren 3DCS-Ergebnisse validiert werden. Daraus folgend soll andererseits das Vorgehen beim experimentellen Einstellen der Toleranzlagen final bestätigt werden.

Der 110-zeilige Gesamtversuchsplan wird in der Simulation einmalig durchlaufen und die virtuellen Messwerte gespeichert. Im Experiment wird ausgehend vom Nullpunkt jede Toleranzlage siebenmalig angefahren. Dies entspricht dem Vorgehen, welches in Abschnitt 5.5.3 beschrieben wird. Jene „siebte Messung wird dabei als die relevante Messung (an-)gesehen und fließt in die Auswertung ein“, vgl. [S3]. Bild 87 zeigt die Ergebnisse der Korrelationsuntersuchungen, welche unter Zuhilfenahme eines eigens in MatLab® implementierten Quellcodes in diesem visualisiert werden. Wie bereits angemerkt, sind normalverteilte Messdaten Voraussetzung für diese Auswertung. Als Ergebnis von Voruntersuchungen kann das Vorhandensein dieser Voraussetzung bestätigt werden.

Aus Bild 87 ist ersichtlich, dass grundlegend eine hohe bis sehr hohe positive lineare Korrelation für die Messstellen, vgl. Bild 52, vorliegt. Als kleinster Korrelationskoeffizient kann derjenige, welcher an Messstelle 8 ermittelt wurde, mit $r_8 = r_{3DCS,CToD,8} \approx 0,91$ genannt werden. An 10 der 14 ausgewerteten Messstellen liegt der jeweilige Korrelationskoeffizient bei Werten $> 0,99$, siehe Tabelle 39. Die größten Abweichungen vom Zielwert $r_i = 1$ zeigen die Messstellen 4, 6 und 8. Dieser Effekt kann mehrere Gründe haben: Zum einen handelt es sich bei diesen Messstellen um diejenigen mit dem größten Abstand zum Aktor – die Hebelverhältnisse könnten hier einen negativen Einfluss ausüben. Zum anderen ist die Cubing-Tür in diesem Bereich zwischen der A- und B-Säule des Fahrzeuges strukturell am Schwächsten ausgeprägt – minimale Verformungen als Folge des Herstellungs-, Transport- und Montageprozesses sowie aus dem laufenden Prüfstandsbetrieb heraus können nicht ausgeschlossen werden.

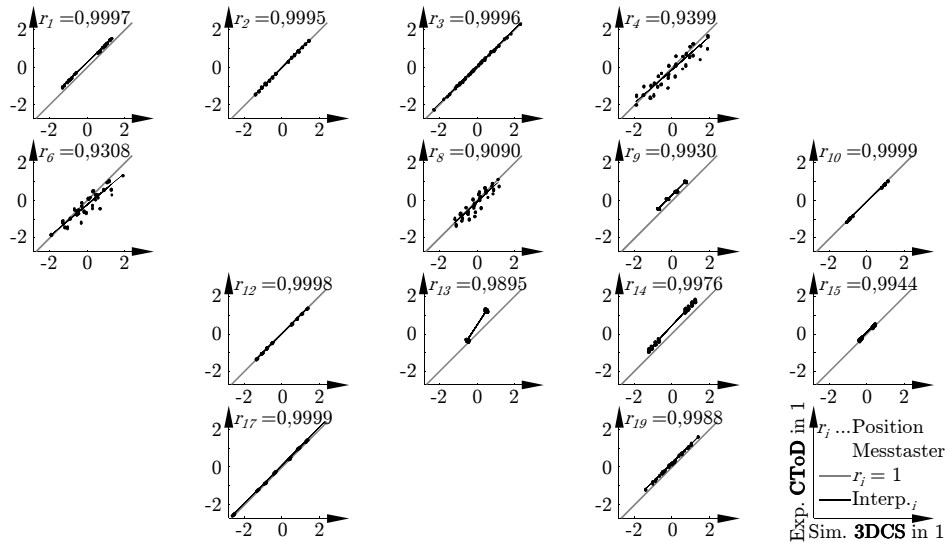


Bild 87: Korrelationsergebnisse für den Fall 3DCS vs. CToD

Tabelle 39: Korrelationskoeffizienten r_i für den Fall 3DCS vs. CToD

Messstelle i	1	2	3	4	5	6	7	8
$r_{3DCS,CToD,i}$	0,9997	0,9995	0,9996	0,9399	/	0,9308	/	0,9090
Messstelle i	9	10	11	12	13	14	15	16
$r_{3DCS,CToD,i}$	0,9930	0,9999	/	0,9998	0,9895	0,9976	0,9944	/
Messstelle i	17	18	19					
$r_{3DCS,CToD,i}$	0,9999	/	0,9988	$r_{3DCS,CToD,\emptyset} = 0,9822$				

Diese in Bild 87 und Tabelle 39 dargestellten Ergebnisse bestätigen, dass die starren 3DCS-Ergebnisse den Fall „Cubing-Tür ohne Dichtsystem“ (CToD) nahezu ideal abbilden. Zudem kann das experimentelle Vorgehen beim Einstellen der Toleranzanlagen als erfolgreich bestätigt werden – „das Konzept des Prüfstandes zum automatisierten Einstellen von Grenzlagen (ist) qualifiziert“, vgl. [S2]. Folglich können die Ergebnisse der nachfolgenden experimentellen Untersuchungen für den Abgleich mit den korrespondierenden virtuellen Untersuchungen verwendet werden.

6.2 Korrelationsuntersuchungen zwischen den Ergebnissen der starren Toleranzrechnung und denen des Experiments unter Verwendung einer Real-Tür sowie bei installiertem Mehrebenen-Dichtsystem (3DCS vs. RTmD)

Die zweite Korrelationsuntersuchung vergleicht die Messdaten der virtuellen Messtaster aus den 3DCS-Simulationen mit den Messdaten der realen Messtaster im Experiment unter Verwendung einer Real-Tür sowie eines verbauten Mehrebenen-Dichtsystems (RTmD). Diese Untersuchung verfolgt das Ziel, den konkreten Unterschied zwischen der starren Toleranzrechnung und dem realen Baugruppenverhalten für den gewählten Demonstrator zu beziffern und sichtbar zu machen.

Der 110-zeilige Gesamtversuchsplan wird in der Simulation einmalig durchlaufen und die virtuellen Messwerte gespeichert. Im Experiment wird ausgehend vom Nullpunkt jede Toleranzlage siebenmalig angefahren. Dies entspricht dem Vorgehen, welches in Abschnitt 5.5.3 beschrieben wird und auch bereits bei der im vorangegangenen Abschnitt 6.1 thematisierten Untersuchung angewandt wurde. Jene „siebte Messung wird dabei als die relevante Messung (an-)gesehen und fließt in die Auswertung ein“, vgl. [S3]. Bild 88 zeigt die Ergebnisse der Korrelationsuntersuchungen, welche unter Zuhilfenahme eines eigens in MatLab® implementierten Quellcodes in diesem visualisiert werden.

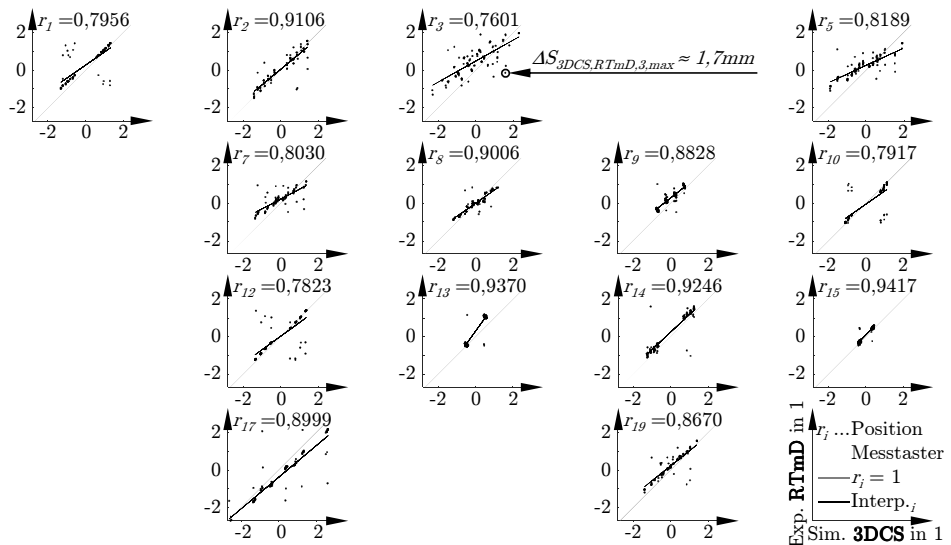


Bild 88: Korrelationsergebnisse für den Fall 3DCS vs. RTmD

Aus Bild 88 ist ersichtlich, dass für die linearen Korrelationskoeffizienten an den verschiedenen Messstellen (siehe Bild 52), im Vergleich zu den Ergebnissen des vorangegangenen Abschnittes, deutlich niedrigere Werte ausgewiesen werden. Tabelle 40 führt nochmals alle Korrelationskoeffizienten für diese Untersuchung auf.

Tabelle 40: Korrelationskoeffizienten r_i für den Fall 3DCS vs. RTmD

Messstelle i	1	2	3	4	5	6	7	8
$r_{3DCS,RTmD,i}$	0,7956	0,9106	0,7601	/	0,8189	/	0,8030	0,9006
Messstelle i	9	10	11	12	13	14	15	16
$r_{3DCS,RTmD,i}$	0,8828	0,7917	/	0,7823	0,9370	0,9246	0,9417	/
Messstelle i	17	18	19					
$r_{3DCS,RTmD,i}$	0,8999	/	0,8670	$r_{3DCS,RTmD,\emptyset} = 0,8583$				

Während die gemittelte Prognosegüte (ausgedrückt über den linearen Korrelationskoeffizienten) für die in Abschnitt 6.1 dargestellte erste Untersuchung bei einem Wert von $r_{3DCS,CToD,\emptyset} = 0,9822 \hat{=} 98,22\%$ liegt, sinkt diese erwartungsgemäß für die in diesem Abschnitt durchgeführte zweite Untersuchung auf $r_{3DCS,RTmD,\emptyset} = 0,8583 \hat{=} 85,83\%$.

Als kleinster Korrelationskoeffizient kann derjenige, welcher an Messstelle 3 ermittelt wurde, mit $r_3 = r_{3DCS,RTmD,3} \approx 0,76$ genannt werden. Bedenkt man die Lage dieser Y -Messung im Bereich des B-Säulen-Knotens mit den einhergehenden Hebelverhältnissen zu den drei Anbindungspunkten zwischen Tür und Seitenrahmen sowie die vergleichsweise strukturelle Schwäche der türseitigen Blechstruktur, so erscheint dieses Ergebnis plausibel.

Ein Vergleich zwischen den Prognosewerten der starren Toleranzsimulation und den real gemessenen Werten für dieses Schließmaß zeigt signifikante Unterschiede: Für eine Zeile j des durchlaufenen Versuchsplans liefert die starre Toleranzsimulation einen Schließmaßwert von $S_{3DCS,3,j} = 1,566\text{mm}$ wohingegen die reale Messung einen Wert von $S_{RTmD,3,j} = -0,146\text{mm}$ zurückmeldet (siehe Bild 88). Dieser exemplarisch ausgewählte extreme Unterschied von $\Delta S_{3DCS,RTmD,3,j} = \Delta S_{3DCS,RTmD,3,\max} \approx 1,7\text{mm}$ zwischen starrer Simulation und realer Messung verschaulicht, welche „Lücke“ ein geeigneter Simulationsansatz schließen könnte. Unterschiede mit derselben Größenordnung zeigen sich auch an nahezu allen anderen betrachteten Messstellen, siehe Tabelle 41.

Tabelle 41: Maximale Unterschiede zwischen den Prognosewerten der starren Toleranzsimulation und den real gemessenen Werten an den i Messstellen (3DCS vs. RTmD)

Messstelle i	1	2	3	4	5	6	7	8
$\Delta S_{3DCS,RTmD,i,max}$				/		/		
	2,10	1,86	1,71		1,63		1,55	0,99
Messstelle i	9	10	11	12	13	14	15	16
$\Delta S_{3DCS,RTmD,i,max}$			/					/
	0,76	1,83		2,22	0,93	2,08	0,57	
Messstelle i	17	18	19					
$\Delta S_{3DCS,RTmD,i,max}$		/		in mm				
	3,74		1,60					

Der in Abschnitt 5.6.2 beschriebene und in den vorangegangenen Abschnitten 6.1 und 6.2 verwendete 110-zeilige D-Optimale Gesamtversuchsplan wird entsprechend der Empfehlung aus Abschnitt 4.5.2 auf einen 11-zeiligen D-Optimalen Versuchsplan auf Basis von 6 Ausrichtpunkten reduziert. Diese Reduzierung geschieht an dieser Stelle auch in Anbetracht des kostenintensiven Simulationsaufwandes. Jener Versuchsplan wird in der Simulation einmalig durchlaufen und die virtuellen Messwerte gespeichert. Auch im Experiment wird, ausgehend vom Nullpunkt, jede der 11 Toleranzsituationen siebenmalig angefahren. Dies entspricht dem Vorgehen, welches in Abschnitt 5.5.3 beschrieben wird und auch bereits bei den in den vorangegangenen Abschnitten 6.1 und 6.2 thematisierten Untersuchungen angewandt wurde. Jene „siebte Messung wird dabei als die relevante Messung (an-)gesehen und fließt in die Auswertung ein“, vgl. [S3]. Bild 89 zeigt die Ergebnisse der Korrelationsuntersuchungen, welche unter Zuhilfenahme eines eigens in MatLab® implementierten Quellcodes visualisiert werden.

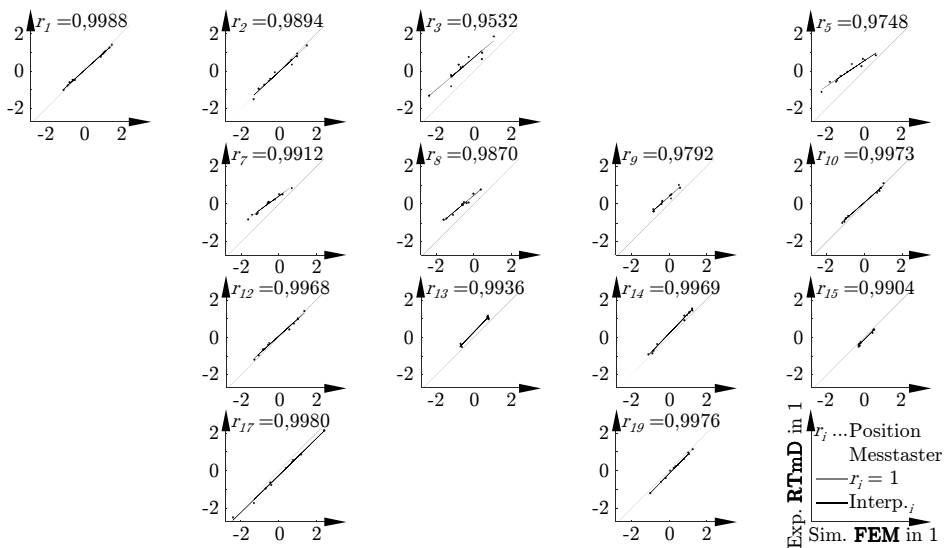


Bild 89: Korrelationsergebnisse für den Fall FEM vs. RTmD

Aus Bild 89 ist ersichtlich, dass eine hohe bis sehr hohe positive lineare Korrelation für die Messstellen, vgl. Bild 52, vorliegt. Als kleinster Korrelationskoeffizient kann derjenige, welcher an Messstelle 3 ermittelt wurde, mit $r_3 = r_{FEM,RTmD,3} \approx 0,95$ genannt werden. Wie bereits in Abschnitt 6.2 beschrieben, handelt es sich hierbei um eine Y-Messung im Bereich des B-Säulen-Knotens. Eine Prognose des abweichungsbehafteten Systemverhaltens (unterliegt nichtlinearen Effekten) an dieser Stelle, welche durch

dessen Lage (größtmöglicher Abstand zu den drei Anbindungspunkten zwischen Tür und Seitenrahmen) sowie durch die vergleichsweise strukturelle Schwäche der türseitigen Blechstruktur charakterisiert ist, kann mit Bezug auf den verwendeten Demonstrator als anspruchsvoll beschrieben werden. Dennoch kann hier von einem sehr guten Korrelationsergebnis gesprochen werden. Mit knapper Ausnahme des Korrelationskoeffizienten an Messstelle 9 ($r_9 = r_{FEM,RTmD,9} \approx 0,98$) liegen die jeweiligen Korrelationskoeffizienten an den verbleibenden 12 ausgewerteten Messstellen bei Werten $r_{FEM,RTmD,i} > 0,98$, siehe Tabelle 42. Der gemittelte Korrelationskoeffizient liegt für diese Untersuchung bei einem Wert von $r_{FEM,RTmD,\emptyset} = 0,9889 \hat{=} 98,89\%$.

Tabelle 42: Korrelationskoeffizienten r_i für den Fall FEM vs. RTmD

Messstelle i	1	2	3	4	5	6	7	8
$r_{FEM,RTmD,i}$	0,9988	0,9894	0,9532	/	0,9748	/	0,9912	0,9870
Messstelle i	9	10	11	12	13	14	15	16
$r_{FEM,RTmD,i}$	0,9792	0,9973	/	0,9968	0,9936	0,9969	0,9904	/
Messstelle i	17	18	19					
$r_{FEM,RTmD,i}$	0,9980	/	0,9976	$r_{FEM,RTmD,\emptyset} = 0,9889$				

Für die Messstellen 11($\vec{X}$), 16($\vec{Z}$) und 18($\vec{Y}$) werden keine Korrelationsergebnisse ausgewiesen. Bei diesen handelt es sich um reine „Kontrollmessstellen“ entlang der Hauptachsen des Koordinatensystems, siehe Bild 52 in Abschnitt 4.5.3. Aufgrund irreparabler Sensorausfälle im Rahmen der experimentellen Versuchsdurchführung können für die Messstellen 4($\vec{Y}$) und 6($\vec{Y}$) ebenfalls keine Korrelationsergebnisse ausgewiesen werden.

6.4 Interpretation der Ergebnisse der Korrelationsuntersuchungen

Das mit diesem Abschnitt endende Kapitel 6 behandelt die Gegenüberstellung der Grenzlagenergebnisse aus Simulation und Experiment mithilfe von Korrelationsuntersuchungen. Gegenübergestellt werden hierbei die Messdaten der virtuellen taktilen Messtaster mit den Messdaten der realen taktilen Messtaster.

Zunächst vergleichen die Korrelationsuntersuchungen aus **Abschnitt 6.1** die Messdaten der virtuellen Messtaster aus den 3DCS-Simulationen mit den Messdaten der realen Messtaster im Experiment unter Verwendung einer Cubing-Tür und unter Ausschluss des Dichtsystems (CToD). Die Ergebnisse dieser Untersuchungen (siehe Bild 87) zeigen deutlich, dass die 3DCS-Ergebnisse den Fall „Cubing-Tür ohne Dichtsystem“ (CToD) nahezu ideal abbilden ($r_{3DCS,CToD,\emptyset} = 0,9822$). In der Folge können sowohl das experimentelle Vorgehen beim Einstellen der Toleranzlagen als erfolgreich bestätigt, als auch die Ergebnisse der angestellten experimentellen Untersuchungen aus den Abschnitten 6.2 und 6.3 für den Abgleich mit den korrespondierenden virtuellen Untersuchungen verwendet werden, da „das Konzept des Prüfstandes zum automatisierten Einstellen von Grenzlagen qualifiziert ist“, vgl. [S2].

In **Abschnitt 6.2** werden Korrelationsuntersuchungen vorgestellt, welche die Messdaten der virtuellen Messtaster aus den 3DCS-Simulationen mit denen der realen Messtaster im Experiment unter Verwendung einer Real-Tür sowie eines verbauten Mehrebenen-Dichtsystems (RTmD) in Relation stellen. Aus den Ergebnissen ist ersichtlich, dass für die linearen Korrelationskoeffizienten an den verschiedenen Messstellen, im Vergleich zu den Ergebnissen des vorangegangenen Abschnittes, deutlich niedrigere Werte ausgewiesen werden (siehe Bild 88). Die gemittelte Prognosegüte hinsichtlich der sich ausprägenden Grenzlagen für diese zweite Untersuchung sinkt erwartungsgemäß auf einen niedrigeren Wert: $r_{3DCS,RTmD,\emptyset} = 0,8583 \hat{=} 85,83\%$. Die in diesem Abschnitt aufgezeigten Unterschiede zwischen starrer Toleranzrechnung und realem Baugruppenverhalten veranschaulichen deutlich, welche „Lücke“ aktuell existiert. Ziel des Simulationsansatzes, welcher in dieser Arbeit vorgestellt wird, ist es, diese zu schließen. Inwiefern dies gelingt, wird in Abschnitt 6.3 thematisiert.

Die abschließende Korrelationsuntersuchung, welche in **Abschnitt 6.3** vorgestellt wird, vergleicht die Messdaten der virtuellen Messtaster aus den gekoppelten Simulationen (FEM) mit den Messdaten der realen Messtaster im Experiment unter Verwendung einer Real-Tür sowie eines verbauten Mehrebenen-Dichtsystems (RTmD). Aus den in Bild 89 vorgestellten Ergeb-

nissen ist ersichtlich, dass eine hohe bis sehr hohe lineare Korrelation für die betrachteten Messstellen vorliegt. Der gemittelte Korrelationskoeffizient liegt für diese Untersuchung bei einem Wert von $r_{FEM,RTmD,\emptyset} = 0,9889$.

In Summe kann als Folge der in Abschnitt 6.3 vorgestellten Korrelationsuntersuchungen festgestellt werden, dass die im Rahmen dieser Arbeit vorgeschlagene Methodik zur Vorhersage funktionsrelevanter Grenzlagen durch einen simulationsunterstützten Ansatz belastbare realitätsnahe Ergebnisse liefert – insbesondere für Systeme, die nichtlinearen Effekten unterliegen. Der gemittelte Korrelationskoeffizient $r_{FEM,RTmD,\emptyset} = 0,9889$ belegt dies mit Bezug auf den gewählten Demonstrator aus der Automobilindustrie. Die Differenz zum idealen Ergebnis von $r_{FEM,RTmD,\emptyset} = 1$ kann vielfältige Gründe haben. Beispiele hierfür sind:

Simulation

- Abweichende Materialeigenschaften,
- Numerische Randbedingungen,

Experiment

- Geometrische Verformungen der Prüfstandskomponenten infolge der Herstellungsverfahren, des Transports und von Montageprozessen sowie aus dem laufenden Prüfstandsbetrieb heraus,
- Erschütterungen während des Prüfstandsbetriebes,
- Gewölbte Blechflanschgeometrien, auf welche die Sensoren messen,
- Abweichende Messvektoren zwischen Simulation und Experiment infolge von Fertigungsabweichungen und Montage,
- Setzverhalten des Aktors (Hexapoden) infolge der permanenten Lasten und Lastwechsel.

7 Integration der simulationsunterstützten funktionalen Grenzlagenabsicherung in den Produktentwicklungsprozess

Die Integration der simulationsunterstützten funktionalen Grenzlagenabsicherung in den Produktentwicklungsprozess dient nicht ausschließlich einer Einordnung mit Bezug auf den gewählten Demonstrator, sondern geschieht gerade auch im Sinne einer Übertragbarkeit auf andere Anwendungsfälle. Es ist offensichtlich, dass die entwicklungs- und absicherungsunterstützende Toleranzrechnung im Allgemeinen frühestmöglich im Produktentwicklungsprozess (PEP) zu verorten ist, um einen größtmöglichen Beitrag hinsichtlich einer gesteigerten Produktqualität zu leisten. Die nachfolgenden Absätze und Abschnitte verfolgen das Ziel, diese Verortung zu konkretisieren.

Aus wissenschaftlicher Sicht ist der Produktentwicklungsprozess (PEP) nicht uneindeutig definiert, da ein Blick in die Literatur zeigt, dass sich in diesem Kontext in den vergangenen Jahren und Jahrzehnten verschiedene Ansätze etabliert haben. Diejenigen für die Umfänge dieser Arbeit potentiell relevanten Ansätze werden nach KREHMER als „Phasen- und zustandsorientierte Ansätze“ bezeichnet. Jene wagen den Versuch, „die Komplexität der Produktentwicklung beherrschbar zu machen und deren unvorhersehbaren Verlauf strukturiert abzubilden“, vgl. [212]. Namentlich werden an dieser Stelle ...

- ... das Vorgehensmodell nach PAHL und BEITZ, vgl. [208],
- ... das Vorgehensmodell nach VDI-RICHTLINIE 2221, 2222 BLATT 1 und 2223, vgl. [213], [225] und [226],
- ... das Vorgehensmodell nach VDI-RICHTLINIE 2206 (V-Modell), vgl. [227],
- ... das Münchener Produktkonkretisierungsmodell (MKM) nach LINDEMANN, vgl. [228] und [229] sowie
- ... das FORFLOW-Prozessmodell, vgl. [210],

genannt. Wie bereits 2010 durch STOCKINGER in [50] festgestellt wurde, findet bei diesen „jedoch das Toleranzmanagement bzw. in erweiterter Sichtweise das *Variational Risk Management* (...) keine explizit dargestellte Integration“.

Die Entscheidung hinsichtlich der Wahl eines Produktentwicklungsprozessmodells fällt an dieser Stelle zugunsten des in der VDI-RICHTLINIE 2221 beschriebenen methodischen Vorgehens aus. Jene Wahl wird sowohl durch den Anspruch, „eine allgemein anwendbare Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte“ bereitzustellen, welche jene Richtlinie an sich selbst stellt, als auch durch den Fakt, dass es sich um eine aner-

kannte Richtlinie handelt, welche durch renommierte Wissenschaftler geprägt wurde, begründet. Konkreter heißt es bezüglich der Inhalts: „Die VDI 2221 behandelt allgemeingültige, branchenunabhängige Grundlagen methodischen Entwickelns und Konstruierens und definiert diejenigen Arbeitsabschnitte und Arbeitsergebnisse, die wegen ihrer generellen Logik und Zweckmäßigkeit Leitlinie für ein Vorgehen in der Praxis sein können“, vgl. [213]. Es darf jedoch festgestellt werden, dass eine derartige Verortung auch in den anderen Vorgehens- und Prozessmodellen vorgenommen werden kann.

In Abschnitt 7.1 wird das gewählte PEP-Modell kurz vorgestellt. Abschnitt 7.2 beschreibt die Einordnung des im Rahmen dieser Arbeit entstandenen Ansatzes in dieses Produktentwicklungsprozessmodell. Im letzten Abschnitt 7.3 wird diese vorgeschlagene Verortung durch einen qualitativen Evaluationstest auf Expertentest (Probandenstudie) bestätigt.

Entsprechende weiterführende Fachliteratur zu den verschiedenen Vorgehensmodellen ist vielfältig verfügbar, weshalb auf diese an dieser Stelle nicht weiter eingegangen wird. Exemplarisch sei auf eine ansprechende Zusammenfassung durch KREHMER verwiesen, vgl. [212]. Hierin werden neben den aufgezeigten Phasen- und zustandsorientierten Ansätzen u.a. auch handlungsorientierte Ansätze sowie Mikrozyklen in der Produktentwicklung thematisiert.

7.1 Das Vorgehensmodell aus den VDI-RICHTLINIEN 2221, 2222 BLATT 1 und 2223 – eine Übersicht

Als Unterstützung für die multidisziplinäre Produktentwicklung ist das Vorgehensmodell aus den VDI-RICHTLINIEN 2221, 2222 BLATT 1 und 2223 eine Zusammenstellung der vielfältig entstandenen „Methoden zur Durchführung einzelner Entwicklungs- und Konstruktionsschritte“, vgl. [213]. In Anlehnung an die Lebensphasen eines Systems (Produktlebenszyklus), siehe Bild 90, wird ein „allgemein anwendbares Vorgehen beim Entwickeln und Konstruieren abgeleitet“, vgl. [213].

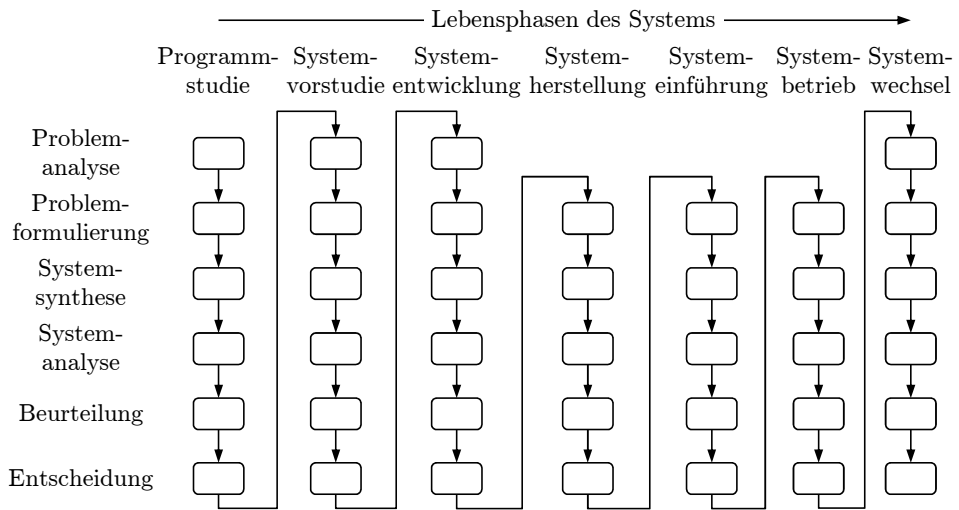


Bild 90: Lebensphasen eines Systems, vgl. [213, Bild 2.1] in Anlehnung an [230] und [231], eigene Darstellung

Auf Grundlage der in Bild 90 aufgezeigten Lebensphasen eines Systems erfolgt die Zuordnung branchenübergreifender Begrifflichkeiten, siehe Bild 91.

Hierin sind unternehmensexterne (Markt/Kunde) und/oder unternehmensinterne Anforderungen und Bedingungen Ausgangspunkt. Falls diese die Entwicklungs-/Konstruktionsaufgabe nicht direkt definieren, geschieht dies in der vorgelagerten Produktplanung. Entwicklung und Konstruktion beschreiben die Produktkonkretisierung bis hin zu den Ausführungs- und Nutzungsangaben (Produktdokumentation). Nachfolgend an diese geometrische Produktspezifikation erfolgen Fertigung und Montage inklusive begleitender und/oder nachgeschalteter messtechnischer Prüfung relevanter und/oder kritischer Merkmale.

