



FAKULTÄT FÜR
MASCHINENBAU

Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Fakultät für Maschinenbau

Institut für Mechanik

Untersuchungen zur Industrialisierung der Virtualisierung des Meisterbocks und Weiterentwicklung der Simulationskonzepte

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

**Doktoringenieur
(Dr.-Ing.)**

von Andreas Händler, M.Sc.

geb. am 08. Juni 1990 in Lutherstadt Wittenberg

genehmigt durch die Fakultät Maschinenbau
der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Gutachter:

1. Prof. Dr.-Ing. Daniel Juhre
2. Prof. Dr.-Ing. André Katterfeld

Promotionskolloquium am 18.06.2024

Disclaimer

Ergebnisse, Meinungen und Schlüsse dieser Dissertation sind nicht notwendigerweise die der Volkswagen Aktiengesellschaft.

The results, opinions and conclusions expressed in this thesis are not necessarily those of Volkswagen Aktiengesellschaft.

Kurzfassung

In Anbetracht der Mobilitätswende, höheren Klimaschutzanforderungen und andauernder Lieferkettenprobleme müssen Fahrzeughersteller zusätzlichen Fokus auf effiziente Produktanläufe legen, um ihre Wettbewerbsfähigkeit zu erhalten. Bisher hat sich in diesem Zusammenhang der sogenannte *Außenmeisterbock (AMB)* als Mess- und Analysemittel von Exterieur-Bauteilen bewährt, um zunächst Geometrieabweichungen zu erkennen und im Anschluss bei der Festlegung von Abstellmaßnahmen zu unterstützen. Zum Teilespektrum gehören u.a. Blech-Anbauteile wie Kotflügel, Türen, Front- und Heckklappe. Um diese Bauteile und deren Interaktionen im Einbaustand zu bewerten bzw. zu qualifizieren, wird jedes Teil am AMB montiert und mithilfe der standardisierten Referenz-Punkt-Systematik (RPS) ausgerichtet. Das Ziel dieser Dissertation besteht in der Bereitstellung einer Methode, welche diesen Qualifizierungsprozess durch den Einsatz von numerischer Simulation mittels Finite-Elemente-Methode (FEM) optimiert und somit den Aufwand physischer Aufbauten sowie die Zahl an notwendigen Korrekturschleifen reduziert.

Als Referenz für die Simulationsmodelle können optische Messungen der physischen Bauteile oder Ergebnisse vorgelagerter Simulationen zum Einsatz kommen. Somit lassen sich Einflüsse durch Geometrieabweichungen der aktuellen Bauteilstände berücksichtigen. Entsprechend der Einbaulage erfolgt dann die Modellierung der Montageperipherie (Anschraubpunkte, Dichtungen, Gasdruckfedern, etc.). Die anschließende Ausrichtung der Bauteile nach RPS im gegebenen Bauraum stellt ein Optimierungsproblem dar, welches durch die Quasi-Newton Methode der Sequentiellen Quadratischen Programmierung (SQP) gelöst wird. Die dafür entworfene Zielfunktion erlaubt eine flexible Gewichtung der zu minimierenden Parameter. Neben den Abweichungen an den RPS-Punkten können zusätzlich beispielsweise die durch den Anbau hervorgerufenen Spannungen minimiert werden.

Der *Virtueller Meisterbock (VMB)* ermöglicht eine verfeinerte Bauteilbewertung durch Kenntnisse über den Verformungszustand und umfangreiche Analysemöglichkeiten ohne physische Aufbauten. Je nach Bauteilanforderung können somit verschiedene Einbaukonstellationen virtuell getestet und bewertet werden. Damit einhergehend verbessert sich die Ableitung geeigneter Korrekturmaßnahmen und der Prozess der Bauteilqualifizierung kann hinsichtlich Ressourcen- und Zeitaufwand effizienter gestaltet werden. Zudem werden für den VMB methodische Werkzeuge und Vorgehensweisen geschaffen, die einen Beitrag leisten, um kostenaufwendige Korrekturschleifen von Exterieur-Bauteilen einzusparen.

Abstract

Due to the mobility transition, increasing climate protecting requirements and ongoing supply chain problems automotive OEMs have to focus additionally on efficient product launches in order to maintain their competitiveness. So far, the so-called „Außenmeisterbock“ (VMB), or outside master jig, has proven itself in this context as assistive device for measuring and analysing exterior parts of cars. With its help, geometric deviations can be detected and subsequently, it supports the determination of appropriate corrective actions. The range of parts includes, amongst others, sheet metal add-on parts like fenders, doors, engine hoods and trunk lids. In order to rate the quality of these parts under mounted conditions and their interactions with adjacent components, every part is mounted on the AMB and aligned by the help of the standardized *reference-point-systematics* (RPS). The aim of this dissertation is to provide a method that optimizes this qualification process by numerical simulation based on the finite-element-method (FEM) and consequently, reduces the effort of physical test build-ups as well as the number of necessary corrections loops.

Point clouds of optical measurements or results of previous simulations, e.g. forming simulations, serve as references for the simulation models. Thereby, it is possible to consider influences caused by geometric deviations. Corresponding to the actual mounting conditions the assembly periphery is idealized (fixing points, sealings, gas springs, etc.). The subsequent RPS alignment of the parts within its assembly space poses an optimization problem, which is solved by the quasi-Newton method sequential quadratic programming (SQP). The objective function designed for this purpose enables the created workflow to minimize RPS deviations as well as stresses within the components, which are caused by the assembly.

The *Virtual Meisterbock* (VMB) allows an in-depth evaluation of exterior parts by providing detailed knowledge about the stress and deformation states as well as more comprehensive analysis possibilities without the need of physical build-ups. Depending on the component requirements, different installation constellations can be virtually tested and evaluated. This also improves the derivation of suitable corrective measures and the process of component qualification can be made more efficient in terms of resources and time. In addition, methodological tools and procedures are created for the VMB, which contribute to saving costly correction loops of exterior components.

Ehrenerklärung

Ich versichere hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Die Hilfe eines kommerziellen Promotionsberaters habe ich nicht in Anspruch genommen. Dritte haben von mir weder unmittelbar noch mittelbar geldwerte Leistungen für Arbeiten erhalten, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorgelegten Dissertation stehen. Verwendete fremde und eigene Quellen sind als solche kenntlich gemacht.

Ich habe insbesondere nicht wissentlich:

- Ergebnisse erfunden oder widersprüchliche Ergebnisse verschwiegen,
- statistische Verfahren absichtlich missbraucht, um Daten in ungerechtfertigter Weise zu interpretieren,
- fremde Ergebnisse oder Veröffentlichungen plagiiert,
- fremde Forschungsergebnisse verzerrt wiedergegeben

Mir ist bekannt, dass Verstöße gegen das Urheberrecht Unterlassungs- und Schadensersatzansprüche des Urhebers sowie eine strafrechtliche Ahndung durch die Strafverfolgungsbehörden begründen kann.

Ich erkläre mich damit einverstanden, dass die Dissertation ggf. mit Mitteln der elektronischen Datenverarbeitung auf Plagiate überprüft werden kann.

Die Arbeit wurde bisher weder im Inland noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form als Dissertation eingereicht und ist als Ganzes auch noch nicht veröffentlicht.

Leipzig, den 2. Juli 2024

Andreas Händler

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	IX
Tabellenverzeichnis	XII
Abaqus Eingabe Verzeichnis	XIII
Abkürzungsverzeichnis	XIV
Nomenklatur	XVI
1 Einleitung	1
1.1 Digitalisierung im Kontext der Industrie 4.0	1
1.2 Motivation für vorliegenden Anwendungsfall	3
1.3 Ableitung der Vorgehensweise	4
2 Stand der Technik	6
2.1 Qualität	7
2.1.1 Begriff	7
2.1.2 Allgemeine Qualitätsanforderungen	8
2.1.3 Qualitätsanforderungen an das Exterieur	10
2.2 Qualitätssicherung im Produktionsanlauf	13
2.3 Messtechnische Grundlagen	15
2.3.1 Messabweichungen	16
2.3.2 Messausrüstung	16
2.4 Bauteilqualifizierungsprozess	18
2.4.1 Motivation	18
2.4.2 Prüfhilfsmittel zur Bauteilqualifizierung	19
2.4.3 Bauteilqualifizierungsprozess mithilfe des AMBs	21
2.4.4 Referenz-Punkt-System (RPS)	23
2.5 Bauteilqualifizierung mit virtuellen Methoden	25
2.5.1 Visualisierung	26
2.5.2 Simulation	27

3	Konkretisierung der Forschungsthematik	29
4	Material und Methoden	33
4.1	Kotflügel	33
4.1.1	Topologie & Materialeigenschaften	34
4.1.2	RPS-Ausrichtung	35
4.1.3	Fertigungsprozesskette	37
4.1.4	Messung ohne Spannhilfen	38
4.2	Struktursimulation	39
4.2.1	Finite-Elemente-Methode in der Strukturmechanik	40
4.2.1.1	Ablauf einer FE-Analyse	40
4.2.1.2	FE-Formulierung	41
4.2.1.3	Nichtlineare Probleme	44
4.2.2	Verwendete Soft- und Hardware	45
4.2.3	Abaqus Eingabe und Einheitensystem	46
4.2.4	Aussagesicherheit einer FE-Analyse	46
4.2.4.1	Vermeidbare Fehlerquellen	47
4.2.4.2	Elementqualität	48
4.3	Optimierung	49
4.3.1	Modellentwicklung	50
4.3.2	Grundlagen zur Problemlösung	52
5	Virtueller Meisterbock	55
5.1	Modellierung des Kotflügels	56
5.1.1	Idealisierung & Vernetzung	56
5.1.2	Materialmodellierung	63
5.1.3	Mapping	63
5.1.4	Zusammenbau	66
5.1.5	Berücksichtigung des Gravitationseinflusses	66
5.1.6	Lagerungen & Lasten	68
5.2	Modellierung der virtuellen Bauteilausrichtung	70
5.2.1	Präzisierung der Zielfunktionen	70
5.3	Lösungsansatz zur virtuellen Bauteilausrichtung	72
5.3.1	Kondensation des Optimierungsproblems	73
5.3.2	Lösung des Optimierungsproblems	74
5.4	Validierung	79
5.4.1	Validierung des Optimierungsalgorithmus	79
5.4.1.1	Ergebnisse der Kondensation	79
5.4.1.2	Ergebnisse der Optimierung	82

5.4.2	Validierung der virtuellen Bauteilausrichtung	84
5.5	Zusammenfassung VMB-Simulation	85
6	Virtuelle Prozesskette	87
6.1	Modellierung der Herstellungsprozesskette des Kotflügels	87
6.1.1	Umformung	88
6.1.2	Clinchverbindungen & kathodische Tauchlackierung	90
6.1.3	Materialmodellierung	91
6.1.4	Mapping	92
6.2	Sensitivitätsanalysen	94
6.2.1	Referenzmodell	95
6.2.2	Ergebnisse	97
6.3	Ergebnisse der Bauteilqualifizierung	98
6.4	Zusammenfassung Virtuelle Prozesskette	100
7	Ergebnisdiskussion	101
7.1	Virtueller Meisterbock	101
7.2	Virtuelle Prozesskette	106
7.3	Aussagesicherheit	109
7.3.1	Zufällige Abweichungen	109
7.3.2	Systematische Abweichungen	111
8	Zusammenfassung und Ausblick	115
	Literatur	121
	Anhang	130
A	Randbedingungen für exemplarische Verformung des Kotflügels	130
B	Ergebnis der freien Messung eines Kotflügels	131
C	Dimensionierung von Connector-Steifigkeiten zur Bauteilbefestigung	132
D	Ergebnisse der freien Rückfederungssimulation in Autoform	133
E	Vergleich plastischer Dehnungen innerhalb der VPK	134

Abbildungsverzeichnis

1-1	Verkürzte Serienanläufen ggü. Änderungsanstieg in der Anlaufphase	3
2-1	Aufbau des Kapitels <i>Stand der Technik</i>	6
2-2	Das Qualitätsurteil	7
2-3	automobile Qualitätsmerkmale im Kano-Modell	9
2-4	Die primären Exterieur-Bauteile am Beispiel VW Golf	10
2-5	Spalt- und Bündigkeitsmaß zwischen Kotflügel und vorderer Tür	11
2-6	Ursache-Wirkungs-Diagramm zur wahrgenommenen Qualität	11
2-7	Ursache-Wirkungs-Diagramm zu abweichenden Fugenverläufen	12
2-8	Prüfmittel im Produktlebenszyklus	13
2-9	Frontloading	14
2-10	Messabweichungen vom wahren Wert nach DIN 1319-1	16
2-11	Allgemeine Klassifizierung von Prüfmitteln in der Fertigungsmesstechnik	17
2-12	Fugenstern und Fugennormal	17
2-13	Koordinatenmessgeräte: optisch und taktil	18
2-14	Prüfhilfsmittel zur Bauteilqualifizierung	20
2-15	Kombi-Cubing	21
2-16	Regelkreises zur Bauteilqualifizierung mithilfe des Meisterbocks	22
2-17	Meisterbock Aluminiumgerüst und angebaute Exterieur-Bauteile	23
2-18	3-2-1-Regel	24
2-19	Berechnung von RPS-Abweichungen	25
2-20	Visualisierung der Ist-Geometrie	26
2-21	Bauteilspezifische Messaufnahme eines Kotflügels	27
3-1	Regelkreises zur Bauteilqualifizierung mithilfe des Virtuellen Meisterbocks	31
4-1	Außen- und Innenansicht des VW Golf 8 Kotflügels	34
4-2	Am Meisterbock relevante Ausrichtpunkte des Kotflügels	35
4-3	Freiheitsgrade eines Anschraubpunktes und Spiel zwischen Schraube und Bohrung	36
4-4	Fertigungsprozesskette des Kotflügels	37
4-5	Verstärkungsteil mit Stützklebernähten und Clinchpunkten	38
4-6	Freie Messung des Kotflügels	39

4-7	Aufwandsabschätzung einer FE-Analyse	40
4-8	Statisch bestimmtes Kontinuum Ω mit Rand Γ und Last F	42
4-9	Diskretisierte Fläche und Zustandsgrößen am Element	42
4-10	Berücksichtigte Qualitätskriterien für Schalenelemente	49
4-11	Gleichheits- und Ungleichheitsrestriktionen eines Optimierungsproblems	51
4-12	Charakterisierung lokaler und globaler Optima	52
5-1	Chronologie zur Anwendung des VMB als Prüfhilfsmittel	55
5-2	Schematische Darstellung der Bezugsebenen von Schalenelementen	56
5-3	Netzauflösung im Bereich der Radien	57
5-4	Exemplarische Verformung des Kotflügels zur Konvergenzuntersuchung der Netzauflösung	58
5-5	Konvergenzanalyse Netzauflösung	59
5-6	Optimiertes FE-Netz des Kotflügels	60
5-7	Ergebnisse der Konvergenzanalyse zur Netzauflösung	60
5-8	Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse spezifischer Netzeinstellungen	61
5-9	Geometrisches Mapping/ Morphing	64
5-10	Genauigkeit des verwendeten Mapping-Algorithmus	65
5-11	Virtueller Zusammenbau der Einzelteilmodelle	66
5-12	Randbedingungen und Ergebnis der Gravitationsrückrechnung	67
5-13	Lagerung des Kotflügelmodells	68
5-14	Prozessdiagramm zur virtuellen Bauteilausrichtung in Optimus	74
5-15	Spiel bei kreisförmigen Aussparungen	75
5-16	Vereinfachtes Testmodell zur Filterung geeigneter Optimierungsalgorithmen	76
5-17	Basierend auf LHS berechnete Stützstellen der Zielfunktion (5-15) sowie die Fläche des eingepassten 3D-Metamodells	77
5-18	Korrelationsmatrix für die Haupt-RPS-Punkte des Kotflügels	80
5-19	Fehlfarbenvergleich zwischen den Ergebnissen der virtuellen Bauteilausrichtung mittels SQP gegenüber der unverformten CAD-Geometrie	83
5-20	Spannungsvergleich zwischen den Ergebnissen der virtuellen Bauteilausrichtung mittels SQP	83
5-21	Validierungsergebnis	85
6-1	Idealisierte VPK des Kotflügels	87
6-2	Werkstückgestalt während des Umformprozesses	88
6-3	Restspannungen im Außenteil nach der Umformsimulation	89
6-4	Spannungszustand des Verstärkungsteils nach der virtuellen Bauteilausrichtung	89
6-5	Schnittdarstellung einer exemplarischen Clinch-Verbindung	90
6-6	Restspannungen im Kotflügel nach der KTL-Simulation	91

6-7	Verfestigungskurve vom Material des Kotflügelaußenteils	92
6-8	Kopplung unterschiedlicher FE-Software durch Mapping zur Umsetzung der VPK	93
6-9	Spannungskompensation am Beispiel eines Balkens	94
6-10	Gegenüberstellung der Vergleichsspannungen vor und nach dem Mapping	95
6-11	Gegenüberstellung der plastischen Vergleichsdehnungen vor und nach dem Mapping	96
6-12	Gegenüberstellung der Blechdickenverteilung vor und nach dem Mapping	97
6-13	Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse	98
6-14	Vergleich zwischen AMB und VPK	99
7-1	Restspannungen im Kotflügel nach der virtuellen Prozesskette	107
7-2	Sensitivität der ungespannten Messung	110
A1	Benennung der Anschraubpunkte am Kotflügel	130

Tabellenverzeichnis

2-1	Primäre Charakteristiken der Bauteilgestalt	15
2-2	Einflüsse auf die wahrgenommene Exterieur-Qualität und deren Ursachen	19
3-1	Verbesserungspotentiale des Meisterbocks	29
4-1	Mechanische Eigenschaften des Kotflügels	35
4-2	Im Rahmen des VMB und der Virtuelle Prozesskette (VPK) verwendete Software	46
5-1	Verwendete Einstellungen für krümmungsbasierte Netze	62
5-2	Am Schalenmodell getestete Optimierungsalgorithmen	79
5-3	Verwendete Freiheitsgrade zur virtuellen Ausrichtung des Kotflügels	81

Abaqus Eingabe Verzeichnis

5.1	Definition der gewählten Elementtypen	62
5.2	Definition elastischer Materialmodelle für Stahl und Stützkleber	63
5.3	Definition der Lagerung zur Rückrechnung des Gravitationseinflusses in der ABAQUS Eingabedatei	67
5.4	Exemplarische Definition der Lagerung für Anschraubpunkt N mithilfe eines <i>Connector</i> -Elements in der ABAQUS Eingabedatei	69
6.1	Definition plastischer Materialmodelle für Stahl	91
6.2	Definition der initialen Zustandsgrößen und Blechdicken	94
A.1	Definition der Randbedingungen für exemplarische Verformung des Kotflügels. Die Sets <i>NODE_SET_____*</i> enthalten jeweils den Knoten am Ende des <i>Connector</i> -Elements (Zielposition in Abb. 5-13)	130

Abkürzungsverzeichnis

Allgemein

- 3D** dreidimensional
- CAD** computer aided design
- SQP** Sequentielle Quadratische Programmierung
- NLP** Nichtlineares Programm
- NLPQL** Nonlinear Programming Quadratic Line Search
- CMA-ES** Covariance Matrix Adaptation Evolution Strategy
- sPSO** Single Objective Particle Swarm Optimization
- GRG** Generalized Reduced Gradient
- LHS** Latin Hypercube Sampling
- STL** Stereolithographie; Standard Triangulation/Tesselation Language
- VR** virtual reality

Automotive/ Technik

- AMB** Außenmeisterbock
- DIN** Deutsches Institut für Normung e.V.; Deutsche Industrienorm
- DoE** design of experiments
- EN** Europäische Norm
- EOP** End of production
- GOM** Carl Zeiss GOM Metrology GmbH
- ISO** Internationale Organisation für Normung
- KDF** Konzept- und Designfestlegung
- KMG** Koordinatenmessgerät
- KTL** kathodische Tauchlackierung
-

- KVP** Kontinuierlicher Verbesserungsprozess
OEM Original Equipment Manufacturer
PEP Produktentstehungsprozess
Pkw Personenkraftwagen
QM Qualitätsmanagement
RPS Referenz-Punkt-Systematik
RFK Referenzkarosse
SOP Start of production
VDA Verband der Automobilindustrie e. V.
VMB Virtueller Meisterbock
VMA virtuelle Messaufnahme
VPK Virtuelle Prozesskette
VW Volkswagen AG

Mechanik

- BH** Bake-Hardening
DOF degrees of freedom
E-Modul Elastizitätsmodul
FE Finite Elemente
FEM Finite-Elemente-Methode
WH Work-Hardening
-

Nomenklatur

Symbol	Definition	Einheit
Allgemeine Notation		
$a; A$	Skalar	
\mathbf{a}	Vektor, Tensor 1. Stufe	
\mathbf{A}	Matrix, Tensor 2. Stufe	
Lateinische Formelzeichen		
B	Breite	mm
BH_2	Streckgrenzenerhöhung durch Bake-Hardening	MPa
\mathbf{C}	Materialmatrix	
c	Spiel zwischen Schraube und Aussparung	mm
c_S	Korrelationskoeffizient nach SPEARMEN	
D	Differentialoperator erster Ordnung	
d_e	Sehnenfehler (<i>Mesh distortion</i>)	mm
E	Elastizitätsmodul	MPa
F	Kraft	N
\mathbf{f}_p^e	Knotenkräfte bzgl. Element e	N
\mathbf{g}	Fallbeschleunigung	mm/s ²
\mathbf{K}	Gesamtsteifigkeitsmatrix	
\mathbf{K}^e	Elementsteifigkeitsmatrix	
k_f	Fließspannung	MPa
L	Länge	mm
l_e	Elementkantenlänge	mm
M	Gewindedurchmesser	mm
n_{AP}	Anzahl Anschraubpunkte	
n_{DOF}	Anzahl Freiheitsgrade	
n_{RPS}	Anzahl RPS-Punkte	
$\mathbf{N}(\mathbf{x})$	Ansatzfunktionen	

Symbol	Definition	Einheit
r_B	Bohrungsradius	mm
r_G	Gewinderadius	mm
R_m	Zugfestigkeit	MPa
$R_{p0,2}$	0,2% Dehngrenze	MPa
s	Skalierungsquotient	
T	Blechdicke	mm
t	Zeit	s
t_R	Rechenzeit, verstrichene Echtzeit während eines Funktionsaufrufes	s
T_{RPS}	Toleranz für RPS-Abweichungen	mm
U	Verschiebung (<i>Displacement</i>)	mm
\mathbf{u}^e	Elementverschiebungsfeld	mm
\mathbf{u}_p	Knotenverschiebungen	mm
x_M	Messwert x	mm
x_w	wahrer Wert bzgl. Messung x	mm
x', y', z'	lokale Translationsfreiheitsgrade	mm

Griechische Formelzeichen

α', β', γ'	lokale Rotationsfreiheitsgrade	rad
Γ	Rand des Kontinuums	
γ	Scherung	%
$\delta_i = \Delta RPS_i$	RPS-Abweichung am Punkt i	mm
$\delta \mathbf{u}_p$	infinitesimalen Knotenverschiebungen	mm
$\delta W_{ext} / \delta W_{int}$	infinitesimale äußere / innere Arbeit	N mm
$\boldsymbol{\varepsilon}^e$	Elementverzerrungsfeld	%
ε_{el}	elastische Dehnung	%
ε_{pl}	plastische Dehnung	%
$\varepsilon_V^{(pl)}$	plastische Vergleichsdehnung	%
μ_x	Erwartungswert bzgl. Messung x	mm
ν	Poissonzahl	
ρ	Dichte	t/mm ³
σ	Normalspannung	MPa
$\boldsymbol{\sigma}^e$	Spannungen des Elementes e	MPa
σ_V	Vergleichsspannung nach von Mises	MPa
$\sigma_{1,2,3}$	Hauptspannungen	MPa

Symbol	Definition	Einheit
τ	Schubspannung	MPa
φ	Freiheitsgradvektor	mm
φ_j	Freiheitsgrad j	mm
Ω	Kontinuum	
$\omega_{i,\sigma}$	Gewichtungsfaktoren	
$\omega_{I,II}$	Zielfunktion I,II	

Sonstige

$\#_e$	Elementnummer
$\#_i$	Integrationspunktnummer
$\#_n$	Knotennummer
$\#_{c_{sys}}$	Koordinatensystemnummer

1 Einleitung

1.1 Digitalisierung im Kontext der Industrie 4.0

Die von der deutschen Bundesregierung ins Leben gerufene Hightech-Strategie *Industrie 4.0* führt vielfach sowohl bei Außenstehenden als auch bei Anwendern zu ambivalenten Assoziationen bezüglich der konkreten Umsetzung in den Unternehmen. Auf dem Markt existieren oft nur unvollständige Lösungskonzepte zur Bewältigung komplexer Aufgabenstellungen und fehlende Standards hemmen geeignete Entwicklungen oder Anpassungen. Im Kontext der Prozessmodellierung im Fahrzeugbau soll an dieser Stelle die vorliegende Arbeit zum Thema *Virtueller Meisterbock (VMB)* einhaken und einen wichtigen Beitrag zur Digitalisierung des Produktentstehungsprozesses (PEP) leisten.

Bevor sich die nachfolgende Argumentation der übergeordneten Industrie 4.0 widmet, steht zunächst die Motivation aus Sicht der Wissenschaft im Vordergrund. Analog zur Untergliederung der Industrialisierung kann die Entwicklungsgeschichte der Wissenschaft ebenfalls in vier chronologische Etappen eingeteilt werden. Während in der ersten Phase vorwiegend mathematische Behauptungen durch Messungen verifiziert oder Theorien durch Messungen verbessert wurden, fußt die gegenwärtige Generation im Wesentlichen auf Softwarewerkzeugen und Computerexperimenten. Infolge der anhaltenden Steigerung der Rechenleistung nach dem *Moore'schen Gesetz* sowie der essenziellen Bandbreite der Datenübertragung können sich Wissenschaftler dieser Tage deutlich leistungsfähigerer Hilfsmittel bedienen. Als Resultat erlaubt die Prozessmodellierung bzw. -simulation in bestimmten Grenzen die Bewältigung einer der Grundaufgaben der Wissenschaft: die Verhaltensprognose von realen Prozessen durch ein Modell.[1, S. 6 ff.] In Bezug auf das bearbeitete Thema soll gleichermaßen ein virtuelles Modell zur Vorhersage des Verhaltens von Exterieur-Bauteilen an Automobilen dienen. Das grundlegende Ziel dieser Arbeit besteht demnach darin, ein vorhandenes Prozessmodell zu optimieren und auszubauen, um von den erlangten, zusätzlichen Erkenntnissen zu profitieren.

Die der Strategie Industrie 4.0 zugrunde liegende politische Intention beruht primär auf einer nachhaltigen Sicherung des Wirtschaftsstandortes Deutschland. Im Jahr 2021 trug das produzierende Gewerbe (ohne Baugewerbe) annähernd 24 Prozent zum Bruttoinlandsprodukt (BIP) bei und stellt damit nach dem Dienstleistungssektor das wichtigste Gewerbe in Deutschland dar. [2] Insofern trägt eine steigende Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Autoindustrie maßgebend zum

Erfolg des Wirtschaftsstandortes Deutschland bei. Davon profitieren insbesondere auch die rund 772.000 Beschäftigten in der deutschen Automobilindustrie (Mai 2022). [3]

Die Vorzeichen der Branche haben sich jedoch durch eine Vielzahl aktueller Ereignisse geändert: Die Original Equipment Manufacturers (OEMs) müssen sich beispielsweise auf die wachsende Popularität von Carsharing und strikteren Klimaschutzanforderungen einstellen [4]. Neben des herrschenden Chipmangels erfordern weitere Lieferkettenprobleme und die im Zusammenhang mit dem Krieg in der Ukraine extrem gestiegenen Energie- und Rohstoffkosten umso mehr möglichst effiziente Produktionsprozesse. Diese Notwendigkeit wird durch einen Blick auf die wachsende Konkurrenz unterstrichen: TESLA kann mit 19,2% Gewinnmarge deutlich mehr aus dem Umsatz abschöpfen als die Volkswagen AG mit durchschnittlich 13,3% [5]. Hierauf mögen unterschiedliche Antriebsarten auch einen Einfluss haben, jedoch ist es für die Bedeutung dieser Arbeit unerheblich, ob die etwaigen Fahrzeuge konventionell, elektrisch oder mittels Wasserstoff angetrieben werden. Alle Derivate sind gleichermaßen Nutznießer einer hohen Anmutungsqualität des Exterieurs.

Daher muss, als ein wichtiger Bestandteil der Maßnahmenpalette zum Erhalt der Wettbewerbsfähigkeit, der Qualifizierungsprozess von Exterieur-Bauteilen weiterentwickelt werden, um dessen Abläufe abteilungsübergreifend in Fertigung und Qualitätssicherung zu optimieren. Bisher war in diesem Zusammenhang der physische Außenmeisterbock (AMB), kurz *Meisterbock*, als Prüfmittel etabliert. Er dient als pragmatische Hilfskonstruktion, an der alle von außen sichtbaren Bauteile wie Frontklappe, Türen oder Leuchten montiert und anschließend aufwendig zueinander ausgerichtet werden. Als Resultat lassen sich das optische Zusammenspiel der Einzelteile sowie die Spalt- und Bündigkeitsmaße der Fugen bewerten und darauf aufbauend optimieren. Die wesentlichen Nachteile des Meisterbockprozesses liegen jedoch in den gebundenen finanziellen Ressourcen und der geringen technischen Flexibilität, denen in der aktuellen Untersuchung durch das Konzept eines VMBs entgegengewirkt werden soll.

Aus wissenschaftlicher Perspektive betrachtet, bietet die fortführende Digitalisierung des Meisterbockprozesses einen wichtigen Fortschritt für die Entwicklung ganzheitlicher virtueller Lösungsansätze im Automobilbau. Auch die Forschung an Prozessmodellen unter Zuhilfenahme der Finite-Elemente-Methode (FEM) verzeichnet eine anhaltende Progression, da die stetig steigende Rechenleistung weitaus komplexere Simulationsmodelle ermöglicht und somit verschiedene Bearbeitungsschritte eines Produkts zusammengeführt werden können. Dennoch fehlen in vielen Bereichen konkrete Konzepte, um theoretische Forschungsergebnisse in die industrielle Anwendung zu übertragen. Ebendiese Lücke soll durch die Weiterentwicklung des VMBs geschlossen werden.

1.2 Motivation für vorliegenden Anwendungsfall

Um die Aufmerksamkeit von Autokäufern zu gewinnen, müssen Automobilhersteller so viele Kundenanforderungen wie möglich erfüllen. Typische Anforderungen wie Preis-Leistungs-Verhältnis, Komfort oder Sicherheit werden regelmäßig als Hauptentscheidungskriterien für einen Kauf identifiziert, wobei auch die Umweltfreundlichkeit einen steigenden Zuspruch erhält [6].

Die quantifizierbaren Kriterien werden zwar explizit von Kunden genannt, jedoch kommen diese oft erst zum tragen, wenn bestimmte Standardvoraussetzungen erfüllt sind. Diese als selbstverständlich betrachteten Aspekte kommunizieren Kunden jedoch selten aktiv bzw. nur auf Nachfrage. [7] Dieser Effekt kann auch bei der optischen Erscheinung des Exterieurs von Fahrzeugen beobachtet werden. Solange die Aufmerksamkeit beim Betrachten der äußeren Bauteile nicht auf besonders hervorstechende Disharmonien gelenkt wird, sind die Kundenansprüche aus deren Blickwinkel zufriedengestellt und wahrscheinlich wird es niemand als Entscheidungskriterium anführen.

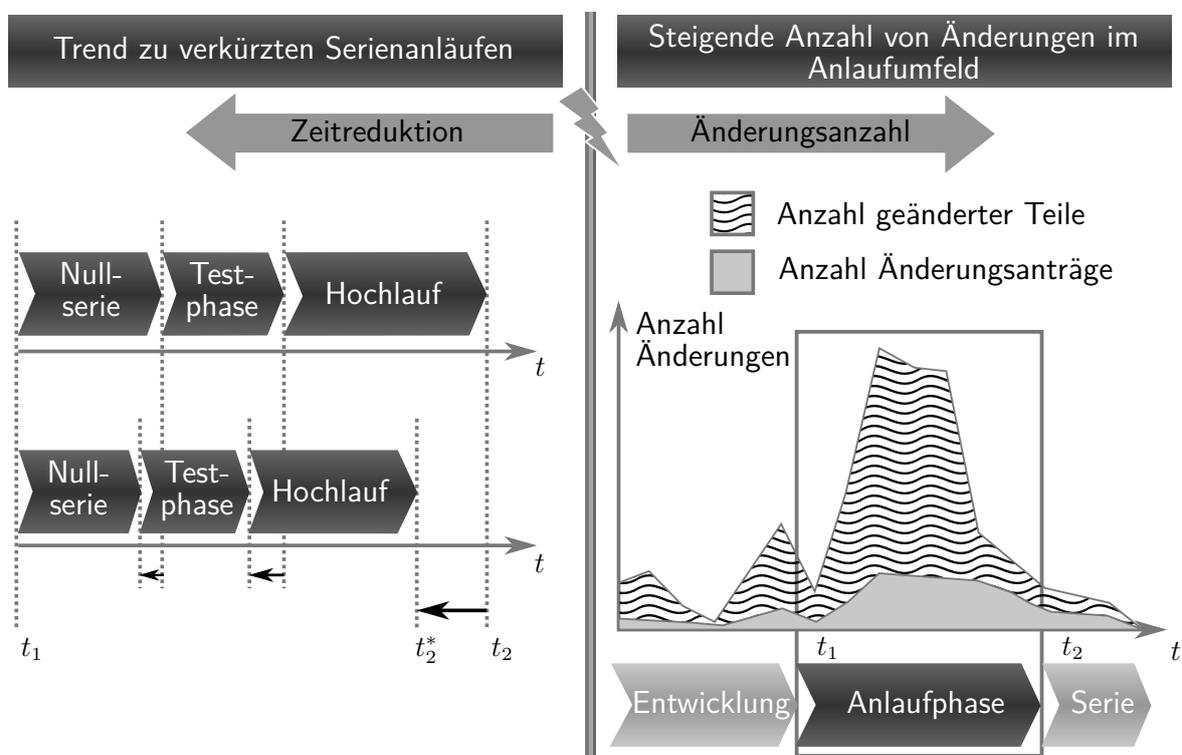


Abb. 1-1: Der wachsende Wettbewerb verstärkt den Trend zu verkürzten Serienanläufen wohingegen die Anzahl der Änderungen in der Anlaufphase üblicherweise steigt. (modifiziert nach [8, S. 224])

Doch im entgegengesetzten Fall, der zum Beispiel durch überstehende Teile, unregelmäßige Fugen oder einer unstetigen Ausrichtung spezifischer Designelemente verursacht wird, ist ein deutlicher Effekt auf die Kaufentscheidung zu befürchten. Denn diese Abweichungen können zusätzlich das Fahrerlebnis durch störende Fahrtwindgeräusche oder höhere Verbrauchswerte beeinträchtigen, wie sich später im Kapitel 2.1.3 anhand eines Ursachen-Wirkungs-Diagramms zeigen wird.

Die Herausforderung ist es, die Qualitätsstandards idealerweise ohne Umwege im Produktionsan-

lauf eines neuen Fahrzeugs zu erreichen und dann während der Serienfertigung effizient aufrechtzuerhalten. Wie in Abbildung 1-1 hervorgehoben, liegt der Fokus dieser Arbeit auf der Anlaufphase von Exterieur-Blechbauteilen. Zu Beginn dieser Phase können die anfänglich hergestellten Teile relativ große Abweichungen gegenüber der Soll-Geometrie aufweisen. Unabhängig von der verwendeten Messtechnik existieren unterschiedliche Strategien, diese geometrischen Abweichungen festzustellen, um dann geeignete Gegenmaßnahmen einzuleiten.

Ein weitverbreitetes Hilfsmittel um Problemstellung zu bewerkstelligen, ist der AMB, da hiermit auch Wechselwirkungen mit anderen Bauteilen, deren etwaige Ungenauigkeiten und Reaktionskräfte aus Dichtungen oder Gasdruckfedern berücksichtigt werden. Der AMB besteht im Grunde aus einem Aluminiumrahmen mit sehr engen Lagetoleranzen für die Befestigungspunkte der Exterieur-Bauteile. Doch nicht nur die vergleichsweise hohen Anschaffungskosten stellen einen Nachteil dieses Werkzeugs dar: Trotz der häufig zeit- und ressourcenaufwendigen Analyseaufbauten bietet der Meisterbockprozess nur eine eingeschränkte Flexibilität hinsichtlich der Erprobung möglicher Korrekturmaßnahmen. Vor dem Hintergrund der in Abbildung 1-1 dargestellten, gegenläufigen Tendenzen der Zeitreduktion bei steigender Änderungszahl erhöht sich umso mehr der Innovationsdruck, effizientere Produktionsanläufe zu erreichen.

Im Sinne der Industrie 4.0 erscheint es daher naheliegend, neue Potentiale durch die Virtualisierung des Meisterbockprozesses mithilfe der FEM zu erschließen. Dabei besteht das primäre Ziel darin, die Variabilität der Simulation auszuschöpfen, indem potentielle Korrekturvarianten digital verifiziert und letztlich der iterative Qualifizierungsprozess von Exterieur-Bauteilen verkürzt werden kann. Die Benefits für die Qualitätssicherung werden sich durch die simulativ gewonnen Erkenntnisse und die gezieltere Einleitung von Korrekturschritten herausstellen. Insbesondere wiegt dieser Vorteil dann, wenn Fehler bereits erkannt werden, bevor die ersten physischen Bauteile hergestellt wurden. Virtuelle Korrekturschleifen der Produktionsprozesse sind erheblich kosteneffizienter als beispielsweise die Änderung eines teuren Presswerkzeugs. Darüber hinaus erlaubt ein validierter VMB die Einsparung des wesentlich kostspieligeren, physischen Pendant. (vgl. [9])

1.3 Ableitung der Vorgehensweise

Um einen Bogen von der Qualitätssicherung in Richtung der Bauteilqualifizierung mit virtuellen Methoden zu schlagen, steht zunächst der Stand der Technik in Bezug auf Qualität und die dafür elementare Messtechnik im Vordergrund. Somit wird das grundlegende Verständnis für die Funktion des Meisterbocks und dessen Einsatz im Verlauf des Produktlebenszyklus geschaffen. Die dabei verwendeten virtuellen Methoden unterstützen zwar bereits den Bauteilqualifizierungsprozess, jedoch erlauben sie weder eine Berücksichtigung der tatsächlichen Einbaumgebung noch eine Verlagerung der Bauteil- oder Prozesskorrektur in eine frühere Phase. Vor diesem Hintergrund erfolgt die Konkretisierung des Forschungsthemas und der Ableitung spezifischer Forschungsfra-

gen. Nachdem anschließend die relevanten Informationen zu den verwendeten Materialien und Methoden bereitgestellt werden, gliedert sich der Hauptteil in zwei Blöcke: Im ersten Teil wird eine VMB-Simulation entwickelt, die einen Kotflügel virtuell über die Anschraubpunkte ausrichtet und mithilfe des realen Meisterbockprozesses validiert wird. Basierend darauf zielt der zweite Teil auf die als Frontloading bezeichnete Verlagerung des Qualifizierungsprozesses in die frühe Phase ab. Dazu wird die Herstellung des zuvor betrachteten Kotflügels in einer virtuellen Prozesskette modelliert und deren Haupteinflussfaktoren herausgefiltert. Somit lassen sich letztlich Antworten zu den anvisierten Forschungsfragen ableiten.

2 Stand der Technik

Um technisch komplexe Produkte erfolgreich zu produzieren und anschließend zu vermarkten, benötigt man eine Vielzahl an oftmals simultan ablaufenden, verzahnten Prozessen. Angefangen bei der Produktidee, über die Entwicklung, bis hin zur Markteinführung werden dabei jeweils spezifische Meilensteine zur stringenten Zielverfolgung gesetzt und von einer verantwortlichen Organisationsstruktur überwacht. Zur Überwachung und Steuerung dieser Prozesse sowie zur Einhaltung der geforderten Qualität sind wiederum entsprechende Regelgrößen oder Kennzahlen notwendig, die den aktuellen Fortschritt des Produkts beschreiben. Insbesondere in der Automobilindustrie hat sich zu diesem Zweck der Einsatz eines Qualitätsmanagementsystems durchgesetzt, das die Messtechnik als ein Instrument zur Generierung dieser Kennwerte verwendet.

Das Ziel dieses Grundlagenkapitels besteht darin, die Zusammenhänge zwischen Qualitätsmanagement (QM) und dem automobilen PEP darzustellen, sodass sich daraus die Notwendigkeit der konstitutiven Messtechnik ableiten lässt. Die Messtechnik liefert die notwendigen Entscheidungshilfen, welche im vorliegenden Beispiel der Qualifizierung von Blechbauteilen maßliche Abweichungen basierend auf dem Meisterbockprozess sein können. Die hierarchische Verknüpfung zwischen QM, PEP und Messtechnik illustriert Abbildung 2-1 und wird in den nachfolgenden Unterkapiteln entsprechend von der Pyramidenspitze bis zum Fundament vertieft. Ziel dieses Kapitels ist die Darstellung der Relevanz des Qualitätsmanagements und eine Hinführung zur Qualitätssicherung im Automobilbau.

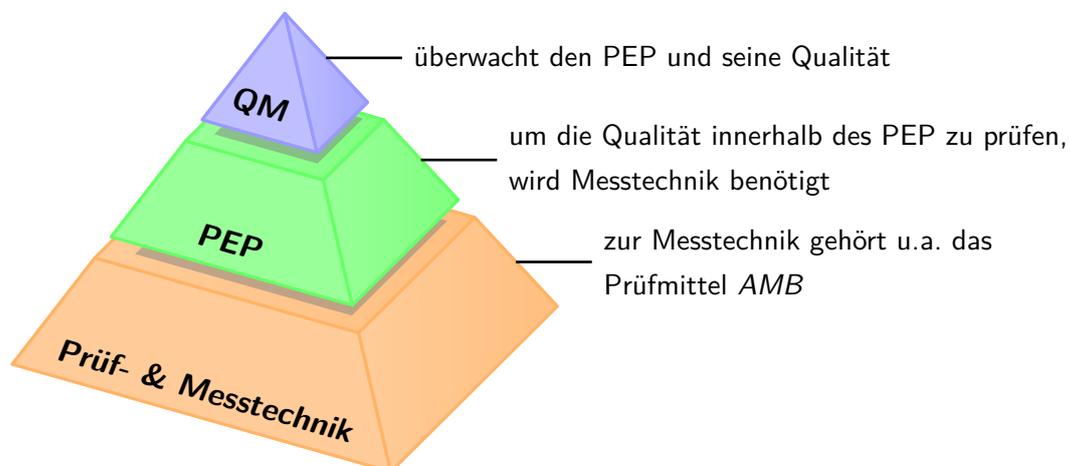


Abb. 2-1: Aufbau des Kapitels *Stand der Technik*

2.1 Qualität

2.1.1 Begriff

Das primäre Ziel jeder Wirtschaftseinheit innerhalb einer Marktwirtschaft umfasst die Gewinnmaximierung durch den Absatz von Produkten oder Dienstleistungen bei gleichzeitiger Minimierung der Kosten. Ein adäquates Mittel um das Ergebnis dieser Gewinnfunktion entsprechend positiv zu beeinflussen, äußert sich in einer kontinuierlichen Steigerung der Absatzzahlen. Infolgedessen wird versucht die Kundenanforderungen und -erwartungen bestmöglich zu erfüllen, um die Attraktivität des Produkts und damit die Kaufmotivation für potentielle Kunden zu erhöhen. Die Herausforderungen insbesondere im Automobilbau bestehen darin, ebendieses Anforderungsprofil zu determinieren und die Produktbeschaffenheit optimal danach auszurichten. Der in Abbildung 2-2 gezeigte Vergleich zwischen beiden Mengen führt letztlich der Kunde durch und bildet sich daraus ein Qualitätsurteil. Je größer die deckungsgleiche Teilmenge C ausfällt, desto höher ist der resultierende Kaufanreiz im Wettbewerbsmarkt und die Absatzprognose zugunsten des Unternehmens wächst.

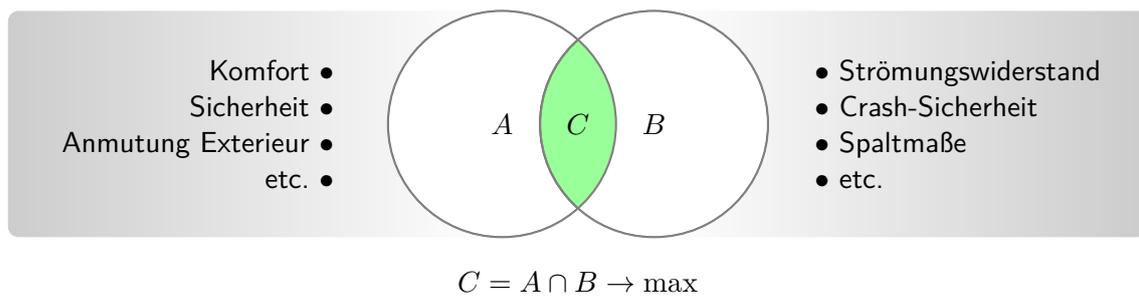


Abb. 2-2: Das Qualitätsurteil (C) entspricht der kongruenten Teilmenge zwischen Kundenanforderungen/ -erwartungen (A) und realisierter Produktbeschaffenheit (B) (in Anlehnung an [7, S. 386])

Vor dem Hintergrund des oben dargestellten Prinzips erweist es sich als logische Konsequenz, die Produkteigenschaften entsprechend kundenorientiert zu optimieren. Sowohl im allgemeinen Sprachgebrauch als auch in der Fachliteratur werden die erzielten Produkteigenschaften mit dem Begriff *Qualität* assoziiert. Wenngleich die umgangssprachliche Bedeutung überwiegend positive Qualitätsmerkmale konnotiert, kann Qualität per Definition auch die entgegengesetzte Richtung meinen. Denn der ursprünglich lateinische Sinngehalt des Wortes weist auf Merkmal, Eigenschaft oder Zustand eines Gegenstandes hin [10, S. 23]. In der Literatur einigt man sich daher auf eine neutrale Ebene, die sowohl gute als auch schlechte Qualität beinhalten kann:

„Qualität = Realisierte Beschaffenheit einer Einheit bezüglich ihrer geforderten Beschaffenheit“ [11, S. 98].

Der Kreis schließt sich, wenn die Qualitätsansprüche in die oben genannte Gewinnfunktion einfließen: Je höher die Qualität, desto größer der Absatz von Produkten und damit der Gewinn. Zu die-

sem Zweck impliziert der Einsatz eines Qualitätsmanagementsystems gemäß DIN EN ISO 9000 [12] eine wichtige Hauptaufgabe: Für den betriebswirtschaftlichen Erfolg eines Unternehmens sollten die Kundenanforderungen und -erwartungen mindestens erfüllt und nach Möglichkeit sogar übertroffen werden. Das Qualitätsmanagement setzt sich wiederum aus diversen Teildisziplinen zusammen, von denen die Qualitätssicherung im Rahmen dieser Arbeit hervortritt, da die Aufgabe der Bauteilqualifizierung in der gleichnamigen Organisationseinheit verortet ist und sie im Sinne der Norm Vertrauen zur Erfüllung der Qualitätsanforderungen schaffen soll [12, S. 31]. Für die anderen Teilaspekte des Qualitätsmanagements, wie beispielsweise die Qualitätsplanung oder -steuerung sei an dieser Stelle auf die Norm DIN EN ISO 9001 [13] verwiesen, da sie für das Verständnis der nachfolgenden Kapitel eine untergeordnete Rollen spielen. Stattdessen erweist es sich als zweckmäßig, die Vielschichtigkeit der Qualitätsanforderungen zu analysieren, um daraus die detaillierten Ansprüche an das Exterieur abzuleiten.

2.1.2 Allgemeine Qualitätsanforderungen

Bevor sich potentielle Neuwagenkunden ein Qualitätsurteil bilden können, müssen aus ökonomischer Sicht zunächst ein Bedürfnis und die entsprechende Kaufkraft vorhanden sein, um einen quantifizierbaren Bedarf zu generieren [14, S. 5]. Wenn diese Voraussetzungen gegeben sind, obliegt es der nachfragenden Wirtschaftseinheit, dass für sich optimale Gut im opulenten Angebot auszuwählen, indem es vorab Anforderungen und Erwartungen an das Produkt absteckt. Infolge unterschiedlicher persönlicher Präferenzen avancieren sich somit individuelle Anforderungsprofile, die aus Sicht des Produzenten pragmatisch klassifiziert werden sollten, um das Qualitätsmanagements kundenorientierter auszurichten. Zu diesem Zweck wird an dieser Stelle eine Klassifizierung in der Anforderungsstufen nach *Kano*¹ vorgenommen, dessen Modell beispielhaft für die Automobilindustrie in Abbildung 2-3 adaptiert ist [16, 17].

Zu den Basisanforderungen zählen, neben gesetzlichen Rahmenbedingungen, auch die Anmutungsqualität des Exterieurs, welche im Fokus dieser Arbeit steht. Anhand der zugehörigen unteren Kurve lässt sich erkennen, dass bei steigendem Erfüllungsgrad zwar ebenfalls die Kundenzufriedenheit zunimmt, jedoch nähert sich der Graph degressiv einer gedachten Asymptote im neutralen Bereich der Kundenzufriedenheit. Demnach erzeugt die Erfüllung derartiger Anforderungen keine Euphorie, dennoch können Mängel in dieser Kategorie zu einer signifikanten Unzufriedenheit führen. Einerseits werden harmonische Fugenverläufe zwischen den Anbauteilen im Regelfall nicht explizit als Qualitätsanforderung genannt (*implied needs*), obwohl sie andererseits bei sichtbaren Unregelmäßigkeiten das Qualitätsurteil nachteilig beeinflussen können. Dieser scheinbar latente, negative Effekt auf die wahrgenommene Qualität (*perceived quality*) korreliert über die ästhetischen Aspekte hinaus mit der Fahrleistung und dem Komfort. Denn infolge

¹N. Kano untersuchte die Wechselwirkungen zwischen Erfüllungsgrad eines Qualitätsmerkmals und Kundenzufriedenheit und begründete damit die „Theory of Attractive Quality“. [15]

gestörter aerodynamischer Verhältnisse werden möglicherweise lautere Fahrtwindgeräusche, höhere Verbrauchswerte und steigende Emissionen hervorgerufen ([18], siehe Unterabschnitt 2.1.3). Somit kann die Anmutungsqualität des Exterieurs auch indirekt zum Erfüllungsgrad der ranghöheren Leistungsanforderungen beitragen, welche einen linearen Zusammenhang zwischen Ein- und Ausgangsgröße und damit eine größere Bedeutung für die Kundenzufriedenheit aufweisen. Die Leistungskriterien, wie beispielsweise Verbrauch oder Beschleunigung eines Fahrzeugs, werden oft direkt vom Kunden an den Verkäufer herangetragen (*stated needs*), auch wenn es nicht für jede Anforderung dieser Art gelten muss und von den individuellen Vorlieben des Kunden abhängt. Im Fall des Geräuschpegels während der Fahrt kommt es eher selten zu expliziten Forderungen, aber dennoch können geringe Fahrtwindgeräuschen bei hohen Geschwindigkeiten die Kundenzufriedenheit proportional steigern.[7, S. 390 f.]

Aufgrund der enorm steigenden Relevanz umweltschonender Qualitätskriterien, insbesondere im Bearbeitungszeitraums dieser Arbeit, kann angenommen werden, dass beispielsweise die Dekarbonisierung eines Automobilherstellers ebenfalls an Bedeutung gewinnt und den Leistungsanforderungen zugeordnet werden kann [19].

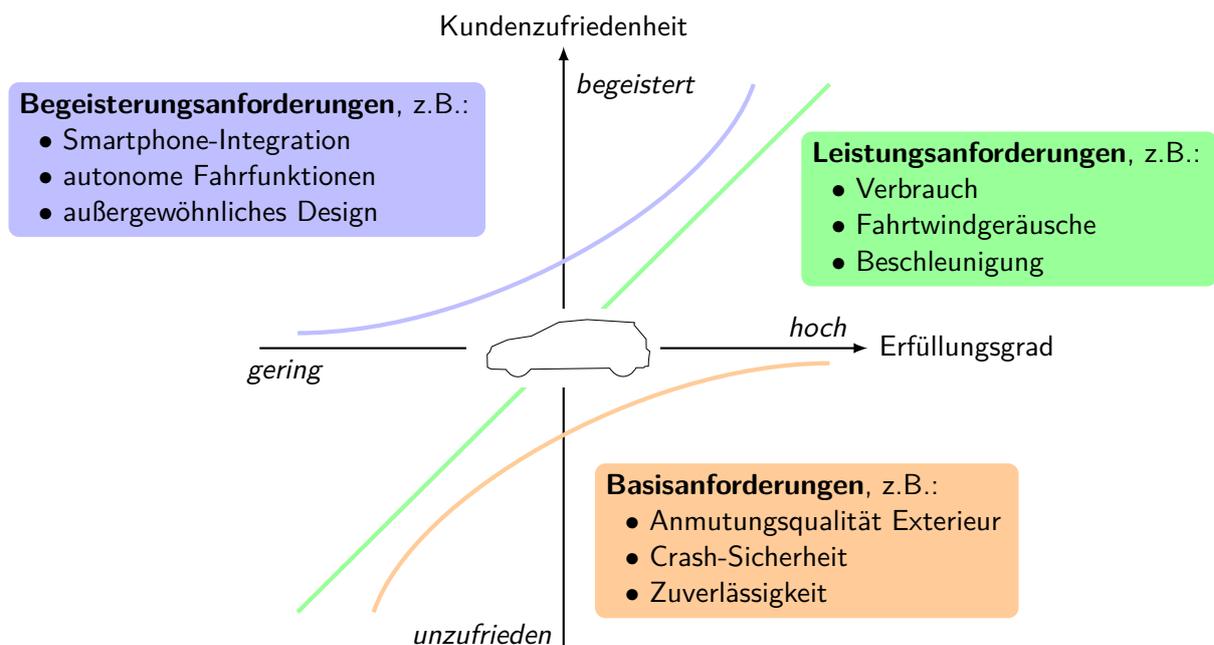


Abb. 2-3: automobiler Qualitätsmerkmale im Kano-Modell

Die Qualitätsmerkmale innerhalb der dritten Kategorie fungieren unter bestimmten Voraussetzungen als Alleinstellungsmerkmal, da sie bei erfüllter Funktionalität den Kunden nicht nur zufriedenstellen, sondern eine Begeisterung für das Produkt hervorrufen können. Im automobilen Umfeld sind diese Anforderungen jedoch oft einer Art Lebenszyklus unterworfen. Beim Markteintritt existiert ein enormes Interesse, doch je mehr es auch in anderen Fahrzeugklassen oder bei anderen Herstellern Anwendung findet und sich diese Anforderungen nahezu als technischer Standard etablieren, desto stärker sinkt die Begeisterungsfähigkeit dafür. Im Zuge dessen sollten gemäß der

Theorie des Kano-Modells diese Qualitätsmerkmale nach unten gestuft und fortan als Basisanforderung gelistet werden.

2.1.3 Qualitätsanforderungen an das Exterieur

Nachdem vorab die Qualitätsanforderungen im automobilen Umfeld in Abhängigkeit der Wirkung auf die Kundenzufriedenheit sortiert worden sind, konzentriert sich dieser Abschnitt auf die Qualität der im Mittelpunkt stehenden flächigen Exterieur-Bauteile. Die in Abbildung 2-4 konturierten Bauteile bestehen in der Regel aus mehreren Einzelteilen und repräsentieren somit Baugruppen, die im Fall von Kotflügel, Türen und Seitenteil spiegelsymmetrisch zur Fahrzeugmittelebene auf beiden Seiten angebracht sind.

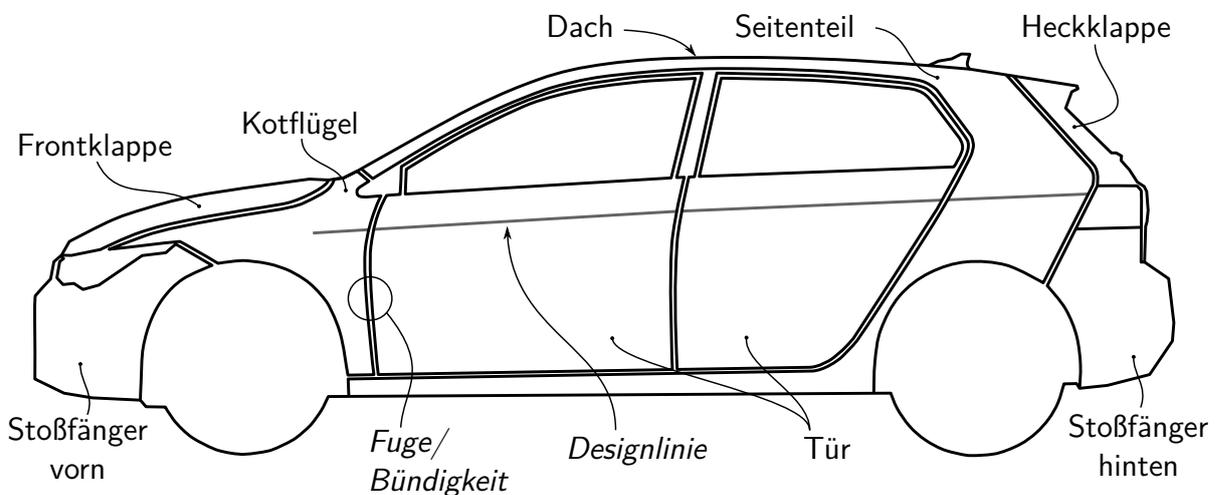


Abb. 2-4: Die primären Exterieur-Bauteile am Beispiel VW Golf. Die Form- und Lagequalität lässt sich insbesondere durch die Maßhaltigkeit der Fugen und den möglichst gleichmäßigen Übergang von Designlinien über mehrere Bauteile hinweg bewerten.

Die qualitativen Ansprüche an das Exterieur am fertigen Fahrzeug reichen von einer gleichmäßigen Lackschicht, über den exakten Farbton bis zur geometrischen Genauigkeit der dargestellten Bauteile. Das letztere Merkmal lässt sich mit bloßem Auge insbesondere an den Fugen (Spalte) oder am Übergang von Designlinien erkennen. Die Qualität der Fugenverläufe, die durch Spalt- und Bündigkeitsmaße (siehe Abb. 2-5) charakterisiert wird, korreliert überwiegend indirekt mit der wahrgenommenen Qualität des Kunden: Etwaige optische Mängel werden zwar bewusst mit der Anmutungsqualität des Exterieurs in Verbindung gebracht, jedoch tritt der Einfluss auf den Komfort oder die Fahrleistung eher unbewusst ein. Stattdessen bewirken abweichende Fugenverläufe zunächst eine Änderung der aerodynamischen Verhältnisse, die vor allem bei höheren Geschwindigkeiten gegenüber Motor- und Abrollgeräuschen dominieren [20, S. 523 f.], sodass erst im zweiten Schritt der Geräuschpegel und die für die Fahrleistung verantwortlichen Eigenschaften spürbar beeinträchtigt werden können (siehe Abb. 2-6).

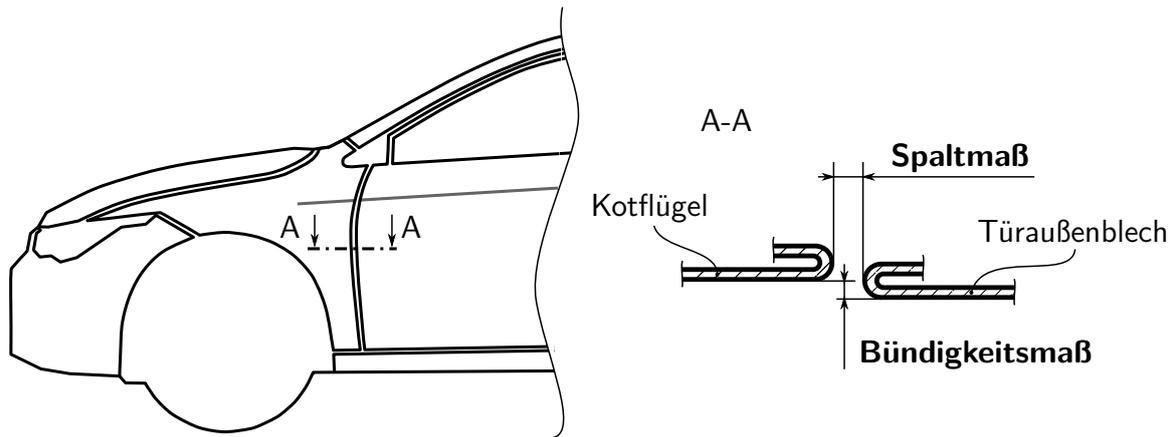


Abb. 2-5: Spalt- und Bündigkeitsmaß zwischen Kotflügel und vorderer Tür

Da im Ursache-Wirkungs-Diagramm 2-6 eine geringe wahrgenommene Qualität in allen drei Fällen auf abweichende Fugenverläufe zurückgeführt wird, stellt sich die Frage, welche Ursachen einem gestörten Fugenbild zugrunde liegen.

