

Reihe Informationsmanagement im
Engineering Karlsruhe

Julius Friedrich Klinger

Tolerance Simulation in the Loop

Ansätze zur Verbesserung der Vorher-
sagegenauigkeit der Toleranzsimulation
im Automobilbau durch Adaption an
reale Fertigungsprozesse

Band 1 – 2019

Julius Friedrich Klinger

Tolerance Simulation in the Loop

Ansätze zur Verbesserung der Vorhersagegenauigkeit
der Toleranzsimulation im Automobilbau durch Adaption
an reale Fertigungsprozesse

**Reihe Informationsmanagement im Engineering Karlsruhe
Band 1 – 2019**

Herausgeber

Karlsruher Institut für Technologie

Institut für Informationsmanagement im Ingenieurwesen (IMI)

o. Prof. Dr. Dr.-Ing. Dr. h.c. Jivka Ovtcharova

Eine Übersicht aller bisher in dieser Schriftenreihe
erschienenen Bände finden Sie am Ende des Buchs.

Tolerance Simulation in the Loop

Ansätze zur Verbesserung der Vorhersagegenauigkeit
der Toleranzsimulation im Automobilbau
durch Adaption an reale Fertigungsprozesse

von
Julius Friedrich Klinger

Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie
KIT-Fakultät für Maschinenbau

Tag der mündlichen Prüfung: 25. Juli 2018
Referenten: Prof. Dr. Dr.-Ing. Dr. h. c. Jivka Ovtcharova
Prof. Dr.-Ing. Rainer Stark

Impressum



Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
KIT Scientific Publishing
Straße am Forum 2
D-76131 Karlsruhe

KIT Scientific Publishing is a registered trademark
of Karlsruhe Institute of Technology.
Reprint using the book cover is not allowed.

www.ksp.kit.edu



*This document – excluding the cover, pictures and graphs – is licensed
under a Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International License
(CC BY-SA 4.0): <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.en>*



*The cover page is licensed under a Creative Commons
Attribution-No Derivatives 4.0 International License (CC BY-ND 4.0):
<https://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/deed.en>*

Print on Demand 2019 – Gedruckt auf FSC-zertifiziertem Papier

ISSN 1860-5990
ISBN 978-3-7315-0876-2
DOI 10.5445/KSP/1000088265

Tolerance Simulation in the Loop

**Ansätze zur Verbesserung der Vorhersagegenauigkeit
der Toleranzsimulation im Automobilbau
durch Adaption an reale Fertigungsprozesse**

Zur Erlangung des akademischen Grades eines
DOKTORS DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN (Dr.-Ing.)

von der KIT-Fakultät für Maschinenbau des
Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)
angenommene

DISSERTATION

von

Julius Friedrich Klinger, M.Sc.,
geboren am 30. Juni 1986 in Jena

Tag der mündlichen Prüfung: 25. Juli 2018

Hauptreferentin: Prof. Dr. Dr.-Ing. Dr. h. c. Jivka Ovtcharova

Koreferent: Prof. Dr.-Ing. Rainer Stark

Kurzfassung

Die präzise Beschreibung der Fertigungsabweichungen durch die Toleranzsimulation ist heute nicht nur ein Werkzeug zur Bewertung der Robustheit und des Fertigungsprozesses, sondern auch essentiell, um der geforderten Produktionsflexibilität nachkommen zu können. Der Stand der Forschung stellt dazu eine Vielzahl theoretischer Ansätze bereit, deren industrielle Umsetzbarkeit teilweise noch nachzuweisen ist. Die gezielte Anwendung dieser Ansätze und der Aufbau einer präzisen Toleranzsimulation erfordern die Kenntnis, welche Fertigungsprozesse im Karosseriebau Auswirkungen auf die resultierende Fertigungsgenauigkeit haben. Diese Auswirkungen müssen möglichst wirtschaftlich und doch präzise abgebildet werden. Das weiterentwickelte Vorhersagemodell ermöglicht dieses für Pressteilstreuungen. Des Weiteren wird ein Visualisierungstool entwickelt, um statistisches Abweichungsverhalten anschaulich darzustellen. So können weitere Erkenntnisse in die Simulation rückgeführt werden. Eine systematische Analyse des industriellen Karosseriebauprozesses und darauf aufbauende Versuche bestätigen den gängigen Abbildungsumfang, der sich auf Einzelteilabweichungen und Fügeoperationen beschränkt. Die vorgeschaltete Sammlerprozesstechnik wird hierbei als potenzieller zusätzlicher Einflussfaktor identifiziert. Die Untersuchung des geometrischen Fügeprozesses zeigt, dass die Umsetzung der durch die Anlage vorgegebenen Geometrie ggf. eine Verformung der Fügepartner bedingt. Zur Einstufung der Materialbeanspruchung hierbei wird ein Praxisbeispiel mittels der FEM abgebildet. Die ermittelte plastische Verformung stellt den Nutzen der elastischen Toleranzsimulation im Vergleich zum Rechenaufwand in Frage. Eine auf der starren Toleranzsimulation basierende Methodik zur Abbildung der Fügeprozessstreuungen wird entwickelt, die den Simulationsaufwand der elastischen Toleranzsimulation umgeht.

Abstract

The precise characterisation of manufacturing deviations by tolerance simulation today is not only required to evaluate the design robustness and the manufacturing process, but also to meet the desired manufacturing flexibility. The state of the art provides a number of theoretical approaches which are briefly reviewed in this work and whose industrial practicability partly is still to be proven. To apply these approaches and to correctly map the deviations of the manufacturing process, knowledge must be acquired which single processes have an impact on the overall dimensional accuracy. These impacts need to be mapped precisely, but yet cost-efficient, which is achieved by the enhanced prediction approach for stamped parts. Furthermore a visualisation tool is developed to create easily perceptible illustrations of deviation behaviour. This way, deviation behaviour discoveries can be fed back into the tolerance simulation. A systematic analysis of the overall manufacturing process chain and tests built upon confirm the simulation scope already in use, taking into account only single part and joining operation deviations. But the tests also identify the pre-loading before joining as a potential additional impact factor. An in-depth research of joining operations reveals a potential deformation of the joining partners, if their shape contradicts the profile targeted by the joining station. To analyse the material stresses occurring while joining deviation-afflicted parts, a use-case is emulated by an FE simulation. The recorded plastic deformation questions the implementation of an elastic tolerance simulation compared to its severe computational costs. A modified approach to map the deviation of the joining process is presented based on the rigid body tolerance simulation, which spares the efforts of the elastic tolerance simulation.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	i
Abstract	iii
Abbildungsverzeichnis	ix
Tabellenverzeichnis	xv
Abkürzungsverzeichnis	xvii
Glossar	xix
Vorwort	xxi
1 Einleitung	1
2 Stand der Technik	3
2.1 Einführung in das Toleranzmanagement im Automobilbau.....	3
2.1.1 Grundlagen des Toleranzmanagements.....	4
2.1.2 Messtechnik und Bezugssysteme	5
2.1.3 Statistische Grundlagen	9
2.1.4 Bewertungsgrößen des Qualitätsmanagements.....	13
2.2 Integration des Toleranzmanagements in den Entwicklungsprozess	14
2.3 Massenproduktion im automobilen Karosseriebau.....	15
2.3.1 Herstellungsprozesse von Pressteilen	16
2.3.2 Herstellungsprozesse im Karosseriebau.....	18
2.4 Prüfmittel	27
2.4.1 Offline-Messtechnik.....	28
2.4.2 Inline-Messmittel.....	30
2.5 Simulationsumfänge.....	31
2.5.1 Pressteilstreuungen.....	32
2.5.2 Prozessstreuungen im Karosseriebau.....	33
2.6 Simulationsmethoden	34

2.6.1	Mathematische Grundlagen	35
2.6.2	Berücksichtigung von Elastizität	35
2.7	Software-Tools.....	36
2.8	Zusammenfassung und Bewertung.....	37
3	Ansatz der Arbeit	39
3.1	Abgeleitete Anforderungen.....	39
3.2	Ziele und Methodik der Arbeit.....	40
4	Untersuchung des Abweichungsverhaltens von Pressteilen.....	45
4.1	Generierung der Datengrundlage	45
4.1.1	Auswahlkriterien Musterteile.....	46
4.1.2	Vorstellung Musterteile	48
4.1.3	Zusammenfassung der Eigenschaften der Musterteile.....	57
4.2	Methodik zur Streuungsvorhersage.....	58
4.2.1	Ableich von Steifigkeit und Streuungen bei den einzelnen Musterteilen	58
4.2.2	Erreichbare Güte des Abgleichs	63
4.2.3	Verallgemeinerung der Erkenntnisse der durchgeführten Abgleiche	65
4.3	Methodik zur Visualisierung des Abweichungsverhaltens	71
4.4	Zusammenfassung	76
5	Untersuchung des Abweichungsverhaltens von Zusammenbauten.....	79
5.1	Übersicht Karosseriebauprozesse	80
5.1.1	Der Produktionsablauf im Karosseriebau	80
5.1.2	Gruppierung der Karosseriebauprozesse.....	101
5.2	Identifikation der für Fertigungsabweichungen relevanten Prozesse	103
5.2.1	Methodik der Vorklassifikation mittels Entscheidungsbaum	103
5.2.2	Validierung der Vorklassifikation	106

5.2.3 Ergebnis der Vorklassifikation und der Validierungsexperimente.....	116
5.3 Gegenüberstellung des Einflusses der verschiedenen Fügeverfahren.....	119
5.3.1 Generischer Vergleich der Spanntechnik der Fügeverfahren.....	119
5.3.2 Vergleich der bei verschiedenen Use-Cases erzeugten Maßhaltigkeit	121
5.4 Untersuchung der geometrischen Korrektur durch die Geo-Station	127
5.4.1 Vorstellung Use-Case	127
5.4.2 Methodik und Ergebnis der Untersuchung.....	131
5.5 Analyse der Materialbeanspruchung der Komponenten in der Geo-Station.....	137
5.5.1 Simulationethodik.....	138
5.5.2 Validierung	140
5.5.3 Ergebnisse.....	141
5.6 Zusammenfassung	143
6 Implementierung der Ansätze zur Kompensation von Simulationsdefiziten	147
6.1 Modifizierung der Abbildungsformen von Pressteilstreuungen	147
6.2 Abbildungsumfang der Prozessstreuungen	148
6.3 Modifizierung der Abbildungsformen von Prozessstreuungen	148
6.4 Zusammenfassung	154
7 Zusammenfassung und Ausblick.....	155
7.1 Zusammenfassung	155
7.2 Ausblick.....	157
Literaturverzeichnis	159

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1:	Abhängigkeit der lokalen Toleranz vom Ausrichtkonzept	5
Abbildung 2.2:	Ausrichtung einer Komponente nach dem sogenannten 3-2-1-Prinzip [Boh-13, S. 13]	6
Abbildung 2.3:	Komponente mit Bezugsstellen	8
Abbildung 2.4:	Beispiele für große Streuungen (oben) und große Mittelwertabweichungen (unten)	9
Abbildung 2.5:	Standardabweichung σ der Normalverteilung [Boh-13, S. 23]	11
Abbildung 2.6:	Einseitiges relatives Konfidenzintervall l/s in Abhängigkeit von der Stichprobengröße n berechnet nach [Schu-14, S. 164]	12
Abbildung 2.7:	Toleranzmanagement im Entwicklungsprozess	14
Abbildung 2.8:	Karosseriematerialien eines hochpreisigen PKW [Böl-10]	16
Abbildung 2.9:	Karosserieformen eines Pressteils [vgl. Bir-13, S. 232]	17
Abbildung 2.10:	Biegerückfederung [Bir-13, S. 302]	18
Abbildung 2.11:	Karosserieaufbaustufen in der Großserienfertigung	20
Abbildung 2.12:	Fixierstifte zur Ausrichtung der Komponenten in der Geo-Station	22
Abbildung 2.13:	Spannelemente zur Ausrichtung der Komponenten in der Geo-Station	22
Abbildung 2.14:	Beispiel einer Geo-Station	23
Abbildung 2.15:	Ausschnitt der Spanntechnik beim Widerstandspunktschweißen am Beispiel der Türverstärkungen	24

Abbildung 2.16:	Spanntechnik des Robscan-Laserschweißens am Beispiel eines Fensterrahmens	25
Abbildung 2.17:	Schnitt durch die Spanntechnik des Laserlötens am Beispiel Heckdeckel	26
Abbildung 2.18:	Spanntechnik beim Durchsetzfügen am Beispiel eines Heckdeckels	26
Abbildung 2.19:	Unabhängigkeit von Relativmaßen vom Bezugssystem	31
Abbildung 2.20:	Beispiel mittelwertabweichender Messreihen	32
Abbildung 3.1:	Zielprozess: Verbesserung der Toleranzsimulation durch Rückführung von Produktionserfahrung	41
Abbildung 4.1:	Gewünschte geometrische Merkmale und deren Gewichtung zur Musterteilauswahl in Klammern	48
Abbildung 4.2:	Geometrische Merkmale des Musterteils Radeinbau	49
Abbildung 4.3:	Messpunkte und Bezugsstellen am Musterteil Radeinbau.....	50
Abbildung 4.4:	Streuungen des Musterteils Radeinbau dargestellt durch die sechsfache Standardabweichung	51
Abbildung 4.5:	Das Musterteil A-Säule mit den modifizierten Bezugsstellen und den Messpunkten	52
Abbildung 4.6:	Das Musterteil B-Säule mit Bezugsstellen und Messpunkten	54
Abbildung 4.7:	Das Musterteil Querträger mit Bezugsstellen und Messpunkten	55
Abbildung 4.8:	Das Musterteil Spiegelkonsole mit Bezugsstellen und Messpunkten.....	56
Abbildung 4.9:	Ableich von Streuung und Steifigkeit beim Radeinbau.....	59

Abbildung 4.10:	Abgleich von Streuung und Steifigkeit bei der A-Säule.....	60
Abbildung 4.11:	Abgleich von Streuung und Steifigkeit bei der B-Säule.....	61
Abbildung 4.12:	Abgleich von optisch (oben) und taktil (unten) gemessener Streuung und Steifigkeit beim Querträger	62
Abbildung 4.13:	Abgleich von Streuung und Steifigkeit bei der Spiegelkonsole	63
Abbildung 4.14:	Abgleich von Streuung und Steifigkeit bei allen taktil vermessenen Musterteilen aus Stahl	66
Abbildung 4.15:	Gegenüberstellung der gemessenen und der berechneten Streuung der Stahl-Musterteilen A-Säule, B-Säule, Querträger und Radeinbau	67
Abbildung 4.16:	Gegenüberstellung der gemessenen und der berechneten Streuung vom Aluminium-Musterteil Spiegelkonsole	70
Abbildung 4.17:	Darstellung einer einzelnen Messung im Falschfarbenbild.....	72
Abbildung 4.18:	Kombination aus Einzelteilmessung und Messgraphen.....	72
Abbildung 4.19:	Untersuchung der Spiegelkonsole mit dem Visualisierungstool.....	75
Abbildung 4.20:	Untersuchung des ZB Integralverstärkung mit dem Visualisierungstool	76
Abbildung 5.1:	Legende zu den Prozessschaubildern [vgl. ISO-85].....	81
Abbildung 5.2:	LT mit kontrollierter Stapelung und vollumfänglicher SLT [vgl. Wis-13, S. 12].....	82
Abbildung 5.3:	Prozessschaubild zur Anlieferung der Komponenten in den Karosseriebau [vgl. Wis-13, S. 10]	83

Abbildung 5.4	Prozessschaubild zum Einschleusen von Komponenten [vgl. Wis-13, S. 13]	84
Abbildung 5.5:	Übersichtsschaubild Kernprozesse im Karosseriebau [vgl. Wis-13, S. 23]	85
Abbildung 5.6:	Prozessschaubild Vorbereiten der Komponenten vor der Weiterverarbeitung [vgl. Wis-13, S.24]	87
Abbildung 5.7:	Prozessschaubild Verwendung von Sammelvorrichtungen [vgl. Wis-13, S. 26]	88
Abbildung 5.8:	Prozessschaubild zu automatischen Geo-Stationen [vgl. Wis-13, S. 29]	90
Abbildung 5.9:	Prozessschaubild zu manuellen Geo-Stationen [vgl. Wis-13, S. 30]	91
Abbildung 5.10:	Prozessschaubild zum Ausfügen [vgl. Wis-13, S. 30]	93
Abbildung 5.11:	Prozessschaubild Teil I zur Hauptlinie bis Z2.2 [vgl. Wis-13, S. 33]	94
Abbildung 5.12:	Prozessschaubild Teil II zur Hauptlinie bis Z2.2 [vgl. Wis-13, S. 33]	95
Abbildung 5.13:	Prozessschaubild zum Fügen des Daches [vgl. Wis-13, S. 35]	98
Abbildung 5.14:	Prozessschaubild zur Hauptlinie Z3 [vgl. Wis-13, S. 36]	99
Abbildung 5.15:	Prozessschaubild zu den Transportprozessen innerhalb des Karosseriebaus [vgl. Wis-13, S. 24]	101
Abbildung 5.16:	Prozessgruppen im Karosseriebau	102
Abbildung 5.17:	Entscheidungsbaum zur Vorklassifizierung.....	104
Abbildung 5.18:	Vereinfachte Darstellung des Betrachtungsumfanges der statistischen Versuchsplannung nach [Gei-08, S. 457]	107
Abbildung 5.19:	a) Positionierung der Komponente A im Magazin; b) Messumfang mit Komponenten A (gelb) und B (grün)	108

Abbildung 5.20:	Werte der Zielgrößen im Experiment Einschleusen 1.....	109
Abbildung 5.21:	a) Positionierung der Komponente B im Magazin; b) Messumfang mit Komponenten B (grün) und D (orange)	111
Abbildung 5.22:	Werte der Zielgröße im Experiment Einschleusen 2.....	112
Abbildung 5.23:	Positionierung der Komponente C im Staurollenförderer.....	113
Abbildung 5.24:	Werte der Zielgrößen im Experiment Transport.....	114
Abbildung 5.25:	a) Positionierung der Komponente E im Sammler; b) ausgewerteter Messumfang.....	115
Abbildung 5.26:	Werte der Zielgröße im Experiment Sammler-Station.....	116
Abbildung 5.27:	Untersuchte Messpunkte bei der Türverstärkung der Karosserie I.....	123
Abbildung 5.28:	Messfensterauswahl am Beispiel eines Messpunkts an der Türe der Karosserie II.....	124
Abbildung 5.29:	Ergebnis des Fügeverfahrensvergleichs	126
Abbildung 5.30:	Use-Case ZB Beplankung Seitenwand.....	128
Abbildung 5.31:	Detailansichten Fügebereich Beplankung Seitenwand und Heckleuchtentopf.....	128
Abbildung 5.32:	Verfahrweg des Heckleuchtentopfes beim Einlegen in die Beplankung Seitenwand.....	129
Abbildung 5.33:	Geo-Station zum Fügen des Heckleuchten- topfes an die Beplankung Seitenwand.....	129
Abbildung 5.34:	SFK des Heckleuchtentopfes beim Fügen mit der Beplankung Seitenwand	130
Abbildung 5.35:	Untersuchte Messpunkte am Heckleuchtentopf.....	132
Abbildung 5.36:	Untersuchte Messpunkte an der Beplankung Seitenwand	133

Abbildung 5.37:	Gegenüberstellung der Einzelteil- und der ZB-Messungen.....	134
Abbildung 5.38:	Use-Case zweite Längsträgerebene I [vgl. Wis-13, S.88].....	137
Abbildung 5.39:	Vergleich der realen Prozesskette mit der entwickelten Simulationsmethodik [vgl. Mov-14, S. 65].....	139
Abbildung 5.40:	Messpunkte zur Validierung der Simulationsmethodik.....	140
Abbildung 5.41:	von Mises-Vergleichsspannung im ZB beim Geo-Schweißen [Mov-14, S. 73].....	142
Abbildung 5.42:	von Mises-Vergleichsspannung im ZB beim Ausschweißen [Mov-14, S. 74].....	142
Abbildung 6.1:	Ausschnitt aus dem SFK der Beplankung Seitenwand beim Fügen mit dem Heckleuchtentopf.....	150
Abbildung 6.2:	Ergebnis der Simulationsvarianten des Use-Cases ZB Beplankung Seitenwand im Vergleich mit Inline-Messungen.....	152
Abbildung 6.3:	Ergebnis der Simulationsvarianten des Use-Cases zweite Längsträgerebene I im Vergleich mit Inline-Messungen.....	153

Tabellenverzeichnis

Tabelle 4.1:	Eigenschaften der Musterteile.....	57
Tabelle 5.1:	Maßhaltigkeitseinfluss der Karosseriebauprozessgruppen	117
Tabelle 5.2:	Prozessualer Vergleich der betrachteten Fügeverfahren	120
Tabelle 5.3:	Karosserie-Use-Cases zur Untersuchung der Anlagensteuerung	122
Tabelle 5.4:	Messergebnisse der Einzelteile und des ZB Beplankung Seitenwand, X-Anteile in Netzrichtung in [mm]	135
Tabelle 5.5:	Validierung der Simulationstechnik mit Messdaten[vgl. Mov-14, S. 69]	141
Tabelle 6.1:	Ausrichtung des Heckleuchtopfes	150
Tabelle 6.2:	Ausrichtung der Beplankung Seitenwand	151

Abkürzungsverzeichnis

3D	dreidimensional
σ	Standardabweichung der Grundgesamtheit
μ	Mittelwert der Grundgesamtheit
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
CAD	Computer Aided Design
CAT	Computer Aided Tolerancing
CKD	Completely knocked down
CSV	Comma Separated Values, Datenaustauschformat
c_p	Prozessfähigkeitsindex
c_{pk}	kleinster Prozessfähigkeitsindex
FE(M)	Finite Elemente (Methode)
ggf.	gegebenenfalls
GOM	Gesellschaft für optische Messtechnik, Hersteller von optischen Messmaschinen
i. e.	id est
IMI	Institut für Informationsmanagement im Ingenieurwesen
l	einseitiges oberes Konfidenzintervall
LT	Ladungsträger

n	Größe der Stichprobe
o. Ä.	oder Ähnliche(s)
R^2	Bestimmtheitsmaß
s	Standardabweichung der Stichprobe
$s_{berechnet}$	berechnete Standardabweichung
SFK	Spann- und Fixierkonzept
SLT	Sonderladungsträger
SPC	Statistical Process Control
t_{OG}	obere Toleranzgrenze
t_{UG}	untere Toleranzgrenze
u. a.	unter anderem
vgl.	vergleiche
VRML	Virtual Reality Modeling Language, CAD-Format
\bar{x}	Mittelwert der Stichprobe
x_{FEM}	berechnete Verschiebung
ZB	Zusammenbau
z. B.	zum Beispiel
Z1	Zusammenbaustufe 1 der Karosserie
Z2	Zusammenbaustufe 2 der Karosserie
Z3	Zusammenbaustufe 3 der Karosserie

Glossar

Abweichung: Die Abweichung bezeichnet hier den Unterschied zwischen Ist- und Soll-Gestalt einer Komponente, der durch den Herstellungsprozess entsteht. Sie schließt sowohl die Fertigungsstreuungen als auch eine etwaige Mittelwertabweichung ein.

Best Fit: Verfahren zur bestmöglichen Montage von Komponenten. Die Fugen und Übergänge zu angrenzenden Komponenten werden optisch vermessen, sodass die zu montierende Komponente optimal eingepasst werden kann. Das Verfahren besitzt einen geschlossenen Regelkreis.

Hauptlinie: Entlang der Karosseriebau-Hauptlinie werden die einzelnen vorgefertigten Zusammenbauten zur Karosserie zusammengesetzt. Die Hauptlinie wird durch das Zusammenfügen des kompletten Unterbaus begründet und endet mit der Fertigstellung der Karosserie.

Karosserie: Die Fahrzeugrohbaukarosserie wird kurz als Karosserie bezeichnet. Die Karosserie besteht im modernen Massen-Fahrzeugbau hauptsächlich aus Pressteilen aus Stahl.

Karosseriebau: Der Karosseriebau ist der gesamte Fabrikbereich, in dem die Fahrzeugrohbaukarosserien hergestellt werden.

Komponente: Das Wort Komponente wird in dieser Arbeit als Überbegriff für beliebige Bauteilumfänge verwendet. Es kann Einzelteile sowie ZB beschreiben.

Loch-Langloch-Prinzip: Zwei runde Fixierstifte nehmen jeweils ein Rund- und ein Langloch einer Komponente auf. Durch die Fixierung des Rundloches werden beide Freiheitsgrade in der Lochebene fixiert, durch das Langloch der Freiheitsgrad quer zur Langseite des Loches.

Die so bestimmten drei Freiheitsgerade schränken meist die Sekundär- und die Tertiärebenen einer Komponente ein.

Skid: Schlitten, auf dem die noch nicht fertiggestellte Karosserie auf der Karosseriebau-Hauptlinie transportiert wird.

Streuung: Die Streuung beschreibt die Wiederholgenauigkeit eines Prozesses. Bei einem Prozess mit geringer Streuung ist die Ergebnisgröße stabil und schwankt nur wenig. Die Quantität kann bei einer normalverteilten Streuung durch die Standardabweichung beziffert werden.

Zusammenbau: Der durch einen Fügevorgang erzeugte Komponentenverbund wird als Zusammenbau bezeichnet. Das Spektrum reicht von sehr kleinen Zusammenbauten, wenn beispielsweise an ein einzelnes Pressteil eine Schweißmutter angefügt wurde, bis zu Groß-Zusammenbauten wie der fertigen Karosserie.

Vorwort

An dieser Stelle möchte ich den Menschen Dank aussprechen, die mich bei der Anfertigung dieser Dissertation begleitet und unterstützt haben.

Ich bedanke mich bei meiner Betreuerin und Erstgutachterin Frau Prof. Dr. Dr.-Ing. Dr. h.c. Jivka Ovtcharova. Ihre klare Sicht auf die Grundprinzipien des wissenschaftlichen Arbeitens sowie auf die inhaltlichen Kernpunkte der Arbeit hat mich sehr dabei unterstützt, die Fragestellungen strukturiert abzarbeiten. Auch für die Kooperation zur Erstellung des Visualisierungstools möchte ich mich bei ihr und bei ihrem Mitarbeiter Victor Häfner bedanken. Prof. Dr.-Ing. Rainer Stark danke ich für die Übernahme des Koreferats.

Bei meinem Industriebetreuer bei der Daimler AG, Dr. Martin Bohn, bedanke ich mich für die Gelegenheit, die Arbeit mit einem tiefgreifenden Praxisbezug anfertigen zu können. Viele Gespräche haben die Dissertation inhaltlich maßgeblich beeinflusst. Ebenso danke ich allen Kollegen aus der Abteilung Toleranzmanagement, die mich mit Rat und Tat unterstützt haben. Den Studenten Sneschana Gillich, Jonathan Litwar, Georg Movsisyan, Meike Rehder, Philipp Roedel, Mohammad Rostami Mehr, Markus Stopp und Carsten Wissing, die im Rahmen ihrer Abschlussarbeiten Beistand leisteten, bin ich ebenso zu Dank verpflichtet.

Zu guter Letzt möchte ich mich bei meiner Mutter und meinen Großeltern bedanken, die mich auf meinem Weg immer unterstützt haben.

Böblingen, im März 2018

Julius F. Klinger

1 Einleitung

Seinen Ursprung teilt sich das Toleranzmanagement mit dem der industriellen Serienfertigung. Um 1800 wurden die ersten Gewehre in einem Serienfertigungsprozess hergestellt. Zur Sicherstellung, dass die verschiedenen Einzelteile reproduzierbar zusammgebaut werden konnten, wurden die Abmaße mit der Anzahl einschiebbarer Lagen von Papier geprüft [Kle-06, S. 1 f.]. Um festzulegen, wieviel Abmaß in Ordnung war, also um die Spezifikation zu erstellen, musste eine Toleranzbetrachtung durchgeführt werden. Das Beispiel zeigt, dass die Serienfertigung zwangsläufig mit dem Toleranzmanagement verbunden ist. Wenn eine Baugruppe in einem reproduzierbaren Produktionsprozess aus industriell hergestellten Komponenten zusammengesetzt wird, so müssen die Komponenten zwingend austauschbar sein. Die Austauschbarkeit kann nur durch ein installiertes Toleranzmanagement gesichert werden, wobei dessen Umfang vom Anwendungsfall abhängt.

Im Automobilbau wird die entstehende geometrische Gestalt eines Produkts durch viele Einzelteile und Produktionsprozesse beeinflusst, was ein umfassendes Toleranzmanagement verlangt. Außerdem ist die statistische Gewichtung der einzelnen Beitragsleister relevant. In der modernen Kraftfahrzeugfertigung werden täglich mehrere hundert Karosserien des gleichen Typs gefertigt. Somit müssen Mittelwert und Streuung der Einflussparameter untersucht und in die Analyse mit einbezogen werden. Die erforderliche Genauigkeit ist hierbei so kostengünstig wie möglich zu realisieren. Generell wird jeder Herstellungsschritt teurer, ja präziser die Herstellung gefordert wird. Somit ist es eine der Anforderungen an die Karosserieentwicklung, dass sich exakte Schließmaße am fertigen Produkt mit möglichst geringen Ansprüchen an die Einzelteilfertigungs- und Zusammenbauprozessgenauigkeit darstellen lassen [Kle-06, S. 20]. Daher fordern

Toleranzanalysen im heutigen Karosseriebauumfeld umfassenden Simulationsaufwand. Zum einen wird eine präzise Abbildung der geometrischen Verhältnisse und räumlichen Orientierungselemente benötigt, die zum anderen mit validierten statistischen Eigenschaften belegt werden müssen.

Durch die ständig wachsende Zahl an Derivaten – in allen Industriebereichen – wird Modularisierung immer wichtiger. Der daraus erwachsende Anspruch der größtmöglichen Flexibilität an die Produktionsanlagen wird aktuell intensiv im Rahmen von „Industrie 4.0“ untersucht. Auch dies ist eine Form von Austauschbarkeit, die vom Toleranzmanagement berücksichtigt werden muss, vgl. auch [Söd-16]. Eine flexible, modularisierte Produktion bedingt die exakte Kenntnis und Kontrolle des Abweichungsverhaltens der einzelnen Prozesse.

Die vorliegende Arbeit verknüpft die theoretische Betrachtung der Abweichungsförderung mit durch Serienprozessmessdaten gestützten Erfahrungswerten. Dazu werden die aktuellen Vorgehensweisen im Toleranzmanagement sowie die berücksichtigten Abweichungsverhalten dargestellt. Die Einteilung und detaillierte Analyse der angewendeten Prozesse identifiziert die maßgeblichen Einflussfaktoren auf die Maßhaltigkeit im Karosseriebau. Daraus werden Verbesserungsmöglichkeiten des Abbildungsumfanges sowie der Abbildungsmethodik abgeleitet.

2 Stand der Technik

In diesem Kapitel werden die Grundlagen der Toleranzsimulation erläutert. Die Simulation von Toleranzketten basiert auf den Prinzipien des Toleranzmanagements, dessen Anwendung im Automobilbau dargelegt wird. Die Grundlagen der Massenproduktion zur Herstellung von Automobilkarosserien werden umrissen. Des Weiteren gehören zum aktuellen Stand der Technik die Prüfmittel, mit denen die Einhaltung der Vorgaben aus dem Toleranzmanagement kontrolliert wird. Auch im Rahmen der vorliegenden Arbeit ist die Prüfmittelqualität entscheidend, da eine Validation und ein Informationsrückfluss in die Simulation nur durch hinreichend genaue Messdaten ermöglicht wird. Die Beschreibung der Anwendungsumfänge der Toleranzsimulation und die Vorstellung verschiedener mathematisch-theoretischer sowie in der Praxis softwaretechnischer Ansätze komplettieren den Stand der Technik.

2.1 Einführung in das Toleranzmanagement im Automobilbau

Das technische Toleranzmanagement im Automobilbau teilt sich in zwei Sparten: Im Bereich Antriebsstrang werden im Rahmen des klassischen Maschinenbaus Passungen und ähnliches untersucht, sodass der Fokus auf Effektivmaßen liegt und Bezugssysteme eine untergeordnete Rolle spielen. Die vorliegende Arbeit ist hingegen im Bereich Karosserieentwicklung angesiedelt, sodass die Schwerpunkte die Analyse und Gestaltung von Toleranzketten sowie die Modellierung der Positionierung und Flächenformabweichungen von Komponenten sind. Hierbei werden Abweichungen im dreidimensionalen Raum untersucht. Diese referenzieren sich auf verschiedene Bezugssysteme, beispielsweise das Fahrzeugkoordinatensystem. Im weiteren

Verlauf bezieht sich der Begriff Toleranzmanagement immer auf das Toleranzmanagement in der Karosserieentwicklung.

2.1.1 Grundlagen des Toleranzmanagements

Die Methoden des Toleranzmanagements werden im Entwicklungsbereich angewendet, um optische sowie technische Funktionen abzusichern. Hierbei wird zwischen den Prinzipien der Toleranzsynthese und der Toleranzanalyse unterschieden [Sto-10, S.18]. Bei der Toleranzsynthese werden aus einer erforderlichen Schließmaßtoleranz die dafür nötigen Spezifikationen der zu Grunde liegenden Einzelkomponenten und Prozesse hergeleitet. Das Schließmaß ist relevant, weil es, eventuell mit anderen Schließmaßen zusammen, ein resultierendes optisches oder technisches Funktionsmaß bildet, welches Zentrum der Auslegung durch das Toleranzmanagement ist. Für die Toleranzsynthese gibt es keine solitäre Lösung. Es ist eine Auslegung zu wählen, die die fertigungstechnischen Gegebenheiten mit einbezieht. Hierfür müssen die einzelnen Beitragsleister berücksichtigt werden. Unter großen Beitragsleistern versteht man diejenigen Glieder einer Toleranzkette, welche die resultierende Schließmaßtoleranz signifikant beeinflussen. Bei der Erhöhung der Fertigungsgenauigkeit ist es folglich am effizientesten, die Streuung des größten Beitragsleisters zu reduzieren. Fertigungstechnisch kann es jedoch günstiger sein, andere Beitragsleister zu optimieren. Unter Berücksichtigung dieser Kriterien sind alle Toleranzen, die das untersuchte Schließmaß beeinflussen, festzulegen. Die Fügefolge der Komponenten, die Ausrichtung beim Fügen sowie die einzelnen Toleranzspezifikationen ergeben zusammen das Toleranzkonzept. Die Fügefolge beschreibt, in welcher Reihenfolge die Einzelteile zum Zusammenbau (ZB) verbunden werden.

Im nächsten Schritt werden die Toleranzen der Toleranzkettenglieder wieder statistisch addiert um zu überprüfen, ob das Schließmaß mit der gewählten Auslegung die Vorgaben erreichen kann. Dieses ermitteln der Schließmaßtoleranz auf Basis von bekannten Beitragsleistern

nennt man Toleranzanalyse. Zur Überprüfung eines Toleranzkonzepts wird durch die Toleranzsimulation eine Toleranzanalyse abgebildet.

Beitragsleister sind nicht nur die Einzelteil-, sondern auch die Prozessabweichungen, welche unter anderem durch das Ausrichtkonzept bestimmt werden. Wird aus mehreren Einzelteilen ein ZB gefertigt, so müssen die Einzelteile während des Fügevorgangs präzise ausgerichtet sein. Die Positionierung der Ausrichtelemente an einer Komponente hat großen Einfluss auf die lokalen Abweichungen. Der Bereich direkt neben einem Ausrichtelement, im Karosseriebau beispielsweise ein Fixierstift oder ein Spannelement, weist dieselbe Fertigungsgenauigkeit auf, mit der die Komponente an dieser Stelle ausgerichtet wird, siehe Flansch 1 in Abbildung 2.1. Untersucht man hingegen einen Komponentenbereich fern von jedem Ausrichtelement, siehe Flansch 2, so ergibt sich die hier auftretende Toleranz aus der Ausrichtungsgenauigkeit und der Komponententoleranz an dieser Stelle. Die Komponententoleranz im Beispiel ist die Schwankung des X-Abstandes zwischen den beiden Flanschen.

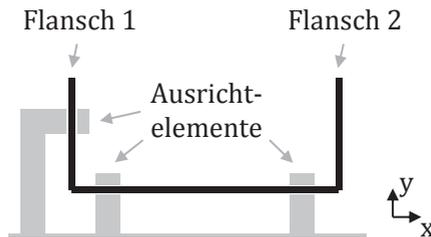


Abbildung 2.1: Abhängigkeit der lokalen Toleranz vom Ausrichtkonzept

2.1.2 Messtechnik und Bezugssysteme

Um die Einhaltung der Toleranzspezifikationen von Einzelteilen sowie ZB zu prüfen, werden die Komponenten geometrisch vermessen. Alle Zusammenbaustufen, aber besonders große ZB, werden regelmäßig auf Koordinatenmessmaschinen geprüft. Dazu muss der Umfang

jedoch aus der Fertigung ausgeschleust werden. Viele Unterbaugruppen und auch die fertige Karosserie werden deshalb zusätzlich mit Inline-Messtechnik abgeprüft. So lassen sich aus dem Ruder laufende Maße unmittelbar erkennen. Die Inline-Messung zählt deshalb eher zur Prozessüberwachung als zur Messtechnik.

Bei der Vermessung müssen die Komponenten stabil und reproduzierbar ausgerichtet werden. Die Komponenten werden im Allgemeinen analog des sogenannten 3-2-1-Prinzips aufgenommen, siehe Abbildung 2.2. Dieses besagt, dass die ersten drei Bezugsstellen denselben translatorischen Freiheitsgrad einschränken, sodass eine Positionsebene, die Primärebene, definiert wird. Darauf schränken zwei weitere Bezugsstellen die Bewegung des Objektes in einer der zwei Richtungen innerhalb der Positionierungsebene sowie die Rotation um den Vektor normal zur Positionierungsebene ein. Die sechste Bezugsstelle unterbindet eine Bewegung in der anderen Richtung innerhalb der Positionierungsebene. Somit ist die zu messende Komponente statisch bestimmt ausgerichtet. Die Primär- und die Sekundärebene müssen im Sinne der Robustheit durch weit auseinanderliegende Punkte aufgespannt werden [vgl. Söd-16].

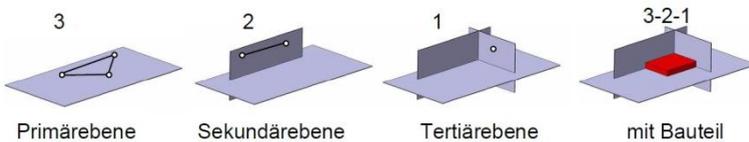


Abbildung 2.2: Ausrichtung einer Komponente nach dem sogenannten 3-2-1-Prinzip [Boh-13, S. 13]

Die genannten Richtungen orientieren sich am allgemeinen Fahrzeugkoordinatensystem. Dieses hat seinen Ursprung in der Mitte der Vorderachse des Fahrzeugs. Die positive X-Richtung zeigt in Richtung Fahrzeugheck, die positive Y-Richtung zeigt fahrzeugrechtsseitig und die positive Z-Richtung senkrecht nach oben. In welcher Richtung die oben beschriebene Positionsebene liegt, hängt von der jeweils

betrachteten Komponentengeometrie und -lage ab. Weist die Positionsebene beispielsweise nur einen kleinen Winkel zur X-Ebene auf, ist also dieser Ebene am nächsten, so heißen die die Positionsebene bestimmenden Bezugsstellen X1, X2 und X3.

Um den zu prüfenden Umfang unter denselben Rahmenbedingungen zu bewerten, wie er hergestellt bzw. verbaut wird, sollte das messtechnische Aufnahmekonzept analog dem Ausrichtkonzept beim Verbau ausgeführt werden [vgl. Cha-99, Söd-16]. Die Bezugsstellen Y1 bis Y3 (siehe Abbildung 2.3) sind an die Positionen verlegt, wo im Karosseriebau Spannelemente die Komponente halten, damit sie gefügt werden kann. In der Regel gibt es in der Geometrie-Station noch mehr Spannelemente, die Komponente wird also statisch überbestimmt ausgerichtet. Dieses soll bei der Messprüfung jedoch nicht abgebildet werden, da die Qualität der möglichst spannungsfreien Komponentengeometrie beurteilt werden soll. Die Bezugsstellen Z4, Z5 und X6 werden über das sogenannte Loch-Langloch-Prinzip realisiert. Beide Löcher werden von Fixierstiften aufgenommen, sodass an beiden Stellen die Z-Position ausgerichtet wird. Damit ist die Z-Ebene die Sekundärebene, die ausgerichtet wird. Das Langloch Z5 ist in X-Richtung ausgeführt, sodass die X-Richtung hier nicht fixiert wird. Somit wird die X-Position der Komponente nur durch die sechste Bezugsstelle X6 im Rundloch bestimmt. Handelt es sich um eine Komponente mit nur geringer Eigensteifigkeit, die sich also in der Messvorrichtung schon durch ihr Eigengewicht messbar verformt, so wird die Komponente mit zusätzlichen Bezugsstellen bewusst statisch überbestimmt ausgerichtet um eine wiederholbare Messung zu gewährleisten. Diese zusätzlichen Bezugsstellen stützen meist die Primärebene des Bezugssystems. Bei sehr großen Komponenten können auch andere Ebenen gestützt werden.

Im Sinne eines funktionalen Toleranz- sowie Aufnahmekonzeptes sollten die Bezugsstellen und Ausrichtelemente an Stellen greifen, wo die Komponente nach dem Verbau eine Schnittstelle zu anderen Komponenten aufweist. Die Komponente in Abbildung 2.3 beispielsweise

wird an den beiden Flanschen links und rechts mit einem anderen Blech verbunden. Somit wären hier die Bezugsstellen aus funktionaler Sicht des Karosseriebaus am besten platziert. Die Hauptfläche der Komponente, an der nach Fertigstellung der Karosserie Montageteile angebunden werden, könnte dann mit Bezug auf die Flansche, die die Position der Komponente bestimmen, geometrisch durch Kontrollmessungen bewertet werden. Da an den Flanschen jedoch Fügepunkte gesetzt werden und beim Einlegen in die Fügestation hier mit dem Fügepartner Kontakt hergestellt wird, ist die Aufnahme der Komponenten an dieser Stelle nicht immer möglich. So muss auch die links gezeigte Musterkomponente in der entsprechenden Karosseriebaustation in anderen Bereichen aufgenommen werden. Somit werden die Bezugsstellen, die mit den Spannstellen der Vorrichtung kongruent sein sollen, verlegt. Hier muss bei der Komponentenentwicklung ein Kompromiss zwischen optimaler Qualitätsbeurteilung und Herstellbarkeit gefunden werden.

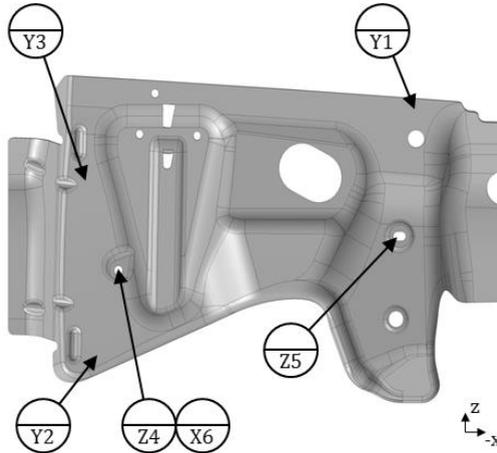


Abbildung 2.3: Komponente mit Bezugsstellen

2.1.3 Statistische Grundlagen

Aufgrund der hohen Produktionsstückzahlen im Automobilbau ist die statistisch korrekte Abbildung des Abweichungsverhaltens ein wesentlicher Aspekt der Toleranzsimulation. Unter Streuung versteht man die statistischen Schwankungen der realen Komponentengeometrie innerhalb eines bestimmten Produktionszeitraumes. Vergleicht man den Mittelwert eines Maßes mit der gewünschten Soll-Geometrie, so spricht man von Mittelwertabweichung. Die Mittelwertabweichung ist unabhängig von der Streuung [vgl. Schu-14, S. 56 ff.]. Abbildung 2.4 illustriert den Unterschied zwischen Streuung und Mittelwertabweichung. Die obere Messreihe weist große Streuungen auf, die Mittelwertabweichung dieser Stichprobe ist jedoch nahezu null. Die untere Messreihe weist im Gegensatz dazu eine sehr kleine Streuung auf, ist also sehr stabil. Der Mittelwert ist jedoch verschoben. Ist die Streuung bei einem in Spezifikation laufenden Prozess ähnlich groß wie die Toleranzfeldbreite, so ist der Prozess zwangswise mittelwertzentriert sein. Alle Parameter sind bekannt, dieser Fall lässt sich simulations-technisch gut nachbilden.

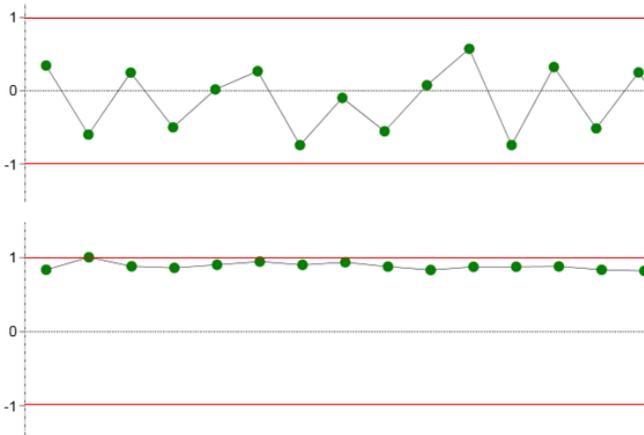


Abbildung 2.4: Beispiele für große Streuungen (oben) und große Mittelwertabweichungen (unten)

Bei einem Prozess hingegen, bei dem die Streuung deutlich kleiner als die Toleranzfeldbreite ist, wie das untere Beispiel, kann eine Mittelwertabweichung vorhanden sein. Die Prämisse, dass die Spezifikation erfüllt wird, lässt in diesem Falle keine eindeutigen Schlüsse auf die Prozessparameter zu. Es ist nicht möglich, die Mittelwertabweichung abzuschätzen. Die Simulation eines solchen Prozesses ist nur risikobehaftet möglich.

Im Gegensatz zur Mittelwertabweichung lässt sich die Streuung weniger leicht quantifizieren. Die übliche Methode ist die Bewertung mittels der Standardabweichung

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2.1)$$

der Stichprobe, wobei n der Größe der Stichprobe, x_i der einzelnen Messwerte und \bar{x} dem Mittelwert entspricht [vgl. Roo-14, S. 75].