Die anschließende Zuführung des Produktes zur Nutzung (Gebrauch oder Verbrauch) erfolgt über den Vertrieb. Unabhängig von den Möglichkeiten einer potentiellen Aufarbeitung des bereits genutzten Produktes schließt sich in der Regel eine Recyclingphase an, welche durch geeignete konstruktive Maßnahmen während des Prozesses der Produktentstehung unter anderem auch im Sinne einer nachhaltigen Rohstoffwiederverwertung bedacht werden sollte. [213]

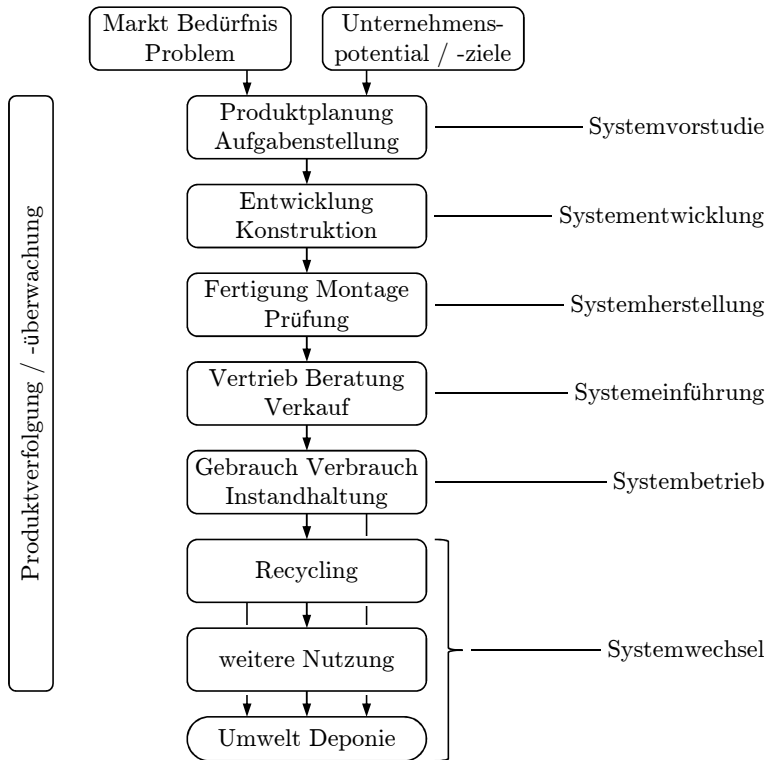


Bild 91: Entwicklung und Konstruktion als Teil der Lebensphasen eines Systems, vgl. [213, Bild 3.1], eigene Darstellung

Mit dem Ziel, all den genannten Aspekten Rechnung tragen zu können, schlägt die VDI-RICHTLINIE 2221 in der Folge ein generelles Vorgehen als branchenübergreifende Grundlage des methodischen Konstruierens vor. Genauer heißt es: „Der Entwicklungs- und Konstruktionsprozeß im Zuge der dargelegten Produktentstehung wird nun in generelle Arbeitsabschnitte untergliedert, die das Vorgehen beim Entwickeln und Konstruieren überschaubar, rationell und branchenunabhängig machen“, vgl. [213], siehe Bild 92.

In der Hauptstruktur sind vier Phasen mit in Summe sieben Arbeitsabschnitten ersichtlich, wobei ein jeder Arbeitsabschnitt ein Ergebnis hervorbringt. In Abhängigkeit der konkreten Entwicklungs-/Konstruktionsaufgabe werden diese Arbeitsabschnitte unabhängig voneinander vollständig, in abgekürzter Form oder auch mehrfach iterativ durchlaufen. Diese Freiheiten bei der Anwendung des vorgeschlagenen Vorgehens unterstützen durch den Einsatz von Auswahl- bzw. Entscheidungs- und Optimierungswerkzeugen in der Folge das Ziel, ein multikriteriell optimiertes Produkt zu schaffen. [213], [50]

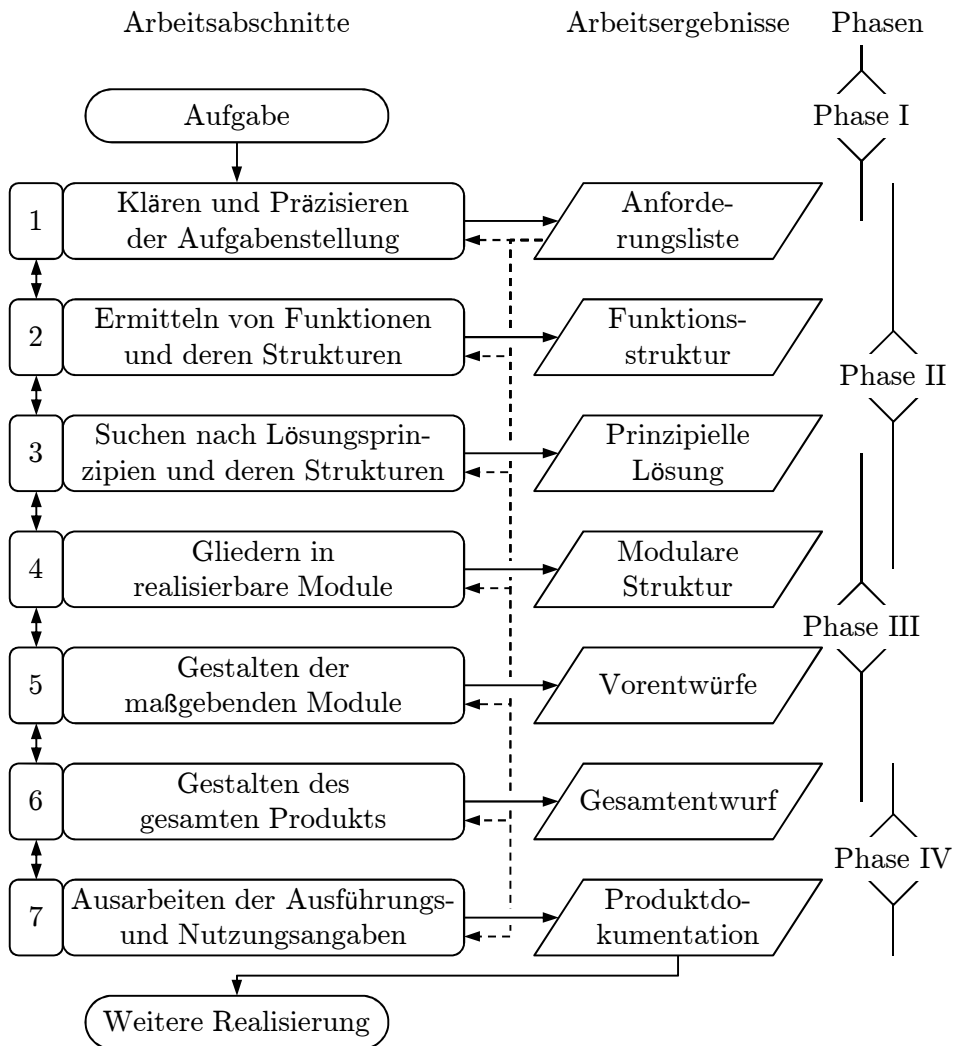


Bild 92: Generelles Vorgehen beim Entwickeln und Konstruieren, vgl. [213, Bild 3.3], eigene Darstellung

Sowohl auf die Inhalte dieser sieben Arbeitsabschnitte als auch auf die Einordnung des im Rahmen dieser Arbeit entstandenen Ansatzes in dieses Produktentwicklungsprozessmodell wird im nachfolgenden Abschnitt 7.2 eingegangen.

Weiterführende Informationen zum Vorgehensmodell sind den VDI-RICHTLINIEN 2221, 2222 BLATT 1 und 2223 zu entnehmen, vgl. [213], [225] und [226].

7.2 Einordnung der Teilschritte des Ansatzes in das Vorgehensmodell aus den VDI-RICHTLINIEN

Mit Bezug auf die Hauptebene des Vorgehensmodells aus den VDI-RICHTLINIEN 2221, 2222 BLATT 1 und 2223, siehe Bild 92, zeigen die folgenden Absätze, wie der im Rahmen dieser Arbeit entstandene Ansatz zur simulationsunterstützten funktionalen Grenzlagenabsicherung innerhalb des Vorgehensmodells verortet wird. Hierzu wird jeweilig zunächst ein Abriss der generischen Inhalte eines jeden Arbeitsabschnittes mit Verweis auf die VDI-RICHTLINIEN gegeben, bevor die erwähnte Verortung durchgeführt wird.

Schritt 1: Klären und Präzisieren der Aufgabenstellung

„Der Arbeitsabschnitt 1 ist notwendig, um die Anforderungen der vom Kunden oder der Produktplanung formulierten Aufgabe zu klären und zu präzisieren. Dazu gehören das Zusammentragen aller verfügbaren Informationen und das Erkennen von Informationslücken, das Überprüfen und Ergänzen der externen Anforderungen, das Hinzufügen unternehmensinterner Anforderungen sowie das Formulieren der Aufgabenstellung aus Sicht des Konstrukteurs einschließlich bereits möglicher und notwendiger Strukturierungen“, vgl. [213, S. 7].

Beginnend mit der Entscheidung, ein neues Produkt zu entwickeln und für dieses vor dem Bau erster Prototypen virtuelle Grenzlagenuntersuchungen durchführen zu wollen, beginnt der Prozess. Der erste Schritt besteht nun darin, Informationen zusammenzutragen, um, ggf. basierend auf empirischem Wissen, toleranzsensitive Schließmaße zu identifizieren. In der Folge werden diesen im Sinne einer Produkthanforderung Soll-Vorgaben zugewiesen respektive die Anforderungen werden geklärt.

Für den vorliegenden Ansatz und den gewählten Demonstrator bedeutet dies die Festlegung toleranzsensitiver und vor allem funktional relevanter Schließmaße rund um den vorderen Einstiegsbereich des Fahrzeuges sowie eine Zuordnung zu erreichender Toleranz-Zielwerte. Beide Tätigkeiten geschehen auf einer abstrahierten Ebene, da eine Detail-Konstruktion zu diesem Zeitpunkt noch nicht vorliegt, und werden im Lastenheft dokumentiert.

Schritt 2: Ermitteln von Funktionen und deren Strukturen

„Im Arbeitsabschnitt 2 erfolgt das Ermitteln von Funktionen, und zwar zunächst der Gesamtfunktion und der wesentlichen, vom zu entwickelnden Produkt bzw. System zu erfüllenden Teilfunktionen (Hauptfunktionen). Deren Gliederung und Kombination zu Strukturen bildet die Grundlage zum Suchen nach Lösungen für das Gesamtprodukt bzw. die Gesamtfunktion“, vgl. [213, S. 8].

Ziel dieses Arbeitsschrittes ist die Beschreibung oder formelle Darstellung von Funktionsstrukturen. Aus Toleranzsicht ist dies von Interesse, da Funktionsstrukturen in der konstruktiven Umsetzung teilweise die funktionsorientierten Toleranzketten und damit die funktionskritischen Maße implizieren. Das heißt, dass die in dem Toleranzsimulationsmodell zu berücksichtigenden Wirkzusammenhänge gegebenenfalls bereits grob in der Funktionsstruktur erkennbar sind.

Schritt 3: Suche nach Lösungsprinzipien und deren Strukturen

„Im Arbeitsabschnitt 3 werden für alle Funktionen oder zunächst für die wesentlichen Teilfunktionen der Funktionsstruktur Lösungsprinzipien gesucht. Hierzu müssen in einem ersten Schritt physikalische, chemische oder andere Effekte ausgewählt werden. Anschließend müssen diese Effekte durch sog. wirkstrukturelle Festlegungen realisiert werden. Bei mechanischen Systemen betreffen solche wirkstrukturellen Festlegungen z. B. die Geometrie (Wirkgeometrie), die Bewegung (Wirkbewegung) und die Werkstoffart. Diese Festlegungen bilden das Lösungsprinzip. Die für Teilfunktionen gefundenen Lösungsprinzipien müssen anschließend entsprechend den Funktionsstrukturen zur Wirkstruktur verknüpft werden. Dabei können weitere Funktionen (Nebenfunktionen) erkennbar werden, die die Realisierung bestimmter Effekte bzw. Lösungsprinzipien erst möglich machen“, vgl. [213, S. 8].

Beim dritten Schritt des Vorgehensmodells steht die Suche nach Lösungsprinzipien im Vordergrund. In Abhängigkeit der Fragestellung, ob für ein existierendes Problem bereits eine bekannte Lösung existiert oder auch nicht, ist dieser Schritt „geprägt von der Recherche zu vorhandenen Lösungsmöglichkeiten und möglichen Alternativen“, vgl. [50]. Vor diesem Hintergrund erfolgt eine Aufgliederung in Lösungs- und Wirkprinzipien. Ist es das Ergebnis dieses iterativen Schrittes (ein möglicher Rücksprungpunkt ist vorhanden), dass alle Anforderungen abgedeckt sind, so werden die Teillösungsprinzipien strukturiert, woraufhin alternative prinzipielle Lösungen abgeleitet werden können.

Im Kontext des Toleranzmanagements sowie für den vorliegenden Ansatz und den gewählten Demonstrator bedeutet dies die Beeinflussung etwaiger Lösungsvorschläge zugunsten einer toleranzverträglichen konstruktiven Auslegung. Mit Bezug auf eine entsprechende Umsetzung bezieht sich diese Beeinflussung sowohl auf Systemanforderungen (funktionale Anforderungen) als auch auf Fertigungsprozesse (Prozessanforderungen).

Schritt 4: Gliedern in realisierbare Module

„Im Arbeitsabschnitt 4 wird die Prinzipielle Lösung in realisierbare Module gegliedert, bevor deren weitere, in der Regel arbeitsaufwendige Konkretisierung erfolgt“, vgl. [213, S. 9].

Der vierte Schritt beginnt unter der Voraussetzung, dass alternative prinzipielle Lösungen (mindestens jedoch eine) vorhanden sind. Diese werden in modulare Strukturen überführt, um im Folgenden (Schritt 5) auf Subsystemebene detailliert betrachtet zu werden. Eine Unterteilung in benannte modulare Strukturen bedeutet eine „Gliederung der Lösung in die für deren Realisierung wesentliche reale Gruppen und Elemente (...) einschließlich derer Verknüpfungen (Schnittstellen)“, vgl. [213].

In Zusammenhang mit dem in dieser Arbeit vorgestellten Ansatz bedeutet dies die Aufteilung in, sowie die Einflussnahme auf mögliche konstruktive Konzeptalternativen mit veränderten Schnittstellen. Diese Einflussnahme kann sich beispielsweise durch Vorschläge hinsichtlich veränderter Beitragsleister, der Wahl alternativer Ausrichtsysteme oder der Abänderung von Montagefolgen ausdrücken.

Schritt 5: Gestalten der maßgebenden Module

„Im Arbeitsabschnitt 5 erfolgt ein wichtiger Konkretisierungs- bzw. Realisierungssprung durch Gestalten der für die Produkt- bzw. Systemoptimierung maßgebenden Module. Hierbei hat es sich als zweckmäßig erwiesen, den Konkretisierungs- und Vollständigkeitsgrad der geometrischen, stofflichen und/oder programmtechnischen Festlegungen nur soweit zu treiben, daß ein Erkennen und Auswählen eines Gestaltungsoptimums möglich wird. Es wird hierbei auch von einem Vorgestalten oder Grobgestalten gesprochen“, vgl. [213, S. 9].

Wie bereits in Schritt 4 benannt, können, durch die Überführung in modulare Strukturen, diese im Folgenden auf Subsystemebene detailliert betrachtet werden (Schnittstellen, Verantwortlichkeiten von Teillösungsprinzipien), um deren prinzipielle Umsetzbarkeit zu überprüfen. Wesentliche Inhalte befassen sich hierbei u.a. mit der überschlägigen Dimensionierung, der zugehörigen

Aufteilung des Bauraums, der Vorauswahl von Fertigungsverfahren, der geometrischen Anordnung sowie der Vorauswahl von Materialien. Die sich aus diesen Teilschritten ergebenden Gesamtkonzepte werden anschließend einer Eigenschaftsanalyse unterzogen, was wiederum in einer Konzeptbewertung resultiert. Bei positivem Ergebnis schließt sich die Dokumentation verwendeter Lösungsprinzipien und genutzter Produktschnittstellen an.

Durch die angesprochene Modularisierung ist aus Toleranzsicht gerade das Schnittstellenthema für die Toleranzsynthese interessant. Sind potentielle Ausrichtsysteme gewählt, lassen sich erste Parameterstudien hinsichtlich einer Bewertung der Toleranzsensitivität der konstruktiven Auslegung im Sinne des *Robust Design* anstellen: „Mit einfachen, analytischen und numerischen Werkzeugen kann die Toleranzsynthese auf Produkt- und/oder Bauteilebene erfolgen und verschiedene Zusammenbaureihenfolgen mit verschiedenen Bezugssystemen durchgespielt werden (...)“, vgl. [50].

Für den vorliegenden Anwendungsfall beinhaltet dieser Schritt die Gestaltung von Ausrichtsystemen und Montage-/Fügekonzepten sowie die Konzeptionierung und Durchführung von korrespondierenden Toleranzberechnungsstudien für toleranzkritische Schließmaße unter Zuhilfenahme der Methoden des CAT. Eine geeignete Dokumentation mit Bezug auf gewonnene Erkenntnisse schließt diesen Schritt des Prozessmodells ab.

Schritt 6: Gestalten des gesamten Produkts

„Im Arbeitsabschnitt 6 werden die bereits vorentworfenen Module durch weitere Detailangaben, durch Gestalten und Ergänzen noch nicht bearbeiteter Gruppen und Elemente sowie durch Verknüpfen aller Gruppen und Teile endgültig festgelegt. Es wird bei diesem Abschnitt auch von einem Endgestalten oder Feingestalten gesprochen. Insbesondere die Festlegung der im Arbeitsabschnitt 5 noch nicht realisierten Module ist u. U. durch Auswahl bekannter bzw. handelsüblicher Elemente möglich“, vgl. [213, S. 9].

Im sechsten Schritt erfolgt die Konkretisierung und Ausgestaltung des Produktes. Hierbei wird zunächst unterschieden, ob die nachfolgende Gestaltung und Absicherung auf Bauteil- oder auf Teilsystemebene erfolgen soll. Auf Bauteilebene schließen sich dem iterativen Prozess aus Gestaltung und Berechnung die Eigenschaftsermittlung und die Bauteilabsicherung an. Auch auf Teilsystemebene schließen sich dem Prozess der Teilsystemintegration die Eigenschaftsermittlung und die Teilsystemabsicherung analog an. Erst nachdem jeweilig an dieser Stelle ein gültiger Entwurf identifiziert ist, erfolgt die Integration in das Teil- oder Gesamtsystem. Nach erfolgreicher Systemintegration wird im Anschluss auch das Gesamtsystem hinsichtlich seines Eigenschaftsprofils untersucht und final abgesichert.

Bei diesem Schritt des Vorgehensmodells werden wesentliche Prozessschritte des vorliegenden Ansatzes verortet respektive entsteht die entscheidende geometrische Produktspezifikation: Zunächst werden, innerhalb des Zyklus aus Berechnung und Zusammenbau des Teilsystems, die finalen statistischen CAT-Berechnungen für das Produkt durchgeführt, um Aussagen an den betrachteten Schließmaßen unter Berücksichtigung geometrischer Verhältnismäßigkeiten zu treffen. Folgend werden auf Basis dieser CAT-Berechnungen die Methoden der statistischen Versuchsplanung zur Minimierung des FEM-Simulationsaufwandes angewandt. Im Anschluss folgen die FEM-Simulationen, auf deren Basis wiederum die Robustheitsuntersuchungen für das betrachtete Produkt stattfinden. Die abschließende Kopplung von starren Grenzlagenaussagen (CAT) und statistischen Basisdaten bzgl. des Systemverhaltens (FEM) zur Korrektur der Grenzlagenprognose komplettiert diesen Schritt. Die Ergebnisse dieser Kopplung, jene der statistischen Versuchsplanung sowie diejenigen der Robustheitsuntersuchungen geben wiederum Rückschlüsse auf die Eigenschaftsprofile von Teil- und Gesamtsystem.

Schritt 7: Ausarbeiten der Ausführungs- und Nutzungsangaben

„Der Arbeitsabschnitt 7 dient dem Ausarbeiten der vom Entwicklungs- und Konstruktionsbereich zu verantwortenden Ausführungs- und Nutzungsangaben. Dieser Arbeitsabschnitt überlappt insofern den vorhergehenden, weil in diesem bereits wesentliche Festlegungen zur fertigungstechnischen Realisierung sowie zum Produktgebrauch getroffen wurden“, vgl. [213, S. 9].

Als Arbeitsergebnis dieses Abschnittes entsteht die Produktdokumentation.

Für den im Rahmen dieser Arbeit vorgestellten Ansatz zur simulationsunterstützten funktionalen Grenzlagenabsicherung bietet sich an dieser Stelle ein wesentlicher Integrationspunkt: Die Ergebnisdokumentation hinsichtlich der prognostizierten korrigierten Grenzlagen inkl. einer Aussage bzgl. der Erreichung der Toleranz-Zielwerte kann hier verortet werden. Sowohl bei Nichterreichen als auch bei Erreichen der Toleranz-Zielwerte kann diese dann beispielsweise Grundlage für dazugehörige Grenzlagenuntersuchungen oder für das Ableiten entsprechender Maßnahmen sein.

7.3 Monadischer Produkttest hinsichtlich der vorgeschlagenen Verortung des Ansatzes innerhalb des Produktentwicklungsprozesses

Die in Abschnitt 7.2 vorgenommene Einordnung der Teilschritte des Ansatzes in das Vorgehensmodell aus den VDI-RICHTLINIEN gilt es zu bestätigen. Zu diesem Zwecke wird in diesem Abschnitt ein Produkttest, wie er für gewöhnlich im Rahmen der Marktforschung Anwendung findet, durchgeführt und ausgewertet. Das zu testende Produkt ist hierbei nicht der Ansatz per se sondern dessen vorgeschlagene Verortung innerhalb des benannten Produktentwicklungsprozesses.

Als Produkttests werden experimentelle Untersuchungen real existierender Produkte verstanden, „bei der zunächst nach bestimmten Merkmalen ausgewählte Testpersonen (i. d. R. Angehörige der Zielgruppe) unentgeltlich bereitgestellte Produkte probeweise ge- oder verbrauchen und anschließend zu ihren subjektiven Wahrnehmungen und/oder Urteilen befragt werden. Testobjekte können dabei sowohl in der Entwicklung (Prototyp) als auch bereits im Markt befindliche eigene oder Konkurrenzprodukte sein“, vgl. [232]. Eine Unterteilung des Oberbegriffs „Produkttest“ kann in drei verschiedene Verfahren erfolgen:

- Paarvergleich (Vergleich „besser“, „unentschieden“, „schlechter“ o. ä.),
- Triadischer Test(drei Produkte in Blindaufmachung, zwei davon identisch),
- Rangfolgetest (Rangreihen bilden oder exakte Bewertungen vornehmen).

In Abschnitt 7.3.1 wird der gewählte Produkttest respektive das gewählte Produkttestverfahren im Sinne eines „Qualitativen Evaluationstests auf Expertenbasis (Probandenstudie)“ beschrieben. Abschnitt 7.3.2 zeigt im Nachgang die vorgeschlagene Referenzlösung in Form der vollständig ausgefüllten letzten und auch einzigen Seite der Probandenstudie, auf welcher die Probanden ihre jeweilige Zuordnung dokumentieren. Zudem erfolgt in diesem Abschnitt die Auswertung der Ergebnisse der Probandenstudie.

7.3.1 Qualitativer Evaluationstest auf Expertenbasis (Probandenstudie)

Für den vorliegenden Fall erfolgt die Durchführung des monadischen¹ Produkttests über eine qualitative Probandenstudie. Als Probanden werden hierbei 15 Fachingenieure und -spezialisten eines deutschen Automobil- und Motorradherstellers, welche verschiedene Positionen in der Entwicklung und Absicherung bekleiden, ausgewählt. Als gewähltes Produkttest-Verfahren ergibt sich der Rangfolgetest, welcher über eine schriftliche Befragung mittels Fragebogen durchgeführt wird.

Wesentliche Prämissen zu den Probanden, zum Fragebogen und zu dessen Auswertung sind die Folgenden:

- Die Probanden sind mit dem PEP vertraut.
- Der Fragebogen zeigt den PEP gemäß den VDI-RICHTLINIEN.
- Die Prozessschritte sind einzeln inkl. Sortierung vorgegeben.
- Die Probanden werden aufgefordert, die Prozessschritte dem PEP zuzuordnen.
- Vor Beginn des Studie dürfen Fragen gestellt werden; während der Studie nicht.
- Alle Abweichungen von der vorgeschlagenen Verortung des Ansatzes innerhalb der Produktentwicklungsprozesses aus Abschnitt 7.2 werden gleichermaßen gewichtet (absolute Bewertung). Es erfolgt keine relative Bewertung.

Die erste Seite des Fragebogens zur Probandenstudie ist im Folgenden dargestellt. Der gesamte Fragebogen zur Probandenstudie ist in Anhang G ersichtlich.

¹ „Beim monadischen Test (Einzeltest) erhält die Testperson lediglich ein Produkt zur Beurteilung, so dass der Proband es nur durch Vergleich mit seinen Kenntnissen und Erfahrungen, nicht aber gegenüber anderen Produkten bewerten kann“, vgl. [232].

Probandenstudie hinsichtlich der Verortung des Ansatzes im PEP

Im Rahmen der Doktorarbeit von M. Ehlert wird ein virtueller Ansatz hinsichtlich einer simulationsunterstützten funktionalen Grenzlagenabsicherung vorgeschlagen. Die Teilschritte des Ansatzes werden den Schritten 1 bis 7 des Produktentwicklungsprozesses, wie in den VDI-RICHTLINIEN 2221, 2222 BLATT 1 und 2223 vorgestellt, zugeordnet. Ziel dieser Probandenstudie ist es, diese Zuordnung durch einen qualitativen Evaluationstest auf Expertenbasis zu bestätigen.

Der/die Proband(in) hat im Rahmen
dieser Studie die folgenden Aufgaben:

- 1 Machen Sie sich mit den 7 Schritten des PEPS, wie in den VDI-RICHTLINIEN 2221, 2222 BLATT 1 und 2223 beschrieben, vertraut.
- 2 Machen Sie sich mit dem vorgeschlagenen virtuellen Ansatz hinsichtlich einer simulationsunterstützten funktionalen Grenzlagenabsicherung vertraut.
- 3 Falls Sie noch Fragen haben sollten, können Sie diese nun stellen.
- 4 Bitte ordnen Sie die einzelnen Teilschritte (Sortierung ist vorgegeben) des virtuellen Ansatzes den einzelnen Schritten des PEPS selbständig zu. Mehrfachzuordnungen zu einzelnen Schritten sind möglich und notwendig.

Beginn Probandenstudie.

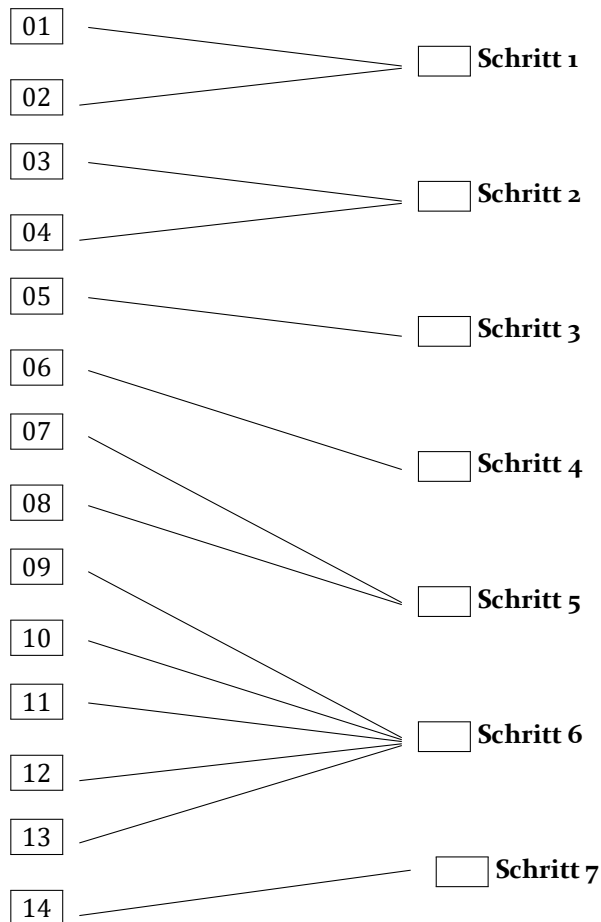
7.3.2 Referenzlösung und Ergebnis der Probandenstudie

Die einzige Seite des Fragebogens zur Probandenstudie, auf welcher die Probanden ihre jeweilige Zuordnung dokumentieren, ist, wie im Anhang G auf Seite 275 zu sehen, im Folgenden dargestellt. Hierbei sind den einzelnen Teilschritten des virtuellen Ansatzes die einzelnen Schritte des PEPS entsprechend den Ausführungen des Abschnittes 7.2 im Sinne einer Referenzlösung zugeordnet.

- 4 Bitte ordnen Sie die Teilschritte des virtuellen Ansatzes den einzelnen Schritten des PEPs selbständig zu. Mehrfachzuordnungen zu einzelnen Schritten sind möglich und notwendig.

Ansatz zur simulations-
unterstützten funktionalen
Grenzlagenabsicherung

PEP entsprechend den
VDI-RICHTLINIEN 2221,
2222 BLATT 1 und 2223



Vielen Dank für Ihre Teilnahme an der Studie.

Ende Probandenstudie.

Tabelle 43 zeigt die Ergebnisse der Probandenstudie. Für jeden der 14 Schritte ist dargestellt, wieviel Prozent der 15 Probanden der vorgeschlagenen Verortung des Ansatzes (siehe Seite 220) innerhalb der Produktentwicklungsprozesses aus Abschnitt 7.2 zustimmen. Alle Abweichungen von diesem Vorschlag werden gleichermaßen gewichtet (absolute Bewertung).

Tabelle 43: Ergebnisse der Probandenstudie

Schritte des Ansatzes	01	02	03	04	05	06	07
zugehörige Schritte des PEPs	1	1	2	2	3	4	5
Anzahl Abweichungen	0/15	0/15	0/15	2/15	0/15	1/15	1/15
Prozentuale Zustimmung	100	100	100	86,7	100	93,3	93,3
Schritte des Ansatzes	08	09	10	11	12	13	14
zugehörige Schritte des PEPs	5	6	6	6	6	6	7
Anzahl Abweichungen	0/15	2/15	2/15	0/15	0/15	2/15	0/15
Prozentuale Zustimmung	100	86,7	86,7	100	100	86,7	100

Im Ergebnis zeigt sich, dass bei 8 der 15 Schritte eine 100%-Übereinstimmung zwischen der vorgeschlagenen und der durch die Probandenstudie ermittelten Verortung des Ansatzes innerhalb der Produktentwicklungsprozesses besteht. Zwei Schritte wurden jeweils einmalig (93,3%) und vier Schritte wurden jeweils zweimalig (86,7%) anders als vorgeschlagen verortet.

Ein Trend hinsichtlich einer alternativen Verortung derjenigen Schritte, welchen nicht zu 100% zugestimmt wurde, lässt sich nicht erkennen. Die Gründe für die Abweichungen können vielfältig sein:

- Das *Wording* kann sich bei einer derartigen Probandenstudie auf die Ergebnisse auswirken.
- Eine der gesetzten Prämissen wird von einzelnen Probanden nicht erfüllt: Die Vertrautheit mit dem PEP ist nicht ausreichend gegeben.
- Verständnisprobleme hinsichtlich des vorgeschlagenen Ansatzes sind denkbar.
- Die Eignung einzelner Probanden für einen solchen Expertentest ist ggf. nicht gegeben.

Zusammenfassend lässt sich als Ergebnis dieser Probandenstudie feststellen, dass der vorgeschlagenen Verortung des Ansatzes innerhalb des Produktentwicklungsprozesses zugestimmt wird.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Das moderne Toleranzmanagement bietet dem Anwender mit seinen simulativen Ansätzen und Verfahren bereits heute eine breite Masse an Möglichkeiten hinsichtlich einer funktional sinnvollen Tolerierung bei der Entwicklung und Absicherung von Produkten. Gerade auf Bauteilebene wird durch diese ein wertvoller Beitrag geleistet, die Güte einer robusten konstruktiven Auslegung zu steigern. Mit Blick auf die Großserienproduktion von einzelnen Bauteilen und/oder komplexen Baugruppen bedingen entsprechend komplexe Anwendungen jedoch auch entsprechende Anforderungen an das Toleranzmanagement im Sinne der Gewährleistung einer zufriedenstellenden Produktqualität. Jene Produktqualität kann sich sowohl auf optische als auch auf funktionale Aspekte beziehen. Mit dem Fokus auf funktionale Absicherungsaspekte einer Großserienproduktion setzt an dieser Stelle die in den vorangegangenen Kapiteln vorgestellte Arbeit an.

