

FAU Studien aus dem Maschinenbau 351

**Sebastian Josef Katona**

Evaluation und Aufbereitung von  
Produktsimulationen mittels  
abweichungsbehafteter Geometriemodelle



Sebastian Josef Katona

Evaluation und Aufbereitung von Produktsimulationen mittels  
abweichungsbehafteter Geometriemodelle

# **FAU Studien aus dem Maschinenbau**

## **Band 351**

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

Sebastian Josef Katona

**Evaluation und Aufbereitung von  
Produktsimulationen mittels  
abweichungsbehafteter Geometriemodelle**

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

Katona, Sebastian Josef. 2020. *Evaluation und Aufbereitung von Produktsimulationen mittels abweichungsbehafteter Geometriemodelle*. FAU Studien aus dem Maschinenbau Band 351. Erlangen: FAU University Press. DOI: 10.25593/978-3-96147-337-3.

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: 978-3-96147-336-6 (Druckausgabe)  
eISBN: 978-3-96147-337-3 (Online-Ausgabe)  
ISSN: 2625-9974  
DOI: 10.25593/978-3-96147-337-3

**Evaluation und Aufbereitung von  
Produktsimulationen mittels  
abweichungsbehafteter Geometriemodelle**

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

zur  
Erlangung des Doktorgrades Dr.-Ing.

vorgelegt von

Sebastian Josef Katona, M.Sc., M.Eng.

aus Forchheim

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

Tag der mündlichen

Prüfung: 14.05.2020

Vorsitzender des

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

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartzack

Prof. Dr.-Ing. habil. Ralph Stelzer, TU Dresden

Prof. Dr.-Ing. Michael Koch, TH Nürnberg

## Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Chemie, Material- und Produktentwicklung (OHM-CMP) der Technischen Hochschule Nürnberg in Kooperation mit dem Lehrstuhl für Konstruktionstechnik (KTmfk) der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg. Die wesentlichen Aspekte dieser Arbeit wurden dabei im Rahmen des Verbundprojektes FORPRO<sup>2</sup> (Forschungsverbund für effiziente Produkt- und Prozessentwicklung durch wissensbasierte Simulation) erarbeitet. Für die Förderung des Projektes danke ich der Bayerischen Forschungstiftung (BFS), sowie allen beteiligten Industriepartnern.

Besonderer Dank gebührt dabei Prof. Dr.-Ing. Michael Koch vom OHM-CMP, der mir einst erst diese Option ermöglicht hat und mich über die gesamte Dauer des Vorhabens gefördert, unterstützt und angetrieben hat sowie stets mit Rat und Tat zur Verfügung stand. Ebenso besonders gilt mein Dank dem Ordinarius des KTmfk, Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartzack, für die Bereitschaft zur Übernahme der wissenschaftlichen Betreuung, seinen konstruktive Kritiken, welche zum Gelingen dieser Arbeit maßgeblich beigetragen haben und die fachliche wie menschliche Integration in das gesamte Team des Lehrstuhls.

Weiterhin danke ich Prof. Dr.-Ing. habil. Ralph Stelzer, Inhaber der Professur für Konstruktionstechnik/CAD am Institut für Maschinenelemente und Maschinenkonstruktion (IMM), für die Übernahme des Zweitgutachtens und das damit verbundene Interesse an meiner Arbeit. Bedanken möchte ich mich zudem bei Prof. Dr.-Ing. Marc Stamminger für die Übernahme des fachfremden Gutachtens, sowie bei Prof. Dr.-Ing. Kai Willner für den Prüfungsvorsitz und dem damit verbundenen Aufwand der Koordination des Verfahrens, welches aufgrund der derzeitigen Coronapandemie zu einem außergewöhnlichen und bis dato einmaligen Verlauf führen musste.

Allen (ehemaligen) Beteiligten des OHM-CMP.LPE – Prof. Dr.-Ing. Rüdiger Hornfeck (Leiter), Dr. sc. techn. Jens Helbig (Geschäftsführer), Tanja Bux (Teamassistentin), Daniel Rücker, Florian Winter, Fabian Müller, Robin Löffler, Peter Steidl, Gabriel Burmeister, Dr.-Ing. Stefan Landkammer und Dr.-Ing. Mario Lusic (geschätzte Kollegen) – danke ich für die vertraute und produktive Arbeitsatmosphäre, die gegenseitige Unterstützung und Wertschätzung, sowie die vielen fachlichen wie fachfremden Diskussionen im „kleinen Konferenzraum“ bei einer Tasse Kaffee.

Für die Kooperation im maßgebenden Projekt FORPRO<sup>2</sup> möchte ich mich bei allen beteiligten Bearbeitern und Leitern bedanken. Hervorheben möchte ich die gute und freundschaftliche Zusammenarbeit während des Projektablaufes und darüber hinaus im Arbeitskreis Produktsimulation mit Tobias Sprügel und Philipp Kestel des KTmfk, sowie Dr.-Ing. Stefan Hautsch und Dr.-Ing. Michael Frisch der Universität Bayreuth.

Zu guter Letzt Danke ich von Herzen meiner gesamten Familie – allen voran meinen Eltern Gertrud und Paul († 04.04.2019); meiner Frau Karolin mit unseren Kindern Greta, Jakob und Simon; meinen Geschwistern Judith, Mirjam und Deborah mit deren Familien – die mir alle stets einen sicheren und bedingungslosen Rückhalt bieten.

Nürnberg, im Juni 2020

Sebastian Katona

# Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnis .....	vii
<b>1 Einführung.....</b>	<b>1</b>
<b>2 Problemstellung .....</b>	<b>3</b>
2.1 Handlungsbedarf.....	3
2.2 Zielsetzung und generelle Vorgehensweise.....	7
2.3 Überblick dieser Arbeit .....	8
<b>3 Stand der Technik und Grundlagen.....</b>	<b>11</b>
3.1 Der Produktentwicklungsprozess .....	11
3.2 Rechnerunterstützte Konstruktion und CAD-Modellierung.....	16
3.3 Simulationsmethoden und Analysewerkzeuge in der Produktentwicklung .....	22
3.3.1 Klassifikationsansätze der Simulationsanwendungen.....	22
3.3.2 Simulationen mit Geometriemodellen.....	25
3.4 Digitalisierung physischer Objekte – Verfahren zur 3D- Datenerfassung.....	32
3.4.1 Unsicherheitsfaktoren und Anforderungen .....	32
3.4.2 Methoden zur Datenerfassung.....	34
3.5 Reverse Engineering.....	47
3.5.1 Definition und Abgrenzung.....	47
3.5.2 Die Prozesskette des Reverse Engineering.....	48
3.5.3 Datenformate und Anwendungsgebiete .....	58
<b>4 Simulation abweichungsbehafteter Geometrien: Forschungsansätze und industrielle Umsetzungen .....</b>	<b>61</b>
4.1 Reverse Engineering Prozess.....	61
4.2 Morphing von FE-Netzen .....	62
4.3 Adaptive FEM-Netze.....	64
4.4 Scandaten als FE-Berechnungsnetze.....	66
4.5 Anwendung von CAT-Methoden .....	67
4.6 Kombination aus Scan- und CAD-Daten (Hallenlayouts und Fabrikplanung) .....	69
<b>5 Kernpunkte dieser Arbeit .....</b>	<b>73</b>

<b>6</b>	<b>Konzept zur Evaluation durchgeführter Produktsimulationen und zur Bereitstellung abweichungsbehafteter Geometriemodelle.....</b>	<b>75</b>
6.1	Übersicht Gesamtprozess .....	75
6.2	Wissensinhalte aus dem Gesamtprozess .....	77
6.2.1	Produktwissen.....	79
6.2.2	Simulations- und Analysewissen (Berechnungswissen).....	81
6.2.3	Wissen zur Messtechnik.....	83
6.2.4	Spezifisches Fertigungswissen.....	85
6.3	Wissensbereitstellung.....	87
6.3.1	Wissenserzeugung und -bereitstellung: Herausforderungen..	87
6.3.2	Prozessabhängige Wissensbereitstellung.....	88
6.3.3	Aufbau und Ablauf des Ebenen-Modells.....	89
6.4	Ansätze zur Modellaufbereitung.....	93
6.4.1	Klassischer RE-Prozess .....	94
6.4.2	Parameteranpassung.....	97
6.4.3	Hybridmodell.....	100
6.4.4	FE-Netzadaption.....	104
6.4.5	Übersicht und Fazit der entwickelten Ansätze .....	109
<b>7</b>	<b>Konzeptionelle Umsetzung der Module in Demonstratoren. ....</b>	<b>111</b>
7.1	Wissensbereitstellung im Ebenen-Modell: Spiegelraste .....	111
7.2	RE-Prozess: Tiefgezogener Motorträger (Teilstück).....	114
7.3	Parametrische Korrektur: Gebogenes Rückspiegel-Tragrohr .....	116
7.4	Hybridmodell: Spiegelraste als Spritzgussteil.....	118
7.5	FE-Netzadaption: Ausrückhebel im Umformprozess.....	120
7.6	Diskussion der Ergebnisse.....	122
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>125</b>
8.1	Zusammenfassung.....	125
8.2	Ausblick.....	126
<b>9</b>	<b>Summary and Outlook .....</b>	<b>127</b>
9.1	Summary.....	127
9.2	Outlook.....	128
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>129</b>

# Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnis

## *Symbol*

A	Fläche
c	Geschwindigkeit
D	Differenzialoperatorenmatrix
E	E-Modul
F, f	Kraft, Belastung
m	Masse
p	Druck
Q	Wärme
R	Rationale Basisfunktionen
$R_s$	Spezifische Gaskonstante
S	NURBS-Fläche
T	Temperatur
t	Zeit
U	Innere Energie
u	Verschiebungsvektor
W	Arbeit
w	Gewichtungsmatrix
$\Delta x_i$	Einzelabweichung
$\Delta y$	Gesamtabweichung
$\beta$	RBF-Koeffizienten
$\varepsilon$	Verzerrung
$\nu$	Querkontraktionszahl
$\rho$	Dichte
$\sigma, \tau$	Spannungen
$\Phi$	Phasenwinkel

**Abkürzung**

AP	Application Protocol
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
B-Rep	Boundary Representation
B-Spline	Basis-Spline
CAD	Computer Aided Design
CAE	Computer Aided Engineering
CAT	Computer Aided Tolerancing
CAx	Computer Aided x
CCD	Charge-coupled Device
CFD	Computational Fluid Dynamics
CNC	Computerized Numerical Control
CSG	Constructive Solid Geometry
CT	Computer Tomographie
DES	Discrete Event Simulation
DIN	Deutsches Institut für Normung
EN	Europäische Norm
ER	Entity Relationship
EVA	Eingabe-Verarbeitung-Ausgabe
FDM	Finite Differenzen Methode
FE	Finite Elemente
FEA	Finite Elemente Analyse
FEM	Finite Elemente Methode
FVM	Finite Volumen Methode
GPS	Geometrische Produktspezifikation
ICP	Iterative Closest Point
IGES	Initial Graphics Exchange Specification
ISO	International Organisation for Standardization

**Abkürzung (Fortsetzung)**

IT	ISO-Toleranzfeld
KE	Konstruktionselement
KMG	Koordinatenmessgerät
MBSE	Model Based Systems Engineering
MBVP	Modellbasierte virtuelle Produktentwicklung
MIT	Massachusetts Institute of Technology
MKS	Mehrkörpersimulation
MVM	Münchener Vorgehensmodell
NURBS	Non-Uniform Rational B-Splines
PEP	Produktentwicklungsprozess
PLM	Product Lifecycle Management
RBF	Radiale Basis-Funktion
RE	Reverse Engineering
RMS	Resilient Modelling Strategy
SE	Systems Engineering
SFM	Structure from Motion
SFS	Shape from Shading
SMS	Skin Model Shapes
SPC	Statistical Process Control
STEP	Standard for the Exchange of Product Model Data
USD	US Dollar
VDA	Verband der Automobilindustrie
VDE	Verband der Elektrotechnik, Elektronik und Informati- onstechnik
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VR	Virtual Reality



# 1 Einführung

Simulationen ermöglichen einen effizienten Entwicklungsprozess [1] und sind inzwischen als eine fundamentale Säule in der modernen Produktentwicklung angenommen. Durch Simulationen kann die Time-to-Market signifikant reduziert und eine Optimierung der Konstruktion erreicht werden [2], weshalb immer mehr Unternehmen auf den Einsatz von Simulationssoftware setzen. Dies spiegelt sich auch in Umsatz und Wachstum des Marktes für Simulationssoftware wieder. So gibt ein Marktforschungsinstitut den Umsatz bei teilnehmenden Unternehmen im Jahr 2016 mit USD 5,5 Milliarden an und rechnet mit einer durchschnittlichen jährlichen Wachstumsrate von 16,5 % auf rund USD 13,5 Milliarden [3].

Dabei ist der Ursprung des Begriffes mit sehr negativen Tätigkeiten vorbelastet. Der lateinische Ausdruck „simulatio“ bedeutet in seiner wörtlichen Übersetzung zunächst „Heuchelei“, „Schein“, „Täuschung“ oder „Vorspielung“ und wird demnach eher mit schlechten Eigenschaften verbunden. Diesen negativen Touch hat der Begriff aber im Laufe der Zeit abgelegt und wird heute als die Prognose von Ereignissen oder Zuständen durch die Analyse eines Modells als durchweg positives Instrument angesehen und verwendet.

Das „Vortäuschen“ eines Verhaltens unter bestimmten Bedingungen dient dem Zweck der Vorhersage und ist demnach ein vielgenutztes und flexibel einsetzbares Werkzeug in der Produktentwicklung geworden.

Die Anwendungen von Simulationen haben sich in den letzten Jahrzehnten enorm verbreitet und sind auch sehr stark mit dem Aufschwung der Computertechnologie verknüpft. Damit und mit den entsprechenden zumeist numerischen Methoden wurde es möglich, auch komplexe Systeme in überschaubarer Zeit analysieren zu können, besonders wenn es keine Möglichkeit für reale Versuche gibt.

Dieses Bestreben setzt sich auch weiterhin fort: Die funktionale Absicherung durch die Simulation eines virtuellen Modells. Diese Vorgehensweise bietet nicht nur ökonomische Vorteile, da teure Tests erst mit ausgereiften Produkten stattfinden müssen, sondern liefert auch einen Zeitvorteil, wenn nicht immer zunächst Prototypen aufgebaut werden müssen. Im Kontext stetig kürzer werdender Entwicklungszeiten („Time-to-Market“) gewinnt das Vorgehen weiter an Bedeutung.

Daneben ist auch der Optimierungsansatz von entsprechender Wichtigkeit. Es wird stetig versucht, aus ökologischer Sicht möglichst viel Energie einzusparen. Dafür werden Produkte so gestaltet, dass die inhärenten Eigenschaften möglichst vollständig ausgereizt werden, ohne die Produktmerkmale negativ zu beeinflussen. Die wohl bekanntesten Beispiele liefert die Transportindustrie, seien es Automobile, Lastwagen oder Flugzeuge, wo jede Verbesserung und Gewichtseinsparung mit einer Verringerung des Treibstoffverbrauchs und damit des Schadstoffausstoßes einhergeht.

Um diesen Bestrebungen gerecht zu werden, ist es ein primäres Ziel, Simulationen stetig zu verbessern und deren Genauigkeit und Aussagekraft weiter anzuheben. Das wird in den verschiedenen Bereichen und Disziplinen angegangen. Auf der einen Seite erfahren die Algorithmen stetig Verbesserungen von den Softwareentwicklern, ohne dass der Anwender davon viel realisiert. Auf der anderen Seite finden, offensichtlicher für den Nutzer, Anpassungen der Benutzeroberfläche statt, welche ebenfalls ihren Teil dazu beitragen, dass die Anwendungen schneller, leichter und dadurch fehlertoleranter genutzt werden können. Ebenfalls ist das Nutzerwissen von großer Bedeutung, wenn es um die Aussagekraft einer Simulation geht. Hier sind die Erfahrung des Anwenders sowie gezielte Schulungen besonders gefragt. Ein Punkt bleibt jedoch noch offen: die Modellbildung. Ausgangspunkt für einen erfolgreichen Simulationsdurchlauf ist stets das Modell, welches der Anwender (mit Unterstützung der Software) erzeugt. Dabei ist besonders bei geometrischen Simulationsmodellen stets das virtuelle Modell die Basis. Dieses zeigt aber immer lediglich einen theoretischen, idealen Zustand, welcher in Wirklichkeit, aufgrund von Toleranzen und Fertigungsungenauigkeiten, äußerst selten vorhanden sind. An dieser Stelle setzt die vorliegende Arbeit an: Ideale Simulationsmodelle werden analysiert und bewertet. Die Modellbildung wird näher an die Realität herangeführt und die Qualität der Simulationen dadurch nachweislich verbessert.

## 2 Problemstellung

Wie bereits einleitend erwähnt, werden die Anforderungen an die entwickelten Komponenten stetig größer. Durch die bessere Ausnutzung der verfügbaren Werkstoffe müssen die Vorhersagen des Betriebsverhaltens auch entsprechend akkurat sein, um nicht durch ungenaue Vorhersagen ein ungewolltes Versagen in Kauf zu nehmen. Da Tests am fertigen Produkt zumeist zeitaufwendig und damit auch teuer sind, werden während sämtlicher Phasen der Produktentwicklung vielfach analytische wie numerische Simulationsmethoden eingesetzt, um für die Bauteile die erforderlichen Sicherheiten zu gewährleisten und das funktionale Verhalten in der Nutzung abzusichern.

### 2.1 Handlungsbedarf

Speziell für Produktsimulationen wird im Regelfall ein enormer Aufwand in der Vorbereitung der Modelle betrieben, um auch verlässliche Ergebnisse der Analysen zu erhalten. Neben einem stark erfahrungsbasierten und wissensabhängigen Preprocessing werden für die Durchführung heute bereits häufig verschiedene komplexe Ausgangsvariablen berücksichtigt. So können beispielsweise nicht-lineare Materialmodelle oder zeitinvariante Randbedingungen beinhaltet sein. Grundlage der Produktsimulationen ist dabei allerdings in der Regel das ideale Geometriemodell aus CAD-Programmen (Computer Aided Design) [4].

Nachfolgend der virtuellen Produktentwicklung steht die tatsächliche Fertigung der einzelnen Bauteile an. Im Allgemeinen zeigt jedes Herstellverfahren Abweichungen gegenüber dem konstruierten idealen Modell des CAD-Systems. Diese Abweichungen können je nach Fertigungsverfahren systematisch oder zufällig auftreten und variieren teils stark auch abhängig von der Bauteilgröße. Während also beispielsweise trennende Verfahren wie Drehen oder Fräsen sehr genau und formstabil sind (im Bereich um Toleranzfeld IT7), können beim Umformen (wie Biegen oder Tiefziehen) oder Urformen (wie Druck- oder Spritzgießen) prozessspezifische Formabweichungen entstehen. Hierfür lassen sich in Praxis und Literatur viele Beispiele finden. Hier sollen exemplarisch nur einige genannt werden:

- Bei Biegeprozessen kommt es aufgrund des elastischen Materialverhaltens zu einer Rückfederung [5].

## 2 Problemstellung

- Ein Wellen- bzw. Faltenwurf tritt bei Tiefzieh-Verfahren auf [6], was einerseits häufig auf eine zu geringe Niederhaltekraft zurückzuführen ist, andererseits aber auch abhängig von dem verwendeten Material und der Bauteilgestaltung (Blechdicke und Krümmungsradius) ist [7].
- Schwund [8] oder Verzug findet sich bei nahezu jedem Gießprozess (egal ob Aluminium-Druckguss, Stahl-Sandguss oder Kunststoff-Spritzguss), welcher vielfach durch die Ursache des unterschiedlichen Abkühlverhaltens aufgrund einer ungünstigen Materialverteilung im Bauteil herrührt [9].
- Ebenfalls bei Gießprozessen können Einfallstellen entstehen, wenn beispielsweise Bereiche mit Materialanhäufung oder schlechter Wärmeabfuhr im Werkzeug später erstarren als dünnwandige Stellen [10].

Bild 1 zeigt exemplarisch ein tiefgezogenes Bauteil, welches an den seitlichen Flächen wellenförmige Abweichungen gegenüber dem gewünschten flachen Erscheinen aus dem CAD-Modell aufweist. Diese sind in einem 3D-Scanmodell deutlich erkennbar. Durch eine farbliche Betrachtung der Abweichungen dieser Seitenfläche mit einer Ebene werden diese noch klarer ersichtlich.

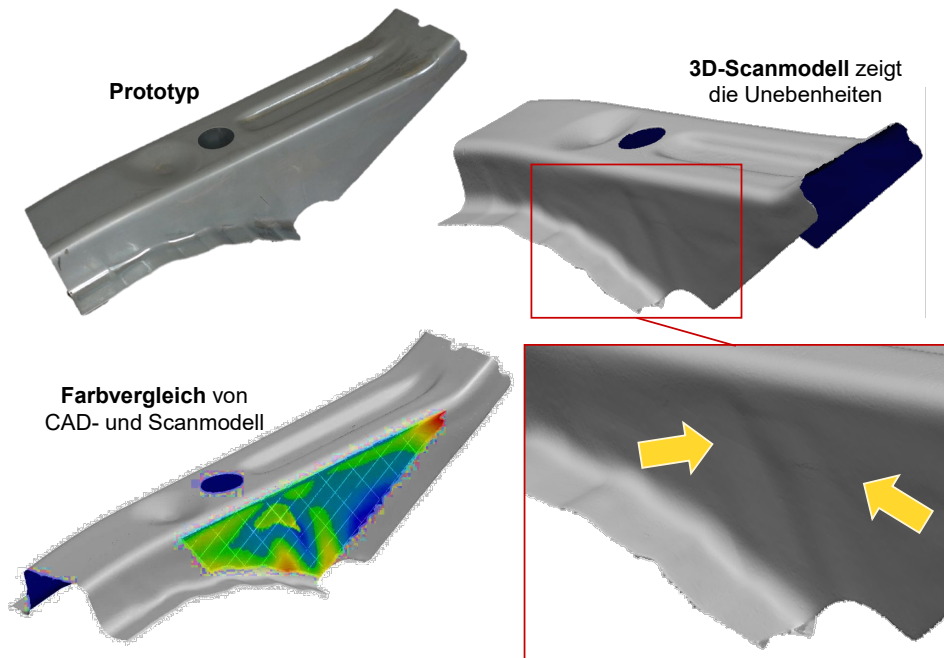


Bild 1: Beispielhafte Darstellung von Wellen-/Faltenwurf-Effekt nach dem Tiefziehprozess.

Bei letztendlicher Betrachtung des Aufwandes für die Erzeugung der Berechnungsmodelle in der Produktsimulation und des Bestrebens nach aussagekräftigen Analyseergebnissen kann folgender Stand festgehalten werden:

- Es wird für diesen Zweck stets das nominale (ideale) CAD-Modell als Basis verwendet.
- Für die Erzeugung der Simulationsmodelle wird ein hoher Aufwand betrieben.
- Die Verfeinerung der Berechnungsmodelle wird, auch aufgrund der nicht exakt dem gefertigten Teil entsprach und somit nicht ausreichend war.

Dies führt zur Frage, wie sinnvoll das alles erscheint, solange nicht die abweichungsbehaftete äußere Form der Komponenten, nach deren spezifischen Fertigungsprozessen, Verwendung findet.

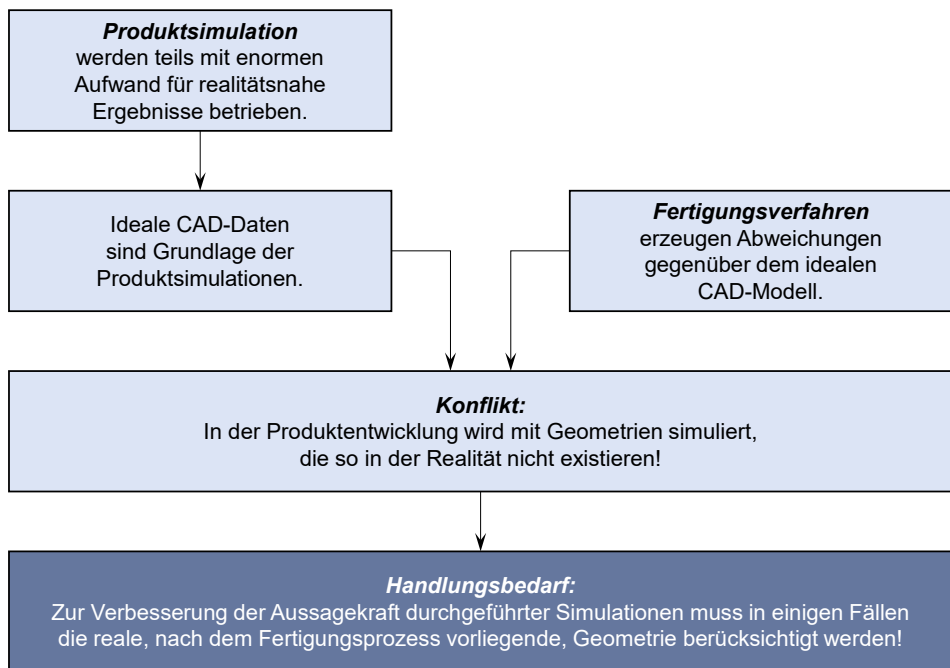


Bild 2: Abweichungen der Geometrie zwischen Simulation und Realität.

Wie oben beschrieben und in Bild 2 dargestellt, gibt es eine Diskrepanz in der Bauteilgeometrie zwischen den Simulationsmodellen und den tatsächlich gefertigten Bauteilen. Dass diese Abweichungen auch auf Simulationsergebnisse einen entscheidenden Einfluss haben, weisen verschiedene Veröffentlichungen auf unterschiedliche Art und Weise nach:

- In [11] beschreiben JOHANNSON et al. ein Beispiel von Turbinenkomponenten, bei welchem Experten Abweichungen auf Basis einer farblichen Darstellung begutachten und auf deren Relevanz bewerten. Auf Grundlage dieser Bewertungen muss für kritische Abweichungen anschließend ein neues CAD-Modell mit der abweichungsbehafteten Geometrie für eine erneute CFD-Simulation (Computational Fluid Dynamics) angefertigt werden.
- Zur Absicherung der Konstruktion und des Bauteilverhaltens ist von HAUTSCH et al. in [12] eine Realgeometrieanalyse auf 3D-Scandaten durchgeführt und mit dem idealen CAD-Modell in einer Simulation verglichen worden.
- Für die Überprüfung von Montageprozessen werden diese von STOCKINGER et al. in [13] mithilfe von Modellen simuliert, welche Abweichungen aus dem Fertigungsprozess enthalten. Diese Modelle basieren auf Toleranzsimulationen, welche mit Variations-FE-Analysen erzeugt werden.
- Eine Verbesserung der Beul-Steifigkeit erreichen KEMPE et al. in [14] durch die simulative Optimierung einer Blech-Seitenwand. Hierfür ist ein gefertigtes Bauteil digitalisiert und in ein CAD-Modell zurückgeführt worden, da die ideale Geometrie des CAD-Systems Bild 3: Überblick und Aufbau der vorliegenden Arbeit.

Eine wichtige Frage bleibt bislang offen: Wann werden die Unterschiede zwischen nomineller und tatsächlicher Geometrie so groß, dass hier ein relevanter Einfluss auf die Simulationsergebnisse entsteht und mit welchen Prozessen werden diese schlussendlich zur Simulation geführt?

Hier setzt diese Arbeit an und stellt sich den aufkommenden Forschungsfragen:

- Mit welchen Mitteln können die auftretenden geometrischen Abweichungen nachvollziehbar, systematisch und reproduzierbar auf deren Einfluss auf das Simulationsergebnis klassifiziert und bewertet werden?
- Welche Möglichkeiten bieten sich dem Produktentwickler, um aus den vorhandenen Datenstrukturen der erzeugten Realgeometrie ein simulationsfähiges Modell, welches die zur sicheren Aussagekraft notwendigen Abweichungen integriert hat, zu erzeugen?

## 2.2 Zielsetzung und generelle Vorgehensweise

An die oben formulierten Defizite und Forschungsfragen knüpft diese Arbeit an. Es wird hierin ein Prozess vorgestellt, der den Anwender befähigt, Abweichungen durch einen Geometrievergleich auf deren Relevanz bewerten zu können und die situativ vorteilhaftesten Möglichkeiten zur Aufbereitung der Modelle für eine Produktsimulation benennen und durchzuführen.

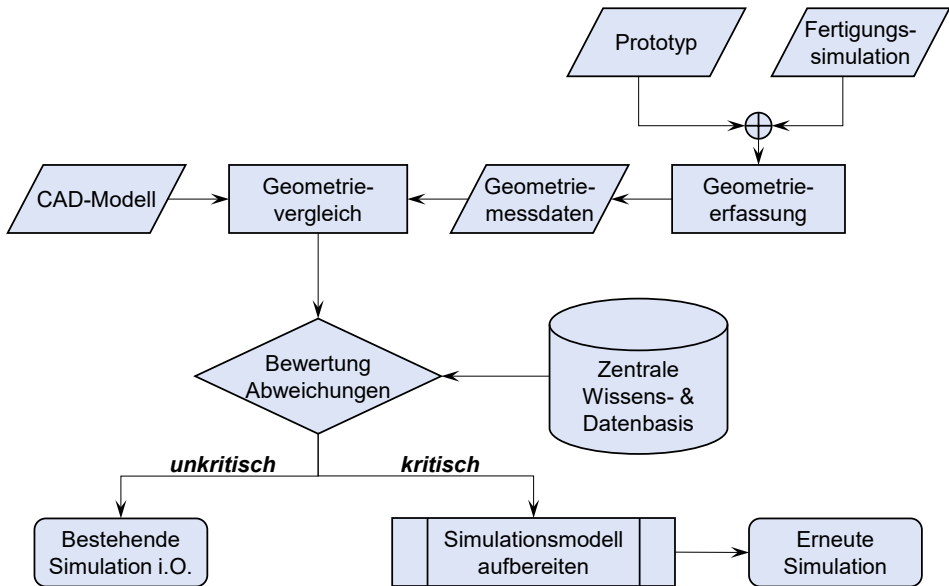


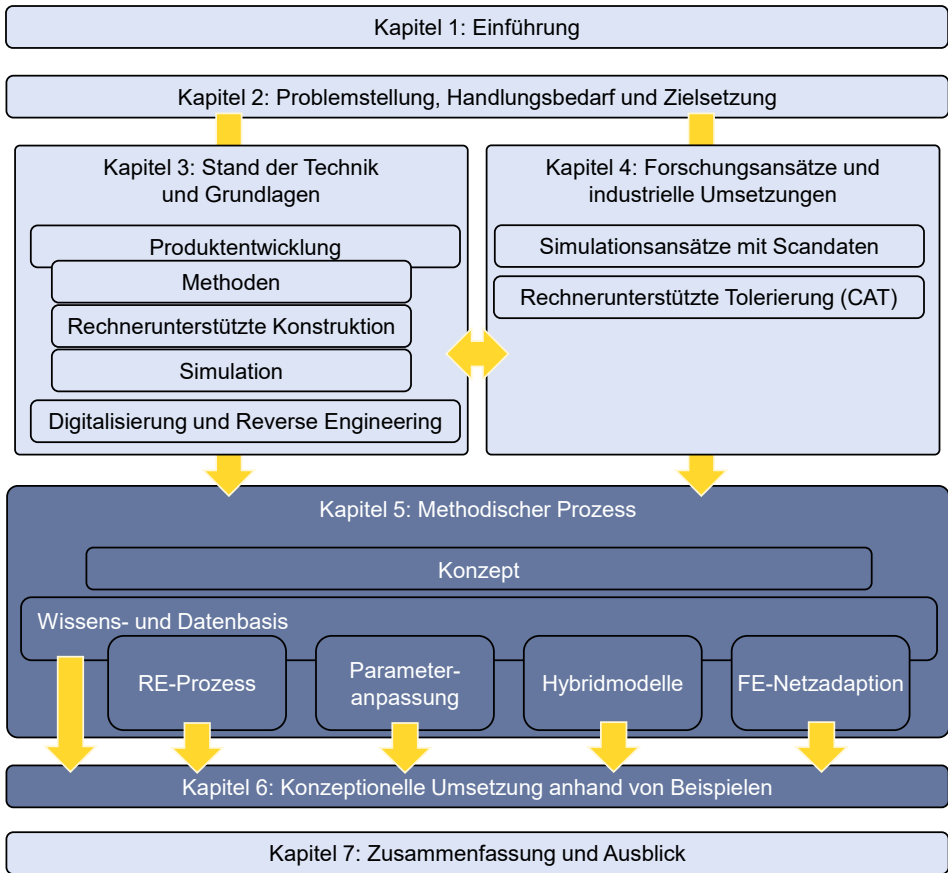
Bild 4: Genereller Zielprozess bei der Evaluation von Produktsimulationen und Aufbereitung mittels Realgeometriemessdaten.

Das angestrebte, übergeordnete Zielvorgehen (Bild 4) ist dabei, dass das nominelle Geometriemodell aus der Konstruktion, welches typischerweise mit einem parametrischen CAD-System erstellt ist, mit einem, aufgrund von Maßabweichungen und verschiedener fertigungstechnischer Ungenauigkeiten, abweichungsbehafteten Realgeometriemodell verglichen wird. Auf dieser Basis des Geometrievergleichs erfolgt eine Analyse, inwiefern durchgeführte Simulationen in Bezug auf die Komponente oder das Produkt ihre Aussagekraft und damit die Gültigkeit behalten. Hierbei wird der Anwender mittels einer Wissens- und Produktdatenbank unterstützt, um gezielt die verschiedenen Abweichungserscheinungen einordnen und bewerten zu können. Die Datenbank enthält neben dem Expertenwissen aus den jeweiligen Fertigungsprozessen auch sämtliche produktspezifische Eigenschaften, die das Bauteil definieren. Mit dieser Bewertung der auftretenden Abweichungen soll die Aussage getroffen werden können, ob die

Simulation mit der nominalen CAD-Geometrie hinreichend genaue Ergebnisse liefert, oder ob eine erneute Berechnung mit einem aufbereiteten Modell erfolgen sollte, um mögliche Versagensstellen frühzeitig zu entdecken und ausbessern zu können.

### 2.3 Überblick dieser Arbeit

Wie vorausgehend in diesem Kapitel dargestellt, gibt es eine Diskrepanz zwischen nominalem CAD-Modell und gefertigtem Bauteil. Die Durchführung von Simulationen zur Absicherung erfolgt auf Basis des Idealmodells. Auch wenn zur Qualitätssicherung häufig dreidimensional gemessene Modelle erzeugt werden, bleiben diese bei Nachrechnungen außen vor. Eine bedarfsgerechte Überprüfung findet nicht statt. Hierfür ist der oben ange deutete Prozess mit Modellaufbereitungsmethoden entwickelt und stellt sich in dieser Arbeit nach Bild 3 dar. Die folgenden zwei Kapitel beschäftigen sich mit dem heutigen Stand in Industrie und Forschung: Kapitel 3 beschreibt den Stand der Technik in der Produktentwicklung mit seinen hauptsächlich verwendeten Methoden, der rechnerunterstützten Konstruktionsmethodik, sowie einem Einblick in die Simulationsanwendungen. Des Weiteren wird das große Feld des Reverse Engineerings mit verschiedenen Digitalisierungsstrategien und Modellaufbereitungsarbeiten dargestellt. Im Kapitel 4 werden Anwendungen aus der Industrie vorgestellt, welche schon heute Simulation mit realen Bauteilgeometrien und Scanmodellen bieten. Außerdem werden hier einige Forschungsansätze in weiterem Sinne der Simulation von und mit Realgeometrien mit ihren spezifischen Herangehensweisen beleuchtet. In Kapitel 5 werden nochmal die Kernpunkte der Arbeit explizit dargestellt. Das Kapitel 6 führt den bereits grob skizzierten Prozess ein, gibt Einblick in die Inhalte der zentralen Wissens- und Datenbasis und zeigt im Speziellen das Vorgehen, mit welchem die Bewertung der Abweichungen durchgeführt wird. Darüber hinaus sind in diesem Kapitel sowohl erweiterte Methoden aus dem Stand der Technik, als auch mehrere neu entwickelte Vorgehen zum Aufbau von Geometriemodellen auf Basis von Scandaten dargestellt und beschrieben. Um den Prozess und die Methoden zur Modellaufbereitung zu veranschaulichen und zur Validierung der einzelnen Aspekte der Arbeit werden diese in Kapitel 7 mit Beispielen aus der Industrie und Forschung dargestellt. Abschließend wird in Kapitel 8 eine Zusammenfassung der genannten Inhalte und ein Ausblick auf zukünftige Entwicklungsfelder gegeben.



- Möglichkeiten durch steigende Rechenkapazitäten, weiter zunehmen.

Dies führt zur Frage, wie sinnvoll das alles erscheint, solange nicht die abweichungsbehaftete äußere Form der Komponenten, nach deren spezifischen Fertigungsprozessen, Verwendung findet.



## 3 Stand der Technik und Grundlagen

Simulationen spielen in der Entwicklung von Produkten eine entscheidende Rolle, um die funktionalen und inhärenten Eigenschaften eines Bauteils analysieren und beschreiben zu können, noch bevor ein realer Prototyp vorhanden ist. Sie werden hierfür sowohl in der Produktsynthese als auch in der Produktanalyse angewendet. Der Produktentwickler sieht sich dabei vielen Herausforderungen gegenüber; bei vielen davon kann er heutzutage auf methodische Vorgehensweisen zurückgreifen, um gezielt Lösungen zu entwickeln. Hierfür spielt die Beschreibung des Produktentwicklungsprozesses (PEP) eine große Rolle. Im Folgenden wird darum zunächst auf den Entwicklungs- und Konstruktionsprozess eingegangen und auf die Möglichkeit, wie dabei Simulationswerkzeuge und -methoden eingesetzt werden können.

Für Simulationen kommt der Modellbildung eine gewichtige Rolle zu. Das Produktmodell muss hinreichend abstrakt sein und gleichzeitig genau genug die Realität abbilden, um den jeweiligen Anforderungen an die Simulation Genüge zu tun. In geometriebasierten Analysen wird in der Regel das erzeugte ideale 3D-Produktmodell als Basismodell verwendet. Wie bereits eingangs beschrieben, liegt in dieser Arbeit der Fokus auf abweichungsbehafteten Geometrien, welche vorwiegend aus Ungenauigkeiten im Fertigungsprozess entstehen. Diese Abweichungen gilt es demnach zu erfassen und hinsichtlich des Simulationszweckes zu bewerten. Aus diesem Grund soll hier ein Überblick über Möglichkeiten zur Datenerfassung der Geometrie gegeben werden. In diesem Rahmen wird das Reverse Engineering (RE) als zugrundeliegender generischer Prozess dargestellt.

### 3.1 Der Produktentwicklungsprozess

Die Entwicklung technischer Produkte war und ist vielfach von Wissen, Erfahrungen und Intuition des einzelnen Produktentwicklers abhängig. Der Entwickler soll hierbei praktisch unterstützt werden, ohne ihn in seinem kreativen Schaffen einzuschränken [15]. Hierfür sind vor allem in den letzten Jahrzehnten verschiedene Konstruktionsmethodiken entwickelt worden, mit denen Vorgehensmodelle zur Entwicklung von Produkten zur Verfügung gestellt werden. Besonders im deutschsprachigen Raum ist hierzu ein großer Beitrag geleistet worden. Dabei sind vor allem PAHL und BEITZ hervorzuheben. In deren Vorgehensmodell – wie auch in vielen anderen, beispielsweise ANDREASEN [16], RODENACKER [17], EHRENSPIEL [18]

oder ROTH [19] – wird der PEP in vier Hauptphasen unterteilt. Diese lassen sich zwar einzeln benennen, sind aber im Regelfall nicht scharf trennbar und mit fließenden Übergängen zueinander. Nach [15] werden die Arbeitsschritte in folgenden Phasen gegliedert:

- Planung (Klären der Aufgabenstellung und Erstellung der Anforderungsliste),
- Konzeption (Finden von Lösungsprinzipien und Festlegung der Funktionsstruktur),
- Entwurf (Entwickeln und Bewerten der Feingestaltung, Festlegen des endgültigen Entwurfes) und
- Ausarbeitung (Anfertigen der fertigungstechnischen Unterlagen).

Diese Erkenntnis hat sich seitdem als Grundlage in der Konstruktionsmethodik etabliert und schlägt sich auch in dem Standardwerk des methodischen Vorgehens in der Produktentwicklung, der VDI 2221 „Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte“, nieder.

Die VDI 2221 bildet den Auftakt im Richtlinienkatalog VDI 2221 bis VDI 2223 und beschreibt allgemeingültige, branchenunabhängige Grundlagen des methodischen Entwickelns und Konstruierens. Dabei ist das Gesamtverfahren in sieben Arbeitsabschnitte unterteilt, welche in entsprechend sieben Arbeitsergebnissen münden. Die Abschnitte müssen bei der Aufgabe nicht immer vollständig, häufig auch nur teilweise durchlaufen werden. Vielmehr ist von einem iterativen Vor- und Rückspringen zwischen einzelnen oder mehreren Aufgaben auszugehen. In der Praxis werden häufig einzelne Arbeitsschritte in die vier oben genannten Entwicklungsphasen (Phase I: Planung, Phase II: Konzeption, Phase III: Entwurf, Phase IV: Ausarbeitung) gebündelt, um terminliche und organisatorische Abläufe besser planen zu können. Bild 5 zeigt das generelle Vorgehen mit den vier Phasen und den darin normalerweise angesiedelten Arbeitsschritten, sowie die entsprechenden zu erwartenden Arbeitsergebnisse eines jeden Schrittes. [20]

Die Richtlinie VDI 2222 Blatt 1 „Methodisches Entwickeln von Lösungsprinzipien“ soll die übergeordnete VDI 2221 vertiefen und ergänzen. Darin wird auf die ersten drei Arbeitsschritte (Klären und präzisieren der Aufgabenstellung, Ermitteln von Funktionen und deren Struktur und Suche nach Lösungsprinzipien und deren Struktur) eingegangen. [21]

Das Werk der VDI 2223 „Methodisches Entwerfen technischer Produkte“ gibt schließlich ein tieferes Verständnis für die Phase des Entwerfens mit

den Arbeitsschritten vier bis sechs (Gliedern in realisierbare Module, Gestalten der maßgebenden Module, Gestalten des gesamten Produkts). „Sie soll auch einen Beitrag dazu leisten, das Entwerfen marktgerechter Produkte zu unterstützen und den Entwurfsprozess selbst zu optimieren, der durch die Einführung neuer Technologien der Informationsverarbeitung und durch die Markt- und Wettbewerbszwänge in einem stetigen Wandel begriffen ist.“ [22]

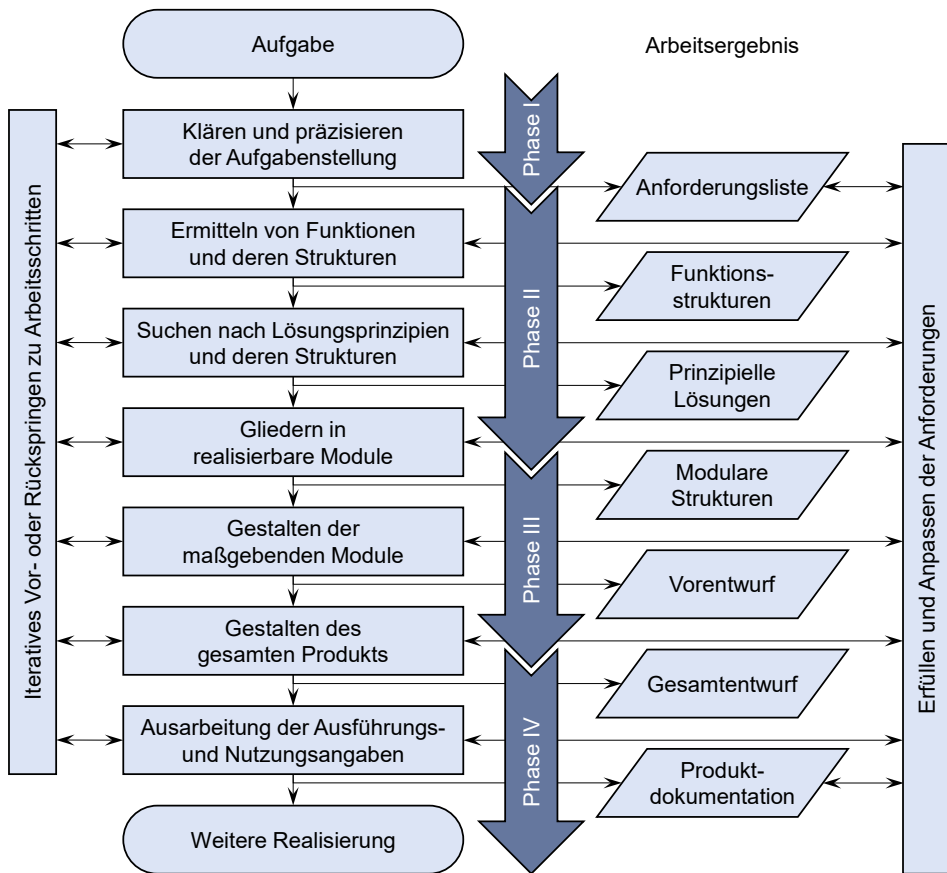


Bild 5: Generelles Vorgehen beim Entwickeln und Konstruieren nach [20].

Als ganzheitlichen Ansatz existiert analog zur VDI 2221 die Richtlinie VDI 2206 „Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme“, in welcher unter anderem ein grundsätzliches generisches Vorgehen für die Phasen der Konzeption und des Entwurfs beschrieben sind [23]. Das dort vorgestellte V-Modell (Bild 6) geht von den Anforderungen aus, welche bei einem konkreten Entwicklungsauftrag vorkommen. Der absteigende linke

Ast stellt den Systementwurf dar, bei dem die Gesamtfunktion in Teilfunktionen zerlegt wird und zudem fachübergreifende Lösungsansätze und physikalische Lösungsprinzipien definiert und beschrieben werden. In der Basis wird das Lösungskonzept in den einzelnen Domänen getrennt weiter konkretisiert und entsprechend ausgelegt. Anschließend erfolgt im rechten aufsteigenden Ast die Integration der einzelnen Teilsysteme zu einem Gesamtsystem. Hierbei werden kontinuierlich die tatsächlichen Eigenschaften des Systems mit den Anforderungen abgeglichen. Hervorzuheben ist zudem, dass vom Systementwurf, über den domänenspezifischen Entwurf, bis hin zur Systemintegration parallel eine Abbildung und Untersuchung der Systemeigenschaften stattfindet. Hierbei kommen vorwiegend rechnergestützte Modelle und Simulationswerkzeuge zum Einsatz.

Als Ausgabe dieses Zyklus entsteht ein neues Produktstadium. Durch mehrfaches Durchlaufen des V-Modells steigt der Produktreifegrad stetig an. Das Produkt kann demnach in den ersten Schritten beispielsweise auch nur ein digitales Modell, ein Labormuster, ein Funktionsmuster oder ein Vorserienprodukt sein. Erst nach dem letztmaligen Durchlaufen des V-Modells beschreibt es das fertige Erzeugnis.

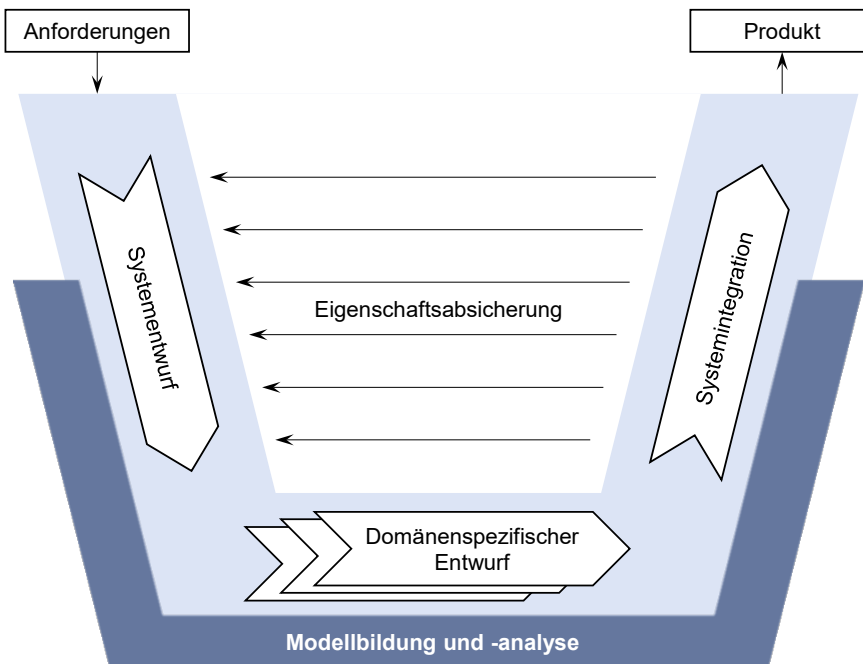


Bild 6: V-Modell als Makrozyklus nach [23].

Neben den genannten Ansätzen der klassischen Produktentwicklungsmethoden nach PAHL/BEITZ und den genannten VDI-Richtlinien existieren

noch weitere Vorgehensmodelle. Exemplarisch ist beispielsweise das Münchener Vorgehensmodell (MVM) nach LINDEMANN zu nennen [24]. Diese Modelle sollen hier aber nicht weiter betrachtet werden.

Eine Erweiterung der Methoden in der Produktentwicklung bildet das Systems Engineering (SE), einem weitgehend dokumentengetriebenen Ansatz. Dieser soll durch seinen interdisziplinären Charakter die steigende Komplexität erfassen und erleichtern, welche mit dem Übergang von ehemals rein mechanischen hin zur mechatronischen Komponenten (verbunden mit einer steigenden Einbeziehung von Softwarekomponenten in allen Produktlebenszyklusphasen) einhergeht. [25]

Motiviert durch den zentralen Einsatz von digitalen Modellen anstelle von Dokumenten in interdisziplinären Entwicklungsszenarien, führen EIGNER et al. den Begriff des Model-Based Systems Engineering (MBSE) ein [26]. Dieses beschreibt nach [27] die Unterstützung sämtlicher Arbeiten während Konzept-, Entwicklungs- und Lebenszyklusphase unter formalisierter Anwendung einer Modellbildung.

Im Zuge dessen haben EIGNER et al. das bekannte und weit verbreitete interdisziplinäre Vorgehen im V-Modell der VDI 2206 als Basis herangezogen, um den Prozess der Modellbasierten Virtuellen Produktentwicklung (MVPE) zu beschreiben. Dieses betrachtet dort hauptsächlich den linken Flügel der interdisziplinären Systementwicklung und erweitert diesen mit dem Einsatz von Methoden aus dem MBSE, wobei darin drei Systemansichten (Modellbildung und Spezifikation, Modellbildung und erste Simulation, disziplinspezifische Modellbildung und Simulation) Anwendung finden sollen. Unterstützt wird der Prozess mit den Daten von einem PLM-System (Product Lifecycle Management).

Abschließend betrachtet sind Produktentwicklungsmethoden sehr universell einsetzbar. Die aktuellen Ansätze und Forschungen in Richtung des MBSE und der MVPE zeigen, dass der Modellbildung eine enorme Wichtigkeit zugeschrieben wird, da das aufgestellte Modell die Grundlage für die Simulation bildet und somit den größten Einfluss auf dessen Aussagekraft liefert. Eine Anwendung von Simulationswerkzeugen findet im Produktentwicklungsprozess zu jeder Zeit statt, auch schon in den frühen Konzept- und Entwurfsphasen. Unter Berücksichtigung der „rule of ten“ (Zehnerregel der Fehlerkosten), ist es von entscheidender Bedeutung, Schwachstellen möglichst früh im PEP festzustellen, da dort die geringsten Kosten zur Vermeidung oder Beseitigung bestehen. Somit werden Simulationen mit hinreichender Aussagekraft bereits in den frühen Phasen angestrebt.

## 3.2 **Rechnerunterstützte Konstruktion und CAD-Modellierung**

Das 3D-Modell eines Produktes stellt den Kern und Ausgangspunkt der Produktentwicklung dar. Es ist die Datenbasis für sämtliche weitere Schritte im PEP. So dient es unter anderem als Vorlage für folgende wichtige Bausteine des Entwicklungsprozesses:

- Zur Ableitung der Modelle von Strukturberechnungen, beispielsweise mittels numerischer Verfahren.
- Für die Erstellung von technischen Dokumentationen, wie Fertigungszeichnungen oder Bauteilkatalogen.
- Zur Festlegung der Daten für Maschinensteuerungssoftware, wie CNC-Programme, Abtastdaten für Messmaschinen oder die Additive Fertigung.

Aufgrund dieser zentralen Bedeutung des 3D-Produktmodells wird in diesem Kapitel ein kurzer Abriss über die Entstehung der rechnergestützten Konstruktion, sowie dem Aufbau und der Geometriebeschreibung bei der CAD-Modellierung gegeben.