Um diese Kennzahl heranzuziehen muss jedoch angenommen werden, dass die Messdaten normalverteilt sind, da die Standardabweichung den Wendepunkt und somit die Breite der Gaußglocke beschreibt. Abbildung 2.5 illustriert die ein-, zwei- und dreifache Standardabweichung σ der Grundgesamtheit. Die Streubreite wird oft mit $\pm 3\sigma$ beschrieben, da dieser Bereich 99,73% der Werte der Grundgesamtheit umfasst [Boh-13, S. 23]. Eine weitere Kenngröße ist der Range, welcher jedoch nicht statistischer Natur ist. Er beschreibt die Differenz zwischen größtem und kleinstem Messwert und ist somit durch Ausreißer leicht beeinflussbar. Daher ist die Standardabweichung oder eines ihrer vielfachen besser zur Beschreibung geeignet, falls normalverteilte Daten vorliegen.

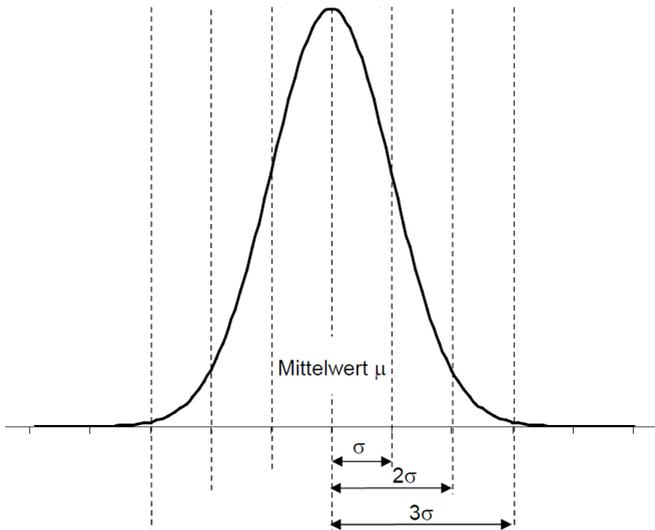


Abbildung 2.5: Standardabweichung σ der Normalverteilung [Boh-13, S. 23]

Bisher wurde bewusst zwischen der Standardabweichung der Stichprobe s und der Standardabweichung der Grundgesamtheit σ unterschieden. Statistische Untersuchungen zu Standardabweichung, Mittelwert und anderen Kenngrößen setzen eine ausreichend große Stichprobenanzahl voraus. Nur von einer großen Stichprobe können Erkenntnisse zuverlässig auf die Grundgesamtheit übertragen werden. Mit der Anzahl der Messdaten verkleinert sich das Konfidenzintervall, welches bei der Standardabweichung generell deutlich größer ist als beim Mittelwert [vgl. Berechnungsbeispiel Zöf-00, S. 73 ff. und Boh-16, S. 144/189 ff.]. Abbildung 2.6 zeigt die Größe des einseitigen oberen Konfidenzintervalls der Standardabweichung l relativ zur Standardabweichung s in Abhängigkeit der Stichprobengröße n bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5%. Der statistische Fehler beim Übertrag von der Standardabweichung der Stichprobe s auf die Standardabweichung der Grundgesamtheit σ reduziert sich erst bei einer Stichprobengröße von 200 Messungen auf ca. 10%.

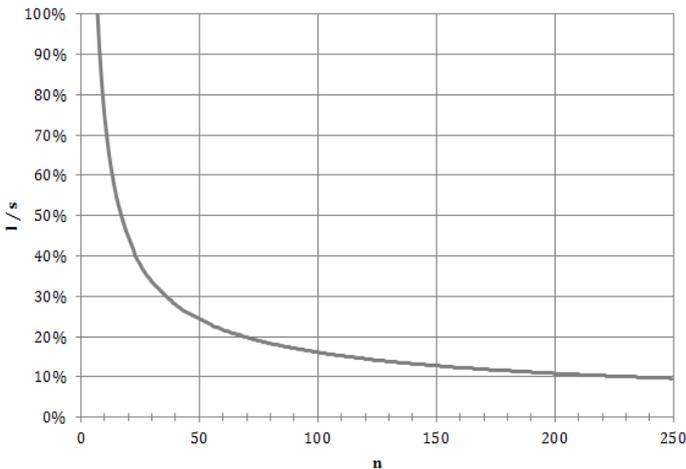


Abbildung 2.6: Einseitiges relatives Konfidenzintervall I/s in Abhängigkeit von der Stichprobengröße n berechnet nach [Schu-14, S. 164]

Im vorangegangenen Kapitel wurde häufig die Prämisse der Normalverteilung vorausgesetzt. Selbstverständlich gibt es viele Prozesse, die nicht als normalverteilt angenommen werden können. Hierzu zählen Messgrößen, die nur durch wenige Faktoren beeinflusst werden oder zeitabhängige Einflussfaktoren haben [Mor-14, S. 17], beispielsweise Temperatur- oder Chargenabhängigkeit. Trotzdem gibt es mehrere Gründe, dass Normalverteilung angenommen werden kann. Zum einen wird die Streuung eines Prozesses selten isoliert betrachtet. Das statistische Verhalten wird meist im Rahmen einer Toleranzanalyse oder -synthese betrachtet, wobei der Einfluss mehrerer Beitragsleister statistisch miteinander verrechnet wird. Werden statistische Kenngrößen addiert, also Verteilungsformen gefaltet, so nähert sich die resultierende Verteilung mit jeder Faltung mehr der Normalverteilung an, unabhängig von der Verteilungsform der einzelnen Beitragsleister [Boh-98, S. 54]. Zudem gibt es verschiedene Verfahren, andere Verteilungsformen in Normalverteilungen zu überführen, z. B. die Johnson-Transformation [vgl. Schu-14, S. 156f.].

2.1.4 Bewertungsgrößen des Qualitätsmanagements

Um die Prozesse in der Massenproduktion zu überwachen, wird Statistical Process Control (SPC) eingesetzt [vgl. Brü-15, S. 111 ff.]. Die wichtigsten Kenngrößen von SPC sind der Prozessfähigkeitsindex c_p , auch Prozesspotenzial genannt, und der kleinste Prozessfähigkeitsindex c_{pk} , auch Prozessfähigkeit genannt [vgl. DIN-16]. Diese Kennzahlen können mit Hilfe der Standardabweichung berechnet werden. Der Prozessfähigkeitsindex charakterisiert die Streubreite eines Prozesses im Hinblick auf die Toleranzfeldbreite und berechnet sich wie folgt:

$$c_p = \frac{t_{OG} - t_{UG}}{6s} \quad (2.2)$$

mit t_{OG} als oberer und t_{UG} als unterer Toleranzgrenze. c_p sagt aus, inwiefern ein Prozess streuungsseitig in der Lage ist, innerhalb der Toleranzgrenzen zu produzieren. Die gegebenenfalls regelbare Mittelwertabweichung wird außer Acht gelassen. Der kleinste Prozessfähigkeitsindex hingegen beurteilt den Prozess ausschließlich hinsichtlich der Spezifikationserfüllung:

$$c_{pk} = \min \left\{ \frac{t_{OG} - \bar{x}}{3s}; \frac{\bar{x} - t_{UG}}{3s} \right\} \quad (2.3)$$

Je nachdem, ob der Prozess eher Richtung oberer oder unterer Toleranzgrenze strebt, wird die Prozessfähigkeit dahingehend bewertet. Das untere Beispiel in Abbildung 2.4 hat somit ein $c_p \gg 1$, da die Messwerte alle sehr dicht beieinander liegen. Die kleinste Prozessfähigkeit wird allerdings $c_{pk} < 1$ sein, da alle Werte sehr nahe der oberen Toleranzgrenze liegen (obere rote Linie).

2.2 Integration des Toleranzmanagements in den Entwicklungsprozess

Das Toleranzmanagement ist integraler Bestandteil nahezu des kompletten Entwicklungsprozesses, dargestellt in Abbildung 2.7, vgl. auch [Söd-16, Cra-97]. Schon in der Konzeptphase müssen Toleranzanalysen hinsichtlich grundsätzlicher Designstrategien durchgeführt werden. Beispielhaft sei hier der Unterschied zwischen einer bündigen Fuge und dem Dachziegelprinzip dargestellt. Beim Scheinwerfer mit der bündigen Fuge, dargestellt im oberen Bild, ist sowohl die Fugenbreite zwischen Motorhaube und Scheinwerfer als auch der Versatz von der Motorhaube zum Scheinwerfer mess- und für den Kunden erkennbar. Da beim Scheinwerfer im unteren Bild die Motorhaube den Scheinwerfer überlappt, ist der Versatz hier nicht ausschlaggebend. Abhängig vom gewählten Konzept stellen sich hier also unterschiedliche Anforderungen an das Toleranzmanagement, die gegebenenfalls unterschiedliche Fertigungsverfahren bedingen. In der Vorentwicklungsphase muss das Toleranzmanagement die Produktentwicklung dahin gehend treiben, dass eine möglichst robuste Konstruktion umgesetzt wird [vgl. Ste-12]. Für die Karosseriekonstruktion bedeutet dieses beispielsweise, dass möglichst viele Komponentenverbindungen als toleranzgerechte Schiebeflansche ausgeführt werden [vgl. Shi-96].

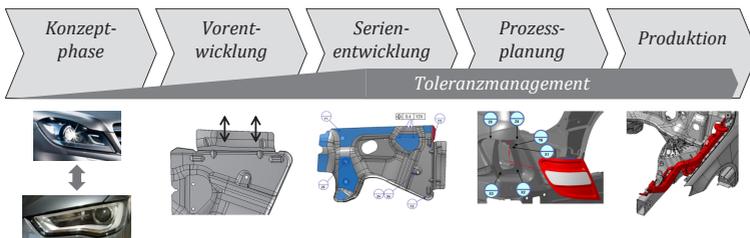


Abbildung 2.7: Toleranzmanagement im Entwicklungsprozess

Während der Serienentwicklung muss das Toleranzmanagement für alle Komponenten geometrische Spezifikationen entwickeln. Hier ist die toleranzgerechte Auslegung weiter voranzutreiben. Parallel startet die Phase der Prozessplanung, in der das Toleranzmanagement beispielsweise die Montagekonzepte mitgestaltet. Die Vorgehensweise in der Montage muss zu den in der Entwicklung entsprechend ausgelegten Toleranzspezifikationen passen. Demnach müssen gegebenenfalls entsprechende Betriebsmittel zum Einsatz kommen. Deren Einsatz wird final in der Produktionsphase validiert, sodass im Toleranzmanagement auch Potenziale für zukünftige Projekte untersucht werden können.

Es ist immer ein Kompromiss aus erforderlicher und wirtschaftlich darstellbarer Toleranzspezifikation zu finden. Um diese Abstimmung zu erleichtern, schlagen [Ble-99] eine Methode zur Vernetzung von Entwicklungs- und Produktionsinformationen vor, i. e. die Integration von Machbarkeits-, Kosteninformationen, etc. in CAD-Systeme. Die Beschaffung dieser Informationen ist jedoch wegen mangelnder systematischer Dokumentation schwierig, siehe [Ger-99].

2.3 Massenproduktion im automobilen Karosseriebau

In der Automobilbranche entscheidet die Nutzung der durch die Massenproduktion erschließbaren Effizienzvorteile über die Wettbewerbsfähigkeit eines Unternehmens. In keinem anderen Industriezweig trifft ein technisch so komplexes – und damit hinsichtlich der geometrischen Qualität sehr anspruchsvolles – Produkt auf eine so ausgeprägte Massenproduktion. Aus dieser durchweg auf hohe Stückzahlen ausgerichteten Produktionsstrategie leitet sich für den Karosseriebau die Anforderung nach sehr robusten Fertigungsprozessen ab.

2.3.1 Herstellungsprozesse von Pressteilen

Im modernen Karosseriebau werden vielerlei Materialien mit einer großen Anzahl von Fertigungsverfahren verarbeitet. Aufgrund der relativ geringen Produktionskosten und der guten Verarbeitbarkeit ist Stahl jedoch nach wie vor der am häufigsten verwendete Werkstoff. Abbildung 2.8 zeigt beispielhaft die Karosseriewerkstoffe eines hochpreisigen Fahrzeugs. Selbst hier bestehen noch 75% der Karosserie aus Stahlpressteilen. Zur Herstellung von Strukturteilen aus Aluminium werden heute Gussverfahren eingesetzt. Aufgrund der hohen Produktionskosten finden Aluminiumgussteile jedoch nur sehr gezielt Anwendung. Anbauteile aus Aluminium, wie beispielsweise Türen und Klappen, sind in der Regel auch Pressteile. Da die zwei mit großem Abstand am häufigsten verwendeten Materialien hauptsächlich als Pressteil ihren Weg ins Fahrzeug finden, soll sich dieses Kapitel auf diese Karosserieteile beschränken.

- 2% Magnesium
- 22% Aluminium
- 1% Kunststoff
- 20% gut umformbare Tiefziehstähle
- 25% Höherfeste Stähle
- 11% Mehrphasenstähle
- 16% Höchsthafte borlegierte Stähle
- 3% Edelstähle



Abbildung 2.8: Karosseriematerialien eines hochpreisigen PKW [Böl-10]

Unter Pressteilen versteht man im Karosseriebau Komponenten, die durch das sogenannte Karosserieformen erzeugt werden. Hierbei handelt es sich um eine Mischform aus Streck- und Tiefziehen (siehe DIN 8585-4 und DIN 8584-3). Der Spannungszustand in der Komponente beim Karosserieformen schwankt zwischen den beiden theoretischen Modellen; geometrieabhängig gibt es Bereiche mit reiner Zugspannung und Bereiche, in denen Zug-Druck-Spannungen vorherrschen, siehe Abbildung 2.9.

Beim Tiefziehen fließt Material nach, idealerweise findet keine Materialausdünnung statt. Die Menge wird hierbei durch den Niederhalter gesteuert. Übt dieser einen kontrollierten Druck auf die Matrize aus, so kann noch genügend Material nachfließen, ohne dass es zu Faltenbildung kommt. Theoretisch entsteht der charakteristische Zug-Druck-Spannungszustand im Pressteilflansch nur bei runden Querschnitten, da nur hier durch das Fließen des Materials in Richtung Zarge durch die Radiusverkleinerungen Druckspannungen entstehen. Das tangentielle Nachfließens des Werkstoffes hat den größten Anteil am Verformungsgrad. Während das reine Tiefziehen bei einem realen Pressteil somit im Zargen- und Flanschbereich zu finden ist, kommt es in der Mitte des Pressteils eher zum Streckziehen. Beim Streckziehen fließt kein Material nach, die Formänderung wird ausschließlich über die Materialausdünnung erreicht.

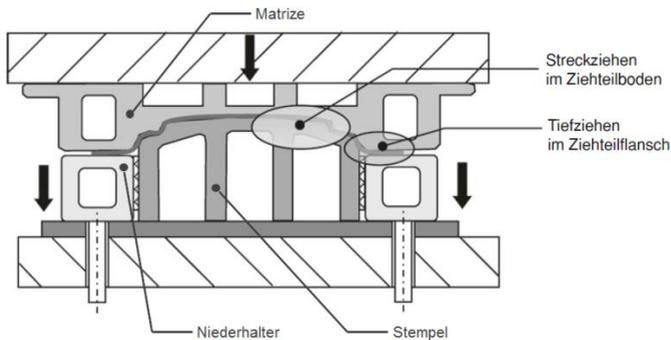


Abbildung 2.9: Karosserieformen eines Pressteils [vgl. Bir-13, S. 232]

Schon bei mittelgroßen Komponenten ist der Weg zum Pressteilflansch zu lang, als dass Material über diese Strecke nachfließen könnte [Bir-13, S. 231 ff.]. Würde man den Niederhalter beim Abpressen komplett schließen, so würde an der ganzen Komponente Streckziehen auftreten.

Unabhängig vom theoretischen Verfahrensmodell muss beim Auslegen von Presswerkzeugen der Rückfedereffekt vorgehalten werden. Dieses ist nach wie vor der für die Umformsimulation anspruchsvollste Effekt. Bei nicht rundum geschlossenen Profilen kommt es nach dem Öffnen des Werkzeugs zur Rückfederung, siehe Beispiel für die Biegerückfederung in Abbildung 2.10. Dabei nähert sich die Komponente in Bereichen, wo keine geometrische Struktur dieses unterbindet, wieder ein Stück der ebenen Platinenform an. Dieser und andere Effekte bedingen einen Vorhalt im Umformwerkzeug, sodass nach dessen Öffnung das Pressteil in die gewünschte Gestalt springt. Somit ist eine Unterscheidung zwischen Komponenten- und Werkzeugdatensatz erforderlich.

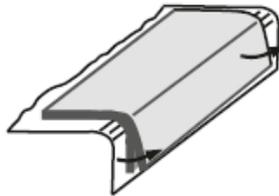


Abbildung 2.10: Biegerückfederung [Bir-13, S. 302]

2.3.2 Herstellungsprozesse im Karosseriebau

Im Karosseriebau werden die Einzelteile möglichst präzise miteinander gefügt. Dieses Kapitel gibt eine Übersicht über den Prozessablauf. Die zur Umsetzung des Ausrichtkonzeptes nötigen Ausrichtelemente werden beschrieben. Überdies werden die generischen Einflüsse der eingesetzten Fügeverfahren auf die Ausrichtelemente herausgestellt.

2.3.2.1 Ablauf des Karosseriebaus

Der Karosseriebau läuft im modernen Automobilbau vollständig automatisiert ab [Kro-13, S. 13]. Nur das Befüllen der Einzelteilmagazine und Logistikaufgaben werden von Werkern erledigt. Nachdem die Einzelteile oder die kleinen ZB dem Karosseriebau zugeführt wurden, werden Sie von Industrierobotern abgegriffen und zum Fügen vorbereitet. Darauf folgt das Einlegen in sogenannte Geometrie-Stationen, auch Geo-Stationen genannt. In diesen werden die Komponenten durch ausgewählte Fügepunkte zusammen geheftet und es wird somit hauptsächlich die Maßhaltigkeit hergestellt [Bir-13, S. 47]. Dabei werden die Komponenten definiert eingespannt. Darauf wird der noch nicht komplett gefügte ZB ausgefügt, d.h. es werden die restlichen Fügepunkte zur Erreichung der benötigten Festigkeit generiert. Das Widerstandspunktschweißen ist nach wie vor das meistgenutzte Fügeverfahren im Karosseriebau [Wes-10, S. 151].

Nachdem der ZB fertig gefügt wird, besteht an vielen Stellen die Möglichkeit, einzelne ZB zur geometrischen Vermessung oder für eine Completely-Knock-Down-Fertigung¹ auszuschleusen. Geschieht das nicht, so wird der ZB mittels automatischer Transportmittel, wie beispielweise einem Staurollenförderer, zur nächsten Station oder in einen Puffer transportiert. Sind die Unter-ZB fertig aufgebaut, werden sie auf der sogenannten Karosseriebau-Hauptlinie zur Gesamtkarosserie gefügt. Je nach Fortschritt werden hier verschiedene Aufbaustufen unterschieden. Eine in der Industrie gängige Einteilung wird in Abbildung 2.11 veranschaulicht. Z1 bezeichnet das Ergebnis der ersten Station der Karosseriebau-Hauptlinie. Hierbei werden der Vorbau, der Hauptboden und der Heckwagen des Fahrzeugs gefügt. Die Karosserie durchläuft nun bis zu ihrer Fertigstellung diverse linear hintereinander angeordnete Stationen. Dabei wird die teilaufgebaute Karosserie auf sogenannten Skids entlang der Hauptlinie weitertransportiert. Ein

¹ Completely-Knock-Down (CKD) bezeichnet die Verschiffung von einzelnen Komponenten in Exportmärkte. Zollbeschränkungen machen dieses Vorgehen in bestimmten Ländern notwendig, bei dem das Fahrzeug erst im Zielland zusammengebaut wird.

Skid ist ein Schlitten, mit dessen Hilfe sich die Karosserie auf einer Rollenbahn oder Ähnlichem auf der Hauptlinie von Station zu Station bewegt. Die Stufe Z2.1 beinhaltet zusätzlich die inneren Seitenwände und die Dachspriegel. Die B-Säule sowie die Verstärkungsbleche innerhalb der Seitenwände zählen zur Seitenwand außen und werden mit der Stufe Z2.2 gefügt. Die Z2.3 enthält zusätzlich das Dach. Schließlich werden in der Z3 noch die Anbauteile wie Kotflügel, Motorhaube, Türen und Heckdeckel beziehungsweise Rückwandtür angebracht. Diese Komponenten werden mechanisch gefügt.

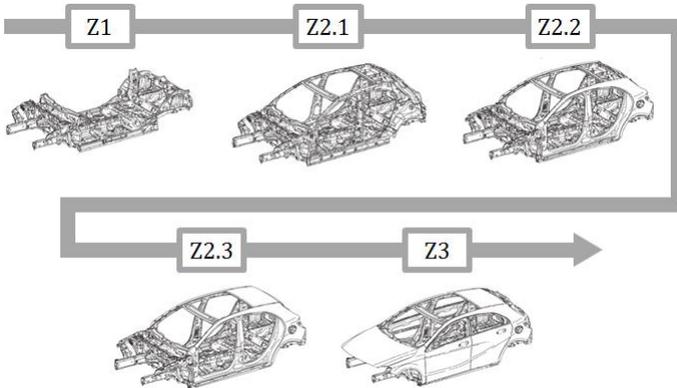


Abbildung 2.11: Karosserieaufbaustufen in der Großserienfertigung

Das getrennte Fügen von Seitenwand innen und außen wird als Double Layer Framing bezeichnet. Diese Methode oder Methoden mit noch mehr Layern werden von den meisten Herstellern angewendet. Einige Hersteller, z.B. der Volkswagenkonzern, setzen das Single Layer Framing ein [Tru-05, S. 10 ff.; GMN-07, S. 20 f.; Jee-11, S. 12; Hon-16, S. 27]. Hierbei wird die Seitenwand erst in sich gefügt, bevor sie an der Hauptlinie mit dem Rest der Karosserie verschweißt wird, es gibt also keine Z2.1-Aufbaustufe. Die verschiedenen Framing-Ansätze ermöglichen unterschiedliche maßliche Einstellungsverfahren im Karosseriebau.

2.3.2.2 Spanntechnik im Karosseriebau

Um die einzelnen Komponenten möglichst präzise zueinander zu fügen, muss auf eine exakte Auslegung der Ausrichtelemente in der Geo-Station geachtet werden. Die Geo-Stationen sind der Hauptbeitragsleister des gesamten Karosseriebauprozesses, da hier die ZB geometrisch eingestellt werden. Prinzipiell wird jeder Fügepartner separat nach dem in Kapitel 2.1.2 erläuterten 3-2-1-Prinzip ausgerichtet. Da die einzelnen Komponenten besonders am Anfang des Karosseriebauprozesses oder bei großflächigen Teilen wenig Eigensteifigkeit besitzen und um eventuelle maßliche Abweichungen aus vorigen Prozessstufen zu korrigieren, wird die Primärebene in der Regel nicht nur durch drei Ausrichtelemente, sondern überbestimmt beschrieben. Es kommen also deutlich mehr Spannelemente zum Einsatz, bei Außenhautteilen unter Umständen mehr als zehn [vgl. Boh-13, S. 76]. Die Genauigkeit der Ausrichtung der Komponenten hängt dabei von der Positionsgenauigkeit jedes einzelnen Ausrichtelementes ab, also von der Lage der Fixierstifte und Spannelemente. Das erarbeitete Ausrichtkonzept wird als Spann- und Fixierkonzept (SFK) bezeichnet.

Die Ausrichtelemente werden durch Fixierstifte (siehe Abbildung 2.12) oder Spannelemente (siehe Abbildung 2.13) umgesetzt. Die Fixierstifte, die eine Komponente in einem Loch aufnehmen, haben verschiedene Formen, die auf das Loch angepasst sind. Die Auflageflächen von Spannelementen sind bei Außenhautteilen deutlich größer ausgelegt und meist nicht eben, sondern der entsprechenden Komponentenkontur genau nachempfunden. Zur Unterstützung bei großen Teilen finden auch Auflagen ohne Bügel Anwendung, die keine definierte Ausrichtung zulassen und deshalb in der Toleranzsimulation ggf. nicht berücksichtigt werden. In den Abbildungen sind ebenso die Shimspakete erkennbar, bei den Fixierstiften in beide Richtungen. Durch das Einlegen verschieden dicker Metallplättchen unter der Auflage kann die gewünschte Position des Ausrichtelementes genau eingestellt und so auf maßliche Abweichungen der Einzelkomponenten reagiert werden.

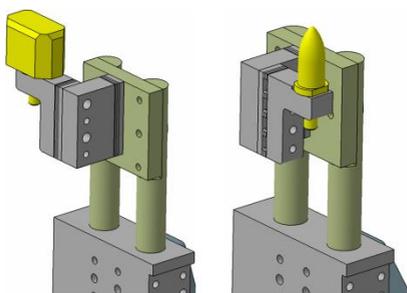


Abbildung 2.12: Fixierstifte zur Ausrichtung der Komponenten in der Geo-Station

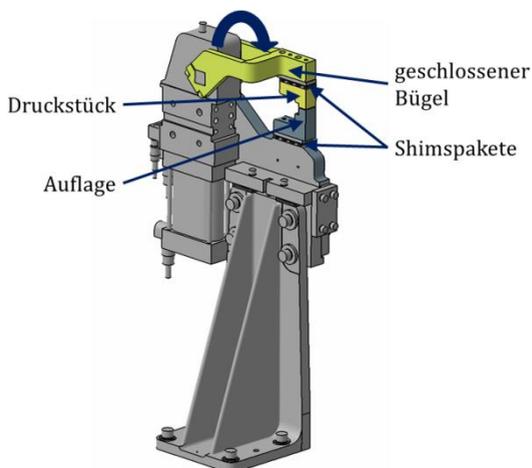


Abbildung 2.13: Spannelemente zur Ausrichtung der Komponenten in der Geo-Station

Abbildung 2.14: zeigt ein Beispiel einer Geo-Station, die aus mehreren der beschriebenen Spannelemente besteht. Die abgesehen von den Hauptspannelementen hauptsächlich im hinteren Bereich der Seitenwand installierte Spanntechnik zeigt, dass in dieser Geo-Station der Heckleuchtentopf (gelb dargestellt) mit der Beplankung Seitenwand gefügt wird.

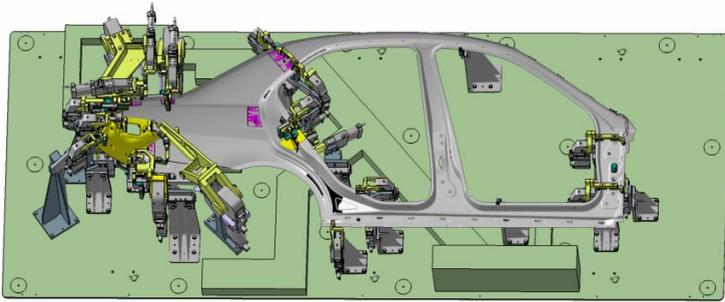


Abbildung 2.14: Beispiel einer Geo-Station

2.3.2.3 Spanntechnik der Fügeverfahren

Die bisherige Beschreibung der Spanntechnik war generisch angelegt. Die einzelnen Fügeverfahren bedingen Besonderheiten, die im Folgenden erläutert werden. Da die Fügekraft beim Widerstandspunktschweißen durch die Schweißzange selbst aufgebracht wird, kann die Spanntechnik in der Geo-Station ausschließlich dazu genutzt werden, die Komponenten lagegenau auszurichten, wie im vorigen Kapitel beschrieben. Abbildung 2.15 zeigt fliederfarben eingefärbt den Türrahmen, die zu fügenden Türverstärkungen in blau und die Spannelemente in grau. Die Schweißpunkte sind schwarz markiert. Zentral im Bild ist ein Fixierstift zu sehen, welcher den Türrahmen durch ein Rundloch aufnimmt. Unter der oberen Verstärkung ist ein weiterer Schaft zu erkennen, dessen Spitze ein Fixierloch dieser Verstärkung aufnimmt (nicht sichtbar). Das in der gezeigten Geo-Station generierte X- und Z-Maß der Fügepartner zueinander wird durch zwei Loch-Langloch-Aufnahmen eingestellt. Die restliche Ausrichtung wird durch wenige Spannelemente übernommen. Dies zeigt, dass die Spanntechnik, die nur für die entstehende Maßhaltigkeit zuständig ist, vor allem bei Strukturteilen sehr reduziert ausgeführt werden kann. Im dargestellten Beispiel ist die Y-Richtung die primäre Ausrichtungsebene und die Richtung, in die geschweißt wird. Dass Füge- und Spannrichtung identisch sind, ist beim Widerstandspunktschweißen jedoch nicht zwingend erforderlich.

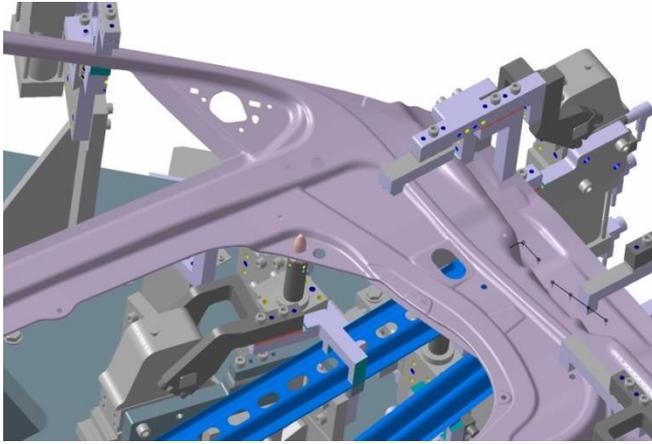


Abbildung 2.15: Ausschnitt der Spanntechnik beim Widerstandspunktschweißen am Beispiel der Türverstärkungen

Beim Laserschweißverfahren agiert das Fügewerkzeug berührungslos, gleichzeitig bestehen aber enorme Anforderungen an die Positionsgenauigkeit im Fügebereich. Der Spalt zwischen den Fügepartnern muss für eine stabile Schweißung sehr genau 0,3 mm groß sein [vgl. Kli-12a], was durch die Spanntechnik gewährleistet werden muss. Obwohl das Fügeverfahren an sich nur eine einseitige Zugänglichkeit der Fügestelle erfordert, müssen deshalb für die Spanntechnik beide Seiten erreichbar sein. Für jeden Lasernahtabschnitt wird ein eigenes Spannelement benötigt, das die Schweißnaht meist U-förmig umschließt. Da direkt an der Fügestelle gespannt wird, sind Spann- und Füge- richtung beim Laserschweißen identisch. Vor allem im Vergleich zum Widerstandspunktschweißen bedingt das Laserschweißen eine ungleich aufwendigere Spanntechnik, die nicht nur die Aufgabe hat, die Komponenten im Sinne eines maßhaltigen ZB auszurichten, sondern die Rahmenbedingung für die Schweißoperation schaffen muss. Den Umfang der eingesetzten Spanntechnik verdeutlicht das in Abbildung 2.16 dargestellte Beispiel. Die Spannelemente sind gelb eingefärbt, die Komponente hellgrau. Die Schweißnähte sind schwarz dargestellt.

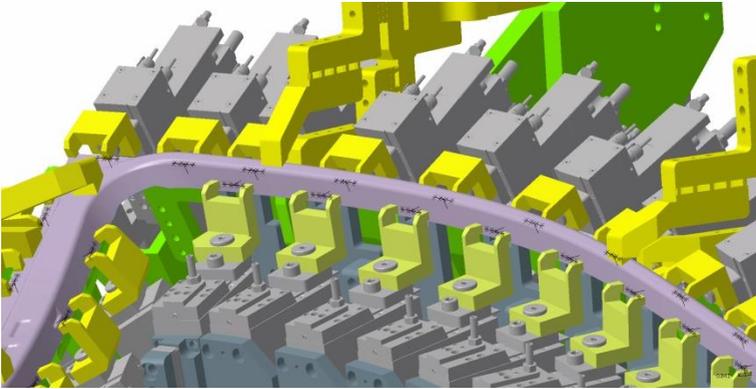


Abbildung 2.16: Spanntechnik des Robscan-Laserschweißens am Beispiel eines Fensterrahmens

Das Laserlöten kommt in der Regel im Sichtbereich zum Einsatz, sodass großflächige Spannelemente verwendet werden. Die spanntechnischen Anforderungen sind ähnlich wie beim Laserschweißen. Es werden Formstücke eingesetzt, um die gleiche Spanndichte zu erhalten. Die Formstücke sind in Abbildung 2.17 an der Schnittebene grün eingefärbt, die Fügepartner blau und grau. Die Formstücke liegen im Fugebereich sehr flächig an. Durch das Laserlöten können viele verschiedene Arten von Stößen gefügt werden, sodass Füge- und Spannrichtung nicht zwangsweise identisch sind. Der Fugebereich muss trotzdem genauso präzise eingespannt werden wie beim Laserschweißen.

Beim mechanischen Fügeverfahren Durchsetzfügen, auch als Clinchen bezeichnet, muss die Fügezange sehr steif ausgeführt werden. Dieses zieht entsprechende Anforderungen hinsichtlich der Zugänglichkeit nach sich. Abbildung 2.18 zeigt ein Beispiel einer Geo-Station, die Komponenten durchsetzfügt. Die Spannelemente sind gelb eingefärbt, die Fügepartner blau und grau und die Fügepunkte schwarz. Ebenfalls ersichtlich ist in der Darstellung die grau eingefärbte Fügezange, links von den Komponenten.

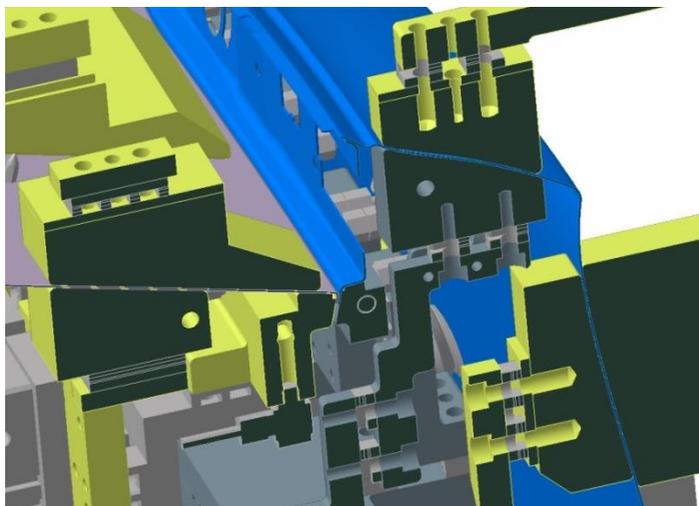


Abbildung 2.17: Schnitt durch die Spanntechnik des Laserlötens am Beispiel Heckdeckel

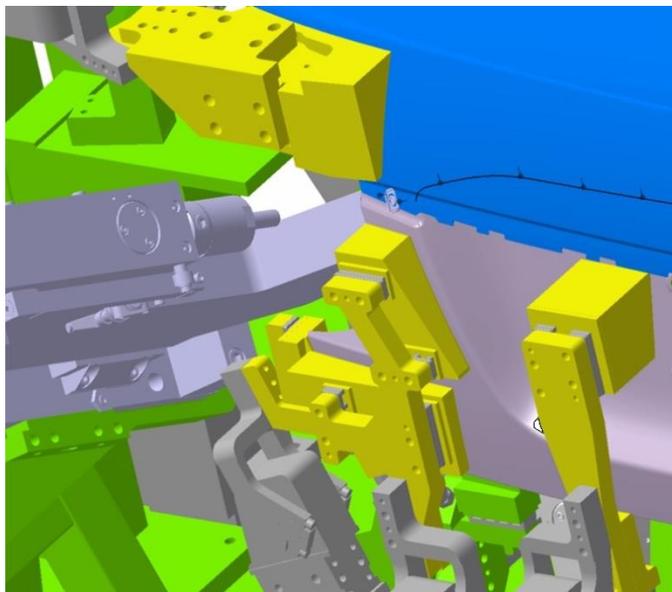


Abbildung 2.18: Spanntechnik beim Durchsetzfügen am Beispiel eines Heckdeckels

Die Spanntechnik der Station befindet sich hier nicht direkt am Fügepunkt, sondern richtet die Fügepartner wie beim Widerstandspunktschweißen allgemein im Raum zur Sicherstellung der Maßhaltigkeit aus. Da es sich im Beispiel um Außenhautteile handelt, werden die Fügepartner über großflächige Spannelemente ausgerichtet, Lochaufnahmen kommen nicht zum Einsatz. Spanntechnik und Fügepunkt sind beim Durchsetzfügen nicht direkt verknüpft, sodass Spann- und Füge- richtung nicht identisch sein müssen. Gleiches gilt für das Stanznieten.

Beim klassischen Schrauben ist der Platzbedarf durch die nur einseitig erforderliche Zugänglichkeit deutlich geringer als bei den anderen beschriebenen Verfahren. Von allen vorgestellten Fügeverfahren fällt beim Schrauben die Spanntechnik am reduziertesten aus. Falls die Lage der Fügepartner nicht dem Lochspiel der Schraubverbindung überlassen werden soll, werden diese meist nach dem Loch-Langloch-Prinzip ausgerichtet. Spannelemente in Schraubrichtung werden nur zum Halten der Fügepartner benötigt. Der Fügespalt wird weder von der Spanntechnik noch vom Fügewerkzeug, sondern vom Fügeelement selbst geschlossen. Somit ist die Füge- unabhängig von der Spann- richtung.

2.4 Prüfmittel

Nur wenn der geometrische Fehler eines ZB genau bestimmt werden kann, können entsprechende Maßnahmen zur Korrektur eingeleitet werden. Das Abprüfen kann mittels Lehren oder verschiedenen Messmitteln erfolgen. Die Messmittelgüte ist dabei für die vorliegende Arbeit entscheidend. Um die geometrische Fertigungsqualität zu dokumentieren und diese Informationen zur Verbesserung der Toleranzsimulation zu verwenden, müssen die resultierenden Werte der Funktionsmaße genau ermittelt werden können.

Lehren werden zur Überprüfung von geometrischer Maßhaltigkeit hauptsächlich bei Anbauteilen eingesetzt. Zur Beschreibung von Prüf-

lehren siehe [Kle-06, S. 138 ff.]. Im Karosseriebau werden Lehren nur bei der Überprüfung von Außenhautfugen verwendet. Deshalb soll auf diese Messwerkzeuge im Folgenden nicht näher eingegangen werden. In diesem Kapitel werden die für den Karosseriebau relevanten Messverfahren erläutert.

2.4.1 Offline-Messtechnik

Am gebräuchlichsten zur Qualitätsbeurteilung im Karosseriebau ist die Offline-Messtechnik. Hierbei werden die zu messenden Komponenten außerhalb ihrer Produktions- oder Weiterverarbeitungsstätten in Messhäusern abgeprüft. Wird ein Einzelteil neu in den Produktionsumfang aufgenommen, wird es anfangs in sehr kurzen Zeitabständen abgeprüft. Ist es maßlich in Ordnung und der Produktionsprozess läuft stabil, so wird die Prüffrequenz heruntergefahren, vgl. auch [Söd-16]. Von jedem Einzelteil werden dann innerhalb eines festen Zeitintervalls nur noch eine Handvoll Teile gemessen. Da die Einzelteile zwischen ihrer Entstehung und ihrer Weiterverarbeitung eingelagert werden, fällt die Ausschleusung aus dem regulären Produktionszyklus leicht. Anders verhält es sich bei ZB im Karosseriebau. Hier sind zwischen den Stationen nur kleine Puffer eingebaut. Somit können nur einzelne ZB entnommen werden, dessen Fehlen der Puffer auszugleichen vermag. An definierten Stellen im Karosseriebau gibt es dafür spezielle Ausschleusstationen, wie in Kapitel 2.3.2 erwähnt. Da auf die ZB-Maßhaltigkeit nicht nur die Einzelteilabweichungen, sondern auch diverse Prozessgrößen einwirken, ist die Prüffrequenz deutlich höher als bei Einzelteilen.

Konventionell werden die Komponenten mit taktilen Koordinatenmessmaschinen vermessen. Der genaueste Typ ist die Portal-Messmaschine, die aber nur kompakte Umfänge messen kann. Aufgrund ihrer steifen Auslegung erreicht sie eine Genauigkeit von $\pm 0,01$ mm, wie Kalibrierversuche zeigen. Die Einarm-Koordinatenmessmaschine ist die am universellsten einsetzbare und somit die weitverbreitetste

Messmaschine. Sie ist auch für großvolumige Komponenten gut geeignet und wird zur Prüfung von großen Einzelteilen, wie z. B. der Beplankung Seitenwand, und großen ZB-Stufen verwendet. Aufgrund ihrer labileren Bauweise ist sie ungenauer als die Portalmessmaschine. Der große Verfahrensweg macht ihre Genauigkeit zudem abhängig von der Auslenkung. Je weiter der Messbereich vom geeichten Messmittelpunkt entfernt ist, desto ungenauer ist die Messung.

Vor allem bei der Messung von Einzelteilen wird vermehrt fotogrammetrische Messtechnik eingesetzt. Hierbei werden die Komponenten von hochauflösenden Kameras aus verschiedenen Blickwinkeln gescannt. Anhand automatisch erkannter Referenzpunkte auf den Scans können diese verknüpft und es kann eine dreidimensionale Punktwolke generiert werden, aus der eine Fläche tessiliert wird. Die aktuelle Technik ist hier jedoch noch sehr empfindlich gegenüber nicht optimalen Lichtverhältnissen und Reflektionen, wie sie bei blanken Metallkomponenten in der Regel auftreten. Dieses schmälert die Genauigkeit des Verfahrens, siehe Kapitel 4.2.2.

Bei der Vermessung mit Koordinatenmessmaschinen wird der Prüfkörper in der Nähe der vorgegebenen Bezugsstellen (siehe Kapitel 2.1.2) eingespannt und an diesen nach Einmessung rechnerisch zu Null gesetzt oder bei überbestimmter Ausrichtung gegen Null vermittelt. Die weitere Messung findet innerhalb dieses Koordinatensystems statt. Es ist also unmöglich, Bezugsstellen nach erfolgter Messung zu modifizieren. In diesem Falle müsste die Komponente noch einmal gemessen werden. Zu viele Bezugsstellen sorgen dafür, dass die Komponente leicht als spezifikationsgerecht bewertet werden kann, da sie durch die Einspannungen auf das Sollmaß gezogen wird. Hier ist also ein Kompromiss zwischen reproduzierbarer Messung und geometrischer Bewertung der Komponente zu finden.

Da die fotogrammetrische Messtechnik eine 3D-Fläche der zu prüfenden Komponente erstellt, kann das Bezugssystem im Nachhinein verschoben werden. Der Anwender kann beliebig auswählen, an

welchen Stellen der erzeugten Realfläche er Bezugsstellen und die Messung somit zu Null setzt. Nach Abgleich mit dem Soll Datensatz kann dann an allen anderen Bereichen der Komponente eine Abweichung ausgewiesen werden. Dieses ist jedoch nur bei statisch bestimmter Ausrichtung der Komponente während der Messung möglich. Wenn die Komponente zur Messung überbestimmt eingespannt wird, kann das Bezugssystem im Nachhinein nicht sinnvoll verändert werden.

2.4.2 Inline-Messmittel

Innerhalb des Karosseriebaus wird vielerorts Inline-Messtechnik eingesetzt. Da diese maßliche Beurteilung mehr die Kontinuität als den absoluten Wert eines Maßes festhält, ist das Verfahren der statischen Prozessüberwachung zuzuordnen. Für eine geometrische Beurteilung ist es nicht ausgelegt. Diese Restriktion entspringt dem Fehlen eines Bezugssystems und der daraus resultierenden schlechten absoluten Messgenauigkeit. Da der Messvorgang vollautomatisch abläuft, wird der zu messende Umfang von einem Roboter in eine Messvorrichtung gelegt. Die Ausrichtung wird hierbei nur durch Fixierstifte, Auflageflächen etc. umgesetzt. Aufgrund der begrenzten Taktzeit kommt keine Spanntechnik zum Einsatz. Da der Roboter die Teile im Rahmen seiner Positionierungsgenauigkeit sehr wiederholgenau in die Messvorrichtung einlegt, ist die Wiederholgenauigkeit der Messungen sehr gut. Aufgrund des mangelnden Bezugssystems und der meist nur auf die zu messenden Produktionsstabilität ausgerichteten Aufnahme ist die absolute Messgenauigkeit schlecht.

Wenn Inline-Messtechnik zur geometrischen Bewertung herangezogen werden soll, so kann dies nur am Relativmaß zwischen im Messumfang enthaltenen geometrischen Elementen einer eigensteifen Komponente geschehen. Vorausgesetzt, dass es keine signifikanten Verkipfungseffekte bei der Aufnahme gibt, ist die Ausrichtung des Messobjektes bei der Auswertung von Relativmaßen zweitrangig. Die Unabhängigkeit des Maßes „a“ von der Ausrichtung des Messobjektes in X-Richtung

illustriert Abbildung 2.19. Obwohl die Komponente im unteren Bild nicht sauber ausgerichtet ist, wird das Maß „a“ trotzdem gleich genau gemessen wie im oberen Bild.

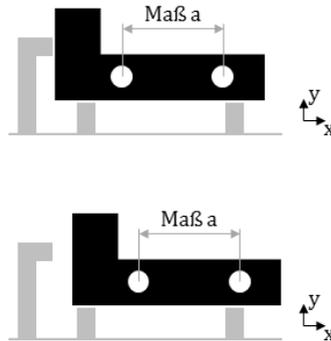


Abbildung 2.19: Unabhängigkeit von Relativmaßen vom Bezugssystem

2.5 Simulationsumfänge

Bei der Toleranzsimulation in der Karosserieentwicklung werden mitunter komplette Karosserien bewertet. Für an der Fertigkarosserie analysierte Funktionsmaße lassen sich hierbei zwei Gruppen von Beitragsleistern unterscheiden. Zum einen zählen die Einzelteilabweichungen zu den wichtigen Eingangsparametern. Da im modernen Großserienfahrzeugbau die Mehrzahl der Einzelteile karosseriegeformte Stahlbleche sind, ist der Begriff Einzelteil in dieser Arbeit weitestgehend mit dem Begriff Pressteil gleichgestellt. In der zweiten Hauptgruppe werden in dieser Arbeit alle weiterverarbeitenden Prozessschritte zusammengefasst. Dieses beinhaltet alle im Karosseriebau Anwendung findenden Fertigungsverfahren, wie Transport, Fügen, Sammeln von Komponenten etc.

2.5.1 Pressteilstreuungen

Das Streuungsverhalten von Pressteilen wurde eingehend untersucht, vgl. beispielsweise [Jan-08] und [Neu-14]. Im Allgemeinen werden Pressteile heute sehr stabil gefertigt, mit relativ konstantem Mittelwert und geringer Streuung. Nur Verschleißerscheinungen, z. B. im Werkzeug, oder ggf. Chargenwechsel können einen wandernden Mittelwert verursachen. Erhöhte Streuungen sind meist auf Rücksprungeffekte zurückzuführen [Kal-12, S. 459], da die Rückfederung aufgrund ihrer vielfältigen Ursachen ein in der Umformtechnik relativ unstabiler Effekt ist [vgl. Hei-06].