Die Interaktion von abweichungsbehafteten Bauteilen führt im Kontext einer gesamthaft betrachteten Baugruppe dazu, dass diese in Folge der Serienfertigung gewissen geometrischen Schwankungen gegenüber der konzipierten Nominalgestalt unterworfen ist. Diese Schwankungen sind in Abhängigkeit der Größe ihrer Ausprägung für den Kunden aber auch für den Hersteller als kritisch hinsichtlich der Einhaltung der angesprochenen funktionalen und optischen Kriterien anzusehen. Die Ausprägungen dieser Schwankungen wiederum sind sowohl durch die konzipierte Nenngeometrie als auch unter anderem durch das Zusammenspiel der in Realität in Form und Lage abweichungsbehafteten Geometrien beeinflusst. Bezogen auf konkrete Schließmaße zwischen Bauteilen einer Baugruppe werden deren minimale bzw. maximale Ausprägungen in Abhängigkeit definierter Wahrscheinlichkeitsniveaus im Kontext einer Toleranzrechnung als Grenzlagen bezeichnet.

Das Verständnis bezüglich der Ausbildung dieser Grenzlagen bildet den Kern dieser Arbeit. Es ist das Ziel, eine Methodik zur Vorhersage funktionsrelevanter Grenzlagen durch einen simulationsunterstützten Ansatz zu erarbeiten – insbesondere für Systeme, die nichtlinearen Effekten unterliegen. Diese soll in der Folge einen Beitrag dazu leisten, die konstruktive Auslegung abweichungsbehafteter und nicht ideal starrer Baugruppen robuster zu gestalten.

Für den gewählten Demonstrator Fahrzeugeinstieg wird die Ausbildung funktionaler Schließmaße zwischen Seitenrahmen und Tür untersucht, sowohl zum Zwecke einer Prognose hinsichtlich der Ausprägungen auftretender Grenzlagen als auch zur Absicherung kundenwertiger funktionaler Kriterien (hier: Dichtigkeit). Vor diesem Hintergrund wird ein Simulationsansatz

vorgestellt und einmalig experimentell abgesichert respektive validiert. In Ergänzung bestehender Ansätze befasst sich dieser in seinen Grundzügen mit der Erarbeitung eines Kopplungsansatzes zur Überlagerung der Ergebnisse einer „starren“ CAT-Toleranzberechnung mit denen korrespondierender FEM-Simulationen zur Prognose auftretender extremaler Toleranzsituationen.

Wesentliche Prozessschritte bezeichnen hierbei ...

- ... die Durchführung einer statistischen Toleranzrechnung unter Zuhilfenahme des CAT zur Ableitung einer „starren“ Grenzlagenaussage,
- ... die zweckmäßige Nutzung der Methoden der statistischen Versuchsplanung (DoE) zur Minimierung der sich anschließenden sowohl simulativen als auch experimentellen Aufwände,
- ... die Durchführung von FEM-Simulationen auf Basis der statistischen Versuchsplanung zur Einbeziehung elastischer und nichtlinearer Effekte zur Ableitung einer „elastischen“ Grenzlagenaussage,
- ... die Durchführung von Robustheitsuntersuchungen basierend auf den erfolgten FEM-Simulationen zur probabilistischen funkt. Grenzlagenabsicherung sowie
- ... die Wahl und Adaption einer geeigneten Kopplungsstrategie zur Abgabe einer belastbaren Prognose bzgl. der real auftretenden extremalen Toleranzsituationen (Grenzlagen) an den betrachteten Schließmaßen.

Im Sinne der einmaligen Validierung des Simulationsansatzes befassen sich wesentliche Teile der vorgestellten Arbeit zudem mit ...

- ... der begleitenden Durchführung von Experimenten zur Qualifizierung der Simulationsrandbedingungen, bspw. hinsichtlich verwendeter Materialparameter und dem nichtlinearen Materialverhalten,
- ... der Konstruktion und Qualifizierung eines geeigneten Prüfstandaufbaus,
- ... der Durchführung von Grenzlagenuntersuchungen am Prüfstandsaufbau entsprechend den virtuellen Vorarbeiten sowie
- ... der Durchführung von Korrelationsuntersuchungen zwischen Simulation und Experiment zur Generierung von Aussagen hinsichtlich der Belastbarkeit der Simulationsergebnisse.

Bezugnehmend auf die in Kapitel 3 benannten Handlungsbedarfe, soll auf deren Umsetzung im Folgenden noch einmal in zusammengefasster Form eingegangen werden.

- *Auf Basis der Toleranzberechnungsergebnisse einer ideal starren Grenzlagenermittlung für ausgewählte Schließmaße ist eine Möglichkeit zur Überführung jener in ein FEM-Simulationsmodell darzustellen.*

Die Abschnitte 4.5.1 und 4.5.3 beschreiben die Grenzlagenermittlung auf Basis einer sowohl starren als auch elastischen Toleranzrechnung. Bindeglied sind die Inhalte des Abschnittes 4.5.2 zur Ableitung einer geeigneten statistischen Versuchsplanung.

Konkret bedeutet dies, dass im ersten Schritt die starren Grenzlagenergebnisse einer CAT-Simulation unter Verwendung der Toleranzsimulationssoftware 3DCS Variation Analyst (3DCS) ermittelt werden. Im anschließenden zweiten Schritt wird auf Basis dieser funktionsrelevanten Grenzlagen eine geeignete statistische Versuchsplanung abgeleitet, welche bei minimalem Aufwand den größtmöglichen Erfüllungsgrad hinsichtlich der Erreichung aller Grenzlagen für den betrachteten Demonstrator liefert. Als abschließender dritter Schritt beschreibt die Umsetzung der FEM-Simulationen auf Basis genannter Vorleistungen. Teilaspekte dieses Schrittes thematisieren die begleitende Durchführung sowohl von Experimenten zur Qualifizierung der Simulationsrandbedingungen, bspw. hinsichtlich verwendeter Materialparameter und dem nichtlinearen Materialverhalten, als auch von Montage- und Schließsimulation. Grundlegend bildet die Montagesimulation den Appliziervorgang der Dichtebenen mit dem Ziel ab, die durch das Aufbringen entstehenden Deformationen der Dichtungen einer nachgeschalteten Schließsimulation als *Input*-Größen zur Verfügung zu stellen. Die Schließsimulation verfolgt das Ziel, den Verformungszustand der als Folge der Montagesimulation bereits deformierten Dichtebenen als Folge des Türschließprozesses realitätsnah abzubilden.

- *Eine geeignete Strategie zur Kopplung dieser Ergebnisse mit denen einer korrespondierenden FEM-Simulation zur Ermittlung korrigierter Grenzlagenaussagen ist zu ermitteln.*

Abschnitt 4.5.4 beschäftigt sich mit der Wahl einer Kopplungsmethodik zur Berücksichtigung von Nachgiebigkeiten in der Toleranzrechnung. In einem ersten Schritt werden abgeleitete Ansätze, basierend auf den Ausführungen des Abschnittes 2.3.4, vorgestellt. Im Anschluss erfolgt ein qualitativer Vergleich dieser Ansätze unter Nennung der Vor- und Nachteile der einzelnen Herangehensweisen. Diesem schließt sich eine Fallstudie am Demonstrator auf Basis der funktionalen Qualitätskriterien des Produkts

an. Jene resultiert in einem quantitativen Vergleich der Ansätze, der die Frage, welcher der Ansätze sich für das Simulationskonzept am besten eignet, folgendermaßen beantwortet: Das als „Ansatz C: Grenzlagenbasierte Superposition der Ergebniswerte“ beschriebene Vorgehen ist einerseits aufgrund der direkten numerischen Superposition der Quelldaten, andererseits aufgrund der Erhaltung der Charakteristik der Verteilungsform des betrachteten Schließmaßes über die Simulationskette hinweg sowie aufgrund der angestellten Bewertung als zielführend anzusehen.

- *Robustheitsuntersuchungen basierend auf den gekoppelten Simulationsergebnissen hinsichtlich des probabilistischen Einflusses einzelner Beitragsleister auf das Grenzlagenergebnis müssen möglich sein.*

In Abschnitt 4.5.5 werden die Robustheitsuntersuchungen für die probabilistische funktionale Grenzlagenabsicherung durchgeführt.

Zunächst erfolgt die Ermittlung der Eingangsparameter für eben jene inkl. korrespondierender Kennwerte auf Basis eines erarbeiteten ISHIKAWA-Diagramms bzgl. der Einflussfaktoren auf die Dichtheit am Fahrzeuginstieg.

Zur Durchführung der stochastischen Versuchsplanung für höherdimensionale Entwurfsräume hat sich hier das „LATIN HYPERCUBE-SAMPLING“ als geeignet herausgestellt. Der Fokus liegt bei den Untersuchungen einerseits darauf, die Unabhängigkeit der Eingangsparameter zu bestätigen. Andererseits wird gezeigt, dass die vorgegebenen Toleranzbereiche bei allen Parametern vollständig belegt sind. Dies wiederum „gewährleistet, dass alle zur Erstellung der Antwortflächen notwendigen Stützstellen berechnet werden können“, vgl. [S4].

- *Die Ergebnisse des zu erarbeitenden Ansatzes bzgl. einer simulationsunterstützten funktionalen Grenzlagenabsicherung sind an einem geeigneten Demonstrator experimentell zu validieren.*

Kapitel 5 beschreibt die experimentelle Validierung des Ansatzes am Demonstrator. Nachdem Zielsetzung und Anforderungen an einen geeigneten Prüfstand definiert werden, erfolgt die technisch-wirtschaftliche Bewertung daraus abgeleiteter Prüfstandkonzepte. Mit der Auswahl des favorisierten Prüfstandkonzeptes wird dessen Umsetzung und Inbetriebnahme inklusive der unverzichtbaren Wiederholgenauigkeits- und Reproduzierbarkeits-Studien im Rahmen eben dieser dokumentiert. Die Ergebnisse der experimentellen Grenzlagenuntersuchungen werden den virtuellen Ergebnissen im sich anschließenden Kapitel 6 gegenübergestellt.

Ein Vergleich der Ergebnisse aus Simulation und Experiment zeigt, dass der gekoppelte Simulationsansatz zielführend ist. Die Auswertung virtueller und experimenteller taktiler Messergebnisse durch Korrelationsuntersuchungen bestätigt den Einfluss elastischer und nichtlinearer Effekte auf das Systemverhalten. Die schließmaßbezogene Ausbildung extremer Toleranzlagen (Grenzlagen) einer Baugruppe als Folge abweichungsbehafteter und interagierender Bauteile kann genauer prognostiziert werden.

- *Die Übertragbarkeit der Methodik auf weitere Anwendungsfälle bzw. Systeme ist durch eine Verortung des erarbeiteten Ansatzes innerhalb des Produktentwicklungsprozesses vorzubereiten.*

In Kapitel 7 wird die Integration der simulationsunterstützten funktionalen Grenzlagenabsicherung in den Produktentwicklungsprozess thematisiert. Die Entscheidung hinsichtlich der Wahl eines Produktentwicklungsprozessmodells fällt zugunsten des in der VDI-RICHTLINIE 2221 beschriebenen methodischen Vorgehens aus. Nachdem dieses vorgestellt wird, erfolgt die Einordnung des im Rahmen dieser Arbeit entstandenen Ansatzes in dieses Produktentwicklungsprozessmodell. Im letzten Abschnitt dieses Kapitels wird diese vorgeschlagene Verortung durch einen qualitativen Evaluationstest auf Expertentest (Probandenstudie) bestätigt. Eine Voraussetzung zur Übertragbarkeit der Methodik ist folglich geschaffen.

Als Fazit kann festgestellt werden, dass das Ziel, eine Methodik zur Vorhersage funktionsrelevanter Grenzlagen durch einen simulationsunterstützten Ansatz abzuleiten – insbesondere für Systeme, die nichtlinearen Effekten unterliegen, insofern erreicht wurde, als dass diese an einem Demonstrator aus der Automobilindustrie sowohl angewendet als auch validiert werden konnte. Das in dieser Arbeit vorgestellte Vorgehen unterstützt im Rahmen des Toleranzmanagements die Bildung eines gesteigerten Verständnisses für die beeinflussenden und interagierenden Beitragsleister hinsichtlich der Ausbildung funktionaler Grenzlagen abweichungsbehafteter und nicht ideal starrer Baugruppen. In der Anwendung können für den Entwicklungs- und Absicherungsprozess folglich frühzeitig Erkenntnisse zum Erhalt und zur Steigerung der Produktqualität abgeleitet werden. Entsprechend frühzeitige Erkenntnisse unterstützen zudem die Senkung des Kostenniveaus aufwendiger Entwicklungen – einerseits durch das rechtzeitige Ableiten geeigneter Maßnahmen und andererseits durch das einhergehende Vermeiden von Fehlern.

Weiterführende Forschungsarbeiten können an dieser Stelle noch weitere wertvolle Beiträge leisten. Denkbar wären:

- **Zeitlich effizientere Robustheitsuntersuchungen**

Hinsichtlich der Datenmengen und des damit einhergehenden Zeitbedarfs bei der Ergebnisgenerierung und -auswertung wäre es sinnvoll, im Kontext der Sensitivitätsanalysen inkl. zugehöriger Auswertungen weitere Forschungsaktivitäten anzusetzen. Um auch kurzfristig im Sinne einer konstruktionsbegleitenden Parameterstudie aussagefähig zu sein, könnten Forschungsaktivitäten hinsichtlich einer verstärkten Automatisierung und Parallelisierung der Prozesse bei den Sensitivitätsbewertungen dieses Bestreben unterstützen, tagesaktuelle und belastbare Aussagen zu kreieren.

- **Grenzlagenvisualisierungen**

Wie bereits im Jahre 2011 durch STUPPY in [170] unter dem Stichwort „Ergebnisdarstellung“ festgestellt, ist beim Thema Visualisierung von Toleranzlagen durchaus noch Forschungsbedarf. Gerade durch konsequent steigende und verfügbare Rechenleistungen und -kapazitäten, sind 3D-*High-End*-Visualisierungen heutzutage keine fiktiven Szenarien mehr. In Kombination mit Konstruktionsmodellen, mit denen sich als Folge einer Toleranzrechnung auch abweichungsbehaftete Zustände abbilden lassen, wäre dem Anwender ein wirkungsvolles Hilfsmittel bei der Beurteilung optischer Grenzlagen, gegebenenfalls gar in Zusammenspiel mit *Virtual-Reality*-Anwendungen, gegeben. Gerade dann, wenn sich diese Grenzlagenbetrachtungen nicht nur auf vereinzelte Schließmaße sondern auch auf umliegende Geometriemerkmale erstrecken würden und damit eine gesamthafte virtuelle Beurteilung der Toleranzsituation zuließen, wäre ein echter Mehrwert gegeben.

9 Summary and Outlook

The modern dimensional management with its simulative approaches and processes already offers the user a wide range of options with regard to a functionally meaningful tolerance when developing and securing products. At component level in particular, this makes a valuable contribution to increasing the quality of a robust design. With regard to the large-scale production of individual components and/or complex assemblies, however, correspondingly complex applications also impose corresponding requirements on dimensional management in terms of ensuring satisfactory product quality. That product quality can relate to both optical and functional aspects. The work presented in the previous chapters focuses on the functional safeguarding aspects of a large-scale production.

The interaction of components subject to deviations in the context of an assembly considered as a whole means that, as a result of series production, it is subject to certain geometric fluctuations compared to the designed nominal shape. Depending on the size of their characteristics, these fluctuations are to be regarded as critical for the customer but also for the manufacturer with regard to compliance with the functional and optical criteria mentioned. The characteristics of these fluctuations are in turn influenced both by the designed nominal geometry and, among other things, by the interplay of the geometries, which in reality deviate in shape and position. In relation to concrete key product characteristics between components of an assembly, their minimum or maximum characteristics depending on defined probability levels are referred to as limiting positions in the context of a tolerance calculation.

The understanding of the formation of these limiting positions forms the core of this work. The aim is to develop a methodology for predicting functionally relevant limiting positions using a simulation-supported approach – especially for systems that are subject to non-linear effects. As a result, this should make a contribution to making the constructive design of deviating and not ideally rigid assemblies more robust.

For the chosen demonstrator (automotive door assembly), the formation of functional key product characteristics between the side frame and door is examined, both for the purpose of forecasting the occurrence of limiting positions and for ensuring customer-specific functional criteria (here: tightness). Against this background, a simulation approach is presented and experimentally verified, respectively, validated once. In addition to existing approaches, the main focus of this work is the development of a coupling approach for superimposing the results of a “rigid” CAT tolerance calculation with the corresponding FEM simulations to predict extreme tolerance situations.

Significant process steps denote here ...

- ... the implementation of a statistical tolerance calculation with the help of CAT to derive a “rigid” limiting position statement,
- ... the appropriate use of the methods in the statistical Design of Experiments (DoE) to minimize the subsequent, both simulative and experimental efforts,
- ... the implementation of FEM simulations based on the statistical Design of Experiments to include elastic and non-linear effects to derive an “elastic” limiting position statement,
- ... the implementation of robustness tests based on the FEM simulations for a probabilistic functional limiting position safeguarding as well as
- ... the selection and adaptation of a suitable coupling approach for the delivery of a reliable forecast regarding the real occurring extreme tolerance situations (limiting positions) at the considered key product characteristics.

With the aim of a one-time validation of the simulation approach, essential parts of the presented work also deal with ...

- ... the accompanying implementation of experiments to qualify the simulation boundary conditions, e.g. with regard to the material parameters used and the non-linear material behavior,
- ... the construction and qualification of a suitable test bench,
- ... the implementation of limiting position investigations on the test bench in accordance with the virtual preparatory work as well as
- ... the implementation of correlation studies between simulation and experiment to generate statements regarding the resilience of the simulation results.

With reference to the need for action named in chapter 3, their implementation will be summarized again below.

- *On the basis of the tolerance calculation results of ideally rigid limiting positions for selected key product characteristics, a possibility for transferring them into a FEM simulation model has to be presented.*

The sections 4.5.1 and 4.5.3 describe the determination of the limiting position on the basis of a rigid and elastic tolerance calculation. The link is the content of the section 4.5.2 to derive a suitable statistical Design of Experiments.

Specifically, this means that the rigid limiting position results of a CAT simulation are determined in the first step using the tolerance simulation software 3DCS Variation Analyst (3DCS). In the subsequent second step,

a suitable statistical Design of Experiments is derived on the basis of these functionally relevant limiting positions, which provides the greatest possible degree of fulfillment with regard to reaching all limiting positions for the demonstrator under consideration with minimal effort. The final third step describes the implementation of the FEM simulations based on the aforementioned preliminary work. Partial aspects of this step address the accompanying implementation of experiments to qualify the simulation boundary conditions, e.g. with regard to the material parameters used and the non-linear material behavior, as well as assembly and door closing simulation. Basically, the assembly simulation depicts the application process of the sealing levels with the aim of making the resulting deformations of the sealings available to a downstream door closing simulation as input quantities. The door closing simulation pursues the goal of realistically reproducing the state of deformation of the sealing levels (which are already deformed as a result of the assembly simulation) as a result of the door closing process.

- *A suitable strategy to couple these results with corresponding FEM simulation results to determine corrected limiting positions needs to be determined.*

Abschnitt 4.5.4 deals with the choice of a coupling methodology to take into consideration both elasticities and a possible non-linear system behavior in the tolerance calculation. In a first step, derived approaches based on the explanations of section 2.3.4 are presented. This is followed by a qualitative comparison of these approaches, stating the advantages and disadvantages of the individual approaches. This is followed by a case study on the demonstrator based on the functional quality criteria of the product. This results in a quantitative comparison of the approaches, which answers the question of which of the approaches is best suited for the simulation concept as follows: On the one hand, the procedure described as “Approach C: Limiting position-based direct source superposition” is due to the direct numerical superposition of the source data, on the other hand, due to the preservation of the characteristic of the distribution form of the considered key product characteristic across the simulation chain as well as due to the assessment carried out to be considered as expedient.

- *Robustness studies based on the coupled simulation results with regard to the probabilistic influence of individual contributors on the limiting position result must be possible.*

In section 4.5.5 the robustness tests for the probabilistic functional limiting position verification are carried out.

First of all, the input parameters for those incl. corresponding characteristic values are determined on the basis of a developed ISHIKAWA diagram with regard to the factors influencing the tightness at the automotive door assembly.

LATIN HYPERCUBE SAMPLING has been shown to be suitable for carrying out the stochastic Design of Experiments for higher-dimensional design spaces. The focus of the investigations is on the one hand to confirm the independence of the input parameters. On the other hand, it is shown that the specified tolerance ranges are fully occupied for all parameters. This, in turn, “ensures that all the support points required to create the response surfaces can be calculated”, see [S4].

- *The results of the approach to be developed with regard to a simulation-supported functional limiting position safeguarding are to be validated experimentally on a suitable demonstrator.*

Chapter 5 describes the experimental validation of the approach on the demonstrator. After the objectives and requirements for a suitable test bench have been defined, the technical and economic evaluation of the test bench concepts derived from them takes place. With the selection of the preferred test bench concept, its implementation and commissioning, including the indispensable repeatability and reproducibility studies, are documented within the framework of this. The results of the experimental limiting position investigations are compared with the virtual results in the following chapter 6.

A comparison of the results from simulation and experiment shows that the coupled simulation approach is expedient. The evaluation of virtual and experimental tactile measurement results by correlation studies confirms the influence of elastic and non-linear effects on the system behavior. The key product characteristic related formation of extreme tolerance positions (limiting positions) of an assembly as a result of deviating and interacting components can be predicted more precisely.

- *The transferability of the methodology to other use cases or systems must be prepared by locating the developed approach within the product development process.*

Chapter 7 deals with the integration of the simulation-supported functional limiting position safeguarding in the product development process.

The decision regarding the choice of a product development process model is in favor of the methodical procedure described in the VDI GUIDELINE 2221. After this is presented, the approach developed in the context of this work is classified in this product development process model. In the last

section of this chapter, this proposed location is confirmed by a qualitative evaluation test based on an expert test (subject study). A prerequisite for the transferability of the methodology is therefore created.

In conclusion, it can be stated that the goal of deriving a methodology for predicting functionally relevant limiting positions through a simulation-supported approach – especially for systems that are subject to non-linear effects – was achieved in that they are both applied and validated on a demonstrator from the automotive industry. In the context of dimensional management, the procedure presented in this work supports the formation of an increased understanding for the influencing and interacting contributors with regard to the formation of functional limiting positions of deviating and not ideally rigid assemblies. As a result, knowledge about how to maintain and improve product quality can be derived early in the application for the development and validation process. Appropriate early knowledge also helps to lower the cost level of complex developments – on the one hand by taking appropriate measures in good time and on the other hand by avoiding accompanying mistakes.

Further research work can make further valuable contributions here. The following would be conceivable:

- **Robustness tests that are more efficient in terms of time**

With regard to the amount of data and the associated time required for generating and evaluating the results, it would make sense to start further research activities in the context of the sensitivity analyzes including the associated evaluations. With the aim of being informative at short notice in the sense of a design-accompanying parameter study, research activities with regard to increased automation and parallelization of the processes in the sensitivity assessments could support this endeavor to create up-to-date and reliable statements.

- **Limiting position visualizations**

As already stated in 2011 by STUPPY in [170] under the heading “Presentation of results”, research on the subject of tolerance situation visualization is still in need of research. Because of consistently increasing and available computing power and capacities, 3D *High-End* visualizations are no longer fictional scenarios. In combination with design models, which can also be used to map deviating states (as a result of a tolerance calculation), the user would be given an effective aid when assessing optical limiting positions, possibly even in conjunction with *Virtual Reality* applications. There would be real added value, especially if these considerations of the limiting positions would not only extend to individual key product characteristics but also to surrounding geometric features and thus allow an overall virtual assessment of the tolerance situation.

Anhang

Anhang A: Ergänzungen zu Kapitel 1

PKW-Sektor: Verkaufszahlen namhafter internationaler Automobilhersteller aus den Jahren 2009 bis 2015

Tabelle 44 zeigt die Verkaufszahlen namhafter internationaler Automobilhersteller aus den Jahren 2009 bis 2015, bezogen auf produzierte Personenkraftwagen (PKW's)^{1,2}, wie sie in Bild 1 (Kapitel 1) dargestellt sind.

Tabelle 44: Verkaufte Fahrzeuge internationaler Automobilhersteller im Vergleich

Marke	2009	2010	2011	2012	2013
Audi	932'260	1'150'018	1'302'981	1'469'205	1'608'048
BMW	1'258'417	1'481'253	1'738'160	1'861'826	2'006'366
Ford	4'817'000	5'524'000	5'695'000	5'668'000	6'330'000
GM	7'477'000	8'385'000	9'024'000	9'297'000	9'722'000
GME	1'668'000	1'663'000	1'751'000	1'611'000	1'393'000
MB	1'093'905	1'276'827	1'381'416	1'451'569	1'565'563
Toy.	7'567'000	7'237'000	7'308'000	7'352'000	8'871'000
VW	6'054'829	7'357'505	8'494'280	9'255'384	9'727'848

Marke	2014	2015
Audi	1'804'624	1'830'334
BMW	2'165'566	2'279'503
Ford	6'321'000	6'674'000
GM	9'925'000	9'958'000
GME	1'256'000	1'176'000
MB	1'722'561	2'001'438
Toy.	9'116'000	8'972'000
VW	10'212'562	10'017'191

in 1

In dieser Tabelle werden die folgenden Abkürzungen für die jeweiligen Fahrzeugmarken verwendet:

- Audi ... Audi Aktiengesellschaft,
- BMW ... Bayerische Motoren Werke Aktiengesellschaft,
- Ford ... Ford Motor Company,
- GM ... General Motors Company,
- GME ... General Motors Company Europe,
- MB ... Daimler Aktiengesellschaft,
- Toy. ... Toyota Motor Corporation,
- VW ... Volkswagen Aktiengesellschaft.

Als Quellen für diese Verkaufszahlen werden die Geschäftsberichte/*Annual Reports* der jeweiligen Automobilhersteller herangezogen, vgl. [1] bis [43].

Anhang B: Ergänzungen zu Kapitel 2

Quantile der kumulativen Verteilungen

In Tabelle 45 sind die Quantile $t_{f,p_{\alpha\beta}}$ der KUMULATIVEN t -VERTEILUNG sowohl für ausgewählte Freiheitsgrade f als auch für festgelegte Irrtumswahrscheinlichkeiten $\alpha = 0.05 \hat{=} 5\%$ und $\beta = 0.15 \hat{=} 15\%$ (für einen Fehler erster/zweiter Art) dargestellt.

Tabelle 45: Quantile der KUMULATIVEN t -VERTEILUNG (Auszug), vgl. bspw. [113, Tabelle 12] und [110, Tabelle 21]

Anz. d. FHG's f $f = n - 1$	Prüfgröße p der Irrtumswahrscheinlichkeiten α und β	
	$p_{\alpha} = 1 - \alpha = 0,975$	$p_{\beta} = 1 - \beta = 0,85$
$f = 19$	2.09302405	1.06550740
$f = 29$	2.04522964	1.05530225
$f = 39$	2.02269092	1.05039949
$f = 49$	2.00957524	1.04751895
$f = 59$	2.00099538	1.04562344
$f = 74$	1.99254350	1.04364927
$f = 99$	1.98421695	1.04189076
$f = 149$	1.97601318	1.04005302
$f = 199$	1.97195654	1.03914118
$f = 239$	2.0319	1.0350
$f = 249$	1.96953687	1.03859631
$f = 299$	1.96792967	1.03823399
$f = 319$	1.967428387	1.038120914
$f = 349$	1.96678456	1.03797564
$f = 698$	1.93368455	1.037203938
$f = 699$	1.963363576	1.037202835

In Tabelle 46 sind die Quantile $\chi_{f,p}^2$ der KUMULATIVEN χ^2 -VERTEILUNG sowohl für ausgewählte Freiheitsgrade f als auch für das festgelegte Signifikanzniveau/die gewählte Irrtumswahrscheinlichkeit für einen Fehler erster Art $\alpha = 0.05$ dargestellt.

Tabelle 46: Quantile der KUMULATIVEN χ^2 -VERTEILUNG (Auszug), vgl. bspw. [113, Tabelle 8] und [110, Tabelle 22]

Anz. d. FHG's f $f = n - 1$	Untere (c_u)/Obere (c_o) Grenze von χ^2 $c_u(p_1 = 0 + \alpha/2 = 0.025)$ $c_o(p_2 = 1 - \alpha/2 = 0.975)$
$f = 19$	8.906516 32.852327
$f = 29$	16.047072 45.722286
$f = 39$	23.654325 58.120060
$f = 49$	31.554916 70.222414
$f = 59$	39.661859 82.117406
$f = 74$	52.102829 99.678349
$f = 99$	73.361080 128.421989
$f = 149$	117.097983 184.686955
$f = 199$	161.826182 239.959682
$f = 249$	207.185595 294.600822
$f = 299$	252.992448 348.794337
$f = 349$	299.137889 402.649159

Anhang C: Ergänzungen zu Kapitel 3

Für das Kapitel 3 gibt es keinen spezifischen Anhang.

Anhang D: Ergänzungen zu Kapitel 4

Ergänzungen zu Abschnitt 4.5.2: Nutzwertanalyse

Die nachfolgenden Ausführungen beschreiben Teile der Erkenntnisse, welche durch ROHLING im Rahmen dieser Arbeit entstanden, vgl. [S2].

Als Werkzeug zur Wahl eines geeigneten Versuchsplantypes wird die sogenannte Nutzwertanalyse gewählt. Die Bewertung von Handlungsalternativen, welche nach bestimmten qualitativen Eigenschaften analysiert werden, erfolgt hierbei unter Einbindung von Expertenwissen. „Für die Bewertung der Versuchspläne wird eine Skala von eins (...) bis zehn (...) herangezogen, mit welcher die relevanten Kriterien beurteilt werden. Als am besten geeignete Methode ist jene auszuwählen, welche bei Addition aller gewichteten Bewertungsgrößen den höchsten Nutzwert der Handlungsalternative bietet“, vgl. [S2]. Als relevante Kriterien wurden die Folgenden durch Expertenbefragungen identifiziert:

- Variable Parameteranzahl
(beliebig viele Einfluss- und Zielgrößen definierbar),
- Möglichst geringer Versuchsumfang
(ausgehend von zehn Einflussfaktoren),
- Auswertbarkeit von Wechselwirkungen möglich,

- Möglichkeit, Faktorkombinationen auszuschließen bzw. einzugrenzen,
- Möglichst geringer Planungsaufwand.

Eine Bewertung dieser Kriterien durch eben jene Experten analog genannter Bewertungslogik führt zu dem Ergebnis, welches in Tabelle 47 dargestellt ist. Eine Randbedingung hierbei ist die Folgende:

- Für alle Arten an Versuchsplänen könnten grundlegend beliebig viele Faktoren bzw. Parameter verwendet werden. Als Versuchsumfang werden hier jedoch sechs Faktoren (Schließmaße) mit jeweils zwei Faktorstufen angenommen (UGL und OGL) und bewertet.

Tabelle 47: Nutzwertanalyse der Versuchspläne, vgl. [S2, Tab. 18], eigene Darstellung

	Gewichtungsvektor in %	Vollfaktorieller VP		Teilfaktorieller VP		Plackett-Burman VP		zentral zusammen- gesetzter VP		Box-Behnken-VP		Taguchi VP		D-Optimaler VP	
		Erfüllungsgrad	Nutzwert	Erfüllungsgrad	Nutzwert	Erfüllungsgrad	Nutzwert	Erfüllungsgrad	Nutzwert	Erfüllungsgrad	Nutzwert	Erfüllungsgrad	Nutzwert	Erfüllungsgrad	Nutzwert
Parameteranzahl	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Versuchsumfang	50	1	5	8	40	9	45	1	5	3	15	9	45	9	45
Auswertung von Wechselwirkungen	15	10	15	0	0	4	6	4	6	6	9	0	0	10	15
Einschränkungen von Faktorkombinationen	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	20
Planungsaufwand	5	8	4	8	4	8	4	8	4	8	4	8	4	4	2
Summe Nutzwert		34		54		65		25		38		59		92	

Im Nutzwert-Ergebnis zeigt sich, dass ein vollfaktorieller statistischer Versuchsplan mit 64 Versuchen als nicht zielführend ausgeschlossen werden kann. Auch zentral zusammengesetzte statistische Versuchspläne (76 Versuche) und das Box-Behnken-Design (48 Versuche) sind auszuschließen. Teilfaktorielle (8 Versuche), Plackett-Burman- (12 Versuche) und Taguchi-Versuchspläne (8 Versuche) hingegen zeigen durch ein höheres Ergebnis eine verbesserte Eignung. Eine klare Dominanz zeigt jedoch der D-Optimale statistische Versuchsplan bei einem Nutzwert von 92 aus 8 Versuchen. Dieses Ergebnis begründet sich mit durch die Möglichkeiten eines D-Optimalen Versuchsplans, Einschränkungen zwischen den Faktoren vornehmen oder auch bestimmte Faktorkombinationen ausschließen zu können.