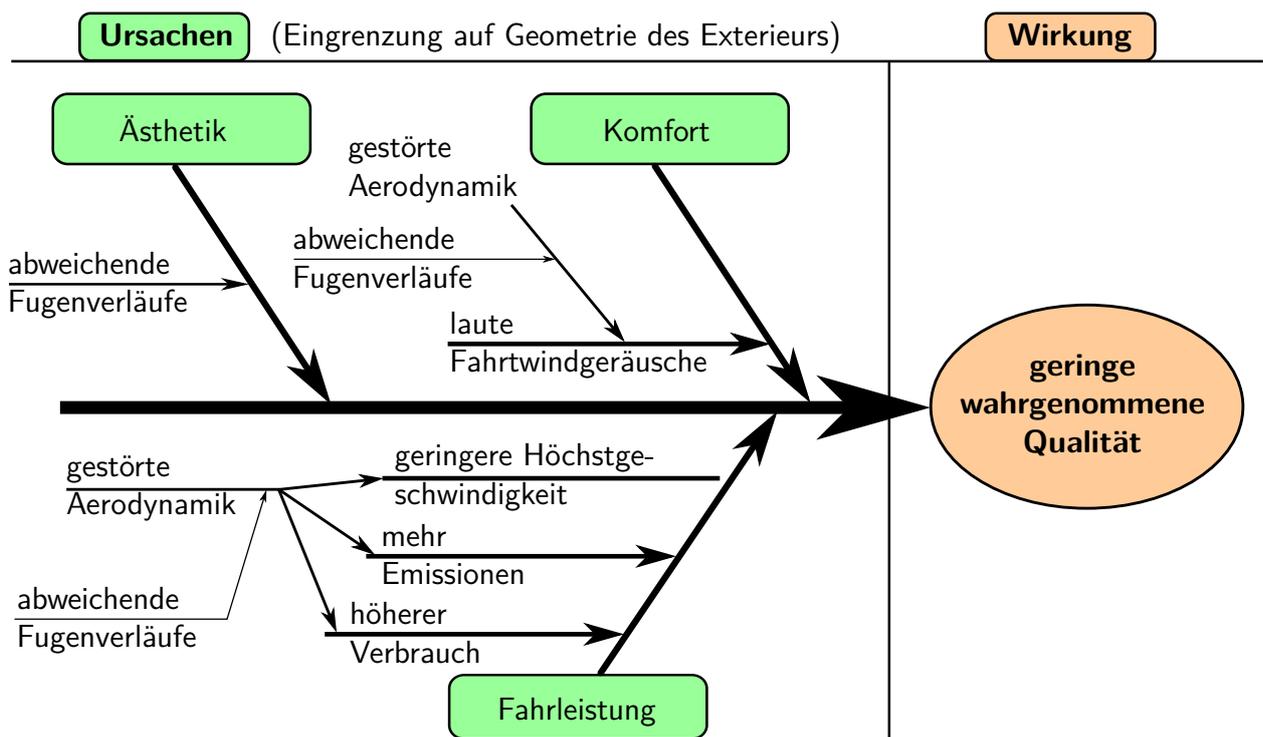


Abb. 2-6: Ursache-Wirkungs-Diagramm (ISHIKAWA [21, 22]) zur wahrgenommenen Qualität eines Automobils

Den offensichtlichen Grund liefert der erste Ast im Ursache-Wirkungs-Diagramm Abb. 2-7: statische Geometrieabweichungen aus den Einzelteilen, die sich in den daraus zusammengesetzten Baugruppen entsprechend additiv oder subtraktiv fortpflanzen. Außerdem werden die Bauteile durch Reaktionskräfte aus z.B. Dichtungen oder Gasdruckfedern mechanisch deformiert.

Wenn diese durch Fertigungstoleranzen hervorgerufenen Abweichungen einen bestimmten Grenzwert außerhalb der jeweiligen Spalt- und Bündigkeitstoleranzen überschreiten, können sich daraus rekursive Änderungen der Umströmungsverhältnisse ergeben. Diese begünstigen bei hohen Geschwindigkeiten wiederum zusätzliche mechanische Bauteildeformationen, welche die Geometrieabweichungen und damit das Fugenbild dynamisch beeinflussen. Darüber hinaus kann eine durch breitere Fugen erzeugte größere Wirkfläche des Strömungsdruckes auf Fenster- und Türdichtungen das Risiko von Leckagen und damit der direkten Schallübertragung erhöhen [20, S. 535].

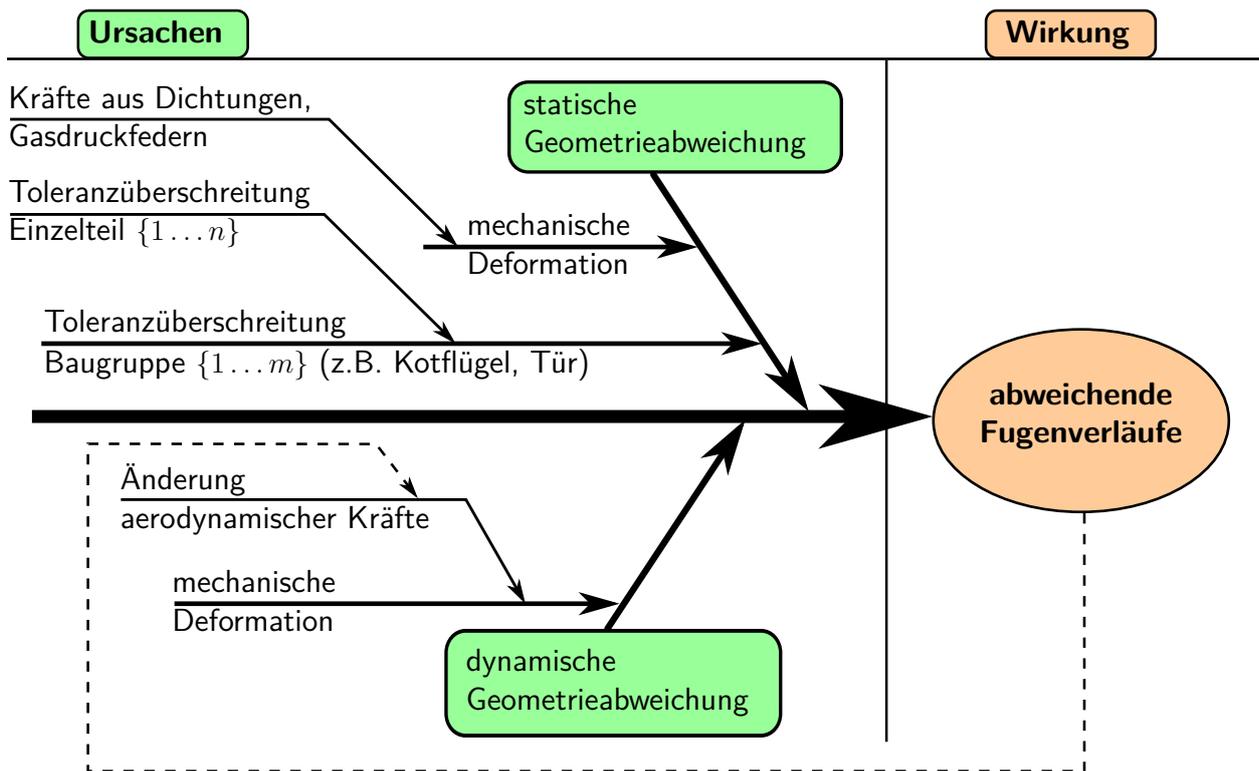


Abb. 2-7: Ursache-Wirkungs-Diagramm zu abweichenden Fugenverläufen

Abschließend lässt sich für die Qualitätsanforderungen an flächige Exterieur-Bauteile zusammenfassen, dass deren wahrgenommene Qualität sowohl bewusst als auch unbewusst von der Maßhaltigkeit der Fugen beeinflusst wird. Daraus resultiert die Motivation, die Abweichungen der Fugenverläufe des gesamten Fahrzeugs zu minimieren. Aus Sicht der Qualitätssicherung bedarf es dafür eines umfassenden Ansatzes, der innerhalb des Produktlebenszyklus insbesondere die Produktionsentwicklung fokussiert, um die notwendigen Justierungen an den einzelnen Autos am Ende der Produktionslinie gering zu halten. Die dafür vorgesehenen Werkzeuge und Methoden werden in den nachfolgenden Abschnitten aufgeschlüsselt.

2.2 Qualitätssicherung im Produktionsanlauf

Von der ersten Produktidee, über die Entwicklung und Produktion bis zur Stilllegung eines Produktes können je nach Branche unterschiedliche Zeiträume verstreichen. Innerhalb der Automobilindustrie schwankt die Dauer dieses Produktlebenszyklus teilweise erheblich, dennoch zeichnet sich ein klarer Trend ab: Sowohl die Zeit bis zur Markteinführung (time-to-market) als auch der Produktionszeitraum selbst verkürzen sich aufgrund des Wettbewerbsdrucks kontinuierlich.[23, S. 1276] Diesen Trend spiegeln beispielsweise die verkürzten Produktionszeiten des VW Golfs wieder, dessen Erstaufgabe mit 9 Jahren Bauzeit mehr als doppelt so lang vom Band lief wie der Golf 6. Lediglich die siebte Generation stellt aktuell eine Ausnahme dar und wird mit Produktaufwertungen bereits 7 Jahre gefertigt [24].

Verschärft werden die Herausforderungen kürzerer Produktlebenszyklen durch die zunehmende Modellvielfalt der Fahrzeuge, da die Notwendigkeit besteht, auftretende Engpässe oder Barrieren in den Prozessen insbesondere bereits vor dem Produktionsanlauf zu minimieren.[25, 26] Entsprechende Prozessinnovationen sind daher unabdingbar und es gilt Fehler so früh wie möglich zu erkennen, um zielgerichtete Gegenmaßnahmen einzuleiten. Gemäß der 10er-Regel der Fehlerkosten korreliert der Aufwand zur Fehlerbehebung um eine 10er Potenz mit der jeweiligen früheren Phase im Produktlebenszyklus, in der der Mangel registriert wird (siehe Abb. 2-9). Im Sinne des als *Frontloading* bezeichneten Vorgangs, die Fehlererkennung möglichst weit nach vorn in den Produktentstehungsprozess zu verlagern, werden für alle Teilprozesse der Herstellung unterschiedlichste Qualitätsmethoden zur präventiven Detektion eingesetzt [22, S. 187].

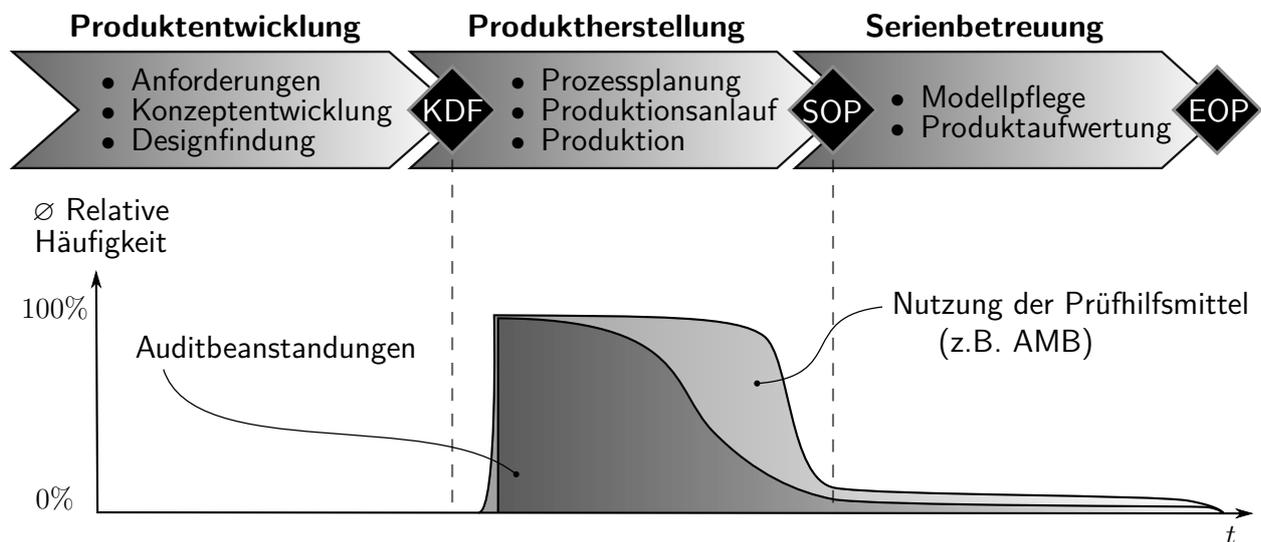


Abb. 2-8: Durchschnittlicher Nutzungsgrad von Prüfmitteln zur Bauteilqualifizierung im zeitlichen Verlauf des Produktlebenszyklus (in Anlehnung an [23, 27])

Wie Abbildung 2-8 darstellt, soll der Produktlebenszyklus an dieser Stelle vereinfacht in 3 sequentielle Abschnitte untergliedert werden, um den Einsatz der Qualitätsmethoden speziell im Bereich

des Exterieurs im zeitlichen Verlauf des Produktlebenszyklus aufzuzeigen. Die erste Phase der Produktentwicklung beginnt mit dem fahrzeugspezifischen Lastenheft und einer umfangreichen Anforderungsliste, für das in geeigneter Weise ein technisch realisierbares Konzept entwickelt wird. Parallel dazu durchläuft das Design diverse Reifegrade und muss bis zum Meilenstein der Konzept- und Designfestlegung (KDF) finalisiert sein. Ab diesem Zeitpunkt können die verantwortlichen Instanzen seitens der Qualitätssicherung die Beschaffung des notwendigen Prüfequipments anstoßen, was in Abbildung 2-8 durch die progressiv ansteigende Nutzungsgradkurve der Prüfhilfsmittel symbolisiert ist. Je nach Beschaffenheit des Bauteils und der zu prüfenden Eigenschaft kommen, wie in Abbildung 2-14 schematisiert, unterschiedliche Prüfhilfsmittel zum Einsatz. Im Fall des AMBs muss dieser bereits mit ausreichend Vorlaufzeit beauftragt, konstruiert, gefertigt und fertigungsliniennah aufgebaut sein.

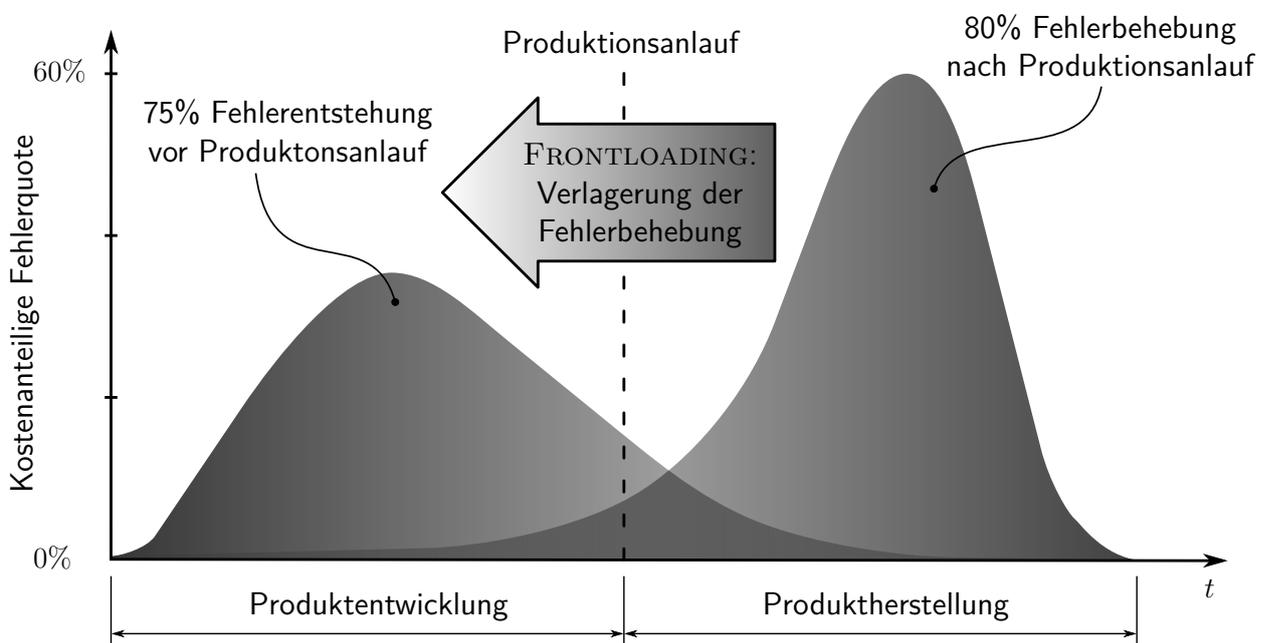


Abb. 2-9: Frontloading bietet unter Berücksichtigung der 10er-Regel der Fehlerkosten enorme Kosteneinsparpotentiale (in Anlehnung an [22, S. 187][7, S. 402])

In der zweiten Phase werden im Rahmen der Prozess- bzw. Prüfprozessplanung für die verschiedenen Fertigungsstufen adäquate Prüfeinrichtungen und für die Zukaufteile entsprechende Bemusterungen vorgesehen. Somit wird gewährleistet, dass die Produkteigenschaften vom Einzelteil, über die Baugruppen bis zum Gesamtfahrzeug entlang der Prozessketten kontrollier- und steuerbar sind. Während des Produktionsanlaufs kann die Qualitätssicherung mit diesen Instrumenten einen engmaschigen Regelkreis zur Bauteilqualifizierung betreiben (siehe Abschnitt 2.4.3). Die durchgeführten Produktaudits dokumentieren zu Beginn ein fertigungsbedingtes Maximum an Beanstandungen, welche es dann möglichst effizient bis zur nächsten Regelungsschleife zu minimieren gilt, sodass durch wiederholte Stellmaßnahmen die Menge an Auditbeanstandungen kontinuierlich abnimmt und bis zum Start of production (SOP) gegen Null tendiert. Damit ver-

knüpft sinkt ebenfalls der durchschnittliche Nutzungsgrad der Prüfhilfsmittel.

Der PEP umfasst gemäß Definition die ersten beiden Phasen Produktentwicklung und -herstellung und ist demnach mit Beginn der Serienbetreuung abgeschlossen. Innerhalb dieser Phase erfolgt die Meisterbockarbeit überwiegend problemorientiert oder im Zusammengang mit Modellpflege-maßnahmen bzw. Produktaufwertungen mit durchschnittlich geringerer Prüfkaktivität. Der Produktlebenszyklus inklusive des zugehörigen Qualitätssicherungsprozesses schließt mit dem End of production (EOP) ab. Fahrzeugspezifische Prüfmittel wie der AMB werden danach entsorgt bzw. recycelt und bei Nachfolgeprojekten entsprechend neu beschafft.

2.3 Messtechnische Grundlagen

Die vorangegangene zeitliche Gegenüberstellung zwischen Produktion und durchschnittlicher Prüfmittelnutzung verschafft einen Überblick über die relevanten Teilprozesse dieses Projektes. Um den AMB darüber hinaus in den messtechnischen Hintergrund einzuordnen, werden in diesem Abschnitt die relevanten Grundlagen der Messtechnik beleuchtet.

„Die Grundaufgabe der Messtechnik besteht in der Erfassung physikalischer Größen mit einer vorgegebenen Genauigkeit.“ [28, S. 3]

Das Spektrum der physikalischen Größen kann neben Werkstoffeigenschaften wie Festigkeit oder Elastizitätsmodul (E-Modul) auch Randzonenmerkmale wie beispielsweise Härte, Risse oder Spannungen beinhalten. Der Fokus liegt zunächst jedoch auf der Charakterisierung der Gestalt des Bauteils aus makroskopischer und mikroskopische Sicht, wie in Tabelle 2-1 dargestellt. [7, S. 625] Daher wird sich zunächst auf die messtechnische Informationsgewinnung, speziell im makroskopischen Bereich, konzentriert und im Anschluss erfolgt die Betrachtung von Messabweichungen. Je nach Ausprägung solcher Abweichungen lassen sich die Genauigkeit bzw. Güte der gewonnenen Informationen bewerten, sodass die Grundaufgabe der Messtechnik per Definition entscheidend davon beeinflusst wird.

Tab. 2-1: Primäre Charakteristiken der Bauteilgestalt

Nr.	a) makroskopisch	b) mikroskopisch
1	Maßhaltigkeit	Rauheit
2	Form	Welligkeit
3	Lage	
4	Winkel	

2.3.1 Messabweichungen

Jeder ermittelte Messwert weicht vom wahren Wert der interessierenden Größe ab. Dieser als Messabweichung oder Messfehler bezeichnete Betrag besteht, wie in Abbildung 2-10 dargestellt, aus zwei Komponenten: Der systematische Anteil bleibt bei wiederholten Messungen und sonst identischen Bedingungen konstant, während die zufällige Messabweichung mit einer bestimmten Verteilung um den Erwartungswert streut. Die Häufigkeitsdichtefunktion dieser Streuung lässt sich häufig, wie im Diagramm abgebildet, mit einer Normalverteilung approximieren. [28, S. 17ff], [7, S. 627]

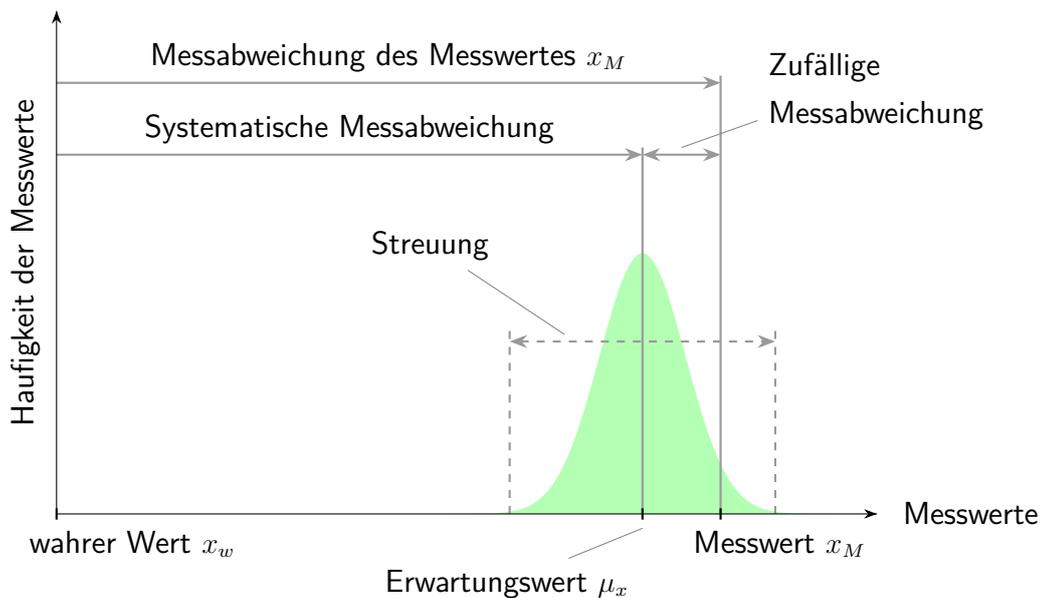


Abb. 2-10: Messabweichungen vom wahren Wert nach DIN 1319-1 [29]

2.3.2 Messausrüstung

Im Rahmen der Qualitätssicherung müssen Voraussetzungen geschaffen werden, die eine wiederholgenaue Prüfung der zuvor erwähnten physikalischen Größen aus unterschiedlichen mechanischen oder elektrotechnischen Bereichen gewährleisten. Zusätzlich wird die Erfüllung dieser Aufgabe durch hohe Genauigkeitsanforderungen an die Prüfergebnisse erschwert, zumal Fahrzeuganläufe regelmäßig das Einbinden des Messvorgangs in die Analyseprozesse erfordern, um insbesondere auch die Wechselwirkungen mit angrenzenden Bauteilen zu berücksichtigen. Aufgrund dieses breiten Anwendungsspektrums besteht die Messausrüstung aus vielen unterschiedlichen Mess- und Prüfmitteln, die in Abbildung 2-11 speziell für die Geometrieerfassung in fünf Klassen gruppiert und mit jeweils typischen Beispielen aus dem Kontext der Bauteilqualifizierung des Exterieurs ergänzt sind.

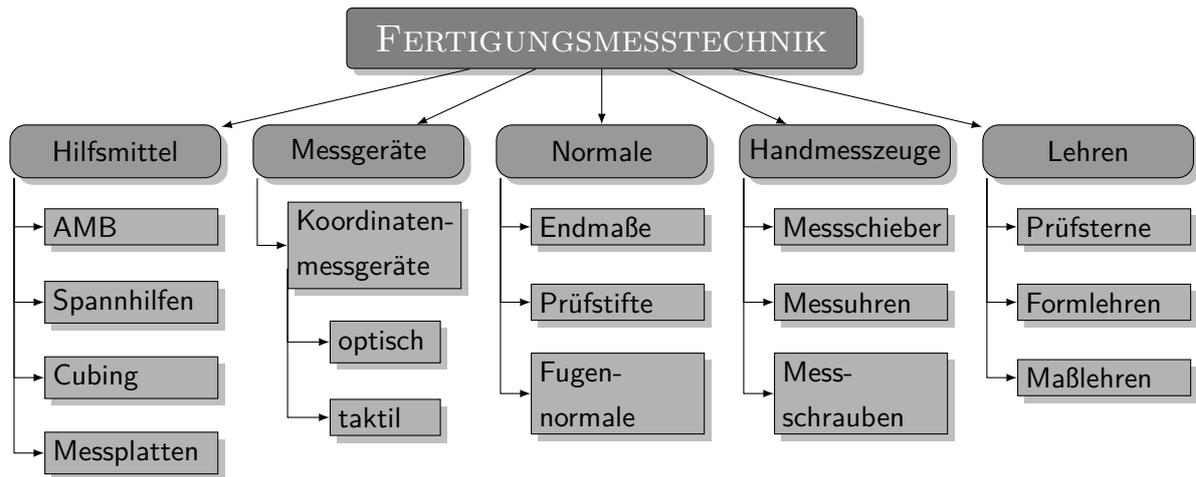


Abb. 2-11: Allgemeine Klassifizierung von Prüfmitteln in der Fertigungsmesstechnik und häufig im Kontext der Bauteilqualifizierung verwendete Beispiele (in Anlehnung an [7, S. 633])

Gemäß der obigen Einteilung zählt der AMB ebenso wie das Cubing zu den Prüfhilfsmitteln, wobei sie im Unterschied zu einfachen Spannhilfen (Messaufnahmen) nicht nur einzelne Bauteile oder Baugruppen darstellen, sondern auch die bereits genannten Wechselwirkungen im System betrachten (Details siehe Abb. 2-14). Neben den industrieübergreifend eingesetzten Prüfwerkzeugen, wie Endmaße zur Kalibrierung oder Prüfstifte zur manuellen Messung von Spaltmaßen (vgl. Abb. 2-5), existieren darüber hinaus spezifische Fugennormale, um beispielsweise Messmethoden zu validieren oder zu vergleichen. In der Klasse der Lehren lassen sich beispielsweise Prüfstern erwähnen, die eine einfache und zügige Methode darstellen, die Maßhaltigkeit von Fugen wie im Bild 2-12 zu prüfen.

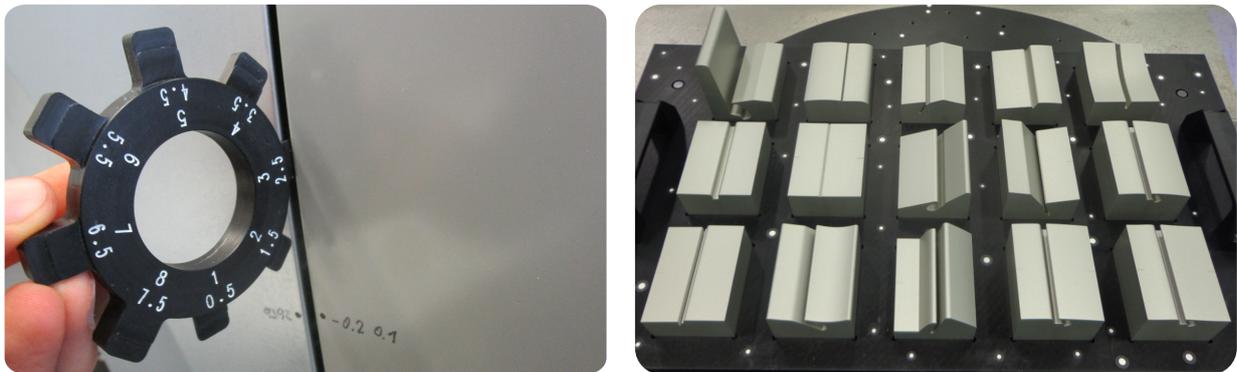


Abb. 2-12: Links: Prüfen der Fuge zwischen Kotflügel und Tür mit einem Fugensterne | Rechts: Fugennormale zur Kalibrierung von Messgeräten und Prüfmitteln

Die Einsatzhäufigkeit dieser meist simplen Mess- und Prüfmittel sinkt jedoch zugunsten der deutlich performanteren Koordinatenmessgeräte (siehe Abb. 2-13), da sie sowohl hohe Flexibilität als auch Präzision bieten. Im Fall von Serienmessungen lassen sich derartige Anlagen außerdem oft problemlos teilautomatisieren oder ggf. komplett automatisieren. Für die hier angestrebte virtuelle Prüfung der Bauteile stellt insbesondere die optische Messtechnik eine Möglichkeit zur

Verfügung, die realen Bauteile aller sichtbaren Flächen vollflächig zu digitalisieren. Dabei werden hohe Qualitätsanforderungen an die erzeugten Punktwolken gestellt, da die späteren Simulationsergebnisse insbesondere von der Auflösung an den Bauteilkanten abhängen. Hinsichtlich der durchgeführten Analysen in diesem Projekt hat sich zu diesem Zweck das auf dem Triangulationsprinzip beruhende *ATOS Triple Scan System* von GOM bewährt. Mithilfe von zwei Kameras wird dabei ein auf das Bauteil projiziertes Streifenlicht gescannt und in ein fein aufgelöstes Netz aus dreidimensionalen Messpunkten transformiert [30, S. 51].



Abb. 2-13: Links: Optisches Messsystem ATOS Triple Scan von GOM [30, S. 53] | Rechts: Messplatte mit zwei taktilen Koordinatenmessgeräten in Ständerbauweise [31]

2.4 Bauteilqualifizierungsprozess

Der Bauteilqualifizierungsprozess repräsentiert einen essentiellen Bestandteil des Produktionsanlaufes und wird darüber hinaus auch während der Serienfertigung bei etwaigen Problemen oder Produktaufwertungen eingesetzt. Welche Motivation sich dahinter verbirgt, wie die Teilschritte chronologisch verknüpft sind und welche Rolle in diesem Zusammenhang der AMB spielt, soll nachfolgend geklärt werden.

2.4.1 Motivation

Zum gegenwärtigen Stand der Fertigungstechnik in der Automobiltechnik weist die Mehrzahl der physisch hergestellten Blech- und Kunststoffteile zu Beginn des Produktionsanlaufs Abweichungen gegenüber der geometrischen Soll-Vorgaben auf, die ggf. außerhalb der jeweiligen Toleranz liegen. Je nach Kombination der Einzelteilabweichungen pflanzen sich die Fehler in den Baugruppen fort und können so zu abweichenden Fugenverläufen oder sogar Funktionsbeeinträchtigungen im Gesamtfahrzeug führen. Das Ergebnis am Fahrzeug wird zusätzlich durch Reaktionskräfte aus

Dichtungen und Gasdruckfedern bei Front- und Heckklappen beeinflusst, da sie eine statische Verformung der Bauteile bewirken und somit die Spalt- und Bündigkeitsmaße der Fugen verändern. Insofern wird die Bauteilgestalt nach der Montage am Fahrzeug durch die zwei voneinander abhängigen Einflussfelder Gestaltabweichung und mechanischen Wechselwirkung bestimmt. Analog der Auflistung in Tabelle 2-2 können die Gestaltabweichungen sowohl von Einzelteilen als auch von Baugruppen des Exterieurs aus verschiedenen Ursachen resultieren. Neben den geometrischen Parametern beeinflussen auch schwankende Materialeigenschaften oder Blechdicken beispielsweise den Umformprozess von Blechteilen und damit die Qualität der erzeugten Zwischenprodukte. Hinzu kommen die mechanischen Wechselwirkungen im Einbauzustand, die einerseits aus den zuvor erläuterten Gestaltabweichungen stammen, indem beispielsweise zur Soll-Lage fehlpositionierte Scharniere eine Verspannung und damit entsprechende Rückstellkräfte in den Lagerpunkten hervorrufen. Wie bereits oben erwähnt, wirken andererseits die im geschlossenen Zustand von Klappen und Türen elastisch deformierten Dichtungen und komprimierten Gasdruckfedern ebenfalls mit entsprechenden Kräften auf die Bauteile ein. Letztlich wird der Betrag der Wechselwirkungskräfte rekursiv von den etwaigen Gestaltabweichungen bedingt.

Tab. 2-2: Einflüsse auf die wahrgenommene Exterieur-Qualität und deren Ursachen (vgl. Abb. 2-7 auf Seite 12)

Einfluss	Gestaltabweichung	mechanische Wechselwirkung
Ursachen	abweichende Maßhaltigkeit	Kräfte durch Gestaltabweichung
	abweichende Form	Kräfte aus Dichtungen
	abweichende Lage	Kräfte aus Gasdruckfedern
	abweichende Winkel	Kräfte aus Gummipuffern
	schwankende Blechdicke	
	schwankende Materialeigenschaften	

Mit dem Ziel die konkreten Ursachen der Abweichungen eines Teils möglichst effizient zu determinieren und anschließend zu minimieren, existieren für die Bereiche Exterieur, Interieur und Karosserie in der Regel unterschiedliche Prüfhilfsmittel, welche im nachfolgenden Abschnitt charakterisiert werden.

2.4.2 Prüfhilfsmittel zur Bauteilqualifizierung

Der Fertigungsprozess von Einzelteilen und Baugruppen im Bereich des Exterieurs, der Karosserie und des Interieurs setzt sich in der Regel aus mehreren Teilschritten zusammen. Um eine Qualifizierung der Zwischenprodukte, z.B. verschiedene Umformoperationen, zu ermöglichen und letztlich einen vollständig ausgeformten Kotflügel gegenüber dem CAD Soll-Modell zu vergleichen, werden

als Messaufnahmen bezeichnete Spannhilfen verwendet. Diese Variante von Prüfhilfsmitteln soll hier als Einzelqualifizierung betrachtet werden, auch wenn diese gleichzeitig für Baugruppen vorgesehen sind. Die Bezeichnung bezieht sich in diesem Kontext auf die isolierte Bewertung des Teils ohne Berücksichtigung mechanischer Wechselwirkungen der angrenzenden Bauteile. Stattdessen wird ausschließlich das zu prüfende Teil von einer Messaufnahme fixiert, deren Ausführungsformen von bauteilspezifisch bis universal reichen (siehe Abbildung 2-14). Der Spezifizierungsgrad hängt dabei u.a. vom eingesetzten Spannkonzepnt ab, welches im Wesentlichen zwei alternative Strategien verfolgt: Das Fixieren mittels flächiger Spanner im Referenz-Punkt-Systematik (RPS) soll wiederholgenaue Messungen über mehrere Prozessschritte hinweg gewährleisten (Details siehe Abschnitt 2.4.4 und Abbildung 2-21) und die Aufnahme an den Anschraubpunkten nähert sich der Einbausituation am Fahrzeug.

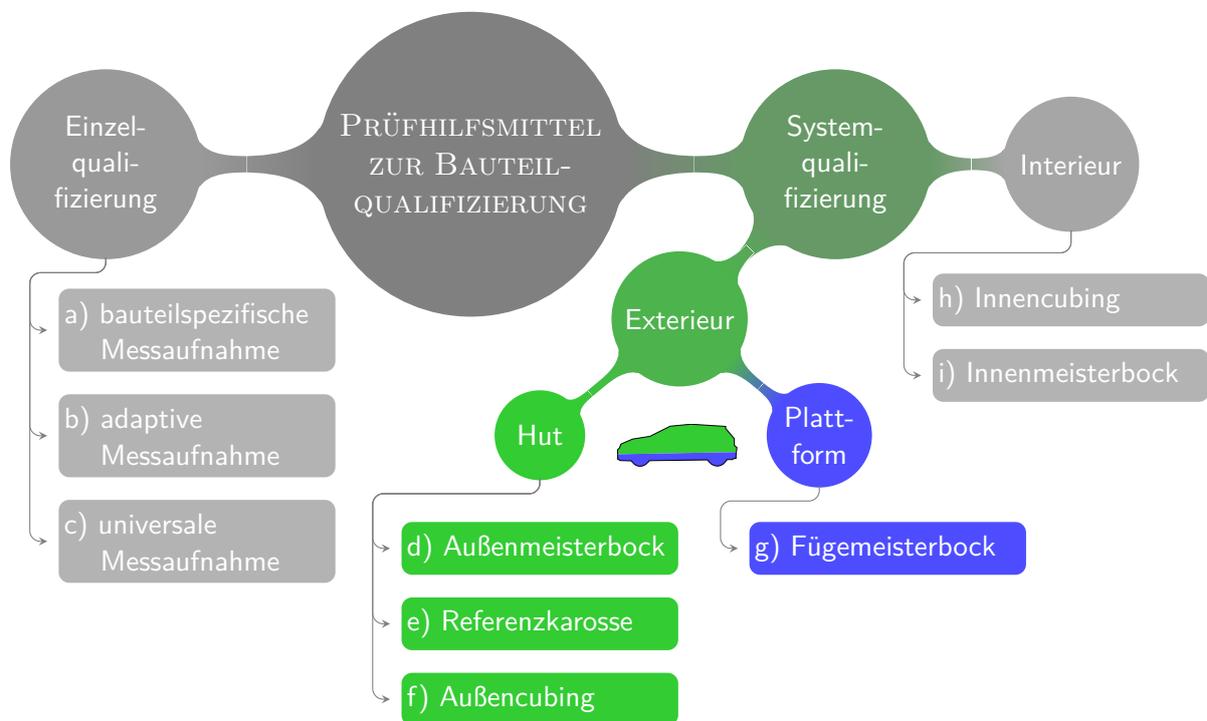


Abb. 2-14: Prüfhilfsmittel zur Bauteilqualifizierung

Die zweite, zur Einzelqualifizierung komplementäre Variante von Prüfhilfsmitteln soll hier als Systemqualifizierung bezeichnet werden. Sie berücksichtigt die in Tabelle 2-2 genannten mechanischen Wechselwirkungen, indem sowohl im Bereich des Exterieurs als auch des Interieurs mehrere relevante Bauteile zusammen am jeweiligen Prüfhilfsmittel aufgebaut werden. Die Vorteile bestehen neben der besseren Abbildung des Einbauzustands im Endprodukt und den einhergehenden Analysemöglichkeiten darin, dass die Produktionsentwicklung parallelisierbar ist. Somit wird beispielsweise gewährleistet, dass der Produktionsanlauf des Huts nicht auf die Fertigstellung der Plattform warten muss. Stattdessen erfolgt eine simultane Optimierung der Fertigungsprozesse für die einzelnen Komponenten in Richtung der Soll-Vorgaben aus dem CAD-Modell. Im Hinblick auf die dafür eingesetzten Prüfhilfsmittel stehen allgemein die zwei Alternativen Meisterbock und

Cubing zur Verfügung, die je nach Anwendungsgebiet in passender Weise adaptiert sind. Zur klaren Trennung wird deshalb entsprechend Abbildung 2-14 zwischen Außen-, Füge- und Innenmeisterbock bzw. zwischen Außen- und Innencubing unterschieden. Es existieren durchaus noch weitere Abwandlungen, wie z.B. das in den Bildern 2-15 dargestellte Kombi-Cubing [32, 17 ff.]. Die Bezeichnung Cubing lehnt sich prinzipiell an die Ausgangsform des Aluminiumblocks, aus dem das fertige Prüfhilfsmittel gefräst wurde, an. Als Resultat bildet das Cubing eine sehr eng tolerierte Einbauumgebung für die zu prüfenden Teile ab. Gleichermäßen lässt sich auch mit den Meisterböcken eine möglichst nah an die Soll-Geometrien heranreichende Umgebung schaffen, die jedoch nicht aus dem Vollen gefräst wird, sondern auf zusammengesetzten Aluminiumprofilen basiert. Vor dem Hintergrund einer nahezu fehlerfreien Umgebung stellt die Referenzkarosse (RFK) eine Ausnahme dar, da sie in der Regel eine zufällig ausgewählte, unveränderte Karosse aus dem jeweils aktuellen Stand der Produktion abbildet. Daran werden analog zum AMB die Exterieur-Bauteile montiert und anschließend bewertet. Die etwaigen fertigungsbedingten Abweichungen der RFK müssen dann in den Qualifizierungs- und Analyseprozess miteinbezogen werden.



Abb. 2-15: Das Kombi-Cubing dient sowohl zur Qualifizierung von allen Interieur- als auch von bestimmten Exterieur-Bauteilen. Zu den Anbauteilen zählen u.a. die überwiegend aus Kunststoff und Glas gefertigten Stoßfänger, Scheinwerfer, Scheiben, Fensterschachtleisten, Blenden und Dichtungen. [32]

2.4.3 Bauteilqualifizierungsprozess mithilfe des AMBs

Aus unternehmensorganisatorischer Sicht setzt sich der Bauteilqualifizierungsprozess aus diversen Abteilungen bzw. Fachbereichen zusammen, die während des Produktionsanlaufs gemeinsam ein primäres Ziel verfolgen: Jeden Fertigungsprozess mit den anfangs nahezu unvermeidbaren Fehlern und Abweichungen möglichst effizient optimieren bis alle Qualitätsanforderungen die vorgegebenen Toleranzen erfüllen. Schematisch entspricht dieser Prozess einem technischen Regelkreis, der für den Fall von Anbauteilen und den Einsatz des AMB anhand eines Blockschaltbildes in Abbildung 2-16 dargestellt ist.

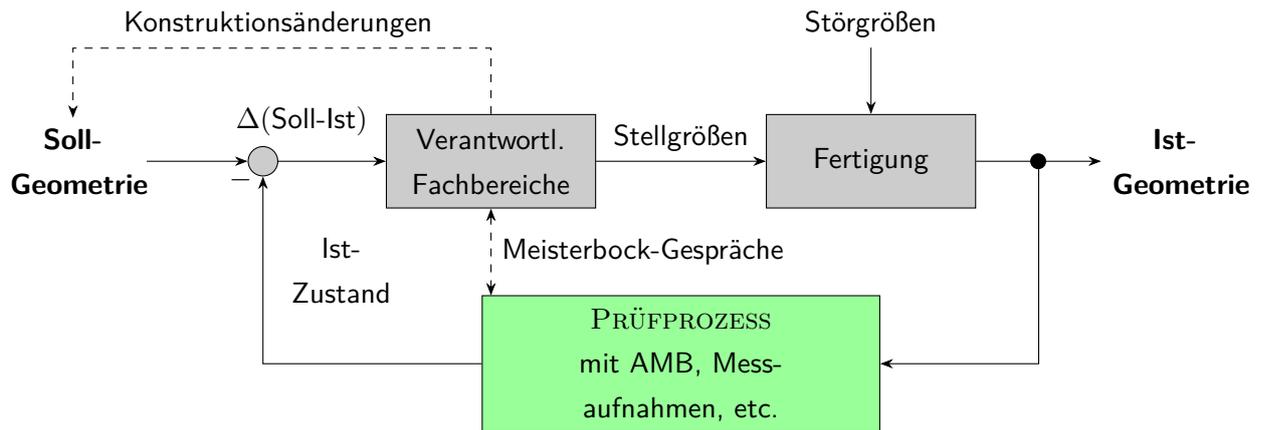


Abb. 2-16: Blockschaltbild des Regelkreises zur Exterieur-Bauteilqualifizierung mithilfe des Meisterbocks (in Anlehnung an [32])

Um den obigen, allgemein anwendbaren Regelkreis zu konkretisieren, soll der Ablauf anhand eines Kotflügels nachvollzogen werden. Bei umfangreicheren Baugruppen würde entsprechend die Zahl der verantwortlichen Fachbereiche steigen, während der prinzipielle Ablauf unverändert bleibt. In Bezug auf einen beliebigen Kotflügel wird der erforderliche Fertigungsprozess vorab geplant und besteht beispielsweise aus mehreren Umformoperationen und einer Schweißoperation. Sobald dann im Fahrzeuganlauf die ersten physischen Teile zur Verfügung stehen, beginnt der Prüfprozess sowohl einzeln auf Messaufnahmen als auch systemisch am AMB (siehe Abb. 2-17). Der Ist-Zustand des Kotflügels wird entsprechend dokumentiert und den Soll-Vorgaben gegenübergestellt. Die sich daraus ergebenden Differenzen $\Delta(\text{Soll-Ist})$ werden anschließend den verantwortlichen Fachbereichen u.a. in sogenannten Meisterbock-Gesprächen mitgeteilt. Deren Aufgabe ist es dann, die Fertigung unter Berücksichtigung etwaiger Störgrößen mit passenden Stellmaßnahmen zu adaptieren, damit das Prüfergebnis im nächsten Durchlauf näher am Sollwert liegt. Am Beispiel des Kotflügels wären an dieser Stelle geänderte Spannpositionen während des Schweißvorgangs oder Anpassungen der Umformwerkzeuge denkbar, die jedoch häufig hohe Kosten verursachen. Sollten die Vorgaben nicht mit den vorhandenen Stellgrößen der Fertigung erreichbar sein, kann gegebenenfalls eine Konstruktionsänderung notwendig werden.

Am AMB dienen die in Abbildung 2-17 sichtbaren Befestigungspunkte einerseits zum Arretieren der Teile und andererseits zum Ausrichten im Referenz-Punkt-Systematik, dessen Relevanz und das zugrundeliegende Prinzip im nachfolgenden Abschnitt verdeutlicht werden. An der Stelle muss jedoch auf einen ausschlaggebenden Aspekt für die Ausrichtung von Bauteilen am AMB hingewiesen werden: Äquivalent zum fertigen Fahrzeug dürfen an den RPS-Punkten keine Kräfte oder Momente eingeleitet werden, sodass die Ausrichtung ausschließlich indirekt mithilfe der Anschraubpunkte zu gewährleisten ist. Zu den prüfbareren Teilen zählen neben den Blechumfängen wie Kotflügel, Türen, Front- und Heckklappe sowie Seitenteile auch Kunststoffteile wie Stoßfänger, Scheinwerfer, Rückleuchten, Scheiben, Spiegel, Türgriffe, Spoiler und Zierleisten [33][34, S. 62]. Nach der oftmals zeitaufwendigen Montage und Ausrichtung werden die Teile gemessen und die

Fugen direkt auf der Bauteiloberfläche nach einem definierten Muster mit den lokalen Spalt- und Bündigkeitsmaßen beschriftet. Aus nachgelagerten Produktaudits resultieren die zu optimierenden Schwerpunkte, welche ebenfalls direkt auf der Bauteiloberfläche mittels aufgeklebter Pfeile o.ä. optisch hervorgehoben werden. In den regelmäßig stattfindenden Meisterbock-Gesprächen stehen diese Schwerpunkte dann zur Diskussion und es gilt, entsprechende Gegenmaßnahmen bzw. die weitere Vorgehensweise der verantwortlichen Fachbereiche abzustimmen. [23, S. 1275]



Abb. 2-17: Links: AMB aus Aluminiumprofilen | Rechts: AMB mit montierten und ausgerichteten Exterieur-Bauteilen

2.4.4 Referenz-Punkt-System (RPS)

Wenn Maßabweichungen eines Einzelteils oder einer Baugruppe gegenüber der zugehörigen Sollgeometrie darzustellen sind, können sich je nach Positionierung und Ausrichtung des imperfekten Bauteils deutlich unterschiedliche Prüfergebnisse ergeben.

Daher stellt sich die Frage, wie die räumliche Lage von Bauteilen im globalen Fahrzeugkoordinatensystem definiert werden kann, damit sich etwaige Maßabweichungen wiederholgenau, im Idealfall über mehrere Fertigungsschritte hinweg vergleichbar abbilden lassen.

Um dieser Anforderung gerecht zu werden, kommen standardisierte Maß Bezugssysteme zum Einsatz, die sich allgemein an der DIN EN ISO 5459 [35] orientieren. Innerhalb des VW-Konzerns hat sich dementsprechend eine Referenz-Punkt-Systematik (RPS) etabliert [36], die zwar mit unterschiedlichen Begriffen, aber im Grundsatz analog auch bei anderen OEMs Anwendung findet. Mithilfe von Referenzpunkten (RPS-Punkte) auf der Bauteiloberfläche wird die relative Position des Bauteils zum globalen Fahrzeugkoordinatensystem, welches sich mittig in der Vorderachse befindet, bestimmt. Dieser Ansatz begünstigt die Ursachenanalyse bei fehlerhaften Baugruppen und die nachfolgende Definition von Abstellmaßnahmen bis auf Einzelteilebene.

Bei der Positionierung von RPS-Punkten müssen sowohl die Rahmenbedingungen des Produktionsprozesses als auch der Qualitätssicherung beachtet werden. Beispielsweise ermöglicht eine zum Fahrzeugkoordinatensystem netzparallele Ausrichtung in bauteilspezifischen Messaufnahmen

(s. Abb. 2-14) oder in Fügevorrichtungen kürzere Durchlaufzeiten für Inspektionen bzw. zur Bestimmung von Korrekturmaßnahmen. [34, S. 54ff.]

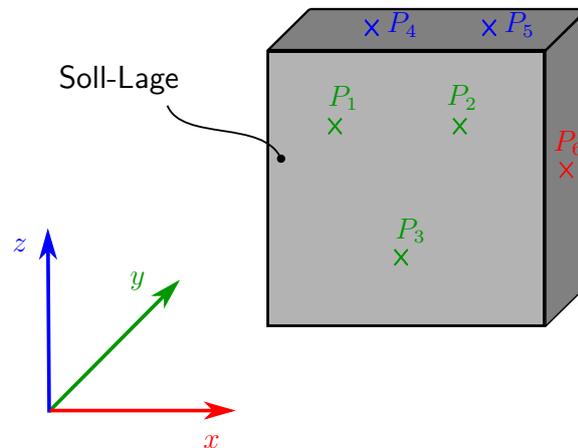


Abb. 2-18: 3-2-1-Regel zur Festlegung des Maß Bezugssystems beliebiger Körper im dreidimensionalen Raum. P_1 bis P_3 unterbinden die y -Translation sowie die Rotationen um x, z . P_4 und P_5 sperren Translation in z sowie die Rotation um y . Somit bleibt nur die Bewegung entlang der x -Achse, die durch P_6 definiert wird. (in Anlehnung an [37])

Aus mechanischer Sicht verfügt ein beliebiger Starrkörper im dreidimensionalen Raum drei translatorische und drei rotatorische Freiheitsgrade, also insgesamt sechs *degrees of freedom (DOF)*. Um diese Bewegungsmöglichkeiten zu fixieren, werden mithilfe der 3-2-1-Regel sechs sogenannte Haupt-RPS-Punkte festgelegt. Abbildung 2-18 illustriert die Vorgehensweise anhand eines simplen Quaders im kartesischen Koordinatensystem xyz : Zunächst wird die Definition der Punkte P_1 bis P_3 in der Basisebene des Quaders vorgenommen (Primärbezug), sodass die Bewegung entlang der y -Achse und die Rotationen um die x - und z -Achse blockiert sind. Die Translation in Richtung der z -Achse und die Drehung um die y -Achse werden anschließend durch das Hinzufügen der Punkte P_4 und P_5 in einer zur Basis vertikalen Ebene unterbunden (Sekundärbezug). Infolgedessen verbleibt nur der translatorische Freiheitsgrad in Richtung der x -Achse variabel, welcher durch den RPS-Punkt P_6 in einer senkrechten Ebene gesperrt wird (Tertiärbezug).

Die mithilfe der 3-2-1-Regel definierten sechs Haupt-RPS-Punkte gewährleisten eine statisch bestimmte Lagebeschreibung von Einzelteilen und Baugruppen, d.h., eine darauf basierende Ausrichtung erzwingt keine Verformung des Bauteils. Dennoch können bei geringer Steifigkeit des Bauteils Deformationen aufgrund des Zusammenspiels zwischen Eigenmasse und Gravitationskraft hervorgerufen werden. Um diesem Effekt entgegenzuwirken, ergänzt man sogenannte Hilfs- oder Neben-RPS-Punkte an den betroffenen Stellen. Mit den zusätzlichen Hilfs-RPS geht eine statische Überbestimmtheit einher und notwendigerweise auch eine Verformung des Bauteils. Im Fall von bauteilspezifischen Messaufnahmen wird das Werkstück sowohl an Haupt- als auch an Neben-RPS-Punkten gespannt und damit deformiert. Ebenso führt auch der Ausrichtungsprozess während der Montage am AMB zu Deformationen.

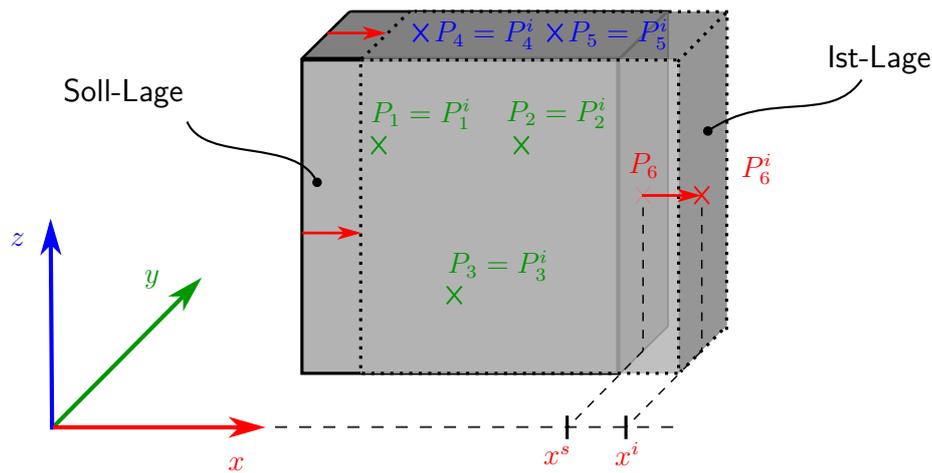


Abb. 2-19: Berechnung von RPS-Abweichungen. Im dargestellten Beispiel ändert sich die Position des tertiären RPS-Punktes P_6 . Da dieser Punkt nur die x -Koordinate referenziert, wird ausschließlich die Differenz zwischen Ist- und Soll-Wert in Bezug auf die x -Achse errechnet: $\Delta RPS = x^i - x^s$.

Um ein Bauteil nach RPS auszurichten, muss sich zunächst dessen aktuelle Lage gegenüber der Soll-Position beschreiben lassen. Das hierfür zugrunde liegende Prinzip zur Ermittlung von RPS-Abweichungen (ΔRPS) ist exemplarisch in Abbildung 2-19 dargestellt, wobei sich diese Vorgehensweise für Haupt- und Neben-RPS-Punkte nicht unterscheidet. Die illustrierte Verschiebung des Quaders in x -Richtung bewirkt, dass sich die projizierte Ist-Position P_6^i entsprechend von der Soll-Lage unterscheidet. Die Projektion erfolgt entlang der nominalen Punktnormale, welche in diesem Fall der x -Achse entspricht. ΔRPS_6 resultiert somit aus der Differenz beider x -Koordinaten des Soll- und Ist-Punktes. Da alle Punkte als mechanisches Loslager fungieren und die Verschiebung demzufolge nur in je einer Richtung unterbinden, erhalten die restlichen RPS-Punkte P_1 bis P_5 zwar neue Projektionen auf der Bauteiloberfläche, jedoch bleiben die Koordinaten der Punkte identisch. Somit ergibt sich für alle fünf Punkte $\Delta RPS_{\{1,\dots,5\}} = 0$ mm. Für die generelle Berechnung von RPS-Abweichungen fasst Gleichung (2-1) die verschiedenen Konstellationen zusammen: Je nachdem in welcher Richtung der jeweilige RPS-Punkt die Bauteilbewegung sperren soll, wird ausschließlich entlang dieser Achse die Differenz gebildet.

$$\Delta RPS = \begin{cases} x^i - x^s & \text{wenn RPS-Punkt in } x\text{-Richtung} \\ y^i - y^s & \text{wenn RPS-Punkt in } y\text{-Richtung} \\ z^i - z^s & \text{wenn RPS-Punkt in } z\text{-Richtung} \end{cases} \quad (2-1)$$

2.5 Bauteilqualifizierung mit virtuellen Methoden

Aus Sicht des Qualitätsmanagements erscheint es im Zuge eines kontinuierlichen Verbesserungsprozesses (KVP) [38, S. 87] als logische Konsequenz, virtuelle Methoden einzusetzen. Denn diese

ermöglichen zum einen, dass sich gleiche und häufig wiederkehrende Aufgaben automatisieren lassen und zum anderen bieten diese Werkzeuge zusätzliche Analysemöglichkeiten. In der Praxis existiert hierbei jedoch oftmals keine klare terminologische Trennung zwischen unveränderter Weiterverarbeitung von Messdaten zur visuellen Darstellung und der strukturmechanischen Simulation. Daher wird beim nachfolgenden Überblick zwischen Visualisierung und Simulation unterschieden, wenngleich das gemeinsame Ziel darin besteht, die Ist-Geometrie der Bauteile zu prüfen bzw. zu analysieren und die Ergebnisse im Anschluss möglichst nachvollziehbar den jeweils bauteilverantwortlichen Fachbereichen zu kommunizieren.

2.5.1 Visualisierung

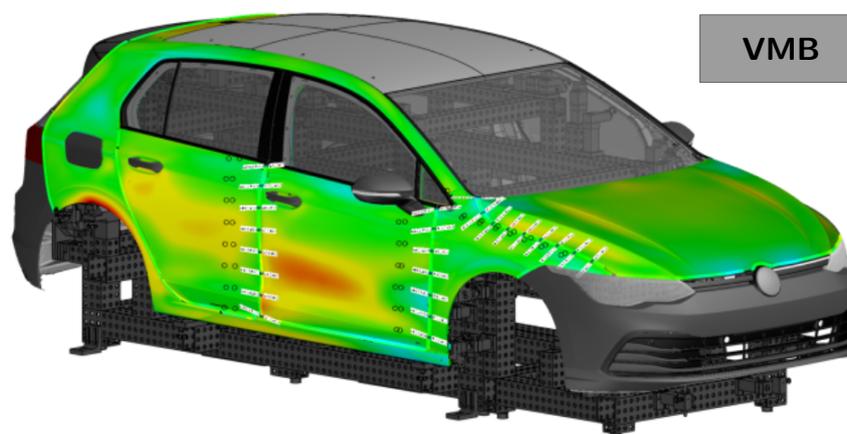


Abb. 2-20: Visualisierung der Ist-Geometrie: Fehlfarbenvergleich zwischen vollflächig gemessenen Anbauteilen und der Soll-Geometrie sowie automatische Auswertung und Beschriftung der Spalt- und Bündigkeitsmaße)

Durch die angestiegene Leistungsfähigkeit der optischen Messtechnik haben sich gegenüber den taktilen Koordinatenmessgeräten mehrere Vorteile für den Qualifizierungsprozess ergeben: Der Ist-Zustand von Bauteilen wird nicht nur punktuell an zuvor definierten Stellen gemessen, sondern mittels eines sehr feinen Rasters können alle sichtbaren Oberflächen nahezu vollständig digitalisiert werden. Somit lassen sich virtuelle Zwillinge realer Bauteile generieren, die dann mit entsprechenden Softwarewerkzeugen zusammengesetzt und analysiert werden. Das Bild 2-20 zeigt das Ergebnis des sogenannten *Virtuellen Fügens* [33] anhand der Anbauteile des VW Golf 8. Dabei werden die zuvor gewonnenen Messdaten als Punktwolken verarbeitet, ohne deren Gestalt zu ändern, weshalb es als reine Visualisierung der Messergebnisse betrachtet wird. Im Gegensatz zum physischen Pendant gestattet der virtuelle Vergleich von Soll- und Ist-Geometrie durch Fehlfarbdarstellungen dafür eine ausführlichere Bewertung der Freiformflächen. Zudem ist die Auswertung und Beschriftung des Fugenverlaufs durch entsprechende Algorithmen mit wenigen Mausklicks erledigt. Am physischen Meisterbock erfordert dieser Vorgang erheblich mehr Aufwand. Des Weiteren kann der Verlauf der Produktionsentwicklung jedes Teils problemlos nachvollzogen werden,

indem man die verschiedenen Bauteilstände untereinander vergleicht, um so den Wirkungstrend etwaiger Korrekturmaßnahmen abzuschätzen. Die gemessenen Punktwolken werden außerdem von virtual reality (VR) Systemen unterstützt, sodass sich im Zuge eines *Virtuellen Audits* die Daten auch mithilfe einer 3D-Brille räumlicher betrachten lassen. [39]

2.5.2 Simulation

Der Begriff Simulation fasst das Nachbilden physikalisch technischer Prozesse oder Systeme zusammen, wobei die zugrunde gelegten mathematisch physikalischen Modelle die Realität abstrahieren, indem sie unwesentliche Einflüsse vernachlässigen. Dennoch ermöglichen die an den jeweiligen Anwendungsfall angepassten Simulationsmodelle innerhalb bestimmter Grenzen genaue Verhaltensprognosen des abzubildenden Systems. [40, S. 98][41]

Daher bietet es sich an, den Bauteilqualifizierungsprozess durch strukturmechanische Simulationen zu unterstützen, welche die Deformation eines durch Kräfte und Momente belasteten Bauteils prognostizieren. Ein wesentlicher Vorteil besteht darin, dass infolge der Simulation kostenintensive Prüfhilfsmittel substituiert werden können. In der Literatur finden sich dazu bereits zahlreiche Konzepte zum virtuellen Spannen von labilen Bauteilen, deren Modelle auf der FEM [42] beruhen. [43–49]

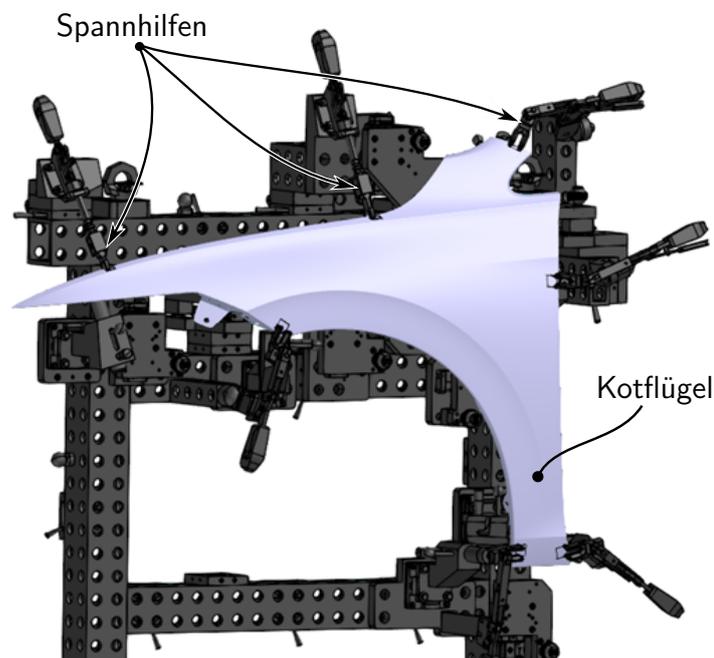


Abb. 2-21: Bauteilspezifische Messaufnahme eines Kotflügels

Exemplarisch soll dazu die Vorgehensweise der Simulationethodik auf eine bauteilspezifische Messaufnahme wie in Abbildung 2-21 transferiert werden. Gemäß dem Überblick 2-14 fungiert die gezeigte Aufnahme als Prüfhilfsmittel für die Einzelqualifizierung des Kotflügels, indem das Bauteil mithilfe von Spannern an den zuvor festgelegten Haupt- und Neben-RPS fixiert wird. Da-

mit einhergehend tritt eine Deformation der Geometrie auf, die gleichermaßen in der Simulation berechnet werden kann. Hierfür wird zunächst mittels optischer Messtechnik eine Punktwolke erzeugt, welche die Oberfläche des realen Bauteils beschreibt. Anschließend muss ein auf dem nominalen CAD-Modell beruhendes FE-Netz auf diese Punktwolke gefittet werden, bis das Netz die Ist-Geometrie ausreichend genau abbildet. Somit ist das Simulationsmodell an die reale Bauteilgestalt adaptiert und es folgt ein geeignetes Setzen von Randbedingungen an den Orten der Spannhilfen, die dazu dienen, die jeweiligen RPS-Punkte in Richtung Soll-Position zu bewegen. Nach der Durchführung der Simulation wird die deformierte Geometrie zurückgegeben und kann für Auswertungen und weitere Analysen verwendet werden.