Wegen der komplexen Einstellung der Vorhaltemaße sind die Mittelwertabweichungen typischerweise deutlich größer als die auftretenden Streuungen. Dieses Verhalten ist in der Toleranzsimulation nur schwer abzubilden, siehe Kapitel 2.1.3. Die von der Presswerkplanung zugesicherte Genauigkeit richtet sich vielmehr nach der Abschätzbarkeit des auftretenden Mittelwerts als nach der schließlich vorhandenen Prozessstreuung. Wie Abbildung 2.20 verdeutlicht, gibt es mehrere Szenarien, die die Spezifikation (rote Linien) erfüllen.

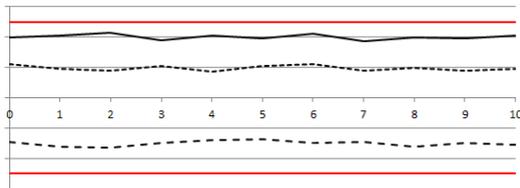


Abbildung 2.20: Beispiel mittelwertabweichender Messreihen

Im Beispiel können alle drei Fälle bei einem Messpunkt an einem toleranztechnisch auszuliegenden Pressteil eintreten und müssen daher simulativ mit denselben statistischen Parametern abgebildet werden. Für die entstehende Toleranzkette ist es jedoch ein erheblicher Unterschied, ob sich das Maß wie der durchgehende oder der grob

gestrichelte Graph verhält. Trotz der geringen Streuungen ist die Pressteilabweichung somit eine große Herausforderung bei der Toleranzsimulation.

2.5.2 Prozessstreuungen im Karosseriebau

Aufgrund der vielen Prozessschritte vom Einschleusen des Einzelteils in den Karosseriebau bis zur Komplettierung der Fahrzeugkarosserie kann der Karosseriebauprozess nicht die geringen Streuungen der Pressteilfertigung erreichen. Mittelwertabweichungen lassen sich jedoch deutlich einfacher korrigieren als bei Pressteilen, da dazu keine Werkzeugänderung nötig ist. Die Ausrichtelemente der geometriebestimmenden Geo-Stationen lassen sich durch sogenanntes „Shimsen“ einstellen (s. Kapitel 2.3.2.2). In der Toleranzsimulation werden die Ausrichtelemente als Kernfunktionen der Geo-Station modelliert.

Zur überbestimmten Einspannung der Primärebene kommen die Kontaktbedingungen mit anderen Fügepartnern. Bei der starren Toleranzsimulation kann die Komponente jedoch nur statisch bestimmt ausgerichtet werden, somit sind mehr als drei Ausrichtstellen für die Primärebene nicht abbildbar. Nur durch eine gegebenenfalls gewichtete Vermittlung zwischen mehreren Ausrichtelementen kann diese Prämisse umgangen werden. Dieses bedingt aber den manuellen Eingriff des Simulationsingenieurs, der bei der Modellerstellung aus seinem Erfahrungsschatz bewerten muss, welche Spannelemente welche Gewichtung erfahren müssen. [Man-99] unterscheidet zwischen Typ 1-ZB, deren resultierende Geometrie allein durch die Einzelteilformen und die Kontaktbedingungen mit anderen Komponenten bestimmt werden, und Typ 2-ZB, für die die Fügevorrichtungen entscheidend sind. Reale ZB in der Automobilfertigung sind meist zwischen diesen beiden Idealfällen angesiedelt. Diese Differenzierung findet in der Literatur selten bewusst statt. Das Gros befasst sich entweder mit Einzelteilstreuungen oder allein mit Vorrichtungsabweichungen, z. B. [Car-99].

Durch den erläuterten Shimsvorgang kann die Maßhaltigkeit des entstehenden ZB gegenüber der Maßhaltigkeit der verwendeten Einzelkomponenten verbessert werden. Diese Vorgehensweise wird von [Bir-13, S. 84 f.] als adaptive Referenzierung beschrieben und nur durch eine Verformung der Einzelkomponenten ermöglicht, welche auch nach dem Entnehmen aus der Geo-Station kontrolliert erhalten bleiben muss. Dieser Effekt steht im Widerspruch zum Wunsch nach einem spannungsfreien Fügen. [Law-96] untersucht diesen Aspekt auf einer höheren Ebene. Es wird ein Herstellungsprozess bis zur Nacharbeit vorgestellt und gezeigt, dass sich die Streuungen in den einzelnen Prozessen nicht aufsummieren. [Jin-99] beansprucht, den kompletten Karosseriebauprozess abweichungstechnisch abbilden zu können. Die Arbeit fokussiert sich jedoch auf Positionierungsgenauigkeiten von Vorrichtungen im zweidimensionalen Raum, lässt Einzelteilabweichungen außer Acht, berücksichtigt keine statistischen Effekte und bringt Verformungen der Komponenten sowie reguläre Prozessstreuungen nur durch einen Korrekturfaktor ein. [Ger-14] beschreibt ebenso die Simulation des gesamten Fertigungsprozesses. Es können aber nicht alle Einflussfaktoren exakt modelliert werden, sodass zu Kalibrierungszwecken hochfrequent Validierungen der Simulation notwendig sind. Das Verfahren kann somit nur serienbegleitend eingesetzt werden und nicht schon im Entwicklungsprozess. [Voß-08] versucht anhand eines einfachen Use-Cases, den Karosseriebauprozess nachzustellen. Seine Simulationsgenauigkeit beträgt jedoch nur 60 %, was auf bisher nicht numerisch darstellbare Effekte zurückgeführt wird.

2.6 Simulationsmethoden

Neben den Simulationsumfängen ist für die korrekte Streuungsabbildung auch die Simulationsmethode relevant. Hierbei geht es um die Abbildungsfähigkeit von Geometrien und ihren Abweichungszuständen sowie die statistische Fähigkeit der Simulationsprogramme.

2.6.1 Mathematische Grundlagen

Die in der Automobilbranche angewendeten Simulationssoftwares sind entweder an CAD-Programme angegliedert oder haben eine Schnittstelle zu diesen. Somit kann die Topologie der betrachteten Komponenten direkt eingelesen werden. In der Regel werden die Komponenten mittels des „Boundary Representation“-Verfahrens (B-Rep) dargestellt [Wit-11, S. 12 ff.]. Da im Karosseriebau der Komponentenkontakt punktuell bzw. linienförmig ist oder nur bestimmte Flächenbereiche betrifft, werden die Toleranzinformationen in der Regel nur punktuell hinterlegt. Dadurch wird weniger Rechenkapazität benötigt. Soll die Betrachtung nicht nur punktuell erfolgen, so müssen für die gesamte Fläche Toleranzinformationen hinterlegt sein. Stockinger listet hierzu sechs methodische Ansätze auf [Sto-10, S. 32 ff.], wie dreidimensionale Abweichungsinformationen simulativ abgebildet werden können, vgl. auch [Pas-03]. [Che-14] vergleichen die zugrunde liegenden mathematischen Ansätze der gängigen Verfahren, wobei kein Ansatz als Universallösung eingestuft wird.

Das statistische Verhalten wird bei den Simulationsprogrammen in der Regel mit der Monte Carlo-Methode abgebildet. Entsprechend der Verteilungsform der Eingangsparameter werden zufallsbasiert Abweichungswerte generiert, mit denen die Toleranzsimulation durchgeführt wird. Dieser Vorgang wird etliche tausend Male wiederholt, sodass statistische Informationen zur Ergebnisgröße generiert werden [vgl. Ung-09, S. 7]. Bei der starren Toleranzsimulation sind diese sich wiederholenden Rechenläufe ausschlaggebend für die benötigte Rechenkapazität.

2.6.2 Berücksichtigung von Elastizität

Bei einer Fahrzeugkarosserie wird die Eigensteifigkeit erst durch das Fügen der Komponenten hergestellt. Die einzelnen Komponenten sind oft sehr labil, besonders große und dünnwandige Komponenten. Soll

das elastische Verformungsverhalten in der Toleranzsimulation berücksichtigt werden, so ist diese um FEM-Berechnungen zu erweitern. Bei jedem Monte Carlo-Lauf wird dann eine FEM-Analyse durchgeführt, um den Komponentenzustand unter Berücksichtigung der gewählten Streuungsparameter abzubilden. Es werden nicht nur abweichungsbehaftete Komponenten dargestellt, auch die Kontaktbedingungen müssen modelliert werden [Dah-05]. Durch die große Anzahl an Rechenläufen wird exorbitant viel Rechenleistung benötigt. Liu et al. [Liu-97] stellen eine elastische Simulationsmethode vor, die den Rechenaufwand durch die Verwendung von reduzierten Steifigkeitsmatrizen und Linearisierung senkt. Dieser Ansatz wurde seitdem mehrfach aufgegriffen, vgl. z. B. [Ung-08b]. Jedoch ist die benötigte Rechenkapazität dennoch deutlich größer als bei der starren Toleranzsimulation. In Ung-08a wird die elastische Toleranzsimulation mit der Visualisierung von optischen Funktionen verknüpft. [Fal-16] stellt mit ANATOLEFLEX eine neue Softwarelösung zur Berücksichtigung von Komponentenverformung vor, die viele Individualisierungsmöglichkeiten bietet und Eigengewichtseinflüsse beachtet. In der Vorstellung wird jedoch nicht auf benötigte Rechenleistung eingegangen.

2.7 Software-Tools

Im Folgenden werden die für die Kraftfahrzeugentwicklung wichtigsten Software-Tools, 3DCS und VisVSA, in Anlehnung an [Sto-10, S. 68 f.] kurz vorgestellt. Die Software 3DCS von Dimensional Control Systems (DCS) ist als Workbench in CATIA V5 integrierbar, sodass direkt auf die dort geladene Geometrie zugegriffen werden kann. Es ist möglich, die Simulation auf aus der Geometrie abstrahierten Punkten (als Schnittstellen) aufzubauen oder sich direkt auf die Oberflächen zu beziehen. Die Aufbaureihenfolge kann im Programm nachgestellt und auch animiert werden. Die Modellierung von Abweichungsprofilen der Einzelteile und der Vorrichtungen erfolgt durch hinterlegte Verteilungsformen oder importierbare Messwerte. Zur Bewertung der

konzeptbedingten Maßhaltigkeit der Konstruktion stehen die Ermittlung der Schließmaße mittels der Monte Carlo-Simulation, eine Beitragsleistanalyse mit steuerbarer Visualisierungsmöglichkeit und eine Sensitivitätsanalyse zur Verfügung. Das separat vertriebene Modul „Compliant Modeler“ ermöglicht die Modellierung von elastischen Verformungen. Die in dieser Arbeit beschriebenen Simulationsversuche werden mit 3DCS durchgeführt.

Das Tool VisVSA als Bestandteil der Siemens PLM Software arbeitet ausschließlich featurebasiert, was die Parametrisierbarkeit des Simulationsmodells sicherstellt. Es können Vorrichtungstoleranzen und deren Verschleißverhalten abgebildet werden. Ähnlich der Methodik von 3DCS wird das Schließmaß mit Hilfe einer Monte Carlo-Analyse bestimmt und kann durch eine Prognose der Fehleranteile, einer Sensitivitätsanalyse sowie eine Beitragsleistanberechnung untersucht werden. Während des Durchlaufes des modellierten Zusammenbaus können statische sowie dynamische Kollisionsuntersuchungen durchgeführt werden. Auch mit VisVSA kann elastisches Komponentenverhalten auf Basis importierter charakteristischer FE-Knotenpunkte abgebildet werden.

2.8 Zusammenfassung und Bewertung

In den vorangegangenen Kapiteln wurden das Toleranzmanagement sowie die -simulation im Automobilbau dem realen Karosseriebauprozess gegenübergestellt. Obwohl es viele Ansätze für die detaillierte Abbildung von Aspekten des Karosseriebauprozesses gibt, kann der Prozess noch nicht ganzheitlich mit der notwendigen Schärfe abgebildet werden. Auch werden viele theoretisch verfügbare Ansätze in der industriellen Toleranzsimulation nicht aufgegriffen, oftmals mangels Umsetzbarkeit. Theoretische Forschung und industrielle Anwendung gehen wenig aufeinander ein. Die Gruppe um Prof. Söderberg ist eine der wenigen, die theoretische Ansätze anhand realer Praxisbeispiele

validiert [vgl. Dah-05, Lin-13, Lor-15, Wär-16a, Wär-16b]. Aktuell beschränkt sich die industrielle Toleranzsimulation auf zwei große Beitragsleister: die Einzelteilabweichungen und das Fügen im Karosseriebau in Form der Ausrichtung durch die Geo-Station.

Die Differenzierung des Abweichungsverhaltens von Pressteilen zwischen Streuung und Mittelwertabweichung kann in einer statistischen Simulation aus mathematischen Gründen nicht durchgeführt werden. Meist werden die Einzelteilabweichungen als normalverteilt streuend um den Mittelwert abgebildet, unter Umständen wird mit Hilfe der Trapezverteilung noch Verschleißverhalten simuliert. In der industriellen Simulation bleiben die geometrischen Gegebenheiten eines Einzelteils, die zu einem inhomogenen Streuungsbild führen, unberücksichtigt.

Hinsichtlich der Simulation des Karosseriebauprozesses ist zu klären, ob die Konzentration ausschließlich auf die Geo-Station das reale Verhalten mit einer hinreichenden Genauigkeit abbildet. Es ist möglich, dass auch andere Teilprozesse im umfassenden Karosseriebau einen Einfluss auf die Maßhaltigkeit haben. Hierzu sind keine Untersuchungen im Rahmen des industriellen Karosseriebaus bekannt. Die teilweise praktizierte Reduktion auf die Abbildung einer rein statisch bestimmten Ausrichtung ist mit einem Genauigkeitsverlust verknüpft. Die geringe Eigensteifigkeit einer Großzahl der Einzelteile bedingt eigentlich die Berücksichtigung elastischer Effekte. Hierfür gibt es schon geeignete Werkzeuge, die vermehrt Anwendung finden sollten. Nichtsdestotrotz sind die damit verbundenen deutlich höheren Anforderungen an die Rechenkapazität für die Praxis nach wie vor eine Hürde. Aber auch mit der Abbildung von elastischem Verhalten wird eventuell nicht das gesamte Verformungsverhalten im Karosseriebauprozess nachgestellt. Bei der erzwungenen Ausrichtung der Komponenten ist zu prüfen, ob die durch die Geo-Station erwirkte Gestaltänderung möglicherweise aufgrund plastischer Verformung erhalten bleibt.

3 **Ansatz der Arbeit**

In diesem Abschnitt werden aus den Defiziten des aktuellen Standes der Technik der industriellen Toleranzsimulation Anforderungen zur Verbesserung dieser abgeleitet. Ferner werden der Zielprozess und die Methodiken beschrieben, wie im Rahmen der vorliegenden Arbeit auf die Anforderungen eingegangen wird.

3.1 **Abgeleitete Anforderungen**

Da auch die Karosserie von modernen Großserienfahrzeugen hauptsächlich aus Pressteilen besteht, ist es wie schon ausgeführt berechtigt, die Abweichungsbetrachtungen von Einzelteilen hauptsächlich auf dieses Fertigungsverfahren zu beziehen. Somit werden im Rahmen dieser Arbeit keine weiteren Anforderungen an den Modellierungsumfang von Einzelteilen formuliert. Hinsichtlich der Modellierungsgüte sind jedoch folgende Aspekte zu untersuchen:

- eine topologieabhängige Modellierung der Streuung,
- vorab verfügbare Indikatoren für Pressteilstreuungen und
- eine allgemeine Rückführung von vorhandenem Wissen über das Abweichungsverhalten von Pressteilen.

Bezug nehmend auf den Karosseriebauprozess ist der jetzt schon simulierte Fügeprozess durch Geo-Stationen exakter abzubilden. Hierbei sind folgende Aspekte zu untersuchen:

- der korrigierende Einfluss der Geo-Station,
- die Abbildungsmöglichkeiten für die reale Spanntechnik, die über eine statisch bestimmte Ausrichtung hinaus geht, und
- die sich einstellende Verformung bei überbestimmter Ausrichtung.

Überdies ist der gesamte Karosseriebauprozess zu untersuchen, um gegebenenfalls weitere Einflussfaktoren zu identifizieren. Dazu müssen folgende Betrachtungen durchgeführt werden:

- Eine Katalogisierung aller repräsentativ auftretender (Teil-)Prozesse im Karosseriebau,
- die Klassifizierung der ermittelten Prozessgruppen hinsichtlich ihrer Relevanz bezüglich Maßhaltigkeit und
- die Unterscheidung zwischen temporären und nachhaltigen Abweichungsquellen.

3.2 Ziele und Methodik der Arbeit

Unter Berücksichtigung der genannten Anforderungen wird ein Simulationskonzept entwickelt, welches sich näher am industriellen Prozess orientiert, siehe Abbildung 3.1. Hierzu werden mit Hilfe von Analysen realer Massenproduktionsprozesse Informationen generiert und neue Werkzeuge entwickelt, die die Abbildungsgüte bzw. -methodik der Toleranzsimulation verbessern. Aus mehreren Use-Cases werden Produktionsdaten in die Simulation rückgeführt, um Ansätze zu entwickeln und zu validieren.

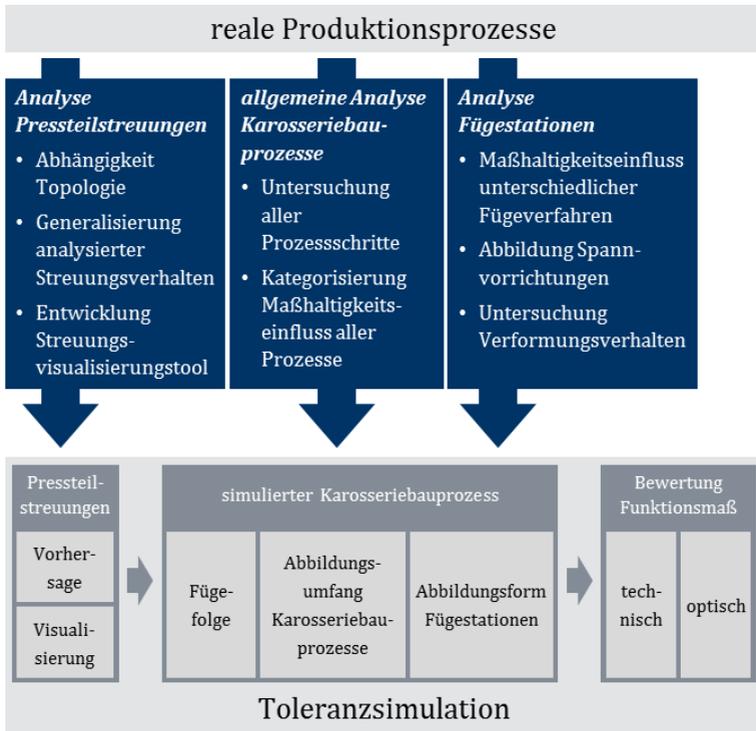


Abbildung 3.1: Zielprozess: Verbesserung der Toleranzsimulation durch Rückführung von Produktionserfahrung

Wie in Abbildung 3.1 gezeigt, erfolgt die Untersuchung separat für den Einzelteilherstellungsprozess, i.e. das Karosserieformen, und die Karosseriebauprozesse. Die Untersuchung der Pressteilstreuungen wird mit folgenden Ansätzen durchgeführt:

- Zur Untersuchung des Streuungsverhaltens und zur Validierung der Ergebnisse werden repräsentative Musterteile in großen Stückzahlen vermessen. Die Auswahl der Musterteile erfolgt anhand charakteristischer geometrischer Merkmale („feature based design“).

- Beim Karosserieformen hat die entstehende Geometrie einen Einfluss auf die Fertigungsstreuungen. Wird bei Pressteilen oder Bereichen von Pressteile ein hoher Umformgrad erreicht, so wird hier aufgrund der stark räumlich ausgeprägten Geometrie auch ein großes Widerstandsmoment geschaffen. Somit wird die generierte Geometrie besser konserviert und die Streuungen sind geringer. An verschiedenen Musterteilen wird die Nachgiebigkeit als Reziprok der Steifigkeit mit der Streuung verglichen. Es wird eine mathematische Verbindung zwischen den zwei Größen hergestellt.
- Die bei den verschiedenen Musterteilen ermittelten mathematischen Zusammenhänge werden zusammengeführt und generalisiert. Dadurch wird für jedes karosseriegeformte Einzelteil eine Streuungsvorhersage ermöglicht.
- Der Schlüssel zur besseren Analyse des Streuungsverhaltens ist die anschauliche Darstellung der auftretenden Streuung. Aktuell existiert keine Methodik, die die Darstellung statistischen Verhaltens an der entsprechenden Geometrie benutzerfreundlich gestattet. Die Verbindung der beispielsweise aus der Eigensteifigkeitsuntersuchung bekannten dynamischen Deformationsdarstellung mit statistischem Abweichungsverhalten ermöglicht eine visuelle Analyse von Streuungsphänomenen.

Die Analyse der Abweichungseinflüsse im Karosseriebau teilt sich auf in die ganzheitliche Untersuchung des durchgängigen Herstellungsprozesses und in die detaillierte Untersuchung einzelner Aspekte des Fügeprozesses, der anerkanntermaßen den größten Einfluss auf die resultierende Maßhaltigkeit hat. Es werden die folgenden Ansätze entwickelt:

- Fast alle aktuellen Simulationsansätze berücksichtigen axiomatisch nur die Einzelteil- und Fügeprozessabweichungen. Eine ganzheitliche Analyse des Karosseriebauprozesses klärt, ob diese Vereinfachung gerechtfertigt ist.

- Dazu werden alle im Karosseriebau auftretenden Teilprozesse katalogisiert. Verwandte Prozesse werden zu Prozessgruppen zusammengefasst.
- Auf analytischer Basis wird ein Entscheidungsbaum entwickelt, der den Einfluss der Prozessgruppen auf die resultierende Maßhaltigkeit bewertet. Dabei werden die Prozessgruppen auf grundlegende Aspekte, die geometrischen Einfluss bewirken, geprüft.
- Die mit Hilfe des Entscheidungsbaumes vorgenommene Vorklassifizierung wird anhand von Experimenten validiert, die mittels statistischer Versuchsplanung entwickelt werden.

- Da die verschiedenen Fügeverfahren differierende Spanntechnik bedingen, variiert die Aufnahme der Fügepartner während des Fügeprozesses. Der prozessuale Einfluss der verschiedenen Fügeverfahren auf die resultierende Maßhaltigkeit wird systematisch anhand einer Vielzahl von Use-Cases untersucht.
- In bestimmten Situationen erzwingt die Geo-Station durch Verspannung der Fügepartner die maßliche Beschaffenheit des entstehenden ZB. Die dabei auftretende Materialbelastung wird untersucht um die Grundlage für eine dem gerecht werdende Abbildungsform zu schaffen.

Im Anschluss werden die Erkenntnisse bewertet und ggf. Ansätze zur Implementierung der entwickelten Methoden in die Toleranzsimulation aufgezeigt:

- Der Simulationsumfang des Standes der Technik wird unter Berücksichtigung der gewonnen Erkenntnisse neu bewertet.
- Die Anwendung der Untersuchungsmöglichkeiten von Presseteilstreuungen wird erläutert.

- Eine Simulationsmethodik, die auf den gewonnen Erkenntnissen zu Fügeprozessen basiert, wird entwickelt und anhand mehrerer Use-Cases validiert. Die Methodik basiert auf der Toleranzsimulation starrer Körper, ermöglicht aber durch die taktische Auswahl und das Zusammenfassen von Bezugsstellen eine überbestimmte Einspannung der Fügepartner.

Ziel von den Untersuchungen und daraus abgeleiteten Maßnahmen ist es, eine realitätskonformere Toleranzsimulation zu ermöglichen. Durch das Eingehen auf die produktionstechnischen Gegebenheiten wird die Simulationsgüte gesteigert, ohne dabei die Komplexität der Simulation zu erhöhen und damit die Praxistauglichkeit herab zu setzen.

4 Untersuchung des Abweichungsverhaltens von Pressteilen

Dieses Kapitel ist der Analyse von im Karosseriebau auftretenden Pressteilstreuungen an Musterteilen gewidmet, die im ersten Abschnitt des Kapitels vorgestellt werden. Darauf wird eine Methode gezeigt, die die Vorhersage von Pressteilstreuungen erleichtert. Um weitere Analysen zum Streuungsverhalten von Einzelteilen durchführen zu können, wird ein Visualisierungstool für Abweichungen entwickelt, welches sowohl die Verknüpfung zur betrachteten Geometrie als auch statistische Effekte optisch veranschaulichen kann.

Die Inhalte der Kapitel 4.1 und 4.2 wurden mit der Unterstützung des Masteranden Markus Stopp generiert, siehe dazu auch seine Abschlussarbeit [Sto-12]. Hinsichtlich Kapitel 4.3 sei auf die Bachelorarbeit von Meike Rehder verwiesen [Reh-13].

4.1 Generierung der Datengrundlage

Um statistische Analysen an repräsentativen Praxisteilen durchführen zu können, muss eine Messdatenbasis geschaffen werden. Fünf Pressteile werden in großer Stückzahl vermessen; ein Pressteil aus normalfestem Stahl, drei Pressteile aus modern hochfesten Stählen sowie ein Pressteil aus einer Aluminiumlegierung. Bevor die Pressteile selbst und das jeweilige Messverfahren vorgestellt werden, wird kurz auf das Auswahlverfahren für die Musterteile eingegangen.

4.1.1 Auswahlkriterien Musterteile

Wie in Kapitel 2.1.3 erläutert, ist eine große Stichprobe nötig, um eine verlässliche Aussage über das Streuungsverhalten treffen zu können. Des Weiteren soll eine gute Messbarkeit der ausgewählten Musterteile gegeben sein, welches durch die Topologie der Teile bestimmt wird. Für taktile Messungen müssen alle zu messenden Bereiche für den Messtaster gut zugänglich sein. Zuletzt spielt auch die Größe der Teile für die Messbarkeit eine Rolle. Sehr große Teile sind schwieriger zu handhaben und beschränken die Auswahl der Messmaschinen. Zu kleine Teile hingegen weisen in der Regel einfache Geometrien auf und werden oft nur durch Biegeprozesse hergestellt. Kleinteile sind außerdem oft Schüttgut, sodass der Herstellungsprozess alleine schwierig untersucht werden kann.

Um die Messergebnisse möglichst unabhängig von der Einspannsituation zu halten, sind eigensteife Pressteile auszuwählen. Weiche Pressteile müssen zur reproduzierbaren Messung mit zusätzlichen Spannelementen überbestimmt ausgerichtet werden, was den Einfluss des Bezugssystems stärkt. Somit werden nur Strukturteile als Muster ausgewählt, die eine angemessene Eigensteifigkeit besitzen. Da es sehr wenige Pressteile gibt, die mit sechs Bezugsstellen auskommen, dürfen die Musterteile maximal sieben Bezugsstellen aufweisen. Um alle variierenden Umwelteinflüsse zu eliminieren, wird die komplette zu vermessende Stichprobe aus einer Charge entnommen und bei der Auswahl der Musterteile vorab geprüft, ob der Herstellungsprozess stabil läuft und der Mittelwert über längere Zeit konstant ist.

Da die ausgewählten Musterteile möglichst repräsentativ und die Ergebnisse der Untersuchung generalisierbar sein müssen, sollten die Pressteile möglichst viele oft auftretende geometrische Standardmerkmale aufweisen. Diese Standardmerkmale sind mit den in der Literatur beschriebenen geometrischen „Form Features“ vergleichbar [vgl. Ovt-92]. Die hier betrachteten Merkmale sind jedoch ausschließlich

flächenbezogen, da es sich bei Pressteilen immer um dünnwandige Körper handelt.

Abbildung 4.1 zeigt die gewünschten geometrischen Merkmale und die Gewichtung, mit der die Relevanz der Merkmale für die Musterteil-auswahl bewertet wird. In der ersten Spalte finden sich alle Merkmale, die eine Materialbegrenzung darstellen. Aufgrund des meistens ange-wendeten Loch-Langloch-Prinzips weisen alle in die engere Auswahl kommenden Musterteile diese beiden Merkmale auf. Eine Ausstellung, auch Kragenloch genannt, wird in ein Pressteil eingebracht, wenn ein Loch besonders stabil ausgeführt werden muss. Dieses Merkmal findet bei Karosseriepresse-teilen eher selten Anwendung. Jedes Pressteil hat einen Beschnitttrand, jedoch spielt auch die Komplexität des Beschnit-tes eine Rolle. Bevorzugt werden Musterteile ausgewählt, die ver-schiedene Beschnitttrichtungen aufweisen. In der mittleren und rech-ten Spalte in Abbildung 4.1 finden sich formbildende geometrische Merkmale. Bei den meisten Pressteilen erzeugt die klassische Tiefzieh-stufe maßgeblich die Eigensteifigkeit, besonders wenn die Stufe nicht geradlinig verläuft. Verprägungen werden nicht nur aufgrund funktio-neller Anforderungen eingebracht. In bestimmten Fällen werden sie als sogenannte Verbraucher genutzt, wenn aus umformtechnischen Gründen lokal ein höherer Verformungsgrad erreicht werden muss. Eine Absetzung ist eine nicht rundum geschlossene Verprägung. Sie hat daher einen anderen Effekt auf die Pressteilsteifigkeit als eine Verprägung. Bei einer Abkantung findet im Gegensatz zu den bisher vorgestellten formgebenden Merkmalen kein Materialfluss statt. Da die Abkantung aufgrund des geringen Formänderungsgrades nur eine geringe eigenstabilisierende Wirkung hat, müssen hier Rücksprungef-fekte besonders beachtet werden. Der Hammerschlag ist eine Verprä-gung quer zu einer Kante und stabilisiert diese.

Es sei hervorgehoben, dass die Analyse der geometrischen Merkmale allein der Auswahl repräsentativer Musterteile dient. Eine Streuungs-untersuchung basierend auf der Ebene der geometrischen Merkmale ist nicht möglich, da hierzu immer das komplette Teil betrachtet

werden muss. Die potenziellen Musterteile werden hinsichtlich aller genannten Kriterien bewertet, um die zu vermessenden Pressteile zu definieren. Beim Kriterium geometrische Merkmale wird nicht nur das Vorhandensein der Merkmale, sondern auch deren Ausprägung und deren Relevanz bzw. Gewichtung berücksichtigt.

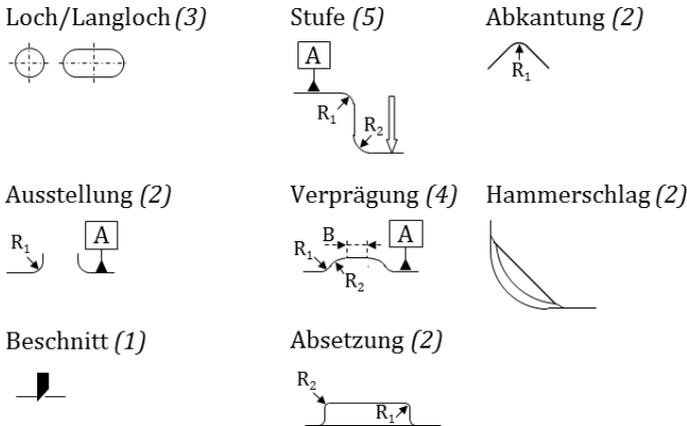


Abbildung 4.1: Gewünschte geometrische Merkmale und deren Gewichtung zur Musterteilerauswahl in Klammern

4.1.2 Vorstellung Musterteile

Mit Hilfe der genannten Kriterien werden die fünf im Folgenden vorgestellten Musterteile ausgewählt.

4.1.2.1 Musterteil Radeinbau aus normalfestem Stahl

Das Musterteil Radeinbau wird aus dem normal festen Stahl DC 04 mit einer Wandstärke von 1 mm abgepresst. Die Teile werden gestapelt in einer Gitterbox transportiert. In Abbildung 4.2 sind die im Musterteil Radeinbau enthaltenen geometrischen Merkmale markiert. Pfeile 1 und 2 deuten auf das Loch und das Langloch. 3 zeigt einen nicht geradlinigen Beschnitt, der an dieser Stelle eindimensional ist, über das

gesamte Pressteil jedoch Ebenen- und Richtungssprünge vollzieht. Pfeil 4 weist auf eine Stufe, 5 auf eine Verprägung und 6 auf eine Absetzung im Flansch. Pfeil 7 markiert den aus der Abbildungsebene herausragenden Flansch, der durch eine Abkantung erzeugt wird. Pfeil 8 zeigt auf einen der zwei Hammerschläge im Musterteil, die sehr groß ausgeführt sind. Hinsichtlich der geometrischen Merkmale ist das Pressteil sehr gut als Musterteil geeignet, einzig das Merkmal Ausstellung ist nicht vorhanden.

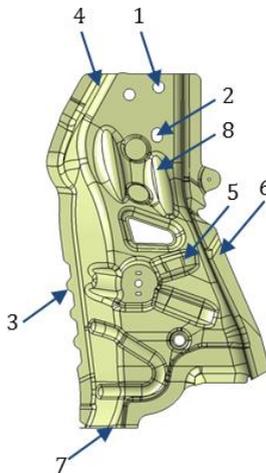


Abbildung 4.2: Geometrische Merkmale des Musterteils Radeinbau

Vom Radeinbau werden 200 Teile mit der robotergeführten optischen Messmaschine GOM Atos III vermessen, ohne dass reflektionsminderndes Einsprühen notwendig ist. Die statistisch ausgewerteten Messpunkte und die Bezugsstellen sind in Abbildung 4.3 markiert. Um das Rücksprungverhalten der Flansche an den beiden Stufen besser herausmessen zu können, werden die Bezugsstellen Y1, Y2 und Y3 bei bestimmten Auswertungen verlegt, Y7 wird gestrichen (blau dargestellt).

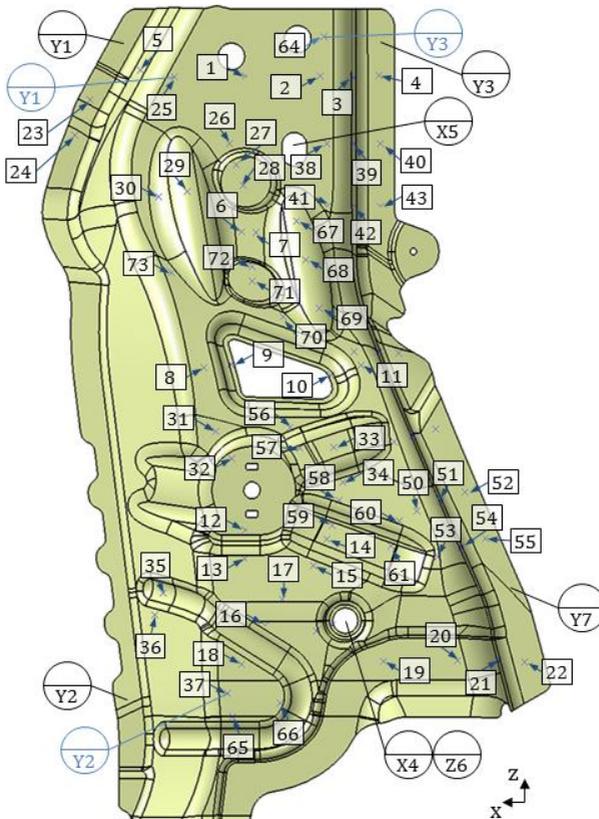


Abbildung 4.3: Messpunkte und Bezugsstellen am Musterteil Radeinbau

Um einen Eindruck über die auftretende Streuung zu vermitteln, werden im Folgenden die Werte für 37 ausgewählte Messpunkte besprochen. Bei der Untersuchung auf Basis des ursprünglichen Bezugssystems ohne Y7 liegt die Streuung an diesen Messpunkten zwischen 0,13 und 0,69 mm für die sechsfache Standardabweichung. Streicht man von den 200 Messungen vier Ausreißer-Messungen, so liegen 0,12 bis 0,52 mm vor. Ausreißer charakterisieren sich dadurch, dass ihre Werte deutlich von denen der restlichen Messreihen abweichen. Unplausible Ausreißer können z. B. durch Messfehler oder durch

beim Transport beschädigte Teile entstehen [vgl. Roo-14, S 151 f.]. Die Werte für die sechsfache Standardabweichung sind in Abbildung 4.4 dargestellt. Die Position der Säulendiagramme markiert hierbei die Lage der Messpunkte.

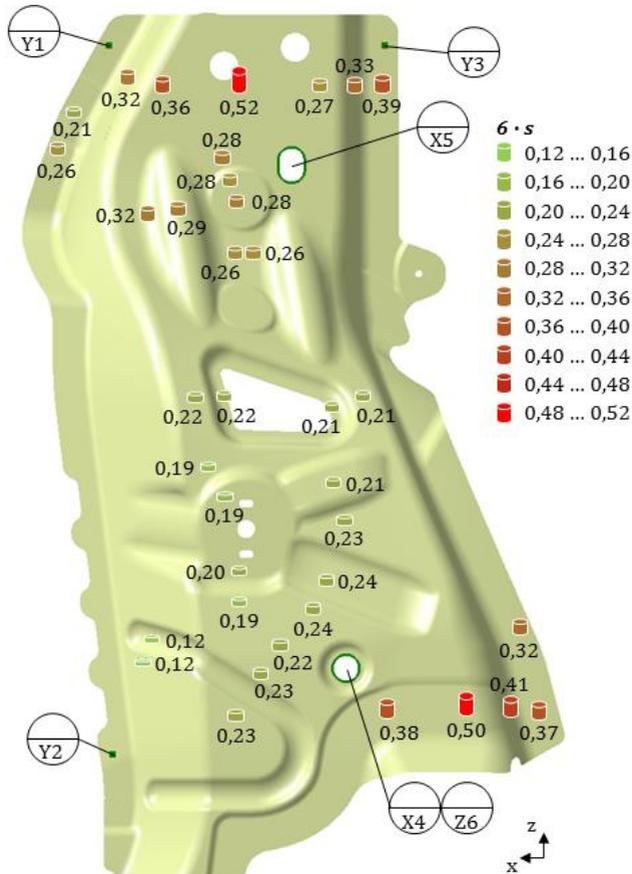


Abbildung 4.4: Streuungen des Musterteils Radeinbau dargestellt durch die sechsfache Standardabweichung

4.1.2.2 Musterteil A-Säule aus hochfestem Stahl

Das Musterteil A-Säule besteht aus einem Dualphasenstahl des Typs DPC 500Y780T mit einer Wandstärke von 1,5 mm. Der Transport erfolgt gestapelt in Gitterboxen. Die Bezugsstellen der Primärebene Y1, Y2 und Y3 werden auf die Hauptpressteileebene gelegt und Y7 entfällt, siehe Abbildung 4.5.

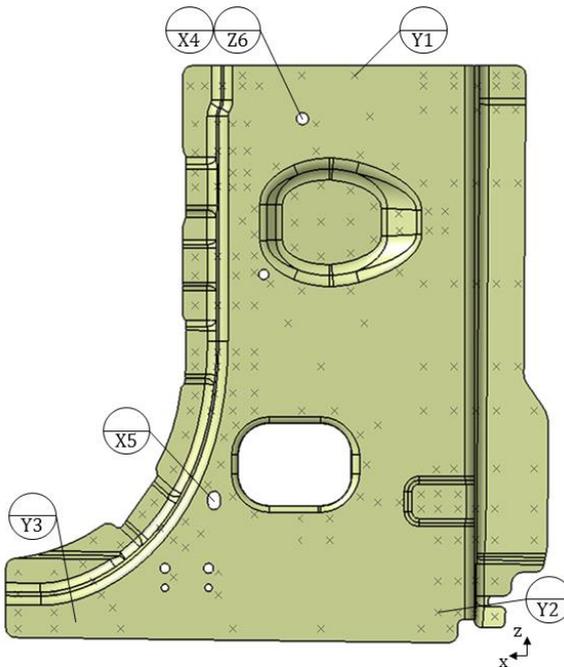


Abbildung 4.5: Das Musterteil A-Säule mit den modifizierten Bezugsstellen und den Messpunkten

Im Unterschied zum Musterteil Radeinbau liegen hier jedoch nur Messdaten im modifizierten Bezugssystem vor, da die Musterteile A-Säule taktil vermessen werden. Im Gegensatz zur optischen Messtechnik lässt sich bei der taktilen Messtechnik das Koordinatensystem nicht im Nachhinein manipulieren, siehe Kapitel 2.4.1. Die Kreuze in

der Abbildung stellen die gewählten Messpunkte dar. Dieses Musterteil weist nicht ganz so viele geometrische Merkmale auf wie das Musterteil Radeinbau. Dafür handelt es sich bei dem großen Loch neben der Bezugsstelle X5 um eine Ausstellung, ein im Musterteil Radeinbau nicht enthaltenes Feature. Vermessen wird das Teil mit der Portal-messmaschine Zeiss Eclipse, die über eine sehr hohe Messgenauigkeit verfügt. Über alle 220 gemessenen Teile ergibt sich als Kennzahl für die Streuung für alle 190 Messpunkte eine sechsfache Standardabweichung von 0,06 bis 1,84 mm. Der kleinere Minimalwert im Vergleich zum Musterteil Radeinbau ist nicht zwangsweise darauf zurückzuführen, dass es hier geometrisch stabilere Bereiche als beim Radeinbau gibt. Durch das genauere Messmittel ist bei der A-Säule das durch die Messgenauigkeit bedingte Grundrauschen geringer. Generell können die minimalen Streuungswerte der Musterteile nur eingeschränkt verglichen werden, da der minimale Abstand zu den Bezugsstellen stark differiert. Überdies ist beim Vergleich der genannten Streuungswerte zu beachten, dass bei der A-Säule der Kennwert für erheblich mehr Messpunkte genannt wird.

4.1.2.3 Musterteil B-Säule aus hochfestem Stahl

Das Musterteil B-Säule ist aus demselben Dualphasenstahl DPC 500Y780T wie die A-Säule. Die Wandstärke beträgt 1,15 mm. Der Transport erfolgt auch hier gestapelt in der Gitterbox. Abbildung 4.6 zeigt das Musterteil B-Säule mit den ursprünglichen Bezugsstellen, den modifizierten Bezugsstellen Y1, Y2 und Y3 in blau und den Messpunkten analog Abbildung 4.5. Bei der B-Säule wird zur besseren Beurteilbarkeit der Flanschlagen ebenso die primäre Bezugsebene auf die Hauptebene des Pressteils gelegt. Die Messdaten werden mit derselben optischen Messeinrichtung wie die vom Radeinbau aufgenommen, der GOM Atos III. Aufgrund der bei der Messung auftretenden Reflektionen werden alle Musterteile vor der Messung eingesprüht. Die um zwei Ausreißerteile bereinigten 198 Messungen der 205 Messpunkte weisen eine Streuung von 0,04 bis 0,76 mm für die sechsfache Standardabweichung auf.

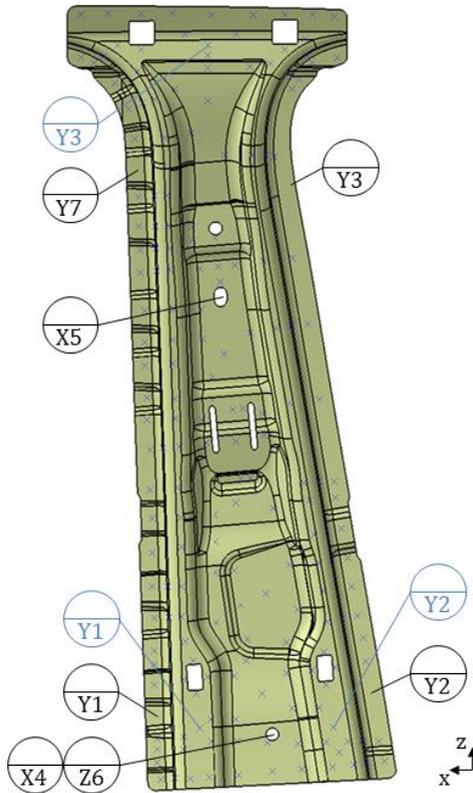


Abbildung 4.6: Das Musterteil B-Säule mit Bezugsstellen und Messpunkten

4.1.2.4 Musterteil Querträger aus hochfestem Stahl

Der Querträger unterm Fahrersitz wird aus Dualphasenstahl der Spezifikation HCT500X mit einer Wandstärke von 1,5 mm abgepresst. Transportiert werden auch diese Musterteile aufeinander gestapelt in der Gitterbox. Der maßgebliche Unterschied zu den bisher vorgestellten Musterteilen ist der komplett umlaufende, eigensteife Flansch. Abbildung 4.7 zeigt nach bekanntem Schema die Bezugsstellen und die Messpunkte vom Musterteil Querträger.

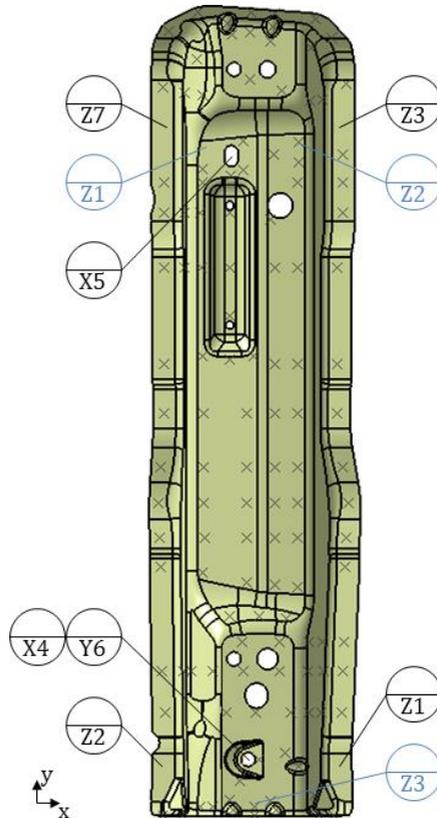


Abbildung 4.7: Das Musterteil Querträger mit Bezugsstellen und Messpunkten

Da dieses Musterteil mit einer GOM Atos IIe optisch vermessen wird, kann das Bezugssystem im Nachhinein modifiziert werden. Die Messungen werden mit dem originalen Bezugssystem, ohne Z7, sowie mit der modifizierten, blau dargestellten Hauptbezugsebene ausgewertet. Die Auswertung der um fünf Messausreißer bereinigten, 195 Messdaten an 131 Messpunkten mit den modifizierten Z1, Z2 und Z3 ergibt eine sechsfache Standardabweichung von 0,04 bis 1,72 mm für die GOM-Messung.