Die geschichtliche Entwicklung der Rechnerunterstützten Konstruktion beginnt in den 1960-er Jahren. Der Aufschwung war stark an die Weiterentwicklung der Computer geknüpft. Bis über die Mitte des 20. Jahrhunderts war die Produktdarstellung ausschließlich im Papierzeichnungsformat gegeben. Den Auftakt zur Rechnerunterstützung machte schließlich SUTHERLAND in seiner Dissertation im Jahr 1963 am Massachusetts Institute of Technology (MIT) mit dem ersten interaktiven CAD-System Scetchpad [28]. In den folgenden Jahren entwickelten vor allem Unternehmen aus Luft- und Raumfahrt sowie der Automobilindustrie in den Vereinigten Staaten von Amerika verschiedene zweidimensionale kommerzielle CAD-Systeme. Ein kommerzieller Meilenstein war die Erscheinung von AutoCAD aus dem Hause Autodesk im Jahr 1982 als 2D-CAD-System auf einem PC. Ein weiterer Meilenstein folgte 1987 durch die Einführung des volumenbasierten, parametrischen 3D-CAD-Systems Pro/Engineer der Firma Parametric Technology Corp. (PTC). In den 90-er Jahren erfolgte dann zunehmend der allgemeine Umstieg von 2D auf 3D Systeme. Seitdem werden die Bestrebungen verfolgt, das dreidimensionale, rein geometrieabbildende Modell zu einem Integrierten Produktmodell zu erweitern. Dieses „[...]basiert auf der Abbildung aller relevanten Produktmerkmale, die in den einzelnen Produktlebensphasen entstehen[...]“ [29], also indem das Modell mit sämtlichen Informationen und Eigenschaften erweitert ist.

Für die rechnerinterne Verarbeitung von geometrischen Modellen ist die mathematische Repräsentationsform der Elemente entscheidend. Die heute standardmäßige parametrische Abbildung bedeutet, dass nicht nur konventionell feste Werte vergeben sind, sondern geometrische Elemente mit variablen Bezügen erfasst sind und verarbeitet werden. In den meisten Fällen wird dabei ein chronologiebasierter Ansatz umgesetzt. Hierbei wird das Modell mittels einer editierbaren Modellgeschichte der Reihe nach aufgebaut. Darauf aufbauend beschreibt die VDI 2209 „3-D-Produktmodellierung – Technische und organisatorische Voraussetzungen – Verfahren, Werkzeuge und Anwendungen – Wirtschaftlicher Einsatz in der Praxis“ das featurebasierte CAD, bei welchem zusätzlich zur Erfassung und Verarbeitung der Geometrie zusätzliche weiterführende Informationen, beispielsweise über Funktionsweise oder Fertigungstechnologie, hinterlegt sind (Bild 7). Die parametrische Modellierung mit dem featurebasierten Informationsstand ist heutzutage hauptsächlich in Anwendung. Nochmals in Erweiterung dieser vorangehenden Ansätze liegt das Ziel des Wissensbasierten CAD, welches mittels Wissensverarbeitung versuchen soll, Schlussfolgerungen aus der aktuellen Konstruktionssituation zu ziehen, um den Konstrukteur im weiteren Entwicklungsprozess zu unterstützen.

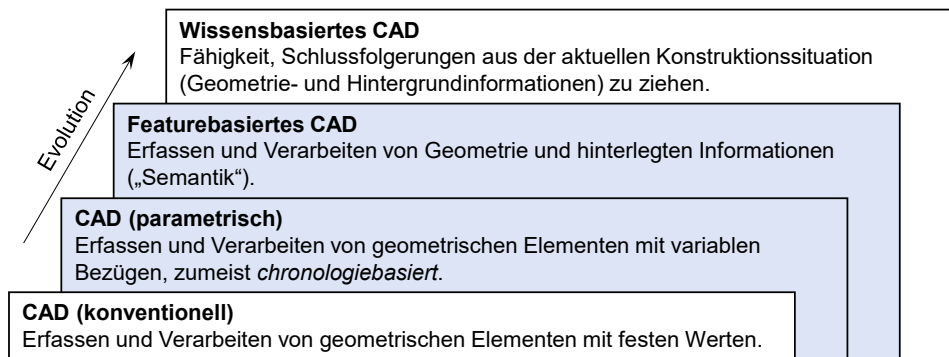


Bild 7: Übersicht der Modellierungsgrundlagen nach [30].

Der Aufbau eines parametrischen CAD-Modells erfolgt mit Hilfe von Konstruktionselementen (KE). Die KE werden in einem Modellbaum chronologisch aufgebaut und regeneriert. Jedes KE besteht aus diversen Features, welche die geometrischen Formelemente und/oder semantischen Informationen beschreiben. Zum Aufbau des virtuellen Modells bieten die CAD-Systeme verschieden KE an. Tabelle 1 zeigt eine Auswahl von häufig verwendeten KE bei der Modellierung.

Tabelle 1: Häufig verwendete Konstruktionselemente in CAD-Systemen.

Art	Beschreibung	Beispiel
Bezugs-KE	Bezugselemente, beschreiben keine Geometrie	Koordinatensysteme Ebenen Achsen Punkte
Skizzenbasierte KE	Erzeugen von Körpern durch skizzierte 2D-Schnitte	Extrusion/Profil Drehen/Rotationskörper Ziehen Verbund
Standard-KE	Verfeinerungen („kosmetische“ Elemente) an bestehenden Geometriekörpern	Rundungen Fasen Bohrungen Schale/Wandstärke Schrägen/Konus

Zur Speicherung und tatsächlichen Abbildung der Geometrie kommen für 3D-Modelle verschiedene Repräsentationsformen zum Einsatz. Die wichtigsten sind in Bild 8 dargestellt und werden im Folgenden kurz erläutert:

- **Kantenmodelle:** Bei dieser Repräsentationsform wird das Modell mit seinen Kanten dargestellt. Diese Darstellung ist äquivalent zur ursprünglichen zweidimensionalen zeichnerischen Darstellung auf dem Papier. Dadurch ist auch nur ein geringer Datenaufwand notwendig, was eine sehr schnelle Darstellung und Bewegung des Modells ermöglicht (durch die steigende Rechnerleistung heutzutage aber vernachlässigbar). Nachteilig hingegen ist das Fehlen von Flächen- und Volumeninformationen anzumerken, was zudem die Orientierung im dreidimensionalen Raum erschwert.
- **Flächenmodelle:** Diese bilden die Geometrie durch eine Flächen-darstellung ab. Auch hier kann häufig eine Orientierung im Modell nicht eindeutig identifiziert werden. Flächenmodelle haben dennoch ein breites Anwendungsspektrum, besonders wenn es darum geht Freiformflächen, geometrisch komplexe Volumina (zum Beispiel bei Gussteilen), Verbindungsbereiche zwischen Regelgeometrien oder gewünschte nicht-analytische Oberflächenbeschreibungen aus Simulationsergebnissen im 3D-Modell abzubilden.
- **Volumenmodelle:** Dies ist die heute standardmäßige Darstellung von 3D-Modellen. Sie bestehen aus topologisch geschlossenen Flächenverbänden und besitzen darüber hinaus Volumeninformationen. Man unterscheidet hauptsächlich die Repräsentationsform

zwischen Boundary Representation (B-Rep) und Constructive Solid Geometry (CSG). Bei B-Rep wird die Geometrie über die Begrenzungsflächen definiert. Die CSG bildet die gewünschte Geometrie über BOOL'sche Operationen ab. Heutige CAD-Systeme verwenden zur Darstellung im Regelfall ein Hybridmodell aus beiden Elementen, welche für den Endnutzer nicht sichtbar in Erscheinung tritt.

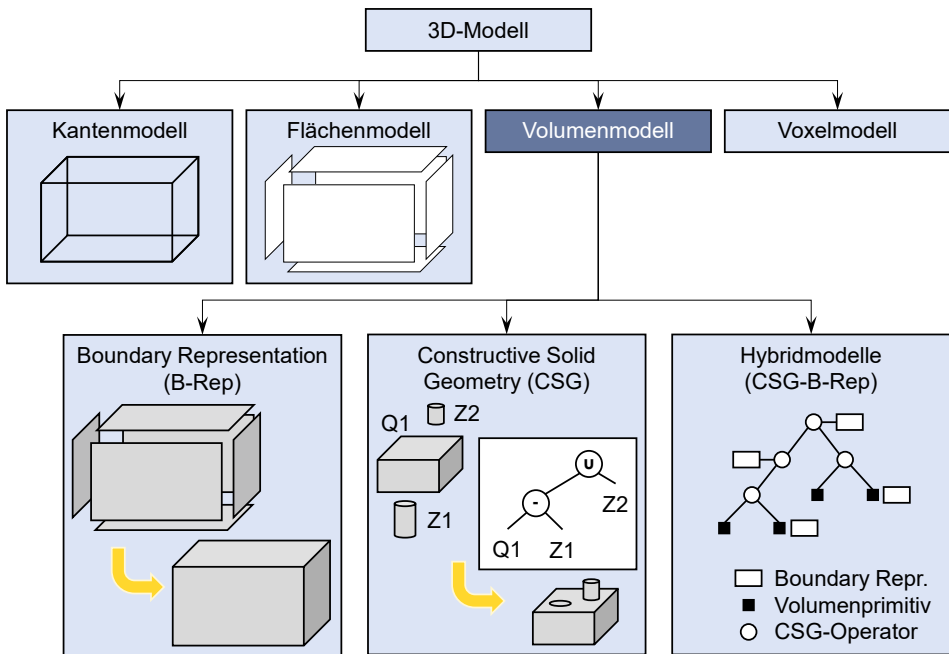


Bild 8: Wichtigste CAD-Repräsentationsformen für 3D-Modelle nach [31].

Auch wenn ein 3D-Modell in der geometrischen Abbildung den gewünschten Anforderungen entspricht, kann es dennoch interne Qualitätsunterschiede bei den Modellen geben. In der heute üblichen parametrischen, chronologiebasierten Modellierungsweise wird die Qualität des Ergebnisses stark vom Anwender beeinflusst. Dabei ist weniger das Modell zu betrachten, als vielmehr die Art und Weise, wie dieses erstellt ist. Aufgrund der historienbasierten Baumstruktur, welche sich bei der Modellierung entwickelt, entstehen (teils ungewollte) Abhängigkeiten (Eltern-Kind-Beziehungen) zwischen den einzelnen Konstruktionselementen. Diese können besonders bei größeren Modellen, welche aus einer Vielzahl an KE bestehen, zu unerwarteten und schwer lösbaren Aufgaben führen, wenn es eine Änderung an der Konstruktion gibt. Um diesem Problem entgegenzutreten gibt es Ansätze für eine robuste Modellierung der Geometrien.

Darunter fallen besonders die Nachvollziehbarkeit und die Änderungsfreundlichkeit im Strukturbaum. Stellvertretend hierfür seien die Ansätze der Resilient Modelling Strategy (RMS) von GEBHARDT [32] und die Delphi-Horizontal-Methode [33] genannt und im Weiteren kurz erläutert.

Mit der RMS und der Delphi-Horizontal-Methode werden universelle Vorgehen zum Aufbau von 3D-Modellen beschrieben, welche unabhängig vom CAD-System angewendet werden können. Das Hauptaugenmerk liegt dabei darauf, die (Eltern-Kind)-Beziehungen untereinander einzuschränken, beziehungsweise so zu strukturieren, dass diese auch bei Änderungen des Modells nicht in Konflikten untereinander münden.

Bei der Delphi-Horizontalmethode werden die einzelnen KE gedanklich in einer horizontalen Hierarchiestufe aufgebaut. Es wird mittels eines initialen Primitivums und vielen Bezugs-elementen ein Grundgerüst des Modells aufgebaut. Anschließend werden sämtliche weiteren KE ausschließlich auf die Bezugs-elemente referenziert, sodass untereinander gar keine Eltern-Kind-Beziehungen entstehen können.

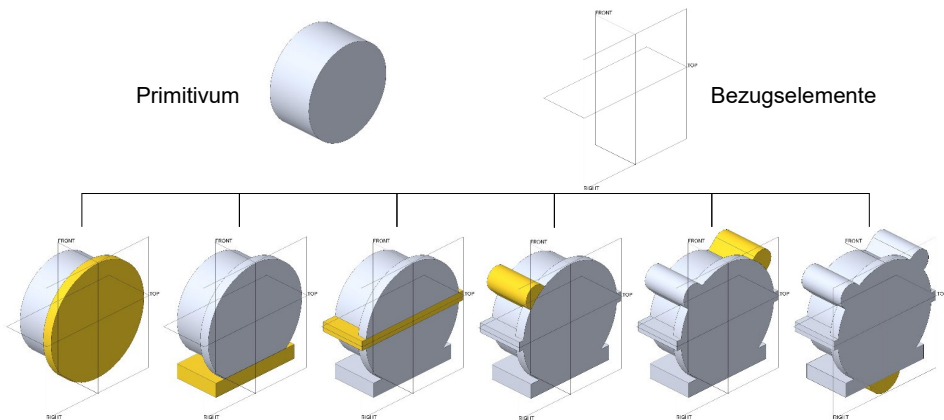


Bild 9: Delphi-Horizontal-Methode zur Modellerstellung nach [34]

Mit RMS stellt GEBHARDT in [32] seine Modellierungsstrategie vor, welche die einzelnen Elemente in Klassen aufteilt und klare Vorgaben macht, wann welche Elemente verarbeitet werden sollten. Dies, zusammen mit einer sauberen Umbenennung der KE, führt zu einem robusten Modell, welches nachträgliche Änderungen ohne lange Regenerationszeiten und unzulässigen Beziehungen ermöglicht. Die genannte Klassifizierung mit der entsprechenden Reihenfolge ist in nachfolgender Tabelle 2 vollständig beschrieben.

Tabelle 2: Aufteilung und Sequenzen bei Modellierung mit der RMS.

Gruppe	Beschreibung	Typische KEs	Anmerkung
1. Referenzen	Sämtliche Referenzelemente zuerst, um sie in allen anderen Gruppen verfügbar zu haben.	Referenzkörper, Referenzebenen, Koordinatensysteme, Layouts, Skizzen, Bilder	Keine Volumina
2. Konstruktionsmerkmale	Elemente wie Flächen oder Kurven zum Beschreiben komplexer Volumenelemente.	Flächen, (3D)-Kurven, Trimmen, Erweitern	Keine Volumina
3. Kernmodell	Basisvolumina, um die grundsätzliche Form und Orientierung zu definieren.	Extrusion, Drehen, Verbund, Schale, Rippe	Material hinzufügen
4. Details	Detailkomponenten, um die Form vollständig zu beschreiben.	Extrusion, Drehen, Verbund, Bohrung, Gewinde	Material wegnehmen, keine Beziehungen innerhalb der Detail-Gruppe
5. Ändern	KE, welche Flächen abschrägen oder verändern.	Schräge, Muster, Spiegeln	
6. Quarantäne	Volatile KEs	Fase, Rundung	

Auch wenn sich das Vorgehen der genannten Modellierungsstrategien unterscheidet, bleibt die Kernaussage beider Methoden, dass die Referenzierung von KE untereinander die größte Herausforderung darstellt, wenn es darum geht, Bauteile nachträglich zu verändern.

Zusammenfassend wird festgehalten, dass das 3D-CAD-Modell der Ausgangspunkt für sämtliche weitere Schritte der Produktentwicklung ist. Darum ist auch ein besonderes Augenmerk auf den Aufbau und die Ausführung mittels einer robusten Modellierung zu legen. Die Anwendung und Einhaltung von Modellierungsstrategien sind nahezu ausschließlich benutzerabhängig. Ein Vorteil der Nutzung einer dieser Strategien ist häufig im Vorfeld nur schwer kalkulierbar, was in Konflikt mit der Akzeptanz für den Mehraufwand steht.

### 3.3 Simulationsmethoden und Analysewerkzeuge in der Produktentwicklung

Simulationen dienen allgemein dem Zweck der Vorhersage des Verhaltens unter bestimmten Gegebenheiten und sind ein vielgenutztes und variabel einsetzbares Werkzeug in der Produktentwicklung. Die VDI 3633 „Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen“ definiert Simulation als „Verfahren zur Nachbildung eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierbaren Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind“ [35]. Ferner wird die Simulation als das „Vorbereiten, Durchführen und Auswerten gezielter Experimente mit einem Simulationsmodell verstanden [...] (um damit das; Anmerkung des Verfassers) Verhalten komplexer Systeme[...]“ zu untersuchen. Ein Modell bedeutet in diesem Zusammenhang „[...]ein materielles oder immaterielles Gebilde, das geschaffen wird, um ein Original zu repräsentieren um so einen bestimmten Zweck erreichen zu können“ [30].

Das Ziel einer Simulation ist also der Erkenntnisgewinn über das tatsächliche Verhalten eines Systems auf Basis von Experimenten an einem Modell. Dieses muss entsprechend so gewählt sein, dass es zum einen so abstrakt ist, dass der Berechnungsaufwand im akzeptablen Verhältnis zum Zweck steht und zum anderen die Wirklichkeit hinreichend genau abgebildet wird, um die Ergebnisse der Simulation wieder auf die Realität zu übertragen.

Besonders im Produktentwicklungsprozess ist es zudem aus Kostengründen ein übergeordnetes Ziel, möglichst frühzeitig Fehler und Schwachstellen zu detektieren und entsprechend gegenzusteuern. Bei diesem als Frontloading [36] bezeichneten Ansatz wird der Einsatz von Simulationsmethoden in den frühen Phasen forciert. Dadurch können sehr viele Einflussfaktoren des Produktes in Betracht gezogen werden, weshalb vor allem bei komplexen Produkten der frühzeitige Einsatz lohnenswert ist, um sämtliche Aspekte zu berücksichtigen.

#### 3.3.1 Klassifikationsansätze der Simulationsanwendungen

Eine Klassifikation von Simulationsmethoden kann dabei einerseits auf Basis des verwendeten Modells stattfinden oder auch nach der angewandten Methodik.

Die Klassifikation nach der Methodik wird in [35] beschrieben. Hierbei unterscheidet man die Simulationstypen nach der verbundenen Zustandsänderung des Modells. Somit ergibt sich nach Bild 10 eine kontinuierliche oder eine diskrete Simulation.

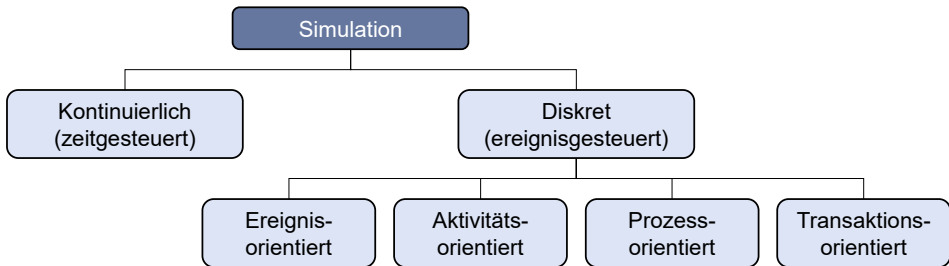


Bild 10: Systematik der Simulation anhand Zustandsänderung nach [35]

In Anlehnung an [37] wird nach VDI 2209 „3-D-Produktmodellierung: Technische und organisatorische Voraussetzungen – Verfahren Werkzeuge und Anwendungen – Wirtschaftlicher Einsatz in der Praxis“ die Simulation modellbasiert systematisiert [30]. Dabei wird die Simulation mit physikalischen Modellen, mit analytischen oder numerischen Modellen sowie mit graphischen Modellen unterschieden (Bild 11). Generell ist eine scharfe Trennung der einzelnen Simulationsklassen kaum möglich, da abhängig von der Aufgabenstellung häufig mehrere Methoden einander bedingen und parallel vonstattengehen [36].

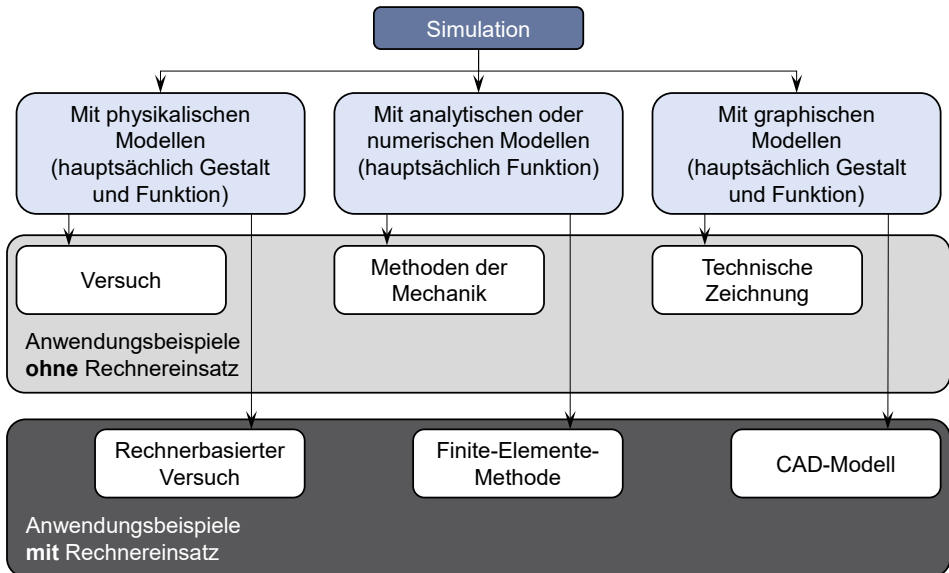


Bild 11: Modellbasierte Systematik der Simulation nach [30]

Wie Bild 11 zu entnehmen, ist eine Simulation als die Abbildung eines Sachverhaltes in einem Modell, mit und/oder ohne Rechnerunterstützung, zu verstehen. Hervorzuheben ist allerdings, dass die rechnerunterstützten Simulationsanwendungen stetig an Bedeutung gewinnen. Der Ursprung der computerunterstützten Simulation kann zweifelsohne in der Mitte des letzten Jahrhunderts ausgemacht werden, als Computer allmählich leistungsstärker und Programme leichter nutzbar wurden. Somit konnten nun Systeme entwickelt werden, welche gar nicht oder nur sehr eingeschränkt unter realen Bedingungen getestet werden konnten (man denke an die Mondlandung im Jahr 1969 [38]). Genau dieser Punkt ist mit einer der großen Vorteile der heutigen Simulationsanwendungen, welche in der Richtlinienreihe der VDI 3633 zusammengetragen sind [35]:

- Es können Systeme getestet werden, welche noch nicht existieren.
- Eine Überprüfung von bestehenden Systemen ist ohne Betriebseingriff möglich.
- Verschiedene Gestaltungsvarianten können mit überschaubarem Aufwand realisiert und verglichen werden.
- Das Langzeitverhalten von Systemen kann im Zeitraffer untersucht werden.
- Wechsel in Betriebszuständen können auf deren Anlaufvorgänge, Einschwingphasen und Übergänge untersucht werden.

Auch wenn eine scharfe Trennung der Simulationsmethodiken, sowohl bezüglich Zustandsänderung, als auch Modellausprägung, nicht zweifelsfrei festgesetzt werden kann, folgen doch alle Simulationen dem gleichen Prinzip beim Vorgehen: Preprocessing, Solving und Postprocessing. Bei einer rechnergestützten Simulation entspricht dies dem EVA-Prinzip (Eingabe, Verarbeitung, Ausgabe).

Das Preprocessing dient der allgemeinen Vorbereitung. Hierbei wird zunächst das Problem analysiert und die Aufgabenstellung geklärt. Eine Festsetzung des zu erreichenden Zieles sowie die Datenaufbereitung und Modellerstellung sind die elementaren Bestandteile des Preprocessings.

Während des Solvings (oder seltener auch Processings) wird die eigentliche Simulation, Analyse, das Berechnen beziehungsweise Lösen der Gleichung(en) durchgeführt. Es erfolgt demnach die Verarbeitung der eingegebenen Daten.

Im Postprocessing findet die Ausgabe und deren Auswertung statt. Es werden dabei die Ergebnisse aufbereitet, visualisiert, analysiert und bewertet.

### 3.3.2 Simulationen mit Geometriemodellen

Im weiteren Verlauf soll hier verstärkt der Fokus auf Simulationen mit Rechneinsatz auf Basis von Geometriemodellen gesetzt werden. Diese dienen zumeist der Vorauslegung von Komponenten, dem Zusammenwirken der einzelnen Elemente oder des Nachweises der Sicherheit und Funktion. Ausgangslage ist hierbei stets das konstruierte Geometriemodell aus einem CAD-System [39].

Eine gewichtige Rolle kommt dabei den numerischen Simulationsverfahren zu. Bei der Anwendung dieser Verfahren für den Simulationszweck werden zumeist partielle Differentialgleichungen approximiert. Dazu wird das kontinuierliche Problem in zeitlicher und räumlicher Auflösung diskretisiert. Es entsteht eine Vielzahl von Differentialgleichungen, welche während des Programmablaufes gelöst werden. Die Anwendungen dieser Lösungsverfahren im Produktentwicklungsprozess sind sehr vielfältig. So lassen sich damit beispielsweise sowohl mechanische, thermische oder strömungsmechanische Eigenschaften einzelner Komponenten ermitteln ebenso aber auch das Zusammenwirken von verschiedenen Systeme miteinander.

Die bekanntesten Anwendungsgebiete heutzutage sind dabei:

- Festigkeits-/Strukturanalysen mittels der Finite-Elemente-Methode (FEM) zur Lösung des Gleichungssystems, sowohl linearer als auch nicht-linearer Probleme. Dies findet auch in vielen anderen Disziplinen Anwendung, beispielsweise bei thermomechanischen Fragestellungen oder Eigenfrequenz-Analysen.
- Strömungssimulationen (CFD, Computational Fluid Dynamics) mit Anwendung der FEM, der Finite-Volumen-Methode (FVM) und der Finite-Differenzen-Methode (FDM) zumeist zur Lösung von Navier-Stokes-, Euler- oder Potentialgleichungen.
- Mehrkörpersimulationen (MKS) zur Bestimmung des dynamischen Verhaltens der Wechselwirkung von einzelnen Körpern und Systemen zueinander.

Aufgrund der enormen Bedeutung dieser drei Verfahren werden im Folgenden die Grundlagen des jeweiligen Vorgehens kurz beschrieben. Alle Verfahren repräsentieren Simulationen mit Geometriemodellen und sind dadurch die Verfahren, welche von den Inhalten dieser Arbeit in Bezug auf die Aufbereitung des Produktmodells profitieren können.

## Finite Elemente Methode

Die FEM beruht auf dem Variationsprinzip des rückföhrbaren L6sens eines Gleichungssystems. Föur den h6ufig angewendeten Fall der linear-elastischen Statik bedeutet das, dass mechanische Strukturen unter Lasteinwirkung zu derjenigen Form6nderung neigen, welche den geringsten energetischen Aufwand bedeutet. Damit l6sst sich ableiten, dass ein eindeutiger Zusammenhang – in Form eines Gleichgewichtes – zwischen Lasten und Deformationen besteht. [40]

Zur Ausföhrung der FEM muss zun6chst eine FE-Struktur erstellt werden. Dies geschieht durch Diskretisierung eines kontinuierlichen Problems zu finiten (sehr kleinen, aber endlichen) Elementen. Da die Qualit6t der Diskretisierung einen gro6en Einfluss auf die Ergebnisse der Simulation hat, ist dies in der Praxis zumeist mit einem hohen Aufwand und Einsatz verbunden, um ein hinreichend feines und gleichm6ssiges Netz aus nahezu unverformten, konformen Elementen zu erhalten [41]. Zur Vernetzung stehen, je nach Problemstellung und Abstraktionsm6glichkeit, verschiedene ein- bis dreidimensionale Elemente mit linearen oder h6herwertigen Ans6tzen zur Verföugung. Bild 12 zeigt die am h6ufigsten eingesetzten Elementtypen, mit denen sich nahezu jeder K6rper diskretisieren l6sst. Weiterentwicklungen sind dabei denkbar und kommen auch in der Praxis zu Einsatz [42].

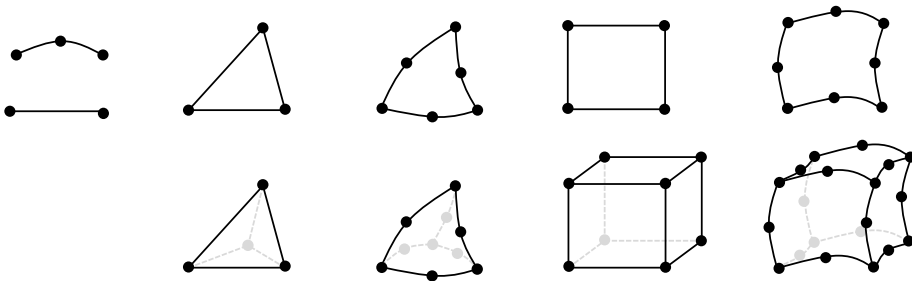


Bild 12: Auswahl verschiedener 1D-, 2D- und 3D-Elementen mit linearen und quadratischen Ans6tzen.

Es folgt die Ermittlung der Elementsteifigkeitsmatrizen föur jedes einzelne Element, welche anschlie6end zu einer Gesamtsteifigkeitsmatrix addiert werden. Zusammen mit den 6u6eren Kr6ften und definierten Verschiebungen kann das Gleichungssystem aufgestellt und mit numerischen Verfahren gel6st werden. Hierbei kommen programmintern Verfahren wie beispielsweise der CHOLESKY-Algorithmus [43] zum Einsatz. Föur sehr gro6e Strukturen (öuber 50.000 Unbekannte) werden iterative Methoden, wie das Konjugierte-Gradienten-Verfahren, verwendet, da diese dann h6ufig

schneller berechnet werden können und weniger Speicherbedarf benötigen [39]. Mittels Rückrechnung kann so schließlich auf die inneren Kräfte und Spannungen in den Bauteilen geschlossen werden.

Bei der Durchführung des Systems müssen jeweils die finiten Grundgleichungen aufgestellt werden. Im häufigen Fall der linearen-elastischen Anwendung wird hier zunächst ein Körper definiert und in Quader-Elemente aufgeteilt. Zur Lösung jedes Kontinuums sind insgesamt 15 Gleichungen erforderlich, um die entsprechenden Unbekannten (drei Verschiebungen  $u^t = [u \ v \ w]$ , sechs Verzerrungen  $\varepsilon^t = [\varepsilon_{xx} \ \varepsilon_{yy} \ \varepsilon_{zz} \ \gamma_{xy} \ \gamma_{yz} \ \gamma_{zx}]$  und sechs Spannungen  $\sigma^t = [\sigma_x \ \sigma_y \ \sigma_z \ \tau_{xy} \ \tau_{yz} \ \tau_{zx}]$ ) zu ermitteln. Die nötigen Grundgleichungen ergeben sich aus folgenden Zusammenhängen:

- Die Gleichgewichtsbedingung als Zusammenhang zwischen inneren Spannungen  $\sigma$  und äußeren Belastungen  $f$  mit der Differenzialoperatorenmatrix  $\underline{D}$ :

$$\underline{D}^t \cdot \vec{\sigma} + \vec{f} = \vec{0} \quad (1)$$

- Die kinematischen Beziehungen zwischen Verzerrungen  $\varepsilon$  und Verschiebungen  $u$  (bei angenommenen kleinen Verschiebungen):

$$\vec{\varepsilon} = \underline{D} \cdot \vec{u} \quad (2)$$

- Das Elastizitätsgesetz als Zusammenhang zwischen Spannungen  $\sigma$  und Verzerrungen  $\varepsilon$  (HOOK'sches Gesetz für isotrope homogene Werkstoffe) mit der Materialeigenschaftsmatrix  $\underline{E} = f(E, \nu)$ :

$$\vec{\sigma} = \underline{E} \cdot \vec{\varepsilon} \quad (3)$$

### Finite Differenzen Methode / Finite Volumen Methode

Neben der FEM kommen in der computergestützten numerischen Strömungssimulation vor allem die Methoden der Finiten Differenzen und Finiten Volumen zum Einsatz. Zur quantitativen Beschreibung des Strömungszustandes müssen die Größen des Geschwindigkeitsvektors, dem Druck, der Dichte und der Temperatur in jedem Element mittels der Erhaltungssätze für Masse, Impuls und Energie betrachtet werden [44]. Neben der räumlichen Diskretisierung, analog zur Strukturmechanik, muss für transiente Strömungsbeschreibungen eine zusätzliche Zeitdiskretisierung vorgenommen werden.

Die genannten Größen ergeben insgesamt sechs Unbekannte: die drei Richtungen der Geschwindigkeit  $c = (u, v, w)$ , den Druck  $p$ , die Temperatur  $T$  und bei kompressiblen Strömungen die Dichte  $\rho$ . Hierfür wird sich der drei Erhaltungssätze (Massenerhaltung, Impulssatz und Energiesatz), sowie der Zustandsgleichung des Fluids (als thermodynamische Verknüpfung von  $p$ ,  $T$  und  $\rho$ ) bedient, welche zu den notwendigen sechs Gleichungen führen.

Über die Massenerhalten, dass die zeitliche Änderung der Masse  $m$  in einem Volumenelement, gleich die Summe der einströmenden Massenströme, abzüglich der Summe der ausströmenden Massenströme, sein muss,

$$\frac{dm}{dt} = \sum_{\text{ein}} \frac{dm}{dt} - \sum_{\text{aus}} \frac{dm}{dt} \quad (4)$$

erhält man die Kontinuitätsgleichung in allgemeiner Form:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \cdot u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho \cdot v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho \cdot w)}{\partial z} = 0 \quad (5)$$

Der Impulssatz besagt, dass die von außen einwirkenden Kräfte  $F_{\text{äußere}}$  in einem Gleichgewicht mit den am Volumenelement ein- und ausströmenden Impulsströmen sein müssen:

$$\rho \cdot A \cdot c^2 = \sum F_{\text{äußere}} \quad (6)$$

Der 1. Hauptsatz der Thermodynamik liefert den Erhaltungssatz für die Energie. Dieser besagt, dass die Innere Energie  $U$  in geschlossenen Systemen konstant ist und sich aus den Komponenten der Wärme  $Q$  und der Arbeit  $W$  zusammensetzt:

$$dU = \delta Q + \delta W = \text{konst.} \quad (7)$$

Die Zustandsgleichung des Fluids komplettiert die allgemeine Beschreibungsform für Strömungen über die spezifische Gaskonstante  $R_s$ :

$$R_s = \frac{p}{\rho \cdot T} \quad (8)$$

Auch in der CFD kommt der Vernetzung des Berechnungsbereiches demnach eine gewichtige Bedeutung zu. Auch hier ist die Vernetzung stark qualitätsbeeinflussend auf das Ergebnis und nimmt demnach häufig auch einen Großteil der Bearbeitungsdauer in Anspruch, übersteigt häufig sogar

die eigentliche Berechnungszeit um ein Vielfaches [45]. Anders aber als in der strukturmechanischen Auslegung, dienen die modellierten Bauteile hier lediglich als Begrenzungselemente, durch welche keine Strömungsprozesse stattfinden können. Zur Analyse muss ein Kontrollraum um diese Teile festgelegt werden, in welchem die Betrachtung erforderlich ist und berechnet werden soll. In der Praxis werden strukturierte und unstrukturierte Netze, auch in Kombination, eingesetzt (Bild 13). Ein strukturiertes Netz ist schneller zu berechnen und wird bei Finiten Differenzen und Finiten Volumen eingesetzt. Bei diesen Netzen sind die innenliegenden Elemente topologisch ähnlich und die Verbindung der inneren Punkte zum lokalen Nachbarn ist dieselbe. Sie bestehen hauptsächlich aus Vierecken (2D) oder Hexaedern (3D). Unstrukturierte Netze bieten hingegen eine enorme Flexibilität bei der Vernetzung, besonders bei komplexen Umströmungsstrukturen und auch in Bezug auf Netzverfeinerungen. Die Nachbarerelemente weisen hier beliebige Strukturen auf. Das Netz wird hauptsächlich mit Dreiecken (2D) oder Tetraedern (3D) aufgebaut. In der Regel kommen diese Netze sowohl bei Finiten Volumen zum Einsatz als auch bei FE-Analysen.

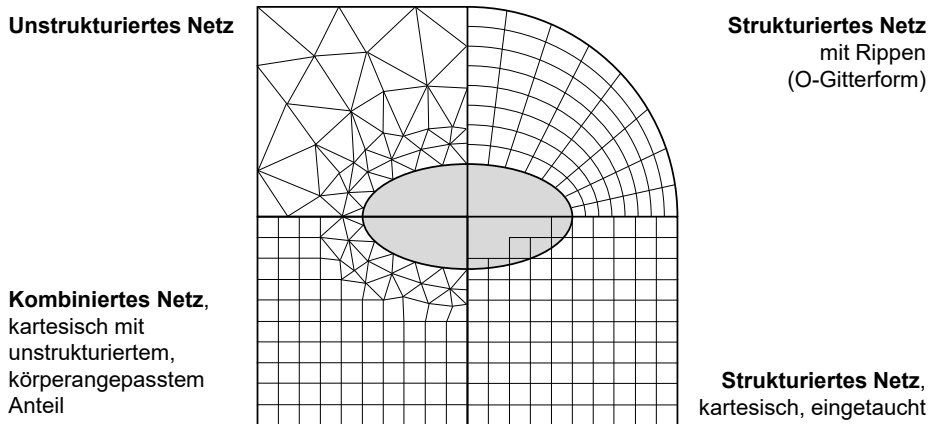


Bild 13: Auswahl verschiedener angewandter Vernetzungsstrategien des Kontrollraums in CFD-Anwendungen.

Bei der Methode der Finiten Differenzen erfolgt die Berechnung durch den Ersatz der Differenziale durch Differenzen. Die erste und zweite Ableitung wird mittels Taylor-Reihenentwicklung ermittelt. Wie bereits erwähnt, ist diese Methode besonders bei strukturierten Netzen angewandt und effektiv. Zur Lösung der erzeugten Strömungsgleichungen sind, wie bei jeder Simulation, zudem Randbedingungen erforderlich. Hierbei müssen an den Rändern des Kontrollraumes entweder direkt die Werte der gesuchten

Größe (DIRICHLET'sche Randbedingungen) oder aber deren Ableitungen (VON NEUMANN'sche Randbedingungen) vorgegeben werden.

Mit der Finiten Volumen Methode werden, anders als bei der FDM, nicht die Berechnungsknoten des Netzes, sondern die Begrenzungsflächen der diskretisierten Kontrollvolumina betrachtet. Eine numerische Quadratur nähert dabei die Oberflächen- und Volumenintegrale an, wodurch man wiederum ein lineares Gleichungssystem zur Lösung des Strömungsproblems erhält. Dieses Verfahren kann entsprechend auf jede Form der Vernetzung angewendet werden, wird also vor allem bei unstrukturierten Netzen herangezogen.

Welches Verfahren nun für eine vorliegende Strömungsanalyse verwendet wird, hängt neben der zur Verfügung stehenden Software von der Art der Aufgabe ab. Es ist dabei jeweils die erforderliche Genauigkeit und die notwendige Flexibilität entscheidend. In folgender Tabelle 3 sind diese Eigenschaften der Verfahren gegenüber gestellt.

Tabelle 3: Klassifikation der numerischen Lösungsansätze für Strömungssimulationen bezüglich Genauigkeit und Flexibilität nach [46].

Methoden	Genauigkeit	Flexibilität
FEM	Genauigkeitsverlust durch ungleichmäßige Netze	Sehr flexibel, unstrukturierte Netze möglich,
FDM	Durch Annäherung mit Differenzen bei Bedarf mit sehr hoher Genauigkeit möglich	Relativ unflexibel, da komplizierte Transformation in den Rechenraum erforderlich, nur strukturierte Netze, hohe Anforderung an Netzqualität
FVM	Genauigkeitsverlust durch numerische Verfahren	Flexibel, da im physikalischen Raum formuliert

### **Mehrkörpersimulation**

Die Mehrkörpersimulation (MKS) beschäftigt sich mit der Fragestellung des dynamischen Verhaltens von Systemen. Hierzu werden starre massenbehaftete Körper mittels Koppellementen, welche Momente und Kräfte zwischen den Einzelkörpern übertragen können, verbunden. Somit ergibt sich ein vereinfachtes System, bei welchem jeder Körper letztendlich nur noch sechs Freiheitsgrade (drei translatorische und drei rotatorische) besitzt. Unter anderem nach [47] werden die Koppellemente in Verbindungsstücke (beispielsweise starre Gelenke, Führungen oder Lagerungen) und Kraftkomponenten (beispielsweise masselose Federn und Dämpfer

oder weitere Regeleinrichtungen) gegliedert. Darüber hinaus werden Lagerbedingungen, wie feste Einspannungen oder Gelenklagerungen zur Beschreibung des Systems definiert. Bild 14 stellt eine beispielhafte Aufstellung eines MKS-Systems mit einer Auswahl verschiedener Koppellemente dar.

Zur Beschreibung der Bewegung müssen die Bewegungsgleichungen aufgestellt werden. Zu den bekanntesten Vertreter hierfür gehören unter anderem das Newton-Euler-Verfahren und die Lagrange-Methode [48]. Das Verfahren nach Newton-Euler funktioniert nach dem Prinzip des Freischneidens und der Betrachtung der entsprechenden Schnittgrößen von Kräften und Momenten. Das Differentialgleichungssystem wird hierbei mittels Impuls- und Drallsatz aufgestellt. Bei der Lagrange-Methode werden die Bewegungsgleichungen aus Energie und Arbeitsbilanzen hergeleitet.

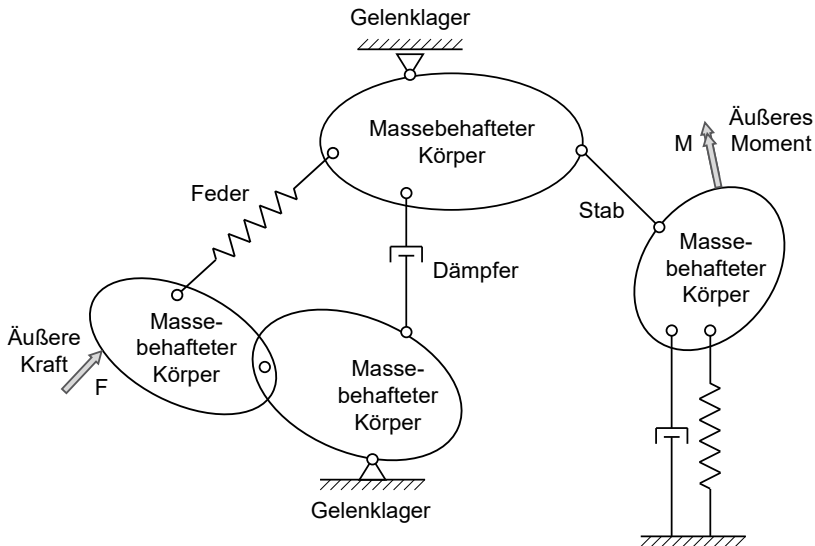


Bild 14: Modellbildung eines Mehrkörpersystems.

### Kopplung der Simulationsdisziplinen

Neben den Analysen in den entsprechenden Einzeldisziplinen gibt es selbstredend auch Anwendungsfälle, bei denen multiphysikalische Simulationen angestrebt werden. Hierin wird versucht, die Probleme aus verschiedenen Teilgebieten mit gemeinsamen Modellen simultan zu lösen.

Unabhängig davon, welche Systeme gekoppelt werden sollen, bringt die Kopplung dennoch häufig einige Probleme mit sich [31]:

- Die erforderliche Diskretisierung in Ort und Zeit kann sich je nach physikalischem Gebiet für die einzelnen Disziplinen stark unterscheiden.
- Der zu berücksichtigende, benötigte Detailgrad der Modelle weicht in spezifischen Simulation ab, sodass bei der Kombination unterschiedliche Modelldetails aus den einzelnen Teilgebieten zusammen verwendet werden müssen.
- Es existieren sehr unterschiedliche Simulationswerkzeuge für die einzelnen Disziplinen, welche softwareseitig kaum kombiniert werden können.

Die genannten Aspekte zeigen auf, dass hier noch ein enormes Entwicklungspotential liegt. Als Schlüsselkriterien zur Beherrschung solcher komplexen Systeme nennen VAJNA et al. eine „[...]systematische Modularisierung, Modellreduktion und die Entwicklung konsistenter, durchgängiger (Modell-)Beschreibungen, die in allen Disziplinen verwendet werden können[...]“ [31].

### **3.4 Digitalisierung physischer Objekte – Verfahren zur 3D-Datenerfassung**

Um physische Objekte wieder in virtuelle Umgebungen zurück zu führen, können diverse Verfahren zur dreidimensionalen Datenerfassung zum Einsatz kommen. Allgemein wird für die Erfassung der Begriff Scannen synonym verwendet. Hierbei sind in den letzten Jahrzehnten bezüglich Datenmenge und -qualität enorme Fortschritte erzielt worden. Da es von elementarer Bedeutung für die weiteren Arbeiten mit den Geometriedaten ist, dass die Daten auch korrekt aufgenommen werden, soll in diesem Kapitel eine Übersicht heutzutage gängiger Erfassungsmethoden gegeben werden. Es werden dabei zunächst die Unsicherheitsfaktoren und Anforderungen von Messverfahren dargelegt. Anschließend folgt eine Übersicht der verschiedenen Messmethoden einer dreidimensionalen Datenerfassung mit den jeweiligen physikalischen Grundprinzipien und in welchen kommerziellen Geräten diese zum Einsatz kommen.

#### **3.4.1 Unsicherheitsfaktoren und Anforderungen**

Unabhängig davon, mit welchem Endgerät die Datenerfassung stattfinden soll, gibt es einige Faktoren, welche einen negativen Einfluss auf die Messung haben können. Hierbei sind nach KEFERSTEIN et al. [49] die fünf „M“ zu nennen:

- Mensch
- Messobjekt
- Messsystem
- Messstrategie
- Milieu

Das Ishikawa-Ursache-Wirkung-Diagramm in Bild 15 zeigt einen Überblick der Einflussfaktoren und Teile deren Ausprägungen, welche für Messunsicherheiten verantwortlich sein können.

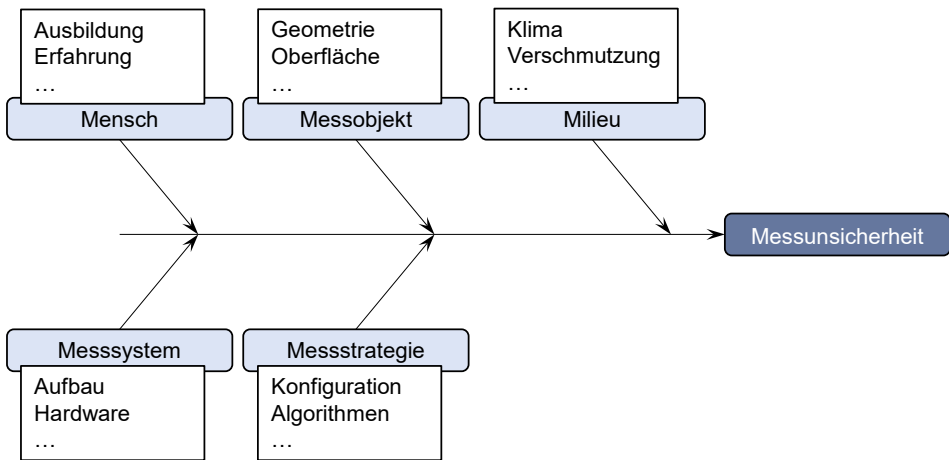


Bild 15: Ursachen für Messunsicherheit nach [49].

Das Milieu fasst die Umwelteinflüsse zusammen. Hier kommen äußere Einflüsse aus klimatischen Bedingungen, wie Temperatur und Luftfeuchtigkeit, sowie direkte Einflüsse, wie beispielsweise der Verschmutzungsgrad des Objektes oder Staubeentwicklung, zusammen. Als mechanische Einflüsse können beispielsweise Schwingungen, ausgehend von der Umgebung oder vom Messgerät selbst, genannt werden. Nicht unerheblich sind zudem die Lichtbedingungen, besonders bei optischen Messeinrichtungen.

Die Beschaffenheit des Messobjekts hat ebenfalls einen großen Einfluss auf die Messgenauigkeit, beziehungsweise die Unsicherheit in der Messung. Neben der Geometrie selbst, welche häufig bei kontinuierlichen und hinterschnittsfreien Flächen besser abgebildet werden kann, als bei Objekten mit derartigen Ausprägungen, ist die Oberflächenbeschaffenheit mit entscheidend für gute Messergebnisse. So können spiegelnde oder sehr dunkle und absorbierende Farben bei optischen Messgeräten zu Problemen und einem verrauschten Ergebnis führen. Die Oberflächenrauheit spielt hier

ebenfalls eine Rolle. Diese kann auch bei taktiler Messung einen Messfehler erzeugen. Des Weiteren stoßen taktile Geräte besonders bei nachgiebigen Oberflächen an Grenzen.

Der Einfluss durch das Messsystem wird besonders durch die verwendete Hardware hervorgerufen und beeinflusst. Für Neuanschaffungen muss man sich demnach im Vorherein im Klaren sein, welche Aufgabe man mit dem System bearbeiten muss, um den Fehler im Nachgang minimal zu halten. Beim Aufbau und der Ausrichtung der Messmittel können zudem Fehler vermieden werden.

Auf die Messstrategie hat man als Nutzer zumeist den geringsten Einfluss. Hier kommt es vornehmlich auf die internen Algorithmen der Software an. Diese können gegebenenfalls unerwünscht Daten filtern und so eine vollständige Erfassung erschweren. Auf eine gewissenhafte Kalibrierung und Kompensation ist allerdings zu achten.

Der Faktor Mensch spielt eine entscheidende Rolle. Sehr häufig ist das Ergebnis des Digitalisierungsprozesses von der Ausbildung des Bedieners abhängig. Mit steigender Erfahrung sind meist verbesserte Ergebnisse zu erwarten, da dann auch Unzulänglichkeiten der anderen Faktoren in gewissem Maße abgeschwächt oder ausgeglichen werden können.

### **3.4.2 Methoden zur Datenerfassung**

Zur Erfassung der geometrischen Form gibt es unterschiedliche Verfahren. Die Klassifizierung kann dabei auf verschiedene Arten getroffen werden. Eine geläufige Darstellung ist die, welche auch in der VDI 5620 vorgestellt ist. Hierbei wird vornehmlich in die beiden Kategorien taktil und berührungslos eingegliedert [50]. Weitere Möglichkeiten zur Einteilung wären beispielsweise nach der Art der Erfassung (nur die Oberfläche und durchdringende Methoden) oder ob das Verfahren für das Objekt zerstörungsfrei oder zerstörend [51] abläuft. Eine ganzheitlichere Übersicht über gängige Verfahren zur Geometrierfassung liefert GOCKEL in [52]. Hier erfolgt eine Einteilung nach dem physikalischen Grundprinzip. Diese Einteilung ist in Bild 16 beibehalten, erweiternd fließt die Gliederung in eine Oberflächenerfassung und eine durchdringende Geometrierfassung mit ein. Die relevantesten Methoden der Darstellung sind anschließend ausführlich erläutert.

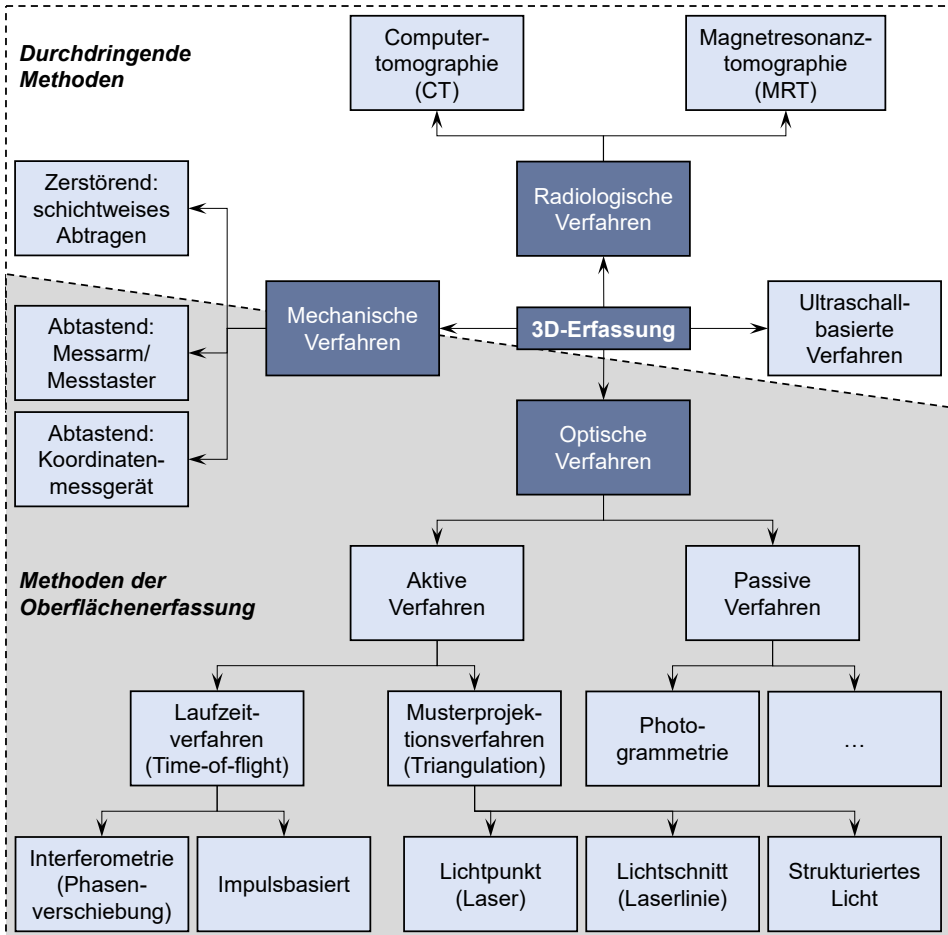


Bild 16: Einteilung der Methoden zur Geometriedatenerfassung.