3 Konkretisierung der Forschungsthematik

Aufgrund der Tatsache, dass die systemische Bauteilqualifizierung mithilfe des AMBs die tatsächliche Einbausituation am Fahrzeug besser widerspiegelt als die Einzelqualifizierung der Bauteile mit Messaufnahmen, bleibt das Prinzip dieses Prüfhilfsmittels auch künftig von Bedeutung. Unabhängig davon, ob die Befestigungspunkte der darunterliegenden Umgebung nahezu den Nominalwerten entsprechen oder im Fall der Referenzkarosse etwaige Abweichungen enthalten sind, gewährleistet diese Herangehensweise die Berücksichtigung der mechanischen Wechselwirkungen aus Tabelle 2-2. Dennoch weist der Prozess zahlreiche Verbesserungspotentiale auf, die in der nachfolgenden Tabelle 3-1 zusammengefasst und dabei in Wirtschaftlichkeit sowie technische Leistungsfähigkeit unterteilt sind.

Tab. 3-1: Verbesserungspotentiale des AMBs

Wirtschaftlichkeit	Technische Leistungsfähigkeit
<ul style="list-style-type: none"> • Fixkosten <ul style="list-style-type: none"> – Beschaffung des AMBs – Beschaffung der Messperipherie (KMG, Messplatten, etc.) – Verwaltungs- & Personalkosten • Variable Kosten <ul style="list-style-type: none"> – Nutzung der Messperipherie – Verwaltungs- & Personalkosten 	<ul style="list-style-type: none"> • Wiederholgenauigkeit • Ausrichtungsgenauigkeit • Fertigungstoleranz des AMBs • Flexibilität für Sonderanalysen <ul style="list-style-type: none"> – Sensitivitätsanalysen – Korrekturprognosen • Frontloading

Im Hinblick auf die wirtschaftlichen Aspekte verursacht der Betrieb des AMBs als Prüfhilfsmittel vor allem zu Beginn eines Fahrzeuganlaufs relevante Fixkosten durch dessen Beschaffung. Hinzu kommen Abschreibungen für die Messperipherie, wie Koordinatenmessgeräte (KMG) oder Messplatten u.ä., die jedoch über diverse Projekte hinweg verwendet werden. Die Verwaltungs- und Personalkosten tragen anteilig sowohl zu den Fixkosten als auch zu den variablen Kosten bei, da die Anzahl der Aufbauten auch mit der Summe der Arbeitsstunden verknüpft ist. Ebenso entstehen abhängig vom Nutzungsgrad der Messperipherie weitere variable Kosten.

Die Relevanz der technischen Aspekte tritt insbesondere im Rahmen dieser Arbeit hervor, da die Ausrichtungs- und Wiederholgenauigkeit einen wesentlichen Einfluss auf das Ergebnis des Qualifizierungsprozesses induzieren. Beide Genauigkeitsparameter beziehen sich auf den Montageprozess der Teile am AMB und werden einerseits durch zufällige Messabweichungen (vgl. Abb. 2-10) und andererseits durch die maximal zu erreichende Toleranz einer manuellen Ausrichtung nach RPS verursacht. Hinzu kommen Fertigungstoleranzen des AMBs in Bezug auf die räumlichen Positionen der Befestigungspunkte, da diese fertigungsbedingt nicht exakt den angestrebten Soll-Werten im CAD-Modell entsprechen. Prüfhilfsmittel, die eine hohe Flexibilität für Sonderanalysen bieten, leisten einen wichtigen Beitrag zu Erhöhung der Leistungsfähigkeit des Bauteilqualifizierungsprozesses und der damit verknüpften, geringeren Anzahl an Korrekturschleifen. Beispielsweise können Sensitivitätsanalysen dazu beitragen, nur die für die jeweilige Abweichung relevanten Stellgrößen zu adaptieren und durch entsprechende Tests der vorgeschlagenen Korrekturen, deren Wirksamkeit prognostizieren. Ebendieses Merkmal ist beim Einsatz des AMBs eingeschränkt, da entsprechende Analysen zeit- und kostenintensive Konstruktionsänderungen des AMBs nach sich ziehen. Des Weiteren offeriert der physische Qualifizierungsprozess keine Möglichkeiten um die Fehlerbehebung innerhalb des PEP weiter nach vorn zu verlagern und gemäß Abbildung 2-9 ein Frontloading zu betreiben. Erst nachdem physische Prototypen vorhanden sind, können diese am AMB geprüft werden.

Aus den zuvor aufgeschlüsselten Verbesserungspotentialen des AMBs leitet sich die bereits in der Einleitung (Abs. 1.1) beschriebene, grundlegende Forschungsfrage nach einem optimierten Bauteilqualifizierungsprozess ab, die hier auf Basis der in Kapitel 2 geschaffenen Grundlagen erweitert wird:

1. Wie kann der systemische Bauteilqualifizierungsprozess optimiert werden?
2. Wie lässt sich ein Bauteil mit Gestaltabweichungen virtuell nach RPS ausrichten?
3. Wie kann die Ausrichtungs- und Wiederholgenauigkeit durch virtuelle Methoden verbessert werden?
4. Wie können mithilfe von virtuellen Methoden flexible Sonderanalysen gewährleistet werden?
5. Was sind die größten Einflüsse einer virtuellen Prozesskette mit dem Ziel eines Frontloadings der Fehlerbehebung?

Die zur Beantwortung der Fragen verwendete Forschungsmethodik basiert auf der Verhaltensprognose des realen Meisterbockprozesses durch FE-Simulationen, mit dem Ziel einen *Virtueller Meisterbock (VMB)* als Prüfhilfsmittel zur Verfügung zu stellen. Bezüglich der genannten wirtschaftlichen Aspekte wird angenommen, dass der parallele Einsatz des physischen und des virtuellen Meisterbocks durch eine Minimierung physischer Korrekturschleifen auch geringere variable Kosten verursacht. Im Falle einer Substitution sind darüber hinaus niedrigere Fixkosten zu erwarten. [40, S. 98] Da das Thema dieses Projektes jedoch die Virtualisierung des Meisterbocks

und die Weiterentwicklung vorhandener Simulationskonzepte forciert, rücken die ökonomischen Aspekte wieder in den Hintergrund. Stattdessen soll nachfolgend ein Überblick zur Entwicklung des virtuellen Meisterbocks basierend auf dem gezeigten Stand der Technik gegeben werden.

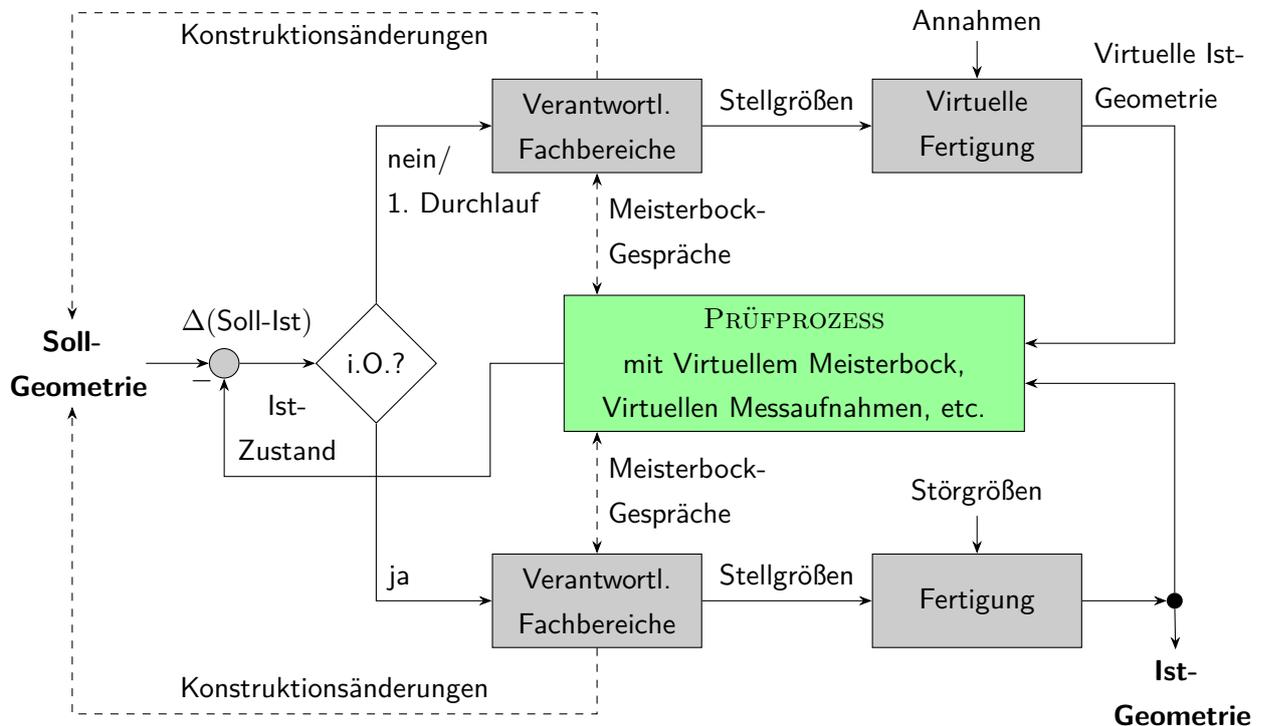


Abb. 3-1: Blockschaltbild des Regelkreises zur Exterieur-Bauteilqualifizierung mithilfe des Virtuellen Meisterbocks (vgl. Abb. 2-16)

Bisherige Simulationsansätze konzentrieren sich auf die Einzelqualifizierung von Bauteilen (Virtuelles Spannen, Abs. 2.5.2) und/ oder beinhalten keine indirekte Bauteilausrichtung im RPS-System mithilfe der Befestigungspunkte in Relation zu angrenzenden Bauteilen. Außerdem werden die Herstellungshistorie und die sich damit ergebenden Möglichkeiten zur Prozessverlagerung in eine frühere Phase vernachlässigt. Der hier verfolgte Ansatz zur Verwendung eines virtuellen Meisterbocks illustriert der in Abbildung 3-1 adaptierte Regelkreis des physischen Meisterbocks (vgl. Abb. 2-16). Darin wird der Bauteilqualifizierungsprozess in einen virtuellen und einen physischen Regelkreise aufgesplittet. Verknüpft sind beide jedoch über die gemeinsame Prüfinstanz, da VMB und virtuelle Messaufnahme (VMA) (=virtuelles Spannen) sowohl für Ergebnisdaten aus vorherigen Simulationen als auch für Messdaten realer Bauteile geeignet sind.

Im Verlauf des PEP gestaltet sich die Vorgehensweise derart, dass ab dem Meilenstein KDF Fertigungsprozesssimulationen von den jeweiligen Fachbereichen erstellt werden. Im Zuge dessen sind die als Stellgrößen zusammengefassten Prozessparameter, wie beispielsweise die Werkzeuggeometrie des Presswerks oder die Anzahl der Prozessschritte, festzulegen. Dabei obliegt es dem verantwortlichen Fachbereich und in Abstimmung mit der nachfolgenden Prüfinstanz, welche Fertigungsoperationen auch tatsächlich für der virtuelle Fertigung notwendig bzw. zu verketteten sind. Als Resultat dient die somit errechnete Ist-Geometrie des Bauteils als Input für den vir-

tuellen Prüfprozess, dessen Ergebnis wiederum mit der Soll-Geometrie abgeglichen wird. Dieser Kreislauf ist solange zu wiederholen, bis sämtliche Soll-Ist Differenzen $\Delta(\text{Soll-Ist})$ die zugehörigen Toleranzanforderungen erfüllen. Falls an dieser Stelle diagnostiziert wird, dass die Anforderungen unter den gegebenen Rahmenbedingungen nicht erfüllbar sind, können hier bereits deutlich kostengünstigere Konstruktionsänderungen als im physischen Regelkreis angestoßen werden. Denn Korrekturen an physischen Werkzeugen erweisen sich in der Regel um ein Vielfaches teurer als reine Änderungskonstruktionen auf CAD-Basis. Eine Virtuelle Prozesskette (VPK) ermöglicht demnach eine Optimierung der Fertigung noch bevor Werkzeuge o.Ä. im Presswerk installiert sind (s. Kapitel 6). Darüber hinaus lassen sie sich weitaus leichter für Sensitivitätsanalysen und verschiedene Korrekturprognosen aufbereiten als physische Hilfsmittel.

Sobald die Soll-Ist Differenz im virtuellen Regelkreis innerhalb der vorgegebenen Toleranzen liegt und damit die Verzweigungsbedingung in Abbildung 3-1 erfüllt ist, kann der bekannte physische Fertigungsprozess beginnen. Im Idealfall würden dann direkt qualitativ fehlerfreie Teile entstehen, die unmittelbar am Fahrzeug verbaut werden können. Jedoch kann es aufgrund der getroffenen Annahmen im Simulationsprozess und durch etwaige Störgrößen in der Fertigung trotzdem zu Abweichungen kommen. Zur Prüfung und Analyse wird erneut der VMB herangezogen, indem die Bauteile mittels optischer Messtechnik in bekannter Weise digitalisiert werden. Die Anzahl der Korrekturschleifen zur Qualifizierung der Ist-Geometrie sollte dann im Vergleich zur klassischen Herangehensweise geringer ausfallen. Die nachfolgenden Untersuchungen zur Virtualisierung des Bauteilqualifizierungsprozesses tragen dazu bei, dass hier geschilderte Szenario zu realisieren und wird in drei Schritte gegliedert:

1. Zunächst muss ein repräsentatives Exterieur-Bauteil festgelegt werden, welches die besonderen Herausforderungen des virtuellen Prüfprozesses enthält und somit als Mustermodell zur Methodenentwicklung dienen kann. Die entwickelte Methodik soll dann möglichst einfach auf andere Bauteile übertragbar sein. Warum die Wahl hierbei auf einen Kotflügel fällt und welche theoretischen Vorüberlegungen für die Methodenentwicklung notwendig sind, beinhaltet das nachfolgende Kapitel.
2. Basierend darauf konzentriert sich der anschließende Abschnitt auf der Strukturierung und Erstellung einer VMB-Simulation zur virtuellen Ausrichtung des Kotflügels gemäß Referenz-Punkt-Systematik. Zur Validierung werden die Abweichungen eines repräsentativen realen Kotflügels in das Modell übertragen und mit den Ergebnissen des physischen Meisterbocks verglichen.
3. Im dritten Abschnitt wird die zuvor entwickelte Simulationsmethodik in eine virtuelle Prozesskette des genannten Kotflügels integriert, um deren Haupteinflussfaktoren zu ermitteln, sodass sich daraus letztlich alle Erkenntnisse zur Beantwortung der Forschungsfragen ableiten lassen.

4 Material und Methoden

4.1 Kotflügel

Verglichen mit anderen Bauteilen besitzen Kotflügel oft sehr geringe Eigensteifigkeiten gegen Biegebelastungen und erfahren schon aufgrund relativ kleiner Kräfte große Verformungen. Da allein durch die Gravitation eine messbare Deformation hervorgerufen werden kann, haben auch geringste Abweichungen der Bauraumumgebung einen Einfluss auf die resultierende Form des Kotflügels im Einbauzustand. Zwar wirken dabei im Regelfall keine Rückstellkräfte aus zusammengedrückten Dichtungen oder komprimierten Gasdruckfedern wie bei Front- und Heckklappen, aber dennoch stellt die zur Qualifizierung notwendige Ausrichtung nach RPS eine wiederkehrende Herausforderung am AMB dar. Es erfordert eine Vielzahl an Iterationsschleifen bis alle Haupt- und Neben-RPS-Punkte ausgerichtet sind und trotzdem bleibt die Wiederholgenauigkeit des manuellen Ausrichtverfahrens begrenzt. Auch bisher vorhandene virtuelle Ausrichtungen, die für andere Anbauteile funktionieren, liefern an dieser Stelle keine geeigneten Ergebnisse. Zusammengefasst lässt sich konstatieren, dass sowohl die physische als auch die virtuelle Qualifizierung des Kotflügels eine besondere Herausforderung darstellt. Daher wird angenommen, dass eine hierfür entwickelte VMB-Simulation inklusive RPS-Ausrichtung analog oder zumindest mit geringem Anpassungsaufwand auf andere Bauteile übertragbar ist.

Im Rahmen dieser Arbeit wird deshalb ein Kotflügel zu Grunde gelegt, der sich in die Klasse der zuvor genannten Argumente einreicht und für den die notwendigen Informationen zur Verfügung stehen. Vorbereitend auf die später folgende Modellierung des Meisterbockprozesses sollen hierfür zunächst die relevanten mechanischen Merkmale des gewählten Kotflügels charakterisiert werden. Für die virtuelle Ausrichtung muss vorab geklärt sein, wo sich die RPS-Punkte auf der Bauteiloberfläche befinden und wie sich diese in der Praxis am AMB einstellen lassen. Gleichermäßen wird ein kurzer Überblick zur Fertigungsprozesskette des Kotflügels gegeben, um daran später die virtuelle Prozesskette zu orientieren. Außerdem erfordert die Integration physischer Bauteile bzw. dessen fertigungsbedingte Abweichungen in das Simulationsmodell eine speziellen Messaufnahme, die im Anschluss ebenfalls umschrieben wird.

4.1.1 Topologie & Materialeigenschaften

Der in Abbildung 4-1 gezeigte Kotflügel besteht aus zwei Blecheinzelteilen, die mittels Klebe- und Durchsetzfügeverbindung (Clinchen) zu einer Baugruppe gefügt werden. Da das Bauteil spiegelsymmetrisch zur senkrechten Mittelebene des Fahrzeugs konstruiert ist, genügt es, die Untersuchungen auf die linke Seite zu referenzieren. Für die Qualifizierung des rechten Kotflügels können die entsprechenden Eingangsdaten gespiegelt werden, somit bleibt die Vorgehensweise der VMB-Simulation für beide Seiten identisch.

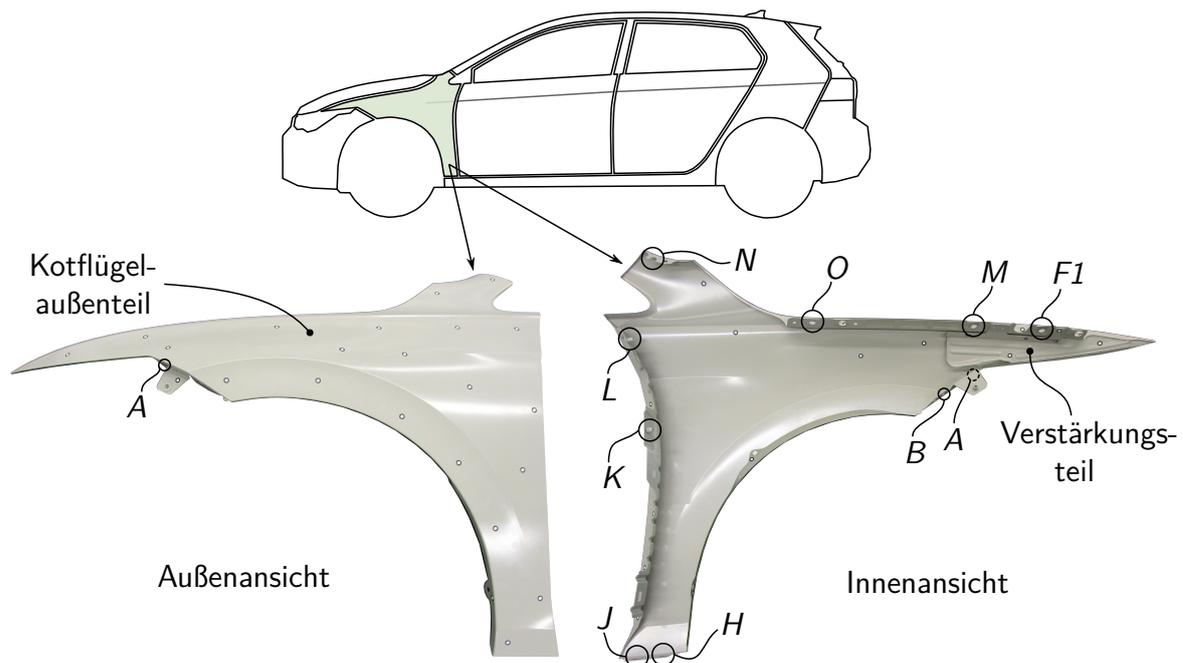


Abb. 4-1: Außen- und Innenansicht des VW Golf 8 Kotflügels. Die grau-grüne Farbe resultiert aus der kathodischen Tauchlackierung (KTL) und die schwarzweißen Aufkleber dienen als Referenzpunkte für die optische Messung (Photogrammetrie). Außerdem sind die zur Montage am AMB benötigten Befestigungspunkte mit Großbuchstaben gekennzeichnet.

Die geringe Blechdicke des Kotflügelaußenteils von 0,6 mm führt zu der leichten Verformbarkeit des Gesamtbauteils. Lediglich der vordere Bereich am Schweinwerfer erhält durch das deutlich dickere Verstärkungsteil eine höhere Steifigkeit. Die mechanischen Eigenschaften beider Blechteile sowie des verwendeten Stützklebers sind in Tabelle 4-1 zusammengefasst. Dabei ist hervorzuheben, dass das Material des Außenteils in die Kategorie der Bake-Hardening (BH) Stähle fällt. Somit erfährt der Werkstoff eine Erhöhung der Streckgrenze infolge des Wärmeeintrags während der kathodischen Tauchlackierung (KTL). Der Vorteil besteht darin, dass sich die geringe Festigkeit des Halbzeugs positiv auf den Tiefziehprozess auswirkt, während gleichzeitig eine ausreichend hohe Beulsteifigkeit des Endproduktes gewährleistet wird. Außerdem regeneriert sich durch den Wärmeeintrag das E-Modul, welches während der Umformung zunächst abgeschwächt wird. [50, S. 569] Auch der Stützkleber härtet erst im KTL-Bad aus und erhält dann den aufgelisteten Wert des Elastizitätsmoduls. Ergänzend muss dabei festgehalten werden, dass alle Kennzahlen

in Tabelle 4-1 den Nominalzustand des Bauteils charakterisieren und nicht exakt die Realität widerspiegeln. Fertigungsbedingt schwanken die Werte in einem bestimmten Bereich, da sich beispielsweise die Blechdicke während des Tiefziehens in Abhängigkeit vom Verformungsgrad unterschiedlich stark verjüngt.

Tab. 4-1: Mechanische Eigenschaften des Kotflügels (CR180BH, CR210LA vgl. [51])

	Außenteil	Verstärkung	Stützkleber
Dicke T	0,6 mm	1,5 mm	≈ 3 mm
Werkstoff	CR180BH	CR210LA	-
E-Modul E	200 GPa	200 GPa	7,56 MPa
Dehngrenze $R_{p0,2}$	180 – 240 MPa	210 – 300 MPa	-
Streckgrenzenerhöhung BH_2	≥ 20 MPa	-	-
Poissonzahl ν	0,3	0,3	0,4
Dichte ρ	$7,85 \cdot 10^{-9} \text{ t/mm}^3$	$7,85 \cdot 10^{-9} \text{ t/mm}^3$	$1,30 \cdot 10^{-9} \text{ t/mm}^3$

4.1.2 RPS-Ausrichtung

Gemäß Abschnitt 2.4.4 fungiert das Referenz-Punkt-Systematik als einheitliches Maß Bezugssystem, um die Lage und Maßhaltigkeit von Einzelteilen und Baugruppen zu beschreiben. Gleichermaßen erlauben die bereits in der Konstruktionsphase definierten RPS-Punkte der Kotflügelbaugruppe eine wiederholgenaue Qualifizierung mit bauteilspezifischen Messaufnahmen oder mit dem AMB.

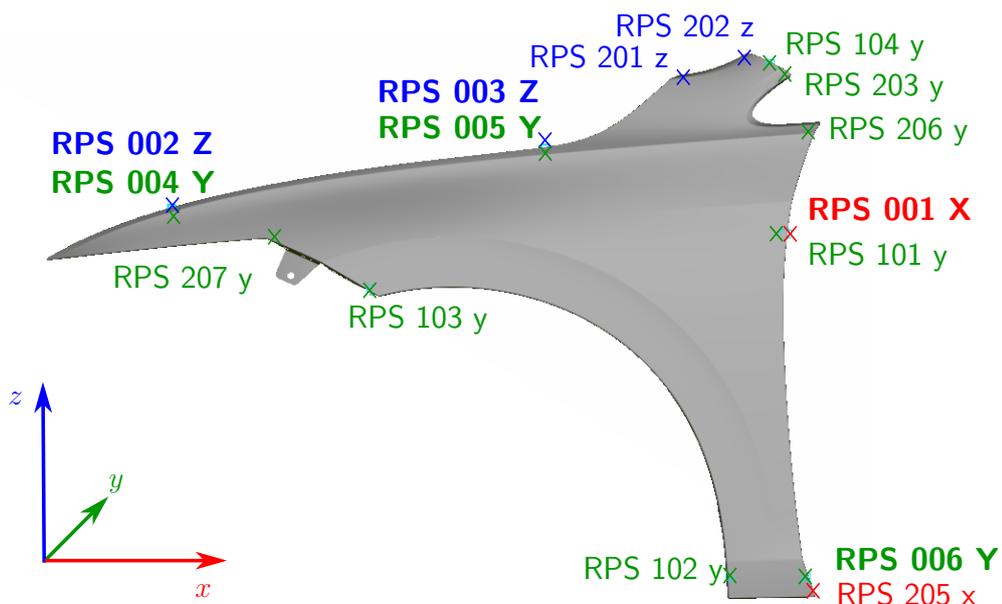


Abb. 4-2: Am Meisterbock relevante Ausrichtpunkte des Kotflügels

Die fettgedruckten und mit Großbuchstaben gekennzeichneten Haupt-RPS in Abbildung 4-2 bestimmen die räumliche Lage des Werkstücks, indem jede der sechs möglichen Starrkörperbewegungen gesperrt wird. Dabei erfährt der Kotflügel keine Deformation, da die Ist-Position jedes RPS-Punktes ausschließlich in der jeweils angegebenen Richtung ermittelt wird. Demzufolge tendiert die eingeleitete Kraft gegen Null, die notwendig ist, um den Kotflügel nach Haupt-RPS auszurichten. Erst durch das zusätzliche Justieren der Neben-RPS (Kleinbuchstaben) wird das Teil in eine Zwangslage gedrängt, die zu einer Formänderung führt. Die Position der Neben-RPS wurde bauteilspezifisch so gewählt, dass die für die Fugenschnittbilder relevanten Bereiche in Relation zu den angrenzenden Bauteilen ausgerichtet werden können.

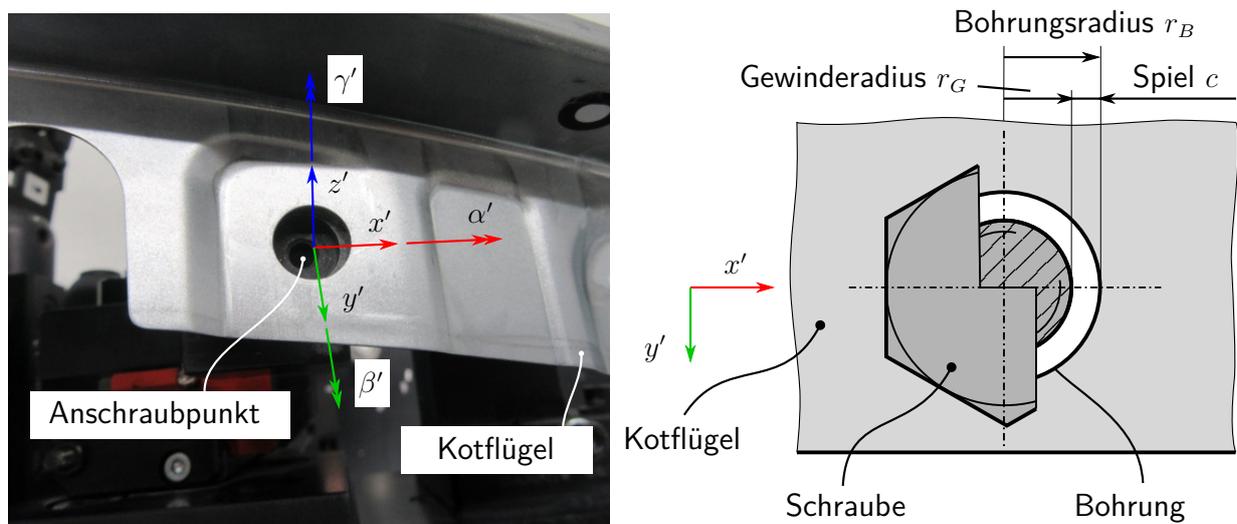


Abb. 4-3: Freiheitsgrade eines Anschraubpunktes (translatorisch: x', y', z' ; rotatorisch: α', β', γ'). Das Spiel s zwischen Schraube und Bohrung ergibt sich aus der Differenz von Bohrungs- und Gewinderadius: $s = r_B - r_G$.

Während die RPS-Ausrichtung bei Messaufnahmen in wenigen Arbeitsschritten erledigt ist, bedarf es am AMB deutlich mehr Aufwand. Die Möglichkeit, mithilfe unterschiedlicher Ausprägungsformen von Spannhilfen direkt die RPS-Punkte oder deren unmittelbare Umgebung wie in Abbildung 2-21 auf die Nominalposition zu klemmen, entfällt hier. Stattdessen lassen sich am AMB oder an einer RFK die RPS-Punkte aller Anbauteile ausschließlich indirekt über die Befestigungspunkte ausrichten, da an den RPS-Punkten selbst keine direkten Spannkraften eingeleitet werden können. Daher basiert auch die manuelle Ausrichtung auf einem iterativen Prozess: Man verrückt die Positionen der Anschraubpunkte solange innerhalb des verfügbaren Spielraums, bis die Abweichungen ΔRPS nach Gleichung 2-1 gegen Null oder einer definierten Soll-Abweichung konvergieren. Zur dynamischen Ermittlung der RPS-Werte am AMB kommen im Regelfall taktile Koordinatenmessgeräte zum Einsatz. Das verfügbare Spiel zur Positionierung der Anschraubpunkte resultiert aus der Differenz zwischen Bohrungs- und Schraubenradius, wie im Bild 4-3 dargestellt. Primär wird dort versucht, lediglich das Spiel in der lokalen xy' -Ebene auszunutzen, um den Kotflügel auszu-

richten. Je nach den baulichen Gegebenheiten des darunterliegenden Bauteils, kann die Position aber auch in Richtung der lokalen z' -Achse bewegt oder um die drei lokalen Achsen gedreht werden. Die Effizienz bzw. die Genauigkeit dieses händischen Ausrichtungsprozesses wird oft von der Erfahrung des jeweiligen Messtechnikers beeinflusst, wobei dennoch übliche Ausrichtungstoleranzen von $\pm 0,05$ mm bei Haupt- und $\pm 0,2$ mm bei Neben-RPS-Punkten eingehalten werden sollten. In der Praxis erweist sich diese Aufgabe insbesondere für Kotflügel als Herausforderung.

4.1.3 Fertigungsprozesskette

Auch wenn die Herstellung des im Mittelpunkt stehenden Kotflügels nicht durchweg bis zum „Endprodukt“ separat stattfindet, sondern teilweise in die Gesamtkarosserie integriert ist, soll der zugrundeliegende Prozess dennoch in vier einzelne Schritte gegliedert werden.



Abb. 4-4: Fertigungsprozesskette des Kotflügels

Das entsprechende Resultat veranschaulicht die Fertigungsprozesskette in Abbildung 4-4, wonach zuerst die Außen- und Verstärkungsteile ihre Form durch mehrstufiges Tiefziehen erhalten. Im zweiten Schritt werden die zuvor erzeugten Blechteile mittels Stützkleber und drei Durchsetzfügeverbindungen, beim sogenannten Clinchen, miteinander verbunden. Zu diesem Zeitpunkt befindet sich der Kleber wie in Bild 4-5 noch im unausgehärteten Zustand und trägt daher kaum zur Festigkeit der Baugruppe bei. Anschließend folgt der Verbau an der Karosserie, welche dann im dritten Schritt komplett die kathodische Tauchlackierung (KTL) durchläuft und dort neben der Grundierung eine definierte Wärmezufuhr erfährt. Diese Wärme ist in Bezug auf den Kotflügel für zwei wichtige Effekte verantwortlich: Einerseits führt das Bake-Hardening (BH) zur Erholung des E-Moduls und zur Steigerung der Dehngrenze des Außenteilmaterials. Andererseits härtet erst an dieser Stelle der Stützkleber aus und erhöht damit die Steifigkeit des vorderen Spitzenbereichs. Ab hier sind die wesentlichen mechanischen Eigenschaften des Kotflügels definiert und bleiben im weiteren Verlauf nahezu konstant. Ebenso erfolgen im weiteren Verlauf keine Änderungen der geometrischen Grundabmessungen, jedoch wird die im Einbauzustand wahrgenommene äußere

Form des Kotflügels durch die Konstellation der Anschraubpunktpositionen bestimmt. Deshalb beginnt in der Anlaufphase eines neuen Fahrzeugs an dieser Stelle der Prüfprozess mithilfe des AMBs, um die zu erwartenden Formänderungen zu qualifizieren. Die isoliert betrachtete Fertigungsprozesskette des Kotflügels schließt ansonsten mit dem Auftrag des Farb- und Klarlacks ab, wobei im Regelfall dieser letzte Schritt im Rahmen des Meisterbockprozesses und damit auch im VMB nicht betrachtet wird.

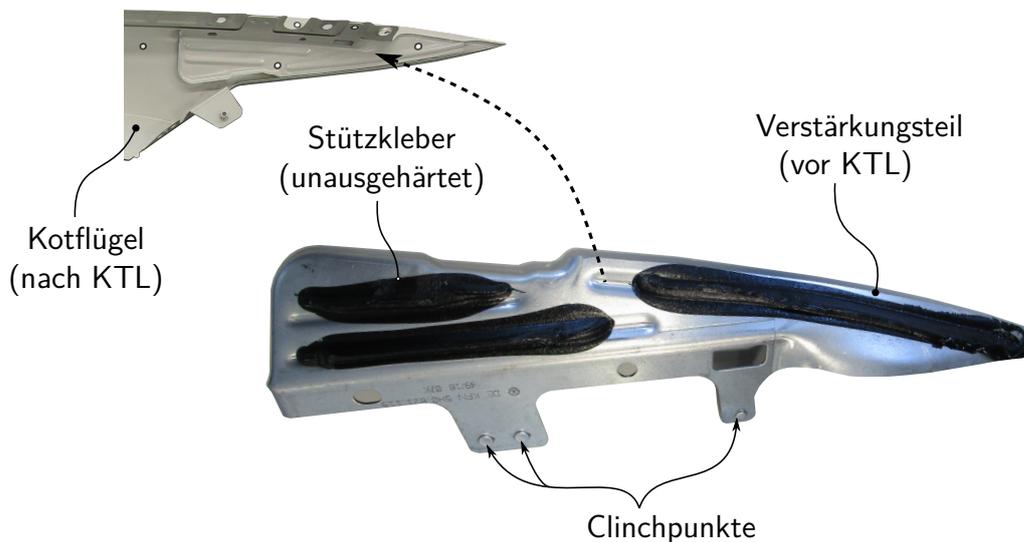


Abb. 4-5: Verstärkungsteil mit Stützklebernähten und Clinchpunkten

4.1.4 Messung ohne Spannhilfen

Bauteilspezifische Messaufnahmen wie in Abbildung 2-21 repräsentieren eine etablierte Methode zur Einzelqualifizierung von Bauteilen. Im Regelfall führt die Anwendung zu einer Zwangslage des jeweiligen Bauteils, indem die Bereiche um die Haupt- und Neben-RPS-Punkte mithilfe von Spannhilfen in die Soll-Lage gedrückt werden. Im Fall des Kotflügels lässt sich die somit deformierte Bauteilgeometrie zwar vollflächig optisch messen, jedoch enthalten die erzeugten Messdaten keine Informationen über den Spannungszustand des Bauteils. Ohne diese Informationen würde die Ausgangskonfiguration des Simulationsmodells auf einer spannungsfreien Form basieren, die sich vom ungespannten physischen Gegenstück unterscheidet. Daher kommt eine prototypische Messaufnahme zum Einsatz, die entsprechend Abbildung 4-6 aus einem Rechteckprofil besteht und drei Auflager besitzt. Darauf wird der Kotflügel ähnlich zur Einbaulage im Fahrzeug aufgehängt. Die Auflager wurden dabei so positioniert, dass die wirkenden Gravitationskräfte möglichst kleine Hebelarme aufweisen und somit die Biegemomente minimiert sind. Dadurch wird gewährleistet, dass die Deformationen durch Gravitation insbesondere gegenüber einer liegenden Messung sehr gering ausfallen. In der gewählten Messposition konvergieren sie zwar ebenfalls nicht zu Null, dennoch kann angenommen werden, dass die verbleibenden Verformungen durch Gravitation mit dem Einbauzustand korrelieren und daher Differenzen vernachlässigbar klein sind.

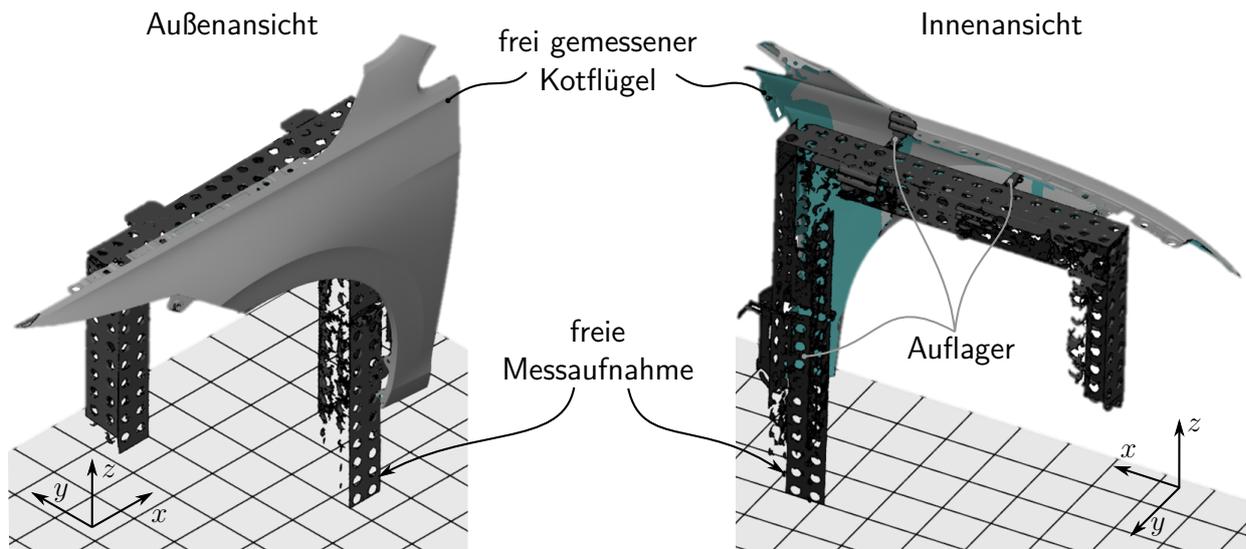


Abb. 4-6: Freie Messung des Kotflügels

4.2 Struktursimulation

Die Verhaltensvorhersagen von realen technischen Prozessen erlangen insbesondere durch die voranschreitende Digitalisierung im Zusammenhang mit der Industrie 4.0 an zusätzlicher Bedeutung. Um die zugrundeliegende Motivation nach steigender Effizienz im PEP durch Simulation zu bedienen, werden die betrachteten Systeme durch physikalisch-mathematische Modelle repräsentiert, wobei in der Regel entsprechende Annahmen und Vereinfachungen notwendig sind. In der Technik führen diese Modelle oft auf Differentialgleichungen mit partiellen Ableitungen nach Ort bzw. Zeit und bieten durch bekannte Anfangs- und Randbedingungen verschiedene Lösungsansätze. Da technische Anwendungen jedoch häufig keine exakte analytische Lösung ermöglichen, muss ein Näherungsverfahren zu den gegebenen Randbedingungen zum Einsatz kommen. Unabhängig von der getroffenen Wahl aus verfügbaren Näherungsansätzen werden die mathematischen Problemstellungen letztlich in lineare Gleichungssysteme überführt², welche sich durch die gute Automatisierbarkeit effizient von Computern lösen lassen. Denn anstatt stetiger Lösungen werden innerhalb eines definierten Rasters diskrete Funktionswerte berechnet. Zu diesen sogenannten Diskretisierungsverfahren zählt neben den *Finiten-Differenzen* oder den *Netzfriren Methoden* auch die *Finite-Elemente-Methode (FEM)*, welche in den letzten Jahrzehnten bei technischen Fragestellungen am häufigsten zur Anwendung kam. [52, S. 1f.] Dazu haben u.a. die flexible Adaptivität an reale Prozesse und die Möglichkeiten zur variablen Berücksichtigung von Änderungen beigetragen. [53, S. 299]

Im Hinblick auf die im Kapitel 3 anvisierte virtuelle Bauteilqualifizierungsschleife bietet sich ebenfalls die FEM an, um Verformungen im Zuge der Montage imperfekter Bauteile zu prognostizieren. Bevor in den späteren Kapiteln auf die Anwendung bzw. die detaillierte Modellerstellung im Fall

²Auch nichtlineare Gleichungssysteme lassen sich durch passende Lösungsmethoden linearisieren [52, S. 2]

des Kotflügels eingegangen wird, soll an dieser Stelle zunächst der theoretische Hintergrund und die dafür eingesetzte Soft- und Hardware erläutert werden. Somit lässt sich die Vorgehensweise bei der Problemaufbereitung und letztlich auch die Aussagesicherheit einer FE-Analyse nachvollziehen.

4.2.1 Finite-Elemente-Methode in der Strukturmechanik

Das Konzept der finiten Elemente wird bei einer Vielzahl von technisch-physikalischen Problemstellungen herangezogen: Neben der Anwendung des Hooke'schen Gesetzes in der linearen Elastostatik erstreckt sich das Einsatzgebiet von der Wärmeübertragung, über die Akustik bis zu gekoppelten multiphysikalischen Systemen.[53, S. 14] Der Fokus der nachfolgenden Kapitel bezieht sich jedoch explizit auf den Einsatz im Rahmen von strukturmechanischen Problemen.

In diesem Zusammenhang existieren prinzipiell drei Ansätze, um sich der Methode der finiten Elemente zu bedienen, die jedoch letztlich auf dieselbe Hauptgleichung führen. Der physikalische Ansatz basiert auf Arbeits- und Energieprinzipien und aus mathematischer Sicht lässt sich die FE-Formulierung aus dem Prinzip der gewichteten Residuen herleiten. Der dritte und pragmatischere Ansatz basiert auf den Methoden zur Matrizenrechnung und ist der ingenieurmäßigen Vorgehensweise entlehnt. [54, S. 5]

Nach einem kurzen Überblick zum Ablauf einer FE-Analyse soll anschließend dieser ingenieurmäßige Ansatz zur Herleitung der Hauptgleichung der FEM dienen.

4.2.1.1 Ablauf einer FE-Analyse

Der prinzipielle Ablauf einer strukturmechanischen FE-Analyse lässt sich zusammengefasst in drei sequentielle Phasen gliedern. Ausgehend von einer fachgerechten Problemaufbereitung wird anschließend ein adäquates Modell des realen Bauteils erzeugt (*Pre-Processing*). Die unbekanntenen Größen dieses Modells werden im zweiten Schritt durch einen Gleichungslöser (*Processing, Solving*) automatisch berechnet, sodass letztlich die Auswertung (*Post-Processing*) der Ergebnisse erfolgen kann.

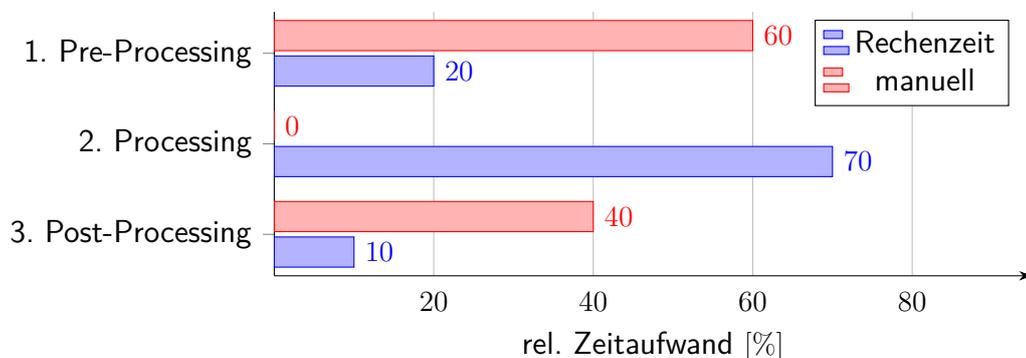


Abb. 4-7: Aufwandsabschätzung einer FE-Analyse (angelehnt an [53, S. 7])

Anhand Abbildung 4-7 lässt sich erkennen, dass der Zeitaufwand für den Simulationsanwender je nach Bearbeitungsphase konträr zur Rechenzeit variiert. Auch wenn moderne Präprozessoren eine Vielzahl an Automatismen anbieten, ist der primäre manuelle Aufwand in der Regel dennoch bei der Problemaufbereitung bzw. Modellerstellung zu erwarten. Als Ausgangspunkt dienen meistens die entsprechenden CAD-Bauteile, welche zunächst in die für die Berechnung notwendigen Bestandteile zerlegt werden müssen. Der Grad der Idealisierung muss hierbei einen Kompromiss zwischen Rechenzeit und erwartbarer Ergebnisgenauigkeit darstellen. Je nach Analyseanforderungen trägt dazu bereits die Wahl des Elementtyps aus folgenden Kategorien bei: [55, S. 234]

- Punktelement (z.B. Masse)
- eindimensionales- oder Linienelement (z.B. Stab oder Balken),
- zweidimensionales- oder Flächenelement (z.B. Scheibe oder Schale) und
- dreidimensionales- oder Volumenelement (z.B. Quader oder Tetraeder).

Nachdem die Geometrien inklusive Materialeigenschaften implementiert sind, fehlt zur Komplettierung des Modells lediglich noch die Lagerung, welche im Rahmen statischer Belastungen mindestens statisch bestimmt ausfallen sollten, um Starrkörperverschiebungen auszuschließen. Das vollständige Modell wird anschließend an den Gleichungslöser übermittelt, wobei oftmals eine spezielle Skriptsprache zum Einsatz kommt, um alle notwendigen Informationen für die Berechnung zur Verfügung zu stellen. Sobald die darauf basierenden Eingaben die Syntaxanforderungen des Solvers erfüllen, startet dieser und löst das Gleichungssystem (siehe Abs. 4.2.1.2) nach den Verformungen auf und die Spannungen, Dehnungen sowie Reaktionskräfte werden im Nachgang zurückgerechnet. Erst nach abgeschlossenem Rechenlauf wird wieder die Expertise des Anwenders gefragt, indem er die erzeugten Daten angemessen auswertet und einer Plausibilitätsprüfung unterzieht. [53, S. 6])

4.2.1.2 FE-Formulierung

Im vorangegangenen Abschnitt kristallisiert sich heraus, dass das Lösen der Gleichungen im zweiten Schritt einer FE-Analyse zwar ohne manuelle Eingriffe geschieht, jedoch sollte der Analyst über ein ausgeprägtes Verständnis des zugrundeliegenden Ansatzes verfügen. Somit lassen sich methodische Anwendungsfehler weitestgehend vermeiden und es kann im Nachhinein eine angemessene Plausibilitätsprüfung mit ggf. zielgerichteter Fehlersuche erfolgen. Zu diesem Zweck wird nachfolgend die Herleitung der FE-Formulierung mithilfe der ingenieurmäßigen Matrixmethode demonstriert. Hierbei kommen grundsätzlich wiederum zwei Ansätze in Betracht: Während bei der *Kraftmethode* die Kräfte als Unbekannte der Gleichungen fungieren, verbleiben bei der *Verschiebungsmethode* hingegen die Verschiebungen als unbekannte Größen. Da die Verschiebungsmethode unabhängig von der statischen Bestimmtheit des Bauteils einsetzbar ist, wird ebendieses Verfahren für die weitere Vorgehensweise herangezogen. [54, S. 6]

Zur Illustration der Allgemeingültigkeit wird von einem dreidimensionalen Kontinuum Ω ausgegangen, welches in Abbildung 4-8 beispielhaft durch den Rand Γ begrenzt ist. Zusätzlich sind kinematische Randbedingungen sowie eine wirkende Kraft F definiert.

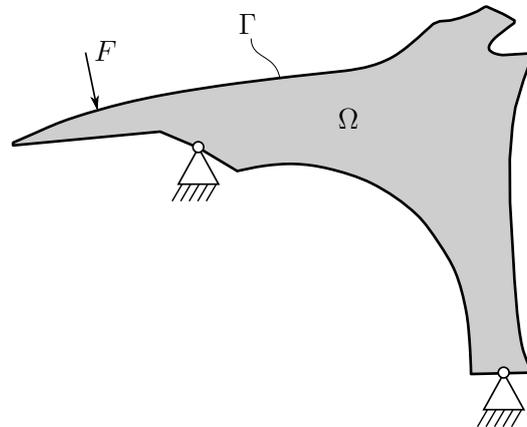


Abb. 4-8: Statisch bestimmtes Kontinuum Ω mit Rand Γ und Last F [54, S. 11]

Das Kontinuum wird anschließend diskretisiert³, sodass deren Geometrie durch eine endliche Anzahl von Teilstücken, den finiten Elementen, näherungsweise beschrieben ist. Bei der Verwendung von Volumenelementen ergeben sich in den Kontaktbereichen untereinander entsprechende Grenzflächen, wohingegen bei Flächenelementen korrespondierende Grenzlinien entstehen. Diese Konstellation veranschaulicht das vernetzte Beispiel in Abbildung 4-9.

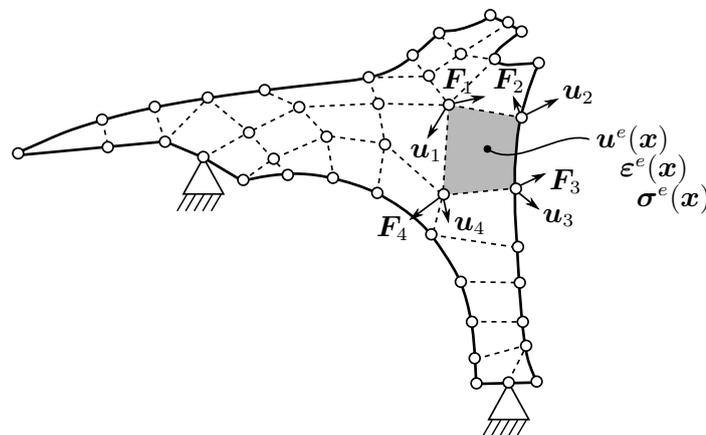


Abb. 4-9: Diskretisierte Fläche und Zustandsgrößen am Element [54, S. 12f.]

Die gestrichelten Linien zeigen den Verlauf von jeweils zwei sich überdeckenden Elementkanten, wobei die mechanischen Interaktionen im Gegensatz zum Kontinuum ausschließlich über die diskreten Eckpunkte der Elemente, die sogenannten Knoten übertragen werden. Somit erfahren Elemente, welche auf denselben Knoten referenzieren, übereinstimmende Verschiebungen und

³In der Praxis wird an dieser Stelle häufig von Vernetzen (*Meshing*) gesprochen.

der Kraftfluss erfolgt ebenfalls ausschließlich über die Knoten. Im Fall der Verschiebungsmethode werden die Knotenverschiebungen \mathbf{u}_p als unbekannte Größen der Gleichungen behandelt.

Der Ausgangspunkt zur Abbildung der an den gedachten Elementgrenzen herrschenden Spannungen ist das *Prinzip der virtuellen Verrückungen*, indem ein Gleichgewicht zwischen äußerer Arbeit δW_{ext} und innerer Arbeit δW_{int} des betrachteten Systems angenommen wird:

$$\delta W_{ext} = \delta W_{int} \quad (4-1)$$

Auf diese Weise lassen sich äquivalente Knotenkräfte erzeugen, welche die imaginären Spannungen an den Elementrändern repräsentieren. Je Element ergibt sich die externe Arbeit aus dem Produkt der Knotenkräfte \mathbf{f}_p^e und den virtuellen, infinitesimalen Verschiebungen $\delta \mathbf{u}_p$.

$$\delta W_{ext} = \left(\mathbf{f}_p^e \right)^T \delta \mathbf{u}_p \quad (4-2)$$

Dahingegen leisten die virtuellen, infinitesimalen Verzerrungen $\delta \boldsymbol{\varepsilon}^e$ im Element mit den inneren Spannungen $\boldsymbol{\sigma}^e$ die innere Arbeit.

$$\delta W_{int} = \int_{\Omega} (\boldsymbol{\sigma}^e)^T \delta \boldsymbol{\varepsilon}^e d\Omega \quad (4-3)$$

Dabei resultiert das Verzerrungsfeld $\boldsymbol{\varepsilon}^e(\mathbf{x})$ aus den Ableitungen des Verschiebungsfeldes $\mathbf{u}^e(\mathbf{x})$, wobei \mathbf{D} den entsprechenden Differentialoperator erster Ordnung darstellt.

$$\boldsymbol{\varepsilon}^e(\mathbf{x}) = \mathbf{D} \mathbf{u}^e(\mathbf{x}) \quad (4-4)$$

Um die Knotenverschiebungen \mathbf{u}_p auf das Innere eines Elementes zu approximieren und damit das Verschiebungsfeld zu charakterisieren, dienen die sogenannten Form- oder Ansatzfunktionen $\mathbf{N}(\mathbf{x})$. Deren Polynomgrad besitzt einen wesentlichen Einfluss auf die Ergebnisgenauigkeit, weshalb dieser Aspekt auch in der späteren Modellentwicklung im Abschnitt 5.1.1 wieder aufgegriffen wird.

$$\mathbf{u}^e(\mathbf{x}) = \mathbf{N}(\mathbf{x}) \mathbf{u}_p \quad (4-5)$$

Durch Einsetzen des Terms 4-5 in Gleichung 4-4 lässt sich das Werkstoffgesetz in folgender Weise darstellen, wobei die Materialmatrix \mathbf{C} bei angenommener Isotropie des Materials von der Querkontraktionszahl ν und dem Elastizitätsmodul E abhängt. Hinsichtlich der Ableitungen der Formfunktionen wird für gewöhnlich eine neue Matrix namens \mathbf{B} festgelegt.

$$\boldsymbol{\sigma}^e(\mathbf{x}) = \mathbf{C} \boldsymbol{\varepsilon}^e(\mathbf{x}) = \mathbf{C} \underbrace{\mathbf{D}\mathbf{N}(\mathbf{x})}_{\mathbf{B}(\mathbf{x})} \mathbf{u}_p \quad (4-6)$$

Das Gleichgewicht der inneren und äußeren Arbeit,

$$\left(\mathbf{f}_p^e\right)^T \delta \mathbf{u}_p = \int_{\Omega} \left(\boldsymbol{\sigma}^e\right)^T \delta \boldsymbol{\varepsilon}^e d\Omega, \quad (4-7)$$

kann somit durch Einsetzen der Terme 4-4 bis 4-6 und anschließendem transponieren in den folgenden Ausdruck umgeformt werden.

$$\left(\delta \mathbf{u}_p\right)^T \mathbf{f}_p^e = \left(\delta \mathbf{u}_p\right)^T \underbrace{\int_{\Omega} \mathbf{B}(\mathbf{x})^T \mathbf{C} \mathbf{B}(\mathbf{x}) d\Omega}_{\mathbf{K}^e} \mathbf{u}_p \quad (4-8)$$

Darin enthalten ist die Elementsteifigkeitsmatrix \mathbf{K}^e , welche durch aufaddieren aller Einzelsteifigkeiten zur Gesamtsteifigkeitsmatrix \mathbf{K} des betrachteten Systems führt.

$$\mathbf{f}_p^e = \mathbf{K}^e \mathbf{u}_p \quad (4-9)$$

Die Hauptgleichung der FEM resultiert dann schließlich aus dem Gesamtgleichgewicht zwischen inneren Rückstellkräften des Systems und den äußeren Lasten. [54, S. 11.ff]

$$\mathbf{f} = \mathbf{K} \mathbf{u} \quad (4-10)$$

Im Rahmen der linearen Strukturmechanik erfolgt die Lösung des entstandenen Gleichungssystems oft mit Methoden, die auf dem *Gauß-Algorithmus* basieren. [56] Um in der Praxis realitätsnahe Prognosen zu treffen, sind jedoch häufig auch nichtlineare Phänomene zu berücksichtigen, weshalb hierauf im nachfolgenden Abschnitt gesondert eingegangen wird.

4.2.1.3 Nichtlineare Probleme

Um die angestrebte Prognosegüte von strukturmechanischen Simulationen im Karosseriebau zu bewerkstelligen, ist es in vielen Fällen notwendig, nichtlineare Berechnungen durchzuführen. Die Ursachen für Nichtlinearitäten können auf diverse Aspekte zurückzuführen sein und lassen sich allgemein betrachtet mithilfe der folgenden Einteilung kategorisieren. [57, S. 2f.]

- Geometrische Nichtlinearität
- Physikalische Nichtlinearität
- Nichtlineare Randbedingungen
- Große Deformationen
- Stabilitätsprobleme
- Gekoppelte Probleme

Im Kontext der vorliegenden Arbeit sorgt die adäquate Modellierung des mechanischen Verhaltens von Blechbauteilen ebenfalls dafür, dass das Kräftegleichgewicht eine nichtlineare Gestalt annimmt, wobei deren Auslöser auf drei der genannten Kategorien reduziert werden können. Dazu zählen geometrische Nichtlinearitäten, da bei vergleichsweise kleinen Verzerrungen große Verschiebungen und Verzerrungen der Bauteile zu erwarten sind. Daher werden derartige Effekte in jedem der späteren ABAQUS-Berechnungen berücksichtigt, indem die dafür vorgesehene *Step-Option* NLGEOM entsprechend in der Eingabedatei aktiviert wird (siehe Abschnitt 4.2.3). Des weiteren resultieren aus der Berücksichtigung des plastischen Materialverhaltens physikalische Nichtlinearitäten, da Lastfälle oberhalb der Dehngrenze, im Gegensatz zum elastischen Bereich, irreversible Deformationen hervorrufen. Demnach erlauben lineare Funktionen auch hier keine ausreichend genaue Beschreibung des mathematischen Zusammenhangs zwischen Dehnung und Spannung. Zusätzlich kann die Modellierung der Bauteilbefestigung den Komplexitätsgrad des Gleichungssystems durch nichtlineare Randbedingungen erhöhen. In Bezug auf die Vorgehensweise am Beispiel des Kotflügels trägt dazu die Verwendung von *Connector-Elementen* mit Dämpfungseigenschaften bei (siehe Abschnitt 5.1.6).

Letztlich muss auch der Lösungsalgorithmus im Stande sein, die entstandenen nichtlinearen Gleichungssysteme zu berechnen. Der bei linearen Problemen verwendete *Gauß-Algorithmus* stößt hier an seine Grenzen, weshalb allgemein in diesem Zusammenhang als auch speziell bei ABAQUS das *Newtonverfahren* bzw. *Newton-Raphson-Verfahren* zum Einsatz kommt. [56, 58]

4.2.2 Verwendete Soft- und Hardware

Die Wahl der in Tabelle 4-2 aufgelisteten Softwaresysteme resultiert aus technischen Anforderungen und Vorteilen, die sich aus Synergieeffekten mit anderen Abteilungen des Unternehmens ergeben. Dennoch ließen sich die aufgelisteten Verwendungszwecke auch mit anderen Softwarewerkzeugen lösen. Im vorliegenden Fall bieten die Systeme zum Teil jedoch mitgelieferte Schnittstellen an, um untereinander einen direkten Datenaustausch zu ermöglichen. Dennoch sind zahlreiche Skripte notwendig, die zum einen beim Datentransfer helfen und zum anderen häufig wiederkehrende bzw. zeitintensive Aufgaben zur Modellerstellung beschleunigen. Relevante Details dazu folgen in den Abschnitten zum Virtuellen Meisterbock.

Im Zuge des Modellaufbaus werden aus Vergleichs- und Effizienzgründen Rechenzeiten bzw. CPU-Zeiten angegeben, die von der jeweils verwendeten Hardware abhängen. Im Rahmen dieses Projektes beruhen alle Werte hingegen auf einer Linux-Umgebung, in der die Softwaresysteme parallelisiert auf 16 CPUs mit je 3,2 GHz Prozessorleistung zugreifen können.

Tab. 4-2: Im Rahmen des VMB und der VPK verwendete Software

Softwaresystem	Version	Distribution	Verwendungszweck
ANSA	18.1.3	kommerziell	Pre-Prozessor
ABAQUS/STANDARD	2018	kommerziell	FE-Solver, Post-Prozessor
LS-DYNA	971	kommerziell	FE-Solver
GOM INSPECT	2019	kommerziell	Pre-/Post-Prozessor
OPTIMUS	2019.2	kommerziell	Optimierung
VW-GEOMAPPER	v01	VW-intern	geometrisches Mapping (Morphing)
SIMAN	2019	VW-intern	Mapping von Zustandsgrößen

4.2.3 Abaqus Eingabe und Einheitensystem

Analog zu anderen FE-Systemen ermöglicht auch ABAQUS die Modellbeschreibung und die Definition von Randbedingungen samt Materialmodellierung mithilfe von Eingabedateien (s. Abaqus Dokumentation [59]). Darin dienen ABAQUS-spezifische Schlüsselwörter, sogenannte Keywords, zur Implementierung aller notwendigen Modellkomponenten. Die wesentlichen Bestandteile des später entwickelten FE-Modells für den vorgesehenen Kotflügel werden als Programmcode gekennzeichnet in den jeweiligen Abschnitten aufgeführt und erläutert. Dabei ist zu beachten, dass alle Größen bzw. Abmessungen dieses Modells auf dem konsistenten Einheitensystem aus Millimeter [mm], Tonne [t] und Sekunde [s] basieren.