Die Empfehlung aus dieser Vorarbeit lautet folglich, einen D-Optimalen statistischen Versuchsplan im Rahmen dieser Arbeit zu erstellen.

Ergänzungen zu Abschnitt 4.5.3

Entsprechend den Ausführungen von Abschnitt 4.5.3 zeigen die nachfolgenden Tabellen die FEM-Simulationsergebnisse aller Sensoren an den Messstellen. Die jeweilig 1. Spalte zeigt das initiale Messergebnis des Sensors zu Beginn der FEM-Untersuchung entsprechend der ausgewählten Zeile des statistischen Versuchsplans. Die jeweilig 2. Spalte zeigt den korrespondierenden Messwert nach Montage- und Schließsimulation sowie unter Berücksichtigung der Materialitäten und Kontaktsituationen. Es sind diejenigen Zellen farblich markiert, deren Messwerte die aus der CAT-Simulation prognostizierte untere Grenzlage (UGL) unterschreiten (hellgrau) oder obere Grenzlage (OGL) überschreiten (dunkelgrau). Zum direkten Vergleich sind diese „starren“ Grenzlagergebnisse nochmals im oberen Teil der Tabelle ersichtlich. Die jeweilig 3. Spalte zeigt den Unterschied zwischen den ersten beiden Spalten. Die hell- und dunkelgrau eingefärbten Zellen heben hierin die extremsten Änderungen hervor.

In Tabelle 55 sind die nominal höchsten relativen Über- und Unterschreitungen der starren oberen respektive unteren Grenzlagen für die betrachteten Sensormessstellen/Schließmaße auf Grundlage der Ergebnisse der elastischen Grenzlagenberechnungen aus den Tabellen 48 bis 54 dargestellt:

- Mit **grauer Schriftfarbe** geschriebene Werte bezeichnen diejenigen Messstellen, an welchen das obere/untere Grenzlagergebnis der starren Toleranzsimulation nicht über- oder unterschritten wurde.
- Die in Summe größten Über- und Unterschreitungen der starren oberen respektive unteren Grenzlagen für die betrachteten Sensormessstellen/Schließmaße sind mit **fetter Schrift** bei Sensor 17 hervorgehoben.

Tabelle 48: Ergebnisse der elastischen Grenzlagenberechnungen für die betrachteten Messstellen 1, 2 und 3

KPC	1			2			3		
UGL	17,61			17,56			17,13		
OGL	19,59			19,64			20,07		
DoE	Anf.	FEM Ende	Δ	Anf.	FEM Ende	Δ	Anf.	FEM Ende	Δ
1	19,654	19,461	-0,192	19,840	19,674	-0,166	20,879	20,981	0,102
2	17,378	17,232	-0,146	18,947	18,824	-0,122	19,249	19,404	0,155
3	19,913	19,671	-0,241	20,017	19,936	-0,081	19,358	19,810	0,452
4	19,283	19,085	0,198	19,265	19,147	0,118	18,941	19,191	-0,250
5	19,557	19,356	-0,201	18,089	17,942	-0,146	19,488	19,780	0,292
6	17,622	17,450	-0,172	19,128	19,073	-0,055	18,510	18,876	0,367
7	19,419	19,199	-0,220	17,718	17,646	-0,072	17,650	18,160	0,510
8	17,665	17,489	0,176	17,757	17,634	0,123	18,995	19,308	-0,313
9	17,772	17,577	-0,195	19,483	19,380	-0,103	19,537	19,827	0,290
10	17,926	17,694	-0,232	17,932	17,918	-0,014	17,459	18,186	0,727
11	17,295	17,113	-0,182	17,178	17,130	-0,048	17,017	17,538	0,521
		<UGL min			<UGL min			<UGL min	
			-0,241			-0,166			-0,313
		>OGL max			>OGL max			>OGL max	
			0,198			0,123			0,727

in mm

Tabelle 49: Ergebnisse der elastischen Grenzlagenberechnungen für die betrachteten Messstellen 4, 5 und 6

KPC	4			5			6		
UGL	17,23			17,50			17,71		
OGL	19,97			19,70			19,49		
DoE	Anf.	FEM Ende	Δ	Anf.	FEM Ende	Δ	Anf.	FEM Ende	Δ
1	20,729	21,255	0,526	20,441	20,816	0,374	19,827	20,529	0,702
2	20,296	20,784	0,488	20,081	20,373	0,292	20,719	21,217	0,497
3	18,879	19,940	1,060	17,955	18,702	0,747	17,744	18,845	1,101
4	19,827	20,539	-0,712	18,954	19,443	-0,489	19,272	20,049	-0,777
5	18,967	19,696	0,729	19,514	20,046	0,533	18,619	19,509	0,890
6	19,245	20,051	0,807	18,706	19,210	0,504	19,710	20,425	0,715
7	18,136	19,080	0,944	17,808	18,523	0,715	18,140	19,068	0,929
8	18,649	19,382	-0,733	19,521	19,995	-0,474	19,161	19,890	-0,729
9	19,531	20,288	0,757	19,289	19,792	0,503	19,330	20,126	0,797
10	16,789	18,125	1,336	17,023	17,927	0,904	17,618	18,560	0,941
11	17,723	18,687	0,964	17,999	18,628	0,629	18,893	19,613	0,720
		<UGL min			<UGL min			<UGL min	
			-0,733			-0,489			-0,777
		>OGL max			>OGL max			>OGL max	
			1,336			0,904			1,101

in mm

Tabelle 50: Ergebnisse der elastischen Grenzlagenberechnungen für die betrachteten Messstellen 7, 8 und 9

KPC	7			8			9		
UGL	17,92			17,96			18,10		
OGL	19,28			19,24			19,10		
DoE	Anf.	FEM Ende	Δ	Anf.	FEM Ende	Δ	Anf.	FEM Ende	Δ
1	19,834	20,124	0,290	18,818	19,274	0,456	18,814	18,930	0,116
2	19,701	19,909	0,208	19,978	20,289	0,311	19,331	19,409	0,078
3	17,801	18,296	0,494	17,815	18,303	0,487	17,813	17,990	0,177
4	18,654	19,000	-0,346	18,234	18,697	-0,463	17,922	18,054	-0,132
5	19,316	19,679	0,364	18,471	18,964	0,493	18,821	18,948	0,127
6	18,727	19,048	0,321	19,725	20,142	0,417	19,279	19,391	0,112
7	18,245	18,697	0,452	18,509	19,062	0,554	18,821	18,976	0,155
8	19,302	19,613	-0,311	19,373	19,778	-0,405	19,290	19,393	-0,103
9	18,736	19,079	0,343	18,832	19,291	0,459	18,333	18,457	0,124
10	17,262	17,805	0,543	18,713	19,206	0,493	18,287	18,461	0,173
11	18,105	18,489	0,384	18,817	19,262	0,445	18,396	18,518	0,123
		<UGL min			<UGL min			<UGL min	
			-0,346			-0,463			-0,132
		>OGL max			>OGL max			>OGL max	
			0,543			0,554			0,177

in mm

Tabelle 51: Ergebnisse der elastischen Grenzlagenberechnungen für die betrachteten Messstellen 10, 11 und 12

KPC	10			11			12		
UGL	17,61						17,57		
OGL	19,59						19,63		
DoE	Anf.	FEM Ende	Δ	Anf.	FEM Ende	Δ	Anf.	FEM Ende	Δ
1	17,693	17,774	0,080	17,546	17,598	0,053	17,565	17,584	0,019
2	19,549	19,609	0,060	19,288	19,334	0,045	19,153	19,176	0,023
3	17,747	17,840	0,094	17,907	17,936	0,029	18,079	18,049	-0,031
4	17,533	17,617	-0,084	17,269	17,315	-0,046	17,233	17,239	-0,006
5	17,692	17,786	0,094	17,547	17,611	0,064	17,565	17,594	0,029
6	19,752	19,813	0,061	19,744	19,764	0,020	19,710	19,691	-0,019
7	17,877	17,967	0,090	17,813	17,850	0,037	17,827	17,813	-0,014
8	19,563	19,640	-0,077	19,474	19,527	-0,053	19,436	19,460	-0,024
9	19,419	19,491	0,073	19,382	19,416	0,034	19,389	19,382	-0,007
10	19,616	19,703	0,087	19,834	19,852	0,018	19,955	19,911	-0,044
11	19,406	19,485	0,079	19,202	19,244	0,042	19,111	19,114	0,003
		<UGL min			<UGL min			<UGL min	
			-0,084			-0,053			-0,044
		>OGL max			>OGL max			>OGL max	
			0,094			0,064			0,029

in mm

Tabelle 52: Ergebnisse der elastischen Grenzlagenberechnungen für die betrachteten Messstellen 13, 14 und 15

KPC	13			14			15		
UGL	16,88			17,61			18,05		
OGL	18,55			19,53			19,15		
DoE	FEM			FEM			FEM		
	Anf.	Ende	Δ	Anf.	Ende	Δ	Anf.	Ende	Δ
1	17,875	17,870	-0,005	17,520	17,508	-0,012	19,011	18,919	-0,092
2	17,842	17,845	0,003	17,483	17,506	0,023	18,993	18,932	-0,061
3	19,340	19,283	-0,058	19,865	19,700	-0,165	18,383	18,226	-0,157
4	17,864	17,846	0,018	17,829	17,777	0,052	19,081	18,974	0,107
5	17,872	17,869	-0,003	17,349	17,357	0,008	18,949	18,867	-0,082
6	19,343	19,307	-0,036	19,524	19,427	-0,097	18,314	18,205	-0,109
7	19,352	19,312	-0,040	19,340	19,228	-0,112	18,266	18,134	-0,132
8	17,826	17,822	0,004	17,319	17,334	-0,015	18,929	18,860	0,069
9	17,845	17,816	-0,029	17,856	17,784	-0,072	19,086	18,975	-0,110
10	19,304	19,235	-0,069	19,678	19,490	-0,188	18,320	18,162	-0,158
11	17,861	17,837	-0,024	17,684	17,636	-0,048	19,027	18,934	-0,093
		<UGL	min		<UGL	min		<UGL	min
			-0,069			-0,188			-0,158
		>OGL	max		>OGL	max		>OGL	max
			0,018			0,052			0,107

in mm

Tabelle 53: Ergebnisse der elastischen Grenzlagenberechnungen für die betrachteten Messstellen 16, 17 und 18

KPC	16			17			18		
UGL				18,10					
OGL				19,10					
DoE	FEM			FEM			FEM		
	Anf.	Ende	Δ	Anf.	Ende	Δ	Anf.	Ende	Δ
1	18,956	18,847	-0,109	17,685	17,833	0,148	17,704	17,902	0,198
2	18,855	18,783	-0,071	17,727	17,903	0,176	17,747	17,977	0,230
3	18,400	18,214	-0,186	21,144	21,032	-0,113	21,337	21,248	-0,089
4	18,996	18,869	0,127	18,987	19,046	-0,059	19,088	19,185	-0,097
5	18,880	18,782	-0,098	16,002	16,199	0,197	15,976	16,246	0,271
6	18,225	18,097	-0,128	19,952	19,913	-0,039	20,067	20,052	-0,015
7	18,198	18,041	-0,157	18,242	18,216	-0,026	18,310	18,327	0,017
8	18,828	18,746	0,082	15,980	16,174	-0,194	15,953	16,218	-0,265
9	19,018	18,887	-0,131	18,961	18,988	0,027	19,062	19,124	0,062
10	18,287	18,100	-0,187	19,457	19,286	-0,171	19,605	19,461	-0,144
11	18,895	18,785	-0,110	17,347	17,404	0,057	17,404	17,520	0,116
		<UGL	min		<UGL	min		<UGL	min
			-0,187			-0,194			-0,265
		>OGL	max		>OGL	max		>OGL	max
			0,127			0,197			0,271

in mm

Tabelle 54: Ergebnisse der elastischen Grenzlagenberechnungen für die betrachteten Messstelle 19

KPC	19		
UGL	17,97		
OGl	19,23		
DoE	FEM		
	Anf.	Ende	Δ
1	19,316	19,080	-0,236
2	17,758	17,594	-0,163
3	20,036	19,652	-0,384
4	19,103	18,836	0,267
5	18,819	18,598	-0,221
6	18,136	17,868	-0,269
7	18,632	18,305	-0,327
8	17,825	17,634	0,191
9	18,688	18,410	-0,279
10	18,555	18,168	-0,387
11	17,637	17,398	-0,239
		<UGL	min
			-0,387
		>OGl	max
			0,267
		in mm	

Tabelle 55: Größtmögliche Über- und Unterschreitungen der jeweiligen starren oberen respektive unteren Grenzlagen für die betrachteten Messstellen auf Basis der Ergebnisse der elastischen Grenzlagenberechnungen, siehe Tabellen 48 bis 54

KPC #	1	2	3	4	5	6	7	8
UGL	17,610	17,56	17,130	17,230	17,500	17,71	17,920	17,960
min. FEM	17,113	17,13	17,538	18,125	17,927	18,56	17,805	18,303
Δ	-0,497	-0,43	0,408	0,895	0,427	0,85	-0,115	0,343
OGl	19,59	19,64	20,07	19,97	19,70	19,49	19,28	19,24
max. FEM	19,671	19,936	20,981	21,255	20,816	21,217	20,124	20,289
Δ	0,081	0,296	0,911	1,285	1,116	1,727	0,844	1,049
KPC #	9	10	12	13	14	15	17	19
UGL	18,10	17,610	17,570	16,880	17,610	18,050	18,100	17,970
min. FEM	17,99	17,617	17,239	17,816	17,334	18,134	16,174	17,398
Δ	-0,11	0,007	-0,331	0,936	-0,276	0,084	-1,926	-0,572
OGl	19,100	19,590	19,630	18,550	19,53	19,150	19,100	19,230
max. FEM	19,409	19,813	19,911	19,312	19,70	18,975	21,032	19,652
Δ	0,309	0,223	0,281	0,762	0,17	-0,175	1,932	0,422
	in mm							

Anhang E: Ergänzungen zu Kapitel 5

Intensitäts-Beziehungsmatrix

Mit Verweis auf die in Abschnitt 5.2.1 referenzierte Intensitäts-Beziehungsmatrix ist diese im Folgenden dargestellt. Aufgrund der Größe dieser Matrix ist diese in 10 Teilmatrizen aufgeteilt (Tabellen 57 bis 66, vgl. [S7, Anhang C]). Tabelle 56 gibt diesbezüglich einen Überblick zur Anordnung der 10 Tabellen mit den Teilmatrizen. Der Übersicht halber sind alle Felder, die mit der Wirkstufe Null (o) belegt sind, frei gelassen. Aktiv- und Passivsummen, welche größer sind als der festgelegte Wertigkeits-Schwellenwert 15, werden im Portfolio-Diagramm (siehe Bild 6o) explizit aufgelistet und sind in den Tabellen **hervorgehoben**.

Tabelle 56: Intensitäts-Beziehungsmatrix: Übersicht bzgl. der Anordnung der 10 Tabellen mit den Teilmatrizen

Wirkung auf							Aktivsumme
von ↗							
Stellgröße	Nr.	x_1 ... x_{10}	x_{11} ... x_{18}	x_{19} ... x_{26}	x_{27} ... x_{34}	x_{35} ... x_{41}	
	$x_1 \dots x_{23}$	Tab. 57	Tab. 58	Tab. 59	Tab. 60	Tab. 61	
	$x_{24} \dots x_{41}$	Tab. 62	Tab. 63	Tab. 64	Tab. 65	Tab. 66	
Passivsumme							

Tabelle 57: Intensitäts-Beziehungsmatrix Teil 01 von 10

Wirkung von		auf	Türmontage	Scharniermontage	Dichtungsmontage	Schließbügelmontage	Verunreinigungen	Isotropie	Oberflächenbehandlung	Ausdehnungskoeffizient	Reibkoeffizient	Materialkennwerte
Stellgröße		Nr.	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}
Montage	Türmontage	x_1										
	Scharniermontage	x_2	1									
	Dichtungsmontage	x_3									1	
	Schließbügelmontage	x_4										
Material	Verunreinigungen	x_5	1	1	1				1		1	
	Isotropie	x_6								3		
	Oberflächenbehandlung	x_7	1								3	
	Ausdehnungskoeffizient	x_8										
	Reibkoeffizient	x_9			1				1			
	Materialkennwerte	x_{10}										
Kinematik	Position Drehachse	x_{11}	3									
	Schiefstellung Drehachse	x_{12}	3									
	Position Schließbügel	x_{13}										
	Position Türschloss	x_{14}										
Geometrieabweichung	Seitenrahmen	x_{15}	3	2	2	2						
	Tür	x_{16}	3			2						
	Dichtung	x_{17}									1	
	Scharnier	x_{18}	3	3								
	Türschloss	x_{19}				3						
	Position Dichtung	x_{20}										
	Flanschübergänge	x_{21}			2							
	Fugenmaß (Strak)	x_{22}	3									
	Dichtmaß	x_{23}										

Tabelle 58: Intensitäts-Beziehungsmatrix Teil 02 von 10

Wirkung von		auf	Position Drehachse	Schiefstellung Drehachse	Position Schließbügel	Position Türschloss	Seitenrahmen	Tür	Dichtung	Scharnier
Stellgröße		Nr.	x_{11}	x_{12}	x_{13}	x_{14}	x_{15}	x_{16}	x_{17}	x_{18}
Montage	Türmontage	x_1	3	3						
	Scharniermontage	x_2	3	3		1				
	Dichtungsmontage	x_3				1			3	
	Schließbügelmontage	x_4								
	Verunreinigungen	x_5								
Material	Isotropie	x_6								
	Oberflächenbehandlung	x_7								
	Ausdehnungskoeffizient	x_8					3	3	1	2
	Reibkoeffizient	x_9								
	Materialkennwerte	x_{10}					1	1	1	1
Kinematik	Position Drehachse	x_{11}								
	Schiefstellung Drehachse	x_{12}								
	Position Schließbügel	x_{13}								
	Position Türschloss	x_{14}								
Geometrieabweichung	Seitenrahmen	x_{15}	2	2	2	1				
	Tür	x_{16}	2	2		1				
	Dichtung	x_{17}				0				
	Scharnier	x_{18}	3	3						
	Türschloss	x_{19}				1				
Geometrieabweichung	Position Dichtung	x_{20}								
	Flanschübergänge	x_{21}								
	Fugenmaß (Strak)	x_{22}								
	Dichtmaß	x_{23}								

Tabelle 59: Intensitäts-Beziehungsmatrix Teil 03 von 10

Wirkung von		auf	Türschloss	Position Dichtung	Flanschübergänge	Fugenmaß (Strak)	Dichtmaß	Seitenrahmen	Tür	Dichtung
Stellgröße		Nr.	x_{19}	x_{20}	x_{21}	x_{22}	x_{23}	x_{24}	x_{25}	x_{26}
Montage	Türmontage	x_1			3	3	3			
	Scharniermontage	x_2					1			
	Dichtungsmontage	x_3		3						
	Schließbügelmontage	x_4		1	1	1	2			
Material	Verunreinigungen	x_5								
	Isotropie	x_6								
	Oberflächenbehandlung	x_7								
	Ausdehnungskoeffizient	x_8	1							
	Reibkoeffizient	x_9								
Kinematik	Materialkennwerte	x_{10}	1		1	1	1			
	Position Drehachse	x_{11}					1			
	Schiefstellung Drehachse	x_{12}								
	Position Schließbügel	x_{13}			1	2	2			
Geometrieabweichung	Position Türschloss	x_{14}			1	2	2			
	Seitenrahmen	x_{15}			3	3	3			
	Tür	x_{16}		2	3	3	3			
	Dichtung	x_{17}		1			2			
	Scharnier	x_{18}			1		1			
	Türschloss	x_{19}			1	2	2			
	Position Dichtung	x_{20}								
	Flanschübergänge	x_{21}		2						
	Fugenmaß (Strak)	x_{22}								
	Dichtmaß	x_{23}								

Tabelle 60: Intensitäts-Beziehungsmatrix Teil 04 von 10

Wirkung von		auf ↴	Scharnier	Türschloss	Schließbügel	Position der Dichtung	Flanschübergänge	Fugenmaß (Strak)	Dichtmaß	Luftdruck
Stellgröße		Nr.	x_{27}	x_{28}	x_{29}	x_{30}	x_{31}	x_{32}	x_{33}	x_{34}
Montage	Türmontage	x_1								
	Scharniermontage	x_2							1	
	Dichtungsmontage	x_3								
	Schließbügelmontage	x_4								
	Verunreinigungen	x_5								
Material	Isotropie	x_6								
	Oberflächenbehandlung	x_7								
	Ausdehnungskoeffizient	x_8								
	Reibkoeffizient	x_9								
	Materialkennwerte	x_{10}								
Kinematik	Position Drehachse	x_{11}								
	Schiefstellung Drehachse	x_{12}								
	Position Schließbügel	x_{13}								
	Position Türschloss	x_{14}								
Geometrieabweichung	Seitenrahmen	x_{15}								
	Tür	x_{16}								
	Dichtung	x_{17}								
	Scharnier	x_{18}								
	Türschloss	x_{19}								
Geometrieabweichung	Position Dichtung	x_{20}						2		
	Flanschübergänge	x_{21}								
	Fugenmaß (Strak)	x_{22}								
	Dichtmaß	x_{23}								

Tabelle 61: Intensitäts-Beziehungsmatrix Teil 05 von 10

Wirkung von		auf	Wind	Niederschlagsmenge	Temperatur	Schiefstellung Fahrzeug	Betrieb	Nachjustage (Finish)	Wahl Vorhalt Tür	Aktivsumme
Stellgröße		Nr.	x_{35}	x_{36}	x_{37}	x_{38}	x_{39}	x_{40}	x_{41}	
Montage	Türmontage	x_1						2		17
	Scharniermontage	x_2								10
	Dichtungsmontage	x_3						1		9
	Schließbügelmontage	x_4								5
Material	Verunreinigungen	x_5								5
	Isotropie	x_6								3
	Oberflächenbehandlung	x_7								4
	Ausdehnungskoeffizient	x_8								10
	Reibkoeffizient	x_9								2
Kinematik	Materialkennwerte	x_{10}								8
	Position Drehachse	x_{11}								4
	Schiefstellung Drehachse	x_{12}						1		4
	Position Schließbügel	x_{13}								5
Geometrieabweichung	Position Türschloss	x_{14}								5
	Seitenrahmen	x_{15}						2		27
	Tür	x_{16}						2		23
	Dichtung	x_{17}								4
	Scharnier	x_{18}								14
	Türschloss	x_{19}						1		10
	Position Dichtung	x_{20}								2
	Flanschübergänge	x_{21}								4
	Fugenmaß (Strak)	x_{22}						3		6
	Dichtmaß	x_{23}								0

Tabelle 62: Intensitäts-Beziehungsmatrix Teil 06 von 10

Wirkung von		auf	Türmontage	Scharniermontage	Dichtungsmontage	Schließbügelmontage	Verunreinigungen	Isotropie	Oberflächenbehandlung	Ausdehnungskoeffizient	Reibkoeffizient	Materialkennwerte
Stellgröße		Nr.	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}
Idealgeometrie	Seitenrahmen	x_{24}	3	3	3	1						
	Tür	x_{25}	3	3	3							
	Dichtung	x_{26}	1		3							
	Scharnier	x_{27}	3	3								
	Türschloss	x_{28}	1			1						
	Schließbügel	x_{29}				3						
	Position der Dichtung	x_{30}										
	Flanschübergänge	x_{31}			2							
	Fugenmaß (Strak)	x_{32}	3	2		3						
	Dichtmaß	x_{33}										
Mileau	Luftdruck	x_{34}										
	Wind	x_{35}										
	Niederschlagsmenge	x_{36}										
	Temperatur	x_{37}										
	Schiefstellung Fahrzeug	x_{38}										
Mensch	Betrieb	x_{39}					2					
	Nachjustage (Finish)	x_{40}										
	Wahl Vorhalt Tür	x_{41}	3	3								
Passivsumme			38	20	17	15	2	0	2	3	6	0

Tabelle 63: Intensitäts-Beziehungsmatrix Teil 07 von 10

Wirkung von		auf ↴	Position Drehachse	Schiefstellung Drehachse	Position Schließbügel	Position Türschloss	Seitenrahmen	Tür	Dichtung	Scharnier
Stellgröße		Nr.	x_{11}	x_{12}	x_{13}	x_{14}	x_{15}	x_{16}	x_{17}	x_{18}
Idealgeometrie	Seitenrahmen	x_{24}	3		3	2				
	Tür	x_{25}	3		3	2				
	Dichtung	x_{26}								
	Scharnier	x_{27}	3	2						
	Türschloss	x_{28}				2				
	Schließbügel	x_{29}				3				
	Position der Dichtung	x_{30}								
	Flanschübergänge	x_{31}								
	Fugenmaß (Strak)	x_{32}								
	Dichtmaß	x_{33}								
Mileau	Luftdruck	x_{34}								
	Wind	x_{35}								
	Niederschlagsmenge	x_{36}								
	Temperatur	x_{37}					3	3	1	1
	Schiefstellung Fahrzeug	x_{38}								
Mensch	Betrieb	x_{39}								
	Nachjustage (Finish)	x_{40}				2				
	Wahl Vorhalt Tür	x_{41}								
	Passivsumme		22	15	8	16	7	7	6	4

Tabelle 64: Intensitäts-Beziehungsmatrix Teil 08 von 10

Wirkung von		auf	Türschloss	Position Dichtung	Flanschübergänge	Fugenmaß (Strak)	Dichtmaß	Seitenrahmen	Tür	Dichtung
Stellgröße		Nr.	x_{19}	x_{20}	x_{21}	x_{22}	x_{23}	x_{24}	x_{25}	x_{26}
Idealgeometrie	Seitenrahmen	x_{24}								
	Tür	x_{25}								
	Dichtung	x_{26}								
	Scharnier	x_{27}								
	Türschloss	x_{28}								
	Schließbügel	x_{29}								
	Position der Dichtung	x_{30}								
	Flanschübergänge	x_{31}		2						2
	Fugenmaß (Strak)	x_{32}								
Mileau	Dichtmaß	x_{33}								
	Luftdruck	x_{34}								
	Wind	x_{35}								
	Niederschlagsmenge	x_{36}								
	Temperatur	x_{37}	1							
Mensch	Schiefstellung Fahrzeug	x_{38}								
	Betrieb	x_{39}				1	1			
	Nachjustage (Finish)	x_{40}								
	Wahl Vorhalt Tür	x_{41}								
Passivsumme			3	11	15	18	24	0	0	2

Tabelle 65: Intensitäts-Beziehungsmatrix Teil 09 von 10

Wirkung von		auf	Scharnier	Türschloss	Schließbügel	Position der Dichtung	Flanschübergänge	Fugenmaß (Strak)	Dichtmaß	Luftdruck
Stellgröße		Nr.	x_{27}	x_{28}	x_{29}	x_{30}	x_{31}	x_{32}	x_{33}	x_{34}
Idealgeometrie	Seitenrahmen	x_{24}			3	1	3	3	3	
	Tür	x_{25}			2	2	3	3	3	
	Dichtung	x_{26}				2				
	Scharnier	x_{27}			2		2	2	2	
	Türschloss	x_{28}			3			2	3	
	Schließbügel	x_{29}		2				3	3	
	Position der Dichtung	x_{30}							3	
	Flanschübergänge	x_{31}								
	Fugenmaß (Strak)	x_{32}								
	Dichtmaß	x_{33}								
Mileau	Luftdruck	x_{34}								
	Wind	x_{35}								
	Niederschlagsmenge	x_{36}								
	Temperatur	x_{37}								
	Schiefstellung Fahrzeug	x_{38}								
Mensch	Betrieb	x_{39}								2
	Nachjustage (Finish)	x_{40}								
	Wahl Vorhalt Tür	x_{41}								
	Passivsumme		0	2	10	5	8	15	18	2

Tabelle 66: Intensitäts-Beziehungsmatrix Teil 10 von 10

Wirkung von		auf	Wind	Niederschlagsmenge	Temperatur	Schiefstellung Fahrzeug	Betrieb	Nachjustage (Finish)	Wahl Vorhalt Tür	Aktivsumme
Stellgröße		Nr.	x_{35}	x_{36}	x_{37}	x_{38}	x_{39}	x_{40}	x_{41}	
Idealgeometrie	Seitenrahmen	x_{24}								31
	Tür	x_{25}								30
	Dichtung	x_{26}								6
	Scharnier	x_{27}								19
	Türschloss	x_{28}								12
	Schließbügel	x_{29}								14
	Position der Dichtung	x_{30}								3
	Flanschübergänge	x_{31}								6
	Fugenmaß (Strak)	x_{32}						3		11
	Dichtmaß	x_{33}								0
Mileau	Luftdruck	x_{34}								0
	Wind	x_{35}								0
	Niederschlagsmenge	x_{36}								0
	Temperatur	x_{37}								9
	Schiefstellung Fahrzeug	x_{38}								0
Mensch	Betrieb	x_{39}								6
	Nachjustage (Finish)	x_{40}								2
	Wahl Vorhalt Tür	x_{41}								6
	Passivsumme		0	0	0	0	0	15	0	

FORFLOW-Prozessmodell

Wie in Abschnitt 5.3.1 verwiesen, zeigen die nachfolgenden Bilder die sechs Schritte des FORFLOW-Prozessmodells, vgl. [214]. Die Schritte 4 und 5 sind der Übersichtlichkeit halber in zwei bzw. drei Bilder aufgeteilt. Die nachfolgende Tabelle gibt einen Überblick.