### Mechanische Verfahren

Die mechanischen Verfahren beinhalten das Prinzip der taktilen Messung. Hierbei wird mit einer mechanischen Tastspitze die Oberfläche des Objektes angetastet. Der häufigste Anwendungsfall der taktilen Messung kommt in Koordinatenmessgeräten (KMG) vor. Diese kommen nach DIN EN ISO 10360-1 „Geometrische Produktspezifikationen für Koordinatenmessgeräte (KMG), Teil 1 Begriffe“ in den folgenden Bauweisen vor [53]:

- Ausliegerbauweise
- Brückenbauweise
- Ständerbauweise
- Portalbauweise

Diese unterscheiden sich hauptsächlich in der Ausprägung und Abnahme der Maßverkörperungen in den einzelnen Achsen. In Bild 17 sind die genannten Vertreter schematisch dargestellt.

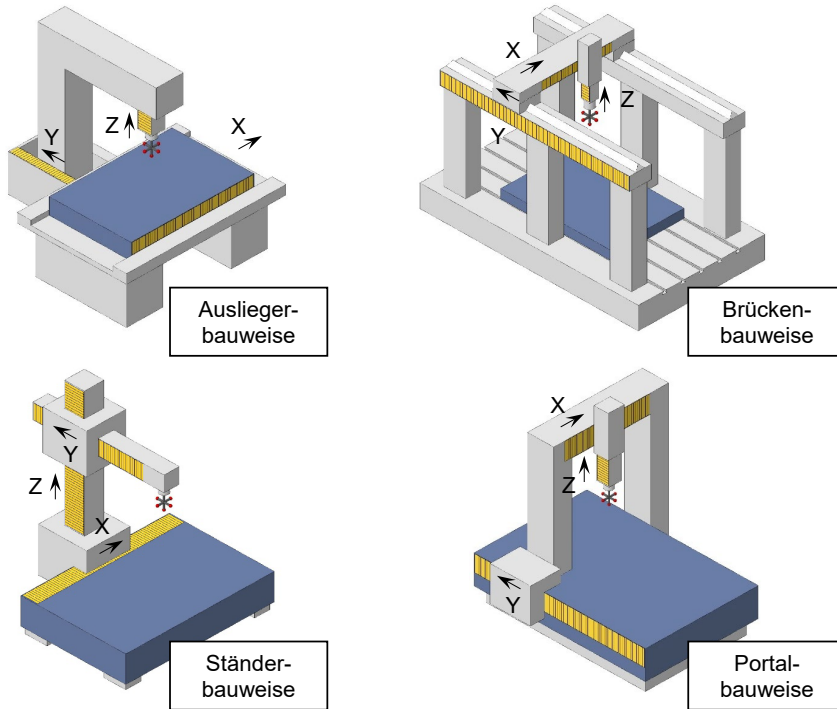


Bild 17: Bauweisen von KMG.

KMG liefern sehr präzise Ergebnisse. Je nach Bauweise werden Antast- und Wiederholgenauigkeiten von  $50\ \mu\text{m}$  bei Ausliegerbauweise, etwa  $10\ \mu\text{m}$  bei Brücken- und Ständerbauweise und bis  $< 1\ \mu\text{m}$  bei Portalbauweise erreicht [49]. Neben dem (vornehmlich für einen klimatisierten Messraum konzipierten) KMG, gibt es noch seriell abtastende Messarme. Hierbei ist ein Taster auf einen Gelenkarm mit sieben Freiheitsgraden montiert. Diese sind besonders für mobile Anwendungen gedacht. Zur Temperaturkompensation außerhalb des Messraums sind diese darum mit Temperatursensoren in den Armstücken ausgestattet.

Bei der Art der Erfassung durch den Taster unterscheiden sich zwei Prinzipien: schaltende und messende Taster (Bild 18). Schaltende Taster arbeiten nach dem Dreibeinprinzip, wobei beim Anfahren an das Messobjekt durch Auslenkung der Tastspitze mindestens einer der drei Schalter geöffnet wird und auslöst. Aufgrund der einzelnen Punktantastung sind hiermit lediglich einfache Regelgeometrien ohne besondere Formabweichungen erfassbar.

Aus diesem Prinzip folgt auch eine langsame Abtastrate. Allerdings sind diese Taster relativ günstig und bieten eine hohe Tastgenauigkeit [54]. Messende Taster verfügen durch federnd gelagerte Taststifte über induktive Wegmesssysteme in alle drei Koordinatenrichtungen. Durch Addition der Auslenkungen und den Werten des Längenmesssystems ist mit diesen Tastern ein Scanning-Modus möglich [55]. Dabei kann eine Bahn auf einem Objekt durch kontinuierliches Abtasten erfasst werden.

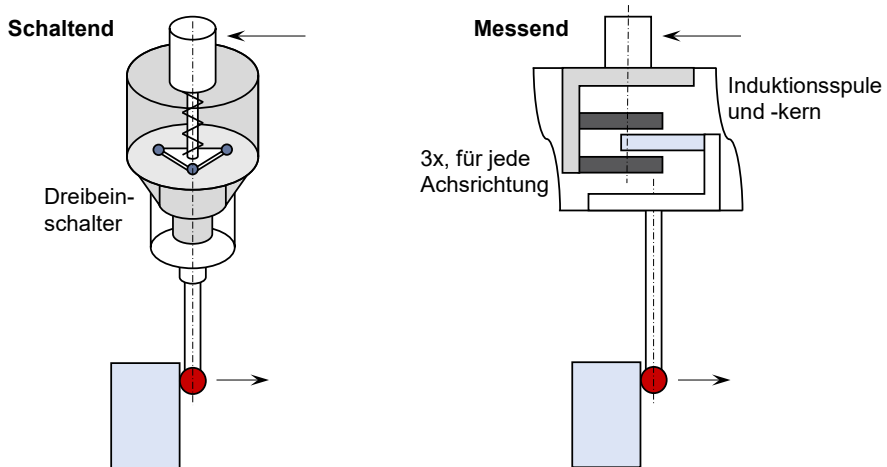


Bild 18: Schaltende und messende Tastkopfsysteme.

Alternativ zu KMG haben sich in den letzten Jahren vermehrt serielle Messtaster etabliert. Im Verhältnis zu einer stationären KMG lassen sich hiermit auch mobile Messaufgaben bewerkstelligen, welche auch außerhalb eines Messraumes in werkstattnahen Gebieten zum Einsatz kommen. Die Position wird analog durch die Berührung eines Messtasters mit dem Objekt festgelegt. Da die starren Achsen des KMG entfallen, wird die Positionsmessung über Tracking-Methoden erfüllt. Hierfür kommen aktuell zwei Varianten zum Einsatz: mechanisches Tracking in Ausführung eines Gelenkarmes mit Winkel- und Rotationssensoren oder optisches Tracking mit einem Kamerasystem und auf dem Tastkopf angebrachte Referenzmarkern. Diese sind Trackingmethoden sind schematisch und mit einem kommerziellen Beispiel in folgendem Bild 19 dargestellt.

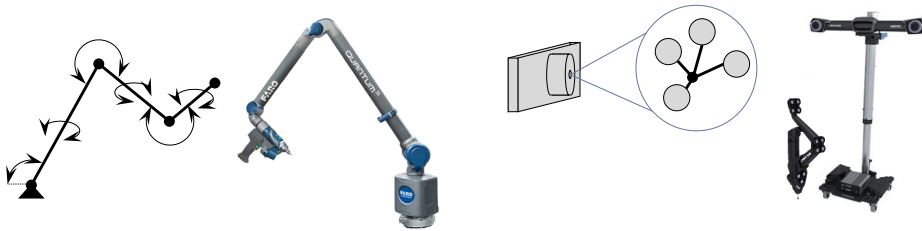


Bild 19: Prinzipien und Beispiele für Tracking bei Messwerkzeuge; mechanischer Gelenkarm [56] (links), optisch mit Kamera und Zielmarkern [57] (rechts).

### Optische Verfahren

Neben den oben genannten taktilen Verfahren sind besonders die optischen Verfahren von großer Bedeutung. Diese teilen sich in aktive und passive Methoden auf. Der Unterschied besteht in der Strahlungsquelle – aktive Systeme besitzen eine eigene Quelle, von der aus die Beleuchtung/Bestrahlung ausgeht, passive Systeme nutzen die natürliche Strahlung und deren Effekte zur Erfassung.

Der wohl bekannteste Begriff der passiven Verfahren ist die Photogrammetrie. Dieser „[...]umfasst die Gesamtheit der Verfahren und Geräte zur Gewinnung, Verarbeitung und Speicherung von primär geometrischen Informationen (Form, Größe, Lage[...]) über Objekte und Prozesse aus Bildern (Meßbilder [sic]).“ [58] Dabei werden Lichtbilder von einer Kamera oder mithilfe eines Flugobjektes von oben ausgewertet. Entscheidend sind stets die natürlichen Lichtverhältnisse, ob und wie gut das gewünschte Objekt aufgenommen werden kann. Zudem ist es elementar, dass auf den Aufnahmen entsprechende Maßstäbe mit erfasst werden, um Größen auch absolut bestimmen zu können.

Für Einzelbilder kann das Verfahren „Shape from Shading“ (SFS) angewandt werden. Hierbei werden aus der Oberflächenschattierung Informationen über die dreidimensionale Gestalt eines Körpers gewonnen. SFS ist im technischen Bereich vor allem in der Qualitätssicherung im Einsatz. Hiermit lassen sich Oberflächeninspektionen, beispielsweise zur Rissdetektion, durchführen [59].

Um ein Objekt in seiner Gesamtheit mittels passiver optischer Verfahren zu erfassen, können mehrere Aufnahmen von einem Objekt aus verschiedenen Ansichten verwendet werden. Dann kommt der Prozess „Structure from Motion“ (SfM) zum Einsatz. Dieser ermittelt auf Grundlage des Bundler-Verfahrens [60] korrespondierende Merkmale der einzelnen Aufnahmen und kann dadurch die räumliche Struktur rekonstruieren.

Neben kommerziellen Programmen zur digitalen Modellrekonstruktion mittels SFM, wie beispielsweise Autodesk® ReCap™ [61], gibt es auch kostenfreie Angebote (zum Beispiel Meshroom von AliceVision [62] oder ARC3D der KU Leuven als Cloud-basierte Lösung [63]), womit hochgeladene Digitalbilder in 3D-Objekte umgewandelt werden können. Des Weiteren stellt WU die Open-Source-Software VisualSFM als Desktoplösung frei zur Verfügung [64].

Bekannt und angewandt sind diese Methoden vornehmlich zur Erzeugung von dreidimensionalen Graphikobjekten, in der Fernerkundung und bei Geoinformationssystemen [65; 66]. Die maschinenbauliche Anwendung der Photogrammetrie zum Zweck der Digitalisierung beschränkt sich allerdings im Wesentlichen auf unterstützende Maßnahmen unter Verwendungen weiterer Digitalisierungsstrategien. So werden in [67] zunächst Zielmarken [68] photogrammetrisch erfasst, um später die einzelnen, mit aktiven Verfahren erfassten Bereiche, zu einem Gesamtkonstrukt zusammen fügen zu können.

Die aktiven optischen Verfahren bilden die größte und wichtigste Gruppe zur flächenhaften Erfassung von Objekten. Dabei gibt es zwei grundsätzliche Konzepte, wie eine Messung vorstattengeht. Hieraus ergeben sich auch jeweils die Anwendungsgebiete:

- Laufzeitverfahren, welche sehr hohe Messgeschwindigkeiten aufweisen und häufig für Messungen von größeren Entfernungen verwendet werden (bis einige hundert Meter).
- Verfahren basierend auf Musterprojektion finden zumeist im Nahbereich ihre Anwendung.

Laufzeitverfahren (Time-of-Flight-Verfahren) funktionieren nach dem Prinzip der Zeitmessung. Ein Licht-/Laserstrahl wird ausgesendet, das Messobjekt reflektiert diesen Punkt, welcher wieder vom Messsystem erkannt wird. Durch die Messung der Zeitdauer vom Senden des Strahls bis zum Empfangen der Reflektion wird mit der Lichtgeschwindigkeit  $c$  von rund  $299,8 \times 10^6$  m/s der Abstand ermittelt. Diese Art der Erfassung ist, betrachtet auf Einzelpunkte pro Zeiteinheit, die schnellste Methode der Datenerfassung [69]. Die Messung selber kann auf folgende Arten erfolgen: Entweder es wird ein einzelner Lichtimpuls gesendet und die Dauer  $\Delta t$  bis zum Wiedereintreffen bestimmt, oder es wird ein kontinuierlicher Strahl emittiert und die Phasenverschiebung  $\Delta\Phi$  zwischen Sender- und Empfängerstrahl gemessen. Diese beiden Prinzipien sind in folgendem Bild 20 nochmals dargestellt.

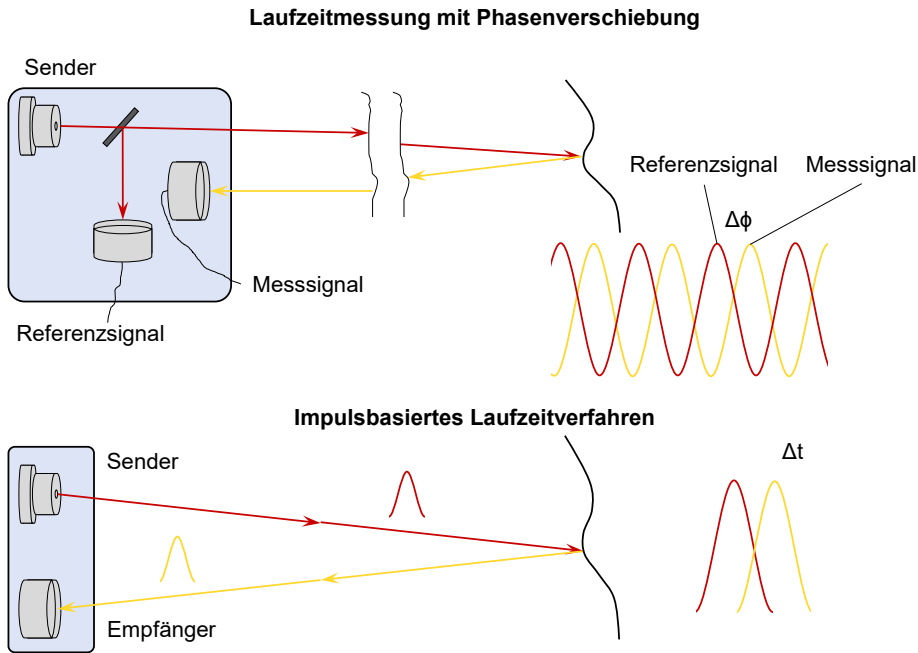


Bild 20: Prinzipien der optischen Laufzeitverfahren, Messung der Phasenverschiebung (oben) und impulsbasiert (unten) [70].

Die Verfahren, welche unter Musterprojektion zu verstehen sind, funktionieren allesamt nach dem Grundprinzip der optischen Triangulation. Hierbei wird ein System aus einem Lichtsender und einem Empfänger (Detektorfläche) verwendet. Diese beiden Elemente sind in einem definierten Abstand zueinander angeordnet. Abhängig davon, wo die Lichtreflektion des ausgesendeten Lichtpunktes auf der Detektorfläche auftrifft, kann ein Einfallswinkel abgeleitet werden und mittels trigonometrischer Funktionen auf die Entfernung geschlossen werden. Um eine maximale Schärfe der Objektebene zu erreichen, müssen Linse und Detektor in dem Gerät dabei so in bestimmten Winkeln ausgerichtet sein, dass sich Bildebene, Objektivenebene und Schärfenebene in einer Linie schneiden (SCHEIMPFLUG'sche Regel). Bild 21 zeigt das Schema des Triangulationsprinzips und den entsprechenden Messbereich, der jedem Gerät aufgrund der individuellen Bauweise inhärent ist.

Dieses Grundprinzip wird in den verfügbaren Verfahren auf zweierlei Weisen umgesetzt:

- Lichtschnittverfahren für Laserlinien-Scanner
- Streifenprojektionsverfahren für flächenhafte Belichtung

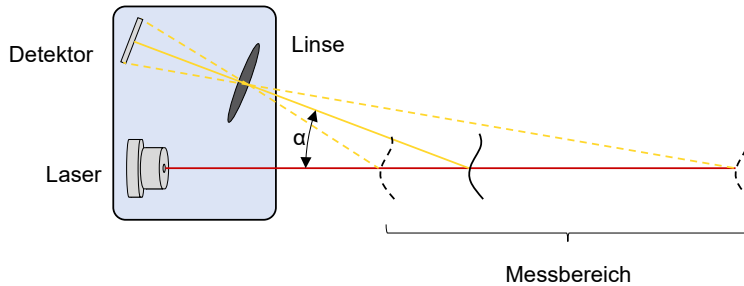


Bild 21: Optisches Triangulationsprinzip [70].

Laserlinien-Scanner nutzen das Lichtschnittverfahren. Dieses ist quasi identisch zum Triangulationsprinzip. Die Möglichkeit zur flächigen Erfassung von Objekten wird dabei durch die Erweiterung des Lichtpunktes zu einer Linie ermöglicht. Dies geschieht in kommerziellen Geräten entweder durch eine entsprechende Linse oder eine oszillierende Bewegung eines Einzelpunktes. Dabei wird auf der Linie eine Vielzahl von diskreten Einzelpunkten auf einer CCD-Matrix-Kamera erfasst. Durch die dort diskrete deformierte Linie wird an dieser Position die Kontur ermittelt. Ermöglicht man eine relative Bewegung zwischen Scannersystem und zu messendem Objekt, werden in kurzen Zeitabständen Linien erzeugt und erfasst, wodurch ein kontinuierlicher Flächenteppich von Einzelpunkten entsteht, welche die Oberfläche repräsentieren. Die Genauigkeiten von Laserlinien-Scannern liegen dabei allgemein im Bereich um die  $30\ \mu\text{m}$  [59]. Das Tracking der Systeme erfolgt nach dem gleichen Prinzip wie bei den seriellen Messtastern (siehe Bild 19) über Kameras mit Referenzmarken oder durch Gelenkarme. Sehr häufig ist die Kombination eines mobilen taktilen Tastkopfes oder auch einer KMG mit aufgesetzter optischer Laser-Scan-Einheit umgesetzt.

Neben den Laserlinien-Scannern, mit dem Lichtschnittverfahren als Umsetzung der Triangulation, haben sich Geräte nach dem Streifenprojektionsverfahren stark am Markt etabliert. Diese Systeme erfassen nicht nur eine Linie, sondern beleuchten mittels eines Projektors einen ganzen Objektbereich und erfassen dabei mit einer CCD-Kamera eine Vielzahl von deformierten Linien gleichzeitig. Bild 22 (links oben) zeigt die dabei auftretende Problematik, dass, je nach Form und Lage des Scanobjektes, die einzelnen Linien und Linienübergänge nicht mehr fehlerfrei zugeordnet werden können. Aus diesem Grund muss eine Codierung der Belichtung integriert werden. Die gängigste Methode ist eine zeitliche Codierung mit dem GRAY-Code [71]. Bei diesem binären Code unterscheiden sich die benachbarten Grayzahlen in nur einem einzigen Bit (Bild 22). Somit ist eine

Zuordnung der Einzelpunkte auf der Kamera gegeben. Alternativ sind neben der zeitlichen Codierung weitere Ansätze möglich:

- Phasencodierung
- Frequenzcodierung
- Örtliche Codierung

Diese sind teils ebenfalls in Bild 22 dargestellt. In kommerziellen Geräten findet sich aktuell hauptsächlich die zeitliche Codierabfolge nach dem Gray-Code wieder.

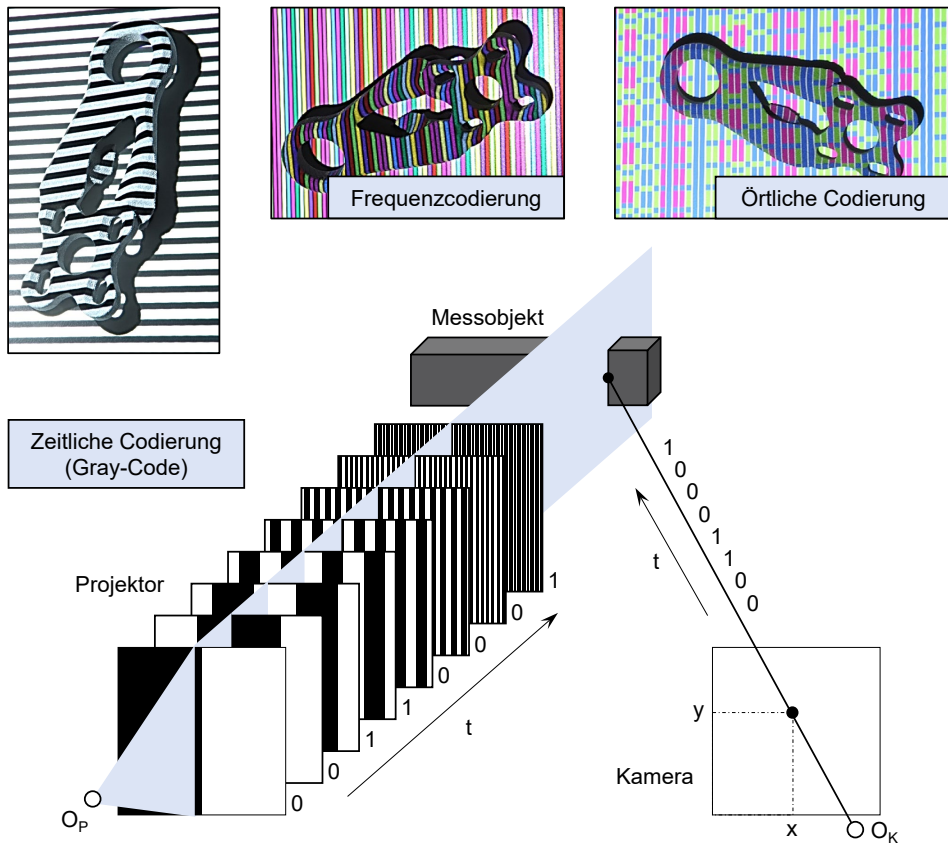


Bild 22: Zuordnungsproblematik der Linien(-übergänge) beim Streifenprojektionsverfahren und verschiedene Codierungsansätze.

Die erzielten Genauigkeiten mit solchen Systemen sind dabei hauptsächlich von der Größe des Messbereichs und der entsprechenden Wahl des Objektivs abhängig. Somit kann eine Genauigkeit von bis zu  $3 \mu\text{m}$  erreicht werden. [59]

Zur Erhöhung der Genauigkeit werden im industriellen Umfeld häufig auch zwei Kameras eingesetzt. Bei diesem Aufbau wird dann das Triangulationsdreieck zwischen diesen beiden Kameras aufgespannt. Somit kann beispielsweise eine thermische Ausdehnung, welche durch die Wärmeabgabe des Projektors oder durch einen Wechsel der Außentemperatur erzeugt wird, ausgeglichen werden. Nachteilig sind hier allerdings die hohen Kosten durch den komplexeren Aufbau und die Synchronisation des Systems zu nennen.

### Radiologische Verfahren

Sind Bauteilflächen durch Hinterschnitte oder andere Hindernisse überdeckt, oder ist auch die innere Struktur von Interesse, können die genannten Verfahren zu Oberflächenerfassung nicht ausreichend für eine vollständige Digitalisierung sein. In diesen Fällen muss auf eine materialdurchdringende Messmethode gesetzt werden. Bei dem Ziel der zerstörungsfreien Prüfung steht zur Geometrierfassung dafür das radiologische Verfahren der industriellen Computertomographie (CT) zur Verfügung.

Bei diesem Verfahren werden ausgehend von einer Strahlungsquelle mehrere Röntgenprojektionen eines Bauteils unter unterschiedlichen Projektionswinkeln erfasst. Aus den gesammelten Bildern kann anschließend das Volumen rekonstruiert werden. Dieses Prinzip ist in nachfolgendem Bild 23 dargestellt.

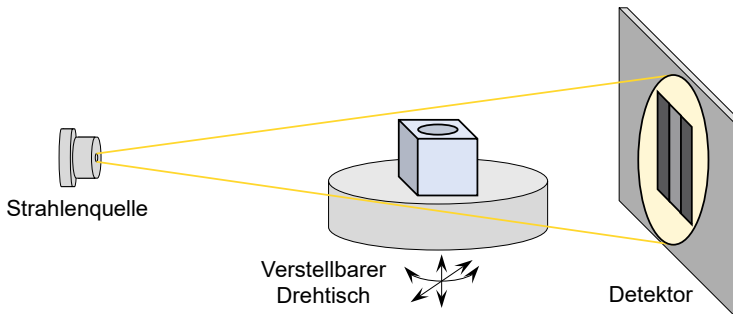


Bild 23: Funktionsprinzip einer Industrie-CT-Anlage.

An dieser Stelle soll nicht weiter auf radiologische Verfahren eingegangen werden. In der Reihe der DIN EN 16016: „Zerstörungsfreie Prüfung – Durchstrahlverfahren – Computertomographie“ [72] sowie der VDI/VDE 2630: „Computertomographie in der dimensionellen Messtechnik“ [73] finden sich weiterführende Hinweise und Besonderheiten von Grundlagen, Anwendung oder Einflussgrößen bei Anlagen zur Computertomographie.

## Geräte und Geräteauswahl

Auf dem Markt der Messgeräte hat sich eine Vielzahl von Geräten unterschiedlichster Hersteller etabliert. Diese bieten neben dem industriellen Umfeld auch teils Produktlösungen für den Privatkunden. Je nach Anwendungsfall finden diese Geräte aus dem Niedrigpreissegment aber auch in Firmenumgebungen ihren Einsatz. Die folgende Tabelle 4 gibt einen Überblick über eine Auswahl zum Zeitpunkt dieser Arbeit verfügbaren Geräte zur dreidimensionalen Datenerfassung, geordnet nach dem jeweiligen Messverfahren [74–88].

Tabelle 4: Auswahl kommerzieller Geräte zur 3D-Datenerfassung.

Physikalisches Prinzip	Messprinzip	Hersteller	Produktauswahl
Mechanische Geräte	Koordinatenmessgeräte	Zeiss Industrielle Messtechnik	Contura, Accura, Micura, Prismo, Xenos, Carmet, MMZ
		Mitutoyo	Crysta-Plus, Crysta-Apex, Legex, Falcio-Apex
		Nikon Metrology	ALTERA, LV V-GP, LK H
		Hexagon	DEA, Leitz PMM, GLOBAL Advantage, Leitz Reference, TIGO SF, Croma
		Wenzel	LH, XORBIT, SF 87, LHF, RS, RA, Raplus, Rax
	Serielle Messtaster	Faro	FaroArm Quantum
		Hexagon	ROMER Absolute Arm
		Kreon3d	Ace, Baces
		Nikon Metrology	MCAx Gelenkmessarm
		Creaform3d	HandyPROBE Next
Optische Geräte	Laufzeitverfahren (Time-of-Flight)	Faro	Laser Tracker Vantage, Focus3D
		Hexagon	Leica Laserscanner RTC, Leica Absolute Tracker AT, Leica B-Probe, T-Probe
		Kreon3d	AirTrack
		Nikon Metrology	K-CMM Tracker

Tabelle 4: Auswahl kommerzieller Geräte zur 3D-Datenerfassung. (Fortsetzung)

Physikalisches Prinzip	Messprinzip	Hersteller	Produktauswahl
Optische Geräte	Laufzeitverfahren (Time-of-Flight)	Creaform3d	C-Track
		Zeiss Optotechnik Zoller+Fröhlich	T-Track Imager
	Lichtschnittverfahren	Faro	ScanArm Prizm & FaroBlu Laser Line Probe
		Hexagon	RS5, Leica Absulte Scanner LAS, Leica T-Scan 5
		Kreon3d	Skyline, Zephyr II
		Creaform3d	Go!SCAN 3D, HandySCAN 3D, MetraSCAN 3D
		Nikon Metrology Zeiss Optotechnik	ModelMaker, K-Scan T-Scan
	Streifenprojektionsverfahren	GOM	ATOS
		Faro	Cobalt Array Imager
		Hexagon	AICON StereoScan neo AICON Smart/PrimeScan
		Zeiss Optotechnik	COMET
		HP 3D Scan	SLS Pro S3
Durchdringende Geräte	Computertomographie	Diondo	Diondo D
		GOM	GOM CT
		Nikon Metrology	MCT225, XT H
		ProCon X-Ray	CT
		Wenzel	Exact
		Zeiss Industrielle Messtechnik	Metrotom, VoluMax, Bossello SRE MAX, Xradia
		Werth	TomoScope, TomoCheck
		YXLON	Cheetah, Cougar, MU60 AE, MU80 AE, MU2000-D

Wie dargelegt, existiert eine Vielzahl von verschiedenen Messsystemen. Eine Hinterfragung und grundsätzliche Festlegung der spezifischen Aufgabe ist stets notwendig, um das passende System für die gestellten Anforderungen zu finden. Hierfür muss man unter anderem folgende technische Fragen beantworten [89]:

- Wie ist die Art der Erfassung? Soll rein die Oberfläche des Objektes oder sollen auch innere Geometrien (beziehungsweise komplexe Hinterschnitte) aufgenommen werden?
- Wie ist die Oberflächenbeschaffenheit?
- Ist das Objekt steif oder nachgiebig?
- Welche Geschwindigkeit muss beim Messvorgang erreicht werden?
- Welche Messunsicherheit/welcher Messfehler kann zugelassen werden?

Des Weiteren gibt es auch ökologisch/ökonomische Fragen zu klären:

- Wie groß ist der finanzielle Rahmen?
- Steht geschultes Personal zur Verfügung?
- An welchem Ort soll gemessen werden? In einem Messraum? In der Werkstatt? Im Produktionsprozess?
- Welche Sicherheitsfaktoren (beispielsweise beim Umgang mit Laser) sind zu beachten?

All diese Fragen haben einen großen Einfluss auf die spätere Messung und müssen demnach zuvor definiert sein, um letztendlich ein passendes Gerät mit inhärentem Prinzip zu nutzen.

Unabhängig des physikalischen Prinzips und des verwendeten Messgerätes ist eine vorherige korrekte Kalibrierung der Einheit dabei elementar um verlässliche Daten zu erhalten. Des Weiteren ist eine erfahrungsbasierte Qualität der Daten, besonders bei handgeführten, manuellen Geräten häufig festzustellen. Dementsprechend ist für korrekte Daten die Schulung des Personals unerlässlich.

In diesen Bereichen der industriellen Messtechnik sind in den vergangenen Jahren und Jahrzehnten enorme Fortschritte gemacht worden und es ist davon auszugehen, dass in den kommenden Jahren weitere folgen werden. Neue Modelle mit verbesserter Hard- und Software werden von den Herstellern kontinuierlich entwickelt und vertrieben. Damit kann von einer insgesamt noch genaueren und fehlerunanfälligeren Datenerfassung in der Zukunft ausgegangen werden.

## 3.5 Reverse Engineering

Das Reverse Engineering (RE) steht mit seiner wörtlichen Übersetzung für „umgekehrtes Konstruieren/entgegengesetztes Entwickeln“. Es dient nach CHIKOFSKY und CROSS dazu, ein betrachtetes System oder Objekt zu analysieren, die Komponenten zu identifizieren und deren Beziehungen zueinander zu ermitteln, mit dem Ziel, das System oder Objekt teilweise oder auch vollständig wieder abzubilden [90]. Diesem Prinzip folgen alle Anwendungen des RE, jedoch ist dabei je nach Disziplin teilweise unterschiedliches zu verstehen. So kann nach [90] in der Informationstechnik zum Beispiel die Wiedergewinnung des Quellcodes aus einem ausführbaren (compilierten) Programm oder die Erschließung des Kommunikationsprotokolls anhand einer beobachteten Kommunikation als RE bezeichnet werden.

### 3.5.1 Definition und Abgrenzung

Im Maschinenbau gibt es keine allgemeingültige Definition von RE. Hier existieren aktuell hauptsächlich zwei Interpretationen darüber, wie weit das RE geht und was mit dem Prozess erreicht werden soll:

Die verbreitetste und allgemein verstandene Auslegung besagt, dass das RE ein Prozess ist, bei dem, ausgehend von einem physischen Objekt, die Rekonstruktion der Geometrie vollzogen wird. Es geht hierbei also ausschließlich darum, aus einem gefertigten Bauteil (oder einer Baugruppe) ein virtuelles Modell mit den entsprechenden Abmessungen zu generieren. [50; 91; 92]

Für manche Autoren geht diese Auslegung nicht weit genug: Zum Begriff Entwickeln gehört nach deren Ansicht nicht nur das Erstellen von Geometriedaten im CAD-System, sondern auch sämtliche andere Aspekte der Produktionstechnik, wie Materialauswahl, Analysen und Berechnung, das entsprechende Fertigungsverfahren, die Arbeitsvorbereitung, die tatsächliche Fertigung selbst, Qualitätskontrollen und vieles mehr. So erweitern, unter vielen anderen, HOSCHEK und DANKWORT in [93], BIDANDA und GENG in [94] sowie RAJA und FERNANDES in [95] den Begriff Reverse Engineering dahingehend, dass von einem physischen Objekt ein Duplikat, also ein Nachbau, welcher in Form und Funktion exakt dem vorliegenden Teil entspricht, angefertigt wird.

SCHÖNE beschreibt die beiden Definitionen in [69] als „Reverse Engineering im engeren Sinne“ für die Erzeugung eines virtuellen Modells und als „Reverse Engineering im erweiterten Sinne“, wenn aus diesen Daten wieder

ein Bauteil hergestellt wird, also auch Materialeigenschaften und Fertigung et cetera berücksichtigt werden müssen (Bild 24).

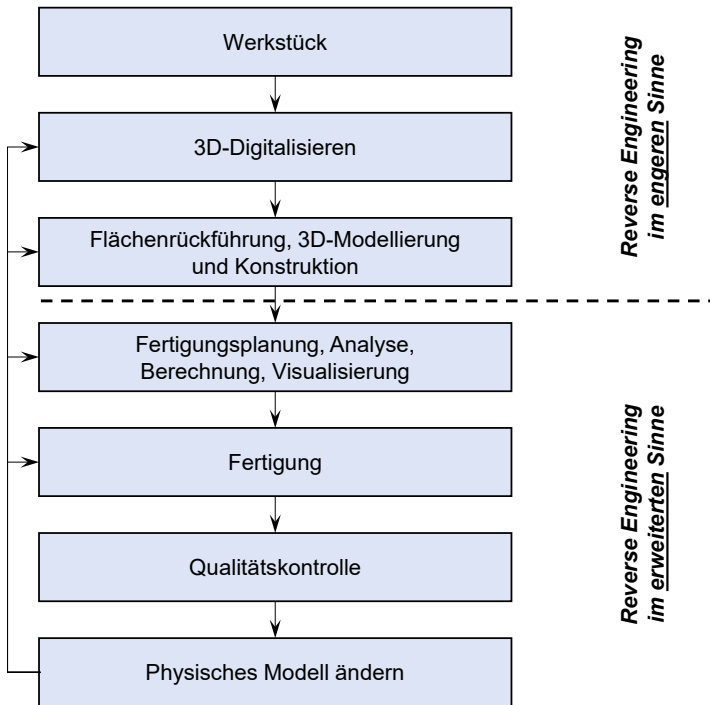


Bild 24: Reverse Engineering im engeren und erweiterten Sinne nach [69].

Das Reverse Engineering im engeren Sinne ist also die Rückführung von einem physischen Objekt zu einem virtuellen/digitalen Modell. Dieser Beschreibung schließt sich auch die VDI-Richtlinie VDI 5620 „Reverse Engineering von Geometriedaten“ an: Es wird dabei mit RE „[...]allgemein der Prozess zur dreidimensionalen digitalen Rekonstruktion der Ist-Geometrie von physisch existierenden Bauteilen und Anlagen für industrielle Anwendungen bezeichnet“ [50]. Diese Definition soll hier im Weiteren gelten, wenn der Begriff des Reverse Engineering verwendet wird.

### 3.5.2 Die Prozesskette des Reverse Engineering

Insgesamt gibt die VDI 5620 einen sehr guten Überblick über die bestehende Anwendung von Reverse Engineering. Es wird dabei in drei wesentliche Bereiche aufgeteilt: 3D-Datenerfassung, Datenaufbereitung und Flächenrückführung, wobei die letzten beiden Schritte unter dem Begriff Post-processing zusammengefasst sind. Bild 25 zeigt die Vorgehensweise in der Richtlinie mit den einzelnen Arbeitsschritten.

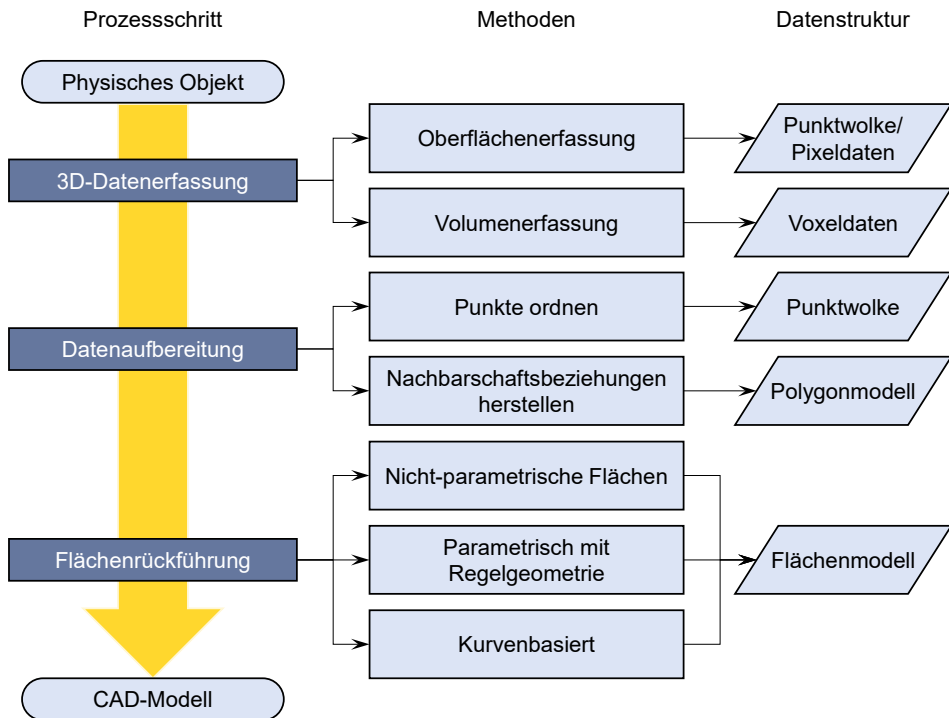


Bild 25: Prozess des Reverse Engineering von Geometriedaten nach [50].

Die Oberflächenerfassung ist in Abschnitt 3.4 bereits beschrieben. Je nach Anforderung an die Daten ist hier im Einzelfall ein passendes Gerät zur Digitalisierung mit der entsprechenden Technik zu verwenden. Da es in den meisten Fällen nötig ist, das Objekt und/oder das Scannersystem zu drehen oder zu versetzen, um sämtliche benötigten Elemente zu erfassen, müssen diese Einzelscans anschließend zusammengeführt werden. Diesen Vorgang, bei dem zwei oder mehrere Datensätze in ein gemeinsames Koordinatensystem geführt werden, nennt man Registrierung. Hierfür können verschiedene Methoden zum Einsatz kommen [50]:

- N-Point Alignment (Drei-Punkt-Methode): Hierbei erfolgt die Registrierung über drei Punkte im Koordinatensystem. Voraussetzung ist, dass diese drei Punkte nicht auf einer Linie liegen dürfen, da es sonst zu unendlich vielen Lösungen kommt und demnach keine eindeutige Zuweisung erfolgen kann. Zur Erhöhung der Genauigkeit können auch mehr als drei Punkte ausgewählt werden.
- Regelgeometrie-einpassung: Bei der Anpassung auf Regelgeometrien werden in den Einzelscans Regelgeometrien eingebracht (zum

Beispiel Kugeln, Zylinder oder Kegel), welche anschließend überlagert werden. Diese Methode ist deutlich robuster gegenüber der Drei-Punkt-Methode, da der Mittelpunkt einer Kugel wesentlich besser eingepasst werden kann als ein einzelner Punkt, welcher deutlich mehr von Messrauschen oder ähnlichen Bildstörungen beeinflusst sein kann. Bei Anwendung dieser Methode werden häufig inhärente Konstruktionsmerkmale verwendet oder zusätzlich Regelgeometriekörper am Messobjekt angebracht, welche in den Scans mit aufgenommen werden, um diese später zusammen zu setzen.

- 3-2-1-Methode (Ebene-Vektor-Punkt-Methode): Bei dieser Methode werden die korrespondierenden Datensätze zunächst an einer Ebene (definiert über drei Punkte), anschließend entlang eines Vektors (zwei Punkte) und über einen Einzelpunkt ausgerichtet. Diese Formelemente müssen zwangsläufig in allen Datensätzen vorhanden sein.
- Best-fit (ICP-Algorithmus [96; 97]): Hierbei kommt der Iterative Closest Point Algorithmus (ICP) zum Einsatz. Dabei wird durch Rotation und Translation iterativ das Minimum der Abstände von jedem Punkt aus einem Datensatz zum nächsten Punkt des anderen Datensatzes mittels Methode der kleinsten Fehlerquadrate gesucht. Die Best-fit-Methode bietet die größte Flexibilität bei der Registrierung, hat aber auch die meisten Freiheitsgrade. Dies kann dazu führen, dass bei regelmäßig geformten Objekten, oder Objekten mit gleichbleibender Kontur, leicht eine fehlerhafte Anpassung erfolgen kann. Es müssen hier demnach zwangsläufig geometriebrechende Elemente vorhanden sein.

Für eine verbesserte Datenqualität kann eine Datenfusion angewendet werden [98]. Dies ist eine Kombination der Daten aus mehreren Scannersystemen. So können große Objekte meist sehr schnell, dafür mit weniger Genauigkeit, erfasst werden. Für Bereiche, welche einen höheren Detailgrad erfordern, werden anschließend zusätzliche andere Geräte zum Einsatz gebracht, welche diese Details besser auflösen und genau genug abbilden können. Die oben beschriebenen Methoden zur Registrierung sind analog für die Datenfusion anzuwenden.

Das Postprocessing gibt den generischen Prozess [95] des Reverse Engineering wieder. Dieser beginnt mit einer Aufbereitung der Rohdaten. Die bei der Datenerfassung erzeugten Punktwolken haben zunächst noch keine Flächeninformationen inhärent. Diese erhalten die Punkte erst über eine

Verbindung von drei Punkten untereinander zu einer Menge aus Dreiecksflächen. Diese Herstellung von Nachbarschaftsbeziehungen zwischen den Punkten wird als Triangulation, Tesselierung oder Polygonisierung bezeichnet. Dabei kommen verschiedene mathematische Algorithmen zum Einsatz, beispielsweise der Triangulationsalgorithmus von DELAUNAY [99]. Dabei werden die Punkte so zu einem Dreieck vernetzt, dass keine anderen Punkte innerhalb des Umkreises des Dreiecks liegen (Umkreisbedingung). Die so erzeugten Daten liefern schließlich Informationen über die Oberfläche der gescannten Geometrie. Eine weitere manuelle Bearbeitung schließt sich in der Regel an die Vernetzung an. Diese kann, je nach Zweck, mehrere oder alle folgende Punkten beinhalten:

- Entfernen von unerwünschten Objekten, welche durch die Lage-sicherung des Bauteils unvermeidbar aufgenommen sind, beispielsweise Halte- und Aufspannvorrichtungen.
- Entfernung fälschlicherweise aufgenommener Artefakte, zum Beispiel durch Reflexionen oder mehrdeutige Oberflächeninterpretationen.
- Glätten des Netzes durch vorgegebene Glättungstoleranzen, bei starkem Rauschen, häufig aufgrund einer sehr rauen Oberflächenstruktur oder Reflexionen durch eine glänzende Fläche. Dadurch ist zudem eine Verringerung der Datenmenge zu erreichen, wenn innerhalb des Toleranzbereiches einzelne Teilflächen zu einer zusammengefasst werden können.
- Schließen von Löchern im Polygonnetz. Hierbei können Bereiche, welche nicht von dem Scanner erfasst werden konnten (zum Beispiel aufgrund eines Hinterschnittes), manuell gerade oder auch krümmungsabhängig zu den benachbarten Dreiecken geschlossen werden.

Als Vorstufe oder ersatzweise zu einer Vernetzung kann die Punktwolke strukturiert und aufbereitet werden. Dabei werden die Punkte in einem geordneten Raster mit konstantem Abstand angeordnet. Dadurch lassen sich automatisiert Kurvenberechnungen für die weitere Verwendung durchführen. Diese Form funktioniert nur bei einer hinterschnittsfreien Punktwolke.

Bei Verwendung von Scans aus CT-Anlagen entstehen zunächst Rohdaten als Voxel (Kunstwort aus „volumetrisch“ und „Pixel“, also ein dreidimensionales Pixel). Diese werden häufig mit einem schwellwertbasierten Algorithmus (zum Beispiel dem Marching-Cubes [100]) segmentiert und somit

Isoflächen zwischen unterschiedlichen Materialdichten erzeugt. Diese lassen sich als Punktwolke oder Polygonmodell ausleiten und analog bearbeiten [50].

Um die erzeugten und aufbereiteten Daten für CAD-Anwendungen oder viele weitere CAx-Werkzeuge nutzbar zu machen, bedarf es schlussendlich einer Flächenrückführung (mit vollständig mathematisch beschriebenen und stetigen Flächen) aus den vorhandenen Punktwolken oder Polygonnetzen. Hierbei kommen verschiedene Methoden zum Einsatz:

- Eine Beschreibung der Oberfläche auf Basis von nebeneinander liegenden Kurven auf den Scandaten.
- Eine Rückführung zu nicht parametrischen Flächen.
- Die Einpassung von Regelgeometrien zur parametrischen Rückführung.

Eine wichtige Aufgabe zur Beschreibung der Form bei einer Flächenrückführung aus digitalisierten Daten kommt der Interpolation und der Approximation zu. Bei der Approximation werden die Punkte durch eine vorgegebene Funktion angenähert. Dadurch ergeben sich glattere Kurven und Flächen, wenngleich nicht alle Punkte verwendet werden. Die Interpolation hingegen verbindet alle  $n$  Datenpunkte mit einem Polynom. Zur vollständigen Beschreibung muss dabei ein Polynom vom Grad  $n-1$  verwendet werden. Vor allem bei mehreren Stützpunkten neigen die Polynome höheren Grades aber besonders in den Randbereichen zu einem Überschwingen. Abhilfe schafft hier die Zerlegung in Segmente, welche stückweise stetig verbunden werden. Dabei wird nicht zwischen allen Punkten interpoliert, sondern nur zwischen wenigen Punkten. Hierbei entsteht ein Spline  $n$ -ten Grades. Dies ist eine Vielzahl von Polynomen, welche jeweils höchstens den Grad  $n$  besitzen. Als Randbedingung muss erfüllt sein, dass die Teilabschnitte an den Enden  $(n-1)$ -mal stetig differenzierbar sind. Im einfachsten Fall werden zwei Punkte durch eine Gerade (Polynomgrad 1) miteinander verbunden, welche an den Übergängen allerdings nur eine Positionsstetigkeit (Tabelle 5) liefern. Für höhere Stetigkeiten und damit glatte Flächen hat sich, in Anlehnung an das Strakverfahren aus dem Schiffbau, die kubische Splineinterpolation etabliert, um einen kontinuierlichen Verlauf abzubilden. Bild 26 zeigt exemplarisch eine Menge aus  $n = 7$  Datenpunkten, welche mit steigendem Polynomgrad approximiert sind. Eine Interpolation wird im Weiteren zunächst linear dargestellt und zudem mit einem Polynom vom Grad  $(n-1 = 6)$ . Das Überschwingen bei der Polynominterpolation an den Randbereichen wird dabei deutlich ersichtlich. Die Interpolation mit einem kubischen Spline zeigt schließlich eine glattere

Kurve, welche ebenfalls die Bedingung der Krümmungstetigkeit an den Stützpunkten erfüllt.

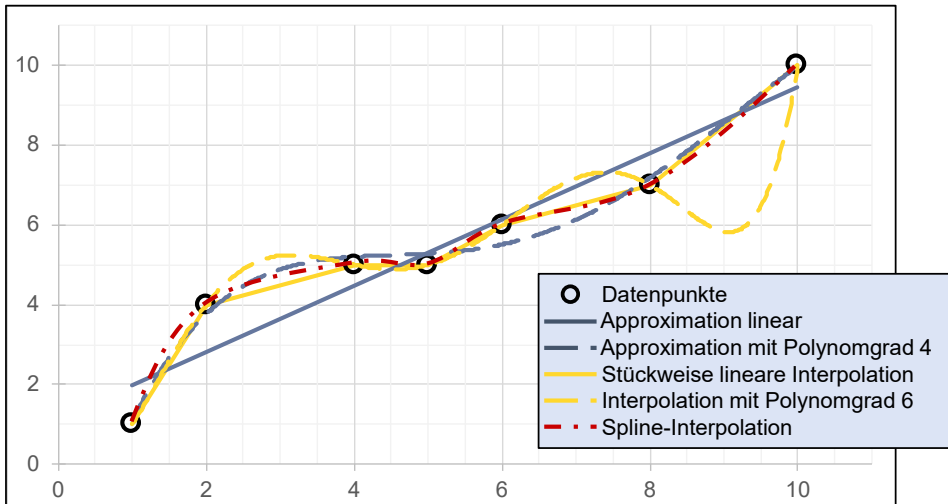


Bild 26: Approximation und Interpolation von Datenpunkten.

Da beim RE die tatsächliche Geometrie erfasst wird, können diese in häufigen Fällen nicht mehr hinreichend genau mit Regelgeometrien (beispielsweise Kreise, Geraden, Zylinder, Ebenen, Kegel) beschrieben werden. Aus diesem Grund soll deshalb zunächst noch der Begriff der Freiformfläche erläutert werden.

Eine Freiformfläche ist nach KIEF [101] zumeist eine mehrfach gekrümmte, komplexe Fläche. Eine Beschreibung mit einfachen mathematischen Regelgeometrien, wie Geraden oder Kreisen, ist dabei nicht mehr möglich. STIEL teilt die Flächen in analytisch beschreibbar (zum Beispiel Zylinder, Kegel und Kugeln) und analytisch nicht beschreibbar (Freiformflächen) ein [102]. Eine allgemeine Aussage nennt SCHÖNE in [69], dass Freiformflächen beliebig gekrümmte Formen sind, welche „[...] sich aus keiner vorgegebenen Regel ergeben und sich nicht durch Funktionen zweiten Grades beschreiben lassen. [...] [Sie] stellen im mathematischen Sinne den allgemeinen Fall der Flächenbeschreibung dar.“

Zur Repräsentation von Freiformflächen müssen gewöhnlich mehrere Flächenstücke (Segmente, Patches) zusammengesetzt werden. Als mathematisches Kriterium zur Bewertung der Übergänge zwischen den einzelnen Patches dient dabei die Stetigkeit. Die Stetigkeit ist in verschiedenen Kategorien ( $C_0$  bis  $C_3$ ) definiert. Eine höhere Stetigkeit impliziert immer die vorhergehenden Stetigkeiten. Tabelle 5 zeigt die verschiedenen Stetigkeiten und Voraussetzungen exemplarisch an Kurvenübergängen.

Tabelle 5: Stetigkeiten zweier Kurvensegmente mit Krümmung.

Bezeichnung	Voraussetzung	Darstellung
Keine Stetigkeit	Die Endpunkte zweier Kurven berühren sich nicht.	$f_1=f(x,y,z)$ ● — ● $f_1 \neq f_2$  $f_2=f(x,y,z)$
C0 Positionsstetigkeit	Die Endpunkte zweier Kurven haben dieselbe Position.	$f_1=f(x,y,z)$ ● — ● $f_1=f_2$  $f_2=f(x,y,z)$
C1 Tangentenstetigkeit	Die Endpunkte zweier Kurven haben dieselbe Steigung. Sie sind tangential zueinander.	$f_1=f(x,y,z)$ ● — ● $f_1=f_2$ $f_1'=f_2'$  $f_2=f(x,y,z)$
C2 Krümmungstetigkeit	Die Endpunkte zweier Kurven haben dieselbe Krümmung.	$f_1=f(x,y,z)$ ● — ● $f_1=f_2$ $f_1'=f_2'$ $f_1''=f_2''$  $f_2=f(x,y,z)$
C3 Flussstetigkeit	Die Endpunkte zweier Kurven haben dieselbe Krümmungsänderung.	$f_1=f(x,y,z)$ ● — ● $f_1=f_2$ $f_1'=f_2'$ $f_1''=f_2''$ $f_1'''=f_2'''$  $f_2=f(x,y,z)$

Für optisch ästhetische Flächenmengen ist mindestens eine C2-Stetigkeit (krümmungstetig) anzustreben. Man spricht dann allgemein von Class A Flächen, wenn die Lichtreflexionen über die Kanten möglichst gleichmäßig verlaufen.

