

# BEITRÄGE ZUR UMFORMTECHNIK

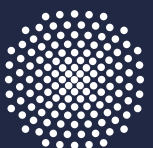


Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Mathias Liewald MBA  
Institut für Umformtechnik, Universität Stuttgart

Severin Hönle

# 79

Methode zur Bewertung und Prognose der Anmutungsqualität und der Herstellbarkeit von Falzschlaufen an Karosserieanbauteilen aus Aluminium



Universität Stuttgart



# Methode zur Bewertung und Prognose der Anmutungsqualität und der Herstellbarkeit von Falzschlaufen an Karosserieanbauteilen aus Aluminium

Von der Fakultät Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik  
der Universität Stuttgart  
zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)  
genehmigte Abhandlung

vorgelegt von  
Severin Hönle  
aus Tübingen

Hauptberichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Mathias Liewald MBA  
Mitberichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Maier  
Tag der mündlichen Prüfung: 31.10.2016

Dipl.-Ing. Severin Hönle  
Institut für Umformtechnik  
Universität Stuttgart

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Mathias Liewald MBA  
Institut für Umformtechnik  
Universität Stuttgart

**D93**

**ISBN 978-3-946818-04-5**

**Institut für Umformtechnik**

Universität Stuttgart  
Holzgartenstraße 17  
70174 Stuttgart  
[www.ifu.uni-stuttgart.de](http://www.ifu.uni-stuttgart.de)

Printed in Germany

## GELEITWORT DES HERAUSGEBERS

Die langjährige Buchreihe „Beiträge zur Umformtechnik“ enthält Forschungsberichte oder abgeschlossene Dissertationen, die am Institut für Umformtechnik (IFU) der Universität Stuttgart oder durch eine Zusammenarbeit zwischen dem Institut und einem Unternehmen entstanden sind, sowie andersartige Abschlussberichte langjähriger Forschungsarbeiten.

**Umformen ist die gezielte Änderung der Form, der Oberfläche und der Eigenschaften eines metallischen Körpers unter Beibehaltung von Masse und Stoffzusammenhalt.**

Diese Definition für das Umformen metallischer Körper in Anlehnung an DIN 8580 beschreibt nicht nur die gezielte Änderung der Form, sondern auch die gezielte Änderung der Oberfläche und der Eigenschaften des Produktes durch den Umformvorgang. Die Technik des Umformens befasst sich daher mit einer möglichst guten Vorausbestimmbarkeit von finalen Produkteigenschaften, wobei die mathematische Beschreibung und die Modellbildung des Umformprozesses eine grundlegende Voraussetzung für die numerische Simulation mithilfe der Methode der Finiten Elemente (FEM) liefert.

Oftmals geht die intuitive, auf aktuellen Grundlagenerkenntnissen basierende Forschung in der Umformtechnik zusammen mit einer experimentellen Herangehensweise an neue Fragestellungen einher. Die dabei erzielten Forschungsergebnisse dienen dem allgemeinen Wissenserwerb und dem Grundlagenverständnis von werkstofflichen und verfahrensspezifischen Phänomenen und sind somit nicht nur für Wissenschaftler, sondern auch für die in der Praxis stehenden Ingenieure von grundsätzlicher Bedeutung.

Stets kürzere Entwicklungszeiten für neue Produkte der Umformtechnik einerseits und veränderte Wertschöpfungsketten, die Dynamik von Märkten, neue Technologien sowie veränderte Randbedingungen, wie z. B. Leichtbaubestrebungen und Initiativen im Sinne von Industrie 4.0, erfordern heute eine besondere Intensivierung der anwendungstechnisch ausgerichteten Forschung und Entwicklung auf diesen Gebieten. Moderne Forschungsstellen sind in beide Prozesse eingebunden: zum einen in die Grundlagenforschung mit Blick auf Werkstoffe, Verfahren und Maschinen der Umformtechnik und zum anderen in vorwettbewerbliche bzw. stark anwendungsorientierte Prozesse der Lösungsfindung.

Ziel und Motivation für die Herausgabe dieser Berichte ist daher die Publikation solcher teils grundlagenorientierter, teils recht praxisorientierter Forschungs- und Entwicklungsarbeiten, die an meinem Institut entstehen. Ein weiteres Ziel dieser Buchreihe ist das Bereitstellen einer fundierten Basis für weiterführende wissenschaftliche Arbeiten auf internationalem Niveau.

Mathias Liewald



## VORWORT

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Umformtechnik der Universität Stuttgart im Rahmen der Hochschulkooperation (HIN) der AUDI AG.

Dem Direktor des Instituts für Umformtechnik, Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Mathias Liewald MBA, danke ich für die Möglichkeit zur Promotion, die hervorragenden geschaffenen Rahmenbedingungen und das stets entgegengebrachte Vertrauen. Die zahlreichen fachlichen sowie persönlichen Gespräche haben mich positiv geprägt und zu meiner wissenschaftlichen Entwicklung beigetragen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Thomas Maier, Leiter des Forschungs- und Lehrgebiets Technisches Design am Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design (IKTD) der Universität Stuttgart, danke ich für die kritische Durchsicht der Arbeit und die Übernahme des Mitberichtes.

Bei Herrn Dr.-Ing. Manfred Sindel, Herrn Dr.-Ing. Jan-Oliver Brassel und Dr.-Ing. Frank Schulz bedanke ich mich herzlich für den persönlichen Einsatz zur Ermöglichung dieser Arbeit und für das fortwährende Interesse und die Unterstützung.

Meinen Kolleginnen und Kollegen am Institut für Umformtechnik danke ich für die sehr gute und von Freundschaft geprägte Zusammenarbeit. Insbesondere Herrn Dr.-Ing. Ralf Denninger, Herrn Dipl.-Ing. Christian Held, Herrn Dipl.-Ing. Apostolos Papaioanu, Herrn Dipl.-Ing. Matthias Schneider und Herrn Dipl.-Ing. Dennis Hofmann danke ich für die zahlreichen konstruktiven Diskussionen und die Motivation zur Durchführung dieser Arbeit. Für die fachlichen Anregungen während der Verfassung dieser Arbeit bedanke ich mich bei allen meinen Arbeitskolleginnen und Kollegen, im Speziellen bei Herrn Dr.-Ing. Michael Huppmann, Herrn Dipl. Mattes Reiling, Herrn Tim Altermann und Herrn Martin Blechschmidt.

Zusätzlich gilt mein Dank den zahlreichen Studierenden die mich mit viel Tatendrang bei der Durchführung dieser Arbeit unterstützt haben. Stellvertretend hierfür möchte ich Frau Dipl.-Ing. Heike Schatton und Herrn Dipl.-Ing. Julian Buchert nennen.

Mein ganz besonderer Dank gilt meinen Eltern und Geschwistern für das uneingeschränkte Vertrauen, die Unterstützung und die Motivation während des gesamten Studiums und meiner Zeit als Doktorand. Der größte Dank gilt meiner Frau Susanne für all die motivierenden Worte, die Geduld und das entgegengebrachte Verständnis in den zeit- und arbeitsintensiven Phasen.

# INHALTSVERZEICHNIS

## TABLE OF CONTENTS

<b>1</b>	<b>EINLEITUNG.....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>STAND DER ERKENNTNISSE.....</b>	<b>4</b>
2.1	Anmutung von Karosseriefugen .....	4
2.1.1	Theoretische Grundlagen der Wahrnehmung und Erkennung.....	5
2.1.2	Erkennung und Gestaltung von Anmutungsqualitäten.....	10
2.1.3	Karosseriefugen als Designmerkmal moderner Fahrzeugkarosserien .....	14
2.2	Das Fügeverfahren Falzen im PKW-Karosseriebau .....	18
2.2.1	Prozesskette zur Herstellung von gefalzten Karosserieanbauteilen .....	18
2.2.2	Verfahrensablauf des Falzens .....	21
2.2.3	Typen von Falzschlaufen im Automobilbau.....	26
2.3	Umformtechnische Grundlagen zum Biegen von Aluminiumblechwerkstoffen.....	28
2.3.1	Eigenschaften von Aluminiumblechwerkstoffen .....	28
2.3.2	Mechanisch-technologische Eigenschaften von Aluminiumblechwerkstoffen .....	31
2.3.3	Versagensmechanismen von Aluminiumblechwerkstoffen .....	35
2.3.4	Kriterien zur Beschreibung des Biegeversagens.....	38
2.4	Auslegung von Falzprozessen für Karosserieanbauteile .....	42
2.4.1	Einflussgrößen auf die Werkstoffbeanspruchung beim Falzen .....	43
2.4.2	Einflussgrößen auf die dimensionalen Eigenschaften von Falzen .....	47
2.5	Ermittlung des Forschungsbedarfs .....	50
<b>3</b>	<b>MOTIVATION UND ZIELSETZUNG DIESER ARBEIT .....</b>	<b>53</b>
<b>4</b>	<b>MODELLHERLEITUNG UND METHODIKEN ZUR MODELLVALIDIERUNG .....</b>	<b>55</b>
4.1	Entwicklung eines prinzipiellen Modells zur Prognose der Anmutung und der Herstellbarkeit von Falzschlaufen.....	55
4.2	Aufbau des Teilmodells zur Beschreibung der Herstellbarkeit von Falzschlaufen .....	56
4.3	Aufbau des Teilmodells zur Beschreibung der Anmutung von Falzschlaufen.....	58
<b>5</b>	<b>ERGEBNISSE ZUR HERSTELLUNG VON FALZSCHLAUFEN .....</b>	<b>60</b>
5.1	Experimentelle Ermittlung der Biegebeanspruchung.....	61
5.1.1	Werkstoffauswahl und Probenpräparation für Biege- und Falzversuche .....	61
5.1.2	Durchführung von Plättchenbiege- und Falzversuchen .....	63
5.1.1	Methoden zur Versuchsauswertung .....	66
5.2	Betrachtung der Prozesskette zur Herstellung von Fahrzeugen.....	71
5.2.1	Betrachtung der Beanspruchungen bei der Herstellung von Anbauteilen.....	72
5.2.2	Explizite Bestimmung der Oberflächenaufrauung während des Falzens .....	75



---

5.3	Betrachtung der Werkstoffbeanspruchung während des Falzens .....	78
5.3.1	Beanspruchung des Werkstoffs während des Maschinenfalzens .....	79
5.3.2	Beanspruchung des Werkstoffs während des Rollfalzens .....	81
5.3.3	Zwischenfazit zur Werkstoffbeanspruchung beim Falzen .....	82
5.4	Betrachtung der Schlaufengeometrie während des Falzens .....	83
5.4.1	Schlaufengeometrie während des Maschinenfalzens.....	84
5.4.2	Schlaufengeometrie während des Rollfalzens.....	85
5.4.3	Zwischenfazit zur Schlaufengeometrie beim Falzen .....	86
5.5	Einflussgrößen auf die Biegebeanspruchung und die Schlaufengeometrie .....	87
5.5.1	Einflussgrößen auf die Biegebeanspruchungen beim Falzen.....	89
5.5.2	Einflussgrößen auf die Schlaufengeometrie beim Falzen.....	93
5.5.3	Zwischenfazit zu den Einflussgrößen .....	96
<b>6</b>	<b>ANMUTUNG VON KAROSSERIESPALTEN UND FALZSCHLAUFEN .....</b>	<b>97</b>
6.1	Feldstudie zur fertigungstechnischen Ausführung von Falzschlaufen .....	98
6.1.1	Durchführung der Feldstudie.....	98
6.1.2	Ergebnisse der Feldstudie.....	99
6.1.3	Ableitung der Wahrnehmungsgrenze .....	102
6.2	Betrachtung der wahrgenommenen Schlaufenmerkmale .....	103
6.2.1	Methodik zur theoretischen Untersuchung von wahrnehmbaren Schlaufenmerkmalen	103
6.2.2	Ergebnisse der theoretischen Betrachtung .....	107
6.2.3	Zwischenfazit zu den Schlaufenmerkmalen.....	114
6.3	Definition der Anmutungsqualität von Falzschlaufen .....	115
6.4	Ermittlung der Anmutungsqualität von Falzschlaufen .....	117
6.4.1	Durchführung der quantitativen Erhebung.....	117
6.4.2	Ergebnisse der Befragung .....	120
6.4.3	Zwischenfazit zur Ermittlung der Anmutungsqualität von Karosseriefugen.....	124
<b>7</b>	<b>VALIDIERUNG UND ANWENDUNG DES PROGNOSEMODELLS .....</b>	<b>125</b>
7.1	Aufbau des Hemming Quality Diagram .....	125
7.1.1	Prognose der Herstellbarkeit .....	125
7.1.2	Prognose der Anmutungsqualität.....	127
7.1.3	Zusammenführung der Prognosemodelle .....	130
7.2	Validierung am Realbauteil.....	132
<b>8</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG DER ERKENNTNISSE .....</b>	<b>134</b>
	Anhang.....	140
	Literaturverzeichnis .....	153
	Lebenslauf.....	171

## VERWENDETE ZEICHEN UND ABKÜRZUNGEN

Symbol	Einheit	Bezeichnung
$a$	[-]	Höhe der Glockenkurve
A, B, C, D, E	[-]	Parameter der Modellfunktion „Anmutung“
$A_g$	[%]	Gleichmaßdehnung
$b$	[-]	Position des Dehnungsmaximums
BAZ	[mm]	Bending Affected Zone
BBF	[-]	Biegebewertungsfaktor
BBF <sub>krit</sub>	[-]	werkstoffspezifischer Grenzwert der Biegebarkeit
BBF <sub>Messung</sub>	[-]	Biegebewertungsfaktor, gemessen
BBF <sub>Prognose</sub>	[-]	Biegebewertungsfaktor, prognostiziert
$b_p$	[mm]	Probenbreite
BQ	[-]	Biegequotient
$c$	[-]	Breite der Glockenkurve
$c_{Sp}$	[-]	unstetige Stelle der Sprungfunktion
$d$	[-]	Überlagerung einer uniaxialen Dehnung
$d_{Auge}$	[mm]	Auflösung des Auges
$d_{Rolle}$	[mm]	Durchmesser der Lagerrollen
$d_{vert}$	[mm]	vertikale Auflösung
$d_{mat}$	[mm]	Messauflösung
$E$	[-]	Elastizitätsmodul
$E$	[-]	empfundener Reiz
$f$	[mm]	Brennweite
H	[-]	Spalthintergrund
$h_B$	[mm]	Blickabstand zwischen Beobachter und Blickzentrum
$h_G$	[mm]	senkrechter Abstand des Hintergrunds zur Oberfläche
I, J, L, M	[-]	Parameter der Modellfunktion „Herstellbarkeit“
$k_f$	[MPa]	Fließspannung
$K_{BU}$	[-]	Bauteilumrisskurve
$l_0$	[mm]	Ausgangslänge
$l_0$	[mm]	Länge der ungelängten Faser
$l_p$	[mm]	Probenlänge
$l_{Schnitt}$	[mm]	Länge des Linienschnitts
M, N, O, P	[-]	Parameter der Modellfunktion „Herstellbarkeit“
$M_B$	[Nm]	Biegemoment

$N$	[-]	Punktnormale im Blickzentrum
$n$	[-]	Verfestigungsexponent
$n$	[-]	Anzahl der Probanden
$N_{keine\ Erkennung}$	[-]	Anzahl nicht benannter Erkennungsinhalte
$N_{neg.\ Erkennung}$	[-]	Anzahl negativer Erkennungsinhalte
$N_{pos.\ Erkennung}$	[-]	Anzahl positiver Erkennungsinhalte
$Q_{Anmutung}$	[-]	Anmutungsqualität einer Falzschlaufe
$Q_{Fr}$	[-]	relativer, ästhetischer Werte der Fuge
$R$	[mm]	Innenradius für den Biegefaktor
$R$	[-]	physikalischer Reiz
$r$	[-]	Senkrechte Anisotropie
$R_0$	[-]	Schwellenwert
$r_0, r_{45}, r_{90}$	[-]	planare Werkstoffanisotropie des Blechhalbzeugs
$R^2$	[-]	Regression
$R_a$	[mm]	arithmetischer Mittenrauwert
$r_A$	[mm]	Abstellradius
$r_{aR}$	[mm]	Radius der äußeren Randschicht in der Biegetheorie
$R_e$	[MPa]	Streckgrenze
$r_g$	[mm]	Radius der Grenzdehnungsschicht in der Biegetheorie
$r_i$	[mm]	Innerer Biegehalbmesser
$r_{iR}$	[mm]	Radius der inneren Randschicht in der Biegetheorie
$R_m$	[MPa]	Zugfestigkeit
$r_m$	[mm]	Krümmungsradius
$r_m$	[mm]	Radius der momentan mittleren Schicht in der Biegetheorie
$r_{m0}$	[mm]	Radius der ursprünglich mittleren Schicht in der Biegetheorie
$R_{p0,2}$	[MPa]	Streckgrenze
$r_s$	[mm]	Radius der momentan spannungsfreien Schicht
$R_{SB}$	[mm]	Radius im Sichtbereich
$r_{St}$	[mm]	Radius des Abstellstempels
$r_{St}$	[mm]	Radius des Biegestempels
$r_u$	[mm]	Radius der momentan ungelängten Schicht in der Biegetheorie
$s_{0,A}$	[mm]	Nennblechdicke des Außenteils
$s_{0,I}$	[mm]	Nennblechdicke des Innenteils

$s_0$	[mm]	Nennblechdicke
$s_F$	[mm]	Spaltweite
$s_{IB}$	[mm]	Funktionsmaß Innenblech
$s_{OF,1}$	[mm]	Offset beim 1. Vorfalzen
$s_{OF,2}$	[mm]	Offset beim 2. Vorfalzen
$s_{OF,3}$	[mm]	Offset beim Fertigfalzen
$s_{PM}$	[mm]	Packmaß einer Falzschlaufe
$s_{Rolle}$	[mm]	Rollenabstand
$s_{SB}$	[mm]	sichtbare Spaltbreite
SSL	[mm]	sichtbare Schlaufenlänge
SST	[mm]	sichtbare Schlaufentiefe
SSL <sub>Messung</sub>	[mm]	sichtbare Schlaufenlänge, gemessen
SSL <sub>Prognose</sub>	[mm]	sichtbare Schlaufenlänge, prognostiziert
$s_{\text{ÜB}}$	[mm]	Schlaufenüberdeckung
$s_v$	[mm]	vertikaler Bauteilversatz
$s_{WG}$	[mm]	Wahrnehmungsgrenze
$s_{WF}$	[mm]	wahrnehmbare Fugenbreite
$x_{IB}$	[mm]	Position des Innenblechs
$y_{\text{Mess}}$	[mm]	Messposition
Z	[-]	Blickzentrum
$\alpha$	[°]	Biegewinkel
$\alpha$	[°]	Blickwinkel orthogonal zum Spaltverlauf
$\alpha_{\text{Rest}}$	[°]	Restschließwinkel
$\alpha_{VF}$	[°]	Vorfalzwinkel
$\beta$	[°]	Blickwinkel parallel zum Spaltverlauf
$\beta_{S\ddot{O}}$	[°]	Öffnungswinkel des Flanschs
$\gamma$	[-]	Oberflächeneigenschaft des Spaltmodells
$\delta$	[-]	Oberflächeneigenschaft des Spalthintergrunds
$\Delta l$	[mm]	Längenänderung
$\varepsilon_{Gl}$	[%]	Gleichmaßdehnung
$\varepsilon_x$	[%]	Dehnung in einem gebogenen Querschnitt in der Biegetheorie
$\kappa$	[°]	Winkelmaß
$\sigma_F$	[MPa]	Fließspannung
$\theta$	[°]	Lichteinfallswinkel orthogonal zum Spaltverlauf
$\tau$	[°]	Lichteinfallswinkel parallel zum Spaltverlauf
$\varphi$	[-]	log. Formänderung

$\varphi_1$	[-]	1. log. Hauptformänderung
$\varphi_2$	[-]	2. log. Hauptformänderung
$\varphi_b$	[-]	Umformgrad in Breitenrichtung
$\varphi_l$	[-]	Umformgrad in Längenrichtung
$\varphi_l, \varphi_b, \varphi_s$	[-]	log. Formänderungen für die Hauptachsenrichtungen

<b>Abkürzung</b>	<b>Bezeichnung</b>
$A_{\text{Tech}}, B_{\text{Kunde}}, C_{\text{Gesch}}$	Gruppe mit identischem Merkmal
ADAC	Allgemeiner Deutscher Automobil-Club e.V.
Al, Cr, Cu, Fe, Mg, Mn, Ni, Si, Ti, Zn	Chemische Bezeichnung: Aluminium, Chrom, Kupfer, Eisen, Magnesium, Mangan, Nickel, Silizium, Zink
BLC	Bending Limit Curve
DOE	Design of Experiments
FLC	Forming Limit Curve
FLD	Forming Limit Diagram
hdp.	hexagonal-dichteste Kugelpackung
HQD	Hemming Quality Diagram
krz.	Kubisch innenzentriertes Gitter
KTL	Kathodische Tauchlackierung
$RAL_F / RAL_S$	Radiusansatzlinie am Flansch / Strak einer Falzschlaufe
T4	Werkstoffzustand: Lösungsgeglüht und kaltausgelagert.
ZSB	Zusammenbau

## ABSTRACT

In car body manufacturing, particularly in the premium segment, the implementation of design specifications and the achievement of quality targets are key points with regard to the design of manufacturing processes and systems. In addition to the design characteristics of sheet metal parts (such as the feature line on the door), in recent years, the panel gaps between parts that are visible to customers (e.g. between the front and rear door) and the gap-forming characteristics of the hang-on parts have become the focus of vehicle manufacturers. These gap-forming features include the hemming ropes at the component edges. In the design of such hems of aluminium components, there is a trade-off between the manufacturing requirements (large bending radii and correspondingly low mechanical bending strains) and the requirements for the perceived quality of hemming ropes (small radii with a high visual quality).

The aim of this study is to determine a method for the simultaneous evaluation of the manufacturability and the perceived quality of hemming ropes. This allows designing manufacturing processes, especially of hemming processes, whilst taking into consideration both points of view. Thus, even at an early stage of the car body development, it is possible to make a reliable statement about the producible perceived quality of the hems. This in turn, reduces the amount of effort needed, tool revisions and costs.

The first part of this work presents a methodology for forecasting the perceived quality and manufacturability of hems. The basis of this is comprised in turn of two sub-models which are the sub-fields of "perceived quality" and "manufacturability". The complete forecast model is produced by combining both models.

The manufacturability of aluminium hems is examined in the second part of this work. First, the process chain for producing hems with regard to the procedural development of bending loads is considered, while both table top and roller hemming will be investigated. Then, the influencing variables on bending strain and their significance are determined in a DOE study. The same procedure is repeated in order to determine the dimensional design of the hemming ropes. Again, the procedural context is identified and the influencing variables are considered. While the determination and evaluation of bending loads can be built on existing scientific work, new criteria shall be developed for assessing the dimensional characteristics. The procedural consideration of the manufacturing process shows that both the dimensional design of the hem and the resulting bending loads are predisposed already in the production of the sheet part. Roller hemming provides more opportunities to influence the loads compared to table top hemming, especially with respect to the load's local position.

In the third section of this work, the perceived quality of hems is investigated. Based on the results of a field study, a visual model of a vehicle gap is developed, whose dimensional design presents the typical, current implementation of a gap on a premium vehicle. Using this visual model, the perceived features of the gap and the hems are described and quantified by the customer. The appearance is a subjectively formed evaluation of the perceived objects by the observer and thus, cannot be exclusively described by the physical size of the hem characteristics. In order to identify the mostly unconscious recognition of perceived qualities, a comprehensive individual survey will be conducted. In doing so, the significance of individual manufacturing parameters is examined. The assessment of the gap by the subject group has a high homogeneity, whereby a reliable statement about the perceived hem quality can be made.

In the last section, the validation of the methodology is performed based on a series aluminium hang-on part. The predicted values are checked using the metrological determination of the bending loads along the process chain and the determination of the dimensional characteristics of the hem. This shows that a very high correlation exists.

Using technological experiments for hemming aluminium sheet materials, significant process parameters with respect to the bending loads and the dimensional design of the hem were identified. In addition, the perceived quality of hems was generally defined and recorded in a statistical survey. By combining the two findings, the perception of hems and their manufacturability depending on procedural parameters was evaluated simultaneously. In doing so, a scientific contribution has been made to the design of metal forming of aluminium sheet materials and the applicability of the method has been demonstrated.

## KURZFASSUNG

Im PKW-Karosseriebau, insbesondere im Premiumsegment, stellen die Umsetzung von Designvorgaben und die Erreichung von Qualitätszielen zentrale Punkte bei der Auslegung von Fertigungsprozessen und -anlagen dar. Neben den Designmerkmalen der Einzelteile aus Blech (z. B. Charakterlinie an Tür) sind in den vergangenen Jahren auch die für Kunden sichtbaren Fugen zwischen Anbauteile (z. B. zwischen Vorder- und Hintertür) sowie die fugenbildenden Merkmale der einzelnen Anbauteile in den Fokus der Fahrzeughersteller gerückt. Zu diesen fugenbildenden Merkmalen zählt die Falzschlaufe an der Bauteilberandung. Bei der Auslegung solcher Falzverbindungen von Aluminiumanbauteilen besteht ein Zielkonflikt zwischen den fertigungstechnischen Anforderungen (große Biegeradien und dementsprechend geringe werkstoffliche Beanspruchungen) und den Anforderungen an die Anmutungsqualität dieser Falzschlaufen (kleine Radien mit hoher Anmutungsqualität).

Die Zielsetzung dieser Arbeit ist die Ermittlung einer Methode zur simultanen Bewertung der Herstellbarkeit und der Anmutungsqualität von Falzschlaufen. Dies ermöglicht die Auslegung von Fertigungsprozessen, speziell von Falzprozessen, unter Berücksichtigung von beiden Gesichtspunkten. Somit kann bereits zu einem frühen Zeitpunkt innerhalb der Fahrzeugentwicklung eine zuverlässige Aussage über die herstellbare Anmutungsqualität der Falzverbindung getroffen werden. Hierdurch werden Einarbeitungsaufwand, Werkzeugüberarbeitungen und Folgekosten reduziert.

Im ersten Teil dieser Arbeit wird eine Methodik zur Prognose der Anmutungsqualität und der Herstellbarkeit von Falzschlaufen dargelegt. Die Basis hierfür bilden zwei Teilmodelle die ihrerseits die Teilgebiete „Anmutungsqualität“ und „Herstellbarkeit“. Durch die Kombination beider Modelle entsteht das gesamte Prognosemodell (Hemming Quality Diagramm HQD).

Die Herstellbarkeit von Falzverbindungen aus Aluminium wird im zweiten Teil untersucht. Zunächst wird die Prozesskette zur Herstellung von Falzschlaufen im Hinblick auf die prozessuale Entstehung von Biegebeanspruchungen betrachtet, dabei werden sowohl das Maschinenfalz- als auch das Rollfalzen untersucht. Anschließend werden in einer DOE-Studie die Einflussgrößen auf die Biegebeanspruchungen und deren Signifikanz bestimmt. Dieselbe Vorgehensweise wird für die Bestimmung der dimensionalen Ausführung der Falzschlaufe wiederholt. Wiederum werden die prozessualen Zusammenhänge aufgezeigt und die Einflussgrößen betrachtet. Während für die Bestimmung und Bewertung der Biegebeanspruchung auf bestehende Arbeiten zurückgegriffen werden kann, werden für die Bewertung der dimensional Eigenschaften neue Kriterien entwickelt. Die prozessuale Betrachtung des Fertigungsprozesses zeigt, dass sowohl die dimensionale Ausführung der Falzschlaufe als auch die entstehenden



Biegebeanspruchungen bereits durch die Herstellung des Einzelteils prädisponiert werden. Das Rollfalzen bietet dabei im Vergleich zum Maschinenfalzen mehr Möglichkeiten die Beanspruchung, insbesondere deren lokale Position, zu beeinflussen

Im dritten Teil dieser Arbeit wird die Anmutungsqualität von Falzverbindungen untersucht. Auf Basis einer Feldstudie wird ein Anschauungsmodell einer Fahrzeugfuge entwickelt, dessen dimensionale Gestaltung einer heute üblichen Ausführung einer Fuge an einem Premiumfahrzeug darstellt. Mithilfe dieses Anschauungsmodells werden die durch einen Kunden wahrnehmbaren Merkmale der Fuge und der Falzverbindung beschrieben und quantifiziert. Die Anmutung stellt eine subjektiv geprägte Bewertung von wahrgenommenen Objekten durch den Betrachter dar und lässt sich somit nicht ausschließlich durch die physische Größe der Schlaufenmerkmale beschreiben. Für die Erfassung dieser meist unbewussten Erkennung der Anmutungsqualitäten wird eine umfassende Probandenbefragung durchgeführt. Dabei wird die Signifikanz von einzelnen fertigungstechnischen Parametern untersucht. Die Bewertung der Fugen durch die Probandengruppe weist eine hohe Homogenität auf, wodurch eine zuverlässige Aussage über empfundene Fugenqualität möglich ist.

Im vierten Teil erfolgt die Validierung der Methodik anhand eines Serienbauteils aus Aluminium. Anhand der messtechnischen Bestimmung der Biegebeanspruchungen entlang der Prozesskette und der Bestimmung der dimensional Merkmale der Schlaufe werden die prognostizierten Werte überprüft. Es zeigt sich, dass eine sehr hohe Übereinstimmung, d. h. eine hohe Prognosegüte, besteht.

Mithilfe von technologischen Versuchen zum Falzen von Aluminiumblechwerkstoffen konnten signifikante Prozessparameter hinsichtlich der Biegebeanspruchung und der dimensional Ausführung der Falzschlaufe bestimmt werden. Zusätzlich wurde die Anmutungsqualität von Falzschlaufen allgemein definiert und in einer statistischen Erhebung erfasst. Durch die Kombination beider Erkenntnisse wurde die Anmutung der Falzschlaufe sowie deren Herstellbarkeit in Abhängigkeit von prozessualen Parametern simultan bewertet. Dadurch wurde ein wissenschaftlicher Beitrag zur Auslegung von Umformprozessen von Aluminiumblechwerkstoffen geleistet und die Anwendbarkeit der Methode aufgezeigt.



# 1 EINLEITUNG

## *INTRODUCTION*

Steigende Energiepreise und die Entstehung neuer Absatzmärkte haben den globalen Fahrzeugmarkt verändert und stellen die Automobilindustrie vor neue Herausforderungen. Standen in den vergangenen Jahrzehnten noch die Steigerung der Fahrsicherheit und der Karosserieleichtbau im Fokus der Premiumhersteller, gleichen sich heute die technischen Aspekte der Fahrzeuge innerhalb der Marken und der Fahrzeugsegmente zunehmend an. Für die Differenzierung der Marken nimmt deshalb die Bedeutung anderer Faktoren, die einen individuellen Mehrwert des Fahrzeugs für den Kunden darstellen, zu. Das Fahrzeugdesign und insbesondere die hochwertige Verarbeitung des Fahrzeugextérieurs zählen zu diesen Faktoren. [BÜR12]

Das Fahrzeugexterior wird durch die Karosserieanbauteile aus Blech (z. B. Türen) geprägt. Diese bestehen im Wesentlichen aus einem gestrakten Außenteil und einer funktionalen Innengruppe, die wiederum aus mehreren Blechteilen aufgebaut ist. Diese beiden Blechteile werden durch das Falzen des Bauteilflanschs des Außenteils zusammengefügt. Innerhalb der Prozessschritte „Abstellen“, „Vorfalzen“ und „Fertigfalzen“ wird dieser Flansch sequentiell gebogen, bis die formschlüssige Verbindung von Innen- und Außenteil hergestellt ist (vgl. Abbildung 1-1). Die dabei entstehende Falzverbindung sowie die Fuge zwischen zwei benachbarten, gefalzten Bauteilen sind für den Kunden teilweise sichtbar und müssen nicht nur den funktionalen Anforderungen an die Festigkeit des Zusammenbaus, sondern auch den gestalterischen Ansprüchen des Fahrzeugdesigns genügen.

Eine allgemeine Anforderung des Fahrzeugdesigns an die Karosseriefugen ist deren präzise und hochwertige Anmutung, die der Kunde beim Betrachten der Karosserie als Folge der Stimulation, z. B. seines Sehsinns, und der daran anschließenden unbewussten Wahrnehmung und Verarbeitung empfindet. Kleine Fugenmaße und kleine Bauteilradien an der Fahrzeugkarosserie werden dabei generell mit einer hohen Verarbeitungsqualität und einer entsprechend hochwertigen Anmutung assoziiert. Die Forderung nach kleinen Radien bildet einen Zielkonflikt mit den umformtechnischen Anforderungen an die Gestaltung von Falzschlaufen. Während des Falzens von Blechwerkstoffen, insbesondere bei den heute üblicherweise eingesetzten Al-Mg-Si-Legierungen (AA 6xxx), führen kleine Biegeradien zu großen Beanspruchungen auf der gebogenen Außenfaser, die bei Überschreiten der werkstofflichen Grenzen Risse verursachen. Aus umformtechnischer Sicht sind beim Falzen deshalb möglichst geringe Dehnungsbeträge, d. h. große Radien, zu bevorzugen.

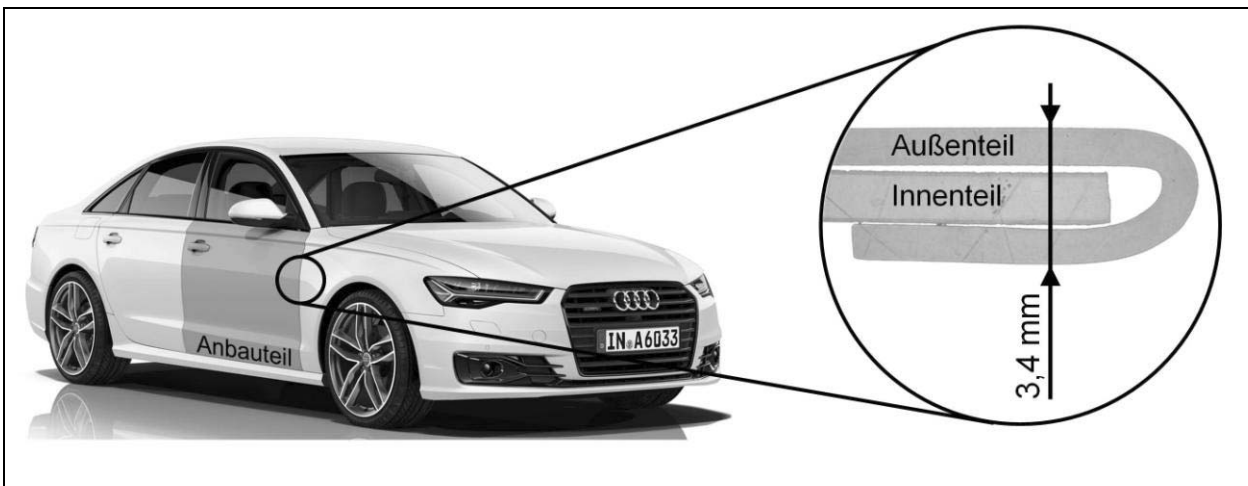


Abbildung 1-1 Falzverbindung an einem Karosserieanbauteil aus Aluminium

Das Ziel dieser Arbeit stellt die Entwicklung einer Methode zur Bewertung der Anmutungsqualität und der Herstellbarkeit von Falzschlaufen dar. Diese Methode beinhaltet zwei Teilmodelle die jeweils die Anmutung bzw. die Herstellbarkeit von Falzschlaufen prognostizieren. Als Eingangsgrößen für beide Teilmodelle werden fertigungstechnische Faktoren (z. B. Nennblechdicke des Außenteils) verwendet. Aus der Synthese beider Modelle wird dann ein Gesamtmodell zur Bewertung der Anmutungsqualität und der Herstellbarkeit (Hemming Quality Diagram) von Falzschlaufen aus Aluminium abgeleitet. Die Validierung der Teilmodelle erfolgt mithilfe von experimentellen und theoretischen Untersuchungen.

Hierzu wird im ersten und zweiten Teil dieser Arbeit die Prozesskette zur Herstellung von Karosserieanbauteilen in Hinblick auf die prozessual eingebrachten Biegebeanspruchungen untersucht. Anhand von technologischen Versuchen zum Roll- und Maschinenfalzen von Aluminiumblechwerkstoffen werden die einzelnen Prozessgrößen (z. B. Abstellen des Bauteilflanschs) betrachtet und die werkstofflichen Beanspruchungen gemessen. Diese Untersuchung ermöglicht somit die detaillierte Bewertung des Beitrags jedes Prozessschritts und jeder Prozessgröße zur kumulierten Biegebeanspruchung des Bauteils. Neben den Biegebeanspruchungen werden auch die dimensional Eigenschaften der Falzschlaufen an den Versuchsproben ermittelt. Dadurch können auf die gleiche Weise die signifikanten Prozessgrößen hinsichtlich der dimensional Ausführung der Schlaufen experimentell bestimmt werden.