4.2.4 Aussagesicherheit einer FE-Analyse

In der Literatur wird die FEM zu den genauesten Berechnungsverfahren gezählt, wobei für die erwartbaren Abweichungen zwischen Finite Elemente (FE)-Lösung und dem wahren Wert (vgl. Abb. 2-10) ein relativer Fehler von unter 10% angegeben wird. [53, S. 299] Dennoch kann einer FE-Analyse nicht pauschal eine hohe Aussagesicherheit zugeschrieben werden, da neben den kaum beeinflussbaren verfahren-inhärenten Abweichungen zusätzlich auch vom Anwender abhängige Fehlerquellen die Ergebnisse beeinträchtigen können.

Da es sich bei der FEM um ein numerisches Näherungsverfahren handelt, treten verfahrensbedingte Fehler auf, die zum einen der schwachen Lösung der grundlegenden Differentialgleichung geschuldet sind. Dieser Ansatz generiert nicht an jeder Stelle im Modell eine exaktes Ergebnis, stattdessen wird die richtige Lösung nur im Mittel gefordert. [60]

Hinzu kommen Abweichungen durch numerische Integrationsverfahren und Fehler durch das Runden von Fließkommazahlen, wobei sich bei diversen kommerziellen FE-Systemen, wie beispielsweise ABAQUS, der Rundungsfehler steuern lässt. [61, 62]

Die nachfolgenden Abschnitte geben hingegen einen Überblick zu denen vom FE-Analyst vermeidbaren Fehlerquellen bei der Problemaufbereitung und im Anschluss konzentriert sich der Fokus speziell auf die Optimierung der Elementqualität.

4.2.4.1 Vermeidbare Fehlerquellen

Der primär eingesetzte FE-Solver ABAQUS prüft zwar zu Beginn jeder Berechnung die syntaktische Richtigkeit der in der Eingabedatei enthaltenen Befehle, jedoch kann bei dem Ergebnis nicht blind davon ausgegangen werden, dass das reale Verhalten des Bauteils innerhalb bestimmter Grenzen richtig abgebildet wird. Neben einer detaillierten Plausibilitätsprüfung der letztlich generierten Daten sollte bereits während der Problemaufbereitung auf typische Fehlerquellen geachtet werden [63]:

- Anwenderfehler
- Idealisierungsfehler
- Diskretisierungsfehler

Da keine universelle Vorgehensweise zur uneingeschränkten Durchführung einer FE-Analyse existiert, obliegt es in erster Linie dem Anwender, die Methodik mithilfe der entsprechenden Software maßgeschneidert zum Einsatz zu bringen. Damit einhergehende Anwenderfehler sollten weitestgehend durch das notwendige Hintergrundwissen zur FEM sowie routinierte Erfahrungen beim Umgang mit den verwendeten Softwaresystemen vermeidbar sein. Die verbliebene Risiko für fehlerhafte Eingaben durch den Anwender, wie beispielsweise simple Tippfehler, lässt sich durch spezielle Checklisten für die Problemauf- und Nachbereitungsphase (Pre- & Post-Prozessor) minimieren.

Hinsichtlich potentieller Idealisierungsfehler kann sich die Ursachenfindung hingegen deutlich komplexer gestalten. Da eine vollständige virtuelle Abbildung des zu untersuchenden Szenarios zu ineffizienten mathematischen Modellen führte, die ggf. keiner Kosten-Nutzen-Analyse standhalten, bedarf es einer passenden Idealisierung. Diese sollte dennoch alle notwendigen Randbedingungen physikalisch korrekt abbilden und lediglich Einflussfaktoren mit geringer Sensitivität vernachlässigen. Im Rahmen der VMB-Simulation ist an dieser Stelle neben einer adäquaten Materialmodellierung die Definition der Befestigungspunkte von besonderer Bedeutung. Beispielsweise würden entgegengesetzte Lagerungen überhöhte Reaktionskräfte erzeugen, die sich zwar einander nahezu aufheben, jedoch extreme Verformungen hervorrufen und so im Rahmen des physischen Meisterbockprozesses nicht auftreten. Ein solches Szenario gilt es zu vermeiden.

Eine weitere vermeidbare Fehlerquelle betrifft die Diskretisierungsqualität der Werkstückgeometrie. Zum einen bedarf die realitätsnahe Abbildung des Spannungsverlaufs einen für den Anwendungsfall geeigneten Elementtyp, der bei akzeptabler Rechenzeit ausreichend genaue Ergebnisse

liefert. Zum anderen trägt der Grad der Netzfeinheit entscheidend zur Aussagesicherheit der FE-Analyse bei. An dieser Stelle muss gleichermaßen wie bei der Wahl des Elementtyps ein Kompromiss zwischen exakter Prognosegüte und erforderlicher Rechenzeit gefunden werden, wobei im Rahmen der Bauteilqualifizierung zusätzliche Anforderungen an das Netz existieren. Da die Ergebnisse der VMB-Simulation letztlich zur Fugen- und Bündigkeitsauswertung herangezogen werden, gilt es, die Kantenbereiche besonders fein zu auflösen.

Die Steigerung der Netzauflösung basiert grundsätzlich auf zwei Ansätzen: Bei der sogenannten *p-Methode* werden die Polynomgrade der Elementansatzfunktionen erhöht, bis die Ergebnisse gegen eine Asymptote konvergieren während die Elementgröße konstant bleibt. Die deutlich weiter verbreitete *h-Methode* sieht die Verfeinerung des Netzes vor, bis sich die Ergebnisse ebenfalls einem Grenzwert annähern. [53, S. 9] Insbesondere aufgrund der bereits genannten Anforderung, dass die Fugenbereiche eine hohe Knotendichte zur genauen Auswertung benötigen, fällt die Wahl auf ebendiese *h-Methode*. Auch im Hinblick auf die rein statischen Belastungen der Bauteile bietet sich dieser Ansatz an, da im Gegensatz zu dynamischen Problemen bzw. Modalanalysen die berechneten Verschiebungen mit der Netzfeinheit korrelieren. [53, S. 315] Eine detaillierte Beschreibung zur praktischen Umsetzung einer Konvergenzstudie zur Netzauflösung am Beispiel des Kotflügels folgt im Abschnitt 5.1.

4.2.4.2 Elementqualität

Unter der Maßgabe möglichst zuverlässige Simulationsergebnisse zu erzeugen, muss neben den im vorherigen Abschnitt erläuterten Fehlerquellen auch auf die Qualität der generierten Elemente geachtet werden. Im Fall der Modellierung von Blechbauteilen offerieren zweidimensionale Schalenelemente in der Regel einen geeigneten Kompromiss aus vergleichsweise geringem Berechnungsaufwand und hoher Genauigkeit. Um diese Benefits maximal auszuschöpfen, sollten im Idealfall die erzeugten Viereckselemente einem Quadrat bzw. einem gleichseitigen Dreieck bei Dreieckselementen entsprechen. Je stärker die tatsächlichen Elementgeometrien von diesen Idealformen abweichen, desto wahrscheinlicher ergeben sich numerische Probleme bei der Berechnung durch den eingesetzten FE-Solver und die Genauigkeit der Ergebnisse sinkt. Daher wird eine möglichst gleichmäßige Netzstruktur angestrebt, deren Eignungsgrad sich durch entsprechende Kennzahlen quantifizieren und mithilfe derer steuern lässt. Elemente, welche einen oder mehrere der in Abbildung 4-10 exemplarisch illustrierten Qualitätskriterien verletzen, erfordern ein iteratives adaptieren bis die jeweils festgelegten Grenzwerte der Kriterien erfüllt sind. Somit lässt sich verhindern, dass beispielsweise ein zu stark von 1 abweichendes Seitenverhältnis (*aspect ratio* = a/b) zu langgestreckten oder kleine Innenwinkel (*Angel min/max*) zu spitzwinkligen Elementen führen. Die Konsequenz derartiger Unregelmäßigkeiten der Netzstruktur wären die bereits erwähnten Ungenauigkeiten der Simulationsergebnisse oder im ungünstigsten Fall ein Programmabbruch des FE-Solvers.

Um zusätzlich zur geometrischen Qualität der Elemente selbst, den Diskretisierungsfehler im Vernetzungsprozess zu berücksichtigen, wird parallel die Mesh distortion d_e , also der senkrechte Abstand zwischen Elementmittelpunkt und CAD-Geometrie berechnet und je nach Anforderung schrittweise reduziert. Infolgedessen steigt unter der Prämisse, die Nominalgeometrie möglichst exakt abzubilden, die Netzfeinheit proportional zur Flächenkrümmung (siehe auch *h-Methode* im vorherigen Abschnitt). Hinsichtlich des Elementtyps werden dabei Viereckselemente präferiert, da sie im Vergleich zu Dreieckselementen bei konstanter Elementauflösung zu genaueren Resultaten führen. [64, S. 331][65, S. 210ff.]

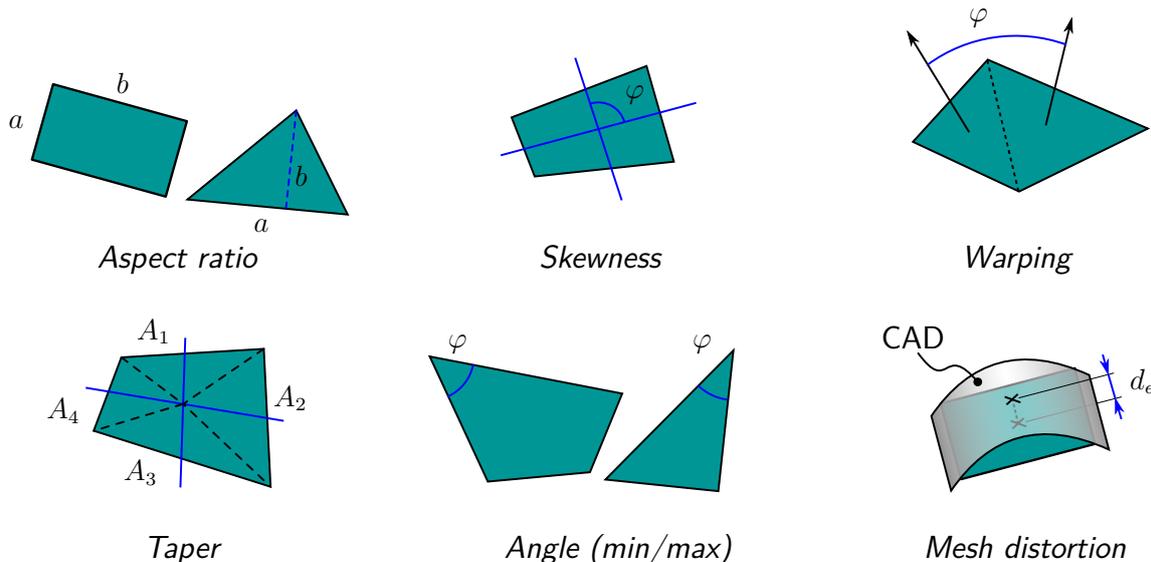


Abb. 4-10: Berücksichtigte Qualitätskriterien für Schalenelemente [66, S. 832ff.]

4.3 Optimierung

Allein im ingenieurtechnischen und betriebswirtschaftlichen Kontext führen unzählige Fragestellungen auf die Formulierung und Lösung eines Optimierungsproblems hin. Darüber hinaus lassen sich selbst alltägliche Entscheidungssituationen auf Optimierungen reduzieren, welche sich beispielsweise damit befassen, die Dauer des Arbeitsweges zu minimieren. Bereits einer der einflussreichsten Mathematiker der Geschichte, LEONHARD EULER, konstatiert 1744 die Omnipräsenz des Minimierens und Maximierens wie folgt:

„Was immer in der Welt passiert, in seinem Inneren hat es die Bedeutung von Maximum oder Minimum. Somit ist kein Zweifel, dass alle Naturphänomene über die Methode des Maximierens oder Minimierens erklärt werden können.“ [67, 68, S. 2]

In diesem Zusammenhang stellt auch das Ausrichten von Bauteilen am AMB oder einer RFK keine Ausnahme dar. Sowohl bei der physischen als auch bei einer virtuellen Vorgehensweise liegt

eine Optimierungsaufgabe zu Grunde, bei der es gilt, die relativen Abstände der Bauteile zu den RPS-Punkten durch Versetzen der Befestigungselemente zu minimieren.

Bevor dieser konkrete Anwendungsfall in den Vordergrund rückt, fungiert dieses Kapitel als Grundlagenvermittler im weiten Feld der Optimierungsansätze. Zunächst soll hier der Bogen aufgespannt werden, welche Optimierungsalgorithmen im Umfeld der Strukturmechanik bewährt zum Einsatz kommen und worin ihre wesentlichen Unterschiede bestehen. Da eine detaillierte Darstellung aller Alternativen zu umfangreich wäre, wird an der Stelle lediglich ein Überblick geboten und weiterführende Informationen erhält der Leser in den zitierten Quellen. Der aufgespannte Bogen soll letztlich wieder verengt werden, indem für das vorliegende ingenieurtechnische Problem anhand der einschlägigen Literatur eine Prognose für einen geeigneten Optimierungsalgorithmus gegeben wird. Die entsprechende Überprüfung in der zu lösenden virtuellen Bauteilausrichtung erfolgt dann im Kapitel 5.3.2.

4.3.1 Modellentwicklung

Naturphänomene eignen sich aufgrund ihrer Komplexität selten als unmittelbarer Ausgangspunkt für mathematische Lösungsansätze. Stattdessen werden, analog zur Finite-Elemente-Methode im vorangegangenen Kapitel, Idealisierungen vorgenommen, um den Sachverhalt in ein mathematisches Modell zu gießen, welches zwar eine Näherung darstellt, aber dennoch ausreichend genau zu dessen Analyse geeignet ist.

Die Modellentwicklung für Optimierungsaufgaben besteht im Wesentlichen aus drei Komponenten: An erster Stelle wird eine Serie von unabhängigen Variablen in einem Vektor \boldsymbol{x} zusammengefasst und dient fortan als Eingangsparameter des Systems. Da an die Eingangsgrößen häufig bestimmte Voraussetzungen bzw. Bedingungen geknüpft sind, müssen im zweiten Schritt entsprechende Restriktionen (*restrictions, constraints*) definiert werden. Die dritte Komponente repräsentiert ein Gütemaß für den Entwurfsvektor \boldsymbol{x} bzw. für das Verhalten des Systems und wird als Zielfunktion (*objective function*) deklariert [69, S. 1]. Die grundlegende Aufgabe einer Optimierung besteht darin, die Extrempunkte dieser Zielfunktion zu bestimmen. Jedoch genügt es bei der mathematischen Formulierung, die Suche auf Minimalpunkte einzugrenzen, da etwaige Maximierungsaufgaben konvertiert werden können: $\max f(\boldsymbol{x}) = -\min(-f(\boldsymbol{x}))$. Infolgedessen lautet die allgemeine Form des Optimierungsproblems wie folgt:

$$\min_{\boldsymbol{x} \in \mathbb{R}^n} f(\boldsymbol{x}) \quad (4-11)$$

Durch die Abgrenzung $\boldsymbol{x} \in \mathbb{R}^n$ werden zwar spezielle Anwendungsfälle, bei denen x eine optimal zu bestimmende Funktion (z.B. eine Steuerungsfunktion [70, S. 3]) darstellt, ausgeschlossen, jedoch kann dieser Bereich im Rahmen dieser Arbeit ausgeschlossen werden. In der hier betrachteten Konstellation wird der Definitions- und Wertebereich der Zielfunktion, wie oben in Schritt zwei

erwähnt, durch eine endliche Anzahl an unterschiedlichen Restriktionen verengt. Ungleichheits- (*inequality constraints*) und Gleichheitsrestriktionen (*equality constraints*) lassen sich wie folgt verallgemeinern:

$$\begin{aligned} x \leq \bar{x} &\rightarrow x - \bar{x} \leq 0 \rightarrow g_1(x) \leq 0 \\ y(x) \leq \bar{y} &\rightarrow y(x) - \bar{y} \leq 0 \rightarrow g_2(x) \leq 0 \\ y(x) = \bar{y} &\rightarrow y(x) - \bar{y} = 0 \rightarrow h(x) = 0 \end{aligned} \quad (4-12)$$

Passend dazu zeigt Abbildung 4-11 die Restriktionen g_1 , g_2 und h für eine eindimensionale Zielfunktion $y(x)$. Dabei wird ersichtlich, dass in diesem Beispiel die Fälle b) und d) Auswirkungen auf das jeweilige Optimum haben. In Bezug auf Konstellationen a) und c) werden die entsprechenden Restriktionen nicht aktiv, sodass die globalen Optima als zulässige Lösungen taugen (Annahme: dargestellte lokale Minimalstelle = globale Minimalstelle).

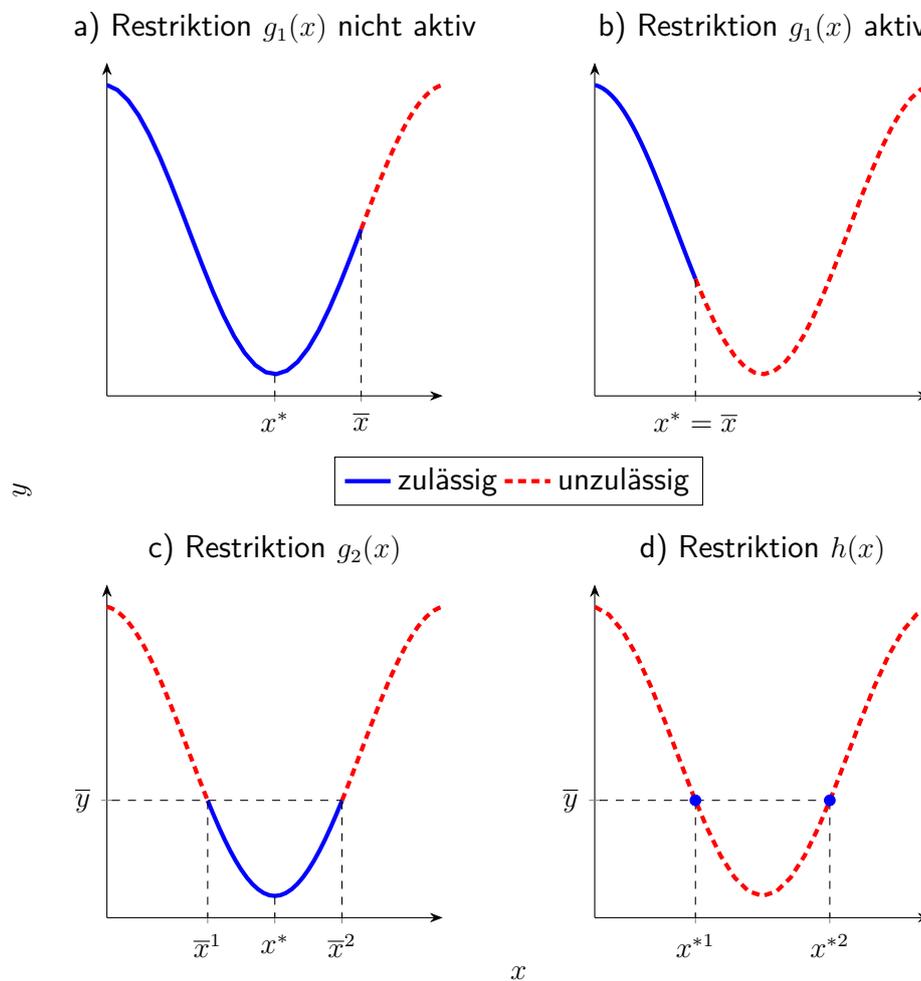


Abb. 4-11: Gleichheits- und Ungleichheitsrestriktionen eines Optimierungsproblems [71, S. 51]

Darüber hinaus sind die expliziten Restriktionen (*side constraints, upper and lower bounds*) zu

ergänzen, sodass allgemein die nachfolgenden Nebenbedingungen zu berücksichtigen sind:

$$g_j(\mathbf{x}) \leq 0 \quad j = 1, m_g \quad m_g \leq \infty \quad (4-13)$$

$$h_k(\mathbf{x}) = 0 \quad k = 1, m_h \quad m_h \leq \infty \quad (4-14)$$

$$\mathbf{x}_i^l \leq \mathbf{x}_i \leq \mathbf{x}_i^u \quad i = 1, n \quad n \leq \infty \quad (4-15)$$

Gleichung (4-16) fasst die Optimierungsaufgabe letztlich in geschlossener Form zusammen und stellt damit eine Standardform zur Modellentwicklung im Optimierungsumfeld bereit. In der Literatur hat sich hierfür der Begriff Nichtlineares Programm (NLP) etabliert, wobei „nichtlineares Minimierungsproblem“ die treffendere Bezeichnung wäre. Unter den möglichen zulässigen Lösungen repräsentiert diejenige die Optimallösung \mathbf{x}^* , welche sowohl die Nebenbedingungen als auch die Forderung nach einem minimalen Funktionswert $f^*(\mathbf{x}^*)$ erfüllt. [70, 71]

$$f^*(\mathbf{x}^*) = \min_{\mathbf{x}} \{f(\mathbf{x}) \mid \mathbf{x} \in X\}$$

$$\text{mit } X = \{\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n \mid \mathbf{g}(\mathbf{x}) \leq 0, \mathbf{h}(\mathbf{x}) = 0, \mathbf{x}^l \leq \mathbf{x} \leq \mathbf{x}^u\} \quad (4-16)$$

4.3.2 Grundlagen zur Problemlösung

Grundlegend steigt das Anforderungsprofil an Optimierungsalgorithmen kohärent zur Komplexität der jeweiligen Ziel- und Restriktionsfunktionen. Im Hinblick auf Effizienz sind daher im Idealfall nichtrestringierte lineare Funktionen am günstigsten, jedoch lassen sich in der Praxis nichtlineare Problembeschreibungen häufig nicht vermeiden. Die hierfür geeigneten Ansätze benötigen mit steigender Nichtlinearität höhere Rechenzeiten oder verfehlen den minimalen Funktionswert im zulässigen Lösungsraum.

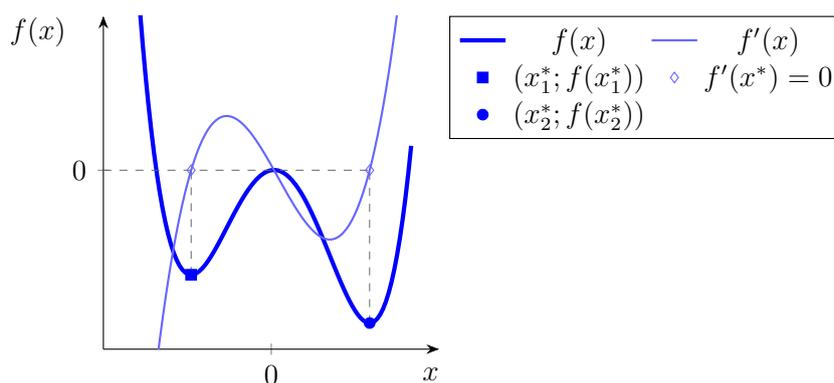


Abb. 4-12: Charakterisierung lokaler und globaler Optima. Die Minima der dargestellten Polynomfunktion $f(x)$ sind durch die zu Null werdende Ableitung $f'(x)$ gekennzeichnet. An der Stelle x_1^* besitzt die Zielfunktion ein lokales und an der Stelle x_2^* ein globales Minimum.

Dieser Umstand rührt daher, dass Algorithmen in lokale Minima laufen können, welche zwar in den angrenzenden Bereichen der Entwurfsvariablen als Optima erscheinen, aber unter den zulässigen

Lösungen nicht das jeweilige globale Minimum darstellen. Diese Problematik veranschaulicht Abbildung 4-12: Während die Stelle x_1^* lediglich ein lokales Minimum repräsentiert, entspricht das lokale Minimum an der Stelle x_2^* ebenso dem globalen Minimum. Mathematisch lässt sich durch eine Analyse der Krümmungseigenschaften feststellen, ob lokales und globales Minimum übereinstimmen: Wenn die Zielfunktion innerhalb des zulässigen Intervalls konvex verläuft, so kann angenommen werden, dass nur ein Minimum existiert. Bei praktischen Anwendungen erweist sich diese Herangehensweise jedoch selten als realisierbar, da oftmals nur diskrete Punkte der Zielfunktion ermittelt werden können.

Vor diesem Hintergrund lassen sich die gängigen Optimierungsalgorithmen prinzipiell in zwei Kategorien einteilen: Bei den lokalen Verfahren kommen überwiegend gradientenbasierte Ansätze zum Einsatz, die ausgehend von einem festgelegten Startpunkt die Steigung der Zielfunktion berechnen und somit die weitere Suchrichtung bestimmen. Hinsichtlich der globalen Verfahren stehen auch im Rahmen der in dieser Arbeit verwendeten Optimierungssoftware OPTIMUS sehr unterschiedliche Ansätze zur Verfügung, zu deren Details auf die Literatur verwiesen sei. [70, 72, 73]

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial f}{\partial x_1} \\ \frac{\partial f}{\partial x_2} \\ \vdots \\ \frac{\partial f}{\partial x_n} \end{pmatrix}_{x^*} = \mathbf{0} \quad (4-17)$$

Unabhängig von der Klassifizierung der Minima hinsichtlich lokaler oder globaler Gültigkeit bedarf es zunächst bestimmter Kriterien, um ein potentielles Minimum zu identifizieren. Die Abbildung 4-12 zeigt ergänzend zur Zielfunktion deren erste Ableitung $f'(x)$, woran sich die notwendige Bedingung für lokale Minima ablesen lässt: Die erste Ableitung bzw. damit gleichbedeutend die Steigung der Zielfunktion wird an diesen Stellen zu Null. Für eine beliebige Anzahl von Entwurfsvariablen ergibt sich somit die notwendige Bedingung 4-17.

Hierbei muss beachtet werden, dass Punkte, welche diese Bedingung erfüllen, neben der gesuchten Minimalstelle auch Maximal- oder Sattelpunkte darstellen können. Im zweidimensionalen Beispiel in Abbildung 4-12 erfüllen drei Stellen die notwendige Bedingung, wobei eine davon jedoch als Maximum zu deklarieren und somit aus der gesuchten Lösungsmenge minimaler Funktionswerte auszuschließen ist. Insofern wird eine weitere, hinreichend Bedingung benötigt: Minima sind dadurch charakterisiert, dass die aus den zweiten Ableitungen bestehende HESSE-Matrix eben dort positiv definit ist bzw. die Eigenwerte ψ in Gleichung 4-18 größer Null sind. Im graphischen Beispiel 4-12 lässt sich dieser Aspekt an der positiven Steigung der ersten Ableitung $f'(x)$ an deren Nullstellen ablesen.

$$\det \left[\begin{array}{cccc} \left(\begin{array}{cccc} \frac{\partial^2 f}{\partial x_1^2} & \frac{\partial^2 f}{\partial x_1 \partial x_2} & \cdots & \frac{\partial^2 f}{\partial x_1 \partial x_n} \\ \frac{\partial^2 f}{\partial x_2 \partial x_1} & \frac{\partial^2 f}{\partial x_2^2} & \cdots & \frac{\partial^2 f}{\partial x_2 \partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial^2 f}{\partial x_n \partial x_1} & \frac{\partial^2 f}{\partial x_n \partial x_2} & \cdots & \frac{\partial^2 f}{\partial x_n^2} \end{array} \right)_{\mathbf{x}^*} & & & \\ & -\psi & \begin{pmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 1 \end{pmatrix} & \\ & & & = 0 \end{array} \right] \quad (4-18)$$

Von besonderer Bedeutung für die optimale Problemlösung im Rahmen dieser Arbeit erweist sich eine direkte Abbildung der Restriktionen in der Zielfunktion. Bewerkstelligt wird dieser Aspekt durch die LAGRANGE-Funktion $\mathcal{L}(\mathbf{x}, \lambda)$:

$$\mathcal{L}(\mathbf{x}, \lambda) = f(\mathbf{x}) + \sum_{j=1}^{m_g} \lambda_j (g_j(\mathbf{x}) + \mu_j^2) + \sum_{k=1}^{m_h} \lambda_k h_k(\mathbf{x}) \quad (4-19)$$

Hierbei lassen sich die Ungleichheitsrestriktionen $g_j(\mathbf{x})$ bezüglich ihrer mathematischen Berücksichtigung mit den Gleichheitsrestriktionen $h_k(\mathbf{x})$ in Einklang bringen, indem die Schlupfvariablen μ_j^2 eingeführt werden. Sie beschreiben die Distanz zur jeweiligen Schranke der Ungleichheitsrestriktion und bewirken damit ein zu Gleichheitsrestriktionen vergleichbares Verhalten. Eine geeignete Verknüpfung zwischen den Restriktionen und der Zielfunktion $f(\mathbf{x})$ ermöglichen die LAGRANGE-Multiplikatoren λ_j und λ_k . Mit deren Hilfe kann sich das Minimum der restringierten Zielfunktion, also der LAGRANGE-Funktion, von dem Minimum der nicht restringierten Zielfunktion unterscheiden, wenn Restriktionen in diesem Bereich aktiv sind. Bei nicht aktiven Restriktionen verschwinden die korrespondierenden Summanden, da die LAGRANGE-Multiplikatoren in diesem Fall den Wert Null annehmen.

Analog zur notwendigen Bedingung in 4-17 lassen sich nach KUHN und TUCKER auch für die LAGRANGE-Funktion Kriterien aufstellen, um lokale Minima zu identifizieren: Die LAGRANGE-Funktion wird sowohl nach den Entwurfsvariablen als auch den Multiplikatoren sowie Schlupfvariablen abgeleitet und zu Null gesetzt. Daraus ergeben sich die notwendigen Bedingungen, bzw. auch KUHN-TUCKER-Bedingungen genannt, für die Existenz minimaler Extrempunkte. [71, S. 52 ff.]

5 Virtueller Meisterbock

Der VMB repräsentiert korrespondierend zum physischen Pendant einen Teilprozess der systemischen Bauteilqualifizierung und deren Realisierung soll analog zur üblichen Chronologie einer FEM-Berechnung in drei sequentielle Schritte eingeteilt sein. Abbildung 5-1 veranschaulicht dieses Konzept anhand einer Prozesskette, wobei die Unterpunkte ebenfalls entlang der Reihenfolge aufeinander aufbauen. Insbesondere die Punkte Mapping, Formulierung des Optimierungsproblems und der Optimierer besitzen für die VMB-Simulation eine wesentliche Bedeutung, da hiermit die jeweilige Ist-Geometrie des Bauteils eingebunden und anschließend virtuell ausgerichtet wird. Die inhaltliche Vorgehensweise dieses Kapitels gestaltet sich derart, dass die Entwicklungsschritte für das Simulationsmodell des linken VW Golf 8 Kotflügels durchlaufen und letztlich mit Experimenten validiert werden. Dabei basieren Teile dieses Kapitels auf einem Vortrag des Autors, der u.a. 2019 auf der Tagung „Magdeburger Ingenieurtag“ gehalten wurde [9].

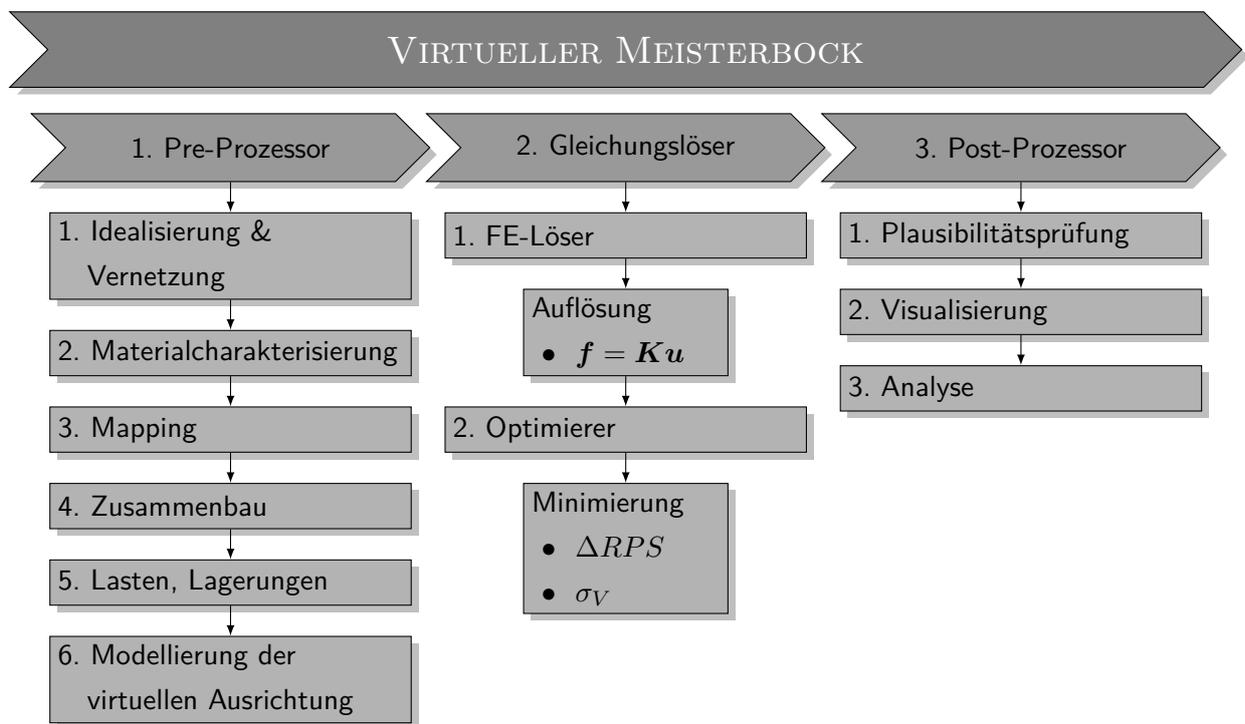


Abb. 5-1: Chronologie zur Anwendung des VMB als Prüfhilfsmittel (in Anlehnung an [52, S. 4][53, S. 47])

5.1 Modellierung des Kotflügels

Im Hinblick auf die hohen Genauigkeitsanforderungen in der Bauteilqualifizierung muss auch der Prozess des VMB diesen Ansprüchen gerecht werden und Ergebnisse liefern, die möglichst exakt die physischen Verhältnisse widerspiegeln. Dabei enthält die Problemaufbereitung (Pre-Processing) die Haupteinflussfaktoren auf die Genauigkeit der letztlich generierten Simulationsergebnisse, da hierbei alle Schritte zur Erzeugung des Simulationsmodells und der Beschreibung des jeweiligen Optimierungsproblems enthalten sind. Gemessen am Gesamtumfang des Aufwandes zur Durchführung der VMB-Simulation beinhaltet diese Phase den größten Anteil an manuellen Arbeitsschritten und wird primär mithilfe der kommerziellen Pre-Processing Software ANSA durchgeführt. Der zeitliche Aspekt ist für einen etwaigen Einsatz im operativen Geschäft zu berücksichtigen.

5.1.1 Idealisierung & Vernetzung

Die Geometrie des Simulationsmodells basiert auf der CAD-Konstruktion des im Abschnitt 4.1 vorgestellten Kotflügels und enthält daher zunächst keine fertigungsbedingten Abweichungen. Um den Arbeits- und Berechnungsaufwand zu minimieren, bedarf es zunächst einer geeigneten Idealisierung dieses Modells, indem nicht benötigte Geometrielemente gelöscht werden. Dazu zählen beispielsweise redundante Flächen bzw. Volumen oder Bohrungen, deren Einflüsse auf die Gesamtsteifigkeit des Bauteils vernachlässigbar klein oder durch eine passende Elementwahl überflüssig sind. Im vorliegenden Fall des Kotflügels werden daher nur die äußeren Flächen der Verstärkung und des Außenteils einschließlich aller Geometrielemente wie Sicken oder Bohrungen beibehalten, da die Blechdicke idealisiert über die Eigenschaften der eingesetzten *Shell*-Elemente dargestellt wird (Elementtypen siehe Abs. 4.2.1.1). Die Verwendung der Außen- statt der Mittelflächen (s. Abb. 5-2) kommt insbesondere bei den Einzelteilen zum tragen, die später im Zuge des geometrischen Mappings oder der Validierung optisch vollflächig gemessen werden. Auf diese Weise wird gewährleistet, dass die Geometrie des Simulationsmodells und die aufgenommene Messung auf dieselbe Schichtlage des Blechs referenzieren.

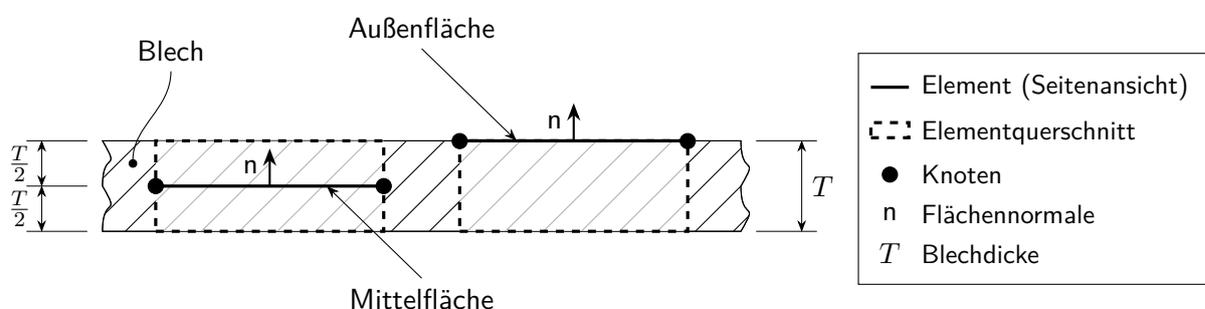


Abb. 5-2: Schematische Darstellung der Bezugsebenen von Schalenelementen. Mithilfe des optionalen SHELL SECTION Parameters OFFSET=SPOS werden im Rahmen dieser Arbeit alle ABAQUS-Schalenelemente auf die Außenfläche referenziert. (vgl. [59])

Außenteil

Nachdem die CAD-Geometrie des Außenteils entsprechend bereinigt ist, wird unter Berücksichtigung der genannten Genauigkeitsanforderungen eine geeignete Diskretisierung vorgenommen, um das Teil gemäß der FEM in hinreichend kleine Elemente zu segmentieren. Das somit erzeugte FE-Netz muss neben der Genauigkeit eine möglichst effiziente und robuste Berechnung des Gesamtmodells durch den FE-Solver sicherstellen. Prinzipiell stehen dafür die bereits im Abschnitt 4.2.4.1 erläuterten Herangehensweisen zur Verfügung: Die als p- und h-Methode bezeichneten Alternativen, sehen entweder eine Verfeinerung des Netzes oder eine Erhöhung des Polynomgrades der Ansatzfunktionen vor, bis die Ergebnisse gegen die eines unendlich fein aufgelösten FE-Modells konvergieren [53, S. 9]. Da für die automatisierte Auswertung der Fugen ohnehin eine sehr engmaschige Auflösung der Kantenradien notwendig ist, bietet sich eine Netzverfeinerung mittels der h-Version an. Je mehr Knotenpunkte in radialer Richtung auf den Radien liegen (siehe Abbildung 5-3), desto zuverlässiger können später passende Fittingkurven mithilfe der entsprechenden Messsoftware berechnet und die darauf basierenden Fugenmaße berechnet werden. In axialer Richtung muss gleichzeitig darauf geachtet werden, dass die Elemente keine zu schmale Form annehmen, sondern das für ABAQUS erforderliche Seitenverhältnis erfüllen (siehe *aspect ratio* S. 48). Letztlich begrenzt das Leistungsvermögen der Berechnungsumgebung eine unendliche Netzverfeinerung, da die Elementanzahl mit der Rechenzeit (CPU-Zeit) korreliert.

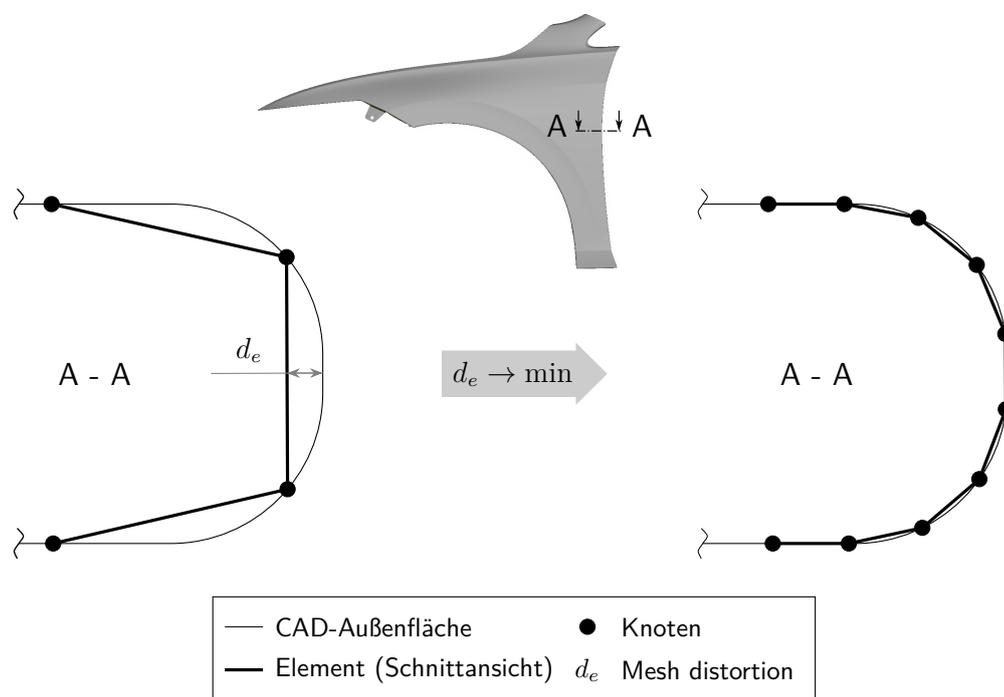


Abb. 5-3: Netzauflösung im Bereich der Radien

Zu diesem Zweck fungiert eine Konvergenzanalyse der Genauigkeits-Rechenzeit-Funktion, welche von der Elementkantenlänge l_e abhängt, zur Ermittlung einer optimalen Netzauflösung. Das zuvor idealisierte Kotflügelmodell (ohne Verstärkung) wird dazu in vier Varianten mit dem in ANSA

verfügbaren Bordmittel *batch Mesh* automatisiert mit Elementen erster Ordnung vernetzt, wobei hauptsächlich Viereckselemente (*quads*) zum Einsatz kommen. Die vier Varianten unterscheiden sich dadurch, dass der Zielwert für die Elementkantenlänge (*target length*) l_e sukzessiv von 10 mm über 5; 2 auf 1 mm sinkt. Im Anschluss wird jede Netzversion mit einem elastischen Materialmodell (siehe Abs. 5.1.2) komplettiert und an den Anschraubpunkten mit definierten Verschiebungen gelagert. Dieser Lastfall (s. Anhang A) bleibt für jede der vier Versionen identisch und bildet eine gängige Deformation im Rahmen der Meisterbockmontage ab. Als Resultat einer durchgeführten Berechnung in ABAQUS (Einstellungen s. Abs. 5.3) stellt Abbildung 5-4 ein exemplarisches Verformungsbild des Kotflügels nach besagtem Lastfall im Vergleich zur ursprünglichen CAD-Geometrie dar.

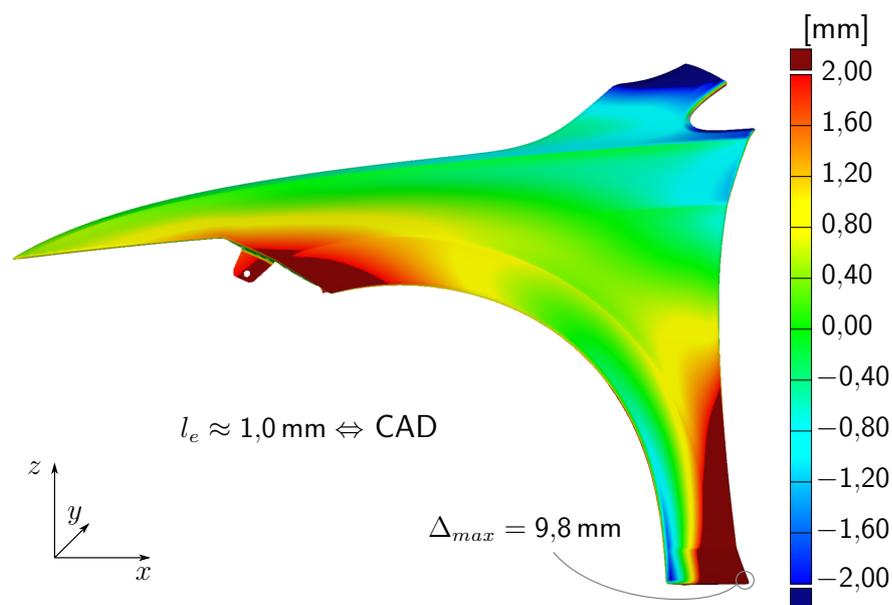


Abb. 5-4: Exemplarische Verformung des Kotflügels zur Konvergenzuntersuchung der Netzauflösung im Flächenvergleich zur CAD-Geometrie

Die Ergebnisse für die vier Netzversionen dieser Untersuchung fasst das Diagramm 5-5 zusammen: Durch die Senkung der Elementkantenlänge steigt die Elementanzahl von ca. 8200 ($l_e \approx 10,0 \text{ mm}$) um etwa das 45-fache auf 372 000 ($l_e \approx 1,0 \text{ mm}$), wobei die Rechenzeit um das 12-fache von rund $t_R = 30 \text{ s}$ auf $t_R = 360 \text{ s}$ anwächst (Soft- und Hardwarekonfiguration siehe Abschnitt 4.2.2). Dem gegenüber wird zur Beurteilung der Genauigkeit der Simulationsergebnisse die maximale Verschiebung im Gesamtmodell herangezogen und im Diagramm an der y -Achse aufgetragen. Während der Ort der maximalen Verschiebung unabhängig vom Netz nahezu gleich bleibt, variiert hingegen dessen Betrag um bis zu $\approx 0,9 \text{ mm}$, was die Bedeutung eines ausreichend fein vernetzten Modells im Hinblick auf Genauigkeitsanforderungen unterstreicht.

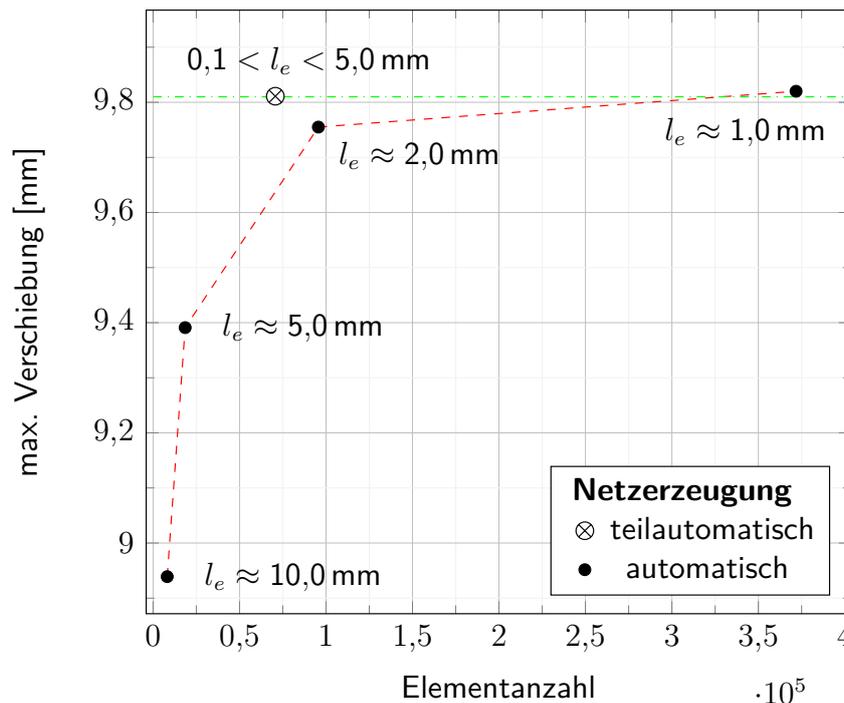


Abb. 5-5: Konvergenzanalyse Netzauflösung. Automatisch erzeugte FE-Netze besitzen nahezu konstante Elementkantenlängen l_e , während bei der teilautomatischen Vernetzung die Elementkantenlänge von der Flächenkrümmung abhängt und somit variiert.

Eindeutig zu erkennen ist in Abbildung 5-5, dass der maximale Verschiebungswert gegen $\approx 9,82$ mm konvergiert, da die Differenz zwischen den Netzversionen mit $l_e \approx 2,0$ mm und $l_e \approx 1,0$ mm bereits sehr gering ausfällt. Obwohl die letztere Netzvariante demnach den gestellten Qualitätsanforderungen gerecht würde, birgt sowohl die hohe Rechenzeit als auch die Netzauflösung an den Kanten noch weiteres Verbesserungspotential. Konkret lässt sich das durch ein krümmungsabhängiges Netz bewerkstelligen, indem u.a. Kanten und Bereiche um RPS-Punkte mit notwendigerweise kleineren Elementen versehen werden, wohingegen nur leicht oder kaum gekrümmte Flächen entsprechend gröbere Elemente erhalten. Als Resultat sinkt die Elementanzahl des Modells bei gleichbleibend hoher Genauigkeit. Der Idealfall wäre an dieser Stelle ein Vernetzungsalgorithmus, der die Elementkantenlänge abhängig von der Krümmung des Bauteils automatisch anpasst. Jedoch existiert zum Bearbeitungszeitpunkt dieses Projektes zumindest im verwendeten ANSA Pre-Prozessor keine geeignete Methode, welche die Kriterien ohne manuelle Eingriffe erfüllt. Stattdessen wird das automatisch erzeugte Netz mit einer Zielkantenlänge von $l_e \approx 5,0$ mm in den erforderlichen Bereichen händisch adaptiert, bis der als *mesh distortion* bezeichnete Sehn- oder Diskretisierungsfehler zwischen FE-Netz und CAD-Geometrie weniger als 0,02 mm beträgt (siehe Abs. 4.2). Das Resultat dieser teilautomatisierten Netzerzeugung zeigt Abbildung 5-6. Es besteht zu 97 % aus Viereckselementen $S4$ sowie zu 3 % aus Dreieckselementen $S3$ die jeweils auf linearen Ansatzfunktionen basieren und weist insgesamt eine deutlich geringere Elementanzahl als die Variante mit $l_e \approx 1,0$ mm auf. Dennoch entspricht dessen maximaler Verschiebungswert mit 9,81 mm nahezu dem Ergebnis der Konvergenzanalyse in Abbildung 5-5 und benötigt lediglich

$t_R \approx 120$ s Rechenzeit (Soft- und Hardwarekonfiguration siehe Abschnitt 4.2.2).

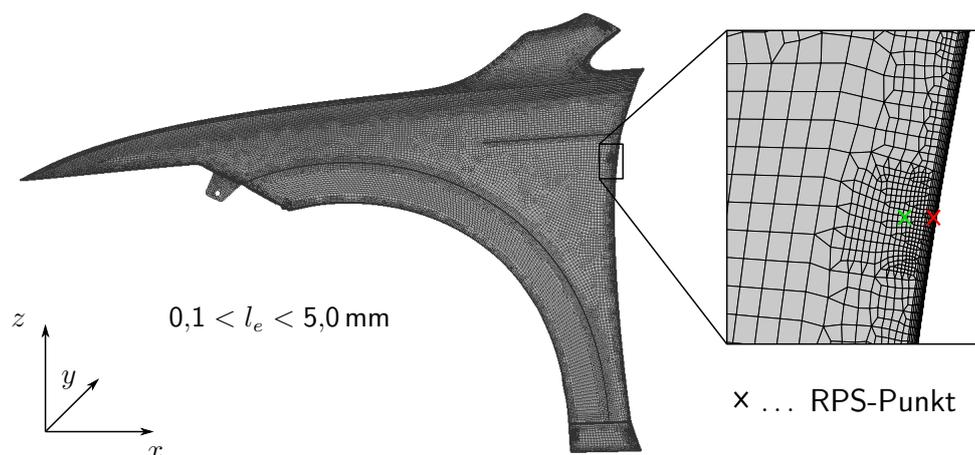


Abb. 5-6: Optimiertes FE-Netz des Kotflügels mit hoher Auflösung an den Kanten und im Bereich von RPS-Punkten (Elementanzahl: 70 683)

Um die Bewertung der Netzgüte nicht nur auf den maximalen Verschiebungswert zu stützen, werden die verformten Netze im Bild 5-7 jeweils vollflächig zum Referenznetz mit $l_e \approx 1,0$ mm verglichen und die Abweichungen anhand einer Farbskala aufgetragen. Während insbesondere die Netzvariante a) mit $l_e \approx 5$ mm großflächige Differenzen aufweist, reduzieren sich bei b) die Abweichungen auf weniger als 0,1 mm. Hierbei wurde die Elementkantenlänge lediglich annähernd

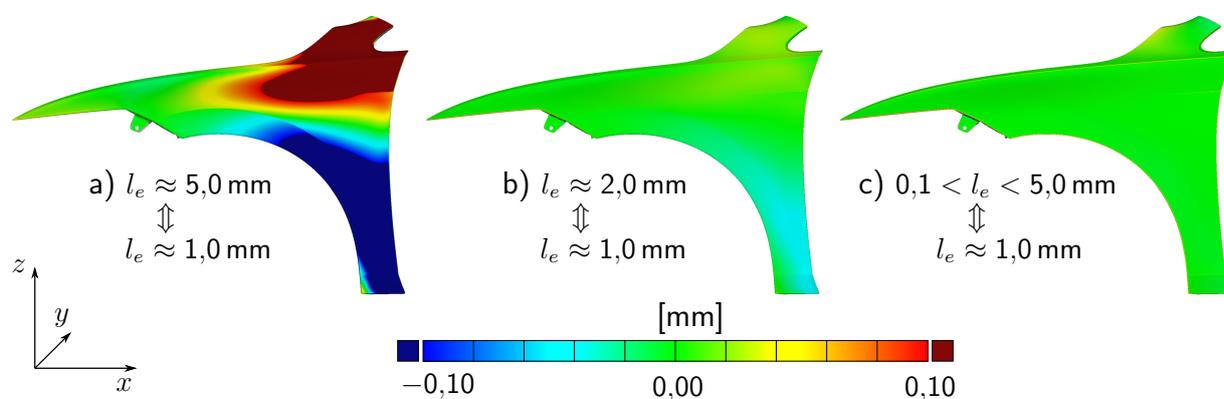


Abb. 5-7: Ergebnisse der Konvergenzanalyse zur Netzauflösung. Abgleich der Simulationsergebnisse untereinander. Als Referenz für die Flächenvergleiche dient das automatisch generierte Netz mit $l_e \approx 1,0$ mm.

auf 2 mm halbiert. Beim dritten, teilautomatisch erzeugten Netz sinken die Differenzen noch weiter und tendieren gegen Null. Somit lässt sich schlussfolgern, dass die krümmungsabhängige Netzauflösung optimale Voraussetzungen bereitstellt, um möglichst genaue Ergebnisse bei gleichzeitig moderater Rechenzeit zu erzielen. Die Simulationsdauer einer Berechnung spielt insbesondere deshalb eine Rolle, weil ein iterativer Ansatz zur Bauteilausrichtung nach RPS die einzelnen Rechenzeiten kumuliert und damit auch relative kurze Iterationsschleifen in der Summe zu langwierigen Berechnungen führen können.

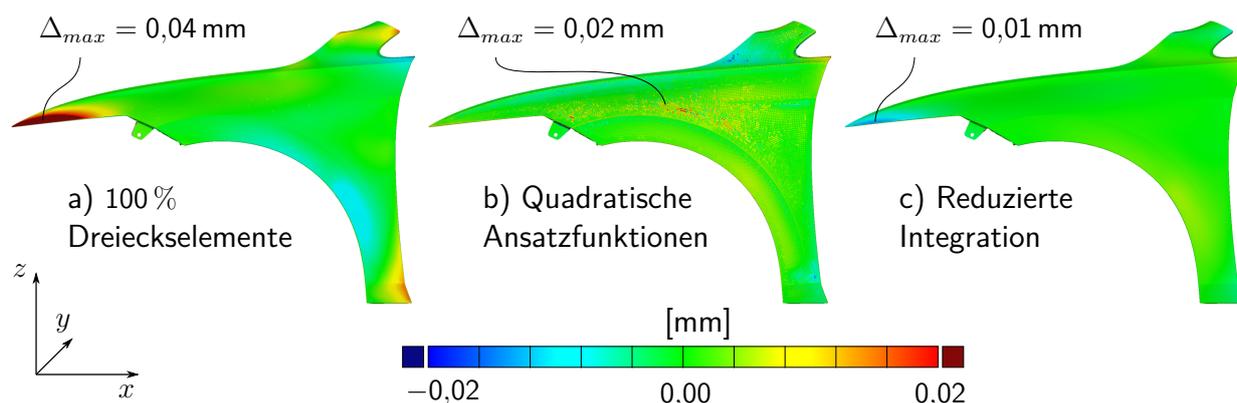


Abb. 5-8: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse spezifischer Netzeinstellungen. Abgleich der Simulationsergebnisse untereinander. Als Referenz für die Flächenvergleiche dient das krümmungsbasierte Netz mit $0,1 < l_e < 5,0$ mm.

Um das Potential des krümmungsbasierten Netzes weitestgehend vollständig auszuschöpfen, soll zusätzlich der Einfluss von Dreieckselementen, dem Polynomgrad der Ansatzfunktionen und die Anzahl an Integrationspunkten je Element analysiert werden. Dabei gestaltet sich die Vorgehensweise wie folgt: Während die Knotenpunkte des krümmungsbasierten Netzes zu identisch bleiben, wird in drei separaten Simulationen jeweils einer der benannten Merkmale adaptiert. In der ersten Simulation sind die oben erwähnten 97% der $S4$ -Elemente komplett in $S3$ -Elemente überführt worden und das folglich erzeugte Ergebnis wird in Abbildung 5-8 unter a) mit dem ursprünglichen $S4$ -Netz verglichen. Absolut betrachtet ergeben sich demnach an der Spitze relative geringe Abweichungen von maximal 0,04 mm, die in Summe mit anderen Einflussfaktoren ggf. jedoch nicht zu vernachlässigen sind. Zu Gunsten der Genauigkeit werden deshalb die Viereckselemente trotz des höheren Vernetzungsaufwandes beibehalten.

Die Fehlfarbandarstellung b) in Abbildung 5-8 bezieht sich auf den Vergleich zwischen linearen und quadratischen Ansatzfunktionen, wobei die Knotenkoordinaten sowie die Elementtypen bei beiden Versionen bestehen bleiben. Die sichtbaren Differenzen der verformten Geometrien von maximal 0,02 mm sind auf die zusätzlichen Knoten der Elemente zweiter Ordnung zurückzuführen. In diesen Bereichen befinden sich aufgrund der geringen Krümmung relativ große Elemente, welche die Geometrie etwas gröber diskretisieren. Dennoch wird die vorgegebene *mesh distortion* von 0,02 mm auch im Fall von linearen Ansatzfunktionen eingehalten und lässt sich damit als hinreichend genau annehmen. Außerdem existieren bei den hervorgerufenen Bauteilverformungen ebenfalls nahezu keine Unterschiede, weshalb es sinnvoll erscheint, die Elemente erster Ordnung zu verwenden. Diese erweisen sich zudem robuster gegenüber großen Netzverzerrungen bei gleichzeitig vertretbaren Rechenzeiten.

Die dritte Stellschraube betrifft die Anzahl an Integrationspunkten pro Element. Dabei gilt es herauszufinden, ob sich ggf. die Recheneffizienz bei konstanter Genauigkeit erhöhen lässt. ABAQUS bietet an dieser Stelle eine Funktionalität, die vorhandenen Elemente auf *reduced integration* um-

zustellen, indem die Elementtypen gewechselt werden. Somit reduziert sich beispielsweise die ursprüngliche Zahl von vier Integrationspunkten bei *S4* Elementen auf nur einen Punkt bei *S4R*. [58] Da diese Maßnahme gemäß Abbildung 5-8 c) jedoch zu einer leichten maßlichen Abweichung führt und der Zeitgewinn lediglich 5 s je Rechnung beträgt, erscheint deren Einsatz nicht als zweckmäßig. Stattdessen wird auch wegen des inhärenten Schutzes vor *hourglass*-Effekten auf die reduzierte Integration verzichtet.

Verstärkungsteil

Aufgrund der höheren Blechdicke und einer insgesamt größeren Eigensteifigkeit des Verstärkungsteils sind bei einschlägigen Lastfällen geringere Deformationen zu erwarten. Somit birgt die Netzauflösung eine weniger große Bedeutung für die Genauigkeit des Simulationsergebnisses als es beim Außenteil der Fall ist. Außerdem grenzt das Verstärkungsteil an keiner Stelle direkt zu benachbarten Sichtteilen an, sodass auch Netzverfeinerungen zum Zweck einer optimalen Fugenauswertung entfallen. Demnach verringern sich die Qualitätsanforderungen an das Netz und es genügt eine automatisierte Vernetzung anhand des *batch mesh* Algorithmus mit einer Elementkantenlänge (*target length*) von $l_e = 4$ mm.

Zusammenfassung

Letztlich werden die gewonnen Erkenntnisse zur Vernetzung des Kotflügels und den daraus abgeleiteten Netzparameter für die VMB-Simulation des Kotflügels in Tabelle 5-1 zusammengefasst. Das derart optimierte Netz stellt einen pragmatischen Kompromiss aus Genauigkeit und Rechenzeit dar und bildet die Basis für die nachfolgenden Untersuchungen. Die Implementierung erfolgt gemäß ABAQUS Eingabe 5.1.