Da die folgende Verarbeitung der Messergebnisse diese unplausibel erscheinen lässt, werden 50 Musterteile der schon optisch vermessenen Teile noch einmal mit einem reduzierten Messpunkteprogramm auf der taktilen Portalmessmaschine vermessen. Die taktile Messung ermittelt deutlich geringere Streuungen, 0,02 bis 0,41 mm. Die GOM Atos IIe, eine handgeführte kompakte Messmaschine, weist folglich für die hier durchgeführte Streuungsbewertung nicht die geforderte Messgenauigkeit auf.

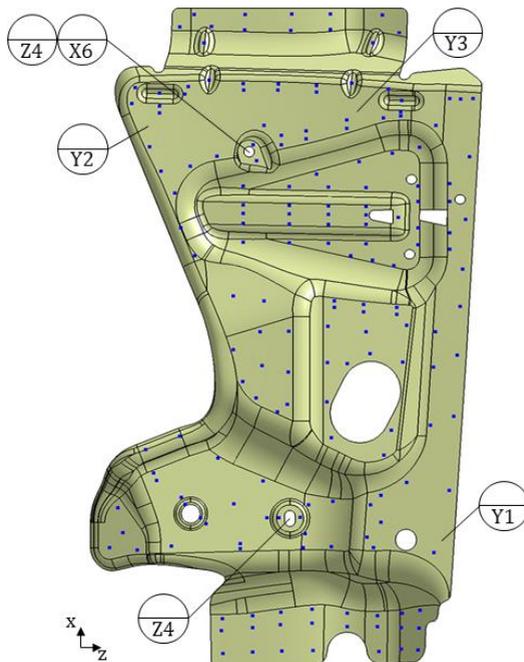


Abbildung 4.8: Das Musterteil Spiegelkonsole mit Bezugsstellen und Messpunkten

4.1.2.5 Musterteil Spiegelkonsole aus Aluminium

Um die gängigsten Karosseriewerkstoffe abzudecken, wird abschließend noch ein Pressteil aus Aluminium vermessen. Die Konsole Spiegel

li besteht aus einer 6000er Aluminium-Magnesium-Legierung mit der Wandstärke 1,5 mm. Auch bei diesem Musterteil erfolgt der Transport gestapelt in der Gitterbox. In Abbildung 4.8 ist die Spiegelkonsole mit den Bezugsstellen dargestellt. Da die primären Bezugsstellen schon auf der Pressteilhauptebene liegen, wird keine Modifikation des Bezugssystems vorgenommen. Die blauen Punkte in der Abbildung markieren die Messpunkte. Das Teil wird mit der Portalmessmaschine vermessen. Nach der Bereinigung von acht Ausreißermessungen werden 191 Messwerte an 183 Messpunkten analysiert. Als Streuung ergeben sich Werte zwischen 0,07 und 1,85 mm für die sechsfache Standardabweichung.

4.1.3 Zusammenfassung der Eigenschaften der Musterteile

Tabelle 4.1 fasst die wichtigsten Eigenschaften zur Analyse der Musterteile zusammen.

Tabelle 4.1: Eigenschaften der Musterteile

Musterteil	Material	Wandstärke [mm]	Messtechnik	$6\cdot\sigma$ min [mm]	$6\cdot\sigma$ max [mm]
Radeinbau	<i>DC 04</i>	1	GOM Atos III	0,12	0,52
A-Säule	<i>DPC 500Y780T</i>	1,5	Zeiss Eclipse	0,06	1,84
B-Säule	<i>DPC 500Y780T</i>	1,15	GOM Atos III	0,04	0,76
Querträger	<i>HCT500X</i>	1,5	GOM Atos IIe / Zeiss Eclipse	0,02*	0,41*
Spiegelkonsole	AL 6000	1,5	Zeiss Eclipse	0,07	1,85

*taktile Messung von nur 50 Teilen

4.2 Methodik zur Streuungsvorhersage

Zur Bestimmung von Indikatoren für auftretende geometrische Streuungen wird der Ansatz von Bohn aufgegriffen [Boh-98, S. 62 ff.]. Hierbei wird die lokale Steifigkeit als Indikator verwendet. In Pressteilbereichen, wo aus der Platine eine besonders steife Geometrie geformt wird, wird diese Geometrie durch die hohe Eigensteifigkeit auch am besten stabilisiert. Im Sinne des Tief- und Streckziehverfahrens wird eine hohe lokale Steifigkeit durch einen hohen Umformungsgrad in diesem Bereich erzielt. Durch große Verformungen wird aus der ebenen Platine eine dreidimensionale Geometrie geschaffen, die viel Widerstandsmoment bietet. Die sich daraus ergebende Stabilisierung bedingt, dass hier geringe Streuungen auftreten. Dieser Ansatz wird anhand der Messreihen aller fünf Musterteile validiert. Teile der Ergebnisse sind in [Kli-12b] und [Kli-13] veröffentlicht.

4.2.1 Abgleich von Steifigkeit und Streuungen bei den einzelnen Musterteilen

Am Musterteil Radeinbau wird die Korrelation zwischen lokaler Steifigkeit und Streuung an einer Auswahl von 41 der in Abbildung 4.3 dargestellten Messpunkte vorgenommen. Die Pressteilgeometrie wird durch ein FEM-Netz nachgebildet, welches im CATIA V5-FEM-Tool analog der dargestellten Bezugsstellen eingespannt wird. Dazu findet das modifizierte Bezugssystem Anwendung. Im nächsten Schritt wird nacheinander an jedem Messpunkt normal zur Fläche eine Einheitskraft aufgebracht, um vergleichbare Verschiebungswerte zu erhalten. Bei allen betrachteten Pressteilen beträgt die Einheitskraft 10 N, sodass sich die Verschiebung im elastischen Bereich bewegt. Die sich einstellende Verschiebung wird anschließend als charakteristischer Kehrwert der Steifigkeit mit der Streuung an demselben Messpunkt verglichen, siehe Abbildung 4.9. Um nur die lokale, durch die Einheitskraft indizierte Verschiebung zu betrachten und eventuell auftretende

globale Verschiebungsverhalten außer Acht zu lassen, wird nur der Verschiebungsvektor normal zur Pressteiloberfläche betrachtet, d.h. in Krafteinleitungsrichtung. Weil dieser Vorgang für jeden Messpunkt wiederholt werden muss, wird nur eine Auswahl von Messpunkten verwendet. In diesem Kapitel wird der Begriff Streuung mit der einfachen Standardabweichung belegt.

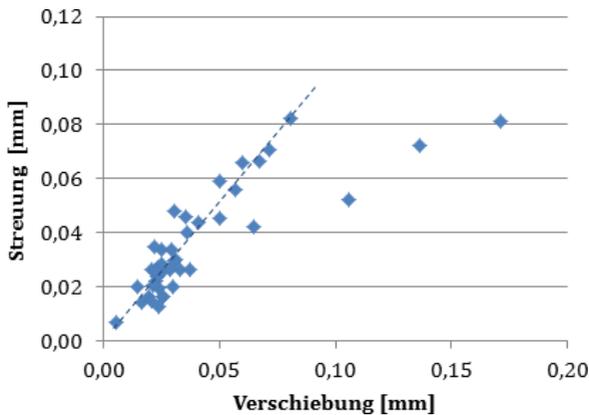


Abbildung 4.9: Abgleich von Streuung und Steifigkeit beim Radeinbau

Das Diagramm zeigt zwar, dass sich die meisten Messpunkte entlang einer Trendlinie befinden, sie sind jedoch recht breit verstreut und es gibt einige Ausreißer. Somit lässt sich alleine auf dieser Analyse basierend keine Beziehung zwischen der Streuung und der Verschiebung als Steifigkeitskennwert quantifizieren. Auch eine nichtlineare Gleichung höherer Ordnung kann hier keine Beziehung mit ausreichender Schärfe zwischen den Wertegruppen herstellen.

Mit derselben Methode werden im Folgenden auch bei allen anderen Musterteilen die Streuungen mit dem jeweils lokalen Steifigkeitskennwert Verschiebung verglichen. Bei der A-Säule werden 35 Messpunkte im Bereich des bogenförmig verlaufenden Flansches und der Hauptfläche auf Basis des modifizierten Bezugssystems betrachtet. Der

Bereich des in Abbildung 4.5 rechts dargestellten Flansches wird nicht weiter betrachtet, da der Ebenensprung hier nicht durch Streck- oder Tiefziehen sondern durch Abkantung des Bleches erreicht wird. Hier wird also eine große geometrische Änderung durch eine kleine Formänderungsrate erreicht. Somit greift der oben erläuterte Ansatz in diesem Pressteilbereich nicht, da die Formgebung (die Abkantung um die Z-Achse) nicht in direktem geometrischen Zusammenhang zur Steifigkeitssteigerung (die Erhöhung des Biegegewiderstandsmomentes um die X-Achse) steht und die Steifigkeitssteigerung nicht dem Rücksprungeffekt entgegenwirken kann. Den Abgleich an den betrachteten Messpunkten zeigt Abbildung 4.10. Im betrachteten Bereich zeigen die Messpunkte einen gut quantifizierbaren Zusammenhang zwischen Streuung und Verschiebung in Normalenrichtung. Die beiden Wertegruppen können mit einem Polynom zweiten Grades mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,92$ verknüpft werden, entsprechend der gestrichelten Kurve.

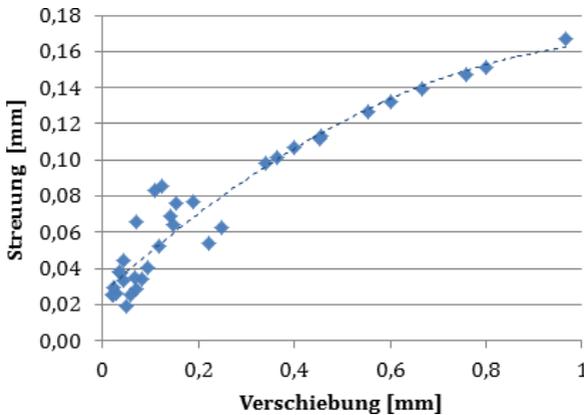


Abbildung 4.10: Abgleich von Streuung und Steifigkeit bei der A-Säule

Bei der GOM-vermessenen B-Säule wird der Abgleich an 50 auf dem gesamten Musterteil verteilten Messpunkten auf Basis des modifizierten Bezugssystems durchgeführt.

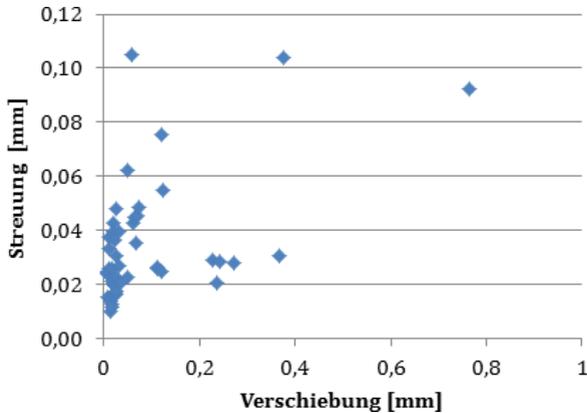


Abbildung 4.11: Abgleich von Streuung und Steifigkeit bei der B-Säule

Leider lässt sich hier keine direkte Quantifizierung des Zusammenhanges vornehmen, siehe Abbildung 4.11. Das Gros der Verschiebungswerte findet sich im Bereich unter 0,1 mm, während die zugehörigen Streuungswerte stark variieren und sich zwischen 0,01 und 0,05 mm bewegen. Die GOM-Messdaten des Musterteils Querträger lassen ebenso keine Beziehung zwischen Streuung und Steifigkeit erkennen, siehe Abbildung 4.12 oben. Zum zweiten Abgleich mit taktil erzeugten Messdaten werden 30 auf der Hauptfläche sowie auf den Flanschen des Querträgers positionierte Messpunkte auf Basis des modifizierten Bezugssystems analysiert. Die Korrelation zwischen der Streuung der jeweils 50 Messwerte und der Verschiebung zeigt Abbildung 4.12 unten, wobei der unterschiedliche Messpunkteumfang der beiden Diagramme zu beachten ist. Hier lässt sich nun der Zusammenhang durch ein Polynom zweiten Grades annähern. Diese Approximation ist zwar nicht so exakt wie beim Musterteil A-Säule, aber das Bestimmtheitsmaß $R^2 = 0,75$ ist ausreichend. Zu beachten ist hierbei, dass aufgrund der geringen Stichprobengröße von 50 das Konfidenzintervall bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % eine Größe von ca. 25 % aufweist, siehe Abbildung 2.6. Auch daher kann hier keine so genaue Korrelation erreicht werden wie bei der A-Säule.

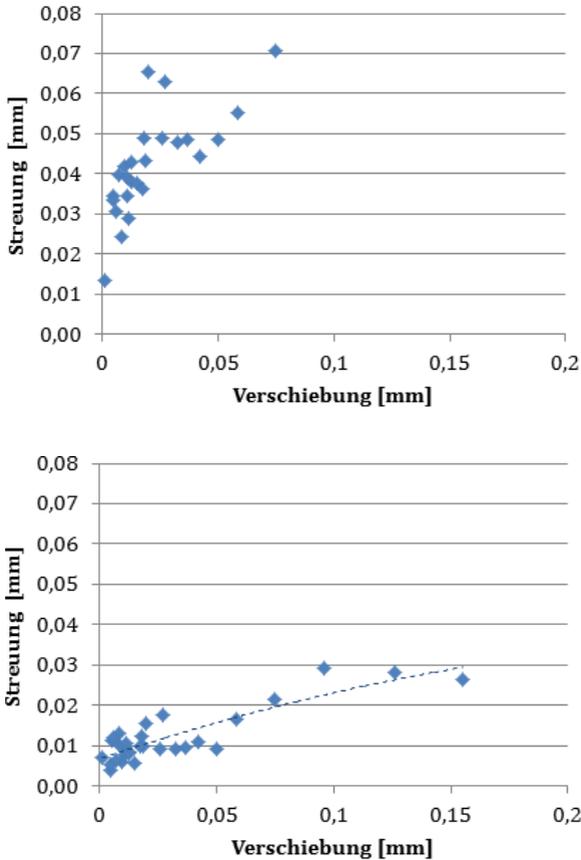


Abbildung 4.12: Abgleich von optisch (oben) und taktil (unten) gemessener Streuung und Steifigkeit beim Querträger

Die Korrelation zwischen der Streuung aus den taktil erhobenen Messdaten der Spiegelkonsole und den durch die FEM-Analyse ermittelten Verschiebungen bei Applikation der Einheitskraft ist in Abbildung 4.13 dargestellt. Der Zusammenhang ist durch ein Polynom zweiten Grades mit einem Bestimmtheitsmaß $R^2 = 0,95$ sehr klar quantifizierbar. Der Abgleich wird an 19 auf dem Musterteil verteilten Messpunkten durchgeführt.

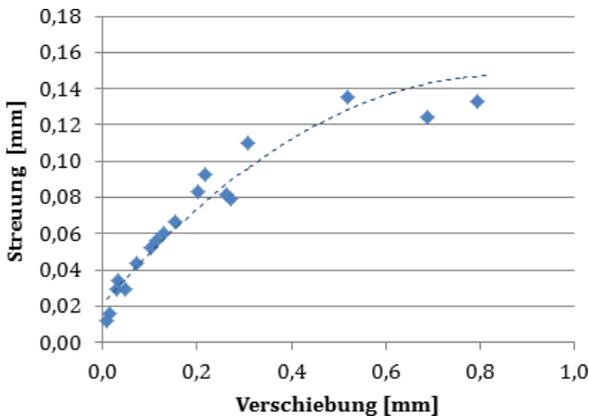


Abbildung 4.13: Abgleich von Streuung und Steifigkeit bei der Spiegelkonsole

4.2.2 Erreichbare Güte des Abgleichs

Sehr auffällig beim Abgleich zwischen Verschiebung und Streuung bei den einzelnen Musterteilen ist die starke Abhängigkeit vom Messverfahren. Während die Korrelation bei den beiden taktil vermessenen Musterteilen A-Säule und Spiegelkonsole sehr gut möglich ist, kann bei den GOM-vermessen Musterteilen keine oder nur eine ungenaue quantitative Beziehung zwischen den beiden Kenngrößen hergestellt werden. Der Unterschied zeigt sich besonders beim Musterteil Querträger, bei dem es eine GOM-basierte und eine taktile Messreihe gibt. Auf Basis der GOM-Messreihe kann kein Zusammenhang hergestellt werden. Die durch erneute, taktile Vermessung von 50 der 200 ursprünglichen Musterteile erzeugte zweite Messreihe lässt hingegen eine Korrelation zu. Dieser Umstand ist auf die höhere Messgenauigkeit der taktilen Portalmessmaschine im Vergleich mit der optischen Messtechnik zurückzuführen. Wie aus den Abbildungen in Kapitel 4.2.1 entnommen werden kann, hat die einfache Standardabweichung mitunter Werte kleiner 0,01 mm, da die Pressteilherstellung wie in Kapitel 2.3.1 erläutert sehr stabil läuft. Auch wenn die Standardabweichungen aus Messwerten abgeleitet werden, deren Beträge deutlich

größer sind, so schränkt es die Korrelationsqualität ein, dass die Minimalwerte der Standardabweichungen kleiner als die erreichte Messgenauigkeit aller anwendbaren Messmaschinen sind. Während die taktile Portalmessmaschine aufgrund ihrer Messgenauigkeit, die zumindest in der Regel noch deutlich unter der Größenordnung der Messwerte liegt, hier noch als Bewertungsinstrument fungieren kann, gilt das für den heutigen Standard der optischen Messtechnik nur bedingt. Besonders die handgeführte, kleine GOM Atos IIe weist keine ausreichende Messgenauigkeit auf. Zur Streuungsuntersuchung von Pressteilen ist die Prüfmittelauswahl aufgrund des stabilen Prozesses mit sehr geringen Streuungen somit sehr eingeschränkt. Zum messtechnisch bedingten Fehler addiert sich zudem der statistische Fehler. Wie in Kapitel 2.1.3 erläutert, wird dieser maßgeblich von der Stichprobengröße bestimmt und ist bei der Ermittlung der Standardabweichung besonders groß.

Als Beispiel sei der Fehler bei einer ermittelten Standardabweichung von 0,1 mm hergeleitet. Wie erwähnt, wird sich die Messgenauigkeit in der Realität aufgrund statistischer Effekte nicht direkt auf die ermittelte Standardabweichung durchschlagen. Aber angenommen, alle Messwerte weisen denselben Messfehler auf, so fände sich dieser Fehler direkt bei der Standardabweichung wieder. Sehr konservativ gerechnet kann also die Messgenauigkeit der taktilen Messmaschine von $\pm 0,01$ mm (s. Kapitel 2.4.1) direkt auf die Genauigkeit der ermittelten Standardabweichung übertragen werden. Wird der statistische Fehler von ca. 10 % im Sinne des Fehlerfortpflanzungsgesetzes [Dub-95, S. A93] mit dem messtechnischen Fehler verrechnet, so ergibt sich ein Fehler von $\pm 0,014$ mm bei einer ermittelten Standardabweichung von 0,1 mm.

Die Messgüte der GOM Atos III-Messmaschine wird nicht dem Datenblatt entnommen, sondern am Beispiel des Musterteils Radeinbaus untersucht. Dasselbe Teil wird dafür zehn Mal neu in die Vorrichtung eingelegt und vermessen. Die Spannweite der Wiederholungsmessungen bewegt sich bei den 73 Messpunkten zwischen 0,01 mm und

0,08 mm; im Mittel sind es 0,04 mm. Bei 25 der 73 Messpunkte liegen die Messwerte an einem Messpunkt mehr als 0,04 mm auseinander. Entsprechend der mehrmals auftretenden 0,08 mm wird die Messgenauigkeit auf $\pm 0,04$ mm eingestuft. Unter denselben Randbedingungen wie im obigen Beispiel ergibt sich ein Gesamtfehler von $\pm 0,041$ mm bei einer Standardabweichung von 0,1 mm. Der Fehler bei der GOM Atos III ist im Beispiel dreimal so groß wie der der taktilen Portalmessmaschine und größer als manche real auftretende Standardabweichung.

4.2.3 Verallgemeinerung der Erkenntnisse der durchgeführten Abgleiche

Zur Verallgemeinerung des bei den taktil vermessenen Musterteilen erfolgreich durchgeführten Abgleichs von Streuung und Verschiebung müssen die einzelnen Ergebnisse zusammengeführt werden. Zielsetzung ist, pro Werkstoffgruppe gültige generalisierte Erkenntnisse formulieren zu können. Beim Vergleich der einzelnen Korrelationen der Musterteile stellt sich jedoch heraus, dass die Differenzierung ausschließlich zwischen Stahl- und Aluminium-Preussteilen zur Formulierung nur zweier verschiedener quantitativer Zusammenhänge ausreichend ist.

Abbildung 4.14 zeigt die Zusammenführung der Streuungs- und Verschiebungswerte aller taktil vermessenen Preussteile aus Stahl, also der A-Säule und des Querträgers. Die ursprünglich insgesamt 84 abgeglichenen Messpunkte werden nochmals um nicht plausible 14 Ergebnisse beim mit geringer Stichprobe taktil vermessenen Querträger bereinigt. Vor allem im Bereich großer Streuungen lassen sich die Wertepaare recht genau durch ein Polynom zweiten Grades verbinden. Da sich die einfache Standardabweichung im unteren Wertebereich immer mehr der Messgenauigkeit annähert, wird die relative Genauigkeit immer schlechter. Dieses erklärt die schlechtere Korrelation bei kleinen Streuungen.

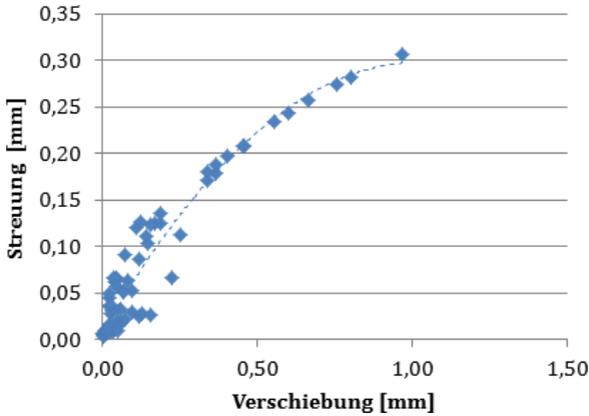
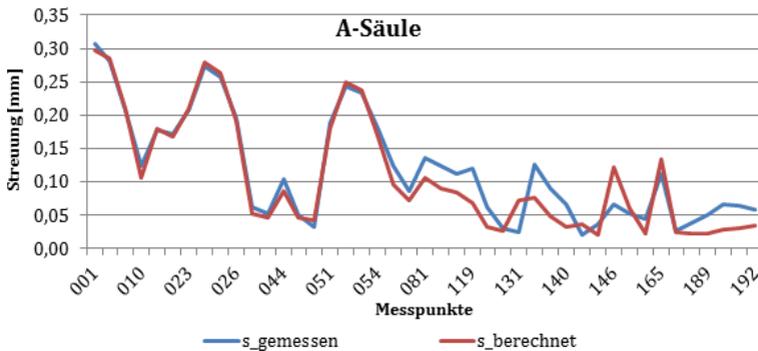


Abbildung 4.14: Abgleich von Streuung und Steifigkeit bei allen taktil vermessenen Musterteilen aus Stahl

Die Trendlinie aus Abbildung 4.14 lässt sich mit einem sehr guten Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,92$ und mit $s_{berechnet}$ für die berechnete Standardabweichung aus x_{FEM} für die berechnete Verschiebung als folgendes Polynom definieren:

$$s_{berechnet} = -0,28 x_{FEM}^2 + 0,57 x_{FEM} + 0,0096 \quad (4.1)$$



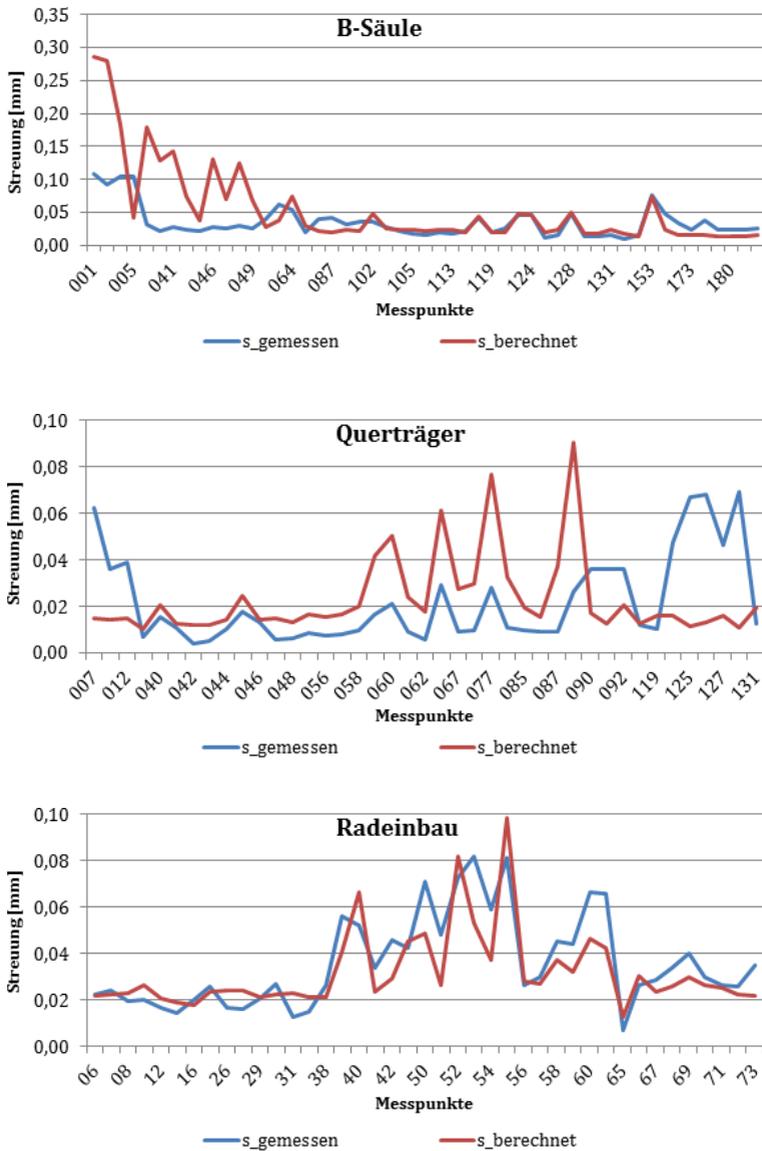


Abbildung 4.15: Gegenüberstellung der gemessenen und der berechneten Streuung der Stahl-Musterteile A-Säule, B-Säule, Querträger und Radeinbau

Dieses Polynom ist gültig bei einer applizierten Einheitskraft von 10 N, wie in Kapitel 4.2.1 erläutert. Wendet man dieses Polynom nun wieder auf alle steifigkeitsseitig berechneten Messpunkte aller Stahlmusterteile an, unabhängig vom Messverfahren, so lassen sich die in Abbildung 4.15 dargestellten Vergleiche bilden.

Die Graphen der A-Säule zeigen die sehr gute Korrelation zwischen den berechneten und den taktil gemessenen Streuungen. Bei nur ca. einem Viertel der Messpunkte liegt der Fehler bei der steifigkeitsbasierten Streuung oberhalb von 20 %. Hierbei ist nochmals hervorzuheben, dass der theoretische Ansatz dieser Methode nur bei tief- oder streckgezogenen Bereichen greift. Die Korrelation ist bei der GOM-vermessenen B-Säule sichtbar schlechter. Hier kann die Streuung des ersten Drittels der Messpunkte nicht über die lokale Steifigkeit prognostiziert werden. Bei den restlichen Messpunkten liefert die ermittelte Formel jedoch gute Ergebnisse, vor allem in Relation zur Messgenauigkeit.

Die Zusatzmessergebnisse des Querträgers lassen sich mit der steifigkeitsbasierten Berechnungsmethode nur qualitativ abschätzen. Die Vorhersagegenauigkeit ist unbrauchbar. Bei ca. zwei Drittel der Messpunkte stimmt jedoch zumindest der Verlauf der gemessenen und der berechneten Streuungskurven überein, d.h. zumindest im Vergleich können mit Hilfe der Formel Streuungen abgeschätzt werden. Bemerkenswerterweise funktioniert die Korrelation beim optisch vermessenen Radeinbau besser als beim Querträger, was auf die verlässlichere Streuungsbestimmung aufgrund der viermal größeren Stichprobe zurückführbar ist.

Zwar wird beim Radeinbau nicht dieselbe Berechnungsgüte wie bei der taktil vermessenen A-Säule erreicht, aber auch hier ist die Ungenauigkeit der steifigkeitsbasierten Berechnung nur in Einzelfällen größer als 20 %.

Die Graphen bestätigen noch einmal die bessere Prognosefähigkeit der steifigkeitsbasierten Streuungsvorhersage bei größeren Streuungen bzw. zumindest deren bessere Validierbarkeit. Wenn sich die Standardabweichung immer mehr der Messgenauigkeit annähert, ist der relative Fehler bei der Messung zu groß um die berechnete und die gemessene Streuung vergleichen zu können. Unter anderem deshalb funktioniert die Korrelation bei den Pressteilen A- und B-Säule, die generell eine größere Standardabweichung aufweisen, besser als bei Querträger und Radeinbau mit kleineren Standardabweichungen.

Der vom hohen Bestimmtheitsmaß $R^2 = 0,95$ geprägte Abgleich zwischen Streuung und Steifigkeit des Musterteils aus Aluminium ergibt folgendes Polynom, siehe Abbildung 4.13:

$$s_{berechnet} = -0,17 x_{FEM}^2 + 0,30 x_{FEM} + 0,021 \quad (4.2)$$

Für das Polynom gelten dieselben Randbedingungen wie für Formel (4.1). Wird Formel (4.2) auf alle steifigkeitsseitig betrachteten Messpunkte der Spiegelkonsole angewendet, so ergibt sich die in Abbildung 4.16 dargestellte Gegenüberstellung. Bei diesem Musterteil stimmen die gemessene und die aus der Steifigkeit berechnete Streuung sehr gut überein, obwohl sich die Standardabweichung auf einem niedrigen Niveau bewegt. Mit der Portalmeßmaschine wird in diesem Fall allerdings auch das Meßmittel mit der höchsten verfügbaren Meßgenauigkeit verwendet. Zudem wird hier nur ein Musterteil betrachtet. Vor der Implementierung dieser Methodik für Aluminiumpressteile in der Praxis sollten weitere Musterteile untersucht werden. Das Übertragen der Methodik auf das Musterteil aus Aluminium bestätigt zwar die prinzipielle Funktion der Methodik, zur praktischen Anwendung muss diese jedoch auf breitere Säulen gestellt werden.

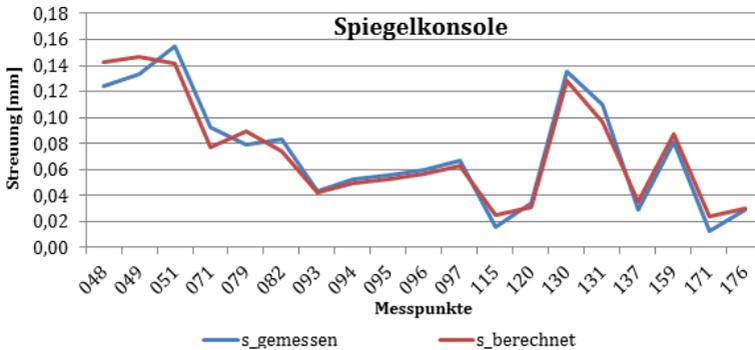


Abbildung 4.16: Gegenüberstellung der gemessenen und der berechneten Streuung vom Aluminium-Musterteil Spiegelkonsole

In diesem Kapitel wurde aufgezeigt, wie die Pressteilstreuung an vielen Bereichen auf Basis der lokal ermittelten Steifigkeit vorausgesagt werden kann. Besonders wenn die Validierung mit höchst präzisen Messmitteln erfolgt, kann ein Zusammenhang zwischen Steifigkeit und Streuung hergestellt werden. Dieses führt zu dem Schluss, dass eine nicht durchgängig mögliche Validierung bei einigen Musterteilen nicht zwangsweise eine Schwächung der aufgestellten Hypothese bedeutet, sondern auch der mitunter nicht ausreichenden Messgenauigkeit geschuldet sein kann. Zur Beurteilung der Korrelation sind sehr genaue Messwerte erforderlich, was bei den hier vorgestellten Musterteilen bzw. deren Messdaten nur teilweise der Fall ist. Beachtet werden muss, dass die hergeleiteten Polynome nur im dargestellten Bereich zwischen dem Nulldurchgang und ihren Wendepunkten bzw. Extrema Gültigkeit haben. Der genaue Gültigkeitsbereich ist bei Bedarf durch weitere Experimente zu ermitteln.

Selbstverständlich spielt bei der Korrelation auch die Analogie von messtechnischem Bezugssystem und Einspannungsbedingungen zur Steifigkeitsermittlung eine Rolle. Dadurch korrelieren die verglichenen charakteristischen Kennwerte allein aufgrund des gleichen Abstandes zum nächsten Bezugspunkt schon zu einem gewissen Grad miteinander. Das beeinträchtigt den praktischen Nutzen des Ansatzes jedoch

nicht, weil die Ausrichtelemente einer korrekt ausgelegten Geo-Station dem messtechnischen Bezugssystem entsprechen.

4.3 Methodik zur Visualisierung des Abweichungsverhaltens

Zur Analyse des Abweichungsverhaltens empfiehlt sich neben der Entwicklung von Prognosemodellen die Untersuchung der Fertigungsgenauigkeit von bestehenden Einzelteilen. Da Toleranzuntersuchungen stets eine statistische Komponente haben, müssen auch die Untersuchungen der Beitragsleister statistisch durchgeführt werden. Bei der Untersuchung von geometrischer Einzelteilqualität werden in der Regel einzelne Messwerte grafisch, beispielsweise anhand eines Falschfarbenbildes, siehe Abbildung 4.17, dargestellt. Messreihen, also mehrere Messwerte des gleichen Einzelteils, werden in tabellarischer oder Messgraphen-Form aufbereitet (siehe beispielhaft Abbildung 2.4). D. h., entweder wird nur eine Messung mit direkter grafischer Assoziation zur Komponente dargestellt, oder es werden mehrere, statistisch notwendige Messreihen, ggf. ergänzt um statistische Kennwerte, dargestellt; dann aber ohne grafischen Bauteilbezug. Um Verständnis über das statistische Abweichungsverhalten zu erlangen, ist die Verknüpfung von grafischer und statistischer Darstellung notwendig.

Im in Abbildung 4.18 gezeigten Beispiel wird diese Verknüpfung zwar hergestellt, indem die Messgraphen bestimmten Messpunkten im Einzelteilbild zugewiesen werden. Aber auch mit dieser Methode gelingt es nicht, das Abweichungsverhalten anschaulich zu illustrieren. Sich auf das komplette Einzelteil beziehende Abweichungsphänomene, wie z. B. das Auf- und Zuspringen eines Hutprofils, können nur schwer erkannt werden. Deshalb wird im Rahmen dieser Arbeit ein Visualisierungsansatz entwickelt, der durch Verformung von CAD-Daten das Abweichungsverhalten eines Einzelteils genau nachbildet.

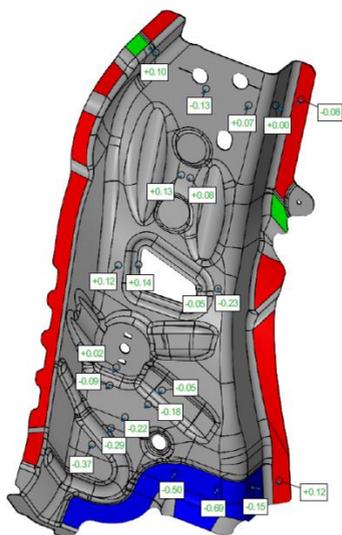


Abbildung 4.17: Darstellung einer einzelnen Messung im Falschfarbenbild

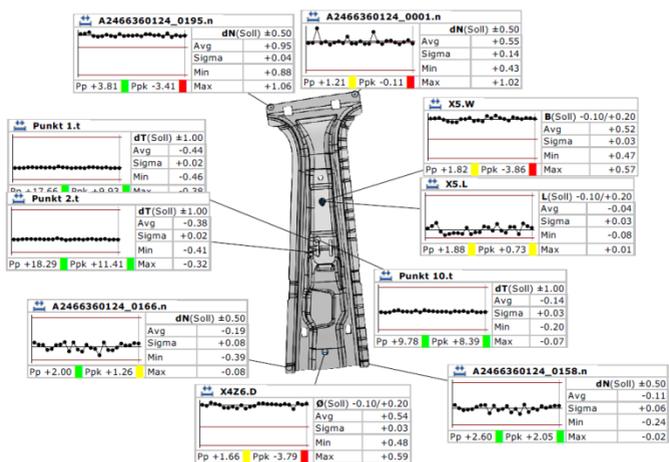


Abbildung 4.18: Kombination aus Einzelteilbild und Messgraphen

Dabei bestehen folgende Anforderungen an den Visualisierungsansatz:

- Alle Messungen, die von dem Einzelteil verfügbar sind, können als verformte CAD-Komponentengeometrie nacheinander dargestellt werden, sodass das statistische Verhalten dynamisch abgebildet wird. Beim entstehenden Video entspricht ein Frame einer Messung.
- Die Reihenfolge der Messwertedarstellung kann dabei durch Manipulation der Eingangsdaten angepasst werden.
- Die Messpunkte, auf deren Basis die verformte Geometrie erstellt wird, können ein- und ausgeblendet werden und bewegen sich mit der Ist-Geometrie.
- Die Ist-Geometrie kann beliebig überzeichnet werden, sodass auch Abweichungen im Zehntelmillimeterbereich sichtbar werden.
- Um die Abweichungen deutlicher interpretieren zu können, kann die unverformte Soll-Geometrie zusätzlich eingeblendet werden.
- Eine Farbskala soll die Abweichungsquantität von Ist-Geometrie und Messpunkten veranschaulichen.
- Die Anwendbarkeit muss auf jedes Teil, von dem CAD-Daten im VRML-Format und Messdaten im vorgegebenen CSV-Format verfügbar sind, gegeben sein.
- Die Darstellung muss, vor allem im Vergleich zu den vorhandenen Darstellungsmöglichkeiten, deutlich übersichtlicher und verständlicher sein.
- Die Visualisierung muss frei im Raum dreh- und verschiebbar sein.

Nach mehreren Anläufen mit MATLAB und 3DCS wurde schließlich durch das Karlsruher Institut für Informationsmanagement im Ingenieurwesen (IMI) ein entsprechendes Visualisierungstool auf PolyVR-Basis [Ovt-15, 116 ff.] umgesetzt. Das Tool berücksichtigt alle o.g. Anforderungen. Die Ist-Geometrie wird durch ein interpoliertes

Dreiecksnetz erzeugt, welches auf der Soll-Geometrie und den Messwerten an den entsprechenden Messpunkten aufbaut. Es handelt sich um eine approximierte Darstellung auf Basis punktueller Informationen. Die Darstellung wird somit umso genauer, je höher die Messpunktdichte ist.

Abbildung 4.19 zeigt die Anwendung des Tools am Use-Case Spiegelkonsole. In der Momentaufnahme des Videos wird das Rücksprungsverhalten des Pressteils deutlich. Der untere Flansch, die Lippe unten links und besonders der obere Flansch zeigen eine deutliche Abweichung in positiver Richtung, was mit unterschiedlichen Ausprägungen bei der kompletten Messreihe zu beobachten ist. Der mittlere Bereich des Pressteils verschwindet hinter der grau eingefärbten Soll-Geometrie-Darstellung, weist also Abweichungen in negative Richtung auf. Das Visualisierungstool illustriert dieses Verhalten sehr anschaulich. Im Beispiel ist die deckend rote Einfärbung auf eine Abweichung von 1,0 mm eingestellt.

Die dynamischen Phänomene können hier leider nicht dargestellt werden, sondern nur beim Betrachten der Bildfolge mit dem Tool. Der linke Teil des unteren Flansches und die Lippe unten links zeigen ein sehr synchrones Streuungsverhalten. Die Bereiche erscheinen wie verknüpft, sodass auch in einer Toleranzsimulation an dieser Stelle eine Verknüpfung sinnvoll ist. Der rechte Teil des unteren Flansches hingegen weicht mitunter gegenläufig zum linken Teil ab, obwohl die Flächen eigentlich enger verknüpft sind als die voran genannte Paarung. Beim oberen Flansch ist es ähnlich; auch hier bewegt sich die linke Hälfte nicht immer mit der rechten. Es zeigt sich ebenso, dass die Quantität des Aufsprunges beim oberen und unteren Flansch in keinem Zusammenhang steht. All diese Phänomene sind durch das Visualisierungstool leicht erfassbar und können in einer Toleranzsimulation berücksichtigt werden.

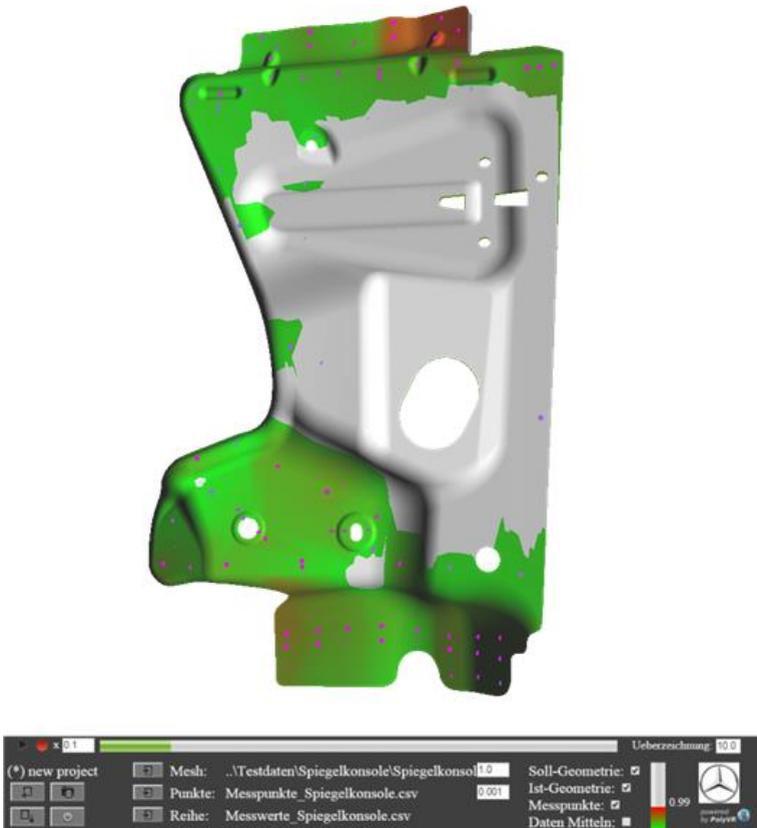


Abbildung 4.19: Untersuchung der Spiegelkonsole mit dem Visualisierungstool

Nach entsprechender Präparation der Eingangsdaten können auch ZB mit dem Visualisierungstool untersucht werden. Abbildung 4.20 zeigt eine Momentaufnahme der Visualisierung des Streuungsverhaltens des ZB Integralverstärkung, der aus Duzenden Einzelteilen besteht. Die B-Säule in der Bildmitte fällt am unteren Ende nach innen ein, während der obere Teil sowie der Dachholm zu weit in Richtung fahrzeugaußen stehen. Das Ende des Dachholms links oben im Bild sackt leicht nach unten, obwohl sich am Übergang vom grauen zum grünen Bereich eine Bezugsstelle befindet.

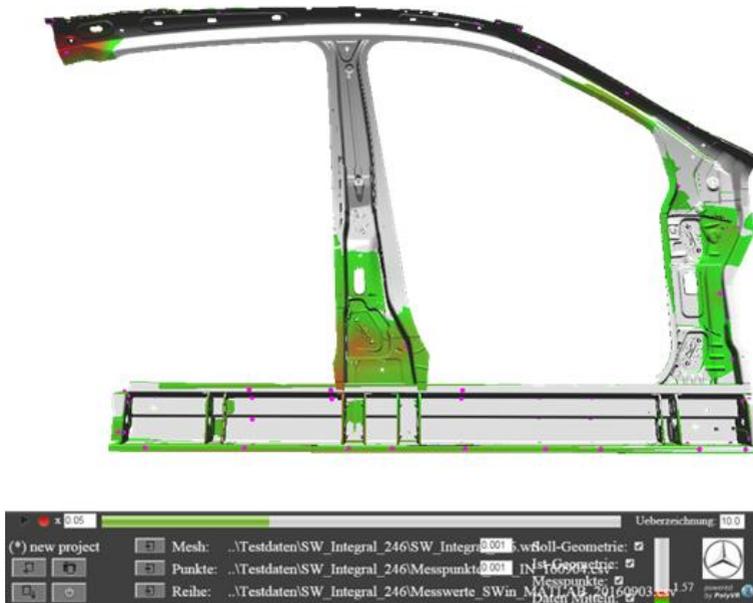


Abbildung 4.20: Untersuchung des ZB Integralverstärkung mit dem Visualisierungstool

Betrachtet man die Messdaten des unteren Längsträgers, einem Hutprofil, so fällt auf, dass die Y-Flansche, besonders der untere, zu weit innen stehen. Mit Hilfe des Visualisierungstools lässt sich dieses Verhalten sehr gut untersuchen: Am unteren Flansch ist das Hutprofil generell zu tief gezogen und dieser steht somit immer zu weit innen. Hinzu kommt, dass im Rahmen der ZB-Streuung das gesamte Hutprofil teilweise zu weit innen liegt. In Kapitel 5 wird näher auf das Abweichungsverhalten von ZB eingegangen.

4.4 Zusammenfassung

Aufgrund der dominanten Stellung werden repräsentativ für die Einzelteile im Karosseriebau Pressteile hinsichtlich ihres Streuungsverhaltens untersucht. Die durch das sogenannte Karosserieformen,

einer Mischform aus Tief- und Streckziehen, hergestellten Pressteile weisen in der Regel sehr stabile Fertigungsprozesse mit kleinen Streuungen auf. Die Mittelwertabweichung, hauptsächlich durch Rückfederungseffekte bedingt, kann deutlich größer ausfallen. Sie kann jedoch durch Vorhaltemaße kompensiert werden, deren Voraussage allerdings simulationstechnisch schwierig und nachträgliche Berücksichtigung durch Werkzeugänderungen sehr kostspielig ist.