Im dritten Teil der Arbeit erfolgt die Untersuchung der Anmutungsqualität von Falzschlaufen. Zunächst werden in einer Feldstudie an aktuellen Fahrzeugen des Premiumsegments charakteristische Merkmale von Karosseriefugen bzw. Falzschlaufen und deren Größe ermittelt. Dies bildet den Ausgangspunkt für eine theoretische Betrachtung der Wahrnehmung solcher Fugen. Hierzu wird ein virtuelles Anschauungsmodell erstellt, dass die gezielte Untersuchung

von Einflussgrößen (z. B. Blickwinkel) auf die Wahrnehmung von Karosseriefugen untersucht und quantifiziert. Das Wahrnehmen der Fuge bildet jedoch nur einen Teil der „Kommunikation“ zwischen Produkt und Kunde. An das Wahrnehmen der Karosseriefuge schließt sich das „Erkennen“ von spezifischen Erkennungsinhalten (z. B. Fahrzeugmarke) an. Dieser subjektiv geprägt, mentale Verarbeitungsvorgang wird durch die Befragung einer Probandengruppe hinsichtlich der empfundenen Anmutung von verschiedenen Schlaufenausführung genauer erörtert. Ziel der Befragung ist die Identifikation von Einflussgrößen auf die Erkennung der Anmutungsqualität von Falzschlaufen.

Den Abschluss dieser Arbeit bildet die Anwendung und Praxisvalidierung des vorgestellten Modells anhand eines Serienbauteils aus Aluminium. Folglich leistet diese Arbeit einen Beitrag zum besseren Verständnis der Umformprozesse bei der Herstellung von Karosserieanbauteilen. Insbesondere dienen die Ergebnisse zur Prognose der resultierenden, kumulierten Biegebeanspruchung an der Falzschlaufe anhand von Fertigungsparametern der Einzelteilherstellung und des Zusammenbaus. Somit können frühzeitig, innerhalb der Produkt- und Prozessauslegung, Aussagen zur Machbarkeit getroffen werden, wodurch Fehlerkosten im Produktlebenszyklus (z. B. Änderungen an Serienwerkzeugen) vermieden werden. Des Weiteren wird ein Beitrag zum tieferen Verständnis der Erkennung von Anmutungsqualitäten von Karosseriefugen geleistet. Diese wird parallel zur Herstellbarkeit und anhand identischer Eingangsgrößen prognostiziert. Somit wird nicht nur die technologische Herstellbarkeit der Falzverbindung sondern auch die Erreichbarkeit von Designvorgaben bewertet. Auf diese Weise können auf schnelle Weise zuverlässige Angaben zu den herstellbaren Produkteigenschaften gemacht werden, wodurch Fehlerkosten vermieden werden.

## 2 STAND DER ERKENNTNISSE

### *STATE OF THE ART*

In den nachfolgenden Unterkapiteln wird zunächst die Anmutung von Karosseriefugen betrachtet. Hierfür wird die Erkennung von Anmutungen auf Basis von physikalischen und psychologisch geprägten Vorgängen beschrieben. Neben diesen gestalterischen Aspekten wird die Prozesskette zur Herstellung von Karosserieanbauteilen vorgestellt, bei der das Fügen von Einzelteilen aus Blech durch Falzen den Schwerpunkt der Betrachtungen bildet. Hierbei werden die beiden heute üblichen Falztechnologien Roll- und Maschinenfalzen erläutert. Die umformtechnischen Grundlagen umfassen die elementare Biegetheorie sowie die Beschreibung der biegeinduzierten Versagensmechanismen. Im letzten Abschnitt werden Einflussfaktoren auf die Biegebeanspruchung und die dimensionale Ausführung von Falzverbindung aus Aluminium betrachtet.

### **2.1 Anmutung von Karosseriefugen**

Die äußere Gestaltung von Produkten, insbesondere von Fahrzeugen, erlangt gegenüber den sachlichen Nutzleistungen des Produktes zunehmend an Bedeutung. Im Premiumautomobilmarkt werden Design und Anmutung bereits heute eine höhere Bedeutung beigemessen als den konkreten Produktmerkmalen. Eine Ursache hierfür ist die starke Prägung des Premiumcharakters durch die ästhetischen Merkmale des Fahrzeugs.

Im ersten Teil dieses Abschnitts werden die Anmutung von Produkten, die Entstehung von „Anmutungen“ beim Kunden und die Mittel zur anmutungshaften Gestaltung von Produkten beschrieben. Im zweiten Teil wird auf Karosseriefugen als Designmerkmal von Premiumfahrzeugen eingegangen. Da der Begriff „Anmutung“ in den wissenschaftlichen Teilgebieten der Psychologie und des Produktmarketings unterschiedlich verwendet wird, werden die kontextbezogenen Bedeutungen des Begriffs zunächst kurz aufgeführt.

#### **Psychologie**

Die „Anmutung“ bezeichnet diffuse, gefühlsartige Eindrücke des Erlebenden, die durch die Wahrnehmung des physischen Raums hervorgerufen werden. Diese emotionalen Eindrücke beeinflussen die Gesamtstimmung des Erlebenden. Die „Anmutung“ beschreibt somit die Weise wie Wahrnehmung und Vorstellung auf den Erlebenden einwirken und dabei gleichzeitig Gefühle im Erlebenden auslösen. Die Eigenschaften des physischen Raums die den Erlebenden ansprechen werden als Anmutungsqualitäten bezeichnet. [KUL09; SCH13]

## Produktmarketing

Im Produktmarketing bezeichnet die „Anmutung“ eine positive oder negative Stimmung die ein Gegenstand in der Anfangsphase der Wahrnehmung beim Verwender auslöst. Das Unbewusste wird im Erlebenden bzw. Verwender vom erlebten bzw. betrachteten Gegenstand angesprochen. Die hervorgerufenen Gefühlsregungen sind in ihrem Ausmaß und ihrer Bedeutung unterscheidbar. Die „Anmutung“ ist auch eine Eigenschaft des Objektes, die durch das Projizieren der unspezifischen Eindrücke des Verwenders hervorgerufen wird. Anmutungsleistungen bezeichnen diejenigen Produkteigenschaften die das Unbewusste im Verwender ansprechen. Die „Anmutung“ ist somit die Entscheidungsgrundlage für oder gegen die Wahl eines Produktes. [FRI76; KOP93; NEU00]

In beiden Wissensgebieten steht die Wahrnehmung des Objektes im Mittelpunkt und bildet die Grundlage für das Auftreten von „Anmutungen“. Im Folgenden wird die Wahrnehmung von Objekten bzw. die Kommunikation von Mensch und Produkt betrachtet.

### 2.1.1 Theoretische Grundlagen der Wahrnehmung und Erkennung

Die „Kommunikation“ zwischen Mensch und Produkt wird nach Seeger [SEE05] durch die Wahrnehmung, die Erkennung und das Verhalten bestimmt. Dieser dynamische Vorgang lässt sich in einzelne, aufeinander aufbauende und zeitlich nacheinander ablaufende Prozessschritte gliedern (vgl. Abbildung 2-1). Die diesen Prozessschritten zugrundeliegenden physischen, psychologischen und neurowissenschaftlichen Abläufe sind nachfolgend beschrieben.

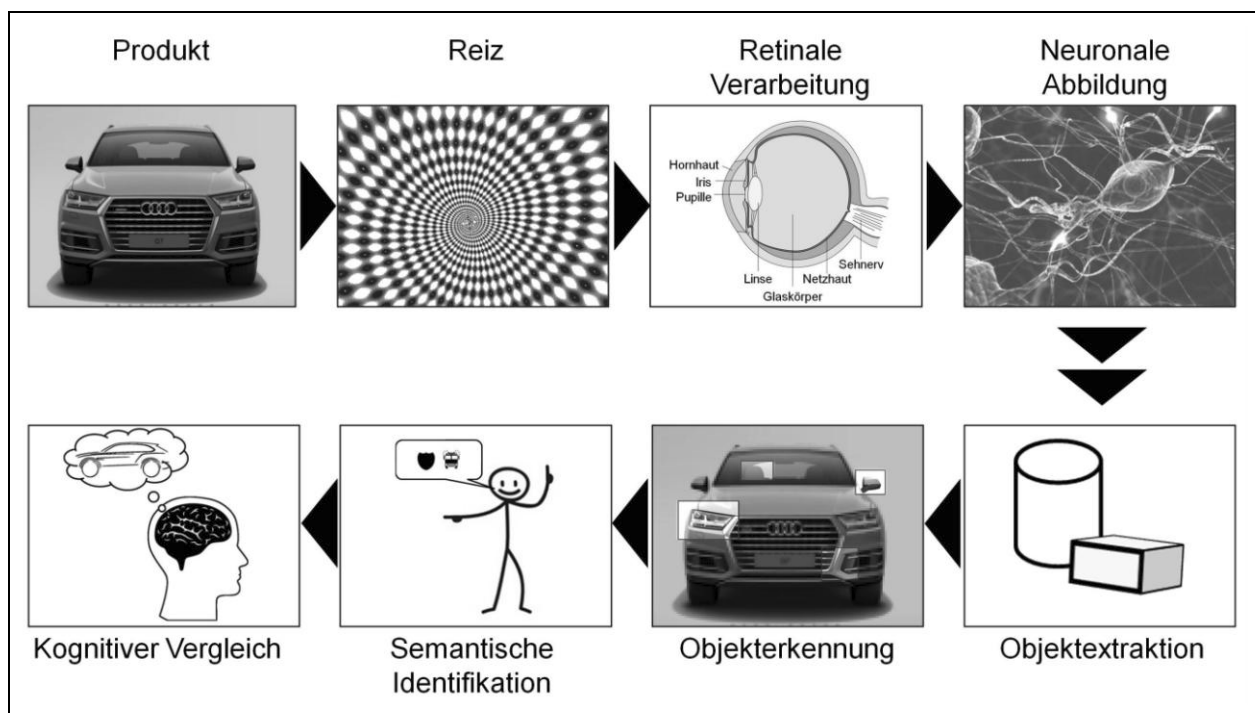


Abbildung 2-1 Schema der neurowissenschaftlichen Abläufe beim Wahrnehmen und Erkennen [SCH11]

## Produkt

Nach Seeger wird ein Produkt durch vier gestalterische Dimensionen definiert. Eine Produktgestalt besteht demnach aus der Ganzheit oder der Vereinigung der Teilgestalten Grafik, Farbe, Form und Aufbau. Der Aufbau zeigt sich dabei in allen Teilgestalten. Des Weiteren bestehen die jeweiligen Teilgestalten aus Gestaltelementen und Gestaltordnungen. Die Teilgestalt Form stellt die zweite Abstraktion der Gestalt ohne Berücksichtigung der Grafik und der Farbe dar und umfasst somit alle nicht-farbigen Formen der aufgebauten und nicht-beschrifteten Gestalt. Die Teilgestalt Aufbau stellt die dritte Abstraktionsebene dar. Sie umfasst die Gestalt ohne Grafik, Farbe und Form. [SEE05]

## Reiz

Ein Reiz (Stimulus) ist eine zunächst allgemeine Bezeichnung für eine physikalische oder chemische Größe deren Zustandsänderung zu einer messbaren Veränderung in einem Organismus führt. Diese Zustandsänderung kann sowohl außerhalb (Außenreiz) als auch innerhalb (Organreiz) des Organismus auftreten. Demnach werden chemische, osmotische, thermische, mechanische, akustische, elektrische und optische Reize unterschieden. [BÖS06]

Das Aussehen von Gegenständen beispielsweise wird durch den spektralen Reflexionsgrad der Oberfläche, den Farbkontrast und den Hell-Dunkel-Kontrast bestimmt. Die Leuchtdichte dient hierbei zur quantitativen Beschreibung der gesehenen Helligkeit als ein auf die Fläche bezogener Lichtstrom von selbstleuchtenden oder beleuchteten Objekten. Der physikalische Kontrast ergibt sich aus dem Leuchtdichteunterschied angrenzender Strukturen. [SCH07B]

Die Veränderung eines Reizes wird von einem Individuum proportional zu dessen Intensität wahrgenommen. Demnach ist ein Individuum erst dann in der Lage die Intensität zweier verschieden großer Reize zu unterscheiden, wenn der Unterschied einen bestimmten Schwellenwert überschreitet [SIX82]. Dieser Schwellenwert ist jedoch nicht konstant, sondern abhängig vom Niveau der Intensität des Reizes. Somit kann bei gleichbleibender Differenz zwischen zwei Reizen und gleichzeitiger Erhöhung des Reizniveaus die Unterscheidbarkeit der Reize, in Folge des Unterschreitens des Schwellenwerts, durch ein Individuum nicht mehr möglich sein [KIE08]. Das Weber-Fechner-Gesetz (Gleichung 2-1) besagt, dass der durch das Individuum empfundene Reiz (E) nur linear ansteigt, obwohl der physikalische Reiz (R) exponentiell anwächst. Der empfundene Reiz ist dabei auch von der Art der Reizes (c) und dem Schwellenwert ( $R_0$ ) abhängig [EBL09].

$$E = c \cdot \ln \frac{R}{R_0} \quad \text{Gleichung 2-1}$$



Für die Erkennung von Größenunterschieden von technischen Produkten gibt Kienzle [KIE13] Normungszahlen an. Diese bestimmen die von Fachmännern und Laien erkennbaren Größenunterschiede innerhalb der jeweiligen Reihe, siehe Tabelle 2-1. Die erkennbare Größenänderung wird als Stufensprung bezeichnet. Die Werte innerhalb der Reihe ergeben sich aus der Multiplikation des Stufensprungs.

Tabelle 2-1: Normungszahlen für erkennbare Größenverhältnisse nach [KIE13]

Bezeichnung	Stufensprung	Reihe				Erkennbarkeit
R5	1,60	1,0	1,6	2,5	4,0	Deutlich unterscheidbar
R10	1,25	1,0	1,25	1,6	2,0	Erkennbar für Nichtfachmann
R20	1,12	1,0	1,12	1,25	1,4	Erkennbar mit großer Übung
R40	1,06	1,0	1,06	1,12	1,18	Höchstens vom Fachmann erkannt

### Retinale Verarbeitung

Das von einem Objekt reflektierte oder von einer Lichtquelle ausgesendete Licht wird durch den dioptrischen Apparat des Auges (Hornhaut, Linse, Glaskörper, Kammerwasser), gebrochen. Durch diesen Vorgang entsteht eine auf dem Kopf stehende und seitenverkehrte Abbildung des gesehenen Objektes auf der Netzhaut. Dieses Bild fällt auf die Retina und stimuliert die dort vorhandenen lichtempfindlichen Fotorezeptoren (Stäbchen, Zapfen). Die Zapfen sind auf unterschiedliche Wellenlängen spezialisiert, d. h. bereits bei geringen Energiebeträgen erfolgt deren Aktivierung. Die Verteilung der Zapfen auf der Retina ist im Allgemeinen ungleichmäßig. Die höchste Zapfendichte befindet sich an der Fovea centralis. Diese stellt die Position der höchsten Sehschärfe dar. Die Stäbchen hingegen reagieren auf das gesamte Lichtspektrum und werden zum monochromatischen Sehen genutzt. Durch das Ausschütten von Neurotransmittern (Botenstoffe) wird die Erregung der Fotorezeptoren an die nachfolgenden Neuronen (retinale Bipolarzellen) weitergeleitet. Diese sammeln und gewichten die empfangenen Signale und leiten diese dann an die retinale Ganglienzellen weiter. Die Nervenzellenausläufer (Axone) der Ganglienzellen reichen über das Auge hinaus und leiten die Signale an das Gehirn weiter. [FAN03; RIE10]

Aus der Lage des Objektes vor dem Auge, der Größe des Objektes und des Abstands von Linse und Netzhaut ergibt sich die Bildgröße auf der Netzhaut. Die Auflösung des menschlichen Auges beträgt unter guten Lichtbedingungen ca. eine Winkelminute. Dies entspricht dem Sehen eines 1 mm großen Objektes aus 3,4 m Entfernung [LAN07]. Zusätzlich wird die Fähigkeit Wahrnehmbarkeit von Objektdetails durch deren Kontrast bestimmt. Der gerade noch auflösbare Kontrastunterschied wird durch die Kontrastempfindlichkeit beschrieben. Diese Empfindlichkeit hängt vom Abstand der Hell-Dunkel-Wechsel im Sichtfeld ab. So werden beispielsweise Kontrastmuster mit geringem Abstand von hellen und dunklen Feldern, d. h. mit einer großen

Raumfrequenz<sup>1</sup>, mit geringer Empfindlichkeit wahrgenommen. Das Optimum der Kontrastsensitivität befindet sich bei einer Raumfrequenz von 3 Perioden pro Sehinkelgrad, der noch sichtbare Kontrast beträgt dann 0,003. [CAM87]

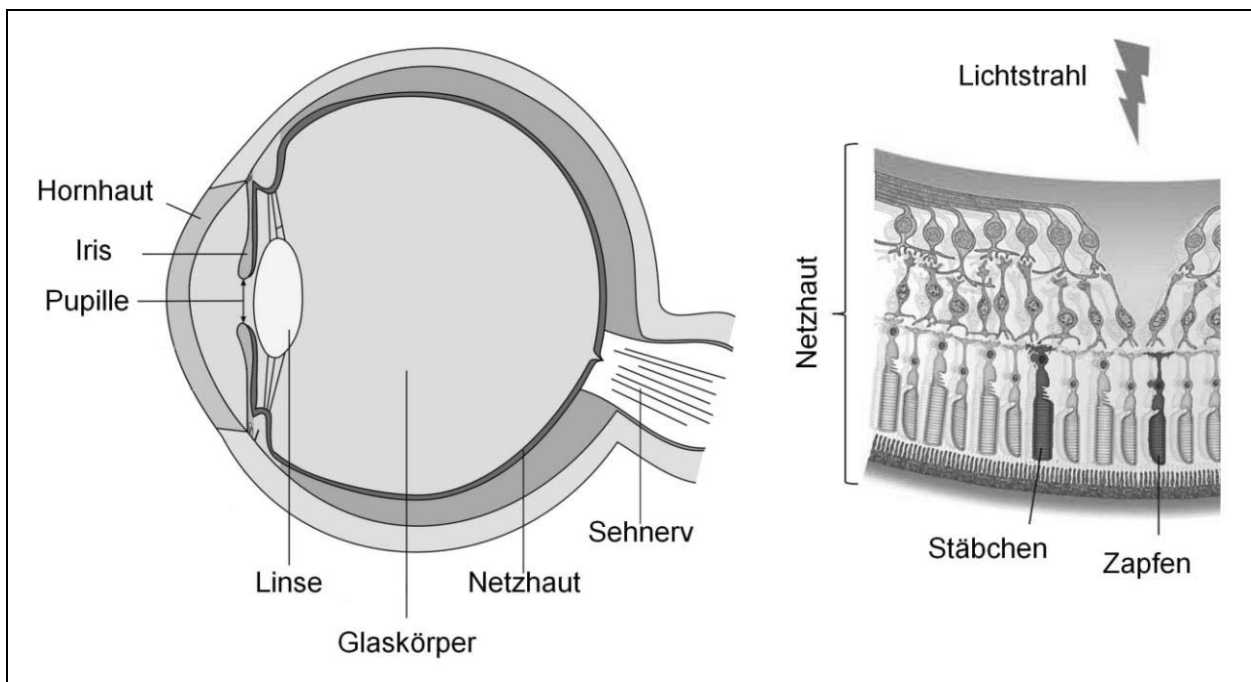


Abbildung 2-2 Aufbau des menschlichen Auges [SCH11]

### Neuronale Abbildung

Die an das Gehirn gesendeten Signale werden im primären visuellen Cortex weiterverarbeitet (Brodmann Areal 17). Die darin enthaltenen einzelnen Neuronen reagieren auf Lichtstreifen. Somit erfolgt die gleichzeitige Extraktion einzelner Gestaltelemente (Kanten, Linien) aus dem gesamten Reiz. Zusammenhängende Neuronen bilden ein Sub-Netz, das komplexere Strukturen, d. h. Linien und deren Orientierung, abbildet. Ein solches Sub-Netz repräsentiert reale Inhalte, deren neurale Teilstrukturen weitgehend identisch sind. So besitzen beispielsweise eine Verpackungsschachtel und ein Mauerstein eine gleiche neuronale Teilstruktur (Quader). Im Anschluss ist ein Transformationsprozess erforderlich, der das quasifotografische Abbild der Realität als neuronales Muster speichert bzw. kodiert. [BIE12; FAN03; PRI03]

### Objektextraktion

An den primären visuellen Cortex schließt sich das sekundäre Gebiet an (Assoziationsgebiet, Brodmann Areale 18 und 19). Darin werden die aus dem primären Gebiet eingehenden

<sup>1</sup> Die Raumfrequenz bezeichnet die Anzahl der vollständigen Hell-Dunkel-Wechsel innerhalb einer bestimmten Größe des sichtbaren Bildausschnitts.

Informationen ineinander integriert und mit früheren Informationen und Mustern verglichen. Ebenso erfolgt die Bestimmung der räumlichen Orientierung des Gesehenen. [FAN03]

Das Erkennen von Struktur und Ordnung durch die menschliche Wahrnehmung wird in der Gestaltpsychologie<sup>2</sup> untersucht. Die Organisationsprinzipien, die zu einer spontanen Strukturierung und Gruppierung von Gegenständen führen, sind in den sogenannten Gestaltheuristiken zusammengefasst (vgl. [BÜR05; SCH11]). Nachfolgend sind die wichtigsten der über 100 bekannten Prinzipien aufgeführt.

- ◆ Prinzip der Prägnanz: Ein Objekt wird so wahrgenommen, dass es eine möglichst einfache Struktur abbildet.
- ◆ Prinzip der Nähe: Einzelelemente werden als zusammengehörig empfunden, wenn diese nahe beieinanderliegen.
- ◆ Prinzip der Ähnlichkeit: Einzelelemente gleicher Form oder Farbe werden als Teil eines gemeinsamen Objektes gesehen.
- ◆ Prinzip der Symmetrie: Symmetrische Strukturen werden einem Objekt zugeordnet.
- ◆ Prinzip der Kontinuität: Einzelelemente, die scheinbar eine Fortsetzung vorangehender oder unterbrochener Elemente bilden, werden diesen zugeordnet.

### **Objekterkennung**

Zur Erklärung von Mustererkennung werden in der Wahrnehmungspsychologie zwei Hauptansätze unterschieden. Während in den Schablonentheorien (template theories) ein Abgleich von wahrgenommenen Objekten mit bereits bekannten Objekten im Langzeitgedächtnis stattfindet, wird in den Merkmalstheorien (feature theories) angenommen, dass wahrgenommene Objekte zunächst analysiert und anhand der spezifischen Merkmale identifiziert werden. Zu den Merkmalstheorien zählen die „Computational Theory“ (vgl. [MAR80; MAR78]) und die „Geon Theory“ (vgl. [BIE88; BIE87]), welche nachfolgend erläutert wird.

Den zentralen Aspekt der Geon<sup>3</sup>-Theorie bildet die Erkennung von Objekten anhand der geometrischen Merkmale ihrer Kanten in der zweidimensionalen Abbildung im visuellen System des Menschen und der Annahme, dass diese Merkmale denen des dreidimensionalen Objektes entsprechen. So werden gerade Linien in der Abbildung als Indiz für gerade Kanten des dreidimensionalen Objektes angesehen. Die Möglichkeit, dass dieses Merkmal in der Abbildung das zufällige Ergebnis der Anordnung einer gekrümmten Linie und dem menschlichen Auge ist, wird ausgeblendet. Die Merkmale von Kanten, die in zweidimensionalen Abbildungen erfasst und auf

---

<sup>2</sup> Die Gestaltpsychologie geht auf die Arbeiten des Philosophen Christian von Ehrenfels zurück, siehe [EHR88].

<sup>3</sup> Geon: Abgeleitet von Geometrical Icon

das dreidimensionale Objekt übertragen werden, werden nicht-zufällige Merkmale genannt. Hierzu zählen die Kolinearität, die Krümmigkeit, die Symmetrie und die Parallelität. Die Erkennung von Kanten kann durch Helligkeits- und Farbunterschiede in farbigen Abbildungen erleichtert werden. Vor allem der Helligkeitsverlauf einer Oberfläche trägt zum Erkennen der Oberflächenkrümmung bei. Die Erkennung von Oberflächen und Farben alleine reicht jedoch zur Objekterkennung nicht aus. Erst durch die volumetrische Information aus der Kantenerkennung folgt die mentale Erkennung des Objektes. Das Objekt wird eingeordnet und repräsentiert dann ein Objekt einer Kategorie. [BIE87] Der Mustervergleich und die Objekterkennung finden im Temporallappen (Brodmann Areale 20, 21) statt.

### **Semantische Identifikation**

Während der semantischen<sup>4</sup> Identifikation wird die strukturierte Repräsentation des wahrgenommenen Objekts mit bereits bekannten Repräsentationen im semantischen Gedächtnis verglichen. Das semantische Gedächtnis beinhaltet die grundlegende Bedeutung von Begriffen, deren Kategorien und Zusammenhänge. Es ist Teil des expliziten Gedächtnisses und somit bewusst, ohne aktiv im Bewusstsein zu erscheinen. Das im semantischen Gedächtnis gespeicherte Wissen enthält Informationen bzw. Objekteigenschaften, die nicht unmittelbar aus der visuellen Wahrnehmung abgeleitet werden können. Mithilfe dieser zusätzlichen Informationen aus der Kognition, der Kategorisierung des Objektes und dem subjektiven Erfahrungsschatz des Betrachters wird das Objekt identifiziert. Die semantische Identifikation erfolgt im Brodmann Areal 38. [KAR06; KEN14; RÖS11]

### **Kognitiver Vergleich**

Das erkannte Objekt wird durch den kognitiven Vergleich in den Kontext der Wahrnehmungssituation gebracht. Daraus wird eine Handlung abgeleitet und dieses Handeln vorbereitet. Es kann sich dabei sowohl um eine motorische (z. B. Benutzung), verbale (z. B. Benennung) als auch um eine emotionale Aktion handeln. [SIN10]

## **2.1.2 Erkennung und Gestaltung von Anmutungsqualitäten**

Im Sinne der Produktdesigns wird unter der Erkennung einer Produktgestalt die Zuordnung von Bezeichnungen über deren Eigenschaften verstanden. Analog wird von der semantischen Dimension gesprochen. Es können auf sprachlicher Ebene die folgenden Erkennungsinhalte unterschieden werden [SEE05]:

---

<sup>4</sup> semanticós (griechisch) = bezeichnend, bedeutend

- ◆ Eigenschaften/Qualitäten eines Produkts    ◆ Herkunft des Produkts
- ◆ formale Qualitäten                                    ◆ Anmutungsqualitäten

Die Erkennungsinhalte können sowohl analog als auch konkret sein. Die analoge Erkennung einer Produktgestalt erfolgt assoziativ zur bekannten Umwelt des Betrachters und basiert auf Menschen, Objekten der Umwelt, Architektur und Objekten des Handwerks. Die bekannteste Analogie im Fahrzeugbau ist die Frontalansicht des Fahrzeugs, die als „Gesicht des Fahrzeugs“ bezeichnet wird. Die Anmutung zählt ebenso zur analogen Erkennung der Produktgestalt. Dabei bezeichnet die Anmutung die erste, unreflektierte und emotionale Wirkung einer Wahrnehmung auf den Betrachter. [GOL08]

Tabelle 2-2: Präzisierung der Erkennungsinhalte nach [SEE05]

Konkrete Erkennung		Analoge Erkennung	
Eigenschaften	Herkunft	Formale Qualität	Anmutungsqualität
Zweckerkennung	Herstellereerkennung	Rein/Unrein	Warm/Kalt
Fertigungserkennung	Markenerkennung	Geordnet/Ungeordnet	Ruhig/Unruhig
Prinziperkennung	Händlererkennung		Weich/Hart

Die Ursachen für Unterschiede und Gemeinsamkeiten bei der Bewertung von Produkten durch Individuen basiert auf den persönlichen Einstellungen und Werten der Benutzer. Diese sind kulturell und sozial geprägt oder basieren auf den persönlichen Erfahrungen. Ebenso spielt die ästhetische Bildung eine Rolle beim Erkennen. [BLO95; OEH11; RAA10] Aufgrund dieser vielfältigen Einflussgrößen existieren nahezu unendlich viele Bezeichnungen für Anmutungsqualitäten. Nachfolgend sind einige Bezeichnungen bzw. Paare von Anmutungsqualitäten nach [BIE12; DÖR76; SEE14] aufgeführt:

- ◆ Männlichkeit/Weiblichkeit                                    ◆ Wuchtigkeit/Zierlichkeit
- ◆ Freundlichkeit/Feindseligkeit                                    ◆ Strenge/Verspieltheit
- ◆ Knackig/Lasch    ◆ Fließend/Gebrochen
- ◆ Klar/Verspielt    ◆ Harmonisch
- ◆ Wertvoll    ◆ Elegant
- ◆ Interessant    ◆ Vertraut
- ◆ Modern    ◆ Sachlich

Für die Gestaltung von anmutungshaften Produkten sind grundsätzliche Zusammenhänge zwischen der Form und den erzielbaren Anmutungsqualitäten bekannt. So bestimmt nach [DÖR76] der Begrenzungsverlauf des Formelementes die prädisponierte Gestalt und signalisiert die Bedeutung und die Anmutung der Gestalt. Begrenzungen können in einem ersten Schritt in gerade verlaufend oder gekrümmt verlaufend unterteilt werden. Ein geradliniger Begrenzungsverlauf wird im Allgemeinen als abgemessen, hart, starr und nüchtern gedeutet. Ein

gekrümmter Begrenzungsverlauf wird als hemmend, weich, flexibel und belebt interpretiert. Im Detail können sogar radial gekrümmte Begrenzungen, die das Teilstück eines Kreises darstellen, und nichtradial gekrümmte Verläufe unterschieden werden. Dabei werden radiale Verläufe als starrer empfunden, siehe Abbildung 2-3. [DÖR76]

Neben dem Begrenzungsverlauf ist auch die Begrenzungserstreckung, welche die räumliche Ausrichtung des Verlaufs beschreibt, zu beachten. Eine horizontale Erstreckung wird als ruhend, lastend, passiv erkannt. Im Gegensatz hierzu werden vertikale Begrenzungserstreckungen als strebend, aktiv, schwerkraftüberwindend gedeutet. Begrenzungsverläufe die diagonal ausgerichtet sind, werden als dynamisch und mit potentieller Energie geladen interpretiert. Es werden hierbei linksgerichtete Begrenzungserstreckungen, d. h. diagonal von links oben nach rechts unten verlaufend, mit Gefahr, Unfall und Sturz assoziiert. Die Interpretationen solcher Begrenzungserstreckungen sind negativ, rückbezüglich, introvers, passiverhaltend und weiblich. Im Gegensatz hierzu werden rechtsgerichtete Begrenzungserstreckungen, d. h. diagonal von links unten nach rechts oben verlaufend, als aufstrebende Elemente, Optimismus und Lebensfreude gedeutet. Die Eindrücke des Betrachters sind positiv, aggressiv, extravers, aktiv und männlich. [DÖR76]

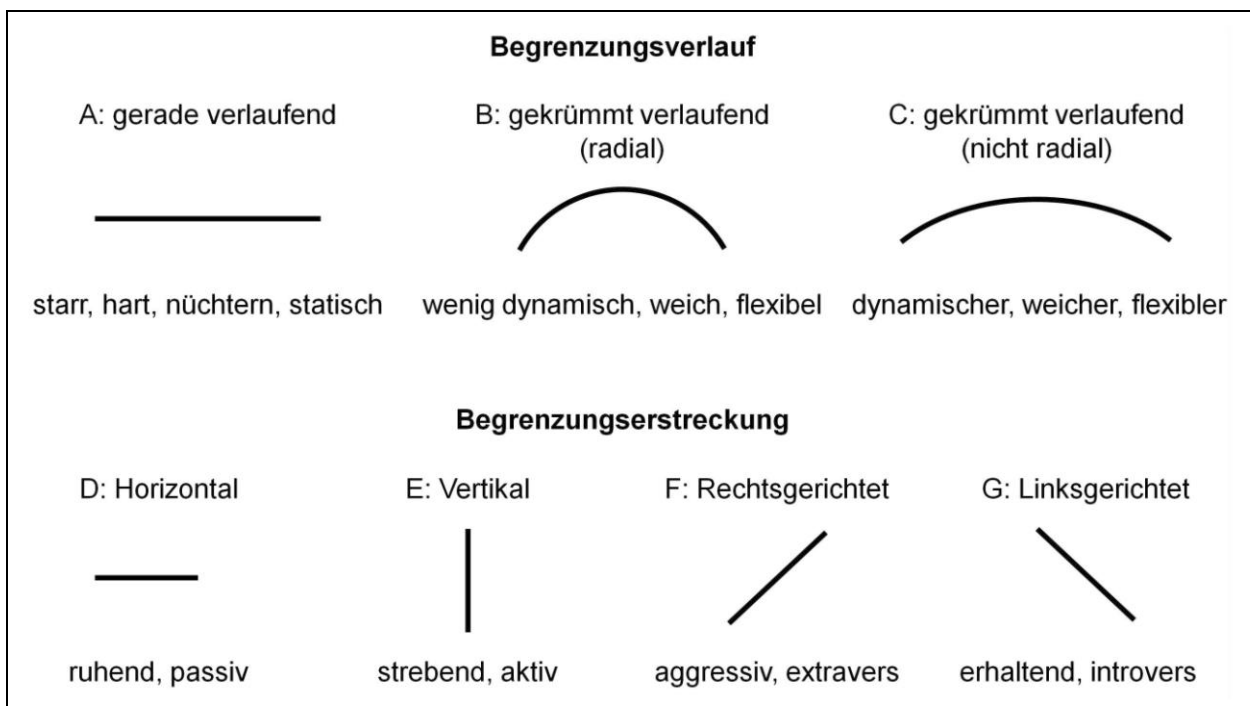


Abbildung 2-3 Anmutung von Begrenzungsverläufen und -erstreckungen von Gestalten nach [DÖR76]

Die von der Begrenzung einer Form ausgehende Anmutung wird durch Winkel bzw. Bögen verstärkt bzw. abgeschwächt. Die sog. Winkel- und Bogenausprägungen beeinflussen die Strebungstendenzen und Strebungskräfte der Begrenzungserstreckungen. Ein rechter Winkel zwischen zwei Einzelementen wird als neutral betrachtet. Mit zunehmender Spitzwinkligkeit

nimmt die Verstärkung zu. Bei Stumpfwinkligkeit wird die Anmutung abgeschwächt. Ähnliche Zusammenhänge sind bei Bogenausprägungen zu beobachten. Geradschenklige Winkel wirken neutral, konvex gekrümmtschenklige Winkel wirken vergleichsweise hemmend. Im Gegensatz hierzu weisen konkav gekrümmtschenklige Winkel eine verstärkte Anmutung auf. [DÖR76; SEE13]

Neben den Linien bzw. der Begrenzungserstreckung sind Flächen für die Anmutung von Gestalten relevant. Einfache Flächenelemente z. B. Quadrat, Kreis oder Dreieck bilden dabei die Grundlage für komplexere Flächenstrukturen. Die Flächenelemente lassen sich kategorisch in „runde“ und „eckige“ Formen unterteilen. Runde Formen werden dabei als Urform bzw. als Formprinzip der Natur angesehen. Da natürliche Prozesse meist zyklisch verlaufen und natürlichen Gestalten rundlich sind, werden solche Formen als beweglich und dynamisch angesehen. Im Gegensatz hierzu sind Quadrate und rechteckige Formen die Archetypen der rationalen Schöpfung. Sie verkörpern das Unbewegte, Statische und Festverankerte. Die Proportionierung der Begrenzungserstreckungen einer Gestalt zueinander wird durch die Horizontal-Vertikalerstreckungsrelation beschrieben, siehe Abbildung 2-4. Gestalten die eine Horizontal-Vertikalerstreckungsrelation größer eins aufweisen, besitzen eine größere horizontale als vertikale Ausdehnung. Die Gestalt wird als liegend, ruhig, lastend, passiv bezeichnet. Bei Horizontal-Vertikal-Erstreckungen kleiner eins, werden die Gestalten als stehend, strebend, aktiv, steigend verstanden. [DÖR76; SEE13]