Tab. 5-1: Verwendete Einstellungen für krümmungsbasierte Netze

Kriterium	Außenteil	Verstärkungsteil
max. Sehnenfehler d_e	0,02 mm	0,04 mm
Elementkantenlänge l_e	$0,1 < l_e < 5,0$ mm	$1,4 < l_e < 5,0$ mm
Anteil <i>S4</i> Elemente	> 97 %	> 97 %
Polynomgrad Ansatzfunktion	erste Ordnung	erste Ordnung
Integration	voll	voll

```

1 *NODE
2 -- 76473 Zeilen: #n, x, y, z
3 *ELEMENT, TYPE=S4

```

```
4 -- 71055 Zeilen: #e, #n, #n, #n, #n
5 *ELEMENT, TYPE=S3
6 -- 2129 Zeilen: #e, #n, #n, #n
```

Abaqus Eingabe 5.1: Definition der gewählten Elementtypen

5.1.2 Materialmodellierung

Die Art und Weise der Materialcharakterisierung der Werkstücke spielt eine wesentliche Rolle in Bezug auf die Genauigkeit der Ergebnisse. Trotzdem erweist es sich in vielen Fällen als Vorteil, einen Kompromiss aus Komplexität und Rechenperformance anzustreben. Je mehr Nichtlinearitäten ein Materialmodell enthält, desto komplexer werden die zugrundeliegenden mathematisch-physikalischen Zusammenhänge und damit einhergehend der numerische Aufwand zur Lösung des mechanischen Gleichgewichts. Daher wird das Materialverhalten hier als isotrop-elastisch angenommen, da die Verformungen beim Meisterbockaufbau im Regelfall nicht die Dehngrenze der Materialien überschreiten und die Bauteile nach der Demontage wieder in den Ausgangszustand zurückkehren. Unter der Voraussetzung das die Herstellungshistorie der Bauteile vernachlässigt wird, führen elastische und plastische Materialmodelle mit identischen E-Moduls im Rahmen der virtuellen Bauteilaufrichtung zu identischen Ergebnissen, solange sich die Belastung weitestgehend unterhalb der Dehngrenze bewegt. Deshalb kommen in diesem Kapitel zunächst elastische Materialmodelle zum Einsatz, die gemäß der ABAQUS Eingabe 5.2 definiert werden und auf den zugehörigen Werten in Tabelle 4-1 basieren.

```
1 *MATERIAL, NAME=Stahl
2 *ELASTIC, TYPE=ISOTROPIC
3 2.00e05, 0.3
4 *MATERIAL, NAME=Stuetzkleber
5 *ELASTIC, TYPE=ISOTROPIC
6 7.56e00, 0.4
```

Abaqus Eingabe 5.2: Definition elastischer Materialmodelle für Stahl und Stützkleber

5.1.3 Mapping

Hinsichtlich des in Abbildung 3-1 entwickelten Regelkreises zur Exterieur-Bauteilqualifizierung wird sowohl für die virtuelle als auch für die physische Qualifizierungsschleife dieselbe Prüfinstanz vorgesehen. Im Regelfall existiert jedoch weder für Mess- noch für Simulationsergebnisse eine direkte Schnittstelle für deren Weiterverarbeitung. Demnach bedarf es einer Funktionalität, welche die Berücksichtigung unterschiedlicher Ist-Zustände im VMB gewährleistet. In der Literatur

oder einschlägigen Softwaresystemen findet sich häufig die Bezeichnung *Morphing* für das Adaptieren einer virtuellen Nominalgeometrie bis diese einer abweichenden Ist-Geometrie entspricht. Dahingegen wird *Mapping* überwiegend für das Übertragen von physikalischen Zustandsgrößen wie Spannung, Dehnung oder Blechdicke zwischen verschiedenen Netzen verwendet. Im Rahmen dieses Projektes soll *geometrisches Mapping* als Synonym für *Morphing* gelten.

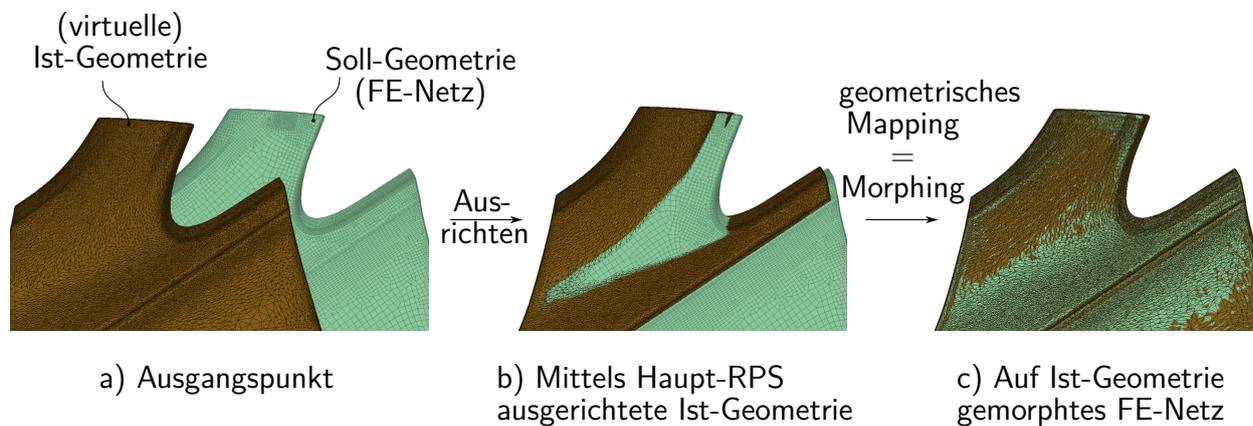


Abb. 5-9: Geometrisches Mapping/ Morphing

Das in Abbildung 5-9 gezeigte geometrische Mapping (Morphing) dient zur Integration der Ist-Geometrie, die entweder aus einer optischen Messung oder einer vorgelagerten Simulation stammen kann, in das Simulationsmodell des VMB. Der Ausgangspunkt (a) gestaltet sich derart, dass zwischen Ist- und Soll-Geometrie eine räumliche Distanz vorliegt, da die Bauteile auf unterschiedliche Koordinatensysteme referenzieren. Das auf der CAD-Konstruktion basierte FE-Netz befindet sich im vordefinierten Fahrzeugkoordinatensystem und ist somit vollständig im RPS-System ausgerichtet, während die Ist-Geometrie mithilfe von GOM INSPECT über die Haupt-RPS positioniert werden muss (b). Der dritte Schritt beinhaltet das eigentliche geometrische Mapping des FE-Netzes auf die Ist-Geometrie und kann anhand unterschiedlicher Ansätze stattfinden. Beispielsweise bietet sich das zu diesem Zweck in ANSA verfügbare Werkzeug *Nominal2Real* an, jedoch erfüllt es die notwendigen Genauigkeitsanforderungen nicht ohne aufwendige manuelle Eingriffe. Stattdessen kommt ein VW interner Mapping-Algorithmus zum Einsatz, welcher im Vergleich zu *Nominal2Real* eine höhere Präzision erzielt. Abbildung 5-10 zeigt ein exemplarisches Resultat dieses Mapping-Algorithmus, welches mittels Fehlfarbandarstellung gegenüber dem abzubildenden Ergebnis einer optischen Messung im STL-Format verglichen wird. Demnach fallen die Differenzen im relevanten Sichtbereich kleiner als 0,1 mm und an den für Fugenauswertungen wichtigen Kantenradien kleiner als 0,02 mm aus. Vorausgesetzt die Ist-Geometrie wurde in diesem Bereich hinreichend genau gemessen, korreliert die Genauigkeit der erreichten Mapping-Ergebnisses mit der krümmungsbasierten Auflösung des FE-Netzes. Je größer die Anzahl an Knotenpunkten pro Fläche, desto präziser lässt sich die Ist-Geometrie abbilden. Da das geometrische-Mapping lediglich eine Koordinatentransformation des FE-Netzes repräsentiert, werden in der ABAQUS Eingabedatei ausschließlich die x -, y - und z -Werte der Elementknoten modifiziert (siehe ABAQUS

Eingabe 5.1). Darunter kann jedoch die Netzqualität durch Elementverzerrungen leiden, wenn sich beispielsweise das Seitenverhältnis (*aspect ratio*) oder die Krümmung (*warping*, vgl. Abschnitt 4.2.4.2) der Elemente durch den Mapping-Prozess ändern. Kritische Bereiche bedürfen daher ggf. nachgelagerter manueller Eingriffe, wobei die Verwendung linearer Ansatzfunktionen auch an dieser Stelle einen Vorteil mit sich bringt: Derartige Elemente sind weniger empfindlich gegenüber starken Verzerrungen [65, S. 211].

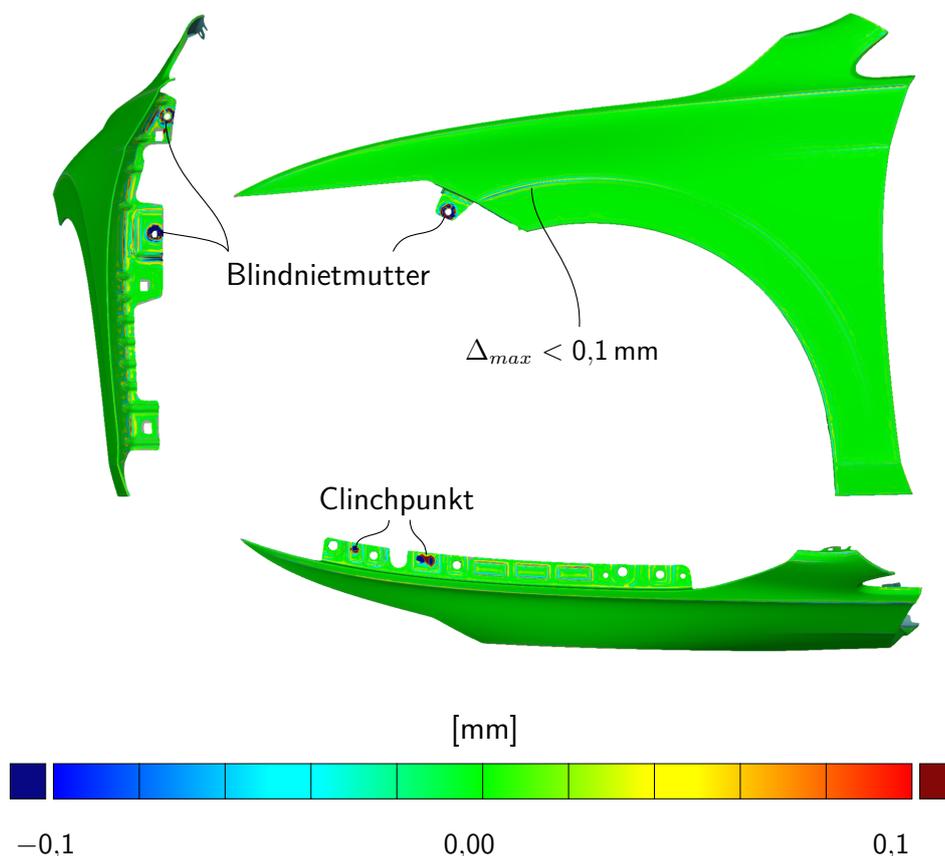


Abb. 5-10: Genauigkeit des verwendeten Mapping-Algorithmus: Fehlfarbenvergleich zwischen Messung (s. Abb. 4-6 & B1) und Mapping-Ergebnis des Kotflügelaußenteils

Auf den Punkt gebracht wird beim Mapping der beliebig abweichende Zustand eines Ist-Bauteils aus der virtuellen oder der physischen Prozesskette in das Simulationsmodell transferiert. Die erzeugten Prototypen lassen sich so im virtuellen Prüfprozess reproduzieren und anschließend qualifizieren. Welche Größen dafür herangezogen werden, hängt letztlich von den verfügbaren Daten und dem Analyseziel ab. Während die Bedeutung der physikalischen Zustandsgrößen im nachfolgenden Kapitel zur VPK analysiert wird, soll hier zur Methodenentwicklung und Validierung der Fokus zunächst ausschließlich auf der Geometrie liegen.

5.1.4 Zusammenbau

Der virtuelle Zusammenbau der beiden Modelle für das Außen- und das Verstärkungsteil des Kotflügels besteht aus einer volumetrischen Nachbildung der Stützklebernaht und drei Ersatzelementen für die Clinchpunkte. Abbildung 5-11 zeigt den durch die Volumenelemente *C3D8* verkörperten Stützkleber, welcher durch die entsprechenden Materialdaten aus Tabelle 4-1 charakterisiert ist. Die Verbindung zwischen den Knoten der Volumenelemente (*Solids*) und der Schalelemente (*Shells*) wird mittels *TIE*-Kontakt implementiert, sodass der Kleber jeweils starr mit den Blechteilen gekoppelt ist und durch Relativbewegungen deformiert werden kann. Dahingegen sind die Blechteile an den Clinchpunkten direkt starr über je ein *Fastener*-Element verbunden.

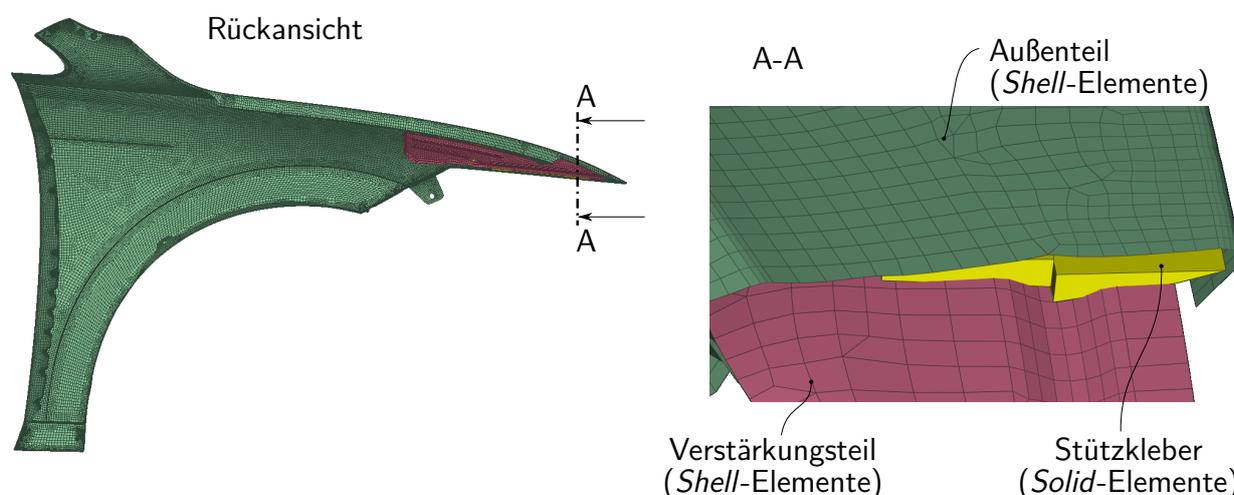


Abb. 5-11: Virtueller Zusammenbau der Einzelteilmodelle. Die Verbindung zwischen Stützkleber und Außen- sowie Verstärkungsteil wird jeweils über eine starre Kontaktdefinition (*TIE*) bewerkstelligt.

5.1.5 Berücksichtigung des Gravitationseinflusses

Nachdem das Gesamtmodell des Kotflügels zusammengefügt ist, gilt es die durch Gravitation hervorgerufenen Verformungen des realen Bauteils in der Messaufnahme zu beurteilen. Die optische Messung ist mittels der in Abbildung 4-6 dargestellten freien Messaufnahme ohne Spannhilfen erfolgt. Um die zu erwartenden Gravitationseinflüsse möglichst gering zu halten, wurden die Auflagepunkte dabei so konzeptioniert, dass möglichst geringe Hebelarme für die Schwerkraft entstehen. Aufgrund der geringen Steifigkeit des Bauteils muss der Einfluss dennoch untersucht werden. Zu diesem Zweck werden drei Lagerpunkte für das auf die Messung gemorphte Gesamtmodell definiert (s. Abb. 4-6 a), welche analog der physischen Messaufnahme positioniert sind (s. Abb. 4-6). Bei den FE-Repräsentation der Auflager *BC-Grav-1* und *-2* dient jeweils ein *Coupling* mit einem Suchradius von 10 mm zur Abbildung der Auflagezylinder, welche einen Durchmesser von 20 mm besitzen. Zudem wird die Fallbeschleunigung g in zur Messung entgegengesetzter

Richtung definiert, um die durch Gravitation induzierte Verformung subtrahieren. Die generische Umsetzung im FE-Solver wird in der ABAQUS Eingabe 5.3 beschrieben.

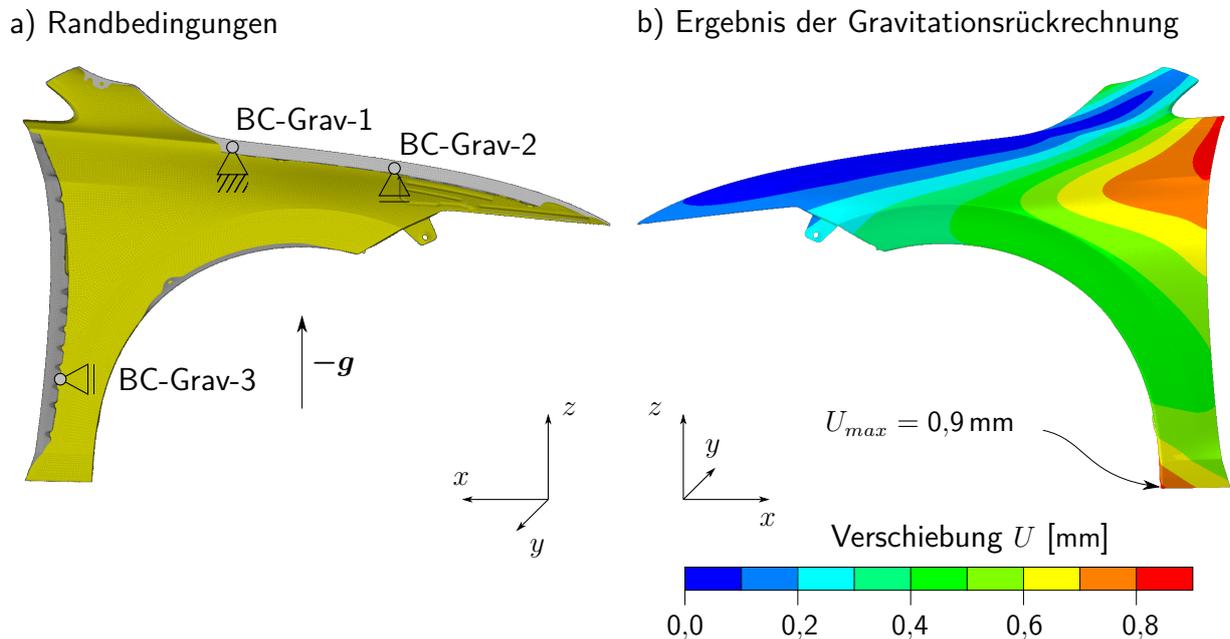


Abb. 5-12: Gravitationsrückrechnung: a) Randbedingungen im Simulationsmodell und b) resultierende Verschiebungen durch umgekehrte Gravitationslast

Die resultierenden Verschiebungen in Abbildung 5-12 b) zeigen Verformungen von bis zu $U_{max} = 0,9 \text{ mm}$, weshalb die Berücksichtigung des Gravitationseinflusses für die weitere Vorgehensweise als notwendig angenommen wird. Die ABAQUS Scripting Methode *PartFromOdb(...)* (Details siehe Abaqus Scripting Reference Guide [74]) dient anschließend dazu, dass Ergebnis der Gravitationsrückrechnung für den Folgeprozess in ein spannungsfreies FE-Netz zu überführen.

```

1  *COUPLING, CONSTRAINT NAME=coupling_BC-Grav-1, REF NODE=node_BC-
    Grav-1, SURFACE=set_BC-Grav-1
2  *KINEMATIC
3      1,      6
4  *COUPLING, CONSTRAINT NAME=coupling_BC-Grav-2, REF NODE=node_BC-
    Grav-2, SURFACE=set_BC-Grav-2
5  *KINEMATIC
6      1,      6
7  *STEP, NAME=minusGrav, NLGEOM=YES
8  *STATIC
9  *DLOAD
10 , GRAV,      9810., -0.112, 0.083,  0.99
11 *BOUNDARY, TYPE=DISPLACEMENT
12 node_BC-Grav-1, 1, 3, 0.

```

```

13 node_BC-Grav-2,      2,      3,      0.
14 node_BC-Grav-3,      2,      ,      0.
15 *END STEP
    
```

Abaqus Eingabe 5.3: Definition der Lagerung zur Rückrechnung des Gravitationseinflusses in der ABAQUS Eingabedatei

5.1.6 Lagerungen & Lasten

Der physische Kotflügel wird am AMB analog zur Fahrzeugmontage über die entsprechenden Anschraubpunkte befestigt (vgl. Abb. 4-1). Da insbesondere für die iterative RPS-Ausrichtung eine detaillierte Modellierung der Schraubenverbindungen zu ineffizient wäre, bedarf es einer geeigneten Idealisierung. Dabei muss gleichzeitig sichergestellt werden, dass die Positionen der Lagerungen im Nachgang durch einen Optimierungsalgorithmus adaptierbar sind. Außerdem sollte ebenfalls die räumliche Neigung der realen Anschraubflächen berücksichtigt werden, da diese durchaus von der Soll-Geometrie abweichen können und somit sowohl Lage als auch Form des montierten Kotflügels beeinflussen.

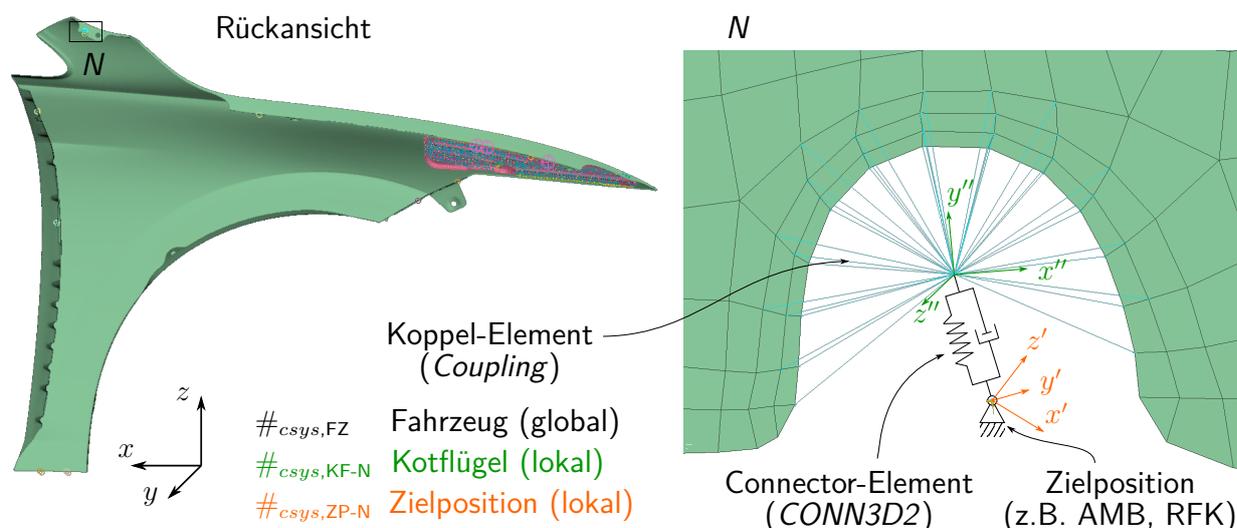


Abb. 5-13: Exemplarische Lagerung des Anschraubpunktes N mittels Connector-Element und Coupling

All die genannten Anforderungen lassen sich in ABAQUS durch den Einsatz von geeigneten Connector-Elementen erfüllen, die mit spezifischen Eigenschaften ausgestattet sind. Abbildung 5-13 stellt das Prinzip der entwickelten Methode dar: Der geometrische Mittelpunkt einer Bohrung bzw. in diesem Fall einer Gabelöffnung fungiert als Referenzpunkt und wird mittels Coupling mit den umliegenden Knoten gekoppelt. Der Umkreis der dabei eingeschlossenen Knoten entspricht jeweils etwa dem Durchmesser der verwendeten Unterlegscheibe. Den entscheidenden Beitrag zur Lagercharakteristik trägt dann das zwischen Referenzpunkt und der Zielposition (z.B. AMB,

RFK) eingefügte *CONN3D2* Connector-Element und deren spezifisch definierten Eigenschaften bei.

Für die besagten Eigenschaften sind in *ABAQUS* diverse Connector-Typen verfügbar, die je nach Auswahl und Kombination ein bestimmtes mechanisches Verhalten bewirken. Hinsichtlich der oben aufgeführten Anforderungen wird durch den Einsatz des translatorischen Bewegungstyps *Axial* und des rotatorischen Bewegungstyps *Projection Flexion-Torsion* das erwünschte Verhalten erzielt (siehe *ABAQUS* Eingabe 5.4). Zusätzlich müssen die Referenzlängen und -winkel (*Constitutive Reference*) des Connector-Elements auf Null gesetzt werden. Somit wird die Verschiebung und Drehung des Anschraubpunktes zur Zielposition erzwungen, da abweichende Referenzlängen bzw. -winkel innere Rückstellkräfte in Axialrichtung bzw. Rückstellmomente um die lokalen Achsen des Connector-Elements erzeugen. Abhängig von der Steifigkeit des Bauteils müssen die Elastizitäts- und Dämpfungswerte des Connectors aus diesem Grund ausreichend hoch definiert sein, um eine präzise Ausrichtung zu gewährleisten. Ausgehend vom Anzugsmoment der verwendeten Schrauben lassen sich die erforderlichen Steifigkeitswerte auf 200 000 N/mm in axialer Richtung und auf 720 000 Nmm/rad in radialer Richtung dimensionieren (Details s. Anhang C). Infolgedessen wird einerseits der lokale Koordinatenursprung des Kotflügels (grün) auf den in der Zielposition (nominal CAD, AMB oder RFK) liegenden Ursprung (orange) verschoben. Andererseits erfolgt gleichzeitig die parallele Ausrichtung der beiden lokalen *xy*-Ebenen, welche in der jeweiligen Anschraubfläche liegen, indem die bewegliche Ebene des Kotflügels auf die fixierte Fläche an der Zielposition gedreht wird.

Illustrativ zusammengefasst bewerkstelligen derart implementierte Connectoren, dass Bohrungen oder Gabelöffnungen des Kotflügels konzentrisch und planparallel auf das entsprechende Gegenstück des AMBs oder einer RFK gezogen und dann dort gehalten werden werden. Um die Lage und Form des Kotflügels in der späteren virtuellen RPS-Ausrichtung zu manipulieren, braucht es lediglich einer Anpassung der Randbedingungen (*Boundary conditions*) des Knotens, welcher die Zielposition repräsentiert.

```
1  *ELEMENT , TYPE=CONN3D2 , ELSET=conn_N
2  #e , #n , #n
3  *CONNECTOR SECTION , ELSET=conn_N , BEHAVIOR=conn_behavior_N
4  AXIAL , PROJECTION FLEXION-TORSION
5  #csys,KF-N , #csys,ZP-N
6  *CONNECTOR BEHAVIOR , NAME=conn_behavior_N
7  *CONNECTOR CONSTITUTIVE REFERENCE
8  0 , 0 , 0 , 0 , 0 , 0
9  *CONNECTOR ELASTICITY , COMPONENT=1
10 200000 , 0
11 *CONNECTOR ELASTICITY , COMPONENT=4
12 720000 , 0
```

```

13 *CONNECTOR ELASTICITY , COMPONENT=5
14 720000 , 0
15 *CONNECTOR DAMPING , COMPONENT=1
16 1 , 0
17 *CONNECTOR DAMPING , COMPONENT=4
18 0.1 , 0
19 *CONNECTOR DAMPING , COMPONENT=5
20 0.1 , 0

```

Abaqus Eingabe 5.4: Exemplarische Definition der Lagerung für Anschraubpunkt N mithilfe eines *Connector*-Elements in der ABAQUS Eingabedatei

5.2 Modellierung der virtuellen Bauteilausrichtung

5.2.1 Präzisierung der Zielfunktionen

Mit Blick auf die in Abschnitt 4.1.2 beschriebene indirekte Vorgehensweise zur RPS-Ausrichtung des physischen Kotflügels am AMB muss auch das Simulationsmodell der jeweiligen Ist-Geometrie in Übereinstimmung mit dem Referenz-Punkt-System ausgerichtet werden, um eine wiederholgenaue Qualifizierung zu gewährleisten. Geometrisch besteht das Ziel des Ausrichtprozesses darin, die räumlichen Abstände zwischen Soll- und Ist-Lage (siehe Abb. 2-19) sowohl der Haupt- als auch der Neben-RPS-Punkte zu minimieren. Um diesen Sachverhalt in ein mathematisches Äquivalent zu überführen, werden die nach Gleichung (2-1) berechneten Abweichungen (ΔRPS) quadriert und anschließend aufsummiert. Das Quadrieren birgt gegenüber des Absolutwertes den Vorteil einer inhärenten Gewichtung großer Abweichungen und damit einer potentiell höheren Konvergenzgeschwindigkeit. Aus Gründen der Lesbarkeit wird $\delta_i \equiv \Delta RPS_i$ festgelegt, sodass sich die Zielfunktion zunächst wie in (5-1) darstellt.

$$\min \left\{ \sum_{i=1}^{n_{RPS}} \delta_i^2 \right\} \quad \text{mit} \quad \boldsymbol{\delta}^T = (\delta_1, \dots, \delta_{n_{RPS}}) \quad (5-1)$$

Zur Lösung dieser Zielfunktion dürfen aus mechanischer Perspektive keine externen Kräfte, Momente oder Verschiebungen direkt an den RPS-Punkten eingebracht werden, denn das reale Bauteile ist im montierten Zustand ausschließlich an den Anschraubpunkten statisch gelagert. Stattdessen fungieren eben die Positionen der Befestigungspunkte des Kotflügels am darunterliegenden Gegenstück als variierbare Stellgrößen und werden mittels kartesischer Koordinaten im Vektor der Entwurfsvariablen zusammengefasst. Da im vorliegenden Fall zehn dieser Anbindungen existieren ($n_{AP} = 10$) und jeder davon jeweils drei lokale Translationsfreiheitsgrade (x', y', z') sowie drei lokale Rotationsfreiheitsgrade (α', β', γ') besitzt, summiert sich die Zahl der Variablen

auf $n_{DOF} = 60$ und somit erhält auch der Entwurfsvektor φ 60 Einträge.

$$\varphi^T = (x'_1; y'_1; z'_1; \alpha'_1; \beta'_1; \gamma'_1; \dots; x'_{n_{AP}}; y'_{n_{AP}}; z'_{n_{AP}}; \alpha'_{n_{AP}}; \beta'_{n_{AP}}; \gamma'_{n_{AP}}) \quad \text{mit} \quad n_{AP} = 10 \quad (5-2)$$

Ein solcher Vektor beinhaltet demnach genau eine mögliche Montageposition von theoretisch unendlich vielen. Das Ziel besteht jedoch darin, eine solche Montageposition bzw. einen Lösungsvektor zu finden, welcher die Gleichung 5-1 erfüllt. Diese Aufgabe stellt ein Optimierungsproblem dar, das durch folgende Restriktionsformulierung spezifiziert wird:

$$\varphi_j^l \leq \varphi_j \leq \varphi_j^u \quad \text{mit} \quad j = 1, \dots, n_{DOF} \quad (5-3)$$

Gemäß Abbildung 4-3 existiert an jedem Befestigungspunkt ein bestimmtes Spiel zwischen Bolzen und dem zugehörigen Geometriemerkmal des Kotflügels (Bohrung, Gabelöffnung, Langloch, etc.), sodass auch das Spektrum der Anschraubpunktpositionen in den lokalen Koordinatensystemen beschränkt sein muss. Daher wird für jeden Eintrag φ_j des Entwurfsvektors φ eine untere Grenze (*lower bound*) φ_j^l und eine obere Grenze (*upper bound*) φ_j^u definiert [75, S. 47].

$$x'^2 + y'^2 \leq c^2 \quad (5-4)$$

Um sicherzustellen, dass die Geometrie von kreisförmigen oder teilkreisförmigen Aussparungen berücksichtigt wird, müssen die entsprechenden oberen und unteren Grenzen in Relation gesetzt werden. Wenn das lokale Koordinatensystem konzentrisch in einer kreisrunden Bohrung oder mittig in einem Langloch platziert ist (siehe Abbildung 4-3), gilt die zusätzliche Restriktion (5-4) in den kreisrunden Bereichen. Demnach reduziert sich der Bereich zulässiger Lösungsmengen auf einen Kreis mit dem Radius des Spiels zwischen Bohrung und Schraube c um den Bohrungsmittelpunkt.

$$-T_{RPS} \leq \delta_i \leq T_{RPS} \quad \text{mit} \quad i = 1, \dots, n_{RPS} \quad (5-5)$$

Das Optimierungsproblem gilt als gelöst, wenn innerhalb des zulässigen Lösungsraumes ein Minimum gefunden wird, bei dem zusätzlich alle RPS-Abweichungen kleiner als $T_{RPS} = 0,05$ mm sind. Auf diese Weise soll vermieden werden, dass sich in Summe größere durch kleinere Differenzen gegenseitig ausgleichen. Stattdessen muss jeder RPS-Bereich gleichermaßen möglichst nah an die Soll-Position heranrücken, damit die Ergebnisgeometrie wiederholgenau zur Bauteilqualifizierung weiterverarbeitet werden kann. Zur praktischen Umsetzung der virtuellen Ausrichtung wird die unter (5-1) postulierte Gleichung im ersten Schritt zur *Zielfunktion* I erweitert (in Anlehnung an

[76]):

$$\omega_I^*(\varphi_I^*) = \min_{\varphi} \{ \omega_I(\varphi) \mid \varphi \in \Phi \} = \min_{\varphi} \left\{ \sum_{i=1}^{n_{RPS}} w_i \frac{\delta_i^2(\varphi)}{s^2} \mid \varphi \in \Phi \right\}$$

mit $\Phi = \{ \varphi_j \in \mathbb{R} \mid \varphi_j^l \leq \varphi_j \leq \varphi_j^u \quad j = 1, \dots, n_{DOF} \}$ (5-6)

Demnach werden die RPS-Abweichungen in eine quadratische Funktion überführt, die vom Entwurfsvektor φ abhängt und anschließend aufsummiert. Dabei dient der Faktor w_i zur unterschiedlichen Gewichtung von Haupt- und Neben-RPS-Punkten. Außerdem lässt sich mithilfe des Skalierungsquotienten s die Dimension der Ergebnisgröße ω steuern. Hinsichtlich der oben eingeführten RPS-Toleranz muss das berechnete Minimum $\omega_I^*(\varphi_I^*)$ nicht notwendigerweise mit der globalen Lösung übereinstimmen, da der Lösungsraum wahrscheinlich mehrere Minima enthält. Für den praktischen Einsatz sollte die gefundene Lösung jedoch eine zusätzliche Anforderung erfüllen: Die potentielle Energie im montierten Zustand und damit einhergehend die erforderliche Kraft zur Montage des Kotflügels gilt es ebenfalls zu minimieren. Zu diesem Zweck wird das 0,95-Quantil der Vergleichsspannung σ_V nach *von Mises* aller Elemente des Simulationsmodells herangezogen. Die Berechnung des Quantils bietet an dieser Stelle den Vorteil, dass der Einfluss eventuell auftretender Singularitäten auf das Ergebnis der nachfolgenden *Zielfunktion* II vernachlässigbar klein wird. Darüber hinaus kommt hier die Bedeutung des Skalierungsquotienten zum tragen, indem sich die unterschiedlichen Einheiten aus RPS-Abweichungen und Vergleichsspannung in ihrer Dimension angleichen lassen.

$$\omega_{II}^*(\varphi_{II}^*) = \min_{\varphi} \{ \omega_{II}(\varphi) \mid \varphi \in \Phi \} = \min_{\varphi} \left\{ \sum_{i=1}^{n_{RPS}} w_i \frac{\delta_i^2(\varphi)}{s^2} + w_{\sigma} \frac{\sigma_{Q95}^2(\varphi)}{s_{\sigma}^2} \mid \varphi \in \Phi \right\}$$

mit $\Phi = \{ \varphi_j \in \mathbb{R} \mid \varphi_j^l \leq \varphi_j \leq \varphi_j^u \quad j = 1, \dots, n_{DOF} \}$ (5-7)

5.3 Lösungsansatz zur virtuellen Bauteilausrichtung

Infolge der hohen Anzahl von Freiheitsgraden n_{DOF} der zuvor definierten Zielfunktionen würde eine direkte Lösung der Optimierungsaufgabe einen sehr hohen Rechenaufwand nach sich ziehen, der in Anbetracht eines angestrebten operativen Einsatzes in der Qualitätssicherung zu ineffizient wäre. Daher erscheint es als logische Konsequenz das Optimierungsproblem zunächst zu kondensieren und dieses im Nachgang mit einem geeigneten Optimierungsalgorithmus zu lösen. Der Vorteil dieses Ansatzes besteht außerdem darin, dass der erste Kondensationsschritt nur einmal zu Beginn jedes Bauteilprojektes mit den CAD-Daten durchgeführt werden muss und sobald (virtuelle) Ist-Geometrien zu qualifizieren sind, kann die virtuelle Bauteilausrichtung direkt mit der Lösung des kondensierten Optimierungsproblems starten. Auf diese Weise wird ein erheblicher Teil an Rechenzeit gespart, da deutlich weniger Iterationen des Optimierungsalgorithmus notwendig sind, um ein geeignetes Minimum der Zielfunktion zu bestimmen.

5.3.1 Kondensation des Optimierungsproblems

Pragmatisch betrachtet dient die Kondensation des Optimierungsproblems dazu, herauszufinden welche Anschraubpunkte wie verschoben werden müssen, um das Bauteil nach RPS auszurichten. Im praktischen Meisterbockprozess geschieht dies häufig iterativ bzw. aus empirischer Erfahrung. Am naheliegendsten erscheinen in diesem Zusammenhang jene Kombinationen, bei denen Befestigungspunkt und RPS-Punkt räumlich möglichst nah beieinanderliegen. Dabei lässt es sich in der Regel nicht vermeiden, dass die Verrückung eines Bereichs auch gleichzeitig Einflüsse auf entferntere Bauteilabschnitte hat und umgekehrt. Als Resultat können sich dadurch unbeabsichtigte Verschiebungen und eine insgesamt ineffiziente manuelle Ausrichtungsstrategie ergeben. Die virtuellen Methodiken bieten hier einen entscheidenden Vorteil: Die enorme Menge an Einstellmöglichkeiten im Simulationsmodell lässt sich anhand einer Sensitivitätsanalyse deutlich effizienter analysieren. Um eine möglichst zuverlässige Aussage über die Korrelationen zwischen Anschraub- und RPS-Punkten zu erhalten wird dazu ein umfangreiches gleichverteiltes Testfeld generiert, welches auf dem *Latin Hypercube Design (LHD)* basiert [77, S. 198ff.].

$$c_S(r_{\varphi_i}, r_{\delta_j}) = \frac{\sum_{k=1}^l (r_{\varphi_{i,k}} - r_{\varphi_i}^-)(r_{\delta_{j,k}} - r_{\delta_j}^-)}{\sqrt{\sum_{k=1}^l (r_{\varphi_{i,k}} - r_{\varphi_i}^-)^2} \sqrt{\sum_{k=1}^l (r_{\delta_{j,k}} - r_{\delta_j}^-)^2}}$$

mit $l = \text{Anzahl der Proben}$ (5-8)

Die somit generierten Daten ermöglichen dann das Herausfiltern der zur Ausrichtung relevanten Parameter, indem für jede Kombination aus dem oben definierten Entwurfsvektor φ und der 10 RPS-Abweichungen im Ausgabevektor δ die Korrelationskoeffizienten c_S berechnet werden. Da sich die Ein- und Ausgangsvariablen untereinander gegenseitig beeinflussen, soll als Berechnungsmethode die Rangkorrelation nach SPEARMEN zum Einsatz kommen. Dabei werden im Vergleich zum Ansatz nach PEARSON die quantitativen Ergebnisse durch ihre Ränge r substituiert, sodass nichtlineare Phänomene problemlos abgedeckt sind [77, S. 387.].

5.3.2 Lösung des Optimierungsproblems

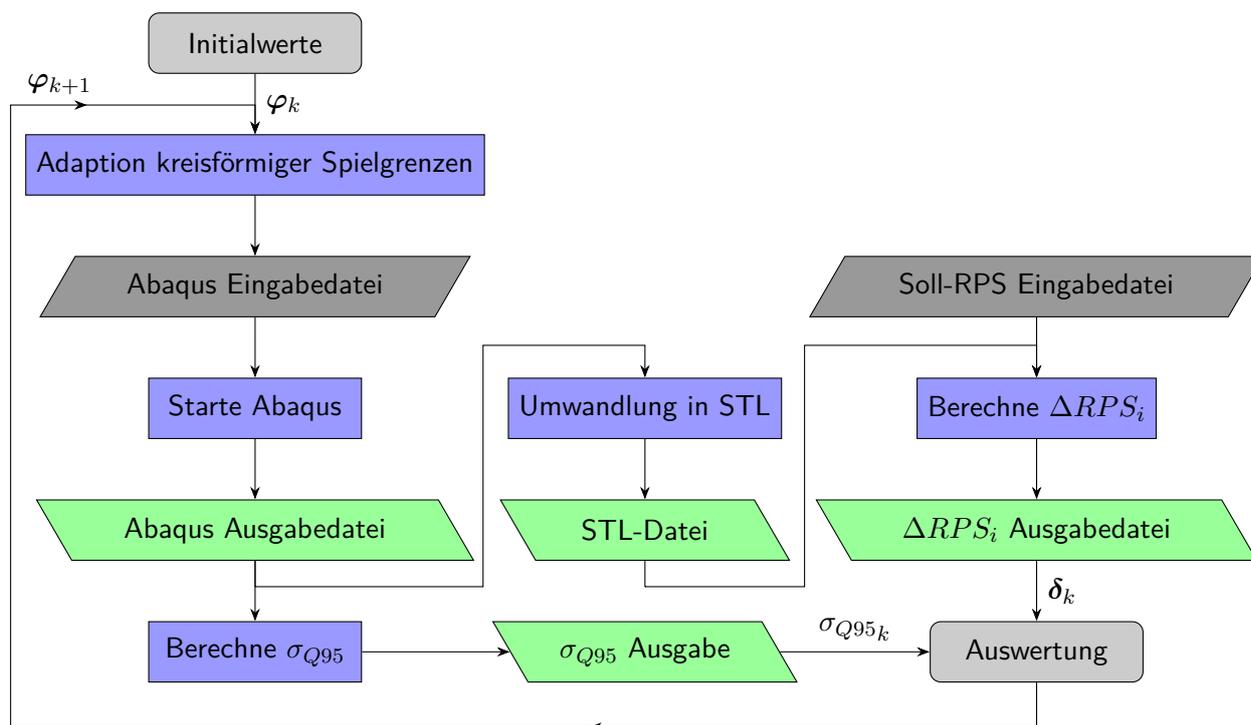


Abb. 5-14: Prozessdiagramm zur virtuellen Bauteilausrichtung in Optimus. Die Iteration beginnt für $k = 0$ mit den Initialwerten aller Anschraubpunktpositionen φ_0 , welche in den darauffolgenden Schritten $k + 1$ gemäß des gewählten Optimierungsalgorithmus verändert werden.

Die im Abschnitt 5.2.1 aufgestellten Zielfunktionen zur virtuellen Bauteilausrichtung beruhen jeweils auf einem in sich abgeschlossenen Systemmodell, welches die Abhängigkeit zwischen den RPS-Abweichungen sowie der Vergleichsspannung und den Positionen der Anschraubpunkte charakterisiert. Dieses System wiederum fußt hauptsächlich auf dem generierten Simulationsmodell des Kotflügels und wird durch eine Reihe von sequentiell verknüpften Berechnungsprozessen komplettiert, um die zu minimierenden Werte der RPS-Abweichungen δ und des Spannungsquantils σ_{Q95} zu erhalten. Mithilfe der Optimierungssoftware OPTIMUS werden die einzelnen Berechnungsschritte gemäß Abbildung 5-14 miteinander verknüpft.

Um die kreisrunden Spielgrenzen in OPTIMUS zu berücksichtigen, wird eine entsprechende Adaptionroutine vorgeschaltet. Als Eingangsdaten fungieren dabei der Gewindedurchmesser M der verwendeten Schraube sowie Länge L und Breite B des jeweiligen Langlochs, wobei kreisrunde Bohrungen durch die Eingabe $L = B$ abgebildet werden (s. Abb. 5-15).

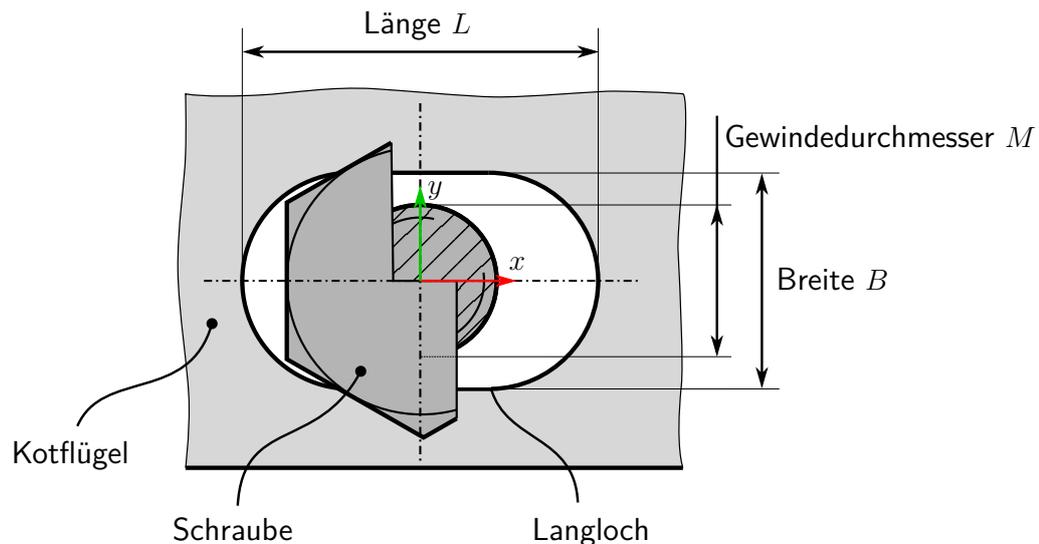


Abb. 5-15: Spiel bei kreisförmigen Aussparungen. Die in Optimus verwendete mathematische Beschreibung eines Langlochs inkludiert kreisrunde Bohrungen, wenn $L = B$.

Anhand der binären Variablen x_r und x_k in den Gleichungen (5-9) und (5-10) lässt sich ablesen, ob der aktuelle x -Wert innerhalb des rechteckigen oder des kreisrunden Bereichs liegt. Falls x sich im kreisrunden Bereich befindet, gibt x_k^* die dazugehörige relative Koordinate an.

$$x_r = \begin{cases} 1 & \text{falls } |x| \leq \frac{L-B}{2} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad \text{mit } \left\{ x \in \mathbb{R} \mid -\frac{L}{2} \leq x \leq \frac{L}{2} \right\} \quad (5-9)$$

$$x_k = \begin{cases} 1 & \text{falls } x_r = 0 \\ 0 & \text{falls } x_r = 1 \end{cases} \quad (5-10)$$

$$x_k^* = \left(|x| - \frac{L-B}{2} \right) \cdot x_k \quad (5-11)$$

Die zwei weiteren binären Variablen y_r und y_k geben an, ob sich das Produkt aus y_n und Spielradius $\frac{B-M}{2}$ im kreisrunden Bereich ($x_k = 1$) inner- oder außerhalb dieser Kreisfläche befindet. Wenn das Produkt die kreisrunde Spielgrenze überschreitet, wird es in Gleichung (5-14) auf den Kreisumfang zurückgerechnet. Letztlich fasst (5-14) alle Konstellationen zusammen und gibt den entsprechenden y -Wert zurück.

$$y_r = \begin{cases} 1 & \text{falls } x^2 + \left(y_n \cdot \frac{B-M}{2} \right)^2 \leq \left(\frac{B-M}{2} \right)^2 \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad \text{mit } \{ y_n \in \mathbb{R} \mid -1 \leq y_n \leq 1 \} \quad (5-12)$$

$$y_k = \begin{cases} 1 & \text{falls } y_r = 0 \\ 0 & \text{falls } y_r = 1 \end{cases} \quad (5-13)$$

$$y = x_r \cdot y_n \cdot \frac{B-M}{2} + x_k \left(y_r \cdot y_n \cdot \frac{B-M}{2} + y_k \cdot y_n \cdot \sqrt{\left(\frac{B-M}{2} \right)^2 - (x_k^*)^2} \right) \quad (5-14)$$

Nachdem der grundlegende Workflow zur virtuellen Bauteilausrichtung zur Verfügung steht, muss zur Minimierung der Zielfunktionen ein geeigneter Optimierungsalgorithmus gewählt werden. Da auch hier die Abhängigkeiten nicht zwingend als linear anzunehmen sind, sollte die gewählte Methode neben einer vergleichsweise großen Anzahl an Variablen gleichermaßen nichtlineares Verhalten bewältigen können. Außerdem ist zu entscheiden, ob globale oder lokale Optimierungsalgorithmen zum Einsatz kommen.

Da OPTIMUS eine Vielzahl von globalen und lokalen Methoden bietet, wird zunächst ein simples Schalenmodell anstatt des rechenintensiven Kotflügels als Entscheidungsgrundlage herangezogen, wobei der Berechnungsablauf identisch zur Abbildung 5-14 bleibt. Das verwendete und in Skizze 5-16 illustrierte Schalenmodell repräsentiert in der Draufsicht ein $10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ großes Quadrat, welches in z -Richtung um 1 mm gewölbt und an den vier Ecken A-B-C-D analog der Anschraubpunkte des Kotflügels gelagert ist. Die Wölbung bietet den Vorteil, dass die Anfälligkeit für Knicken (*buckling*) im vorgesehenen Lastbereich minimiert wird, da sich für den Kotflügel in der Regel ebenfalls Knicklastfälle innerhalb der Spielgrenzen ausschließen lassen. Die nominalen Koordinaten der eingezeichneten RPS-Punkte befinden sich im undeformierten Zustand bei RPS_1 exakt mittig auf der Oberfläche der Schale und bei RPS_2 mittig auf der Randkante zwischen Punkt B und C. Der etwaige Abstand zur Geometrie wird bei RPS_1 in z - und bei RPS_2 in x -Richtung ermittelt.

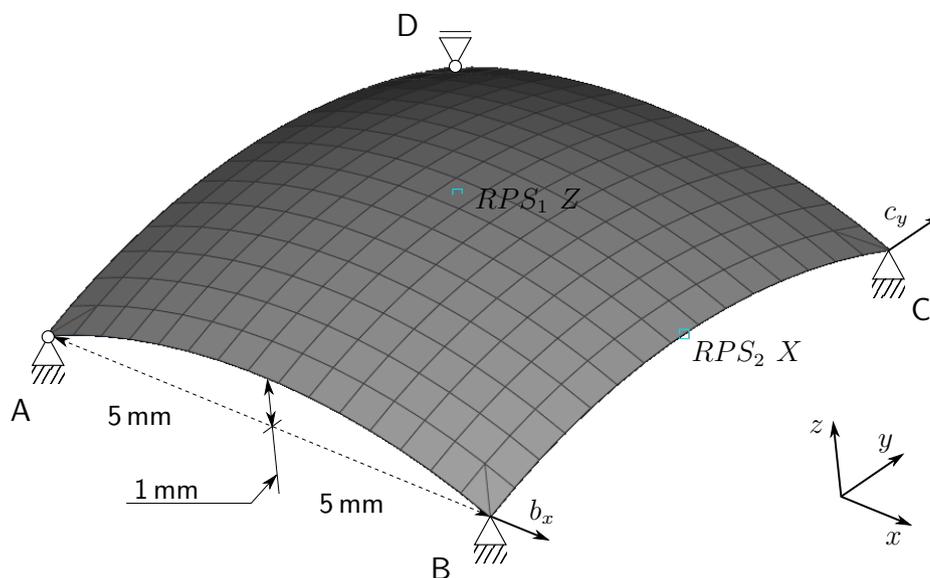


Abb. 5-16: Vereinfachtes Testmodell zur Filterung geeigneter Optimierungsalgorithmen. Das System wird statisch überbestimmt an den Eckpunkten A-B-C-D gelagert, wobei folgende Freiheitsgrade frei beweglich bleiben: a_α , a_β , a_γ , d_y , d_α , d_β , d_γ . Als Variablen zur Ausrichtung der beiden RPS-Punkte dienen die Freiheitsgrade b_x und c_y .

Unter der Maßgabe, dass sich lediglich die Lage von Punkt B in x -Richtung sowie von Punkt C in y -Richtung variieren lässt, um die räumlichen Abstände der Geometrie zu den RPS-Punkten zu beeinflussen, ergibt sich durch Einsetzen in Zielfunktion I (5-6) das anwendungsbezogene

Optimierungsproblem (5-15). Hierbei wurden die Gewichtung- und Skalierungsfaktoren zu Null gesetzt, da in diesem Fall keine Unterscheidung in Haupt- und Neben-RPS vorgenommen wird und sich die Dimensionen der Ergebnisgrößen gleichen. Das Spiel der betreffenden Lagerpunkte (B, C) und damit der Definitionsbereich der Eingangsparameter wird auf $\pm 1,5$ mm beschränkt.

$$\omega_1^*(\varphi_1^*) = \min_{\varphi} \left\{ \Delta RPS_1^2(\varphi) + \Delta RPS_2^2(\varphi) \mid \varphi \in \Phi \right\}$$

(5-15)

mit $\Phi = \{b_x, c_y \in \mathbb{R} \mid -1,5 \text{ mm} \leq b_x, c_y \leq 1,5 \text{ mm}\}$

Der Vorteil dieses überschaubaren Testsystems mit lediglich zwei Variablen und sehr geringen Rechenzeiten (10s je Funktionsaufruf) wird bei der möglichen grafischen Darstellung der Zielfunktion und der damit erleichterten Plausibilitätsprüfung deutlich. Zu diesem Zweck werden Stützstellen innerhalb des Definitionsbereichs der Zielfunktion berechnet, deren Verteilung gleichmäßig über die Grundfläche definiert sein soll. Dafür eignet sich der DoE-Ansatz Latin Hypercube Sampling (LHS), wobei die Anzahl an Funktionsaufrufen auf 100 festgelegt wird. Die auf diese Weise ermittelten Koordinaten sind im Diagramm 5-17 als schwarze Punkte verortet. Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird darin außerdem die Fläche eines mittels OPTIMUS erzeugten 3D-Metamodells eingepflegt, welches auf den berechneten Stützstellen des LHS basiert.

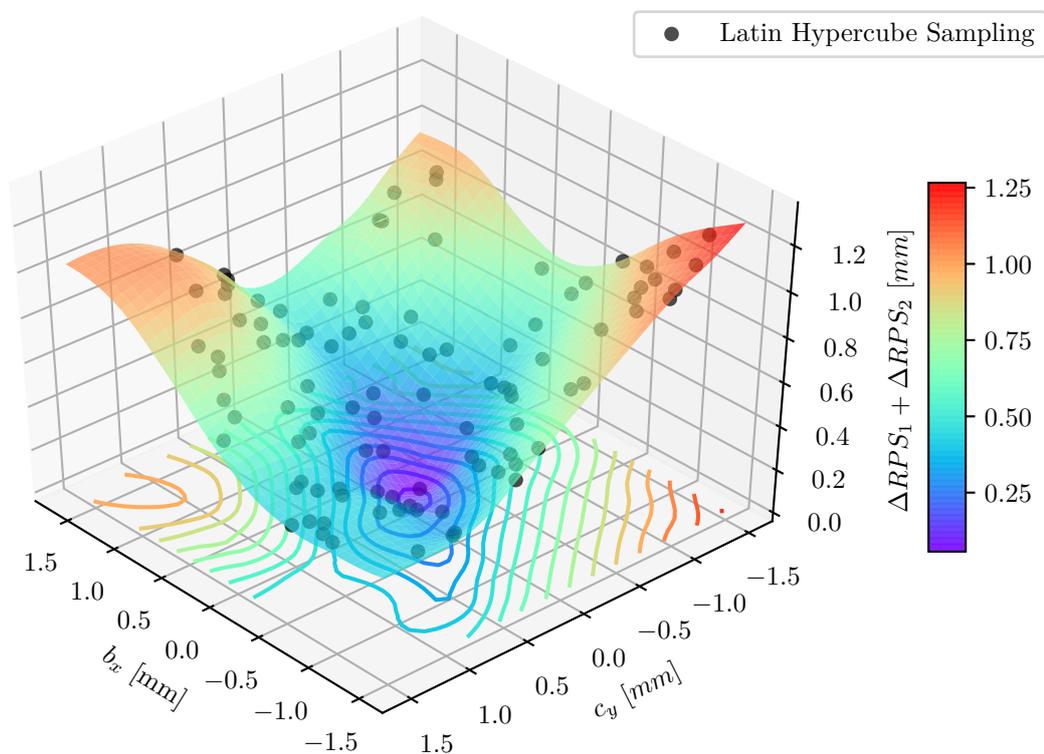


Abb. 5-17: Basierend auf LHS berechnete Stützstellen der Zielfunktion (5-15) sowie die Fläche des eingepassten 3D-Metamodells

Anhand der Farbgebung lässt sich leicht das Minimum bei $\varphi_1^{*T} = (0 \text{ mm}; 0 \text{ mm})$ ablesen. Ebenso

wird der nichtlineare Zusammenhang zwischen Befestigungs- und RPS-Punkten deutlich, welcher in einer ähnlichen Art und Weise auch bei tatsächlichen Bauteilen wie dem Kotflügel auftreten kann.

Um für die virtuelle Ausrichtung des Kotflügels einen effizienten Optimierungsalgorithmus auszuwählen, wird für den Startvektor folgendes Wertepaar festgelegt: $\varphi_0^T = (-1,4 \text{ mm}; -1,4 \text{ mm})$. Pragmatisch ausgedrückt besteht somit das Ziel für jeden der zu testenden Algorithmen darin, mit möglichst wenig Funktionsaufrufen die Summe der RPS-Abweichungen aus dem tiefroten Bereich in den tiefblauen Bereich des Metamodells zu bringen. Je schneller und exakter man sich dabei dem Optimum bei $\varphi_1^{*T} = (0 \text{ mm}; 0 \text{ mm})$ nähert, desto geeigneter erscheint der betreffende Ansatz auch für ähnliche Problemstellungen mit deutlich mehr Variablen wie dem Kotflügel.

Sowohl vier lokale als auch sieben globale Optimierungsalgorithmen sind im Rahmen dieser Vergleichsrechnung mit den vorgegebenen Standardeinstellungen in OPTIMUS zum Einsatz gekommen. Die Ergebnisse der insgesamt elf verwendeten Algorithmen sind in Tabelle 5-2 zusammengefasst, wobei sie aufsteigend anhand der Iterationsanzahl (Funktionsaufrufe) sortiert wurden. Zudem lassen sich die verstrichenen Gesamtrechnenzeiten $\sum t_R$ (Summe der Rechenzeiten t_R über die Anzahl an Funktionsaufrufen) sowie die Werte für Eingangs- und Ausgangsgrößen miteinander vergleichen.

Hervorzuheben sind an dieser Stelle die beiden lokalen Ansätze Nonlinear Programming Quadratic Line Search (NLPQL) und Sequentielle Quadratische Programmierung (SQP), welche beide nahezu gleichermaßen schnell mit 21 respektive 23 Funktionsaufrufen das Minimum finden. Die erzielten RPS-Abweichungen treffen das wahre Optimum bis auf wenige hundertstel genau, wengleich sich die Genauigkeit durch eine Justierung der jeweiligen Voreinstellungen steigern ließe. An der dritten Stelle im Ranking taucht der erste globale Ansatz namens NAVIRUN auf, deren detaillierte methodische Vorgehensweise jedoch nicht von OPTIMUS offengelegt wird. Auch wenn die Iterationsanzahl etwa das dreifache der ersten beiden lokalen Algorithmen beträgt und die Rechenzeit fast viermal so hoch ausfällt, sticht NAVIRUN mit einem bis zur dritten Nachkommastelle exakt ermittelten Optimum hervor. Die nächste globale Methode Simulated Annealing erreicht dies erst nach 217 Funktionsaufrufen.

Zusammenfassend lässt sich folgendes Fazit ziehen: Bei diesem einfachen Beispiel findet zwar jede der getesteten Methoden eine passende Ausrichtung des Schalenmodells, jedoch mit deutlichen Differenzen bezüglich der Effizienz. Mit Blick auf einen anvisierten operativen Einsatz der virtuellen Bauteilausrichtung steht die Bedeutung der Rechenzeit sehr weit oben, sodass die Zahl der Berechnungsdurchläufe zu minimieren ist. Unter diesem Aspekt erscheinen die Methoden NLPQL und SQP als am besten geeignet, da sie im Rahmen des Schalenmodelltests die geringste Zahl an Funktionsaufrufen benötigen. Damit bestätigt sich die in der Literatur attestierte, gute Performance des SQP-Algorithmus für Problemstellungen im Rahmen der Optimierung von mechanischen Strukturen. Darüber hinaus wird dieser Ansatz bei der Berücksichtigung von zahlreichen Restriktionen empfohlen. Insofern erscheint es plausibel, dass die Wahl auf SQP fällt,

da die Restriktionsanzahl beim Kotflügel deutlich im Vergleich zum Schalenmodell ansteigt. [71, S. 121f.]

Tab. 5-2: Am Schalenmodell getestete lokale (*) und globale Optimierungsalgorithmen. Die verstrichenen Gesamtrechnenzeiten $\sum t_R$ ergeben sich aus der Summe der Einzelrechnenzeiten t_R je Funktionsaufruf. Bezüglich der verwendeten Soft- und Hardwarekonfiguration siehe Abschnitt 4.2.2.

Algorithmus	Iterationsanzahl	$\sum t_R$ [hh:mm:ss]	b_x [mm]	c_y [mm]	ΔRPS_1 [mm]	ΔRPS_2 [mm]
NLPQL*	21	00:02:57	-0,026	0,056	-0,024	-0,006
SQP*	23	00:03:47	-0,039	0,053	-0,020	-0,011
NAVIRUN	73	00:13:01	0,000	0,000	0,000	0,000
SOMBAS	100	00:16:43	-0,042	-0,006	0,012	-0,014
CMA-ES	132	00:21:42	0,001	-0,007	0,003	0,000
Self-adaptive Evolution	150	00:24:14	0,004	-0,006	0,002	0,001
Adaptive Region*	170	00:27:59	0,000	0,000	0,000	0,000
Differential Evolution	170	00:26:39	0,000	0,003	-0,002	0,000
GRG*	192	00:29:56	0,149	-0,073	0,010	0,047
Simulated Annealing	217	00:34:33	0,000	0,000	0,000	0,000
sPSO	780	02:07:03	0,000	0,000	0,000	0,000

5.4 Validierung

Die Validierung des zuvor aufgestellten Lösungsansatzes zur virtuellen Bauteilausrichtung soll in zwei Schritten erfolgen. Dafür wird zunächst die Frage geklärt, ob die Kondensation der Optimierungsproblems und die anschließende Minimierung der Zielfunktion mithilfe der SQP-Methode zum theoretisch richtigen Ergebnis führt. Im zweiten Schritt werden dann reale Bauteilabweichungen im virtuellen Ansatz berücksichtigt und letztlich mit dem Ergebnis des physischen Meisterbockprozesses verglichen.