Bild(er)	Schritt	Bezeichnung des Schrittes
93	1	Klären und Präzisieren der Aufgabenstellung
94	2	Ermitteln von Funktionen und deren Struktur
95	3	Suche n. Lösungsprinzipien u. deren Strukturen
96, 97	4	Gesamtkonzept entwickeln
98, 99, 100	5	Systemgestaltung
101	6	Produktionsanlauf und -betreuung

FORFLOW Prozessmodell Schritt 1: Klären und Präzisieren der Aufgabenstellung

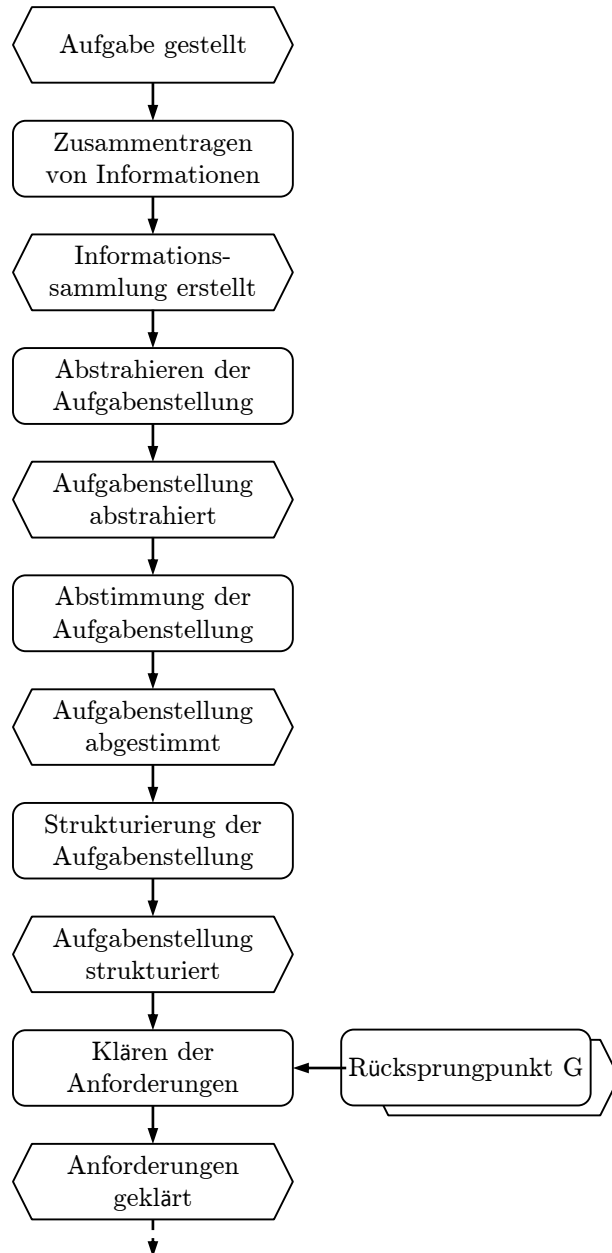


Bild 93: FORFLOW-Prozessmodell – Schritt 1: Klären und Präzisieren der Aufgabenstellung, vgl. [214]

FORFLOW Prozessmodell Schritt 2: Ermitteln von Funktionen und deren Struktur

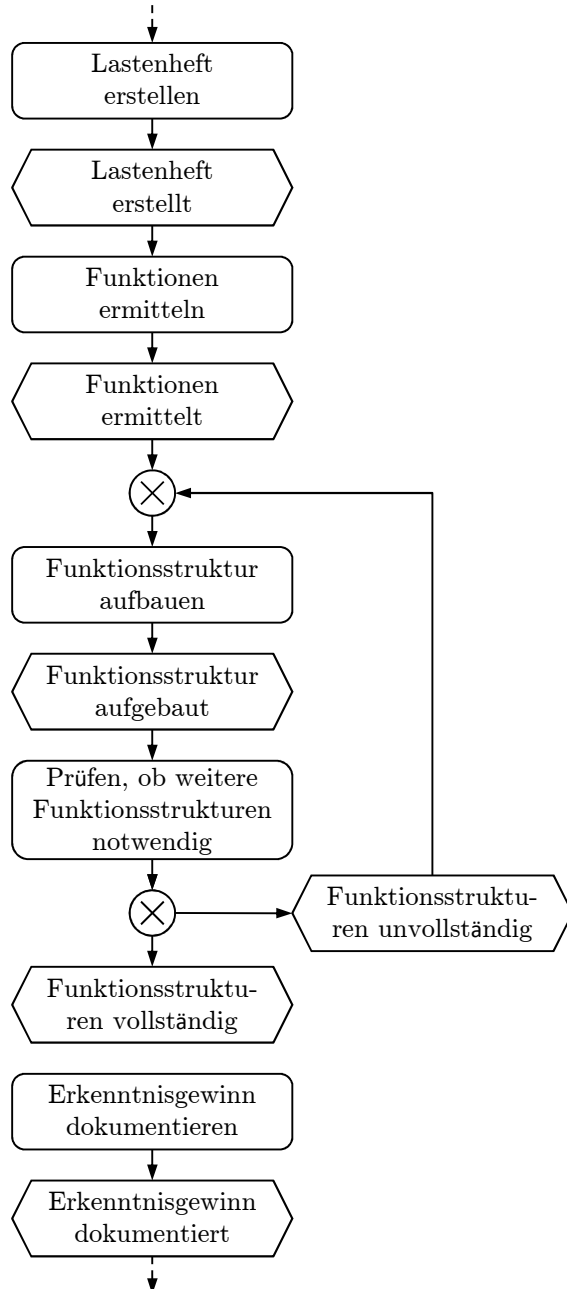


Bild 94: FORFLOW-Prozessmodell – Schritt 2: Ermitteln von Funktionen und deren Struktur, vgl. [214]

FORFLOW Prozessmodell Schritt 3: Suche nach Lösungsprinzipien und deren Strukturen

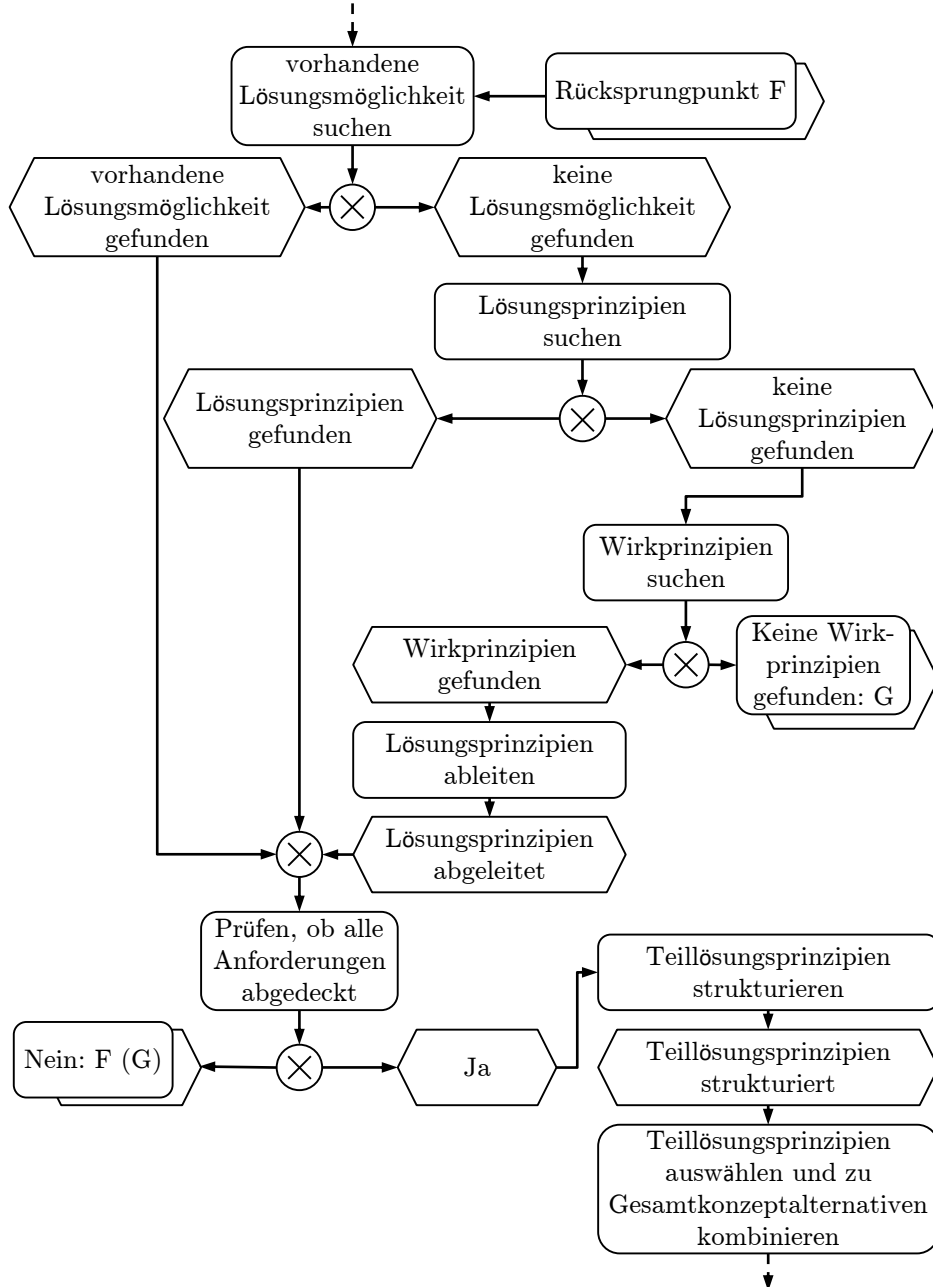


Bild 95: FORFLOW-Prozessmodell – Schritt 3: Suche nach Lösungsprinzipien und deren Strukturen, vgl. [214]

FORFLOW Prozessmodell Schritt 4: Gesamtkonzept entwickeln 1/2

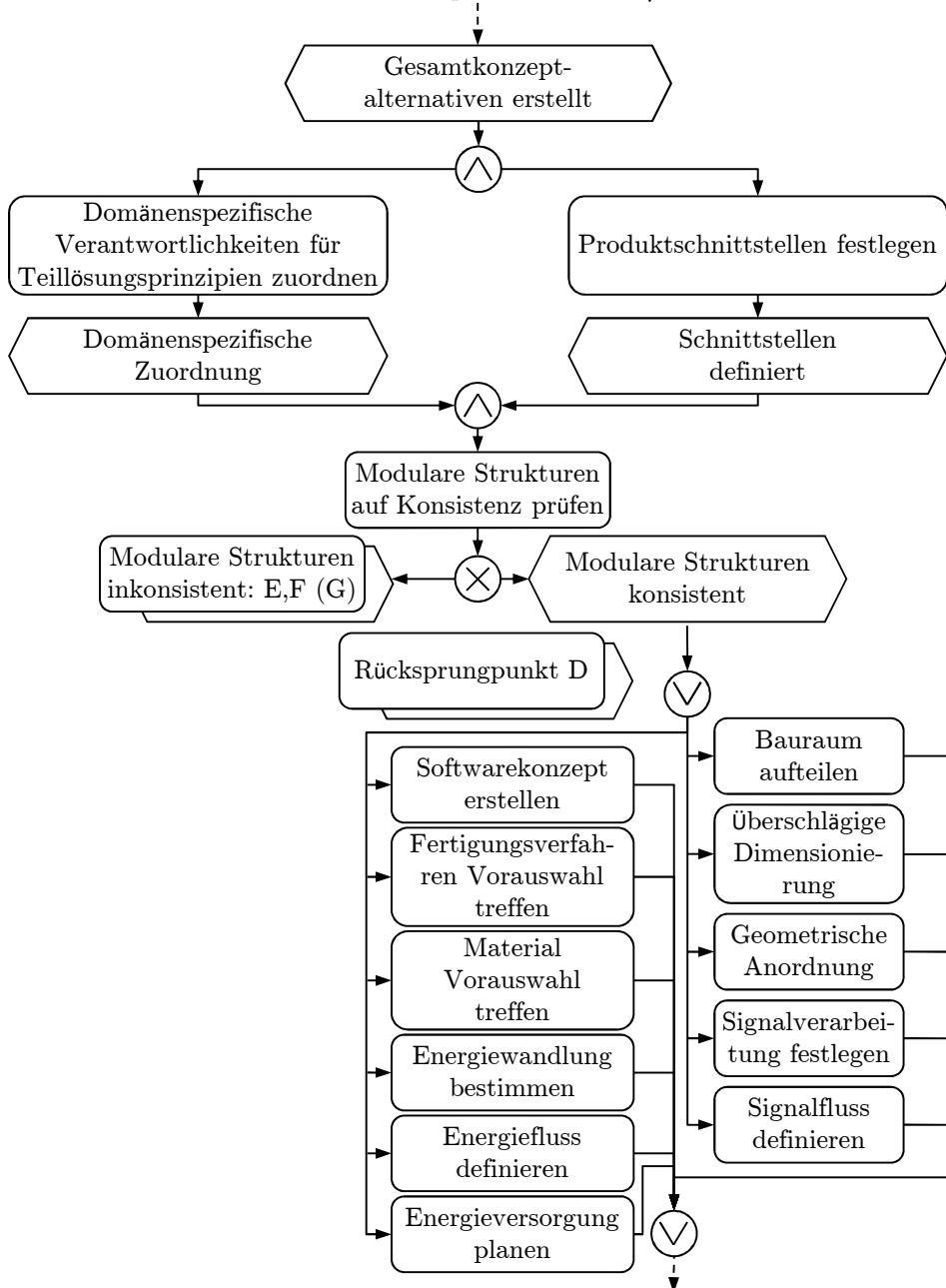


Bild 96: FORFLOW-Prozessmodell – Schritt 4: Gesamtkonzept entwickeln 1/2, vgl. [214]

FORFLOW Prozessmodell Schritt 4: Gesamtkonzept entwickeln 2/2

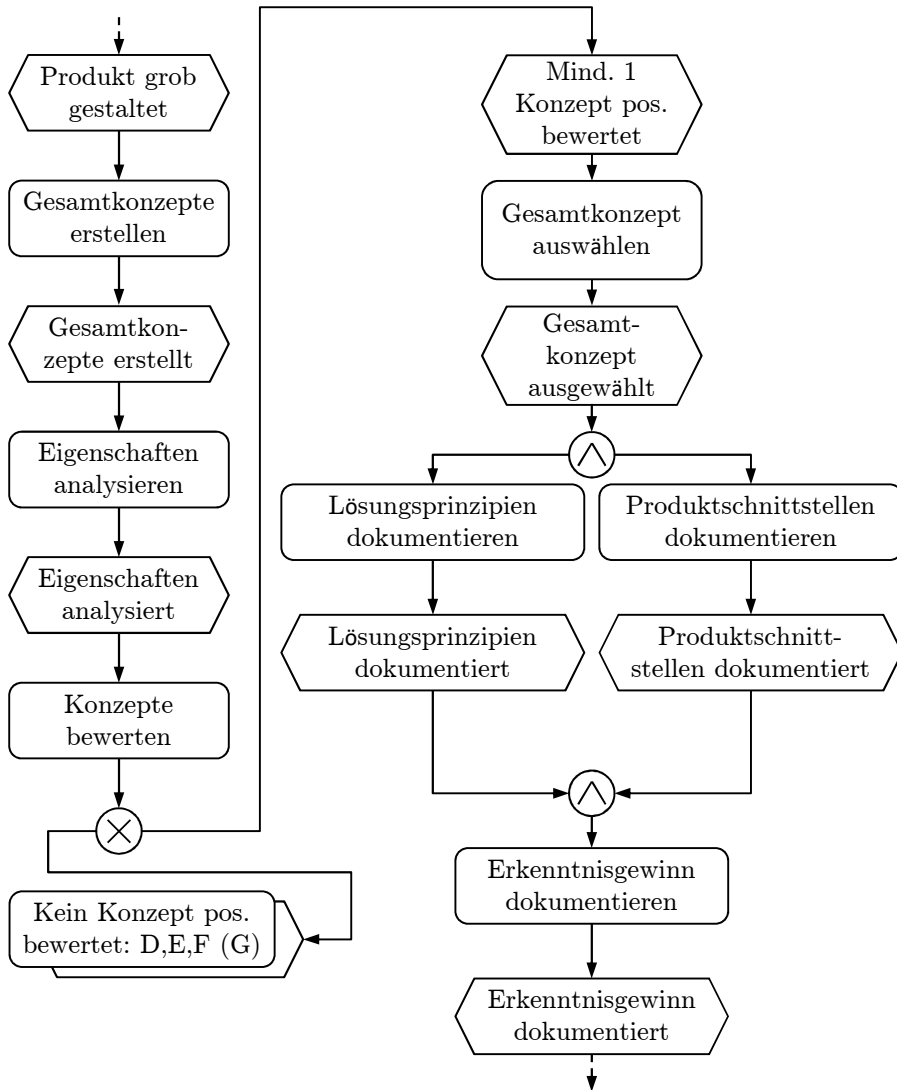


Bild 97: FORFLOW-Prozessmodell – Schritt 4: Gesamtkonzept entwickeln 2/2, vgl. [214]

FORFLOW Prozessmodell Schritt 5: Systemgestaltung 1/3

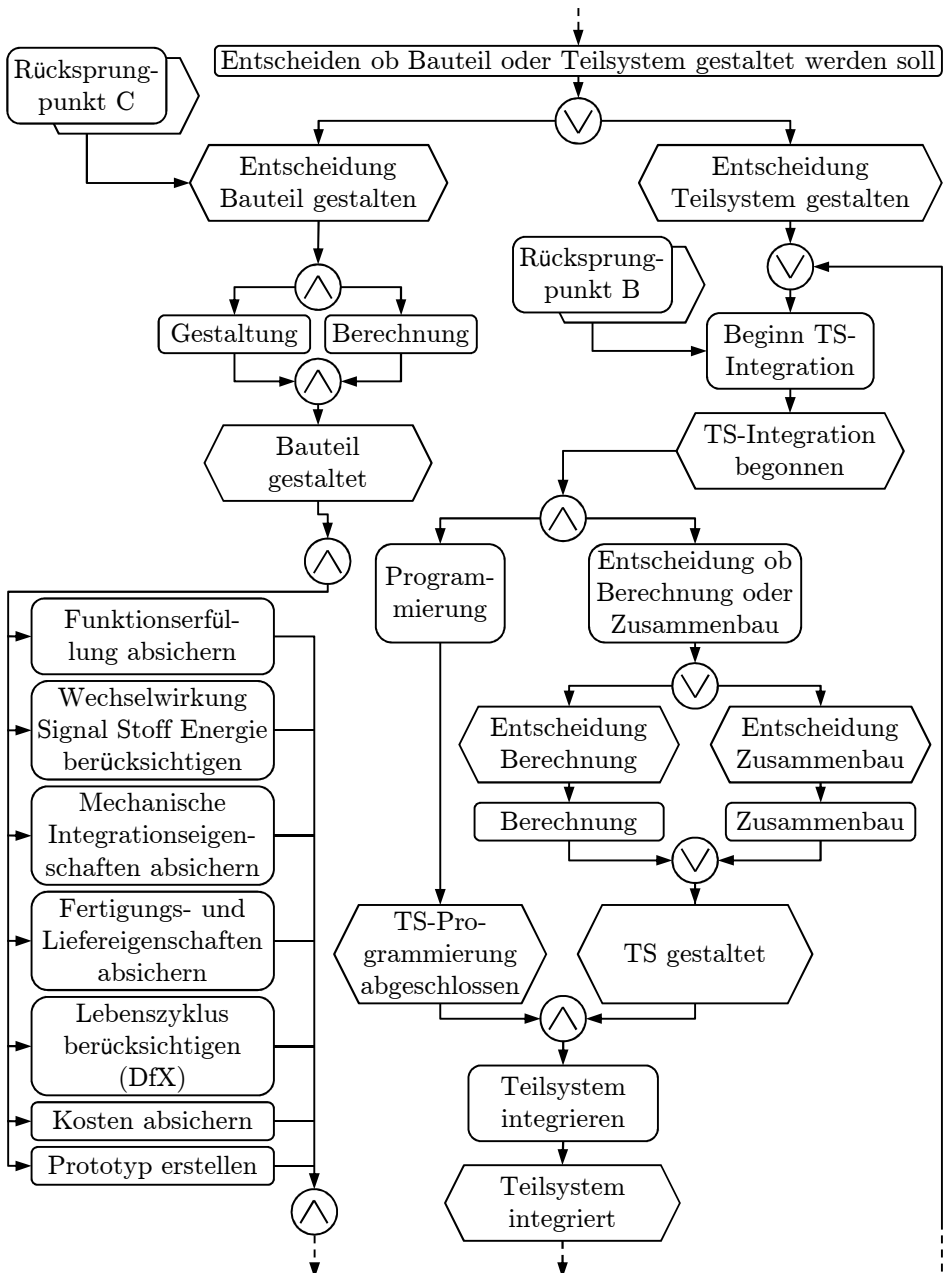


Bild 98: FORFLOW-Prozessmodell – Schritt 5: Systemgestaltung 1/3, vgl. [214]

FORFLOW Prozessmodell Schritt 5: Systemgestaltung 2/3

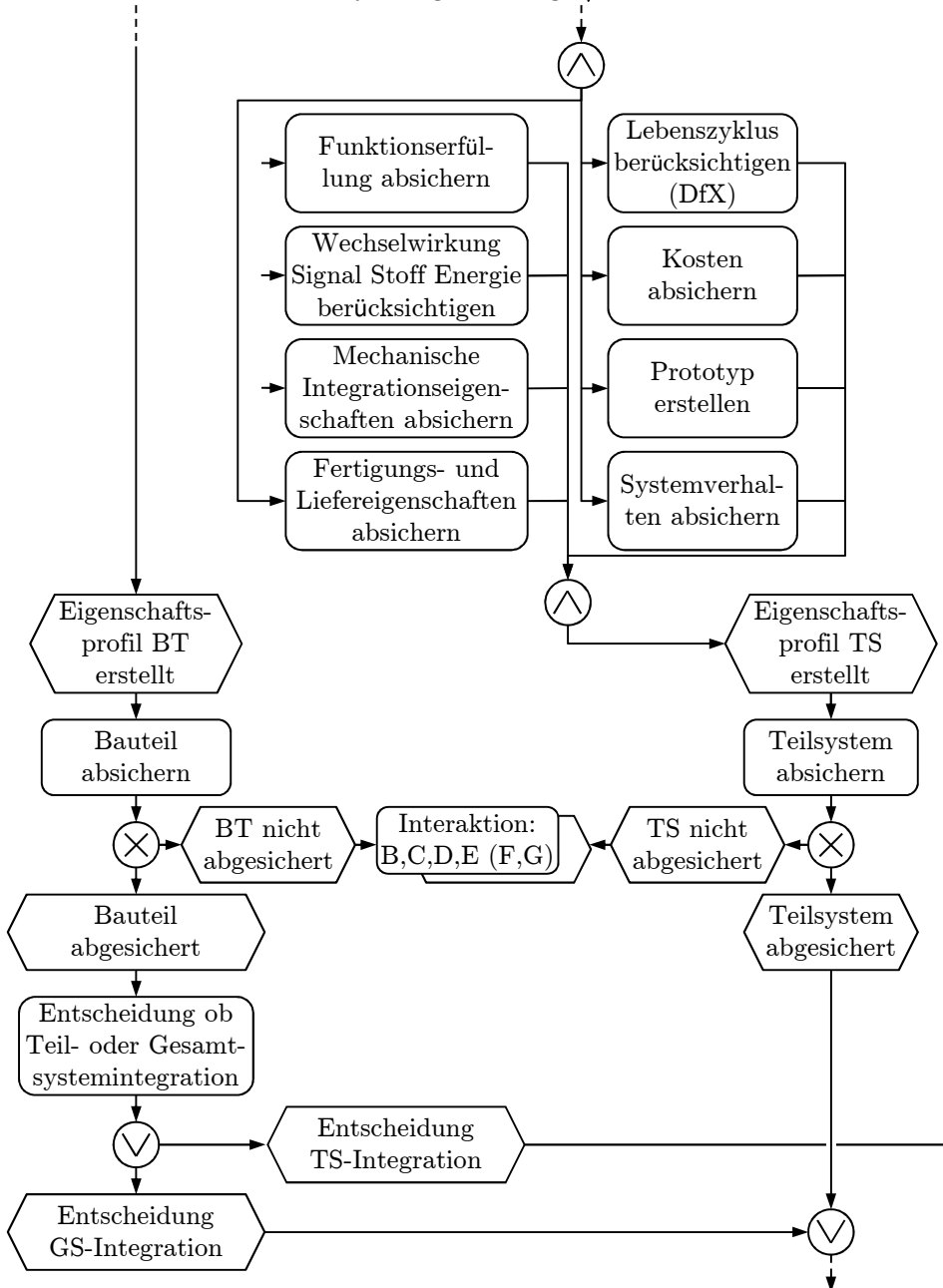


Bild 99: FORFLOW-Prozessmodell – Schritt 5: Systemgestaltung 2/3, vgl. [214]

FORFLOW Prozessmodell Schritt 5: Systemgestaltung 3/3

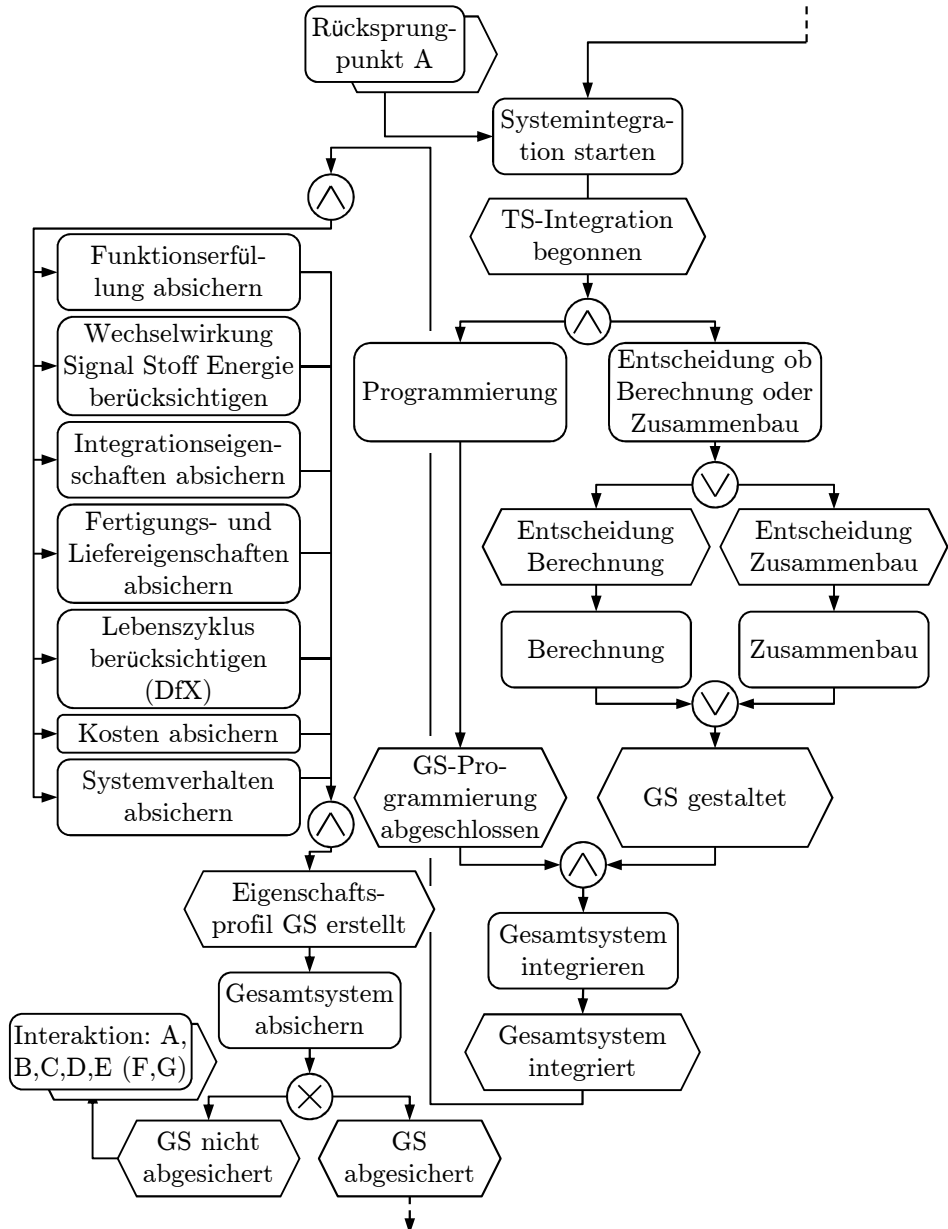


Bild 100: FORFLOW-Prozessmodell – Schritt 5: Systemgestaltung 3/3, vgl. [214]

FORFLOW Prozessmodell Schritt 6: Produktionsanlauf und -betreuung

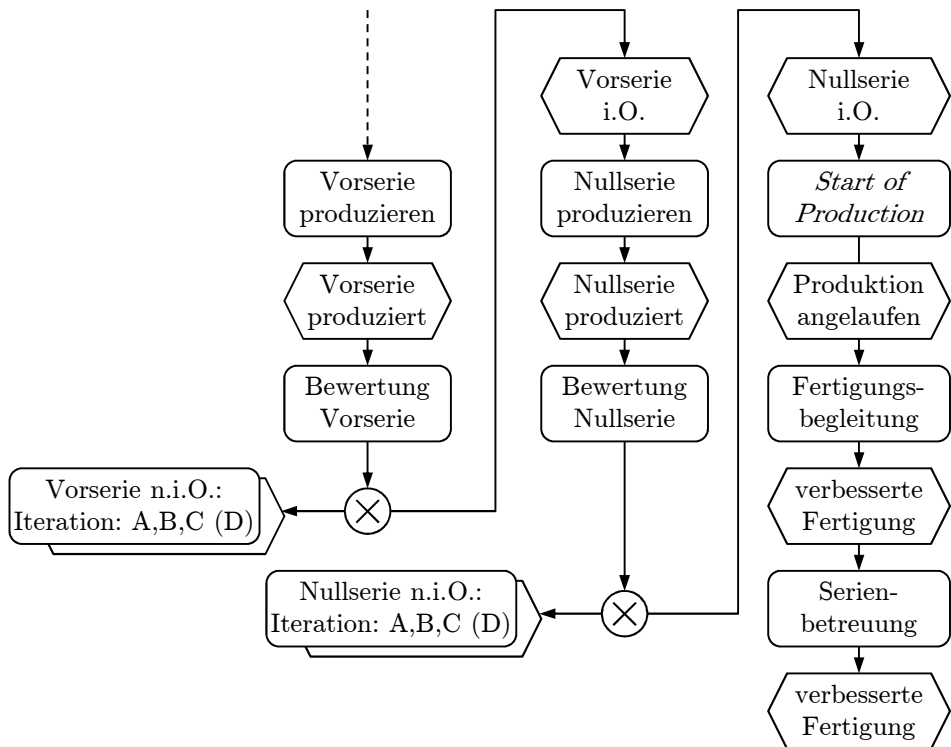


Bild 101: FORFLOW-Prozessmodell – Schritt 6: Produktionsanlauf und -betreuung, vgl. [214]

Tabelle 67: Technische Bewertung, vgl. [S7, Tabelle 6.4], eigene Darstellung

Beschreibung der Kriterien (Treiber)	Genauigkeit und Präzision	Einstellung aller Freiheitsgrade	Bauraum Messtechnik	Spritzwasserschutz	Wertungszahl $w_i = \sum (m_{ij} \cdot g_i)$	technische Wertigkeit $x_i = w_i / \sum w_{i,ideal}$
Maßzahlumsetzung für m_{ij}	{0,1,2,3,4}	{0,1,2,3,4}	{0,1,2,3,4}	{0,1,2,3,4}		
Gewichtung g_i	40	30	20	10		
Variante	Soll-Wert $\sum g_i := 100$					
Verbesserter Ist-Stand	Linearpräzisions-tische gewähren Einstellsicherheit. ⊕ ⊕ Genauigkeit ⊕ ⊕ Präzision	Konzept erlaubt lediglich 4 FHG's. SCHLECHT.	Unterbringung Messtechnik unproblematisch. GUT.	Kann durch Abschirmung gewährleistet werden (bspw. Schürzen). AUFWAND GERING.		
	4	0	3	3	250	0,63
Segmentierter Seitenrahmen	Kann in Abhängigkeit von den Einzelteilen genau eingestellt werden. Spätere Korrektur nicht möglich. ⊖ ⊖ Genauigkeit ⊕ ⊕ Präzision	FHG's können hier nicht eingestellt werden. Ist hier jedoch auch nicht notwendig. NICHT EINDEUTIG.	Unterbringung Messtechnik unproblematisch. Jedoch ist bei „neuer“ Grenzlage eine Anpassung notwendig. MITTEL.	Abdichtung der einzelnen Elemente muss sichergestellt werden. Machbar mit Silikon. AUFWAND GERING.		
	1	1	1	2	110	0,28
Roboter	Positionswiederholgenauigkeit $\pm 0,2mm$ ⊖ ⊖ Genauigkeit ⊖ ⊖ Präzision	Abhängig von der Regelung können FHG's einfach eingestellt werden. GUT.	Unterbringung Messtechnik machbar. Jedoch muss Kollision mit beweglichen Teilen zwingend verhindert werden. MITTEL.	Kann mit einer Schürze gewährleistet werden. AUFWAND MITTEL.		
	0	4	3	2	200	0,50
Hexapod	Aktorauflösung $0,05\mu m$. Wiederholgenauigkeit (max.): $\pm 2\mu m$ ⊕ ⊕ Genauigkeit ⊕ Präzision	Abhängig von der Regelung können FHG's einfach eingestellt werden. GUT.	Unterbringung Messtechnik machbar. Jedoch muss Position der Messschnitte teilweise angepasst werden. MITTEL.	Kann mit einer Schürze gewährleistet werden. AUFWAND GERING.		
	3	4	2	3	310	0,78
Lineartisch	Linearpräzisions-tische gewähren Einstellsicherheit. ⊕ ⊕ Genauigkeit ⊖ Präzision	FHG's können eingestellt werden. Zeitaufwand hoch. MITTEL.	Unterbringung Messtechnik machbar. Kollision mit anderen Bauteilen kann Herausforderung sein. MITTEL.	Kann mit Schürzen gewährleistet werden. Ist jedoch voraussichtlich mit Komplikationen verbunden. AUFWAND HOCH.		
	2	3	1	1	200	0,50
ideal	4	4	4	4	400	1,00

Tabelle 68: Wirtschaftliche Bewertung, vgl. [S7, Tabelle 6.5], eigene Darstellung

Beschreibung der Kriterien (Treiber)	Zeitaufwand Grenzlagen-einstellung	Invest-Kosten	Laufende Kosten	Weitere Nutzung im Unternehmen	Wertungszahl $w_i = \sum (m_{ij} \cdot g_i)$	wirtschaftliche Wertigkeit $y_i = w_i / \sum w_{i,ideal}$
Maßzahlumsetzung für m_{ij}	{0,1,2,3,4}	{0,1,2,3,4}	{0,1,2,3,4}	{0,1,2,3,4}		
Gewichtung g_i	40	30	20	10		
Variante	Soll-Wert $\sum g_i := 100$					
Verbesserter Ist-Stand	Manuelle Einstellung der Grenzlagen. Einstellvorgang intuitiv, da netzparallele Einstellung. MITTEL.	Kinematik ca. 15.000€. GERING.	Bei geringer Drehzahl ist nicht mit Ausfall zu rechnen. GERING.	Ja. Kann mit geringen Anpassungsmaßnahmen weiter verwendet werden. AUFWAND MITTEL.		
	2	4	3	3	200	0,71
Segmentierter Seitenrahmen	Sehr viel Zeit, da viele Teile ausgetauscht und eingestellt werden müssen und evtl. eine Einstellung der Einzelteile notwendig ist. HOCH.	Geringe Kosten für Aufbau. Höhere Kosten in Abhängigkeit von Anzahl der Grenzlagen. MITTEL.	Evtl. sind weitere Seitenrahmenprofile notwendig. Ansonsten ist das Konzept wartungsarm. Risiko: unpassende Teile. Folge: Iterationen. MITTEL.	Konzept kann weiter verwendet werden. Anpassung muss individuell erfolgen. Aufwand. Seitenrahmen muss bei neuem Projekt angepasst werden. AUFWAND SEHR HOCH.		
	0	2	1	0	60	0,21
Roboter	Nach einmaliger Programmierung ist der Aufwand gering. GERING.	Kinematik ca. 1.000.000€. SEHR HOCH.	Ausfall unwahrscheinlich. Ausfallkosten jedoch hoch. Gefahr Kollision gegeben. MITTEL.	Kann weiter verwendet werden. Programmierung muss angepasst werden. AUFWAND MITTEL.		
	3	0	3	3	120	0,43
Hexapod	Nach einmaliger Programmierung ist der Aufwand gering. GERING.	Kosten Hexapod inkl. Steuerung ca. 107.100€. HOCH.	Ausfall unwahrscheinlich. Ausfallkosten jedoch hoch. Gefahr Kollision gegeben. MITTEL.	Kann weiter verwendet werden. Programmierung muss angepasst werden. AUFWAND MITTEL.		
	3	2	3	3	180	0,64
Lineartisch	Vermutlich viele Iterationen notwendig. Annahme: Einstellung manuell (keine elektrische Regelung). HOCH.	Kosten Führungen ca. 30.939,98€. MITTEL.	Lange Lebensdauer bei langsamer Verfahrensgeschwindigkeit. Ausfall unwahrscheinlich. Ausfallkosten jedoch hoch. Risiko Kollision groß. MITTEL.	Nach Anpassung ist System nutzbar. Anpassung auf gesamten Seitenrahmen kaum möglich. AUFWAND HOCH.		
	1	3	2	2	130	0,46
ideal	4	4	4	4	280	1,00

Ergebnisse aus den Studien zur Qualifizierung des Prüfstands hinsichtlich der Widerlegung der Nullhypothese H_0

Die nachfolgenden Abschnitte zeigen die Messergebnisse zu den jeweiligen Studien aus Abschnitt 5.5. Die größten ermittelten Standardabweichungen sind fett hervorgehoben.