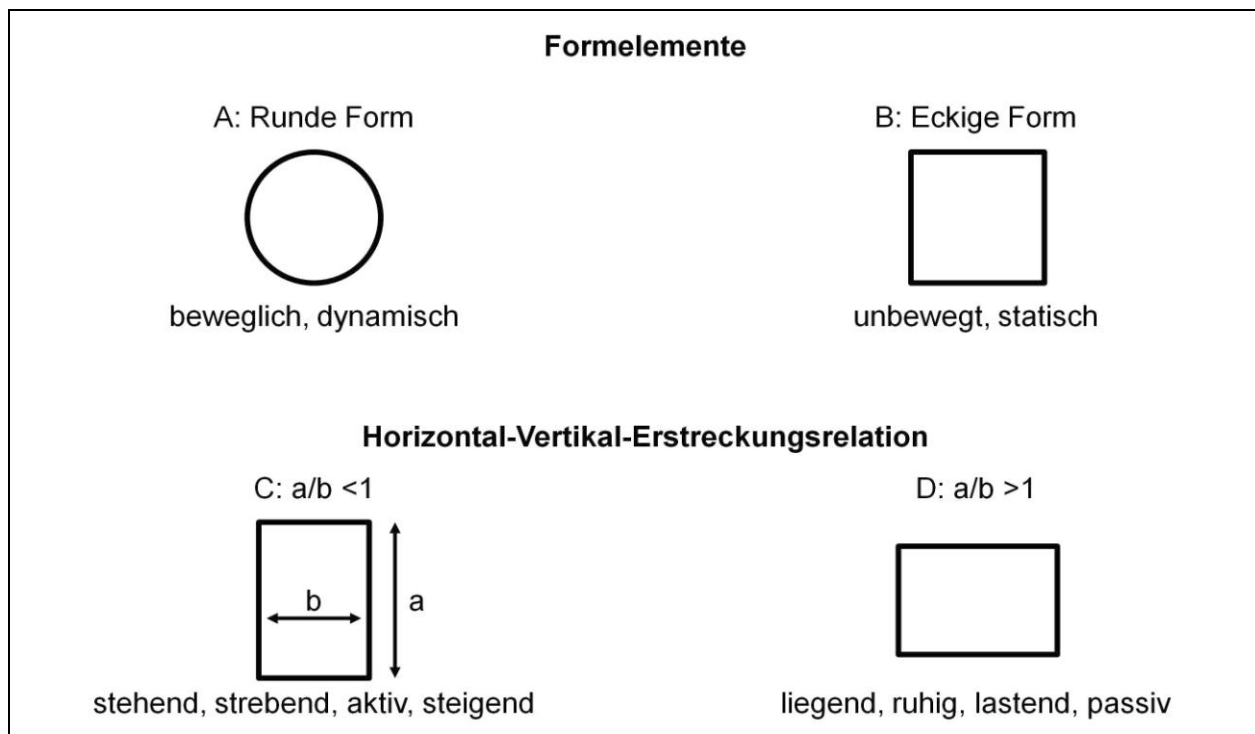


Abbildung 2-4 Anmutung von Horizontal-Vertikal-Erstreckungsrelationen und Formelementen von Gestalten nach [DÖR76]

Zusätzlich zur Produktform bieten sich weitere Möglichkeiten die Anmutung eines Produktes zu gestalten. Hierzu zählen der gezielte Einsatz von Farben, Oberflächentexturen, Werkstoffen (z. B. Holz und Leder im Innenraum eines Fahrzeugs zur Erzeugung eines hochwertigen Charakters) und Gerüchen. [SCH76; UNG86]

### **2.1.3 Karosseriefugen als Designmerkmal moderner Fahrzeugkarosserien**

Im Kaufentscheidungsprozess ist die Karosserie des Fahrzeugs, vornehmlich das Exterieur-Design, einer der Haupteinflussfaktoren und dient der Vermittlung der zentralen Markenwerte und der Fahrzeugcharakteristik. Das Designkonzept des Fahrzeugs wird dabei von nichtgestalterischen Faktoren (z. B. behördliche und gesetzliche Rahmenbedingungen), technologischen Faktoren (z. B. Herstellbarkeit von Bauteilen) und gestalterischen Faktoren (z. B. markenspezifische Designmerkmale) bestimmt. In diesem Abschnitt werden die gestalterischen Elemente von Fahrzeugkarossen und insbesondere deren Karosseriefugen betrachtet. Die gesetzlichen Rahmenbedingungen für Karosseriefugen sowie die Betrachtung deren Herstellbarkeit folgen in Kap. 2.4. [STE11; TUM14]

Ein wesentliches Element des Produktmarketings ist die Abgrenzung bzw. Unterscheidung von Produkten eines Unternehmens zu jenen eines Wettbewerbers. Hierzu werden im Automobilbau Marken, die auf die individuelle Kundengruppen oder Absatzmärkte zuschnitten sind, eingesetzt. Die Relevanz von Marken bzw. des Markenimages für den Fahrzeugkauf zeigt sich z. B. im ADAC Markenindex. Die Erkennbarkeit von Marken und somit die Übermittlung des Markenimages wird durch die Gestaltung des Fahrzeugexteriurs bestimmt. Zur Kennzeichnung solcher Marken werden bestimmte Designelemente wie die BMW-Niere, die Rolls-Royce-Kühlerfigur, der Mercedes-Stern oder die Audi-Ringe eingesetzt. Für diese markenspezifischen Elemente sind primär die Fahrzeugfront und das Fahrzeugheck geeignet. Aber auch andere Designelemente können die Markierungsfunktion erfüllen, z. B. der Hofmeisterknick (BMW) am seitlichen Heckfenster. [STE11]

Zu den gestalterischen Faktoren des Fahrzeugdesigns zählen auch die Fahrzeugproportionen und die geschwungenen Formflächen der Außenhaut. Die Außenhautflächen von modernen Fahrzeugen weisen ein hohes Maß an Ordnung auf (z. B. hohe Anzahl an Symmetrien). Dies erleichtert für den Beobachter die Identifizierung der Marke bzw. des Fahrzeugs und der damit verbundenen Botschaften. Die gezielte Betonung von Symmetrien, Symmetriepolen (vgl. Abbildung 2-5) und die Wiederholung von Elementen führen zu einer Reduktion der Komplexität, was die Ästhetik weiter erhöht. [ROS99; SEE14]

Nach dieser Betrachtung der allgemeinen Designmerkmale von Fahrzeugen, die sich aus der Proportion und den flächigen Merkmalen der Fahrzeugaußenhaut ergeben, werden nachfolgend die



Karosseriefugen, die eine linienförmige Charakteristik der Außenhaut darstellen, betrachtet. Die Fuge (vgl. Abbildung 2-6). bezeichnet dabei einen Spalt oder einen Zwischenraum zwischen zwei angrenzenden Bauteilen (z. B. zwischen Vorder- und Fondtür) und kann sowohl fertigungstechnische (z. B. Bauteil kann aufgrund seiner Größe nicht einteilig hergestellt werden), funktionsbedingte (z. B. Relativbewegung zwischen zwei Bauteilen soll ermöglicht werden), monetäre (z. B. kostengünstigere Fertigung als zweiteiliges Bauteil), konzeptionelle (z. B. Gleichteilefertigung), substitutionelle (z. B. Instandsetzung nach Unfall) oder gestalterische Ursachen (z. B. als optische Trennlinie) haben. [BAL02]

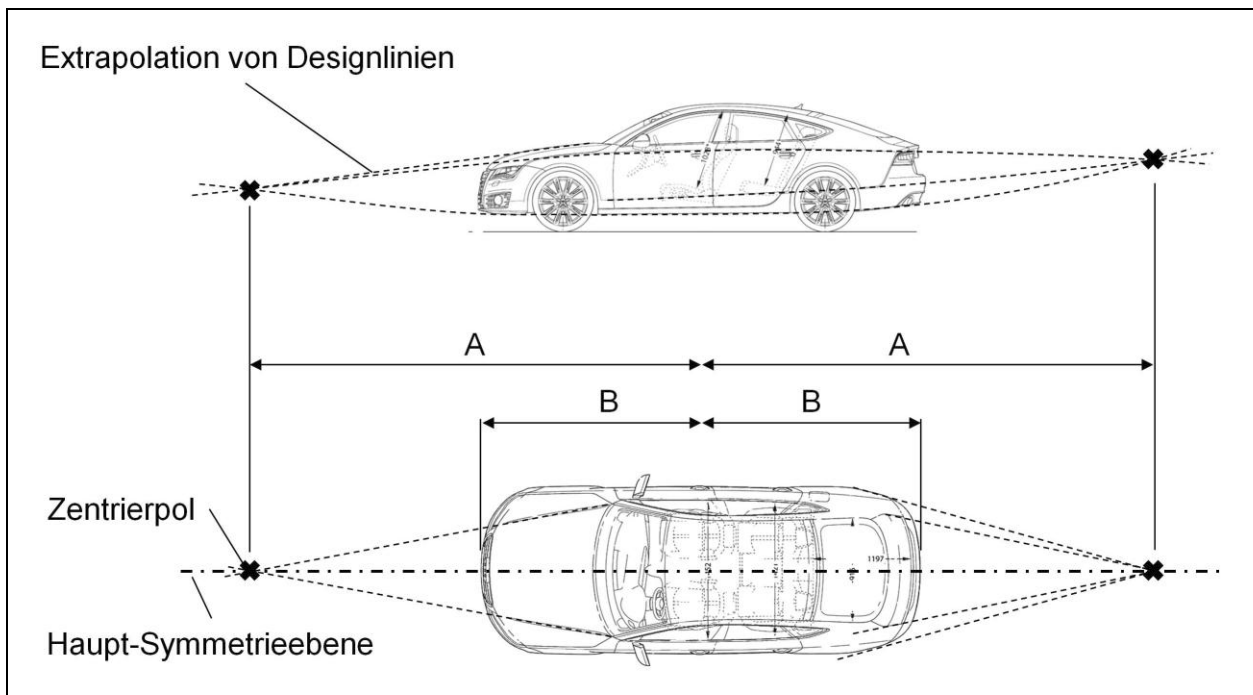


Abbildung 2-5 Symmetrielinien von Fahrzeugen und Zentrierpole an der Fahrzeugfront bzw. am Fahrzeugheck nach [SEE14]

Die funktionsbedingten Rahmenbedingungen der Fugengestaltung werden in [LEU10] genannt. Demnach stellt die Fuge eine notwendige funktionale Bauteiltrennung dar, bei der die Funktion selbst unter extremen Nutzungsbedingungen sicherzustellen ist. Zur funktionsgerechten Gestaltung ist die Fugenbreite als Nominalmaß auf Basis der Vermeidung von Bauteilkontakt konstruktiv festzulegen sowie ein Toleranzkonzept zu erarbeiten, das die Problemfelder Fertigungstoleranzen der Bauteile, Montage und Ausrichtung der Bauteile sowie Funktionsicherheit berücksichtigt. Das obere Grenzmaß wird durch gestalterische Aspekte wie das Streben nach kleinen Fugenmaßen bestimmt. Die fertigungstechnischen Rahmenbedingungen der Fugengestaltung folgen aus der maßhaltigen Herstellbarkeit der einzelnen Bauteile und den Montagebedingungen. Der Fugenverlauf und die Einhaltung der Sollvorgaben werden parallel

zum laufenden Serienprozess am Meisterbock<sup>5</sup> bewertet und überwacht. Die Fugenbreite und die Bauteilradien werden entlang der Karosseriefuge gemessen und auf der Karosserie dokumentiert. Ein Beispiel für die Bemaßung von Fugen und Radien ist in Abbildung 2-7 dargestellt. Weitere Beispiele finden sich in [KNA13].

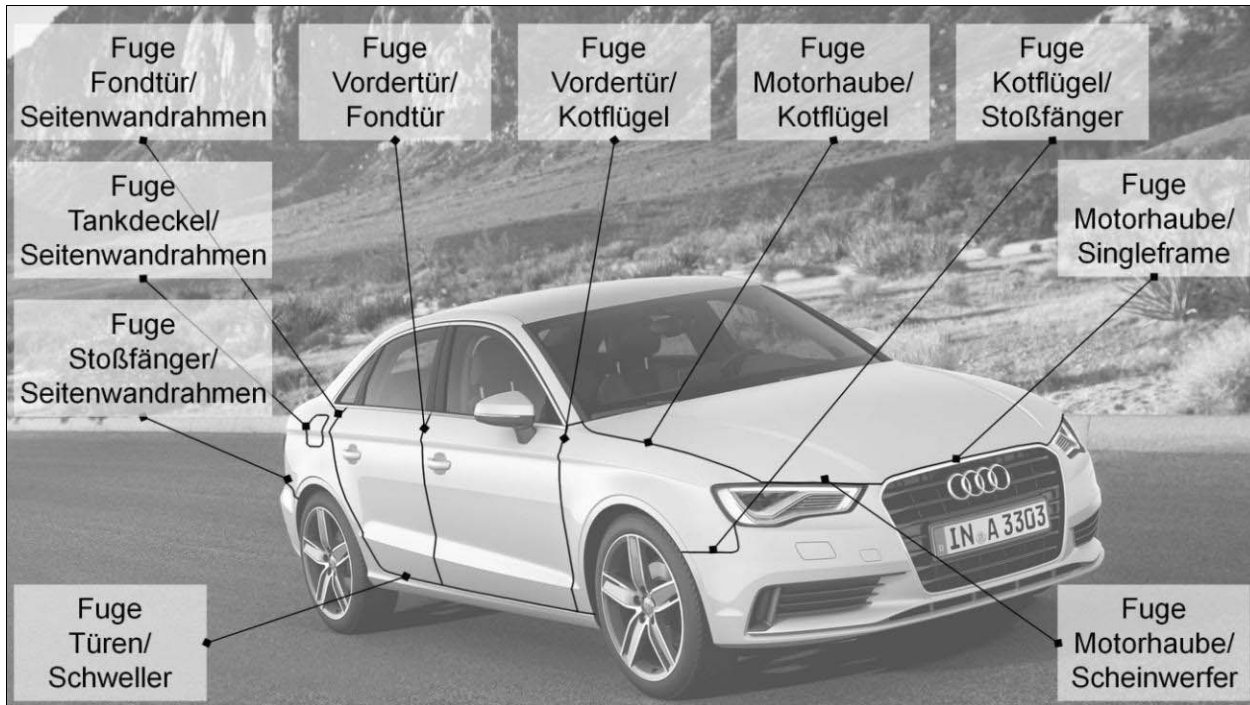


Abbildung 2-6 Fugen an einem Fahrzeug

Auf die gestalterischen Aspekte wird in [BAL02] hingewiesen und dabei die grundlegende Frage, ob Fugen eigene Formelemente darstellen oder ob sie aus der Anordnung von Formelementen folgen, beantwortet: Die Fuge (ebenso wie Sicken und Kanten) dient der eindeutigen Trennung von Formelementen gegenüber Nachbarelementen. Somit ergibt sich die Fuge aus der Ordnung der Elemente. Dies gilt bis zu einer Fugenbreite von 10 mm. Bei breiteren Fugen wird der Fugengrund als bandförmiges, farbiges Flächenelement sichtbar, vgl. Abbildung 2-7.

In [BAL02] wird ebenfalls die Signifikanz von Karosseriefugen für die Fahrzeuggestalt herausgestellt. Demnach stellen sie ein wesentliches und zugleich auffallendes Merkmal einer Fahrzeugaußenhaut dar. Zur Beschreibung der Qualität der Fuge werden zwei Aspekte, „Bündigkeit“ und „Stetigkeit“, benannt, jedoch nicht weiter quantifiziert. „Bündigkeit“ liegt vor, wenn Formelemente nicht kontrastieren, sondern zueinander passen. Dies ist der Fall, wenn die Bauteile durch schmale, gleichmäßige Fugen getrennt sind. Solche Gestalten werden als formal

<sup>5</sup> Der Meisterbock ist ein Prüfwerkzeug der Qualitätssicherung im Karosseriebau. Der steife Aufbau aus Aluminiumprofilen stellt die konstruktiv vorgesehene Anbausituation von Karosserie- und Anbauteilen dar. Durch das Anbauen von Komponenten aus der Serien- oder Vorserienproduktion kann deren Zusammenwirken hinsichtlich Optik, Spaltmaß, Funktion und Montierbarkeit bewertet werden.

„rein“ bezeichnet. „Stetigkeit“ liegt vor, wenn Linien nicht unterbrochen werden und Fugenbreite sowie Fugentiefe einen konstanten Verlauf aufweisen.

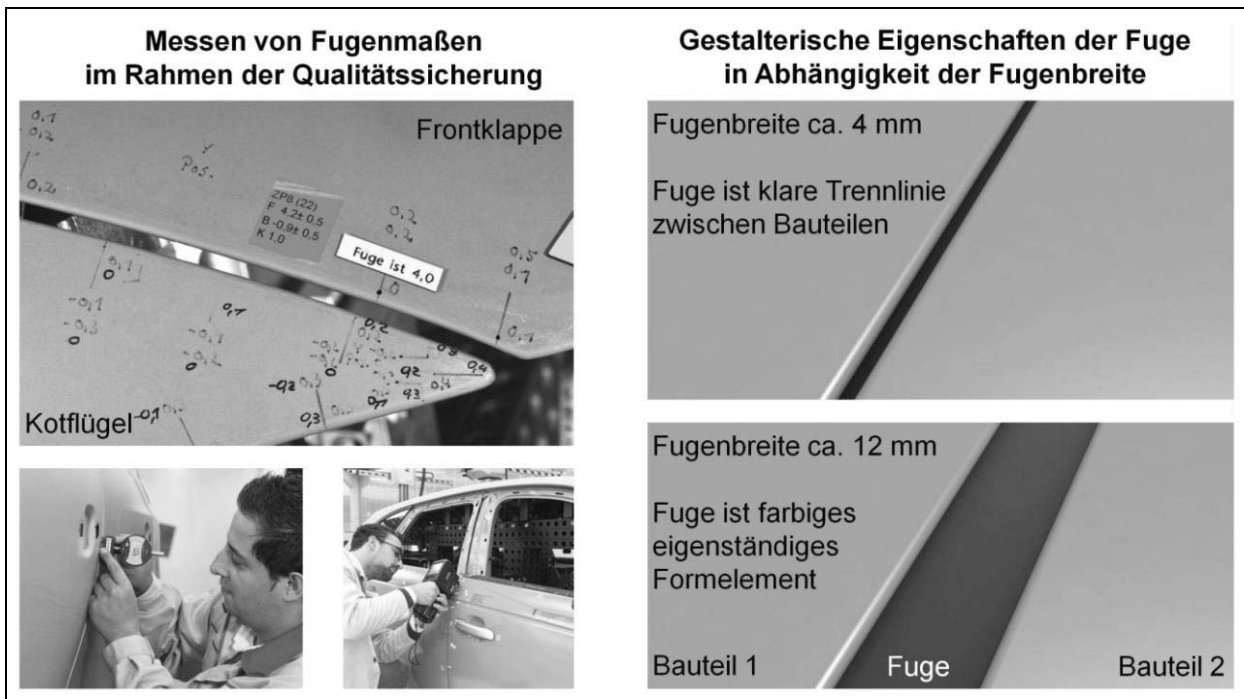


Abbildung 2-7 Messen von Karosseriefugen (links, Bilder: [AUD15A]) und gestalterische Eigenschaft der Fuge (rechts) als Trennlinie oder eigenständiges Formelement nach [BAL02]

Im Kontext des Gesamtfahrzeugs bilden die vertikal verlaufenden Fugen, z. B. Türfugen, Unterbrechungen der längsgerichteten Fahrzeuggestalt. In der Seitenansicht wird dies deutlich, siehe Abbildung 2-8. Die Unterbrechung der Fahrzeuggestalt wird maßgeblich durch die Fugenbreite, den Fugenverlauf (gekrümmt oder gestreckt), den Fluchtpunkt der Fuge und die Fugentiefe bestimmt. Die Merkmale Form, Spalt, Bündigkeit von Türen sowie Klappen zueinander sind dabei von elementarer Bedeutung. Gleichmäßige, schmale und klare Blechfugen sowie deren harmonischer Verlauf visualisieren eine hohe optische Wertigkeit. Dabei spielen Blickrichtung, Sichtkante, Radiusansatz, Fugenneigung und -krümmung sowie der momentane Lichteinfall eine erhebliche Rolle. Aufgrund dieser zahlreichen Einflussparameter kann es aus optischen Gründen erforderlich sein, von der geometrisch exakten Fugengestalt abzuweichen, um ein harmonisch wirkendes Bild zu erzeugen. [BRA13; FAR02; ROS99]

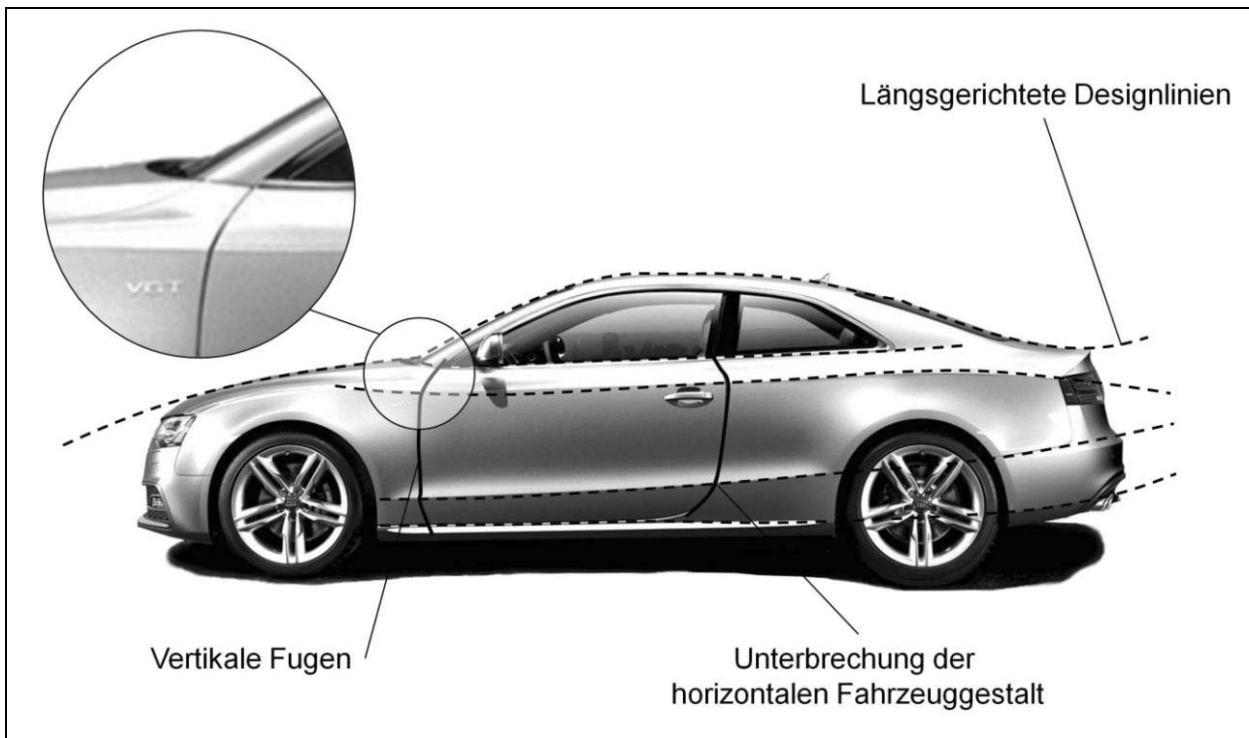


Abbildung 2-8 Unterbrechung der längsgerichteten Fahrzeuggestalt durch vertikale Fugen

## 2.2 Das Fügeverfahren Falzen im PKW-Karosseriebau

Das Exterieurdesign des Fahrzeugs wird im Wesentlichen durch die Außenhaut bzw. die Anbauteile der Außenhaut bestimmt. Für die technologische Auslegung der Anbauteile ist ein Verständnis für die konstruktive, technische Gestaltung der Bauteile sowie die umformtechnische Prozess- und Werkzeugauslegung notwendig. Im Folgenden wird zunächst die Prozesskette zur Herstellung von Karosserieeinzelteilen und die hierfür eingesetzten Betriebsmittel erläutert und dann im Hinblick auf die Herstellung von Anbauteilen erweitert. Der Verfahrensablauf der heute eingesetzten Fügeverfahren (Maschinen- und Rollfalzen mittels Roboter) wird im Anschluss dargelegt.

### 2.2.1 Prozesskette zur Herstellung von gefalzten Karosserieanbauteilen

Der Herstellprozess für Einzelteile der Karosserieaußenhaut ist in modernen Presswerken typischerweise in mehrere Operationen gegliedert (vgl. Abbildung 2-9). Zunächst wird die zugeschnittene Formplatte in der ersten Stufe des Stufenwerkzeugs zu einem dreidimensionalen Bauteil plastisch umgeformt. Der Begriff „Karosserieziehen“ bezeichnet dabei eine Verfahrenskombination von Tief- und Streckziehen. Die Werkstoffverfestigung infolge der plastischen Dehnung während des Umformens des gezogenen Bauteils stellt eine wichtige Eingangsgröße für alle nachfolgenden Prozessschritte dar. Der Arbeitsbereich für das Tief- und Streckziehen, in dem weder Falten noch Reißen entstehen dürfen, ist bei konventionellen Fertigungsverfahren stark eingeschränkt. [LIE12; LIE14A; PAP11]

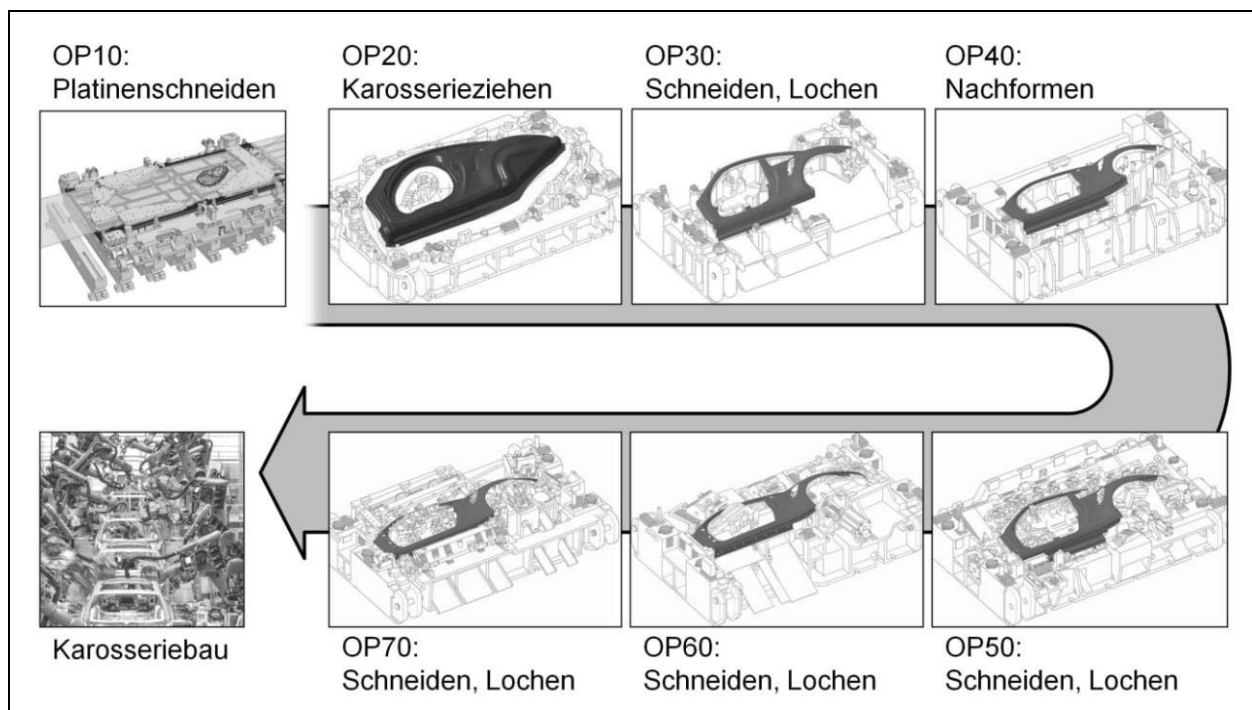


Abbildung 2-9 Prozesskette zur Herstellung eines Karosserieeinzelteils nach [BIR13], Fahrzeug nach [AUD15B]

Anschließend wird das tiefgezogene Bauteil gelocht und geschnitten, um die für das Karosserieziehen benötigten Hilfsflächen (Ankonstruktion, Blechhalterfläche, etc.) zu entfernen und den endgültigen Bauteilumriss zu erzeugen. In den Nachformoperationen werden einzelne Bauteilradien nochmals ausgeformt und ggf. neue Hilfsflächen für die nachfolgenden Fügeoperationen ausgeformt. Hierzu zählt die Erzeugung des Bauteilflanschs, der für die Herstellung der Falzverbindung benötigt wird, sowie den Umformschritt des Flanschabstellens. Der zuvor erstellte, dem förmlichen Verlauf des Bauteilstraks folgende Flansch wird dabei mithilfe eines Abstellstempels um ca.  $90^\circ$  gebogen. Abhängig von der Zugänglichkeit im Werkzeug und der Möglichkeit, das Einzelteil nach OP70 aus dem Werkzeug zu entnehmen, sind auch größere Biegewinkel möglich. Das werkzeugfallende Bauteil wird anschließend im Karosseriebau weiterverarbeitet. [BIR13]

Das Abstellen des Flanschs stellt einen freien Biegeprozess dar. Die Werkzeuge dienen dabei primär der Übertragung der Umformkräfte in die Umformzone. Die Form des Werkstücks hängt nicht von der geometrischen Form der Werkzeuge, sondern vielmehr von deren relativer Positionierung zueinander und den Eigenschaften des Blechwerkstoffs ab. Während des Abstellens werden der Abstellradius des Bauteils, der Öffnungswinkel sowie die lokale Verfestigung am Biegeradius definiert. Die Länge des Flanschs ergibt sich aus der abgewickelten Länge unter Berücksichtigung der Verschiebung der ungelängten Faser beim Biegen. [LAN90; MÄC53; OEH62]

Die Anbauteile heutiger Fahrzeugkarosserien sind meistens in Schalenbauweise ausgeführt. Die geforderte Steifigkeit der Struktur wird durch große, hohle Bauteilquerschnitte erzeugt. Während diese Querschnitte im Bereich der nicht sichtbaren Karosseriestruktur durch Nieten, Kleben und Schweißen zweier geformter Blechbauteile erzeugt werden, erfolgt das Fügen des bauteilverstefenden Innenblechs mit dem gestrakten Außenblech stets durch Falzen. [LIE13B]

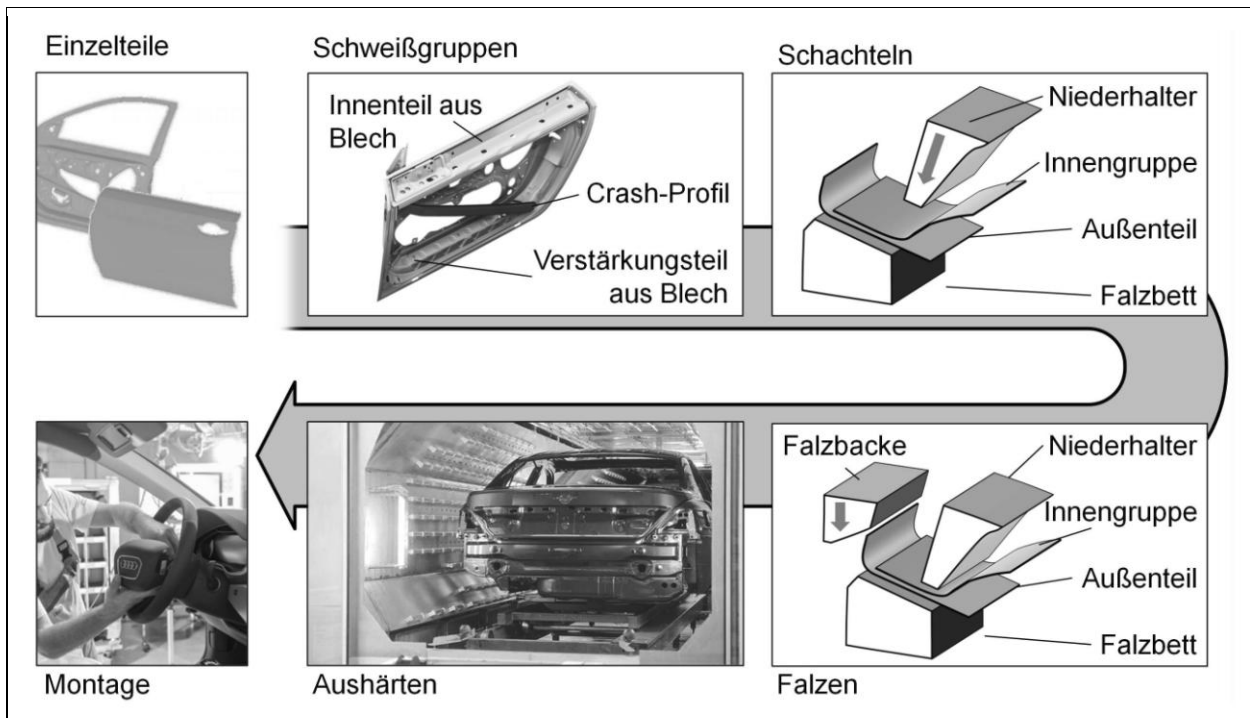


Abbildung 2-10 Einzelne Stufen des Zusammenbauprozesses eines Karosserieanbauteils, Bilder nach [AUD15A; HÖN14; KAN10]

Der Zusammenbauprozess, in dem das später sichtbare Außenteil, das Innenteil und die strukturversteifenden Bauteile zu einem rohbaufertigen Anbauteil gefügt werden, lässt sich in vier Einzelschritte unterteilen, siehe Abbildung 2-10. Im ersten Prozessschritt werden die Verstärkungsteile und Strangpressprofile, zur Erhöhung der Crashesicherheit, und die Funktionskomponenten wie beispielsweise Schlösser mit dem umgeformten Türinnenteil aus Blech gefügt. Dabei kommen thermische, mechanische und chemische Fügeverfahren zum Einsatz. Im zweiten Prozessabschnitt wird das Fügen des nun verstärkten Innenteils und des gestrakten Außenteils vorbereitet. Zur relativen Positionierung der beiden Teile werden diese auf das Falzbett gelegt und dort mithilfe von Positionierstiften, Anschlägen und Saugern exakt positioniert. Zwischen Außenteil und Innenteil wird in der Nähe des Bauteilflanschs Falzklebstoff eingebracht. Zur weiteren Erhöhung der dynamischen Bauteilsteifigkeit kann während des Schachtelns zusätzlicher Strukturklebstoff zwischen Innen- und Außenteil aufgebracht werden. Die ausgerichteten Bauteile werden in ihrer Lage durch den Niederhalter fixiert, der das Außenblech und das Innenblech auf das Falzbett drückt. [ECK12B; EIC11]

Auf das Schachteln folgt der Falzprozess, bei dem der abgestellte Flansch des Außenblechs mithilfe eines Werkzeugs in mehreren Stufen um das Innenteil gebogen wird. Der Niederhalter verhindert während des Falzens eine Relativbewegung der Bauteile und das Abheben der Baugruppe vom Falzbett infolge der auf den Flansch einwirkenden Biegekräft. Nach dem Falzen wird der 1-Komponenten-Strukturklebstoff unter Zufuhr von Wärme geliert [MAU11]. Ein Vorgelieren erfolgt meist in unmittelbarer Nähe des Falzprozesses, um eine erste, jedoch noch nicht vollständige Bindung zwischen den Bauteilen für den weiteren Transport zu erreichen. Das vollständige Aushärten des Klebstoffs erfolgt im KTL-Trockner bei circa 180 °C. [ALB12; DIE14; LIE11] Beim Einsatz von aushärtbaren Aluminiumlegierungen für die Einzelteile wird die Temperatur im KTL-Trockner gleichzeitig zur Erhöhung der Werkstofffestigkeit genutzt. Eine Steigerung der Streckgrenze von aushärtbaren Aluminiumlegierungen um 30 – 40 MPa ist möglich. [FRI02; LAH02; MIL00]

### 2.2.2 Verfahrensablauf des Falzens

Das Falzen zählt zu den in DIN 8593-1:2003-09 definierten Fügeverfahren durch Umformen. Es ist darin als „... *Fügen durch Umformen derart, dass an ihren Rändern vorbereitete Blechteile ineinandergelegt werden und durch Umlegen der Ränder einen Formschluss erhalten*“ bezeichnet. [DIN03C] Im PKW-Karosseriebau wird das Falzen zur Verbindung einer Außenhautbeplankung mit einem bauteilverstärkenden Strukturteil eingesetzt.