5.4.1 Validierung des Optimierungsalgorithmus

5.4.1.1 Ergebnisse der Kondensation

Die auf dem Latin Hypercube Design basierende Sensitivitätsanalyse beinhaltet 300 Funktionsaufrufe des in Abbildung 5-14 skizzierten Berechnungsworkflows, wobei die Geometrie des Simulationsmodells dem CAD-Modell des Kotflügels entspricht. Denn unabhängig von den etwaigen

Abweichungen einer Ist-Geometrie bleiben die Korrelationskoeffizienten zwischen den Ein- und Ausgangsparametern bei sonst identischen Bedingungen nahezu konstant. Da jeder der zehn

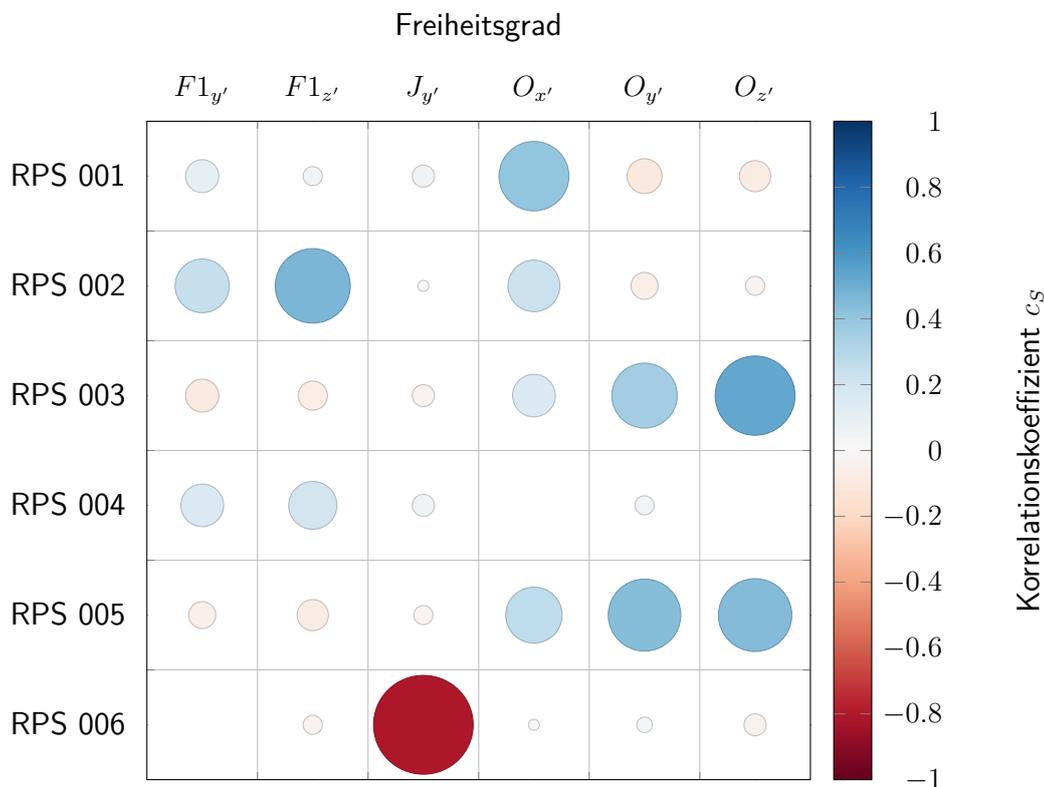


Abb. 5-18: Korrelationsmatrix für die Haupt-RPS-Punkte des Kotflügels

Anschraubpunkte je drei Translations- und drei Rotationsfreiheitsgrade besitzt, ergeben sich bei 16 RPS-Punkten 960 Kombinationen, wofür jeweils der Korrelationskoeffizient $c_S(r_{\varphi_i}, r_{\delta_j})$ nach Gleichung 5.3.1 berechnet wird. Aufgrund der hohen Anzahl an Kombinationen bietet sich zur Auswertung der Ergebnisse eine Korrelationsmatrix wie in Abbildung 5-18 an. Aus Platzgründen soll hier lediglich die Vorgehensweise anhand der Haupt-RPS-Punkte und sechs vorausgewählten Freiheitsgraden verdeutlicht werden, denn das Prinzip für die restlichen Ausrichtungspunkte bleibt identisch.

Allgemein können Korrelationskoeffizienten Werte im Bereich von -1 bis $+1$ annehmen, womit sich der gegenseitige Einfluss der verglichenen Parameter charakterisieren lässt. Je mehr der Betrag $|c_S(r_{\varphi_i}, r_{\delta_j})|$ zum Wert 1 tendiert, desto stärker fällt die Abhängigkeit aus, wobei ein negatives Vorzeichen auf eine umgekehrte Proportionalität hinweist. Mit dem Ziel der Kondensation des Optimierungsproblems gilt es somit, für jeden RPS-Punkt den einflussreichsten Freiheitsgrad herauszufiltern. In der obigen Korrelationsmatrix sind diese durch steigende Farbsättigungen und anwachsende Kreisdurchmesser zu erkennen. Im Fall des RPS 005 entsteht eine Pattsituation, da die Korrelationswerte der zwei wirkungsreichsten Freiheitsgrade $O_{y'}$ und $O_{z'}$ sehr nah beieinander liegen. Da $O_{z'}$ bereits für RPS 003 in Betracht kommt, fällt die Wahl bei RPS 005 auf $O_{y'}$. Derselbe Ansatz führt beim RPS 004 auf die Verwendung des Anschraubpunktes $F1$ in lokaler

y' -Richtung. Bei dieser Vorgehensweise muss außerdem berücksichtigt werden, dass manche Freiheitsgrade durch Randbedingungen des Bauraums eingeschränkt sind. So kann beispielsweise der Anschraubpunkt K nur minimal in Richtung der lokalen z' -Achse bewegt werden, da der darunterliegende Blechwinkel des Seitenteils nur geringe Verformungen im Zehntelmillimeterbereich zulässt.

Tab. 5-3: Verwendete Freiheitsgrade zur virtuellen Ausrichtung des Kotflügels

RPS	Freiheitsgrad
RPS 001 X	$O_{x'}$
RPS 002 Z	$F1_{z'}$
RPS 003 Z	$O_{z'}$
RPS 004 Y	$F1_{y'}$
RPS 005 Y	$O_{y'}$
RPS 006 Y	$J_{y'}$
RPS 101 y	$K_{y'}$
RPS 102 y	$H_{y'}$
RPS 103 y	$B_{y'}$
RPS 104 y	$N_{y'}$
RPS 201 z	$N_{\gamma'}$
RPS 202 z	$N_{\alpha'}$
RPS 203 y	$O_{\alpha'}$
RPS 205 x	$H_{x'}$
RPS 206 y	$L_{y'}$
RPS 207 y	$A_{y'}$

Tabelle 5-3 fasst die Ergebnisse der Kondensation zusammen. Die aufgelisteten Freiheitsgrade bilden den reduzierten Entwurfsvektor für die nachfolgenden Optimierungsrechnungen und enthält nun 16 statt der ursprünglichen 60 Einträge. Außerdem kann festgehalten werden, dass die Ergebnisse mit den unabhängig dazu gewonnenen Erkenntnissen bei der physischen Ausrichtung am AMB übereinstimmen. Viele der rechnerisch bestimmten Korrelationen erscheinen bei räumlicher Betrachtung offensichtlich, da die Anschraubpunkte in der Regel den größten Einfluss auf die am nächsten gelegenen RPS-Punkte haben. Ein Ausnahme stellt hingegen die Ausrichtung des RPS 001 dar, da man hier wahrscheinlich den nahegelegenen Anschraubpunkt K als relevanten Faktor vermuten würde. Jedoch entpuppt sich dieser Bereich mit einem Korrelationswert von nahezu 0 als nicht signifikant, da die gesamte Lasche eine vergleichsweise geringe Steifigkeit aufweist. Änderungen der lokalen Position bewirken somit primär eine elastische Verformung der Lasche anstatt der angestrebten Gesamtverschiebung in x -Richtung. Daher fungiert stattdessen

der Freiheitsgrad $O_{x'}$ sowohl im virtuellen als auch im physischen Prozess zur Ausrichtung des RPS 001.

5.4.1.2 Ergebnisse der Optimierung

Für den Eignungsnachweis von Prüfprozessen bedarf es in der Regel eines Normals, um gemäß Abbildung 2-10 die Anteile der systematischen und der zufälligen Messabweichungen zu bestimmen. Dahingegen existiert für den Fall eines physischen Kotflügels mit fertigungsbedingten Abweichungen jedoch kein passendes Prüfnormal, welches die jeweilige Ist-Geometrie ideal am AMB ausgerichtet repräsentiert und für die Validierung der virtuellen Bauteilausrichtung herangezogen werden kann. Stattdessen wird das im Abschnitt 5.1 entwickelte Kotflügelmodell ohne den Schritt des geometrischen Mappings wiederholt durch unterschiedliche Entwurfsvektoren verformt und anschließend mithilfe der SQP wieder ausgerichtet. Da die Zielgeometrie der spannungsfreien CAD-Oberfläche entspricht und somit als Prüfnormal fungiert, können die Ergebnisse des Optimierungsalgorithmus hiermit abgeglichen werden.

Exemplarisch soll hier das bereits zur Konvergenzanalyse des FE-Netzes eingesetzte Verformungsmuster des Kotflügelmodells (s. Abb. 5-4) als Start-Geometrie verwendet werden, um diese basierend auf den Zielfunktionen I und II auszurichten. Die im Startvektor φ_0 enthaltenen Verschiebungen der Anschraubpunkte führen zu einer deutlichen Deformation der Ursprungsgeometrie, sodass das Bauteil nicht mehr nach RPS ausgerichtet ist und demnach $\sum |\delta_i| \neq 0$ gilt. Die größte

$$\begin{aligned}\varphi_0^T &= (A_{y'}; B_{y'}; F1_{y'}; F1_{z'}; H_{x'}; H_{y'}; L_{y'}; N_{y'}; O_{x'}; O_{y'}; O_{z'}) \\ &= (1,8 \text{ mm}; 2,4 \text{ mm}; -0,2 \text{ mm}; -0,2 \text{ mm}; 1,7 \text{ mm}; 0,15 \text{ mm}; \\ &\quad 0,3 \text{ mm}; 4,2 \text{ mm}; 0,1 \text{ mm}; 0,4 \text{ mm}; -0,5 \text{ mm})\end{aligned}\quad (5-16)$$

Differenz liegt bei RPS 006 mit 8,6 mm vor. Die Ergebnisse der mittels SQP minimierten Summe über alle RPS-Punkte und somit ausgerichteten Kotflügel stellt Abbildung 5-19 dar, wobei im Fall der Zielfunktion II unterschiedliche Gradientenmethoden zum Einsatz gekommen sind. Dabei wird anhand des Fehlfarbenvergleichs a) deutlich, dass der gewählte Optimierungsalgorithmus es zwar bewerkstelligt, nach 121 Schleifendurchläufen ein passendes Minimum zu finden, welches die Anforderung nach Gleichung 5-5 erfüllt. Denn die konkret ausgerichteten Bereiche weisen eine sehr geringe Differenz gegenüber CAD auf, jedoch weicht die restliche Fläche bis zu 0,3 mm ab. Somit entspricht das determinierte lokale Minimum nicht der gewünschten Prüfgeometrie, die das globale Optimum repräsentiert. Diese Aussage bestätigt sich, wenn das Konturdiagramm in Abbildung 5-20 hinzugezogen wird: Insbesondere im Bereich des Anschraubpunktes A wirken hohe Spannungen, die sich durch die Konzentration auf einzelne Knoten stark überhöhen (Singularität, [78]) und somit nicht dem spannungsfreien Prüfnormal genügen.

Deutlich bessere Resultate liefern die auf Zielfunktion II beruhenden Ergebnisse in den Fehlfar-

benvergleichen b) und c) in Abbildung 5-19. Die bei b) angewendete Gradientenmethode *forward* benötigt 136 gerade mal halb so viel Funktionsaufrufe zur Berechnung des Gradienten wie die *central* Methode bei c) mit 262 Aufrufen. Der Nachteil liegt jedoch offenkundig darin, dass die etwas ungenauere Bestimmung des Funktionsanstiegs bei b) zu einem geringfügig anderen Minimum führt und somit Abstriche bei der Ergebnisgenauigkeit zu verbuchen sind. Mit Blick auf die Spannungsauswertung in Abbildung 5-20 lässt sich dennoch in beiden Fällen die These aufstellen, dass durch Berücksichtigung der Vergleichsspannung im Optimierungsalgorithmus eine optimale Lösung zur virtuellen Bauteilausrichtung gefunden wird. Allerdings ist dabei auch festzuhalten, dass die optimale RPS-Ausrichtung nur im Rahmen dieses Testfalls exakt mit dem nahezu spannungsfreien Zustand übereinstimmt. Bei physischen Kotflügeln, die durch fertigungsbedingte Abweichungen charakterisiert sind, wird diese Überdeckung nicht zwingend zu erwarten sein.

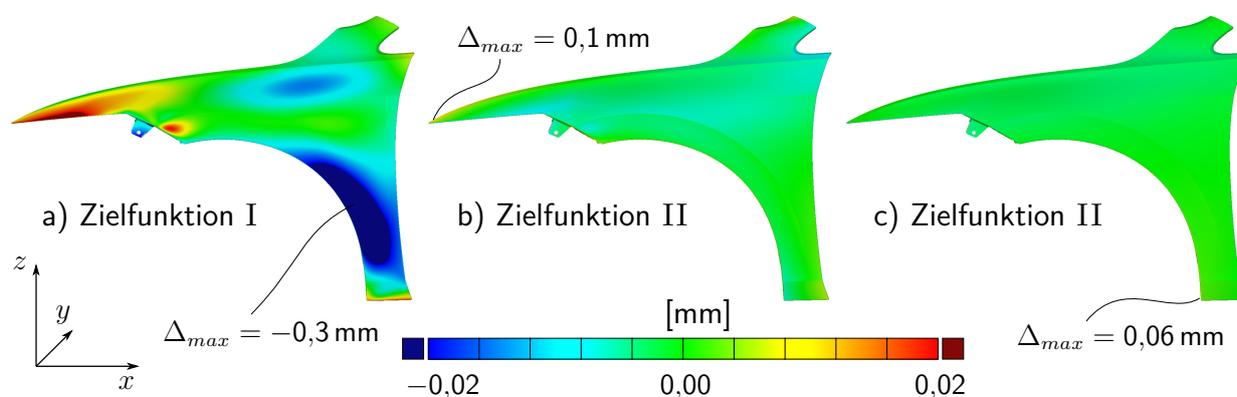


Abb. 5-19: Fehlfarbenvergleich zwischen den Ergebnissen der virtuellen Bauteilausrichtung mittels SQP gegenüber der unverformten CAD-Geometrie. SQP Gradientenmethode bei a) & b) *forward*; bei c) *central*

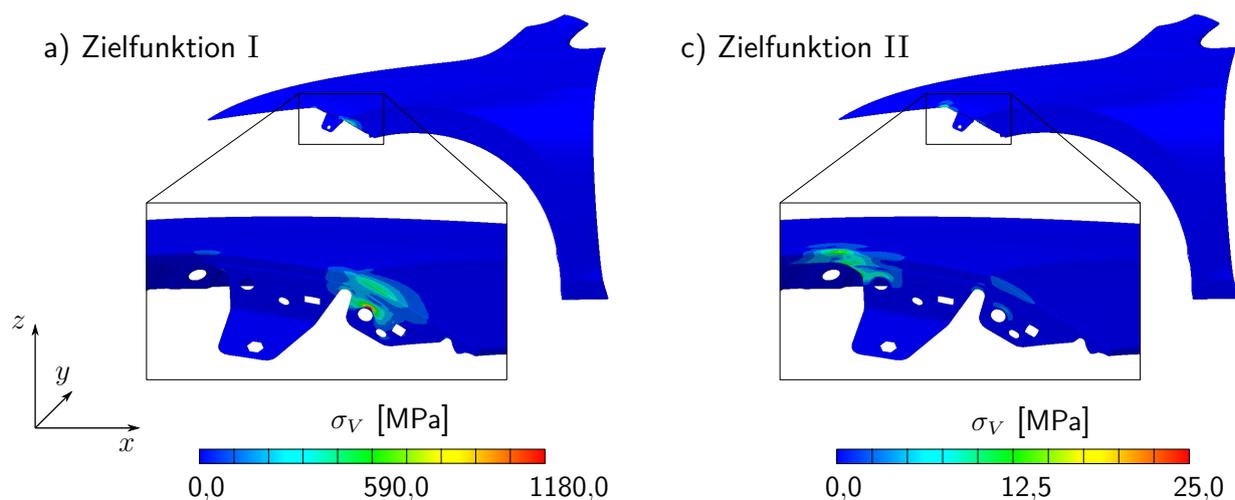


Abb. 5-20: Spannungsvergleich zwischen den Ergebnissen der virtuellen Bauteilausrichtung mittels SQP.

5.4.2 Validierung der virtuellen Bauteilausrichtung

Nachdem nachgewiesen ist, dass die Methodik zur virtuellen Bauteilausrichtung im Rahmen von Testbeispielen ohne Fertigungsabweichungen zum richtigen Ergebnis führt, soll die Validierung in diesem Abschnitt auf reale Daten erweitert werden. Als Grundlage dafür dient ein während des Fahrzeuganlaufs produzierter Kotflügel, dessen Geometrie von den Soll-Vorgaben im CAD-Modell abweicht und zu diesem Zeitpunkt repräsentativ für die aktuelle Pressteilcharge in den Meisterbockprozess eingeschleust wird. Dort erfolgt vorab eine möglichst spannungsfreie optische Messung in Fahrzeuglage wie in Abbildung 4-6, um die Ist-Geometrie in das Simulationsmodell integrieren zu können. Ein Vergleich mit dem CAD-Modell zeigt, dass dieser Kotflügel Abweichungen von rund bis zu 5 mm aufweist (s. angehängte Abb. B1). Im Anschluss beginnt der standardisierte Aufbau am AMB mit der manuellen Ausrichtung der RPS-Punkte, wobei erneut anzumerken ist, dass die erreichbare Genauigkeit dieser Ausrichtung begrenzt bleibt.

Parallel dazu gilt es, die Simulation gemäß Abschnitt 5.1 vorzubereiten und dabei die oben erwähnte optische Messung als Zielobjekt für das geometrische Mapping mithilfe des VW-Geomappers zu verwenden. Da diese Messung den Kotflügel in Fahrzeuglage referenziert, enthalten die Messdaten bereits die durch die Gravitation hervorgerufenen Verformungen, sodass etwaige Differenzen durch unterschiedliche Lagerpunkte zwischen Messaufnahme und virtueller Einbauposition zu vernachlässigen sind. Außerdem werden die Zustandsgrößen wie Spannung, Dehnung und Blechdicke an dieser Stelle nicht berücksichtigt, jedoch folgt deren Betrachtung im Kapitel zur virtuellen Prozesskette.

Da insbesondere die räumliche Lage der Anschraubpunkte einen wesentlichen Einfluss auf das Ergebnis der virtuellen Ausrichtung besitzt, werden deren tatsächliche Positionen am AMB gleichermaßen optisch gemessen und für die Lagerung des Kotflügelmodells zu Grunde gelegt. Die gemessenen Mittelpunkte am AMB dienen als Zielpositionen für die dazugehörigen Befestigungspunkte des Kotflügels bzw. für das jeweils modellierte Connector-Element (s. Abb. 5-13). Die Spiele zwischen Schrauben und den korrespondierenden Löchern im Kotflügel referenzieren dann auf die einzelnen Mittelpunkte, um welche die translatorischen sowie rotatorischen Freiheitsgrade angetragen werden. Die lokalen xy' -Flächen sind dabei stets planparallel zur Anschraubfläche des AMBs.

Letztlich müssen die Beträge der erzielten manuellen Ausrichtung am AMB als Zielwerte für den Optimierungsalgorithmus erhoben werden, da die Abweichungen mehrere Zehntel Millimeter betragen und sich nur so ein vergleichbares Ergebnis generieren lässt. Zur virtuellen Ausrichtung kommt schließlich die SQP-Methode basierend auf dem kondensierten Entwurfsvektor (s. Tab. 5-3) zum Einsatz. Die entsprechenden Resultate für die Optimierungen nach Zielfunktion I und II sind nahezu identisch, wobei das Bauteil in beiden Fällen trotzdem an allen Ausrichtungspunkten die anvisierten Werte erreicht. Außerdem liegt die auf diese Weise virtuell deformierte Geometrie sehr nah am optischen Messergebnis des am Meisterbock montierten Werkstücks, wie die Abbil-

dung 5-21 zeigt. Die maximalen Differenzen bewegen sich im Bereich von zwei Zehntel Millimeter und sind im Rahmen des Prüfprozesses von Exterieur-Bauteilen akzeptabel. Die Funktionalität der virtuellen Bauteilausrichtung, welche die Grundlage für den VMB darstellt, wird damit für den Kotflügel und ähnliche Bauteile als validiert angenommen.

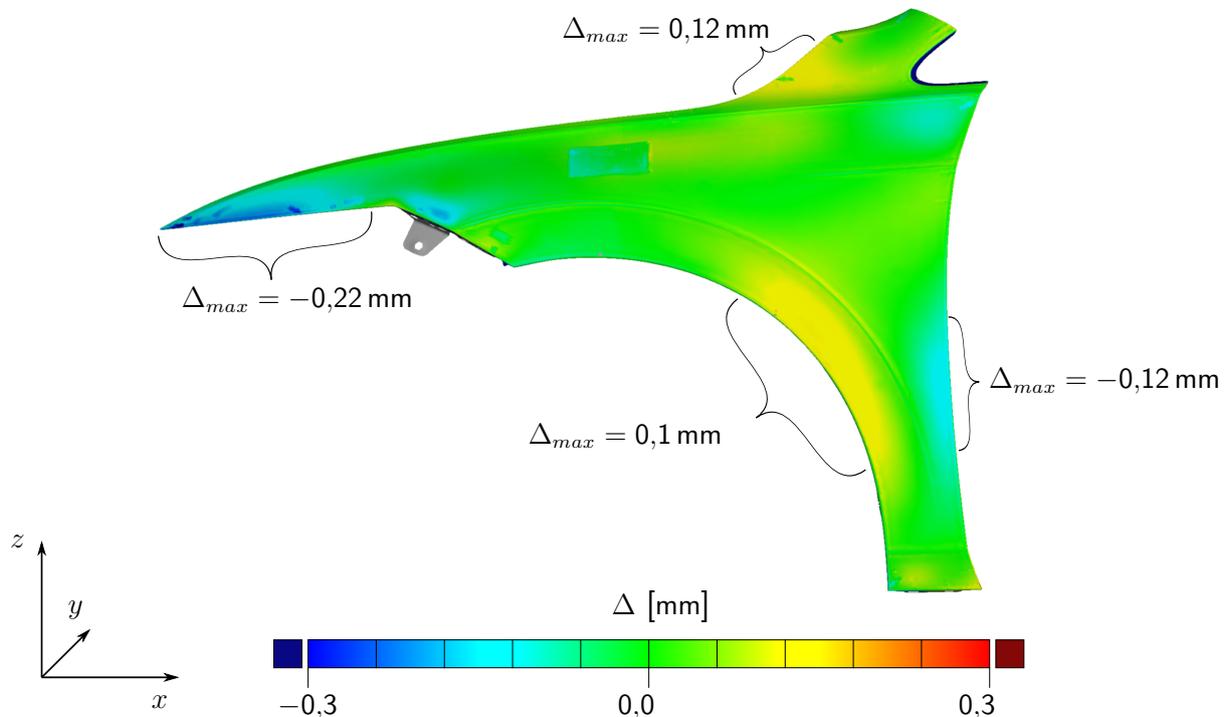


Abb. 5-21: Validierungsergebnis: Fehlfarbenvergleich des sowohl virtuell als auch physisch ausgerichteten Kotflügels

5.5 Zusammenfassung VMB-Simulation

Zur Durchführung einer VMB-Simulation sind im Wesentlichen zwei primäre Arbeitspakete zu erledigen. Während des ersten Schrittes, die grundlegende Erstellung des FE-Modells, hat sich insbesondere die Relevanz einer geeigneten Netzauflösung herauskristallisiert. Sie stellt einen entscheidenden Faktor für die Aussagesicherheit des virtuellen Prüfprozesses dar, wobei die Ergebnisgenauigkeit bei einer geeigneten Berücksichtigung der Flächenkrümmungen kaum zu Lasten der Rechenperformance geht. Darauf aufbauend erlaubt das allgemein als Mapping bezeichnete transferieren von Geometrie- und Zustandsgrößen auf das FE-Modell überhaupt erst die Abbildung realer Fertigungstoleranzen. Dabei konzentriert sich dieses Kapitel ausschließlich auf das geometrische Mapping und vernachlässigt die Zustandsgrößen, deren Sensitivität später in den Mittelpunkt rückt. Im letzten Schritt des Modellaufbaus werden die Lagerungen der Anschraubpunkte mithilfe von Connector-Elementen realisiert, die eine planparallele Ausrichtung der Anschraubflächen von Kotflügel und Meisterbock ermöglichen und somit die realen Flächenkontakte nachbilden.

Das derart generierte Simulationsmodell wird in eine Berechnungskette eingefügt, die als Eingabe die Positionen der Anschraubpunkte benötigt und am Ende die RPS-Abweichungen sowie Zustandsgrößen wie das 95 %-ige Quantil der Vergleichsspannungen ausgibt. Auf diese Weise lässt sich ein Optimierungsalgorithmus entwickeln, der eine Montageposition des Kotflügels berechnet, die zu einem Minimum der kumulierten RPS-Abweichungen führt und dabei optional die erwähnten Vergleichsspannungen gleichermaßen reduziert. In jedem Fall besteht die Zielstellung darin, das Werkstück virtuell im RPS-System auszurichten, um es der weiterführenden Bauteilqualifizierung vergleichbar zur Verfügung zu stellen. Im Zuge der Validierung stellt sich heraus, dass die Spannung im idealisierten Testfall einen wesentlichen Einfluss auf das Ergebnis hat, wobei der Abgleich mit dem realen Meisterbockprozess auch ohne diesen Aspekt positive Resultate zeigt. Die Differenzen zwischen virtueller Bauteilausrichtung und parallel durchgeführter Ausrichtung am physischen Meisterbock bewegen sich maximal im Bereich von zwei Zehntel Millimeter. Da diese Abweichung im Qualifizierungsprozess von Blechbauteilen im Exterieur-Umfeld von Automobilen als akzeptabel erscheint, wird die Aussagesicherheit als hinreichend genau angenommen.

6 Virtuelle Prozesskette

Ausgehend von dem bereits in Abbildung 4-4 zusammengestellten Überblick der Fertigungsprozesskette des Kotflügels zielt dieses Kapitel darauf ab, die wesentlichen Einflüsse der einzelnen Teilprozesse herauszufiltern, um in Verbindung mit der VMB-Simulation eine virtuelle Bauteilqualifizierungsschleife zu generieren. Dazu konzentriert sich das Vorgehen zunächst auf die unabhängig voneinander in verschiedenen Abteilungen und mit verschiedenen Softwarepaketen durchgeführten Prozesssimulationen und bewertet dessen Notwendigkeit aus Sicht der am Ende folgenden VMB-Simulation. Die daraus resultierenden Teilaspekte werden durch eine geeignete Datenübertagung zwischen den Systemen miteinander verknüpft, sodass letztlich das erzeugte Prozessmodell als Grundlage für diverse Sensitivitätsanalysen herangezogen werden kann. Außerdem erlaubt der gewählte Ansatz letztlich einen Abgleich zwischen virtueller und physischer Bauteilqualifizierung anhand eines konkreten Beispiels.

6.1 Modellierung der Herstellungsprozesskette des Kotflügels

Zur Modellierung der Herstellungsprozesskette muss ein Kompromiss gefunden werden, der einerseits alle Phänomene abbildet, bei denen eine relevante Beeinflussung der geometrischen sowie mechanischen Eigenschaften des Gesamtbauteils zu erwarten ist und der andererseits den rechnerischen Aufwand in einem vertretbaren Rahmen hält. Außerdem setzen die einzelnen Simulationsdisziplinen oft auf unterschiedliche Softwaresysteme mit heterogenen FE-Netzen und erfordern daher bei jedem Systemwechsel an adäquates Mapping der Netze und Zustandsgrößen. Infolgedessen sollte berücksichtigt werden, dass jeder Einsatz von Mapping-Verfahren in der Regel mit Approximationsfehlern einhergeht. Daher reduziert sich die Virtuelle Prozesskette (VPK) des Kotflügels auf die in Abbildung 6-1 enthaltenen Schritte, wobei die jeweiligen Hintergründe und Details der einzelnen Komponenten in den anschließenden Unterabschnitten folgt.

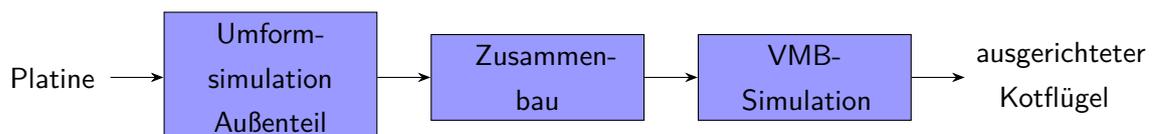


Abb. 6-1: Idealisierte VPK des Kotflügels

6.1.1 Umformung

Die fachliche Durchführung der Umformsimulation für das Kotflügelaußenteil ist nicht Bestandteil dieser Arbeit, sondern liegt in der Verantwortung eines separaten Unternehmensbereichs, von dem dankenswerterweise die entsprechenden Ergebnisse bereitgestellt werden. Im vorliegenden Anwendungsfall wird das einschlägige Softwaresystem *AUTOFORM* eingesetzt, um den Umformprozess des Kotflügels im Vorhinein methodisch abzusichern und beispielsweise die Wahrscheinlichkeit von Rissbildungen zu minimieren. Die resultierende Umformsimulation enthält mehrere Ziehstufen sowie Beschnitt- und Stanzoperationen, deren technische Details an dieser Stelle eine untergeordnete Rolle spielen. Auch wenn die Aussagefähigkeit der virtuellen Prozesskette insbesondere von der Qualität der vorangegangenen Simulationen abhängt, soll hier angenommen werden, dass diese zunächst alle Genauigkeitsanforderungen erfüllt. Allgemein zählt die Anwendung von FE-Simulation im Gebiet der Umformung zum Stand der Technik und erreicht im Karosseriebau Prognosegüten von bis zu 95% [23, S. 1318]. Entscheidend für die Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit und damit für den VMB-Prüfprozess ist der Zustand des Werkstücks nach der letzten Operation. Zu diesem Zweck illustriert Abbildung 6-2 die prinzipielle Operationsfolge anhand eines simplen Tiefziehnapfes. Die Platine a) wird durch das zusammenfahren der Werkzeuge in eine definierte Form b) gebracht, die bereits bestimmte Vorhaltungen enthält, um die elastische Rückfederung nach dem Entlasten zu kompensieren. Die Art und Weise dieser Entlastung korreliert entscheidend mit dem Ergebnis der Rückfederung, wobei hier zwei der gängigen Ansätze versinnbildlicht sind. Mithilfe der virtuellen Messaufnahme in c) lässt sich die Form des Bauteils in der realen Messaufnahme inklusive der wirkenden Gravitation annähern. Zum Zeitpunkt dieses Projektes dient dieser Zustand als Vergleichsreferenz, welche jedoch nicht für die Weitergabe an nachfolgende Berechnungsprozesse geeignet ist, da die Spannhilfen zusätzliche Kräfte in das System bringen und die Fallbeschleunigung g nicht notwendigerweise in dieselbe Richtung orientiert sein muss. Stattdessen wird die Form d) nach einer freien Rückfederung ohne Spannhilfen und Gravitationseinflüsse benötigt.

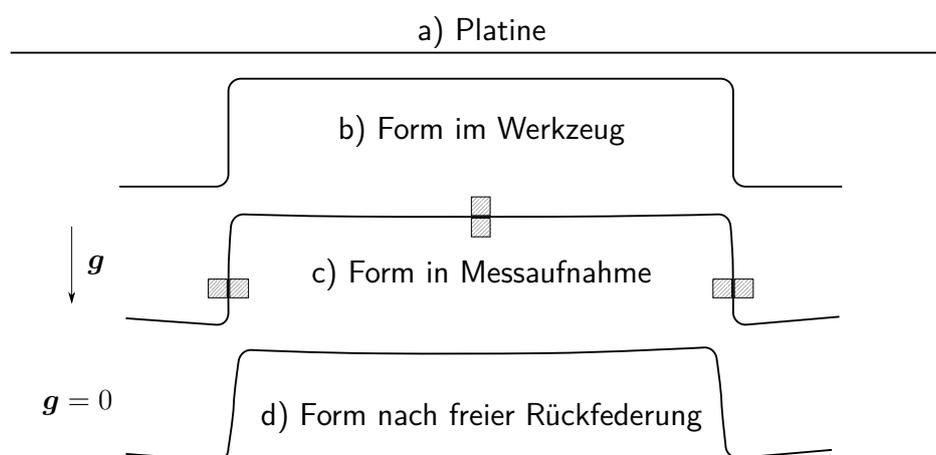


Abb. 6-2: Werkstückgestalt während des Umformprozesses

Abbildung 6-3 zeigt die vorhandenen Restspannungen, die nach der freien Rückfederungsberech-

nung in AUTOFORM im Außenteil des Kotflügels verbleiben. Prinzipiell lässt sich hierbei erkennen, dass bei steigenden Umformgraden auch die Restspannungen in den Elementen zunehmen. Die dargestellten Vergleichsspannungswerte nach *von Mises* referenzieren jeweils auf die äußeren Integrationspunkte jedes Elements und überschreiten häufig die Dehngrenze R_p des eingesetzten Materials. Dennoch befindet sich das Gesamtmodell im mechanischen Gleichgewicht, da sich die Spannungstensoren über je fünf Integrationspunkte in Querschnittsrichtung kompensieren. Andernfalls wäre das Simulationsmodell nicht vollständig frei zurückgefederter. Eine Darstellung der mit dem Umformprozess einhergehenden Verjüngung der lokalen Blechdicken findet sich im Anhang D1.

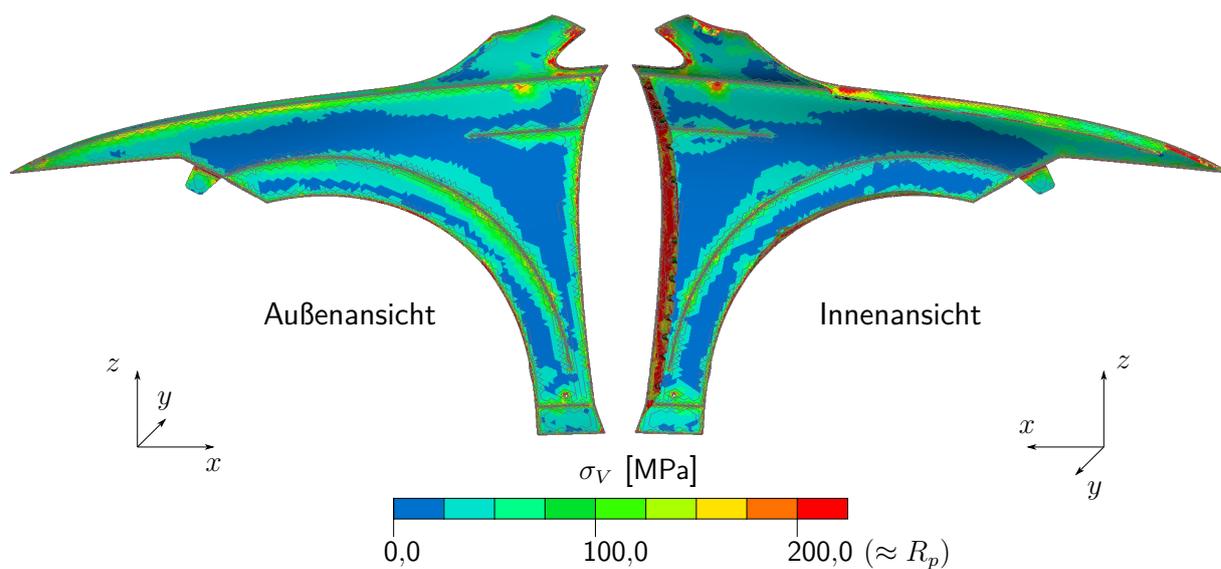


Abb. 6-3: Restspannungen im Außenteil nach der Umformsimulation. (Ergebnisse der Umformsimulation wurden bereitgestellt; Eigene Darstellung)

Da der Großteil an nichterfüllten geometrischen Qualitätsanforderungen im Zusammenhang mit der elastischen Rückfederung des Blechbauteils steht [34, S. 241], leitet sich daraus die Bedeutung der Ergebnisse der freien Rückfederungssimulation des Kotflügels für die virtuelle Prozesskette ab. Es ist anzunehmen, dass dabei das labile Außenteil den maßgeblichen Anteil zur Beschaffenheit

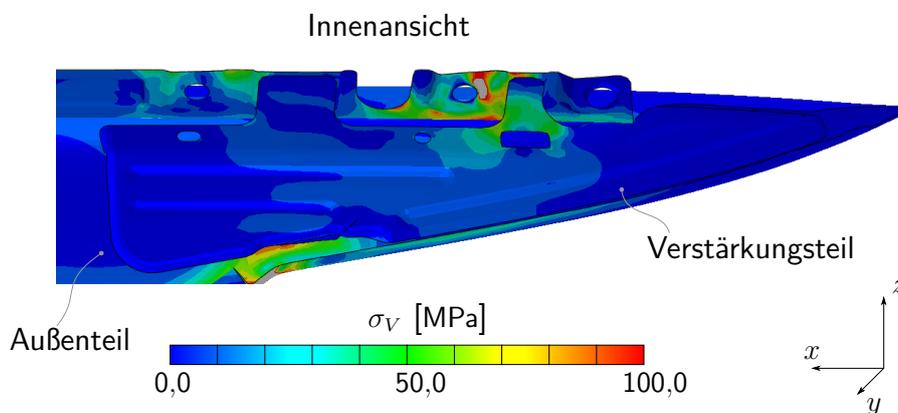


Abb. 6-4: Spannungszustand des Verstärkungsteils nach der virtuellen Bauteilausrichtung

der gesamten Baugruppe beiträgt und dessen Berechnungsergebnisse somit die Grundvoraussetzung für eine virtuelle Prozesskette sind. Hinsichtlich des Verstärkungsteils ist jedoch davon auszugehen, dass aufgrund der hohen Eigensteifigkeit vergleichsweise geringe Deformationen und damit ein vernachlässigbar kleiner Effekt auf die Baugruppe entsteht. Dieser Aspekt bestätigt sich im Hinblick auf die in Abbildung 6-4 gezeigte Spannungsverteilung des Verstärkungsteils im Einbauzustand, die demnach im Bereich von maximal 50 MPa und damit deutlich unter der Dehngrenze des Materials von mindestens 210 MPa liegt. Die Daten für die grafische Darstellung basieren auf dem Simulationsergebnis zur Validierung der virtuellen Bauteilausrichtung im Abschnitt 5.4.2, weshalb die Abbildung des realen Lastfalls als hinreichend genau betrachtet wird.

6.1.2 Clinchverbindungen & kathodische Tauchlackierung

Im Bereich der drei Durchsetzfügeverbindungen (Clinchpunkte) zwischen Außen- und Verstärkungsteil werden beide Bleche plastisch verformt, sodass der in Abbildung 6-5 zu erkennende Hinterschnitt entsteht, welcher die Bauteile kraft- und formschlüssig zusammenfügt. Da die Deformationen jedoch nur lokal jeweils in einem Durchmesser kleiner als 10 mm auftreten, sind die Wechselwirkungen mit der Gesamtgeometrie der Baugruppe eher gering einzustufen und werden daher nicht in der virtuellen Prozesskette berücksichtigt.

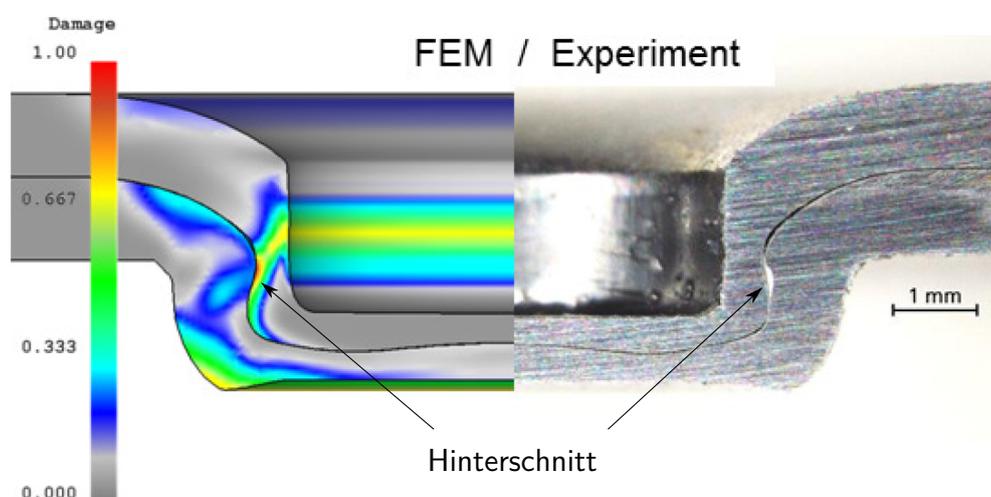


Abb. 6-5: Schnittdarstellung einer exemplarischen Clinch-Verbindung. Das Ergebnis der FE-Simulation zeigt die plastische Dehnung. (modifiziert nach [79, S. 12])

Eine ähnliche Schlussfolgerung lässt sich im Fall der KTL-Simulation ableiten, welche die entsprechende Temperaturlast während des Tauchbads nachbildet. Da die plastischen Deformationen nahezu Null sind und gleichermaßen die verbleibenden Spannungen des Kotflügels nach der Behandlung im Tauchbad sehr niedrig ausfallen (s. Abb. 6-6), kann dieser Schritt, zumindest für den Kotflügel, in der virtuellen Prozesskette vernachlässigt werden. Die dennoch vorhandenen Spannungen an den Anschraubpunkten von gemittelt unter 15 MPa lassen sich auf die Befestigungen an der Karosse zurückführen, welche anders als der Kotflügel messbare Formänderungen

erfährt. Beispielsweise biegt sich die Frontklappe im Tauchbad mehrere Millimetern durch, sodass in diesem Fall wahrscheinlich eine Berücksichtigung notwendig wäre.

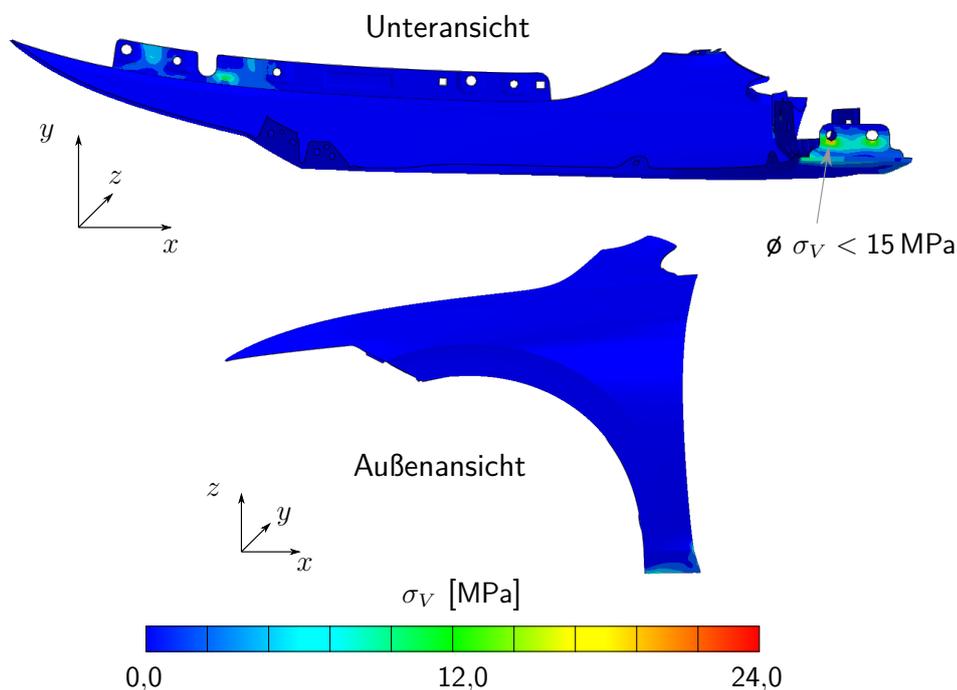


Abb. 6-6: Restspannungen im Kotflügel nach der KTL-Simulation. (Ergebnisse der KTL-Simulation wurden bereitgestellt; Eigene Darstellung)

6.1.3 Materialmodellierung

Zunächst wird die Dichte des Materials vordefiniert, um spätere Untersuchungen der Gravitationseinflüsse zu ermöglichen. Da die Restspannungen nach der Umformsimulation des Außenteils teilweise die Dehngrenze übersteigen, soll außerdem die Komplexität der Materialmodellierung zur Abbildung von plastischen Deformationen erweitert werden. Die erforderlichen Angaben werden einer Materialdatenbank entnommen, welche u.a. die experimentell ermittelte Verfestigungskurve in Abbildung 6-7 enthält. Diese wird durch 205 Kurvenpunkte approximiert und in der ABAQUS Eingabedatei mittels *PLASTIC implementiert (s. Abq. Ein. 6.1). In Bezug auf das eingesetzte Material wird angenommen, dass das als *Bauschinger Effekt* bekannte Phänomen der verringerten Dehngrenze nach einem Wechsel der Belastungsrichtung nicht eintritt und daher die isotrope Verfestigung verwendet werden kann.

```

1  *MATERIAL , NAME=Stahl_pl
2  *DENSITY
3  7.85e-09 ,
4  *ELASTIC , TYPE=ISOTROPIC
5  2.00e05 , 0.3

```

```
6 *PLASTIC, HARDENING=ISOTROPIC
7 -- 205 Zeilen:  $k_f$ ,  $\epsilon_{pl}$ 
```

Abaqus Eingabe 6.1: Definition plastischer Materialmodelle für Stahl

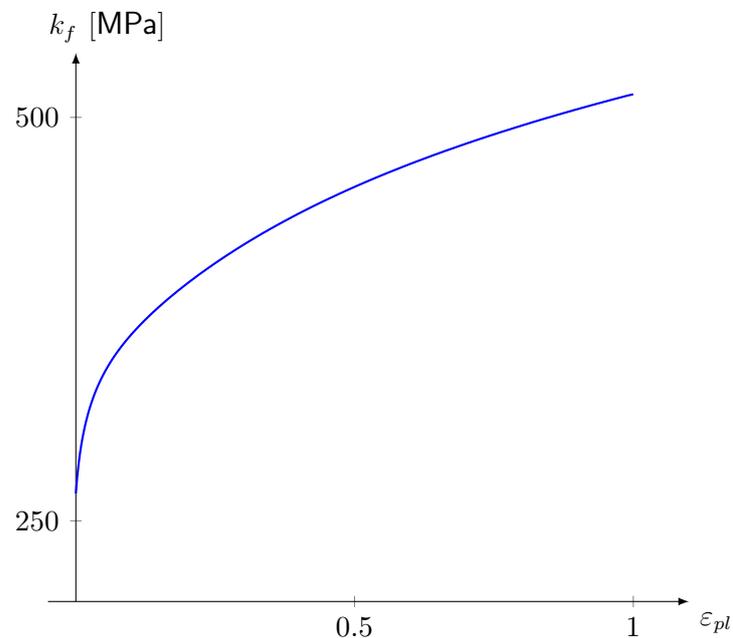


Abb. 6-7: Verfestigungskurve vom Material des Kotflügelaußenteils

6.1.4 Mapping

Nachdem sich die Umformsimulation des Außenteils als primärer Bestandteil der VPK des Kotflügels herauskristallisiert hat, bedarf es einer geeigneten Integration der Rückfederungsergebnisse in das Simulationsmodell zur virtuellen Bauteilausrichtung. In diesem Zusammenhang illustriert Abbildung 6-8 die notwendige Kopplung der verschiedenen FE-Softwaresysteme durch Mapping-Werkzeuge.

Die Basis bildet das im vorangegangenen Kapitel entwickelte nominale FE-Netz, dessen Schalelementgrößen mit der Krümmung der darunterliegenden CAD-Fläche korrelieren. Dieses Netz wird mithilfe des VW-Geomappers spannungsfrei auf die rückgefederte Geometrie aus der AUTOFORM-Simulation projiziert, wobei die Zielfläche im STL-Format vorliegen muss. Das Resultat lässt sich anschließend als ABAQUS-konforme Eingabedatei an eine für Zustandsgrößen geeignete Mapping-Software übergeben, die im vorliegenden Anwendungsfall SIMAN sein soll. Aus Kompatibilitätsgründen erfolgt der Datenaustausch zwischen AUTOFORM und SIMAN über ein LSDYNA-Format (*.dyn), welches alle Zustandsgrößen und Blechdicken der gesamten Geometrie enthält. Als Besonderheit der zur Verfügung stehenden Umformsimulation lässt sich festhalten, dass die Netzauflösung des Modells zwar ebenfalls auf der Flächenkrümmung basiert, jedoch

werden dabei ausschließlich dreieckige Schalenelemente verwendet. Außerdem nutzt **AUTOFORM** zur einfachen lokalen Netzverfeinerung sogenannte *hanging nodes*, welche bei einer weiteren Verwendung in **ABAQUS** jedoch Ungenauigkeiten hervorrufen können. Nachdem die hinsichtlich ihrer Form bereits adaptierten Ursprungs- und Zielmodelle aufeinander positioniert sind, besteht die Herausforderung des Mappers darin, die Zustandsgrößen von einem homogenen Dreiecksnetz mit *hanging nodes* auf ein gemischtes Netz (S_4 , S_3) mit überwiegend viereckigen Elementen zu übertragen. **SIMAN** nutzt dazu den gradientenbasierten Interpolationsansatz *nearest neighbor*, der den am nächsten gelegenen Integrationspunkt im Zielnetz berechnet und den letztlichen Wert durch eine lineare Gewichtung des Abstandes bestimmt. Die Anzahl der Integrationspunkte in Querschnittsrichtung von fünf bleibt identisch, wobei zu beachten ist, auf welche Elementschicht die jeweiligen Netze referenzieren. Im gegebenen Fall bezieht sich das **AUTOFORM**-Netz auf die Mittel- und das **ABAQUS**-Netz aus Messgründen auf die Außenfläche.

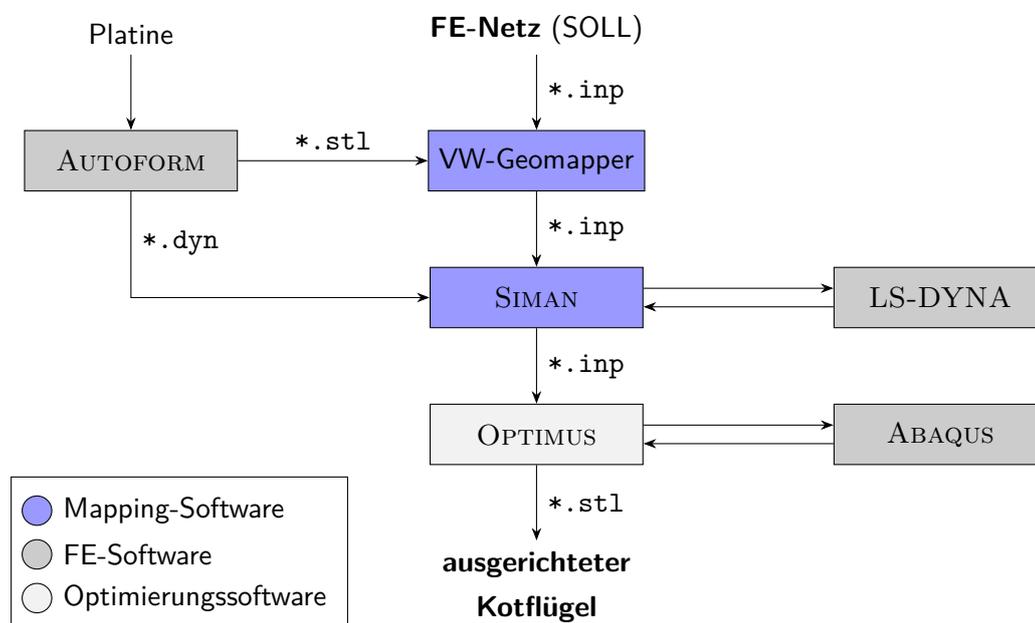


Abb. 6-8: Kopplung unterschiedlicher FE-Software durch Mapping zur Umsetzung der VPK. Die Integration von **LS-DYNA** in **SIMAN** dient optional zum iterativen Ausgleichen der gemappten Spannungswerte des Gesamtmodells.

Die durch das Interpolieren der Zustandsgrößen verursachten Approximationsfehler korrelieren mit den lokalen Ähnlichkeiten der Netze, d.h. je deckungsgleicher die wechselseitigen Elemente sind, desto genauere Mapping-Ergebnisse werden erzielt. Im aktuellen Szenario weisen zwar beide Netze ähnliche Elementgrößen auf, aber die unterschiedlichen Elementtypen führen dennoch zu Differenzen, die ein mechanisches Ungleichgewicht des Gesamtmodells hervorrufen. Infolgedessen ändert sich abhängig von der Höhe des Ungleichgewichts die Ausgangsgeometrie des FE-Modells, die sich dann vom Ergebnis der Rückfederungsberechnung in **AUTOFORM** unterscheidet. Um diese Divergenz zu minimieren, werden die Spannungen des interpolierten Modells iterativ durch gelagerte Rückfederungsberechnungen in **LS-DYNA** ausbalanciert. Das dabei zu Grunde lie-

gende Prinzip veranschaulicht Abbildung 6-9 anhand eines einfachen Balkens: Der interpolierte Spannungstensor σ_0 wird als initiale Randbedingung zum bereits geometrisch gemappten und gelagerten Balkenmodell hinzugefügt und anschließend im FE-Solver aufgelöst. Solange die resultierende Differenz Δ_{max} größer als die vorgegebene Toleranz von $u_T = 0,1\text{ mm}$ ist, werden die Spannungen des relaxierten Modells σ_r wieder zum Ausgangszustand zurückgeführt und die Rechnung mit geänderten Initialbedingungen erneut gestartet. Auf diese Weise ergibt sich auch bei komplexeren Modellen wie dem Kotflügel eine ausgeglichene Spannungsverteilung, die mit einer geringeren Initialverformung einhergeht.

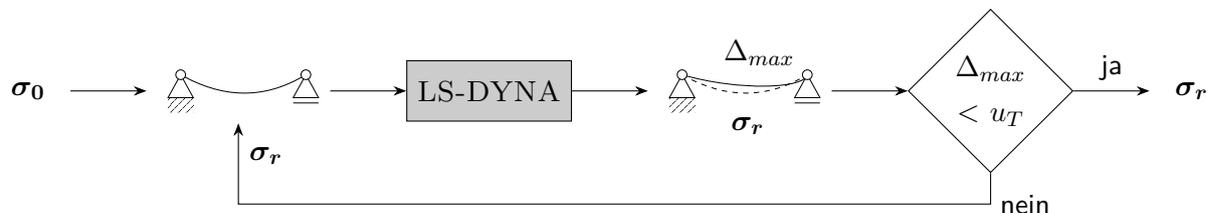


Abb. 6-9: Spannungskompensation am Beispiel eines Balkens

Die Resultate des Mappings der Blechdicke T werden in der ABAQUS Eingabe (vgl. Abb. 6.2) elementspezifisch implementiert, indem die einzelnen Beträge tabellarisch den Elementnummern zugeordnet sind (DISTRIBUTION). Zur Beschreibung des Spannungszustandes lassen sich ebenfalls elementweise zwei Normal- und eine Schubkomponente übergeben, die durch die plastische Vergleichsdehnung zur Charakterisierung der Materialverfestigung (Work-Hardening) ergänzt wird. Dabei erhalten die quer zur Elementfläche liegenden Integrationspunkte jeweils separate Spannungs- und Dehnungswerte.

```

1  *DISTRIBUTION , LOCATION=ELEMENT , NAME=Thickness
2  , T0
3  -- 70604 Zeilen: #e , T
4  *INITIAL CONDITIONS , TYPE=STRESS , SECTION POINTS
5  -- 353015 Zeilen: #e , #i , sigma_x , sigma_y , tau
6  *INITIAL CONDITIONS , TYPE=HARDENING , SECTION POINTS
7  -- 353015 Zeilen: #e , #i , epsilon_V^(pl)
  
```

Abaqus Eingabe 6.2: Definition der initialen Zustandsgrößen und Blechdicken

6.2 Sensitivitätsanalysen

Ausgehend von den verfügbaren Daten aus der Umformung soll zunächst die Vorgehensweise zur Erstellung des VPK-Referenzmodells detailliert werden, um anhand dessen die Wechselwirkungen verschiedener Einflussfaktoren auf das Gesamtsystem zu analysieren. Zu den Faktoren zählen ei-

nerseits die vorhandenen Informationen aus der Umformsimulation, wie beispielsweise die variablen Blechdicken, Work-Hardening (WH) Effekte sowie Eigenspannungen und deren Kompensation. Andererseits gilt es ebenfalls herauszufinden, welchen Auswirkungen sich durch Schwankungen des E-Moduls, der etwaigen Vernachlässigung des Verstärkungsteils und der Gravitation ergeben. Außerdem stellt sich die Frage, ob der materialspezifische BH-Effekt des Kotflügelaußenteils im KTL-Bad das Resultat des Prüfprozesses beeinflusst. Zu diesem Zweck gestaltet sich die Sensitivitätsanalyse derart, dass basierend auf dem Referenzmodell für jeden Einflussfaktor virtuelle Bauteilansichtungen des Kotflügels durchgeführt werden, bei denen der jeweils zu untersuchende Parameter variiert oder vollständig isoliert ist. Somit lassen sich die qualitativen Korrelationen zwischen Ein- und Ausgangsgrößen der virtuellen Prozesskette bestimmen.

6.2.1 Referenzmodell

Gemäß des im vorangegangenen Abschnitt idealisierten Workflow-Ansatzes bildet die Umformsimulation die Grundlage zur VPK. Als Referenz für die Sensitivitätsanalyse soll hier auf die entsprechenden Ergebnisse einer Rückfederungssimulation aufgesetzt werden, die zuerst durch das beschriebene Mapping-Verfahren auf das für die VMB-Simulation optimierte FE-Netz zu übertragen sind. Nachdem Adaptieren der Gesamtform mithilfe des VW-Geomappers erfolgt das Interpolieren der Zustandsgrößen. Ein Vergleich der daraus resultierenden Spannungsverteilungen über die außenliegenden Integrationspunkte der Schalenelemente zum Ausgangspunkt bieten die Konturdiagramme in Abbildung 6-10. Abhängig von der Flächenkrümmung steigen auch die Eigenspannungen im Blech, wobei die Maxima an den Kanten für die späteren Fugenauswertungen liegen. Aufgrund der inhärenten Approximationsfehler des Mapping-Verfahrens, führt allein das mechanische Ungleichgewicht der Spannungen im Mapping-Ergebnis b) zu einer maximalen Verformung von 0,61 mm, wenn das Modell basierend auf der 3-2-1-Regel gelagert und simuliert wird. Um diese initiale Verformung zu minimieren, wird eine Spannungskompensation analog zur Prinzipskizze 6-9 durchgeführt, welche den Wert der initialen Deformation auf 0,03 mm senkt.

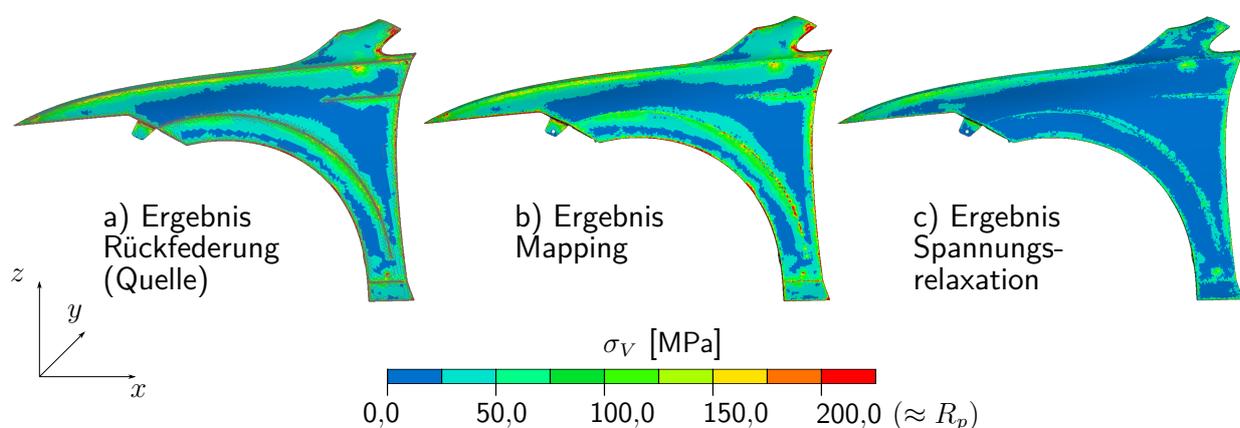


Abb. 6-10: Gegenüberstellung der Vergleichsspannungen (von Mises) a) vor und b) nach dem Mapping. Bei c) wurde zusätzlich zum Mapping eine Spannungskompensation durchgeführt.

Die Beträge der sich auf diese Weise ergebenden Spannungsverteilung (siehe c) in Abbildung 6-10) fallen etwas niedriger aus, wobei das Gesamtbild der Eigenspannungen sowie der Geometrie dennoch weitestgehend kongruent zur ursprünglichen Rückfederung bleibt. Die effektiven plastischen Dehnungen der Elemente werden gleichermaßen auf die Integrationspunkte des Zielnetzes interpoliert, wobei an dieser Stelle keine Notwendigkeit besteht, die auftretenden Rundungsfehler iterativ auszubalancieren. Da die Wirkungen dieser Differenzen erst dann in Erscheinung treten, wenn die Belastungen des Bauteils äquivalente Spannungen oberhalb der Dehngrenze des bereits verfestigten Materials (WH) hervorrufen, werden im Rahmen von Lastfällen der virtuellen Bauteilausrichtung die damit akzeptieren Fehler als vernachlässigbar gering angenommen. Anhand der Darstellung in Abbildung 6-11 lässt sich erkennen, dass die Ergebnisse des Mapping-Verfahrens die plastischen Vergleichsdehnungen qualitativ und quantitativ mit dem ursprünglichen Netz harmonisieren.