Studie 1: Randomisiertes Anfahren der acht Positionen

Tabelle 69: Studie 01: Standardabweichungen aus den Sensormessungen in mm

Pos.	Sensornummer									
	1/11	2/12	3/13	4/14	5/15	6/16	7/17	8/18	9/19	10
1	0,1379	0,0363	0,0580	0,0463	/	0,0728	/	0,0837	0,0615	0,1306
	0,1282	0,1247	0,0289	0,0239	0,0337	0,0322	0,0171	0,0168	0,0726	
2	0,1033	0,0292	0,0494	0,0326	/	0,0678	/	0,0759	0,0468	0,0973
	0,0948	0,0923	0,0306	0,0269	0,0215	0,0210	0,0110	0,0114	0,0621	
3	0,0272	0,0471	0,0546	0,0522	/	0,0335	/	0,0273	0,0460	0,0277
	0,0224	0,0273	0,0367	0,0315	0,0247	0,0240	0,0251	0,0258	0,0258	
4	0,0962	0,0303	0,0336	0,0462	/	0,0527	/	0,0589	0,0453	0,0995
	0,0975	0,0970	0,0189	0,0170	0,0419	0,0393	0,0170	0,0168	0,0354	
5	0,1546	0,0460	0,0750	0,0458	/	0,0670	/	0,0858	0,0467	0,1414
	0,1396	0,1336	0,0239	0,0229	0,0391	0,0368	0,0128	0,0135	0,0787	
6	0,1006	0,0199	0,0327	0,0261	/	0,0513	/	0,0656	0,0550	0,1015
	0,0987	0,0990	0,0278	0,0190	0,0242	0,0234	0,0123	0,0122	0,0551	
7	0,0210	0,0101	0,0165	0,0206	/	0,0308	/	0,0324	0,0370	0,0218
	0,0176	0,0205	0,0309	0,0283	0,0279	0,0277	0,0170	0,0186	0,0281	
8	0,0838	0,0363	0,0421	0,0463	/	0,0404	/	0,0521	0,0415	0,0857
	0,0819	0,0824	0,0207	0,0146	0,0368	0,0344	0,0229	0,0233	0,0395	

Studie 2: Randomisiertes Anfahren der 8 Punkte mit jeweiligem Durchfahren des Referenzpunktes

Tabelle 70: Studie 02: Standardabweichungen aus den Sensormessungen in mm

Pos.	Sensornummer									
	1/11	2/12	3/13	4/14	5/15	6/16	7/17	8/18	9/19	10
1	0,0094	0,0108	0,0205	0,0240	/	0,0247	/	0,0273	0,0202	0,0078
	0,0067	0,0079	0,0165	0,0130	0,0318	0,0321	0,0037	0,0035	0,0221	
2	0,0113	0,0115	0,0215	0,0244	/	0,0318	/	0,0244	0,0212	0,0068
	0,0081	0,0061	0,0256	0,0263	0,0323	0,0332	0,0069	0,0063	0,0258	
3	0,0083	0,0232	0,0281	0,0283	/	0,0281	/	0,0249	0,0073	0,0056
	0,0046	0,0055	0,0116	0,0071	0,0311	0,0310	0,0123	0,0125	0,0239	
4	0,0054	0,0069	0,0185	0,0296	/	0,0288	/	0,0251	0,0050	0,0064
	0,0078	0,0082	0,0076	0,0087	0,0287	0,0291	0,0116	0,0111	0,0229	
5	0,0034	0,0102	0,0195	0,0127	/	0,0164	/	0,0148	0,0083	0,0062
	0,0072	0,0088	0,0094	0,0090	0,0309	0,0309	0,0051	0,0041	0,0223	
6	0,0167	0,0159	0,0278	0,0114	/	0,0211	/	0,0208	0,0226	0,0100
	0,0100	0,0063	0,0227	0,0179	0,0345	0,0335	0,0027	0,0015	0,0327	
7	0,0177	0,0123	0,0218	0,0156	/	0,0263	/	0,0250	0,0147	0,0118
	0,0120	0,0093	0,0125	0,0103	0,0313	0,0316	0,0107	0,0110	0,0280	
8	0,0160	0,0174	0,0251	0,0239	/	0,0270	/	0,0267	0,0077	0,0136
	0,0131	0,0123	0,0099	0,0124	0,0365	0,0371	0,0146	0,0146	0,0268	

Studie 3a: Wiederholtes aufeinanderfolgendes Anfahren der 8 Punkte mit jeweiligem Durchfahren des Referenzpunktes

Tabelle 71: Studie 03a: Standardabweichungen aus den Sensormessungen in mm

Pos.	Sensornummer									
	1/11	2/12	3/13	4/14	5/15	6/16	7/17	8/18	9/19	10
1	0,0102	0,0054	0,0107	0,0056	/	0,0070	/	0,0074	0,0137	0,0089
	0,0085	0,0082	0,0110	0,0087	0,0038	0,0048	0,0023	0,0029	0,0059	
2	0,0072	0,0025	0,0054	0,0053	/	0,0025	/	0,0065	0,0150	0,0060
	0,0065	0,0067	0,0221	0,0221	0,0043	0,0066	0,0069	0,0069	0,0025	
3	0,0092	0,0249	0,0283	0,0200	/	0,0050	/	0,0031	0,0080	0,0072
	0,0057	0,0067	0,0096	0,0086	0,0062	0,0052	0,0129	0,0131	0,0072	
4	0,0026	0,0046	0,0095	0,0037	/	0,0027	/	0,0053	0,0024	0,0029
	0,0032	0,0034	0,0038	0,0043	0,0059	0,0052	0,0051	0,0051	0,0038	
5	0,0051	0,0019	0,0054	0,0044	/	0,0039	/	0,0032	0,0059	0,0064
	0,0073	0,0075	0,0082	0,0072	0,0051	0,0039	0,0029	0,0030	0,0031	
6	0,0038	0,0036	0,0074	0,0040	/	0,0083	/	0,0110	0,0195	0,0046
	0,0022	0,0041	0,0178	0,0154	0,0089	0,0069	0,0018	0,0020	0,0048	
7	0,0116	0,0041	0,0048	0,0054	/	0,0108	/	0,0099	0,0156	0,0099
	0,0084	0,0088	0,0132	0,0103	0,0074	0,0080	0,0107	0,0111	0,0056	
8	0,0079	0,0130	0,0156	0,0189	/	0,0126	/	0,0049	0,0078	0,0073
	0,0066	0,0067	0,0074	0,0080	0,0051	0,0050	0,0046	0,0047	0,0041	

Studie 3b: Wiederholtes aufeinanderfolgendes Anfahren der 8 Punkte mit jeweiligem Durchfahren des Referenzpunktes bei erhöhter Versuchsanzahl

Tabelle 72: Studie 03b: Standardabweichungen aus den Sensormessungen in mm

Pos.	Sensornummer									
	1/11	2/12	3/13	4/14	5/15	6/16	7/17	8/18	9/19	10
1	0,0084	0,0056	0,0112	0,0070	/	0,0084	/	0,0083	0,0143	0,0072
	0,0065	0,0065	0,0111	0,0088	0,0049	0,0059	0,0029	0,0034	0,0061	
2	0,0073	0,0021	0,0046	0,0056	/	0,0062	/	0,0076	0,0136	0,0064
	0,0069	0,0066	0,0195	0,0195	0,0052	0,0067	0,0060	0,0060	0,0051	
3	0,0078	0,0216	0,0246	0,0169	/	0,0059	/	0,0044	0,0075	0,0063
	0,0049	0,0060	0,0094	0,0080	0,0065	0,0057	0,0111	0,0115	0,0067	
4	0,0027	0,0052	0,0107	0,0067	/	0,0050	/	0,0070	0,0031	0,0035
	0,0039	0,0040	0,0057	0,0048	0,0083	0,0075	0,0057	0,0057	0,0050	
5	0,0053	0,0023	0,0068	0,0063	/	0,0052	/	0,0026	0,0050	0,0065
	0,0078	0,0081	0,0070	0,0070	0,0054	0,0046	0,0034	0,0032	0,0025	
6	0,0037	0,0047	0,0101	0,0065	/	0,0097	/	0,0121	0,0188	0,0049
	0,0033	0,0053	0,0182	0,0146	0,0123	0,0116	0,0027	0,0023	0,0084	
7	0,0105	0,0057	0,0086	0,0055	/	0,0107	/	0,0108	0,0158	0,0090
	0,0076	0,0080	0,0125	0,0099	0,0106	0,0111	0,0105	0,0110	0,0084	
8	0,0064	0,0146	0,0183	0,0205	/	0,0131	/	0,0056	0,0091	0,0059
	0,0053	0,0056	0,0082	0,0091	0,0085	0,0078	0,0043	0,0044	0,0064	

Tabelle 73: Studie 03: Ergebnisse (Prüfgröße p) des ANDERSON-DARLING-Tests auf Normalverteilung

Pos.	Sensornummer									
	1/11	2/12	3/13	4/14	5/15	6/16	7/17	8/18	9/19	10
1	0,004	0,067	0,069	0,170	/	0,276	/	0,548	0,256	0,000
	0,000	0,000	0,013	0,128	0,216	0,124	0,103	0,139	0,041	
2	0,000	0,026	0,039	0,017	/	0,004	/	0,258	0,000	0,069
	0,009	0,144	0,090	0,004	0,090	0,020	0,396	0,567	0,000	
3	0,688	0,059	0,042	0,502	/	0,128	/	0,054	0,012	0,144
	0,012	0,001	0,294	0,128	0,229	0,172	0,017	0,008	0,011	
4	0,025	0,216	0,392	0,154	/	0,234	/	0,380	0,023	0,121
	0,173	0,147	0,064	0,055	0,440	0,628	0,207	0,284	0,103	
5	0,004	0,024	0,449	0,058	/	0,111	/	0,000	0,085	0,141
	0,590	0,177	0,094	0,324	0,277	0,273	0,325	0,112	0,000	
6	0,336	0,297	0,542	0,646	/	0,506	/	0,354	0,002	0,143
	0,174	0,130	0,042	0,000	0,423	0,026	0,146	0,020	0,322	
7	0,114	0,352	0,174	0,479	/	0,768	/	0,553	0,193	0,147
	0,055	0,020	0,560	0,073	0,070	0,116	0,000	0,000	0,456	
8	0,509	0,817	0,912	0,506	/	0,388	/	0,169	0,012	0,266
	0,020	0,431	0,429	0,536	0,013	0,059	0,026	0,015	0,523	
$p < \alpha$ Die Nullhypothese, dass die Daten normalverteilt sind, wird verworfen.										
$p > \alpha$ Die Nullhypothese, dass die Daten normalverteilt sind, kann nicht verworfen werden.										

Anhang F: Ergänzungen zu Kapitel 6

Für das Kapitel 6 gibt es keinen spezifischen Anhang.

Anhang G: Ergänzungen zu Kapitel 7

Nachfolgend ist der gesamte Fragebogen zur Probandenstudie, wie in Abschnitt 7.3.1 beschrieben, ersichtlich.

Probandenstudie hinsichtlich der Verortung des Ansatzes im PEP

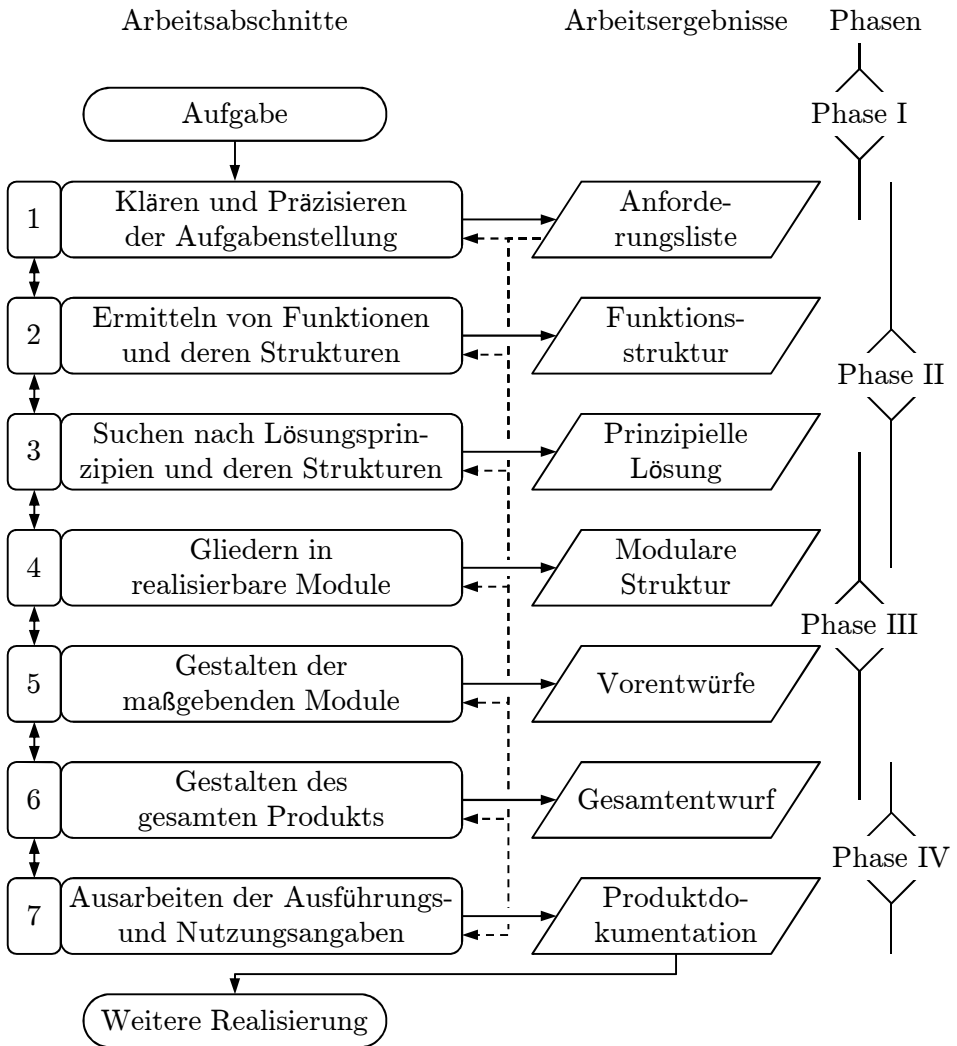
Im Rahmen der Doktorarbeit von M. Ehlert wird ein virtueller Ansatz hinsichtlich einer simulationsunterstützten funktionalen Grenzlagenabsicherung vorgeschlagen. Die Teilschritte des Ansatzes werden den Schritten 1 bis 7 des Produktentwicklungsprozesses, wie in den VDI-RICHTLINIEN 2221, 2222 BLATT 1 und 2223 vorgestellt, zugeordnet. Ziel dieser Probandenstudie ist es, diese Zuordnung durch einen qualitativen Evaluationstest auf Expertenbasis zu bestätigen.

Der/die Proband(in) hat im Rahmen
dieser Studie die folgenden Aufgaben:

- 1 Machen Sie sich mit den 7 Schritten des PEPs, wie in den VDI-RICHTLINIEN 2221, 2222 BLATT 1 und 2223 beschrieben, vertraut.
- 2 Machen Sie sich mit dem vorgeschlagenen virtuellen Ansatz hinsichtlich einer simulationsunterstützten funktionalen Grenzlagenabsicherung vertraut.
- 3 Falls Sie noch Fragen haben sollten, können Sie diese nun stellen.
- 4 Bitte ordnen Sie die einzelnen Teilschritte (Sortierung ist vorgegeben) des virtuellen Ansatzes den einzelnen Schritten des PEPs selbständig zu. Mehrfachzuordnungen zu einzelnen Schritten sind möglich und notwendig.

Beginn Probandenstudie.

1 Machen Sie sich mit den 7 Schritten des PEPS, wie in den VDI-RICHTLINIEN 2221, 2222 BLATT 1 und 2223 beschrieben, vertraut.



Schritt 1: Klären und Präzisieren der Aufgabenstellung

„Der Arbeitsabschnitt 1 ist notwendig, um die Anforderungen der vom Kunden oder der Produktplanung formulierten Aufgabe zu klären und zu präzisieren. Dazu gehören das Zusammentragen aller verfügbaren Informationen und das Erkennen von Informationslücken, das Überprüfen und Ergänzen der externen Anforderungen, das Hinzufügen unternehmensinterner Anforderungen sowie das Formulieren der Aufgabenstellung aus Sicht des Konstrukteurs einschließlich bereits möglicher und notwendiger Strukturierungen“, vgl. [213, S. 7].

Schritt 2: Ermitteln von Funktionen und deren Strukturen

„Im Arbeitsabschnitt 2 erfolgt das Ermitteln von Funktionen, und zwar zunächst der Gesamtfunktion und der wesentlichen, vom zu entwickelnden Produkt bzw. System zu erfüllenden Teilfunktionen (Hauptfunktionen). Deren Gliederung und Kombination zu Strukturen bildet die Grundlage zum Suchen nach Lösungen für das Gesamtprodukt bzw. die Gesamtfunktion“, vgl. [213, S. 8].

Schritt 3: Suche nach Lösungsprinzipien und deren Strukturen

„Im Arbeitsabschnitt 3 werden für alle Funktionen oder zunächst für die wesentlichen Teilfunktionen der Funktionsstruktur Lösungsprinzipien gesucht. Hierzu müssen in einem ersten Schritt physikalische, chemische oder andere Effekte ausgewählt werden. Anschließend müssen diese Effekte durch sog. wirkstrukturelle Festlegungen realisiert werden. Bei mechanischen Systemen betreffen solche wirkstrukturellen Festlegungen z. B. die Geometrie (Wirkgeometrie), die Bewegung (Wirkbewegung) und die Werkstoffart. Diese Festlegungen bilden das Lösungsprinzip. Die für Teilfunktionen gefundenen Lösungsprinzipien müssen anschließend entsprechend den Funktionsstrukturen zur Wirkstruktur verknüpft werden. Dabei können weitere Funktionen (Nebenfunktionen) erkennbar werden, die die Realisierung bestimmter Effekte bzw. Lösungsprinzipien erst möglich machen“, vgl. [213, S. 8].

Schritt 4: Gliedern in realisierbare Module

„Im Arbeitsabschnitt 4 wird die Prinzipielle Lösung in realisierbare Module gegliedert, bevor deren weitere, in der Regel arbeitsaufwendige Konkretisierung erfolgt“, vgl. [213, S. 9].

Schritt 5: Gestalten der maßgebenden Module

„Im Arbeitsabschnitt 5 erfolgt ein wichtiger Konkretisierungs- bzw. Realisierungssprung durch Gestalten der für die Produkt- bzw. Systemoptimierung maßgebenden Module. Hierbei hat es sich als zweckmäßig erwiesen, den Konkretisierungs- und Vollständigkeitsgrad der geometrischen, stofflichen und/oder programmtechnischen Festlegungen nur soweit zu treiben, daß ein Erkennen und Auswählen eines Gestaltungsoptimums möglich wird. Es wird hierbei auch von einem Vorgestalten oder Grobgestalten gesprochen“, vgl. [213, S. 9].

Schritt 6: Gestalten des gesamten Produkts

„Im Arbeitsabschnitt 6 werden die bereits vorentworfenen Module durch weitere Detailangaben, durch Gestalten und Ergänzen noch nicht bearbeiteter Gruppen und Elemente sowie durch Verknüpfen aller Gruppen und Teile endgültig festgelegt. Es wird bei diesem Abschnitt auch von einem Endgestalten oder Feingestalten gesprochen. Insbesondere die Festlegung der im Arbeitsabschnitt 5 noch nicht realisierten Module ist u.U. durch Auswahl bekannter bzw. handelsüblicher Elemente möglich“, vgl. [213, S. 9].

Schritt 7: Ausarbeiten der Ausführungs- und Nutzungsangaben

„Der Arbeitsabschnitt 7 dient dem Ausarbeiten der vom Entwicklungs- und Konstruktionsbereich zu verantwortenden Ausführungs- und Nutzungsangaben. Dieser Arbeitsabschnitt überlappt insofern den vorhergehenden, weil in diesem bereits wesentliche Festlegungen zur fertigungstechnischen Realisierung sowie zum Produktgebrauch getroffen wurden“, vgl. [213, S. 9].

2 Machen Sie sich mit dem vorgeschlagenen virtueller Ansatz hinsichtlich einer simulationsunterstützten funktionalen Grenzlagenabsicherung vertraut.

- 01 Festlegung toleranzsensitiver Schließmaße (vor allem funktional relevant)
- 02 Zuordnung zu erreichender Toleranz-Zielwerte
- 03 Ermittlung von Wirkzusammenhängen
- 04 Klären der Wirkzusammenhänge im Toleranzsimulationsmodell
- 05 Beeinflussung etwaiger Lösungsvorschläge zugunsten einer toleranzverträglichen konstruktiven Auslegung
- 06 Aufteilung in sowie Einflussnahme auf mögliche konstruktive Konzeptalternativen mit veränderten Schnittstellen (Diese Einflussnahme kann sich durch Vorschläge hinsichtlich veränderter Beitragsleister, der Wahl alternativer Ausrichtsysteme oder der Abänderung von Montagefolgen ausdrücken.)
- 07 Gestaltung von Ausrichtsystemen und Montage-/Fügekonzepten
- 08 Konzeptionierung und Durchführung von korrespondierenden Toleranzberechnungsstudien für toleranzkritische Schließmaße inkl. Dokumentation
- 09 Durchführung der finalen statistischen CAT-Berechnungen für das betrachtete Produkt
- 10 Durchführung der finalen statistischen Versuchsplanung auf Basis CAT zur Minimierung des FEM-Simulationsaufwandes
- 11 Durchführung der FEM-Simulationen für betrachtetes Produkt
- 12 Durchführung von Robustheitsuntersuchungen für das betrachtete Produkt
- 13 Kopplung der Ergebnisse aus den finalen statistischen CAT-Berechnungen und FEM-Simulationen
- 14 Ergebnisdokumentation hinsichtlich der prognostizierten korrigierten Grenzlagen inkl. Aussage bzgl. Erreichung der Toleranz-Zielwerte

3 Falls Sie noch Fragen haben sollten, können Sie diese nun stellen.

- 4 Bitte ordnen Sie die Teilschritte des virtuellen Ansatzes den einzelnen Schritten des PEPs selbständig zu. Mehrfachzuordnungen zu einzelnen Schritten sind möglich und notwendig.

Ansatz zur simulations-
unterstützten funktionalen
Grenzlagenabsicherung

PEP entsprechend den
VDI-RICHTLINIEN 2221,
2222 BLATT 1 und 2223

01

☐ Schritt 1

02

03

☐ Schritt 2

04

05

☐ Schritt 3

06

07

☐ Schritt 4

08

09

☐ Schritt 5

10

11

☐ Schritt 6

12

13

☐ Schritt 7

14

Vielen Dank für Ihre Teilnahme an der Studie.

Ende Probandenstudie.

Anhang H: Ergänzungen zu Kapitel 8

Für das Kapitel 8 gibt es keinen spezifischen Anhang.

Literaturverzeichnis

- [1] BMW.AG. *Geschäftsbericht 2015*. Bayerische Motoren Werke AG, 2016. https://www.bmwgroup.com/content/dam/bmw-group-websites/bmwgroup_com/ir/downloads/de/2015/12784_GB_2015_dt_Finanzbericht_Online.pdf.
- [2] BMW.AG. *Geschäftsbericht 2014*. Bayerische Motoren Werke AG, 2015. <http://geschaeftsbericht2014.bmwgroup.com/bmwgroup/annual/2014/gb/German/pdf/bericht2014.pdf>.
- [3] BMW.AG. *Geschäftsbericht 2013*. Bayerische Motoren Werke AG, 2014. <http://geschaeftsbericht2013.bmwgroup.com/bmwgroup/annual/2013/gb/German/pdf/bericht2013.pdf>.
- [4] Daimler.AG. *Geschäftsbericht 2015*. Feb. 2016. <https://www.daimler.com/dokumente/investoren/berichte/geschaeftsberichte/daimler/daimler-ir-geschaeftsbericht-2015.pdf>.
- [5] Daimler.AG. *Geschäftsbericht 2014*. Feb. 2015. <https://www.daimler.com/dokumente/investoren/berichte/geschaeftsberichte/daimler/daimler-ir-geschaeftsbericht-2014.pdf>.
- [6] Daimler.AG. *Geschäftsbericht 2013*. Feb. 2014. http://www.daimler.com/Projects/c2c/channel/documents/2432178_Daimler_2013_Geschaeftsbericht.pdf.
- [7] Daimler.AG. *Geschäftsbericht 2012*. Feb. 2013. <https://www.daimler.com/dokumente/investoren/berichte/geschaeftsberichte/daimler/daimler-ir-geschaeftsbericht-2012.pdf>.
- [8] Daimler.AG. *Geschäftsbericht 2011*. Feb. 2012. http://www.daimler.com/Projects/c2c/channel/documents/2125318_Daimler_2011_Gesch__ftsbericht.pdf.
- [9] Daimler.AG. *Geschäftsbericht 2010*. Feb. 2011. <https://www.daimler.com/dokumente/investoren/berichte/geschaeftsberichte/daimler/daimler-ir-geschaeftsbericht-2010.pdf>.
- [10] Daimler.AG. *Geschäftsbericht 2009*. Feb. 2010. http://www.daimler.com/Projects/c2c/channel/documents/1813320_DAI_2009_Geschaeftsbericht.pdf.
- [11] Audi.AG, Finanzkommunikation/Finanzanalytik. *Geschäftsbericht 2015*. Feb. 2016. http://www.audi.com/content/dam/com/DE/investor-relations/financial_reports/annual-reports/audi-gb-2015.pdf.

- [12] Audi.AG, Finanzkommunikation/Finanzanalytik. *Geschäftsbericht 2014*. Feb. 2015. http://www.audi.com/content/dam/com/DE/investor-relations/financial_reports/annual-reports/audi_gb_2014_de.pdf.
- [13] Audi.AG, Finanzkommunikation/Finanzanalytik. *Geschäftsbericht 2013*. Feb. 2014. http://www.audi.com/content/dam/com/DE/investor-relations/financial_reports/annual-reports/audi_gb_2013_de.pdf.
- [14] Audi.AG, Finanzkommunikation/Finanzanalytik. *Geschäftsbericht 2012*. Feb. 2013. http://www.audi.de/content/dam/ngw/company/Investor_Relations_2013_01/GB_2012_DE.pdf.
- [15] Audi.AG, Finanzkommunikation/Finanzanalytik. *Geschäftsbericht 2011*. Feb. 2012. http://www.audi.com/content/dam/com/DE/investor-relations/financial_reports/annual-reports/audi_gb_2011_de.pdf.
- [16] Audi.AG, Finanzkommunikation/Finanzanalytik. *Geschäftsbericht 2010*. Feb. 2011. http://www.audi.com/content/dam/com/DE/investor-relations/financial_reports/annual-reports/audi_gb_2010_de.pdf.
- [17] Audi.AG, Finanzkommunikation/Finanzanalytik. *Geschäftsbericht 2009*. Feb. 2010. http://www.audi.com/content/dam/com/DE/investor-relations/financial_reports/annual-reports/audi_gb_2009_de.pdf.
- [18] FORD. *2015 Annual Report*. Ford Motor Company, 2016. <http://corporate.ford.com/content/dam/corporate/en/investors/reports-and-filings/Annual%20Reports/2015-Annual-Report.pdf>.
- [19] FORD. *2014 Annual Report*. Ford Motor Company, 2015. http://corporate.ford.com/annual-reports/annual-report-2014/files/201_Ford_Annual_Report_sm.pdf.
- [20] FORD. *2013 Annual Report*. Ford Motor Company, 2014. http://corporate.ford.com/doc/ar2013-2013_ford_annual_report_mr.pdf.
- [21] FORD. *2012 Annual Report*. Ford Motor Company, 2013. <http://corporate.ford.com/content/dam/corporate/en/investors/reports-and-filings/Annual%20Reports/2012-annual-report.pdf>.
- [22] FORD. *2011 Annual Report*. Ford Motor Company, 2012. http://corporate.ford.com/doc/2011_annual_report.pdf.
- [23] FORD. *2009 Annual Report*. Ford Motor Company, 2010. http://corporate.ford.com/doc/2009_annual_report.pdf.