Das Falzen lässt sich in zwei zeitlich aufeinanderfolgende Prozessabschnitte untergliedern. Während des Vorfalzens wird der zuvor im Presswerkzeug auf ca. 90° abgestellte Flansch des Außenblechs mithilfe mindestens eines Vorfalzwerkzeugs weiter in Richtung des eingelegten Innenblechs gebogen. Im abschließenden Fertigfalzen werden die nach dem Vorfalzen verbleibenden Öffnungen des Bauteilflanschs durch einen weiteren Biegevorgang geschlossen (Abbildung 2-11), es entsteht eine formschlüssige Verbindung von Außen- und Innenteil.

Der Vorfalzvorgang selbst kann wiederum in einer oder in mehreren Stufen erfolgen. Ausschlaggebend hierfür sind der Flanschöffnungswinkel bzw. der Restschließwinkel nach dem Abstellen, die eingesetzte Falztechnologie sowie die mechanisch-technologischen Eigenschaften des für das Außenteil verwendeten Werkstoffs. Für das Falzen stehen drei wesentliche Technologien zur Verfügung.

Die Entwicklungshistorie des Falzens von Karosserieanbauteilen zeigt einen klaren Trend hin zu kompakten Anlagen mit möglichst geringem Flächenbedarf und Antriebsleistungen. Das Falzen in Universalpressen stellt dabei die älteste Technologie dar. Im Automobilbau werden heute zwei Falztechnologien eingesetzt: das Maschinenfalzen mit feststehenden Vorrichtungen und das

Rollfalzen mittels Roboter. Beide Technologien werden im Karosseriebau für unterschiedliche Produktionsvolumen eingesetzt. [BAU05; EIS12; HÖN13B; JON06]

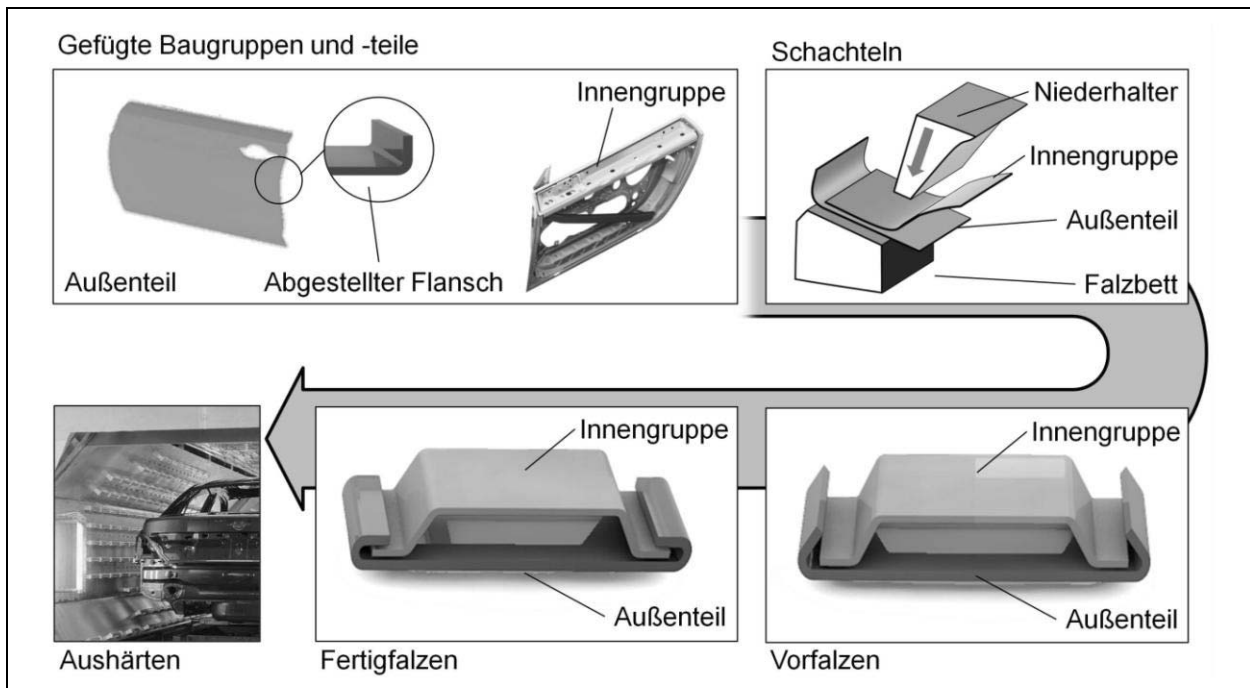


Abbildung 2-11 Prozessabfolge zur Herstellung von Falzverbindungen nach [LIE14B]

### Anlagen zum Maschinenfalzen

Eine Vorrichtung zum Maschinenfalzen mit feststehendem Falzbett besteht aus fünf Hauptkomponenten: den Falzbacken für das Vor- und Fertigfalzen, einem Träger, auf dem die Falzbacken angeordnet sind, einem Antrieb zur Bewegung dieses Trägers, dem Niederhalter und dem feststehenden Falzbett (vgl. Abbildung 2-12). Das Falzbett, das meist der Bauteilkontur entspricht, befindet sich mittig innerhalb der Vorrichtung, die Falzbackenträger und die Falzbacken sind seitlich oberhalb davon angeordnet, der Niederhalter befindet sich mittig oberhalb des Falzbetts. Die Falzbacken für das Vor- und Fertigfalzen weisen technologisch bedingt unterschiedliche Konturen auf. Für die einzelnen Falzvorgänge, meistens einmal Vorfalzen und anschließendes Fertigfalzen, werden die Falzbacken auf dem Träger durch einen kinematischen Antrieb so verschoben, dass sie sich direkt oberhalb des Bauteilumrisses befinden.

Zu Beginn des Falzens werden die bereits geschachtelten Bauteile in das Falzbett eingelegt, dabei werden sie durch Positionsdorne und seitliche Führungen ausgerichtet und anschließend durch den Niederhalter auf dem Falzbett fixiert. Die seitlichen Träger und die darauf montierten Falzbacken werden durch den Antrieb translatorisch in Richtung des Falzbetts bewegt. Bei Kontakt von Vorfalzwerkzeug und abgestelltem Flansch beginnt der Falzvorgang. Durch die fortschreitende Bewegung der Vorfalzbacke wird der Bauteilflansch in Richtung des Innenblechs



gebogen. Bei Erreichen eines definierten Restschließwinkels (z. B.  $40^\circ$ ) endet das Vorfalzen. Die Positionen der Vorfalzbacken werden automatisch gewechselt, sodass im folgenden Vorrichtungshub das Fertigfalzen stattfinden kann.

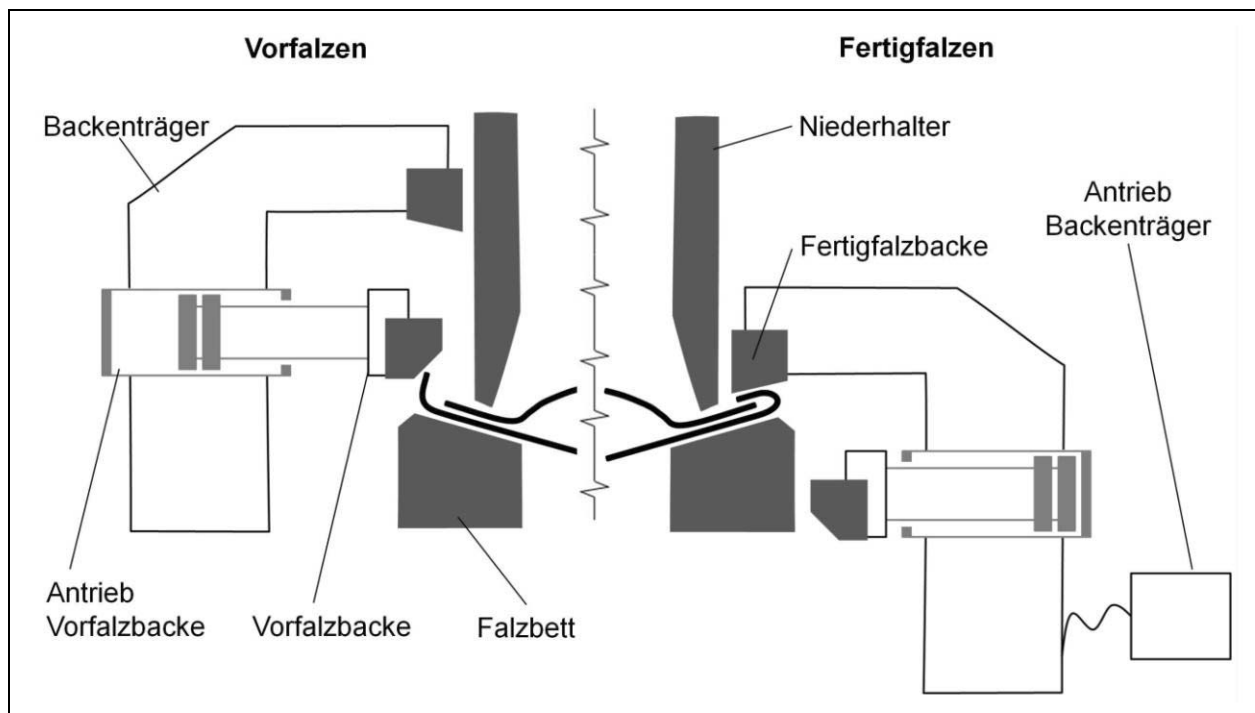


Abbildung 2-12 Schematische Darstellung des Aufbaus einer Maschinenfalzvorrichtung, hier für eine Anlage mit festem Falzbett

Das in Abbildung 2-13 dargestellte Prozessschema zeigt den Falzvorgang für ein bereits geschachteltes Bauteil mit einem Restschließwinkel von  $90^\circ$  in einer Vorrichtung mit bewegten Falzbackenträgern. In der industriellen Anwendung finden sich zahlreiche Variationen des zuvor beschriebenen Aufbaus, etwa Vorrichtungen mit angetriebenem Falzbett und starren Backenträgern, auf den seitlichen Trägern montierte Niederhalter, robotergeführte Niederhalter, Anlagenkonzepte mit getrennten Vorrichtungen für das Vor- und Fertigfalzen sowie eine in die Falzvorrichtung integrierte Schachtelvorrichtung.

Aufgrund der simultanen Formgebung entlang des gesamten Bauteilumrisses während des Vorrichtungshubs werden beim Maschinenfalzen kurze Taktzeiten (ca. 40 Sek.) erreicht, was den Einsatz dieser Falztechnologie für Großserienprojekte prädestiniert. Die Nachteile des Maschinenfalzens sind die bauteilspezifische Konstruktion der Falzvorrichtung und der Falzbacken, die eine Wiederverwendung in Anlagen von Folgeprojekten kaum möglich macht, sowie der lange Zeitraum für die Werkzeuganfertigung und die mechanische Einarbeitung der Falzbacken. [FEL14; LEM10]

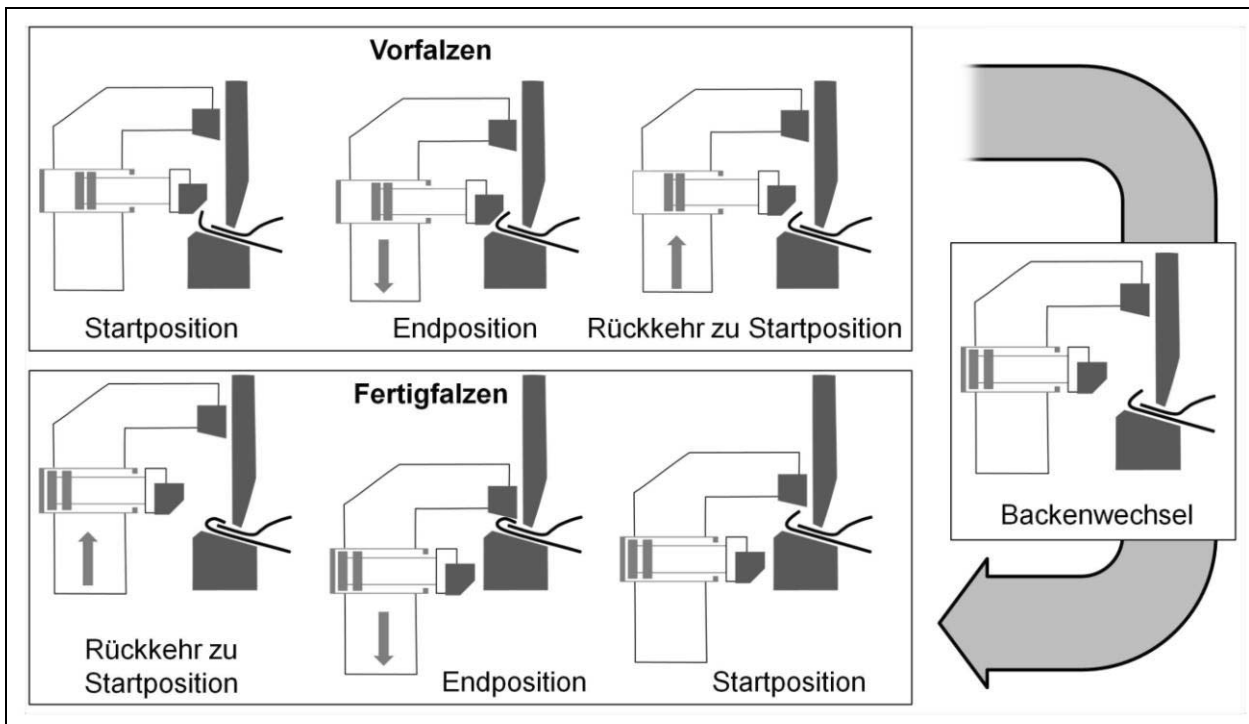


Abbildung 2-13 Schematische Darstellung des Prozessablaufes des Falzens mithilfe einer Vorrichtung zum Maschinenfalzen, hier für eine Anlage mit festem Falzbett

### Anlagen zum Rollfalzen

Eine Anlage zum Rollfalzen mittels Roboter besteht aus einem Falzbett, einem Niederhalter sowie mindestens einem Industrieroboter, der ein Rollfalzwerkzeug oder einen Rollfalzkopf mit mehreren Falzrollen trägt (vgl. Abbildung 2-14). Die Falzrollen können unterschiedliche geometrische Profile und Durchmesser aufweisen (z. B. Kegelrolle). Die zentrale Position innerhalb der Anlage nimmt wiederum das Falzbett ein. Der Niederhalter befindet sich zu Beginn oberhalb des Falzbetts. Der Industrieroboter befindet sich seitlich des Falzbetts. Der Aufstellort ist dabei so gewählt, dass das Falzwerkzeug durch den Roboter manipulator den gesamten Umriss des Bauteils erreichen kann. Ist dies aus einer einzigen Standposition nicht möglich, werden weitere Roboter und Falzwerkzeuge benötigt. Der Verfahrensablauf erfolgt zunächst analog zum Maschinenfalzen. Die geschachtelten Bauteile werden eingelegt und durch den Niederhalter auf dem Falzbett fixiert bzw. zueinander ausgerichtet. Im Anschluss wird beim Vorfalzen eine Falzrolle durch den Roboter den Bauteilumriss entlang bewegt, sodass durch die relative Position der Falzrolle zum Falzbett und die Orientierung der Rollenachse der Bauteilflansch umgebogen wird. Dies erfolgt zunächst für alle Abschnitte des Falzflanschs. Daran anschließend werden in weiteren Bahnabfolgen die Flanschbereiche weiter umgebogen, wobei die Position und die Orientierung der Rolle in jedem Durchgang angepasst werden. Der relative Biegewinkel beträgt dabei jeweils ca.  $30^\circ$  pro Falzbahn. Die letzte Roboterbahn stellt das Fertigfalzen dar, an dessen Ende der Flansch vollständig umgebogen ist. Abhängig von den Öffnungswinkeln der verschiedenen Flanschbereiche sind unterschiedlich viele Vorfalzgänge

notwendig. Im Allgemeinen werden zwei Vorfalzbahnen durchgeführt. Zusätzlich zu dem aufgeführten Aufbau der Rollfalzanlage und dem dargestellten Verfahrensablauf finden sich heute zahlreiche Varianten in der industriellen Anwendung (z. B. Anlagen mit mehreren Industrierobotern, robotergeführte Niederhalter, angetriebene Falzrollen, hybride Roll- und Maschinenfalzanlagen sowie Portal-Roboter).

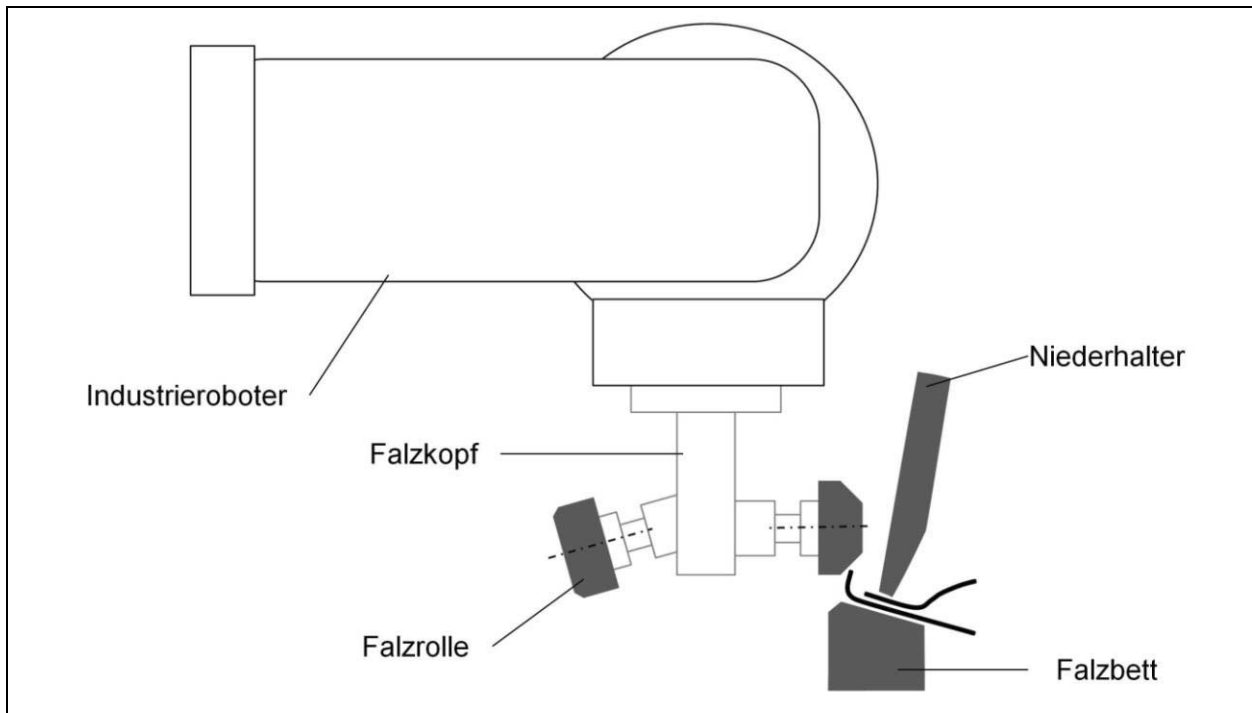


Abbildung 2-14 Schematische Darstellung des Aufbaus einer Roboterfalzanlage

Die Taktzeit einer Roboterfalzanlage wird durch die Länge des Bauteilumrisses, die Anzahl der Falzbahnen zum Schließen der Restöffnungswinkel am werkzeugfallenden Teil, die Abrollgeschwindigkeit der Falzrolle und die Anzahl der Falzroboter bestimmt. Dies führt zu verhältnismäßig langen Prozesszeiten im Vergleich zum Maschinenfalzen. Das Rollfalzen ist daher für Projekte mit langen Taktzeiten (ca. 90 Sek.) und entsprechend geringerem Produktionsvolumen (ca. 400 – 500 Fahrzeuge pro Tag) geeignet. Gegenüber dem Maschinenfalzen zeichnet sich das Rollfalzen mittels Roboter durch die geringeren Investitionen, die schnelle Werkzeugaufbereitung, die flexible und schnelle Anpassung der Falzbahnen während der Einarbeitung, die Übernahme von Prototypwerkzeugen in die Serie sowie durch die Möglichkeit aus, Komponenten für mehrere aufeinanderfolgende Fahrzeuggenerationen zu verwenden. Die Nachteile sind die eingeschränkte Zugänglichkeit von Bauteilbereichen mit kleinen Umschlingungsradien sowie die räumlichen Einschränkungen bei der Bahnauslegung durch die Störkonturen der Anlage (z. B. Niederhalter, Einweiser). [JON06; THU08; ZUB11]

### 2.2.3 Typen von Falzschlaufen im Automobilbau

Falzverbindungen können in unterschiedlichen geometrischen Ausführungen hergestellt werden. Der geometrische Grundtyp der Falzschleife wird in Abhängigkeit von den gesetzlichen Bestimmungen, der eingesetzten Falztechnologie, der zu falzenden Werkstoffe und der ästhetischen Ansprüche an das Produkt während der Produktplanung festgelegt. Im PKW-Karosseriebau werden generell vier Geometriegrundtypen unterschieden, siehe Abbildung 2-15. Zwischen den geometrischen Ausführungen lassen sich optische Merkmale und strukturelle Merkmale der Falzschleife unterscheiden.

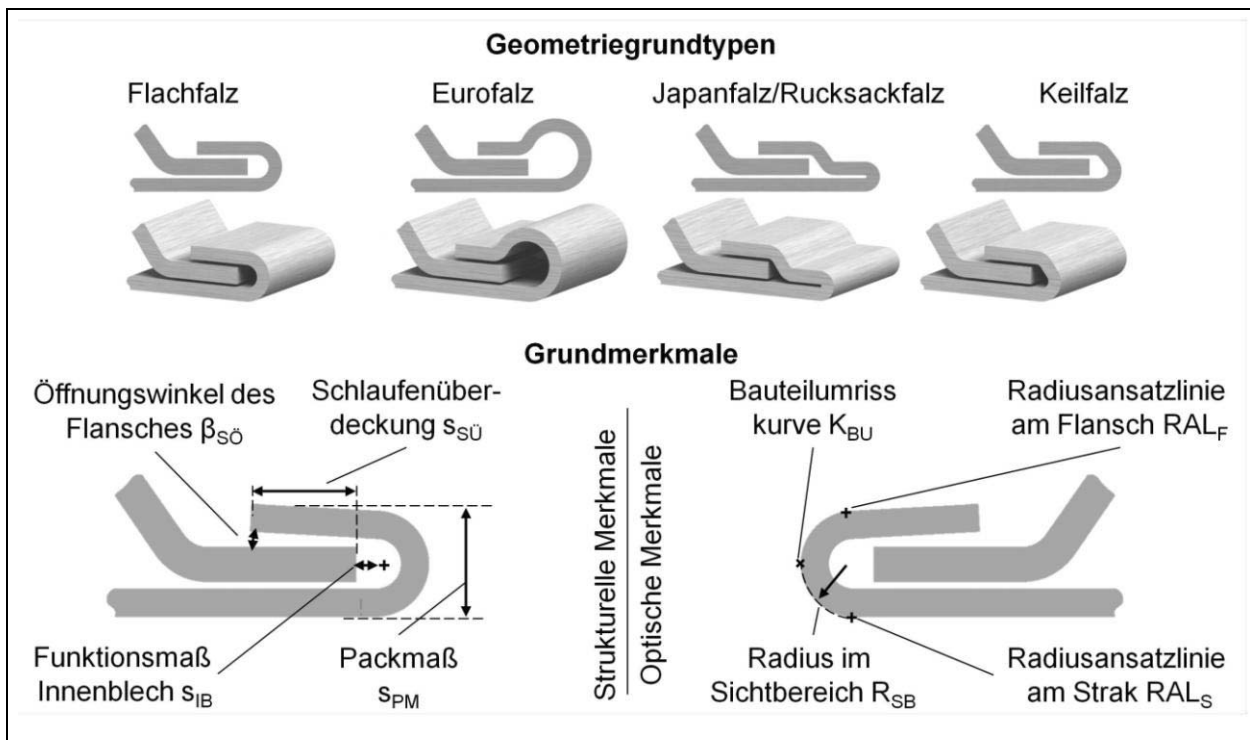


Abbildung 2-15 Geometriegrundtypen von geometrischen Falzschlaufenausführungen und strukturelle und optische Merkmale von Falzschlaufen am Beispiel eines Flachfalzes, Bilder nach [ALT12]

#### Strukturelle Merkmale von Falzschlaufen

Die primären Funktionen der Falzverbindung sind die formschlüssige Verbindung von Außen- und Innenblech sowie die Reduktion des Verletzungsrisikos durch Schneiden an der Bauteilumrandung. Diese Funktionen werden durch die konkrete Vorgabe der folgenden konstruktiven Merkmale sichergestellt: Falzüberdeckung, Packmaß, Position des Innenblechs. Die Falzüberdeckung ist das Maß zwischen der rückseitigen Flanschseite und der geschnittenen Bauteilumrandung des Innenblechs. Das Packmaß  $s_{PM}$  bezeichnet die Strecke zwischen gestrahteter Bauteiloberfläche und der Flanschaußenseite am Messpunkt. Das Packmaß ist ein Maß für die Funktionserfüllung der Fügeverbindung und wird zur Beurteilung der Verklebung des Falzes verwendet. Das Positionsmaß des Innenblechs kennzeichnet den Abstand der Bauteilumrandung des Innenblechs zum Zentrum des Außenkreises der Falzschleife, siehe Abbildung 2-15.

### Optische Merkmale von Falzschlaufen

Die anmutungshaften Eigenschaften der Falzschlaufe werden durch die optische Erscheinung der Falzschlaufe in der Einbausituation am Fahrzeug bestimmt, deren charakteristischen Merkmale ausschließlich durch die sichtbaren Flächen und Radiusansatzverläufe hervorgerufen werden. Die Radiusansatzlinie am Strak  $RAL_S$  kennzeichnet den Übergang von der gestrakten Bauteiloberfläche zu dem durch das Falzen erzeugten gekrümmten Bauteilabschnitt. Auf der Rückseite des Falzes findet sich die sinnverwandte Radiusansatzlinie am Flansch  $RAL_F$ , die jedoch für den Benutzer nicht sichtbar ist. Die Bauteilumrisskurve  $K_{BU}$  ist die eindimensionale Kurve, die das Bauteil für einen Betrachter von seiner Umgebung abgrenzt. Der Umriss hängt somit sowohl vom Objekt als auch vom Betrachtungswinkel ab. Zur Bewertung der optischen Eigenschaften von Falzschlaufen wird im Rahmen der Qualitätssicherung zumeist der Falzradius an der Schlaufenkontur gemessen. Die Bestimmung eines exakten Werts an der Schlaufenkontur gestaltet sich jedoch äußerst schwierig, da die Schlaufenkontur nicht zwingend einem Kreis entspricht. Zur Bewertung der optischen Eigenschaften wird daher meist nur der für den Kunden sichtbare Bereich der Schlaufe durch einen eingepassten Kreisbogen bestimmt. Dieser Best-fit-Kreis  $R_{SB}$  nähert sich den optischen Eigenschaften jedoch nur an. Die Grundtypen der Schlaufenausführung, vgl. Abbildung 2-15, entsprechen den häufigsten Anwendungen im Automobilbau. Im Folgenden werden die optischen und strukturellen Vor- und Nachteile der Typen sowie deren Einsatz im Karosseriebau aufgezeigt. [BEY08; HÖN13C]

**Flachfalz.** Die Flachfaltung ist die Basisform für die nachfolgenden Falztypen. Das Außen- und das Innenblech sind formschlüssig verbunden. Die Länge der Schlaufenüberdeckung entspricht nahezu der gesamten Länge des Rückseiten-Flanschabschnitts, damit entsteht ein größerer Bereich für die Strukturverklebung. Der Radius der Falzschlaufe entspricht im Wesentlichen dem halben Wert des Packmaßes, das gleichzeitig der Schlaufenhöhe entspricht. Flachfalze werden üblicherweise bei Türen und Heckklappen angewandt.

**Euroschlaufe.** Die Euroschlaufe wird in Bereichen eingesetzt, in denen erhöhte Sicherheitsanforderungen hinsichtlich des Schutzes von Verkehrsteilnehmern gesetzlich vorgeschrieben sind. In diesen Bereichen muss das Anbauteil, wie z. B. eine Motorhaube, einen Berandungsradius größer als 2,5 mm aufweisen. [VER09; WIR10] Diese Regelung betrifft meist die gefalzten Kanten an Heckspoilern und Frontklappen. Die Euroschlaufe wird auch beim Falzen von Werkstoffen mit geringer Grenzformänderung eingesetzt, die einen großen Falzradius erfordern. [RUP12; SIE15]

**Japanfalz.** Durch die Verschiebung des Innenblechs in Richtung Bauteilzentrum ist es möglich, das Außenblech auf sich selbst zu falzen. Die Schlaufenhöhe an der Bauteilkante wird somit

minimal, und der geometrisch mögliche Außenradius ist nur noch von der Dicke des Außenblechs abhängig. Die im Verhältnis zur Blechdicke kleinen Biegeradien erhöhen die Werkstoffbeanspruchung im Vergleich zu Flachfalzen.

**Keilfalz.** Ebenso wie bei Japanfalzen steht bei Keilfalzverbindungen die optische Qualität der Falzung im Vordergrund. Der rückseitige Bereich der Falzschlaufe ist im Gegensatz zum Flachfalz nicht rundlich ausgeführt, sondern winkelig. Durch diese Maßnahme wird die Bindung des sichtbaren Falzradius an die geometrischen Bedingungen des Packmaßes gelöst. Die Radiusansatzlinie auf der Strakseite der Falzschlaufe wird durch das winkelige Andrücken des Flanschs nicht verschoben, jedoch verändern sich die Bauteilumrisslinie und der Konturverlauf. Der sichtbare Radius der Falzschlaufe kann somit verringert werden. Gleichzeitig wird dem Kunden durch den geringeren Abstand von Radiusansatzlinie und Bauteilumriss eine zusätzliche Verringerung des sichtbaren Radius suggeriert. Ein typisches Einsatzgebiet sind die Türkanten im Einstiegsbereich, da diese beim Öffnen der Tür im Fokus des Kunden stehen.

## 2.3 Umformtechnische Grundlagen zum Biegen von Aluminiumblechen

Die Prozesskette zur Herstellung von Karosserieranbauteilen umfasst zahlreiche Fertigungsverfahren. Das in dieser Arbeit betrachtete Falzen zählt zu den Fertigungsverfahren durch Biegeumformen (vgl. [DIN03A]). In diesem Kapitel werden die für das Verständnis dieser Arbeit relevanten Grundlagen der elementaren Biegetheorie dargestellt. Hierzu zählen auch die Versagensmechanismen und die Versagenskriterien beim Biegen.

### 2.3.1 Eigenschaften von Aluminiumblechwerkstoffen

Aluminium, Sauerstoff und Silizium sind die drei häufigsten auf der Erde vorkommenden chemischen Elemente. Dabei kommt Aluminium aufgrund seiner starken Reaktionsneigung mit nichtmetallischen Elementen nicht in Reinform sondern ausschließlich in chemischen Verbindungen (z. B. Aluminiumoxid) vor. Für die technische Aluminiumgewinnung wird in einem 2-stufigen Prozess aus Bauxit, einem Erz mit einem Aluminiumoxidgehalt von ca. 50 %, metallisches Aluminium erzeugt. Der Prozess gliedert sich in die Verfahren: Gewinnung von Aluminiumoxid und Reduktion des Oxids zu metallischem Aluminium. [OST07]

Aluminiumoxid wird mit dem sog. Bayer-Verfahren aus Rohbauxit gewonnen. Das grobstückige Bauxit wird zunächst fein gemahlen und durch Zugabe einer Lauge von den Eisenoxiden gelöst. Aus der Lauge wird dann Aluminiumhydroxid abgetrennt und anschließend in einem thermischen Prozess bei ca. 1300 °C zu Aluminiumoxid umgewandelt. Im zweiten Verfahrensschritt wird das Aluminiumoxid mithilfe der Schmelzflusselektrolyse reduziert. Eine Alternative zur sehr energieaufwändigen Gewinnung von Primäraluminium stellt das

Einschmelzen von Sekundärrohstoffen (z. B. Fabrikationsschrott) zu sog. Sekundäraluminium dar. [KUR15]

### **Einteilung der Aluminiumwerkstoffe**

Aluminiumlegierungen können als Knet- oder Gusslegierungen nach [DIN05A] bzw. [DIN03D] vorliegen. Aluminiumknetlegierungen werden mit Stranggussverfahren zu Barren oder Bändern gegossen und anschließend zur Herstellung von Press-, Zieh- und Walzprodukten weiterverarbeitet. Für Formgußteile werden Aluminiumgusslegierungen verwendet. Zur Unterscheidung der Legierungen werden diese normgerecht, mithilfe einer Ziffernfolge, bezeichnet, Abbildung 2-16. [BAR08; KLE09]

Die Bezeichnung für Aluminiumknetwerkstoffe enthält eine vierstellige Ziffernfolge. Die erste Ziffer der Folge kennzeichnet dabei die Legierungsgruppe, die sich aus den Hauptlegierungselementen ergibt. Die Gruppen zeichnen sich auch hinsichtlich der Aushärtbarkeit bzw. der Nichtaushärtbarkeit der darin enthaltenen Legierungen aus (vgl. Abbildung 2-16). Aushärtbare Aluminiumlegierungen können durch gezielte Wärmebehandlung eine Festigkeitssteigerung erfahren. Hierbei werden metastabile Phasen ausgeschieden, die eine Versetzungsbewegung beim Umformen behindern. Voraussetzung für die Festigkeitssteigerung durch die Ausscheidung von metastabilen Phasen ist eine abnehmende Löslichkeit von Legierungselementen bei sinkenden Temperaturen. Die Festigkeit von nicht aushärtbaren Aluminiumlegierungen kann ausschließlich durch Kaltverfestigung erhöht werden. Die letzten beiden Ziffern dienen zur Bezeichnung der verschiedenen Legierungen innerhalb der Gruppe und geben den Reinheitsgrad des unlegierten Aluminiums an. [WEI10]

Die aushärtbaren Aluminiumlegierungen benötigen zur Erreichung eines gewissen Festigkeitsniveaus eine relativ komplexe Wärmebehandlung, die aus Lösungsglühen, Abschrecken und anschließender Warm- oder Kaltauslagerung besteht. Dementsprechend gibt es unterschiedliche Aushärtungszustände. Die Bezeichnung des Zustandes (z. B. T4) erfolgt nach der Reihenfolge der Grundbehandlungen die zur Erzielung des gewünschten Werkstoffzustandes eingesetzt werden. Die Basiszustände werden mit Großbuchstaben charakterisiert [DIN16]. Zur weiteren Unterteilung werden Ziffern an den Kenn- Buchstaben des Basiszustandes angefügt. Diese angefügten Ziffern beziehen sich auf die Reihenfolge der Grundbehandlungen, die die Werkstoffmerkmale wesentlich beeinflussen (vgl. Abbildung 2-16). Für die weitere Unterscheidung identischer Legierungen mit gleicher Abfolge der Grundbehandlungen, jedoch unterschiedlich resultierenden Werkstoffeigenschaften, wird die Bezeichnung um eine weitere Ziffer ergänzt. Die Aushärtung der Aluminiumlegierungen erfolgt in der automobilen Prozesskette in der Lacktrocknung. [HEN11]