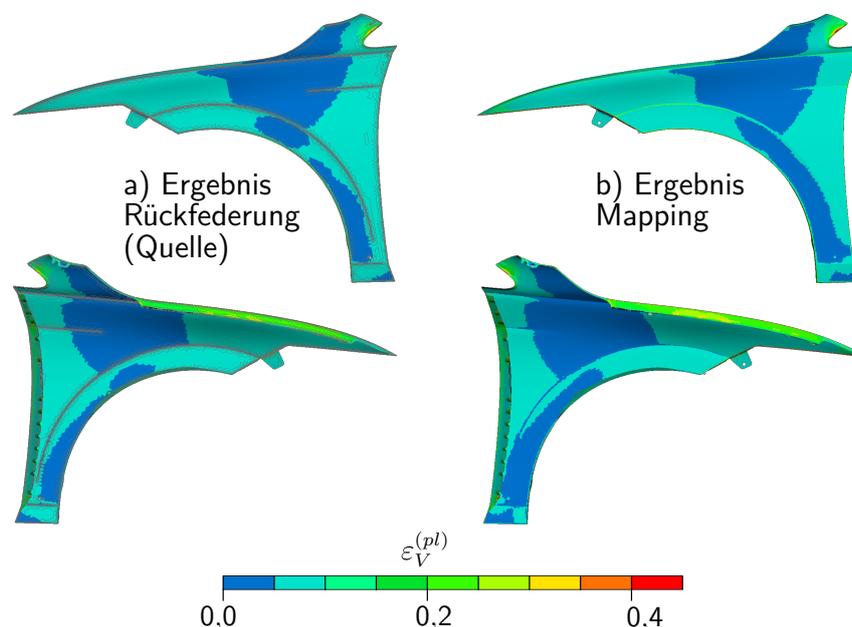


Abb. 6-11: Gegenüberstellung der plastischen Vergleichsdehnungen vor und nach dem Mapping

Das Vorgehen zur Übertragung der plastischen Vordehnungen wird gleichermaßen für die elementbasierten Zuweisungen der variablen Blechdicken angewendet und führt unter Zuhilfenahme des Vergleichs in Abbildung 6-12 auf stringente Resultate. Je stärker sich die Momentangestalt von der ursprünglich ebenen Platine entfernt, desto höher fallen in beiden Szenarien dementsprechend auch die Kennwerte der plastischen Vordehnung und damit die Querkontraktion der Elemente aus. Die weitere Modellierung folgt der beschriebenen Herangehensweise im Kapitel zum VMB, indem das aus Verstärkung und Außenteil bestehende Simulationsmodell des Kotflügels mittels Volumen- und Fastener-Elementen verknüpft und die Lagerung an der Zielposition durch Connectoren nachgebildet wird. Die Berücksichtigung der Gravitation in Fahrzeuglage erfolgt durch das ABAQUS-Keyword DLOAD und den in die negative z -Richtung orientierten Vektor für die Fallbeschleunigung g . Damit steht das verknüpfte Gesamtmodell der zu Beginn des Kapitels idealisierten Prozesskette (s. Abb. 6-1) bereit, um die Sensitivität diverser Parameter auf

das Ergebnis der nachfolgenden virtuellen Bauteilausrichtung zu untersuchen.

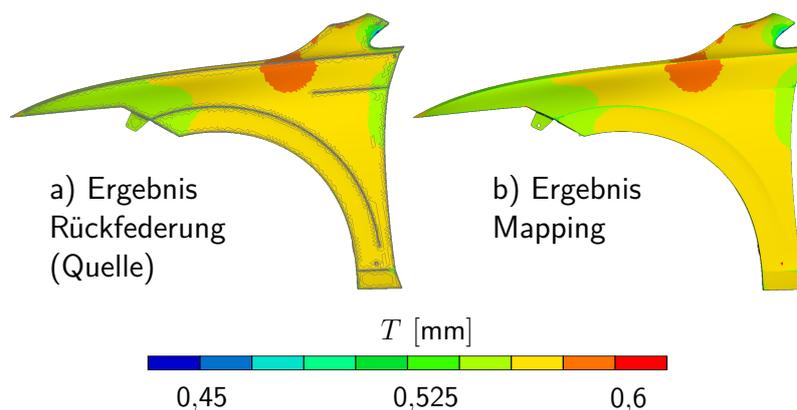


Abb. 6-12: Gegenüberstellung der Blechdickenverteilung vor und nach dem Mapping

6.2.2 Ergebnisse

Ausgehend vom oben entwickelten Referenzmodell werden weitere acht Versionen abgeleitet, bei denen jeweils ein einzelner Einflussfaktor variiert oder exkludiert wurde. Jedes dieser leicht unterschiedlichen Simulationsmodelle durchläuft anschließend die virtuelle Bauteilausrichtung inklusive Spannungsminimierung und wird am Ende mit dem ebenfalls ausgerichteten Referenzmodell verglichen. Die jeweilige maximale Differenz der A-B-Flächenvergleiche soll dabei als eindimensionaler Kennwert fungieren, um die Bedeutung der Einflussfaktoren zu klassifizieren. Die Ergebnisse dieses Ansatzes fasst Abbildung 6-13 mithilfe einer Rangliste zusammen.

Demnach zieht die Vernachlässigung des Verstärkungsteils im virtuellen Prüfprozess die größte maximale Differenz nach sich und trägt messbar zur Steifigkeit der Kotflügelspitze bei. Dieser Aspekt spielt insbesondere für die interprozessuale Qualitätssicherung eine Rolle, wenn zu entscheiden ist, ob Prüferkenntnisse bezüglich des einzelnen Außenteils identisch zur Baugruppe Kotflügel ausfallen und somit ggf. Prüfinstanzen eingespart werden können. Der zweitwichtigste Faktor in dieser Betrachtung stellt die Kompensation der Interpolationsfehler der Spannungen dar, da ein Weglassen dieses Zwischenschrittes nach der Ausrichtung letztlich in einer Abweichung von 0,46 mm resultiert, welche auf die bereits erwähnte initiale Verformung von 0,61 mm zurückzuführen ist. Die mit der Spannungskompensation einhergehenden Ungenauigkeiten für den virtuellen Prüfprozess werden dabei als unwesentlich eingestuft, da der ebenfalls in Abbildung 6-13 aufgelistete Effekt der Eigenspannungen lediglich bei 0,06 mm liegt.

Die Auswirkungen des Gravitationsfeldes lassen sich im realen Versuch nur mit erheblichem Aufwand isolieren und haben für die praktische Bauteilqualifizierung nur eine indirekte Bedeutung. Im Rahmen virtueller Methoden sollte speziell im Fall des Kotflügels der maximale Einfluss von 0,21 mm jedoch nicht vernachlässigt werden. Die Wirkungsrichtung ist demnach sowohl bei verketteten Simulationen als auch bei Modellen, die auf optischen Messungen beruhen, zu berücksichtigen.

sichtigen. Eine weniger starke Relevanz für das Prüfergebnis kristallisiert sich für die abhängig vom lokalen Umformungsgrad verjüngte Blechdicke und einer Variation des E-Moduls im Bereich von $\pm 5\%$ gegenüber dem Ausgangswert von 200 GPa heraus. Die Schwankung des E-Moduls kann einerseits aus inkonsistenten Eigenschaften des Platinenmaterials und andererseits aus dem Umformprozess in Verbindung mit dem Wärmeeintrag im KTL-Bad herrühren. Eine einheitliche Erhöhung bzw. Verringerung im genannten Ausmaß hat im Testfall jedoch nur sehr kleine Auswirkungen von maximal 0,03 mm zur Folge.

Hinsichtlich der Steigerung der Dehngrenze des Materials durch WH- oder BH-Effekte sind im Flächenvergleich der Test- und Referenzsimulationen keine Abweichungen festzustellen, sodass diese Faktoren ohne Genauigkeitseinbußen bei der virtuellen Bauteilausrichtung außer Acht gelassen werden können. Dieses Resultat erscheint nachvollziehbar, da sich die auftretenden Belastungen überwiegend im elastischen Bereich bewegen und deutlich höhere Spannungen in der Regel nur punktuell an den Anschraubpunkten zu beobachten sind. Der generell wichtigste Einflussfaktor für den virtuellen Prüfprozess, der nicht in der Abbildung enthalten ist, repräsentiert die Ist-Geometrie des Außenteils. Unabhängig davon, ob diese aus vorgeschalteten Simulationen oder optischen Messungen physischer Bauteile stammt, bildet diese Form die entscheidende Grundlage zur weiteren Bauteilqualifizierung.

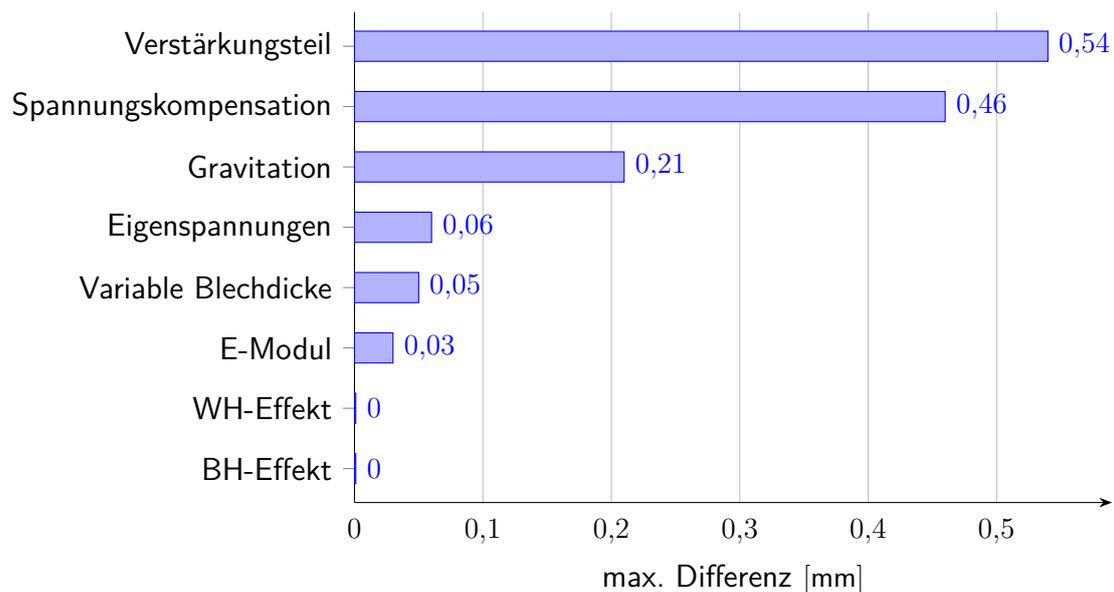


Abb. 6-13: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse. Verglichen wird jeweils die maximale Verschiebungsdifferenz zur Referenzsimulation

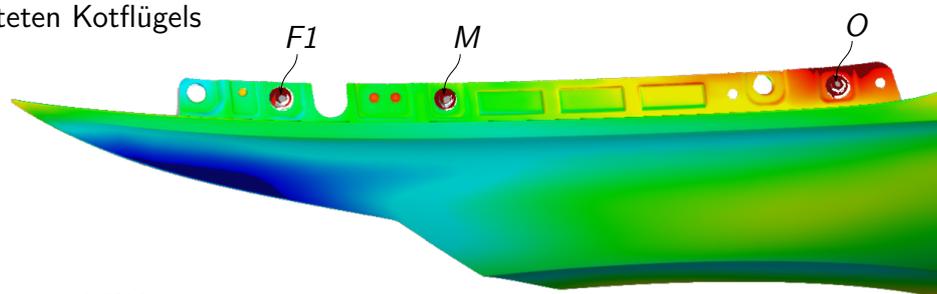
6.3 Ergebnisse der Bauteilqualifizierung

Das primäre Ziel der virtuellen Prozesskette besteht darin, bereits simulierte Prototypen in einer frühen Phase des PEP realitätsnah zu qualifizieren und damit Fehler im Sinne des Frontloadings

Fehler zu erkennen, bevor die ersten physischen Bauteile existieren. Vor diesem Hintergrund werden in Abbildung 6-14 die Ergebnisse der Bauteilqualifizierung eines physischen Kotflügels am Meisterbock mit den virtuellen Resultaten der zuvor entwickelten VPK verglichen. Dabei lassen sich zwei Gemeinsamkeiten feststellen: Um das Werkstück sowohl physisch als auch simulativ nach RPS auszurichten, muss die Position des Anschraubpunktes O in lokaler z -Richtung (nahezu identisch mit global z) mehr als 1,3mm gegenüber der Soll-Lage in CAD nach oben verstellt werden. Die zweite Gemeinsamkeit betrifft den vorderen Fugenbereich zum Scheinwerfer, der in beiden Fällen deutlich zu weit in Richtung Fahrzeuginnen kippt. Dieses Phänomen wird durch die Verrückung des Anschraubpunktes O verstärkt, da diese Bewegung gemäß des Hebelprinzips eine Verschiebung der Spitze des Kotflügels nach unten bzw. Fahrzeuginnen bewirkt, wobei die Befestigungspunkte M und $F1$ an dieser Stelle als Lagerpunkt für den Hebeleffekt fungieren.

Die dennoch vorhandenen quantitativen Unterschiede zwischen dem virtuellen und dem physischen Prüfergebnis sind im Wesentlichen auf zwei Gründe zurückzuführen: Zum einen geht die manuelle RPS-Ausrichtung mit einer höheren Streuung einher als es beim virtuellen Pendant der Fall ist. Zum anderen existiert keine exakte Verknüpfung zwischen dem Fertigungsstand des Kotflügels und der Freigabe der Umformsimulation. Trotzdem lässt sich konstatieren, dass beide Prüfmethode qualitativ dieselben Schlussfolgerungen für die Bauteilqualifizierung zulassen.

a) Messergebnis eines am AMB ausgerichteten Kotflügels



b) Ergebnis der VPK

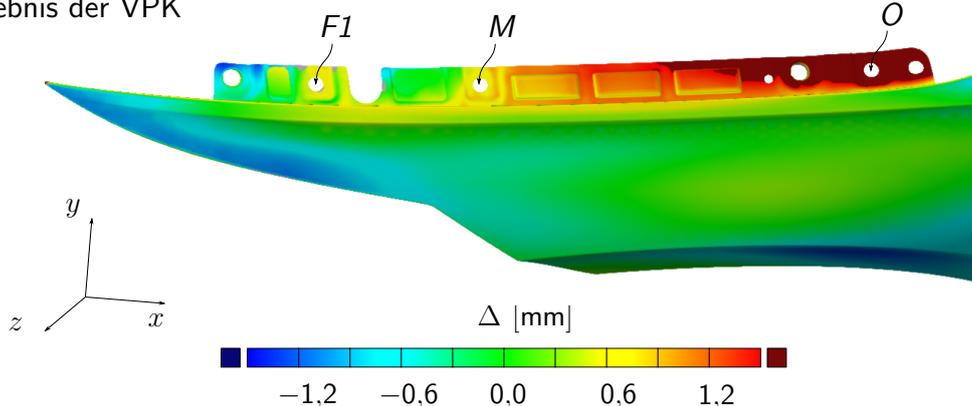


Abb. 6-14: Vergleich zwischen Ergebnis am AMB und am Ende der VPK (Fehlfarbendarstellung jeweils gegenüber CAD)

6.4 Zusammenfassung Virtuelle Prozesskette

Eine detaillierte Nachbildung der drei grundlegenden Herstellungsphasen Umformung, Zusammenbau und KTL eines Golf 8 Kotflügels mithilfe von virtuellen Methoden wäre weder effizient noch zielführend. Zudem erweist sich der Ansatz einer lückenlosen Prozessmodellierung auch nicht als notwendig, da die Auswirkungen der lokalen Blechumformung durch Clinchen und des durch das KTL-Bad erzeugten Wärmeeintrags auf die Steifigkeit des Gesamtbauteils eine untergeordnete Rolle spielen. Stattdessen sind lediglich die binären Informationen, ob die Clinchpunkte gesetzt und der Stützkleber ausgehärtet wurde, für die Steifigkeit und damit für die maßliche Qualifizierung von Bedeutung. Daher genügt an dieser Stelle die Beschreibung der entsprechenden Verbindungseigenschaften durch passende Ersatzelemente, welche das Außen- und Verstärkungsteil mechanisch verknüpfen. Anders verhält es sich bei der Umformung des Außenteils aus einer ebenen Platine, denn hierbei wird die maßgebliche Geometrie des Bauteils festgelegt. Die Ausgabe der zugehörigen Umformsimulation stellt darüber hinaus die Zustandsgrößen wie Eigenspannungen, Verfestigungskennwerte sowie die variierende Blechdicke zur Verfügung. Diese Informationen lassen sich durch entsprechende Mapping-Verfahren in das Simulationsmodell des VMB übertragen, um die virtuelle Ist-Geometrie möglichst verlustfrei weiterzugeben. Im Zuge einer Sensitivitätsanalyse kristallisiert sich jedoch heraus, dass der Effekt dieser zusätzlichen Daten relativ gering ausfällt. Umso entscheidender ist es, dass Verstärkungsteil und die Gravitationskraft im Prüfprozess zu berücksichtigen, da beide Parameter jeweils messbare Effekte im Zehntel-Millimeter Bereich verursachen. Nahezu keinen Einfluss haben Verfestigungsmechanismen des Materials durch den Umformungsprozess sowie durch das Bake-Hardening in der KTL und können daher problemlos im VMB-Ausrichtungsprozess vernachlässigt werden. Letztlich stellt sich bei einem Vergleich zwischen dem Prüfergebnis eines physischen Kotflügels, der am AMB aufgebaut wurde, und dem Endergebnis der virtuellen Prozesskette heraus, dass beide Verfahren qualitativ äquivalente Schlussfolgerungen für die Bauteilqualifizierung des Werkstücks ermöglichen.

7 Ergebnisdiskussion

In Bezug auf die zuvor gewonnen Erkenntnisse werden in diesem Kapitel entsprechende Schlussfolgerungen gezogen und hinsichtlich der technischen Potentiale bzw. mögliche Verbesserungen für den Bauteilqualifizierungsprozess diskutiert. Dabei wird zuerst auf den virtuellen Meisterbock und dessen Methode der Bauteilausrichtung durch Optimierungsalgorithmen eingegangen und im Anschluss stehen die Erfahrungen mit der virtuellen Prozesskette zur Debatte. Dabei besteht das Ziel zunächst darin, die im Kapitel 3 gestellten Forschungsfragen zu beantworten. Letztlich rückt der Fokus auf die Aussagesicherheit einer VMB Simulation und welche Stellschrauben in diesem Zusammenhang existieren bzw. welche über die größte Sensitivität verfügen.

7.1 Virtueller Meisterbock

In Kapitel 5 wurde ein technischer Ansatz entwickelt, welcher es ermöglicht, den gewählten Kotflügel virtuell in Einbaulage zu qualifizieren, ohne das Bauteil physisch zu montieren. Die dabei erreichte Genauigkeit (max. 0,22 mm Differenz zwischen Simulation und Aufbau am AMB) bestätigt die systematische Korrektheit des Ansatzes und damit die Voraussetzung, um für Korrekturschleifen als Prüfhilfsmittel eingesetzt zu werden. Die verbliebenen Abweichungen lassen sich nicht ausschließlich auf Vereinfachungen im Simulationsmodell zurückführen, sondern auch das Messergebnis des AMBs beinhaltet zufällige Messabweichungen (siehe Abb. 2-10). Aus diesem Grund wäre eine exakte Übereinstimmung nicht zu erwarten. Eine detailliertere Betrachtung zur Aussagesicherheit des VMB folgt in Abschnitt 7.3.

An dieser Stelle bleibt festzuhalten, dass die entwickelte Systematik für den Kotflügel zu verwertbaren Prüfergebnissen führt. Außerdem lässt sich die Vorgehensweise ohne Weiteres auf Kotflügel von anderen Fahrzeugmodellen übertragen, da die Randbedingungen in der Regel identisch ausfallen. Hingegen erfordert die virtuelle Abbildung sonstiger Anbauteile wie Frontklappen, Türen oder Heckklappen die Berücksichtigung zusätzlicher Einflüsse durch Dichtungen, Gasdruckfedern o.Ä. Der Ansatz zur virtuellen Bauteilausrichtung bleibt jedoch gleich. Diese Erkenntnis dient als Basis für die nachfolgende Beantwortung der Forschungsfragen.

1. Wie kann der systemische Bauteilqualifizierungsprozess optimiert werden?

Angesichts der Tatsache, dass trotz des Einsatzes virtueller Methoden weiterhin physische Prüfhilfsmittel notwendig bleiben, lassen sich im Fall des VMB ungeachtet der wirtschaftlichen Vor- oder Nachteile zwei mögliche Anwendungsszenarien aufstellen:

Szenario I: VMB in Kombination mit dem Außenmeisterbock (AMB)

Szenario II: VMB in Kombination mit einer Referenzkarosse (RFK)

In beiden Fällen dienen die physischen Prüfhilfsmittel zur Validierung der VMB-Simulationsmodelle zu Beginn des jeweiligen Fahrzeugprojektes. Darüber hinaus wird es zu gewissen Meilensteinen ohnehin notwendig sein, die Anbauteile physisch aufzubauen, um eine Bemusterung im realen Umfeld und haptischer Wahrnehmung durchzuführen. Die dazwischenliegenden Korrekturschleifen lassen sich hingegen effizienter mithilfe des VMB betreiben, vorausgesetzt eine systemische Prüfung inkl. Montageperipherie erscheint notwendig und das virtuelle Prüfhilfsmittel erfordert bei wiederholter Anwendung einen geringen Umfang an manueller Arbeit. Wenn auf diese Weise zumindest die Mehrheit der Bauteilqualifizierungen mithilfe des VMB durchgeführt werden, ergibt sich innerhalb der Meisterbockabteilung eine Verlagerung der Arbeitsspitzen. Dieser Aspekt referenziert nicht auf das in Abbildung 2-9 dargestellte Frontloading des PEP. Stattdessen verschiebt sich ein Großteil der Qualifizierungsarbeit vom physischen Meisterbock (Aufbau, Ausrichtung, Beschriftung, etc.) in die Phase zwischen KDF und dem Beginn der operativen AMB Nutzung (siehe Abbildung 2-8). In diesem Zeitraum werden alle für den VMB notwendigen Daten beschafft und zentral abgelegt. Außerdem sind die CAD-Dateien der relevanten Bauteile aufzubereiten und zu vernetzen (oder ggf. von anderen Abteilungen vorhandene FE-Netze weiterverwenden), um daraus die VMB-Simulationsmodelle zu erzeugen. Idealerweise wird der Simulationsablauf bzw. allgemein die Generierung der Ergebnisgeometrie durch den Einfluss der Montageperipherie soweit automatisiert, dass später im operativen Prozess lediglich die Bauteilmessungen ausgetauscht werden müssen. Diese Automatisierung ermöglicht gegenüber der konventionellen Methode am Meisterbock eine beschleunigte Bauteilqualifizierung in Einbaulage und somit sind die Voraussetzungen für raschere Korrekturschleifen gegeben.

Die übliche Vorgehensweise zur Bauteilqualifizierung besteht im Wesentlichen aus der wiederholten Bauteilbereitstellung, dem Aufbau mithilfe des physischen oder virtuellen Prüfhilfsmittels, der Messung und schließlich der Bemusterung des jeweiligen Bauteils. Ergänzend dazu bietet der VMB weitere Einsparpotentiale, da sich Erkenntnisse aus den Simulationen in die praktische Anwendung transferieren lassen. So dienen die Sensitivitätsanalysen zwischen Anschraub- und RPS-Punkten im Abschnitt 5.3 primär zunächst zur Kondensation des Optimierungsproblems. Gleichzeitig können die Ergebnisse aber auch zur manuellen RPS-Ausrichtung am AMB oder der RFK und zur optimalen Gestaltung des Montageplans des jeweiligen Bauteils in der Fertigungslinie genutzt werden. Außerdem können Bauteile mithilfe der virtuellen Bauteilausrichtung vorab qualifiziert werden, um zu entscheiden, ob das Bauteil nach der letzten Korrektur relevante Änderungen erfahren hat und ob sich somit überhaupt ein physischer Aufbau am AMB oder an der

RFK lohnt. Als Eingangsdaten können hierfür sowohl reale Messdaten als auch Ergebnisdaten einer vorangegangenen Herstellungssimulation (Stichwort VPK, s. Kap. 6) verwendet werden.

Eine ähnliche Vorgehensweise bietet sich insbesondere bei externen Fertigungen an: Vorausgesetzt der betreffende Zulieferer besitzt die entsprechende Messtechnik, das Know-How für möglichst spannungsfreie Messungen oder entsprechende Simulationskompetenz, können die so erzeugten Ergebnisdaten an die zu beliefernde Prüfinstanz der Qualitätssicherung übermittelt und dort virtuell qualifiziert werden. Darauf basierend lässt sich entscheiden, ob eine weiterführende Prüfung vor Ort zielführend erscheint. Erst dann würden logistische Ressourcen für den Transport des physischen Bauteils benötigt.

Letztlich bietet der Einsatz des VMB vor allem Vorteile in Kombination mit der kostengünstigeren RFK (Szenario II). Diese verursacht einen Bruchteil der Beschaffungskosten des AMB und spiegelt die tatsächliche Situation am Fahrzeug näher wieder, als der enger tolerierte Meisterbock. Fertigungsbedingte Abweichungen der RFK können zwar die Ursachenanalyse bei der Bauteilqualifizierung erschweren, jedoch lassen sich diese Analysen ohne Weiteres mithilfe des VMB komplementär ergänzen. Die virtuellen Abbilder der realen (imperfekten) Bauteile können durch simples Anpassen der Anschraubkoordinaten sowohl in der perfekten CAD-Umgebung als auch in der imperfekten RFK-Umgebung evaluiert werden. Anschließend lassen sich die relevanten Einflüsse durch einen A-B-Vergleich herausfiltern.

2. Wie lässt sich ein Bauteil mit Gestaltabweichungen virtuell nach RPS ausrichten?

Im Hinblick auf die in Abschnitt 2.4.4 erläuterte RPS-Systematik sind sechs Referenzpunkte (Haupt-RPS) festzulegen, um die Lage eines Bauteils im Raum statisch bestimmt zu definieren. Im Verlauf dessen wird keine Verformung des Bauteils verursacht. Insofern genügen für diesen Fall der RPS-Ausrichtung mathematische Ansätze ohne Berücksichtigung der Strukturmechanik, wie sie beispielsweise in den Softwaresystemen industrieller Messtechnik (GOM, etc.) zum Einsatz kommen. Die Punktwolken der jeweiligen Bauteile erfahren hierbei lediglich eine Starrkörperbewegung.

Wenn die Liste der einzubeziehenden RPS-Punkte hingegen durch mindestens einen weiteren Referenzpunkt (Hilfs-RPS) erweitert wird, entsteht eine Zwangslage (statische Überbestimmtheit), welche das reale Bauteil verformt und demzufolge eine aufwendigere virtuelle Vorgehensweise erfordert. Im Fall der systemischen Bauteilqualifizierung kommt erschwerend hinzu, dass die Bauteile mithilfe der Befestigungspunkte fixiert und indirekt über das dort vorhandene Spiel auszurichten sind. Durch die Formulierung eines Optimierungsproblems, bei dem die Positionen der Befestigungspunkte als Entwurfsvariablen und die Abweichungen der berechneten RPS-Koordinaten als zu minimierende Größen fungieren, lässt sich dieser Sachverhalt zielgerichtet lösen (s. Absch. 5.3). Das mechanische Verhalten des Bauteils im Zuge der Montage im Bauraum wird durch ein entsprechendes FE-Modell nachgebildet, um der erzwungenen Deformation Rechnung zutragen.

Die Wahl des eingesetzten Optimierungsalgorithmus kann je nach Randbedingungen unterschiedlich ausfallen, wobei sich im Rahmen der Bauteilqualifizierung des VW Golf 8 Kotflügels die Quasi-Newton-Methode SQP als geeignetste Variante herausstellt, da sie hinsichtlich Genauigkeit und Zeit die besten Resultate erzielt. Um die Rechenintensität bei wiederholter Anwendung der virtuellen Bauteilausrichtung zu minimieren, sollte vorab das Optimierungsproblem mithilfe einer Sensitivitätsanalyse kondensiert werden. Somit wird sichergestellt, dass der Optimierungsalgorithmus ausschließlich Parameter variiert, die einen wesentlichen Einfluss auf die Ausrichtung haben und zudem nicht durch Begrenzungen im Bauraum beschränkt sind.

3. Wie kann die Ausrichtungs- und Wiederholgenauigkeit durch virtuelle Methoden verbessert werden?

Das manuelle Ausrichten von Anbauteilen am physischen AMB oder der RFK besteht nach der initialen Montage aus der Wiederholung der folgenden Arbeitsschritte bis die Soll-Ist-Abweichung jedes einzelnen RPS-Punktes eine definierte Toleranz unterschreitet: *RPS-Abweichung messen, Schraube(n) lösen, Bauteil verrücken, Schraube(n) anziehen*. Die mithilfe dieser manuellen Iterationsschleife erreichbare Ausrichtungsgenauigkeit wird, insbesondere bei labilen Bauteilen wie dem Kotflügel, durch den dafür notwendigen Zeitaufwand beschränkt. Eine einzelne Wiederholung bewegt sich zeitlich zwar im Rahmen von wenigen Minuten, jedoch treiben die aufsummierten Iterationen bei vielen RPS-Punkten die Gesamtdauer schnell nach oben. Zudem beeinflusst das Verrücken eines einzelnen Befestigungspunktes oft gleich mehrere Bereiche des Bauteils, sodass sich unter Umständen zwar die beabsichtigte RPS-Abweichung minimiert, aber gleichzeitig andere Referenzpunkte, die bereits ausgerichtet waren, wieder verschieben. Diese Querabhängigkeiten spiegeln sich in der durchgeführten Sensitivitätsanalyse wieder (s. Abb. 5-18). In der Praxis wird deshalb eine Toleranz von 0,05 mm für Haupt-RPS und 0,2 mm für Neben-RPS zugelassen.

Bei der virtuellen Ausrichtung dauert eine vergleichbare Iterationsschleife im Fall des Kotflügels und der eingesetzten Berechnungshardware ca. 2 min, sodass in kurzer Zeit viele Montagekonstellationen gerechnet und letztlich eine genauere Ausrichtung gefunden werden kann. Somit wird in der Regel eine Toleranzanforderung von 0,02 mm sowohl für Haupt- als auch für Neben-RPS-Punkte mithilfe der virtuellen Optimierung erfüllt. Außerdem erfordert die automatisierte virtuelle Ausrichtung während der Laufzeit keine Kontrolle durch den Anwender. Infolgedessen kann eine gestartete Berechnung auch außerhalb der Arbeitszeit, ggf. über Nacht, autonom zu Ende rechnen. Gleichmaßen ließen sich je nach Bedarf bereits andere Aufgaben bearbeiten, wohingegen bei der manuellen Ausrichtung zur Einhaltung des verfügbaren Zeitfensters üblicherweise zwei Messtechniker je Bauteil in Vollzeit notwendig sind.

Die vergleichsweise hohe Ausrichtungstoleranz bei der manuellen Vorgehensweise führt außerdem dazu, dass voneinander abweichende Ausrichtungskonstellationen zustande kommen, wenn dasselbe Bauteil bei identischen Randbedingungen mehrmals nacheinander auf- und abgebaut wird. Das Ergebnis der manuellen Ausrichtung hängt demzufolge nicht nur von der Bauteilgeometrie

ab, sondern wird auch vom jeweiligen Bediener beeinflusst. Dahingegen liefert der Algorithmus zur virtuellen Ausrichtung bei konstanten Randbedingungen dauerhaft deckungsgleiche Ergebnisse und damit eine höhere Wiederholgenauigkeit. Die einzige Variable stellt die von CAD abweichende Bauteilgeometrie dar, welche durch eine optische Messung aufgenommen und dem Berechnungsprozess im STL Format als Eingangsgröße zur Verfügung gestellt wird.

4. Wie können mithilfe von virtuellen Methoden flexible Sonderanalysen gewährleistet werden?

Gegenüber der konventionellen Bauteilqualifizierung am AMB bietet die entwickelte virtuelle Ausrichtung eine hohe Flexibilität, da sich etwaige Anpassungen von Randbedingungen, Bauteilgeometrien oder -eigenschaften vergleichsweise einfach umsetzen lassen. Derartige Sonderanalysen sollen hier vereinfachend wie folgt kategorisiert und anschließend diskutiert werden: Ausrichtungs-, Ursachen- und Prognoseanalysen.

Anstatt der standardisierten Ausrichtung aller Haupt- und Neben-RPS-Punkte, können ebenso andere Referenzpunkte herangezogen werden. Hintergrund kann beispielsweise die Fragestellung sein, wie sich die im vorangegangenen Kapitel gezeigte Abweichung des Kotflügels im Bereich des Scheinwerfers ausrichten lässt, um im Idealfall alle geometrischen Anforderungen im Einbauzustand trotz mangelhafter Einzelteilgeometrie zu erfüllen. Zu diesem Zweck bietet sich eine virtuelle Sensitivitätsanalyse an, um zunächst einen oder mehrere geeignete Sonderausrichtungspunkte zu definieren. Diese können dann in den virtuellen Ausrichtungsprozess integriert und nach erfolgreicher Prüfung in das physische Pendant übertragen werden.

Standardmäßig zielt der AMB und die zugehörige VMB-Simulation auf die Qualifizierung der Bauteile in Nulllage ab, d.h. es wird angenommen, dass die Positionen der Anschraubpunkte am Gegenstück nahezu exakt den Vorgaben im CAD-Modell entsprechen. Zur Ursachenanalyse kann die virtuelle Bauteilausrichtung durch einfaches Anpassen der Zielpositionen mit den zugehörigen Spielen derart adaptiert werden, dass die resultierende Konstellation einer realen Karosserie mit den spezifischen Fertigungstoleranzen entspricht. Im Anschluss lässt sich durch einen A-B-Vergleich der Einfluss der imperfekten Karosserie auf das jeweilige Anbauteil herausfiltern. Ein ähnliche Vorgehensweise kann bei einer Reihe von Problemstellungen unterstützen.

Analog wird bei der Prognose von möglichen Korrekturmaßnahmen oder konstruktiver Änderungen vorgegangen. Soll zum Beispiel die Blechdicke eines Einzelteils bei sonst konstanten Prozessparametern geändert werden, zeigt ein virtueller Aufbau im digitalen Fahrzeugzwilling potentielle Nebenwirkungen der Maßnahme. Die mit einer geringen Blechdicke einhergehende Abnahme der Bauteilsteifigkeit kann trotz unveränderter Abmaße des betreffenden Einzelteils die Wechselwirkungen mit benachbarten Teilen oder Dichtungen beeinflussen, sodass unbeabsichtigt das korrelierende Fugenbild der Baugruppe in Mitleidenschaft gezogen wird. Mithilfe der VMB-Simulation und entsprechend adaptierten Blechdicken lässt sich in diesem Zusammenhang eine zuverlässigere Kosten-Nutzen-Prognose treffen.

Den nächsten Schritt zur effizienteren Bauteilqualifizierung repräsentiert die virtuelle Optimierung von Korrekturmaßnahmen: Mithilfe eines iterativen Verfahrens ließe sich beispielsweise die Vorhaltung eines Einzelteils solange adaptieren, bis die jeweiligen Qualitätsanforderungen im Einbauzustand erfüllt sind. Die somit aus Perspektive des Gesamtproduktes optimierte Bauteilgeometrie würde anschließend als Soll-Vorgabe zurück in den Umformprozess fließen. Vorab wäre an dieser Stelle jedoch zu entscheiden, ob die beabsichtigten Geometrieabweichungen des Einzelteils vom Nominal ebenso projektübergreifend als tolerierbar angenommen werden können. Die Abweichungen mögen sich im konkreten Gesamtprodukt aufheben und augenscheinlich verschwinden, jedoch könnte die Wiederverwendung als Übernahmebauteil bei anderen Projekten zu Problemen führen.

7.2 Virtuelle Prozesskette

5. Was sind die größten Einflüsse einer virtuellen Prozesskette mit dem Ziel eines Frontloadings der Fehlerbehebung?

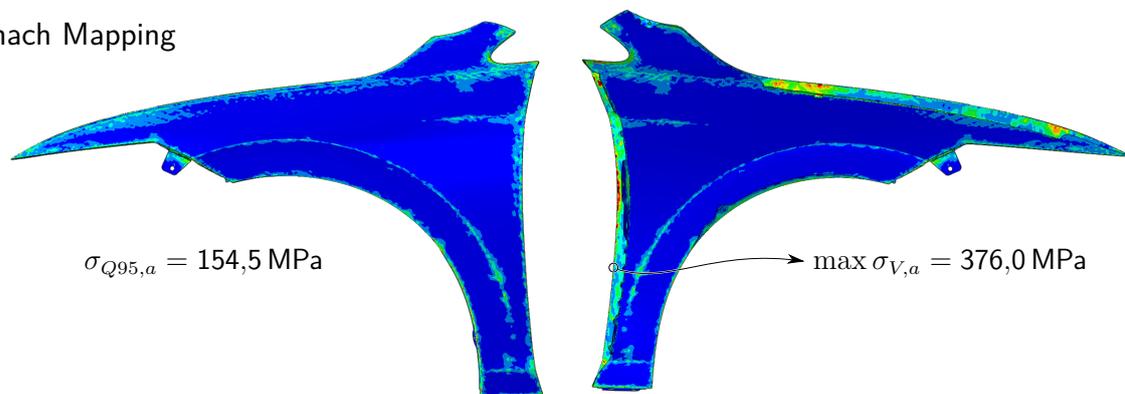
Gemäß Abschnitt 6.1 wird der tatsächliche Herstellungsprozess, des aus zwei Einzelteilen bestehenden Kotflügels, für die virtuelle Abbildung idealisiert, wobei der Haupteinfluss für die geometrischen Abmessungen nachvollziehbar aus dem Umformprozess des Außenteils herrührt. Möglicherweise auftretende Formabweichungen des Verstärkungsteils werden vernachlässigt, da aufgrund der Verbindung zum Außenteil über Stützkleber und Clinchpunkte lediglich eine Beeinflussung der Steifigkeit der Gesamtbaugruppe zu erwarten ist. Diese Annahme gilt zumindest für verhältnismäßig kleine Formabweichungen innerhalb der zulässigen Form- und Lagetoleranzen im Zehntelmillimeterbereich. Hinsichtlich der mechanischen Stabilität bestätigt sich in der Sensitivitätsanalyse im Abschnitt 6.2, dass das Verstärkungsteil die Steifigkeit des vorderen Bereichs deutlich erhöht und den größten Einflussfaktor im Vergleich zu den anderen untersuchten Parametern darstellt. Diese Tatsache erscheint im Kontext der physischen Bauteilqualifizierung insbesondere deshalb interessant, weil in der praktischen Anwendung oftmals der Einfluss des Verstärkungsteils vernachlässigt und ausschließlich das Außenteil in die Prüfung einbezogen wird. Insofern gilt es festzuhalten, dass die Verstärkungselemente bei Blechanbauteilen grundsätzlich zu berücksichtigen sind. Um im Zweifelsfall die Relevanz für die VPK in einer frühen Phase zu prüfen, ist an dieser Stelle ein analoger A/B-Vergleich, also mit oder ohne der jeweiligen Verstärkung, simulativ durchzuführen. Bei mehreren Verstärkungsteilen wäre dieser Vorgang entsprechend zu wiederholen. Außerdem könnten mögliche geometrische Abweichungen der betroffenen Verstärkungsteile durch entsprechende Morphing-Algorithmen vorweggenommen und so ggf. vernachlässigbare Teile oder besonders kritische Bereiche für die übergeordnete Baugruppe herausgefiltert werden.

Laut Abbildung 6-13 geht die Spannungskompensation als zweitwichtigster Einflussfaktor der VPK hervor, da es infolge des Mappings von Zustandsgrößen bei heterogenen FE-Netzen zu Interpolations-

tionsfehlern kommt. Sollte das somit generierte mechanische Ungleichgewicht nicht ausbalanciert werden, ändert sich die initiale Bauteilgeometrie und die Ausrichtung führt dementsprechend zu abweichenden, ggf. fehlerhaften Resultaten.

Dieser Einflussfaktor kann jedoch vernachlässigt werden, da letztlich auch der Effekt ausbalancierter Eigenspannungen auf die ausgerichtete Bauteilgeometrie mit 0,06 mm vergleichsweise gering ausfällt. Ebenso weisen Verfestigungsmechanismen durch Work- und Bake-Hardening-Effekte nahezu keinen Einfluss auf das virtuelle Ausrichtungsergebnis auf, da die Montage ausschließlich elastische Verformungen bewirkt. Einerseits entsprechen die relativen Änderungen der plastischen Vergleichsdehnungen Null (siehe Anhang E1) und andererseits steigt das Spannungsfeld innerhalb des Bauteils infolge der Montage und Ausrichtung lediglich marginal an. Anhand Abbildung 7-1 lässt sich erkennen, dass der durch die Zwangslage im Einbauzustand generierte Maximalwert punktuell um 20 MPa zunimmt, dennoch befinden sich 95 % der Spannungswerte unter 160 MPa und liegen damit deutlich unter der Dehngrenze von $R_p = 200$ MPa.

a) nach Mapping



b) nach virtueller Ausrichtung

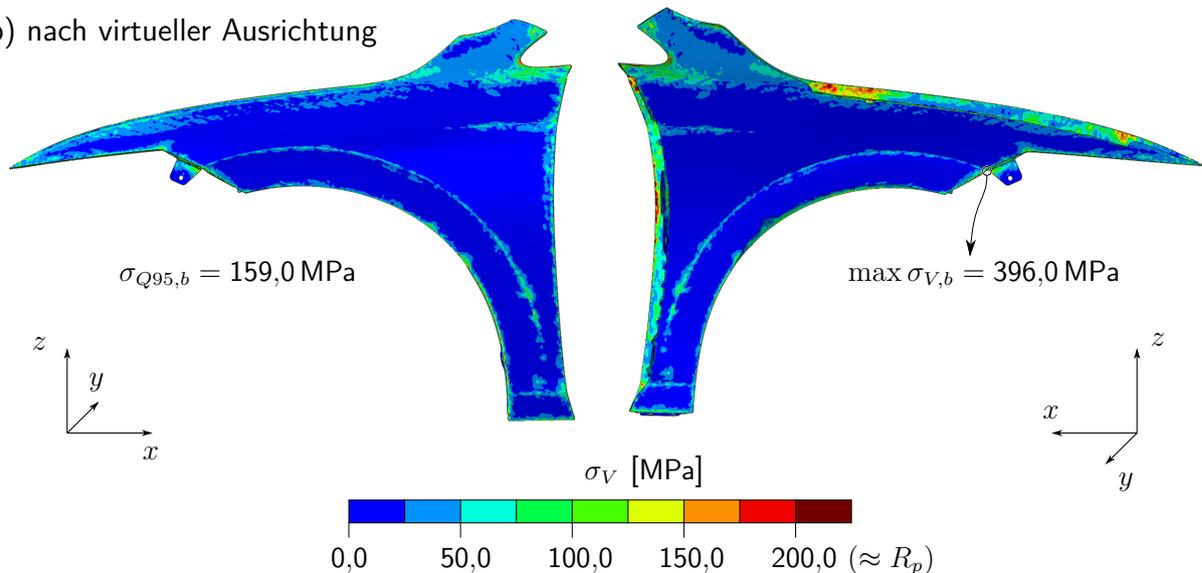


Abb. 7-1: Restspannungen im Kotflügel nach der virtuellen Prozesskette

Die durch den Umformungsprozess verursachten lokalen Blechdickenänderungen sowie evtl. schwankende Elastizitätsmoduln des Materials von $\pm 5\%$ wirken sich vernachlässigbar gering auf das

Ergebnis der virtuellen Bauteilausrichtung aus. Der relativ geringe Einfluss einer inkonsistenten Blechdicke erscheint plausibel, da die Beträge der Änderungen für die Mehrheit der Elemente vergleichsweise gering ausfallen.

Somit lässt sich festhalten, dass die simulative Berücksichtigung der inkonsistenten Blechdicke und der Zustandsgrößen (Spannung, Dehnung) bzw. den damit einhergehenden Verfestigungsmechanismen des Materials in Bezug auf die entwickelte virtuelle Ausrichtung nicht zu messbaren Effekten führt. Insofern kann auf eine Übertragung dieser Feldgrößen auf das Simulationsmodell zur virtuellen Montage am Fahrzeug aus vorangegangenen FE-Simulationen (z.B. Umform- oder Falzsimulation) zumindest im Fall von Kotflügeln verzichtet werden. Es wird angenommen, dass diese Schlussfolgerung auch auf andere Anbauteile (Türen vorn & hinten, Front- sowie Heckklappe) zutrifft, da diese eine höhere Eigensteifigkeit aufweisen und sich deren Deformationen ebenfalls im elastischen Bereich innerhalb von wenigen Millimetern bewegen.

Außerdem bestätigt diese Erkenntnis die Vorgehensweise im Rahmen des VMB: Hierbei wird lediglich die abweichende Geometrie des realen Bauteils mithilfe optischer Messtechnik in das Simulationsmodell überführt, wobei sich die Feldgrößen Spannung, Dehnung und Blechdicke nicht ohne Weiteres berücksichtigen lassen. Dieser Aspekt kann jedoch aus den zuvor angeführten Gründen vernachlässigt werden. Insofern erscheinen auch die Validierungsergebnisse im Abschnitt 5.4.2 plausibel.

Letztlich gilt es, auch die Wirkung der Gravitationskraft insbesondere bei labilen Bauteilen zu prüfen und im Prozess der virtuellen Bauteilausrichtung zu berücksichtigen. Die in Abbildung 6-13 aufgeführte Sensitivität von $\sim 0,2$ mm basiert auf einem vollständig zurückgefederten Kotflügel. Dieser ungespannte Zustand lässt sich virtuell vergleichsweise einfach durch eine Rückfederungssimulation erzeugen, in der sich das Modell bei deaktivierter Gravitationslast und statisch bestimmter Lagerung in eine Art schwerelosen Zustand begibt. Dahingegen enthalten reale Bauteilmessungen unweigerlich die durch Gravitation induzierten Verformungen. Deshalb muss bei der Integration von optischen Messergebnissen in entsprechende VMB-Simulationen unbedingt die durch Gravitation hervorgerufene Deformation untersucht werden. Je nach Messaufnahmedesign und Bauteilsteifigkeit kann eine Rückrechnung dieser Deformation erforderlich werden, um eine möglichst unverfälschte Startgeometrie des Bauteils für die virtuelle Ausrichtung zu erhalten. Nachdem eine real gemessene Bauteilgeometrie auf diese Weise zunächst in den schwerelosen Zustand gebracht wird oder die Gravitationsverformungen in der Messaufnahme sehr gering ausfallen, wird während des virtuellen Ausrichtungsprozesses die Gravitationskraft in Einbaulage wieder beaufschlagt.

Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse zur Sensitivität der VPK lassen sich zukünftige VPK-Projekte auf die wesentlichen Bestandteile reduzieren und insgesamt durch einen vorhandenen Fahrplan zügiger realisieren, um bei etwaig notwendigen Korrekturmaßnahmen rechtzeitig reagieren zu können. Für die auf vorangegangene FE-Simulationen basierende virtuelle Montage genügt es, die Geometrie der außenliegenden Einzelteile zu übertragen, innen liegende Verstärkungsteile

im Nominalzustand zu integrieren und die Gravitation im Hinblick auf die Einbaulage zu aktivieren. Für den Fall das durch größere Formabweichungen der Außenteile Durchdringungen mit den Verstärkungsteilen entstehen, bietet es sich ggf. an, diese durch ein geometrisches Mapping (Morphing) in den Bauraum einzupassen.

7.3 Aussagesicherheit

Bevor die Ergebnisse eines teilweise oder vollständig virtuellen Prüfprozederes als Grundlage für darauffolgende Korrekturmaßnahmen innerhalb des Bauteilqualifizierungsprozesses in Anspruch genommen werden, bedarf es einer Bewertung der zu erwartenden Aussagesicherheit. Zur generellen Bestimmung von Messunsicherheiten und einer detaillierten Bewertung der Prüfprozesseignung existieren einschlägige Leitfäden, wie beispielsweise der VDA-Band 5 „Mess- und Prüfprozesse – Eignung, Planung und Management“ [80] oder die GUM Norm 98-3:2008-09 „Messunsicherheit – Teil 3: Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen“ [81]. Wenngleich eine vollumfängliche Betrachtung auf Basis dieser Normen den Rahmen dieser Arbeit sprengen würde, sollen in diesem Abschnitt zumindest die offensichtlichen Haupteinflüsse untersucht werden.

Gemäß Abbildung 2-10 im Kapitel zu den messtechnischen Grundlagen (2.3) lassen sich Messabweichungen auf zufällige oder systematische Ursachen zurückführen. In Analogie dazu werden nachfolgend die potentiellen Ursachen für Ergebnisabweichungen zwischen VMB- sowie VPK-Simulationen und den jeweiligen wahren Werten in diese beiden Kategorien unterteilt und analysiert. An der Stelle muss noch darauf hingewiesen werden, dass Messergebnisse vom AMB nicht prinzipiell mit den wahren Werten übereinstimmen, da hier ebenso Messunsicherheiten auftreten. Insofern müssen Differenzen zwischen physischen und virtuellen Ergebnisgeometrien nicht zwingend auf suboptimale Simulationsmodelle hinweisen.

7.3.1 Zufällige Abweichungen

Entgegen dem konventionellen Prüfhilfsmittel AMB können bei der virtuellen Qualifizierung mithilfe der VMB- oder VPK-Simulation bei konstanter Ausgangsgeometrie des Bauteils und unveränderter Konfiguration des Modells zufällige Abweichungen ausgeschlossen werden. Vor diesem Hintergrund leitet sich für den virtuellen Prüfprozess lediglich eine Variable ab, welche das Ergebnis bei sonst konstanten Parametern beeinflusst: die bereits erwähnte Ausgangsgeometrie.

Wenn die Ausgangsgeometrie aus optischen Messungen hervorgeht, beeinflusst die Wiederholgenauigkeit des Messprozesses nachfolgend auch die Schwankung des Simulationsergebnisses. Die Präzision des optischen Messprozesses wird im Wesentlichen wiederum durch drei Einflussfaktoren dirigiert: Das verwendete optische Messsystem, die Bauteilaufnahme und der damit gekoppelte Auflegevorgang des Bauteils durch ggf. unterschiedliche Anwender. Die Messunsicherheit des optischen Sensors lässt sich in der Regel beim jeweiligen Hersteller in Erfahrung bringen und sollte im

Kontext des VMB vernachlässigt werden können, da Abweichungen im Zehntelmillimeterbereich nicht zu erwarten sind [30, S.44].

Umso wichtiger erscheint es daher, die Bauteilaufnahme für ungespannte Messungen (vgl. Abschnitt 4.1.4) soweit zu optimieren, dass möglichst geringe Streubreiten gewährleistet werden. Zu diesem Zweck ist während der Konzeptionierung der Auf- und Anlagepunkte darauf zu achten, ein wiederholgenaues Ablegen des Bauteils zu ermöglichen, um somit den Spielraum für eventuelles Verrutschen zu reduzieren. Zudem sollten die Positionen der Auflager so gewählt werden, dass die durch Gravitation induzierte Verformung insbesondere bei labilen Bauteilen minimiert wird. Infolgedessen haben kleine Ungenauigkeiten bei der Positionierung einen geringeren Einfluss auf das Messergebnis. Einen zusätzlichen Vorteil bieten pneumatische Auflager, welche das Werkstück mithilfe von Druckluft für einen kurzen Moment schweben lassen und somit etwaige Querkräfte durch die Reibung zwischen Werkstückoberfläche und Auflagepunkt eliminieren (vgl. *Virtual Clamping*, Fa. GOM [82]). Damit einhergehend lassen sich bereits systematische Fehler durch etwaige Gravitationsrückrechnungen verringern, wobei dieser Punkt im nachfolgenden Abschnitt wieder aufgegriffen wird.

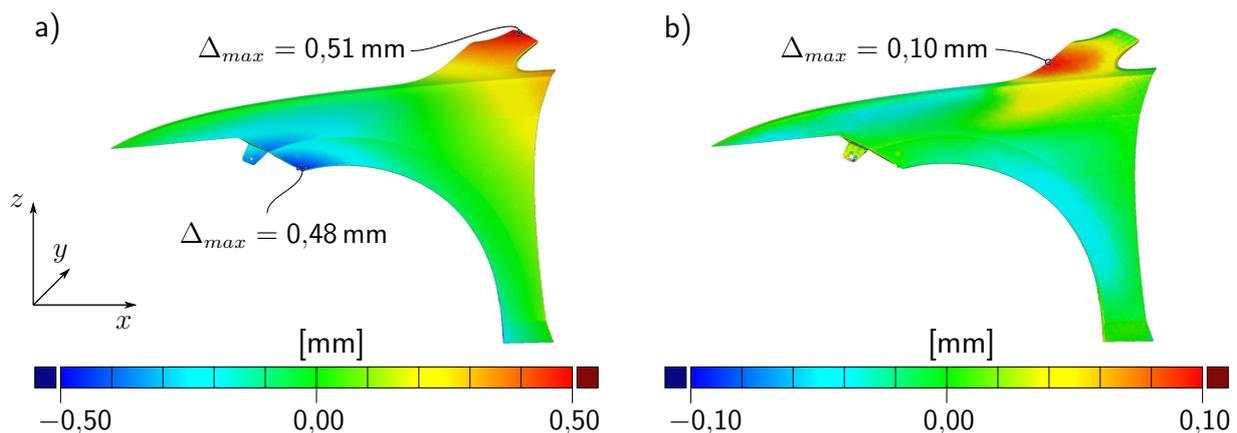


Abb. 7-2: Sensitivität der ungespannten Messung auf das Ergebnis der VMB-Simulation: a) Flächenvergleich der beiden größten Ausreißer von 35 optischen Messungen eines ungespannten Kotflügels b) Flächenvergleich der beiden größten Ausreißer nach der VMB-Simulation

Dennoch lässt sich eine gewisse Schwankungsbreite der optischen Messergebnisse von ungespannten Bauteilen nicht ausschließen. Mit dem Ziel die Sensitivität derartiger Streuungen auf das Ergebnis der VMB-Simulation zu identifizieren, wird derselbe Kotflügel jeweils fünfmal von sieben unterschiedlichen Anwendern auf die freie Messaufnahme in Abbildung 4-6 aufgelegt und anschließend mit identischen Einstellungen optisch gemessen. Die Auswertung aller Messungen zeigt, dass Streuungen hauptsächlich im Bereich von $\pm 0,1 \text{ mm}$ auftreten, wobei die maximale Abweichung zwischen zwei Messergebnissen bei $\sim 0,5 \text{ mm}$ liegt (s. Abb. 7-2 a). Wenn diese beiden Ausreißermessungen jeweils aus Ausgangsgeometrie für zwei separate VMB-Simulationen genutzt und im Anschluss die Ergebnisgeometrien verglichen werden, führt dies zu einer maximalen Differenz von $0,1 \text{ mm}$ (s. Abb. 7-2 b). Insofern kann der Einfluss des ungespannten optischen Messprozesses

inklusive unterschiedlicher Anwender auf das Qualifizierungsergebnis bei diesem Kotflügel und der verwendeten Messaufnahme vernachlässigt werden. Es ist anzunehmen, dass dies zumindest auch für Bauteile gilt, deren äußere Dimension ähnlich oder kleiner ausfallen. Im Anwendungsfall ist diese Annahme dennoch zu prüfen.

7.3.2 Systematische Abweichungen

Anders als bei klassischen Messvorgängen werden Simulationsergebnisse in der Regel nicht durch zufällige Abweichungen beeinflusst. Das Ausmaß etwaiger Fehler bleibt bei wiederholten Berechnungen und sonst gleichen Bedingungen invariant, weshalb derartige Diskrepanzen zwischen Ergebnis und wahren Wert den systematischen Abweichungen zuzuordnen sind (vgl. systematische Messabweichung Abb. 2-10). Allgemein wird die Genauigkeit von FE-Simulationen durch folgende Einflussfaktoren bestimmt [53, S. 312]:

- Netzqualität (inkl. Elementtyp)
- gewählte Materialmodellierung
- numerische Genauigkeit der Rechnung
- Idealisierungsgrad

Die detaillierten Anforderungen an die Netzqualität werden in Abschnitt 4.2.4 erläutert und bei der Vernetzung des Kotflügels in Kapitel 5.1.1 entsprechend angewendet. Die erforderliche Netzfeinheit bei gleichzeitig möglichst geringer Rechenzeit ergibt sich anhand einer Konvergenzstudie. Prinzipiell lässt sich elastisches Materialverhalten sehr präzise vorhersagen, wohingegen plastisches Materialverhalten maßgebend von der korrekten Modellierung des Fließverhaltens abhängt. Da bei VMB-Simulationen davon ausgegangen werden kann, dass primär elastische Verformungen auftreten (vgl. Diskussion Forschungsfrage 5), lässt sich ein ungenügendes Materialmodell als relevante Fehlerquelle ausschließen. Zumal die Sensitivität des E-Moduls auf das Simulationsergebnis sehr gering ausfällt.

Hinsichtlich der numerischen Genauigkeit verfügt der Benutzer in der Regel nur eingeschränkte Möglichkeiten um diese zu beeinflussen. Im Fall des eingesetzten FE-Solvers ABAQUS/STANDARD gehört die doppelte Genauigkeit von Gleitkommazahlen bereits zur Standardeinstellung (*double precision* [83, S.19]). Für Anwendungen im VMB Kontext wird dies als absolut präzise genug angenommen.

Die Aussagesicherheit von VMB-Simulationen wird im Wesentlichen vom Idealisierungsgrad und damit von den Eingabewerten für die Positionen der Anschraubpunkte beeinflusst. Die Anschraubpunkte am Gegenstück werden idealisiert als starr angenommen, wohingegen diese Annahme das Verhalten am physischen AMB bzw. an der RFK nicht vollständig abbildet. Je nach Steifigkeit der betreffenden Anbindungspunkte können entsprechende Verformungen auftreten. Darüber hinaus

ist es essentiell, die richtigen Freiheitsgrade zu wählen, die von dem Optimierungsalgorithmus verwendet werden, um die RPS-Abweichungen zu minimieren. Demzufolge stellt die Sensitivitätsanalyse der Freiheitsgrade an den Anschraubpunkten eine entscheidende Komponente des virtuellen Prüfprozesses dar.

Gemäß Literatur liegen die Differenzen zwischen FE-Lösung und den wahren Werten im Allgemeinen bei 7-10 % (vgl. Abschnitt 4.2.4, [53, S. 299]). Wenn für den vorliegenden Anwendungsfall das Aufbauergebnis des Kotflügels am AMB näherungsweise als wahrer Wert angenommen wird, ergibt sich laut Abbildung 5-21 eine maximale Abweichung von 0,22 mm. Im Verhältnis zur maximalen Abweichung des ungespannten Kotflügels von 4,85 mm (s. Abb. B1) resultiert ein relativer Fehler von rund 4,5%. Demzufolge wird das Intervall aus der Fachliteratur zwar etwas unterschritten, aber der ermittelte Relativwert kann aufgrund der unbekannt exakten Lösung nur als Orientierungshilfe herangezogen werden. Dennoch erscheint das Validierungsergebnis in Kapitel 5.4.2 plausibel.

Genauigkeit Gravitationsrückrechnung

Wie bereits im vorangegangenen Abschnitt erwähnt, kann es insbesondere bei labilen Bauteilen notwendig sein, dass Deformationen durch das Erdschwerefeld in einem Zwischenschritt näherungsweise zurückgerechnet werden. Dies gilt vor allem dann, wenn Bauteile während der optischen Messung statt parallel zur Einbaulage (vgl. Abb. 4-6) um 90 Grad o. ä. gedreht positioniert sind. Um bei solchen ungespannten Messungen prinzipiell die systematischen Abweichungen zu minimieren, sollte die für diesen Zweck genutzte *freie Messaufnahme* im Idealfall folgende Anforderungen erfüllen:

- statisch bestimmte Lagerung des Bauteils
- optimierte Positionierung der Lagerpunkte (minimale Überhänge)
- zur Bauteiloberfläche orthogonale Auflager mit punktförmigen Kontaktflächen
- Reibung zwischen Auflager und Bauteil tendiert gegen Null

Diese Kriterien bieten eine geeignete Orientierungshilfe, von der dennoch in begründeten Fällen abgewichen werden kann. Zum Beispiel für den Fall, dass ein labiles Bauteil mittels statisch bestimmter Lagerung eine vergleichsweise hohe Verformung im Zentimeterbereich erfährt. An der Stelle bietet es sich an, zusätzlich Stützstellen anzubringen, wobei der hierdurch induzierte Effekt auf die Gravitationsrückrechnung bzw. das letztliche Simulationsergebnis zu prüfen ist.

Ein möglicher Ansatz um ein frei gemessene Bauteile zunächst in eine Art schwerelosen Zustand zu überführen, sieht wie folgt aus: Das auf die Messung gemorphte FE-Netz wird an den tatsächlichen Auflagerpunkten gelagert, indem dort wegbasierte Randbedingungen am nächstgelegenen Knoten definiert und gleich Null gesetzt werden. Als Lastfall wird die Fallbeschleunigung in umgekehrter Richtung zur jeweiligen Konstellation im Messvorgang definiert.

Diese Vorgehensweise beinhaltet eine wesentliche Vereinfachung: Es wird angenommen, dass die durch die Gravitation generierten Spannungen im Bauteil keinen Einfluss auf das Ergebnis eben dieser Rückrechnung haben. Denn in der Realität wirken diese der Gravitationskraft entgegen und bilden ein Gleichgewicht. Solange sich die gravitationsbedingten Deformation im Bereich von wenigen Zehntelmillimeter bewegen, führt diese Annahme dennoch zu ausreichend genauen Resultaten. Falls bei einer Gravitationsrechnung jedoch nicht die benötigte Genauigkeit erreicht wird, ließe sich der gewählte Ansatz auf zwei Wegen optimieren: Einerseits kann der Spannungszustand näherungsweise bestimmt und anschließend auf das gemessene Modell übertragen werden, indem das nominale FE-Netz auf der virtuellen freien Messaufnahme dem Gravitationsfeld ausgesetzt wird und ein Mapping-Algorithmus die berechneten Spannungs- und Dehnungswerte transferiert. Andererseits lässt sich auch der Wert der Fallbeschleunigung kalibrieren bis das Ergebnis präzise genug der Zielgeometrie entspricht.

Zusammenfassend lässt sich jedoch festhalten, dass Bauteildeformationen aufgrund des Gravitationseinflusses nicht absolut exakt zurückgerechnet werden können. Für die praktische Anwendung erscheinen die Ansätze dennoch für Geometrien sowohl aus optischen Messungen als auch aus vorangegangenen FE-Simulationen als hinreichend genau. Je kleiner die in der freien Messaufnahme durch das Schwerfeld generierten Deformationen ausfallen, desto geringer sind die bei der Gravitationsrückrechnung zu erwartenden systematischen Abweichungen.