- [24] GM. *Annual Report 2015*. General Motors Company, 2016. https://www.gm.com/content/dam/gm/en_us/english/Group4/InvestorsPDFDocuments/10-K.pdf.
- [25] GM. *Annual Report 2014*. General Motors Company, 2015. https://www.gm.com/content/dam/gm/en_us/english/Group4/InvestorsPDFDocuments/2014_GM_Annual_Report.pdf.
- [26] GM. *Annual Report 2013*. General Motors Company, 2014. http://www.gm.com/annualreport/downloads/2013_GM_Annual_Report.pdf.
- [27] GM. *Annual Report 2011*. General Motors Company, 2012. http://www.gm.com/content/dam/gmcom/COMPANY/Investors/Stockholder_Information/PDFs/2011_GM_Annual_Report.pdf.
- [28] GM. *Annual Report 2010*. General Motors Company, 2011. http://www.gm.com/content/dam/gmcom/COMPANY/Investors/Corporate_Governance/PDFs/StockholderInformationPDFs/Annual-Report.pdf.
- [29] GM. *Annual Report 2010 ANNUAL REPORT PURSUANT TO SECTION 13 OR 15(d) OF THE SECURITIES EXCHANGE ACT OF 1934*. General Motors Company, 2011. <http://quote.morningstar.com/stock-filing/Annual-Report/2010/12/31/t.aspx?t=XNYS:GM&ft=&d=2c93e95b284822ffaob75ab7b4650994>.
- [30] Volkswagen.AG, Konzernkommunikation. *Geschäftsbericht 2015*. Apr. 2016. http://www.volkswagenag.com/content/vwcorp/info_center/de/publications/2016/04/Y_2015_d.bin.html/binarystorageitem/file/Y_2015_d.pdf.
- [31] Volkswagen.AG, Konzernkommunikation. *Geschäftsbericht 2014*. Feb. 2015. http://www.volkswagenag.com/content/vwcorp/content/de/misc/pdf-dummies.bin.html/downloadfilelist/downloadfile/downloadfile_30/file/Y_2014_d.pdf.
- [32] Volkswagen.AG, Konzernkommunikation. *Geschäftsbericht 2013*. Feb. 2014. http://www.volkswagenag.com/content/vwcorp/info_center/de/themes/2014/03/Annual_Report_2013.bin.html/marginalparsys/textandimage/downloadFile/GB%5C%2B2013_d.pdf.
- [33] Volkswagen.AG, Konzernkommunikation. *Geschäftsbericht 2012*. Feb. 2013. http://www.volkswagenag.com/content/vwcorp/content/de/misc/pdf-dummies.bin.html/downloadfilelist/downloadfile/downloadfile_22/file/Y_2012_d.pdf.
- [34] Volkswagen.AG, Konzernkommunikation. *Geschäftsbericht 2011*. Feb. 2012. <http://geschaeftsbericht2011.volkswagenag.com/serviceseiten/willkommen.html?cat=s>.

- [35] Volkswagen.AG, Konzernkommunikation. *Geschäftsbericht 2010*. Feb. 2011. http://www.volkswagenag.com/content/vwcorp/content/en/misc/pdf-dummies.bin.html/downloadfilelist/downloadfile/downloadfile_14/file/Y_2010_e.pdf.
- [36] Volkswagen.AG, Konzernkommunikation. *Geschäftsbericht 2009*. Feb. 2010. http://www.volkswagenag.com/content/vwcorp/info_center/de/publications/2010/03/Annual_Report_2009.bin.html/binarystorageitem/file/Y_2009_d.pdf.
- [37] N.N. „Toyota’s car sales worldwide from FY 2007 to FY 2016 (in 1,000 units)“. <https://www.statista.com>, Stand: 16.08.2016 (2016). <https://www.statista.com/statistics/267274/worldwide-vehicle-sales-of-toyota-since-2007/>.
- [38] TOYOTA. *Annual Report 2014*. TOYOTA Motor Corporation, 2015. http://www.toyota-global.com/investors/ir_library/annual/pdf/2014/.
- [39] TOYOTA. *Annual Report 2013*. TOYOTA Motor Corporation, 2014. http://www.toyota-global.com/investors/ir_library/annual/pdf/2013/.
- [40] TOYOTA. *Annual Report 2012*. TOYOTA Motor Corporation, 2013. http://www.toyota-global.com/investors/ir_library/annual/pdf/2012/.
- [41] TOYOTA. *Annual Report 2011*. TOYOTA Motor Corporation, 2012. http://www.toyota-global.com/investors/ir_library/annual/pdf/2011/.
- [42] TOYOTA. *Annual Report 2010*. TOYOTA Motor Corporation, 2011. http://www.toyota-global.com/investors/ir_library/annual/pdf/2010/.
- [43] TOYOTA. *Annual Report 2009*. TOYOTA Motor Corporation, 2010. http://www.toyota-global.com/investors/ir_library/annual/pdf/2009/.
- [44] FIAT Chrysler Automobiles. *Annual Report 2014*. Dez. 2015. http://www.fcagroup.com/en-US/investor_relations/financial_information_reports/annual_report/2014/FCA_2014_Annual_Report.pdf.
- [45] FIAT. *Annual Report 2013*. Dez. 2014. http://www.fiatspa.com/en-US/investor_relations/financial_reports/FiatDocuments/Bilanci/2013/2013_annual_report.pdf.
- [46] FIAT. *Annual Report 2012*. Dez. 2013. http://www.fiatspa.com/en-US/investor_relations/financial_reports/FiatDocuments/Bilanci/2012/FiatGroup_Annual_Report_2012_ENG.pdf.

- [47] FIAT. *Annual Report 2011*. Dez. 2012. http://www.fiatspa.com/en-US/investor_relations/financial_reports/FiatDocuments/Bilanci/2011/Fiat_AnnualReport_2011_ENG.pdf.
- [48] FIAT. *Annual Report 2010*. Dez. 2011. http://www.fiatspa.com/en-US/investor_relations/financial_reports/FiatDocuments/Bilanci/2010/Relazione_Finanziaria_UK.pdf.
- [49] FIAT. *Annual Report 2009*. Dez. 2010. http://www.fiatspa.com/en-US/investor_relations/financial_reports/FiatDocuments/Bilanci/2009/Annual_report_totUK_2009.pdf.
- [50] Stockinger, Andreas. „Computer Aided Robust Design – Verknüpfung rechnerunterstützter Entwicklung und virtueller Fertigung als Baustein des Toleranzmanagements“. Diss. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Technische Fakultät, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 01, Konstruktionstechnik / Maschinenelemente, Nr. 409, Okt. 2010. http://www.opus.ub.uni-erlangen.de/opus/volltexte/2011/2263/pdf/dissertation_stockinger2011_unibibsmall.pdf.
- [51] Flassig, Peter Michael. „Unterstützende Optimierungsstrategien zur robusten aerodynamischen Verdichterschaufelenauslegung“. Diss. Brandenburgische Technische Universität Cottbus, Fakultät für Maschinenbau, Elektrotechnik und Wirtschaftsingenieurwesen, Lehrstuhl Technische Mechanik und Fahrzeugdynamik, Juni 2011. http://www.shaker.de/Online-Gesamtkatalog-Download/2013.01.21-13.43.11-192.109.190.88-radioA8C.tmp/3-8440-0580-3_INH.PDF.
- [52] Grieb, P. „Gelebte digitale Prozesskette“. *Konstruktion* 4 (2008), S. 33–35.
- [53] Bayer, J.; Collisi, T. und Wenzel, S. „Simulation in der Automobilproduktion“. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2003. Kap. BÄR, T. ; HAA-SIS, s.: Prozessplanung, Produktionsmodellierung und -simulation – ein Überblick, S. 151–163.
- [54] Ehlert, Matthias. „Aeroakustische Nachrechnung von Axialventilatorprofilen, Diplomarbeit“. Magisterarb. Technische Universität Berlin, Fachgebiet Luftfahrtantriebe, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt Braunschweig, Technische Akustik, ebm-papst Mulfingen GmbH & Co. KG, Vorentwicklung Strömungstechnik, 2011.
- [55] Lewis, E. E. „Introduction to Reliability Engineering“. *John Wiley & Sons, Inc., Chichester* (1996).

- [56] Fiessler, Bernd; Neumann, Hans-Joachim und Rackwitz, Rüdiger. „Quadratic Limit States in Structural Reliability“. *Journal of the Engineering Mechanics Division* 105 (1979), S. 661–676. <http://cedb.asce.org/cgi/WWWdisplay.cgi?8906>.
- [57] Bullough, R.; Green, V. R.; Tomkins, B.; Wilson, R. und Wintle, J. B. „A Review of Methods and Applications of Reliability Analysis for Structural Integrity Assessment of UK Nuclear Plant“. *International Journal of Pressure Vessels and Piping* 76 (1999), S. 909–919.
- [58] Roos, Dirk und Bucher, Christian. „Methoden der stochastischen Optimierung“. *Proceedings of Weimarer Optimierungs- und Stochastiktag 1.0, Weimar* (2004). http://www.dynardo.de/fileadmin/Material_Dynardo/bibliothek/WOST_1.0/WOST_1_StochastischeOptimierung_De.pdf.
- [59] Koch, P. N.; Yang, R.-J. und Gu, L. „Design for six sigma through robust optimization“. *Structural and Multidisciplinary Optimization* 26 (2004), S. 235–248.
- [60] Reuter, R. und Hulsmann, J. „Achieving design targets through stochastic simulation“. *Proceedings of the Madymo Users Conference, Paris* 1-9 (2000).
- [61] Marczyk, J. „Principles of Simulation-Based Computer-Aided Engineering“. *FIM Publications, Barcelona* (1999).
- [62] Keane, Andy J. und Nair, Prasanth B. „Computational Approaches for Aerospace Design, The Pursuit of Excellence“. *John Wiley & Sons, Inc., Chichester* (2005).
- [63] Ehlert, Matthias. „Vergleich unterschiedlicher Methoden zur Schätzung probabilistischer Maße für die robuste aerodynamische Verdichterauslegung, Studienarbeit“. Magisterarb. Technische Universität Berlin, Fachgebiet Luftfahrtantriebe, Brandenburgische Technische Universität Cottbus, Lehrstuhl Technische Mechanik und Fahrzeugdynamik, Mai 2010.
- [64] Keskin, Akin. „Process Integration and Automated Multi-Objective Optimization Supporting Aerodynamik Compressor Design“. Diss. Brandenburgische Technische Universität Cottbus, Fakultät für Maschinenbau, Elektrotechnik und Wirtschaftsingenieurwesen, Lehrstuhl Technische Mechanik und Fahrzeugdynamik, Shaker Verlag, 2007.
- [65] Ronniger, Curt. *Taschenbuch der statistischen Qualitäts- und Zuverlässigkeitsmethoden*. Auflage 1.1. Eigenverlag, München, 2013.

- [66] Bohn, Martin. „Toleranzmanagement im Entwicklungsprozess – Reduzierung der Auswirkungen von Toleranzen auf Zusammenbauten der Automobil-Karosserien“. Diss. Universität Karlsruhe, Fakultät für Maschinenbau, 1998. <http://d-nb.info/100428182x/34>.
- [67] Bohn, Martin und Hetsch, Klaus. *Toleranzmanagement im Automobilbau*. Hanser Verlag, München, 2013.
- [68] Thornton, Anna C.; Donnelly, Stephen und Ertan, Basak. „More than Just Robust Design: Why Product Development Organizations Still Contend with Variation and its Impact on Quality“. *Research in Engineering Design* 12 (2000), S. 127–143.
- [69] Schleich, Benjamin. „Skin Model Shapes: A new Paradigm for the Tolerance Analysis and the Geometrical Variations Modelling in Mechanical Engineering“. Diss. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Technische Fakultät, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 01, Konstruktionstechnik / Maschinenelemente, Nr. 438, 2017.
- [70] Salomons, O.W.; Jonge Poerink, H.J.; Haalboom, F.J.; van Slooten, F.; van Houten, F.J.A.M. und Kals, H.J.J. „A computer aided tolerancing tool I: Tolerance specification“. *Elsevier: Computers in Industry* 31 (1996), S. 161–174. <http://doc.utwente.nl/32232/1/Salomons96computer1.pdf>.
- [71] DIN. *DIN EN ISO 1101 Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Geometrische Tolerierung – Tolerierung von Form, Richtung, Ort und Lauf*. Beuth Verlag GmbH, 2008.
- [72] DIN. *DIN EN ISO 1101 Berichtigung 1*. Beuth Verlag GmbH, 2011.
- [73] Kethara Pasupathy, T. M.; Morse, Edward P. und Wilhelm, Robert G. „A Survey of Mathematical Methods for the Construction of Geometric Tolerance Zones“. *Journal of Computing and Information Science in Engineering* 3, Issue 1 (2003), S. 64–75.
- [74] Britten, W. *CAD-Basierte Übersetzung geometrischer Toleranzen in vektorielle Darstellungen*. In: Bley, H. & Weber, C., Schriftenreihe Produktionstechnik, Band 17, Universität des Saarlandes, Dissertation Saarbrücken, 1999.
- [75] Krulikowski, A. *Fundamentals of Geometric Dimensioning and Tolerancing*. 2. Aufl. Delmar Cengage Learning, 1997.
- [76] Whitehead, T. N. *The Design and Use of Instruments and Accurate Mechanism*. 22. Aufl. Dover Publications, Okt. 1954.
- [77] Slocum, Alexander. *Precision Machine Design*. Prentice Hall, 1992.

- [78] Smith, S. T. und Chetwynd, D. G. *Foundations of Ultraprecision Mechanism Design*. Gordon und Breach Science Publishers, Philadelphia, 1992.
- [79] Kamm, L. J. *Designing Cost-Effective Mechanisms*. McGraw-Hill, New York, USA, 1990.
- [80] Kriegel, J. M. „Exact constraint design“. *Proceedings of the ASME International Mechanical Engineering Congress and Exhibition (Winter Annual Meeting)*, New York, USA paper 94-WA DE-18 (1994).
- [81] Blanding, D. *Exact Constraint: Machine Design Using Kinematic Principles*. ASME Press, New York, USA, 1999.
- [82] Whitney, D. E.; Mantripragada, R.; Adams, J. D. und Rhee, S. J. „Designed Assemblies“. *Research in Engineering Design*, Springer-Verlag London Limited 11 (1999), S. 229–253.
- [83] DIN. *DIN EN ISO 5459:2013-05 (D) Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Geometrische Tolerierung – Bezüge und Bezugssysteme*. 2013.
- [84] Schleich, Benjamin und Wartzack, Sandro. „Approaches for the assembly simulation of skin model shapes“. *Computer-Aided Design*, Elsevier 65 (2015), S. 18–33.
- [85] Klein, Bernd. *Prozessorientierte Statistische Tolerierung*. Expert Verlag, Renningen, 2007.
- [86] Mannewitz, Frank. „Prozessfähige Tolerierung von Bauteilen und Baugruppen – ein Lösungsansatz zur Optimierung der Werkstattfertigung im Informationsverbund zwischen CAD und CAQ“. Diss. Universität Kassel, 1997.
- [87] Fischer, Hans. *A History of the Central Limit Theorem: From Classical to Modern Probability Theory*. Springer-Verlag New York, 2011.
- [88] Jorden, Walter. *Form- und Lagetoleranzen: Handbuch für Studium und Praxis*. 6. aktualisierte Auflage. Hanser Verlag, München, 2009.
- [89] Stark, R. und Weber, Chr. „Integration von Toleranz- und Geometriebeschreibung in CAD“. *VDI Journal* Ausgabe 7 (1993), S. 67–73.
- [90] Stark, R. „Entwicklung eines mathematischen Toleranzenmodells zur Integration in (3D-) CAD-Systeme“. Diss. Universität des Saarlandes, Schriftenreihe Produktionstechnik Bd. 5, Saarbrücken, 1994.
- [91] Wittmann, Stefan. „Verfahren zur Simulation und Analyse der Auswirkungen toleranzbedingter Bauteilabweichungen“. Diss. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Technische Fakultät, 2011.

- [92] Schleich, Benjamin; Anwer, Nabil; Mathieu, Luc und Wartzack, Sandro. „Skin Model Shapes: A new paradigm shift for geometric variations modelling in mechanical engineering“. *Computer-Aided Design* Bd. 50 (2014), S. 1–15.
- [93] Schleich, Benjamin und Wartzack, Sandro. „Smart Product Engineering – Proceedings of the 23rd CIRP Design Conference, Bochum“. Stark, R. und Abramovici, M., 2013. Kap. The Implications of the Skin Model Concept for Computer Aided Tolerancing, S. 573–582.
- [94] Walter, Michael. „Toleranzanalyse und Toleranzsynthese abweichungsbehafteter Mechanismen“. Diss. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Technische Fakultät, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 01, Konstruktionstechnik / Maschinenelemente, Nr. 437, Okt. 2016.
- [95] Hochmuth, Rüdiger. „Methoden und Werkzeuge als Teil eines Assistenzsystems zur rechnergestützten Analyse und Optimierung robuster Produkte“. Diss. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Technische Fakultät, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 20, Rechnerunterstützte Verfahren (CAD, CAM, CAE, CAQ, CIM ...), Nr. 356, 2002.
- [96] Schleich, Benjamin und Wartzack, Sandro. „How to determine the influence of geometric deviations on elastic deformations and the structural performance?“ *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* Bd. 207 Nr.5 (2013), S. 754–764.
- [97] Koller, Franz Ludwig. „CAD-gestützte Toleranzrechnung basierend auf der Auswertung von Kontaktkräften in einem Mehrkörpersimulationsmodell“. Diss. Technische Universität München, Fakultät für Maschinenwesen, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 20, Rechnerunterstützte Verfahren, Nr. 219, 1996.
- [98] Ji, S.; Li, X.; Ma, Y. und Cai, H. „Optimal Tolerance Allocation Based on Fuzzy Comprehensive Evaluation and Genetic Algorithm“. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 16 (2000).
- [99] Klein, Bernd. „Montagesimulation in der virtuellen Produktentwicklung“. *ATZ Automobiltechnische Zeitschrift* 7/8 (1999), S. 492–499.
- [100] Dietrich, Edgar und Schulze, Alfred. *Statistische Verfahren zur Maschinen- und Prozessqualifikation*. 6., vollständig überarbeitete Auflage. Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, München [u.a.], 2009.

- [101] Lockan, Michael. „Robuste Mehrkriterien-Optimierung und adaptive Antwortflächenverfahren im Dialog, Diplomarbeit“. Magisterarb. Brandenburgische Technische Universität Cottbus, Lehrstuhl Technische Mechanik und Fahrzeugdynamik, Aug. 2009.
- [102] Lippe, Peter Michael v.d. *Deskriptive Statistik*. Uni-Taschenbücher für Wissenschaft Nr. 1632. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, Jena, 1993.
- [103] Reinert, U.; Blaschke, H. und Brockstieger, U. *Technische Statistik in der Qualitätssicherung. Grundlagen für Produktionstechnik und Verfahrenstechnik*. Springer-Verlag Berlin, 1998.
- [104] Dietrich, E. *Statistische Verfahren zur Maschinen- und Prozessqualifikation*. Ausgabe 5, aktualisierte Auflage. Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, München, 2005.
- [105] Lohninger, Hans. „Test auf Normalverteilung“. <http://www.statistics4u.info>, Stand: 26.04.2015 (2012). http://www.statistics4u.info/fundstat_germ/cc_normality_test.html.
- [106] Bredner, Barbara. „Prüfung auf Normalverteilung“. *Statistische Beratung und Lösungen*, <http://www.bb-sbl.de>, Stand: 26.04.2015 (2015). <http://www.bb-sbl.de/tutorial/verteilungen/ueberpruefungnormalverteilung.html>.
- [107] D'Agostino, Ralph B. und Stephens, Michael A. *Goodness-of-fit techniques*. Bd. 68. STATISTICS: textbooks and monographs, 1986. <http://books.google.co.in/books?id=1BSEaGVBj5QC&lpq=PP1&hl=de&pg=PR13#v=onepage&q&f=false>.
- [108] Lohninger, Hans. „Bindungen“. <http://www.statistics4u.info>, Stand: 17.07.2016 (2012). http://www.statistics4u.com/fundstat_germ/dd_ties.html.
- [109] Hohl, Kathrin. „Ersetzungsmethoden für fehlende Werte kategorialer Variablen in klinischen Datensätzen“. Diss. Universität Ulm, Medizinische Fakultät, 2007. https://oparu.uni-ulm.de/xmlui/bitstream/handle/123456789/1324/vts_6027_8103.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
- [110] Retzlaff, Gisela; Rust, Gerhard und Waibel, Jürgen. *Statistische Versuchsplanung*. Verlag Chemie, Weinheim, New York, 1978.
- [111] Zwanziger, H.; Rohland, U. und Werner, G. „Risiko 2. Art und Stichprobenumfang bei statistischen Tests“. *Fresenius' Zeitschrift für analytische Chemie*, Springer-Verlag Berlin 323.4 (1986), S. 371–374.
- [112] Toutenburg, Helge. *Versuchsplanung und Modellwahl*. Physica-Verlag, Heidelberg, 1994.

- [113] Pearson, E. S. und Hartley, H. O. *Biometrika Tables for Statisticians*. Bd. I. Cambridge University Press, 1966.
- [114] Lauert, A. „So genau wie nötig. Toleranz-Analysen sparen Änderungskosten an Konstruktionen und Werkzeugen“. *Der Konstrukteur* 5 (2006).
- [115] Prisco, Umberto und Giorleo, Giuseppe. „Overview of current CAT systems“. *Integrated Computer-Aided Engineering* 9 (2002), S. 373–387.
- [116] TTC³ GmbH. *Produkt- und Prozessabsicherung durch Toleranzmanagement*. 2016. <http://www.toleranzsimulation.de>.
- [117] SIEMENS. *eM-TolMate – eMPower for manufacturing process management*. 2007. https://www.plm.automation.siemens.com/en%5C_gb/Images/tx%20oem%20tolmate%20ofs%20W%203%5C_tcm642-4946.pdf.
- [118] Dachzelt, Sebastian. *Tecnomatix Quality. eM-Probe Seminar*. Techn. Ber. UGS Group, 2004.
- [119] Variation Systems Analysis GmbH. *VisVSA. 3-dimensionale Untersuchung von Toleranzeinflüssen bei Zusammenbauten*. 2016. <http://www.visvsa.de/>.
- [120] Variation Systems Analysis GmbH. *Toleranzanalyse mit VisVSA*. 2016. http://www.myvsa.de/Toleranzanalyse_VisVSA/Toleranzanalyse%20mit%20VisVSA_exper.htm.
- [121] SIEMENS. *Siemens PLM Software*. 2016. http://www.plm.automation.siemens.com/de_de/.
- [122] Sigmetrix. *CETOL 6 σ Tolerance Analysis Software*. 2015. <http://www.sigmetrix.com/products/cetol-tolerance-analysis-software/?gclid=CK-o-amclcoCFRKeGwodflcCFQ>.
- [123] INNEO Solutions GmbH. *CETOL 6 σ Toleranzen analysieren und optimieren*. 2015. <http://www.inneo.de/produkt/cetol-6s/>.
- [124] INNEO Solutions GmbH. *CETOL 6 σ Das System zur Toleranzoptimierung*. 2015. <https://www.inneo.de/files/content/Produktentwicklung/Berechnung-Simulation/cetol-6-sigma-broschuere.pdf>.
- [125] Enventive Engineering, Inc.. *Computergestützte Entwicklung*. 2018. <https://www.enventive.com/de/>.
- [126] Enventive Engineering, Inc.. *Produkte für Toleranzanalyse, Prozessanalyse, DFSS*. 2018. <https://www.enventive.com/de/products-2-6/>.

- [127] TTC³ GmbH. *ENVENTIVE für Microsoft Excel*. 2018. <http://www.toleranzsimulation.de/softwareloesungen/enventive>.
- [128] Dimensional Control Systems, Ltd.. *Tolerance Analysis (Also Known As Variation Analysis)*. 2016. <http://www.3dcs.com/tolerance-analysis.html>.
- [129] CENIT AG. *3DCS – Toleranzmanagement: der Schlüssel für eine optimierte Produktqualität*. 2016. http://www.cenit.com/de_DE/plm/3ds-plm/software/3dcs.html.
- [130] Kleppmann, Wilhelm. *Versuchsplanung: Produkte und Prozesse optimieren*. Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, München Wien, 2003.
- [131] Scheffler, Eberhard. *Statistische Versuchsplanung und -auswertung: eine Einführung für Praktiker*. Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1997.
- [132] Klein, Bernd. *Versuchsplanung – DoE*. Oldenbourg Verlag München Wien, 2007.
- [133] Küstner, Christof. *Forschungsbericht Workshop 1: Wissenschaftliche Auswertung der experimentellen Versuchsergebnisse (Foliensatz)*. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Konstruktionstechnik KTmfk, 2015.
- [134] Gundlach, Carsten. „Entwicklung eines ganzheitlichen Vorgehensmodells zur problemorientierten Anwendung der statistischen Versuchsplanung“. Diss. Universität Kassel, 2004.
- [135] ISO. *ISO 3534-3:2013 Statistics – Vocabulary and symbols – Part 3: Design of Experiments*. http://www.iso.org/iso/iso_catalogue/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=44245.
- [136] VDI. *VDI-Richtlinie 2247 Qualitätsmanagement in der Produktentwicklung*. 1994.
- [137] Wallacher, Johannes. „Einsatz von Methoden der statistischen Versuchsplanung zur Bestimmung von robusten Faktorkombinationen in der präventiven Qualitätssicherung“. Diss. Universität Karlsruhe, VDI Verlag, Düsseldorf, 1994.
- [138] Taguchi, Gen'ichi. *Einführung in Quality Engineering: Minimieren von Verlusten durch Prozeßbeherrschung*. gfmt – Gesellschaft für Management und Technologie, München, 1989.
- [139] Phadke, Madhav S. *Quality Engineering Using Robust Design: Robuste Prozesse durch Quality Engineering*. gfmt – Gesellschaft für Management und Technologie, München, 1989.

- [140] Fisher, Ronald Aylmer. *The Design of Experiments*. Oliver und Boyd, Edinburgh, 1935.
- [141] Saltelli, Andrea; Chan, Karen und Scott, E. Marian. *Sensitivity Analysis: Gauging the Worth of Scientific Models*. John Wiley & Sons Ltd., Wiley Series in Probability und Mathematical Statistics, Chichester, England, 2000.
- [142] Siudak, Anna Zofia. „Robuste Parameterschätzung, Modelldiskriminierung und optimale Versuchsplanung am Beispiel von In-vitro-Datensätzen zur Benzaldehydlyase, Diplomarbeit“. Magisterarb. Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, Diplomstudiengang Mathematik mit dem Schwerpunkt Biowissenschaften, 2007.
- [143] Orth, Andreas. „Modellgestützte Versuchsplanung und Optimierung“. *Schulungsunterlagen, Umesoft, Eschborn* (2000).
- [144] Clough, Ray William. „The finite element method in plane stress analysis“. *Proceedings of 2nd Conference on Electronic Computation, A.S.C.E. Structural Division, Pittsburgh, Pennsylvania, USA* (1960).
- [145] Klein, Bernd. *FEM. Grundlagen und Anwendungen der Finite-Elemente-Methode im Maschinen- und Fahrzeugbau*. 7. Aufl. Friedr. Vieweg & Sohn Verlag | GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 2007.
- [146] Albers, Albert; Enkler, Hans-Georg; Maier, Thomas und Weiler, Helge. „Robust Design Processes with CAD based Finite Element Models“. *ICED – International Conference on Engineering Design* (2007), S. 1–8.
- [147] Steinke, Peter. *Finite-Elemente-Methode: Theorie und Anwendungen, Band 1*. Cornelsen-Girardet-Verlag, Düsseldorf, 1992.
- [148] Ewert, Roland. *manual: 2D algebraic multi block grid generator ALGRID*. v1.0. 2009.
- [149] Stommel, Markus; Stojek, Marcus und Korte, Wolfgang. *FEM zur Berechnung von Kunststoff- und Elastomerbauteilen*. Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, München, 2011. <https://books.google.de/books?id=wE2cpwAACAAJ>.
- [150] Gebhardt, Christof. *Konstruktionsbegleitende Berechnung mit ANSYS DesignSpace – FEM-Simulation für Konstrukteure*. Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, München, 2009.
- [151] Wagner, Marcus. *Lineare und nichtlineare FEM*. Springer Vieweg Fachmedien Wiesbaden, 2017. <https://www.springerprofessional.de/lineare-und-nichtlineare-fem/13339656>.
- [152] Anderl, Reiner und Binde, Peter. *Simulation mit NX / Simcenter 3D*. Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, München, 2017.

- [153] Bertsche, Bernd und Haas, Werner. *Kennwertermittlung für die FEM-Simulation*. Uni Stuttgart, Institut für Maschinenelemente, 2012. http://www.ima.uni-stuttgart.de/pdf/studium/bachelor/dt/spezialisierungsfachversuche/HFV_FEM-Simulation_2012.pdf.
- [154] Peschke, Harald. „Simulation von Elastomerdichtungen unter dynamischer Belastung“. *INA-Sonderdruck, Vortrag zum ABAQUS-Anwendertreffen am 30. September und 1. Oktober 1999, Universität-Gesamthochschule Essen* (1999). http://www.schaeffler.com/remotemedien/media/_shared_media/o8_media_library/o1_publications/schaeffler_2/reprint/downloads_16/sve_de_de.pdf.
- [155] Mohr-Matuschek, Ulrich. „Auslegung von Kunststoff- und Elastomerformteilen mittels Finite-Elemente-Simulation“. Diss. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Fakultät für Maschinenwesen, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 20, Rechnerunterstützte Verfahren, Nr. 68, Düsseldorf, 1992.
- [156] Odgen, Raymond W. „Large Deformation Isotropic Elasticity – On the Correlation of Theory and Experiment for Incompressible Rubberlike Solids“. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences* 326 (1972), S. 565–584.
- [157] Kilian, Hans-Georg. „Equation of state of real networks“. *Polymer* 22 (1981), S. 209–217.
- [158] Arruda, E. M. und Boyce, M. C. „A three-dimensional constitutive model for the large stretch behavior of rubber elastic materials“. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 41, Issue 2 (Feb. 1993), S. 389–412.
- [159] Yeoh, O. H. „Some forms of the strain energy function for rubber“. *Rubber Chemistry and technology* 66, Issue 5 (Nov. 1993), S. 754–771.
- [160] Timmel, Mario; Kaliske, Michael und Kolling, Stefan. „Modellierung gummiartiger Materialien bei dynamischer Beanspruchung“. 3. *LS-DYNA Anwenderforum* (2004), S. C-I-1-C-I-11. <https://www.dynamore.de/de/download/papers/forumo4/modellierung-gummiartiger-materialien-bei>.
- [161] McCord, Jeffrey. *Grundpraktikum, Versuchsreihe: Materialwissenschaft, B302: Spannung und Dehnung*. Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Technische Fakultät, Institut für Materialwissenschaft, Stand: 10.02.2014, 2012. <http://www.tf.uni-kiel.de/servicezentrum/neutral/praktika/anleitungen/b302.pdf>.