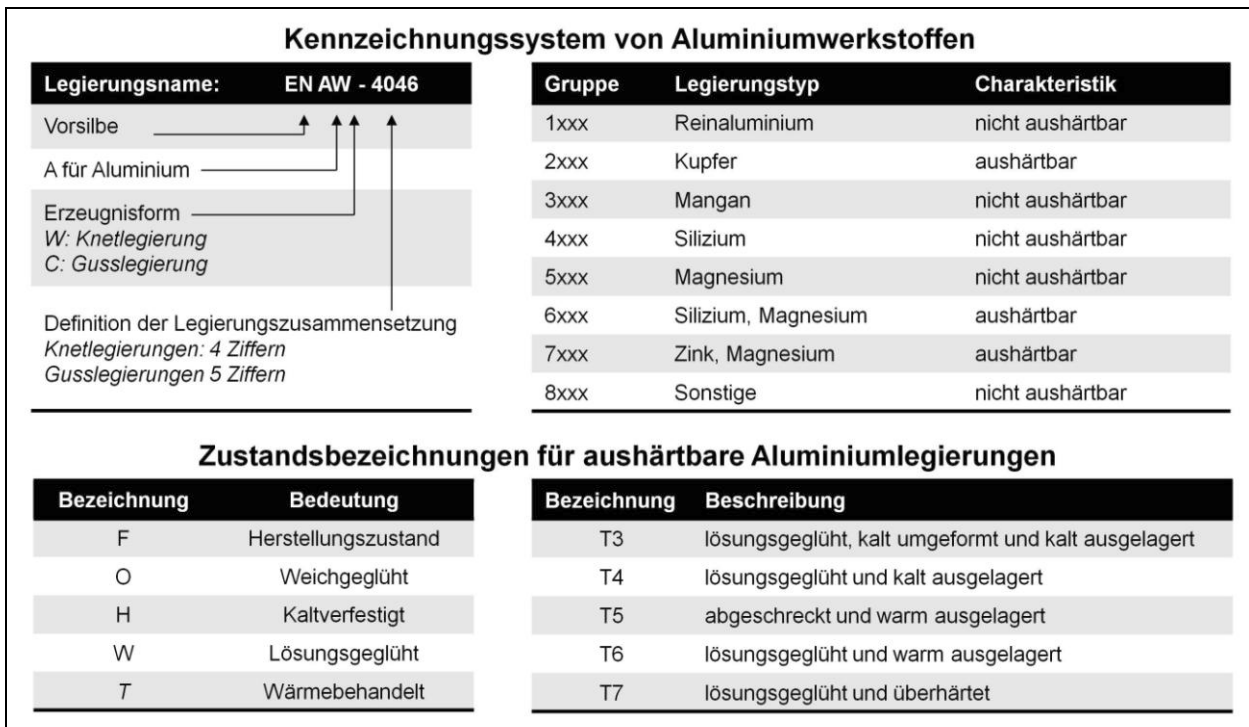


Abbildung 2-16 Bezeichnung von Aluminiumwerkstoffen und deren Zustände nach [DIN03D; DIN16; DIN05A]

### Herstellung von Aluminiumblechwerkstoffen

Zur Herstellung von Blechhalbzeugen wird das Aluminium in einem Stranggießverfahren zu einem Walzbarren verarbeitet. Dieser wird im Walzwerk zunächst homogen erwärmt, um für das anschließende Warmwalzen ein hohes Umformvermögen sicherzustellen. Das Warmwalzen erfolgt konventionell in einem reversierenden Vorwalzgerüst. Die Walzrichtung wird nach jedem Stich, d. h. nach jedem Durchlauf des Barrens durch die Walzen, gedreht. Am Ende des Warmwalzens beträgt die Banddicke zwischen 2,3 mm und 5 mm. Anschließend wird das kalte Band auf einer Kaltwalzanlage (ein- oder mehrgerüstig) in mehreren Stichabnahmen auf das Endmaß bzw. die Blechdicke abgewalzt. Je nach Zusammensetzung der Legierung, der Werkstoffverfestigung und des Umformvermögens können Zwischenglühungen vorgesehen werden, um das Erreichen des Endmaßes sicher zu stellen. Für Karosserieaußenteile beträgt dieses ca. 1 mm. Im letzten Walzvorgang (Dressierwalzen) erhält das Blechband eine definierte Oberflächentextur, welche die Tribologie und somit die Umformbarkeit des Halbzeugs maßgeblich beeinflusst. [GOB06; WEI07]

### Einsatz von Aluminiumblechwerkstoffen im Karosseriebau

Aufgrund seiner vergleichsweise geringen Dichte ( $2,7 \text{ g/cm}^3$ ) im Vergleich zu konventionellen Stahlwerkstoffen ( $7,8 \text{ g/cm}^3$ ) wird Aluminium im Automobilbau als Leichtbauwerkstoff eingesetzt. Durch die Legierungsbildung ändert sich die Dichte dabei nur geringfügig ( $\pm 3 \%$ ). Neben Antrieb und Fahrwerk ist der Karosseriebau der Bereich, bei dem der Leichtbau mit Aluminium die größte absolute Gewichtsreduzierung am Fahrzeug verspricht. Eine



Gewichtseinsparung von ca. 35 % ist möglich. Zu den typischen Einsatzgebieten von Aluminium im Karosseriebau zählen neben den Strukturteilen der Rohkarosse auch die Karosserieanbauteile (z. B. Frontklappe). Die für den Kunden am fertigen Fahrzeug sichtbare Außenhaut dieser Anbauteile muss dabei zahlreichen Anforderungen genügen. So muss beispielsweise eine hohe Umformbarkeit der Blechwerkstoffe gewährleistet sein, um die Designmerkmale der Außenhaut (z. B. Zischerlinien) ausformen zu können. Dabei soll eine hohe Beulsteifigkeit erzielt werden und die Oberfläche des Blechteils soll nach der Umformung keine Fließfiguren aufzeigen. Um eine vergleichbare Steifigkeit zu einem aus Stahlblech hergestellten Anbauteil zu erreichen sind höher Nennblechdicken erforderlich (ca. 1,5-fach höher). Trotzdem sollen die Bauteilumrandungen mit ähnlichen kleinen Falzradien ausgeführt werden wie bei Stahlanbauteilen. Für die Außenhaut von Karosserieanbauteilen werden nahezu ausschließlich Legierungen der aushärtbaren AA 6xxx Klasse verwendet. Gegenüber den AA 5xxx Legierungen bieten sie die Möglichkeit zur Aushärtung und weisen auch bei hohen Umformgraden eine fließfigurenfreie Oberfläche auf. [LEI99]

### **2.3.2 Mechanisch-technologische Eigenschaften von Aluminiumblechwerkstoffen**

Der grundlegende Mechanismus der Umformung basiert auf der Fähigkeit von Werkstoffen, unter definierten Spannungszuständen zu fließen. Die zum Erreichen und zum Erhalten des plastischen Zustands notwendige Spannung wird als Fließspannung bezeichnet. Die Kennwerte zur Charakterisierung der Umformeigenschaften von metallischen Werkstoffen werden im uniaxialen Zugversuch ermittelt. Hierzu zählen: der Elastizitätsmodul  $E$ , die Streckgrenze  $R_e$ , die Zugfestigkeit  $R_m$ , die Gleichmaßdehnung  $\varepsilon_{Gl}$ , die Bruchdehnung  $\varepsilon_{Br}$  sowie der Verfestigungsexponent  $n$ . Im Zugversuch werden die Zugkraft sowie die Probenlänge und -breite kontinuierlich erfasst. Auf diese Weise kann die auf den momentanen Probenquerschnitt bezogene Fließspannung  $k_f$  eines Blechwerkstoffs bestimmt werden. Die Ermittlung der logarithmischen Formänderungen für die Hauptachsenrichtungen  $\varphi_l$ ,  $\varphi_b$ ,  $\varphi_s$  erfolgt ebenso aus den momentanen Größen. [LAN02]

#### **Werkstoffverfestigung**

Die Verfestigung eines metallischen Werkstoffs infolge seiner Umformung wird durch den Verfestigungsexponenten  $n$  charakterisiert. Werkstoffe mit hohen  $n$ -Werten zeigen aufgrund der erhöhten Gleichmaßdehnung eine reduzierte Neigung zum lokalen Einschnüren. Die Verfestigungseigenschaften basieren auf der Gefügestruktur der Werkstoffe. Werkstoffe mit kleinen Korngrößen weisen geringe Verfestigungsexponenten und hohe Festigkeiten auf. Dieser Zusammenhang zwischen Korndurchmessern und Werkstofffestigkeit wird durch die Hall-Petch-

Beziehung beschrieben. Zusätzlich kann die Festigkeit des Werkstoffs in der Regel durch eine Erhöhung der Umformgeschwindigkeit, die Reduzierung der Umformtemperatur und durch natürliche oder künstliche Werkstoffalterung gesteigert werden. [HAL51; PET54; SWI52]

### Anisotropie von Werkstoffen

Die Anisotropie bezeichnet in der Umformtechnik die Richtungsabhängigkeit von Werkstoffeigenschaften. In der Blechumformung basiert dieses Verhalten auf der Vorzugsorientierung der Körner, welche während der Halbzeugherstellung erzeugt wird [LAN84]. Zur Quantifizierung des anisotropen Verhaltens wird die senkrechte Anisotropie  $r$ , welche aus dem Verhältnis der Umformgrade in Breitenrichtung  $\varphi_b$  und Längsrichtung  $\varphi_l$  des uniaxialen Zugversuchs ermittelt wird, genutzt. Die senkrechte Anisotropie hängt sowohl von der Beanspruchungsrichtung im Verhältnis zur Walzrichtung als auch vom momentanen Dehnungsbetrag ab. So ist es zum Beispiel möglich, dass die senkrechte Anisotropie bei einer plastischen Dehnung von 10 % um 20 % größer ist. Auch die Veränderung der Belastungsrichtung bezogen auf die Walzrichtung kann beispielsweise zu einer Veränderung der senkrechten Anisotropie um 30 % führen [AND09].

### Elementare Biegetheorie

Das Biegen wird nach DIN 8586:2003-09 in Verfahren mit geradliniger und drehender Werkzeugbewegung unterteilt, wobei die Halbzeuge Bleche, Rohre, Drähte sowie Stäbe verarbeitet werden können. [DIN03B; LAN02] Zur Beschreibung der Vorgänge beim Biegen führt Ludwik [LUD04] die elementare Biegetheorie ein, der folgende Annahmen zugrunde liegen:

- ◆ Das Blech wird durch reines Biegemoment beansprucht, die Biegelinie ist ein Kreisbogen
- ◆ Das Blech ist sehr breit, sodass im Biegequerschnitt ein ebener Formänderungszustand herrscht
- ◆ Ebene Blechquerschnitte bleiben eben und senkrecht zur Blechoberfläche
- ◆ Die Blechdicke bleibt während des Biegens konstant
- ◆ Der Blechwerkstoff ist homogen und isotrop, die Spannungs-Dehnungslinien für Zug und Druck sind symmetrisch zum Nullpunkt
- ◆ Es werden nur Spannungen in Längsrichtung des Bleches berücksichtigt; die bei reiner Biegung auftretenden Spannungen in Breiten- und Dickenrichtung des Bleches werden vernachlässigt

In der geometrischen Mitte des betrachteten Biegequerschnitts befindet sich die neutrale Faser, in der weder Druck- noch Zugspannungen vorliegen. Anhand der Vereinfachungen ist es möglich, den dreiachsigen Spannungszustand beim Biegen in einen einachsigen Zustand zu

überführen und die Dehnungen im Querschnitt in Abhängigkeit des Krümmungsradius zu bestimmen:

$$\varepsilon_{x(y)} = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{(r_m + y) \cdot \alpha - l_0}{l_0} = \frac{y}{r_m} \quad \text{Gleichung 2-2}$$

Die Dehnung in den Außenfasern, d. h.  $y = \frac{1}{2} \cdot s_0$ ,  $r_m = r_i + \frac{1}{2} \cdot s_0$ , hängt demnach nur von der Blechdicke und dem Innenradius ab. Bei Annahme eines elastisch-plastisch-verfestigenden Werkstoffmodells bilden sich zu Beginn der Biegung, d. h. bei kleinen Biegewinkeln, zunächst nur elastische Dehnungen aus. Bei Erreichen der Fließspannung in der Außenfaser beginnt diese zu plastifizieren. Im Anschluss breiten sich vom Rand her, bei steigender Krümmung, die plastischen Bereiche aus. Die Grenze zwischen plastischem und elastischem Bereich lässt sich ausgehend von der Querschnittsmitte anhand Gleichung 2-3 ermitteln. Der vollplastifizierte Querschnitt stellt die Grenze von Biegevorgängen dar, da der Krümmungsradius  $r_m = 0$  nicht unterschritten werden kann. Die elementare Biegetheorie gilt für große Radien und kleine Blechdicken. [LAN90]

$$y_F = \frac{\sigma_F \cdot r_m}{E} \quad \text{Gleichung 2-3}$$

Bei großen plastischen Formänderungen bzw. relativ kleinen Biegeradien kann die Annahme eines zur ortfesten neutralen Schicht symmetrischen Spannungsverlaufs im Blechquerschnitt nicht angewandt werden. Vielmehr ändern die einzelnen Schichten im Blechquerschnitt ihre relative Lage zueinander. Aus der Annahme konstanter Blechdicke, ebener Querschnitte und der Volumenkonstanz folgt die Dehnungshistorie jeder einzelnen Schicht. Die momentan dehnungsfreie Faser, die sich im ebenen Blechstreifen noch in der Mitte des Querschnitts befindet, verschiebt sich während der Biegung in Richtung des Druckbereichs am Innenradius. Faserschichten, die in diesem Druckbereich liegen (also zunächst Druckspannungen ausgesetzt sind), erfahren eine Umkehr der Dehnung. [LAN90; WOL52]

Nach [LAN90] können im Querschnitt folgende Schichten unterschieden werden:

- ◆ äußere Randschicht  $r_{aR}$
- ◆ ursprünglich mittlere Schicht  $r_{m0}$
- ◆ momentan mittlere Schicht  $r_m$
- ◆ momentan ungelängte Schicht  $r_u$
- ◆ momentan spannungsfreie Schicht  $r_s$
- ◆ Grenzdehnungsschicht  $r_g$
- ◆ innere Randschicht  $r_{iR}$

Während des Biegens werden diese Schichten unterschiedlich beansprucht. Alle Schichten zwischen der äußeren Randschicht und der ursprünglich mittleren Schicht erfahren ausschließlich Zugspannungen. Schichten zwischen  $r_{m0}$  und  $r_u$  werden zunächst gestaucht und anschließend wieder gedehnt, wobei der Dehnungsbetrag größer ist als die Stauchung. Zwischen  $r_u$  und  $r_g$  liegt derselbe Wechsel von Stauchung zu Dehnung vor, jedoch überwiegt hier der

Betrag der Stauchung. In der Nähe des Innenradius zwischen der Grenzdehnungsschicht  $r_g$  und der inneren Randschicht  $r_{iR}$  erfahren alle Schichten ausschließlich Stauchung, siehe Abbildung 2-17.

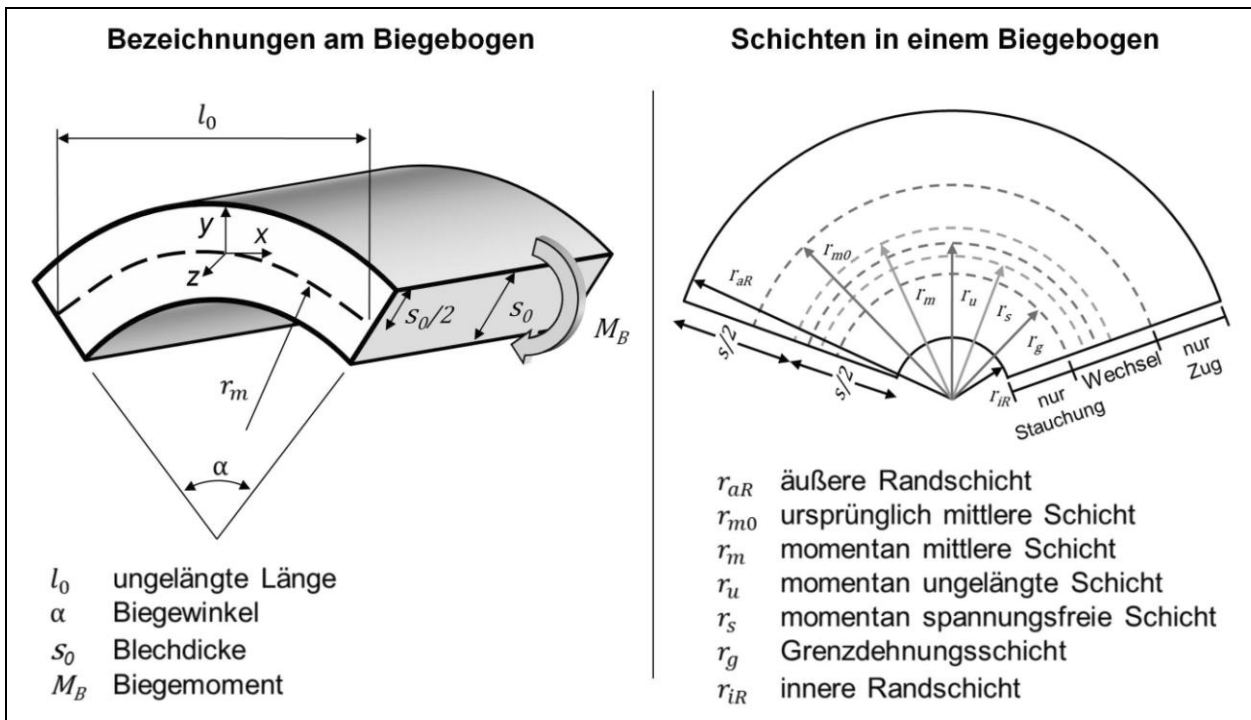


Abbildung 2-17 Bezeichnungen an einem Volumenelement nach der elementaren Biegetheorie und Schichten in einem Biegebogen

Den vorangegangenen Betrachtungen liegen geometrische Vereinfachungen zu Grunde. Hierzu zählt die Annahme einer geraden Biegelinie. Moderne Karosserieanbauteile aus Blech weisen jedoch auch konvex oder konkav gekrümmte Bereiche auf. In solchen Bauteilbereichen wird dem durch das Biegemoment induzierten Spannungszustand ein zusätzlicher, in tangentialer Richtung wirkender Spannungsanteil überlagert. An konvex gekrümmten Bauteilabschnitten entstehen während des Abstellens des Flanschs tangentielle Druckspannungen in Folge einer lokalen Materialanhäufung. Diese beeinflusst auch die Spannungsverteilung im Biegebogen. In konkaven Abschnitten entstehen nach demselben Prinzip tangentielle Zugspannungen (vgl. Abbildung 2-18).

Beim Abstellen und Falzen von Flaschen an Karosserieanbauteilen aus Aluminium tritt die zuvor beschriebene Verschiebung der ungelängten Faser ebenso auf. Infolge des sequenziellen Prozessablaufes (Abstellen, Vorfalzen, Fertigfalzen) korreliert die Verschiebung jedoch nicht mit Messwerten aus kontinuierlichen Biegeprozessen. In Abhängigkeit des Biegewinkels zeigen sich dabei Unterschiede von bis zu 10 % (vgl. Abbildung 2-18). In einem mehrstufigen, sequentiellen Biegeprozess können somit geringere bzw. höhere Faserverschiebungen als in einem vergleichbaren, kontinuierlichen Biegevorgang, mit identischem Biegewinkel, erzeugt werden.

Dementsprechend entstehen auch geringere Spannungen und Biegebeanspruchungen im Biegebogen. [LIE14B]

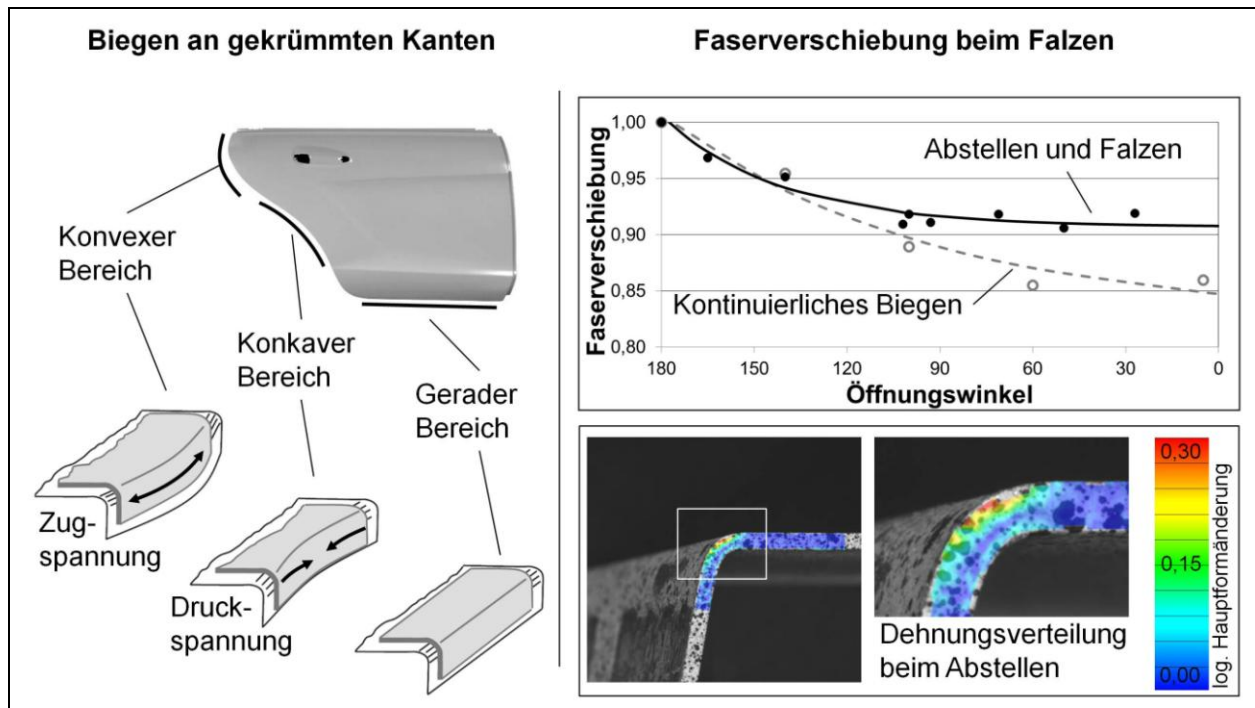


Abbildung 2-18 Spannungen im Flansch beim Biegen an gekrümmten Kanten und Verschiebung der ungelängten Faser beim Abstellen und Falzen nach [LIE14B]

### 2.3.3 Versagensmechanismen von Aluminiumblechwerkstoffen

Im Folgenden werden zunächst die allgemeinen Versagensmechanismen von Blechwerkstoffen vorgestellt. Daran anschließend erfolgt die Betrachtung der Oberflächenrauheit als Indikator für die fortschreitende Beanspruchung des Werkstoffs. Im Anschluss werden Ansätze zur numerischen Beschreibung der Versagensgrenze beim Umformen aufgezeigt.

#### Sprödbbruch

Der annähernd verformungslose Sprödbbruch tritt ohne ausgeprägte plastische Deformation und Einschnürung senkrecht zur Hauptnormalspannung auf. Der Bruch kann in Abhängigkeit von der Gefügestruktur sowohl trans- als auch interkristallin erfolgen. Der Versagensmechanismus tritt bei spröden Metallen, die meist einen krz- oder hdp-Gitteraufbau (z. B. Magnesium) besitzen, und bei duktilen Werkstoffen auf, falls eingelagerte, spröde Phasen oder innere Fehlstellen vorliegen. Ebenso können hohe Dehnraten, niedrige Umformtemperaturen und mehrachsige Spannungszustände zu sprödem Bruchverhalten führen. [HAA94]

Die physische Trennung des Werkstoffs beginnt an lokalen Oberflächen- oder Gefügefehlstellen, die innerhalb des Kraftflusses der Belastung liegen, die bei weiterer Beanspruchung zu Mikrorissen führt. Der transkristalline Bruch verläuft auf mikroskopischer Ebene parallel zu den

Gleitebenen, bevorzugt durch Gebiete mit identischer Textur. Die Bruchfläche erscheint glänzend oder glitzernd. [BAR08; ROO05] Beim interkristallinen Bruch verläuft der Riss entlang der Korngrenzen, die Bruchfläche erscheint somit matt und nur wenig zerklüftet. [GOB06; GRO11]

### **Duktiler Bruch**

Dem duktilen Bruch von metallischen Werkstoffen gehen starke plastische Verformungen sowie Einschnürung voraus. Bei Beginn der lokalen Einschnürung bilden sich in diesen Zonen Poren innerhalb des Werkstoffgefüges, die sich bei weiterer Beanspruchung zu Hohlräumen vereinigen (Hohlraumkoaleszenz) und schließlich den Bruch initiieren. Die Rissbildung verläuft meist transkristallin unter einem Neigungswinkel von  $45^\circ$  zur Hauptspannungsrichtung. [HOR08; ROO05] Die Trennung des Werkstoffs beginnt an inneren Fehlstellen des Gefüges (Einschlüsse, Korngrenzen) bei 3-achsigem Spannungszustand. Der Bruch kann auch durch Oberflächenfehler initiiert werden. Werkstoffe, die weder eindeutig spröde noch ausgeprägte duktile Eigenschaften aufweisen, versagen durch Mischbruch. Innerhalb der Bruchfläche liegen sowohl Bereiche mit duktilem als auch Bereiche mit sprödem Versagen vor. Die geometrische Bruchform und die Lage des Bruchs zur Beanspruchungsrichtung werden durch den lokalen Spannungszustand und die Beanspruchungsart bestimmt. [DAH93; GRO11]

### **Membranstabilität**

Metallische Werkstoffe weisen im stabilen Zustand (d. h. ohne plastische Umformung) eine geringe Sensitivität gegenüber Inhomogenitäten (z. B. Ausscheidungen) auf. Bei Beginn der plastischen Umformung wird der Zustand quasistabil und anschließend instabil. An den geometrischen Fehlstellen (Riefen) kommt es somit zur lokal überhöhten Dehnungsbeschleunigung im Vergleich zum homogenen Werkstoffgefüge. Die stark progressive Dehnungslokalisierung führt dann zum Versagen. [LIE08; MAR02]

### **Oberflächenaufrauung**

Beim Biegen von Aluminiumblechwerkstoffen geht dem biegeinduzierten Werkstoffversagen eine Aufrauung der Oberfläche voraus. Diese Aufrauung infolge des Umformens wird maßgeblich von der Korngröße und dem lokalen Umformgrad bestimmt. Zusätzlich ist die kornmorphologische Anisotropie der Körner (Ausrichtung und Größe) als wesentlicher Faktor bekannt (vgl. [DAN67; MAH98; REI61; STO11]). Die Kornausrichtung bzw. die Lage der Gleitsysteme führt bei Beanspruchung in Vorzugsrichtung zur Bildung von Gleitebenen im Korn, während bei anderer Beanspruchung verstärkt Korngrenzengleitung auftritt. Dabei steigt der Einfluss der Korngröße mit zunehmendem Umformgrad an. [MÖS83]

Die schrittweise Entwicklung der Oberflächenrauheit eines Blechwerkstoffs lässt sich in drei allgemeine, von den vorherrschenden Dehnungsbeträgen abhängige, Phasen unterteilen. Bei kleinen plastischen Dehnungen  $\varphi < 0,1$  werden die bereits in der Ausgangsoberfläche der Probe enthaltenen Rauheitsprofile lediglich verstärkt. Dies basiert auf der Bildung von Gleitstufen. Bei mittleren Dehnungsbeträgen  $0,1 < \varphi < 0,2$  kommt es zur Korngrenzengleitung und somit zur Bildung neuer Profilelemente. Werden noch größere Dehnungsbeträge erzielt, wird durch die Verkipfung und Drehung von oberflächennahen Körnern die Rauheit weiter verstärkt. [THO80] Es zeigt sich, dass die Oberflächenrauheit vom plastischen Dehnungsbetrag und Dehnungszustand abhängt. Bei einachsigen Dehnungszuständen mit geringen Dehnungen wird ein linearer Zusammenhang festgestellt, der bei großen Dehnungsbeträgen ( $\varphi > 0,1$ ) in einen überproportionalen Zusammenhang übergeht. Beim Biegen herrscht eine lineare Abhängigkeit von der plastischen Dehnung auf der Außenfaser und der Oberflächenrauheit vor. [BEC98; RAA03; SAC04; SAR04; WIL81]

### **Versagensbeschreibung**

Die von einem Werkstoff maximal ertragbaren Formänderungen zu Beginn des Werkstoffversagens werden als Grenzkurven sowohl für die Validierung der Ergebnisse der Umformsimulation als auch für die Bewertung der Prozesssicherheit realer Umformprozesse benötigt. Beim Umformen von Blechwerkstoffen wird der Beginn der Einschnürung in einem lokal begrenzten Gebiets des Werkstücks als Werkstoffversagen bewertet. Dieses Versagen hängt von zahlreichen Faktoren z. B. dem Spannungszustand oder der Umformhistorie ab. Die konventionelle Grenzformänderungskurve FLC dient der Darstellung der Versagensgrenze, die auf lokaler Einschnürung und Membraninstabilität im ebenen Dehnungsraum basiert. [MER06]

Zur Ermittlung der FLC werden der Marciniak- bzw. der Nakajima-Versuch eingesetzt (vgl. [MAR73; NAK68]). Hierbei werden Probengeometrien mit unterschiedlichen Umrissen mithilfe eines Halbkugel- bzw. eines Napfstempels bis zum Versagen umgeformt. Die unterschiedlichen Probengeometrien, die sich hauptsächlich in der Breite des Probenstegs unterscheiden, erzeugen während des Umformens verschiedene Spannungszustände. Während des Versuchs werden die lokalen Formänderungsbeträge messtechnisch erfasst. Die ertragbaren Haupt- und Nebenformänderungen werden im letzten Zeitschritt vor dem Riss der Probe analysiert und auf die zulässigen Formänderungen zu Beginn der Einschnürung zurückgerechnet. Aus den Ergebnissen jedes Probentyps wird die max. mögliche Formänderung bis zum Einschnüren im Grenzformänderungsdiagramm (FLD) durch das Wertepaar aus Haupt- und Nebenformänderung dargestellt. Durch das Verbinden der Punkte im Diagramm ergibt sich die FLC. [DIN09; GOO68]

Die konventionelle FLC gilt jedoch nur für lineare Dehnpfade mit homogen applizierten Lasten. [NAK68] Treten während des Umformvorgangs oder bei sequentieller Prozessführung nicht-lineare Dehnpfade auf, verschiebt sich die Grenzformänderungskurve [MÜS75]. Eine Verschiebung der Grenzformänderung infolge von überlagerter Biegung und Scherung wurde in [EMM08; HEL09] für Stahlwerkstoffe festgestellt. Ansätze zur Beschreibung von nicht-linearen FLCs für Aluminiumblechwerkstoffe finden sich in [LIE06; STO00; WER14].

### 2.3.4 Kriterien zur Beschreibung des Biegeversagens

Die Charakteristik des Biegeversagens zeigt eine Dehnungslokalisierung auf der Außenfaser des gebogenen Blechs sowie ein von der Oberfläche nach innen fortschreitendes Versagen. Demnach lassen sich während des Biegens vier Stadien unterscheiden (Abbildung 2-19). Zu Beginn des Biegens stellt sich eine Aufrauung der Oberfläche ein (Bildung einer Oranjenhaut), die sich bei fortschreitender Biegung zu Rauheitstälern und Riefen vereinigt. Diese bilden sich parallel zur Biegeachse aus (Phase eins und zwei). In Phase drei vergrößern sich die Täler durch Bildung von Gleitbändern weiter, bis in der letzten Phase im Grund der tiefsten Riefe ein Scherbruch entsteht und das Blech durch den nach innen verlaufenden Riss versagt. [AKE78]

Diese Dehnungslokalisierung und das Entstehen einer überwiegend interkristallinen Bruchfläche bei Aluminiumlegierungen der AA 6000er-Reihe, wie sie heute für Karosserieanbauteile verwendet werden, zeigen, dass technologische Kennwerte aus dem Zugversuch nicht für die Bewertung der Biegebarkeit brauchbar sind (vgl. [LLO02; MAT13; SCH10]). Zur Bewertung der Beanspruchungen beim Biegen von Aluminiumblechwerkstoffen werden daher geometrische Ansätze, dehnungsbasierte Ansätze oder Schädigungsmodelle eingesetzt.

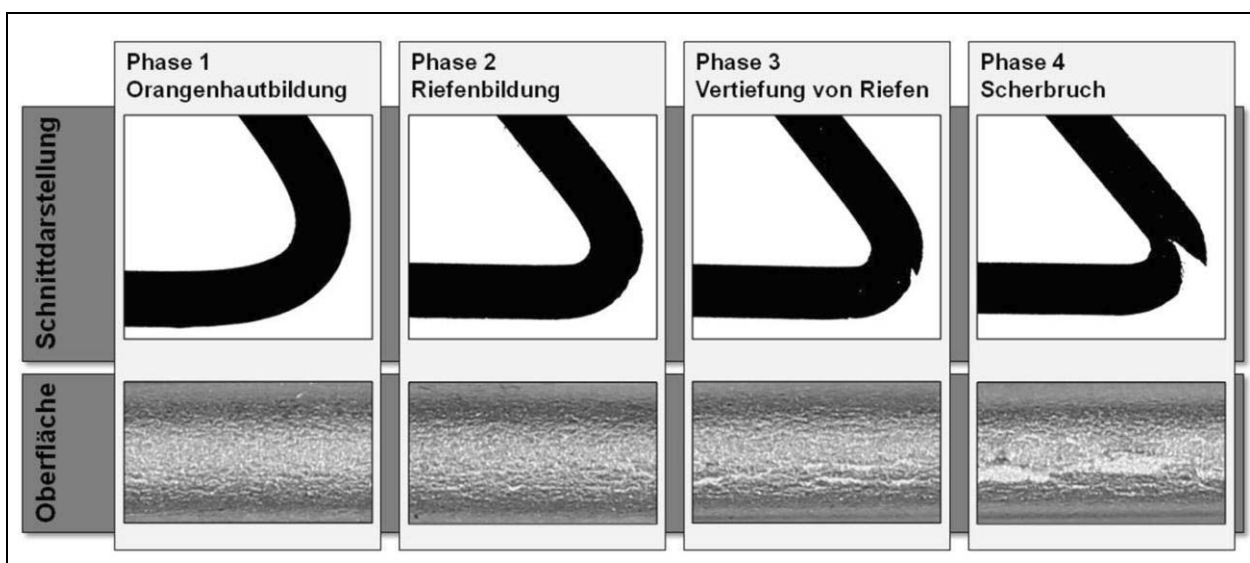


Abbildung 2-19 Querschliff und Oberflächenzustand während der vier Phasen beim Biegen von Aluminiumblechwerkstoffen nach [AKE78; LAN02; LIE15]



## Biegefaktor

Zur Quantifizierung der Biegebarkeit von Blechwerkstoffen wird der geometrische Ansatz des Biegefaktors betrachtet, der sich aus dem Quotienten des gemessenen Innenradius  $R$  eines gebogenen Blechstreifens und der Nennblechdicke  $s_0$  berechnet. Zur experimentellen Ermittlung des zulässigen Biegefaktors werden Blechproben mithilfe von einfachen Versuchswerkzeugen, z. B. Plättchenbiegeversuch, mit unterschiedlichen Biegeradien auf definierte Biegewinkel, z. B.  $180^\circ$ , gebogen. Die resultierenden Probenoberflächen werden anschließend optisch begutachtet, auf Versagen infolge Rissbildung bewertet und in produktspezifische Klassen der Oberflächenqualitäten eingeordnet. Auf diese Weise kann der kleinste, für eine spezifische Oberflächengüte zulässige Biegeradius bzw. die Blechdicke für einen Blechwerkstoff experimentell ermittelt werden. Der Einfluss der subjektiven Bewertung des Oberflächenzustands kann durch den Einsatz von standardisierten Prüfverfahren mit automatisierter Ermittlung von Oberflächenanrissen reduziert werden. Ein Beispiel hierfür ist der Plättchenbiegeversuch (vgl. Abbildung 2-20), in dem der Anriss der Blechoberfläche durch einen festgelegten Kraftabfall beim Biegen definiert erkannt wird (vgl. [BOT98; LLO00; SAR01]). Experimentelle Ergebnisse zum Einfluss des Vordehnungsbetrags, des Abstellradius und der Ausrichtung der Biegeachse zur Walzrichtung auf den Mindestbiegeradius<sup>6</sup> finden sich in [LIE13A; REN04; SCH79; SIE15].