Die Beschreibung der Freiformflächen in CAD-Systemen stammt aus der Automobilbranche und geht auf das Jahr 1964 zurück. COONS [103] entwickelte als erster eine CAD-Flächenbeschreibung, in Form von so genannten Coonspflastern, welche die Basis für die späteren CAD-Repräsentationen von Freiformflächen darstellt. Eine verallgemeinerte Form der Coonspflaster entwickelte GORDON [104–106], um 1969 bei General Motors unter dem Begriff „transfinite Interpolation“. Ausgangspunkt eines bilinear gebundenen Coonspflasters sind vier Randkurven, welche eine Fläche einschließen.

Durch die je zwei gegenüberliegenden Randkurven können zwei Regelflächen bestimmt werden. Während damit die beiden Randkurven interpoliert werden können, sind die jeweils anderen Ränder allerdings nur linear verbunden und können damit nicht abgebildet werden. Durch eine dritte bilineare Interpolation der vier Eckpunkte können somit alle einzelnen Elemente dargestellt werden. Durch die von COONS entwickelte Regel besteht ein bilinear gebundenes Coonspflaster also aus zwei Regelflächen und einer bilinearen Fläche. Mit dem gleichen Prinzip werden schließlich Gordonflächen erzeugt. Dabei wird der Ansatz aber erweitert, dass nicht nur vier Randkurven für die Flächenmodellierung ausreichen, sondern ein Kurvennetzwerk die Fläche beschreiben soll. Bild 27 veranschaulicht die Erzeugungsmethodik eines Coonspflasters (links) und einer Gordonfläche (rechts). Aufgrund des ähnlichen prinzipiellen Vorgehens wird darum auch häufig von Gordon-Coons-Flächen gesprochen.

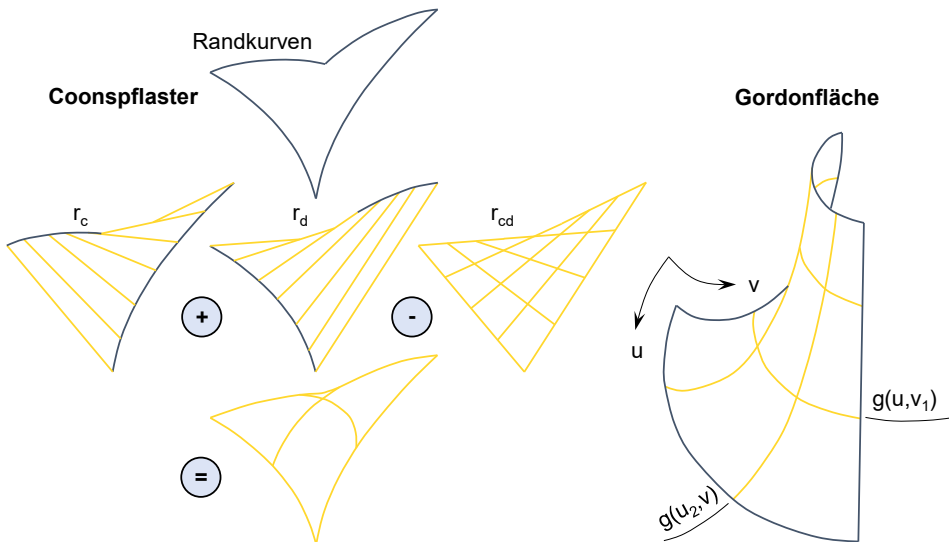


Bild 27: Erzeugungsmethodik eines bilinear gebundenen Coonspflasters (links) und einer Gordonfläche (rechts).

Eine weitere Form der Freiformflächen- und -kurvenbeschreibung sind Bézierkurven und -flächen, welche von DE CASTELJAU bei Citroen [107; 108] und BÉZIER bei Renault [109–111] in den 1960er Jahren entwickelt wurden. Bei dieser Darstellung wird die Kurve durch Stützstellen, welche nicht auf der Kurve selbst liegen, definiert. Der Algorithmus von DE CASTELJAU besagt, dass eine Bézierkurve aufgeteilt und durch zwei aneinandergesetzte Kurven abgebildet werden kann. Es wird dabei wiederholt linear zwischen den Zwischenpunkten interpoliert um den Kurvenpunkt zu ermitteln.

Durch das entstehende Kontrollpolygon der zusammengesetzten Bézierkurven wird eine Approximation der Kurve erreicht (Bild 28).

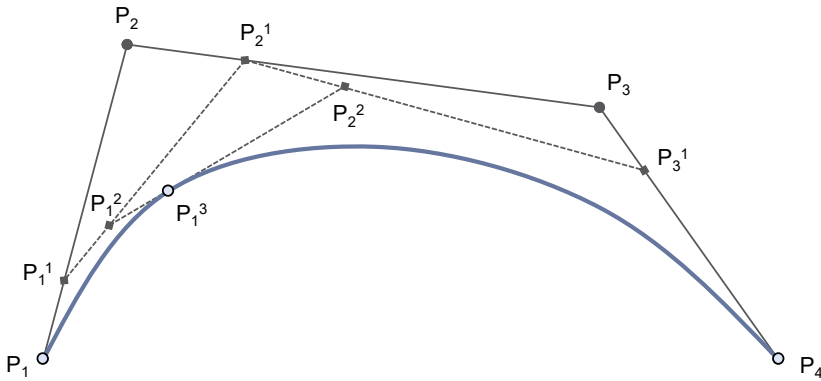


Bild 28: Wiederholte lineare Interpolation zur Ermittlung der einzelnen Kurvenpunkte nach DE CASTELJAU.

Die Anzahl der Kontrollpunkte bestimmt letztendlich die Ordnung der Bézierkurve. Dieser Nachteil lässt sich dadurch eliminieren, indem man Kurven stückweise aus Kurven mit gesetzter Ordnung zusammensetzt. Somit erhält man die sogenannten B-Splines (Basis-Splines). Die B-Spline-Kurven wiederum lassen sich zu NURBS (Non-Uniform Rational B-Splines; selten auch lediglich als NURB abgekürzt) generalisieren. NURBS sind die wichtigste Beschreibung für Kurven und Flächen und haben sich als Industriestandard zur Repräsentation von computergestützten geometrischen Informationen etabliert [112; 113]. Mittlerweile können NURBS-Beschreibungen von nahezu sämtlichen CAD-Systemen und Standardformaten verarbeitet werden. Die Vorteile von NURBS legen PIEGL und TILLER in [112] anschaulich dar:

- NURBS bieten eine mathematische Basis zur Repräsentation sämtlicher Formen, sowohl analytischer Geometrien, als auch Freiformkurven/-flächen.
- NURBS-Algorithmen sind schnell und numerisch stabil.
- NURBS benötigen zudem einen relativ geringen Speicherbedarf, da nur Kontrollpunkte, Kontrollfunktionen und Knotenvektoren gespeichert werden müssen [51].
- Bezogen auf gewöhnliche Transformationen, wie Translation, Rotation, parallele oder perspektivische Projektionen, sind NURBS invariant.
- Nicht-rationale B-Splines sowie rationale und nicht rationale Bézier-Kurven/Flächen lassen sich in NURBS verallgemeinern.

Bild 29 zeigt eine beispielhafte NURBS-Fläche mit dem zugehörigen Kontrollgitter und der Anordnung der Knotenpunkte. Das Kontrollgitter ist dabei in der z-Richtung offsetiert, um eine anschauliche Übersicht zu behalten.

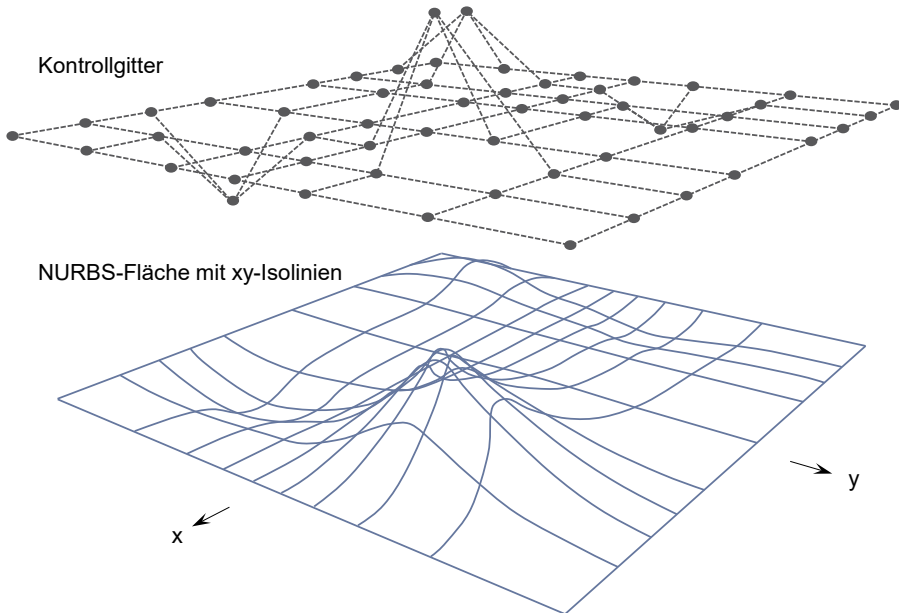


Bild 29: NURBS-Fläche mit offsetiertem Kontrollgitter.

Eine NURBS-Fläche ist allgemein beschrieben durch die Funktion:

$$S(u, v) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m R_{i,j}(u, v) \cdot P_{i,j} \quad (9)$$

Dabei ist  $p$  der Grad der Funktion in Richtung  $u$  und  $q$  der Grad in Richtung  $v$ . Die Kontrollpunkte  $\{P_{i,j}\}$  spannen das bidirektionale Kontrollnetz auf. An den Knotenvektoren

$$U = \left\{ \underbrace{0, \dots, 0}_{p+1}, u_{p+1}, \dots, u_{r-p-1}, \underbrace{1, \dots, 1}_{p+1} \right\} \quad (10)$$

und

$$V = \left\{ \underbrace{0, \dots, 0}_{q+1}, v_{q+1}, \dots, v_{s-q-1}, \underbrace{1, \dots, 1}_{q+1} \right\} \quad (11)$$

mit  $r = n + p + 1$  und  $s = m + q + 1$

sind die nicht-rationalen B-Splines Basisfunktionen  $\{N_{i,p}(u)\}$  und  $\{N_{j,q}(v)\}$  definiert und liefern mit der zweidimensionalen Gewichtungsmatrix  $w$  die stückweisen rationalen Basisfunktionen:

$$R_{i,j}(u, v) = \frac{N_{i,p}(u) \cdot N_{j,q}(v) \cdot w_{i,j}}{\sum_{k=0}^n \sum_{l=0}^m N_{k,p}(u) \cdot N_{l,q}(v) \cdot w_{k,l}} \quad (12)$$

Mit der Segmentierung einer Punktwolke oder eines Polygonnetzes und Füllung der entstehenden einzelnen Patches mit NURBS-Flächenbeschreibungen lassen sich schlussendlich geschlossene, kontinuierliche Flächenmodelle erzeugen. Diese können dann mit den gängigen CAD-Programmen zunächst zu Volumenmodellen aufbereitet und entsprechend weiterbearbeitet werden.

### 3.5.3 Datenformate und Anwendungsgebiete

Im jedem Prozessschritt des RE entstehen durch die Veränderung und Aufwertung neue Daten. Die folgende Tabelle 6 zeigt eine Übersicht der gängigsten Datentypen innerhalb der einzelnen Schritte.

Tabelle 6: Gängige Datentypen der RE-Anwendungen.

Prozessschritt	Datentyp	Format	Dateiendung	Beschreibung
Datenerfassung	Punktwolke	Plain Text	*.txt	ASCII-Format xyz-Koordinaten
		Point Cloud Data	*.pcd	ASCII-Format xyz-Koordination mit weiteren Informationen, wie Farbwert oder Normalenvektor
	Voxel	Crystallographic Information File	*.cif	3D-Voxeldaten
Datenaufbereitung	Polygonmodell	Wavefront OBJ	*.obj	ASCII-Format Optische Materialdaten können über eine Bibliothek eingebunden werden

Tabelle 6: Gängige Datentypen der RE-Anwendungen. (Fortsetzung)

Prozessschritt	Datentyp	Format	Dateiendung	Beschreibung
Datenaufbereitung	Polygonmodell	Standard Tessellation Language (auch Standard Triangulation Language, Surface Tessellation Language oder Stereolithography)	*.stl (*stla) (*stlb)	ASCII- oder Binär-Format Flächenbeschreibung aus Dreiecksfacetten, jedes Dreieck wird mittels Eckpunkte und seiner Flächennormalen beschrieben
		Jupiter Tessellation	*.jt	Nach ISO 14306 [114] Tesselierte oder auch B-Rep-Abbildung Kann Objekt- und Metadaten enthalten
		Polygonal File Format	*.ply	ASCII- oder Binär-Format Mit Attributen für Einzelfacetten (Farbe, Transparenz und weitere)
Flächenrückführung	Flächenmodell	Standard for the Exchange of Product Model Data (STEP)	*.stp *.step	Nach ISO 10303 [115] Produktdatenmodell mit verschiedenen Protokollen (AP), je nach Anwendungsfall
		Initial Graphics Exchange Specification	*.igs *.iges	Nach US Pro: IGES 5.3 [116] Beschreibung von Punkten, Punktmengen, Vektoren und Freiformflächen
		Verband der Automobilindustrie – Flächenschnittstelle (VDA-FS)	*.vda	Spezifiziert in zurückgezogener DIN 66301 [117] Beschreibung von Punkten, Punktmengen, Vektoren und Freiformflächen

Während des gesamten RE-Prozesses können die erzeugten Daten für unterschiedliche Anwendungen nutzbar gemacht werden. Tabelle 7 gibt eine Übersicht, welches die typischen Anwendungsgebiete des RE-Prozesses sind und welcher Stand der Datenaufbereitung hierfür jeweils notwendig ist, um die gewünschte Aufgabe zu erfüllen.

Tabelle 7: Anwendungsfelder von RE mit notwendigem Datenstand.

Anwendung	Punktwolken/ Polygon- modelle	Polygon- modelle (aufbereitet)	Flächen- modelle
Bauteilvermessung	X		
Qualitätskontrolle	X		
Soll-Ist-Vergleiche	X		
Statistische Prozess- kontrolle (SPC)	X		
Simulation und FE-Berechnungen		(X) sehr begrenzt	X
Darstellung im virtu- ellen Raum (VR-Wall)	X	X	X
Reproduktion (Addi- tive Fertigung) → Mock-up		X	
Reproduktion (Kon- ventionell, CNC-Pro- gramm) → Duplikat			X

## 4 Simulation abweichungsbehafteter Geometrien: Forschungsansätze und industrielle Umsetzungen

Das Ziel einer höheren Qualität der Simulationsergebnisse ist stets Gegenstand in wissenschaftlichen Arbeiten, aber selbstverständlich auch direkt in der industriellen Praxis. In diesem Kapitel werden demzufolge einige Ansätze dargestellt, wie Simulationen von und mit abweichungsbehafteten Geometriemodellen erfolgen und welche Methoden dabei zum Einsatz kommen.

### 4.1 Reverse Engineering Prozess

Das Reverse Engineering ist in der Industrie ein bereits etablierter Prozess. Eine vielversprechende Anwendung des RE wird hierin von einigen Firmen angeboten: Ein Vergleich der eigenen Produkte mit den Entwicklungen der Marktbegleiter durch ein virtuelles Benchmarking. Dadurch wird sich ein Wissensvorsprung erhofft, um bei der eigenen Produktentwicklung letztlich Zeit und Kosten einzusparen [118].

Ein durchgängiger Prozess ist dabei von der Firma TecoSIm mit ihrem Produkt Tec|Bench entwickelt worden. Bei diesem wird durch Anwendung der RE-Techniken, in Zusammenhang mit Materialtests und CAE-Werkzeugen, ein Wettbewerbsprodukt auf seine Stärken und Schwächen analysiert. Somit kann der Stand der eigenen Produktreihe ermittelt und verglichen werden. Das Bild 30 zeigt einen Überblick der Einzelschritte hin zum Benchmarkergebnis.

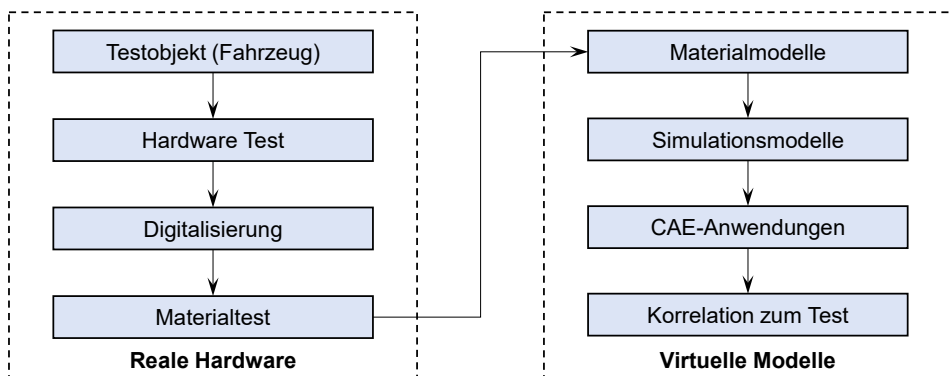


Bild 30: Prozess des TecoSIm Tec|Bench Benchmarkings nach [119].

Die dabei erzeugten Geometrien werden mittels Streifenprojektionsverfahren erzeugt. Vorgeschaltet wird die Aufnahme von Referenzmarkern mittels Photogrammetrie, um die einzelnen aufgenommenen Segmente zu einem Gesamtkonstrukt registrieren zu können.

Neben diesen Benchmarking Prozessen gibt es in der Industrie eine Vielzahl von Anbietern, welche sich auf Ingenieurdienstleistungen im Bereich des RE spezialisiert haben und diese individuell durchführen, aber häufig keine weiterführenden Simulationen mit den Daten anstellen.

Fazit: Tec|Bench und auch andere Benchmarkingdienstleistungen beinhalten eine sehr umfangreiche Aufbereitung der Bauteile und Baugruppen und deren Funktion und Betriebsverhalten. Der Fokus bezüglich des Reverse Engineerings liegt dabei auf dem RE im erweiterten Sinne (siehe Bild 24, Kapitel 3.5.2). Dies bedeutet, es wird neben der reinen Geometrieerfassung auch versucht, durch Materialtests die Werkstoffparameter zu ermitteln. Dabei wird allerdings stets auf den aufwändigen Prozess der vollständigen Geometrierückführung zurückgegriffen, was insgesamt zu einem enormen Aufwand führt, welcher sich nur für die häufige Verwendung und Vermarktung des Datensatzes rentieren kann. Darum sind bei TecoSim auch nur bestimmte Modelle aus der Automobilbranche in diesem Produktpaket erhältlich.

## 4.2 **Morphing von FE-Netzen**

Den Begriff des Morphings beschreibt der DUDEN als ein „auf einem Computerprogramm beruhendes Verfahren, ein Bild (in einem wahrnehmbaren Prozess ohne abrupte Übergänge) so zu verändern, dass ein völlig neues Bild entsteht“ [120]. In der Produktentwicklung, besonders in der simulativen Auslegung, wird unter Morphing das Verfahren betitelt, womit meist diskrete Modelle (beispielsweise FE-Netze) an leicht veränderte geometrische Abmessungen angepasst werden können, ohne dabei die inhärenten Eigenschaften zu verlieren. Diese Methode verspricht vorher aufgebrachte Definitionen wie Lagerbedingungen, Kräfte und Materialeigenschaften zu konservieren und durch Deformationen des Ursprungsnetzes das erzeugte homogene und durchweg berechenbare Modell zu erhalten. Dieses Verfahren wurde zunächst in CFD-Analysen angewandt (beispielsweise zur strömungstechnischen Formoptimierung, wie in [121] oder [122] dargestellt), findet mittlerweile aber auch in der Struktursimulation eine breite Verwendung. Dabei sind die zwei Anwendungsfälle möglich:

- Einerseits können kleine Änderungen aus der Konstruktion in einem FE-Modell eingebracht werden, ohne die gesamte Simulation neu aufbauen zu müssen. Die Ausgangslage ist demnach, dass eine Zielgeometrie für das Morphing vorliegt. Wichtig bei dieser Art der Bearbeitung ist jedoch die Erkennung der Topologie des Modells, damit diese mit der FE-Vorlage verarbeitbar sind. Hierbei ist die Identifikation von Ecken, Kanten und Flächen von qualitätsbestimmender Wichtigkeit.
- Andererseits ist eine Rückkopplung aus der Berechnungsabteilung an die Konstruktion möglich, indem Modelle an Stellen mit Spannungsspitzen zunächst rein im FE-Modell weiter verstärkt werden, bis sie eine unkritische Größe erreichen. Dieser Wert kann zurückgegeben werden, um das Konstruktionsmodell entsprechend der Anforderungen in dem Bereich anzupassen.

Grundlage der heutigen kommerziellen Morph-Pakete sind Radiale Basisfunktionen (RBF), welche sich häufig auch im entsprechenden kommerziellen Produktnamen wiederfinden, beispielsweise RBF-Morph [123] als Erweiterung für ANSYS. Einen weiteren bekannten Vertreter im Bereich des Modell-Morphings liefert die Firma Altair in dem Modul HyperMorph des solverunabhängigen Pre- und Postprocessors HyperMesh [124]. Radiale Basisfunktionen eignen sich für diesen Zweck besonders gut, da die zu approximierende Funktion von vielen Variablen oder Parametern abhängt und durch viele Daten definiert sind [125].

Die Interpolation mit RBF wird hierbei verwendet, um die Verschiebung in jeder Örtlichkeit im Raum abzuleiten. Somit wird jede Komponente der Verschiebung durch die Linearkombination von radialen Basisfunktionen wie folgt interpoliert:

$$\begin{cases} v_x = s_x(x) = \sum_{i=1}^N \gamma_i^x \cdot \varphi \cdot (\|x - x_{k_i}\|) + \beta_1^x + \beta_2^x \cdot x + \beta_3^x \cdot y + \beta_4^x \cdot z \\ v_y = s_y(x) = \sum_{i=1}^N \gamma_i^y \cdot \varphi \cdot (\|x - x_{k_i}\|) + \beta_1^y + \beta_2^y \cdot x + \beta_3^y \cdot y + \beta_4^y \cdot z \\ v_z = s_z(x) = \sum_{i=1}^N \gamma_i^z \cdot \varphi \cdot (\|x - x_{k_i}\|) + \beta_1^z + \beta_2^z \cdot x + \beta_3^z \cdot y + \beta_4^z \cdot z \end{cases} \quad (13)$$

Die Koeffizienten der radialen Basisfunktionen müssen anschließend über ein lineares Gleichungssystem gelöst werden.

Ein verbreiteter Anwendungsfall für das Morphing von Strukturen ist die Erstellung von individuellen Knochenmodellen in der Medizintechnik. Eine zeitaufwändige Neuerstellung für jeden Patienten kann nicht realisiert werden. Somit werden unter Verwendung eines Vorlagenmodells durch manuell gesetzte Punkte auf der Modelloberfläche, welche Schnittebenen darstellen, Parameter definiert. Mittels RBF-Interpolation kann somit das Modell auf jeden Patienten vergleichsweise einfach gemorphet werden. [126]

Eine weitere Möglichkeit des Morphens von 3D-Modellen beschreiben TIERNY et al. in [127]. Dabei werden die Geometrien mittels eines Reeb-Graphen [128], welcher auf der Morse-Theorie [129] basiert, auf ein innenliegendes Skelett reduziert. Ein Beispiel ist in folgendem Bild 31 dargestellt. Die Anwendung ist allerdings den eigenen Angaben zufolge lediglich darauf ausgelegt, optisch ansprechende Graphikmodelle zu erzeugen und nicht für maßgenaue Anpassungen an vorgegebene Geometrierestriktionen anzuwenden. Es wird darum im weiteren Verlauf vom Autor im Rahmen der Anpassung von Produktsimulationsmodellen als aktuell nicht zu verwenden angesehen.

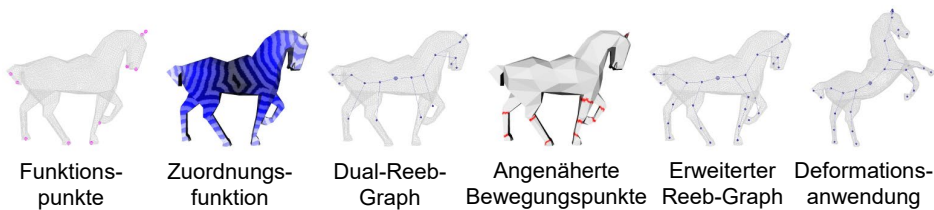


Bild 31: Anwendung des Morphing-Algorithmus mittels eines Skelettes nach [127]

Fazit: Durch den Prozess des Morphens ist es möglich, diskrete Netzmodelle auf Geometrieabweichungen anzupassen. Dennoch ist ein hoher manueller Aufwand beim Auffinden und der Zuordnung der Topologieteile (beispielsweise Kanten und Flächen) notwendig. Des Weiteren ist für die Anwendung ein vollständiges Volumenmodell notwendig. Scandaten müssen den gesamten RE-Prozess durchlaufen und aufbereitet werden. Zudem ist kein ganzheitlicher Ansatz gegeben, da die Hintergründe, wann und warum das Bauteil gemorphet werden soll, außen vor bleiben.

### 4.3 Adaptive FEM-Netze

Ein vielversprechender topologieorientierter Ansatz zur Anpassung von FE-Netzen auf 3D-Scandaten wurde an der Technischen Universität Dresden von KLAUS et al. in [130] entwickelt und vorgestellt.

Hierbei werden Objekte, für die es kein Geometriemodell (mehr) gibt, zunächst digitalisiert und es wird ein erster Modellaufbau mit den klassischen RE-Methoden durchgeführt. Dieses Modell fungiert als Basis (Template) für die Anwendung in einer Simulationsumgebung. Es wird demnach der Standardprozess des Preprocessings (Vernetzung, Festlegung der Randbedingungen) durchgeführt. Gibt es nun weitere Formen, welche topologisch ähnlich sind (Targets), wird mit deren topologieorientierten Ansatz nach dem 3D-Scan eine Netzdeformation des erstellten Basismodells auf die neue Geometrie durchgeführt.

In dem in [131] und [132] vorgestellten Verfahren wird mit den beiden Netzdaten zunächst eine Geometrieanalyse durchgeführt, wobei geometrische Primitive ermittelt werden. Anhand dieser erfolgt eine Registrierung der beiden Datensätze. Anschließend werden Korrespondenzen gesucht, um die Knoten der Primitive des Templates mit denen des Targets zu verknüpfen. Die übrigen Knotenpunkte, welche keinem Primitivum zugeteilt werden (können), werden gleichmäßig zwischen den bestehenden Verknüpfungen in mehreren Iterationen erstellt.

Die Netzadaption wird dabei in einem zweistufigen Prozess vollführt. Im ersten Deformationsschritt wird zunächst mittels einer  $k$ -Nearest-Neighbor-Klassifikation die neue Form angenommen. Diese Vorgehensweise führt aber bei unterschiedlichen Oberflächenausprägungen zwangsläufig zu einer Deformation des Netzes und somit zu einem Qualitätsverlust der Vernetzung in Bezug auf die Simulationsanforderungen. Der zweite Schritt der Anpassung erfolgt schließlich mittels eines Federsteifigkeitsmodells, womit die gewünschte Spannungsminimierung bei der Elementtransformation erreicht wird. Das Bild 32 zeigt das Vorgehen beim Prozess der Netzanpassung nach KLAUS et al. mit den beiden Deformationsschritten.

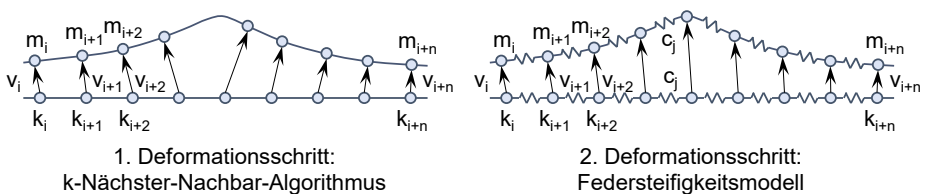


Bild 32: Deformationsschritte der Netzanpassung nach Klaus et al [131].

Fazit: Die FE-Netzanpassung nach KLAUS et al. zeigt einen insgesamt sehr vielversprechenden Ansatz zur Adaption der FE-Netze an Scandaten. Allerdings muss zur Anwendung der Methode der RE-Prozess in großen Teilen mehrfach durchlaufen werden. Rein mit Punktwolken kann nicht gear-

beitet werden. Zudem ist hierbei zusätzlich eine vorgeschaltete Segmentierung der Scan-Polygonnetze notwendig, um die Anpassung durchzuführen. Die Knotenverschiebung erfolgt dann ähnlich wie bei den kommerziellen Morph-Paketen. Allerdings ist die Qualität der Ergebnisse stark von der anwenderbegleiteten Verknüpfung der Scandaten mit dem FE-Netz abhängig, wie die Autoren selber darlegen.

#### 4.4 Scandaten als FE-Berechnungsnetze

Eine vermeintlich naheliegende Anwendung zur Simulation mit Scandaten kann, aufgrund der beiderseits diskreten Abbildung in Form eines Netzes, in der direkten Verwendung der digitalisierten Bauteile als Polygonmodell vermutet werden. Hierzu gibt es auch zwei Ansätze in kommerzieller Software, welche im Folgenden kurz dargestellt und diskutiert werden.

Eine grundsätzliche Herausforderung bei dieser Anwendung besteht darin, dass die Polygonnetze der digitalisierten Geometrien lediglich die Aufgabe besitzen, die Kontur möglichst genau nachzubilden. Qualitätsanforderungen an Simulationsnetze sind aber, wie bereits in Kapitel 3.3.2 aufgeführt, in Sachen Gleichmäßigkeit und Auflösung um ein Vielfaches höher, was wiederum nicht so einfach abgebildet werden kann und in den folgenden Software-Paketen auch nur unzureichend adressiert wird.

Die erste Anwendung liegt im Modeler-Modul der Software PolyWorks von InnovMetric [133]. Hier gibt es eine spezielle Vernetzungsmöglichkeit, um aus dem standardmäßigen Dreiecksnetz ein Vierecksnetz zu generieren. Das in Bild 33 dargestellt Beispiel zeigt jedoch, dass hier dennoch kein konsistentes und unverzerrtes Netz entsteht. Zudem ist die Steuerbarkeit der Elementgröße nur sehr begrenzt möglich. Ebenfalls ist bei dieser Applikation keine Möglichkeit gegeben, aus dem erzeugten Oberflächennetz eine Volumenvernetzung zu generieren, wodurch dies auch nicht ohne weiteren Aufwand für Volumengeometrie geeignet ist.

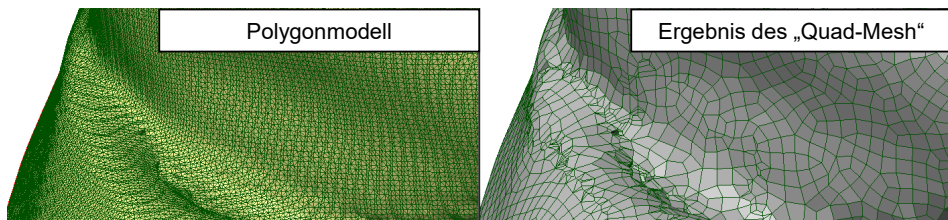


Bild 33: Erzeugungsmethode eines Vierecksnetzes mit PolyWorks.

Eine weitere Aufbereitung der Scandaten bietet das Modul Remesh in Materialise 3-matic [134]. Dieses erweitert die Triangulationsmöglichkeiten

von 3D-Scans um einige manuelle und automatische Neuvernetzungs-funktionen, welche die Qualität der Netze für Simulationsanwendungen verbessern sollen. Zudem ist ein Volumenvernetzer mit integriert. Allerdings lassen sich bei diesem Programm lediglich Dreiecks- (Oberflächen) und Tetraedernetze (Volumen) erzeugen. Eine gezielte Steuerung der Elementgrößen und -ausprägung scheint auch in diesem Modul nicht möglich.

Fazit: Neben der angesprochenen Problematik bei der Erzeugung von unverzerrten und homogenen Netzen, besonders auch in Bezug einer möglichen Netzverfeinerung oder bei Erzeugung strukturierter Netze in benötigten Bereichen, sieht der Autor hier besonders im weiteren Verlauf der CAE-Anwendung Probleme. So fehlt diesen Modellen grundsätzlich die Information über Kanten oder Flächenberandungen, was die Definition von Randbedingungen häufig erschwert. Eine denkbare Anwendung liegt aber in der Strömungssimulation, wo das Festkörpermodell häufig als starrer Körper betrachtet wird und lediglich die Umströmungsbedingungen relevant sind. Wie auch in allen anderen Fällen, ist es hier von elementarer Bedeutung, zunächst ein geschlossenes (mannigfaltiges) Modell zu erzeugen, was bereits in der Datenaufbereitung des Scanmodells einen erheblichen Mehraufwand bedeuten kann.

## 4.5 Anwendung von CAT-Methoden

Mittels Toleranzanalyse sollen Abweichungen und deren Auswirkungen auf die Bauteileigenschaften, sowie eine Veränderung der Montagefähigkeit in der Baugruppe, untersucht werden. In der Anwendung wird dies häufig mittels Software unterstützt, was den Begriff des Computer Aided Tolerancing (CAT) geprägt hat. Das CAT soll grundsätzlich eine Hilfestellung während der Produktentwicklung darstellen, um den Konstrukteur die vorgegebenen Toleranzen zu verdeutlichen und zu visualisieren um deren Auswirkungen besser verstehen zu können [135].

Methodisch kommen bei der Toleranzanalyse verschiedenen Verfahren zum Einsatz. Neben einer Worst-Case Analyse [136], bei der die maximal möglichen Abweichungen ermittelt werden, kommen ebenfalls häufig statistische Analysen zum Einsatz, welche die Auftretenswahrscheinlichkeit bei einer Normalverteilung eines Merkmals angeben können. Eine Erweiterung dieses statistischen Modells zur Ermittlung der Auswirkungen vorgegebener Toleranzen bietet die Monte-Carlo-Simulation [137]. Dabei werden die Abweichungen einzelner Toleranzen auf Basis der statistischen Verteilung, welche nicht normalverteilt sein muss, zufällig ausgewählt und die Auswirkungen auf vorher definierte Qualitätsmerkmale berechnet. Durch

eine hinreichende Anzahl an Wiederholungen kann damit eine Aussage über die Verteilung der Merkmale getroffen werden [138]. Diese Methode wird beispielsweise in der CAT-Software RD&T [139] von SÖDERBERG angewandt.

Einen besonders interessanten Ansatz zeigt SCHLEICH mit so genannten Skin Model Shapes (SMS) auf, unter anderem in [140]. Er verfolgt das Hauptziel, durch diese neuartige Modellform die geometrischen Abweichungen virtuell abzubilden und ein Grundelement für Toleranzanalysen zu generieren. Diese Darstellung basiert auf dem Konzept von Skin Models, entwickelt von BALLU und MATHIEU [141], und bildet die virtuelle Repräsentation des Skin Models mittels diskreten Geometrierepräsentationen wie Punktwolken oder Oberflächennetzen/Polygonmodellen (Bild 34).

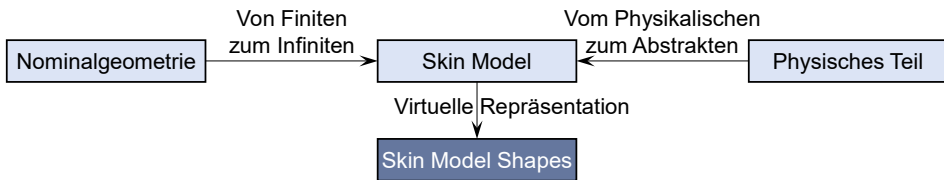


Bild 34: Skin Models und das Konzept von Skin Model Shapes nach [142]

Zur Erstellung der SMS werden die zu erwartenden systematischen Abweichungen beispielsweise mit Fourierreihen [143] und die zufälligen Abweichungen mit einem Gaußschen Zufallsfeld [144] ermittelt. Anschließend erfolgt eine Skalierung der Abweichungen. Die so erzeugten Modelle können somit zu Montage- und Bewegungssimulationen genutzt werden.

Fazit: Wie beschrieben, werden CAT-Werkzeuge dazu verwendet, um bei der Vergabe von Toleranzen zu unterstützen und das Verständnis der Auswirkungen besser zu verständlichen. Die erzeugten Abweichungsbilder in den Modellen werden durch die vergebenen Toleranzen selbst erzeugt und sind abhängig von dem entsprechenden Fertigungsprozess. Es wird also davon ausgegangen, dass eine fehlerfreie Tolerierung mit einer definierten Auftretenswahrscheinlichkeit vorliegt. Zwar werden für die Toleranzanalyse vielfach FE-Simulationen eingesetzt, eine Rückkopplung der ermittelten Modelle für beispielsweise strukturmechanische Anwendungen findet aktuell allerdings nicht als Teil des CAT statt.

## 4.6 Kombination aus Scan- und CAD-Daten (Hallenlayouts und Fabrikplanung)

Neben der bisher betrachteten reinen Produktsimulation mit der Auslegung von Bauteilen und Baugruppen werden auch weitere Simulationsmethoden unter Zuhilfenahme von realen Daten aus Scan-Prozessen angewendet. So wird diese Kombination besonders bei zwei Simulationsanwendungen verwendet:

- In der Fabrikplanung und für Hallenlayouts [145], sowie
- bei der Analyse des Fertigungsprozesses mittels einer Discrete Event Simulation (DES, Englisch: ereignisorientierte Simulation) zur Vorhersage eines Systemverhaltens in der Entwicklung von Produktionssystemen [146].

Das Vorgehen bei der Simulationsmodellerstellung ist in beiden Anwendungen ähnlich, die Ausgangssituation stellt sich jedoch unterschiedlich dar.

In der Planung von Fabriken und Hallen ergibt sich häufig das Problem, dass die Gebäude durch die üblichen Bauungenauigkeiten oder schlecht dokumentierten Umbauten von der Planzeichnung abweichen [145]. Ebenso kommen bei Fertigungsanlagen vielfach Kabeltrassen, Verrohrungen oder Zusatzaggregate hinzu, welche nicht dokumentiert sind. Auch komplette Maschinen sind häufig nicht in den Werkshallen- und Fabrikplänen zu finden. Es ergibt sich also in Wirklichkeit ein Stand von Fertigungshallen, welche gar nicht, unzureichend oder falsch dokumentiert sind. Daraus leitet sich entsprechend der Problemfall ab, dass Neu- oder Umplanungen der Produktionsanlagen in bestehenden Gebäuden nur sehr unzureichend simuliert werden können. Abhilfe kann dabei die Kombination aus dem virtuellen Modell der Fertigungsanlagen mit dem aktuellen Ist-Stand der baulichen Ausprägung mit den Standorten der weiteren Maschinenanlagen schaffen. Hierfür ist die Kombination der verschiedenen Datentypen notwendig.

Ein konkreter Anwendungsfall ist an der Technischen Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm durchgeführt worden. Beim Austausch einer alten Werkzeugmaschine durch ein neues Modell wurde zunächst mittels eines terrestrischen Laserscanners die Werkhalle erfasst, um die tatsächlichen Dimensionen exakt zu kennen. Dadurch konnte die vorhandene Maschine virtuell aus der Punktwolke entfernt werden und die neue Maschine entsprechend mit dem optimalen Standort und benötigten Raumbedarf durch das Einsetzen der CAD-Geometrie kalkuliert werden (Bild 35).

#### 4 Simulation abweichungsbehafteter Geometrien: Forschungsansätze und industrielle Umsetzungen

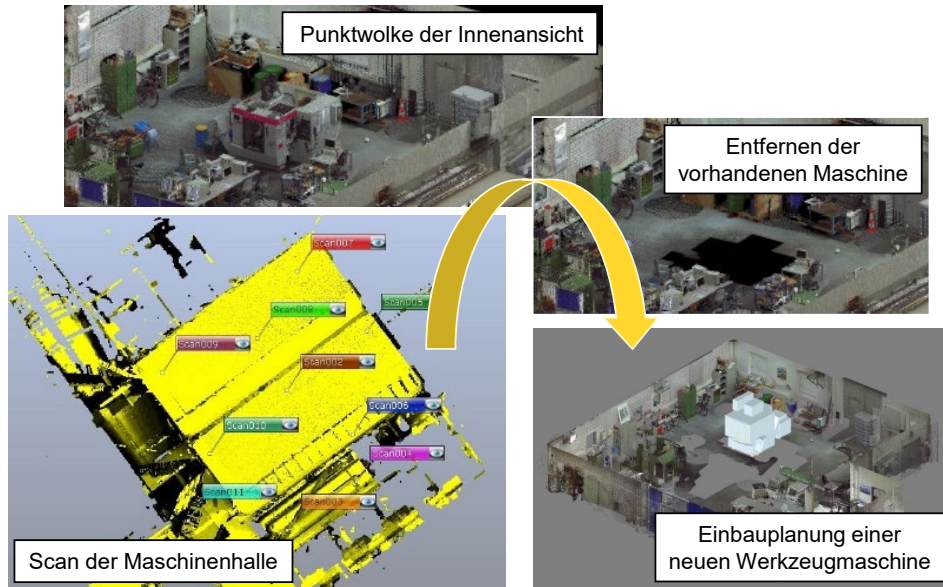


Bild 35: Planung der Positionierung einer neuen Werkzeugmaschine in der Fertigungshalle.

Um kostspielige Fehler im Entwicklungsprozess von Produktionsanlagen zu vermeiden, wird mittels diverser Simulationswerkzeuge versucht, diese möglichst gut nachzubilden [147]. Um dieses Ziel zu erreichen, werden DES eingesetzt, damit möglichst frühzeitig das Systemverhalten studiert und der Prozessfluss visualisiert werden kann [146]. Hierfür verwenden LINDSKOG und BERGLUND et al. in [2014] und [149] ebenfalls eine Kombination aus 3D-Scandaten der Hallen oder Fabriken in Form von Punktwolken, zusammen mit den im angestrebten Prozess verwendeten Maschinen und Robotern als Art Hybridmodell. Das folgende Bild 36 zeigt die durchgeführte Studie einer Simulation, bei der die Produktionsausrüstung (Roboter) als Volumenmodelle aus dem CAD-System in die Produktionshalle, bestehend aus einer gescannten Punktwolke, platziert sind.



Bild 36: Hybridmodell aus Punktwolke (Gebäude) und CAD-Objekten (Fertigungs-ausrüstung) [149].

Fazit: Diese Art der Simulation bietet ein enormes Potenzial zur Beurteilung bei Fabrikplanung, Hallenlayouts und Produktionsprozessen. Besonders die Möglichkeit, solche Gebäude virtuell mittels Virtual/Augmented Reality zu begehen, fördert das Vermögen, sich neu geplante Anlagen vorstellen und vorab bewerten zu können. Die größte Herausforderung zur Anwendung solcher Projekte sieht der Autor in Anlehnung an LINDSKOG und BERGLUND darin, dass es kaum Software zur Visualisierung und Bearbeitung von sowohl CAD-Daten als auch Punktwolken gibt, sowie die unterschiedlichen Datentypen, welche miteinander verbunden werden müssen. Hinzu kommt die große Datenmenge, welche Punktwolken zum Speichern und während der Verarbeitung benötigen



## 5 Kernpunkte dieser Arbeit

Ausgehend von der Problemstellung (Kapitel 2) und den im vorigen Kapitel 4 dargestellten Ansätzen aus der Forschung, zusammen mit den etablierten Anwendungen in der Industrie, wurde aufgezeigt, dass es einen großen Bedarf an Simulationen mit realen, abweichungsbehafteten Geometriemodellen gibt. Die vorgestellten Lösungen sind vielfältig, jedoch jeweils stets mit einigen inhärenten Nachteilen versehen:

- Der RE-Prozess ist enorm Zeitaufwändig und vielfach gar nicht für sämtliche Teilbereiche notwendig.
- Das Morphing von FE-Netzen erfordert ein Solid-Geometriemodell als Ziel zur Vorgabe.
- Adaptive FE-Netze setzen ein mehrfaches Anwenden des RE-Prozesses und eine manuelle Verknüpfung von Grundelementen zwischen den Scan- und FE-Daten voraus.
- Eine direkte Verwendung von Polygonnetzen aus einem Scanprozess erfüllt die Anforderungen an Simulationsanwendungen im Regelfall nicht.

Weiterhin bleibt bei sämtlichen Ansätzen die Frage offen, wann und in welchem Umfang eine Modellaufbereitung zu erfolgen hat, um eine Steigerung der Aussagekraft der Simulation zu erzielen.

Daraus ergeben sich die folgenden Kernpunkte dieser Arbeit um Simulationen zu bewerten und simulationsfähige Modell zu erzeugen:

- Die Schaffung eines Prozesses zur Evaluation von Produktsimulationen auf deren Aussagekraft. Basis hierfür ist ein Vergleich des nominellen CAD-Modells mit erzeugten Scandaten eines gefertigten Bauteils. Unterstützung erhält der Anwender von einer Wissensbasis, welche die notwendigen Informationen zu Produkt und Fertigung bereitstellt.
- Die Bereitstellung von Anwendungen, um Modelle mittels der erzeugten nativen Scandaten direkt auf die tatsächliche, abweichungsbehaftete Geometrie aufzubereiten.



## 6 Konzept zur Evaluation durchgeführter Produktsimulationen und zur Bereitstellung abweichungsbehafteter Geometriemodelle

In Kapitel 4 wurden verschiedene wissenschaftliche Anwendungen und industrielle Umsetzungen zur Verwendung von Scandaten in Simulationsprozessen vorgestellt. Im aktuellen Kapitel wird die Methodik dargelegt, mit welcher für eine Produktsimulation mittels Geometrievergleich überprüft wird, ob die durchgeführte Vorauslegung die benötigte Aussagekraft besitzt. Dieser Prozess stellt eine systematische Vorgehensweise zur Evaluation zur Verfügung und zeigt, je nach bereits vorhandenem Modellstatus, verschiedene Möglichkeiten auf und gibt entsprechend Empfehlungen dazu, wie gegebenenfalls das Simulationsmodell mit tatsächlich gefertigten, abweichungsbehafteten Geometrieinformationen aufbereitet werden kann.

### 6.1 Übersicht Gesamtprozess

Das Vorgehen in diesem Gesamtprozess umfasst folgende Bausteine:

Es erfolgt:

- ein reiner Geometrievergleich von nominaler CAD-Geometrie mit der tatsächlich gefertigten Kontur aus einem 3D-Scan,
- die Bewertung der auftretenden einzelnen Abweichungserscheinungen und
- gegebenenfalls eine Empfehlung zur Modellanpassung für die Simulation mittels verschiedener Vorgehensweisen.

Den Ausgangspunkt bildet dabei also der Vergleich der nominalen Geometrie (Soll) mit der realen, tatsächlich gefertigten Geometrie (Ist) des Bauteils (Bild 37). Der Soll-Zustand wird mit dem konstruierten, dreidimensionalen Produktmodell aus dem CAD-System repräsentiert. Die Ist-Kontur muss für den Vergleich zunächst generiert werden. Dafür bieten sich nach aktuellem Stand vor allem Methoden der dreidimensionalen Datenerfassung des Bauteils eines (werkzeugfallenden) Prototyps an. Die Alternative dazu bietet wiederum eine Simulation des Herstellprozesses (Prozesssimulation/Fertigungssimulation). Diese findet vorwiegend bei Umformprozessen und Gussbauteilen statt, zeigt aber noch keine quantitativ

verlässlichen Ergebnisse, welche für die exakte Abweichungsbetrachtung sinnvoll herangezogen werden können. Somit bleibt im Regelfall der Vergleich von CAD-Daten zu Scanmodell. Durch die Flexibilität des Vergleichsprozesses bleibt es aber jederzeit möglich, auch Fertigungssimulationen, welche für gewöhnlich die gleiche Datenstruktur aufweisen, hierfür zu einem späteren Zeitpunkt heranzuziehen.

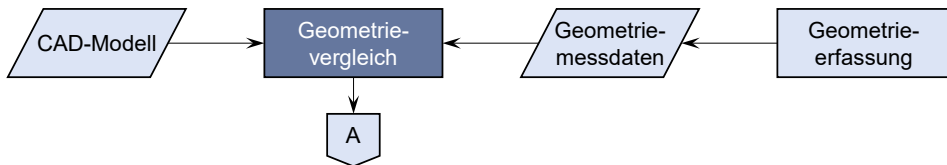


Bild 37: Geometrievergleich von CAD-Modell und Messdaten.

Die Bewertung der Ergebnisse findet im zentralen Bewertungsbaustein der vorliegenden Arbeit statt (Bild 38). Dabei wird auf eine zentrale Wissens- und Datenbasis zugegriffen, welche die Informationen zu dem Bauteil und der dafür notwendigen Peripherie beinhaltet. Bei einer unkritischen Einstufung der Abweichungen sind keine weiteren Schritte erforderlich.

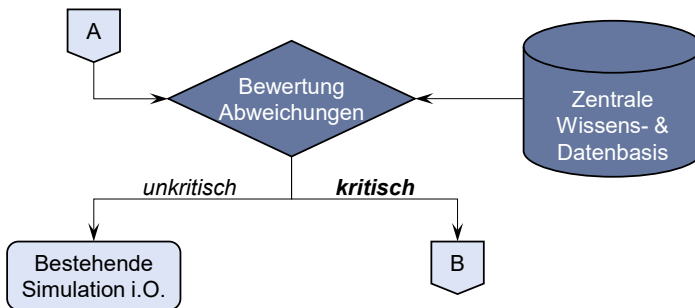


Bild 38: Bewertung des Geometrievergleichs mit Unterstützung der Wissens- und Datenbasis.

Bringt die Bewertung eine möglicherweise kritische Ausprägung hervor, so wird eine Empfehlung ausgegeben, die Simulation mit einem um die relevanten Abweichungen aufbereiteten Geometriemodell erneut durchzuführen (Bild 39). Hierzu stehen verschiedene Methoden zur Verfügung, welche in Abhängigkeit des Modellstatus vorgeschlagen werden und durchgeführt werden können.

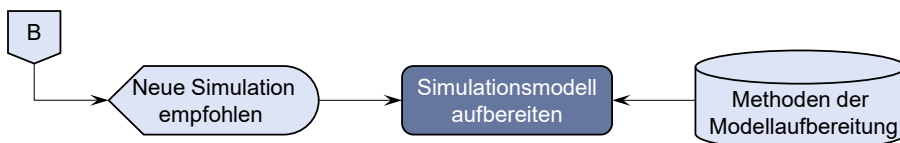


Bild 39: Bereitstellung von Methoden zur Aufbereitung des Simulationsmodells.

## 6.2 Wissensinhalte aus dem Gesamtprozess

Zur Klassifizierung der Abweichungen wird eine Vielzahl von Informationen benötigt, um die relevanten Strukturen gezielt bewerten zu können. Dabei kommen die gesammelten Wissens Elemente aus den verschiedenen Bereichen in einer Datenbank zusammen. Diese werden dem Produktentwickler im Entscheidungsfindungsprozess entsprechend zur Verfügung gestellt. Somit kann eine qualifizierte Aussage entwickelt werden, welche vorhandenen Fertigungsabweichungen schlussendlich Auswirkungen auf die Aussagekraft von Simulation haben können.

Das vorhandene Wissen gliedert sich dabei zum einen in produktspezifisches Wissen und zum anderen in Prozesswissen, welche in Form von Fakten, Erfahrungen und/oder Methoden vorliegen [150]. Das produktspezifische Wissen beinhaltet alle Wissens Elemente, die direkt mit dem aktuell behandelten Produkt oder Einzelteil in Zusammenhang stehen. Das Prozesswissen integriert alle Erkenntnisse über die unterschiedlichen Prozessschritte bei der Fertigung und Analyse (Bild 40). Die Akquisition der Wissens Elemente erfolgt dabei sowohl auf direktem Wege, durch Eingabe von Experten der entsprechenden Fachdomänen, als auch indirekt über Rückflüsse aus dem Entscheidungsprozess.