Um die recht geringe Prozessstreuung in der digitalen Produktentstehungsphase abschätzen zu können, wird ein Ansatz weiterentwickelt, der dieses auf Basis der Geometrie des entsprechenden Pressteils ermöglicht. Mit Hilfe eines Polynoms kann eine mathematische Beziehung zwischen elastischen Verformungskennwerten als reziprokem Charakteristikum der lokalen Steifigkeit und der maßlichen Streuung an derselben Stelle hergestellt werden. Dieser Zusammenhang wird darauf zurückgeführt, dass in Bereichen, wo lokal eine höhere Steifigkeit beim Karosserieformen entsteht, dann auch eine geometrische Stabilisierung erreicht wird. Mit den zwei hergeleiteten Formeln kann die Prozessstreuung bei Pressteilen aus Stahl und aus Aluminium abgeschätzt werden.

Um das Abweichungsverhalten schon physisch vorhandener Pressteile zu untersuchen, wird im zweiten Schritt ein Visualisierungstool für Formabweichungen entwickelt. Das Tool wird mit einem CAD-Datensatz des zu analysierenden Umfangs und einer statistisch signifikanten Menge von Messdaten gespeist. Die Innovation dieser Methodik ist es, statistische Informationen zum Abweichungsverhalten direkt an der Bauteilgeometrie darzustellen. Somit können bestimmte Abweichungsphänomene besser visualisiert werden, von denen einige an verschiedenen Use-Cases erläutert werden. Umgesetzt wurde das Tool durch das Karlsruher Institut für Informationsmanagement im Ingenieurwesen (IMI) in einer Virtual Reality-Anwendung auf Basis des Prinzips der interpolierten Dreiecksnetze.

5 **Untersuchung des Abweichungsverhaltens von Zusammenbauten**

Im Gegensatz zur Streuungsuntersuchung von Pressteilen ist das Abweichungsverhalten beim kompletten Karosseriebauprozess bis dato noch wenig erforscht. Während ein Pressteil in abgeschlossener Folge durch mehrere Operationsstufen einer Pressenstraße hergestellt wird, sind die Karosseriebauprozesse ungleich facettenreicher. Es reihen sich viele, mitunter wiederholende, Prozessschritte aneinander, die ggf. räumlich getrennt ablaufen, [vgl. Mor-01]. Daher beginnt die in diesem Kapitel geschilderte Untersuchung mit der Darstellung des Prozessablaufes und der Katalogisierung der auftretenden Prozesse. Darauf folgend wird analysiert, welche der Prozesse Einfluss auf die Karosseriemaßhaltigkeit haben. Des Weiteren beinhaltet dieses Kapitel einen Vergleich des Maßhaltigkeitseinflusses der verschiedenen Fügeverfahren und eine Untersuchung des maßlichen Korrekturvorganges der Geo-Station.

Kapitel 5.1 und 5.4 wurden mit der Hilfe des Masteranden Carsten Wissing erarbeitet [Wis-13]. Zu Kapitel 5.2 hat die Masterarbeit von Mohammad Rostami Mehr beigetragen [Ros-14]. Die Betrachtung von Kapitel 5.3 wurde in Zusammenarbeit mit der Bachelorandin Sneschana Gillich [Gil-14a, Gil-14b] durchgeführt. Die Materialbeanspruchung beim Fügen in Kapitel 5.5 wurde mit Hilfe von Georg Movsisyan [Mov-14] untersucht.

5.1 Übersicht Karosseriebauprozesse

Um das Abweichungsverhalten bei den Karosseriebauprozessen zu untersuchen, müssen diese zuerst aufbereitet und übersichtlich dargestellt werden. Daher wird in diesem Kapitel anknüpfend an Kapitel 2.3.2 der Ablauf im Karosseriebau detailliert beschrieben. Diese Beschreibung gilt für den üblichen, hochautomatisierten Karosseriebauprozess mit großen Stückzahlen in Hochlohnländern. In Niedriglohnländern und bei geringen Stückzahlen ist der Automatisierungsgrad ggf. deutlich geringer. Trotz Literatur- und Videorecherche kann nicht ausgeschlossen werden, dass bei anderen Herstellern noch andere Prozesse zum Einsatz kommen. Alle bei der Prozessbeschreibung auftauchenden Prozesse werden zusammengetragen und anschließend Prozessgruppen zugeordnet.

Die Prozessbeschreibung bezieht sich gemäß des Stands der Technik auf die in der modernen Massenproduktion im Automobilbau übliche, in blechschalenbauweise aufgebaute Karosserie. Dabei kommen neben Pressteilen z. B. auch Abkanteile zum Einsatz. Die Beschreibung gilt größtenteils auch für Karosserien, bei deren Produktion andere metallische Einzelteile, wie beispielsweise Gussteile, zum Einsatz kommen.

5.1.1 Der Produktionsablauf im Karosseriebau

Die Prozessbausteine, die ab dem Einfließen jedes Einzelteils in den Karosseriebauprozess bis zur Fertigstellung der Karosserie Anwendung finden, werden im Folgenden anhand von Flussschaubildern aufgearbeitet. Die Flussschaubilder bestehen gemäß [ISO-85] aus Symbolen für den Start- bzw. Endzustand, den Übergabezustand an den Folgeprozess, die Prozesse an sich und Prozessgruppen, um Vorgänge im Interesse der Übersichtlichkeit zusammenzufassen, siehe Abbildung 5.1. Die erarbeiteten Prozessschaubilder sind die Grundlage für die Prozesskatalogisierung in Kapitel 5.1.2.

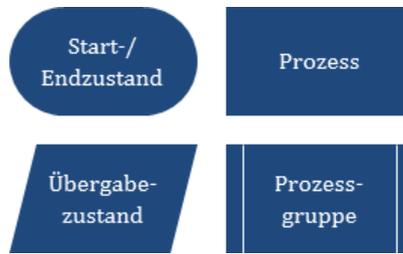


Abbildung 5.1: Legende zu den Prozessschaubildern [vgl. ISO-85]

Nach der Herstellung eines Einzelteils wird dieses zum Abtransport in einem Ladungsträger abgelegt. Je nach Gestalt kommen verschiedene Ladungsträger (LT) zum Einsatz. Unempfindliche Kleinteile werden als Schüttgut chaotisch aufbewahrt. Größere Teile werden, u.a. zur besseren Nutzung des Transport- und Lagervolumens, gestapelt in LT abgelegt. Ggf. werden hierbei Abstandshalter zwischen den Stapeln zur Entlastung der untenliegenden Komponenten verwendet. Geometrisch sensiblere Teile werden auch gestapelt abgelegt, jedoch findet sich hier im LT eine Vorrichtung, die eine kontrollierte Stapelung erzwingt, siehe Abbildung 5.2 links. Dieses macht den LT zu einem nicht mehr universell einsetzbaren Sonderladungsträger (SLT). Bei großen, dünnwandigen oder Außenhautteilen kommen vollumfängliche SLT zum Einsatz, die die Teile definiert fixieren, siehe Abbildung 5.2 rechts. Diese SLT sind komplett auf die zu transportierenden Teile zugeschnitten. Die LT werden dann entweder direkt dem Karosseriebauprozess zugeführt oder die Einzelteile werden vorab noch zu kleinen ZB weiterverarbeitet. Dieses kann z. B. durch das Anbringen von Schweißmuttern geschehen. Für diese Klein-ZB finden ebenso die oben erläuterten LT Anwendung. Abbildung 5.3 zeigt den Prozess des Verladens der Einzelteile bzw. der Klein-ZB, zusammenfassend Komponenten genannt, und den Transport bis in den Karosseriebau. Wie geschildert werden die Komponenten chaotisch oder gestapelt in LT verladen.



Abbildung 5.2: LT mit kontrollierter Stapelung und vollumfänglicher SLT
[vgl. Wis-13, S. 12]

Bei großen Teilen, wie beispielsweise der Bepunktung Seitenwand erfolgt die Verladung nicht immer durch den Werker von Hand, sondern ggf. auch durch einen Industrieroboter in den SLT [Nis-14]. Das chaotische Befüllen eines Ladungsträgers geschieht auch nicht zwangsweise manuell. Über eine Rutsche können die LT auch direkt aus der Produktionsanlage mit Kleinteilen versorgt werden. Anschließend besteht die Möglichkeit, dass die LT direkt in den Karosseriebau geliefert werden. Meist werden die LT jedoch zwischengelagert und später verwendet oder sie müssen noch an einen anderen Standort gebracht werden.

Im Karosseriebau angekommen, müssen die Komponenten in den automatischen Prozess eingeschleust werden, siehe Abbildung 5.4. Nur noch sehr vereinzelt werden im hochautomatisierten Karosseriebau die Komponenten einzeln eingeschleust. Meist wird vom Werker ein Magazin befüllt, das einen Industrieroboter in der Anlage mit Komponenten speist. Hierbei kann der Werker das Magazin mit mehreren Komponenten befüllen, die nacheinander abgegriffen werden. So kann ein Werker mehrere Stationen versorgen.

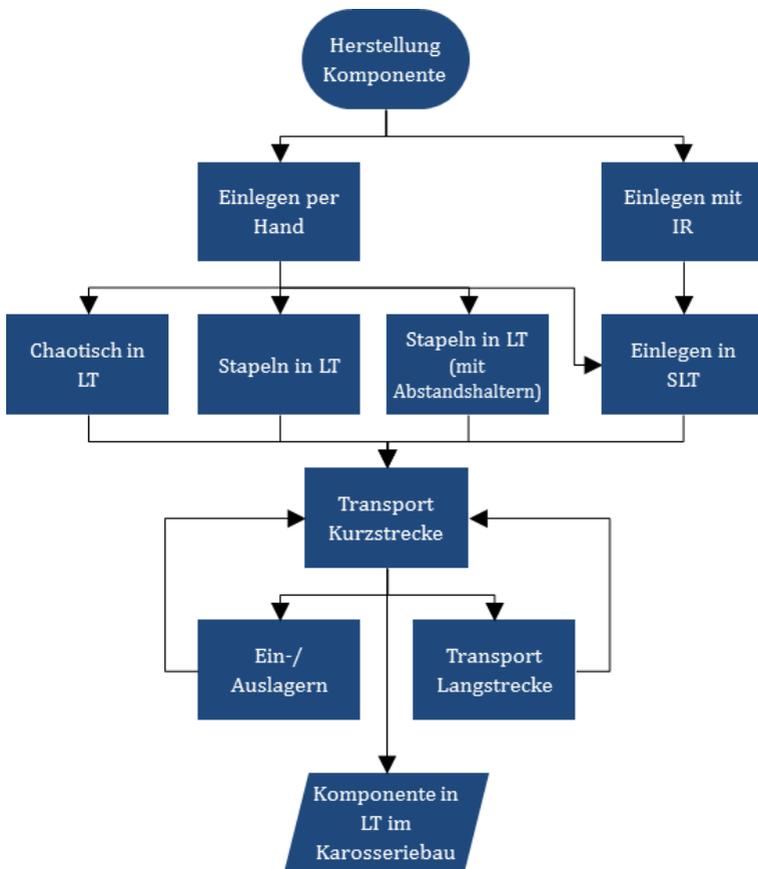


Abbildung 5.3: Prozessschabild zur Anlieferung der Komponenten in den Karosseriebau [vgl. Wis-13, S. 10]

Es kommen verschiedenste Arten von Magazinen zum Einsatz. Beispiele sind die Wechselladung oder der Trägerwagen, die vollgeladen und dann zur Entnahme durch einen Industrieroboter in die Station gefahren werden, der Schwerkraftförderer, bei dem die Komponenten auf installierten Bahnen in die Station hineinrutschen, der Linearförderer, bei dem die Komponenten in der Ebene durch einen Antrieb in die Station befördert werden und der Drehspeicher, der die Ent- und die

Beladestation durch eine Schwenkbewegung austauschen kann. Vollumfängliche SLT können direkt in die Station eingesetzt werden und bilden somit selbst die Schnittstelle zum abgreifenden Industrieroboter.

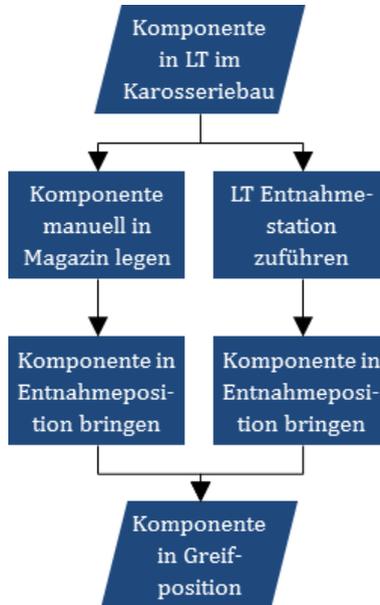


Abbildung 5.4 Prozessschaubild zum Einschleusen von Komponenten [vgl. Wis-13, S. 13]

Abbildung 5.5 gibt eine Übersicht über den kompletten, dann folgenden Karosseriebauprozess. Die kompakte Darstellung enthält einige Prozessgruppen, die im Folgenden noch näher erläutert werden. Des Weiteren kommen zwischen zwei Prozessschritten immer Transportprozesse zum Einsatz, die im Schaubild nicht einzeln dargestellt sind.

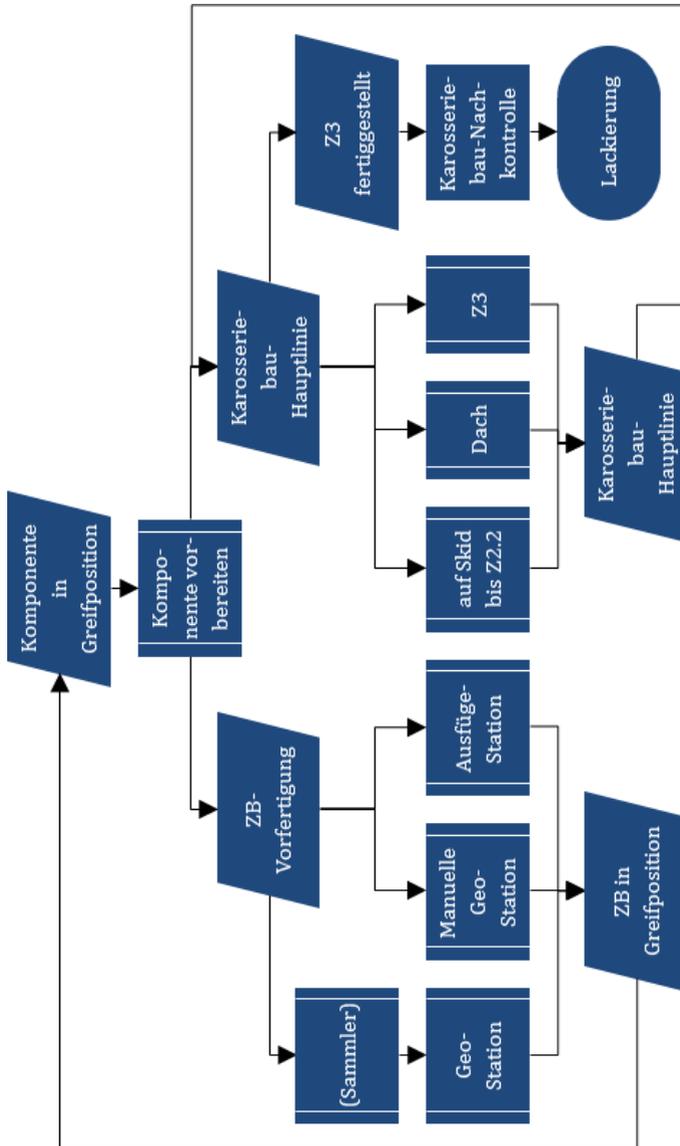


Abbildung 5.5: Übersichtsschaubild Kernprozesse im Karosseriebau [vgl. Wis-13, S. 23]

Jede Komponente, die nach dem Einschleusen zur Verfügung steht, durchläuft zuerst eine Vorbereitungsphase. Hier wird die Komponente beispielsweise entgratet, Kleber wird appliziert oder das Teil wird nur zum besseren Handling während der Weiterverarbeitung neu positioniert. Die Komponenten werden darauffolgend der ZB-Vorfertigung zugeführt, wo sie mit anderen Komponenten zu ZB zusammengefügt werden. Dieses kann durch eine vollautomatische Geo-Station geschehen, die zur Taktzeitreduzierung unter Umständen noch über einen vorgeschalteten Sammler verfügt. Manuelle Geo-Stationen werden bei der Herstellung großer Stückzahlen nur noch selten eingesetzt. Falls noch nicht alle zur Erreichung der benötigten Festigkeit erforderlichen Fügepunkte gesetzt sind, findet der dargestellte Prozessfluss auf den soeben entstandenen ZB noch einmal Anwendung und der ZB durchläuft die Ausfüge-Station. Bei diesem Durchlauf beschränkt sich die Vorbereitung auf eine Neupositionierung oder entfällt ganz. Der geschilderte Prozessfluss auf der linken Seite von Abbildung 5.5 findet noch einige Male Anwendung, bis der ZB den Umfang erreicht hat, mit dem er der Karosseriebau-Hauptlinie zugesteuert wird. Dies kann z. B. der Vorbau sein, der mit dem Hauptboden und dem Heckwagen den Unterboden bildet und in diesem Fügeschritt die Hauptlinie begründet. Während der Unterbau auf einem Skid die Hauptlinie entlang fährt, wird er – hauptsächlich durch mobile Geo-Stationen – immer weiter aufgerüstet, bis der Z2.2-Umfang komplett ist. Dabei wird mehrmals der Ast mit der Prozessgruppe „auf Skid bis Z2.2“ durchlaufen. Darauf werden das Dach und anschließend alle Z3-Umfänge montiert. Diese beiden Prozessgruppen werden im Schaubild separat als eigene Zweige dargestellt, da hierbei das „Best Fit“-Verfahren zum Einsatz kommt [Dom-08]. Nach Fertigstellung des Z3-Umfanges wird noch eine Nachkontrolle durchgeführt, in deren Rahmen bei Bedarf manuelle Nacharbeiten durchgeführt werden. Anschließend wird die Karosserie an die Lackierung übergeben.

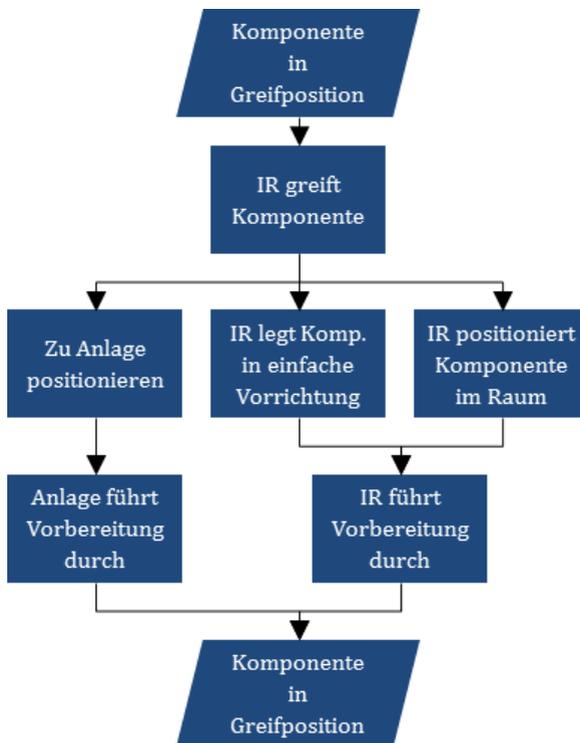


Abbildung 5.6: Prozessschaubild Vorbereiten der Komponenten vor der Weiterverarbeitung [vgl. Wis-13, S.24]

Im Folgenden wird auf die gezeigten Prozessgruppen näher eingegangen. Die meisten Prozessgruppen können von verschiedenen Aufbauzuständen durchlaufen werden. Abbildung 5.6 zeigt die Vorbereitung der Komponente. Hierbei greift ein Industrieroboter die sich in Greifposition befindliche Komponente und führt sie selber an die die Vorbereitung durchführende Maschine, die starr ist. Alternativ legt der Industrieroboter die Komponente in eine einfache Vorrichtung ohne Spanntechnik oder hält die Komponente einfach im Raum. In den beiden letzteren Fällen bewegt ein anderer Industrieroboter die Maschine an der Komponente entlang, sodass beispielsweise Klebstoff

aufgetragen, Bolzen angeschweißt oder Grat entfernt werden kann. Abschließend muss die Komponente wieder in Greifposition gebracht werden.

Bei der Verwendung eines Sammlers, siehe Abbildung 5.7, greift ein Industrieroboter oder ein Werker mehrere Komponenten und legt diese in den Sammler ein. Das manuelle Einlegen kommt im modernen Karosseriebau hoher Stückzahlen jedoch selten vor. Die Komponenten können einzeln aufgenommen und wieder abgelegt werden oder es werden alle Komponenten hintereinander aufgenommen und hintereinander wieder in Sammler abgelegt. Auch eine Kombination dieser beiden Ansätze ist möglich.

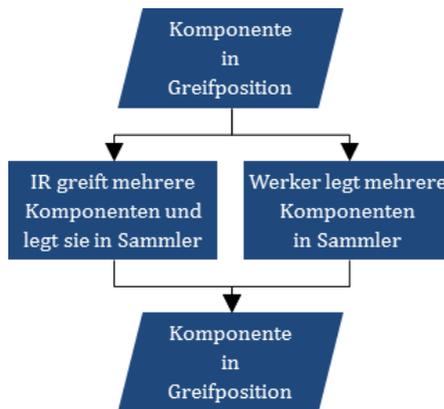


Abbildung 5.7: Prozessschabild Verwendung von Sammelvorrichtungen
[vgl. Wis-13, S. 26]

Die Komponenten werden zusammen von einem Industrieroboter aus dem Sammler entnommen und gleichzeitig in die automatische Geo-Station eingelegt, siehe linker Ast in Abbildung 5.8 oben. Falls kein Sammler verwendet wird, werden die Komponenten von einem Industrieroboter einzeln nacheinander in die automatische Geo-Station eingelegt. Auch ein manuelles Einlegen der Komponenten durch den Werker ist möglich. Dieser Prozess findet sich jedoch nicht

im taktzeitgetriebenen, vollautomatisierten Karosseriebauprozess, sondern nur in Karosseriebaufabriken in Niedriglohnländern oder mit kleinen Stückzahlen. Die Beschreibung des Einlegeprozesses der Komponenten in die Geo-Station macht den Vorteil von Sammlerstationen deutlich. Wenn jeder Fügepartner vom Industrieroboter einzeln eingelegt werden muss, beansprucht das viel Zeit. Somit bleibt von einem Taktzeitintervall weniger Zeit für den Fügevorgang an sich übrig. Werden die Fügepartner vorher im Sammler schon grob zueinander positioniert und können dann mit einer Roboterbewegung alle gemeinsam in die Geo-Station transferiert werden, so benötigt der Einlegeprozess weniger Zeit.

Nachdem alle Komponenten in die Geo-Station eingelegt sind, schließen sich die Spannelemente der Geo-Station und richten die eingelegten Komponenten sehr exakt aus. Da die Geo-Station die Position der Komponenten zueinander bestimmt, während diese durch Füge-technik fest verbunden werden, kommt ihr die wichtigste Rolle bezüglich der Karosseriemaßhaltigkeit zu. Sind alle Komponenten in der Geo-Station ausgerichtet, muss die Geo-Station eventuell noch in die Fügestation verfahren. Es gibt ortsfeste Geo-Stationen und Geo-Stationen auf Trägersystem, siehe unterer Bereich links von Abbildung 5.8. Gibt es jeweils mehrere Industrieroboter zum Ent- und Beladen der Geo-Station sowie zum Durchführen des Fügevorgangs, so können sich diese aufgrund ihres großen Platzbedarfes gegenseitig behindern. Deshalb ist die Geo-Station häufig so aufgebaut, dass es einen Besowie Entladebereich und einen Fügebereich gibt, zwischen denen die eigentliche Spannvorrichtung auf einer Linearachse hin- und herfährt. Befindet sich die Spannvorrichtung im Fügebereich, positionieren ein oder mehrere Industrieroboter die Fügewerkzeuge zur Geo-Station und der Fügevorgang wird durchgeführt. Abschließend fährt die Spannvorrichtung wieder in den Entladebereich und die Spannelemente geben den gefügten ZB frei, bzw. bei ortsfesten Geo-Stationen öffnen die Spannelemente. Daraufhin kann der ZB von einem Industrieroboter entnommen werden.

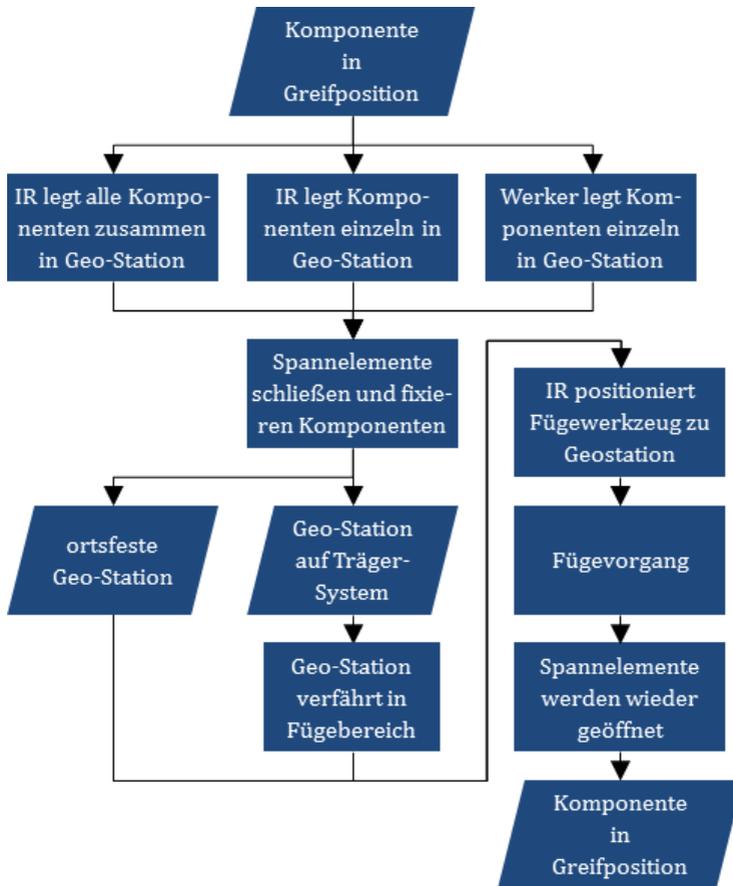


Abbildung 5.8: Prozessschaubild zu automatischen Geo-Stationen [vgl. Wis-13, S. 29]

Manuelle Geo-Stationen finden sich in der modernen Großserienfertigung nur noch in der dem Karosseriebau vorangestellten Herstellung von Klein-ZB. Außerdem sind sie bei der Karosserieaufbereitung in Niedriglohnländern anzutreffen, bei der unter Umständen sogar noch die Hauptlinie aus manuellen Geo-Station besteht [Dat-14]. Wie in Abbildung 5.9 dargestellt, legt ein Werker manuell die Fügepartner nacheinander in die Geo-Station ein.

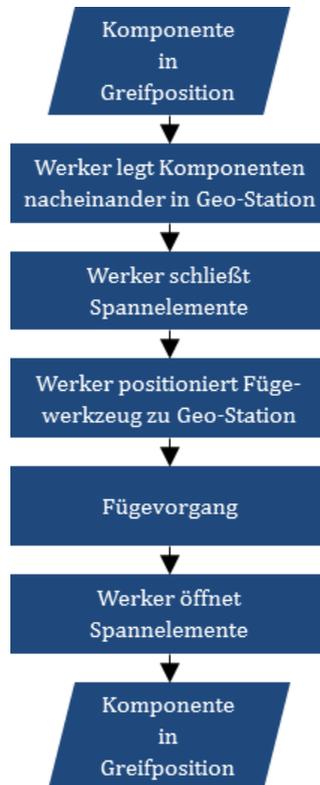


Abbildung 5.9: Prozessschabild zu manuellen Geo-Stationen [vgl. Wis-13, S. 30]

Nachdem er die Spannelemente geschlossen hat, führt der Werker das Fügewerkzeug an die Geo-Station. Dieses kann beispielsweise ein an Seilzügen aufgehängtes Fügewerkzeug sein, das mittels Schablonen an den Fügepunkten positioniert wird. Nach dem Fügevorgang öffnet der Werker die Spannelemente wieder und der gefügte ZB ist zur Entnahme bereit.

Wie schon erläutert, ist die Geo-Station der wichtigste Prozessschritt bzgl. der Generierung von geometrischer Maßhaltigkeit und ist deshalb mit umfangreicher Spanntechnik ausgerüstet. Dadurch ist die Zugäng-

lichkeit für die Fügeroboter sehr eingeschränkt. Da außerdem die Taktzeit sehr knapp ist, können nicht alle erforderlichen Fügeelemente in der Geo-Station gesetzt werden. Aus diesem Grund ist einer Geo-Station meist noch eine Ausfüge-Station nachgeschaltet. Hierbei kommt keine Spannvorrichtung zum Zuge, da die Geometrie durch die Geo-Fügepunkte bereits fixiert ist. Nachdem ein Industrieroboter den ZB aufgenommen hat, positioniert er diesen definiert im Raum und andere Industrieroboter fahren die Fügewerkzeuge an den ZB. Alternativ kommt ein stationäres Fügewerkzeug zum Einsatz und der aufnehmende Industrieroboter positioniert den ZB direkt passend dazu, siehe Schaubild in Abbildung 5.10. Nach dem Ausfügen übergibt der Industrieroboter den ZB, den er noch im Greifer hat, zum nächsten Prozessschritt.

Ist der ZB komplett aufgerüstet, wird er auf der Karosseriebau-Hauptlinie an den Groß-ZB auf dem Skid angefügt. Es werden viele ZB angefügt, bis der Z2.2-Umfang komplett ist. Der Ablauf bis zur Komplettierung der Z2.2 ist in Abbildung 5.11 und Abbildung 5.12 dargestellt. Zu Beginn jedes Fügeprozesses wird der Groß-ZB auf dem Skid von der Rollenbahn an die Station übergeben, wo der Skid fixiert wird. Die beiden linken, sich vereinigenden Äste beschreiben die Standardfügeprozesse auf der Hauptlinie. Hierbei positioniert der Industrieroboter mit der ihm möglichen Genauigkeit die zu fügende Komponente am Groß-ZB. Darauf spannt eine Vorrichtung an einem Greifer den Teil des Groß-ZB ein, an den die Komponente angefügt wird. Alternativ setzt der Industrieroboter die Komponente nur lose an den Groß-ZB an und eine mobile Geo-Station an einem Greifer spannt die Fügepartner präzise zueinander. In beiden Fällen positioniert anschließend ein weiterer Industrieroboter das Fügewerkzeug und der Fügevorgang wird durchgeführt. Abschließend öffnen sich die Spannelemente wieder und die mobile Geo-Station wird entfernt.

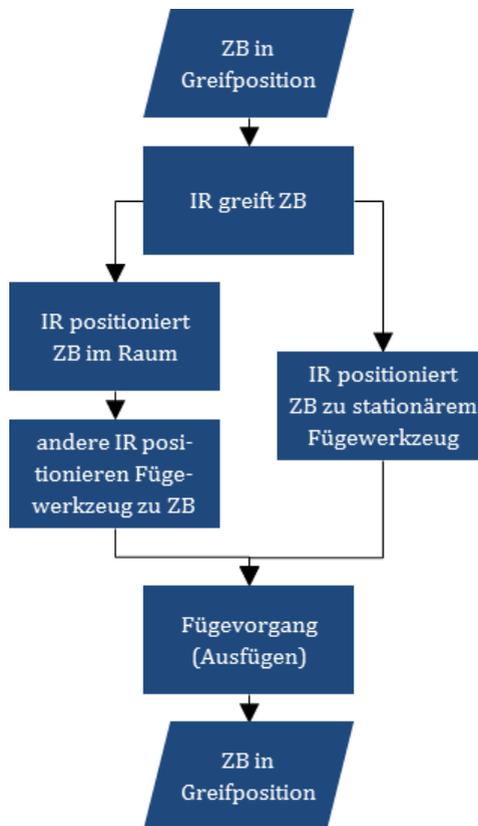


Abbildung 5.10: Prozessschabild zum Ausfügen [vgl. Wis-13, S. 30]

Für die Qualität dieses Fügevorgangs ist die Position des Groß-ZB in der Station von Bedeutung. Da diese Position maßgeblich von der geometrischen Gestalt der Skids abhängt, werden deren Ausrichtelemente nach jedem Durchlauf von einer Inline-Messtechnikanlage überprüft. Die beiden nächsten Äste beschreiben den Framer-Prozess, mit dem die Seitenwände und die Dachspiegel mit dem Unterbau verbunden werden. Hierbei wird die grundlegende Geometrie der Karosserie geschaffen.

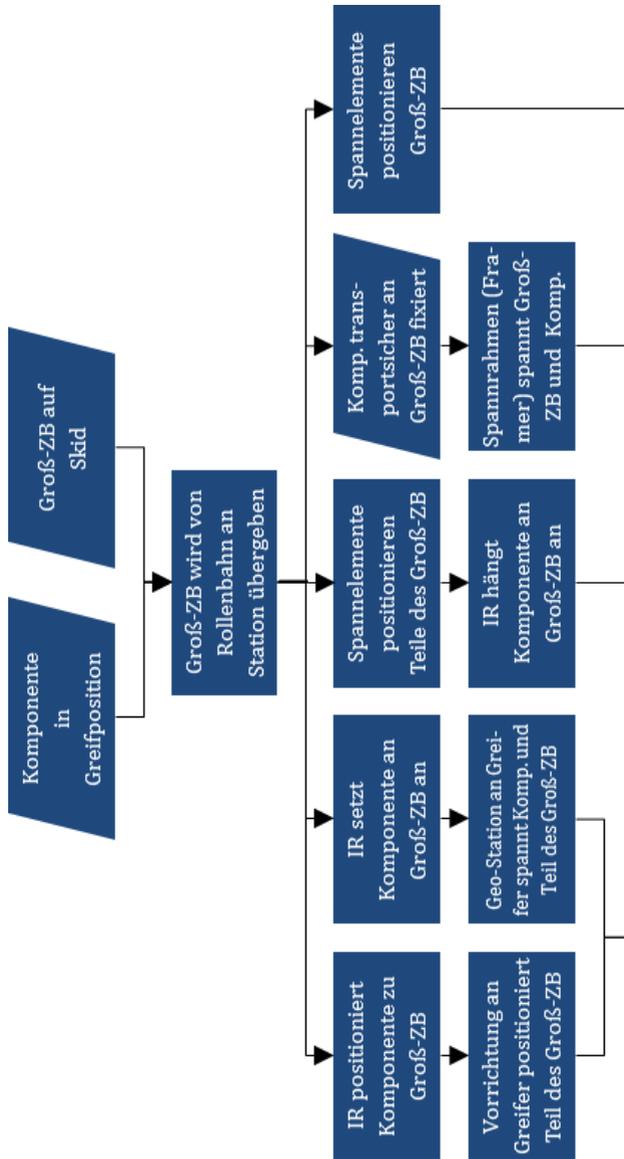


Abbildung 5.11: Prozessschaubild Teil I zur Hauptlinie bis Z2.2 [vgl. Wis-13, S. 33]

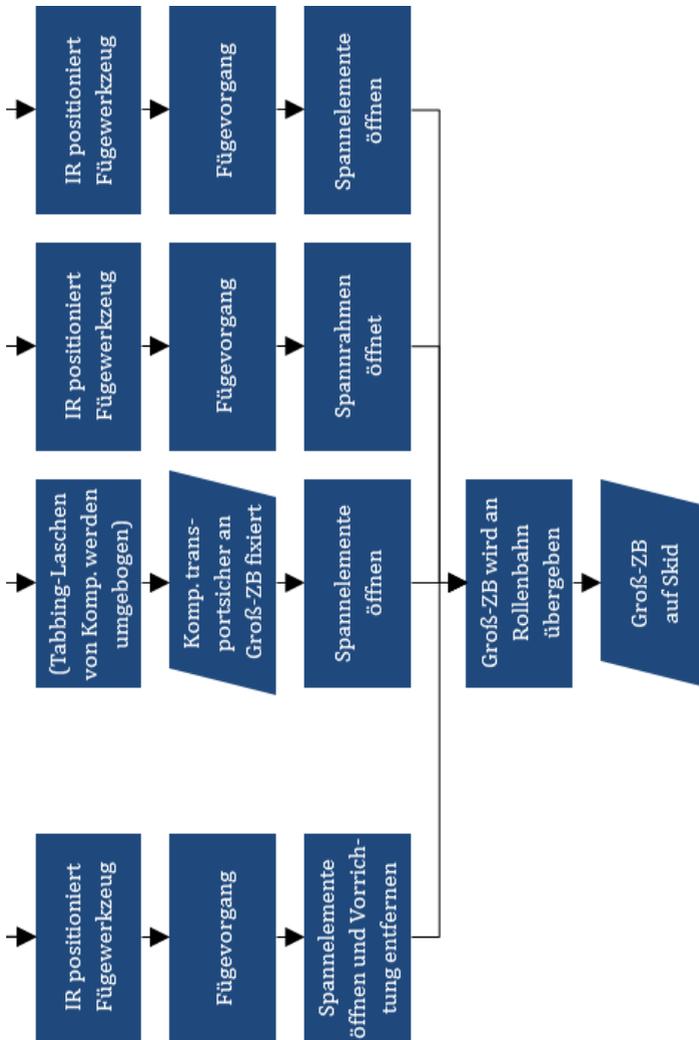


Abbildung 5.12: Prozessschaubild Teil II zur Hauptlinie bis Z2.2 [vgl. Wis-13, S. 33]

Einige ZB, z. B. die Seitenwand außen, werden dabei vorab schon lose, aber transportsicher am Groß-ZB befestigt, sodass in der Framer-Station für deren Zufuhr kein Raum und keine Zeit vorgehalten werden muss. Dieser Prozess wird vom mittleren Ast in Abbildung 5.11 und Abbildung 5.12 dargestellt. Nachdem der Groß-ZB an die Station übergeben wird, richten Spannelemente Teile des Groß-ZB im Bereich der Schnittstellen aus. Ein Industrieroboter hängt die Komponente an den Groß-ZB an. Ist die Komponente transportsicher am Groß-ZB fixiert, so wird dieser wieder freigegeben und an die Rollenbahn übergeben. Der Zweig rechts daneben beschreibt den Framer-Prozess selbst. Nachdem der Groß-ZB mit den anhaftenden Komponenten an die Station übergeben wird, fahren sehr massiv ausgeführte Vorrichtungsrahmen, auch Framer genannt, heran. Diese spannen den Groß-ZB sowie die anzufügende Komponente stark überbestimmt ein. Die Framer sind sehr stabil ausgeführt, damit sie sich beim Ausrichten des schon recht steifen Groß-ZB und der Komponenten nicht elastisch verformen, sondern ggf. die Fügepartner geometrisch korrigiert werden. Darauf fahren ein oder mehrere Industrieroboter die Fügewerkzeuge an den Groß-ZB und der Fügevorgang wird durchgeführt. Schlussendlich öffnen sich die Spannelemente wieder, die Spannrahmen fahren weg und der Groß-ZB wird wieder an die Rollenbahn übergeben.

Der Ast ganz rechts beschreibt den Ausfüge-Vorgang, der beim Groß-ZB ähnlich abläuft wie bei den kleineren ZB abseits der Hauptlinie und auch aus derselben Notwendigkeit resultiert. Nach der Übergabe in die Station wird der Groß-ZB mit einer reduzierten Anzahl von Spannelementen fixiert. Es sind meist mehrere Industrieroboter, die anschließend die Fügewerkzeuge positionieren. Wie bei den anderen Prozessen wird der Groß-ZB nach dem Fügevorgang wieder freigegeben und zurück auf die Rollenbahn gesetzt.

Als nächster Schritt folgt wie in Abbildung 5.13 gezeigt das Fügen des Daches. Das Dach besteht entweder nur aus dem Beplankungsteil oder zusätzlich noch einem eingesetzten Versteifungsrahmen für ein

Schiebedach o. Ä. In der ersten Station wird nur der Groß-ZB bearbeitet. Dieser wird von der Rollenbahn genommen und an den Kontaktflanschen zum Dach wird Kleber appliziert. Währenddessen greift ein Industrieroboter das zu fügende Dach und legt es in eine Vorrichtung, die das Dach für die Aufnahme durch den Spezialgreifer genau positioniert. Dieser Spezialgreifer verfügt über Saugnäpfe, womit er das Dach ansaugt, festhält und über den sich inzwischen in der nächsten Station befindlichen Groß-ZB schwenkt. An dem Industrieroboter ist ebenfalls optische Messtechnik befestigt (z. B. Best Fit-Messtechnik), die die Position des das Dach haltenden Greifers relativ zum Groß-ZB misst und die Lage entsprechend korrigiert. Darauf wird das Dach vollends abgesenkt und der immer noch das Dach haltende Greifer wird mit dem Groß-ZB verspannt. Obwohl vorab Kleber appliziert wird, muss das Dach an einigen Punkten mechanisch bzw. thermisch gefügt werden, da der Kleber erst später aushärtet. Nach diesem Fügevorgang wird der Spezialgreifer entfernt und der Groß-ZB mit Dach wieder auf die Rollenbahn gesetzt.

Der beschriebene Prozess findet in der Automobilindustrie bei Dachkonzepten mit geklebtem Dach und Dachkanal zwischen Seitenwand und Dachfläche Anwendung. Dieser Dachkanal kann auch die Lagerstellen für den Dachgepäckträger aufnehmen und muss in der Montage optisch durch eine Zierleiste verschlossen werden. Einige Hersteller setzen Konzepte ohne Dachkanal ein; das Dach kann dann jedoch nicht geklebt, sondern muss z. B. gelötet werden. Optische Messtechnik zur Einpassung des Daches kann dabei jedoch auch zum Einsatz kommen.

Bevor der Karosseriebauprozess abgeschlossen ist, müssen noch die Z3-Umfänge, also die Türen, die Heckklappe bzw. der Heckdeckel, die Motorhaube und die Kotflügel, gefügt werden. Den Prozess dazu zeigt Abbildung 5.14.

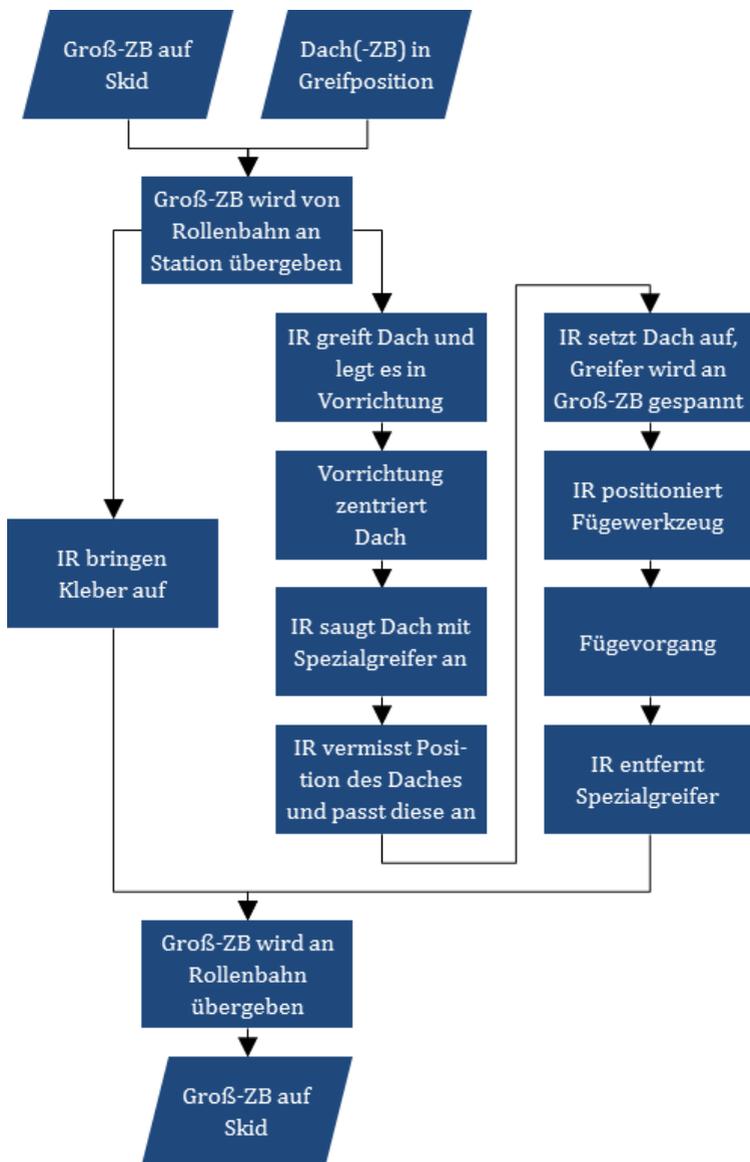


Abbildung 5.13: Prozessschaubild zum Fügen des Daches [vgl. Wis-13, S. 35]

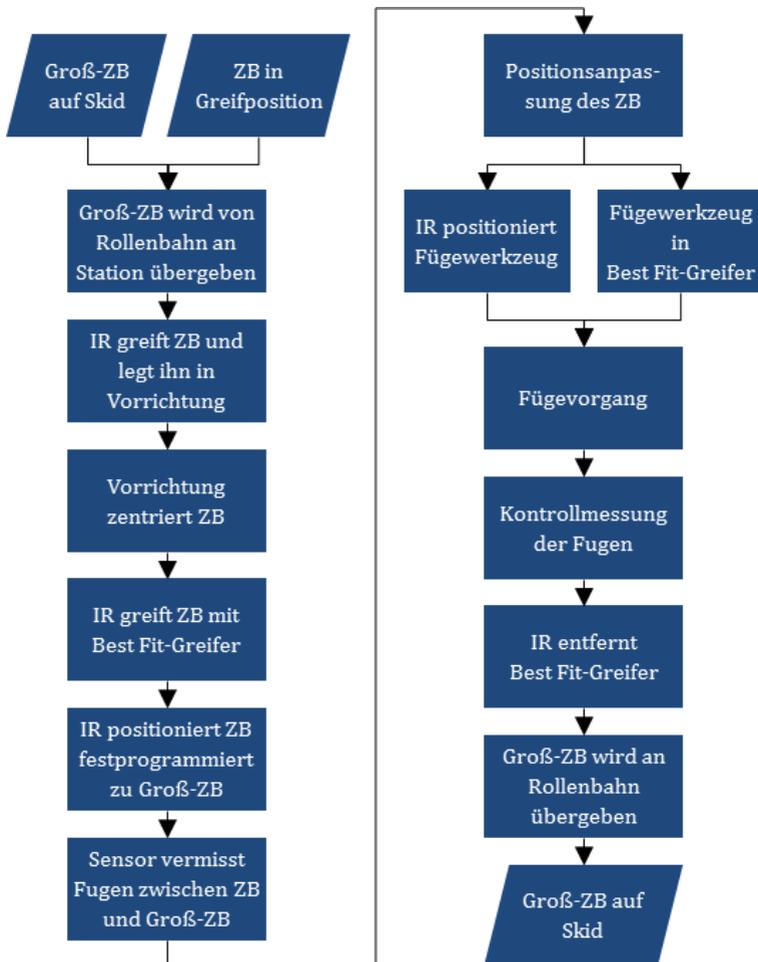


Abbildung 5.14: Prozessschaubild zur Hauptlinie Z3 [vgl. Wis-13, S. 36]

Eingangs wird der Groß-ZB an die Station übergeben und die Komponente, beispielsweise eine Tür, wird von einem Industrieroboter in eine Vorrichtung gelegt. Diese Vorrichtung positioniert die Komponente zur späteren Aufnahme durch den Spezialgreifer, ähnlich dem Prozess des Dach-Fügens. Ein Industrieroboter mit einem speziellen

Best Fit-Greifer nimmt die Komponente auf und positioniert ihn zum Groß-ZB. Die am Best Fit-Greifer angebrachten Sensoren vermessen die Fugen zwischen Komponente und Groß-ZB und die Position der Komponente wird entsprechend korrigiert, sodass die bestmöglich zu erreichenden Fugen entstehen. Darauf positioniert ein weiterer Industrieroboter das Fügwerkzeug oder das Fügwerkzeug ist schon im Best Fit-Greifer integriert. Nachdem der Fügevorgang abgeschlossen ist, z. B. das Verschrauben der Türscharniere, werden die entstandenen Fugen zur Kontrolle noch einmal gemessen. Falls die Werte außerhalb den Spezifikationen liegen, kann nicht direkt in der Station korrigiert werden, aber es wird eine Meldung an den Nacharbeitsbereich generiert. Darauf wird der Greifer entfernt und der Groß-ZB der Rollenbahn zugeführt.