Genauigkeit Rückfederungssimulation

Für den Fall einer VPK besteht bei einem Wechsel des Softwaresystems zwischen verschiedenen Gewerken bzw. Prozessschritten zudem die Möglichkeit, dass das Bauteil vor der Weitergabe bereits simulativ in den schwerelosen Zustand gebracht wird. Somit lässt sich die Gravitationsrückrechnung im Folgesystem umgehen und eine mögliche Fehlerquelle minimieren.

Dennoch können bei der virtuellen Verkettung insbesondere von umformenden Prozessen relevante (systematische) Abweichungen nicht ausgeschlossen werden, da die Rückfederung des jeweiligen Bauteils nach dem Aufklappen des Umformwerkzeugs von einer Reihe von komplexen Faktoren abhängt. Hierzu zählen u.a. E-Modul, Streckgrenze und Verfestigungsverhalten des Werkstoffs sowie primär die Bauteilgeometrie, der Prozessablauf und die Elastizität des Werkzeugs in Kombination mit der Maschine [34, S. 300]. Bis heute weisen alle Materialmodelle Diskrepanzen gegenüber dem realen Materialverhalten auf [34, S. 190]. Hinzu kommen unzulängliche Reibmodelle und die oftmals zu starke Abstraktion von Werkzeug und zugehöriger Werkzeugmaschine als Starrkörper [34, S. 314].

Wenn die Ergebnisse einer Rückfederungssimulation, beispielsweise nach der Umformsimulation eines Einzelteils oder der Falzsimulation eine Baugruppe, als Eingangsgeometrie für die VMB-Simulation dienen, hängt somit auch dessen Resultat maßgebend eben von dieser Ausgangsgeometrie ab. In diesem Zusammenhang stellt das Ergebnis der VPK für den Kotflügel keine Ausnahme dar. Ein Abgleich zwischen physischer und virtueller Geometrie in Kapitel 6.3 zeigt

quantitative Unterschiede von mehreren Zehntelmillimetern auf, welche zwar nicht vollständig, aber jedenfalls im signifikanten Maße von der virtuellen Umformhistorie abhängen. An dieser Stelle sei als weitere Fehlerquellen vor allem auf die Inkonsistenz der Datenstände hingewiesen. Nichtsdestotrotz stimmen die Resultate durchaus auf qualitativer Ebene überein. Vor diesem Hintergrund wirkt eine präzise Prognose der maßlichen Bauteilqualität auf Basis einer VPK zumindest im Bereich von mehreren Zehntelmillimetern realistisch. Um Fertigungsprozesse zukünftig effizient und im Sinne des Frontloadings in der frühen Phase des PEP noch präziser virtuell zu optimieren, gilt es die verschiedenen Fachbereiche hinsichtlich einer VPK stärker zu vernetzen und somit die jeweils maximale Prognosegüte der einzelnen Herstellungssimulationen zu heben.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Auf den ersten Blick erscheinen hohe Qualitätsanforderungen an das Exterieur von Personenkraftwagen (Pkw) insbesondere im Hinblick auf Spalt- und Fugenmaße nicht zeitgemäß, da Kunden z.B. mehr Wert auf sogenannte Begeisterungsanforderungen wie Smartphone-Integration oder autonome Fahrfunktionen legen. Doch beim näheren Hinsehen stellt sich daraus, dass abweichende Fugenverläufe durchaus einen Einfluss auf die wahrgenommene Qualität und damit auf die Kaufentscheidung haben können (siehe Abb. 2-6 und 2-7). Infolgedessen erscheint es für die OEMs auch aus ökonomischer Perspektive sinnvoll, die relevanten Fertigungsprozesse in Bezug auf Anmutungsqualität und Kosteneffizienz zu optimieren. Hinzu kommt aufgrund des wachsenden Wettbewerbs die Notwendigkeit, alle Effizienzgewinne zur Kürzung der Fristen für Serienanläufe zu heben. Deshalb gilt es, Möglichkeiten zur Beschleunigung des Bauteilqualifizierungsprozesses insbesondere auch für Exterieur-Bauteile zu finden.

Der konventionellen Herangehensweise zur Minimierung fertigungsbedingter Abweichungen von Exterieur-Bauteilen liegt prinzipiell ein reaktiver Ansatz zu Grunde. Das heißt, erst durch das Fertigen von Prototypenteilen lässt sich infolge eines Abgleichs mit dem Soll-Zustand eine qualitative Bewertung vornehmen. Während dieser Soll-Ist-Vergleich für Einzelteile prozessbegleitend vergleichsweise einfach realisierbar ist, müssen Baugruppen des Exterieurs (Kotflügel, Klappen und Türen) zunächst mehrere Prozessschritte bis zur Prüfung durchlaufen. Dabei können sich Abweichungen der Einzelteile gegenseitig aufheben oder aufsummieren. Um die daraus resultierenden Differenzen in Einbaulage und unter dem zusätzlichen Einfluss der Montageperipherie (Dichtungen, Gasdruckfedern, Lageabweichungen von Befestigungspunkten) zu quantifizieren, hat sich als Prüfhilfsmittel hierfür der aus Aluminiumprofilen bestehende Außenmeisterbock (AMB) etabliert. Obgleich sich der AMB als geeignetes Hilfsmittel erwiesen hat und Prüfungen sowie Ursachenanalysen unabhängig vom aktuellen Stand der zugehörigen Karosserie ermöglicht, existieren signifikante Nachteile. Neben den Beschaffungs- und Betriebskosten ergeben sich Verbesserungspotentiale vor allem hinsichtlich der technischen Leistungsfähigkeit (siehe Tab. 3-1). Zum einen betrifft das die Wiederhol-, Ausrichtungs- und Fertigungsgenauigkeit des AMB und zum anderen wird nach Optionen gesucht, wie Sensitivitätsanalysen und Korrekturprognosen zur Unterstützung des Bauteilqualifizierungsprozesses einfacher handhabbar sind. Den größten Einflussfaktor zur Verkürzung des Produktentstehungsprozess (PEP) betrifft die notwendige Anzahl an Korrekturschleifen bis zur Erfüllung aller Toleranzvorgaben. Darauf kann die Bauteilqualifizierung mithilfe des AMB prozessinhärent erst relativ spät Einfluss nehmen. Bis eine Schleife inklusive

Festlegung der Korrekturmaßnahme, deren Umsetzung sowie das erneute Fertigen der jeweiligen Teile vergehen in der Regel mehrere Wochen.

In Anbetracht dieser Kehrseiten lassen sich die in dieser Arbeit untersuchten Forschungsfragen auf zwei Kernaspekte herunterbrechen: Zunächst muss überprüft werden, wie sich der vorhandene Bauteilqualifizierungsprozess des Exterieurs mithilfe eines Prozessmodells basierend auf der Finite-Elemente-Methode (FEM) optimieren lässt. Darauf aufbauend stellt sich die Frage, wie innerhalb des PEP früher Einfluss auf die Anmutungsqualität genommen werden kann, um auf diese Weise die Anzahl an physischen Korrekturschleifen zu reduzieren.

Das in dieser Arbeit dafür vorgesehene Forschungsdesign besteht aus vier Bestandteilen. Grundlage ist der relevante Stand der Technik bezüglich Qualität, Messtechnik und des betreffenden Bauteilqualifizierungsprozesses. Danach wird für die spätere Methodenentwicklung ein Kotflügel als Musterbauteil festgelegt und deren mechanische Eigenschaften sowie dessen Fertigungsablauf dokumentiert. Das Zusammenfassen der theoretischen Hintergründe zur Struktursimulation und Optimierung fungieren als Vorbereitung für den dritten Teil, der Virtueller Meisterbock (VMB) Simulation für den Kotflügel. Das hierbei entwickelte Verfahren wird anschließend im vierten Teil erweitert und im Rahmen einer Virtuelle Prozesskette (VPK) ebenfalls auf den Kotflügel angewendet.

Das resultierende FE-Modell des Kotflügels besteht primär aus Schalenelementen (*Shells*), welche im Fall des Außenteils krümmungsabhängig und somit im Fugenbereich besonders fein aufgelöst sind, um bei gleichbleibend hoher Genauigkeit geringe Rechenzeiten zu gewährleisten. Lediglich der Stützkleber zwischen Außen- und Verstärkungsteil wird durch Volumenelemente (*Solids*) repräsentiert, wobei beide Materialmodelle auf einem linearen Ansatz beruhen. Die Definition der Randbedingungen an den Anschraubpunkten beinhaltet jeweils eine Koppelverbindung (*Coupling*) zu den umliegenden Elementen und ein *Connector*-Element zwischen dessen Referenzknoten und der Zielposition am AMB. Zur Wiederhol- und Vergleichbarkeit der Qualifizierung am AMB werden vordefinierte Referenzpunkte, die sogenannten RPS-Punkte, mithilfe des jeweils vorhandenen Spiels zwischen Schraube und Bohrung im betreffenden Bauteil ausgerichtet. Korrespondierend dazu wird für das Prozessmodell eine virtuelle Bauteilausrichtung entwickelt: Die Freiheitsgrade der Anschraubpunkte lassen sich als Eingangsvariablen und die aus dem Simulationsergebnis ermittelten RPS-Abweichungen als zu minimierende Ergebnisgrößen nutzen, um daraus die Zielfunktion für ein mathematisches Optimierungsproblem abzuleiten (Zielfunktion I). Das Bauteil wird somit durch das Minimieren der Zielfunktion ausgerichtet, wobei durchaus verschiedene Minimallösungen existieren können. Das Erweitern der Zielfunktion durch einen Spannungszustand darstellenden Vergleichswert ermöglicht dem Lösungsalgorithmus hingegen, eine Ausrichtung zu finden, bei der das Bauteil einer möglichst geringen Belastung ausgesetzt ist (Zielfunktion II). Bevor dieser Ansatz beim relativ rechenintensiven Kotflügel Anwendung findet, wird anhand eines stark vereinfachten Schalenmodells ein geeigneter Optimierungsalgorithmus herausgefiltert: Sequentielle Quadratische Programmierung (SQP). Außerdem lässt sich durch eine Korrelati-

onsanalyse die hohe Gesamtzahl an Freiheitsgraden des Kotflügels auf das relevante Minimum reduzieren, die zur Ausrichtung benötigt werden. Somit verringert sich ebenfalls die Rechenzeit. Für den Fall einer Testrechnung mit bekannter optimaler Ausrichtung des Kotflügels findet der Optimierungsalgorithmus für beide Zielfunktionen ein passendes Minimum. Jedoch stellt sich heraus, dass bei der ersten Zielfunktion ein lokales Optimum ermittelt wurde, welches einen erhöhten Spannungszustand des Bauteils aufweist. Dennoch bleibt festzuhalten, dass die entwickelte Methodik unabhängig von der Zielfunktion eine die Toleranzvorgaben erfüllende Ausrichtung findet. Zum Zweck der Validierung mit dem realen Prozess wird ein Kotflügel ungespannt aufgenommen und vollflächig optisch gemessen. Anschließend deformiert eine Mapping-Algorithmus (Morphing) solange das nominale FE-Netz des Kotflügels, bis dieses der zuvor gemessenen Punktwolke entspricht. Somit repräsentiert das FE-Modell ein reales Bauteil inklusive deren geometrische Abweichungen. Sowohl der reale Kotflügel als auch dessen virtuelles Abbild werden am AMB bzw. mit der beschriebenen Methodik am VMB montiert. Die resultierenden Geometrien liegen maximal etwa zwei Zehntelmillimeter voneinander entfernt, wobei sich die Optimierungsergebnisse auf von Zielfunktion I und II in diesem Fall nicht unterscheiden. Die Differenz zwischen AMB und VMB wird als hinreichend genau bewertet, da einerseits auch der physische Meisterbockprozess mit Unsicherheiten behaftet ist und andererseits führen beide Ergebnisse zu korrelierenden Qualitätsbeurteilungen. Somit wird die gleiche Basis zur nachfolgenden Ableitung von Korrekturmaßnahmen gewährleistet. Zudem wird das in der Einleitung formulierte Ziel, ein Prozessmodell für die Bauteilqualifizierung am AMB zu entwickeln, als erreicht betrachtet.

Mit dem Ziel aus Sicht der Qualitätssicherung früher Einfluss auf die geometrische Bauteilqualität zu nehmen, wird für denselben Kotflügel eine VPK generiert. Deren wesentliche Bestandteile sind die Umformsimulation des Außenteils und die darauf basierende VMB-Simulation. Das für diese Arbeit erstellte nominale FE-Netz wird ebenfalls mithilfe eines Morphings der Ergebnisgeometrie aus der Umformung angepasst. Damit sich in einem zusätzlichen Schritt neben der variierenden Blechdicke auch Spannungen und Dehnungen übertragen lassen, wird das FE-Modell für die VMB-Simulation mit einem nichtlinearen Materialmodell ausgestattet. Die anschließenden Sensitivitätsanalysen weisen jedoch nach, dass der Effekt der transferierten Zustandsgrößen maximal sechs Hundertstel Millimeter beträgt. Ebenso führt auch eine fünf prozentige Variation des E-Moduls zu vernachlässigbar kleinen Differenzen. Für labile Bauteile wie den Kotflügel rufen die Berücksichtigung des Verstärkungsteils ($\approx 0,5\text{ mm}$) sowie der Gravitationskraft ($\approx 0,2\text{ mm}$) deutlich signifikantere Unterschiede hervor.

In Bezug auf die erste Forschungsfrage lassen sich unter der Annahme, dass die entwickelte Methodik auch auf die anderen Anbauteile des Exterieurs (Front- & Heckklappe, Türen) übertragbar ist, folgende Schlussfolgerungen ziehen: Der Einsatz von VMB-Simulationen ermöglicht eine beschleunigte Bauteilqualifizierung, wenn Simulationsmodelle entsprechend vorbereitet und sich wiederholende Teile des Ablaufs automatisiert sind. Zudem können virtuell einfach umzusetzende Sensitivitätsanalysen den Prozess unterstützen. Dazu zählen insbesondere A/B-Vergleiche

zwischen perfekter und imperfekter Montageperipherie, also beispielsweise der Unterschied zwischen der Montage am eng tolerierten AMB und einer fertigungsbedingt abweichenden RFK. Diese Möglichkeit unterstützt somit einen alternativen Ansatz für Bauteilqualifizierungsprozesse ohne den kostenintensiven AMB. Stattdessen kann eine RFK zum Einsatz kommen, welche durch VMB Simulationen ergänzt wird und ggf. zur Ursachenanalyse das Montageergebnis in geometrisch perfekter CAD-Umgebung bereitstellt.

Entscheidend für die Prozessoptimierung insgesamt und speziell für eine Reduzierung der Anzahl von notwendigen Korrekturschleifen ist das frühere Eingreifen innerhalb des PEP: Bevor reale Bauteile und deren Presswerkzeuge existieren, lassen sich Fehler deutlich kosteneffizienter beheben (Frontloading, s. Abb. 2-9). Zusammenfassend für die Untersuchungen zur VPK im Rahmen dieser Arbeit kann festgestellt werden, dass die Berücksichtigung von Zustandsgrößen (Spannung, Dehnung, Blechdicke) aus vorhergehenden Prozesssimulationen keinen signifikanten Einfluss auf das Ergebnis der VMB Simulation des Kotflügels zeigt. Daher genügt es, die Bauteilgeometrie mittels geometrischem Mapping (Morphing) zu übertragen und lediglich ein lineares Materialmodell vorzusehen. Dies bestätigt außerdem die zuvor beschriebene Herangehensweise mit Messdaten, bei der die IST-Geometrie aus einer optischen Messung stammt. Prozessinhärent enthält die Messung keine Kenntnis über Spannungen und Dehnungen im Bauteil. Diese Schlussfolgerungen basieren auf denen am Kotflügel durchgeführten Untersuchungen, jedoch wird angenommen, dass die restlichen Blechbauteile des Exterieurs diesbezüglich keine Ausnahme darstellen. Zu erwarten ist eher das Gegenteil: Aufgrund der höheren Steifigkeit von Klappen und Türen werden die durch die Montageperipherie erzeugten relativen Verformungen wahrscheinlich noch geringer ausfallen und dementsprechend im elastischen Bereich bleiben.

Aus übergeordneter Perspektive erlaubt dieser Aspekt zwei Vorteile: Der Arbeitsaufwand zur Erstellung der VMB Simulation sinkt und gleichzeitig wird eine hohe Vergleichbarkeit über mehrere Meilensteine des PEP hinweg gewährleistet. Denn sowohl Ergebnisse vorhergehender Simulationen als auch Messergebnisse realer Bauteile können auf die gleiche Art und Weise mittels VMB Simulation geprüft werden. Den größten Benefit bietet eine VPK, welche am Ende mittels VMB Simulation die Montage am Fahrzeug abbildet, jedoch innerhalb des Zeitfensters zwischen KDF und Werkzeugbeauftragung: Hier erlauben virtuelle Korrekturschleifen eine effiziente Fehlerbehebung. Im Idealfall würden dann schon die ersten Prototypenteile alle Anforderungen im eingebauten Zustand erfüllen. Auch wenn die Wahrscheinlichkeit für einen derart reibungslosen Prozess unwahrscheinlich wirkt, hilft dennoch bereits jede eingesparte physische Korrekturschleife enorm bei der Kosteneinsparung und damit der Wettbewerbsfähigkeit des Unternehmens.

Wenn auf der Basis von VMB Simulationen Korrekturmaßnahmen vorgenommen werden, stellt sich die Frage, wie belastbar diese Ergebnisse sind. Die Aussagesicherheit einer VMB Simulation hängt im Wesentlichen von zwei Faktoren ab: Zunächst kann die zu verwendende Eingangsgeometrie sowohl zufällige als auch systematische Abweichungen beinhalten. Für den Fall einer VPK hängen etwaige systematische Fehler der Eingangsgeometrie von der Genauigkeit der vorherigen

Simulationen ab. Die Ergebnisse von Rückfederungssimulationen (am Ende von Umformprozessen o.Ä.) werden von vielen Variablen beeinflusst und können je nach Idealisierungsgrad stark schwanken. Im Fall von zufälligen Abweichungen bei optischen Messungen auf ungespannten Messaufnahmen zeigt sich hingegen eine relativ geringe Sensitivität auf der Ergebnis der VMB Simulation. Dennoch sollte die Wiederholgenauigkeit der freien Messungen gewährleistet und der Gravitationseinfluss auf das Bauteil geprüft werden. Es empfiehlt sich, dass Design einer freien Messaufnahme hinsichtlich eines möglichst geringen Gravitationseinfluss zu optimieren und/ oder mithilfe einer Gravitationsrückrechnung dem Effekt entgegenzuwirken. Der zweite Faktor betrifft die Modellqualität der VMB Simulation selbst. Das Vernachlässigen von Verstärkungsbauteilen oder der Gravitationskraft in Einbaulage kann zu relevanten systematischen Abweichungen führen. Die größte Bedeutung wird der korrekten Modellierung der Befestigungspunkte zuteil. Diese muss einerseits das mechanische Verhalten realitätsnah widerspiegeln und andererseits benötigt der Optimierungsalgorithmus die richtigen Freiheitsgrade zur Ausrichtung nach RPS.

Ausgehend von den vorgestellten Ergebnissen zum virtuellen Bauteilqualifizierungsprozess stehen für dessen kontinuierliche Weiterentwicklung und Verbesserung mehrere Ansatzpunkte zur Verfügung. In Bezug auf den operativen Einsatz wäre zu untersuchen, ob die VMB Simulation mit imperfekten Bauteildaten immer notwendig ist oder ob Erkenntnisse auf CAD-Basis prinzipiell ausreichen, um den relativen Effekt der Montageperipherie zu bewerten. Die VMB Simulation mit Berücksichtigung der geometrischen Abweichungen würde dennoch als Analysetool notwendig sein.

Den größten Hebel um die Wirtschaftlichkeit von Fahrzeuganläufen zu optimieren, bietet die zunehmende Steigerung der Prognosegüte von einzelnen Prozesssimulationen (z.B. Umform-, Füge-, Falz- und Wärmeverzugssimulation) und darauf aufbauend deren Verknüpfung zur VPK [34, S. 314]. Dabei gilt es zu beachten, dass analog zum Beispiel Kotflügel nicht jeder Prozessschritt einen relevanten Einfluss auf das jeweilige Bauteil zur Folge hat. Insofern müssen auch für die restlichen Bauteile des Exterieurs die Hauptbeitragsleister identifiziert werden, um effiziente VPKs bereitzustellen, die dem Trend zu kürzeren Fahrzeuganläufen genügen.

Darüber hinaus stellt sich die Frage, wie in der VPK mit den üblichen geometrischen Schwankungen bei der Bleichteilfertigung umgegangen wird. Ein möglicher Ansatz wäre die statistische Variation der Bauteilgeometrie, wobei beispielsweise ein Ergebnis der Umformsimulation als Erwartungswert dieser Statistik fungiert. Durch die anschließende Weiterverarbeitung in darauffolgenden Simulationen lassen sich potentiell auftretende Abweichungen nach ihrem Stellenwert für das Gesamtprodukt klassifizieren. Trotz des deutlich höheren Rechenaufwands erlaubt dies ein frühzeitigeres Gegensteuern in kritischen Bereichen. Dieser Ansatz kann ebenso bei Einzelteilen unterstützen, für die keine Fertigungssimulationen vorgesehen sind. Im Rahmen von Lieferantenbauteilen tritt dieser Fall häufiger auf.

Letztlich muss der virtuelle Bauteilqualifizierungsprozess auch auf Bauteile, welche aus anderen metallischen oder nichtmetallischen Werkstoffen bestehen, erweitert werden. Der Anteil von

Blechbauteilen im Exterieur eines Fahrzeugs wird tendenziell weiter sinken. Stattdessen kommen vermehrt Mischbauweisen mit Aluminium und insbesondere Kunststoffbauteile oder Faserverbundwerkstoffe zum Einsatz. Trotz deren anisotroper Materialverhalten kann die FE-Modellierung für die virtuelle Montage am Meisterbock wahrscheinlich auf lineare Ansätze zurückgreifen, da auch hier die Verformungen in der Regel relativ klein bleiben.

Literatur

- [1] Wendelstorf, J.: "Beiträge der Wissenschaft zur Industrie 4.0!? Metallurgie - Kolloquium 2016". Institut für Metallurgie. de.
Konferenzbeitrag. Clausthal: Technische Universität Clausthal, 2016. 23 S.
URL: [10.21268/20161102-111057](https://doi.org/10.21268/20161102-111057).
- [2] Statistisches Bundesamt, Hrsg.: *VGR Monitor Deutschland - Bruttoinlandsprodukt. Wirtschaftsstruktur - Anteile in % am BIP*. 2022.
URL: <https://service.destatis.de/DE/vgr-monitor-deutschland/bip.html>
(besucht am 11.08.2022).
- [3] Statistisches Bundesamt, Hrsg.: *Beschäftigte und Umsatz der Betriebe im Verarbeitenden Gewerbe: Deutschland, Monate, Wirtschaftszweige. Monatsbericht im Verarbeitenden Gewerbe*. WZ08-29 Herstellung von Kraftwagen und Kraftwagenteilen. 2022. URL:
<https://www-genesis.destatis.de/genesis/online?sequenz=tabelleErgebnis&selectionname=42111-0004&sachmerkmal=WZ08X2&sachschluesel=WZ08-29#abreadcrumb> (besucht am 11.08.2022).
- [4] Jannsen, N. et al.: "Autoindustrie — auf dem richtigen Weg?"
In: *Wirtschaftsdienst* 99.7 (2019). PII: 2475, S. 451–469. ISSN: 0043-6275.
DOI: [10.1007/s10273-019-2475-z](https://doi.org/10.1007/s10273-019-2475-z).
URL: <https://static-content.springer.com/pdf/art%3A10.1007%2Fs10273-019-2475-z.pdf?token=1579949164279--c04abdac2329f799e292a7bc9b0081eba5ee6da4ccd81a8e1c7c24797c353ac6eabb09f0a9eafa8a3194e54af35873c7aecdc4fde779cb513555168885a827> (besucht am 25.01.2020).
- [5] Köllner, C.: *Sehr gute Bilanzen verdecken kritische Lage der Autoindustrie*. Hrsg. von Springer Professional. Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH. 2022.
URL: <https://www.springerprofessional.de/automobilwirtschaft/automobilproduktion/sehr-gute-bilanzen-verdecken-kritische-lage-der-autoindustrie/23115684> (besucht am 11.08.2022).
- [6] Aral Aktiengesellschaft, Hrsg.: *Aral Studie - Trends beim Autokauf*. 2021.
URL: <https://www.aral.de/content/dam/aral/business->
-

- sites/de/global/retail/presse/pressemeldungen/2021/broschuere-aral-studie-trends-beim-autokauf.pdf (besucht am 12.08.2022).
- [7] Pfeifer, T. und Masing, W., Hrsg.: *Masing Handbuch Qualitätsmanagement*. ger. 6., überarb. Aufl. Masing, Walter (Begr.) Pfeifer, Tilo (Hrsg.) Hanser, München und Wien, 2014. XL, 1111. ISBN: 978-3-446-43992-4.
- [8] Schuh, G., Stölzle, W. und Straube, F., Hrsg.: *Anlaufmanagement in der Automobilindustrie erfolgreich umsetzen. Ein Leitfaden für die Praxis*. ger. SpringerLink Bücher. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2008. 275 S. ISBN: 978-3-540-78407-4. DOI: 10.1007/978-3-540-78407-4.
- [9] Händler, A. et al.:
"Virtualization of the Meisterbock Process Using Numerical Simulation".
In: *14. Magdeburger Maschinenbau-Tage 2019 - Magdeburger Ingenieurtag : 24. und 25. September 2019 : Tagungsband*. Hrsg. von Universitäts- Und Landesbibliothek Sachsen-Anhalt und Martin-Luther Universität. Hrsg. von Grote, K.-H. et al. Otto von Guericke University Library, Magdeburg, Germany, 2019, S. 280–290. DOI: 10.25673/13731.
- [10] Zech, R.: *Qualitätsmanagement und gute Arbeit. Grundlagen einer gelingenden Qualitätsentwicklung für Einsteiger und Skeptiker*. ger. 2. Aufl. 2019. SpringerLink Bücher. Zech, Rainer (VerfasserIn). Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2019. Online-Ressource (X, 47. ISBN: 9783658236014. DOI: 10.1007/978-3-658-23601-4. URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-658-23601-4>.
- [11] Geiger, W.: *Beschaffungsmanagement als einzige Methode zum einfachen und wirtschaftlichen Gestalten des einen Managementsystems einer Organisation*. Edition Management. Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH, München, 2013. XXX, 440 S. ISBN: 9783486589290.
- [12] Deutsches Institut für Normung e. V., Hrsg.: *Qualitätsmanagementsysteme – Grundlagen und Begriffe (ISO 9000:2015)*. DIN EN ISO. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 1. Nov. 2015.
- [13] Deutsches Institut für Normung e. V., Hrsg.: *Qualitätsmanagementsysteme – Anforderungen (ISO 9001:2015)*. DIN EN ISO. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 1. Nov. 2015.
- [14] Kocian-Dirr, C.: *Betriebswirtschaftslehre - Schnell erfasst*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2019. 9 S. ISBN: 978-3-662-54289-7. DOI: 10.1007/978-3-662-54290-3.
- [15] Noriaki Kano et al.: "Attractive Quality and Must-Be Quality".
In: *The Journal of the Japanese Society for Quality Control*. 1984.
-

- [16] Hölzing, J. A.: *Die Kano-Theorie der Kundenzufriedenheitsmessung. Eine theoretische und empirische Überprüfung*. Zugl.: Mannheim, Univ., Diss., 2007. ger. 1. Aufl. Gabler Edition Wissenschaft. Gabler Verlag / GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden, Wiesbaden, 2008. 264 S. ISBN: 978-3-8349-1219-0. DOI: 10.1007/978-3-8349-9864-4.
- [17] Lin, F.-H. et al.: "Empirical research on Kano's model and customer satisfaction". eng. In: *PloS one* 12.9 (2017). Journal Article. DOI: 10.1371/journal.pone.0183888. eprint: 28873418. (Besucht am 08.01.2020).
- [18] Hucho, W.-H.: "Einführung". In: *Hucho - Aerodynamik des Automobils. Strömungsmechanik, Wärmetechnik, Fahrdynamik, Komfort*. Hrsg. von Schütz, T. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2013, S. 1–67. DOI: 10.1007/978-3-8348-2316-8_1. (Besucht am 05.01.2020).
- [19] Volkswagen AG, Hrsg.: *Dekarbonisierung – was ist das? Dekarbonisierung ist wichtig, um den Klimawandel aufzuhalten. Doch was genau verbirgt sich dahinter? Und was tut Volkswagen dafür?* 2019. URL: <https://www.volkswagenag.com/de/news/stories/2019/03/decarbonization-what-is-it.html>.
- [20] Helfer, M.: "Umströmungsgeräusche". In: *Hucho - Aerodynamik des Automobils. Strömungsmechanik, Wärmetechnik, Fahrdynamik, Komfort*. Hrsg. von Schütz, T. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2013, S. 523–549. DOI: 10.1007/978-3-8348-2316-8_8. (Besucht am 05.01.2020).
- [21] Ishikawa, K.: *Guide to quality control*. eng. 13. print. Asian Productivity Organization, Tokyo, 1996. 225 S. ISBN: 9283310365.
- [22] Brüggemann, H. und Bremer, P.: *Grundlagen Qualitätsmanagement. Von den Werkzeugen über Methoden zum TQM*. 3rd ed. 2020. Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2020. 1Online-Ressource (X, 299 Seiten). ISBN: 978-3-658-28780-1.
- [23] Braess, H.-H. et al.: "Produktentstehungsprozess". In: *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*. Hrsg. von Pischinger, S. und Seiffert, U. 8., aktualisiert und erweitert Aufl. 2016. SpringerLink Bücher. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2016, S. 1257–1369. ISBN: 978-3-658-09528-4. DOI: 10.1007/978-3-658-09528-4_11. (Besucht am 25.01.2020).
- [24] *VW Golf*. Wikipedia. 2020. URL: https://de.wikipedia.org/wiki/VW_Golf (besucht am 19.01.2020).
- [25] Diez, W.: *Wohin steuert die deutsche Automobilindustrie?* ger. 2., überarbeitete und aktualisierte Auflage. Diez, Willi (VerfasserIn).
-

- De Gruyter Oldenbourg, Berlin und Boston, 2017. 230 S. ISBN: 9783110481150. URL: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/gbv/detail.action?docID=5158700>.
- [26] Fuß, P., Hrsg.:
Automobilstandort Deutschland 2015. Status quo und neue Herausforderungen. ger.
Bd. 49. Materialien zur Automobilindustrie.
VDA Verband der Automobilindustrie, Berlin, 2015. 62 S.
- [27] Eigner, M. und Stelzer, R.: *Product Lifecycle Management. Ein Leitfaden für Product Development und Life Cycle Management.* ger. 2., neu bearb. Aufl. VDI.
Springer, Dordrecht, 2013. 434 S. (Besucht am 17.01.2020).
- [28] Puente León, F.: *Messtechnik. Grundlagen, Methoden und Anwendungen.* 11. Aufl.
Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2019. 13 S. ISBN: 978-3-662-59767-5.
DOI: 10.1007/978-3-662-59767-5. (Besucht am 09.11.2019).
- [29] Deutsches Institut für Normung e. V., Hrsg.: *Grundlagen der Meßtechnik - DIN 1319-1.*
Berlin: Beuth Verlag GmbH, 1995.
- [30] Schuth, M. und Buerakov, W.: *Handbuch Optische Messtechnik. Praktische Anwendungen für Entwicklung Versuch Fertigung und Qualitätssicherung.*
Hanser eLibrary. Hanser, München, 2017. ISBN: 978-3-446-43661-9.
DOI: 10.3139/9783446436619. URL: <http://www.hanser-fachbuch.de/buch/Handbuch+Optische+Messtechnik/9783446436343>.
- [31] Deutsches Institut für Normung e. V., Hrsg.: *Annahmeprüfung und Bestätigungsprüfung für Koordinatenmessgeräte (KMG) - DIN EN ISO 10360-1.*
Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2003.
- [32] Meisterbock & Cubing Marke Volkswagen, Hrsg.:
Leitfaden Meisterbock und Cubing der Marke Volkswagen. Version 4. Ausgabe.
Volkswagen Aktiengesellschaft, 2014.
- [33] Audi MediaCenter, Hrsg.: *Der Meisterbock.* 2017.
URL: <https://www.audi-mediacyenter.com/de/techday-quality-9568/der-meisterbock-9571> (besucht am 26.10.2019).
- [34] Birkert, A., Haage, S. und Straub, M.:
Umformtechnische Herstellung komplexer Karosserieteile.
Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2013. 729 S. ISBN: 978-3-642-34669-9.
DOI: 10.1007/978-3-642-34670-5.
- [35] Deutsches Institut für Normung e. V., Hrsg.: *Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Geometrische Tolerierung – Bezüge und Bezugssysteme (ISO 5459:2011).* DIN EN ISO.
Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2013.
- [36] Volkswagen AG, Hrsg.: *Referenz-Punkt-Systematik (RPS).* Konzernnorm. 1. Mai 2021.
-

- [37] Rai, B. und Shenglan, L.:
"RPS Alignment of Automotive Body Parts in Virtual Assembly and Deviation Analyses".
In: *International Journal of Scientific & Engineering Research* 9 (2016).
URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/1053/5e711635fec8f3dd6e279b7736757fe1bd17.pdf> (besucht am 29.05.2019).
- [38] Brückner, C.: *Qualitätsmanagement. Das Praxishandbuch für die Automobilindustrie*. ger. Hanser Verlag, München, 2011. Online-Ressource (569. ISBN: 9783446428102.
DOI: 10.3139/9783446428102.
URL: <http://www.hanser-elibrary.com/doi/book/10.3139/9783446428102>.
- [39] Verein Deutscher Ingenieure e.V., Hrsg.: *Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen: Simulation und Visualisierung*. VDI-Richtlinie 3633 Blatt 11. Düsseldorf, 2009.
- [40] Roubanov, D., Zafirov, R. und Eigner, M., Hrsg.:
Modellbasierte virtuelle Produktentwicklung. ger. SpringerLink Bücher.
Roubanov, Daniil (Hrsg.) Zafirov, Radoslav (Hrsg.)
Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2014. 402 S. ISBN: 978-3-662-43815-2.
DOI: 10.1007/978-3-662-43816-9.
- [41] Verein Deutscher Ingenieure e.V., Hrsg.:
Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen: Begriffe.
VDI-Richtlinie 3633. Düsseldorf, 2018.
- [42] Zienkiewicz, O. C., Taylor, R. L. und Zhu, J. Z.:
The finite element method. Its basis and fundamentals. 7th ed.
Elsevier Science, Burlington, 2013. 753 S. ISBN: 9781299833456.
- [43] GOM GmbH: *Virtual Clamping – Quantensprung*. Mit Virtual Clamping entwickelt GOM eine neue Technologie zum virtuellen Spannen von Kunststoff- und Blechbauteilen. URL: <https://mag.gom.com/de/gom-software/quantensprung> (besucht am 24.02.2020).
- [44] Haj Ibrahim, M. et al.: "A novel approach to the inspection of deformable bodies by adapting the coherent point drift algorithm and using a clustering methodology".
In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 103.1-4 (2019).
PII: 3554, S. 409–422. ISSN: 1433-3015. DOI: 10.1007/s00170-019-03554-z.
- [45] Karganroudi, S. S. et al.: "'What-if' scenarios towards virtual assembly-state mounting for non-rigid parts inspection using permissible loads". In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 97 (2018), S. 353–373. ISSN: 1433-3015.
DOI: 10.1007/s00170-018-1947-4.
- [46] Wilcox, W. und Havnor, M.:
"METHOD FOR VIRTUALLY INSPECTING AN ACTUAL PRODUCED PART".
EP 3 382 654 A1. Hexagon Technology Center GmbH. 2018.
-

- [47] Sabri, V. et al.: "Fixtureless profile inspection of non-rigid parts using the numerical inspection fixture with improved definition of displacement boundary conditions". In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 82.5-8 (2016). PII: 7425, S. 1343–1352. ISSN: 1433-3015. DOI: 10.1007/s00170-015-7425-3.
- [48] Abenhaim, G. N. et al.: "A virtual fixture using a FE-based transformation model embedded into a constrained optimization for the dimensional inspection of nonrigid parts". In: *Computer-Aided Design* 62 (2015), S. 248–258. ISSN: 00104485. DOI: 10.1016/j.cad.2014.12.006.
- [49] Jaramillo, A. E., Boulanger, P. und Prieto, F.: "On-line 3-D system for the inspection of deformable parts". In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 57.9-12 (2011), S. 1053–1063. ISSN: 0268-3768. DOI: 10.1007/s00170-011-3332-4.
- [50] Bleck, W.: "Stähle für die Verkehrstechnik – Qualität und Quantität in höchster Perfektion". In: *Handbuch Stahl. Auswahl, Verarbeitung, Anwendung*. Hrsg. von Bleck, W. und Moeller, E. Hanser, München, 2017. ISBN: 9783446449619.
- [51] Verband der Automobilindustrie e.V., Hrsg.: *Flacherzeugnisse aus Stahl zur Kaltumformung – VDA 239-100*. VDA. Berlin, 2016.
- [52] Wagner, M.: *Lineare und nichtlineare FEM. Eine Einführung mit Anwendungen in der Umformsimulation mit LS-DYNA*. 2. Aufl. Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, Wiesbaden, 2019. ISBN: 978-3-658-25051-5. DOI: 10.1007/978-3-658-25052-2.
- [53] Klein, B.: *FEM. Grundlagen und Anwendungen der Finite-Element-Methode im Maschinen- und Fahrzeugbau*. 10., verb. Aufl. 2015. SpringerLink Bücher. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2015. ISBN: 978-3-658-06053-4. DOI: 10.1007/978-3-658-06054-1.
- [54] Merkel, M. und Öchsner, A.: *Eindimensionale Finite Elemente. Ein Einstieg in die Methode*. ger. 2., neu bearb. u. erg. Aufl. 2014. SpringerLink Bücher. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2014. 438 S. ISBN: 978-3-642-54481-1. DOI: 10.1007/978-3-642-54482-8.
- [55] Silber, G. und Steinwender, F.: *Bauteilberechnung und Optimierung mit der FEM. Materialtheorie, Anwendungen, Beispiele*. B. G. Teubner, Stuttgart, Leipzig, Wiesbaden, 2005. 459 S. ISBN: 13:978-3-519-00425-7.
- [56] Rust, W.: *Nichtlineare Finite-Elemente-Berechnungen. Kontakt Geometrie Material*. ger. 2., überarbeitete und erweiterte Auflage. SpringerLink Bücher.
-

- Vieweg+Teubner, Wiesbaden, 2011. Online-Ressource (XII, 301. ISBN: 978-3-8348-1491-3. DOI: 10.1007/978-3-8348-8148-9.
- [57] Wriggers, P.: *Nichtlineare Finite-Element-Methoden*. Springer-Verlag Berl in Heidelberg GmbH, 2001. ISBN: 978-3-540-67747-5. DOI: 10.1007/978-3-642-56865-7.
- [58] Dassault Systèmes, Hrsg.: *Abaqus 2019 Documentation*. 2020. URL: <https://www.3ds.com/products-services/simulia/services-support/support/documentation/> (besucht am 04.03.2020).
- [59] Dassault Systèmes, Hrsg.: *ABAQUS 6.14. ABAQUS/CAE USER'S GUIDE*. Dassault Systèmes. 2014. URL: <http://130.149.89.49:2080/v2016/index.html> (besucht am 27.06.2019).
- [60] Betten, J.: *Finite Elemente für Ingenieure 2. Variationsrechnung, Energiemethoden, Näherungsverfahren, Nichtlinearitäten*. ger. 3 Bde. Springer eBook Collection. Springer, Berlin und Heidelberg, 1998. 481 S. ISBN: 978-3-662-07237-0. DOI: 10.1007/978-3-662-07237-0.
- [61] Otten, D.: "Abschätzung des Simulationsfehlers bei Statik- und Prozesssimulationen mittels semi-empirischer Ansätze". Dissertation. Universität Bayreuth, 2020. URL: <http://d-nb.info/1210389673>.
- [62] Dassault Systèmes, Hrsg.: *Abaqus Analysis Guide*. 2019. URL: www.3ds.com.
- [63] Shah, C.: "Mesh discretization error and criteria for accuracy of finite element solutions". In: *ANSYS\textregistered\ Users Conference 2002*.
- [64] Vajna, S. et al.: "Finite-Elemente-Modellierung und Anwendungen". In: *CAX für Ingenieure*. Hrsg. von Vajna, S. et al. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2018, S. 299–341. ISBN: 978-3-662-54623-9. DOI: 10.1007/978-3-662-54624-6_6.
- [65] Dassault Systèmes: *Simulia Abaqus. Trainingsunterlagen: Introduction to Abaqus/Standard and Abaqus/Explicit*. FE-Software. 2017. URL: www.3ds.com.
- [66] BETA CAE Systems: *ANSA Pre Processor. User's Guide*. Switzerland, 2019.
- [67] Euler, L.: "Methodus inveniendi lineas curvas maximi minimive proprietate gaudentes, sive Solutio problematis isoperimetrici latissimo sensu accepti". In: *Opera Omnia*. 1. Aufl. 24. 1744.
- [68] Tichatschke, R.: *"Auf den Schultern von Giganten" - Zur Geschichte der Mathematischen Optimierung*. Universität Trier, 2008. URL: <https://www.uni-trier.de/fileadmin/fb4/INF/TechReports/History-article.pdf>.
-

- [69] Gill, P. E., Wonham, W. M. und Wright, M. H.: *Practical optimization*. eng. Acad. Press, London, 1981. 401 S. ISBN: 0-12-283950-1.
- [70] Jarre, F. und Stoer, J.:
Optimierung. Einführung in mathematische Theorie und Methoden. 2nd ed. 2019. Masterclass. 2019. 1Online-Ressource (XVI, 520 Seiten). ISBN: 978-3-662-58855-0. DOI: 10.1007/978-3-662-58855-0.
- [71] Schumacher, A.:
Optimierung mechanischer Strukturen. Grundlagen und industrielle Anwendungen. 3rd ed. 2020. Springer Berlin Heidelberg und Imprint: Springer Vieweg, Berlin und Heidelberg, 2020. 356). ISBN: 978-3-662-60328-4. DOI: 10.1007/978-3-662-60328-4.
- [72] Ulbrich, M. und Ulbrich, S.: *Nichtlineare Optimierung*. ger. Mathematik Kompakt. Springer und Birkhäuser, Basel, 2012. 154 S. ISBN: 978-3-0346-0142-9. DOI: 10.1007/978-3-0346-0654-7.
- [73] *Optimus Rev 10.18 SP1 - Theoretical Background*. Noesis Solutions. 2017.
- [74] Dassault Systèmes, Hrsg.: *Abaqus Scripting Reference Guide*. 2019. URL: www.3ds.com.
- [75] Schumacher, A.:
Optimierung mechanischer Strukturen. Grundlagen und industrielle Anwendungen. ger. 2., aktual. u. erg. Aufl. 2013. SpringerLink Bücher. Springer Berlin Heidelberg und Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2013. 313 S. ISBN: 978-3-642-34699-6. DOI: 10.1007/978-3-642-34700-9.
- [76] *Optimus Rev 10.20 Manual*. Noesis Solutions. 2017.
- [77] Siebertz, K., van Bebber, D. und Hochkirchen, T.:
Statistische Versuchsplanung. Design of Experiments (DoE). 2. Aufl. 2017. SpringerLink Bücher. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2017. ISBN: 978-3-662-55742-6. DOI: 10.1007/978-3-662-55743-3. URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-662-55743-3>.
- [78] Welsch, M.:
"Bewertung von Spannungsspitzen und Singularitäten in FEM- Rechnungen". In: *11. Norddeutsches Simulationsforum*. 2015. DOI: 10.13140/RG.2.1.1755.2728. URL: <https://www.researchgate.net/publication/283045331>.
- [79] Drossel, W.-G., Israel, M. und Falk, T.:
"Robustheitsbewertung und Werkzeugoptimierung beim Umformfügen". In: *9. Weimarer Optimierungs- und Stochastiktagen*. 2012. URL: www.dynardo.de/library.
-

-
- [80] Verband der Automobilindustrie, Hrsg.: *Mess- und Prüfprozesse*. Berlin: Verband der Automobilindustrie e.V. (VDA), 1. Juli 2021.
- [81] ISO/TMBG Technical Management Board - groups, Hrsg.: *ISO/IEC Guide 98-3:2008*. eng. Version 1. ed. Genève: International Organization for Standardization.
- [82] GOM Metrology: *Weniger Aufwand, geringere Kosten: Virtual Clamping*. 2022. URL: <https://www.gom.com/de-de/produkte/gom-suite/virtual-clamping> (besucht am 27.05.2022).
- [83] Dassault Systèmes, Hrsg.: *Abaqus 2020 Output Guide*. Dassault Systèmes. 2019. URL: www.3ds.com.
- [84] Dassault Systèmes, Hrsg.: *Abaqus Elements Guide*. 2020. URL: www.3ds.com.
-

Anhang

A Randbedingungen für exemplarische Verformung des Kotflügels

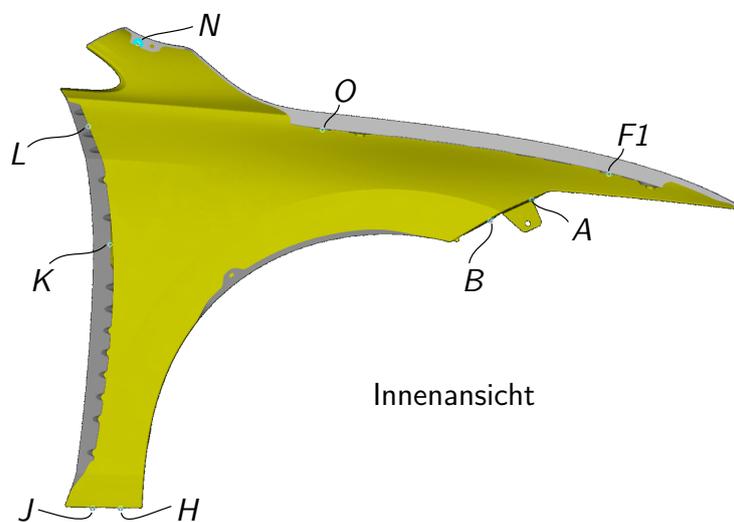


Abb. A1: Benennung der Anschraubpunkte am Kotflügel

```

1  *Boundary
2  NODE_SET___N , 2, 2, 4.2
3  NODE_SET___N , 3, 6
4  NODE_SET___O , 1, 1, -0.1
5  NODE_SET___O , 2, 2, 0.4
6  NODE_SET___O , 3, 3, -0.5
7  NODE_SET___O , 4, 6
8  NODE_SET___F1 , 2, 2, -0.2
9  NODE_SET___F1 , 3, 3, -0.2
10 NODE_SET___F1 , 4, 6
11 NODE_SET___A , 2, 2, 1.8
12 NODE_SET___A , 3, 6
13 NODE_SET___B , 2, 2, 2.4
14 NODE_SET___B , 3, 3, -0.24

```

```
15 NODE_SET___B, 4, 6
16 NODE_SET___H, 1, 1, 1.7
17 NODE_SET___H, 2, 2, 0.15
18 NODE_SET___H, 3, 3, 2.3
19 NODE_SET___H, 4, 6
20 NODE_SET___J, 4, 6
21 NODE_SET___K, 2, 2
22 NODE_SET___K, 3, 3, -1.8
23 NODE_SET___K, 4, 6
24 NODE_SET___L, 2, 2, 0.3
25 NODE_SET___L, 3, 6
```

Abaqus Eingabe A.1: Definition der Randbedingungen für exemplarische Verformung des Kotflügels. Die Sets *NODE_SET___** enthalten jeweils den Knoten am Ende des *Connector*-Elements (Zielposition in Abb. 5-13)

B Ergebnis der freien Messung eines Kotflügels

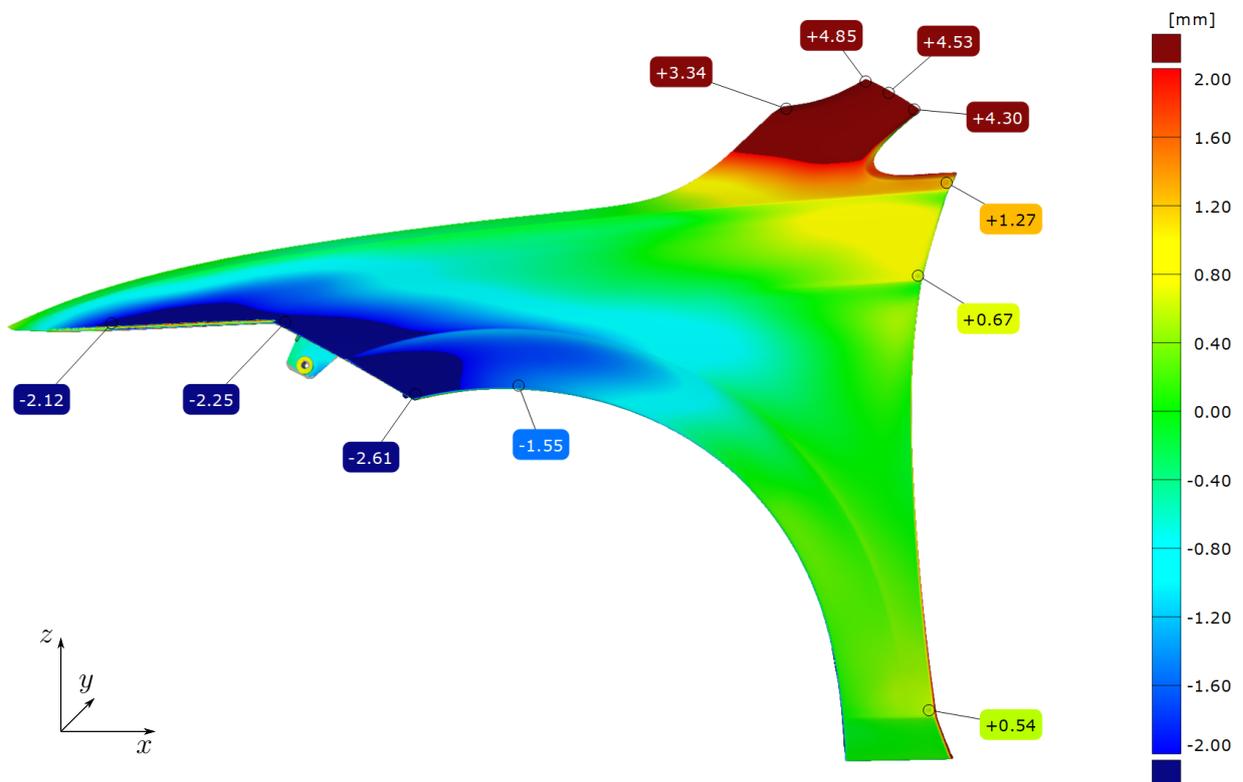


Abb. B1: Fehlerfarbenvergleich zwischen CAD-Oberfläche und des zur Validierung frei gemessenen Kotflügels auf der Hilfsmessaufnahme in Abbildung 4-6. Die räumliche Ausrichtung der Messdaten erfolgt rein mathematisch über die Haupt-RPS-Punkte des Bauteils.

C Dimensionierung von Connector-Steifigkeiten zur Bauteilbefestigung

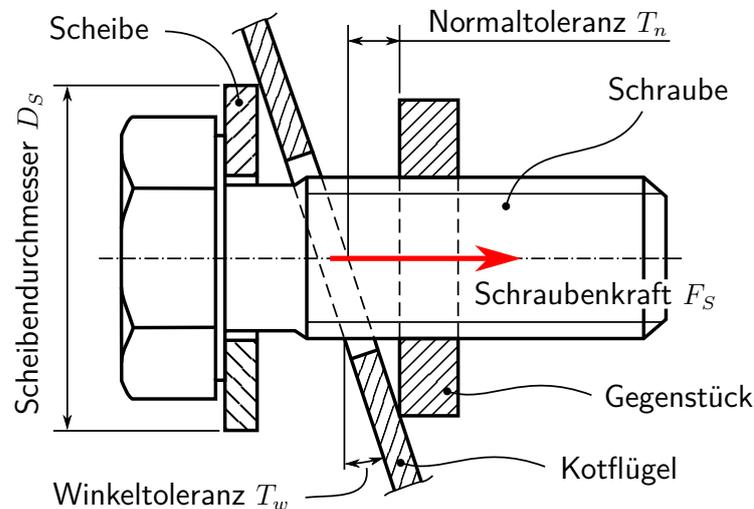


Abb. C1: Schraube mit Scheibe innerhalb der Bohrung eines imperfekten Kotflügels. FE-Repräsentation mittels Connector-Elemente siehe Abb. 5-13

Das zur Befestigung des Kotflügels angegebene Anzugsmoment M_A der Schrauben beträgt 8 N m. Mithilfe der Gewindesteigung $P = 1$ mm des bei diesen Schrauben zum Einsatz kommenden Regelgewindes M6 lässt sich die maximale Schraubkraft F_S berechnen. Für den Fall, dass die Rückstellkraft des Kotflügels aufgrund geometrischer Abweichungen am jeweiligen Anschraubpunkt mit der erzeugten Schraubkraft im Gleichgewicht steht, soll eine Normaltoleranz von $T_n = 0,04$ mm angenommen werden. Mittels Gleichung (A-2) lässt sich dann die erforderliche Steifigkeit des Connectors in axialer Richtung D_{11} berechnen (Details zu ABAQUS Connector Eigenschaften siehe [84, S. 647]).

$$F_S = \frac{M_A}{P} = \frac{8000 \text{ N mm}}{1 \text{ mm}} = 8000 \text{ N} \quad (\text{A-1})$$

$$D_{11} = \frac{F_S}{T_n} = \frac{8000 \text{ N}}{0,04 \text{ mm}} = 200\,000 \text{ N/mm} \quad (\text{A-2})$$

Analog dazu werden die radialen Steifigkeiten des Connectors bestimmt: Basierend auf der Schraubkraft F_S kann das über den äußersten Punkt der Scheibe übertragene Moment M_S in Gleichung (A-3) berechnet werden. Wenn eine Winkeltoleranz von $T_w = 0,1$ rad im Gleichgewichtszustand zu erreichen ist, resultiert jeweils ein Wert von 720 000 N mm/rad für die Rotationsteifigkeiten D_{44} und D_{55} des Connectors.

$$M_S = F_S \frac{D_S}{2} = 8000 \text{ N} \frac{18 \text{ mm}}{2} = 72\,000 \text{ N mm} \quad (\text{A-3})$$

$$D_{44} = D_{55} = \frac{M_S}{T_w} = \frac{72\,000 \text{ N mm}}{0,1 \text{ rad}} = 720\,000 \text{ N mm/rad} \quad (\text{A-4})$$

D Ergebnisse der freien Rückfederungssimulation in Autoform

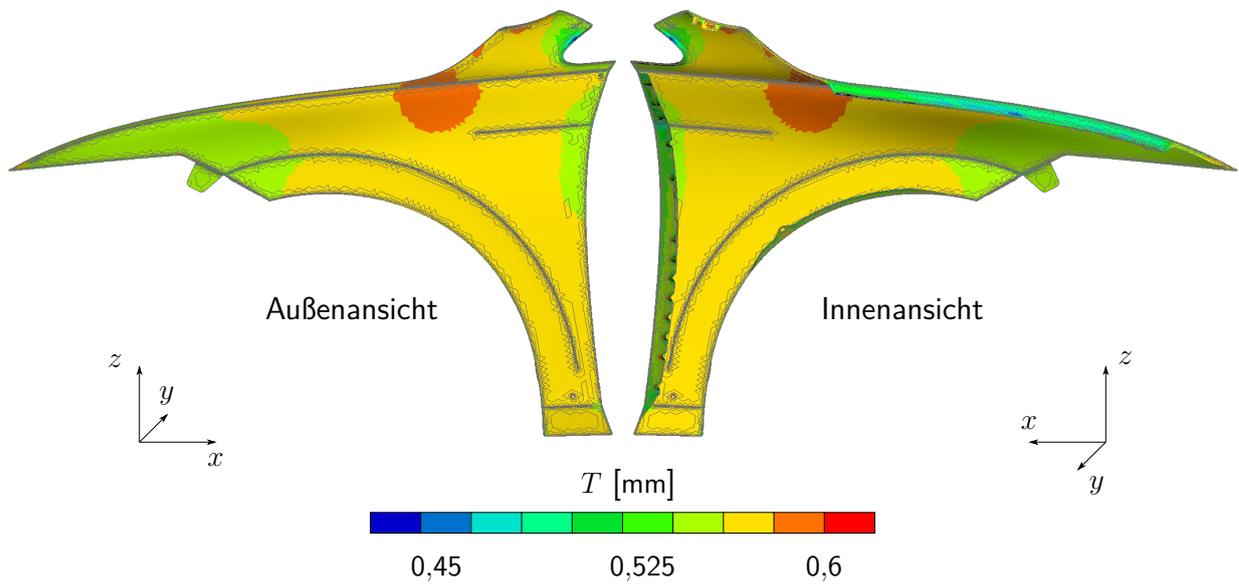
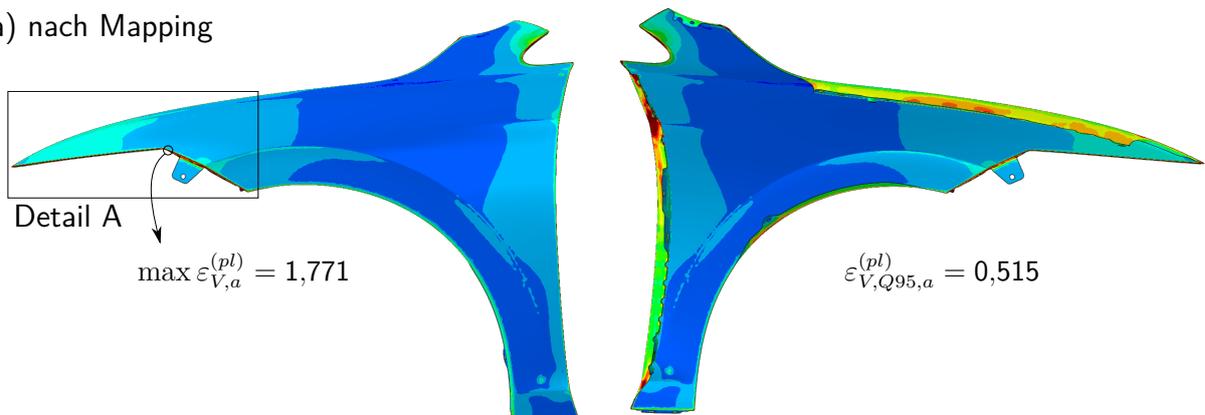


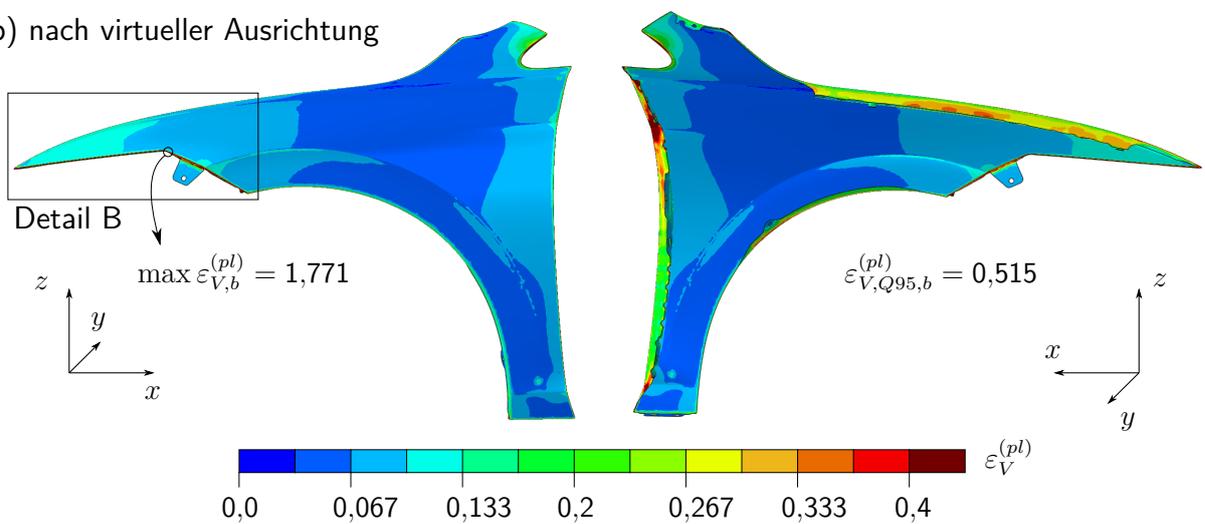
Abb. D1: Blechdicke T des Kotflügelaußenteils nach der freien Rückfederungssimulation in AUTOFORM

E Vergleich plastischer Dehnungen innerhalb der VPK

a) nach Mapping



b) nach virtueller Ausrichtung



c) Detailansicht A/B

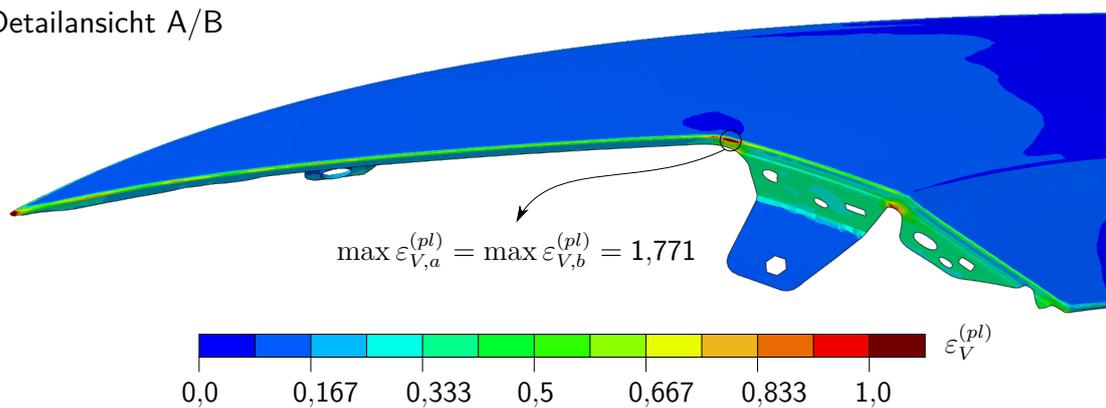


Abb. E1: Plastische Vergleichsdehnungen innerhalb der Virtuelle Prozesskette. Fazit: Die entwickelte virtuelle Ausrichtung verursacht im Fall des Kotflügels nahezu keine irreversiblen Verformungen.