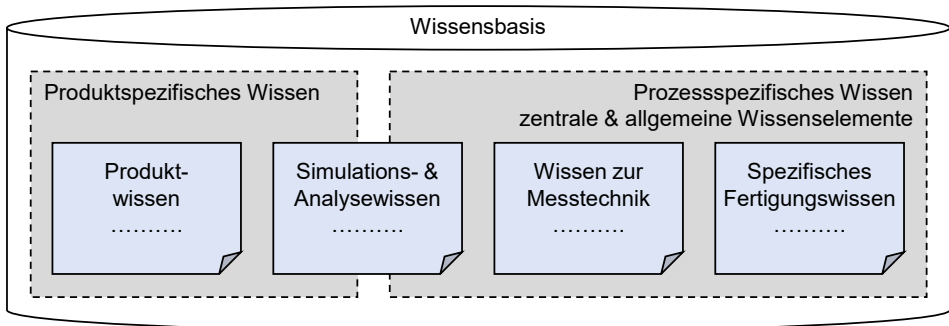


Bild 40: Wissens Elemente innerhalb der Prozessdatenbank.

Als übergreifende Informationen im Bereich des produktspezifischen Wissens kann zunächst der lose Soll-Ist-Vergleich des Geometriemodells mit der tatsächlichen, digitalisierten Geometrie angesehen werden. Dieser liefert bereits eine Ansicht über die entsprechenden Abweichungen am Produkt und ist häufig ein früher Indikator für eine qualitative Aussage über mögliche Anpassungen.

Zur Verdeutlichung wurden Untersuchungen mit einem einfachen Fall an gestellt, welche das prinzipielle Verhalten der Spannungsänderung  $\Delta\sigma$  bei

verschiedenen, statischen Belastungen auf die an der Oberfläche befindlichen FE-Netzknotten aufzeigen. Hierbei wird eine einfache Stabgeometrie mit definierten reinen Lastfällen (Zug, Druck, Biegung und Torsion) simuliert. Zur Betrachtung der Änderungen durch Fertigungsabweichungen werden symmetrisch definierte Abweichungen analysiert. Fasst man die Ergebnisse aller Simulationen zusammen, ergibt sich das folgende Diagramm (Bild 41). Dabei sind auf der Abszisse die geometrischen Abweichungen in senkrechter Richtung zur Bauteiloberfläche aufgetragen. Die Ordinate gibt die Veränderungen der Vergleichsspannung  $\Delta\sigma$  nach von Mises, jeweils relativ zum analytischen Maximalwert bei Betrachtung der Regelgeometrie ohne Abweichungen.

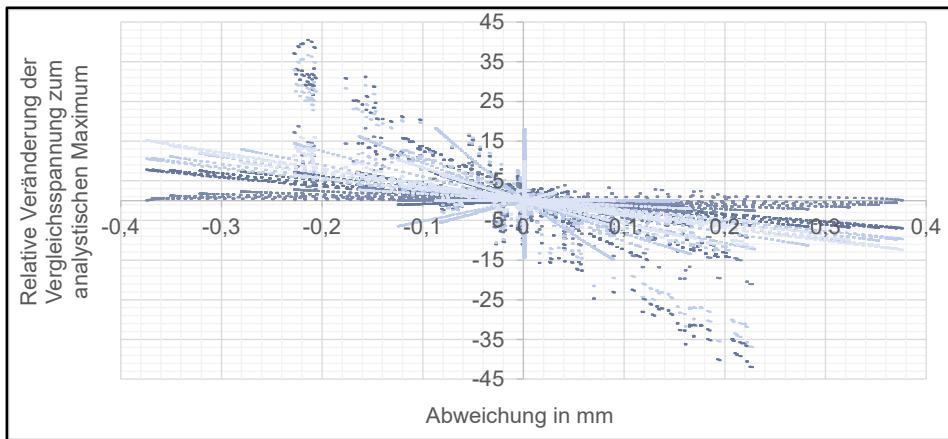


Bild 41: Relative Vergleichsspannungsänderung in Abhängigkeit der Höhe und Richtung der geometrischen Abweichung.

Es zeigt sich dabei eine deutliche Anhäufung der Punkte im II. und IV. Quadranten. Dies ist ein eindeutiger Hinweis, dass die Spannung bei negativer Abweichung (gedachten Einfallstellen) an der Bauteiloberfläche zunimmt und eine positive Abweichung (eine Aufdickung an dem entsprechenden Knotenpunkt) in einer Spannungsreduktion resultiert. Somit können bereits vorab, rein aus der Abweichungsbetrachtung von Soll- und Ist-Zustand, Aussagen über das Änderungspotenzial der Struktursimulation getroffen werden.

Neben dem reinen Geometrievergleich und der Abbildung von Abweichungen in positiver oder negativer Richtung spielen zur Bewertung noch einige andere Faktoren eine Rolle. So können minimale Abweichungen bereits einen großen (negativen) Einfluss auf die Bauteileigenschaften aufweisen, wenn diese in schon hochbelasteten Bereichen auftreten, in denen nur wenig Materialreserve vorhanden ist. Ebenso ist der umgekehrte Fall denkbar,

bei welchem zwar gravierende Abweichungen von Soll und Ist festzustellen sind, diese aber in vollkommen unbelasteten Bereichen auftreten und die Spannung dort möglicherweise anheben, aber dennoch deutlich unter der Materialgrenze bleiben. Ein ebenso mögliches Szenario ist, dass Abweichungen an ungünstigen Stellen zwar diese selber nicht oder nur wenig beeinträchtigen, aber dafür an anderen Positionen gravierende Verschlechterungen des Bauteilverhaltens nach sich ziehen.

Um auch diesen genannten Punkten im Prozess Rechnung zu tragen, werden in der Wissens- und Datenbasis die verschiedenen Informationen gesammelt und aufbereitet. Im Folgenden werden alle Inhalte dargestellt. Dabei wird auf die jeweils vorliegende Datenstruktur sowie der Informationsgehalt erläutert.

### 6.2.1 Produktwissen

Im Bereich der produktspezifischen Inhalte ist das direkte Wissen des betreffenden Bauteiles verortet. Für den hier beschriebenen Ansatz ist die Bauteilgestalt selbst die Eigenschaft mit dem höchsten Gewicht. Diese wird in Form des digital entwickelten 3D-Modells und/oder einer Technischen Zeichnung zur Verfügung gestellt. Es wird dabei der Fokus auf die geometrischen Aspekte gelegt, welche dargestellt werden, da ein Integriertes Produktmodell (mit sämtlichen Informationen über den gesamten Produktlebenszyklus nach GRABOWSKI et al. [151]) häufig nicht zur Verfügung steht, besonders wenn Daten von Extern verwendet werden oder verschiedene Programme mit unterschiedlichen Datenformaten angewandt werden müssen. Allgemein enthält die Zeichnung (oder auch das 3D-Modell nach aktueller ASME-Normung) alle vom Produktentwickler zulässigen Abweichungen für Funktionsflächen des Bauteils. Mit diesen Toleranzwerten wird festgelegt, dass die Abweichungen nur so groß sein dürfen, dass die Funktion des Bauteils in jedem Fall erfüllt werden kann.

Der Produktentwickler vergibt zur Begrenzung der Abweichungen auf relevanten Bauteilflächen einerseits Allgemeintoleranzen, die für das gesamte Bauteil gelten und andererseits spezielle Toleranzen für ausgewählte Flächen.

Im deutschsprachigen und europäischen Raum sind hierfür die entsprechenden Richtlinien und Normen der Geometrischen Produktspezifikation (GPS) nach dem Matrix-Modell der DIN EN ISO 14638 [152] notwendig und hinterlegt:

- Grundlegende Normenwerke, wie die Tolerierungsgrundsätze nach DIN EN ISO 8015: „Geometrischen Produktspezifikation (GPS) – Grundlagen – Konzepte, Prinzipien, Regeln“ [153], die 2011 zurückgezogene DIN 7167: „Hüllbedingung ohne Zeichnungseintrag“ [154] sowie die DIN EN ISO 14405: „Geometrischen Produktspezifikation (GPS) – Dimensionelle Tolerierung“ [155].
- Die allgemeinen Schriften zur Beschreibung der geometrischen Eigenschaften, wie DIN EN ISO 286: „Geometrischen Produktspezifikation (GPS) – ISO-Toleranzsystem für Längenmaße“ [156], DIN EN ISO 1302: „Geometrischen Produktspezifikation (GPS) – Angabe der Oberflächenbeschaffenheit in der technischen Produktdokumentation“ [157] oder DIN EN ISO 1101: „Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Geometrische Tolerierung – Tolerierung von Form, Richtung, Ort und Lauf“ [158].
- Und die ergänzenden Normen, welche die speziellen Herstellprozesse und spezielle Maschinenelemente berücksichtig, hauptsächlich dabei die Allgemeintoleranzen nach DIN ISO 2768 [159], sowie beispielsweise DIN EN ISO 8062: „Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Maß-, Form- und Lagetoleranzen für Formteile“ [160] und DIN EN ISO 13920: „Allgemeintoleranzen für Schweißkonstruktionen“ [161].

Mittels der vorliegenden Richtlinien und Normenwerke können Allgemeintoleranzen, welche üblicherweise nicht in Zeichnungen dargestellt werden, direkt überblickt und quantifiziert werden und Unklarheiten über Toleranzangaben nachgeschlagen und somit die Ausprägungen am Bauteil besser bewertet werden.

Die Kombination von Allgemeintoleranzen und Einzeltoleranzen beschreibt die zugelassenen Abweichungen aller Funktionsflächen des Bauteils. Ausgehend von einer korrekten Vergabe der Toleranzen ist die Einhaltung oder Nicht-Einhaltung der Toleranzen ein aussagekräftiges Indiz für die Qualität des später produzierten Bauteils. Um unmittelbar über die Abweichungen urteilen zu können, ist es essenziell, auf sämtliche Informationen der Toleranzangaben zurückgreifen zu können.

Problematisch bleibt aber die Darstellung der Abweichungen, um deren Folgen abschätzen zu können. Hierfür unterstützt ein Modell oder eine Zeichnung des Zusammenbaus, um gravierende Auswirkungen auf die Baugruppe durch auftretende Abweichungen zu erkennen. Somit wird dem Produktentwickler gezielt die Funktion des einzelnen Bauteils in der Gesamtkonstruktion vor Augen geführt und wie durch eine Veränderung der

Gestalt die Funktion der Gesamtbaugruppe negativ beeinträchtigt werden könnte.

Neben den Daten, die das aktuelle Produkt betreffen, bietet sich innerhalb eines Unternehmens die Darstellung von ähnlichen Komponenten oder Vorgängerversionen zu diesem Bauteil an. Sind an diesen Teilen Schwachstellen oder Versagensbereiche bekannt, wird der Produktentwickler zu einer erhöhten Aufmerksamkeit beim aktuellen Bauteil an diesen Stellen sensibilisiert. Hierfür sind, sofern verfügbar, entsprechend Versuchsberichte oder Informationen aus dem laufenden Betrieb dieser Teile hinterlegt.

Zu informativen Zwecken können auch andere produktspezifische Merkmale mit den entsprechenden mechanischen Eigenschaften hinterlegt sein.

### **6.2.2 Simulations- und Analysewissen (Berechnungswissen)**

Zur Abschätzung eines bestimmten Verhaltens lassen sich diverse – hauptsächlich numerische – Berechnungen anstellen, um jenes Verhalten unter der angenommenen Belastung möglichst frühzeitig vorhersagen zu können. Dabei entstehen Wissens Elemente, welche als Simulationswissen deklariert werden. Die Simulation von Geometrieformen in der Produktentwicklung lässt sich nach dem Anwendungsfall gliedern. Wird das Bauteil selbst (beispielsweise hinsichtlich Festigkeit, Nachgiebigkeit, Schwingungsverhalten, Strömungsverhältnisse oder ähnliches) analysiert, spricht man als Überbegriff von der Produktsimulation. Im Bereich des Fertigungsprozesses lässt sich aber mit ähnlichen Methoden auch die Herstellung vorab simulieren. Diese sind besonders im Bereich des Umformens und des Gießens anzutreffen. Das Simulationswissen ist demnach sowohl in der Gruppe des produktspezifischen, als auch in der Gruppe des prozessspezifischen Wissens verortet.

Die Produktsimulation ist hierbei die allgemeingültigere und bereits sehr etablierte Methode zur Vorhersage von Bauteilverhaltens unter Last, wodurch ein Großteil der Schwachstellen bereits frühzeitig in der Produktentwicklung festgestellt und eliminiert werden können.

Die Bereiche der Prozesssimulation hingegen sind häufig qualitativer Natur und können die entstehenden Abweichungen nur ungenügend quantifizieren. Daher wird die Digitalisierung der Bauteile als notwendige Bedingung angesehen, um möglichst exakte Abweichungsausprägungen und -details abzubilden.

Der Fokus im Bereich des Simulationswissens liegt darum hauptsächlich auf der Produktsimulation. Im Speziellen werden hierbei die folgenden Inhalte in der Datenbasis abgelegt:

- Wenn bereits vorhanden, werden die Simulationsergebnisse des aktuellen Bauteils dargestellt. Somit lassen sich direkt die Bereiche erkennen, welche grundsätzlich hohen Belastungen ausgesetzt sind. Zusammen mit der Darstellung der Abweichungen aus dem Soll-Ist-Vergleich lassen sich hierdurch bereits frühzeitig etwaige Versagensbereiche identifizieren. Überdecken sich die Spannungsspitzen in einem konzentrierten Bereich, mit zeitgleichem Vorliegen von festigkeitsmindernden Fertigungsabweichungen, ist in diesen Bereichen von einer erhöhten Versagensgefahr auszugehen.
- Eine ähnliche Aussagekraft kann innerhalb eines Unternehmens mit Vorgängerversionen und ähnlichen Bauteilen aus dem Unternehmensportfolio entstehen. Sind dabei Schwachstellen an bestimmten Belastungsbereichen bekannt, muss in Betracht gezogen werden, dass beim aktuellen Bauteil ähnlichen Schwächen auftreten könnten. Somit sollte dieser Abschnitt unter besonderer Beobachtung stehen und auftretende Formabweichungen genauestens inspiziert werden.

Mit den Berichten über die Simulationsergebnisse ist selbstverständlich auch die Korrektheit und Plausibilität der durchgeführten Analysen ein entscheidender Faktor. Zur Überprüfung von Simulationsergebnissen stellt SPRÜGEL in [162;163] eine Plausibilitätsprüfung für FE-Simulationen mittels sphärischer Detektorflächen vor, welche sich für diesen Zweck anbietet.

Zusätzlich zu den strukturmechanischen Ergebnissen liefert die Modellvorstellung des Kraftflusses durch ein Bauteil oder eine Baugruppe eine anschauliche Darstellungsform für kraftführende Bereiche [164], von der Krafteinleitung hin zum Ort des aufnehmenden Lagers. Es werden demnach die belastungsintensiven Bereiche gezeigt, welche bei zusätzlich auftretender Abweichung eine Schwächung der Bauteilstruktur verursachen können. Zur Visualisierung des Kraftflusses können die Hauptspannungsvektoren integriert werden und somit die Kraftflusslinien dargestellt werden [165]. Alternativ bildet die Netzdarstellung die kraftdurchflossenen Bereiche ab (Bild 42).

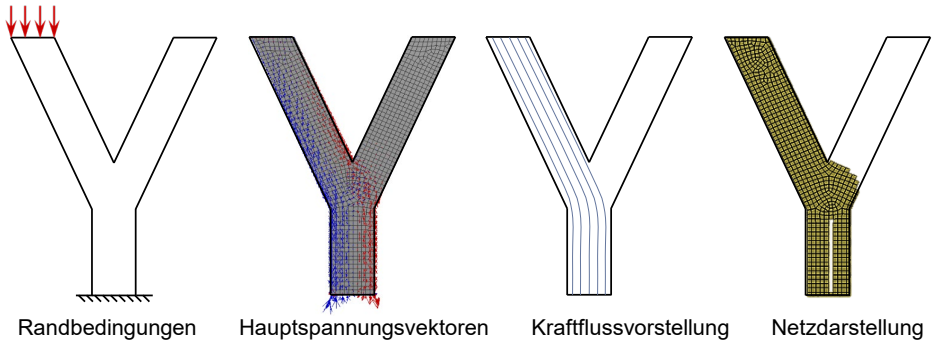


Bild 42: Modell des Kraftflusses zur Darstellung belasteter Bereiche.

Mit dieser Darstellungsform werden die belasteten Bereiche der Komponente entsprechend sichtbar. Somit können dort gezielt die weiteren Einflussfaktoren (Abweichungen und Spannungen) begutachtet und bewertet werden.

### 6.2.3 Wissen zur Messtechnik

Der Bereich des Wissens zur Messtechnik umfasst die Abschätzung der Fehlerkette durch die Bearbeitungsschritte der Digitalisierung, mit welcher die Daten des Objektes aufgenommen werden können. Das Ziel dabei ist folglich, eine Einschätzung geben zu können, mit welcher Verlässlichkeit die Scandaten erfasst und betrachtet werden können. Hierbei kommen die verschiedenen Abweichungen zum Tragen, welche durch die unterschiedlichen Prozessschritte des Digitalisierens und Aufbereitens der Daten entstehen. Dazu gehören:

- Abweichung und Wiederholgenauigkeit des Scansystems,
- Größe und Art des gemessenen Objektes,
- Tessellierung der Punktwolke zu Polygonmodellen,
- weiterführende Arbeiten zur Erzeugung höherwertigerer Flächen (NURBS) und
- Registrierung von Einzelscans zueinander, aber auch von Nominalgeometrie und Scandaten.

Die Genauigkeit des Scansystems hängt von vielen Faktoren ab. Das physikalische Grundprinzip der Messeinrichtung gibt bereits einen Rahmen für die Genauigkeit vor. Über das Datenblatt des Geräteherstellers sind die Abweichungen  $\Delta X_{Hardware}$  spezifiziert.

Mit vorliegenden Rohscandaten erfolgt die Datenaufbereitung und -verarbeitung. Dazu müssen im Regelfall die Vielzahl der Einzelpunkte reduziert

werden. Somit können die Einzelpunkte zu handhabbaren Datenmengen als dreieckseitige Flächennetze tesseliert werden. Dieser Schritt beinhaltet eine weitere Abweichungsquelle  $\Delta x_{\text{Vernetzung}}$ , da die Punktdaten innerhalb einer festgelegten Toleranz reduziert und vereinfacht werden.

Nach der Vernetzung liegt häufig noch ein fehlerbehaftetes Netz vor. Dieses kann mittels Glättungsalgorithmen, Netzverfeinerungen/-vergrößerungen oder Methoden zum Schließen von Löchern aufbereitet werden. Dieses Vorgehen liefert einen weiteren Einflussfaktor  $\Delta x_{\text{Datenaufbereitung}}$ .

Im möglichen letzten Schritt, der Erzeugung von höherwertigeren, tangential-/krümmungsstetigen Flächen aus dem Dreiecksnetz, entstehen ebenfalls weitere Abweichungen  $\Delta x_{\text{Flächenrückführung}}$  zu den gescannten Rohdaten. Hierbei wird die endliche Anzahl an Stützstellen für die Flächenbeschreibung so gewählt, dass die Gesamtfläche im Mittel eine möglichst geringe Abweichung zu den Daten aufweist.

Eine Registrierung der Daten kann ebenfalls Ungenauigkeiten  $\Delta x_{\text{Registrierung}}$  hervorrufen. Diese kann bei einer Daten-zu-Daten-Registrierung anfallen (wenn das Messsystem ein Objekt nicht vollständig erfassen kann und demnach mehrere Einzelscans zu einer Gesamtheit zusammengefügt werden müssen), genauso wie bei einer Daten-zu-Referenz-Registrierung (wenn die Scandaten zu einem nominalen CAD-Referenzmodell ausgerichtet werden).

Die Abweichungskette zur Gesamtabweichung  $\Delta y_{\text{Gesamt}}$  stellt sich daraufhin wie folgt dar:

$$\begin{aligned} \Delta y_{\text{Gesamt}} = & \left| \frac{\partial y}{\partial x_{\text{Hardware}}} \right| \cdot \Delta x_{\text{Hardware}} \\ & + \left| \frac{\partial y}{\partial x_{\text{Vernetzung}}} \right| \cdot \Delta x_{\text{Vernetzung}} \\ & + \left| \frac{\partial y}{\partial x_{\text{Datenaufbereitung}}} \right| \cdot \Delta x_{\text{Datenaufbereitung}} \\ & + \left| \frac{\partial y}{\partial x_{\text{Flächenrückführung}}} \right| \cdot \Delta x_{\text{Flächenrückführung}} \\ & + \left| \frac{\partial y}{\partial x_{\text{Registrierung}}} \right| \cdot \Delta x_{\text{Registrierung}} \end{aligned} \quad (14)$$

Das Ziel in diesem Bereich ist schlussendlich, eine Einschätzung der Gesamtgenauigkeit bei der Datenerhebung durch die verwendete Messtechnik und notwendigen Algorithmen zu bekommen. Dies geschieht durch folgende Aspekte:

- Einschätzung des Aufwandes für die Messaufgabe mit der eigentlichen Messung und entsprechender Datenaufbereitung.
- Erklärung zu den physikalischen Prinzipien der gewählten Messtechnik.
- Darstellung der Abweichungskette, in Abhängigkeit vom physikalischen Prinzip, Scan-Hardware, Produktgröße und Produktart.
- Einordnung der zu erwartenden Genauigkeit in Abhängigkeit vom Rohdatensatz mit der Abweichungskette.

Mit diesen Informationen kann die Abschätzung der zu erwartenden Genauigkeit erfolgen.


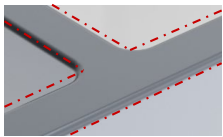
#### **6.2.4 Spezifisches Fertigungswissen**

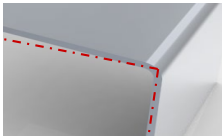

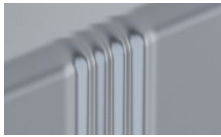
Betrachtet man das entsprechende Fertigungsverfahren, mit dem einzelne Komponenten gefertigt werden, lassen sich hierbei jeweils individuelle Arten und Formen von Abweichungen feststellen. So können Abweichungen lokal auftreten und lokal wirken (wie etwa die einfache Maßabweichung einer Bohrung) oder auf das gesamte Bauteil einen globalen Effekt ausüben (zum Beispiel durch Verzug nach dem Gießen). Diese spezifischen Abweichungen müssen in der Datenbank hinterlegt werden, um dem Produktentwickler dargestellt werden zu können. Dazu gibt der entsprechende Fertigungsspezialist sämtliche bekannte Größen und Auswirkungen an. Ist eine Abweichung hauptsächlich auf eine Ursache zurückzuführen, kann zudem eine Herkunft zu informativen Zwecken mit angegeben werden.

Die im einzelnen Fertigungsprozess auftretenden Abweichungsformen können sehr unterschiedlich ausfallen, weshalb hier exemplarisch nur die beiden Verfahren des Gießens und des Tiefziehens dargestellt werden sollen. Diese beiden Verfahren sind hier als Vertreter für Umform- und Urformverfahren, wodurch sich die Inhalte teils auch auf andere Fertigungsverfahren übertragen lassen. Eine Erweiterung der Inhalte sollte jeweils für angewandte Fertigungsverfahren erfolgen. Sie sind mit ihren möglichen Abweichungen in Tabelle 8 erfasst.

Jedem Bauteil werden entsprechend ein oder mehrere Fertigungsverfahren zugeordnet und somit die Fülle an Abweichungen prozessspezifisch eingeschränkt.

Tabelle 8: Klassifizierte spezifische Fertigungsabweichungen an den gewählten Beispielfertigungsverfahren Gießen und Tiefziehen.

<b>Gießen</b>			
Abweichungsbild	Einfallstelle	Schrumpfung	Verzug
Region	Lokal	Global	Global/Lokal
Auswirkung	Einfall	Bauteil verkleinert	Formabweichung
Einflussgröße	Klein bis groß	Klein	Mittel
Herkunft	Materialanhäufung, inhomogenes Abkühlverhalten	Auslegung	Materialanhäufung, inhomogenes Abkühlverhalten, lokaler Schrumpf
Bild/Erklärung			

<b>Tiefziehen</b>			
Abweichungsbild	Rückfederung	Wellenbildung	Faltenwurf
Region	Global	Lokal	Lokal
Auswirkung	Formabweichung	Wellige Oberfläche	Falten
Einflussgröße	Klein	Mittel	Groß
Herkunft	Geringe Überbiegung	Geringe Niederhaltekraft	Geringe Niederhaltekraft
Bild/Erklärung			

## 6.3 Wissensbereitstellung

Wie vorausgehend dargestellt, beinhaltet die Wissens- und Datenbasis eine Vielzahl an verschiedenen Informationen, welche das betrachtende Bauteil betreffen. Die Datenbank, die diese Wissens Elemente enthalten soll, ist aber zunächst damit zu füllen. Hierfür können verschiedene Methoden der direkten, indirekten und automatischen Wissensakquisition zum Tragen kommen. Im Folgenden werden die Herausforderungen bei der Akquisition und Bereitstellung des vorhandenen Wissens beschrieben und ein Lösungsansatz aufgezeigt.

### 6.3.1 Wissenserzeugung und -bereitstellung: Herausforderungen

Für viele Bereiche der Wissensbasis bildet die direkte Wissensakquisition den richtigen Ansatz. Hierbei bringen die Experten der Unterbereiche ihr spezifisches Fachwissen direkt ein. Besonders in den Bereichen des Produkt-, Messtechnik- und Fertigungswissens bedeutet das:

- Das Produktwissen beinhaltet die Angaben über das jeweilige Bauteil. Hier sind Produktentwickler und Konstrukteure als Spezialisten mit darin gefordert, sämtliche relevante Daten über die geometrischen Eigenschaften (CAD-Modell, Zeichnungen) und das Zusammenspiel mit anderen Teilen in der Baugruppe (Einbaubedingungen, Funktionsweise) systematisiert in der Datenablage zu hinterlegen.
- Die Angaben für die messtechnischen Systeme, über Genauigkeitsangaben und damit die Verlässlichkeit der digitalisierten Strukturen müssen von einem Messspezialisten vereinheitlicht aufbereitet und eingegeben werden.
- Eine besondere Relevanz kommt dem Fertigungsspezialisten zu. Dieser muss die für das jeweilige Fertigungsverfahren typischen Abweichungsbilder klassifizieren und beschreiben. Darüber hinaus sollen Hintergründe für das Auftreten der Ungenauigkeiten und deren Auswirkungen in diesem Abschnitt genannt werden.

Für den letzten großen Informationsbereich der Simulation sollen neben der direkten/indirekten Wissensakquisition auch bereits vorhandene Ergebnisse von dem aktuellen Produktstand, von Vorgängermodellen oder artverwandten Bauteilen zur Verfügung gestellt werden.

Die Wissens Elemente im Bereich der Simulation können aber extrem vielfältig sein und lassen sich dementsprechend nur schwer gliedern und bereitstellen. Berechnungsergebnisdateien sind im Regelfall sehr komplex und lassen sich häufig nur mit entsprechendem Fachwissen darstellen und interpretieren. Zudem ist häufig eine spezielle Software zur Verarbeitung nötig. Im Allgemeinen ist die Berichtsform mit Text und Bildern für Simulationsergebnisse etabliert, woraus das Wissen extrahiert werden muss.

So kommen neben komplexen Berechnungsergebnisdateien, welche im Regelfall unhandliche Dateigrößen haben und auch lediglich von der entsprechenden Software verarbeitet und dargestellt werden können, vornehmlich Berichte in Text- und Bildform vor.

In diesem Bereich wurden in dem Forschungsvorhaben FORPRO<sup>2</sup> - Effiziente Produkt und Prozessentwicklung durch wissensbasierte Simulation [166] mehrere Ansätze erarbeitet, wie dieses Simulationswissen aus den Berichten extrahiert werden kann. Dazu zeigen BREITSPRECHER und KESTEL verschiedene Text- und Data-Mining-Ansätze auf, um gezielt das im Bericht enthaltene Wissen herauszuziehen und systematisiert abzulegen [167; 168]. Die gewonnenen Erkenntnisse der bisherigen Simulationsergebnisse können in die Datenbank eingepflegt werden und zu späteren Zeitpunkten situativ entsprechend bereitgestellt werden.

Neben der vorherigen Befüllung der Wissens- und Datenbasis entstehen in dem eigentlichen Prozess ebenso wertvolle Informationen und Daten, welche entsprechend zurückgeführt werden müssen, um für die weiteren Schritte oder spätere Entwicklungen wieder zur Verfügung zu stehen.

Generell werden in der Basis unterschiedlichste Wissens Elemente gesammelt und abgelegt. Diese sind zunächst in unstrukturierter Form vorliegend, was den Überblick und die Auswertung durch den Produktentwickler behindert. Dadurch kann die Fähigkeit, mit den vorhandenen Daten, die richtigen Schlüsse zu ziehen, negativ beeinflusst sein. Zur Adressierung dieses Problems, sind eine prozessabhängige Wissensbereitstellung, mit den situativ benötigten Informationen und Daten, sowie eine Nutzerführung durch den Prozess notwendig. Das methodische Vorgehen hierzu wird im Folgenden erläutert.

### 6.3.2 Prozessabhängige Wissensbereitstellung

Die aufgezeigten Probleme der unstrukturierten Daten- und Wissensablagen müssen behoben werden, um den Prozess praktikabel zu gestalten. Hierzu werden die folgenden Bedingungen abgeleitet:

- Der Produktentwickler muss durch den Soll-Prozess geführt werden. Dabei sollen die Informationen nicht gleichzeitig, sondern stets lediglich die für die jeweilige Situation notwendigen Inhalte dargeboten werden.
- Der Ablauf muss eine interaktive Prozesssteuerung zulassen, welche durch eine gezielte Kommunikation mit dem Entwickler stattfindet.

Ziel ist demnach eine prozessabhängige Wissensbereitstellung und Interaktion mit dem Entwickler. Hierfür wird in der vorliegenden Arbeit ein mehrstufiges Ebenen-Modell als methodisches Vorgehensmodell entwickelt, welches die Daten gliedert und bereitstellt. Der Anwender wird durch den gesamten Prozess geführt und kann somit die Evaluation der Simulationsanwendungen auf Basis eines Geometrievergleiches durchführen, indem ihm jederzeit die situativ benötigten Informationen zur Verfügung gestellt werden. Mittels gezielter Fragestellungen kann dadurch produktspezifisch eine Aussage erarbeitet werden, ob das Simulationsmodell mit idealer CAD-Geometrie für eine sichere Aussage hinreichend genau genug ist oder ob eine Aufbereitung des Berechnungsmodells zur besseren Abschätzung der Beanspruchungen führen kann.

### 6.3.3 Aufbau und Ablauf des Ebenen-Modells

Mit Hilfe des Ebenen-Modells werden die beschriebenen Anforderungen umgesetzt. Es beinhaltet die drei Komponenten der Wissensbereitstellung, der Nutzerinteraktion und dem Wissensrückfluss nach erfolgter Tätigkeit im einzelnen Bereich. Die Nutzerinteraktion setzt sich aus den Bausteinen der Wissensbereitstellung durch Dokumente und die Visualisierung der geometrischen Fakten, soweit einer Abfrage und Bewertung des Zustandes zusammen. [169; 170]

Innerhalb der Nutzerinteraktion wird die Methodik zur Evaluation in die insgesamt sechs Ebenen aufgeteilt. Dabei werden aus der Wissens- und Datenbasis die benötigten Elemente für jede einzelne Ebene geholt und entsprechend dargestellt, sodass der Produktentwickler stets sämtliche relevante Informationen vorgeführt bekommt, um die notwendige Abfrage beantworten zu können und letztendlich eine Entscheidung herbeizuführen.

Die sechs Ebenen des entwickelten Modells sind hierarchisch aufgebaut und müssen folglich nacheinander durchlaufen werden, um die Aussage der Simulationsmodellenaufbereitung zu generieren. Diese stellen sich zunächst wie folgt dar:

- Ebene I: Geometrieinformation
- Ebene II: Funktionsüberprüfung
- Ebene III: Belastungsfeststellung
- Ebene IV: Abweichungserscheinungsbild
- Ebene V: Abweichungsorientierung
- Ebene VI: Simulationsmodellauflbereitung

In Bild 43 ist das Konzept als Gesamtprozess im Ebenen-Modell in der Übersicht abgebildet. Es werden die drei Komponenten der Wissensbereitstellung, Nutzerinteraktion und Wissensrückfluss ersichtlich.

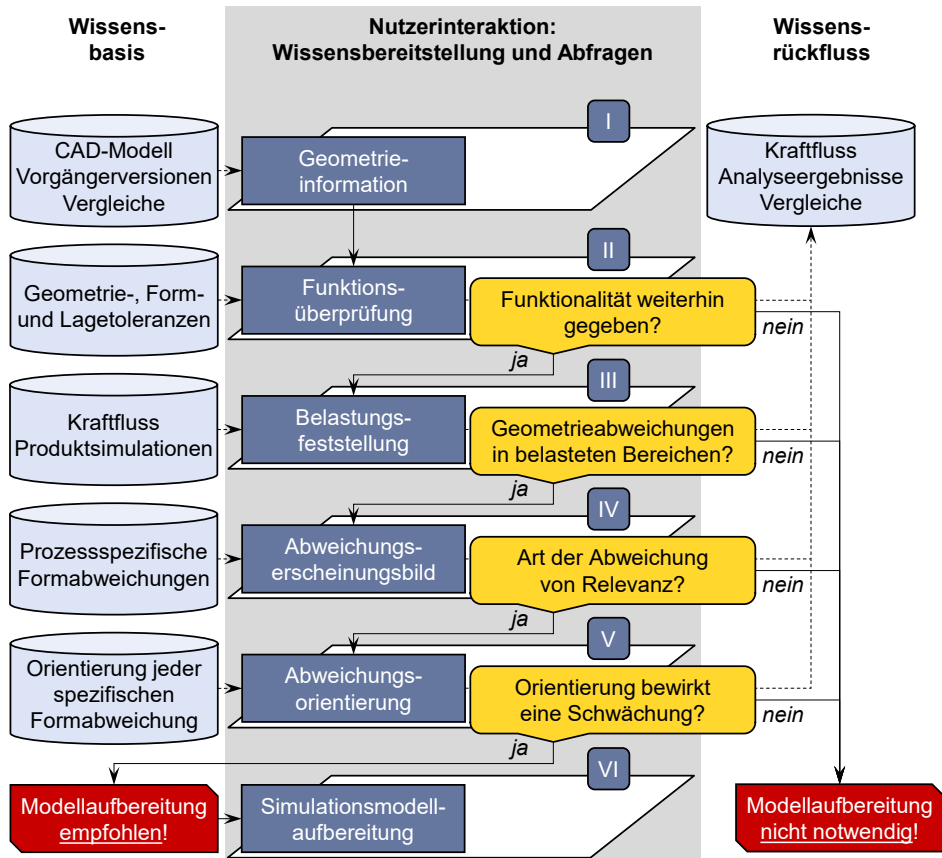


Bild 43: Konzept des Ebenen-Modells zur Evaluation der Abweichungen für Simulationsanwendungen.

Die Ebene I (Geometrieinformation) gibt dem Nutzer zunächst einen Überblick der aktuellen Situation des Modells. Es wird dabei das Nominalmodell aus dem CAD-System dargestellt. Zudem können Informationen

aus Vorgängerversionen oder ähnlichen Bauteilen innerhalb eines Unternehmens aufgezeigt werden, um bereits im Vorfeld mögliche Schwachstellen zu detektieren, welche möglicherweise verstärkte Aufmerksamkeit im weiteren Verlauf benötigen. Wenn bereits vorhanden, können innerhalb dieser ersten Ebene ebenso die Vergleichsdarstellungen von idealem CAD-Modell zur digitalisierten Realgeometrie betrachtet werden, um auch damit eine Vorstellung über die tatsächlichen Abweichungen und besonders deren Lage zu erhalten.

In der Ebene II (Funktionsüberprüfung) soll grundsätzlich die Frage beantwortet werden, ob trotz der Fertigungsabweichungen die Funktion des Bauteils innerhalb des Einsatzortes noch vorhanden ist. Hierzu werden die entsprechenden Zeichnungen mit denen vom Konstrukteur vergebenen Toleranzen angezeigt. Mit der Wissensbasis werden die notwendigen Informationen aus den Normen und Richtlinien zur Verfügung gestellt, um diese zu verstehen und nachschlagen zu können. Somit liegen sämtliche Toleranzdaten, auch allgemeintolerierte Angaben, in einer Übersicht vor. Die Darstellung der Einbaulage kann zudem ebenso wertvolle Information über die Eigenschaftsänderung durch Abweichungen liefern. Wird durch Sichtung der Daten klar, dass mit den Abweichungen die Funktion nicht weiter gegeben ist, wird der Prozess verlassen, da keine weitere Notwendigkeit besteht. Scheint die Funktion dennoch gegeben, erfolgt die weitere Betrachtung in der folgenden Ebene.

Ebene III (Belastungsfeststellung) dient zur Überprüfung der Belastungen im Bauteil. Dabei kann eine Darstellung des Kraftflusses durch die Komponente Aufschluss darüber geben, ob beanspruchte Bereiche zusätzlich eine gewisse Abweichung aufweisen. Ebenso werden bereits durchgeführte Produktsimulationen aufgezeigt, um die Belastung des aktuellen Bauteils abschätzen zu können.

Sind die Belastung und Abweichungen festgestellt, muss in Ebene IV (Abweichungserscheinungsbild) festgelegt werden, ob die Art der auftretenden Abweichung auch relevant ist. Diese sind für jeden Fertigungsprozess spezifisch und in der Wissensbasis hinterlegt. Somit erhält der Nutzer eine Darstellung sämtlicher prozessspezifischer Abweichungen, zusammen mit den charakteristischen Ausprägungen. Zeigt sich dabei, dass diese Abweichungen, zusammen mit der Belastungsfeststellung, nicht von Relevanz sind, wird der Prozess ohne Modellaufbereitung verlassen. Ist die Abweichung jedoch von Bedeutung, so muss durch die mögliche Orientierung die folgende Ebene durchlaufen werden.

Diese Ebene V (Abweichungsorientierung) gibt aus der Datenbank die Hinweise, welche Orientierungen tatsächlich einen negativen Effekt auf die Eigenschaften nach sich ziehen können und welche vernachlässigbar sind oder gar positive Effekte aufweisen können. Dies liefert, beispielsweise zusammen mit der Kraftflussanalyse bei strukturmechanischen Berechnung oder Strömungslinien bei CFD-Analysen, die finale Aussage, ob die Abweichungen in einem Simulationsmodell Berücksichtigung finden sollten. Durch die Beantwortung der Abfrage kommt man schlussendlich zur letzten Ebene des Modells.

Ist die Ebene VI (Simulationsmodellauflbereitung) erreicht, steht fest, dass eine erneute Simulation mit einem an die Abweichungen angepassten Modell ausgeführt werden soll. Dazu können verschiedene Methoden zum Einsatz kommen. In der Ebene IV werden dem Anwender diese Methoden aufgezeigt und eine passende vorgeschlagen. Welche sich hier am vorteilhaftesten darstellt, hängt hauptsächlich von anderen Faktoren des bisherigen Modellstatus ab, besonders von Bedeutung hierbei sind:

- Liegt ein parametrisches CAD-Modell vor?
- Wie einfach oder komplex sind die Abweichungserscheinungen?
- Wurde bereits eine Simulation mit dem nominalen Modell durchgeführt?

Je nachdem, welche Lage im Einzelfall vorliegt, werden eine oder mehrere Modellauflbereitungsstrategien vorgeschlagen und durchgeführt. Die in dieser Arbeit entwickelten Ansätze dazu sind mit ihrem Vorgehen und den jeweiligen Vor- und Nachteilen im folgenden Kapitel 6.4 dargestellt und erläutert.

Zur Anwendung des Ebenen-Modells erfolgt eine Strukturierung der Inhalte mit dem ER-Modell (Entity Relationship). Dieses zeigt in Bild 44 die verschiedenen Eigenschaften und in welcher Beziehung diese jeweils zueinander und dem eigentlichen Produkt stehen. Die zentrale Entität bildet das Bauteil mit den inhärenten Merkmalen und Eigenschaften als Attribute. Hierzu werden die weiteren Informationen, welche von Nöten sind, über die Beziehungen verknüpft. Sämtliche vorhandenen Daten werden aus dem Repository gezogen. Neu erzeugte Informationen innerhalb des Prozesses werden dort abgelegt.

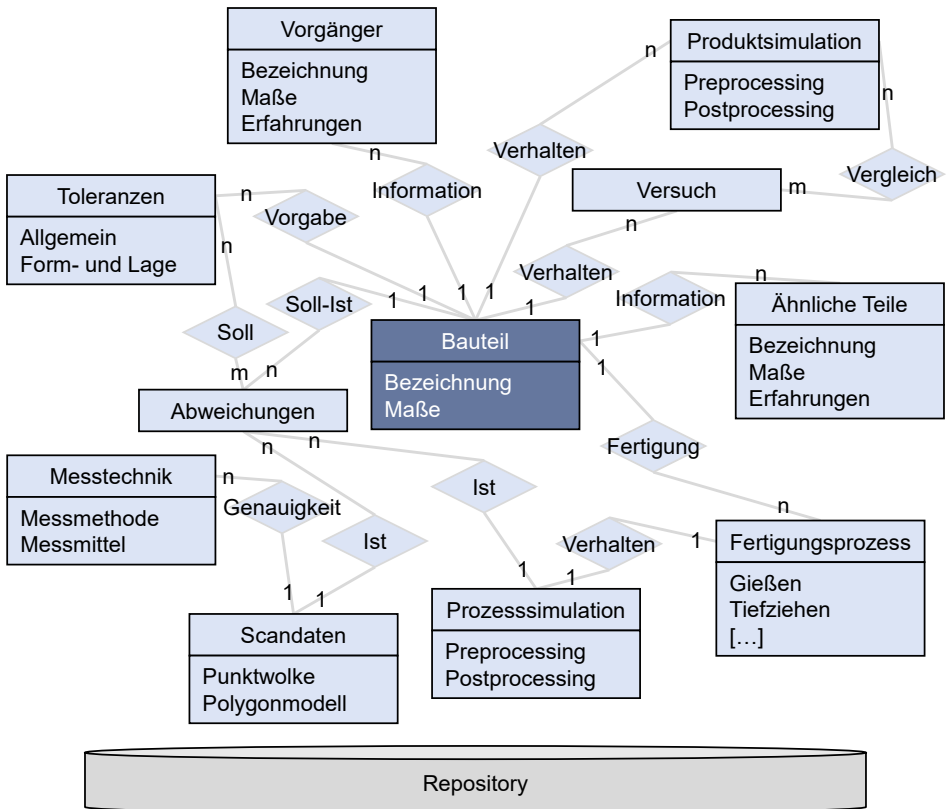


Bild 44: ER-Diagramm der Wissensinhalte des Ebenen-Modells.

## 6.4 Ansätze zur Modellaufbereitung

Nach dem wissensbasierten Evaluationsprozess müssen die relevanten Abweichungen in das vorhandene nominale Geometriemodell integriert werden. Hierbei sind aber mehrere Herausforderungen zu überwinden, welche mit den Unterschieden in den Datenstrukturen und Datentypen einhergehen. Zur Bewerkstelligung dieser Hürde werden im Folgenden insgesamt vier entwickelte Methoden vorgestellt, wie mit Hilfe der gemessenen Geometriedaten ein simulationsfähiges Modell erzeugt werden kann (Bild 45). Dazu kommen neben dem klassischen RE-Prozess drei weitere Ansätze zum Tragen, um dieses Vorhaben zu erreichen. Dabei sind neben dem gewünschten Berechnungsprozess und der geforderten Zielgröße besonders die bereits vorhandenen Geometrie- und Simulationsdaten von Bedeutung. Hieraus ergeben sich unterschiedliche Anwendungen der Methoden, welche jeweils mit den entsprechenden Vor- und Nachteilen diskutiert werden.

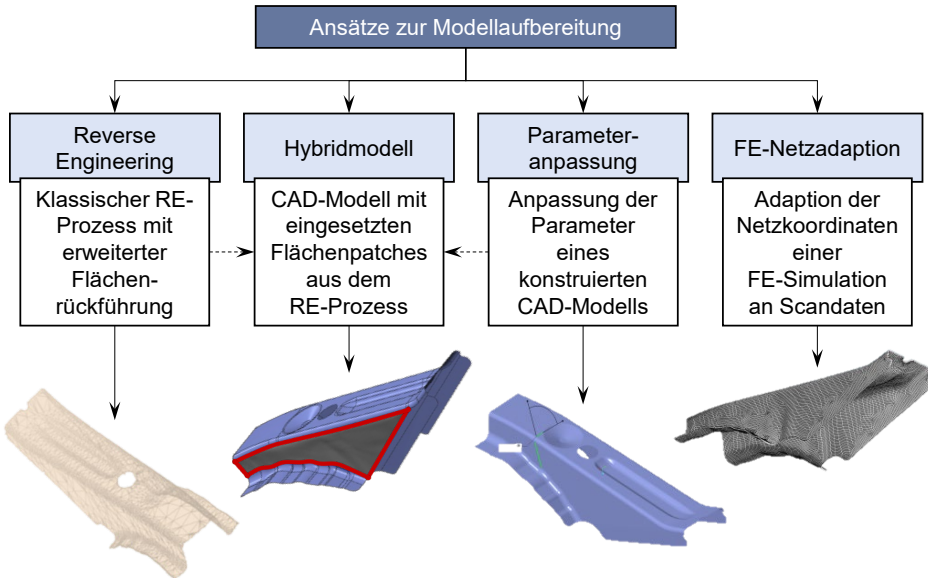


Bild 45: Übersicht der Methoden zur Aufbereitung der Simulationsmodelle mittels Geometriemessdaten.

Die entwickelten Einzelmethoden werden nachfolgend beschrieben und die Vor- und Nachteile relativ zum klassischen RE-Prozess und vergleichend zueinander dargestellt.

### 6.4.1 Klassischer RE-Prozess

Die Verwendung des klassischen RE-Prozesses im engeren Sinne, also die Rückführung eines existierenden Bauteils in ein CAD-Modell, stellt den offensichtlichen Lösungsansatz dar. Dieses Vorgehen ist eine etablierte Methode zur vollständigen Abbildung der tatsächlichen Geometrie. Mithilfe des rückgeführten Modells kann schließlich eine erneute Simulation aufgebaut werden.

Eine Herausforderung bei dem Versuch der Rückführung liegt häufig darin, dass – natürlich auch stark abhängig von der Messmethode – Bauteile nicht vollständig erfasst werden können. Besonders bei Oberflächenerfassungsverfahren bleiben in Hinterschnitten häufig Löcher im Scanmodell zurück, welche manuell rekonstruiert werden müssen, um das gewünschte Volumenmodell zu erhalten. Dadurch wird zum einen das Modell wiederum nur angenähert, da eben keine Messdaten in diesen Abschnitten zur Verfügung stehen, zum anderen ist es aber auch häufig gar nicht erforderlich,

dass sämtliche Bereiche eines Bauteils den aufwändigen Prozess der Rückführung erfahren, da diese für die weiteren Anwendungen (beispielsweise beim reinen Geometrievergleich) und Berechnungen belanglos sind.

Da das Reverse Engineering von Geometriedaten eine etablierte Methode ist (siehe auch die Kapitel 3.5 und 4.1), dient sie demnach als Referenz für die weiteren entwickelten Verfahren. Hierbei kommen besonders folgende Gesichtspunkte zum Tragen:

- Die notwendige Zeitinvestition zur Erstellung einer erneuten Simulation. Hierunter fallen einerseits die Erstellung des Simulationsmodells, andererseits aber ebenso die Definition der Randbedingungen im Preprocessing.
- Die erforderliche und zu handhabende Datenmenge und Dateigröße.
- Die Komplexität der Aufbereitung, also die Anforderungen an den Benutzer.

Der Gesamtprozess bildet sich dabei dadurch, dass zunächst eine Simulation mit dem idealen CAD-Modell aufgebaut wird. Im Anschluss daran wird der Scan mittels der RE-typischen Methoden aufbereitet und zu einem vollständig unabhängigen neuen Modell aufbereitet, welcher daraufhin wiederum das gesamte Preprocessing der Simulation durchläuft und neu berechnet werden kann. Das nachfolgende Bild 46 zeigt eine normierte Zeitschiene für die beiden Prozesse des Simulationsaufbaus und des Reverse Engineerings. Der Aufteilung nach dem zeitlichen Aufwand der Einzelschritte erfolgt aus eigenen Erfahrungswerten und Literaturhinweisen [171]:

- Für die FEM findet sich häufig keine quantitative Aussage. Häufig wird aber dem Preprocessing ein großer Aufwand bescheinigt. In [39] werden für die Vorbereitung mindestens 60 % des Mannaufwandes angegeben. Erfahrungsgemäß kann sogar ein noch höherer Anteil zugeschrieben werden, weshalb hier der Anteil des Preprocessings für die weitere Betrachtung mit 70 % angesetzt wird.
- Für das RE findet sich in [69] die Angabe, dass auf die Nachbereitung der Rohdaten etwa 80 % des Gesamtaufwandes fallen. Dieser Wert deckt sich mit den eigenen Erfahrungen und wird so für die weitere Betrachtung verwendet.

Die Darstellung in Bild 46 gilt gleichzeitig als Referenz für alle weiteren entwickelten Methoden der Simulationsmodell Anpassung und wird im Folgenden immer wieder aufgegriffen, um die jeweiligen Vorteile und

Zeit-/Aufwandseinsparungen aufzuzeigen, welche sich in der Anwendung der einzelnen Methoden ergeben haben.

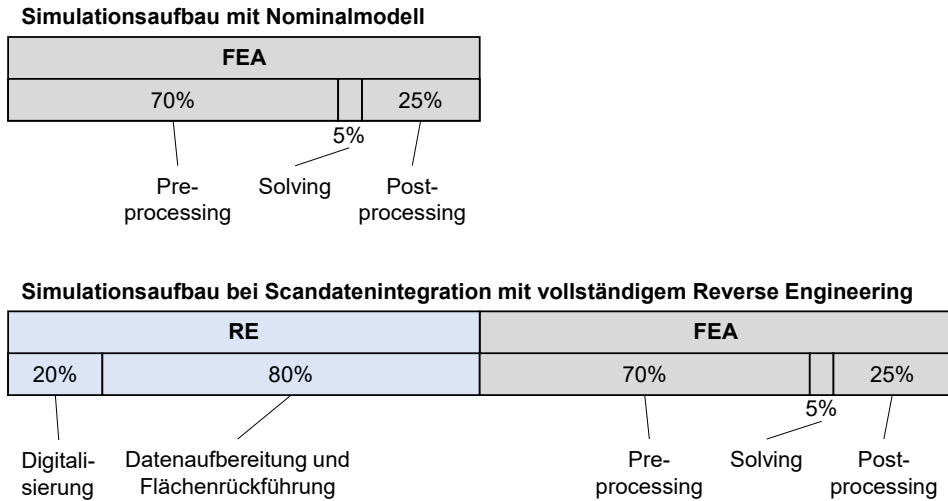


Bild 46: Vorgehen mit Einschätzung des zeitlichen Arbeitsaufwandes der Einzelschritte bei einer FE-Simulation eines RE-Modells.

Wie bereits im Stand der Technik und im obigen Bild 46 dargestellt, erfordert die ganzheitliche Flächenrückführung derzeit enorm viel manuellen Aufwand. Verbesserungen in dieser Hinsicht können durch einen entwickelten Algorithmus zur Kurvenerzeugung erreicht werden [172]. Als Voraussetzung zur Aufbereitung zu NURBS-Flächen muss das tesselierte Scan-Modell mittels Kurven in Flächenstücke (Patches) mit vier Randkurven aufgeteilt werden. Diese sind dabei so zu wählen, dass keine zu großen Krümmungen in dem einzelnen Patch auftreten, da sonst die mathematische Beschreibung mit den Übergangsbedingungen an den Rändern unzureichende Ergebnisse liefert. Dies lässt sich umgehen, indem man die gesamte Fläche in relativ kleine Elemente aufteilt, wodurch wiederum in jedem Patch erzwungenermaßen kleine Krümmungen auftreten. Um diesen Schritt zu erleichtern, wird der Prozess so automatisiert, dass man lediglich die vier äußeren Randkurven definieren muss. Anschließend kann in Abhängigkeit der Bauteilstruktur und der gewünschten Genauigkeit der Flächenstücke die variable Anzahl an Zwischenkurven vom Produktentwickler gewählt werden. Der Algorithmus teilt anschließend die Splinekurven am Rand jeweils in der Mitte auf und verbindet die entstehenden Mittelpunkte mit einer neuen Kurve. Mit dieser erzeugten Kurve liegen in der anderen Richtung somit bereits drei Kurven (zwei Randsplines und der

mittlere Spline) zur weiteren Unterteilung vor. Diese werden daraufhin jeweils in vier gleiche Längen geteilt, um somit drei weitere Mittenkurven zu erzeugen. Dieser Schritt wird in dieser Weise auf Basis der getroffenen Entscheidung über die Aufteilungsgenauigkeit in beiderlei Richtungen iterativ angewandt, bis das Bauteil in nahezu rechtwinklige, hinreichend kleine Flächenpatches segmentiert ist (Bild 47).