Zwischen den erläuterten Prozessen kommen Transportprozesse innerhalb der Karosseriebauanlage zum Einsatz. Dies gilt hauptsächlich für die ZB-Vorfertigung, da der Groß-ZB ausschließlich zur Fixierung in Stationen von seinem Skid gehoben wird und sonst nur durch diesen transportiert wird. Im Rahmen der Zuführung der Komponenten an die Hauptlinie kommen dieselben Transportprozesse wie in der ZB-Vorfertigung jedoch auch dort zum Einsatz. Abbildung 5.15 zeigt den Ablauf dieser Transportprozesse. Die Komponente befindet sich in Greifposition und wird von einem Industrieroboter direkt an einen anderen übergeben. Alternativ kann die Komponente auch in eine Übergabevorrichtung gelegt werden, aus der sie durch einen andern Industrieroboter wieder entnommen wird. Transporte über größere Distanzen innerhalb des Karosseriebaus erfolgen in der Regel durch Staurollenförderer. Hierbei stehen Gehänge zur Verfügung, die jeweils eine Komponente aufnehmen und zu deren Transport eine Bahn entlanglaufen. Ein Vorteil davon ist, dass diese Förderer auch als Puffer fungieren.

Nach der Komplettierung des Z3-Umfanges und damit der Karosserie, wird diese der Karosseriebaunachkontrolle zugeführt, siehe Abbildung 5.5. Hier werden beispielweise Fehlermeldungen, die beim Best

Fit-Verbau generiert werden, adressiert. Nachdem eventuelle Mängel beseitigt sind, wird die Karosserie an die Lackierung übergeben und der Karosseriebauprozess damit abgeschlossen.

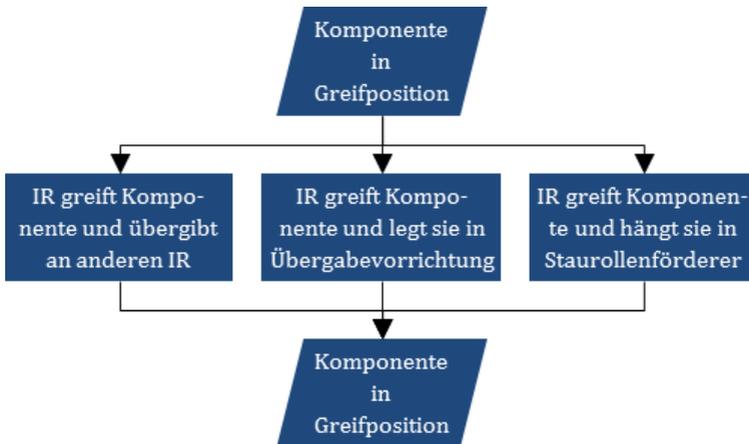


Abbildung 5.15: Prozessschabild zu den Transportprozessen innerhalb des Karosseriebaus [vgl. Wis-13, S. 24]

5.1.2 Gruppierung der Karosseriebauprozesse

Die Untergliederung des Karosseriebauprozesses in die einzelnen Prozessschritte im vorangegangenen Kapitel bildet die Basis für die Gruppierung der Prozesse. Das in Abbildung 5.4 dargestellte Einschleusen von Komponenten wird als erste Prozessgruppe definiert. Alle weiteren Prozessgruppen können aus dem Übersichtsschaubild über die Kernprozesse im Karosseriebau (Abbildung 5.5) abgeleitet werden. Das Vorbereiten der Komponenten vor dem Fügen stellt die zweite Prozessgruppe. Das Zusammenführen der Komponenten im Sammler vor dem Einlegen in die Geo-Station ist als nächster Kernprozess die dritte Prozessgruppe. Die selten verwendete manuelle Geo-Station bildet zusammen mit der üblichen automatischen Geo-Station die Prozessgruppe Geo-Fügen von Unter-ZB. Hierbei handelt es sich –

abgesehen von der eventuellen Translation zwischen Einlege- und Fügestation – um stationäre Geo-Stationen. Die Prozessgruppe Geo-Fügen auf der Hauptlinie beinhaltet hingegen das geometriegebende Fügen hauptsächlich durch mobile, an den Groß-ZB heranführende Geo-Stationen auf der Hauptlinie bis einschließlich Z2.2-Bereich. Die sechste Prozessgruppe Best Fit-Fügen umfasst das Anbringen des Daches und aller Z3-Umfänge, da hier überall Best Fit zum Einsatz kommt. Das Ausfügen von Unter-ZB sowie auf der Hauptlinie bildet die vorletzte Prozessgruppe. Diese beiden Arten des Prozesses sind in Abbildung 5.5 im Flussdiagramm in getrennten Ästen dargestellt, der Fügeprozess an sich läuft jedoch gleich ab. Die letzte Prozessgruppe beinhaltet die Transport-Prozesse. Abbildung 5.16 zeigt, dass auf alle im Karosseriebau verwendeten Komponenten Prozesse bestimmter oder aller Prozessgruppen ein- oder mehrmals angewendet werden, bis schlussendlich die Karosserie fertig aufgebaut ist und zum Lackieren aus dem Karosseriebauprozess ausgeschleust wird. Die acht entwickelten Prozessgruppen machen dabei deutlich, dass es im Karosseriebau standardisierte Prozesse gibt, die leicht variiert in den verschiedenen Aufbaustufen immer wieder Anwendung finden. Der Karosseriebauprozess kann als modular aufgebaut bezeichnet werden.

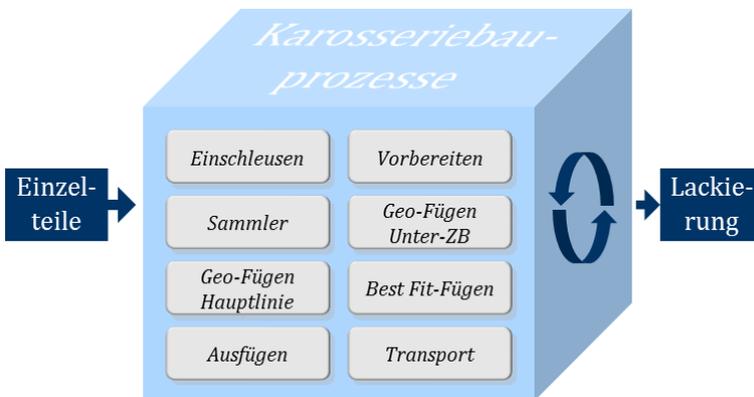


Abbildung 5.16: Prozessgruppen im Karosseriebau

5.2 Identifikation der für Fertigungsabweichungen relevanten Prozesse

Die in Kapitel 5.1 herausgearbeiteten Prozessgruppen werden bezüglich ihres Einflusses auf die Karosseriemaßhaltigkeit untersucht. Zur Vorklassifikation wird ein Entscheidungsbaum entwickelt, der die Prozessgruppen hinsichtlich im Karosseriebau relevanter Abweichungsrisiken systematisch bewertet. Es werden Versuche in einer Karosseriebauanlage durchgeführt, die die Ergebnisse aus der Vorklassifikation validieren.

5.2.1 Methodik der Vorklassifikation mittels Entscheidungsbaum

Zur Vorauswahl werden die Prozessgruppen als (potenzielle) Einflussfaktoren oder als einflusslos auf die Karosseriemaßhaltigkeit klassifiziert. Abbildung 5.17 zeigt den erarbeiteten Entscheidungsbaum. Bei der Untersuchung eines Prozesselementes werden die vier dargestellten Abweichungsursachen betrachtet. Es wird analysiert, ob das Prozesselement

- zum Handling von Komponenten,
- zur messtechnischen Ausrichtung,
- zur vorübergehenden Positionierung oder
- zu endgültigen Positionierung

dient. Wenn keines dieser vier Kriterien zutrifft, hat das Prozesselement keine Auswirkung auf die Karosseriemaßhaltigkeit. Beinhaltet das Prozesselement Handling von Komponenten, so muss geprüft werden, ob bei diesem Vorgang eine bleibende Verformung eingeleitet werden kann. Ist dies der Fall, hat das Prozesselement eventuell Einfluss auf die Karosseriemaßhaltigkeit, es handelt sich also um einen potenziellen Einflussfaktor. Wird nur eine temporäre oder gar keine

Verformung eingeleitet, so hat das Prozesselement sicher keinen Einfluss auf die Karosseriemaßhaltigkeit. Eine Verformung kann auch die Verschiebung der Elemente eines Komponentenverbundes zueinander bedeuten, wenn diese noch nicht fixiert sind. Bedient sich das Prozesselement der Messtechnik, so muss geklärt werden, ob diese Messtechnik Teil eines Regelkreises zur Ausrichtung beim Fügen ist und somit die endgültige Positionierung beeinflusst. Die verbliebenen beiden Abweichungsursachen beziehen sich direkt auf den Aspekt Positionierung, und zwar bei Prozesselementen direkt vor geometriegebenden Fügevorgängen. Handelt es sich nur um eine vorrübergehende Positionierung, so ist wieder die dadurch eingeleitete Verformung der Komponente relevant. Beinhaltet das Prozesselement die endgültige Positionierung vor einem geometriegebenden Fügevorgang, wie beispielsweise durch eine Geo-Station, so hat es definitiv Einfluss auf die Karosseriemaßhaltigkeit.

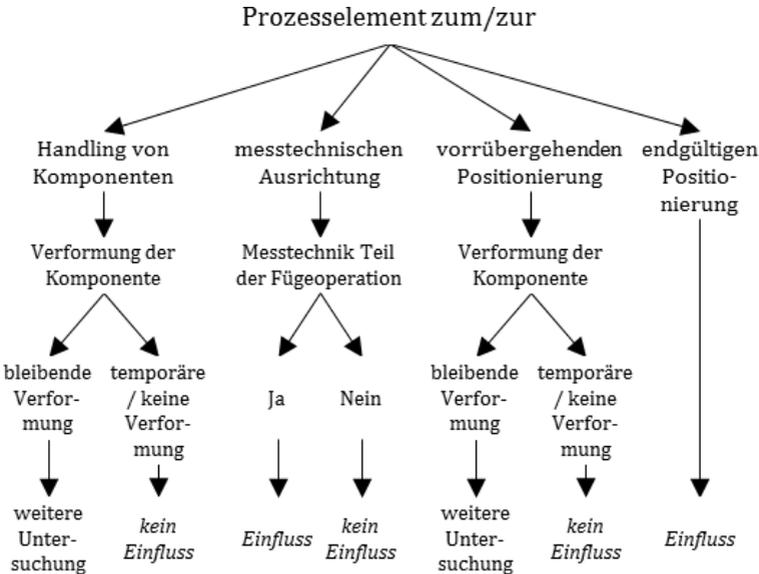


Abbildung 5.17: Entscheidungsbaum zur Vorklassifizierung

K.-o.-Kriterien werden als maßhaltig nicht relevant eingestuft. Wenn in einem Prozesselement ein Fehl Ablauf auftritt, der den Prozess unterbrechen kann, so hat dies keinen Einfluss auf die Karosseriemaßhaltigkeit. Muss ein Industrieroboter beispielsweise eine Komponente greifen, so ist er entweder dazu in der Lage, weil sich der Greifer in einer toleranzseitig abgesicherten Lage relativ zur Komponente befindet, und der Prozess läuft planmäßig weiter, oder es ist gar nicht erst möglich, die Komponente zu greifen, was zu einem Prozessabbruch führt.

Zur Anwendung des Entscheidungsbaumes werden repräsentative Prozesse aus den Prozessgruppen in ihre einzelnen Teilprozesse, hier als Prozesselemente bezeichnet, aufgeteilt. Jedes Prozesselement wird mittels des Entscheidungsbaumes überprüft. Sobald ein Prozesselement gefunden wird, welches sicher oder potenziell einen Einflussfaktor auf die Karosseriemaßhaltigkeit darstellt, so wird die gesamte Prozessgruppe dementsprechend als (potenzieller) Einflussfaktor eingestuft.

Als Beispiel sei die Methodik des Entscheidungsbaumes an der Prozessgruppe Einschleusen erläutert. Ein repräsentativer Prozess ist das manuelle Einlegen der Komponenten in das Stationsmagazin, welcher aus drei Prozesselementen besteht. Der Ausgangszustand ist, dass die Komponenten im LT bereit stehen. Die Komponenten werden aus dem LT entnommen und in das Magazin eingelegt. Dann wird der Stapel von Komponenten in der Station in die Entnahmeposition gebracht. Der Anfangszustand ist ein Handlings-Prozesselement, welches keine bleibende Verformung verursacht. Somit hat es keinen Einfluss auf die Maßhaltigkeit. Für das zweite Prozesselement gilt das gleiche. Mit dem dritten Prozesselement wird die Komponente in eine definierte Lage in der Station gebracht. Diese Positionierung ist jedoch nur vorübergehend und es wird keine bleibende Verformung eingebracht, somit hat auch dieses Prozesselement keinen Einfluss auf die Karosseriemaßhaltigkeit. Da keines der drei Prozesselemente einen Einfluss hat, kann geschlossen werden, dass der gesamte Prozess keinen Maßhaltigkeitseinfluss hat.

Nach derselben Vorgehensweise werden alle Prozessgruppen überprüft und es wird eine Vorklassifikation in potenzielle oder sichere sowie auszuschließende Einflussfaktoren vorgenommen. Die Vorklassifikation legt die Annahme zugrunde, dass alle Prozesse zweckmäßig durchgeführt werden, also dass beispielsweise keine Teile während eines Transportvorganges beschädigt werden etc. Folgende Prozessgruppen haben gemäß der Vorklassifikation keinen Einfluss auf die Karosseriemaßhaltigkeit:

1. Einschleusen
2. Vorbereiten
3. Transport

Die folgenden Prozessgruppen haben gemäß der Vorklassifikation einen (potenziellen) Einfluss auf die Karosseriemaßhaltigkeit:

1. Sammler
2. Geo-Fügen Unter-ZB
3. Geo-Fügen Hauptlinie
4. Best Fit-Fügen
5. Ausfügen

Der Einfluss von Punkt zwei bis vier der mutmaßlichen Einflussfaktoren ist gewiss. Punkt fünf hat auf mikrostruktureller Ebene möglicherweise einen Einfluss, welcher aber nicht Gegenstand dieser prozessualen Untersuchung ist. Somit muss die Vorklassifikation für Punkt eins der Einflussfaktoren sowie für alle als Einflussfaktoren ausgeschlossene Prozessgruppen validiert werden.

5.2.2 Validierung der Vorklassifikation

Zur Bestätigung der Methodik und des Ergebnisses der Vorklassifikation werden vier Experimente im Karosseriebau durchgeführt und ausgewertet: zwei Experimente zur Validierung der Vorklassifikation der Prozessgruppe Einschleusen, ein Experiment für Transport-

Prozesse und ein weiteres Experiment für Sammler-Stationen. Ein prozessualer Maßhaltigkeitseinfluss der Prozessgruppe Vorbereiten kann logisch ausgeschlossen werden, sodass hier kein Experiment durchgeführt wird. Das Vorbereiten selbst hat keinerlei geometrische Auswirkung auf die Komponente, sodass nur der Handling-Anteil des Prozesses eventuell relevant ist. Dieser Anteil wird schon im Rahmen der anderen Prozessgruppen untersucht.

Die Experimente werden gemäß der Prinzipien der statistischen Versuchsplanung angelegt. Hierbei wird eine Eingangsgröße des Prozesses, auch Faktor genannt, kontrolliert variiert und die Auswirkung auf die Zielgröße beobachtet, siehe Abbildung 5.18. Die Abbildung ist auf die beschriebenen Anwendungsfälle angepasst, bei denen es sich um Ein-Faktor-Versuche [vgl. Gei-08] handelt und alle anderen Eingangsgrößen konstant gehalten werden.



Abbildung 5.18: Vereinfachte Darstellung des Betrachtungsumfanges der statistischen Versuchsplanung nach [Gei-08, S. 457]

5.2.2.1 Experiment I: Einschleusen 1

Beim ersten Versuch wird das Einlegen einer Komponente in ein Magazin manipuliert und die Auswirkung auf das in der folgenden Geo-Station entstehende Schließmaß untersucht. Abbildung 5.19 a) zeigt die in das Magazin eingelegte Komponente A. Die Verschiebung in $-X$ - bzw. $+X$ -Richtung im Magazin ist die Störgröße, die im Experiment eingebracht wird. Nach dem Einschleusen der Komponente A und eines Transportprozesses innerhalb der Station wird die Komponente A in einer Geo-Station mit der Komponente B zu einem ZB verschweißt. Wenig später wird der ZB in der in Abbildung 5.19 b) dargestellten Aufbaustufe zur Vermessung ausgeschleust.

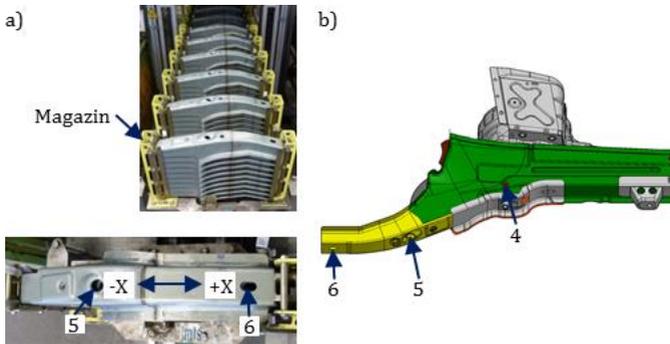


Abbildung 5.19: a) Positionierung der Komponente A im Magazin; b) Messumfang mit Komponenten A (gelb) und B (grün)

Die Messpunkte 5 und 6 liegen auf Komponente A (gelb) und werden zum Referenzpunkt 4 auf Komponente B (grün) gemessen. Die Deltas zwischen Punkt 5 und 4 bzw. Punkt 6 und 4 sind die Zielgrößen, die zeigen, ob die Verschiebung von Komponente A im Magazin einen Effekt hat. Da die Manipulation in X-Richtung erfolgt und die Komponenten A und B auch nur in diese Richtung ungehindert zueinander verschiebbar sind, wird bei den Zielgrößen ausschließlich die X-Komponente des Delta-Vektors ausgewertet. Entscheidend für das Experiment ist, dass die eingebrachte Störgröße eine deutlich größere Amplitude als das Grundrauschen des untersuchten Prozesses hat. Dieses ist hier gegeben. Der Manipulationsrange von Komponente A beträgt über 6 mm, während der ungestörte Prozess sehr stabil läuft und die Zielgröße in den letzten fünf Jahren nur im Bereich von 0,8 mm streut. Um das Risiko unbekannter Einflüsse noch weiter einzuschränken, werden die Experimente nur mit Einzelteilen aus jeweils einer Charge durchgeführt. Der Faktor, also die kontrollierte Störgröße, nimmt im Experiment folgende Merkmalswerte an:

1. Keine Manipulation, der Faktor streut im prozessüblichen Bereich
2. Manipulation in positive X-Richtung um 2,1 mm
3. Manipulation in negative X-Richtung um 4,2 mm

Die Merkmalswerte zwei und drei werden von den Anschlägen im Magazin bestimmt. Da der Zusammenhang zwischen Faktor und Zielgröße im ersten Schritt nicht quantifiziert, sondern nur nachgewiesen oder widerlegt werden muss, reicht eine Stichprobengröße von vier pro Merkmalswert. Die Vermessung der entstandenen ZB wird von einer einarmigen Koordinatenmessmaschine vorgenommen.

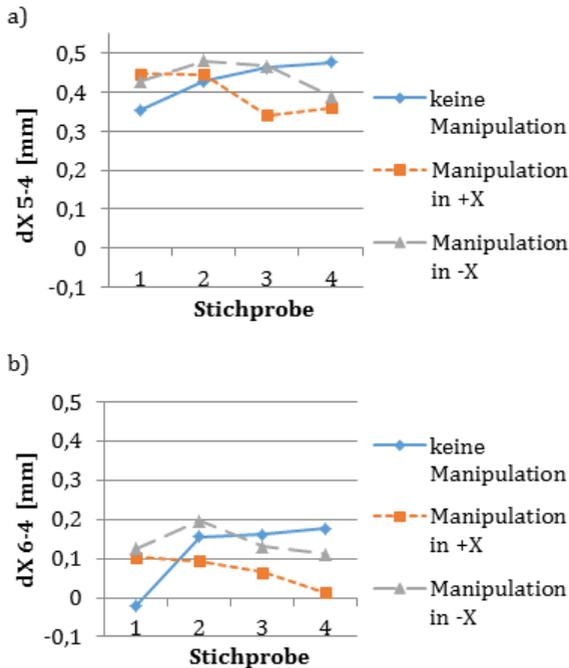


Abbildung 5.20: Werte der Zielgrößen im Experiment Einschleusen 1

Abbildung 5.20 zeigt die beiden Zielgrößen. Teil a) zeigt das Delta zwischen Messpunkt 5 und 4, Teil b) zwischen Messpunkt 6 und 4. In den Ergebnissen ist keine Auswirkung der Merkmalswerte, auch nicht verringert, zu erkennen. Beim Verschieben von Komponente A in negative X-Richtung müssten bei einem Einfluss die Messpunkte 5 und 6 näher an Punkt 4 heranrücken, die Zielgröße also kleiner werden.

Dies ist, wie in beiden Diagrammen zu sehen, nicht der Fall. Vielmehr schwanken die Zielgrößen völlig unabhängig vom Merkmalswert und es ist kein Muster vorhanden.

Demnach hat der Prozess des Einschleusens keinen geometrischen Einfluss auf den entstehenden ZB.

5.2.2.2 Experiment II: Einschleusen 2

Beim zweiten Experiment zur Prozessgruppe Einschleusen wird die Störgröße nicht im Rahmen des Experimentes eingebracht, sondern ist bereits Bestandteil des untersuchten Prozesses. Eine Untersuchung der Einschleusevorgänge im Karosseriebau zeigt, dass Komponenten durch Stapeln bis zu 35 mm versetzt positioniert sein können. Stapelt man beispielsweise winkelförmige Teile, so kann die Position des letzten Teils je nach Lagerungsorientierung zum ersten Teil um viele mm lateral verschoben sein. Abbildung 5.21 a) zeigt die beschriebene Situation am Beispiel des hier betrachteten Umfangs. Es handelt sich um die schon in Experiment I herangezogene Komponente B, die direkt aufeinander gestapelt in das Magazin eingelegt wird. In diesem Fall entsteht eine Verschiebung von bis zu 7 mm normal zur Greifrichtung des in der Station aufnehmenden Roboters, was im Experiment der Merkmalswertbreite des Faktors entspricht. Dafür werden zwölf Komponenten aufeinandergestapelt. In Abbildung 5.21 b) ist der Messumfang des Experiments II gezeigt. Es wird der gleiche ZB-Umfang wie in Experiment I vermessen, nur werden andere Messpunkte zur Auswertung herangezogen. Der im vorigen Experiment als Fixpunkt dienende Messpunkt 4 (auch gezeigt in Abbildung 5.21 a)) bewertet die Positionierung von Komponente B relativ zum neuen Fixpunkt 2 in Komponente D (orange). Die allgemeine Stabilität des Prozess wird innerhalb eines Jahres vor der Experimentdurchführung ausgewertet und zeigt in diesem Zeitraum eine Streuung von 0,9 mm bei der Zielgröße. Da sich die in Abbildung 5.21 a) gezeigte Verschiebung hauptsächlich in Z-Richtung niederschlägt, ist diese Komponente die Zielgröße.

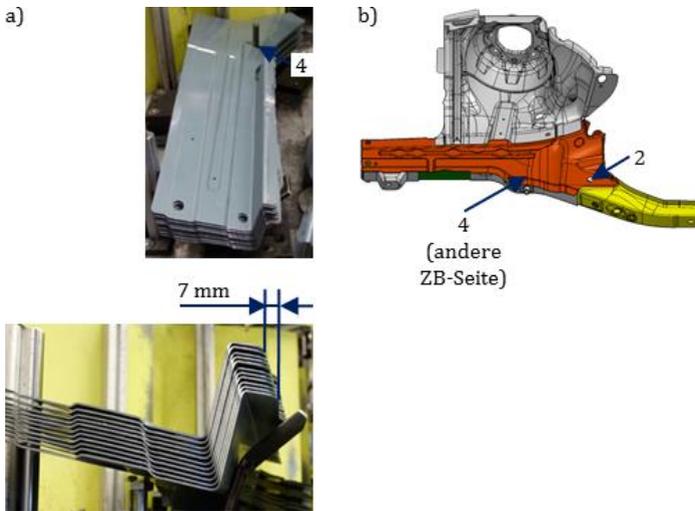


Abbildung 5.21: a) Positionierung der Komponente B im Magazin; b) Messumfang mit Komponenten B (grün) und D (orange)

Im Gegensatz zum vorigen Experiment wird der ZB nicht zur Vermessung ausgeschleust, sondern es wird auf die vorhandenen Inline-Messdaten zurückgegriffen. Dazu wird die Messfrequenz an der Inline-Messstation auf 100 % erhöht und es werden 50 aufeinanderfolgende ZB zur Auswertung der Zielgröße (Punkt 4 relativ zu Punkt 2) vermessen. Wie in Kapitel 2.4.2 erläutert ist die absolute Messgenauigkeit von Inline-Messstation aufgrund der fehlenden definierten Aufnahme des Messumfangs schlecht. Da hier jedoch eine Relativmessung ausgewertet wird, ist die Messgenauigkeit ausreichend. Abbildung 5.22 zeigt das Ergebnis dieser 50 Relativmessungen in Z-Richtung. Die Werte streuen zwischen 0,2 und 1,0 mm. Es ist keinerlei Muster der zwölf aufeinandergestapelten Teile zu erkennen. Hätten die 7 mm laterale Verschiebung einen Effekt, dann würde die Zielgröße nach jeweils zwölf Messungen einen Sprung machen, wenn auf das nächste Magazin zurückgegriffen wird, bei dem das erste Teil am anderen Ende der Merkmalswertbreite liegt. Da dies nicht der Fall ist, hat auch hier eine Abweichung beim Einschleusen keine Auswirkung.

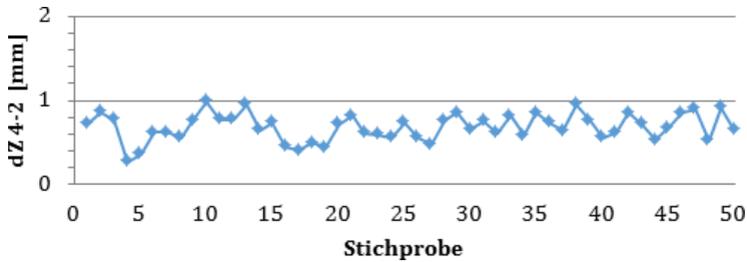


Abbildung 5.22: Werte der Zielgröße im Experiment Einschleusen 2

5.2.2.3 Experiment III: Transport

Als Repräsentant für die Transportprozessgruppe wird aufgrund seiner Nähe zur Geo-Station der Staurollenförderer ausgewählt. Abbildung 5.23 zeigt Komponente C im Staurollenförderer. Die Komponente kann in X-Richtung verschoben werden, da bei der Fixierung im Staurollenförderer das in diese Richtung positionierende Element ein Langloch ist. Der Faktor nimmt dabei folgende Merkmalswerte an:

1. Keine Manipulation, der Faktor streut im prozessüblichen Bereich um die mittlere Position im Staurollenförderer
2. Manipulation in positive X-Richtung um ca. 4 mm
3. Manipulation in negative X-Richtung um ca. 4 mm

Der Einfluss der Störung wird wie bei Experiment II aus dem Delta der Messpunkte 2 und 4 ermittelt, siehe Abbildung 5.21 b). In diesem Falle wird allerdings die X-Komponente als Zielgröße ausgewertet. Auch hier kommen relative Messwerte basierend auf Inline-Messtechnik zum Einsatz. Die Zielgröße streut innerhalb eines Jahres in einem Range von 1,2 mm. Somit kann der ungestörte Prozess als stabil eingestuft werden.

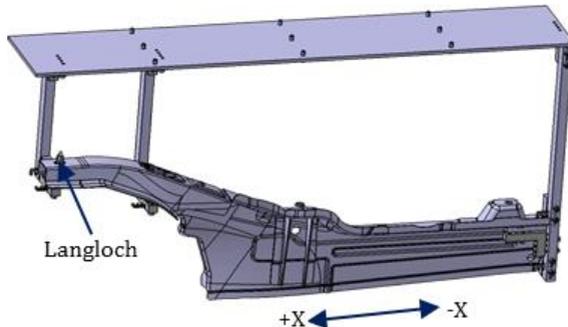


Abbildung 5.23: Positionierung der Komponente C im Staurollenförderer

Da der Staurollenförderer einen Puffer mit 20 Komponenten zwischen den Stationen darstellt, werden die Positionen von 20 Komponenten im Staurollenförderer manipuliert, was somit der Stichprobengröße pro Merkmalswert entspricht. Die Ergebnisse sind in Abbildung 5.24 dargestellt. Die Zielgröße ohne Manipulation hat einen Durchschnitt von 2,14 mm, bei Manipulation in positive X-Richtung sind es 2,07 mm und bei Manipulation in negative X-Richtung 1,95 mm. Somit wird auch hier das Ergebnis der Vorklassifikation bestätigt. Wie schon in der Darstellung verdeutlicht, weisen die jeweiligen Durchschnittswerte der Zielgrößen nicht dieselbe Ordnung wie die Merkmalswerte auf. Die ZB, bei denen kein manipuliertes Teil verbaut wird, weisen im Durchschnitt den größten Abstand zwischen den Messpunkten 2 und 4 auf, während die ZB, bei denen die Komponente C vom Fixpunkt 2 weggeschoben wird, im Durchschnitt den kleinsten Abstand zwischen diesen Messpunkten haben. Es gibt keinen Zusammenhang zwischen der Manipulation und der Zielgröße. Somit zeigt das Experiment, dass der Transportprozess Staurollenförderer keinen Einfluss auf die Geometrie des ZB hat, der direkt im Anschluss erzeugt wird.

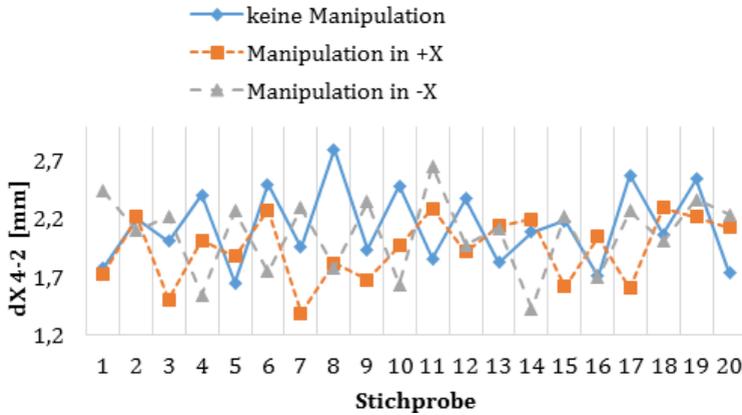


Abbildung 5.24: Werte der Zielgrößen im Experiment Transport

5.2.2.4 Experiment IV: Sammler-Station

Das letzte Experiment dient zur Untersuchung des Einflusses des Sammlers auf die Maßhaltigkeit. Die einzelnen Komponenten des in Abbildung 5.25 a) gezeigten Heckrahmens werden in einer Sammlerstation zusammengelegt, bevor der komplette Umfang in die Geo-Station eingelegt wird. An den Schnittstellen zwischen dem mittleren Querträger, im Folgenden als Komponente E bezeichnet, und den beidseitig angeordneten Längsträgern, im Folgenden als Komponente F bezeichnet, wird zuvor Strukturkleber aufgetragen. Dieser härtet zwar erst im Karosseriebauofen aus, eine hemmende Wirkung bei der späteren Ausrichtung in der Geo-Station kann trotzdem nicht ausgeschlossen werden. Die Position von Komponente E wird im Experiment wie gezeigt manipuliert. Die Merkmalswerte sind folgende:

1. Keine Manipulation: Der Querträger wird im Sammler wie eingestellt über das Loch-Langloch-Prinzip ausgerichtet.
2. Manipulation in positive Y-Richtung um 1,5 mm: Die Vorrichtung wird so umgestellt, dass der Fixierstift, der das Ausrichtungslöcher aufnimmt, in die positive Y-Richtung verschoben wird.

Bei diesem Experiment wird aktiv in den Karosseriebauprozess eingegriffen und es werden vorhandene Ausrichtelemente verstellt. Die Zielgröße ist die Y-Position von Komponente E im ZB, nachdem dieser in der dem Sammler folgenden Geo-Station verschweißt wird. Bewertet wird dieses über das Y-Delta zwischen Messpunkt 1, Teil von Komponente F links, und 3, Teil von Komponente E. Die Messpunkte sind in Abbildung 5.25 b) eingezeichnet und die manipulierte Komponente E ist blau eingefärbt.

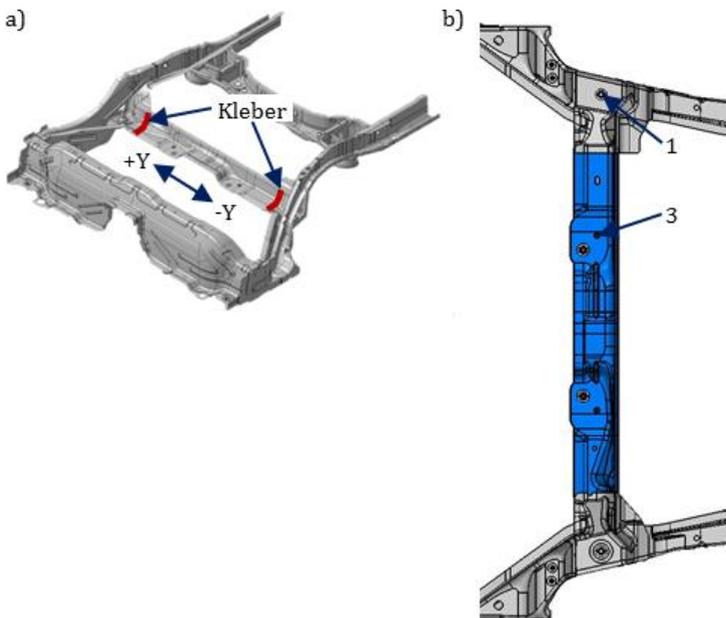


Abbildung 5.25: a) Positionierung der Komponente E im Sammler; b) ausgewerteter Messumfang

Der Verlauf der Zielgröße ist in Abbildung 5.26 dargestellt. Die ersten Messwerte stammen aus den gut drei Monaten vor dem Experiment und weisen keine Manipulation auf. Selbstverständlich streut die Zielgröße in diesen drei Monaten mehr als während der zehn direkt

aufeinanderfolgenden Messungen im Rahmen des Experiments. Im Diagramm ist auch die Einstellung des Sammlers, die manipuliert wird, illustriert. Das Diagramm zeigt, dass sich während der Manipulation im Sammler keine Änderung des Mittelwertes der Zielgröße einstellt. Bei den letzten beiden Messungen wird der oben beschriebene Kleber entfernt, was aber keine Abweichung zu den restlichen Messwerten des Experiments hervorruft. Das Experiment zeigt, dass eine Abweichung in der Sammler-Station hier keinen Einfluss auf die geometrische Qualität des erzeugten ZB hat.

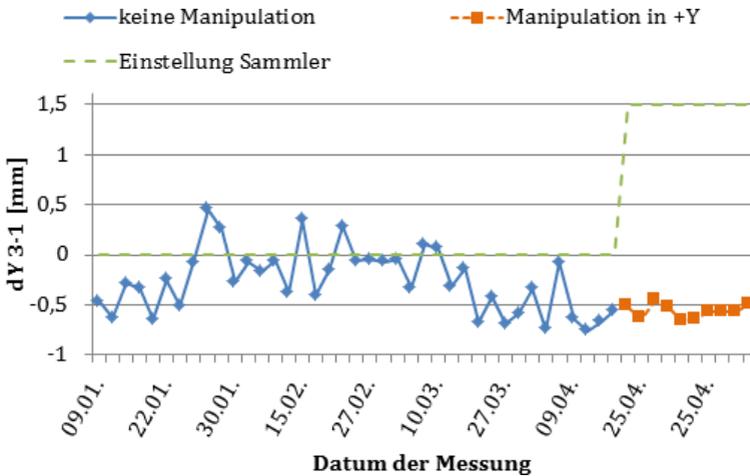


Abbildung 5.26: Werte der Zielgröße im Experiment Sammler-Station

5.2.3 Ergebnis der Vorklassifikation und der Validierungsexperimente

Die Experimente aus Kapitel 5.2.2 bestätigen bis auf den Sammler-Prozess die systematische Vorklassifikation der Karosseriebauprozesse aus Kapitel 5.2.1. Mit Hilfe der durchgeführten Experimente lässt sich somit aus der Vorklassifikation die in Tabelle 5.1 gezeigte Einstufung ableiten.

Tabelle 5.1: Maßhaltigkeitseinfluss der Karosseriebauprozessgruppen

Karosseriebauprozess	Prozessualer Einfluss auf Maßhaltigkeit	Validierungsmittel
Einschleusen	<i>Kein Einfluss</i>	Zwei Experimente
Vorbereiten	<i>Kein Einfluss</i>	Entscheidungsbaum, analytisch
Transport	<i>Kein Einfluss</i>	Experiment
Sammler	<i>(Kein Einfluss)</i>	Experiment
Geo-Fügen Unter-ZB	Ausrichten der Komponenten in der Geo-Station	Entscheidungsbaum, Prozesszweck
Geo-Fügen Hauptlinie	<ul style="list-style-type: none"> - Positionieren des Skids in der Station - Ausrichten von Bereichen des Groß-ZB - Ausrichten der Füge-Komponente 	Entscheidungsbaum, Prozesszweck
Best Fit-Fügen	<ul style="list-style-type: none"> - Positionieren des Skids in der Station - Ausrichten von Bereichen des Groß-ZB - Positionieren der Füge-Komponente - Vermessen und Ausrichten 	Entscheidungsbaum, Prozesszweck
Ausfügen	<i>Kein Einfluss</i>	Entscheidungsbaum, analytisch

Die zwei Experimente zur Prozessgruppe Einschleusen schließen einen prozessualen Einfluss dieser Prozesse auf die Maßhaltigkeit aus. Der Prozessgruppe Vorbereiten kann analytisch unter Anwendung des Entscheidungsbaumes und basierend auf dem Prozessverständnis ein Einfluss abgesprochen werden. Das Experiment zur Prozessgruppe Transport zeigt auf, dass auch dieser Prozess keinen Einfluss auf die Maßhaltigkeit hat. Abweichungen durch Übergabeprozesse werden in der Geo-Station wieder ausgeglichen. Entgegen des Ergebnisses der Vorklassifikation weist das Experiment beim Sammler auch keinen Einfluss auf die resultierende Maßhaltigkeit auf. Dabei gibt es keinen

Unterschied, ob Kleber verwendet wird oder nicht. Der Einfluss des Sammlers wird experimentell an einer geometrischen Teilekonfiguration geprüft, die toleranzausgleichend ausgeführt ist. D. h., dass das entstehende Schließmaß allein durch die Geo-Station und nicht durch die Teilegeometrie bestimmt wird (Typ 2-ZB, siehe Kapitel 2.5.2). Somit ist bewiesen, dass die Geo-Station durch den Sammler eingebrachte Abweichungen an Schiebeflanschen korrigieren kann. Diese Erkenntnis ist jedoch nicht sicher auf eine geometrische Blocksituation übertragbar. Wenn nicht nur wie im durchgeführten Experiment der Kleber und die Haftreibung zwischen den Komponenten eine maßliche Korrektur durch die Geo-Station behindern, sondern auch noch eine Verschachtelung o. Ä. der Fügepartner, kann dies eventuell die Maßhaltigkeit beeinflussen. Dieser Spezialfall ist intensiver zu untersuchen.

Die Einflüsse der Geo-Stationen sind fraglos. Da Geo- und Best Fit-Stationen dazu angelegt sind, die Maßhaltigkeit der Karosserie zu bestimmen, ist ein experimenteller Nachweis dazu obsolet. Das Ausfügen wird letztendlich als prozessualer Maßhaltigkeitseinfluss ausgeschlossen, da zum Zeitpunkt der Durchführung die Geo-Station die relevanten Schließmaße schon fixiert hat. Ein ggf. durch Hitzeeintrag auf mikrostruktureller Ebene eingebrachter Verzug wird bei der Analyse der prozessualen Maßhaltigkeit nicht betrachtet.

Schlussendlich zeigt die Untersuchung, dass im Karosseriebauprozess nur das Geo- sowie das Best Fit-Fügen einen bleibenden Einfluss auf die Maßhaltigkeit haben. Auf Gefügebene muss eventuell der Verzug durch das Ausfügen berücksichtigt werden. Einzig das zueinander Positionieren formschlüssiger Komponenten im Sammler kann als zusätzlicher prozessualer Einflussfaktor nicht ausgeschlossen werden. Davon abgesehen ist einer genauen Toleranzsimulation mit der Abbildung des Karosseriebauprozesses ausschließlich durch die Modellierung des Geo- sowie des Best Fit-Fügens, wie aktuell üblich, genüge getan.

5.3 Gegenüberstellung des Einflusses der verschiedenen Fügeverfahren

Das Widerstandspunktschweißen ist nach wie vor das am häufigsten eingesetzte Fügeverfahren. Mittlerweile haben aber auch andere Verfahren ihren Weg in die Massenproduktion gefunden, besonders bei Aluminiumteilen. Das unterschiedliche Verzugsverhalten durch die unterschiedliche Wärmeinbringung bei den verschiedenen Fügeverfahren ist bekannt [Sko-14, S. 834 ff.]. In diesem Kapitel wird untersucht, ob die verschiedenen Fügeverfahren auch auf prozessualer Ebene, also hinsichtlich des Spann- und Fixierkonzepts, Unterschiede hinsichtlich der Maßhaltigkeit bedingen. Hierzu werden die Fügeverfahren generisch miteinander verglichen und repräsentative Use-Cases hinsichtlich ihrer Maßhaltigkeit untersucht.

5.3.1 Generischer Vergleich der Spanntechnik der Fügeverfahren

Ein Vergleich der in Kapitel 2.3.2.3 vorgestellten Spanntechnik der gängigen Fügeverfahren zeigt, welche Ansprüche die verschiedenen Verfahren generell an die Spanntechnik stellen. Tabelle 5.2 stellt die wichtigsten prozessualen Eigenschaften der vorgestellten Fügeverfahren gegenüber. Ein grundlegender Unterschied zwischen dem Widerstandspunktschweißen, Durchsetzfügen, Stanznieten und Schrauben einerseits und dem Laserschweißen und -löten andererseits ist die Hauptfunktion der Spanntechnik in der Geo-Station. Bei den vorgestellten Pressschweiß- und mechanischen Fügeverfahren wird der Fügespalt durch das Fügewerkzeug bzw. das Fügeelement eingestellt bzw. geschlossen und die Spanntechnik der Station ist ausschließlich auf das Erreichen der benötigten ZB-Maßhaltigkeit ausgelegt. Die Laserfügeverfahren hingegen benötigen aufwendige Spanntechnik zur Einstellung des benötigten Fügespalt. Somit ist die Hauptaufgabe der Spanntechnik nicht die ZB-Maßhaltigkeit sicherzustellen, sondern die

Fügbare zu gewährleisten. Es gibt deutlich mehr Spannelemente, was aber nicht zwangsweise bedeutet, dass die Fügepartner im Sinne der ZB-Maßhaltigkeit lagegenauer ausgerichtet sind.

Die Anforderungen hinsichtlich Zugänglichkeit sind beim Widerstandspunktschweißen und beim Schrauben eher gering. Bei den Fügeverfahren mit Kaltverformung sowie bei den Laserfügeverfahren muss die Zugänglichkeit bei der Komponenten- und Stationsauslegung besonders berücksichtigt werden. Beim Durchsetzfügen und Stanznieten ist das durch die Größe des Fügewerkzeugs bedingt, beim Laserschweißen und -löten muss Platz für die aufwendige Spanntechnik vorgehalten werden.

Tabelle 5.2: Prozessualer Vergleich der betrachteten Fügeverfahren

Fügeverfahren	Punktschweißen	Laserschweißen	Laserlöten	Durchsetzfügen	Stanznieten	Schrauben
Spanntechnik nur zur Erreichung ZB-Maßhaltigkeit	ja	nein	nein	ja	ja	ja
Deutlich überbestimmte Spanntechnik notwendig	nein	ja	ja	nein	nein	nein
Hohe Anforderungen Zugänglichkeit	nein	ja	ja	ja	ja	nein
Zusätzliche Verbindungselemente nötig	nein	nein	ja	nein	ja	ja
Lange Taktzeit	nein	nein	nein	nein	nein	ja

5.3.2 Vergleich der bei verschiedenen Use-Cases erzeugten Maßhaltigkeit

Nachdem die grundsätzlichen Unterschiede bei der Spanntechnik der verschiedenen Fügeverfahren herausgearbeitet wurden, werden repräsentative Anwendungsbeispiele zum maßlichen Vergleich ausgewählt. Die Stabilität der Prozesse wird anhand von Messpunkten, die nur den Einfluss der Geo-Station widergeben, bewertet und gegenübergestellt.