## Biegefaktorverlauf

Der konventionelle Biegefaktor eignet sich nur bedingt zur Bewertung von mehrstufigen Umform- und Biegeprozessen. In Abhängigkeit von der Dehnungshistorie des Blechwerkstoffs aus den vorangegangenen Prozessschritten kann jedoch ein Biegefaktorverlauf erstellt werden, der die Bestimmung des kleinstmöglichen Radius erlaubt. Zur Erstellung des Biegefaktordiagramms werden Blechproben zunächst plastisch auf Dehnungsbeträge von 0 % bis 18 % gedehnt und anschließend mit Biegeradien von 0,2 mm bis 0,9 mm gebogen. Das Vordehnen der Proben auf spezifische Vorbeanspruchungen erfolgt beispielsweise mit einer Zugprüfmaschine (uniaxiale Vordehnung) oder mit einem Marcianiakstempel (plane-strain und biaxiale Vordehnung). Die Bewertung der Oberfläche an der gebogenen Blechkante erfolgt wiederum subjektiv oder über einen definierten Lastabfall. Die Gültigkeit des Biegefaktorverlaufs wird für nahezu kreisrunde Falzschlaufen nachgewiesen. Zur Bewertung

---

<sup>6</sup> Mindestbiegeradius = Wird ein vom Werkstoff abhängiger minimaler Biegeradius unterschritten, so treten an der Außenfaser Risse auf. [DUB07]

von stark elliptischen oder gequetschten Falzschlaufen werden die Beanspruchungen als nicht zutreffend charakterisiert. [DEN14; LIE09]

### Bending Limit Curve

Die Biegegrenzkurve BLC basiert auf der Betrachtung von Dehnungen auf der Biegekante. Entsprechend der Grenzformänderungskurve beschreibt die Biegegrenzkurve die kritischen Dehnungsbeträge im Haupt- und Nebenformänderungsraum. Zur Erstellung der Biegegrenzkurve werden Proben auf definierten Dehnpfaden bis zu einem bestimmten Dehnungsbetrag vorgedehnt. Die Vordehnung dient zur Nachbildung der plastischen Formänderungen, die innerhalb der Prozesskette der Biegeoperation vorausgehen. Anschließend werden die Blechproben im Plättchenbiegeversuch bis zur Rissbildung umgeformt. Die Grenzen des jeweiligen Dehnpfads werden durch das Aufsummieren der Vordehnung und Biegedehnung ermittelt, dadurch ergeben sich die Stützpunkte der BLC für einen bestimmten Blechwerkstoff (vgl. Abbildung 2-20). [LIE10; SCH10]

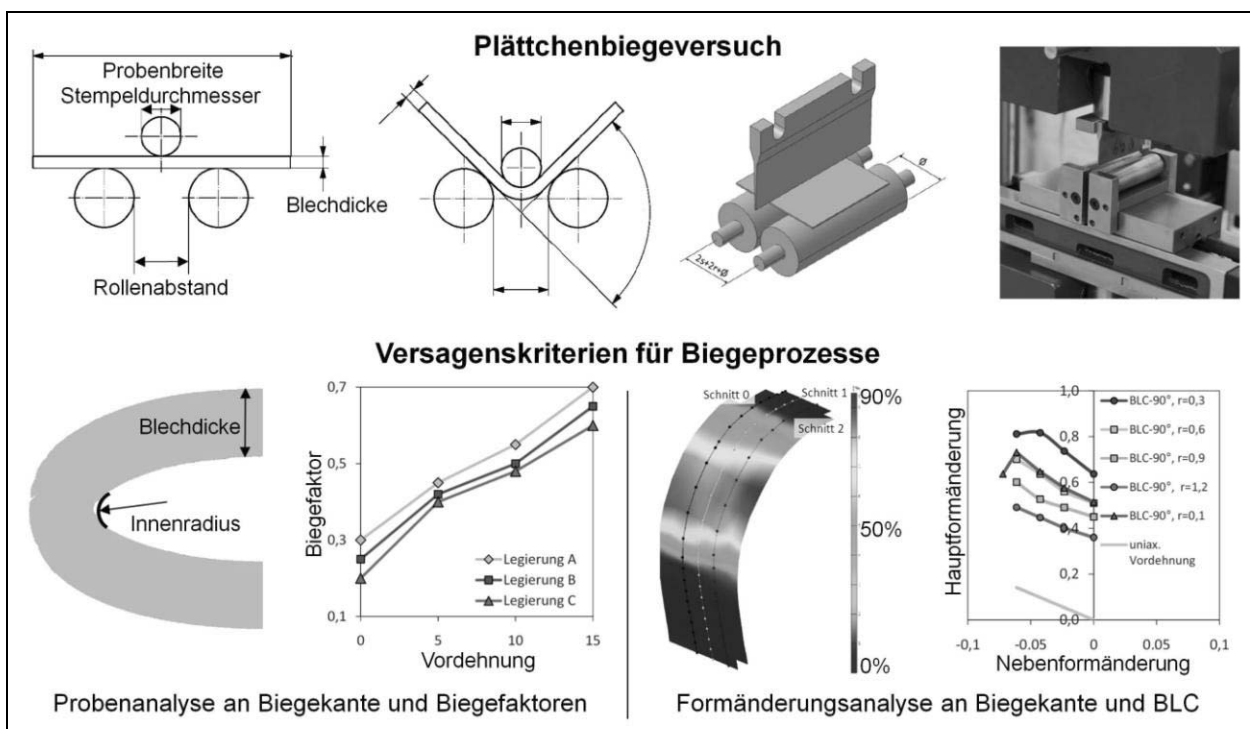


Abbildung 2-20 Versuchseinrichtung zur Charakterisierung der Biegebarkeit nach [DIN05B], Biegefaktor und Bending Limit Curve für AA 6016 Legierungen nach [SCH10]

### Biegebewertungsfaktor

Während in den oben genannten Ansätzen der maximale Dehnungsbetrag beim Biegen betrachtet wird, wird beim Biegebewertungsfaktor BBF die gesamte Formänderungsverteilung senkrecht zur Biegeachse berücksichtigt. Diese Verteilung korreliert mit der Oberflächenqualität. [DEN14]

In [DEN14] wurden unterschiedlich vorbeanspruchte Blechproben einer AA 6016 Legierung mithilfe einer Vorrichtung zum Plättchenbiegen auf identische Restschließwinkel gebogen. Die Formänderungen an der Biegekante wurden dabei mit optischer Messtechnik ausgewertet. Die Analyse der Proben zeigte, dass stark vorgedehnte Aluminiumproben eine stärkere Neigung zur Dehnungslokalisation an der Biegekante aufweisen als vergleichbare Proben mit geringerer Vordehnung. Mit zunehmender Vordehnung nimmt auch die am Probenscheitel gemessene max. Formänderung zu. Dabei wurden festgestellt, dass diese hohen Formänderungsbeträge entlang einer kürzeren Abwicklungslänge auftreten. Die nicht vorfestigten Proben hingegen verfestigten während des Biegens in einem größeren Bereich. Basierend auf diesen experimentellen Ergebnissen wurden charakteristische Formänderungsverläufe abgeleitet. Hierzu wurden die Formänderungen in einem Linienschnitt senkrecht zur Biegekante betrachtet (Abbildung 2-21). Die gemessenen Kurvenverläufe wurden mit der Formulierung der Gauß'schen Glockenkurve (Gleichung 2-4) treffend approximiert, die nun die Grundlage für die Beschreibung des charakteristischen Verlaufs darstellt.

$$y_{(x)} = a \cdot e^{-\left(\frac{x-b}{c}\right)^2} + d \quad \text{Gleichung 2-4}$$

Darin beschreibt der Parameter  $a$  die Höhe der Glockenkurve und stellt den Betrag der maximalen Hauptformänderung am Biegescheitel dar. Der Bereich in dem während des Biegens plastische Formänderungen stattfinden, wird als Bending Affected Zone BAZ bezeichnet. Dieser entspricht der Breite der Öffnung der charakteristischen Glockenkurve und wird durch den Faktor  $c$  beschrieben. Für die Bestimmung der Biegebeanspruchung weniger wichtig sind die Faktoren  $b$  (Position des Dehnungsmaximums auf der abgewickelten Schnittlänge) und  $d$  (Überlagerung eines konstanten, einachsigen Dehnungsbetrags).

Ausgehend von dieser mathematischen Beschreibung lässt sich unabhängig von Geometrie und Vordehnung ein Ansatz zur Bewertung der Biegebeanspruchung aufstellen. Hierbei wird angenommen, dass im Unterschied zu anderen Bewertungsmethoden scharfe Biegekanten (d. h. kleine Biegeradien) und große Formänderungsbeträge am Biegescheitel nicht zwingend zum Versagen führen müssen. Vielmehr wird der Beanspruchungsgradient betrachtet. Überschreitet der Beanspruchungsgradient einen kritischen Wert, beginnt der Werkstoff an der Biegekante zu versagen. Der Biegebewertungsfaktor setzt sich aus der maximalen Hauptformänderung und der BAZ zusammen (Gleichung 2-5), wobei der größte Hauptformänderungsbetrag quadratisch berücksichtigt wird.

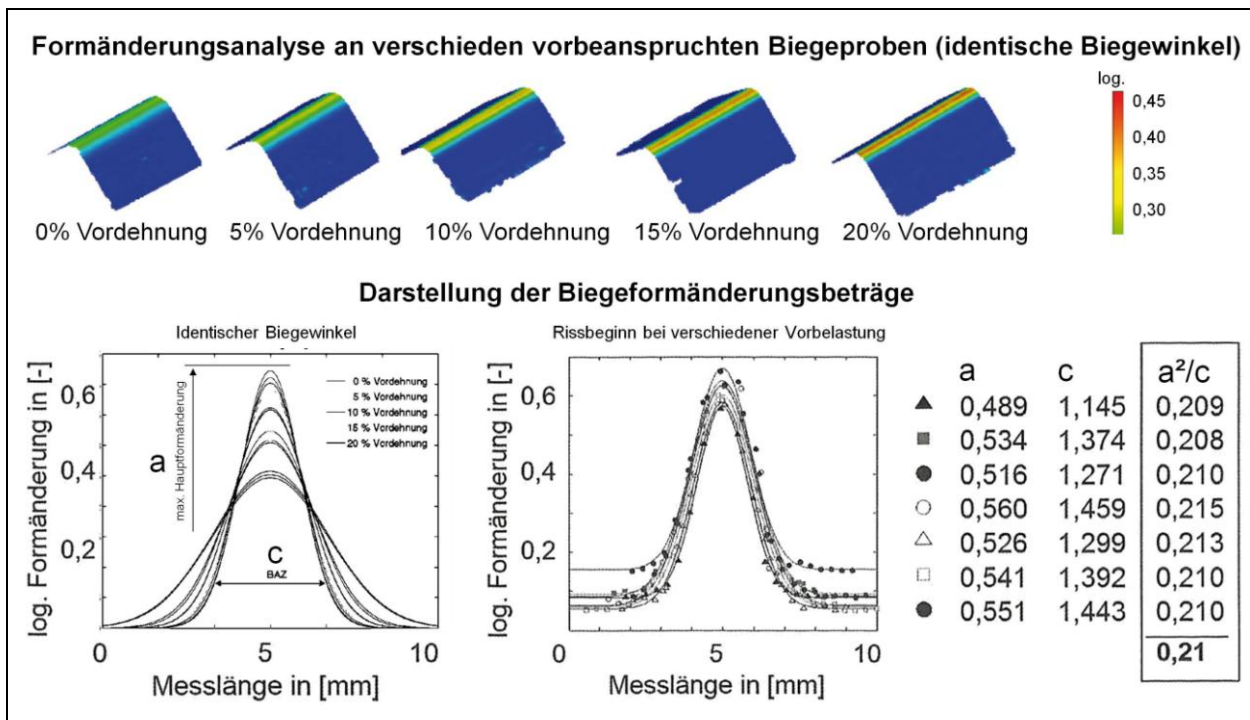


Abbildung 2-21 Gemessene Hauptformänderungen an Biegeproben (AA 6016), Biegeformänderungsverläufe und Biegebewertungsfaktor bei Rissbeginn (AA 6016) nach [DEN14; DEN10]

Zur Bewertung der Prozesssicherheit wird der Biegebewertungsfaktor mit dem werkstoffspezifischen Grenzwert für Biegeprozesse verglichen. Dieser wird anhand von technologischen Biegeversuchen, z. B. dem Plättchenbiegen, ermittelt. Analog zur Aufnahme der BLC werden Blechproben bis zur Rissbildung gebogen. Aus den gemessenen Formänderungsbeträgen an der Biegekante und der Größe der Biegezone wird der werkstoffspezifische Versagenswert ermittelt. Aus dem Verhältnis zwischen dem für einen Biegeprozess prognostizierten BBF oder dem an einem Realbauteil gemessenen BBF und dem werkstoffspezifischen Grenzwert leitet sich der Biegequotient BQ ab Gleichung 2-6. Dieser beschreibt die Prozesssicherheit innerhalb des Wertebereichs  $0 \leq BQ \leq 1$ , wobei  $BQ \approx 0$  den als unkritisch beschriebenen Rand und  $BQ \approx 1$  den risskritischen Rand darstellt.

$$BBF \approx \frac{a^2}{c} \approx \frac{\text{max. Hauptformänderung im Biegebereich}^2}{\text{Bending Affected Zone}} \quad \text{Gleichung 2-5}$$

$$\text{Prozesssicherheit} \approx BQ \approx \frac{BBF}{\text{Werkstoffgrenzwert}} \quad \text{Gleichung 2-6}$$

## 2.4 Auslegung von Falzprozessen für Karosserieanbauteile

Die zuverlässige Vorhersage der technologischen Herstellbarkeit des Bauteils und der Bauteileigenschaften stellt eine große Herausforderung während der Produktentwicklung dar. Dabei ist der Beitrag jedes einzelnen Fertigungsschrittes (z. B. Einzelteilherstellung oder Lackierung) zur Qualität des fertigen Anbauteils am gebrauchsfähigen Fahrzeug zu betrachten. Die Qualität des Rohbauteils umfasst dabei sowohl dimensionale und geometrische Bauteileigenschaften als auch

die Oberflächenschädigung infolge von beanspruchungsinduzierter Oberflächenaufrauung und Rissbildung. [ESP06; SOM14] In den folgenden Kapiteln wird der Einfluss des Falzens auf die Qualität des Rohbauteils aufgezeigt.

### **2.4.1 Einflussgrößen auf die Werkstoffbeanspruchung beim Falzen**

Die Herstellbarkeit von anmutungshaften Karosserieanbauteilen, z. B. Fahrzeugtüren mit kleinen Falzradien, wird maßgeblich durch die biegeinduzierte Werkstoffbeanspruchung während des Falzens bestimmt. Dabei muss trotz abweichungs- und streuungsbehafteter Fertigungsprozesse (z. B. mechanischer Fügeprozess im Karosseriebau), dem Einsatz neuer Leichtbauwerkstoffe und unterschiedlicher Fügetechnologien (Roll- und Maschinenfalzen) bereits während der Bauteil- und Anlagenentwicklung die Herstellbarkeit der Bauteile sichergestellt werden.

Numerische Methoden bzw. Finite-Elemente-Simulationen werden bereits heute in den frühen Phasen der Produktentwicklung von PKW-Karosserien eingesetzt um Bauteil-, Werkzeug- und Anlagenkonzepte auszulegen bzw. zu optimieren. Durch den gezielten Einsatz von FE-Simulation sollen durch das frühzeitige Erreichen von hohen Produkt- und Prozessreifegraden die Folgekosten (z. B. mehrfache Änderungsschleifen im Anlaufmanagement von Karosseriebauanlagen) reduziert werden. Teilprozesse der Prozesskette zur Herstellung von Anbauteilen sind bereits umfassend in den Produktentwicklungsprozess integriert. Hierbei ist insbesondere die Simulation von Prozessen zur Herstellung von Einzelteilen aus Blech (z. B. Tiefziehen) zu nennen. Für andere Teilprozesse (z. B. thermische Fügeprozesse) sind Softwarelösungen am Markt verfügbar und die Leistungsfähigkeit der Simulation ist bekannt, jedoch ist noch keine durchgängige und vollständige Prozesskettensimulation sichergestellt.

Neben den numerischen Methoden zur Absicherung der Machbarkeit von Anbauteilen lassen sich Aussagen zur Produktreife auch mithilfe von Prototypen und Detailmodellen treffen. Jedoch ist der Einsatz dieser Methoden aufgrund der vergleichsweise hohen Investitionen in Werkzeuge und Anlagen sowie des verhältnismäßig langen Zeitraums zu deren Herstellung zu reduzieren bzw. zu vermeiden.

Weitere Erkenntnisse lassen sich aus Grundlagenuntersuchungen gewinnen. Diese können dabei sowohl experimentell als auch simulativ durchgeführt werden. Bei experimentellen Untersuchungen wird dabei an verhältnismäßig einfachen Probengeometrien mit nur wenigen unbekanntem Prozessstreuungen der Einfluss von Produkt- oder Prozessgrößen betrachtet. Die daraus abgeleiteten Modelle zur Bewertung von Einflussgrößen auf die Werkstoffbeanspruchung werden an komplexeren Baugruppen validiert und anschließend als Werkzeuge in der Produktentwicklung eingesetzt. Im Gegensatz hierzu bieten simulative Ansätze die Möglichkeit eine Vielzahl an Einflussgrößen innerhalb kurzer Zeit zu prüfen. Jedoch muss vorab die

Simulation entsprechend kalibriert und validiert werden, vgl [HÖN13D]. Im Folgenden sind Erkenntnisse aus solchen Grundlagenuntersuchungen (simulativ und experimentell) zur Werkstoffbeanspruchung beim Falzen dargestellt.

### **Werkstoffbeanspruchungen beim Falzen infolge der Einzelteilherstellung**

Im Allgemeinen ist die Werkstoffbeanspruchung beim Falzen von den vorhergehenden Umformoperationen, z. B. Tiefziehen, sowie den Vorgängen beim Falzen abhängig. Im Folgenden wird zunächst auf diese Formgebungsvorgänge und auf den Abstellvorgang eingegangen. Anschließend folgen die direkt mit dem Falzen zusammengehörigen Einflussgrößen auf die Werkstoffbeanspruchung (z. B. Vorfalzwinkel).

Beim Biegen von Aluminiumblechwerkstoffen ist eine Dehnungslokalisierung am Biegescheitel zu beobachten. Diese Dehnungslokalisierung sowie die Größe des Dehnungsbetrags nehmen mit zunehmender Vordehnung (z. B. Tiefziehen) des Blechs zu [DEN14]. Dieser Vorgang tritt auch beim Falzen auf. Zur Bewertung der Biegebeanspruchung werden drei experimentelle Methoden eingesetzt: 1. Abgleich mit Grenzmustern und Einteilung in Qualitätsklassen (vgl. [SCH07A]), 2. Ermittlung der Oberflächenrauheit mithilfe konfokaler Mikroskopie (vgl. [STO14]), 3. Optische Formänderungsanalyse (vgl. [DEN11; HÖN13A]).

In experimentellen Untersuchungen von Siegert wurde eine AlMg<sub>0,4</sub>Si<sub>1,2</sub> Legierung in einem Maschinenfalzprozess analysiert. Es zeigt sich, dass Proben mit großen Vordehnungen eine rauere, d. h. schlechtere Oberfläche, nach dem Falzen aufweisen als Proben die mit der identischen Falzvorrichtung, jedoch mit geringerer Vordehnung gefalzt wurden. Die Formänderungen wurden dabei nicht messtechnisch erfasst, die Bewertung der Oberfläche erfolgt anhand von Grenzmustern. [SIE93]. Für eine weitere AA 6016 Legierung wurde dies auch in [LAH02] beobachtet. Die Auswertung erfolgte auch hier anhand von Grenzmustern.

Nach dem Tiefziehen des Blechteils, d.h. dem Vordehnen, werden dessen Flansche abgestellt und für das Falzen vorbereitet. Die Werkstoffbeanspruchung wird dabei durch den Abstellradius, den Abstellspalt, den Radius an der Abstellbacke und die Ausrichtung der Biegeachse definiert (Abbildung 2-22). Die Ausrichtung der Biegeachse zur Walzrichtung des Blechs und zur Vorbeanspruchungsrichtung beeinflusst die Beanspruchung während des Falzens nicht. Sowohl [SIE93] als auch [LIN09] zeigten dies in experimentellen Untersuchungen zum Maschinenfalzen für AA 6016 bzw. AA 5052. In beiden Untersuchungen waren Messungenauigkeiten und Prozessschwankungen größer als die zu erwartenden Effekte der Achsausrichtung.

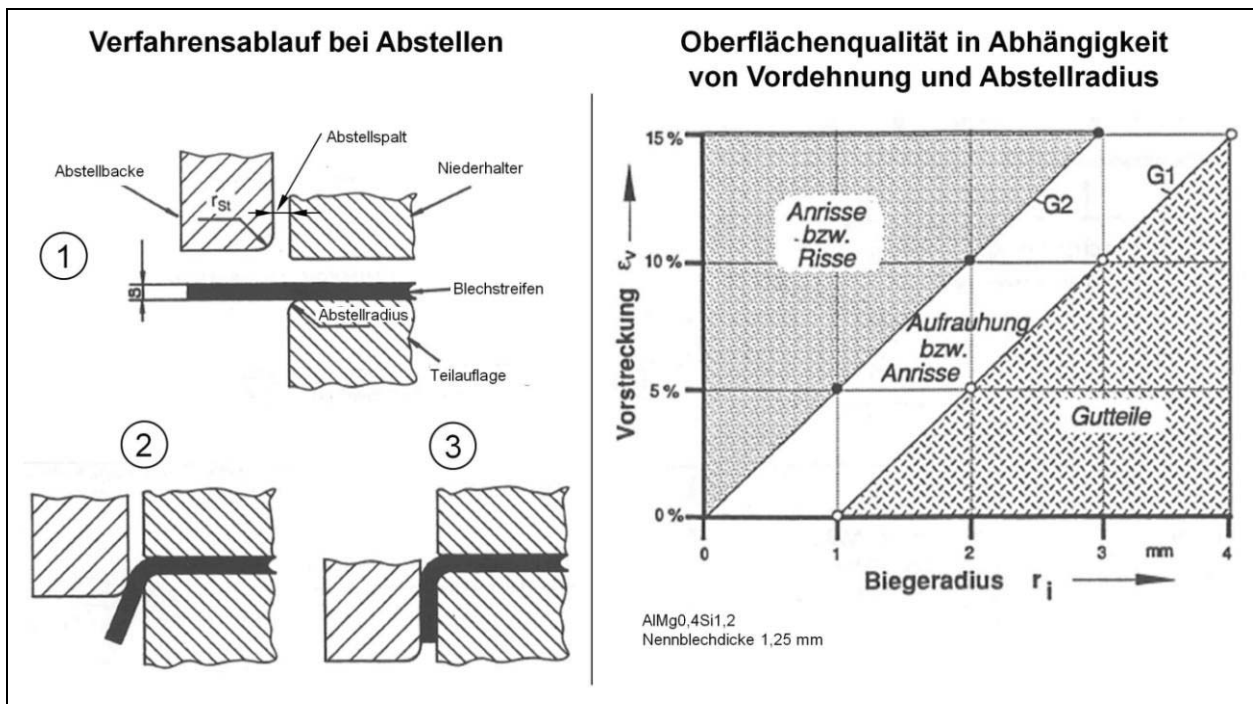


Abbildung 2-22 Versuchswerkzeug zum Abstellen von Aluminiumblechproben und ermittelte Oberflächenqualität nach [SIE93]

Die Größe des Abstellradius am Abstellwerkzeug hat einen großen Effekt auf die Biegebeanspruchung des Blechwerkstoffs beim Falzen. Livataylie stellt in einer experimentellen Untersuchung einer AA 6111 Legierung (Nennblechdicke 1,0 mm) fest, dass große Abstellradien die Biegebeanspruchung beim Maschinenfalzen generell reduzieren. Untersucht wurden dabei Abstellradien zwischen 0,5 mm und 2,0 mm. [LIV01] Vergleichbare Ergebnisse zeigte [SIE93] für Abstellradien zwischen 1,0 mm und 4,0 mm für AA 6016. In [LIN09] wurde die Abhängigkeit der Biegebeanspruchung vom Abstellradius (1,2 mm bis 2,2 mm) für AA 5052 gezeigt.

Neben dem Abstellradius sind der Abstellspalt sowie der Radius am Abstellstempel als Einflussgrößen auf die Biegebeanspruchung bekannt. Sowohl eine Vergrößerung des Abstellspalts als auch des Radius an der Abstellbacke bewirken eine Reduktion der Biegebeanspruchung beim nachfolgenden Falzen. [LIV01] In [SIE93] und [LAH01; LAH02] wurden die Zustände des Blechhalbzeugs in Hinblick auf deren Falzbarkeit betrachtet. Demnach hat die Oberflächentextur von Aluminiumblechen bei geringeren Vordehnungsbeträgen ( $< 5\%$ ) einen deutlichen Einfluss auf die Oberflächenrauheit nach dem Maschinenfalzen. Ebenso wird hohe Werkstofffestigkeit mit geringer Falzbarkeit assoziiert.

### Werkstoffbeanspruchungen beim Roll- und Maschinenfalzen

Die Biegebeanspruchung des Außenteils beim Falzen ist von der eingesetzten Falztechnologie (z. B. Rollfalzen) und der geometrischen Auslegung des Falzes (z. B. Falzradius) abhängig.

Während des Rollfalzens sind die Anzahl der Falzbahnen (d.h. der Biegewinkel innerhalb eines Falzdurchgangs), die räumliche Lage der Falzrolle (d.h. der Abstand der Mantelfläche der Falzrolle zum Falzbett) und die Eindrehung der Falzrolle maßgebliche Größen des programmierten Roboterfalzprogramms. Die Bewegungsgeschwindigkeit der Falzrolle, deren Größe und Form sowie die Reibung zwischen Blechwerkstoff und Falzrolle stellen technologische Randbedingungen beim Rollfalzen dar.

In einer experimentellen Studie zeigte Zubeil die Abhängigkeit der Korngröße (AA 6014) im Biegebereich einer rollgefalzten Probe von der Anzahl der Falzbahnen bzw. des Vorfalzwinkels. Er schlussfolgerte auf Basis von Schlibbildern, dass das Korngrößenverhältnis und somit die Biegebeanspruchung bei einem zweistufigen Vorfalzprozess und einem nachfolgenden Fertigfalzen größer ist als beim einem einstufigen Vorfalzprozess. Eine Quantifizierung der Biegebeanspruchung wurde jedoch nicht angegeben. [ZUB10]

Das Maschinenfalzen zeichnet sich gegenüber der Rollfalzen durch eine starre, nur mit sehr großem manuellem Aufwand veränderbare Werkzeuggeometrie aus. Die Einflussfaktoren auf den Falzprozess sind entsprechend weniger umfangreich. In experimentellen Versuchen zum Maschinenfalzen von Denninger wurde die räumliche Position des Vorfalzwerkzeugs im Hinblick auf die Biegebeanspruchung der Falzschlaufe (AA 6016) betrachtet. Der Effekt ist, verglichen mit dem einer erhöhten Vordehnung, gering. [DEN14]

Die geometrische Auslegung des Falzes erfolgt für Maschinenfalz- und Rollfalzprozesse anhand derselben Parameter (z. B. Position des Innenteils, vgl. Abbildung 2-15). Die Auswirkungen auf die Biegebeanspruchung können für die jeweilige Falztechnologie unterschiedlich sein. Für das Maschinenfalzen zeigte Denninger, dass die Position des Innenblechs die Biegebeanspruchung beim Falzen beeinflusst. Der Effekt ist allerdings innerhalb der technologischen Grenzen (z. B. Sicherstellung einer ausreichenden Falzüberdeckung) sehr gering. Wesentlich größer ist der Einfluss der Flanschlänge, diese stellt von den geometrischen Einflussfaktoren den Wichtigsten dar. [DEN14; HÖN13E] Zum Rollfalzen liegen im Stand der Technik hierzu keine Ergebnisse vor.

In weiteren Studien wurde das Rollfalzen im Vergleich zum konventionellen Falzprozess betrachtet. Die Erkenntnisse hinsichtlich der Werkstoffbeanspruchung aus diesen Untersuchungen sind im Folgenden aufgeführt. Die Darstellung umfasst die Betrachtung von Dehnungszuständen, -beträgen und deren Position in Relation zur Geometrie der Falzschlaufe.

Der Dehnungszustand beim Maschinenfalzen wird im ermittelten Stand der Technik als reiner Plane-strain-Zustand beschrieben. Beim Rollfalzen liegen solche Erkenntnisse jedoch noch nicht vor. In neueren Veröffentlichungen wird ein zusätzlicher hydrostatischer Spannungszustand



erkannt, der die Versagensgrenze zu größeren Formänderungen verschiebt und somit die Prozessgrenzen erweitert. Der Rollfalzprozess zeichnet sich demnach durch die Überlagerung des reinen Plane-strain-Dehnungs-Zustands durch einen überlagerten isobaren Spannungszustand aus. Bei beiden Falztechnologien wird eine Verschiebung der Position des größten Dehnungsbetrags beim Fertigfalzen festgestellt. Während beim Maschinenfalzen das Dehnungsmaximum nach dem Fertigfalzen an der Polstelle auftritt, befindet es sich beim Rollfalzen noch in der Nähe des Radiusansatzes, wo es sich bereits nach dem Vorfalzen befunden hat. Die in experimentellen und simulativen Untersuchungen festgestellten Dehnungsmaxima an der Falzschlaufe sind beim Roll- und Maschinenfalzen identisch. [THU08; ZUB14]

### 2.4.2 Einflussgrößen auf die dimensionalen Eigenschaften von Falzen

Die finalen geometrischen Eigenschaften eines gefalzten Bauteils sind das Produkt aus allen Umformoperationen der Einzelteile, deren Rückfederung nach dem Umformen, dem Bauteilbeschnitt sowie dem Fügen und der Rückfederung der gefügten Komponente. Diese Eigenschaften lassen sich in globale und lokale Anteile auftrennen. Die Qualitätsaspekte bei der Einzelteilfertigung sind beispielsweise in [FAA09; MOR11] dargelegt. Die Wechselwirkungen der Einzelteilfertigung und der Fügeprozesse im Karosseriebau zeigen [ECK12A; KÄS13].

In dieser Arbeit liegt der Fokus einzig auf den lokalen Eigenschaften der Falzschlaufe die nachfolgend für Maschinenfalz- und Rollfalzvorgänge getrennt betrachtet werden. Diese lokalen Qualitätseigenschaften umfassen: Rückfederung des Flanschs, Einfallstellen, Ausbeulung, Falzverlust und Falzradius (vgl. Abbildung 2-23).

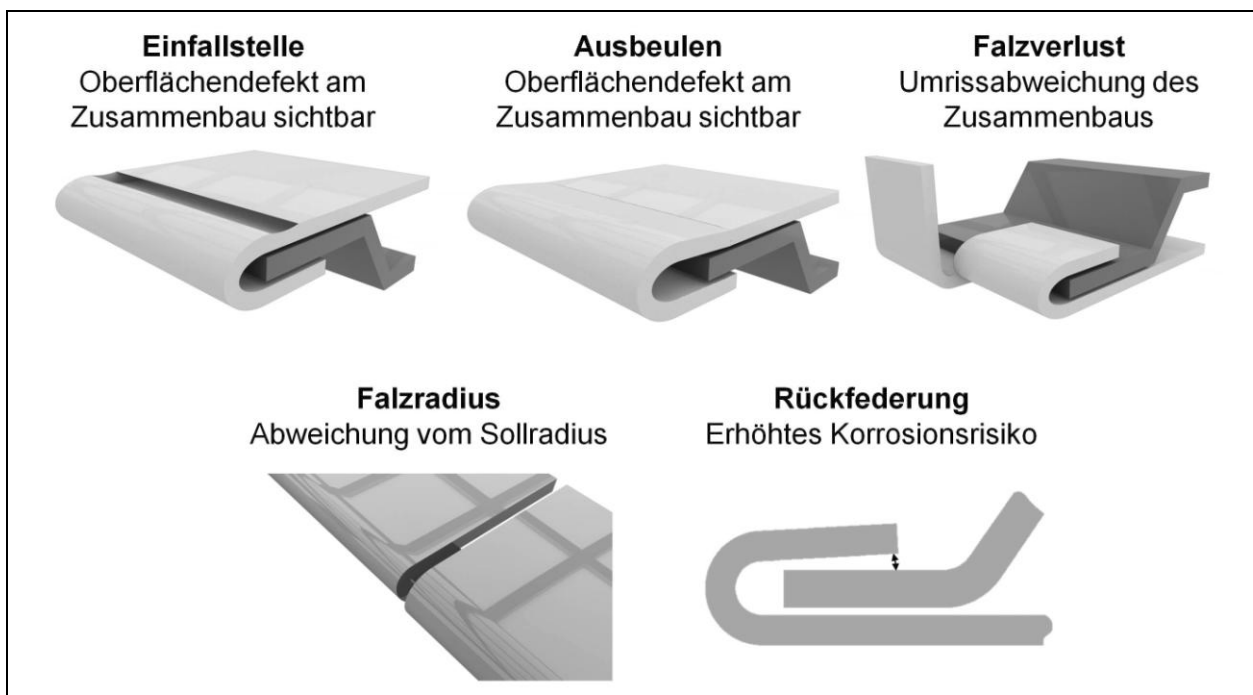


Abbildung 2-23 Fehlergrößen beim Falzen von Aluminiumblechwerkstoffen

Die Größe des Falzradius von Karosserieanbauteilen wird im Radien- und Fugenplan des Fahrzeugs festgelegt (vgl. [BRA07]). Der Falzradius beeinflusst dabei einerseits die Größe der Fuge andererseits wird ein gleichmäßiger, harmonischer Radienverlauf entlang des Bauteils für eine hochwertige Anmutung angestrebt.

### **Rückfederung beim Falzen**

Die Rückfederung des Flanschs führt zu einem Offenstehen der Falzschlaufe. Dies ist primär für die auf den Karosserierohbau folgenden Prozessschritte der KTL-Vorbehandlung (Reinigung, Spülung) und der Nahtabdichtung (Verbesserung der Korrosionsbeständigkeit der Beschnittkante des Außenblechs) wichtig. Überschreitet die Flanschöffnung ein definiertes Qualitätsmaß kann während KTL und den Reinigungsprozessen eine Auswaschung des Falzklebstoffs auftreten. Gleichzeitig können große Flanschöffnungen nicht prozesssicher mit einer Nahtabdichtung versehen werden, wodurch ein erhöhtes Korrosionsrisiko entsteht. [MAU11] Die Einflussgrößen (z. B. Vorbeanspruchung, Abstellradius) sowie Kompensationsmöglichkeiten werden in [KRA06; LIN07; LIV03; SIE93] beschrieben.

### **Einfallstellen und Ausbeulung**

Die Anforderungen an die Oberflächenqualität von Karosserieanbauteile sind in den vergangenen Jahren kontinuierlich angestiegen. Eine makellos lackierbare Oberfläche ohne manuelle Nacharbeit ist heute eine übliche Anforderung an alle sichtbaren Blechformteile und Anbauteile. Einfallstellen und Ausbeulungen in der Nähe der Falzschlaufe stellen Oberflächen-defekte dar, die die hochwertige Anmutung des Bauteils beeinträchtigen.

Das Auftreten von Einfallstellen auf der Außenseite der Falzschlaufe beim Vor- und Fertigfalzen ist auf plastische Rückbiegung im gestrakten Bauteilbereich zurückzuführen. Die Ursachen hierfür sind große Abstellradien, vergleichsweise kleine Vorfalzwinkel, eine hohe Fertigfalzkraft und horizontale Schubbewegungen während des Falzens infolge der Backengeometrie. Die Einfallstellen weisen typischerweise eine relative Tiefe zwischen 10 bis 200 µm auf (vgl. [HIS86; LIV00; NII86; ZHA01]).

Das Ausbeulen des Außenblechs tritt stets zwischen Radiusansatzlinie am Strak und dem durch das Innenblech festgespannten Bereich auf. Die Ursache der Beulenbildung liegt in der lokalen Werkstoffverfestigung am Biegeradius und der Rückfederung des Außenblechs nach dem Fertigfalzen. Bauteile mit konkaven Umrissen und großen Abstellradien zeigen eine höhere Neigung zum Ausbeulen als Bauteile mit geraden oder konvexen Umrissen. [LIV00; LIV02; ZHA00]

### Umrissverlust

Der Bauteilumriss kann sich während des Falzens infolge der Biegung des Flanschs und der Veränderung des Abstell- bzw. Falzradius ändern. Es ist sowohl eine Verkleinerung als auch eine Vergrößerung möglich. Die Verkleinerung des Bauteilumrisses wird als „Falzverlust“ (engl.: roll-in) bezeichnet. Dieser Umrissverlust wird durch die sog. „Falzvorlage“ bereits während der Bauteilentwicklung kompensiert. Dabei wird der Bauteilstrak des Außenteils um eine Vorlage verlängert, um nach dem Falzen ein i.O. Bauteil zu erhalten. Ein schlecht kompensierter Falzverlust führt zu schwankenden bzw. zu großen Fugenmaßen. [EIS10]

Ein um 90° abgestellter Bauteilflansch erfährt während des Falzens eine Falzkraft, deren Wirkrichtung maßgeblich durch die Flanschstellung und die Werkzeuggeometrie (Maschinenfalzen) oder die räumliche Position der Falzrolle (Rollfalzen) bestimmt wird. Die Falzkraft enthält sowohl eine normal zum Falzbett, als auch eine orthogonal dazu, wirkende Komponente, welche die Biegung des Flanschs verursacht. Die am oberen Ende des Flanschs angreifende Kraft bewirkt ein Moment, das in der Nähe des Abstellradius seinen größten Wert annimmt. Da der Werkstoff an dieser Stelle bereits stark durch vorhergehende Umformschritte (z. B. Flanschabstellen) verfestigt ist, wird am abgestellten Radius ein höheres Biegemoment zur plastischen Formänderung benötigt als in den unmittelbar angrenzenden, weniger verfestigten Bereichen. Die plastische Formänderung tritt demzufolge zunächst an einer anderen Stelle als beim Abstellen auf, wodurch es während des Vor- und Fertigfalzens zu einem Umrissverlust oder einer Umrissvergrößerung kommt.