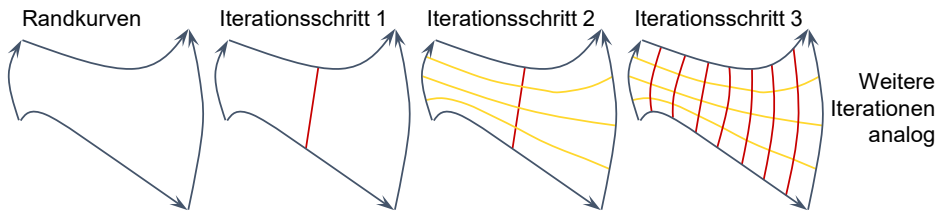


Bild 47: Beschreibung des iterativen Vorgehens zur automatisierten, gleichmäßigen Flächenrückführung.

Dadurch entsteht ein strukturiertes Gitterkonstrukt aus gleichmäßig verteilten Kurven, welche die einzelnen Flächenstücke begrenzen. Diese werden anschließend mit NURBS-Flächen auf das vorliegende Polygonnetz gefittet, um eine zusammengesetzte geschlossene Flächendarstellung der Geometrie zu erhalten. Mittels des vorgestellten Algorithmus lässt sich die Anwendung des klassischen RE-Prozesses im Bereich der Flächenrückführung bereits deutlich vereinfachen (Bild 48). Anhand einiger durchgeführter Beispiele (siehe auch Kapitel 7) kann eine mittlere Ersparnis des Aufwandes von rund 20 % beim Postprocessing des RE erreicht werden.

#### Simulationsaufbau bei Scandatenintegration mit RE mit Flächenrückführungsoption

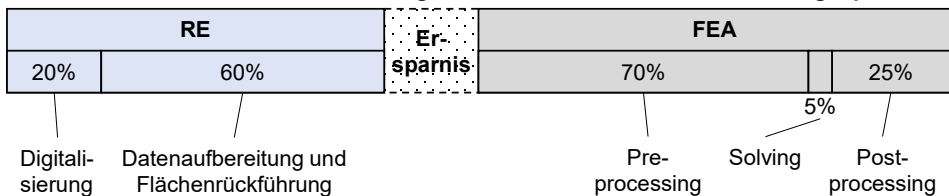


Bild 48: Aufwandes der Einzelschritte bei FE-Simulation mit RE-Modell unter Verwendung der automatisierten Kurvenerzeugung zur Flächenrückführung.

Diese Methode ist insgesamt universell einsetzbar, bietet aber vergleichsweise wenig Potenzial zur Aufwandseinsparung.

### 6.4.2 Parameteranpassung

Die Parameteranpassung hat als Ziel, ausgemachte Abweichungen durch Anpassung von entsprechenden Parametern direkt im CAD-Modell zu

übernehmen. Voraussetzung für die Anwendung dieser Strategie ist aber, dass ein parametrisches Modell der Geometrie vorliegt und darin auch die entsprechenden Parameter zur Beschreibung der Abweichung definiert sein müssen.

Da es unmöglich ist, die Vielzahl von potentiellen Abweichungen zu kennen und vorab in einem CAD-Modell während Konzeption, Entwurf und Ausarbeitung durch entsprechende Features mit Variablen zu konstruieren, kann die Parameteranpassung also nur auf Abweichungen von geringer Komplexität abzielen. Zur Abbildung von höherwertigeren Abweichungen wäre eine Modellierung mit Freiformflächen unerlässlich. Dies würde aber im Vorfeld einen enormen Aufwand bei der Modellierung und Abschätzung der möglichen Fertigungsabweichungen bedeuten, dass dies in keinem Fall zu empfehlen ist. Geeignete Abweichungserscheinungen von geringer Komplexität sind beispielsweise Formabweichungen in Biegeprozessen durch Rückfederung oder Maßabweichungen (beispielsweise Längenmaße, Abstände oder Durchmesser).

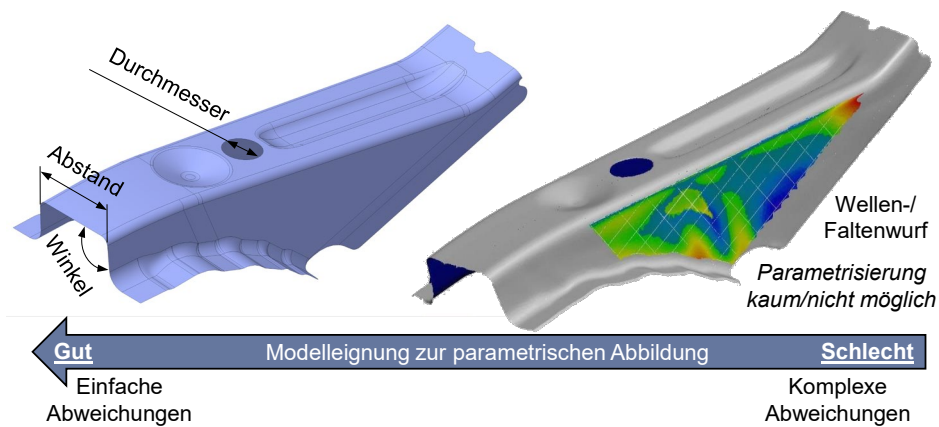


Bild 49: Möglichkeit der Abbildung von Abweichungen, abhängig von dessen Komplexitätsgrad.

Der Ansatz greift darum auf die vorhandenen parametrischen Werte der Einzelteilmodellierung zurück. Jedes Feature besteht aus verschiedenen zweidimensionalen Objekten, welche als Basis zur Ermittlung der tatsächlichen Werte dienen. Hierzu werden die einzelnen Geometrielemente erfasst, um daraus die entsprechend zugehörigen Prüfmerkmale zu erstellen (Tabelle 9). Dabei wird jedem geometriedefinierenden KE, je nach dessen Klasse, ein oder mehrere Prüfmerkmale zugeordnet und eindeutig bezeichnet, um eine spätere Zuordnung zwischen KE und Prüfmerkmal zu gewährleisten. Zu beachten ist, dass einige KE weitere KE beinhalten. Für diese

Zuordnung ist eine Datenbank mit verschiedenen Primitiven hinterlegt, um die Soll- (CAD-Modell) und Ist-Geometrie (Scandaten) mittels dieser Prüfmerkmale zu vergleichen. Die dort ermittelten einzelnen Ist-Werte werden über die Zuordnung wieder an das entsprechende KE zurückgegeben. Mit diesen neuen Werten kann das Modell regeneriert werden und bildet somit die tatsächliche Gestalt ab.

Tabelle 9: Zuordnung Prüfmerkmale zu Konstruktionselement (Auswahl).

Geometrieelement	Inhalte	Prüfmerkmal
Skizze	Maße $n_i$ Winkel $\alpha_i$	Abstände $p_i$ Winkel $\phi_i$
Profil/Extrusion	Schnitt Extrusionsmaß	Skizze (KE) Abstand $p$
Rotationskörper	Halbschnitt Zylinder	Skizze (KE)
Zugverbund	Leitkurve Schnitte $s_i$	Skizze (KE) Skizzen (KE)
Bohrung	Position Durchmesser Tiefe	Abstände $a / b$ Zylinderdurchmesser $d$ Abstand $c$
[...]	[...]	[...]

Das Vorgehen ist in folgendem Bild 50 dargestellt und veranschaulicht die Methode der Parameteranpassung zur Aufbereitung des Geometriemodells zum Simulationszweck.

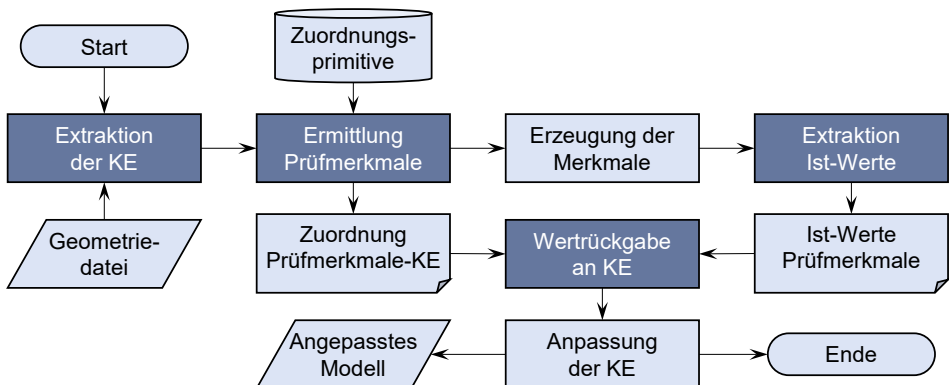


Bild 50: Methode der Parameteranpassung.

Mit dieser Methode kann der Aufwand zum Einsatz von Scandaten für die Simulation weiter reduziert werden. Nachfolgendes Bild 51 zeigt den Prozess und den quasi vollständigen Entfall der Datenaufbereitung und Flächenrückführung des Reverse Engineerings. Dafür ist eine Merkmalszuweisung der KE zu den entsprechenden Prüfmerkmalen notwendig.

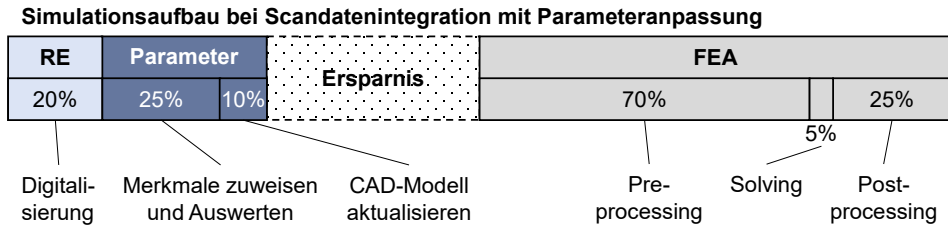


Bild 51: Aufwandes der Einzelschritte bei Aufbau einer FE-Simulation mit Parameterermittlung und -anpassung.

Die Parameteranpassung setzt ein parametrisches CAD-Modell voraus und kann auch nur die dort definierten Angaben verändern. Dadurch ist dieser Prozess in seiner Anwendbarkeit eingeschränkt und nur für einfache Geometrieabweichungen sinnvoll einsetzbar. Die Verwendung einer Modellierungsstrategie ist hierbei von elementarer Bedeutung, um den Modellaufbau bei den veränderten Werten gewährleisten zu können.

### 6.4.3 Hybridmodell

Wie in obigem Ansatz mit der Parameteranpassung bereits dargestellt, können viele Abweichungserscheinungen aufgrund der zu hohen Komplexität nur bedingt in das vorhandene CAD-Modell eingebracht werden. Dieser Ansatz bringt darum eine Erweiterung zur parametrischen Modellierung, indem höherwertigere Abweichungen durch gescannte und teilweise flächenrückgeführte Einsatzelemente ersetzt werden (Bild 52). Dieses Vorgehen führt folglich zu einem hybriden Modell, welches zunächst vollständig aus parametrisch aufgebauten Konstruktionselementen erstellt wird. Anschließend werden die ausgewählten Abweichungen durch Flächenpatches aus den Geometriemessdaten ersetzt. [173]

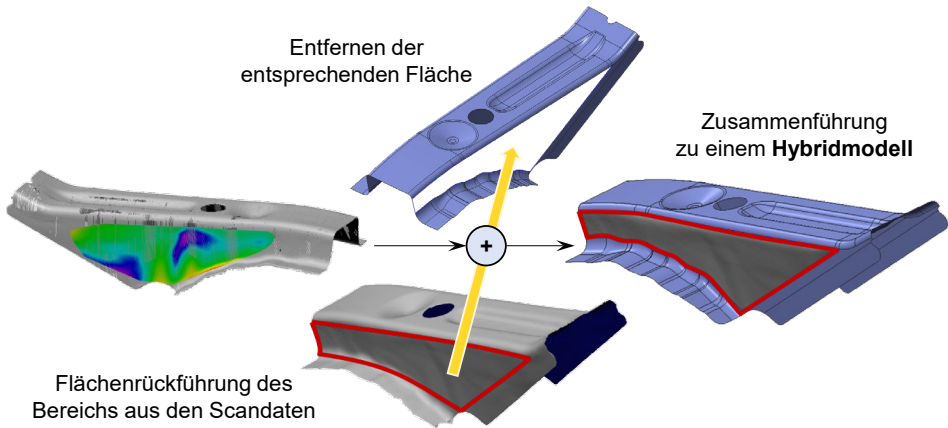


Bild 52: Schematische Prinzipdarstellung der Hybridmodellherzeugung.

Zur Integration der Flächenpatches muss zunächst eine Gleichartigkeit der Geometriedaten vorliegen. In der Regel wird in der Produktentwicklung mit Volumenkörpern modelliert. Die Einsätze aus den Scandaten kommen in Form von (Freiform)-Flächen vor. Aus diesem Grund sind beide Elemente nicht ohne weiteres miteinander zu verknüpfen. Um dennoch ein Zusammenwirken zu erzwingen, muss das Volumenmodell zunächst in ein Flächenmodell umgewandelt werden. Mit der daraufhin gleichen Struktur kann eine Verbindung des Einsatzteils zum Gesamtmodell erfolgen und so die Abweichung abgebildet werden. Im Anschluss steht eine Rückführung zum Volumenmodell an, wenn dies erforderlich ist.

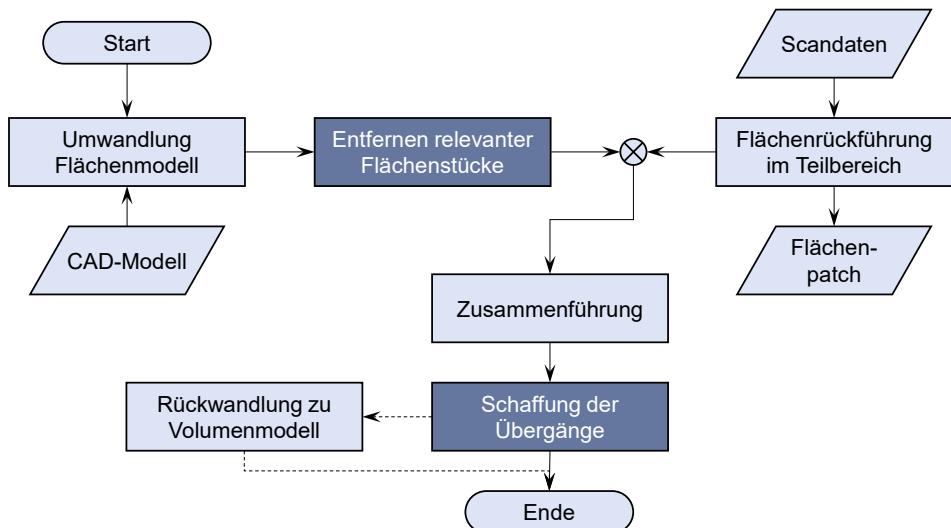


Bild 53: Vorgehen bei der Erzeugung von Hybridmodellen aus Scandaten und CAD-Modell.

Um einen kontinuierlichen Zusammenbau der nominalen CAD-basierten Geometrie und dem aus dem Scan abgeleiteten Flächenpatch zu erreichen, muss der Übergang zwischen den beiden Teilen stetig ausgelegt werden. Dabei ist entscheidend, in wie groß die einzusetzende Scan-Fläche sein muss. Hierfür kommen zwei Grenzfälle in Betracht:

- Die Scanfläche liegt innerhalb einer tangential-/krümmungsstetigen Gesamtoberfläche und wird entsprechend fließend eingesetzt. Es ergibt sich ein C<sub>2</sub>-stetiger Übergang zwischen der idealen Geometrieoberfläche und dem eingesetzten Patch → Flächenübergang
- Es wird ein, durch scharfe Kanten begrenztes, Flächenstück komplett mittels einer Scanfläche ersetzt. An den begrenzenden Kanten liegt ein Übergang mit C<sub>0</sub>-Stetigkeit vor → Kantenübergang

Die beiden beschriebenen Übergangsformen sind in Bild 54 nochmals schematisch dargestellt. Die Herausforderung in der Anwendung liegt darin, die Übergangsbereiche zwischen den Flächenpatches und der idealen Oberflächenkontur nahtlos einzupassen. Zur Beschreibung der Einpassung der Scan-Einsätze wird nochmals zwischen den beiden Fällen unterschieden.

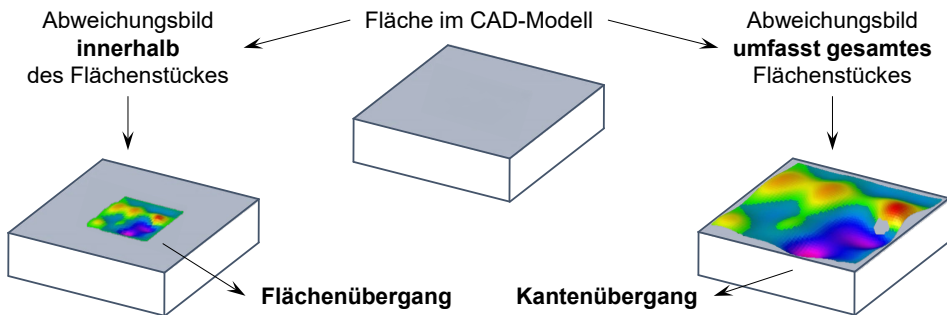


Bild 54: Mögliche einzelne Abweichungserscheinungen bei Verwendung der Hybridmodellstrategie.

Scan-Einsätze innerhalb von Gesamtflächen weisen auch nach einer lokalen Registrierung an den Rändern minimale Abweichungen zum CAD-Modell auf. Aus diesem Grund kann hier eine Kontinuität nicht ohne weiteres erreicht werden. Als Lösungsprinzip wird darum der Ausschnitt aus der Nominalgeometrie etwas größer gewählt, als der tatsächliche Flächenpatch. Die entstehende Lücke wird entsprechend mit einem oder mehreren weiteren Teilflächenstücken gefüllt, welche die erforderlichen Randbedingungen erfüllen können (Bild 55).

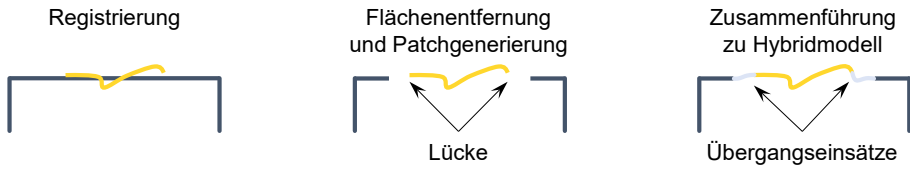


Bild 55: Einsatz eines Scan-Inserts innerhalb einer Fläche mit krümmungsstetigen Übergangsbedingungen.

Für Einsätze mit einem Kantenübergang wird eine Gesamtfläche aus dem Verbund entfernt und durch einen Scan-Einsatz ersetzt. Da bei der Digitalisierung häufig Randbereiche nicht fehlerfrei erkannt werden können ist es zumeist der Fall, dass das einzusetzende Flächenstück kleiner ist als das originale. Ebenfalls kann es sein, dass die neue Fläche manchmal in die Nachbarfläche hinein ragt oder erst darüber hinaus zum Schnitt kommen würde. Entsprechend müssen hier zunächst beide Randbereiche der angrenzenden Flächen so verlängert oder verkürzt werden, dass ein kompletter Schnitt möglich ist, um eine neue scharfe Kante zu erzeugen und die Positionsstetigkeitsbedingung zu erfüllen (Bild 56).

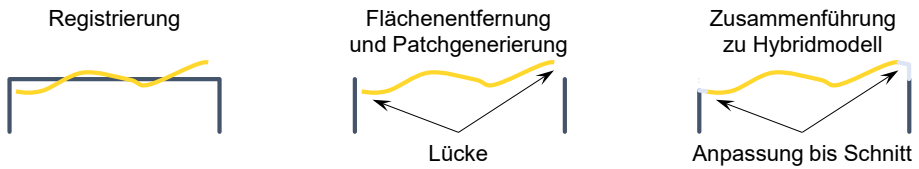


Bild 56: Ersatz einer Gesamtfläche durch ein Scan-Insert mit Erzeugung der Positionsstetigkeit.

Durch den Einsatz von Flächenpatches können die Vorteile der Parameteranpassung mit der Flexibilität und allgemeinen Anwendbarkeit des klassischen RE-Prozesses kombiniert werden. In Bild 57 wird dargestellt, wie sich die Verteilung des Aufwandes reduziert, wenn dieser Prozess durchgeführt wird. Eine Datenaufbereitung und Flächenrückführung ist demnach lediglich für die Scan-Einsätze notwendig. Hinzu kommt die Schaffung der Übergänge zwischen dem Einsatzelement und der nominalen Geometrie.

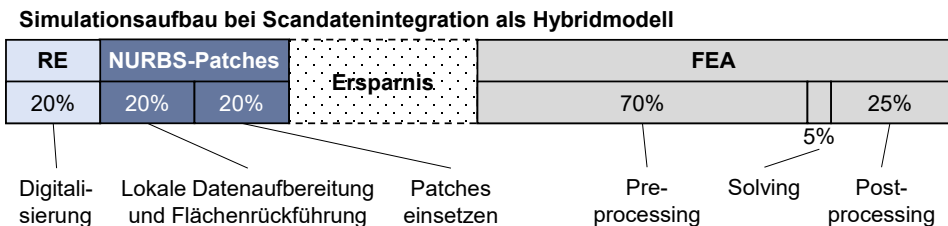


Bild 57: Aufwandsanpassung bei Anwendung der Hybridmodelltechnik.

Zur Anwendung dieser Hybridmodellstrategie ist zudem kein parametrisches Modell notwendig. Es lässt sich demnach auch mit neutralen Datenformaten durchführen, welche als Volumen- oder Flächenmodell vorliegen.

### 6.4.4 FE-Netzadaption

Dieser Ansatz geht davon aus, dass zur Produktsimulation bereits ein Berechnungsnetz mit dem dafür notwendigen, erheblichen Aufwand erzeugt ist. Um dieses Netz und die eingebrachten Definitionen der Randbedingungen (Materialmodelle, Lasten, Lagerbedingungen) während des Pre-processings der Simulation nicht verwerfen zu müssen, wird eine Anpassung des Netzes an die vorhandene Realgeometrie forciert, um so eine verbesserte Simulation, mit realitätsnäheren Ergebnissen, zu erhalten. [174–176; 171]

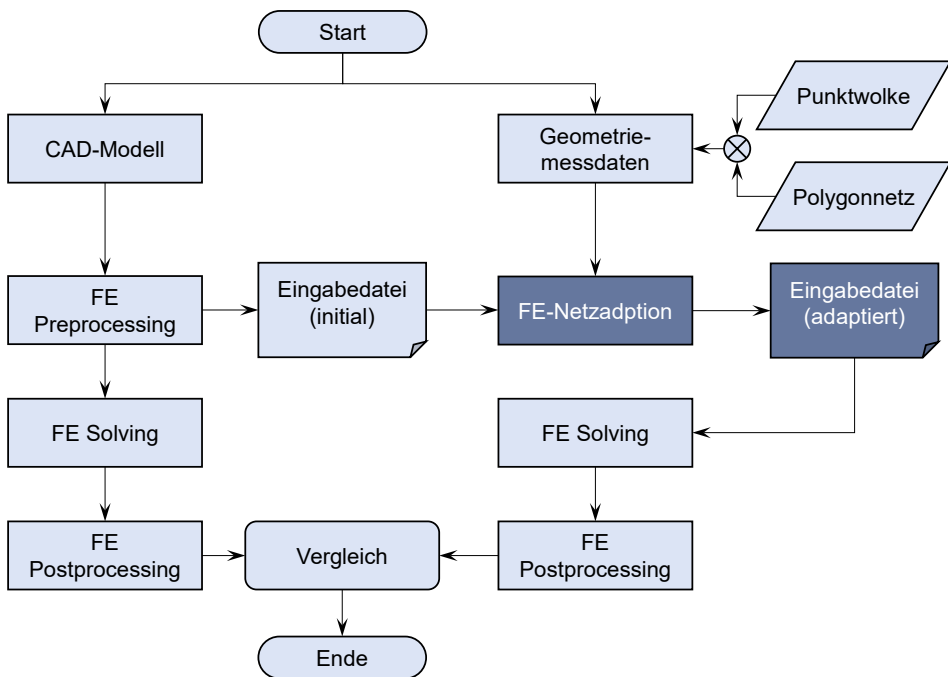


Bild 58: Prinzipielles Vorgehen zur FE-Netzanpassung.

Das Prinzip dieser Methode ist die Nutzung der bereits vorhandenen Simulation mit dem idealen CAD-Modell, um parallel oder nachgeschaltet eine Simulation mit abweichungsbehafteter Geometrie durchzuführen (Bild 58). Für diesen Prozess wird die Eingabe des Pre-processings herangezogen und mit den Geometriemessdaten, welche in Form einer Punktwolke oder

eines Polygonnetzes vorliegen, verglichen. Im Baustein der FE-Netzadaption werden die Abweichungen der Knotenpunkte des Berechnungnetzes ermittelt und orthogonal zur Oberfläche auf die Scandaten angepasst. Dadurch erhält man eine funktionierende Eingabedatei, welche mittels des Solvers standardmäßig gelöst werden kann. Die entstehenden Ergebnisse beider Simulationen lassen sich dadurch direkt miteinander vergleichen.

Um das Mapping der Knotenpunkte auf die Scandaten zu vollführen, muss zunächst ein Abstand zwischen den beiden Geometrieelementen ermittelt werden. Dabei ist die Methode der Abstandsfindung von der vorhandenen Datenstruktur des Scanmodells abhängig. Vorbereitend dazu muss allerdings für jeden Knoten, welcher angepasst werden soll, eine Richtung bestimmt werden, in welcher die Messung durchgeführt wird. Hierfür wird zu jedem Element des Netzes die Normalenrichtung ermittelt und jedem Knotenpunkt wird anschließend durch Superposition der Normalenvektoren der angrenzenden Elemente ein Richtungsvektor zugeordnet (Bild 59).

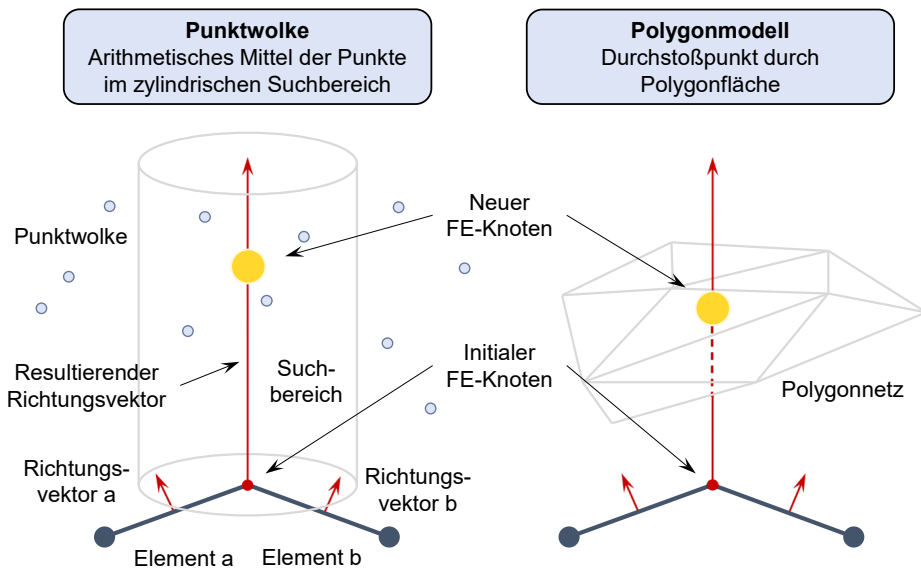


Bild 59: Ermittlung des Abweichungswertes der einzelnen Knotenpunkte.

Wenn den entsprechenden Knoten jeweils die Richtung zur Abstandsermittlung zugeordnet ist, wird der Verschiebungsvektor auf die abweichungsbehaftete Scangeometrie ermittelt. Dabei ist es von der Datenstruktur der gemessenen Form abhängig, nach welchem Schema die Ermittlung abläuft. Liegen die Messwerte als Polygonmodell vor, so wird der Durchstoßpunkt des Richtungsvektors als neue Koordinate für den Knoten ver-

wendet. Bei Vorliegen einer Punktwolke als Messobjekt werden alle Messpunkte des Scans innerhalb eines zylindrischen Bereiches um den Richtungsvektor erfasst und aus deren Mittelwert die aktualisierten Knotenkoordinaten erstellt. Der verwendete Suchradius ist dabei variabel und kann entsprechend der Gegebenheiten und Dichte der Punktwolke daran angepasst werden. Dieser Sachverhalt ist im Bild 59 veranschaulicht. Darin ist zu erkennen, wie sich der Richtungsvektor ermittelt und wie sich der Abstand bei den beiden möglichen Datentypen ergibt.

Da es sich bei den Scandaten zumeist um Oberflächenmodelle handelt, können entsprechend auch nur die Oberflächenknoten angepasst werden. Dies kann, je nach Auflösung des Netzes und der vorliegenden Verformung zu schlechten Elementverhältnissen führen. Dies wiederum bedeutet qualitativ schlechtere Ergebnisse oder in extremen Fällen auch nicht berechenbare Vernetzungen aufgrund von entstehenden Topologiefehlern (Bild 60).

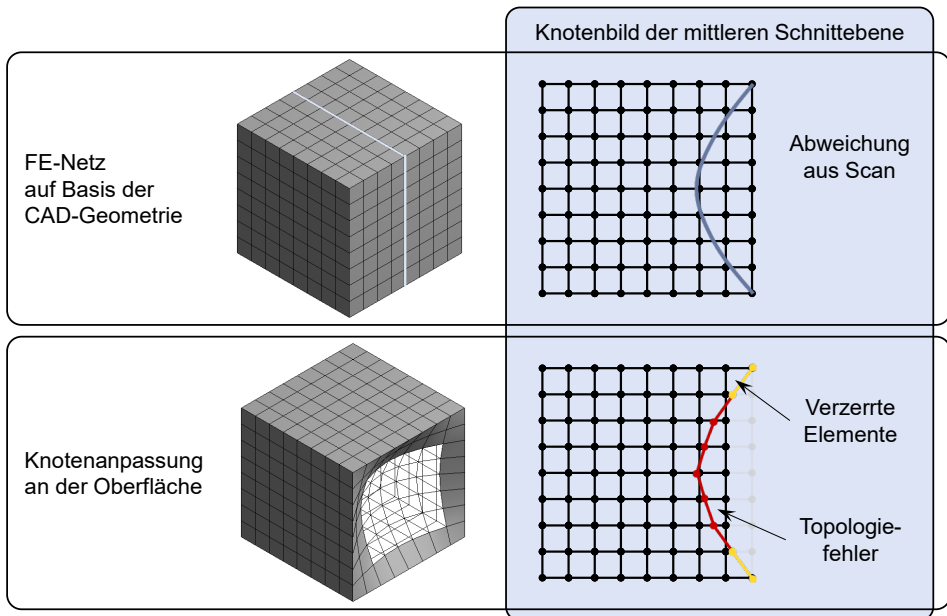


Bild 60: Mögliches Fehlverhalten des FE-Netzes durch Verschiebung der Oberflächenknoten.

Zur Vermeidung dieses Problems ist der Prozess der FE-Netzadaption in erweiterter, vollständig Funktion entwickelt worden, welcher das oben beschriebene Fehlverhalten eliminiert (Bild 61). In diesem Vorgehen wird ein Vorlastschritt in die FE-Simulation mit integriert. Dabei werden die vorher ermittelten Abweichungen als fixe Verschiebung vorgegeben. Als Resultat erhält man daraus ein funktionsfähiges Berechnungsnetz, welches mit den

vormals definierten knotenbasierten Randbedingungen aus der Simulation mit dem idealen CAD-Modell zu einer neuen Eingabedatei kombiniert, erneut ausgeführt und ausgewertet werden kann.

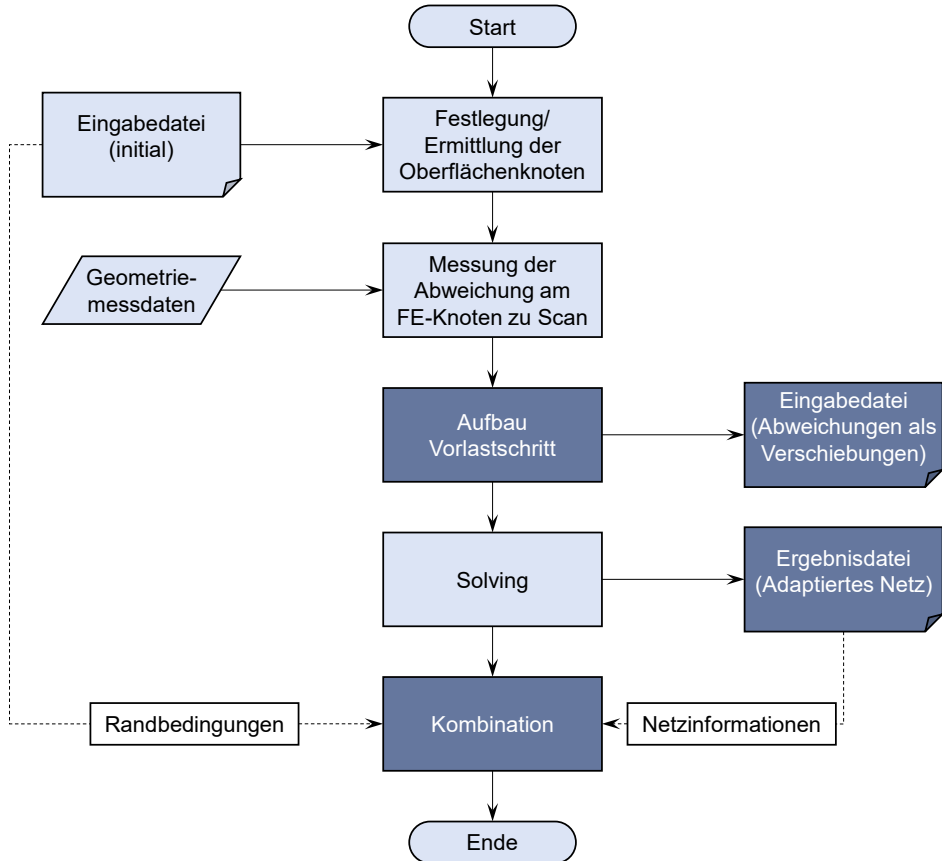


Bild 61: Vollständiges Vorgehen zur FE-Netzanpassung.

Der Gesamtprozess beginnt dabei mit der Auswertung des am Nominalmodell vorgenommenen Preprocessings. Aus der Eingabedatei werden zunächst die definierten Randbedingungen extrahiert und für den späteren Gebrauch zwischengespeichert. Anschließend sucht der Prozess die Knotenpunkte aus, welche an der Oberfläche liegen. Je nach individueller Gegebenheit, kann der Benutzer hierbei auch lediglich einen Bereich von Knotenpunkten auswählen, welche angepasst werden sollen. Somit wird gewährleistet, dass auch nur notwendige Abweichungen eingebracht werden. Der Nutzen dieser Vorgehensweise liegt darin, dass der Eingriff in das erstellte Preprocessing möglichst klein bleibt und nicht durch große Verän-

derungen des Netzes unnötig Unsicherheiten einbracht werden. Im weiteren Verlauf werden für die gewünschten Knoten der Oberfläche aus den angrenzenden Element-Normalenvektoren die Suchrichtungen für die Scandaten definiert. Nach Abschluss dieser Datensammlung wird der Vorlastschritt als eigenständige Finite Elemente Simulation durchgeführt. Es wird also eine Vorberechnung ausgeführt, bei der die ermittelten Abweichungen der Oberflächenknoten als Verschiebung definiert sind. Die Knoten ohne gewünschte Anpassung werden mit einem Festlager in ihrer Position fixiert. Das Resultat ergibt ein deformiertes Netz, welches den Vernetzungsansprüchen für eine FEA genüge tut und somit als Ausgangsobjekt für die Simulation mit abweichungsbehafteter Geometrie dienen kann. (Bild 62)

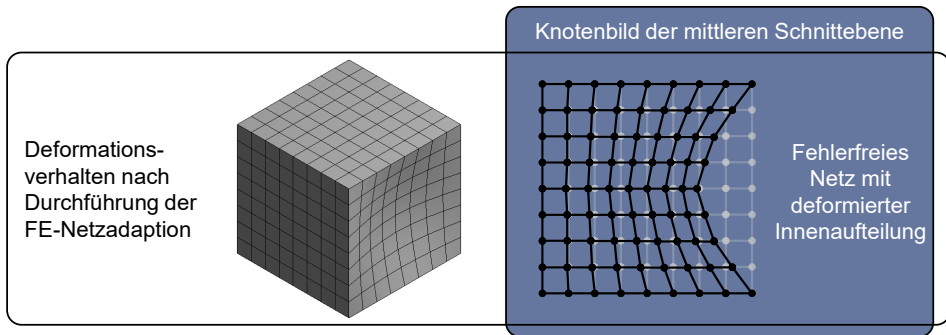


Bild 62: Simulationsfähiges deformiertes Netz nach dem Vorlastschritt des Prozess der FE-Netzanpassung.

Mit der Kombination aus diesem Resultat des Netzes und den vormals extrahierten Randbedingungen wird eine neue simulationsfähige Eingabedatei erstellt, welche im üblichen Solver gelöst werden kann und entsprechend im Postprocessing ausgewertet und auch mit der idealen Simulation auf Spannungs-/Dehnungsänderungen direkt verglichen werden kann.

Mit Anwendung der FE-Netzadaption kann eine enorme Reduktion des Gesamtaufwandes erreicht werden. Sowohl im RE-Prozessteil, in dem die Datenaufbereitung auf ein Minimum reduziert wird, als auch im FE-Bereich, bei welchem ein erneutes Preprocessing entfällt, werden die Tätigkeiten mit dem größten Umfang umgangen (Bild 63).

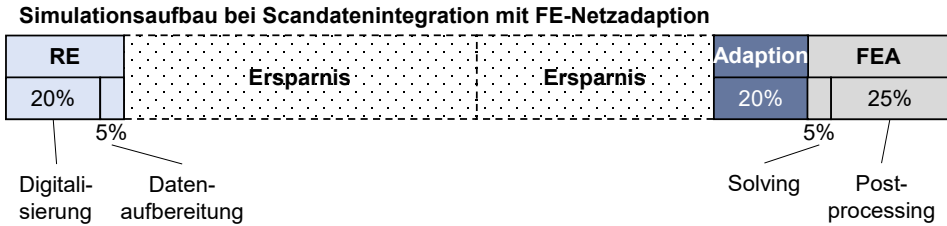


Bild 63: Änderung des Aufwandes bei Simulationsmodell Aufbau mittels einer FE-Netzadaption.

Die Voraussetzung für diesen Prozess ist dennoch zu berücksichtigen, da eine vorherige Simulation mit dem nominalen CAD-Modell zwingend erforderlich ist.

### 6.4.5 Übersicht und Fazit der entwickelten Ansätze

Wie beschrieben, gibt es vielfältige Möglichkeiten zur Modellaufbereitung zum Zweck der Simulation unter Zuhilfenahme von Scandaten. Eine universelle Methode ist aufgrund der verschiedenen Voraussetzungen und Ziele nicht gegeben. Jedoch verspricht jedes Verfahren in bestimmten Situationen eine relative Vorteilhaftigkeit gegenüber den anderen. Hierfür sind in Tabelle 10 nochmals alle Verfahren mit den dafür notwendigen Voraussetzungen an das vorliegende Modell, sowie den erforderlichen Schritten aus dem RE-Prozess, mit den jeweils eigenen Vor- und Nachteilen aufgelistet.

Tabelle 10: Übersicht der entwickelten Ansätze zur Modellaufbereitung.

	<b>Reverse Engineering</b>	<b>Parameterkorrektur</b>	<b>Hybridmodell</b>	<b>Adaption FE-Netz</b>
Voraussetzung: Nominalmodell	kein Modell notwendig	editierbares, parametrisches CAD-Modell (nativ)	CAD-Modell (natives oder neutrales Datenformat)	fertig aufbereitete FE-Simulation
Voraussetzung: Scanmodell	Digitalisierung vollständige Aufbereitung NURBS-Flächenrückführung	Digitalisierung selektive Aufbereitung	Digitalisierung selektive Aufbereitung selektive Flächenrückführung	Digitalisierung selektive Aufbereitung

Tabelle 10: Übersicht der entwickelten Ansätze zur Modellaufbereitung. (Fortsetzung)

	<b>Reverse Engineering</b>	<b>Parameterkorrektur</b>	<b>Hybridmodell</b>	<b>Adaption FE-Netz</b>
Vorteile	Aufbau auch ohne Nominalmodell möglich universelle Einsetzbarkeit	Parametrik bleibt erhalten	CAD-Modell bleibt erhalten und wird erweitert	kein erneuter Aufbau einer FEA notwendig
Nachteile	vollständige Geometrie muss erfasst sein sehr aufwändig keine Verwendung bisheriger Modelle möglich	erfordert ein editierbares CAD-Modell		FEA muss bereits vorhanden sein

Eine Verifikation der Ansätze findet im folgenden Kapitel 7 durch die Umsetzung in einzelnen Anwendungsfällen statt.

## 7 Konzeptionelle Umsetzung der Module in Demonstratoren

Das in Kapitel 6 vorgestellte stufenförmige Ebenen-Modell zur Untersuchung und Evaluation durchgeführter Produktsimulationen und den zugehörigen Konzepten zur Simulationsmodelladaptation ist im Rahmen dieser Arbeit mit verschiedenen Softwarepaketen umgesetzt. Zur Veranschaulichung wurden für jedes Teilgebiet reale Anwendungsfälle aus Industrie und Praxis herausgenommen, um die einzelnen Prozessschritte zu veranschaulichen und zu validieren. Beginnend wird der Durchlauf des Ebenen-Modells mit den vorhandenen Wissens-elementen gezeigt. Anschließend erfolgt in gleicher Reihenfolge mit unterschiedlichen Bauteilen jeweils eine Aufbereitung von Modellen für die Simulation mit Verwendung der Scandaten nach den vorgestellten, entwickelten Methoden.

### 7.1 Wissensbereitstellung im Ebenen-Modell: Spiegelraste

Zur Darstellung der der Wissensbereitstellung im Ebenen-Modell konnte ein Spritzgussteil der Firma MEKRA-Lang GmbH (Ergersheim, Projektpartner im Forschungsverbund FORPRO<sup>2</sup>) untersucht werden. Bei diesem treten durch Aufeinanderliegen zweier Rastengeometrien Schwingungen im Gesamtsystem auf, welche ein Störgeräusch hervorrufen. Um diese zu eliminieren, muss die entsprechende Frequenz ermittelt werden. Diese Frequenzen lassen sich zwar durch Vibrationsanalysen simulativ herausfinden, sie geben aber häufig nicht die gewünschte Genauigkeit zu den Ergebnissen aus Labortests und Feldversuchen wieder. Der Verdacht liegt dabei im Vorfeld darauf, dass die Rastengeometrien zwar theoretisch am nominalen Modell eine große Kontaktfläche aufweisen, fertigungstechnisch bedingt aber durch Schwindung, Ungenauigkeiten in der Formfertigung oder nicht genau regelbare Abkühlvorgänge nicht die gesamte Kontur zum Tragen der Kontaktkraft verwendet werden kann.

Zur Überprüfung des Sachverhaltes kommen die Prozesse des Ebene-Modells zum Einsatz, bei welchen die vorliegenden Daten entsprechend dargestellt und/oder erzeugt werden.

Ebene I (Bild 64): In der ersten Ebene sind die Geometrieinformationen zu dem Produkt enthalten. Der Nutzer bekommt hierin die Geometrie in

Form des CAD-Modells angezeigt. Darüber hinaus ist ein Realgeometriescan für den untersuchten Rastenbereich vorhanden, welcher als Punktwolke vorliegt. Die verwendete Messhardware ist ebenfalls mit dem entsprechenden Datenblatt hinterlegt, um die Genauigkeit der Daten abschätzen zu können. Mit dem Nominalmodell sowie den Scandaten kann eine erste Vergleichsdarstellung angezeigt werden, um die Abweichungsverhältnisse farblich auswerten zu können. Damit kann der Verdacht bestätigt werden, dass besonders im Bereich der Rastengeometrie fertigungsspezifische Abweichungen auftreten, welche das unerwünschte Verhalten begünstigen.

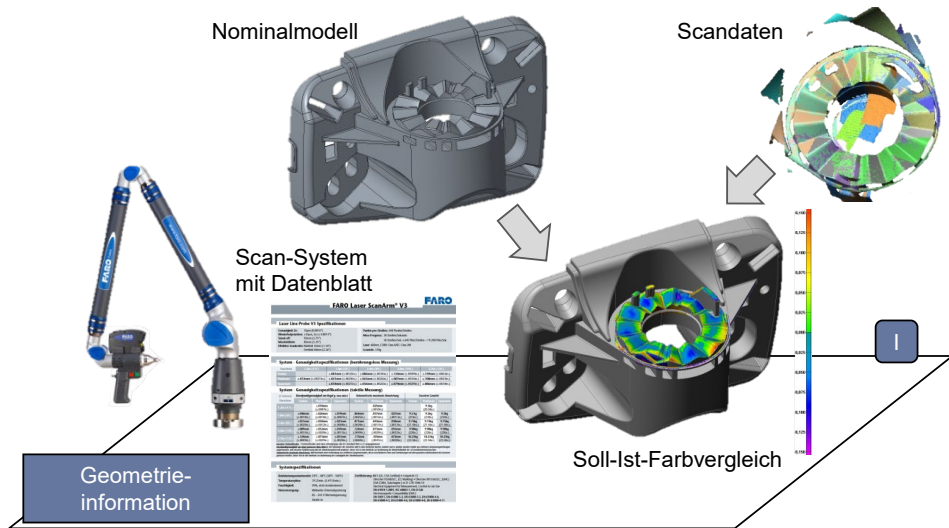


Bild 64: Wissensbereitstellung in Ebene I am Beispiel der Spiegelraste.

Ebene II (Bild 65): Die Überprüfung der Funktionshaltigkeit erfolgt hierin durch die Darstellung der gesamten Baugruppe. Es kann damit festgestellt werden, dass die generelle Funktion der Raste – den Erhalt der Position zum Gegenstück – auch mit den vorhandenen Fertigungsabweichungen weiterhin gegeben bleibt.

Ebene III: Auch wenn hier keine vorherigen Produktsimulationen durchgeführt sind, kann die Belastungsfeststellung bereits mit den Informationen aus der vorangegangenen Ebene II erfolgen. Die Abfrage, ob Abweichungen in den belasteten Bereichen auftreten, muss aufgrund der Feststellung des Kontaktbereiches bejaht werden.

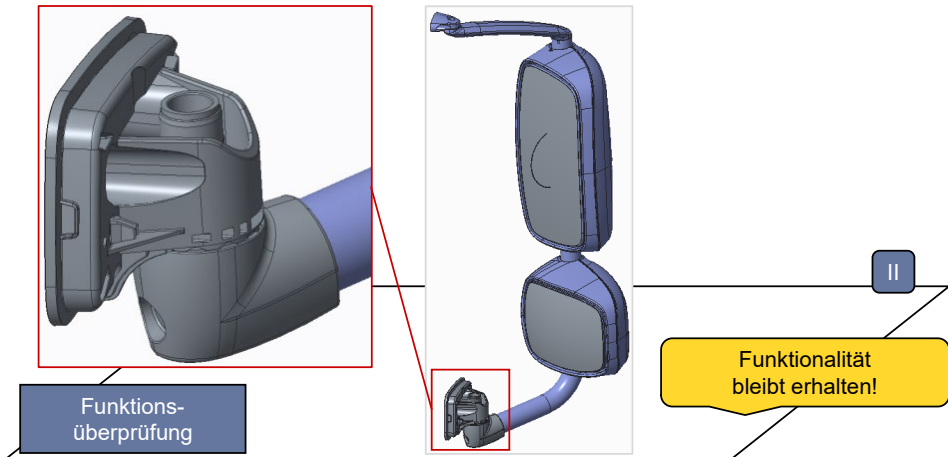


Bild 65: Wissensbereitstellung und Abfrage in Ebene II.

Ebene IV: Im Abweichungserscheinungsbild werden die prozessspezifischen Abweichungsmerkmale für das Gießen gezeigt. Es handelt sich hierbei um Einfallstellen an den betroffenen Flächen, wobei die Herkunft nicht ausgemacht werden kann. Die Tatsache, dass diese Art in dem Bereich relevant ist, gibt die Antwort auf die Abfrage und führt zur nachfolgenden Ebene.

Ebene V: Die Orientierung der Abweichung ist in diesem Fall eindeutig. Es fallen die Innenbereiche der Einzelflächen ein. Somit ergibt sich für die Orientierung eine Schwächung des Strukturverhaltens, da die Kontaktfläche signifikant kleiner wird als bei der Produktentwicklung vorgesehen war. Mit der Beantwortung dieser Abfrage folgt die Aussage, dass eine Modellaufbereitung sinnvoll ist und wird entsprechend in der letzten Ebene empfohlen.

Ebene VI: Aus den bisherigen Erkenntnissen muss eine Aufbereitung des Simulationsmodells erfolgen, um das Betriebsverhalten realitätsnäher als mit einer Simulation des nominalen CAD-Modells abbilden zu können. Hierfür stehen die vier vorgestellten Methoden zur Verfügung. Die sinnvollste wird auf Basis des aktuellen Modellfortschrittes gewählt. Die Festlegung erfolgt in diesem Fall auf die Variante der Hybridmodellerzeugung. Die Auswahl fällt aufgrund folgender Nachteile der anderen Methoden:

- Das RE ist sehr aufwändig, dafür dass lediglich ein kleiner Teil des Gesamtmodells betrachtet wird.
- Eine Parameteranpassung kommt nicht in Frage, da es sich um komplexe Abweichungsbilder handelt.

- Eine FE-Netzadaption ist nicht sinnvoll, da bislang noch keine FEA durchgeführt wurde und somit die Voraussetzung dafür nicht erfüllt ist.

Es bleibt also nach Durchlaufen des Prozesses die Aussage, dass zur genauen Analyse eine Simulation mit Realgeometrie und tatsächlichen Kontaktverhältnissen durchgeführt werden sollte. Vorteilhaft hierbei gibt sich die Aufbereitung mittels eines Hybridmodells. Dies ist entsprechend durchgeführt und in dem Umsetzungsteil zum Hybridmodell (Kapitel 7.4) genau beschrieben.

## 7.2 RE-Prozess: Tiefgezogener Motorträger (Teilstück)

Der Vergleichsprozess des Reverse Engineerings wird anhand des bereits eingangs dargestellten Werkstückes aufgezeigt. Es handelt sich hierbei um ein tiefgezogenes Teilstück eines Motorträgers. In Bild 66 zeigen sich in den seitlichen Randbereichen deutlich verschiedene wellenförmige Abweichungen, welche eine Aufbereitung erfordern. Da in diesem Fall das gesamte Bauteil in vielerlei Hinsicht zum Nominalzustand abweicht, ist eine Verwendung des vollständigen RE-Prozesses angesetzt.

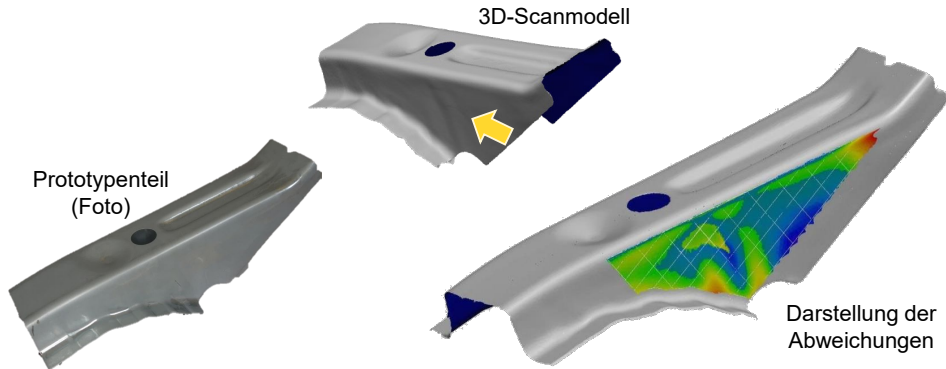


Bild 66: Darstellung des tiefgezogenen Motorträgers mit Falschfarbendarstellung der seitlichen Abweichungserscheinung.

Zur Abbildung der Realgeometrie wird die gescannte Punktwolke sehr fein zu einem Polygonmodell vernetzt, um möglichst alle Abweichungen zu berücksichtigen. Im Rahmen der Flächenrückführung kommt der in Kapitel 6.4.1 dargestellte Algorithmus zum Einsatz, um aus den Scandaten ein vollständiges Bauteilflächenmodell zu erhalten. Bild 67 zeigt die einzelnen Zustände der Datenobjekte, die angebrachte Segmentierung zur Flächenrückführung mit der algorithmusbasierten Aufteilung in Flächenpatches, bis

hin zum fertig zurückgeführten Flächenmodell, welches als Basis für die Vergleichssimulation verwendet werden kann.