5.3.2.1 Vorstellung der Use-Cases und der Vergleichsmethodik

Pro Fügeverfahren wird die maßliche Stabilität eines oder mehrerer Use-Cases analysiert. Zur besseren Vergleichbarkeit werden die Untersuchungen hauptsächlich an verschiedenen Tür- und Heckdeckelaufbaustufen unterschiedlicher Karosserien durchgeführt, bei denen der gleiche Funktionsumfang mit unterschiedlichen Fügeverfahren hergestellt wird. Welches Verfahren an welchem Karosserie-Use-Case untersucht wird, zeigt Tabelle 5.3. Das Standardverfahren Widerstandspunktschweißen wird an einem Beispiel aus der Use-Case-Gruppe Tür betrachtet, am Fügevorgang der Türverstärkung an das Türinnenteil bei der Karosserie I. Das Laserschweißen wird anhand zweier Use-Cases untersucht: an der Verbindung von Fensterrahmen zu Türinnenteil der Karosserie I und Verstärkung zu Längsträger der Karosserie II. Da das Laserlöten nur in Spezialfällen angewendet wird, wird es nur am Verbinden der beiden Beplankungsteile des Heckdeckels von Karosserie III analysiert. Durchsetzfügen bzw. Clinchen wird an Karosserie I beim Fügen der Beplankung Heckdeckel sowie des Lampentopfes und an Karosserie II analysiert. Das Stanznieten wird an zwei verschiedenen Use-Cases an der Tür der Karosserie III untersucht und das Schrauben anhand des Fügevorgangs der Türverstärkung an das Türinnenteil von Karosserie IV.

Tabelle 5.3: Karosserie-Use-Cases zur Untersuchung der Anlagenstreuung

Fügeverfahren		Use-Case	Punktschweißen	Laserschweißen	Lasertlöten	Durchsetzfügen	Stanznieten	Schrauben
Tür	Fensterrahmen		I			III		
	Türverstärkung	I				III	IV	
Heckdeckel	Bepankung Heck-deckel			III	I II			
	Lampentopf				I			
Längsträgerverstärkung			II					

Nur der Maßhaltigkeitseinfluss der entsprechenden Spanntechnik darf bewertet werden, Störgrößen sind auszuschließen. Eine relevante Störgröße bei der statistischen Analyse der geometrischen ZB-Qualität ist die maßliche Schwankung der Einzelteile. Daher werden nur Messpunkte untersucht, die direkt an einem Spannelement liegen oder ein Fixierloch selbst darstellen, wie schon in Kapitel 5.2. Beispielhaft sei das Vorgehen am untersuchten Fügevorgang Widerstandspunktschweißen des Türinnenteils und der unteren Türverstärkung an der Karosserie I erklärt. Im Fügebereich liegen die Y-Flächen der Fügepartner blockbildend aufeinander, sodass das Y-Maß des entstehenden ZB allein durch die Einzelteilgeometrien bestimmt wird. In X- und Z-Richtung sind die Fügepartner jedoch in einem gewissen Maß zueinander verschiebbar. Diese Ausrichtung wird durch die Fixierstifte der Geo-Station gesteuert, die in die in Abbildung 5.27 markierten Lang- und Rundlöcher eingreifen. Um die Ausrichtungsstabilität der im Falle des Widerstandspunktschweißens charakteristischen Positionierung über Fixierstifte zu untersuchen, wird am fertigen ZB die Position

dieser Aufnahmelöcher zueinander analysiert. Sind die Ausrichtelemente keine Fixierstifte sondern Spannelemente, so wird die im ZB resultierende Position der Spannfläche untersucht.

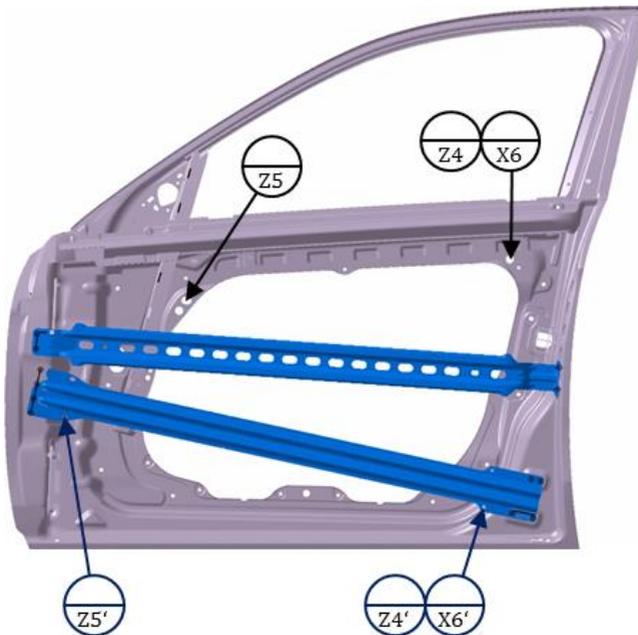


Abbildung 5.27: Untersuchte Messpunkte bei der Türverstärkung der Karosserie I

Zur Analyse der Prozessstabilität werden sowohl Inline- als auch Offline-Messdaten herangezogen. Bei der Verwendung von Serienmessdaten ist die Auswahl des Messzeitraumes entscheidend. Einerseits sollte zur Abschätzung der Prozessfähigkeit der Messzeitraum so lange wie möglich sein. Andererseits besteht bei einem zu lang gewählten Messfenster die Gefahr, dass manuelle Eingriffe, z. B. Regeleingriffe, in den eigentlich automatisierten Prozess die Prozessfähigkeit verfälschen. Es vergrößert sich die auftretende Streuung, ohne dass es dafür im Prozess selbst eine Ursache gibt. Abbildung 5.28 zeigt die Auswahl des Messfensters am Beispiel eines Messpunktes an der Karosserie II.

Es sind Messdaten von August 2013 bis Dezember 2014 dargestellt. Im Mai 2014 wurde manuell eine Störung eingebracht, sodass hier der Mittelwert springt. Um die charakteristische Streuung des Prozesses zu untersuchen, muss nun entweder der Bereich vor oder nach Mai 2014 untersucht werden, siehe Pfeile. In beiden Bereichen streuen die Messwerte in einem Range von ca. 1,0 mm. Alle Messwerte zusammen haben aufgrund des Mittelwertversatzes von 0,5 mm im Mai 2014 einen Range von ca. 1,5 mm, was aber nicht mit der eigentlichen Prozessstreuung korreliert.

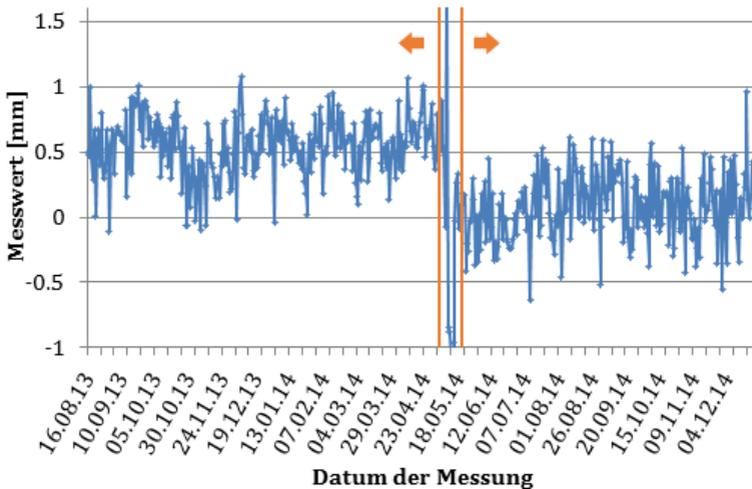


Abbildung 5.28: Messfensterauswahl am Beispiel eines Messpunkts an der Türe der Karosserie II

5.3.2.2 Ergebnis des Vergleichs der Use-Cases

Die Prozessstabilität aller untersuchten Use-Cases wird in Abbildung 5.29 anhand der ermittelten Standardabweichungen der Referenzmessungen veranschaulicht. Die Farbe der Balken zeigt das Fügeverfahren, siehe Legende. Bei Use-Cases, deren maßliche Stabilität in zwei Raumrichtungen untersucht wird, werden diese mit separaten Balken dar-

gestellt. Die Symbole in den Balken vermitteln zusätzlich Informationen zur Spanntechnik, i. e. ob die untersuchte Positionierungsrichtung in der entsprechenden Geo-Station durch Fixierstifte oder Spannelemente eingestellt wird. Teilweise kommen beide Ausrichtelemente gemeinsam zum Einsatz.

Aus dem Diagramm ist ersichtlich, dass kein Fügeverfahren durch eine besonders hohe oder besonders geringe Prozessstabilität auffällt. Werden mehrere Richtungen untersucht, so ist die Schwankung in der Regel zwischen den Richtungen beim selben Use-Case sogar größer als der Unterschied zwischen den einzelnen Fügeverfahren und den damit einhergehenden Unterschieden in der Spanntechnik. Die Standardabweichungen der Ausrichtung in X-Richtung und in Z-Richtung bei der verschraubten Türverstärkung der Karosserie IV unterscheiden sich beispielsweise um mehr als 0,2 mm. Ähnlich ist es bei der punktgeschweißten Türverstärkung der Karosserie I. Die Differenz der Mittelwerte der verschiedenen Use-Cases pro Fügeverfahren ist geringer. Die durch die unterschiedlichen Fügeverfahren bedingte Differenzierung der Spanntechnik hat keinen prinzipiellen Einfluss auf die Prozessgenauigkeit. Die Unterschiede bei der Standardabweichung zwischen den verschiedenen Use-Cases innerhalb eines Fügeverfahrens sind nicht kleiner als die Unterschiede zwischen den Fügeverfahren. Die unterschiedlichen Ziele der Spanntechnik, ob es alleine um die Komponentenausrichtung oder auch um die Unterstützung des Fügeprozesses geht, zeigen keine Auswirkung auf die Prozessgenauigkeit.

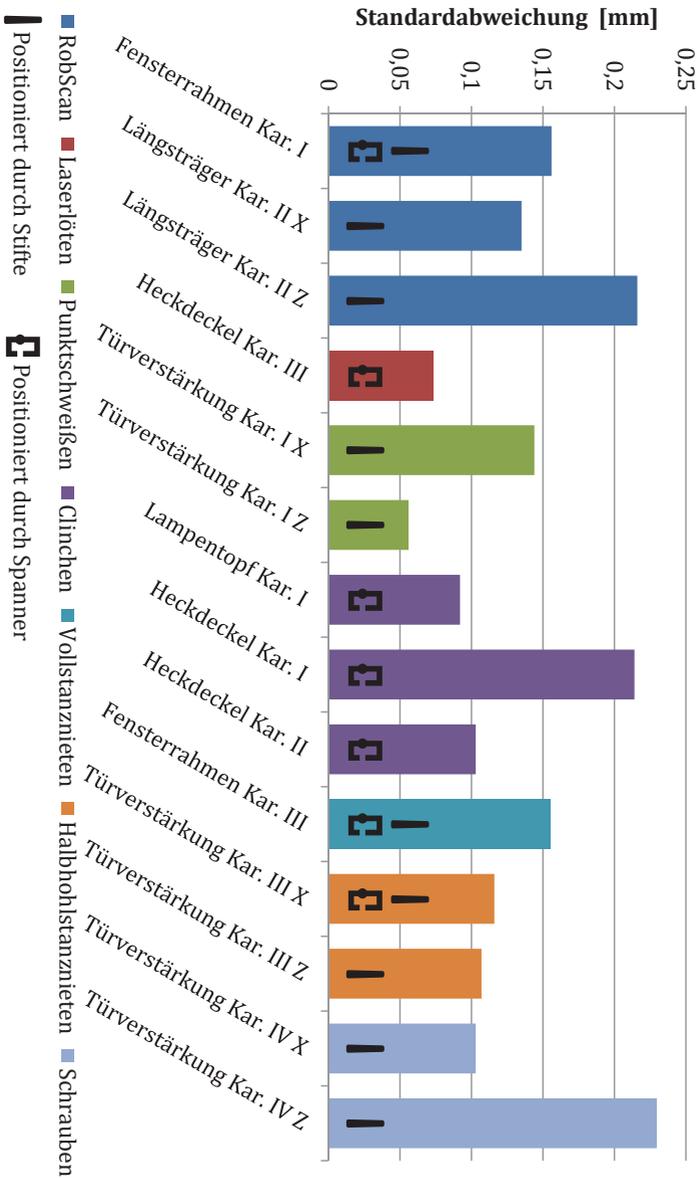


Abbildung 5.29: Ergebnis des Fügeverfahrensvergleichs

5.4 Untersuchung der geometrischen Korrektur durch die Geo-Station

Auf den grundlegenden Einfluss der Geo-Station beim Erreichen der Karosseriemaßhaltigkeit wurde schon mehrmals eingegangen. Die im Karosseriebau erzeugte geometrische Qualität lässt sich durch ein Anpassen der Geo-Stationen beeinflussen, siehe Kapitel 2.3.2.2. Beim Beispiel in Abbildung 5.27 lässt sich das Einstellen der Fügepartner zueinander in X- und Z-Richtung einfach realisieren. Die Fügepartner lassen sich in dieser Ebene relativ frei verschieben. Es werden jedoch auch Fügepartner zueinander eingestellt, deren Kontaktbereiche in der zu verschiebenden Richtung eine Blocksituation bilden. Hier setzt sich die Spanntechnik der Geo-Station über die eigentlich durch die Komponentenform vorgegebene ZB-Geometrie hinweg. Dieses Verhalten wird an einem Use-Case analysiert.

5.4.1 Vorstellung Use-Case

Der ZB Beplankung Seitenwand, dargestellt in Abbildung 5.30, besteht aus fünf Einzelteilen. Im ersten Fügevorgang wird das Einzelteil Beplankung Seitenwand der Karosserie I mit dem unteren Seitenteil und dem Heckdeckelöffnungsblech verbunden. Darauf werden die hintere Schlossverstärkung und der Heckleuchtentopf verschweißt. Die Beplankung Seitenwand ist blau eingefärbt und der Heckleuchtentopf grün. Diese beiden Komponenten werden in Z-Richtung sowie in zwei Schrägen mit X- und Z-Anteil miteinander punktverschweißt, siehe gelbe Punkte in Abbildung 5.31 links. Die beiden Fügepartner befinden sich in X- und Z-Richtung in einer geometrischen Blocksituation. Beim Fügevorgang wird der Heckleuchtentopf wie in Abbildung 5.32 gezeigt von vorne in die Beplankung Seitenwand hineingefahren. Die X- und überwiegend auch die Z-Position der Fügepartner zueinander müssten somit durch die beiden nahezu winkelhalbierend positionierten Flansche beider Komponenten ober- und unterhalb der Spitze

bestimmt werden. Würde die Geo-Station eine andere Ausrichtung erzwingen, so müsste sich mindestens ein Fügepartner an dieser Stelle verformen. Dieses wäre bei einer maßlichen Korrektur durch die Geo-Station der Fall.



Abbildung 5.30: Use-Case ZB Beplankung Seitenwand



Abbildung 5.31: Detailansichten Fügebereich Beplankung Seitenwand und Heckleuchtentopf

Abbildung 5.33 zeigt die Spanntechnik in der entsprechenden Geo-Station. Der Heckleuchtentopf ist hier durch die orange Einfärbung hervorgehoben. Im Gegensatz zu Abbildung 5.30 wird der Umfang hier von der Innenseite gezeigt, die Beplankung Seitenwand liegt also mit der Außenseite nach unten gerichtet auf.

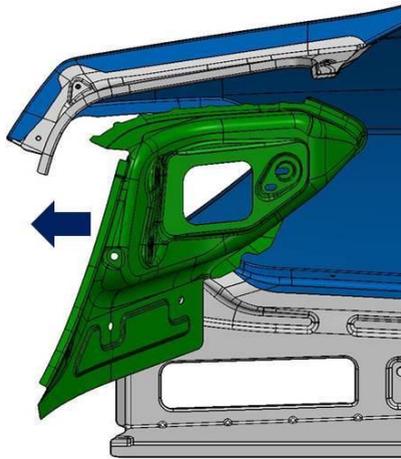


Abbildung 5.32: Verfahrweg des Heckleuchtentopfes beim Einlegen in die Beplankung Seitenwand

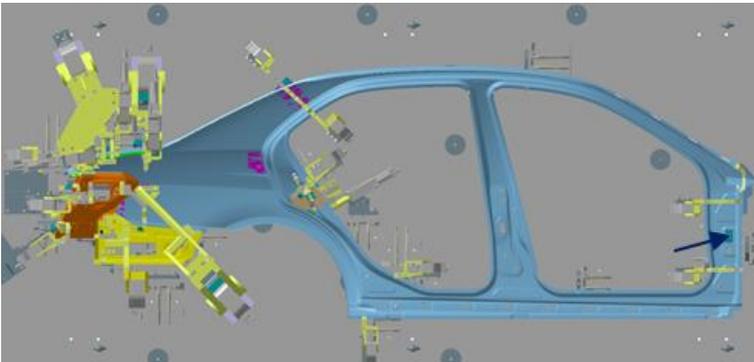


Abbildung 5.33: Geo-Station zum Fügen des Heckleuchtentopfes an die Beplankung Seitenwand

Die durch die Beplankung Seitenwand lila durchscheinenden Flächen sind die Außenhautauflagen bzw. -spannelemente. Da die Beplankung Seitenwand ein sehr großflächiges, dünnes und damit labiles Einzelteil ist, kommt im hinteren Bereich zum Fügen des Heckleuchtentopfes besonders in Y-Richtung umfangreiche Spanntechnik zum

Einsatz. Die X-Ausrichtung der Beplankung Seitenwand wird über das mit einem Pfeil gekennzeichnete Pastillenloch in der A-Säule realisiert. Überdies gibt es nur X-Spannelemente im Bereich der hier auch gefügten Schlossverstärkung und ganz hinten an der Seitenwandspitze über dem Heckleuchtentopf.

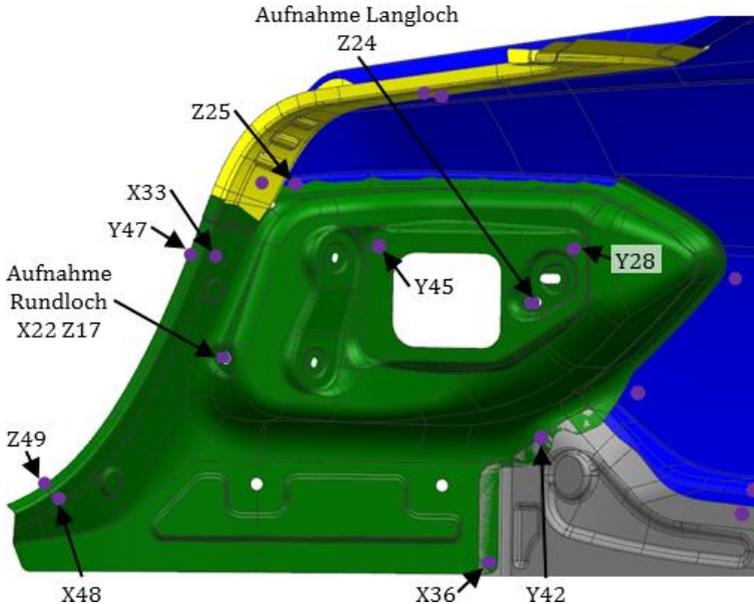


Abbildung 5.34: SFK des Heckleuchtentopfes beim Fügen mit der Beplankung Seitenwand

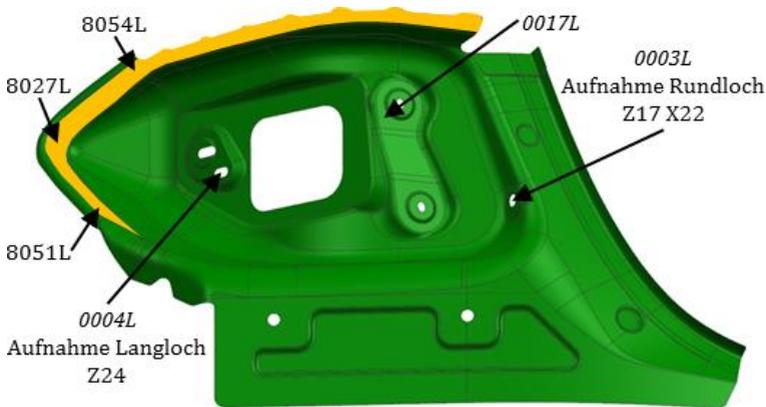
Die Spanntechnik, die den Heckleuchtentopf ausrichtet, ist in Abbildung 5.34 schematisch dargestellt. Die Spannelemente und die beiden Fixierstifte sind durch violette Markierungen gekennzeichnet und mit ihren SFK-Namen gekennzeichnet, wobei der Buchstabe die Hauptspannrichtung angibt. Genauso wie bei der Beplankung Seitenwand kommen hier viele Y-Spannelemente zum Einsatz. Es gibt zwei X-Spannelemente, X33 und X36. Hauptsächlich, weil im Gegensatz zu den gespannten Flanschen nicht verformbar, wird die Komponente in X-Richtung jedoch durch das Fixierloch ausgerichtet, siehe X22.

Wird der Heckleuchtentopf in der Geo-Station entgegen seiner durch die Komponentengeometrie bestimmten Passung in X-Richtung ausgerichtet, so arbeiten die genannten Ausrichtelemente im Heckleuchtentopf und in der Beplankung Seitenwand gegen die Fügeflansche beider Komponenten. Nachdem der beschriebene Umfang fertiggestellt ist, wird der ZB Beplankung Seitenwand mit weiteren Komponenten zum ZB Seitenwand vollständig aufgerüstet und schließlich der Karosseriebau-Hauptlinie zugeführt. Im beschriebenen Bereich des Heckleuchtentopfes finden dabei bis zur Hauptlinie keine Fügevorgänge mehr statt.

5.4.2 Methodik und Ergebnis der Untersuchung

Zur Analyse, ob sich die entstandene ZB-Geometrie an den Einzelteilmaßen oder an den in diesem Fall abweichenden Geo-Stationseinstellungen orientiert, wird die X-Position des Heckleuchtentopfes in der Beplankung Seitenwand untersucht. Es muss wieder darauf geachtet werden, die Einflüsse der Streuungen der Einzelteile auszugrenzen. Daher werden die ZB-Messungen, die die Ausrichtungsgenauigkeit der Geo-Station wiedergeben, angepassten Einzelteilmessdaten gegenübergestellt.

Um das Einzelteil Heckleuchtentopf maßlich zu bewerten, werden die taktil erzeugten Messwerte von 26 Teilen analysiert. Die dabei betrachteten Messpunkte zeigt Abbildung 5.35. Der Fügeflansch, der formschlüssig mit der Beplankung Seitenwand einen X- und Z-Block bildet, ist gelb eingefärbt. Die Messpunkte 8027L, 8051L und 8054L geben Aufschluss über die Lage des Fügeflansches. Sie werden auf Messpunkt 0003L bezogen ausgewertet, der X-Bezugsstelle der Einzelteilmessung. An diesem Loch wird der Heckleuchtentopf auch in der Geo-Station in X-Richtung ausgerichtet, siehe Fixierstift X22 in Abbildung 5.34. Da nur der im ZB entstehende X-Block untersucht wird, wird bei den auf der Schrägen liegenden Messpunkten der X-Anteil des Messwertes herausgerechnet.

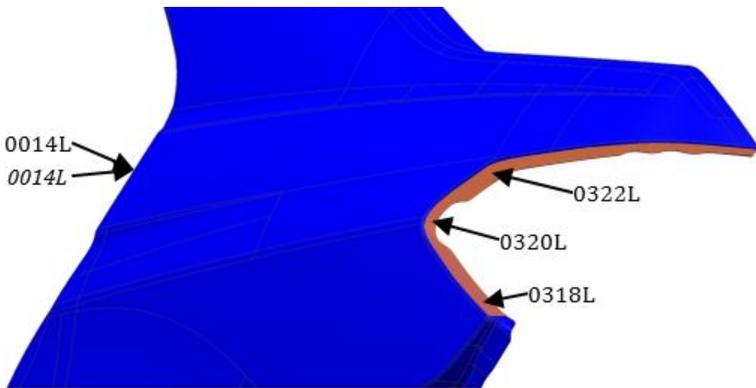


8054L – taktile Einzelteilmesspunkte

0017L – Inlinemesspunkte

Abbildung 5.35: Untersuchte Messpunkte am Heckleuchtentopf

Von dem anderen betrachteten Fügepartner, der Beplankung Seitenwand, werden 51 taktile Einzelteilmessungen ausgewertet. Wie beim Heckleuchtentopf handelt es sich um Offline-Messungen, sodass die verwendeten Messdaten über einen Zeitraum von mehreren Jahren hinweg gesammelt wurden. Die Lage des ocker eingefärbten Fügeflansches wird auch hier durch drei Messpunkte analysiert, siehe Abbildung 5.36, von denen nur die X-Komponente extrahiert wird. Die X-Bezugsstelle sowie das Ausrichtloch in der Geo-Station ist bei der Beplankung Seitenwand das Pastillenloch an der A-Säule, siehe Abbildung 5.33. Der Anschlussbereich zum Heckleuchtentopf liegt von diesem Referenzpunkt ca. 3000 mm entfernt, sodass beispielsweise Fehlstellungen im Bereich der dazwischenliegenden Türöffnungen die Messwerte und damit die Messdatenanalyse verfälschen können. Daher wird für den Vergleich ein neuer X-Referenzpunkt im Fügebereich der Schlossverstärkung gewählt, 0014L. Die Messpunkte 0318L, 0320L sowie 0322L werden bezogen auf 0014L ausgewertet und auch bei der ZB-Messung wird die Lage des Heckleuchtentopfes auf diesen Messpunkt bezogen.



0014L - taktile Einzelteilmesspunkte

0014L - Inlinemesspunkte

Abbildung 5.36: Untersuchte Messpunkte an der Beplankung Seitenwand

Es werden ca. 10 000 Inline-Messdatensätze des ZB aus einem Zeitraum von zwei Monaten analysiert. Abbildung 5.37 zeigt am oberen Bildrand die Einzelteil-Maßkette, die mit den ZB-Messungen, am unteren Bildrand ersichtlich, abgeglichen wird. Die Darstellung bezieht sich bei den Einzelteilmessungen exemplarisch nur auf die Messpunkte vorne in der Spitze des Fügebereichs. Im Bild wird noch einmal verdeutlicht, dass alle auf die Beplankung Seitenwand bezogenen Messungen relativ zum Messpunkt 0014L gesetzt sind.

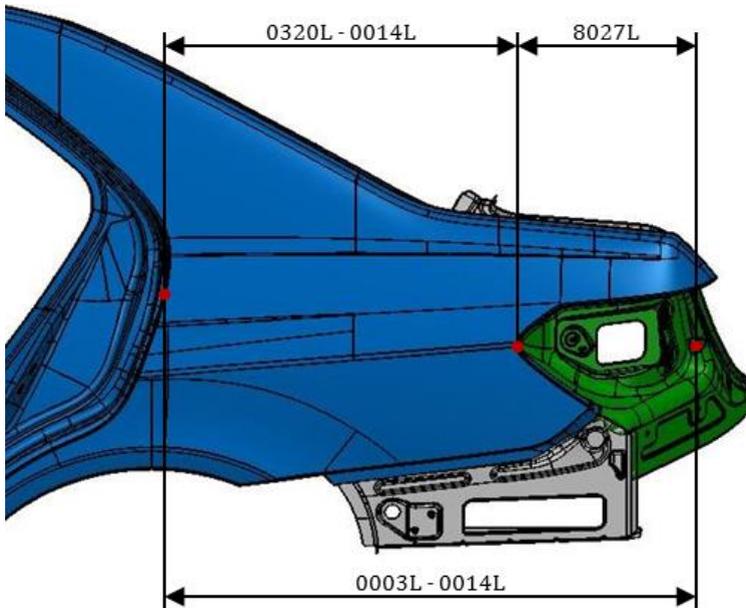


Abbildung 5.37: Gegenüberstellung der Einzelteil- und der ZB-Messungen

Tabelle 5.4 zeigt die Mittelwerte und die Standardabweichungen der Messpunkte auf den Fügeflanschen von Heckleuchtentopf und Beplankung Seitenwand sowie der ZB-Messungen. Die Anordnung der Einzelteilmesspunkte richtet sich nach der Position der Messpunkte auf dem Fügeflansch. Die positiven Mittelwerte der Messpunkte auf dem Flansch des Heckleuchtentopfes bedeuten, dass der Flansch in Fahrzeugrichtung zu weit hinten ist. Die Mittelwertabweichungen sind zwar sehr gering und einer der Messpunkte zeigt eine negative Abweichung. Da der Scheitelpunkt des Flanschdreiecks aber mit 0,32 mm im positiven Bereich liegt, ist die X-Distanz zwischen Flansch und X-Referenzloch im Heckleuchtentopf tendenziell zu kurz. Auch bei der Beplankung Seitenwand zeigen die Messwerte, dass der Flansch in Fahrzeugrichtung nach hinten abweicht. Der Mittelwert ist bei allen drei Messpunkten zu groß.

Tabelle 5.4: Messergebnisse der Einzelteile und des ZB Beplankung Seitenwand, X-Anteile in Netzrichtung in [mm]

Messgröße		Mittelwert	Standardabweichung
Heckleuch- tentopf	8054L	-0,09	0,07
	8027L	0,32	0,12
	8051L	0,21	0,12
Beplankung Seitenwand	0322L - 0014L	0,45	0,24
	0320L - 0014L	0,20	0,30
	0318L - 0014L	0,20	0,23
ZB	0003L - 0014L	-1,60	0,08

Vergleicht man jeweils die Messpunkte von Heckleuchtentopf und Beplankung Seitenwand, die in etwa an derselben Stelle liegen, so ergibt sich folgendes Bild: Wäre die Blocksituation im oberen Flanschbereich maßgebend für die Position des Heckleuchtentopfes im ZB, so würde dieser 0,54 mm zu weit hinten positioniert sein. Würde dieselbe Annahme für den Scheitelpunkt getroffen, wie in Abbildung 5.37 dargestellt, betrüge die Fehlstellung -0,12 mm. Beim unteren Flanschbereich wären es -0,01 mm. Vermittelt man diese drei resultierenden Werte, so müsste der Heckleuchtentopf recht genau bei null liegen bzw. leicht nach fahrzeughinten verschoben sein. Die Messwerte aus Tabelle 5.4 zeigen aber, dass der Heckleuchtentopf im ZB mit -1,60 mm deutlich zu weit vorne positioniert ist. Die Geo-Station stellt hier das Maß unabhängig von der geometrischen Gestalt der Einzelteile her. Somit ist bewiesen, dass über die Geo-Station trotz einer geometrischen Blocksituation der Fügepartner ein Schließmaß eingestellt werden kann. Eine sich dadurch ergebende Verformung der Einzelteile wird in Kauf genommen.

Die Standardabweichung von den Einzelteil- und den ZB-Messungen ist nicht vergleichbar, da sich das zeitliche Messfenster deutlich unterscheidet. Trotzdem sticht heraus, dass die ca. 10 000 Messungen des

ZB eine geringere Standardabweichung als die wenigen Einzelteilmes-
sungen aufweisen.

Der hier beschriebene Use-Case ZB Beplankung Seitenwand wird ebenso auf der rechten Fahrzeugseite analysiert und bestätigt dabei die für die linke Seite gewonnenen Erkenntnisse. Bei diesen Beispielen kann die eigentlich nicht den Einzelteilgeometrien entsprechende ZB-Form durch die Schweißpunkte auf dem pfeilförmigen Fügeflansch (siehe Abbildung 5.31) eingefroren werden. Die Fügepunkte in der winkelhalbierenden Ebene erschweren ein Zurückspringen, nachdem der ZB aus der Geo-Station entnommen wird. Beim Use-Case zweite Längsträgerebene I gibt es diese Verkeilung zwischen den Fügepartnern nicht. Es wird der in Abbildung 5.38 gelb eingefärbte Längsträger in X-Richtung auf die ockerfarbene A-Säule gefügt. Hierbei entsteht ein X-Block und trotzdem wird der Längsträger in X-Richtung durch die Geo-Station eingestellt. Ein möglicher Rücksprung nach der Entnahme aus der Geo-Station wird weniger behindert als beim ersten Beispiel. Bei der maßlichen Untersuchung dieses Use-Cases zeigt sich, dass die Position des Längsträgers im ZB nicht den realen Einzelteilgeometrien entspricht, sondern von der Geo-Station bestimmt wird. Die durch die Geo-Station erzwungene Position bleibt erhalten. Somit wird das Ergebnis aus dem oben ausführlich erläuterten Beispiel ZB Beplankung Seitenwand auch hier noch einmal bestätigt.

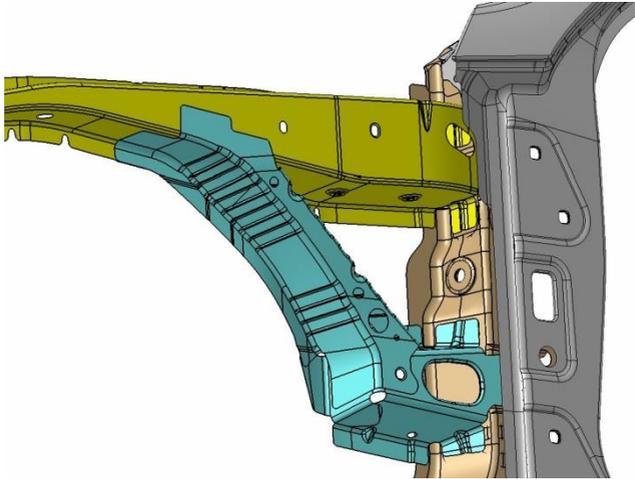


Abbildung 5.38: Use-Case zweite Längsträgerebene I [vgl. Wis-13, S.88]

5.5 Analyse der Materialbeanspruchung der Komponenten in der Geo-Station

Setzt sich das durch die Geo-Station eingestellte Schließmaß über die Komponentengeometrie der Fügepartner hinweg, so werden diese elastisch oder plastisch verformt. Elastische Verformung kann in der Toleranzsimulation durch integrierte FEM-Berechnungen, siehe Kapitel 2.6.2, berücksichtigt werden. Für plastische Verformungen gibt es aufgrund der Nichtlinearität aktuell keine statistische Abbildungsmöglichkeit. Wie in Kapitel 2 ausgeführt, ist die elastische Toleranzsimulation nur durch die Methode der reduzierten Steifigkeitsmatrizen mit praxistauglichem Aufwand umsetzbar. Bei nichtlinearer, plastischer Verformung kann diese Methode nicht eingesetzt werden. Deshalb wird mit Hilfe einer FEM-Simulation eines Fügeprozesses die dort entstehende Materialbelastung nachgestellt und untersucht.

5.5.1 Simulationsmethodik

Am Beispiel aus Kapitel 5.4.1 wird die Art der auftretenden Verformung untersucht. Hierzu wird der Fertigungsprozess nachmodelliert, siehe Abbildung 5.39. Die Fügepartner werden vermessen, deren CAD-Datensätze vernetzt und die Netze durch Morphing so verformt, dass die Ist-Geometrie abgebildet wird. Somit wird der Kritikpunkt von [Dah-05] adressiert, der die bisher vernachlässigte Abbildung realer Einzelteilabweichungen als Defizit einstuft. Das Einlegen der Beplankung Seitenwand in die Sammelvorrichtung wird durch das Heranfahren der in Stationslage unten liegenden Auflagen und die Zuführung des Heckleuchtentopfes als lineare Bewegung in X-Richtung nachgebildet. Der Transfer von der Sammelstation in die Geo-Station ist für die Simulation der Verformungsart nicht relevant. Das Schließen der Spannelemente wird zweiteilig abgebildet, da auch im realen Prozess die Spannelemente der Beplankung Seitenwand vor den Spannelementen am Heckleuchtentopf schließen. Im FEM-Model fahren dazu an jeder Spannfläche zwei starre, ebene, kleine quadratische Hilfsnetze zusammen. Das Setzen der Geo-Schweißpunkte wird ebenso durch zwei die Fügepartner zusammendrückende starre Hilfsnetze abgebildet, die zur Modellierung des entstandenen Schweißpunktes zusammengepresst bleiben. Nachdem das Wegfahren der Hilfsnetze das Öffnen der Spannelemente nachstellt, wird das Setzen der Ausschweißpunkte analog den Geo-Punkten modelliert.

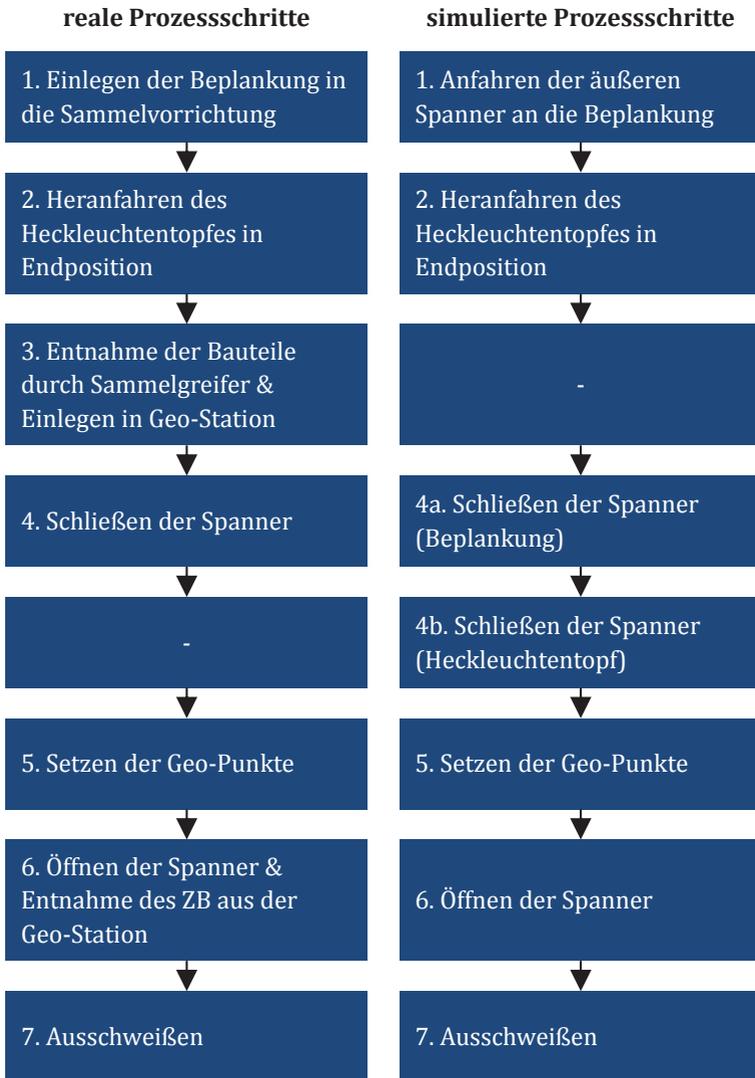


Abbildung 5.39: Vergleich der realen Prozesskette mit der entwickelten Simulationsmethodik [vgl. Mov-14, S. 65]

5.5.2 Validierung

Ziel der FEM-Simulation ist es, die in den Fügepartnern auftretenden Spannungen zu untersuchen. Die FEM-Simulation gibt aber nicht nur die Spannungswerte, sondern auch die Verformungswerte aus. Diese können zur Validierung der FEM-Simulation herangezogen werden. Hierzu wird der aus den vermessenen Fügepartnern real entstandene ZB nach seiner Fertigstellung vermessen und mit der geometrischen Gestalt des digital entstandenen ZB verglichen. Abbildung 5.40 stellt die dazu verwendeten acht Messpunkte dar. Die Resultate der Validierung in Tabelle 5.5 zeigen, dass die simulierten Verformungen zwar deutlich kleiner als die real gemessenen, qualitativ jedoch durchgängig richtig sind. Das Delta zwischen simulierter und gemessener Verformung beträgt maximal 0,3 mm, was unter Berücksichtigung der Messungenauigkeit von ca. 0,1 mm absolut gesehen gering ist, jedoch an Messpunkten mit kleiner Verformung zu einem hohen relativen Delta führt. Qualitativ stimmen die Simulationsergebnisse durchgängig aber auch hier. Die Simulation ermöglicht prinzipiell also auch in diesem Falle die Analyse der Materialbeanspruchung,

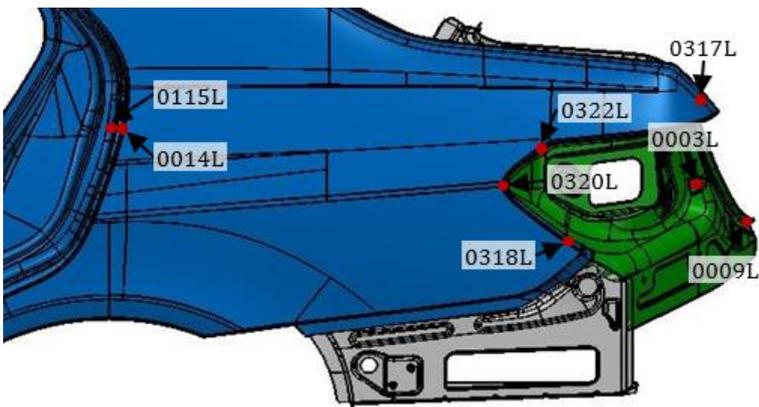


Abbildung 5.40: Messpunkte zur Validierung der Simulationsmethodik

Tabelle 5.5: Validierung der Simulationstechnik mit Messdaten[vgl. Mov-14, S. 69]

Messpunkt	Verformung FEM-Simulation [mm]	Verformung gemessen [mm]	delta [mm]
0014L	-0,15	-0,19	0,04
0115L	-0,12	-0,19	0,07
0317L	1,26	1,52	0,26
0322L	-0,06	-0,21	0,15
0320L	0,08	0,18	0,11
0318L	0,22	0,50	0,28
0003L	-0,82	-1,12	0,30
0009L	-0,59	-0,80	0,21

Punkte mit kleiner Verformung, i.e. kleiner Abweichung sind für die Untersuchung jedoch generell weniger interessant. Schlussendlich bildet die Simulation das Verformungsverhalten mit hinreichender Genauigkeit und systematisch korrekt ab, die Verformungswerte und damit auch die Materialbeanspruchung liegen jedoch unter den realen Werten.

5.5.3 Ergebnisse

Abbildung 5.41 zeigt die ermittelte Materialbeanspruchung in Form der von Mises-Vergleichsspannung während des Geo-Fügens. Der bei der Beplankung Seitenwand verwendete Stahl DC05 hat eine Streckgrenze zwischen 140 und 180 MPa [DIN-07]. Schon die simulativ ermittelten Werte, die wie erläutert unter den realen Werten liegen, zeigen Spannungsspitzen von über 200 MPa. Großflächig werden in den Bereichen der Füge- und Ausrichtpunkte, beispielweise an der oberen Kante des Heckleuchtenausschnittes, Spannungswerte von über 180 MPa erreicht, sodass das Material hier plastisch verformt

wird. Beim in Abbildung 5.42 dargestellten Ausschweißen wird das Material der Beplankung Seitenwand sogar noch stärker beansprucht.

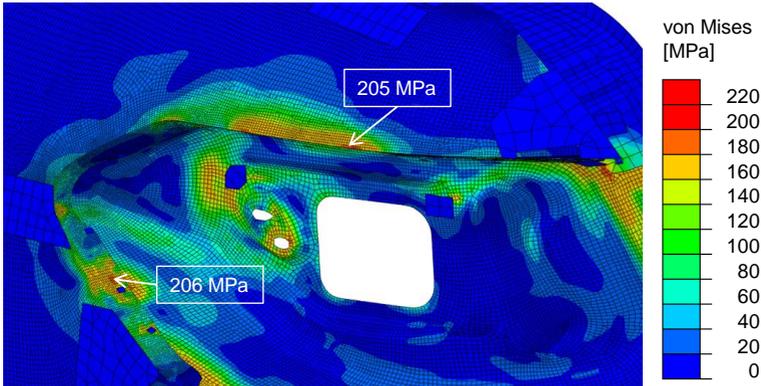


Abbildung 5.41: von Mises-Vergleichsspannung im ZB beim Geo-Schweißen [Mov-14, S. 73]

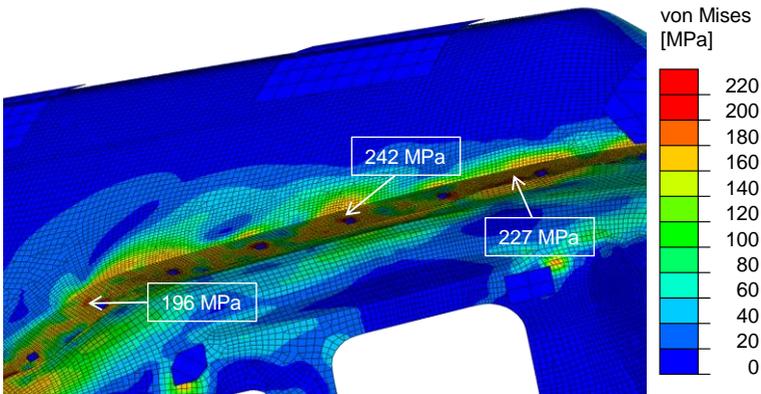


Abbildung 5.42: von Mises-Vergleichsspannung im ZB beim Ausschweißen [Mov-14, S. 74]

Die FEM-Spannungsanalyse zeigt, dass die Belastung der Fügepartner durch die erzwungene Ausrichtung in der Geo-Station zu Verformun-

gen der Komponenten im plastischen Bereich führt. Wird zusätzlich noch berücksichtigt, dass auch die Position des Fügwerkzeuges toleranzbehaftet ist, ist ein weiteres Ansteigen der Materialbelastung möglich. Im untersuchten Fall trägt die geometrische ZB-Konfiguration dazu bei, dass das durch die Geo-Station erzwungene Schließmaß konserviert wird. Bei Anwendungsfällen, wo dieses nicht sichergestellt ist, wird die plastische Verformung sogar benötigt um Rücksprungseffekte zu begrenzen.

Das Auftreten von plastischer Verformung im Karosseriebauprozess stellt den Vorteil der elastischen Toleranz-Simulation in Frage. Aufbau und Durchführung einer elastischen Toleranz-Simulation sind gegenüber einer starren statistischen Simulation deutlich aufwendiger. Wenn auch die elastische Simulation die Realität nur unzureichend nachbilden kann, muss dieser Mehraufwand kritisch hinterfragt werden. Ggf. sollten andere Abbildungsformen des Verhaltens in der Geo-Station in Betracht gezogen werden.