In einer simulativen Studie zum Rollfalzen einer Aluminiumlegierung (AA 6014) untersuchte Eisele Einflussgrößen auf die Größe des Falzverlustes. Vor allem die Vordehnung des Außenteils und die Krümmung des Bauteilumrisses zeigten einen großen Effekt. Die Nennblechdicke und der Abstellradius, sowie die Lage des Innenteils wurden ebenfalls als signifikante Einflussgrößen identifiziert. [EIS12] Einflussgrößen auf die Größe des Falzverlusts zeigten auch [DEB02; ESP07; SIG03; SVE01; SVE10; ZHA03]. Neben diesen technologischen Einflussgrößen haben auch die fertigungstechnischen Rahmenbedingungen einen Einfluss auf den Umriss des gefalzten Bauteils. So kommt es beim Rollfalzen infolge der Gegenkraft beim Biegen des Flanschs zu einer Abweichung der Falzbahn des elastischen Falzroboters von der programmierten Sollbahn. Zur exakten Auslegung von serientauglichen Rollfalzbahnen wird die Elastizität des Rollfalzroboters vorab in Metamodellen abgebildet und bereits bei der simulativen Bahnauslegung kompensiert. [BAR14; EIS12; HEC14]

## Falzradius

Einflussgrößen auf den Falzradius beim Rollfalzen sind aus [EIS12] bekannt. Darin werden die Nennblechdicke des Außenteils sowie der Abstellradius als Haupteinflussfaktoren genannt. Sowohl große Abstellradien als auch große Nennblechdicken führen zu vergleichsweise großen Falzradien. Als sekundäre Einflussgrößen sind die Lage des Innenteils und die Vordehnung des Außenteils beschrieben. Beim Maschinenfalzen identifizierte Denninger [DEN14] die Vordehnung des Außenteils sowie die Position des Falzwerkzeugs während des Vorfalzens als signifikante Einflussparameter, während der Abstellradius einen vergleichsweise geringen Einfluss auf den Radius der Falzschleife hat.

Die dimensionale Ausprägung des Falzradius wird neben der geometrischen Randbedingung des Packmaßes maßgeblich durch die Vorbeanspruchung des Außenblechs und den Abstellradius bestimmt. [DEN14; LIV02]

## 2.5 Ermittlung des Forschungsbedarfs

Die Entwicklung des PKW-Marktes ist von der steigenden Produktderivatisierung, den stagnierenden oder sinkenden Absatzzahlen in den großen Absatzmärkten, der zunehmenden technischen Angleichung der Produkte verschiedener Hersteller und Marken sowie der Verkürzung der Produktentwicklungszeiten geprägt. Die Attraktivität eines Fahrzeuges im Sinne der Erzeugung eines Kaufreizes wird demzufolge heute noch stärker über das Markenimage, den individuellen Mehrwert des Fahrzeugs und die Markenbotschaften bestimmt. Diese Faktoren werden maßgeblich durch das Fahrzeugdesign der Außenhaut geprägt. Neben den Fahrzeugproportionen sowie den proportionsgebenden Designkanten auf der Außenhaut zählen dabei die Fugen zwischen zwei benachbarten Anbauteilen zu den wesentlichen Merkmalen des Fahrzeugdesigns. Die dimensionale Ausführung von Falzschleifen, welche die Karosseriefugen begrenzen, umfasst somit nicht nur fertigungstechnische Aspekte.

Im ersten Teil des hier dargestellten Stands der Erkenntnisse wird die Beziehung Mensch/Produkt durch eine Wirkkette aus Wahrnehmung – Erkennung – Verhalten beschrieben. Die Wahrnehmung beruht auf physikalischen und physiologischen Gesetzmäßigkeiten. Ihre elementaren Aspekte sind aus theoretischen und medizinischen Studien bekannt. Die Erkennung von konkreten Inhalten und Anmutungen, die zeitlich nach der Wahrnehmung stattfindet, basiert auf psychologischen und soziologischen Abläufen. Diese Mechanismen sind Gegenstand aktueller Forschungsvorhaben und werden durch vereinfachte Modelle beschrieben (z. B. Gestaltheuristiken). Das Gefallensurteil des Menschen wird durch die analoge Erkennung von Anmutungsqualitäten bestimmt. Die Anmutung bezeichnet dabei die erste, unreflektierte und emotionale Wirkung, die ein Objekt hervorruft (vgl. [SEE14]). Ein anmutungshaft gestaltetes

Produkt besitzt demnach neben seinen funktionalen Eigenschaften auch Anmutungseigenschaften, die den Käufer „positiv“ ansprechen sollen. Ein Beispiel hierfür ist die Gestaltung von Verpackungen (vgl. [SEE13]). Ein Produkt mit hoher Anmutungsqualität ruft eine vom Designer beabsichtigte Wirkung bzw. Anmutung beim Kunden hervor. Die Erkennung der Anmutungsqualitäten von einfachen Begrenzungsverläufen und die Wirkung von Objektproportionen (horizontale und vertikale Erstreckungen) wurden in [DÖR76; SCH76; SEE13; UNG86] betrachtet. Eine Untersuchung der Anmutung verschiedener dimensionaler Ausführungen von Fugen und Falzverbindungen an Karosserieanbauteilen wurde noch nicht durchgeführt.

Der zweite Teil des Stands der Erkenntnisse führt die fertigungstechnischen Anforderungen der rissfreien Herstellung von Falzschlaufen von Türen und Klappen aus Aluminium im modernen Karosseriebau auf. Beim Biegen von Aluminiumwerkstoffen zeigt sich eine starke Dehnungslokalisierung an der Biegekante bzw. der Falzkante, die zunächst zu einer Aufrauung der Oberfläche und bei weiterer Beanspruchung zum Versagen des Blechwerkstoffs führt (vgl. [AKE78]). Die Biegebeanspruchung kann durch zahlreiche phänomenologisch ermittelte Versagenskriterien quantifiziert werden (Kap. 2.3.4). Beim Falzen werden generell die Fertigungsverfahren Rollfalzen und Maschinenfalzen unterschieden. Die Verfahren weisen Unterschiede im Hinblick auf die eingesetzten Technologien und den Prozessablauf auf. Beide Fertigungsverfahren werden im vorliegenden Stand der Technik in experimentellen und simulativen Untersuchungen hinsichtlich der auftretenden Biegebeanspruchung des Blechwerkstoffs betrachtet (Kap. 2.4). Die Biegebeanspruchungen werden dabei mit unterschiedlichen Methoden (z. B. qualitative Begutachtung von Oberflächen gefalzter Bauteilkanten oder Ermittlung von Formänderungsbeträgen) bestimmt und verschiedenen Bewertungsansätzen beurteilt. Eine einheitliche Betrachtung aller relevanten Einflussgrößen des gesamten Falzprozesses (Maschinen- als auch Rollfalzen) auf Basis gemessener, quantitativ ermittelter Formänderungen liegt derzeit noch nicht vor und bildet den Anspruch dieser Arbeit.

Basierend auf der Literaturrecherche zu den Themengebieten der Anmutungsqualität von Falzschlaufen und deren quantitativer Bewertung sowie zur Auslegung von Falzprozessen unter Berücksichtigung der Biegebeanspruchung wird folgender Forschungsbedarf festgestellt:

- ◆ Zur Beschreibung der Anmutung von industriellen Massenprodukten sind grundlegende Zusammenhänge zwischen der Formgestaltung und den beim Kunden hervorgerufenen Empfindungen bekannt. Eine detaillierte Betrachtung von Falzschlaufen und Karosriefugen unter diesem Gesichtspunkt wurde noch nicht durchgeführt.
- ◆ Ein Kennwert zur Beschreibung der Anmutung von Karosriefugen ist nicht bekannt.

- ◆ Die Anmutung von Karosseriefugen ergibt sich nach dem Stand der Technik aus deren Wahrnehmung und Erkennung durch den Betrachter, die wiederum von zahlreichen, in ihrem Effekt auf die Anmutung bisher nicht quantifizierten Einflussgrößen abhängt. Hierzu zählen:
  - ◆ der Einfluss von Umgebungsbedingungen (z. B. Ausleuchtung, Blickwinkel)
  - ◆ der Einfluss von gestalterischen Maßnahmen (z. B. Bauteilradien)
  - ◆ der Einfluss von fertigungstechnischen Aspekten (z. B. Bauteilversatz)auf die Anmutung von Falzschlaufen und Karosseriefugen.
- ◆ Bei der Auslegung der Prozesskette zur Herstellung von Karosserieanbauteilen sind aus dem Stand der Technik zwei Anforderungen bekannt. Einerseits sollen die dimensionalen Vorgaben, welche die Anmutung bestimmen, umgesetzt werden. Andererseits sind die Prozesse hinsichtlich des Werkstoffversagens auszulegen. Die Einflussgrößen auf beide Anforderungen wurden bisher nicht umfassend und einheitlich untersucht.
- ◆ Zu den Einflussgrößen auf die dimensionalen Eigenschaften und die Biegebeanspruchung von Falzschlaufen zählen:
  - ◆ Werkstoffparameter (z. B. Legierungstyp)
  - ◆ Einzelteilparameter (z. B. Abstellradius)
  - ◆ Konstruktionsparameter (z. B. Nennblechdicke)
  - ◆ Falzgeometrie
  - ◆ Zusammenbauparameter (z. B. Positionierung des Innenteils)

Diese Einflussgrößen sollen sowohl für Maschinenfalzprozesse als auch für Rollfalzprozesse im weiteren Verlauf dieser Arbeit untersucht werden.

### **3 MOTIVATION UND ZIELSETZUNG DIESER ARBEIT**

#### *MOTIVATION AND OBJECTIVE OF THIS THESIS*

Die technischen Anforderungen an Fahrzeuge sind aufgrund von legislativen und sicherheitstechnischen Richtlinien in den vergangenen Jahren stetig angestiegen. Im selben Zeitraum hat sich der Fahrzeugmarkt zu einem Markt mit umfassender Angebotsvielfalt entwickelt. In dieser komplexen Anforderungswelt stellen die Positionierung von Fahrzeugmarken und die Bereitstellung eines individuellen Mehrwerts (z. B. Geltungsnutzen) einen wesentlichen Faktor für die Kundenbegeisterung und den Fahrzeugabsatz dar. Die Außenhaut stellt dabei aufgrund ihres Flächenanteils am Gesamtfahrzeug und der Möglichkeit, Eigenschaften des Produkts nach außen zu kommunizieren, ein einzigartiges gestalterisches Mittel zur Produktemotionalisierung dar. Nicht nur die Gestalt der Außenhaut (Blechbauteile), sondern auch die Karosseriefugen gehen dabei in die Wahrnehmung des Kunden ein. Während der Entwicklung des Fahrzeugs, der Auslegung von Anlagen und Werkzeugen für Anbauteile sowie deren Inbetriebnahme besteht dabei ein Zielkonflikt zwischen der bestmöglichen Anmutung des herzustellenden Bauteils und der fertigungstechnischen Verarbeitbarkeit der festgelegten Werkstoffe. Dieser Zielkonflikt wird nachfolgend erläutert.

Die Anmutung von Fahrzeugen stellt im globalen Wettbewerb der Fahrzeughersteller einen wesentlichen Faktor zur Differenzierung von Marken dar. Dabei wird der Begriff „Anmutung“ inflationär verwendet, ohne ihn in der heutigen Praxis exakt zu definieren. Bei der Auslegung von Karosseriefugen wird im allgemeinen Sprachgebrauch von wissenschaftlichen Veröffentlichungen und journalistischen Beiträgen davon ausgegangen, dass kleine Bauteil- und Falzradien zu einer verbesserten Anmutung führen. Diese kleinen Radien führen zu hohen Zugspannungen in der Außenfaser der Biegung, die bei Überschreiten des werkstofflichen Grenzwerts zur Bildung von Rissen und bei weiterer Beanspruchung zum vollständigen Versagen der Falzschlaufe führen.

Während bei konventionellen Stahlgütern für die Fahrzeugaußenhaut die Rissbildung auf der Außenseite des Falzes kaum auftritt, ist bei Verwendung von Aluminiumwerkstoffen die Herstellbarkeit des Bauteils diesbezüglich erschwert. Dies ist auf die reduzierte Biegebarkeit von Aluminiumblechwerkstoffen und die größeren Nennblechdicken zurückzuführen, die zur Erzielung derselben Beul- und Steifigkeitseigenschaften wie bei vergleichbaren Stahlteilen heute notwendig sind. Im Allgemeinen führen vornehmlich die Zugspannungen auf der Außenfaser zum Versagen des Werkstoffs. Zur Reduktion dieser Spannungen und zur Sicherstellung der Herstellbarkeit des Bauteils werden größere Falzradien verwendet. Diese verhältnismäßig großen Radien reduzieren jedoch die Anmutung des Karosserieanbauteils.

Anhand dieser Problemstellung wird deutlich, dass bei der exakten Auslegung von Falzschlaufen aus Aluminium beide Aspekte ausreichend berücksichtigt werden müssen. Ein geeignetes Modell mit hoher Prognosegüte beachtet sowohl die technologischen Aspekte der Herstellbarkeit als auch die subjektiven Aspekte der Wahrnehmung und führt diese zusammen. Das Modell stellt somit einen Zusammenhang zwischen der Falztechnologie und der Anmutungsqualität der Falzschlaufe bzw. dem Empfinden durch den Menschen her. Die beiden Teilaspekte werden dabei gleichermaßen berücksichtigt.

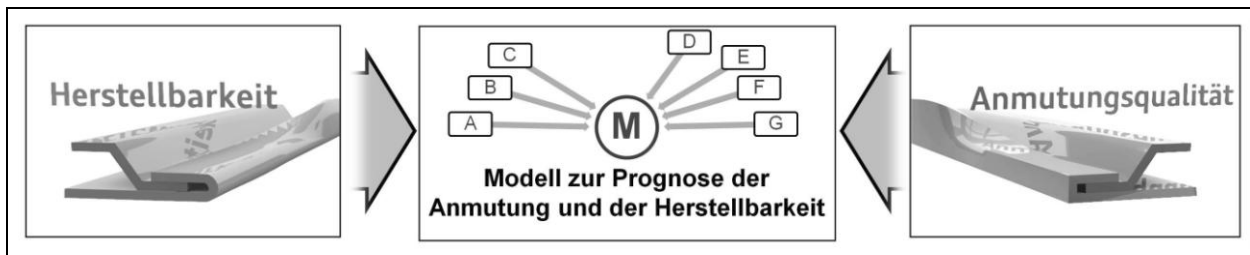


Abbildung 3-1 Synthese der beiden Zielgrößen „Herstellbarkeit“ und „Anmutungsqualität“ bei der Auslegung von Falzschlaufen in einem gemeinsamen Prognosemodell

Die Zielsetzung dieser Arbeit ist die Entwicklung eines prinzipiellen Modells zur Prognose der Anmutung und der Herstellbarkeit von Falzschlaufen. Dieses Modell besteht aus zwei Teilmodellen, die ihrerseits die Anmutungsqualität bzw. die Herstellbarkeit von Falzschlaufen in Abhängigkeit von bekannten Eingangsgrößen (z. B. Falztechnologie, Nennblechdicke des Werkstoffs) beschreiben. Das Prognosemodell fasst beide Teilmodelle zusammen und ermöglicht die Vorhersage der erzielbaren Anmutungsqualität des Falzes und der Beanspruchung des Blechwerkstoffs.

Das Prognosemodell ermöglicht eine frühe Machbarkeitsanalyse von Falzschlaufen an Karosserieanbauteil während der Fahrzeugentwicklung. Hierzu werden die Anforderung an die Anmutungsqualität aus den Konstruktionsdaten bzw. dem Fahrzeuglastenheft (z. B. Bauteilradius) entnommen und mit technologischen Informationen aus Referenzprojekten (z. B. Falztechnologie) ergänzt. In einem weiteren Anwendungsfall wird während einer späteren Phase der Fahrzeugentwicklung die Detailauslegung bzw. die Optimierung des Falzprozesses ermöglicht. Auf Basis von Simulationsergebnissen des Außenteils wird die erzielbare Anmutung ermittelt. Bei Nichterreichen der Sollvorgaben wird der Fertigungsprozess weiter optimiert (z. B. Anpassung der Ziehmethode). Zuletzt wird auch die nachträgliche Anpassung eines bereits umgesetzten Falzprozesses (z. B. Produktaufwertung) hinsichtlich des Optimierungspotentials bewertet. Die Optimierung kann dabei sowohl die Anmutungsqualität als auch die Prozesssicherheit gegen Versagen betreffen. In beiden Fällen wird eine Ist-Analyse des Fertigungsprozesses durchgeführt und als Datengrundlage für das Prognosemodell verwendet.



## 4 MODELLHERLEITUNG UND METHODIKEN ZUR MODELLVALIDIERUNG

### *MODEL DERIVATION AND METHOD OF MODEL VALIDATION*

In Kap. 3 wurde der Zielkonflikt zwischen einer Schlaufenauslegung mit geringer Werkstoffbeanspruchung (d. h. große Falzradien) und der Herstellung von Karosserieanbauteilen mit hoher Anmutungsqualität (d. h. kleine Falzradien) aufgezeigt. Aus diesem Zielkonflikt ergibt sich die Notwendigkeit eines zuverlässigen Modells zur Auslegung von Falzprozessen für Falzschlaufen mit hoher Anmutungsqualität bei gleichzeitiger Berücksichtigung der werkstofflichen Prozessgrenzen. In diesem Abschnitt werden der prinzipielle Aufbau dieses Modelles dargestellt sowie die hierfür benötigten Teilmodelle, Methoden und Modelleingangs- bzw. Modellausgangsgrößen beschrieben.

#### 4.1 Entwicklung eines prinzipiellen Modells zur Prognose der Anmutung und der Herstellbarkeit von Falzschlaufen

Das Falzbewertungsdiagramm (engl: Hemming Quality Diagram, kurz: HQD) stellt eine kausale Verknüpfung zwischen der Anmutungsqualität einer herzustellenden Falzschlaufe und den dabei auftretenden werkstofflichen Beanspruchungen her. Somit kann die technologische Herstellbarkeit einer anmutungshaften Falzschlaufe bewertet werden. Zur Veranschaulichung kann das Modell als mehrdimensionales Diagramm dargestellt werden (vgl. Abbildung 4-1). In dem abgebildeten Fall führt die geforderte Anmutung der Schlaufe sowie das gewählte Fertigungskonzept bzw. die gewählte Kombination von Prozessparametern zu einer kritischen Biegebeanspruchung (Punkt V1). Zur Reduktion der Biegebeanspruchung mit dem Ziel die Herstellbarkeit der Falzschlaufe sicherzustellen, wird hier eine Kombination von zwei prinzipiellen Lösungswegen gewählt. Zum einen wird die Anforderung an die Anmutung der Schlaufe reduziert, dies führt zu einer ersten Reduktion der Biegebeanspruchung. Im weiteren Verlauf wird der Herstellprozess durch gezielte Anpassung der Prozessparameter (z. B. Abstellradius am Bauteil) so verändert, dass eine weitere Reduktion der Werkstoffbeanspruchung erreicht wird. Am Ende der Optimierung (Punkt V2) steht eine Falzverbindung mit leicht reduzierter Anmutung und deutlich reduzierter Beanspruchung. Für die Gestaltung des Fertigungsprozesses werden dann die entsprechenden Prozessparameter ausgewählt.

Zur Erzeugung des Prognosemodells werden zwei zunächst unabhängige Teilmodelle für Anmutung und Herstellbarkeit von Falzschlaufen benötigt. Diese Teilmodelle werden dann mithilfe mindestens eines verknüpfenden, den Teilmodellen gemeinsamen Parameters miteinander verbunden. Hierbei liefert das Teilmodell A die Biegebeanspruchung der Falzschlaufe in Abhängigkeit von allgemeinen Bauteil- und Prozessparametern sowie die aus

den Prozessparametern und der Falztechnologie resultierenden geometrischen Eigenschaften der Falzschlaufe. Innerhalb des Teilmodells A werden Effekte aufgezeigt und deren Einfluss auf die Biegebeanspruchung quantifiziert. Hierbei werden bewusst gewählte Prozessgrößen (z. B. Abstellradius am Einzelteil) oder feststehenden Randbedingungen (z. B. Werkstoff) von prozessualen Streuungen und Ungenauigkeiten im Fertigungsprozess getrennt. Die Robustheit des Fertigungsprozesses (z. B. nach [BOX88] ) wird nicht betrachtet.

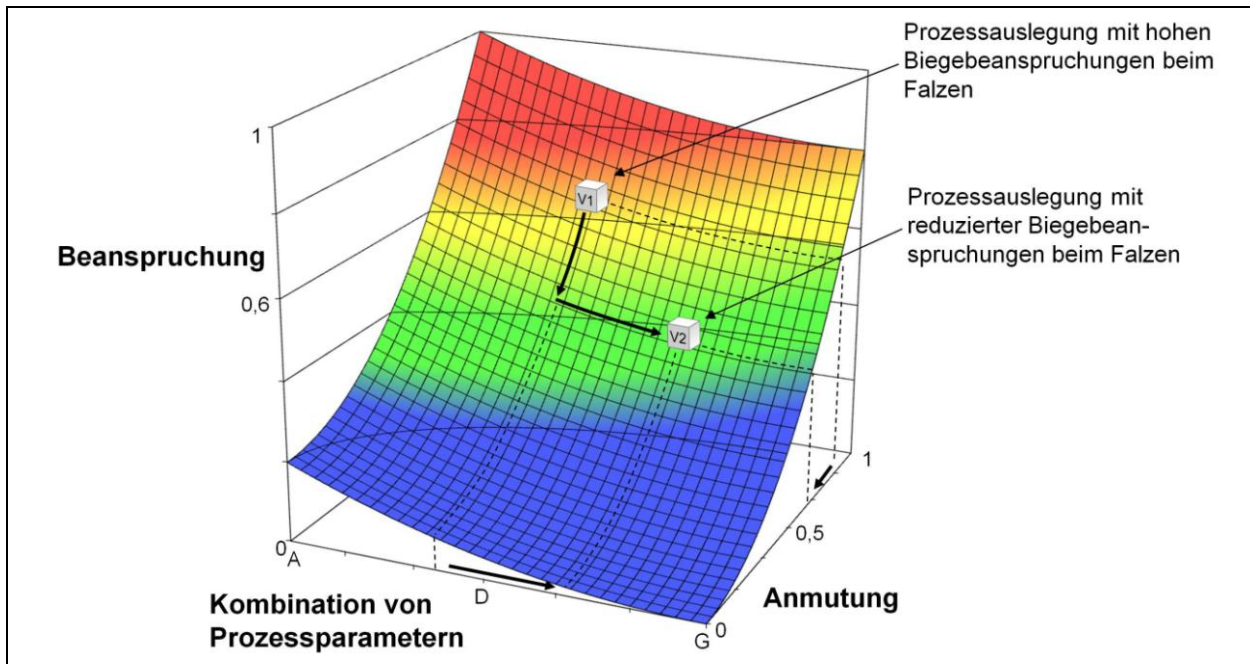


Abbildung 4-1 Prinzipielles Modell zur Prognose von Biegebeanspruchung beim Falzen und der Anmutungsqualität der entstehenden Falzschlaufe in Abhängigkeit der Prozessparameter

Das Teilmodell B beinhaltet den Zusammenhang zwischen der wahrgenommenen Anmutungsqualität der Falzverbindung und deren geometrischen Ausführung. Das Modell ist somit auch als eigenständiges Modell zur Beschreibung bzw. Bewertung der Anmutungsqualität von Falzverbindungen verwendbar.

## 4.2 Aufbau des Teilmodells zur Beschreibung der Herstellbarkeit von Falzschlaufen

Das Teilmodell zur Beschreibung der Herstellbarkeit von Falzschlaufen aus Aluminium stellt eine empirische Funktion dar. Diese leitet aus der experimentellen Analyse des Falzens ein mathematisches Modell zur Prognose der Biegebeanspruchung sowie der geometrischen Eigenschaften der hergestellten Falzschlaufe ab. Als Eingangsgrößen in das Modell werden technologische, prozessuale und werkstoffliche Größen gewählt. Hierzu zählen: Abstellradius, Vordehnung, Werkstoffgüte und Falztechnologie. Die Biegebeanspruchung und die geometrische Form des Falzes stellen die Ausgangsgröße des Modells dar (vgl. Abbildung 4-2). Das Prognosemodell wird mithilfe von experimentellen Daten kalibriert.

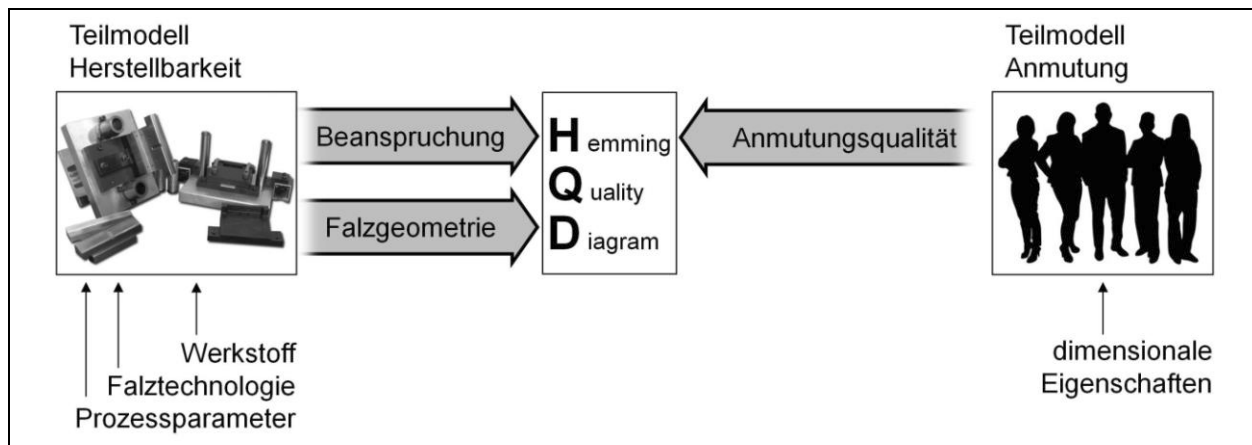


Abbildung 4-2 Aufbau des Hemming Quality Diagramm aus den Teilmodellen „Herstellbarkeit“ und „Anmutungsqualität“

Für die Kalibrierung des Modells A wird der Herstellprozess von Falzschlaufen aus Aluminium in einem Laborversuch nachgebildet. Für die Versuche werden technologische Prüfvorrichtungen zum Roll- und Maschinenfalzen eingesetzt. Durch die gezielte Variation der Eingangsgrößen und die detaillierte Messung der resultierenden Biegebeanspruchung bzw. der Falzgeometrie können zunächst Effekte aufgezeigt und bewertet werden. Im Anschluss werden mathematische Funktionen zur Beschreibung der Biegebeanspruchung beim Falzen bzw. der Falzgeometrie in Abhängigkeit der Prozessparameter durch mathematische Regression der Versuchsergebnisse bestimmt. Die Funktion  $f_{\text{Herstellbarkeit}}$  nach Gleichung 4-1 beschreibt das Teilmodell mathematisch.

$$f_{\text{Herstellbarkeit}} : f(\text{Falztechnologie}, \text{Werkstoff}, \text{Prozessparameter}, \dots) \quad \text{Gleichung 4-1}$$

Das Teilmodell A besteht dabei aus zwei Subfunktionen, die ihrerseits die Biegebeanspruchung und die Falzgeometrie prognostizieren. Die beim Falzen auftretende Biegebeanspruchung wird durch den ersten Teil des Teilmodells A beschrieben. Es entspricht im Allgemeinen einer Funktion nach Gleichung 4-3. Der zweite Teil stellt die Falzgeometrie in Abhängigkeit der Prozessparameter dar (vgl. Gleichung 4-4.)

$$f_{\text{Herstellbarkeit}} : \{f_{\text{Biegebeanspruchung}}; f_{\text{Falzgeometrie}}\} \quad \text{Gleichung 4-2}$$

$$f_{\text{Biegebeanspruchung}} : f(\text{Falztechnologie}, \text{Werkstoff}, \text{Prozessparameter}, \dots) \quad \text{Gleichung 4-3}$$

$$f_{\text{Falzgeometrie}} : f(\text{Falztechnologie}, \text{Werkstoff}, \text{Prozessparameter}, \dots) \quad \text{Gleichung 4-4}$$

Die Probenpräparation, die Versuchsaufbauten für das Roll- und Maschinenfalzen, die Werkstoffe und die Auswertemethodik zu den experimentellen Untersuchungen sind in Kap. 5 dargestellt. Dort werden auch die Erkenntnisse aus den Versuchen zusammengefasst. Im

Rahmen dieser Arbeit werden dabei die folgenden wissenschaftlichen Fragestellungen und Thesen bearbeitet:

- ◆ Welche Faktoren innerhalb der Prozesskette beeinflussen die Oberflächenqualität bzw. die Biegebeanspruchung an der Falzschlaufe maßgeblich?
- ◆ Welche Faktoren beeinflussen die Herstellbarkeit von Falzschlaufen beim Maschinen- und Rollfalzen von Aluminiumwerkstoffen?
- ◆ Wie entwickelt sich die Biegebeanspruchung beim Maschinen-/Rollfalzen im Prozess?
- ◆ Welche Faktoren beeinflussen die dimensionale Ausführung der Falzkante beim Maschinen- und Rollfalzen von Aluminiumwerkstoffen?
- ◆ Wie entwickelt sich die Falzgeometrie beim Maschinen-/Rollfalzen im Prozess?
- ◆ Lassen sich durch die gezielte Steuerung von Prozessparametern die Grenzen der rissfreien Herstellbarkeit von Falzschlaufen erweitern?

### 4.3 Aufbau des Teilmodells zur Beschreibung der Anmutung von Falzschlaufen

Das Teilmodell zur Beschreibung der Anmutungsqualität von Falzschlaufen aus Aluminium stellt ein empirisches Modell dar. Anhand von Untersuchungen zum Zusammenhang zwischen Anmutungsqualität und Falzgeometrie wird ein mathematisches Modell gebildet. Die Eingangsgrößen in das Modell sind die geometrischen Merkmale von Falzschlaufen sowie die Umgebungsbedingungen (z. B. Lichtverhältnisse). Die von diesen Merkmalen hervorgerufenen Anmutungsqualitäten sind die Ausgangsgrößen des Modells (vgl. Abbildung 4-2). Das Teilmodell wird mithilfe von Daten aus einer statistischen Erhebung justiert.

Für den Justiervorgang wird eine repräsentative Erhebung zur Wahrnehmung von Falzschlaufen durchgeführt. Hierfür wird ein Fragebogen erstellt bzw. eine Online-Umfrage durchgeführt. Es werden Probandengruppen verschiedene Schlaufenausführungen vorgelegt und deren Einschätzung zur Anmutungsqualität erfasst. Hierdurch lassen sich Einflussgrößen auf die Wahrnehmung der Anmutungsqualität bestimmen und quantifizieren. Anschließend wird die Anmutungsqualität als Funktion der dimensionalen Schlaufenausführung beschrieben (vgl. Gleichung 4-5).

$$f_{\text{Anmutungsqualität}} : f(\text{dim. Schlaufeneigenschaften, Umgebung, ...})$$

Gleichung 4-5

Die Systematik der Erhebung sowie die daraus gewonnenen Erkenntnisse sind in Kap. 6 ausgeführt. Im Teilgebiet der Anmutung von Karosseriefugen werden im Rahmen der Untersuchungen dieser Arbeit die folgenden wissenschaftlichen Fragestellungen und Thesen behandelt:

- 
- ◆ Wie kann die Wahrnehmbarkeit von Fugendetails messtechnisch erfasst werden?
  - ◆ Wie kann die Anmutung einer Karosseriefuge objektiv bestimmt werden?
  - ◆ Welche Faktoren beeinflussen die Wahrnehmung bzw. Anmutung von Karosseriefugen?
  - ◆ Lässt sich die Anmutungsqualität in Form einer skalaren Größe als Kennwert angeben?

## 5 ERGEBNISSE ZUR HERSTELLUNG VON FALZSCHLAUFEN

### MANUFACTURING OF HEMMING ROPES

Im Rahmen dieser Arbeit wird die Produktion von Anbauteilen in vier aufeinander aufbauenden Teilgebieten betrachtet. Die Prozesskette wird in die Teilgebiete

- ◆ Werkstoffauswahl während der Produktentwicklung,
- ◆ Bauteilkonstruktion und technologische Fertigungsplanung,
- ◆ Auslegung der Einzelteile und
- ◆ Auslegung des Zusammenbauprozesses (Schachteln, Vor- und Fertigfalzen)

unterteilt. Jeder dieser Prozessschritte beeinflusst unmittelbar oder mittelbar die Qualität der herzustellenden Falzschlaufe. Im Folgenden werden die Prozessschritte hinsichtlich der Qualitätsanforderungen an Falzschlaufen betrachtet. Hierzu zählen die Werkstoffbeanspruchung durch das Biegen und die Schlaufengeometrie im für den Kunden sichtbaren Bereich. Die in Abbildung 5-1 dargestellten Einflussfaktoren der einzelnen Prozessschritte werden nachfolgend gruppenweise im Hinblick auf deren Beitrag zu den Qualitätskriterien betrachtet. Dabei wird die Entwicklung jedes Qualitätsmerkmals innerhalb der Prozesskette zunächst allgemein beschrieben, danach folgt die präzisere Untersuchung der einzelnen Einflussfaktoren.

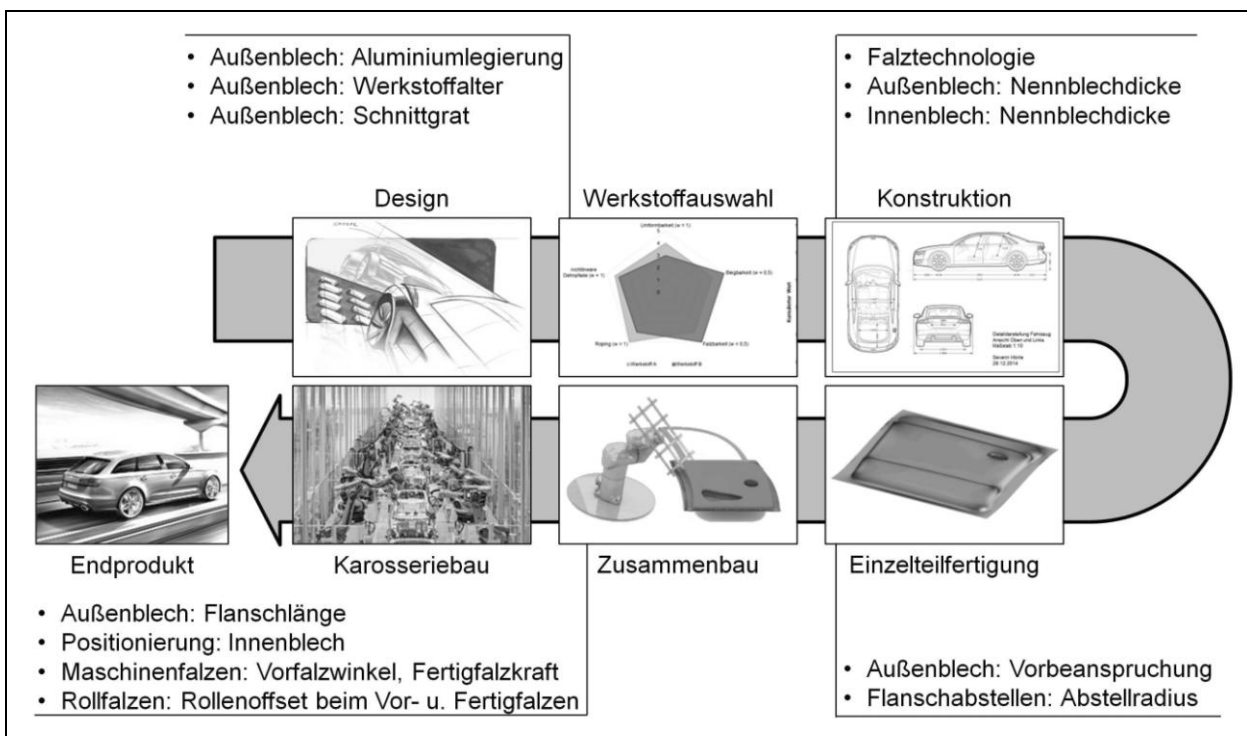


Abbildung 5-1 Darstellung der Prozesskette zur Herstellung von Premiumfahrzeugen mit Einflussfaktoren auf die Qualität der Falzschlaufe am Beispiel eines ZSB Fahrertür

## 5.1 Experimentelle Ermittlung der Biegebeanspruchung

Die Untersuchung der Herstellbarkeit von Falzschlaufen aus Aluminium erfolgt durch die experimentelle Abbildung des Fertigungsprozesses. Die verwendeten Werkstoffe, Versuchseinrichtungen und Analysemethoden werden in diesem Kapitel beschrieben.