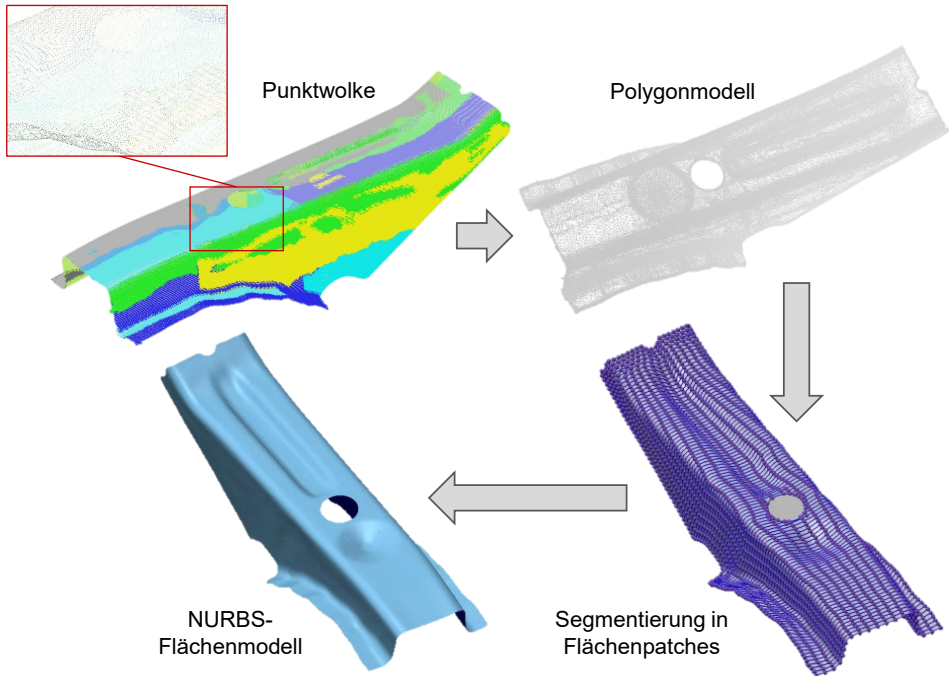


Bild 67: Zustand der verschiedenen Datenausprägungen im RE-Prozess für den tiefgezogenen Motorträger.

Mittels des rückgeführten Modells wird eine neue Simulation aufgebaut. Hierbei ist besonders der Aufwand zu berücksichtigen, dass sowohl vergleichbare Netze mit ähnlicher Ausprägung und Qualität erstellt werden, als auch die Randbedingungen identisch aufgebracht werden müssen. Der direkte Vergleich von Simulationsmodell und Simulationsergebnis zwischen Verwendung der nominalen CAD-Geometrie oder der Realgeometrie aus dem rückgeführten Scanmodell wird in Bild 68 deutlich. Es sind dort die zunächst die Netze abgebildet, um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten. Zudem zeigt das Bild Unterschiede in der Spannungsverteilung beider Simulationen. Zu sehen ist die dritte Hauptspannung mit der veränderten Verteilung des Maximalwertes. Dieses tritt genau in den seitlichen mit den wellenförmigen Geometrieabweichungen auf.

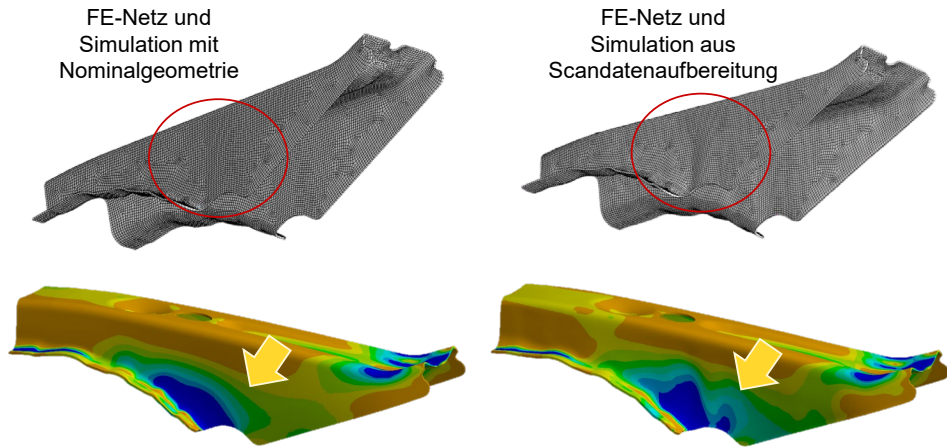


Bild 68: Direkter Vergleich der Simulationsnetze und die Auswirkungen auf die erste Hauptspannung (normiert).

Dieser Anwendungsfall zeigt die Universalität des klassischen RE-Prozesses. Es können demnach sämtliche Abweichungserscheinungen abgebildet werden. Einzige Voraussetzung ist, dass auch eine vollständige digitale Erfassung des Bauteils möglich sein muss. Nachteilig hierbei stellt sich jedoch dar, dass weder das CAD-Modell noch das Simulationsmodell eine Verknüpfung zum realen Scanteil besitzen. Somit muss stets eine komplett neue Analyse mit allen Schritten aufgesetzt werden.

### 7.3 Parametrische Korrektur: Gebogenes Rückspiegel-Tragrohr

Die parametrische Korrektur eines CAD-Modells kann mithilfe einer Biegerohrkonstruktion der Firma MEKRA-Lang GmbH (Ergersheim) demonstriert werden. Zunächst ist bei der Modellierung auf die notwendige Robustheit des Modellbaums und der Struktur zu achten. Ferner darf, wie im vorangegangenen Kapitel beschrieben, die Komplexität des Bauteils ein gewisses Maß nicht überschreiten, da nur die vergebenen Parameter auch wieder abgebildet werden können. Dieses Beispiel erfüllt die genannten Kriterien.

Im ersten Schritt der Anpassung werden den verwendeten Konstruktionselementen im Modell ein oder mehrere Messmerkmale zugewiesen, welche sämtliche vergebenen Parameter abdecken. Nachfolgende Tabelle 11 zeigt die fünf relevanten KE des Strukturbaumes und die zugeordneten notwendigen Merkmale. Zudem werden die Soll-Werte, welche im CAD-Modell vergeben sind, mit übergeben. Durch die Registrierung von idealer CAD-

Geometrie mit der Punktwolke aus dem Oberflächenscan des Rohres können anschließend die Ist-Werte nach dem Fertigungsprozess extrahiert werden.

Tabelle 11: Zuordnung der Merkmale zu den KE mit Soll-Maßen nach dem CAD-Modell und Ist-Werten aus der Vergleichsmessung.

KE	Merkmal(e)	Soll (CAD)	Ist-Wert
Skizze_Winkel	Abstand Winkelschenkel lang	756 mm	755,457 mm
	Abstand Winkelschenkel kurz	241 mm	240,472 mm
	Winkel 1	100°	99,453°
Skizze_Bogen	Bogen 1 (innen)	(65 mm)	66,215 mm
	Bogen 2 (außen)	(105 mm)	104,166 mm
	Neutrale Faser (Mittelwert)	85 mm	85,191 mm
Zylinder_kurz	Zylinder 1	40 mm	40,080 mm
Zylinder_lang	Zylinder 2	40 mm	40,204 mm
Wandstärke	Schieber-Wandstärke	2 mm	2,201 mm

Die so ermittelten Werte werden wieder an das CAD-System zurückgeführt und dort im jeweils gekoppelten KE angepasst. In Bild 69 ist der Prozess des Vorgehens verdeutlicht. Aus dem parametrischen CAD-Modell wird mittels der Datenbasis (Zuordnung KE zu Prüfmerkmalen) eine Verknüpfung der benötigten Merkmale durchgeführt. Diesen werden anschließend durch Überlagerung von CAD-Modell und gescannter Punktwolke ein Ist-Wert extrahiert. Die erzeugten tatsächlichen Einzelmaße werden schließlich wieder an das CAD-Modell zurückgeführt, um daraus ein vollparametrisches Modell inklusive der vorhandenen Fertigungsabweichungen zu erstellen.

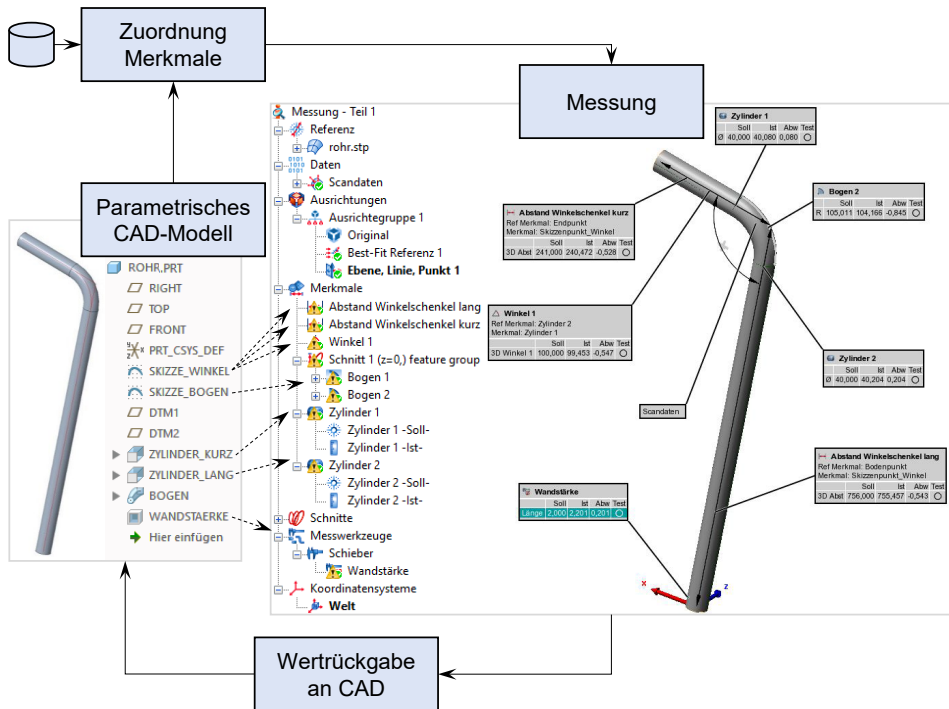


Bild 69: Anpassungsprozess des CAD-Modells durch parametrische Korrektur auf Basis der Scandaten.

Mit der parametrischen Korrektur des CAD-Modells bietet sich die Möglichkeit, ein konsistentes CAD-Modell beizubehalten. Die gesamten geometrischen Informationen bleiben somit in einem Modell erhalten und es lassen sich inhärente Daten, wie Volumen, Masse oder Schwerpunkte, einfach im CAD-System ermitteln. Eine stringente Modellierungsstrategie bei der Erzeugung des Modells ist jedoch unabdingbar. Dennoch bleibt diese Methode auf einfache Abweichungserscheinungen begrenzt.

## 7.4 Hybridmodell: Spiegelraste als Spritzussteil

Zur Darstellung der Hybridmodellgenerierung wird das in Kapitel 6.1 vorgestellte Bauteil der Spiegelraste nach Sichtung, Prüfung und Feststellung der geeigneten Aufbereitungsmethode verwendet.

Für den Schritt der Modellerzeugung wird die im Prozess digitalisierte Spiegelraste zunächst um die unnötig aufgenommenen Punkte bereinigt. Anschließend erfolgt die standardmäßige Tessellierung der Daten zu einem Polygonmodell. Neben der Tatsache, dass nur dieser kleine Bereich digitalisiert werden muss, kommt im weiteren Verlauf der Vorteil zum Tragen,

dass lediglich dieser Bereich der aufwändigen Flächenrückführung unterzogen werden muss. Dies bietet einen enormen Vorteil, da besonders bei dieser Art der Geometrie mit vielen Hinterschnitten, dünnen Stegen und kleinen Taschen eine vollständige Rückführung nicht mit vertretbarem Aufwand bewerkstelligt werden könnte. Auf Basis des Polygonmodells wird schließlich der einzusetzende Flächenpatch erzeugt. Die Ausrichtung der Scandaten zum Idealmodell erfolgt in dieser Anwendung anschließend über einen Best-Fit-Algorithmus.

Auf der Seite des CAD-Modells müssen ebenfalls die notwendigen Prozessschritte durchgeführt werden. Dies beginnt damit, dass das vorliegende Volumenmodell zu einer reinen Oberflächenbeschreibung umgewandelt wird. Durch diesen Schritt ist es möglich, die zu ersetzenden Flächenbereiche zu entfernen.

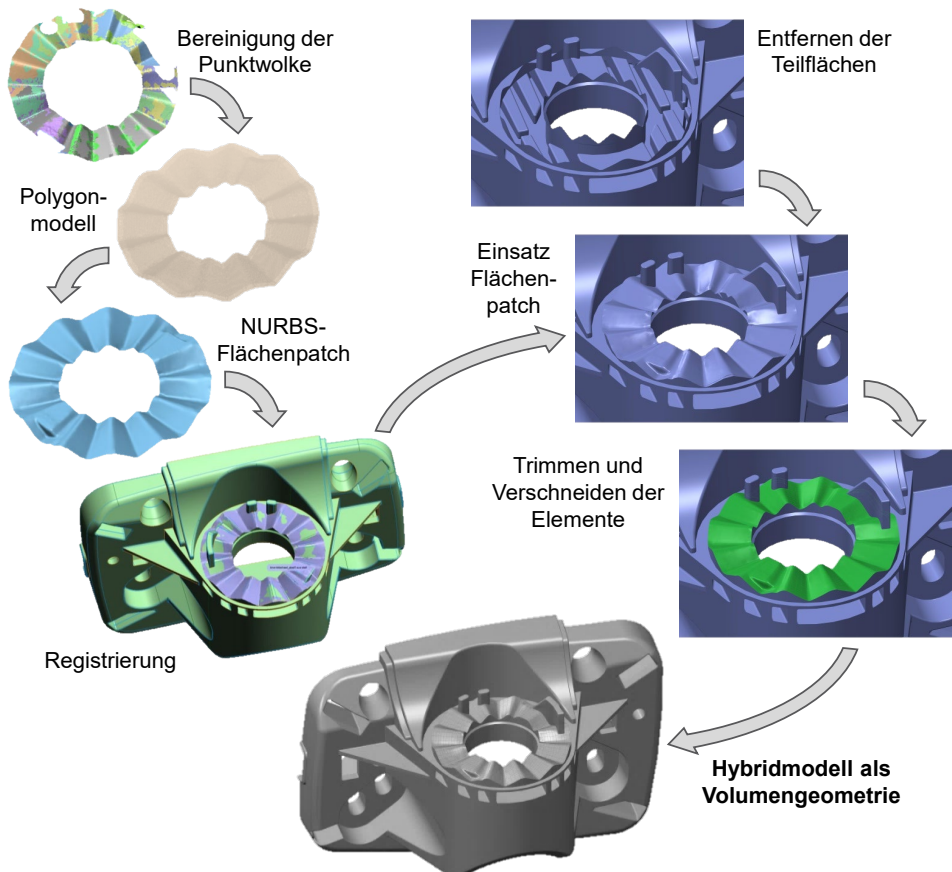


Bild 70: Vorgehen der Teilbereiche von CAD-Modell und Flächenpatch zur Erzeugung des Hybridmodells der Spiegelraste.

Um schlussendlich das Hybridmodell zu erhalten, werden die beiden Elemente – ideales CAD-Modell mit entfernten Rastenflächen und der mit RE-Methoden rückgeführte Flächenpatch – miteinander verbunden. Dabei werden die jeweiligen Randbereiche krümmungsstetig so erweitert, bis sich die beiden angrenzenden Flächenstücke in einer kontinuierlichen Begrenzungskante treffen. Somit entsteht wieder ein geschlossenes Oberflächenkonstrukt, welches in ein Volumenmodell rückgewandelt werden kann. Das folgende Bild 70 zeigt die beiderseitigen Schritte und die Zusammenführung zum fertigen Hybridmodell.

Mittels der in Bild 71 dargestellten realen Kontaktsituation können nunmehr bessere Rückschlüsse auf die simulativ ermittelte Vibrationsperformance getroffen werden. Waren in der Verwendung von idealem CAD-Modell Frequenzabweichungen zwischen Simulation und späteren Prüfstandsversuchen von etwa 20 % zu erwarten, kommen durch den Einsatz des aufbereiteten Modells maximale Abweichungen lediglich im kleinen einstelligen Prozentbereich vor.

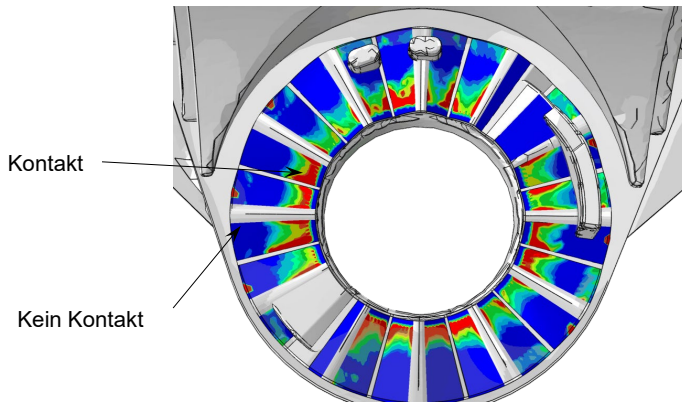


Bild 71: Tatsächliche Kontaktsituation der Spiegelrasten zum Gegenstück als Basis der Vibrationsanalyse.

Die Hybridmodellgenerierung gibt einen Mittelweg zwischen der vollständigen Rückführung mit RE-Methoden und dem parametrischen Modell. Das nominale Modell bleibt komplett erhalten. Betroffene Flächen werden in einem letzten Schritt durch Scan-Einsätze substituiert.

## 7.5 FE-Netzadaption: Ausrückhebel im Umformprozess

Zur Anwendung der Methode der FE-Netzadaption wird ein Ausrückhebel aus einem Kleinwagen zur Nachrechnung herangezogen. Dieser ist zunächst mit klassischen manuellen Messmitteln zu einem parametrischen

CAD-Modell aufgebaut. Parallel dazu wurde das physikalische Bauteil mit einem Oberflächen Laser-Scanner digitalisiert. Durch eine Überlagerung beider Elemente werden die Abweichungen deutlich. Zu beachten ist, dass der Scan des gefertigten Bauteils signifikante Unterschiede zu dem erzeugten CAD-Modell aufweist (Bild 72).

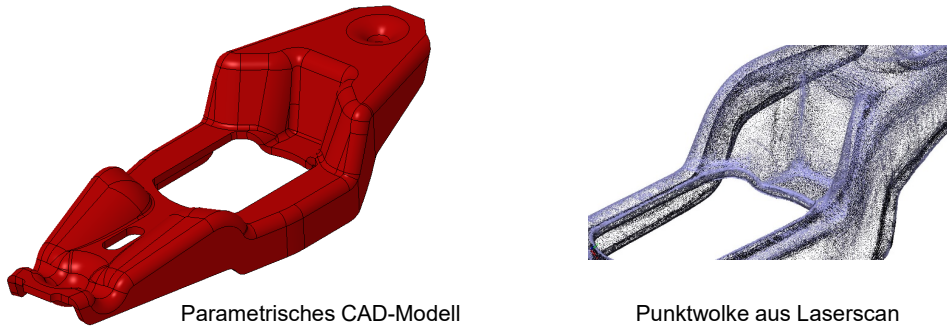


Bild 72: Gegenüberstellung des parametrischen Modells aus dem CAD-System mit der Punktwolke des Scans.

Die Lagersituation und die Größe der anliegenden Kräfte zur Berechnung sind nach [177] ermittelt und mit für diese Fahrzeugklasse typischen Werten ergänzt. Somit ergeben sich die Eingabewerte und Randbedingungen für die FE-Simulation. Das aufgebaute Modell wird zunächst standardmäßig vernetzt und mit den Randbedingungen simuliert. Anschließend werden aus der Eingabedatei mit dem Algorithmus der FE-Netzadaption die Netzkoordinaten und Randbedingungen extrahiert, um den Verschiebeprovorgang durchzuführen. Somit entsteht eine neue rechenfähige Eingabedatei, welche wieder simuliert wird. Bild 73 zeigt die Vernetzung des CAD-Modells und die ermittelte Vergleichsspannung im Bauteil, sowie die Veränderung des Netzes bei der Anpassung auf die Scandaten und die dadurch auftretende Änderung der maximalen Vergleichsspannung vom adaptierten zum nominalen Modellaufbau.

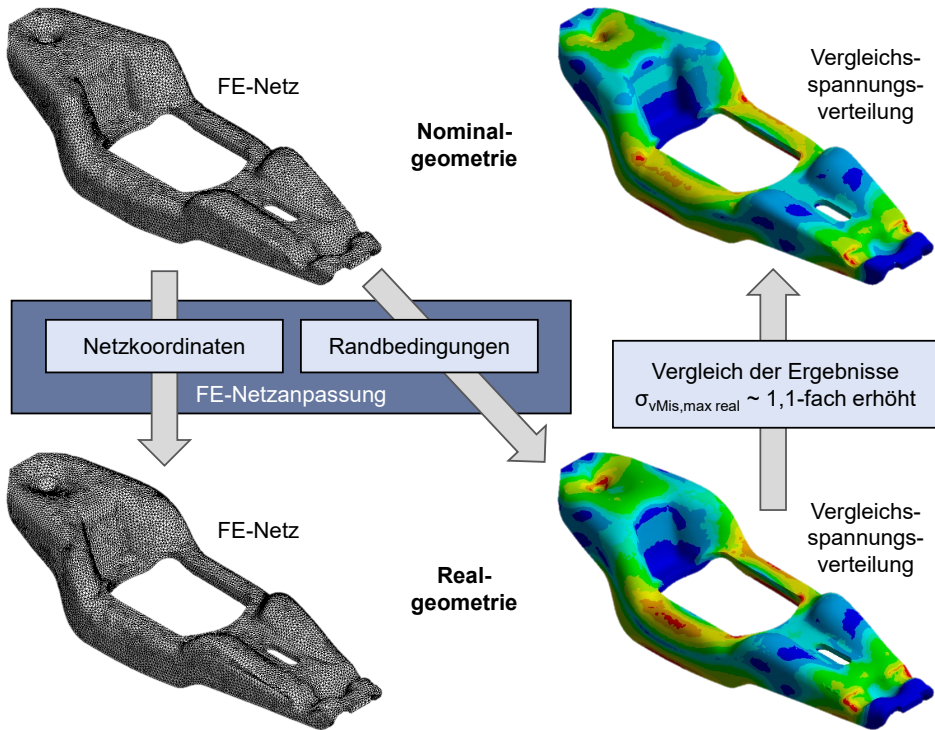


Bild 73: Änderungen der Kontur und der Vergleichsspannung nach dem Prozess der FE-Netzadaption und erneuter Simulation.

Zur Anwendung der FE-Netzadaption ist eine vollständige FE Analyse mit dem Nominalmodell notwendig. Wenn diese bereits vorliegt, bietet sich allerdings eine schnelle und robuste Möglichkeit der Simulation eines Modells mit Abweichungen. Der Aufwand einer Aufbereitung der Scandaten ist minimal und der Aufbau eines erneuten Simulationsaufbaus entfällt vollständig.

## 7.6 Diskussion der Ergebnisse

In diesem Kapitel 7 wurden die verschiedenen Methoden anhand von realen Beispielen durchgeführt und somit validiert. Dabei kann festgehalten werden, dass sämtliche Methoden der Modellaufbereitung relativ zur klassischen Variante (Simulation – RE – erneute Simulation) vorteilhaft in Bezug auf Zeit- und Verarbeitungsaufwand sind.

Die Nutzung von Geometriemodellen, welche um deren Abweichungen korrigiert sind, schafft eine erhöhte Genauigkeit in den Simulationen. So zeigt das Beispiel des Motorträgers eine veränderte Spannungsverteilung

im Bereich der Abweichungen. Beim Ausrückhebel folgt mit der Einbindung der Abweichungen eine Erhöhung der maximalen Vergleichsspannung von 10 % im Verhältnis zu Idealgeometrie.

Die Nutzung der tatsächlich gefertigten Geometrie verbessert demnach insgesamt die Darstellung der Spannung. Somit kann genauer auf die Verteilung geachtet und Spannungsspitzen besser erkannt werden. Mit diesen Kenntnissen kann innerhalb der Konstruktion eine Anpassung der Form stattfinden, um diese Schwachstellen frühzeitig zu eliminieren.

Die in dieser Arbeit gesteckten Ziele nach einer verbesserten Simulation durch die Verwendung von abweichungsbehafteten Geometrien können somit erreicht werden. Die umständliche Aufbereitung über den Reverse Engineering Prozess kann mit den vorgestellten Methoden umgangen oder vereinfacht werden kann. Dies führt zu einer signifikante Zeit- und Aufwandsersparnis in der Erzeugung des simulationsfähigen Modells (siehe hier auch Bild 46 im Vergleich zu Bild 48, Bild 51, Bild 57 und Bild 63).

Festzuhalten bleibt jedoch, dass die Modellaufbereitung einen Zusatzaufwand bedeutet. Zur Abschätzung, ob der Aufwand gerechtfertigt ist, müssen die jeweiligen Einzelabweichungen separat betrachtet und bewertet werden. Hierfür liefert das Ebenen-Modell die notwendige Hilfestellung. Somit ist in dieser Arbeit ein vollständiger und durchgängiger Prozess der Bewertung der Abweichung und der vorteilhaftesten Methode zur Aufbereitung gegeben.



## 8 Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wird eine Methode zur Evaluation von Simulationsergebnissen mit Hilfe von Realgeometriedaten vorgestellt. Die Ziele dabei bestehen darin, auf Basis des Scans eines werkzeugfallenden Prototyps, dem Produktentwickler eine Unterstützung beim Vergleich von idealer CAD-Geometrie zu gescannter Realkontur zu liefern. Es muss ein wissenschaftsbasiertes und reproduzierbares Vorgehen bereitgestellt werden, um die auftretenden Abweichungen hinsichtlich ihrer Relevanz auf eine Simulation bewerten zu können und gleichzeitig Möglichkeiten zur Aufbereitung des Simulationsmodells anbieten.

Die in Kapitel 6 dargebotene Vorgehensweise kann die genannten Ziele erfüllen und den Produktentwickler durch situative Bereitstellung der benötigten Informationen durch den Entscheidungsfindungsprozess leiten. Ferner sind verschiedene Arten der Aufbereitung integriert, welche abhängig vom Modellreifegrad simulationsfähige Modelle bereitstellen können.

### 8.1 Zusammenfassung

In den anfänglichen Kapiteln wurden Simulationsmethoden als wichtiges Werkzeug der Produktentwicklung identifiziert. Diese führen zu kürzeren Entwicklungszeiten und können die hohen Kosten für aufwändige Tests reduzieren, indem im Vorlauf die Produkte bereits durch Simulationen abgesichert sind.

Kapitel 2 benennt eine der größten Herausforderungen bei der Simulation: die Modellbildung. Für geometrische Analysen wird hierbei stets das ideale CAD-Modell verwendet. Dieses ist aber aufgrund unvermeidlicher Ungenauigkeiten im Fertigungsprozess stets abweichungsbehaftet. Somit leitet sich die Zielsetzung ab, realistischere Simulationsmodelle zu generieren, welche die geometrischen Fertigungsabweichungen integriert haben, um möglichst noch genauere Ergebnisse zu erhalten.

Als Stand der Technik und Wissenschaft werden in den Kapiteln 3 und 4 zunächst die grundsätzliche Konstruktionsmethodik, die Modellierung mittels CAD und die gängigsten Simulationsmethoden dargestellt. Zur Darstellung der Fertigungsabweichungen ist eine Erfassung von physischen Bauteilen notwendig, weshalb im Weiteren der RE-Prozess mit den notwendigen Digitalisierungsmöglichkeiten beschrieben ist. Darauf aufbauend werden neue wie etablierte Ansätze aus Industrie und Forschung

aufgeführt, welche Simulationen von und mit abweichungsbehafteten Modellen durchführen. Diese sind jedoch allgemein sehr aufwändig oder nur für sehr begrenzt anwendbar.

Somit wurden in Kapitel 5 die Kernpunkte der Arbeit abgeleitet, einen Prozess zur Evaluation der Produktsimulationen zu entwickeln, welche auf einem Geometrievergleich des Soll- und Ist-Zustandes basieren und Methoden bereitzustellen, Geometriemodell mittels Scandaten aufzubereiten.

Im Kapitel 6 wurde schließlich ein Modell vorgestellt, die auftretenden Abweichungen auf deren Einfluss auf das Simulationsmodell/-ergebnis zu bewerten. Weiterhin konnten insgesamt vier Methoden entwickelt werden, welche eine Modellaufbereitung ermöglichen ohne den vollständigen Weg des RE zu durchlaufen.

Eine Verifikation der Methoden erfolgte in Kapitel 7 durch die Verwendung jedes einzelnen Aspektes an realen Anwendungsfällen aus dem industriellen Umfeld.

## 8.2 Ausblick

Um die Gesamtstruktur zukünftig zu verbessern, ist eine Erweiterung der Wissens- und Datenbasis ein wichtiger Schritt. Dies kann jedoch nur in konkreten Fällen in der aktuellen Umgebung des Anwenders mit vergleichbaren Bauteilen und/oder Vorgängerversion geschehen.

Um genauere und vollständigere Realgeometriemodelle zu erhalten, ist die Entwicklung neuer und verbesserter Messtechnik entscheidend. Hierbei sind in den letzten Jahren bereits viele Fortschritte erzielt worden und es ist davon auszugehen, dass dieser Trend auch fortan bestehen bleibt.

Möglichst sämtliche Fehler bereits in der frühen Entwurfsphase des PEP zu entdecken und zu vermeiden ist aufgrund der Zehnerregel der Fehlerkosten von großer Wichtigkeit in Unternehmen. Da physische Prototypen in diesem Stadium kaum zur Verfügung stehen, bietet eine aussagekräftige Prozesssimulation großes Potenzial, einen 3D-Scan zunächst zu substituieren. Der vorgestellte Prozess ist aufgrund der ähnlichen Datenstruktur von Scan- und Simulationsmodell dahingehend flexibel. Jedoch liefern aktuelle Fertigungssimulationen noch nicht den gewünschten Genauigkeitsgrad.

Abschließend bietet der genannte Ansatz weitere Potentiale über die Simulation hinaus, beispielsweise im Kontext eines Digital Twins.

## 9 Summary and Outlook

In this thesis a method for the evaluation of simulation results with the help of real geometry data is presented. The aim is to support the product developer in comparing ideal CAD geometry with scanned real contours based on the scan of a prototype. A knowledge-based and reproducible procedure must be provided in order to be able to evaluate the occurring deviations with regard to their relevance to a simulation and at the same time offer possibilities for the preparation of the simulation model.

The procedure presented in chapter 6 can fulfill the mentioned objectives and guide the product developer through the decision making process by situational provision of the required information. Furthermore, various types of preparation are integrated, which can provide simulation-capable models depending on the model maturity level.

### 9.1 Summary

In the initial chapters, simulation methods were identified as an important tool for product development. These lead to shorter development times and can reduce the high costs for complex tests by ensuring that the products are already validated by simulations in the run-up phase.

Chapter 2 identifies one of the greatest challenges in simulation: modelling. The ideal CAD model is always used for geometric analyses. However, due to unavoidable inaccuracies in the manufacturing process, this model is always subject to deviations. Therefore, the objective is to generate more realistic simulation models that integrate the geometric manufacturing deviations in order to obtain even more accurate results.

As the state of the art and science, chapters 3 and 4 first describe the basic design methodology, modelling using CAD and the most common simulation methods. For the representation of manufacturing deviations, it is necessary to capture physical components, which is why the RE process is described below with the necessary digitization options. Based on this, new as well as established approaches from industry and research will be listed, which perform simulations of and with models that are subject to deviations. However, these are generally very complex or only applicable to a very limited extent.

Thus, in chapter 5 the main points of the work were derived to develop a process for the evaluation of the product simulations, which are based on

a geometric comparison of the nominal and actual state and to provide methods to process the geometric model with scan data.

Finally, in chapter 6 a model was presented to evaluate the occurring deviations on their influence on the simulation model and results. Furthermore four methods have been developed, which allow a model preparation without going through the complete path of RE.

A verification of the methods was carried out in chapter 7 by using every single aspect in real use cases from the industrial environment.

## **9.2 Outlook**

In order to improve the overall structure in the future, an expansion of the knowledge and data base is an important step. However, this can only be done in concrete cases in the user's current environment with comparable components and/or previous versions.

In order to obtain more accurate and complete real geometry models, the development of new and improved measurement technology is crucial. In this area, much progress has been made in recent years and it can be assumed that this trend will continue.

Detecting and avoiding all errors in the early design phase of the PEP is of great importance in companies due to the rule of ten of the failure cost. Since physical prototypes are hardly available at this stage, a reliable process simulation offers great potential to substitute a 3D scan. The presented process is flexible due to the similar data structure of scan and simulation model. However, current manufacturing simulations do not yet provide the desired degree of accuracy.

Finally, the approach mentioned offers further potentials beyond simulation, for example in the context of a digital twin.

# Literaturverzeichnis

- [1] WIERSE, A.: Simulation ist nicht nur etwas für „Große“. URL: <https://www.blechnet.com/simulation-ist-nicht-nur-etwas-fuer-grosse-a-729830/>. Abgerufen am: 18.07.2019.
- [2] PAQUIN, R.; PROUTY, K.: Die Vorteile virtueller Simulation im Vergleich zu herkömmlichen ethoden. URL: [https://www.solidworks.de/sw/docs/10032-RR-Virtual-Simulation-Software\\_DEU.pdf](https://www.solidworks.de/sw/docs/10032-RR-Virtual-Simulation-Software_DEU.pdf). Abgerufen am: 22.07.2019.
- [3] MARKETSSANDMARKETS: Simulation Software Market by Component (Software and Services), Application, Vertical (Automobile, Aerospace & Defense, Electrical & Electronics, Healthcare, and Education & Research), Deployment Mode, and Region - Global Forecast to 2022. URL: [https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/simulation-software-market-263646018.html?gclid=EAIaI-QobChMInliHyJu84wIVA-d3ChozKQedE-AAYASAAEgKYx\\_D\\_BwE](https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/simulation-software-market-263646018.html?gclid=EAIaI-QobChMInliHyJu84wIVA-d3ChozKQedE-AAYASAAEgKYx_D_BwE). Abgerufen am: 19.07.2019.
- [4] GEBHARDT, C.: Praxisbuch FEM mit ANSYS Workbench. Einführung in die lineare und nichtlineare Mechanik. 2., überarb. Aufl., [elektronische Ressource]. München: Hanser, 2014.
- [5] BURMEISTER, J.; DILLINGER, J.; ESCHERICH, W.; IGNATOWITZ, E.; OESTERLE, S.; REIßLER, L. et al.: Fachkunde Metall. Europa-Lehrmittel. 58., neu bearbeitete Auflage. Haan-Gruiten: Verlag Europa-Lehrmittel, 2017.
- [6] BIRKERT, A.; HAAGE, S.; STRAUB, M.: Umformtechnische Herstellung komplexer Karosserieteile. Auslegung von Ziehanlagen. SpringerLink. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013.
- [7] SCHREYER, S.; VOLK, W.: Optimization of the Modified Yoshida Bucklung Test to investigate the influence of curvature. In: Advanced Materials Research. Bd. 1140, S. 67–74.
- [8] NEE, A. Y. C. (Hg.) (2015): Handbook of Manufacturing Engineering and Technology. London, s.l.: Springer London. URL: <http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4471-4670-4>.
- [9] THOMA, C.; VOLK, W.; BRANNER, G.; EIBISCH, H.: Simulationsgestützte Optimierung der Maßhaltigkeit Simulationsgestützte Optimierung der Maßhaltigkeit von dünnwandigen Strukturbauteilen in der Prozesskette Aluminium-Druckguss. In: Gießerei Rundschau. Bd. 60, 2013, S. 282–286.

- [10] EYERER, P.; ELSNER, P.; HIRTH, T.: Polymer Engineering. Technologien und Praxis. VDI-Buch. Berlin, Heidelberg: Springer, 2008.
- [11] JOHANSSON, J.; STOLT, R.; RAUDBERGET, D.: An approach to capture engineering knowledge through visual evaluation of mass generated design proposals. In: MARJANOVIĆ, D. et al. (Hrsg.): DESIGN 2016. Proceedings. May 16 - 19 2016, Dubrovnik, Croatia, 2016.
- [12] HAUTSCH, S.; KATONA, S.; SPRÜGEL, T.; KOCH, M.; RIEG, F.; WARTZACK, S.: Validierung von prozessgerecht strukturoptimierten Bauteilentwürfen mittels integrierter FE-Realgeometrieanalyse. In: KRAUSE, D.; PAETZOLD, K.; WARTZACK, S. (Hrsg.): Design for X. Beiträge zum 26. DfX-Symposium. 07.-08.10.2015, Herrsching. Hamburg: TuTech, 2015.
- [13] STOCKINGER, A.; WITTMANN, S.; MARTINEK, M.; MEERKAMM, H.; WARTZACK, S.: Virtual assembly analysis. Standard tolerance analysis compared to manufacturing simulation and relative positioning. In: 11th International Design Conference. Proceedings, DESIGN 2010, Dubrovnik, Croatia, 2010.
- [14] KEMPE, J.; HOLLENHORST, M.; HUPPERTZ, T.: „Immer besser“ durch Simulation. Vielfältige Berechnungen führen zu besserem Systemverständnis. In: CADFEM GmbH (Hrsg.): CADFEM Journal. Bd. 2, 2015, S. 32–35.
- [15] PAHL, G.; BEITZ, W.; FELDHUSEN, J.; GROTE, K.-H.: Konstruktionslehre. Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung, Methoden und Anwendung. 7. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer, 2007.
- [16] ANDREASEN, M. M.: Machine Design Methods Based on a Systematic Approach. Dissertation, LUND UNIVERSITY, 1980.
- [17] RODENACKER, W. G.: Methodisches Konstruieren. Grundlagen, Methodik, praktische Beispiele. 27. Konstruktionsbücher. Vierte, überarbeitete Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer, 1991.
- [18] EHRENSPIEL, K.: Integrierte Produktentwicklung. Methoden für Prozessorganisation, Produkterstellung und Konstruktion. München, Wien: Hanser, 1995.
- [19] ROTH, K.: Konstruieren mit Konstruktionskatalogen. Band 1: Konstruktionslehre. 3. Auflage, erweitert und neu gestaltet. Berlin: Springer, 2000.
- [20] VDI 2221: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte. Berlin: Beuth. 1993.

- [21] VDI 2221-1: Methodisches Entwickeln von Lösungsprinzipien. Berlin: Beuth. 1997.
- [22] VDI 2223: Methodisches Entwerfen technischer Produkte. Berlin: Beuth. 2004.
- [23] VDI 2206: Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme. Berlin: Beuth. 2004.
- [24] LINDEMANN, U.: Methodische Entwicklung technischer Produkte. Methoden flexibel und situationsgerecht anwenden. VDI-Buch. 2., bearbeitete Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007.
- [25] HABERFELLNER, R. (Hg.) (2015): Systems Engineering. Grundlagen und Anwendung. 13., aktualisierte Aufl. Zürich: Orell Füssli.
- [26] EIGNER, M.; ROUBANOV, D.; ZAFIROV, R.: Modellbasierte virtuelle Produktentwicklung. Berlin: Springer Vieweg, 2014.
- [27] TECHNICAL OPERATIONS INTERNATIONAL COUNCIL ON SYSTEMS ENGINEERING (INCOSE): Systems Engineering Vision (2020).
- [28] SUTHERLAND, I. E.: SKETCHPAD. A Man Machine Graphical Communication System. Dissertation, MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY (MIT), 1963.
- [29] LOSSACK, R.-S.: Wissenschaftstheoretische Grundlagen für die rechnerunterstützte Konstruktion. Berlin: Springer, 2006.
- [30] VDI 2209: 3-D-Produktmodellierung - Technische und organisatorische Voraussetzungen - Verfahren, Werkzeuge und Anwendungen - Wirtschaftlicher Einsatz in der Praxis. Berlin: Beuth. 2009.
- [31] VAJNA, S.; WEBER, C.; ZEMAN, K.; HEHENBERGER, P.; GERHARD, D.; WARTZACK, S.: CAX für Ingenieure. Eine praxisbezogene Einführung. 3., vollständig neu bearbeitete Auflage. Berlin, 2018.
- [32] GEBHARD, R.: A Resilient Modeling Strategy. Technical Presentation. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=QGj3hwtyZxQ>. Abgerufen am: 02.04.2019.
- [33] LANDERS, D. M.; KHURANA, P.: Horizontally-Structured CAD/CAM Modeling for Virtual Concurrent Product and Process Design. Anmeldenr: US Patent 6,775,581. Veröffentlichungsnr: 6,775,581.
- [34] CAMBA, J. D.; CONTERO, M.; COMPANY, P.: Parametric CAD modeling. An analysis of strategies for design reusability. Computer-Aided Design Bd. 74 (2016), S. 18–31.
- [35] VDI 3633: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen - Begriffe. Berlin: Beuth. 2013.

- [36] ALBERT-LAUKANT, B.; NEIDNICH, M.; ROITH, B.: Simulation. In: RIEG, F.; STEINHILPER, R. (Hrsg.): Handbuch Konstruktion. München: Hanser, 2012, S. 889–906.
- [37] ULLMAN, D. G.: The mechanical design process. New York: McGraw-Hill, 1992.
- [38] GRIEB, P.: Digital Prototyping. Virtuelle Produktentwicklung im Maschinenbau. München, Wien: Hanser, 2010.
- [39] KLEIN, B.: FEM. Grundlagen und Anwendungen der Finite-Element-Methode im Maschinen- und Fahrzeugbau. Lehrbuch. 10., verb. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015.
- [40] DEGER, Y.: Die Methode der finiten Elemente. Grundlagen und Einsatz in der Praxis. 551. Kontakt & Studium. 4. Aufl. Renningen: expert verlag, 2007.
- [41] FAGAN, M. J.: Finite element analysis. Theory and practice. Reprinted. Harlow, Essex: Longman, 1996.
- [42] STEINBUCH, R.: Simulation im konstruktiven Maschinenbau. Anwendung von FEM- und verwandten Systemen in der Konstruktion. München, Wien: Fachbuchverl. Leipzig im Carl-Hanser-Verl., 2004.
- [43] COMMANDANT BENOIT: Note sur une méthode de résolution des équations normales provenant de l'application de la méthode des moindres carrés à un système d'équations linéaires en nombre inférieur à celui des inconnues (Procédé du Commandant Cholesky). Bulletin géodésique (1924) Nr. 2, S. 67–77.
- [44] OERTEL, H.; BÖHLE, M.; REVIOL, T.: Strömungsmechanik. Grundlagen - Grundgleichungen - Lösungsmethoden - Softwarebeispiele. 6., überarbeitete und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag / Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH Wiesbaden, 2011.
- [45] JASTROW, B.: Entwicklung einer Immersed Boundary Methode für einen Entwicklung einer Immersed Boundary Methode für einen block-strukturierten CFD-Code. Dissertation, KARLSRUHER INSTITUT FÜR TECHNOLOGIE (KIT), 2014.
- [46] LAURIEN, E.; OERTEL, H.: Numerische Strömungsmechanik. Grundgleichungen und Modelle - Lösungsmethoden - Qualität und Genauigkeit ; mit über 530 Wiederholungs- und Verständnisfragen.

- Studium. 4., überarbeitete und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag / Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH Wiesbaden, 2011.
- [47] SHABANA, A. A.: Computational dynamics. 2nd ed. New York: Wiley, 2001.
- [48] WLOKA, D. W.: Robotersysteme 1. Technische Grundlagen. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1992.
- [49] KEFERSTEIN, C. P.; MARXER, M.; BACH, C.: Fertigungsmesstechnik. Alles zu Messunsicherheit, konventioneller Messtechnik und Multisensorik. 9., überarbeitete und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2018.
- [50] VDI 5620: Reverse Engineering von Geometriedaten. Berlin: Beuth. 2017.
- [51] HERRMANN, J.; MÖSER, M.: Reverse Engineering. Vom Objekt zum Modell. Allgemeine Vermessungs-Nachrichten avn (2008) Nr. 5, S. 185–187.
- [52] GOCKEL, T.: Interaktive 3D-Modellerfassung mittels One-Shot-Musterprojektion und schneller Registrierung. Dissertation, UNIVERSITÄT KARLSRUHE (TH), 2006.
- [53] DIN EN ISO 10360-1: Geometrische Produktspezifikationen für Koordinatenmessgeräte (KMG), Teil 1 Begriffe. Berlin: Beuth.
- [54] CHRISTOPH, R.; NEUMANN, H. J.: Multisensor-Koordinatenmesstechnik. Dimensionelles Messen mit Optik, Taster und Röntgenotografie. 352. Die Bibliothek der Technik. München: Verl. Moderne Industrie, 2013.
- [55] WECKENMANN, A.; GAWANDE, B.: Koordinatenmeßtechnik. Flexible Meßstrategien für Maß, Form und Lage. München: Hanser, 1999.
- [56] FARO TECHNOLOGIES, I.: Produkte: FARO ScanArm. URL: <https://www.faro.com/de-de/produkte/3d-manufacturing/faro-scanarm/>. Abgerufen am: 22.02.2019.
- [57] CREAFORM: Produkte: Creaform Handyprobe. URL: <https://www.creaform3d.com/de/messtechnik/tragbares-koordinatenmessgeraet-cmm-handyprobe>. Abgerufen am: 22.02.2019.
- [58] HEIPKE, C. (Hg.) (2017): Photogrammetrie und Fernerkundung. Handbuch der Geodäsie, herausgegeben von Willi Freedten und Reiner Rummel. Berlin, Heidelberg, s.l.: Springer Berlin Heidelberg (Springer Reference Naturwissenschaften). URL: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-47094-7>.

- [59] SCHUTH, M.; BUERAKOV, W.: Handbuch optische Messtechnik. Praktische Anwendungen für Entwicklung, Versuch, Fertigung und Qualitätssicherung. München: Hanser, 2017.
- [60] SNAVELY, N.; SEITZ, S. M.; SZELISKI, R.: Photo Tourism. Exploring image collections in 3D. In: ACM Transactions on Graphics (Hrsg.): Proceedings of SIGGRAPH 2006. 30th July to 3rd August, Boston, Massachusetts, USA, 2006.
- [61] AUTODESK: Produkt: Autodesk ReCap. URL: <https://www.autodesk.de/products/recap/overview>. Abgerufen am: 27.02.2019.
- [62] ALICEVISION: Meshroom. URL: <https://alicevision.org/#meshroom>. Abgerufen am: 29.08.2019.
- [63] VISIVS GROUP: ARC3D. URL: <http://www.arc3d.be/>. Abgerufen am: 27.02.2019.
- [64] WU, C.: <http://ccwu.me/vsfrm/>. URL: <http://ccwu.me/vsfrm/>. Abgerufen am: 27.02.2019.
- [65] ALBERTZ, J.; WIGGENHAGEN, M.: Taschenbuch zur Photogrammetrie und Fernerkundung. Guide for photogrammetry and remote sensing. 5., völlig neu bearb. und erw. Aufl. Heidelberg: Wichmann, 2009.
- [66] BÄHR, H.-P.; VÖGTLE, T. (Hg.) (2005): Digitale Bildverarbeitung. Anwendungen in Photogrammetrie, Fernerkundung und GIS. 4., völlig neu bearb. Aufl. Heidelberg: Wichmann. URL: [http://deposit.dnb.de/cgi-bin/dokserv?id=2671283&prov=M&dok\\_var=1&dok\\_ext=htm](http://deposit.dnb.de/cgi-bin/dokserv?id=2671283&prov=M&dok_var=1&dok_ext=htm).
- [67] SCHÖNE, C.; REHM, C.; SCHREIBER, S.: The Golden City Hall Man. 3D Scanning and Reverse Engineering. In: HEMSLEY, J.; KEENE, S. (Hrsg.): EVA 2006 London. Conference proceedings. Hampton Hill, Middlesex: EVA Conferences International, 2006.
- [68] NIEDERÖST, M.; MAAS, H.-G.: Entwurf und Erkennung von codierten Zielmarken. In: Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung (Hrsg.): Tagungsband der 16. Wissenschaftlich-Technischen Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung. 1996, Oldenburg, 1997.
- [69] SCHÖNE, C.: Reverse Engineering für Freiformflächen in Prozessketten der Produktionstechnik. Habilitation, TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN, 2009.

- [70] KATONA, S.; KOCH, M.; WARTZACK, S.: Reverse Engineering. Prozess, Technologie und Anwendungsfälle. In: RIEG, F.; HACKENSCHMIDT, R. (Hrsg.): 16. Bayreuther 3D-Konstrukteurstag. Tagungsband. 17.09.2014, Bayreuth, 2014.
- [71] GRAY, F. (1953): Pulse Code Communication am 17.03.1953. Anmeldnr: U.S. Patent 2,632,058. Veröffentlichungsnr: U.S. Patent 2,632,058.
- [72] DIN EN 16016: Zerstörungsfreie Prüfung - Durchstrahlverfahren - Computer Tomographie. Berlin: Beuth. 2011.
- [73] VDI/VDE 2630: Computertomographie in der dimensionellen Messtechnik. Berlin: Beuth. 2016.
- [74] CREAFORM: Produkte. URL: <https://www.creaform3d.com/de/messtechnik/messtechnik-produkte>. Abgerufen am: 21.02.2019.
- [75] DIONDO: Produkte. URL: <https://www.diondo.com/de/produkte>. Abgerufen am: 21.02.2019.
- [76] FARO TECHNOLOGIES, I.: Produkte. URL: <https://www.faro.com/de-de/produkte/>. Abgerufen am: 21.02.2019.
- [77] GOM: Produkte. URL: <https://www.gom.com/de/messsysteme.html>. Abgerufen am: 21.02.2019.
- [78] HEXAGON: Produkte. URL: <https://www.hexagonmi.com/products>. Abgerufen am: 21.02.2019.
- [79] KREON3D: Produkte. URL: <https://kreon3d.com/de/#>. Abgerufen am: 21.02.2019.
- [80] MITUTOYO: Produkte. URL: [https://shop.mitutoyo.de/web/mitutoyo/de\\_DE/mitutoyo/o8/Coordinate%20Measuring%20Machines/index.xhtml](https://shop.mitutoyo.de/web/mitutoyo/de_DE/mitutoyo/o8/Coordinate%20Measuring%20Machines/index.xhtml). Abgerufen am: 21.02.2019.
- [81] NIKON METROLOGY: Produkte. URL: <https://www.nikonmetrology.com/de/produkte>. Abgerufen am: 21.02.2019.
- [82] PROCON X-RAY: Produkte. URL: <https://www.procon-x-ray.de>. Abgerufen am: 21.02.2019.
- [83] WENZEL: Produkte. URL: <https://www.wenzel-group.com/de/produkte/>. Abgerufen am: 21.02.2019.
- [84] WERTH: Produkte. URL: <https://www.werth.de/de/unsere-angebote/produkte-nach-kategorie/koordinatennessgeraete-fuer/ct-anwendungen.html>. Abgerufen am: 21.02.2019.

- [85] ZEISS INDUSTRIELLE MESSTECHNIK: Produkte. URL: <https://www.zeiss.de/messtechnik/home.html>. Abgerufen am: 21.02.2019.
- [86] ZEISS OPTOTECHNIK: Produkte. URL: <https://optotechnik.zeiss.com/produkte>. Abgerufen am: 21.02.2019.
- [87] ZOLLER+FRÖHLICH: Produkte. URL: <https://www.zf-laser.com/Produkte.laserscanner.o.html>. Abgerufen am: 21.02.2019.
- [88] YXLON: Produkte. URL: <https://www.yxlon.de/products/rontgen-und-ct-prufsysteme>. Abgerufen am: 29.08.2019.
- [89] LEACH, R. (Hg.) (2011): Optical Measurement of Surface Topography. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg. URL: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-12012-1>.
- [90] CHIKOFSKY, E. J.; CROSS, J. H.: Reverse engineering and design recovery. A taxonomy. IEEE Software Bd. 7 (1990) Nr. 1, S. 13-17.
- [91] ROSEMANN, F.; FREIBERGER, S.: Reverse Engineering. In: RIEG, F.; STEINHILPER, R. (Hrsg.): Handbuch Konstruktion. München: Hanser, 2012.
- [92] PERCOCO, G.: Reverse Engineering. In: LAPERRIÈRE, L.; REINHART, G. (Hrsg.): CIRP encyclopedia of production engineering. Springer reference. Berlin: Springer, 2014.
- [93] HOSCHEK, J.; DANKWORT, W. (Hg.) (1996): Reverse Engineering. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag. URL: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-322-84819-2>.
- [94] BIDANDA, B.; GENG, Z.: Emerging Trends in Reverse Engineering. In: CHUA, C. K. et al. (Hrsg.): 2nd International Conference on Progress in Additive Manufacturing. Pro-AM 2016. 16-19 May 2016, Singapore, 2016.
- [95] RAJA, V.; FERNANDES, K. J.: Reverse Engineering. An Industrial Perspective. Springer Series in Advanced Manufacturing. London: Springer-Verlag, 2008.
- [96] CHEN, Y.; MEDIONI, G.: Object modelling by registration of multiple range images. Image and Vision Computing Bd. 10 (1992) Nr. 3, S. 145-155.
- [97] BESL, P. J.; MCKAY, N. D.: A method for registration of 3-D shapes. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence Bd. 14 (1992) Nr. 2, S. 239-256.
- [98] MITCHELL, H. B.: Data Fusion. Concepts and Ideas. 2nd ed. 2012. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012.