- [162] Fiolka, Mark. „Theorie und Numerik volumetrischer Schalenelemente zur Delaminationsanalyse von Faserverbundlamina-ten“. Diss. Universität Kassel, Institut für Mechanik, Berichte des Instituts für Mechanik (Bericht 2/2008), 2007. <https://kobra.bibliothek.uni-kassel.de/bitstream/urn:nbn:de:hebis:34-2008061621996/1/DissertationMarkFiolka.pdf>.
- [163] Markvoort, Laurent. „Méthodologie d’analyse statistique de tolérances dans les assemblages impliquant des composants déformables“. Diss. Mémoire de doctorat en Automatique et Informatique des Systèmes Industriels et Humains à L’Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, 2007.
- [164] Lustig, Ralph. „Integration und Verarbeitung von Verformungsinformationen im Umfeld rechnergestützter Toleranzanalysen“. Diss. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Technische Fakultät, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 20, Rechnerunterstützte Verfahren, Nr. 418, 2008.
- [165] Wärmefjord, K.; Lindkvist, L. und Söderberg, R. „Tolerance Simulation of Compliant Sheet Metal Assemblies Using Automatic Node-Based Contact Detection“. *Proceedings of IMECE2008, 2008 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Boston, USA* (2008).
- [166] Liu, S.C. und Hu, S.J. „Variation Simulation for Deformable Sheet Metal Assemblies Using Finite Element Methods“. *Journal of Manufacturing Science and Engineering* 119 (1997), S. 368–374.
- [167] Praun, Stefan von. „Toleranzanalyse nachgiebiger Baugruppen im Produktentstehungsprozess“. Diss. Technische Universität München, Fakultät für Maschinenwesen, Lehrstuhl für Montagesystemtechnik und Betriebswissenschaften, 2002. <http://www.iwb.tum.de/iwbmedia/vonPraun.pdf>.
- [168] Enventive Engineering, Inc.. *Performance Modeling*. 2018. <https://www.enventive.com/de/major-features-2/performance-modeling/>.
- [169] Camelio, Jaime A.; Hu, S. Jack und Ceglarek, Dariusz. „Modeling Variation Propagation of Multi-Station Assembly Systems with Compliant Parts“. *Journal of Mechanical Design* 125 (2003), S. 673–681.
- [170] Stuppy, Julia. „Methodische und rechnerunterstützte Toleranzanalyse für bewegte technische Systeme“. Diss. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Technische Fakultät, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 20, Rechnerunterstützte Verfahren, Nr. 433, Okt. 2011.

- [171] Dimensional Control Systems, Ltd.. *3DCS FEA Compliant Modeler*. 2018. <http://www.3dcs.com/tolerance-analysis-software-and-spc-systems/add-ons/fea-compliant-modeler>.
- [172] Ceglarek, Dariusz; Huang, W.; Zhou, S.; Ding, Yu; Kumar, R. und Zhou, Y. „Time-Based Competition in Multistage Manufacturing: Stream-of-Variation Analysis (SOVA) Methodology-Review“. *The International Journal of Flexible Manufacturing Systems* 16 (2004), S. 11–44.
- [173] Chen, Yong; Ding, Yu; Jionghua, Jin und Ceglarek, Dariusz. „Integration of Process-Oriented Tolerancing and Maintenance Planning in Design of Multistation Manufacturing Processes“. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering* 3.4 (2006), S. 440–453.
- [174] Prakash, N.; Phoomboplab, Tirawat; Izquierdo, L. E. und Ceglarek, Dariusz. „Self-Resilient Production Systems: Going Beyond Design Robustness“. *11th CIRP International Conference on Computer Aided Tolerancing, Annecy, France* (2009).
- [175] Jareteg, Cornelia; Wärmefjord, Kristina; Söderberg, Rikard; Lindkvist, Lars; Carlson, Johan; Cromvik, Christoffer und Edelvik, Fredrik. „Variation simulation for composite parts and assemblies including variation in fiber orientation and thickness“. *5th CATS 2014 – CIRP Conference on Assembly Technologies and Systems* (2014). <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827114011263>.
- [176] Camelio, Jaime A.; Hu, S. Jack und Marin, S. „Compliant Assembly Variation Analysis Using Component Geometric Covariance“. *Journal of Manufacturing Science and Engineering* 126 (2004), S. 355–360.
- [177] Pham, The-Quan. „Toleranzanalyse und Optimierung eines Finite-Elemente-Strukturmodells mit OptiY“. *19. Deutschsprachige ABAQUS-Benutzerkonferenz* (2007). <http://www.optiy.eu/download/Abaqus2007ToleranzAnalyseOptimierung.pdf>.
- [178] Flassig, Peter Michael; Dutta, Amit Kumar und Bestle, Dieter. „Robustheit und Zuverlässigkeit in der aerodynamischen Verdichterauslegung“. *1. Dresdner-Probabilistik-Workshop* (2008), S. 1–12.
- [179] Bourier, Günther. *Wahrscheinlichkeitsrechnung und schließende Statistik*. 5. Aufl. Betriebswirtschaftlicher Verlag Dr. Th. Gabler, GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 2006.
- [180] Rubinstein, R. *Simulation and the Monte Carlo method*. Technion, Israel Institute of Technology, New York: John Wiley & Sons, Inc., 1981.
- [181] VDI. *VDI-Richtlinie 4008 Monte-Carlo-Simulation*. 1999.

- [182] Saliby, Eduardo. „Descriptive Sampling: An Improvement over Latin Hypercube Sampling“. *IEEE Computer Society, Proceedings of the 1997 Winter Simulation Conference, Washington* (1997), S. 230–233. <http://www.informs-sim.org/wsc97papers/o230.PDF>.
- [183] Olsson, A.; Sandberg, G. und Dahlblom, O. „On Latin hypercube sampling for structural reliability analysis“. *Journal of Structural Safety* 25 (2003), S. 47–68.
- [184] Bates, Stuart J. und Sienz, Johann. „Formulation of the Optimal Latin Hypercube Design of Experiments Using a Permutation Genetic Algorithm“. *Proceedings of 45th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics & Materials Conference, Palm Springs, California, USA* (2004). https://www.researchgate.net/profile/Vassili_Toropov/publication/237531419_Formulation_of_the_Optimal_Latin_Hypercube_Design_of_Experiments_Using_a_Permutation_Genetic_Algorithm/links/55095f570cf26ff55f85592c.pdf/download?version=vtp.
- [185] Viana, Felipe A. C. „Things you wanted to know about the Latin hypercube design and were afraid to ask“. *10th World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization* (2013). <http://www2.mae.ufl.edu/mdo/Papers/5176.pdf>.
- [186] Anderson, Herbert L. „Metropolis, Monte Carlo and the MANIAC“. *Los Alamos Science* (1986), S. 96–108. <http://library.lanl.gov/cgi-bin/getfile?00326886.pdf>.
- [187] Andrieu, Christophe; de Freitas, Nando; Doucet, Arnaud und Jordan, Michael I. „An Introduction to MCMC for Machine Learning“. *Kluwer Academic Publishers* (Sep. 2001). <http://people.cs.ubc.ca/~nando/papers/mlintro.pdf>.
- [188] The MathWorks, Inc.. *Monte-Carlo-Simulation*. 2016. <http://de.mathworks.com/discovery/monte-carlo-simulation.html?requestedDomain=www.mathworks.com>.
- [189] McWilliams, Thomas P. „Sensitivity analysis of geologic computer models: A formal procedure based on Latin hypercube sampling“. *Mathematical Geology* 19, Issue 2 (Feb. 1987), S. 81–90. <http://link.springer.com/article/10.1007/BF00898188>.
- [190] EPI χ Analytics. „Latin Hypercube sampling“. <http://www.epixanalytics.com>, Stand: 27.05.2016 (2016). http://www.epixanalytics.com/modelassist/AtRisk/Model_Assist.htm#Montecarlo/Latin_Hypercube_sampling.htm.

- [191] Choi, Seung-Kyum; Grandhi, Ramana V. und Canfield, Robert A. *Reliability-based structural design*. Springer-Verlag London, 2007.
- [192] Völkl, Ralf Manfred und Engel, Ulf. „Improvement of Tool Life in Cold Forging by FE-Simulation with the Consideration of Stochastic Process Characteristics“. *NAFEMS Seminar: Use of Stochastics in FEM Analyses*, Wiesbaden, Germany (Mai 2003).
- [193] Völkl, Ralf Manfred. „Stochastische Simulation zur Werkzeuglebensdaueroptimierung und Präzisionsfertigung in der Kaltmassivumformung“. Diss. Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg, Technische Fakultät, Lehrstuhl für Fertigungstechnologie; B, 2008.
- [194] Specka, Xenia. „Analyse und Parametrisierung eines komplexen Agrarökosystemmodells für Fragestellungen der ökologischen Folgeabschätzung des Energiepflanzenanbaus“. Diss. Brandenburgische Technische Universität Cottbus, Fakultät für Umweltwissenschaften und Verfahrenstechnik, Lehrstuhl Ökosysteme und Umweltinformatik, 2014. https://opus4.kobv.de/opus4-btu/files/2883/Diss_Specka_final.pdf.
- [195] Saltelli, A.; Tarantola, S. und Chan, K.P.S. „A quantitative model-independent method for global sensitivity analysis of model output“. *Technometrics* 41 (1999), S. 39–56. <http://www.jstor.org/stable/1270993>.
- [196] Will, Johannes; Möller, J.-St. und Bauer, E. „Robustheitsbewertungen des Fahrkomfortverhaltens an Gesamtfahrzeugmodellen mittels stochastischer Analyse“. *Weimarer Optimierung- und Stochastiktag 1.0* (Dez. 2004). http://www.dynardo.de/fileadmin/Material_Dynardo/bibliothek/WOST_1.0/WOST_1_RobustheitsbewertungenanGesamtfahrzeugmodellen_De.pdf.
- [197] Brunner, Franz J. und Wagner, Karl W. *Qualitätsmanagement, Leitfaden für Studium und Praxis*. Hrsg. von 6., überarbeitete Auflage. Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, München, Praxisreihe Qualitätswissen, herausgegeben von Kurt Matyas, 2016.
- [198] Wagner, Fred. „Gesetz der großen Zahlen“. *Gabler Wirtschaftslexikon*, Springer-Verlag, Stand: 04.02.2018 (2017). <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/145544/gesetz-der-grossen-zahlen-v7.html>.
- [199] Walter, M.; Sprügel, T.; Ziegler, P. und Wartzack, S. *Konstruktion* 10 (2015), S. 88–92. <https://www.konstruktion-online.de/2015/Ausgabe-10/Praxis-Forschung-Wissenschaft/Beruecksichtigung-von-Wechselwirkungen-zwischen-Abweichungen-in-der-statistischen-Toleranzanalyse>.

- [200] Bajrami, Blerim. *Virtuelle Grenzlagenabsicherung – Pos. 1.2 & 1.3*. Techn. Ber. ISKO Engineers AG, Nov. 2014.
- [201] Bajrami, Blerim. *Virtuelle Grenzlagenabsicherung – Pos. 1.4 & 1.5*. Techn. Ber. ISKO Engineers AG, Apr. 2015.
- [202] Bajrami, Blerim. *Virtuelle Grenzlagenabsicherung – Pos. 1.1*. Techn. Ber. ISKO Engineers AG, März 2015.
- [203] Fischer, B.R. „Mechanical Tolerance Stackup and Analysis“. *Marcel Dekker, Inc., New York, USA* (2009).
- [204] Mannewitz, Frank. „Komplexe Toleranzanalysen einfach durchführen“. *Konstruktion* (2005). http://www.casim.de/download/KON_7_8_Mannewitz.pdf.
- [205] DIN. *DIN EN 485-4 Aluminium und Aluminiumlegierungen – Bänder, Bleche und Platten – Teil 4: Grenzabmaße und Formtoleranzen für kaltgewälzte Erzeugnisse*. 1994.
- [206] Mayers, Bernd. „Prozeß- und Produktoptimierung mit Hilfe der Statistischen Versuchsmethodik“. Diss. RWTH Aachen, Shaker Verlag, 1997.
- [207] Ulrich, Hans und Probst, Gilbert J.B. *Anleitung zum ganzheitlichen Denken und Handeln – Ein Brevier für Führungskräfte*. Paul Haupt Verlag, 1996.
- [208] Pahl, Gerhard; Beitz, Wolfgang; Feldusen, Jörg und Grote, Karl-Heinrich. *Konstruktionslehre – Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung*. 6. Aufl. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 2005.
- [209] Ehrlenspiel, Klaus und Meerkamm, Harald. *Integrierte Produktentwicklung – Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit*. 5. Aufl. Hanser Verlag, München Wien, 2013.
- [210] Krehmer, Hartmut; Eckstein, Raiko; Lauer, Wolfgang; Roelofsen, Julia; Stöber, Christina; Troll, Alexander; Zapf, Jochen; Weber, Nadine; Meerkamm, Harald; Heinrich, Andreas; Lindemann, Udo; Rieg, Frank und Wartzack, Sandro. „Das FORFLOW-Prozessmodell zur Unterstützung der multidisziplinären Produktentwicklung“. *Konstruktion* 10 (2010), S. 59–68.
- [211] Krehmer, Hartmut; Eckstein, Raiko; Lauer, Wolfgang; Roelofsen, Julia; Stöber, Christina; Troll, Alexander; Weber, Nadine und Zapf, Jochen. „Coping with multidisciplinary product development – a process model approach“. *eProceedings of the 17th ICED – International Conference on Engineering Design, Stanford University, Palo Alto, Kalifornien, USA* (2009), S. 241–252.

- [212] Krehmer, Hartmut. „Vorgehensmodell zum Iterations- und Produktreifegradmanagement in der eigenschaftsbasierten Produktentwicklung“. Diss. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Technische Fakultät, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 01, Konstruktionstechnik / Maschinenelemente, Nr. 416, 2012.
- [213] VDI. *VDI-Richtlinie 2221 Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte*. 1986.
- [214] Krehmer, Hartmut. *Das FORFLOW-Prozessmodell*. Hrsg. von FORFLOW, Forschungsverbund. Bayerischer Forschungsverbund für Prozess- und Workflowunterstützung zur Planung und Steuerung der Abläufe in der Produktentwicklung, 2009.
- [215] Klein, Bernd. *TRIZ/TIPS – Methodik des erfinderischen Problemlösens*. 2. Aufl. Oldenbourg Verlag München Wien, 2008.
- [216] Schlette, Christian. *Anthropomorphe Multi-Agentensysteme – Simulation, Analyse und Steuerung*. Springer Vieweg Fachmedien Wiesbaden, 2013.
- [217] Roth, Karlheinz. *Konstruieren mit Konstruktionskatalogen – Band I: Konstruktionslehre*. 3. Aufl. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2000.
- [218] Geschäftsbereich Lineartechnik. *Angetriebene Lineareinheiten*. Schaeffler Technologies AG & Co. KG, 2014. https://www.schaeffler.com/remotemedien/media/_shared_media/o8_media_library/01_publications/schaeffler_2/catalogue_1/downloads_6/al1_de_de.pdf.
- [219] KUKA Industrierobotik – Mittlere Traglast. KUKA Roboter GmbH, 2017. https://www.kuka.com/-/media/kuka-downloads/imported/9cb8e31bfd744b4boeab25ca883f6d3/kuka_pb_mittlere_tl_de.pdf.
- [220] *Schwerlast-Hexapod H-845*. PI Physik Instrumente, 2017. <https://www.physikinstrumente.de/de/produkte/hexapoden-parallelkinematiken/hexapoden-mit-motor-spindel-antrieb/h-845-schwerlast-hexapod-700805/>.
- [221] Walker, H. Fred; Benbow, Donald W. und Elshennaway, Ahmad K. *The Certified Quality Technician Handbook*. 2. Aufl. American Society for Quality, Quality Press, Milwaukee, 2013.
- [222] Magnescale. *Digital Gauge / Digitale Messtaster – DK830SR / DK830SLR / DK830SVR - Instruction Manual / Bedienungsanleitung*. Techn. Ber. Magnescale Co., Ltd., Japan, 2010.
- [223] Bortz, Jürgen und Döring, Nicola. *Forschungsmethoden und Evaluation für Human- und Sozialwissenschaftler*. 2006.

- [224] Höchstetter, Marius. „Entwicklung einer Methodik zur Bewertung singulär impulshafter Fahrzeuggeräusche“. Diss. Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Fakultät für Maschinenbau, Institut für Mechanik, Prof. Dr. habil. Ulrich Gabbert, 2015.
- [225] VDI. *VDI-Richtlinie 2222 Blatt 1 Konstruktionsmethodik: Methodisches Entwickeln von Lösungsprinzipien*. 1997.
- [226] VDI. *VDI-Richtlinie 2223 Konstruktionsmethodik: Methodisches Entwickeln von Lösungsprinzipien*. 2004.
- [227] VDI. *VDI-Richtlinie 2206 Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme*. 2004.
- [228] Lindemann, Udo. *Methodische Entwicklung technischer Produkte – Methoden flexibel und situationsgerecht anwenden*. 3., korrigierte Auflage. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009.
- [229] Ponn, Josef und Lindemann, Udo. *Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte – Systematisch von Anforderungen zu Konzepten und Gestaltlösungen*. 2. Aufl. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011.
- [230] Franke, H. M. „Der Lebenszyklus technischer Produkte“. Diss. Düsseldorf, VDI-Berichte Nr. 512, 1984.
- [231] Blass, E. „Verfahren mit Systemtechnik entwickelt“. *VDI-Nachrichten* Nr. 29 (1981).
- [232] Berekoven, Ludwig; Eckert, Werner und Ellenrieder, Peter. *Marktforschung – Methodische Grundlagen und praktische Anwendung*. Betriebswirtschaftlicher Verlag Dr. Th. Gabler, GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 2013.

Verzeichnis promotionsbezogener, eigener Publikationen

- [P1] Ehlert, Matthias und Wartzack, Sandro. „Kundenorientierte Produktgestaltung: Ein Ansatz zur Absicherung extremer Toleranzsituationen“. *Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktentwicklung – WiGeP News* 2 (2016), S. 21–22. http://www.wigep.de/fileadmin/download/bkreis/newsletter/WiGeP_News_Ausgabe2_2016_final_Homepage_kleiner.pdf.
- [P2] Ehlert, Matthias; Hofmann, Robert; Stockinger, Andreas und Wartzack, Sandro. „Kopplungsstrategien zur Ermittlung korrigierter Grenzlagenaussagen“. 26. *DfX-Symposium 2015*, TuTech Verlag, Hamburg (2015), S. 193–208.
- [P3] Ehlert, Matthias; Heling, Björn und Wartzack, Sandro. „Virtual validation of functional automotive door assembly properties by means of superposed CAT and FEM“. *ICED – International Conference on Engineering Design*, Mailand, Italien (2015).
- [P4] Ehlert, Matthias; Stockinger, Andreas und Wartzack, Sandro. „Validierung kundenorientierter funktionaler Anforderungen unter Berücksichtigung abweichungsbehafteter Geometrien und systembedingter Variationen“. *EEE2014*, TUDpress Verlag, Dresden (2014).
- [P5] Ehlert, Matthias; Stockinger, Andreas und Wartzack, Sandro. „Validation of customer requirements by system simulation taking tolerances and system variations into account“. *ISoRD – International Symposium on Robust Design*, Kopenhagen, Dänemark (2014), S. 61–68.
- [P6] Ehlert, Matthias; Rohling, Andreas und Wartzack, Sandro. „Ansatz zur Steigerung des Erfüllungsgrades bei der experimentellen Absicherung funktionaler Grenzlagen auf Basis einer Toleranzsimulation“. 2. *Summer School Toleranzmanagement*, Lehrstuhl für Konstruktionstechnik KTmfk, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Erlangen, Deutschland (2015).
- [P7] Ehlert, Matthias; Hofmann, Robert; Stockinger, Andreas und Wartzack, Sandro. „On the evolvement of limiting positions as a result of the interaction of tolerances and compliant systems“. *Proceedings of the 14th CIRP Conference on Computer Aided Tolerancing*, Elsevier B.V., Göteborg, Schweden (2016).

Verzeichnis promotionsbezogener, studentischer Arbeiten *

- [S1] Epple, Christoph; Stockinger, Andreas; Ehlert, Matthias und Pischelt-rieder, Klaus. „Funktionale Grenzlagenabsicherung – Grenzlagenermittlung durch statistische Versuchsplanung und Toleranzsimulation“. Masterarbeit. Hochschule München, 2013.
- [S2] Rohling, Andreas; Wonneberg, Birk; Ehlert, Matthias und Dröder, Klaus. „Qualifizierung eines Duschcubing-Prüfstandes zur Grenzlagenabsicherung am Fahrzeugeinstieg unter Toleranzbedingungen“. Diplomarbeit. Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik (IWF), Abteilung Fertigungstechnologien & Prozessautomatisierung, 2015.
- [S3] Exner, Peter; Ehlert, Matthias und Knauer, Gerhard. „Erarbeitung und Bewertung eines Ansatzes zur Steigerung des Grenzlagen-Erfüllungsgrades im Rahmen der funktionalen Absicherung am Demonstrator Fahrzeugeinstieg“. Diplomarbeit. Hochschule München, Fakultät für Maschinenbau, Fahrzeugtechnik und Flugzeugtechnik, 2016.
- [S4] Hofmann, Robert; Michael, Hannes; Ehlert, Matthias und Gröger, Sophie. „Robustheitsuntersuchung für die probabilistische funktionale Toleranzlagenabsicherung am Fahrzeugeinstieg“. Masterarbeit. Technische Universität Chemnitz, Fakultät für Maschinenbau, Professur Fertigungsmesstechnik, 2015.
- [S5] Stampoulidis, Maximilian; Ehlert, Matthias und Fuchsberger, Alfred. „Simulationsgestützte funktionale Grenzlagenabsicherung mit Hilfe der Finite Elemente Methode am Beispiel eines modernen Fahrzeugeinstiegs unter Toleranzbedingungen“. Bachelorarbeit. Hochschule München, 2014.
- [S6] Müller, Markus; Stockinger, Andreas; Ehlert, Matthias und Diekmann, Paul. „Virtuelle funktionale Grenzlagenabsicherung mit Hilfe der Finite Elemente Methode am Beispiel eines Fahrzeugeinstiegs unter Toleranzbedingungen“. Bachelorarbeit. Fachhochschule Bielefeld, 2014.

* Der Autor an zweiter (und ggf. dritter) Stelle bezeichnet den bzw. die Betreuer der studentischen Arbeit und an letztgenannter Stelle den/die Lehrstuhlinhaber/in.

- [S7] Heling, Björn; Ehlert, Matthias und Wartzack, Sandro. „Konzeption und Entwurf eines Prüfstandes zur funktionalen Grenzlagenabsicherung eines abweichungsbehafteten Fahrzeugeinstiegs“. Masterarbeit. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Technische Fakultät, Department Maschinenbau, Lehrstuhl für Konstruktionstechnik KTmfk, 2014.
- [S8] Battel, Mohamed; Ehlert, Matthias und Haller, Dieter. „FEM-Untersuchungen zur resultierenden Rückstellung von Tür und Seitenrahmen auf Grundlage des Dichtungsgegendrucks am Beispiel eines Fahrzeugeinstiegs unter Toleranzbedingungen“. Bachelorarbeit. Hochschule München, 2014.
- [S9] Kadir, Merve; Ehlert, Matthias und Soika, Martin. „Integrationskonzept des Grenzlagenabsicherungsprozesses in den generischen ItO (Idea to Offer), Bachelorarbeit“. Bachelorarbeit. Hochschule Landshut, 2016.

Reihenübersicht

Koordination der Reihe (Stand 2020):

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
KTmflk	Lehrstuhl für Konstruktionstechnik
LFT	Lehrstuhl für Fertigungstechnologie
LPT	Lehrstuhl für Photonische Technologien

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 flexiblen
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 umformtech-
nischen Prozessen
LFT, 99 Seiten, 46 Bilder, 6 Tab. 1998.
ISBN 3-87525-105-9.

Band 81: Stefan Schubert
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 Knoblach
Beitrag zur rechnerunterstützten
verursachungsgerechten
Angebotskalkulation von Blechteilen
mit Hilfe wissensbasierter 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 Prozessauslegung
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 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 105: Thomas Hennige
Flexible Formgebung von Blechen
durch Laserstrahlumformen
LFT, 119 Seiten, 50 Bilder. 2001.
ISBN 3-87525-140-7.

Band 106: Thomas Menzel
Wissensbasierte 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 Laserdurchstrahlschweißen 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 einsetzgerechten 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 Laserstrahltiefschweißen
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
Laserdurchstrahlungsschweißen
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 Größeneffek-
ten 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 Lösun-
gen zur Robustheitssteigerung elektroni-
scher 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 Prozess-
grenzen bei der Innhochdruck-Umform-
ung 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 Optimie-
rung 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 Laserstrahlintern von
Hochtemperatur-Thermoplasten - Eine
Betrachtung werkstoff-prozessspezifi-
scher 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 Lichtwellenlei-
tern
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, Prozesssimu-
lation 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
LPT, 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 Elektrofahrzeugen
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 Karosseriebauteile 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 Prozesssimulation von Biegeumform- und Falzverfahren
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
zwischen geschalteten 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 disk-
ret 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
Großserientaugliche 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 Stellan
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.

Abstract

In addition to a classical toleration of components and assemblies Computer-Aided Tolerancing (CAT) became an indispensable engineering discipline in recent years – especially in the context of a series manufacturing of a product. Taking 3D geometries, resulting lever ratios, assembly sequences and various reference systems as well as statistical approaches into account, it already enables complex tolerance calculations of products that are subject to variations arising from the manufacturing process. One of the main premises for these kinds of simulations refers to the presumed rigid behavior of all contributors.

As a direct consequence of that assumption this thesis describes a virtual approach, based on specified Key Product Characteristics (KPCs) that takes both elasticities and a possible non-linear system behavior in the simulation into consideration. This proceeding to include materialities and interactions between tolerance affected components increases the forecast quality of the tolerance simulation in terms of a more realistic prediction.

Based on the results of a 3D tolerance analysis with a subsequent Design of Experiments (DoE to increase the simulation effort) KPC-related predicted limiting positions will be made available to finite element simulations. By including materialities and contact conditions to the chosen system, which is subject to non-linear effects, corresponding elastic limiting positions occur regarding the specified KPCs. An appropriate strategy for coupling of the rigid limiting positions with their corresponding elastic counterparts will be derived from existing research approaches. This strategy will be applied in order to enable a better prognosis for overall limiting positions. Additionally, robustness evaluations that are based on the aforementioned finite element simulations will be presented regarding the probabilistic impact of the single contributors on the characteristics of the limiting positions. Finally, correlation studies are carried out to verify the plausibility of the results of that virtual approach. Therefore, with regard to the selected demonstrator, a comparison will be made with data from an experimental test rig.

Kurzfassung

Die simulationsunterstützte Toleranzrechnung (engl. *Computer-Aided Tolerancing*, CAT) hat sich neben der klassischen Bauteil- und Baugruppentolerierung in den letzten Jahren zu einer unverzichtbaren Ingenieursdisziplin entwickelt - gerade im Kontext der Serienfertigung eines Produktes. Durch eine Berücksichtigung von 3D-Geometrien, einhergehenden Hebelverhältnissen, Fügefolgen und verschiedensten (Unter-)Bezugssystemen sowie unter Einbeziehung statistischer Ansätze ermöglicht es schon jetzt komplexe Toleranzbetrachtungen von Produkten, welche im Rahmen der Fertigung unsicheren Schwankungen, sowohl aus Produktions- als auch aus Prozesssicht, unterliegen. Eine wesentliche Prämisse, die bei derartigen Simulationen zugrunde gelegt wird, bezeichnet das angenommene ideal starre Verhalten aller Beitragsleister.

Als direkte Folge jener Prämisse beschreibt diese Arbeit einen virtuellen Ansatz auf Basis einer schließmaßbasierten Toleranzbetrachtung, welcher sowohl Elastizitäten als auch ein mögliches nichtlineares Systemverhalten in der Toleranzsimulation berücksichtigt. Dieses Vorgehen zur Einbeziehung von Materialitäten und Interaktionen zwischen den abweichungsbehafteten Beitragsleistern erhöht die Prognosegüte der Toleranzsimulation in Richtung einer realitätsnäheren Vorhersage.

Basierend auf den Ergebnissen einer 3D-Toleranzanalyse, mit sich anschließender statistischer Versuchsplanung zur Steigerung des prozentualen Erfüllungsgrades (Verhältnis von untersuchter zu maximal möglicher Grenzlagenzahl) bei minimalem Aufwand, werden die schließmaßbezogenen prognostizierten Grenzlagen einer Finite-Elemente-Simulation (engl. *Finite Element Method*, FEM) zur Verfügung gestellt. Durch Einbeziehung der Materialitäten und Kontaktrandbedingungen werden für das gewählte System, welches nichtlinearen Effekten unterliegt, korrespondierende respektive eindeutig zuordenbare elastische Grenzlagenaussagen an den betrachteten Qualitätsmerkmalen generiert. Eine geeignete Strategie zur Kopplung der starren und elastischen Grenzlagenergebnisse wird auf Grundlage bestehender Forschungsansätze abgeleitet und hinsichtlich einer Prognose korrigierter Grenzlagenaussagen angewendet. Zudem werden, basierend auf den FEM-Simulationsergebnissen, Robustheitsuntersuchungen hinsichtlich des probabilistischen Einflusses einzelner Beitragsleister auf das Grenzlagenergebnis vorgestellt. Finale Korrelationsuntersuchungen plausibilisieren die Ergebnisse des virtuellen Ansatzes durch einen Vergleich mit den Ergebnissen eines geeigneten Experiments in Bezug auf den gewählten Demonstrator.

Die simulationsunterstützte Toleranzrechnung (engl. Computer-Aided Tolerancing, CAT) hat sich neben der klassischen Bauteil- und Baugruppentolerierung in den letzten Jahren zu einer unverzichtbaren Ingenieursdisziplin entwickelt - gerade im Kontext der Serienfertigung eines Produktes. Durch eine Berücksichtigung von 3D-Geometrien, einhergehenden Hebelverhältnissen, Fügefolgen und verschiedensten (Unter-)Bezugssystemen sowie unter Einbeziehung statistischer Ansätze ermöglicht es schon jetzt komplexe Toleranzbetrachtungen von Produkten, welche im Rahmen der Fertigung unsicheren Schwankungen, sowohl aus Produktions- als auch aus Prozesssicht, unterliegen. Eine wesentliche Prämisse, die bei derartigen Simulationen zugrunde gelegt wird, bezeichnet das angenommene ideal starre Verhalten aller Beitragsleister.

Als direkte Folge jener Prämisse beschreibt diese Arbeit einen virtuellen Ansatz auf Basis einer schließmaßbasierten Toleranzbetrachtung, welcher sowohl Elastizitäten als auch ein mögliches nichtlineares Systemverhalten in der Toleranzsimulation berücksichtigt. Dieses Vorgehen zur Einbeziehung von Materialitäten und Interaktionen zwischen den abweichungsbehafteten Beitragsleistern erhöht die Prognosegüte der Toleranzsimulation in Richtung einer realitätsnäheren Vorhersage.

Basierend auf den Ergebnissen einer 3D-Toleranzanalyse, mit sich anschließender statistischer Versuchsplanung zur Steigerung des prozentualen Erfüllungsgrades (Verhältnis von untersuchter zu maximal möglicher Grenzlagenanzahl) bei minimalem Aufwand, werden die schließmaßbezogenen prognostizierten Grenzlagen einer Finite-Elemente-Simulation (engl. Finite Element Method, FEM) zur Verfügung gestellt. Durch Einbeziehung der Materialitäten und Kontakttrandbedingungen werden für das gewählte System, welches nichtlinearen Effekten unterliegt, korrespondierende respektive eindeutig zuordenbare elastische Grenzlagenaussagen an den betrachteten Qualitätsmerkmalen generiert. Eine geeignete Strategie zur Kopplung der starren und elastischen Grenzlagenenergebnisse wird auf Grundlage bestehender Forschungsansätze abgeleitet und hinsichtlich einer Prognose korrigierter Grenzlagenaussagen angewendet. Zudem werden, basierend auf den FEM-Simulationsergebnissen, Robustheitsuntersuchungen hinsichtlich des probabilistischen Einflusses einzelner Beitragsleister auf das Grenzlagenergebnis vorgestellt. Finale Korrelationsuntersuchungen plausibilisieren die Ergebnisse des virtuellen Ansatzes durch einen Vergleich mit den Ergebnissen eines geeigneten Experiments in Bezug auf den gewählten Demonstrator.