5.6 Zusammenfassung

Zur Untersuchung des Abweichungsverhaltens von ZB wird zum einen der komplette Karosseriebauprozess ganzheitlich analysiert. Hierzu werden alle auftretenden Prozessschritte katalogisiert. Dieses wird anhand der umfassenden Prozessanalyse einer Karosseriefabrik durchgeführt, durch internationale Recherchen wird der Ausarbeitung Allgemeingültigkeit verliehen. Auf Basis des entwickelten Prozesskatalogs werden Prozessgruppen gebildet, die einzeln untersucht werden.

Als Methodik zur analytischen Bewertung des Einflusspotenzials auf die Maßhaltigkeit wird ein Entscheidungsbaum entwickelt. Mit Hilfe dessen werden die Prozessgruppen in (potenzielle) Einflussfaktoren und einflusslose Prozesse unterteilt. Zur Validierung werden mit statistischer Versuchsplanung mehrere Experimente durchgeführt, die das Ergebnis der Vorklassifizierung hauptsächlich bestätigen. Lediglich

der Einfluss von Sammler-Stationen im Karosseriebauprozess kann nicht vollständig geklärt werden.

Zum anderen wird der Einfluss des Fügens als abweichungsentscheidender Prozessschritt im Detail analysiert. Die verschiedenen Füge-techniken bedingen unterschiedliche Spanntechnik in der Geo-Station, die für die Positionierung der Fügepartner während des Fügevorgangs zuständig ist. Die unterschiedlichen Anforderungen an die Spanntechnik durch die verschiedenen Verfahren werden analytisch gegenübergestellt. Dabei wird der zentrale Unterschied herausgearbeitet, dass bei manchen Verfahren die Spanntechnik in erster Linie die geometrische Konfiguration im Fügebereich herstellen muss, während bei anderen Verfahren die gesamte Positionierung der Fügepartner zueinander und somit die resultierende Maßhaltigkeit im Mittelpunkt steht. Anschließend werden repräsentative Use-Cases für die einzelnen Fügeverfahren ausgewählt und hinsichtlich ihrer Prozessstreuung untersucht. Die Analyse zeigt, dass obwohl sich die Konzepte der Spanntechnik deutlich unterscheiden, dieses keinen generischen Einfluss auf die resultierende Maßhaltigkeit der ZB ausübt.

Zudem wird untersucht, inwieweit sich nicht maßhaltige Pressteile im Karosseriebauprozess in Form ziehen lassen, sodass am Ende doch ein maßhaltiger ZB entsteht. Messdaten von Einzelteilen und daraus entstehenden ZB werden in signifikanter Zahl miteinander verglichen. Es wird ermittelt, dass die Geo-Station für die resultierende Genauigkeit ausschlaggebend ist. Durch den Fügeprozess werden auch ZB in die Maßhaltigkeit gezogen, deren geometrischer Aufbau das aufgrund von Blockbildung der maßlich abweichenden Pressteile eigentlich nicht zulässt.

Diese Manipulation im Karosseriebauprozess bedingt eine elastische oder eventuell sogar plastische Verformung der Pressteile. Der Verformungszustand wird anhand eines Use-Cases detailliert untersucht. Es wird eine Methodik entwickelt, mit der der Fügevorgang auf geometrischer Ebene nachgebildet werden kann. Mittels einer mehrglied-

rigen FEM-Berechnung können die Verformungen und die Spannungszustände der Fügepartner ermittelt werden. Die Validierung der Methodik erfolgt über den Abgleich von rechnerisch und messtechnisch ermittelten Verformungen. Die Methodik zeigt anhand des Use-Cases auf, dass die Fügepartner in der Geo-Station plastisch verformt werden. Diese Feststellung verschlechtert die Kosten-Nutzen-Bilanz der elastischen Toleranzsimulation, da somit dort trotz enormen Rechenaufwands nicht alle auftretenden Verformungsverhalten abgebildet werden.

6 Implementierung der Ansätze zur Kompensation von Simulationsdefiziten

Der Analyse des in der Praxis gängigen Abbildungsumfanges und der Methodik bei der Toleranzsimulation in Kapitel 2 folgt die Untersuchung des realen Abweichungsverhaltens beim Karosserieformen und im Karosseriebauprozess in Kapitel 4 und 5. Im vorliegenden Kapitel wird die dem aktuellen Stand der Technik entsprechende Simulationstechnik dem realen Abweichungsverhalten gegenübergestellt und es werden Vorschläge aufgezeigt, wie die Simulation durch die in dieser Arbeit entwickelten Erkenntnisse näher an das reale Abweichungsverhalten herangeführt werden kann. Dies wird untergliedert in die realitätsnähere Abbildung der Einzelteilabweichungen, den Abbildungsumfang und die optimierte Abbildungsform der Prozessstreuungen behandelt. Letztgenannte wurde mit der Unterstützung des Studenten Jonathan Litwar [Lit-14] entwickelt. Inhaltlich mit diesem Kapitel in Zusammenhang stehende Ergebnisse wurden in [Kli-14] und [Kli-15] veröffentlicht.

6.1 Modifizierung der Abbildungsformen von Pressteilstreuungen

Kapitel 4.2 zeigt eine Methodik auf, wie Pressteilstreuungen bereits im Entwicklungsprozess abgeschätzt werden können. Wird bei der Abbildung von Pressteilstreuungen nur auf die Toleranzspezifikation zurückgegriffen, kann das in der Realität inhomogene Streuungsverhalten nicht abgebildet werden. Beim weiterentwickelten Prognosemodell

kann für jeden Punkt auf dem Pressteil eine individuelle Streuungsvorhersage getroffen werden.

Um das Abweichungsverhalten von schon physikalisch existierenden Einzelteilen besser abzubilden und generische Streuungsuntersuchungen durchzuführen, kann das entwickelte Visualisierungstool herangezogen werden. Das Tool kann geometrische und statistische Informationen zugleich veranschaulichen. So können Abweichungsphänomene leichter bzw. überhaupt erfasst werden.

6.2 Abbildungsumfang der Prozessstreuungen

In Kapitel 5 wird die gängige Praxis, aus dem gesamten Karosseriebauprozess nur die Einzelteilabweichungen und die Ausrichtung in der Geo-Station bei Toleranzsimulationen abzubilden, in Frage gestellt. Die umfassende Prozessanalyse zeigt jedoch, dass dieser Abbildungsumfang ausreichend ist. Lediglich die Sammler-Station konnte nicht generisch bewertet werden. Abgesehen davon muss bei einer sorgfältigen Auslegung und Ausführung der Karosseriebauprozesskette kein weiterer prozessualer Einfluss auf die Maßhaltigkeit berücksichtigt werden.

6.3 Modifizierung der Abbildungsformen von Prozessstreuungen

Für die in Kapitel 5.4 nachgewiesene Dominanz der Geo-Station bei der Erzeugung der geometrischen Qualität eines ZB aus nachgiebigen Fügepartnern wird ein modifizierter Simulationsansatz entwickelt. Bei Typ 2-ZB (siehe Kapitel 2.5.2) muss die Geo-Station mit einer größeren Gewichtung in der Simulation abgebildet werden. Anhand mehrerer Use-Cases, bei denen die Ausrichtung durch die Geo-Station einen

größeren maßlichen Einfluss als die Blockbildung der Fügepartner hat, werden verschiedene Modellierungsansätze gegenüber gestellt:

- V1: Stand der Technik der starren Toleranzsimulation
- V2: Ausrichtung der Fügepartner wenn möglich nur über Positionierungselemente der Geo-Station
- V3: V2 + Vermittlung mehrerer Ausrichtelemente

Die Methodik der einzelnen Simulationsansätze wird im Folgenden genauer erläutert. Im ersten Schritt wird die Simulation des Use-Case nach der starren, in der industriellen Anwendung üblichen Methode aufgebaut (V1). Bei der Version V2 werden gegenüber den blockbildenden Komponentenbereichen die positionsbestimmenden Geo-Station-Elemente bevorzugt als Ausrichtepunkte gewählt. Die Version V3 stellt zusätzlich zu V2 eine Vermittlung zwischen mehreren Ausrichtelementen dar. Der Effekt einer überbestimmten Ausrichtung (siehe Kapitel 2.3.2.2) wird durch Vermittlung mehrerer Ausrichtelemente zu einem Ausrichtelement approximiert und die Einschränkung der starren Simulation abgeschwächt. Es wird untersucht, ob mit dem Ansatz der Vermittlung der Einfluss bestimmter Ausrichtelemente reduziert oder gesteigert werden kann. Wird die Ausrichtgenauigkeit zweier Ausrichtelemente rechnerisch vermittelt, so ist zu beachten, dass sich die Streuung durch die mathematische Ausmittlung der Monte Carlo-Ergebnisse verringert.

Als erster Use-Case wird der in Kapitel 5.4 vorgestellte ZB Beplankung Seitenwand mit den verschiedenen Ansätzen simuliert. Das Ausrichtkonzept des Heckleuchtentopfes wird in Abbildung 5.34 vorgestellt. Abbildung 6.1 zeigt die relevanten Spann- und Fixierstellen der Beplankung Seitenwand in der Geo-Station. Das untere Seitenteil ist bereits gefügt. Bei „Z4 X6“ sowie „Z5“ handelt es sich um Fixierlöcher, der Rest sind Spannstellen. Ebenso gekennzeichnet sind der Referenzmesspunkt unterhalb von „Z4 X6“ und der als Referenzpunkt herangezogene Messpunkt „0014L“. Da „Z4 X6“ im Karosseriebauprozess oft als

Aufnahmeloch verwendet wird und somit einem gewissen Verschleiß unterliegt, ist der Referenzmesspunkt bewusst abgegrenzt.

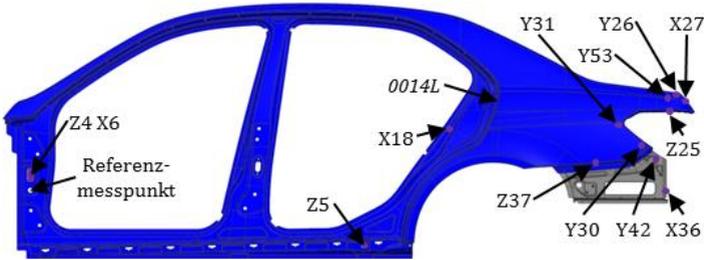


Abbildung 6.1: Ausschnitt aus dem SFK der Beplankung Seitenwand beim Fügen mit dem Heckleuchtentopf

In Tabelle 6.1 sind die für die Modellierung gewählten Ausrichtelemente des Heckleuchtentopfes aufgelistet. Anhand der statisch bestimmten sechs Ausrichtelemente wird die Funktion der gewählten Spann- und Fixierstellen verdeutlicht. Da der Heckleuchtentopf eine relativ kompakte Komponente ist, wird sie nicht so massiv überbestimmt aufgenommen wie die Beplankung Seitenwand. Somit fällt die Entscheidung leichter, welche Ausrichtelemente für die Simulation herangezogen werden. In der betrachteten X-Richtung wird die Komponente über ein Fixierloch ausgerichtet.

Tabelle 6.1: Ausrichtung des Heckleuchtentopfes

Ausrichtelemente	V1 & V2	V3
Y1	Y28	Y28 & Y45
Y2	Y42	Y42
Y3	Y47	Y47
Z4	Z17	Z17
Z5	Z24	Z24
X6	X22	X36 & (X22 & X33)

Somit unterscheiden sich V1 und V2 nicht, da auch bei der üblichen Herangehensweise in diesem Fall das Fixierloch als positionsbestimmend abgebildet wird. Beim vermittelnden Ansatz (V3) wird der Einfluss verschiedener Ausrichtelemente zusammengerechnet. Werden mehr als zwei Ausrichtelemente miteinander verrechnet, so muss priorisiert werden, in welcher Reihenfolge vermittelt wird. Im Beispiel haben beim X6-Äquivalent die Positionsgenauigkeiten von X22 sowie X33 jeweils 25 % und X36 50 % Einfluss.

Auch beim Fügepartner Beplankung Seitenwand unterscheidet sich die Ausrichtung in der betrachteten X-Richtung zwischen V1 und V2 nicht, siehe Tabelle 6.2. Da in diese Richtung über ein Fixierloch ausgerichtet wird, wird dieses auch im herkömmlichen Simulationsaufbau als Ausrichtelement herangezogen. In der Variante V2, die die Ausrichtung über die Geo-Station widerspiegelt, wird lediglich die Y-Ausrichtung ergänzt, da bei einer Komponente dieser Größe und Stabilität eine Ausrichtung über nur drei Y-Spannelemente physikalisch nicht darstellbar ist. V3 stellt den Vermittlungsansatz und somit den Einfluss von fünf Y-Spannelementen und drei X-Ausrichtelementen dar.

Das Ergebnis der wie beschrieben aufgebauten Simulationsvarianten im Vergleich mit den Inline-Messdaten zeigt Abbildung 6.2 anhand der sechsfachen Standardabweichungen.

Tabelle 6.2: Ausrichtung der Beplankung Seitenwand

Ausrichtelemente	V1	V2	V3
Y1	Y31	Y30 & Y31	Y30 & Y31
Y2	Y42	Y42	Y26 & Y53
Y3	Y53	Y53	Y42
Z4	Z4	Z4	Z4
Z5	Z5	Z5	Z37
X6	X6	X6	X27 & (X6 & X18)

Die Messung *0003L* beschreibt die Position des Heckleuchtentopfes in Relation zum Bezugssystem des ZB, also zum Messloch in der Bepunktung Seitenwand, welches eine vernachlässigbar kleine Abweichung zum Aufnahme Loch Z4 X6 aufweist. Bei *0003L - 0014L* handelt es sich um die schon in Kapitel 5.4.2 erläuterte Relativmessung zwischen der Position des Heckleuchtentopfes und des hintersten Bereiches des Türausschnittes. Dies verdeutlicht die Ausrichtgenauigkeit des Heckleuchtentopfes in dessen unmittelbaren Umfeld. Die Messungen zeigen, dass sich die Position des Heckleuchtentopfes eher an den Ausrichtelementen der Geo-Station als an der geometrischen Gestalt der Umgebung orientiert, da die Messung zum ZB-Bezugssystem die geringeren Streuungen aufweist. Bei beiden Messungen wird ersichtlich, dass die nach dem herkömmlichen Ansatz aufgebaute Toleranzsimulation eine deutlich größere Streuung als die am Real-ZB gemessene ausweist, nämlich für *0003L* 0,73 mm gegenüber 0,48 mm. Werden bei der Simulation die Ausrichtelemente der Geo-Station stärker in den Vordergrund gerückt, so nähert sich die Simulation den Messwerten an, siehe V2. Werden darüber hinaus mehrere Ausrichtelemente vermittelt, so kommt die Simulationsvariante V3 mit 0,53 mm bei *0003L* der Messung sehr nahe.

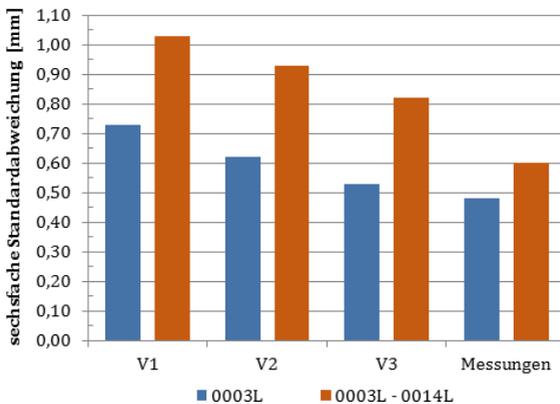


Abbildung 6.2: Ergebnis der Simulationsvarianten des Use-Cases ZB Bepunktung Seitenwand im Vergleich mit Inline-Messungen

Die vorgestellten Simulationsansätze werden noch an zwei weiteren Use-Cases geprüft, zweite Längsträgerebene I und II, die das beschriebene Verhalten generell bestätigen. Auf die Ergebnisse beim Use-Case zweite Längsträgerebene I, der bereits in Kapitel 5.4.2 vorgestellt wurde, wird kurz eingegangen. Die Prozessschwankungen des ZB werden in X- und in Z-Richtung betrachtet, wobei eine sechsfache Standardabweichung von 0,49 mm bzw. 0,82 mm ermittelt wird, siehe Abbildung 6.3. Die Modellierungsansätze V1, V2 und V3 sind analog zum Use-Case oben aufgebaut. In X-Richtung zeigt Modellierungsansatz V1 mit 0,87 mm wie zuvor eine zu hohe Streuung. V2 und V3 liegen hier mit jeweils 0,68 mm näher am realen Wert. Bei der Z-Richtung ist das Simulationsergebnis von V1 auch deutlich zu hoch, während V3 eine etwas zu geringe Streuung ausweist. Die reale Streuung in Z-Richtung liegt zwischen den Ergebnissen von V2 und V3.

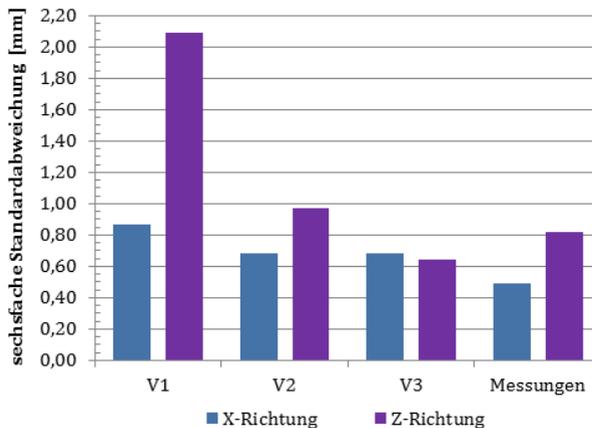


Abbildung 6.3: Ergebnis der Simulationsvarianten des Use-Cases zweite Längsträgerebene I im Vergleich mit Inline-Messungen

Die erläuterten Use-Cases ZB Beplankung Seitenwand und zweite Längsträgerebene I sowie der Use-Case zweite Längsträgerebene II zeigen, dass die Prozessstreuungen durch Simulationen, die stärker auf den Einfluss der Geo-Stationen fokussiert sind, genauer abgebildet

werden können. Nachdem in Kapitel 5.4 die Dominanz der Geo-Station nachgewiesen wurde, zeigt dieses Kapitel die Verbesserung der Toleranzsimulationsgüte, wenn diese Erkenntnis bei der Simulationserstellung berücksichtigt wird. Die Vermittlung zwischen mehreren Ausrichtelementen schlägt sich in der Realität sowie in der Simulation auch in einer reduzierten Streuung wieder, da Abweichungen durch Vermittlung abgeschwächt werden.

6.4 Zusammenfassung

Die in der Industrie angewandte Abbildungsform der Einzelteile sollte mit den in Kapitel 4 vorgestellten Methodiken präzisiert werden. Der im Stand der Technik angewandte Simulationsumfang zeigt sich jedoch abgesehen von einer potenziellen Ausnahme als ausreichend.

Die in Kapitel 5 gesammelten Erkenntnisse zum Verformungsverhalten in der Geo-Station fordern neue Ansätze zur Toleranzsimulation dieser. Es wird eine Methodik entwickelt, die auf der starren Toleranzsimulation basiert, jedoch durch gezielte Gewichtung sowie Vermittlung von Positionierungselementen den realen Sachverhalt, i.e. die Verformung der Einzelteile, besser nachbildet. Die Methodik wird durch Vergleiche zwischen Simulations- und Messdaten anhand mehrerer Use-Cases validiert. Mit der entwickelten Vorgehensweise benötigt der Aufbau der Simulation zwar mehr Fachkenntnis, der Simulationsumfang erhöht sich jedoch nicht. Dies ist ein Vorteil gegenüber der elastischen Toleranzsimulation.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Abschließend wird das Ergebnis der Arbeit zusammengefasst und mit dem aktuellen Stand der Technik abgeglichen. Zudem werden weitere Forschungsfelder aufgezeigt.

7.1 Zusammenfassung

Sowohl für die Abbildung der Pressteilabweichungen als auch die Zusammenbauprozesse werden Optimierungsmöglichkeiten dargelegt. Die Qualität der Abweichungsabbildung auf Pressteilebene kann durch die vorgestellte Prognosemethodik verbessert werden. Die Methodik ist zwar nur für karosseriegeformte Pressteile anwendbar, dies ist aber aktuell auch die gängigste Einzelteilherstellungsmethode. Das für alle Umfänge anwendbare, entwickelte Visualisierungstool von Abweichungsverhalten ermöglicht weiteren Fortschritt durch bessere Analysemöglichkeiten.

Die Abbildungsgenauigkeit der Pressteilstreuungen kann somit durch folgende Methodiken verbessert werden (siehe auch Kapitel 4.4):

- Anstatt des bisher gewählten Pauschalansatzes ist das individuelle Streuungsverhalten der einzelnen Pressteile zu berücksichtigen (Prognosemethodik).
- Typische Streuungsphänomene bei Pressteilen müssen mit einbezogen werden (Analyse mittels Visualisierungstool).

Umfassende Untersuchungen des Abbildungsumfanges der Toleranzsimulation zeigen, dass hier bezogen auf den Stand der Technik kein Handlungsbedarf besteht. Die stark reduzierte Abbildung des

Karosseriebauprozesses erweist sich bis auf eine noch zu untersuchende, potenzielle Ausnahme überraschenderweise als ausreichend. Es wird nachgewiesen, dass auch keine Rücksicht auf die Art des Fügeverfahrens genommen werden muss, siehe Kapitel 5.6. Die Abbildungsgenauigkeit der alles entscheidenden Geo-Station kann hingegen noch verbessert werden. Die Forschung hält hier einige innovative Ansätze bereit, von denen jedoch nur wenige bisher in die Praxis transferiert wurden. Allgemein fällt bei der Literaturrecherche auf, dass nur sehr wenige Arbeiten theoretische Ansätze mit Validierungen an realen Anwendungsfällen verknüpfen. In diesem Kontext wird für den Fügevorgang von nachgiebigen Komponenten ein Simulationsansatz vorgestellt, der auf den in der Industrie üblichen Werkzeugen aufsetzt, die Simulationsgenauigkeit verbessert und trotzdem keine erhöhte Rechenzeit bedingt. Dieser Ansatz nimmt u.a. Rücksicht auf den belegten Umstand, dass die Geo-Station bei nachgiebigen Fügepartnern eine Blockbildung dieser maßlich übergeht. Legitimiert wird dieser Ansatz auf Basis der starren Toleranzsimulation durch den Beweis, dass in üblichen industriellen Anwendungsfällen bei ebendiesem dominanten Ausrichten durch die Geo-Station beim Fügeprozess plastische Verformungen der Komponenten auftreten können. Diese Untersuchung stellt die Aufwand-Nutzen-Relation der elastischen Toleranzsimulation in Frage, siehe Kapitel 6.4.

Die Untersuchungsergebnisse des Abweichungsverhaltens der Karosseriebauprozesse sind in folgenden Punkten auf die Methodik der Toleranzsimulation zu übertragen:

- Der Abbildungsumfang gemäß des Standes der Technik ist ausreichend.
- Die durch verschiedene Fügeverfahren bedingte unterschiedliche Spanntechnik hat keinen generischen Einfluss auf die erzeugte Maßhaltigkeit.
- Die Positionierung der Fügepartner durch die Geo-Station ist in der Regel mächtiger als die geometrische Blockbildung zwischen den Fügepartnern.

- Die entwickelte Methodik zur geometrischen FEM-Nachbildung des Fügeprozesses zeigt, dass die Erzwingung einer maßhaltigen Geometrie durch die Geo-Station zur plastischen Verformung der Fügepartner führen kann.

Die entwickelte Simulationsmethodik zur Abbildung der Karosseriebauprozesse unterscheidet sich somit im Wesentlichen in folgenden Aspekten von der statistischen, starren Toleranzsimulation, auf der sie basiert:

- in der Abbildung des dominanten Einflusses der Geo-Station durch angepasste Auswahl der simulativen Positionierungselemente und
- der Abbildung von statisch überbestimmter Einspannung durch Vermittlung mehrerer Spannstellen, wobei auch eine Gewichtung vorgenommen wird.

7.2 Ausblick

Die zukünftigen Forschungsfelder im Bereich Toleranzsimulation stehen auf zwei Ebenen. Zum einen gibt es noch handwerkliche Defizite, durch deren Adressierung die Präzision der Toleranzsimulation weiter gesteigert werden kann. Dazu gehört die Klärung des Umgangs mit der Sammlerstation, die weitere Analysen im vollautomatisierten Karosseriebau erfordert. Nur auf Basis der Untersuchung eines Use-Cases im Rahmen dieser Arbeit kann zu diesem variantenreichen Prozessschritt keine generische Aussage getroffen werden. Darüber hinaus müssen die vorgestellten ganzheitlichen Toleranzsimulationsansätze weiter vorangetrieben werden, um den Herstellungsprozess komplett abzubilden. Die aus der Literatur bekannten Beispiele sind entweder stark vereinfacht oder aufgrund vieler unbekannter Faktoren so erheblich von Validierungen abhängig, dass sie bisher nicht als Vorhersagewerkzeug zu gebrauchen sind.

Auf der anderen Ebene steht der steigende Bedarf an der Bearbeitung strategischer Forschungsthemen, die die Toleranzsimulation mit den aktuellen Trends in Entwicklung und Produktion verbinden. Durch immer flexibler werdende Produktionsanlagen und steigenden Kostendruck sind in der Automobilbranche immer mehr Produkte modular aufgebaut, nicht zuletzt um Derivate abzubilden. Eine realitätsnahe Toleranzsimulation muss daher in Zukunft auch modular aufgebaut sein, um leicht iteriert werden und auf austauschbare Produkteinheiten reagieren zu können. Die Modularisierung ist zudem die Basis, um die Variabilität des Produktportfolios bzw. die Flexibilität der Produktionsanlagen mit der Toleranzsimulation abbilden zu können.

Literaturverzeichnis

- Bir-13 Birkert, A., Haage, S., Straub, M. (2013). Umformtechnische Herstellung komplexer Karosserieteile. Auslegung von Zieh-anlagen. Springer Vieweg, Berlin.
- Ble-99 Bley, H., Oltermann, R., Thome, O., Weber, Ch. (1999). A tolerance system to interface design and manufacturing. 6th CIRP International Seminar on Computer-Aided Tolerancing, S. 149-156.
- Boh-13 Bohn, M., Hetsch, K. (2013). Toleranzmanagement im Auto-mobilbau. Hanser, München.
- Boh-16 Bohn, M., Hetsch, K. (2016). Funktionsorientiertes Toleranz-design. Maßgeschneiderte Präzision im Maschinen-, Fahr-zeug- und Gerätebau. Hanser, München.
- Boh-98 Bohn, M. (1998). Toleranzmanagement im Entwicklungspro-zeß. Reduzierung der Auswirkungen von Toleranzen auf Zusammenbauten der Automobil-Karosserien. Doktorarbeit, Universität Karlsruhe, Karlsruhe.
- Böl-10 Fa. Böllhoff (2010). Porsche Panamera - 4. Generation ver-bindet in der „4. Dimension“. Pressemitteilung, Bielefeld.
- Brü-15 Brüggemann, H., Peik, B. (2015). Grundlagen Qualitätsma-nagement. Von den Werkzeugen über Methoden zum TQM. Springer Vieweg, Wiesbaden.
- Car-99 Carlson, J.S. (1999). Root cause analysis for fixtures and locating schemes using variation data. 6th CIRP International Seminar on Computer-Aided Tolerancing, S. 111-120.
- Cha-99 Chang, M., Kim, J., Rho, H.-M., Ha, S. (1999). Representation of assembly and inspection processes for the tolerance analysis of automobile bodies. 6th CIRP International Seminar on Computer-Aided Tolerancing, S. 223-230.

- Che-14 Chen, H., Jin, S., Li, Z., Lai, X. (2014). A comprehensive study of three dimensional tolerance analysis methods. *Computer-Aided Design*, Jahrgang 53, S. 1-13.
- Cra-97 Craig, M. (1997). Dimensional management. A necessary process to meet corporate goals for global competition. *IEE Colloquium on Control of Dimensional Variation*.
- Dah-05 Dahlström, S., Lindkvist, L. (2005). Practical implications in tolerance analysis of sheet metal assemblies. Experiences from an automotive application. 9th CIRP International Seminar on Computer-Aided Tolerancing, S. 311-320.
- Dat-14 2014 Datsun Go Production, TestDriven. Youtube-Video: https://www.youtube.com/watch?v=eVNSKlebqT8&index=29&list=PLOGD-wY8tLcx8J3fe2kyOtaO_2Hp1LfoG, veröffentlicht am 04.02.2014, zugegriffen am 07.01.2016.
- DIN-07 DIN EN 10130:2007-02, Kaltgewalzte Flacherzeugnisse aus weichen Stählen zum Kaltumformen - Technische Lieferbedingungen.
- DIN-16 DIN ISO 22514-1:2016-08, Statistische Methoden im Prozessmanagement – Fähigkeit und Leistung. Teil 1: Allgemeine Grundsätze und Begriffe.
- Dom-08 Domke, A. (2008). Simulationsmethode zur automatisierten Einpassung toleranzbehafteter Karosserieanbauteile. Doktorarbeit, Technischen Universität Darmstadt, Darmstadt.
- Dub-95 Beitz, W., Kötner, K.-H. (Hrsg.) (1995). *Dubbel. Taschenbuch für den Maschinenbau*. Springer, Heidelberg Berlin.
- Fal-16 Falgarone, H., Thiébaud, F., Coloosc, J., Mathieu, L. (2016). Variation simulation during assembly of non-rigid components. Realistic assembly simulation with ANATOLEFLEX software. 14th CIRP Conference on Computer Aided Tolerancing, S. 202-207.
- Gei-08 Geiger, W., Kotte, W. (2008). *Handbuch Qualität. Grundlagen und Elemente des Qualitätsmanagements: Systeme - Perspektiven*. Vieweg, Wiesbaden.

- Ger-14 Germer, Ch., Nagat, M., Klenk, T. (2014). Die virtuelle Messdatenanalyse bei Volkswagen. Konstruktion, Jahrgang 10-2014, S. 94-98.
- Ger-99 Gerth, R.J., Klonaris, P., Pfeiffer, T. (1999). Cost tolerance sensitivity analysis for concurrent engineering design support. 6th CIRP International Seminar on Computer-Aided Tolerancing, S. 313-324.
- Gil-14a Gillich, S. (2014). Grundlagen moderner Fügeverfahren. Projektarbeit, Hochschule Konstanz, Konstanz.
- Gil-14b Gillich, S. (2014). Einfluss moderner Fügeverfahren auf die Präzision im Karosseriebau. Bachelorarbeit, Hochschule Konstanz, Konstanz.
- GMN-07 Swartzell, T., Kolis, D. (2007). Body-in-White technology in the new Saturn Outlook, GMC Acadia & Buick Enclave. Great Designs in Steel Seminar.
- Hei-06 Heinzlmann, E. (2006). Rückfederung im Griff. Software für die Simulation von Rückfederungsvorgängen beim Blechumformen. technica - Blechbearbeitung Special, Jahrgang 09, S. 62-65.
- Hon-16 Crichley, S. (2016). New global model introduction: the all-new 2016 Honda Civic. Great Designs in Steel Seminar.
- ISO-85 ISO 5807:1985-02, Information processing - Documentation symbols and conventions for data, program and system flowcharts, program network charts and system resources charts.
- Jan-08 Jansson, T., Nilsson, L., Moshfegh, R. (2008). Reliability analysis of a sheet metal forming process using Monte Carlo analysis and metamodels. Journal of Materials Processing Technology, Jahrgang 202, S. 225-268.
- Jee-11 Smith, D. (2011). 2011 Grand Cherokee. Great Designs in Steel Seminar.
- Jin-99 Jin, J., Shi, J. (1999). State space modeling of sheet metal assembly for dimensional control. Journal of Manufacturing Science and Engineering, Jahrgang 121, S. 756-762.

- Kal-12 Kalweit, A., Paul, Ch., Peters, S., Wallbaum, R. (Hrsg.) (2012). Handbuch für Technisches Produktdesign. Material und Fertigung. Entscheidungsgrundlagen für Designer und Ingenieure. Springer, Heidelberg.
- Kle-06 Klein, B. (2006). Toleranzmanagement im Maschinen- und Fahrzeugbau. Form- und Lagetoleranzen – Tolerierungsprinzipien – Tolerierungsverknüpfungen – Maßketten – Oberflächen. Oldenbourg, München.
- Kli-12a Klinger, J.F. (2012). Automotive body structure assembly. Mass & cost saving potential of laser welding compared to spot welding. Masterarbeit, KTH, Stockholm.
- Kli-12b Klinger, J.F., Bohn, M. (2012). Untersuchung der realen Presseteilstreuungen als Eingangsgröße für die Toleranzsimulation. 4th International Conference on Accuracy in Forming Technology, S. 401-410.
- Kli-13 Klinger, J.F., Bohn, M. (2013). Predicting dimensional deviations of structural vehicle body parts deep drawn from aluminum blanks. 46th CIRP Conference on Manufacturing Systems, S. 353-358.
- Kli-14 Klinger, J.F., Litwar, J., Bohn, M., Constantinescu, C. (2014). Valuable use-cases towards a generic model of geo-station welding. 8th International Conference on Digital Enterprise Technology, S. 81-85.
- Kli-15 Klinger, J.F., Bohn, M., Litwa, F. (2015). Adaptive modeling of non-rigid assembly orientation processes in a statistical CAT simulation. 13th CIRP Conference on Computer Aided Tolerancing, S. 71-76.
- Kro-09 Kropnik, M. (2009). Produktionsleitsysteme in der Automobilfertigung. Springer, Berlin.
- Law-96 Lawless, J.F., Mackay, R.J. (1996). Analysis of variation transmission in manufacturing processes. Part I. Journal of Quality Technology, Jahrgang 32-2, S. 131-142.

- Lin-13 Lindau, B., Wärmefjord, K., Lindkvist, L., Söderberg, R. (2013). Aspects of fixture clamp modeling in non-rigid variation simulation of sheet metal assemblies. ASME 2013 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, San Diego.
- Lit-14 Litwar, J. (2014). Weiterentwicklung der simulativen Darstellung von Zusammenbauten im Rohbauumfeld zur Untersuchung hinsichtlich Maßhaltigkeit. Diplomarbeit, Universität Stuttgart, Stuttgart.
- Liu-97 Liu, S.C., Hu, S.J. (1997). Variation simulation for deformable sheet metal assemblies using finite element methods. Journal of Manufacturing Science and Engineering, Jahrgang 119-3, S. 368-374.
- Lor-15 Lorin, S., Cromvik, Ch., Edelvik, F., Söderberg, R. (2015). Welding simulation of non-nominal structures with clamps. 13th CIRP Conference on Computer Aided Tolerancing.
- Man-99 Mantripragada, R., Whitney, D.E. (1999). Modeling and controlling variation propagation in mechanical assemblies using state transition models. IEEE Transactions on Robotics and Automation, Jahrgang 15-1, S. 124-140.
- Mor-01 Morgan, A.P., Cafeo, J.A., Gibbons, D.I., Lesperance, R.M., Sengir, G.H., Simon, A.M. (2001). CBR for dimensional management in a manufacturing plant. International Conference on Case-Based Reasoning, S. 597-610.
- Mor-14 Morse, E.P. (2014). The interaction of population specifications with statistical specifications on individual features. 13th CIRP Conference on Computer Aided Tolerancing.
- Mov-14 Movsisyan, G. (2014). Simulative Analyse der Materiabeanspruchung in Karosseriebau-Prozessen mithilfe der Finiten Elemente Methode. Masterarbeit, RWTH Aachen, Aachen.
- Neu-14 Neumann, A. (2014). Konzept zur Beherrschung der Prozessschwankungen im Presswerk. Doktorarbeit, FAU Erlangen-Nürnberg, Erlangen.

- Nis-14 2014 Nissan Qashqai Production, Youtube-Video, TestDriven, https://www.youtube.com/watch?v=PWIwDzzCnq4&index=30&list=PL0GD-wY8tLcx8J3fe2kyOtaO_2Hp1LfOG, veröffentlicht am 22.01.2014, zugegriffen am 07.01.2016.
- Ovt-15 Ovtcharova, J., Häfner, P., Häfner, V., Katicic, J., Vinke, Ch. (2015). Innovation braucht Resourceful Humans Aufbruch in eine neue Arbeitskultur durch Virtual Engineering. In: Botthof, A., Hartmann, E.A. (Hrsg.). Zukunft der Arbeit in Industrie 4.0, S. 111-124. Springer Vieweg, Berlin Heidelberg.
- Ovt-92 Ovtcharova, J. (1992). Feature-based modeling for preliminary design support. Informatik aktuell: CAD '92, S. 480-487.
- Pas-03 Pasupathy, T.M.K., Morse, E.P., Wilhelm, R.G. (2003). A survey of mathematical methods for the construction of geometric tolerance zones. Journal of Computing and Information Science in Engineering, Jahrgang Volume 3, Issue 1, S. 64-75.
- Reh-13 Rehder, M. (2013). Entwicklung und Anwendung eines Visualisierungstools zur statistischen Untersuchung von Press-teilstreuungen. Bachelorarbeit, Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, Hamburg.
- Roo-14 Rooch, A. (2014). Statistik für Ingenieure. Wahrscheinlichkeitsrechnung und Datenauswertung endlich verständlich. Springer, Berlin.
- Ros-14 Rostami Mehr, M. (2014). Comprehensive analysis of Body-in-White process chain to identify impact factors on dimensional accuracy. Masterarbeit, Hochschule Emden-Leer, Emden.
- Schu-14 Schulze, A., Dietrich, E. (2014). Statistische Verfahren zur Maschinen- und Prozessqualifikation. Hanser, München.
- Shi-96 Shi, B.W., Ceglarek, D., Chi, J. (1996). Multi-stations sheet metal assembly modeling and diagnostics. Transactions of North American Manufacturing Research Institution of SME, S. 199-204.
- Sko-14 Skolaut, W. (Hrsg.) (2014). Maschinenbau. Springer, Berlin Heidelberg.

- Söd-16 Söderberg, R., Lindkvist, L., Wärmefjord, K., Carlson, J.S. (2016). Virtual geometry assurance process and toolbox. 14th CIRP Conference on Computer Aided Tolerancing, S. 3-12.
- Ste-12 Steinle, Ph., Bohn, M. (2012). An approach of design methodology and tolerance optimization in the early development stage to achieve robust systems. Applied Mechanics and Materials, Jahrgang 104, S. 67-71.
- Sto-10 Stockinger, A. (2010). Computer aided robust design. Verknüpfung rechnerunterstützter Entwicklung und virtueller Fertigung als Baustein des Toleranzmanagements. Doktorarbeit, Universität Erlangen-Nürnberg, Erlangen.
- Sto-12 Stopp, M. (2012). Verifikation eines Werkstoffmodells zur Streuungsvorhersage von Pressteilen. Masterarbeit, Hochschule für Technik und Wirtschaft des Saarlandes, Saarbrücken.
- Tru-05 Morris, T. (2005). Laser processing. Concept and production implementation. Great Designs in Steel Seminar.
- Ung-08a Ungemach, G., Mantwill, F., Rund, M. (2008). Visualisierung von Bauteil deformationen zur virtuellen Qualitätsbeurteilung. ATZ, Jahrgang 110, S. 568-573.
- Ung-08b Ungemach, G. (2008). Efficient consideration of contact in compliant assembly variation analysis. Journal of Manufacturing Science and Engineering, Jahrgang 131-1, S. 1-9.
- Ung-09 Ungemach, G. (2009). Simulation toleranzbehafteter Karosseriestrukturen und deren virtuelle Qualitätsbeurteilung. Doktorarbeit, Helmut-Schmidt-Universität, Hamburg.
- Voß-08 Voß, R. (2008). Bewertung des Einflusses von Randbedingungen für eine Toleranzsimulation nachgiebiger Baugruppen im Karosserierohbau. 19. Symposium Design for X.
- Wär-16a Wärmefjord, K., Söderberg, R., Ericsson, M., Appelgren, A., Lundbäck, A., Lööf, J., Lindkvist, L., Svensson, H.-O. (2016). Welding of non-nominal geometries. Physical tests. 14th CIRP Conference on Computer Aided Tolerancing.

- Wär-16b Wärmefjord, K., Carlson, J.S., Söderberg, R. (2016). Controlling geometrical variation caused by assembly fixtures. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, Jahrgang 16-1.
- Wes-10 Westkämper, E., Warnecke, H.-J. (2010). *Einführung in die Fertigungstechnik*. Vieweg+Teubner, Wiesbaden.
- Wis-13 Wissing, C. (2013). *Analyse der Produktionsabläufe zur Prozessstreuungsquantifizierung*. Masterarbeit, Universität Karlsruhe, Karlsruhe.
- Wit-11 Wittmann, S. (2011). *Verfahren zur Simulation und Analyse der Auswirkungen toleranzbedingter Bauteilabweichungen*. Doktorarbeit, Universität Erlangen-Nürnberg, Erlangen.
- Zöf-00 Zöfel, P. (2000). *Statistik verstehen. Ein Begleitbuch zur computergestützten Anwendung*. Addison-Wesley, Boston.

REIHE INFORMATIONSMANAGEMENT IM ENGINEERING KARLSRUHE

Karlsruher Institut für Technologie | ISSN 1860-5990

Herausgeber:

Institut für Informationsmanagement im Ingenieurwesen (IMI)

o. Prof. Dr. Dr.-Ing. Dr. h.c. Jivka Ovtcharova

- | | |
|------------------|---|
| Band
1 – 2005 | SEIDEL, MICHAEL
Methodische Produktplanung. Grundlagen, Systematik und Anwendung im Produktentstehungsprozess. 2005
ISBN 3-937300-51-1 |
| Band
1 – 2006 | PRIEUR, MICHAEL
Functional elements and engineering template-based product development process. Application for the support of stamping tool design. 2006
ISBN 3-86644-033-2 |
| Band
2 – 2006 | GEIS, STEFAN RAFAEL
Integrated methodology for production related risk management of vehicle electronics (IMPROVE). 2006
ISBN 3-86644-011-1 |
| Band
1 – 2007 | GLOSSNER, MARKUS
Integrierte Planungsmethodik für die Presswerkneutypplanung in der Automobilindustrie. 2007
ISBN 978-3-86644-179-8 |
| Band
2 – 2007 | MAYER-BACHMANN, ROLAND
Integratives Anforderungsmanagement. Konzept und Anforderungsmodell am Beispiel der Fahrzeugentwicklung. 2008
ISBN 978-3-86644-194-1 |
| Band
1 – 2008 | MBANG SAMA, ACHILLE
Holistic integration of product, process and resources integration in the automotive industry using the example of car body design and production. Product design, process modeling, IT implementation and potential benefits. 2008
ISBN 978-3-86644-243-6 |

- Band
2 – 2008 **WEIGT, MARKUS**
Systemtechnische Methodenentwicklung : Diskursive Definition heuristischer prozeduraler Prozessmodelle als Beitrag zur Bewältigung von informationeller Komplexität im Produktleben. 2008
ISBN 978-3-86644-285-6
- Band
1 – 2009 **KRAPPE, HARDY**
Erweiterte virtuelle Umgebungen zur interaktiven, immersiven Verwendung von Funktionsmodellen. 2009
ISBN 978-3-86644-380-8
- Band
2 – 2009 **ROGALSKI, SVEN**
Entwicklung einer Methodik zur Flexibilitätsbewertung von Produktionssystemen. Messung von Mengen-, Mix- und Erweiterungsflexibilität zur Bewältigung von Planungsunsicherheiten in der Produktion. 2009
ISBN 978-3-86644-383-9
- Band
3 – 2009 **FORCHERT, THOMAS M.**
Prüfplanung. Ein neues Prozessmanagement für Fahrzeugprüfungen. 2009
ISBN 978-3-86644-385-3
- Band
1 – 2011 **ERKAYHAN, ŞEREF**
Ein Vorgehensmodell zur automatischen Kopplung von Services am Beispiel der Integration von Standardsoftwaresystemen. 2011
ISBN 978-3-86644-697-7
- Band
2 – 2011 **MEIER, GUNTER**
Prozessintegration des Target Costings in der Fertigungsindustrie am Beispiel Sondermaschinenbau. 2011
ISBN 978-3-86644-679-3
- Band
1 – 2012 Nicht erschienen
- Band
2 – 2012 **WUTTKE, FABIAN**
Robuste Auslegung von Mehrkörpersystemen. Frühzeitige Robustheitsoptimierung von Fahrzeugmodulen im Kontext modulbasierter Entwicklungsprozesse. 2012
ISBN 978-3-86644-896-4

- Band
3 – 2012 **KATIČIĆ, JURICA**
Methodik für Erfassung und Bewertung von emotionalem Kundenfeedback für variantenreiche virtuelle Produkte in immersiver Umgebung. 2012
ISBN 978-3-86644-930-5
- Band
1 – 2013 **LOOS, MANUEL NORBERT**
Daten- und termingesteuerte Entscheidungsmethodik der Fabrikplanung unter Berücksichtigung der Produktentstehung. 2013
ISBN 978-3-86644-963-3
- Band
2 – 2013 **SYAL, GAGAN**
CAE - PROCESS AND NETWORK: A methodology for continuous product validation process based on network of various digital simulation methods. 2013
ISBN 978-3-7315-0090-2
- Band
1 – 2016 **BURGER, ALEXANDER**
Design for Customer: Methodik für nachhaltige Kundenlösungen unter Zuhilfenahme eines bedürfnisorientierten Leistungskonfigurators. 2016
ISBN 978-3-7315-0168-8
- Band
2 – 2016 **HOPF, JENS MICHAEL**
Framework for the Integration of Mobile Device Features in PLM. 2016
ISBN 978-3-7315-0498-6
- Band
1 – 2017 **WALLA, WALDEMAR**
Standard- und Modulbasierte digitale Rohbauprozesskette: Frühzeitige Produktbeeinflussung bezüglich Produktionsanforderungen im Karosserierohbau der Automobilindustrie. 2017
ISBN 978-3-7315-0600-3
- Band
1 – 2018 **WEISER, ANN-KATRIN**
Methodik eines holistischen Variantenmanagements modularer Produktfamilien – Grundlagen, Systematik und beispielhafte Anwendung der VM_{ahead} Methodik. 2018
ISBN 978-3-7315-0775-8

Band
2 – 2018 **STANEV, STILIAN**
Methodik zur produktionsorientierten Produktanalyse für die
Wiederverwendung von Produktionssystemen – 2REUSE.
Konzept, Informationsmodell und Validierung am besonderen
Beispiel des Karosserierohbaus in der Automobilindustrie. 2018
ISBN 978-3-86644-932-9

Band
1 – 2019 **KLINGER, JULIUS FRIEDRICH**
Tolerance Simulation in the Loop: Ansätze zur Verbesserung der
Vorhersagegenauigkeit der Toleranzsimulation im Automobilbau
durch Adaption an reale Fertigungsprozesse. 2019
ISBN 978-3-7315-0876-2

ISSN 1860-5990
ISBN 978-3-7315-0876-2

Gedruckt auf FSC-zertifiziertem Papier