- [99] DELAUNAY, B. N.: Sur la sphère vide. Bulletin of Academy of Sciences of the USSR (1934) Nr. No. 6, S. 793–800.
- [100] LORENSEN, W. E.; CLINE, H. E.: Marching Cubes. A high resolution 3D surface construction algorithm. Computer Graphics Bd. Volume 21 (1987) Nr. 4, S. 163–169.
- [101] KIEF, H. B.: NC/CNC Handbuch. München: Hanser, 2005.
- [102] STIEL, C.: Featurebasiertes Gestalten von Produkten mit Freiformgeometrien. Dissertation, TECHNISCHE UNIVERSITÄT BERLIN, 1997.
- [103] COONS, S. A.: Surfaces for computer aided design. Technical Report. 1964.
- [104] GORDON, W. J.: Blending-Function Methods of Bivariate and Multivariate Interpolation and Approximation. SIAM Journal on Numerical Analysis Bd. 8 (1971) Nr. 1, S. 158–177.
- [105] GORDON, W. J.: Free-form Surface Interpolation through Curve Networks. Technical Report GMR-921. 1969.
- [106] GORDON, W. J.: Spline-Blended Surface Interpolation Through Curve Networks. Journal of Mathematics and Mechanics Bd. Vol. 18 (1969) Nr. No.10, S. 931–952.
- [107] CASTELJAU, P. de: Outillages méthodes calcul. Technischer Bericht. 1959.
- [108] CASTELJAU, P. de: Courbes et surfaces à poles. Technischer Bericht. 1963.
- [109] BÉZIER, P.; FORREST, A. R.: Numerical control. Mathematics and applications. Wiley series in computing. London: Wiley, 1972.
- [110] BÉZIER, P.: Définition numérique des courbes et surface II. Automatismes (1967) Nr. XII, S. 17–21.
- [111] BÉZIER, P.: Définition numérique des courbes et surface I. Automatismes (1966) Nr. XI, S. 625–632.
- [112] PIEGL, L.; TILLER, W.: The NURBS Book. Monographs in Visual Communication. Second Edition. Berlin, Heidelberg: Springer, 1997.
- [113] MÜLLER, K.: NURBS und Unterteilungsflächen. Adaptive Visualisierung von Unterteilungsflächen und ihre Erweiterung auf nicht-uniforme Flächen. Dissertation, TECHNISCHE UNIVERSITÄT BRAUNSCHWEIG, 2006.
- [114] ISO 14306: Industrial automation systems and integration - JT file format specification for 3D visualization. 2017.

- [115] ISO 10303: Industrial automation systems and integration - Product data representation and exchange.
- [116] U.S. PRODUCT DATA ASSOCIATION: Initial Graphics Exchange Specification IGES 5.3. 1996.
- [117] DIN 66301: Industrielle Automation; Rechnerunterstütztes Konstruieren; Format zum Austausch geometrischer Informationen. Berlin: Beuth. 1986.
- [118] VIRTUAL REALITY MAGAZIN: Virtuelles Benchmarking in der Automobilindustrie. URL: <https://www.virtual-reality-magazin.de/virtuelles-benchmarking-der-automobilindustrie>. Abgerufen am: 01.03.2019.
- [119] TECOSIM: Virtuelles Benchmarking: TEC|BENCH. URL: <https://www.tecosim.com/de/produkte/virtuelles-benchmarking/>. Abgerufen am: 01.03.2019.
- [120] DUDENREDAKTION (Hg.) (2017): Duden. Die deutsche Rechtschreibung. Berlin: Duden.
- [121] BIANCOLINI, M. E.: RBF Morph software. RBF mesh morphing ACT extension for ANSYS Mechanical. In: Ansys Inc. (Hrsg.): International Conference on Automotive and Electronics Technologies 2014. Proceedings of a meeting held 9-10 October 2014, Tokyo, Japan. Automotive Simulation World Congress 2014 and ANSYS Electronics Simulation EXPO 2014. 9-10 October 2014, Tokyo, Japan. Curran Associates, Inc., 2014.
- [122] SAALFELD, B.; RÜTTEN, M.; SAALFELD, S.; KÜNEMUND, J.: Improved Mesh Morphing Based on Radial Basis Functions. In: EBERHARDSTEINER, J.; BÖHM, H. J.; RAMMERSTORFER, F. G. (Hrsg.): ECCOMAS 2012 e-book. containing all full papers submitted to the ECCOMAS 2012 Congress (6th European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering). September 10-14, 2012, Vienna, Austria, 2012.
- [123] RBF MORPH SRL A SOCIO UNICO: RBF-Morph. URL: <http://www.rbf-morph.com/>. Abgerufen am: 01.03.2019.
- [124] ALTAIR: Altair HyperMesh Overview. URL: <https://altairhyperworks.de/product/HyperMesh>. Abgerufen am: 01.03.2019.
- [125] BUHMANN, M. D.: Radial basis functions. Theory and implementations. 12. Cambridge monographs on applied and computational mathematics. Transferred to digital print. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2006.

- [126] HRAIECH, N.; TADDEI, F.; MALVESIN, E.; ROCHETTE, M.; VICECONTI, M.: Fast 3D mesh generation of femur based on planar parameterization and morphing. In: 2008 5th IEEE International Symposium on Biomedical Imaging: From Nano to Macro. 14.05.2008 - 17.05.2008, Paris, France: IEEE, 2008, S. 1561–1564.
- [127] TIERNY, J.; VANDEBORRE, J.-P.; DAOUDI, M.: 3D Mesh Skeleton Extraction Using Topological and Geometrical Analyses. In: 14th Pacific Conference on Computer Graphics and Applications (Pacific Graphics 2006). October 2006, Taipei, Taiwan, 2006.
- [128] REEB, G.: Sur les points singuliers d'une forme de Pfaff complétement int'égrable ou d'une fonction num'érique. In: Comptes-rendus de l'Académie des Sciences, 222, 1946, S. 847–849.
- [129] MORSE, M.: The calculus of variations in the large. 18. American Mathematical Society colloquium publications. 9. print. Providence, RI: American Math. Soc, 1996.
- [130] DEUTSCHE FORSCHUNGSGEMEINSCHAFT (DFG): Topologieorientierte Verformung von FEM-Netzen in iterativen Reverse Engineering Prozessen. Projektergebnisse. URL: <http://gepris.dfg.de/gepris/projekt/195604115/ergebnisse>. Abgerufen am: 17.01.2019.
- [131] KLAUS, M.; SCHÖNE, C.; STELZER, R.: FE- Netzverformung an Scandaten ähnlicher Objekte. In: BRÖKEL, K. et al. (Hrsg.): 14. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik. Tagungsband. 06.-07.10.2016, Rostock, 2016, S. 279–287.
- [132] KLAUS, M.; HOLTZHAUSEN, S.; SCHÖNE, C.; STELZER, R.: Topology-orientated deformation of FE-meshes in iterative reverse engineering processes. In: American Society of Mechanical Engineers (ASME) (Hrsg.): Proceedings of the ASME 11th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis 2012. July 2-4, 2012, Nantes, France. New York: American Society of Mechanical Engineers (ASME), 2012.
- [133] INNOVMETRIC SOFTWARE: PolyWorks | Modeler. URL: <https://www.innovmetric.com/en/products/polyworks-modeler>. Abgerufen am: 04.03.2019.
- [134] MATERIALISE: 3-matic. URL: <https://www.materialise.com/de/software/3-matic/module>. Abgerufen am: 04.03.2019.
- [135] HUSUNG, S.; WEBER, C.; KROSCHER, A.; KRONE, K.-H.; CREDO, T.; MÜLLER, B.; ACKERMANN, L.: Application of Vectoral Tolerances in CAD-Systems during the Design Process. In: MARJANOVIĆ, D. et al.

- (Hrsg.): DESIGN 2016. Proceedings. May 16 - 19 2016, Dubrovnic, Croatia, 2016, S. 659–668.
- [136] JORDEN, W.; SCHÜTTE, W.: Form- und Lagetoleranzen. Handbuch für Studium und Praxis. 9., neu bearbeitete Auflage. München: Hanser, 2017.
- [137] TURNER, J. U.; WOZNY, M. J.: Tolerances in computer-aided geometric design. *Visual Computer* (1987) Nr. 3, S. 214–226.
- [138] STOLL, T.: Einsatzmöglichkeiten von virtuellen, nichtidealen Prototypen in der Toleranzsynthese und-analyse. Dissertation, FRIEDRICH-ALEXANDER-UNIVERSITÄT ERLANGEN-NÜRNBERG, 2012.
- [139] SÖDERBERG, R.: Software RD&T. URL: <http://www.rdnt.se/>. Abgerufen am: 20.03.2019.
- [140] SCHLEICH, B.: Skin Model Shapes. A new Paradigm for the Tolerance Analysis and the Geometrical Variations Modelling in Mechanical Engineering. Dissertation, FRIEDRICH-ALEXANDER-UNIVERSITÄT ERLANGEN-NÜRNBERG, 2017.
- [141] BALLU, A.; MATHIEU, L.: Analysis of dimensional and geometrical specifications: standards and models. 3rd CIRP Seminar on Computer-Aided Tolerancing, Cachan, France (1993), S. 157–170.
- [142] SCHLEICH, B.; ANWER, N.; MATHIEU, L.; WARTZACK, S.: Status and Prospects of Skin Model Shapes for Geometric Variations Management. *Procedia CIRP* Bd. 43 (2016), S. 154–159.
- [143] HENKE, R. P.; SUMMERHAYS, K. D.; BALDWIN, J. M.; CASSOU, R. M.; BROWN, C. W.: Methods for evaluation of systematic geometric deviations in machined parts and their relationships to process variables. *Precision Engineering* Bd. 23 (1999) Nr. 4, S. 273–292.
- [144] SCHLEICH, B.; WARTZACK, S.: A discrete geometry approach for tolerance analysis of mechanism. *Mechanism and Machine Theory* Bd. 77 (2014), S. 148–163.
- [145] NAFORS, D.; LINDSKOG, E.; BERGLUND, J.; GONG, L.; JOHANSSON, B.; VALLHAGEN, J.: Realistic virtual models for factory layout planning. In: 2017 Winter Simulation Conference (WSC). 03.12.2017 - 06.12.2017, Las Vegas, NV: IEEE, 2017, S. 3976–3987.
- [146] TAYLOR, S. J. E.; ROBINSON, S.: So where to next? A survey of the future for discrete-event simulation. *Journal of Simulation* Bd. 1 (2017) Nr. 1, S. 1–6.

- [147] BECKER, M. C.; SALVATORE, P.; ZIRPOLI, F.: The impact of virtual simulation tools on problem-solving and new product development organization. *Research Policy Bd.* 34 (2005) Nr. 9, S. 1305–1321.
- [148] PROCEEDINGS OF THE WINTER SIMULATION CONFERENCE 2014 (2014). 2014 Winter Simulation Conference - (WSC 2014). Savannah, GA, USA, 07.12.2014 - 10.12.2014: IEEE.
- [149] LINDSKOG, E.; BERGLUND, J.; VALLHAGEN, J.; BERLIN, R.; JOHANSSON, B.: Combining point cloud technologies with discrete event simulation. In: *Proceedings Title: Proceedings of the 2012 Winter Simulation Conference (WSC)*. 09.12.2012 - 12.12.2012, Berlin, Germany: IEEE, 2012, S. 1–10.
- [150] WARTZACK, S.: Predictive Engineering - Assistenzsystem zur multi-kriteriellen Analyse alternativer Produktkonzepte. Dissertation, FRIEDRICH-ALEXANDER-UNIVERSITÄT ERLANGEN-NÜRNBERG, 2001.
- [151] GRABOWSKI, H.; ANDERL, R.; POLLY, A.: Integriertes Produktmodell. *Entwicklungen zur Normung von CIM*. 1. Aufl. Berlin: Beuth, 1993.
- [152] DIN EN ISO 14638: Geometrische Produktspezifikation - Matrix Modell. Berlin: Beuth. 2015.
- [153] DIN EN ISO 8015: Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Grundlagen - Konzepte, Prinzipien und Regeln. Berlin: Beuth. 2011.
- [154] DIN 7167: Hüllbedingung ohne Zeichnungseintrag. Berlin: Beuth.
- [155] DIN EN ISO 14405: Geometrischen Produktspezifikation (GPS) - Dimensionelle Tolerierung. Berlin: Beuth.
- [156] DIN EN ISO 286: Geometrische Produktspezifikation (GPS) - ISO-Toleranzsystem für Längenmaße. Berlin: Beuth. 2019.
- [157] DIN EN ISO 1302: Geometrischen Produktspezifikation (GPS) - Angabe der Oberflächenbeschaffenheit in der technischen Produktdokumentation. Berlin: Beuth. 2002.
- [158] DIN EN ISO 1101: Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Geometrische Tolerierung -Tolerierung von Form, Richtung, Ort und Lauf. Berlin: Beuth. 2017.
- [159] DIN ISO 2768: Allgmeintoleranzen. Berlin: Beuth. 1991.
- [160] DIN EN ISO 8062: Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Maß-, Form- und Lagetoleranzen für Formteile. Berlin: Beuth.
- [161] DIN EN ISO 13920: Allgmeintoleranzen für Schweißkonstruktionen. Berlin: Beuth. 1996.

- [162] SPRÜGEL, T.; KESTEL, P.; WARTZACK, S.: FEA-Assistenzsystem – Plausibilitätsprüfung für Finite-Elemente-Simulationen mittels sphärischer Detektorflächen. In: KRAUSE D., P. K. W. S. (Hrsg.): Beiträge zum 27. DfX-Symposium, 2016.
- [163] SPRÜGEL, T.; SCHRÖPPEL, T.; WARTZACK, S.: Generic Approach to Plausibility Checks for Structural Mechanics with Deep Learning. In: Proceedings of the 21st International Conference on Engineering Design (ICED17). Vol. 1: Resource-Sensitive Design | Design Research Applications and Case Studies: Vancouver, Canada, 21.-25.08.2017, 2017, S. 299–308.
- [164] GROTE, K.-H.; BENDER, B.; GÖHLICH, D. (Hg.) (2018): *Dubbel - Taschenbuch für den Maschinenbau*. Berlin: Springer Vieweg.
- [165] MOLDENHAUER, H.: Die Visualisierung des Kraftflusses in Stahlbaukonstruktionen. *Stahlbau* Bd. 81 (2012) Nr. 1, S. 32–40.
- [166] LINDEMANN, U. (Hg.): *Forschungsverbund FORPRO<sup>2</sup>. Effiziente Produkt- und Prozessentwicklung durch wissensbasierte Simulation*. URL: <https://www.forproz.tum.de/forschungsverbund/>. Abgerufen am: 05.03.2019.
- [167] BREITSPRECHER, T.; KESTEL, P.; DINGFELDER, C.; WARTZACK, S.: Gaussian Process based approach for automatic knowledge acquisition. In: MARJANOVIC, D. et al. (Hrsg.): Proceedings of the 13th International Design Conference, 2014.
- [168] BREITSPRECHER, T.; KESTEL, P.; KÜSTER, C.; SPRÜGEL, T.; WARTZACK, S.: Einsatz von Data-Mining in modernen Produktentstehungsprozessen. *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* Bd. 110 (2015) Nr. 11, S. 744–750.
- [169] KATONA, S.; KOCH, M.; WARTZACK, S.: Integrating real geometry models into product simulations: An approach of a knowledge-based process. In: MARJANOVIĆ, D. et al. (Hrsg.): DESIGN 2016. Proceedings. May 16 - 19 2016, Dubrovnic, Croatia, 2016, S. 689–696.
- [170] KATONA, S.; KOCH, M.; WARTZACK, S. (2016): An Approach of a Knowledge-based Process to Integrate Real Geometry Models in Product Simulations. In: *Procedia CIRP* Bd. 50, S. 813–818. DOI: 10.1016/j.procir.2016.04.176.
- [171] KATONA, S.; KOCH, M.: Verbesserung von Simulationsergebnissen durch Integration von Geometriemessdaten. *Konstruktion - Zeitschrift für Produktentwicklung und Ingenieur-Werkstoffe* (2018) Nr. 3, S. 70–74.

- [172] KATONA, S.; KOCH, M.; WARTZACK, S.: Reale Bauteilgeometrien simulieren. Automatisierte Flächenrückführung. Digital Engineering Magazin Bd. 17 (2014) Nr. 4/14, S. 38–40.
- [173] KATONA, S.; KOCH, M.; WARTZACK, S.: Generating hybrid geometry models for more precise simulations by combining parametric cad-models with 3D surface scanned geometry inserts. In: Proceedings of the 20st International Conference on Engineering Design (ICED15). Bd. 10: Milan; Italy; 27 July 2015 through 30 July 2015, 2015, S. 11–20.
- [174] KATONA, S.; KESTEL, P.; KOCH, M.; WARTZACK, S.: Vom Ideal- zum Realmodell. Bauteile mit Fertigungsabweichungen durch automatische FE-Netzadaption simulieren. In: STELZER, R. (Hrsg.): Entwerfen Entwickeln Erleben – Beiträge zu virtuellen Produktentwicklung und Konstruktionstechnik. Dresden: TUDPress, 2014.
- [175] KATONA, S.; SPRÜGEL, T.; KOCH, M.; WARTZACK, S.: Adapting FE-Meshes to real, 3D surface detected geometry data to improve FE-simulation results. In: NAFEMS (Hrsg.): Summary of Proceedings NAFEMS World Congress 2015, 2015, -.
- [176] KATONA, S.; KOCH, M.; SPRUEGEL, T. C.; WARTZACK, S.: Structural Mechanics Analysis Using an FE-Mesh Adaption to Real, 3D Surface Detected Geometry Data. Journal of Mechanics Engineering and Automation Bd. 5 (2015) Nr. 7.
- [177] NAUNHEIMER, H.; BERTSCHE, B.; LECHNER, G.: Fahrzeuggetriebe. Grundlagen, Auswahl, Auslegung und Konstruktion ; mit 85 Tabellen. VDI. 2., bearb. und erw. Aufl. Berlin, Heidelberg, New York, NY: Springer, 2007.

## Verzeichnis promotionsbezogener, eigener Publikationen

- [P1] KATONA, S.; KOCH, M.: Verbesserung von Simulationsergebnissen durch Integration von Geometriemessdaten. In: KONSTRUKTION, Ausgabe 3/2018, März 2018, S. 70-74. ISSN 0720-5953
- [P2] CARRO SAAVEDRA, C.; D'ALBERT, H.; GOLLER, D.; HAUTSCH, ST.; HEILMEIER, F.; KAMMERL, D.; KATONA, S.; KESTEL, P.; KOCH, M.; LINDEMANN, U.; OTTEN, D.; RIEG, F.; SCHMID, M.; SCHMIDT, D.M.; SCHREYER, S.; SCHWEIGERT, S.; SPRÜGEL, T.C.; VOLK, W.; WARTZACK, S.: Effiziente Produkt- und Prozessentwicklung durch wissensbasierte Simulation – Ein Leitfaden für Praktiker. ABColor Druck, München: 2017.
- [P3] HAUTSCH, ST.; KATONA, S.; SPRÜGEL, T. C.; KOCH, M.; RIEG, F.; WARTZACK, S.: Anwendung wissensbasierter Simulationen zur Ausschöpfung von Leichtbaupotenzialen in der Automobilindustrie. In: Krause, D.; Paetzold, K.; Wartzack, S. (Hrsg.): Design for X – Beiträge zum 27. DfX-Symposium, Jesteburg, 05.-06.10.2016. Hamburg, TuTech Verlag, 2016.
- [P4] LUŠIĆ, M.; KATONA, S.; HORNFECK, R.: Compensating Deviations During Flexible Pin-type Moulding of Spatially Curved CFRP by Using 3D-Surface Detection. In: Procedia CIRP, Vol. 55, 2016, P.158-163, 5th CIRP Global Web Conference Research and Innovation for Future Production (CIRPe), 04.-06.10.2016.
- [P5] KATONA, S.; KOCH, M.; WARTZACK, S.: An approach of a knowledge-based process to integrate real geometry models in product simulations. In: Procedia CIRP, Vol. 50, 2016, P. 813-818, 26th CIRP Design Conference, Stockholm, Sweden, 15.-17.06.2016.
- [P6] KATONA, S.; LUŠIĆ, M.; KOCH, M.; WARTZACK, S.: Integrating optical 3D measurement techniques in pipe bending: a model-based approach minimising waste by deriving real functional design behaviour. In: Procedia CIRP, Vol. 50, 2016, P. 808-812, 26th CIRP Design Conference, Stockholm, Sweden, 15.-17.06.2016.
- [P7] KATONA, S.; KOCH, M.; WARTZACK, S.: Integrating real geometry models into product simulations: an approach of a knowledge-based process. In: Marjanović D., Štorga M., Pavković N., Bojčetić

- N., Škec S. (eds.): Proceedings of the 14th International Design Conference DESIGN 2016, Cavtat, Dubrovnik, Croatia, 16.-19.05.2016, P. 689-696.
- [P8] KESTEL, P.; SPRÜGEL, T.C.; KATONA, S.; LEHNHÄUSER, T.; WARTZACK, S.: Concept and Implementation of a Central Knowledge Framework for Simulation Knowledge. In: European Conference on Simulation Process and Data Management – SPDM, Munich, Germany, 2.-3.12.2015.
- [P9] HAUTSCH, ST.; KATONA, S.; SPRÜGEL, T. C.; KOCH, M.; RIEG, F.; WARTZACK, S.: Validierung von prozessgerecht strukturoptimierten Bauteilentwürfen mittels integrierter FEM-Realgeometrieanalyse. In: Krause, D.; Paetzold, K.; Wartzack, S. (Hrsg.): Design for X – Beiträge zum 26. DfX-Symposium, Herrsching, 07.-08.10.2015. Hamburg, TuTech Verlag, 2015, S. 181-192. ISBN-978-3-941492-93-6
- [P10] KATONA, S.; SPRÜGEL, T. C.; KOCH, M.; WARTZACK, S.: Structural mechanics analysis using an FE-mesh adaption to real, 3d surface detected geometry data. In: Journal of Mechanics Engineering and Automation (JMEA), Vol. 5, No. 7, July 2015, P. 387-394. ISSN 2159-5275 (print), 2159-5283 (online)
- [P11] KATONA, S.; KOCH, M.; WARTZACK, S.: Generating hybrid geometry models for more precise simulations by combining parametric CAD-models with 3d surface detected geometry inserts. In: Proceedings of the 20th International Conference on Engineering Design (ICED15), Milan, Italy, 27.-30.07.2015.
- [P12] KATONA, S.; LANDKAMMER, ST.; MORINA, D.; WINTER, F.; HORNFECK, R.; KOCH, M.: Reverse Engineering – 3D-Scannen als Werkzeug in der Produktentwicklung. In: Technik in Bayern, Heft 4/2015, S. 22f. ISSN 1610-6563
- [P13] KATONA, S.; SPRÜGEL, T. C.; KOCH, M.; WARTZACK, S.: Adapting FE-meshes to real, 3d surface detected geometry data to improve FE-simulation results. In: NAFEMS Ltd. (Ed.): NAFEMS World Congress – A world of engineering simulation; Summary of Proceedings. San Diego, USA. ISBN-13 978-1-910643-24-2
- [P14] KESTEL, P.; SPRÜGEL, T. C.; KATONA, S.; WARTZACK, S.: Konzept zur Umsetzung einer zentralen Wissensbasis für Simulationswissen in ANSYS Engineering Knowledge Manager. In: ANSYS Conference & 33. CADFEM Users' Meeting 2015, Bremen, 24.-26.06.2015.

- [P15] KATONA, S.; KOCH, M.; WARTZACK, S.: Reverse Engineering – Prozess, Technologien und Anwendungsfälle. In: Rieg, F.; Hackenschmidt, R. (Hrsg.): 16. Bayreuther 3D-Konstrukteurstag. Lehrstuhl für Konstruktionslehre und CAD, Universität Bayreuth, 17.09.2014. ISBN-978-3-00-046550-5
- [P16] KATONA, S.; KESTEL, P.; KOCH, M.; WARTZACK, S.: Vom Ideal- zum Realmodell: Bauteile mit Fertigungsabweichungen durch automatische FE-Netzadaption simulieren. In: Stelzer, R. (Hrsg.): Entwerfen Entwickeln Erleben – Beiträge zur virtuellen Produktentwicklung und Konstruktionstechnik. Dresden, TUDpress, 2014, S. 275-286. ISBN-978-3-944331-67-6
- [P17] KATONA, S.; KOCH, M.; WARTZACK, S.: Automatisierte Flächenrückführung - Reale Bauteilgeometrien simulieren. In: Digital Engineering Magazin, 17. Jg. 2014, Heft 4, S. 38-40. ISSN 1618-002X

## Verzeichnis promotionsbezogener, studentischer Arbeiten\*

- [S1] THAMM, L.; KATONA, S.; HORNFECK, R.: Bestimmung der Messunsicherheit des FARO Laser Scan Arm V3. Masterprojektarbeit (2014), Nürnberg
- [S2] TOMBUL, E.; KATONA, S.; KOCH, M.: Visualisierung des Kraftflusses an einem Bauteil/einer Baugruppe. Bachelorarbeit (2014), Nürnberg
- [S3] VOGT, CH.; KATONA, S.; KOCH, M.: Softwaregestützte Ermittlung der Prozesskennwerte  $C_p$  und  $C_{pk}$  von lasergescannten Bauteilen mit PolyWorks IMInspect. Masterprojektarbeit (2014), Nürnberg
- [S4] DUCKWITZ, A.; KATONA, S.; KOCH, M.: Machbarkeitsstudie zur automatisierten Erstellung von Hybridmodellen mit SolidWorks. Bachelorarbeit (2014), Nürnberg
- [S5] EISFELD, P.; KATONA, S.; KOCH, M.: Untersuchung des Einflusses von Falten-/Wellenwurf beim Tiefziehen auf die Simulation. Bachelorarbeit (2015), Nürnberg
- [S6] FREUDENBERGER, S.; KOCH, M.: Untersuchung von optischen Verfahren zur dreidimensionalen Körpervermessung, 3D-Modellierung sowie Bilderzeugung und Prüfung der Verwendbarkeit für Sachverständige. Bachelorarbeit (2015), Nürnberg
- [S7] RETTIG, T.; CLAUSEN, S.; KATONA, S.; KOCH, M.: Parametrische Korrektur von Fertigungsabweichungen an CAD-Modellen auf Basis eines Realgeometriescans. Masterprojektarbeit (2015), Nürnberg
- [S8] CLAUSEN, S.; KATONA, S.; KOCH, M.: Umsetzung einer automatisierten Integration von Scan-Inserts in parametrische CAD-Modelle (zu Hybridmodellen) in SolidWorks. Masterarbeit (2016), Nürnberg
- [S9] ZEILINGER, D.; KATONA, S.; KOCH, M.: Machbarkeitsstudie einer FE-Netzanpassung an Scandaten mit kommerziellen Morph-Paketen. Masterprojektarbeit (2018), Nürnberg

---

\* Der Autor an zweiter (und ggf. dritter) Stelle bezeichnet den bzw. die Betreuer der studentischen Arbeit und an letztgenannter Stelle den/die Lehrstuhlinhaber/in.



## Reihenübersicht

Koordination der Reihe (Stand 2020):  
Geschäftsstelle Maschinenbau, Dr.-Ing. Oliver Kreis, [www.mb.fau.de/diss/](http://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:

<b>FAPS</b>	Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik
<b>KTmfk</b>	Lehrstuhl für Konstruktionstechnik
<b>LFT</b>	Lehrstuhl für Fertigungstechnologie
<b>LPT</b>	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 CO<sub>2</sub>-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  
CO<sub>2</sub>-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  
CO<sub>2</sub>-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  
Zweistrahltechnik  
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  
CO<sub>2</sub>-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 Programoptimierung  
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  
CO<sub>2</sub>-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 Meißner  
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 mechani-  
scher 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 Fokuslage beim Schweißen  
mit CO<sub>2</sub>-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  
Demontagetechologien 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 CO<sub>2</sub>-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  
Oberflächen Ausbildung 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 Prechtl  
Automatisiertes Schichtverfahren für metallische Folien - System- und Prozesstechnik  
LFT, 154 Seiten, 45 Bilder, 7 Tab. 2006.  
ISBN 3-87525-238-1.

Band 172: Markus Meidert  
Beitrag zur deterministischen Lebensdauerabschätzung von Werkzeugen der Kaltmassivumformung  
LFT, 131 Seiten, 78 Bilder, 9 Tab. 2006.  
ISBN 3-87525-239-X.

Band 173: Bernd Müller  
Robuste, automatisierte Montagesysteme durch adaptive Prozessführung und montageübergreifende Fehlerprävention am Beispiel flächiger Leichtbauteile  
FAPS, 147 Seiten, 77 Bilder, 0 Tab. 2006.  
ISBN 3-87525-240-3.

Band 174: Alexander Hofmann  
Hybrides Laserdurchstrahlsschweißen von Kunststoffen  
LFT, 136 Seiten, 72 Bilder, 4 Tab. 2006.  
ISBN 978-3-87525-243-9.

Band 175: Peter Wölflick  
Innovative Substrate und Prozesse mit feinsten Strukturen für bleifreie Mechatronik-Anwendungen  
FAPS, 177 Seiten, 148 Bilder, 24 Tab. 2006.  
ISBN 978-3-87525-246-0.

Band 176: Attila Komlodi  
Detection and Prevention of Hot Cracks during Laser Welding of Aluminium Alloys Using Advanced Simulation Methods  
LFT, 155 Seiten, 89 Bilder, 14 Tab. 2006.  
ISBN 978-3-87525-248-4.

Band 177: Uwe Popp  
Grundlegende Untersuchungen zum Laserstrahlstrukturieren von Kaltmassivumformwerkzeugen  
LFT, 140 Seiten, 67 Bilder, 16 Tab. 2006.  
ISBN 978-3-87525-249-1.

Band 178: Veit Rückel  
Rechnergestützte Ablaufplanung und Bahngenerierung Für kooperierende Industrieroboter  
FAPS, 148 Seiten, 75 Bilder, 7 Tab. 2006.  
ISBN 978-3-87525-250-7.

Band 179: Manfred Dirscherl  
Nicht-thermische Mikrojustiertechnik mittels ultrakurzer Laserpulse  
LFT, 154 Seiten, 69 Bilder, 10 Tab. 2007.  
ISBN 978-3-87525-251-4.

Band 180: Yong Zhuo  
Entwurf eines rechnergestützten integrierten Systems für Konstruktion und Fertigungsplanung räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3D-MID)  
FAPS, 181 Seiten, 95 Bilder, 5 Tab. 2007.  
ISBN 978-3-87525-253-8.

Band 181: Stefan Lang  
Durchgängige Mitarbeiterinformation zur Steigerung von Effizienz und Prozesssicherheit in der Produktion  
FAPS, 172 Seiten, 93 Bilder. 2007.  
ISBN 978-3-87525-257-6.

Band 182: Hans-Joachim Krauß  
Laserstrahlinduzierte Pyrolyse präkeramischer Polymere  
LFT, 171 Seiten, 100 Bilder. 2007.  
ISBN 978-3-87525-258-3.

Band 183: Stefan Junker  
Technologien und Systemlösungen für die flexibel automatisierte Bestückung permanent erregter Läufer mit oberflächenmontierten Dauermagneten  
FAPS, 173 Seiten, 75 Bilder. 2007.  
ISBN 978-3-87525-259-0.

Band 184: Rainer Kohlbauer  
Wissensbasierte Methoden für die simulationsgestützte Auslegung wirkmedienbasierter Blechumformprozesse  
LFT, 135 Seiten, 50 Bilder. 2007.  
ISBN 978-3-87525-260-6.

Band 185: Klaus Lamprecht  
Wirkmedienbasierte Umformung tiefgezogener Vorformen unter besonderer Berücksichtigung maßgeschneiderter Halbzeuge  
LFT, 137 Seiten, 81 Bilder. 2007.  
ISBN 978-3-87525-265-1.

Band 186: Bernd Zolleiß  
Optimierte Prozesse und Systeme für die Bestückung mechatronischer Baugruppen  
FAPS, 180 Seiten, 117 Bilder. 2007.  
ISBN 978-3-87525-266-8.

Band 187: Michael Kerausch  
Simulationsgestützte Prozessauslegung für das Umformen lokal wärmebehandelter Aluminiumplatten  
LFT, 146 Seiten, 76 Bilder, 7 Tab. 2007.  
ISBN 978-3-87525-267-5.

Band 188: Matthias Weber  
Unterstützung der Wandlungsfähigkeit von Produktionsanlagen durch innovative Softwaresysteme  
FAPS, 183 Seiten, 122 Bilder, 3 Tab. 2007.  
ISBN 978-3-87525-269-9.

Band 189: Thomas Frick  
Untersuchung der prozessbestimmenden Strahl-Stoff-Wechselwirkungen beim Laserstrahlschweißen von Kunststoffen  
LFT, 104 Seiten, 62 Bilder, 8 Tab. 2007.  
ISBN 978-3-87525-268-2.

Band 190: Joachim Hecht  
Werkstoffcharakterisierung und  
Prozessauslegung für die wirkmedienba-  
sierte Doppelblech-Umformung von  
Magnesiumlegierungen  
LFT, 107 Seiten, 91 Bilder, 2 Tab. 2007.  
ISBN 978-3-87525-270-5.

Band 191: Ralf Völkl  
Stochastische Simulation zur Werkzeug-  
lebensdaueroptimierung und Präzisions-  
fertigung in der Kaltmassivumformung  
LFT, 178 Seiten, 75 Bilder, 12 Tab. 2008.  
ISBN 978-3-87525-272-9.

Band 192: Massimo Tolazzi  
Innenhochdruck-Umformen verstärkter  
Blech-Rahmenstrukturen  
LFT, 164 Seiten, 85 Bilder, 7 Tab. 2008.  
ISBN 978-3-87525-273-6.

Band 193: Cornelia Hoff  
Untersuchung der Prozesseinflussgrößen  
beim Presshärten des höchstfesten  
Vergütungsstahls 22MnB5  
LFT, 133 Seiten, 92 Bilder, 5 Tab. 2008.  
ISBN 978-3-87525-275-0.

Band 194: Christian Alvarez  
Simulationsgestützte Methoden zur  
effizienten Gestaltung von Lötprozessen  
in der Elektronikproduktion  
FAPS, 149 Seiten, 86 Bilder, 8 Tab. 2008.  
ISBN 978-3-87525-277-4.

Band 195: Andreas Kunze  
Automatisierte Montage von makrome-  
chatronischen Modulen zur flexiblen  
Integration in hybride  
Pkw-Bordnetzsysteme  
FAPS, 160 Seiten, 90 Bilder, 14 Tab. 2008.  
ISBN 978-3-87525-278-1.

Band 196: Wolfgang Hußnätter  
Grundlegende Untersuchungen zur  
experimentellen Ermittlung und zur  
Modellierung von Fließortkurven bei  
erhöhten Temperaturen  
LFT, 152 Seiten, 73 Bilder, 21 Tab. 2008.  
ISBN 978-3-87525-279-8.

Band 197: Thomas Bigl  
Entwicklung, angepasste Herstellungs-  
verfahren und erweiterte Qualitätssiche-  
rung von 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 Schwerpunktlagebestim-  
mung der optischen Prozessemissionen  
beim Laserstrahl-tiefschweißen  
LFT, 138 Seiten, 70 Bilder, 5 Tab. 2009.  
ISBN 978-3-87525-292-7.

Band 205: Wolfgang Wolf  
Entwicklung eines agentenbasierten  
Steuerungssystems zur  
Materialflussorganisation im  
wandelbaren Produktionsumfeld  
FAPS, 167 Seiten, 98 Bilder. 2009.  
ISBN 978-3-87525-293-4.

Band 206: Steffen Polster  
Laserdurchstrahl-schweißen  
transparenter Polymerbauteile  
LFT, 160 Seiten, 92 Bilder, 13 Tab. 2009.  
ISBN 978-3-87525-294-1.

Band 207: Stephan Manuel Dörfler  
Rührreibschweißen von walzplattiertem  
Halbzeug und Aluminiumblech zur  
Herstellung flächiger Aluminiumschaum-  
Sandwich-Verbundstrukturen  
LFT, 190 Seiten, 98 Bilder, 5 Tab. 2009.  
ISBN 978-3-87525-295-8.

Band 208: Uwe Vogt  
Seriennahe Auslegung von Aluminium  
Tailored Heat Treated Blanks  
LFT, 151 Seiten, 68 Bilder, 26 Tab. 2009.  
ISBN 978-3-87525-296-5.

Band 209: Till Laumann  
Qualitative und quantitative Bewertung  
der Crashtauglichkeit von höchstfesten  
Stählen  
LFT, 117 Seiten, 69 Bilder, 7 Tab. 2009.  
ISBN 978-3-87525-299-6.

Band 210: Alexander Diehl  
Größeneffekte bei Biegeprozessen-  
Entwicklung einer Methodik zur  
Identifikation und Quantifizierung  
LFT, 180 Seiten, 92 Bilder, 12 Tab. 2010.  
ISBN 978-3-87525-302-3.

Band 211: Detlev Staud  
Effiziente Prozesskettenauslegung für das  
Umformen lokal wärmebehandelter und  
geschweißter Aluminiumbleche  
LFT, 164 Seiten, 72 Bilder, 12 Tab. 2010.  
ISBN 978-3-87525-303-0.

Band 212: Jens Ackermann  
Prozesssicherung beim Laserdurchstrahl-  
schweißen thermoplastischer Kunststoffe  
LPT, 129 Seiten, 74 Bilder, 13 Tab. 2010.  
ISBN 978-3-87525-305-4.

Band 213: Stephan Weidel  
Grundlegende Untersuchungen zum  
Kontaktzustand zwischen Werkstück  
und Werkzeug bei umformtechnischen  
Prozessen unter tribologischen  
Gesichtspunkten  
LFT, 144 Seiten, 67 Bilder, 11 Tab. 2010.  
ISBN 978-3-87525-307-8.

Band 214: Stefan Geißdörfer  
Entwicklung eines mesoskopischen Modells zur Abbildung von Größeneffekten in der Kaltmassivumformung mit Methoden der FE-Simulation  
LFT, 133 Seiten, 83 Bilder, 11 Tab. 2010.  
ISBN 978-3-87525-308-5.

Band 215: Christian Matzner  
Konzeption produktspezifischer Lösungen zur Robustheitssteigerung elektronischer Systeme gegen die Einwirkung von Betauung im Automobil  
FAPS, 165 Seiten, 93 Bilder, 14 Tab. 2010.  
ISBN 978-3-87525-309-2.

Band 216: Florian Schüßler  
Verbindungs- und Systemtechnik für thermisch hochbeanspruchte und miniaturisierte elektronische Baugruppen  
FAPS, 184 Seiten, 93 Bilder, 18 Tab. 2010.  
ISBN 978-3-87525-310-8.

Band 217: Massimo Cojutti  
Strategien zur Erweiterung der Prozessgrenzen bei der Innhochdruck-Umformung von Rohren und Blechpaaren  
LFT, 125 Seiten, 56 Bilder, 9 Tab. 2010.  
ISBN 978-3-87525-312-2.

Band 218: Raoul Plettke  
Mehrkriterielle Optimierung komplexer Aktorsysteme für das Laserstrahljustieren  
LFT, 152 Seiten, 25 Bilder, 3 Tab. 2010.  
ISBN 978-3-87525-315-3.

Band 219: Andreas Dobroschke  
Flexible Automatisierungslösungen für die Fertigung wickeltechnischer Produkte  
FAPS, 184 Seiten, 109 Bilder, 18 Tab. 2011.  
ISBN 978-3-87525-317-7.

Band 220: Azhar Zam  
Optical Tissue Differentiation for Sensor-Controlled Tissue-Specific Laser Surgery  
LPT, 99 Seiten, 45 Bilder, 8 Tab. 2011.  
ISBN 978-3-87525-318-4.

Band 221: Michael Rösch  
Potenziale und Strategien zur Optimierung des Schablonendruckprozesses in der Elektronikproduktion  
FAPS, 192 Seiten, 127 Bilder, 19 Tab. 2011.  
ISBN 978-3-87525-319-1.

Band 222: Thomas Rechtenwald  
Quasi-isothermes Laserstrahlsintern von Hochtemperatur-Thermoplasten - Eine Betrachtung werkstoff-prozessspezifischer Aspekte am Beispiel PEEK  
LPT, 150 Seiten, 62 Bilder, 8 Tab. 2011.  
ISBN 978-3-87525-320-7.

Band 223: Daniel Craiovan  
Prozesse und Systemlösungen für die SMT-Montage optischer Bauelemente auf Substrate mit integrierten Lichtwellenleitern  
FAPS, 165 Seiten, 85 Bilder, 8 Tab. 2011.  
ISBN 978-3-87525-324-5.

Band 224: Kay Wagner  
Beanspruchungsangepasste  
Kaltmassivumformwerkzeuge durch  
lokal optimierte Werkzeugoberflächen  
LFT, 147 Seiten, 103 Bilder, 17 Tab. 2011.  
ISBN 978-3-87525-325-2.

Band 225: Martin Brandhuber  
Verbesserung der Prognosegüte des Ver-  
sagens von Punktschweißverbindungen  
bei höchstfesten Stahlgüten  
LFT, 155 Seiten, 91 Bilder, 19 Tab. 2011.  
ISBN 978-3-87525-327-6.

Band 226: Peter Sebastian Feuser  
Ein Ansatz zur Herstellung von  
pressgehärteten Karosseriekomponenten  
mit maßgeschneiderten mechanischen  
Eigenschaften: Temperierte Umform-  
werkzeuge. Prozessfenster, 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 Laserstrahl-tiefschweißprozesses 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  
zwischeneschalteten 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 Bönig  
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  
Kohlenstoffaserverbundwerkstoffe mit  
spezifischem Zusatzdraht  
LFT, 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  
LFT, 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 Stellin  
Design of Manufacturing Processes for  
the Cold Bulk Forming of Small Metal  
Components from Metal Strip  
LFT, 146 Seiten, 67 Bilder, 7 Tab. 2017.  
ISBN 978-3-87525-430-3.

Band 304: Bassim Bachy  
Experimental Investigation, Modeling,  
Simulation and Optimization of Molded  
Interconnect Devices (MID) Based on  
Laser Direct Structuring (LDS) / Experi-  
mentelle Untersuchung, Modellierung,  
Simulation und Optimierung von Molded  
Interconnect Devices (MID) basierend  
auf Laser Direktstrukturierung (LDS)  
FAPS, 168 Seiten, 120 Bilder, 26 Tab. 2017.  
ISBN 978-3-87525-431-0.

Band 305: Michael Spahr  
Automatisierte Kontaktierungsverfahren  
für flachleiterbasierte  
Pkw-Bordnetzsysteme  
FAPS, 197 Seiten, 98 Bilder, 17 Tab. 2017.  
ISBN 978-3-87525-432-7.

Band 306: Sebastian Suttner  
Charakterisierung und Modellierung  
des spannungszustandsabhängigen  
Werkstoffverhaltens der Magnesium-  
legierung AZ31B für die numerische  
Prozessauslegung  
LFT, 150 Seiten, 84 Bilder, 19 Tab. 2017.  
ISBN 978-3-87525-433-4.

Band 307: Bhargav Potdar  
A reliable methodology to deduce  
thermo-mechanical flow behaviour of  
hot stamping steels  
LFT, 203 Seiten, 98 Bilder, 27 Tab. 2017.  
ISBN 978-3-87525-436-5.

Band 308: Maria Löffler  
Steuerung von Blechmassivumformpro-  
zessen durch maßgeschneiderte  
tribologische Systeme  
LFT, viii u. 166 Seiten, 90 Bilder, 5 Tab.  
2018. ISBN 978-3-96147-133-1.

Band 309: Martin Müller  
Untersuchung des kombinierten Trenn-  
und Umformprozesses beim Fügen art-  
ungleicher Werkstoffe mittels  
Schneidlinchverfahren  
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 Taumelprozess

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 Karosserierohbau: 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 Werkzeuoberflächen

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 Wälzlagertähle für die Wärmebehandlungssimulation  
LFT, xiv u. 189 Seiten, 75 Bilder, 32 Tab.  
2019. ISBN 978-3-96147-209-3.

Band 326: Tobias Gnihl  
Modellbasierte Prozesskettenabbildung rührreibgeschweißter Aluminiumhalbzeuge zur umformtechnischen Herstellung höchstfester Leichtbauteile  
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 Aluminiumblechwerkstoffen mit ultrafeinkörnigem Gefüge  
LFT, ix u. 160 Seiten, 88 Bilder, 14 Tab.  
2019. ISBN 978-3-96147-227-7.

Band 329: Stefan Landkammer  
Grundsatzuntersuchungen, mathematische 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 Materialeigenschaften bei der Ultrakurzpuls-Lasermaterialbearbeitung  
LPT, xi u. 143 Seiten, 49 Bilder, 2 Tab.  
2019. ISBN 978-3-96147-235-2.

Band 331: Michael Scholz  
Intralogistics 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 Kontext 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 laserdirektstrukturierter 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 Zahnradern  
LFT, viii u. 151 Seiten, 81 Bilder, 3 Tab.  
2020. ISBN 978-3-96147-287-1.

Band 340: Simon Spreng  
Numerische, analytische und empirische  
Modellierung des Heißscrimpprozesses  
FAPS, xix u. 204 Seiten, 91 Bilder, 27 Tab.  
2020. ISBN 978-3-96147-293-2.

Band 341: Patrik Schwingenschlögl  
Erarbeitung eines Prozessverständnisses  
zur Verbesserung der tribologischen  
Bedingungen beim Presshärten  
LFT, x u. 177 Seiten, 81 Bilder, 8 Tab.  
2020. ISBN 978-3-96147-297-0.

Band 342: Emanuela Affronti  
Evaluation of failure behaviour  
of sheet metals  
LFT, ix u. 136 Seiten, 57 Bilder, 20 Tab.  
2020. ISBN 978-3-96147-303-8.

Band 343: Julia Degner  
Grundlegende Untersuchungen zur  
Herstellung hochfester Aluminiumblech-  
bauteile in einem kombinierten Umform-  
und Abschreckprozess  
LFT, x u. 172 Seiten, 61 Bilder, 9 Tab.  
2020. ISBN 978-3-96147-307-6.

Band 344: Maximilian Wagner  
Automatische Bahnplanung für die Auf-  
teilung von Prozessbewegungen in syn-  
chrone Werkstück- und Werkzeugbewe-  
gungen mittels Multi-Roboter-Systemen  
FAPS, xxi u. 181 Seiten, 111 Bilder, 15 Tab.  
2020. ISBN 978-3-96147-309-0.

Band 345: Stefan Härter  
Qualifizierung des Montageprozesses  
hochminiaturisierter elektronischer Bau-  
elemente  
FAPS, ix u. 194 Seiten, 97 Bilder, 28 Tab.  
2020. ISBN 978-3-96147-314-4.

Band 346: Toni Donhauser  
Ressourcenorientierte Auftragsregelung  
in einer hybriden Produktion mittels  
betriebsbegleitender Simulation  
FAPS, xix u. 242 Seiten, 97 Bilder, 17 Tab.  
2020. ISBN 978-3-96147-316-8.

Band 347: Philipp Amend  
Laserbasiertes Schmelzkleben von Thermoplasten mit Metallen  
LPT, xv u. 154 Seiten, 67 Bilder  
2020. ISBN 978-3-96147-326-7.

Band 348: Matthias Ehlert  
Simulationsunterstützte funktionale Grenzlagenabsicherung  
KTmfk, xvi u. 300 Seiten, 101 Bilder, 73 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-328-1.

Band 349: Thomas Sander  
Ein Beitrag zur Charakterisierung und Auslegung des Verbundes von Kunststoffsubstraten mit harten Dünnschichten  
KTmfk, xiv u. 178 Seiten, 88 Bilder, 21 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-330-4

Band 350: Florian Pilz  
Fließpressen von Verzahnungselementen an Blechen  
LFT, x u. 170 Seiten, 103 Bilder, 4 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-332-8

Band 351: Sebastian Josef Katona  
Evaluation und Aufbereitung von Produktsimulationen mittels abweichungsbehafteter Geometriemodelle  
KTmfk, ix u. 147 Seiten, 73 Bilder, 11 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-336-6

# Abstract

Simulations are an important part of modern product development. These lead to shorter and more efficient development cycles and can reduce high costs for complex tests. One of the biggest challenges for good results in simulation applications is modelling. The ideal CAD model is always used for geometric analyses. However, due to unavoidable inaccuracies in the manufacturing process, this model is subject to deviations which falsify the results of the simulations. This thesis deals with the topic of how geometric manufacturing deviations can be integrated into the simulation process in order to obtain models that are as accurate and fit for simulation as possible and thus improve the quality of the results.

As a methodical foundation, a layer-model is presented, which guides the product developer to evaluate a comparison of nominal and actual geometry with regard to its significance for a simulation. The actual state is generated with high-resolution digitization techniques. Based on this comparison, a decision is forced on the user as to whether a simulation carried out with an ideal CAD model is sufficient. The knowledge elements provided at each layer can be used to answer specific questions in order to assess the significance of the deviations that occur and to evaluate their relevance to simulation results.

If a simulation with real geometric elements is recommended on the basis of this process, four methods for the generation of simulation-capable models have been developed and presented for this purpose: Parametric correction of the CAD model for simple deviations; the complete but complex process of Reverse Engineering (RE); generation of hybrid models consisting of CAD geometry and scan inserts from RE; adaptation of FE meshes to the scanned data sets (point clouds and polygonal models). All process models shown are carried out for verification with application examples from industry and practice. The simulation results were refined and brought closer to the real conditions.

The presented model offers an approach to the improvement of simulation models by integrating production deviations. An even earlier use in the development cycle should be the goal in order to reduce costs and can be achieved by using process simulations if these deliver reliable results. Since the data structures of the scans and process simulations are similar, the methods presented here can be used in the same way. The approach presented here for corrected, more realistic geometries can also make an important contribution outside the simulation application, for example within the context of a digital twin.

Simulationen sind ein wichtiger Bestandteil der modernen Produktentwicklung. Diese führen zu kürzeren und effizienteren Entwicklungszyklen und können hohe Kosten für aufwändige Tests reduzieren. Eine der großen Herausforderungen für gute Ergebnisse bei Simulationsanwendungen ist die Modellbildung. Für geometrische Analysen wird dabei stets auf das ideale CAD-Modell zurückgegriffen. Dieses ist aber aufgrund unvermeidlicher Ungenauigkeiten im Fertigungsprozess mit Abweichungen behaftet, wodurch die Aussagen der Simulationen verfälscht werden. Diese Arbeit befasst sich mit der Thematik, wie geometrische Fertigungsabweichungen in den Simulationsprozess integriert werden können, um möglichst genaue, simulationsfähige Modell zu erhalten und somit die Ergebnisqualität zu verbessern.

Als methodischer Unterbau wird hierzu ein Ebenen-Modell vorgestellt, welches den Produktentwickler dabei anleitet, einen Vergleich von Soll- und Ist-Geometrie auf dessen Aussagekraft zu einer Simulation bewerten zu können. Der Ist-Stand wird hierfür mit hochauflösenden Digitalisierungstechniken erzeugt. Aufgrund dieses Vergleichs wird eine Entscheidung mit dem Anwender forciert, ob eine durchgeführte Simulation mit idealem CAD-Modell ausreichend ist. Durch die in jeder Ebene situativ bereitgestellten Wissens Elemente können gezielt Fragestellungen beantwortet werden, um die Signifikanz der auftretenden Abweichungen einschätzen und in Hinblick auf die Relevanz auf Simulationsergebnisse bewerten zu können. Wird auf Basis dieses Prozesses eine Simulation mit realen Geometrieelementen empfohlen, sind für diesen Zweck vier Methoden zur Erzeugung simulationsfähiger Modelle entwickelt worden und dargestellt: Parametrische Korrektur des CAD-Modells bei einfachen Abweichungen; der vollständige aber aufwändige Prozess des Reverse Engineering (RE); Generierung von Hybridmodellen, bestehend aus CAD-Geometrie und Scan-Einsatzteilen aus RE; Adaption von FE-Netzen an die gescannten Datensätze (Punktwolken und Polygonnetze). Alle aufgezeigten Vorgehensmodelle sind zur Verifikation jeweils mit Anwendungsbeispielen aus Industrie und Praxis durchgeführt. Dabei konnten die Simulationsergebnisse verfeinert und näher an die realen Verhältnisse gebracht werden.

Das vorgestellte Modell bietet einen Einstieg in die Verbesserung der Simulationsmodelle durch Integration von Fertigungsabweichungen. Eine noch frühzeitigere Verwendung im Entwicklungszyklus ist zur Kostenreduktion anzustreben und kann durch die Verwendung von Prozesssimulationen erfolgen, wenn diese verlässliche Ergebnisse liefert. Da die Datenstrukturen der Scans und Prozesssimulationen ähnlich sind, können die vorgestellten Methoden hier in gleicher Weise eingesetzt werden. Ebenso kann die hier vorgestellte Erzeugungsmethodik für korrigierte, realitätsnahe Geometrien auch außerhalb der Simulationsanwendung einen wichtigen Beitrag leisten, beispielsweise im Rahmen des Digitalen Zwillings.