### 5.1.1 Werkstoffauswahl und Probenpräparation für Biege- und Falzversuche

Im Rahmen dieser Arbeit wurden zwei unterschiedliche Aluminiumgüten (aushärtbare Al-Mg-Si-Legierungen) im Zustand T4 untersucht. Die Werkstoffe wurden beim Falzen sowohl als Innen- wie auch als Außenblech eingesetzt. Legierung 1 ist ein falzoptimierter Werkstoff, der sich durch gute Biegeeigenschaften auszeichnet. Legierung 2 bietet gute Eigenschaften für Tief- und Streckziehvorgänge.

Legierung 2 liegt in drei verschiedenen Nennblechdicken vor. Die Probenpräparation und die Versuchsdurchführung erfolgten innerhalb einer dreimonatigen Frist nach Anlieferung der Werkstoffe, um quasikonstante Werkstoffeigenschaften sicherzustellen. Die verwendeten Werkstoffgüten und Blechdicken entsprechen denen bekannter Blechwerkstoffe für Außenhautbauteile in dieser Festigkeitsklasse. In Tabelle 5-1 sind ihre mechanischen Eigenschaften entsprechend den Liefervereinbarungen dargestellt. Zusätzlich zu den mechanischen Eigenschaften wurde die chemische Zusammensetzung im Anlieferungszustand betrachtet (Tabelle 5-2).

Tabelle 5-1: Mechanische Werkstoffeigenschaften der verwendeten Aluminiumlegierungen (Liefervereinbarung)

Bezeichnung	$s_0$ [mm]	$R_{p0,2}$ [MPa]	$R_m$ [MPa]	$A_g$ [%]	$n$ [-]	$r_0$ [-]	$r_{45}$ [-]	$r_{90}$ [-]
Legierung 1	1,04	128 MPa	240	22	0,26	0,60	0,40	0,60
Legierung 2	1,04	128 MPa	245	24	0,28	0,60	0,50	0,60
Legierung 2	1,25	128 MPa	245	24	0,28	0,60	0,50	0,60
Legierung 2	1,50	128 MPa	245	24	0,28	0,60	0,50	0,60

Tabelle 5-2: Chemische Zusammensetzungen der Legierungen

Bezeichnung	Si [%]	Fe [%]	Cu [%]	Mn [%]	Cr [%]	Ni [%]	Zn [%]	Ti [%]
Legierung 1	1,150	0,225	0,043	0,090	0,422	0,013	0,006	0,017
Legierung 2	1,130	0,179	0,045	0,080	0,422	0,012	0,007	0,036

Die Proben für die Biege- und Falzversuche werden aus Formplatinen hergestellt. Dabei werden sowohl Proben im Anlieferungszustand als auch Proben mit simulierter Umformhistorie erzeugt. Diese Proben werden mit unterschiedlichen Vordehnungsbeträgen zur Simulation der Werkstoffbeanspruchung beim Tiefziehen hergestellt. Die im Rahmen dieser Arbeit eingesetzten

Prüfstände erfordern Proben mit unterschiedlichen Probenbreiten  $b_p$ . Die Proben wurden aus diesem Grund mit zwei Verfahren vorgedehnt.

Für die uniaxiale Vordehnung der Blechproben mit  $b_p = 60$  mm wurde eine Zugprüfmaschine der Firma Zwick (50 kN) eingesetzt. Die quasistatische Vordehnung erfolgte mit einer Dehnrates von 0,008 1/s, die Dehnung der Blechstreifen (Länge  $l_p = 250$  mm) wurde mit den Längsdehnungsaufnehmern (Prüflänge 80 mm) der Prüfmaschine gemessen. Die Sekundärproben für die Biege- und Falzversuche aus dem vorgedehnten Blechstreifen wurden innerhalb des homogenen Dehnungsbereiches (Abbildung 5-2), durch Scherschneiden entnommen. Probenzuschnitte mit  $b_p > 60$  mm wurden mithilfe des Hexagonal-Spannrahmens (Abbildung 5-3) auf einen definierten uniaxialen Dehnungszustand gedehnt. Die Werkzeugbewegung erfolgte weggesteuert. Die plastische Formänderung wurde dabei mithilfe der optischen Formänderungsanalyse gemessen. Die Sekundärproben wurden wiederum dem homogenen Dehnungsbereich des Blechstreifens entnommen.

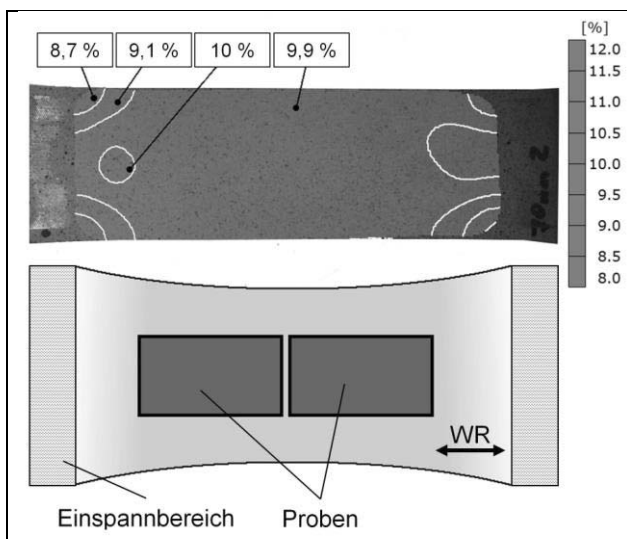


Abbildung 5-2  
Entnahmeposition der Sekundärproben aus dem vorgedehnten Blechstreifen (unten) und optisch gemessene Dehnungsverteilung auf der Probe (oben)

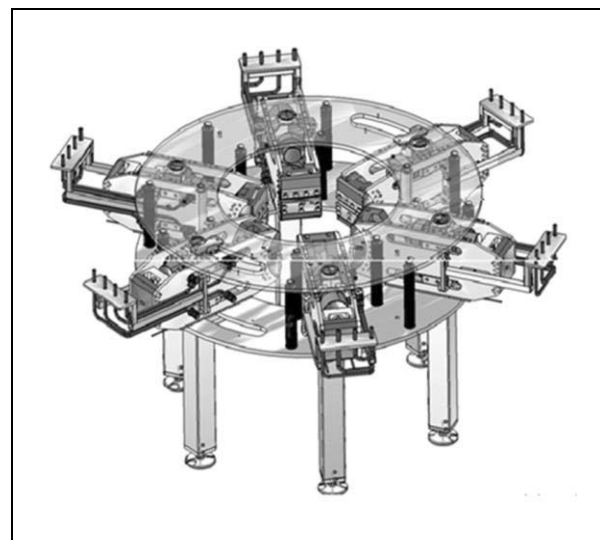


Abbildung 5-3  
Hexagonal-Spannrahmen zur uniaxialen Vordehnung von Proben [SCH10]

Zur Simulation der Werkstoffbeanspruchung beim Tiefziehen wurden Proben mit unterschiedlichen uniaxialen Beanspruchungen erzeugt. In Tabelle 5-3 sind die Vordehnungszustände und -verfahren für Legierung 1 exemplarisch dargestellt. Die Proben mit  $b_p = 60$  mm wurden zur Herstellung von Sekundärproben für die Plättchenbiegeversuche und die Maschinenfalzversuche benötigt. Die Sekundärproben für das Rollfalzen wurde aus Primärproben mit  $b_p = 100$  mm entnommen.



Tabelle 5-3: Uniaxiale Vordehnungszustände und -methoden für die Probenpräparation mit/ohne Umformhistorie

	Plastischer Vordehnungsbetrag $\varphi$							Vordehnungsmethode
	0 %	2 %	5 %	7 %	10 %	15 %	20 %	
$b_p = 60 \text{ mm}$	x		x		x	x	x	Zugprüfmaschine
$b_p = 100 \text{ mm}$	x	x	x	x	x			Hexagonal-Spannrahmen

### 5.1.2 Durchführung von Plättchenbiege- und Falzversuchen

Für die experimentelle Versuchsdurchführung wurden drei Prüfvorrichtungen benötigt. Die technologische Prüfung der Biegebarkeit der Blechwerkstoffe wurde mithilfe des Plättchenbiegens untersucht. Für die Abbildung der Prozesskette zur Herstellung von Karosserieanbauteilen wurden im Rahmen dieser Arbeit sowohl Maschinen- als auch Rollfalzeinrichtungen verwendet. Der konventionelle Herstellprozess wurde durch einen Laborversuch nachgebildet, der die Analyse der Proben im Hinblick auf die Biegebeanspruchungen und die Kontur ermöglicht, siehe Abbildung 5-4.

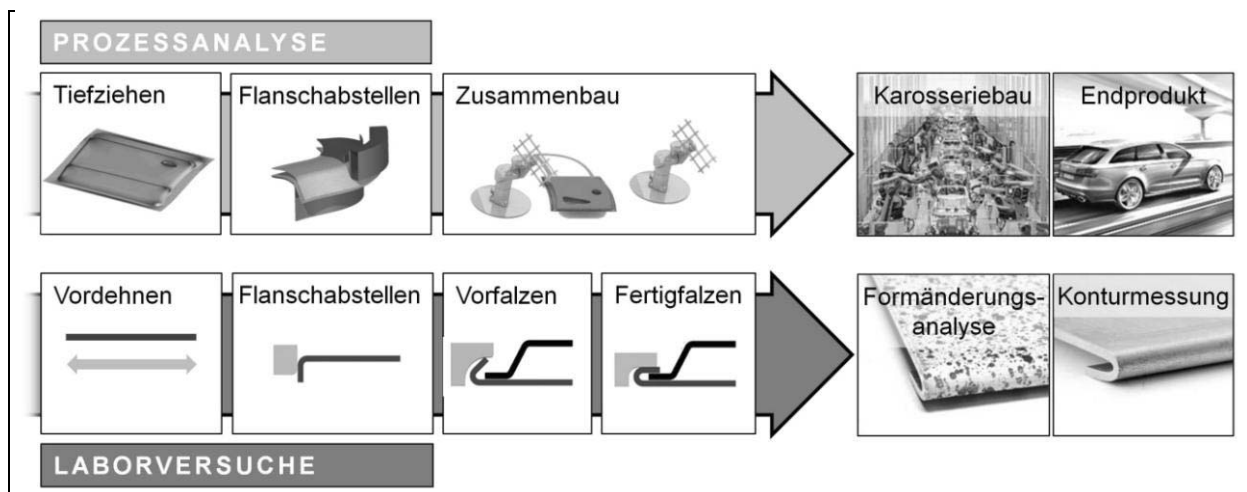


Abbildung 5-4 Nachbildung des Herstellprozesses für Karosserieanbauteile aus Aluminium (oben) durch einen vereinfachten Laborversuch (unten) mit anschließender Analyse der Proben hinsichtlich der Formänderungen und der Schlaufenkontur

### Plättchenbiegen

Zur Charakterisierung der Biegebarkeit der hier untersuchten Blechwerkstoffe wurde eine Versuchseinrichtung zum Plättchenbiegen verwendet, die in ihrem wesentlichen Aufbau einem 3-Punkt-Biegeversuch nach DIN EN 7438:2005 [DIN05B] entspricht. Die Biegeversuche wurden bei Raumtemperatur durchgeführt. Die Prüfeinrichtung war in eine konventionelle Druckprüfmaschine eingebaut, was die In-situ-Erfassung des Kraftbedarfs und des Stauchweges ermöglicht. Die Versuche wurden nach DIN EN 7438:2005 durchgeführt, dabei entspricht der Rollendurchmesser des Prüfwerkzeugs  $d_{Rolle} = 30 \text{ mm}$ . Der Abstand zwischen den Walzen betrug  $s_{Rolle} = 3,0 \text{ mm}$ . Die Bewertung der Biegebarkeit des geprüften Werkstoffs erfolgte durch

die Betrachtung des erzielten Biegewinkels bei der Rissentstehung oder durch die Bestimmung des Biegebewertungsfaktors mithilfe der optischen Formänderungsanalyse.

### **Maschinenfalzen**

Zur Untersuchung von Maschinenfalzprozessen stand im Rahmen dieser Arbeit eine Versuchsvorrichtung zum Abstellen, Vor- und Fertigfalzen von ungedehnten und vorgedehnten Blechproben zur Verfügung. Die Vorrichtung besteht aus einer oberen Werkzeugkomponente, die mit verschiedenen Abstellwerkzeugen, Vor- und Fertigfalzbacken ausgerüstet werden kann, und einer unteren Werkzeugkomponente, die das Falzbett und den Niederhalter trägt (Abbildung 5-5). Das modulare Werkzeug wird in eine Druckprüfmaschine eingebaut. So ist eine exakte, gesteuerte Bewegung der Komponenten möglich. Gleichzeitig können die Prozesskräfte und -bewegungen gemessen und dokumentiert werden. Die Vorrichtung zum Maschinenfalzen bildet die konventionelle Prozesskette beginnend beim Abstellen des Flanschs ab. Der vorangegangene Umformschritt des Tiefziehens wird durch uniaxiales Vordehnen der Proben simuliert. Dadurch ist es möglich, ebene Blechproben zu verwenden. Vor Beginn des Versuchs wurde die Blechprobe ( $l_p = 88 \text{ mm}$ ,  $b_p = 40 \text{ mm}$ ) auf dem Stempel der Versuchseinrichtung platziert und mithilfe von variablen Werkzeuganschlügen ausgerichtet. Die Fixierung erfolgte mit einem Niederhalter. Die Niederhalterkraft wurde durch eine Stellschraube aufgebracht. Die an der oberen Werkzeugkomponente montierte Abstellbacke bewegt sich während des Umformens vertikal nach unten. Während des Abstellens können Abstellradius, Flanschlänge, Abstellspalt, Abstellbackenradius und Flanschöffnungswinkel variiert werden. Nach dem Abstellen werden die Werkzeugeinsätze getauscht. Die abgestellte Blechprobe wird gemeinsam mit dem Innenblech auf dem Falzbett durch den Niederhalter fixiert. Durch die vertikale Bewegung der Vorfalzbacke wird die Probe vorgefalzt. Für den Fertigfalzvorgang wird die Falzbacke getauscht und die Probe fertiggefalzt.

Während des Vor- und Fertigfalzens sind zahlreiche Parameter des Prüfstands individuell anpassbar, was die Untersuchung unterschiedlicher Prozessrouten ermöglicht. Diese Parameter lassen sich in vier Kategorien einteilen: Werkstoff- und Einzelteilparameter sowie konstruktive Parameter der Schlaufenauslegung und des Zusammenbaus (Abbildung 5-1). Anhand dieser Einteilung werden sie getrennt betrachtet. Dies erlaubt die Abschätzung der Einzelbeiträge der Auslegungs- und Planungsschritte zur kumulierten Biegebeanspruchung beim Falzen sowie deren Beitrag zur Schlaufengeometrie.

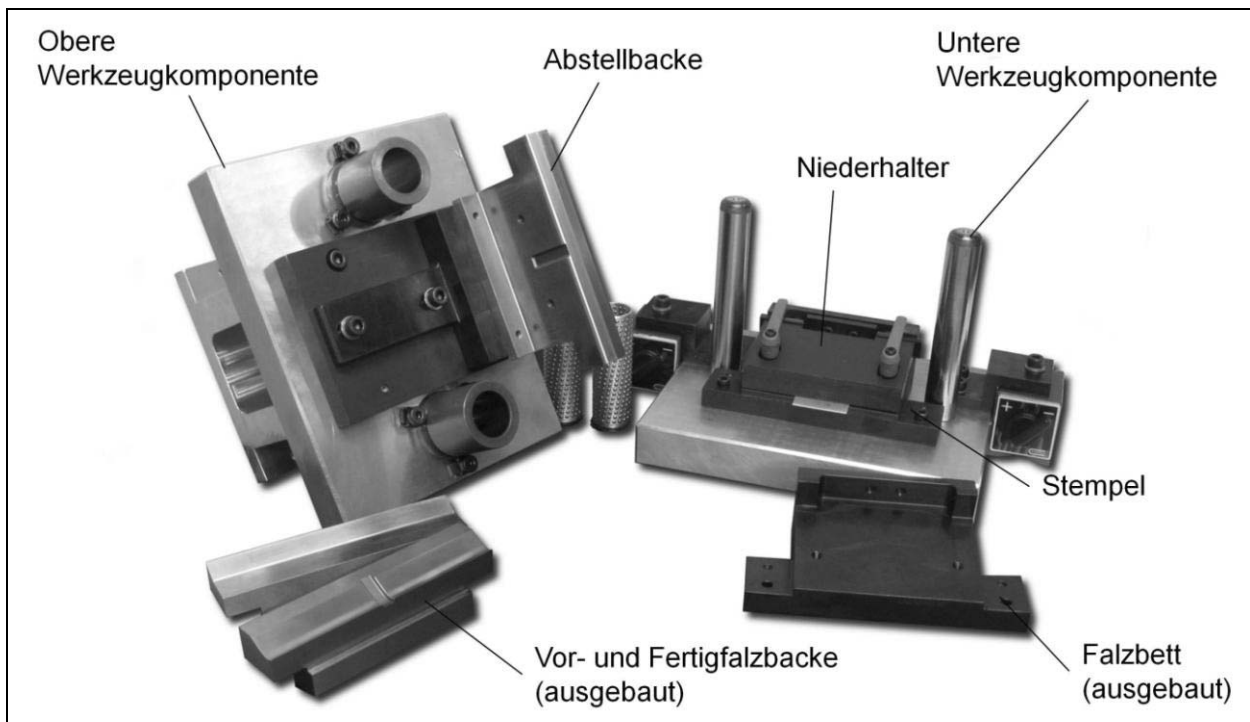


Abbildung 5-5 Versuchseinrichtung zum Maschinenfalzen von Aluminiumblechen

### Rollfalzen

Der Prüfstand zum Rollfalzen (Abbildung 5-6) besteht aus einem konventionellen Industrieroboter, dem daran montierten Rollfalzkopf und dem Falzbett mit Niederhalter. Der Prüfstand ist innerhalb einer Sicherheitsumhausung untergebracht. Das Falzbett ist auf einem im Hallenboden verschraubten Tisch in unmittelbarer Nähe des Industrieroboters befestigt. Roboter und Rollfalzkopf entsprechen in ihrer Ausführung gängigen Komponenten für die Serienfertigung. Das Falzbett und der Niederhalter entsprechen konstruktiv den Komponenten des Maschinenfalzprüfstands. Die Blechproben besitzen die doppelte Breite ( $b_p = 80 \text{ mm}$ ).

Der Rollfalzprüfstand bildet den Prozessablauf beginnend beim 1. Vorfalzen ab. Die Vorbeanspruchung der Proben dient wiederum der Simulation des Tiefziehens. Das Abstellen des Flanschs erfolgt im Prüfstand des Maschinenfalzens. Entsprechend der Vorrichtung zum Maschinenfalzen lassen sich in der nachgebildeten Prozesskette des Rollfalzens die Parameter des Einzelteils variieren. Zusätzlich können typische Rollfalzparameter betrachtet werden. Im Wesentlichen handelt es sich dabei um den Bahnoffset und den Zustellwinkel während der einzelnen Falzvorgänge.



Abbildung 5-6 Versuchseinrichtung zum Rollfalzen von Aluminiumblechproben

### 5.1.1 Methoden zur Versuchsauswertung

Die Auswertung der gefalzten Blechproben erfolgte hinsichtlich der Ausprägung der dimensionalen Eigenschaften und der Oberflächenrauheit an der gebogenen Falzkante. Zusätzlich wurden die Formänderungen im Bereich der Umformzone bewertet.

#### Messen von dimensionalen Merkmalen

Zum Messen von dimensionalen Merkmalen an den Probekörpern wurden zwei unterschiedliche Verfahren eingesetzt. Für das erste Verfahren erfolgt die zerstörende Prüfung (Abbildung 5-7) der gefalzten Proben. Hierzu werden aus den gebogenen Proben kleine Bereiche mittels einer Trennscheibe zum Nasstrennen herausgelöst. Die Trennflächen werden anschließend geschliffen und poliert. Die quantitative Auswertung erfolgt dann mithilfe von Lichtmikroskopie. Die Schliffbilder werden zunächst mithilfe eines Mikroskops mit integriertem Kamerasystem (Auflösung 5 Megapixel) digitalisiert. Durch die Anpassung der Beleuchtungsstärke und des Kontrastwerts sowie durch die Korrektur der Schwellwerte der Farbstufen werden Schwarz-Weiß-Bilder erzeugt, auf denen die Schnittfläche des Bauteils in Weiß wiedergegeben wird. Diese Schwarz-Weiß-Bilder werden mithilfe der Image Processing Toolbox des Softwarepakets Matlab R2014 b weiterverarbeitet. Die Kontur der Falzschleife wird durch den Übergang des Farbwerts von 1 = weiß zu 0 = schwarz automatisiert erkannt und kann zur Bestimmung der geometrischen Merkmale (z. B. Radius, Schlaufenlänge) verwendet werden. Die erzielbare Messauflösung liegt bei ca.  $d_{mat} = 0,01$  mm. Beim zweiten Verfahren wurden die Proben mit einem portablen Lichtschnittsensor der Firma Nextsense digitalisiert. Dieser digitalisiert die

Schlaufenkontur und speichert sie als Koordinatenpunkte ab. Die Auswertung der Schnitte erfolgt automatisiert im Messrechner. Für dieses Messsystem wird im Vorfeld die Reproduzierbarkeit und Genauigkeit der Messwerte bestimmt (vgl. Anhang - A).

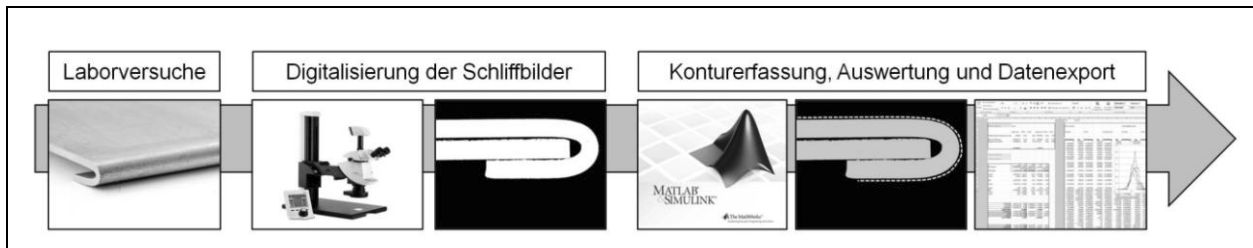


Abbildung 5-7 Digitalisierung von Falzschlaufen mithilfe der Lichtmikroskopie und anschließende automatisierte Bildverarbeitung zum Export der dimensional Kennwerte der Falzproben

### Bewertung von dimensional Eigenschaften

Die Außenkontur der sichtbaren Abschnitte der Falzschleife wird im Stand der Technik meist durch die Angabe eines Best-fit-Kreis mit dem Radius  $R_{MK}$  beschrieben. Im Rahmen eigener Voruntersuchungen wurde festgestellt, dass dieses Bewertungsverfahren die tatsächliche Außenkontur einer Falzschleife nur ungenau erfasst. Die Betrachtung der Abweichung zwischen approximiertem Falzradius (Best-fit mithilfe der Methode der kleinsten Fehlerquadrate) und realer Falzkontur zeigt, dass der Kreisradius vor allem zur Beschreibung der Schlaufenkontur nach dem Abstellen geeignet ist. Ursache hierfür ist das große Biegeverhältnis aus Abstellradius  $r_A$  und Nennblechdicke  $s_{0,A}$ . Mit fortschreitender Biegung beim Vor- und Fertigfalzens steigt die Abweichung an. Nach dem Fertigfalzen lässt sich die Kontur nur noch näherungsweise durch einen Kreis beschreiben, die Regression beträgt noch  $R^2 = 95\%$  (vgl. Abbildung 5-8). Die Detailbetrachtung zeigt große lokale Abweichungen an der Radiusansatzlinie und an der Bauteilumrisslinie der fertiggefalten Schleife. An diesen Stellen wird die Außenkontur durch einen Kreis unzureichend abgebildet.

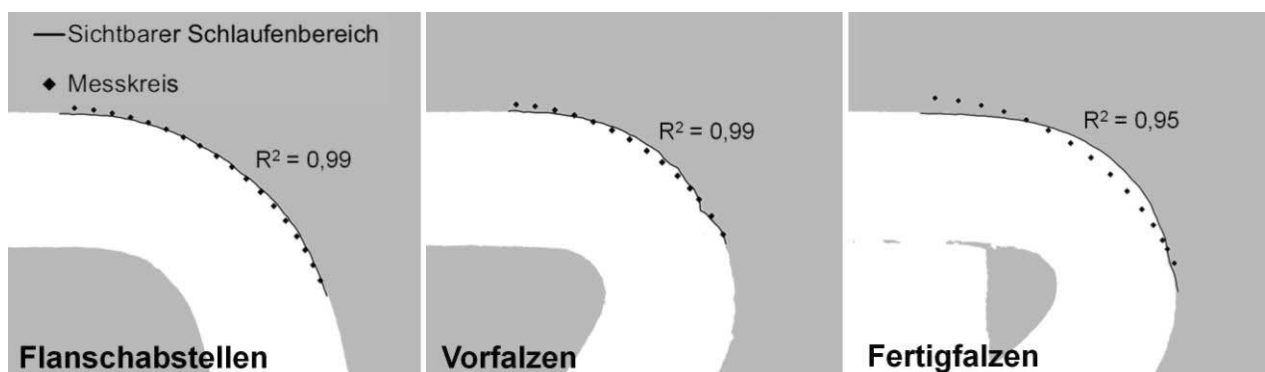


Abbildung 5-8 Bildliche Darstellung der Approximation der sichtbaren Schlaufenkontur durch einen Kreisradius nach dem Flanschabstellen, Vorfalzen und Fertigfalzen

Wird zusätzlich die lokale Krümmung der Außenkontur der Falzschleife mit der Krümmung des Best-Fit-Kreises verglichen zeigen sich noch größere Abweichungen. Beispielsweise bildet ein

Kreis der auf den sichtbaren Bereich der Schlaufe gefittet wurde die Krümmung des Falzes nur zu ca. 47% ab (vgl. Abbildung 5-9). Eine deutlich bessere Abbildung der realen Außenkontur gelingt durch das Fitten einer Ellipse. Die Übereinstimmung zwischen lokaler Ellipsenkrümmung und gemessener Krümmung an der Falzschlaufe beträgt ca. 97% (vgl. Abbildung 5-9).

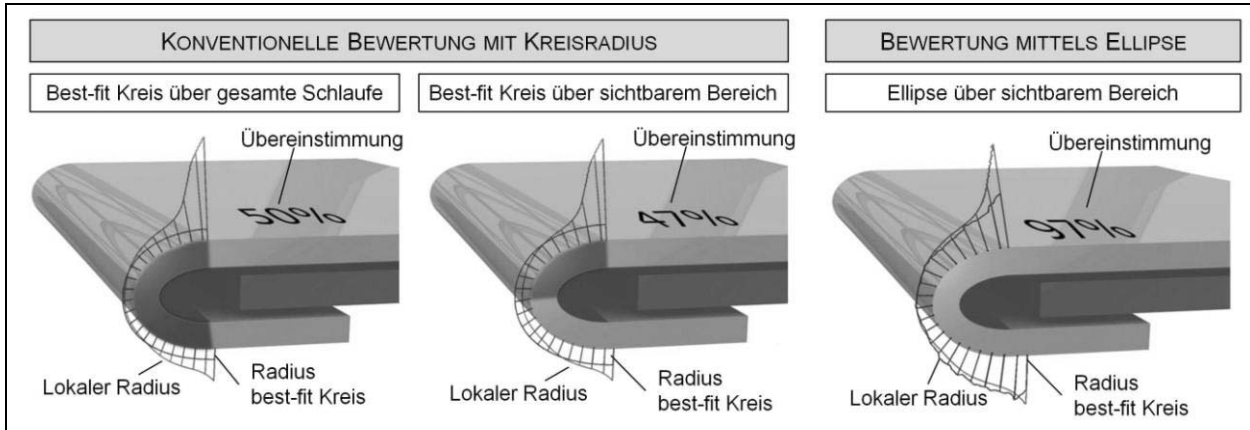


Abbildung 5-9 Bildliche Darstellung der Approximation der sichtbaren Schlaufenkontur durch einen Best-fit-Kreis basierend auf der gesamten Schlaufe (links), basierend auf dem sichtbaren Bereich (Mitte) und durch eine Ellipse (rechts)

Die verwendete Ellipse genügt im Allgemeinen der Form einer Ellipse in der 1. Hauptlage. Der sichtbare Schlaufenbereich wird durch das Viertel der Ellipse im 1. Quadranten des kartesischen Koordinatensystems ( $x \geq 0, y \geq 0$ ) beschrieben. Dabei stellt die 1. Hauptachse gleichzeitig die x-Achse dar. Die Ellipse besitzt als charakteristische Merkmale neben dem Mittelpunkt  $M(x_0 = 0, y_0 = 0)$  die große Halbachse und die kleine Halbachse, siehe Abbildung 5-10. Diese entsprechen den Bezeichnungen:

- ◆ Länge der kleinen Halbachse = sichtbare Schlaufentiefe (SST)
- ◆ Länge der großen Halbachse = sichtbare Schlaufenlänge (SSL)

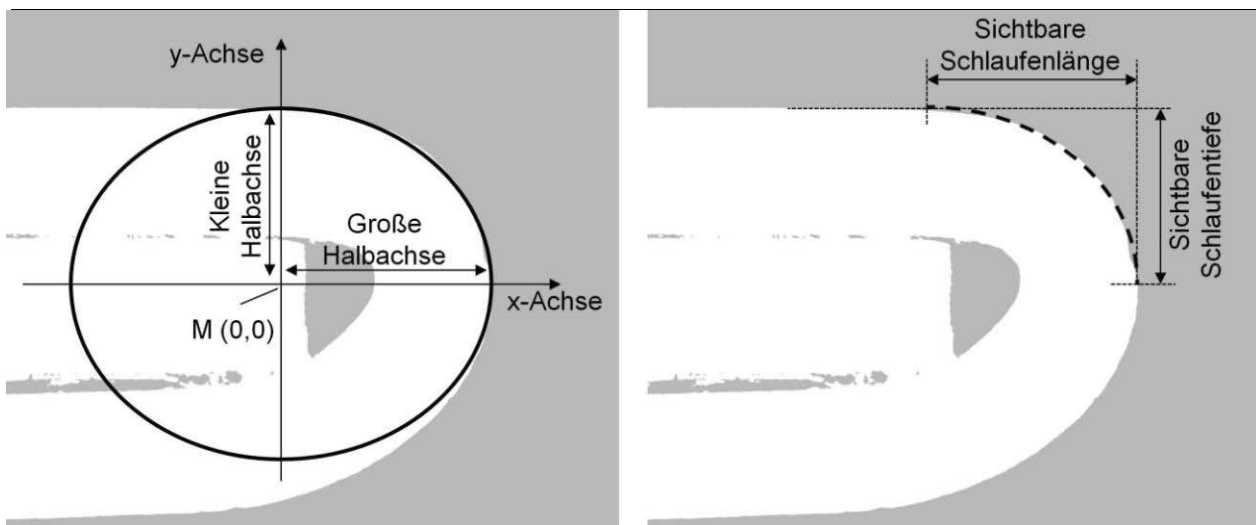


Abbildung 5-10 Darstellung des lokalen Koordinatensystems und der konturbeschreibenden Ellipse (links) sowie der charakteristischen Konturmerkmale im sichtbaren Bereich der Falzschlaufe (rechts)

In den folgenden Abschnitten werden daher zur Beschreibung der geometrischen Form die Kennwerte „sichtbare Schlaufentiefe“ und „sichtbare Schlaufenlänge“ verwendet.

### **Messen der Oberflächenqualität**

Für die Analyse der Oberflächentopografie der Proben wurde eine chromatisch-konfokale Abstandsmessungsvorrichtung der Firma FRT GmbH (Micro 300) verwendet. Die vertikale Messauflösung beträgt  $d_{vert} = 6$  nm. Bei der chromatischen Abstandsmessung wird ein Lichtstrahl auf der Oberfläche der Probe fokussiert. Das Streulicht von der Oberfläche wird durch ein Spektrometer detektiert und die lokale Höhe der Oberfläche durch das Auftreten einer charakteristischen Intensitätsspitze im Lichtspektrum berechnet. [GEV06] Auf jeder gebogenen Probe wurde ein  $l_{Schnitt} = 10$  mm langer Linienschnitt innerhalb der Formänderungszone gemessen. Zur Korrektur der Unebenheit beim Ausrichten und Messen der Probe wurde eine Best-fit-Gerade von den Messdaten subtrahiert. Auf Basis der korrigierten Messdaten wurde der primäre Oberflächenparameter  $R_a$  aus der gesamten Messlänge des gemessenen Probenabschnitts nach DIN EN ISO 4287:2010-07 [DIN10] bestimmt.

### **Messen von Formänderungen**

Die Beanspruchung beim Biegen wurde im Rahmen dieser Arbeit nach [DEN14] bestimmt und aus den größten lokalen Hauptformänderungen und der Breite der Formänderungszone berechnet. Beide Werte lassen sich durch die optische Formänderungsanalyse messtechnisch bestimmen. Zum Einsatz kam das Aramis-Messsystem 5M der Firma GOM mbH, das aus zwei hochauflösenden Kameras besteht, deren zueinander synchrone Bilder mithilfe der Fotogrammetrie weiterverarbeitet werden. Die zu prüfenden Blechproben werden mit einem stochastischen, kontrastreichen Sprühmuster versehen und der Referenzzustand erfasst. Dabei werden die Kamerabilder in Elemente unterteilt, die aufgrund des individuellen Grauwerts und Grauwertverlaufs innerhalb des Elements eindeutig sind. Während der Umformung der Probe wird das Muster auf der Oberfläche verzerrt. Auf Basis dieser Verzerrung werden vom Messsystem Punktverschiebungen und Dehnungen für jedes Element berechnet und auf der digitalisierten Probenoberfläche visualisiert (Abbildung 5-11). Die Messauflösung sowie die Größe des Messbereichs sind von den verwendeten Kameraobjektiven und der Positionierung der Probe innerhalb des Messfelds abhängig. So werden beispielsweise durch den Einsatz eines Objektivs mit einer Brennweite  $f = 50$  mm bei einer Biegeprobe über 30 Messpunkte in einem Querschnitt der Biegung erzeugt.

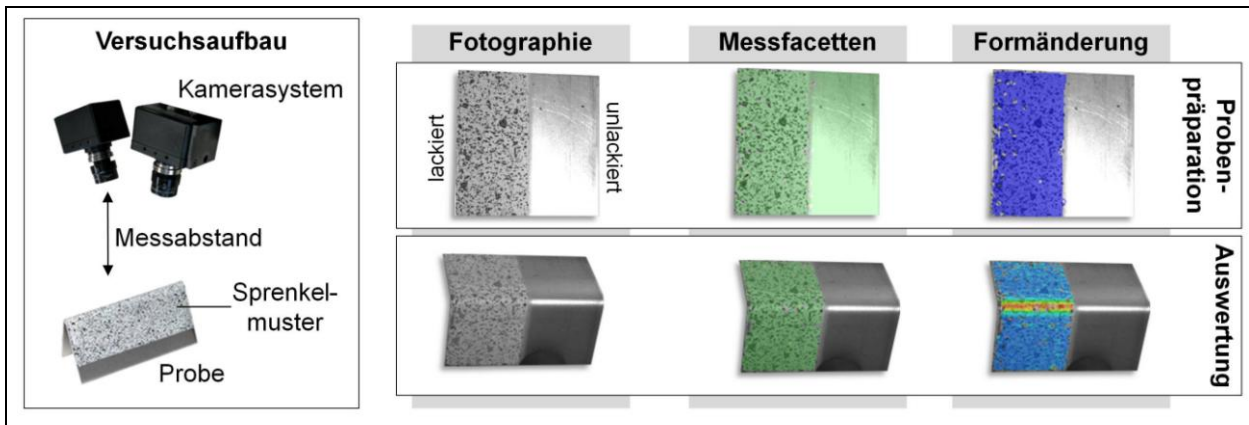


Abbildung 5-11 Messaufbau (links) und lackierte Probenkörper (rechts) zur Erfassung der Dehnungen an der Oberfläche mittels optischer Formänderungsanalyse

### Bewertung der Biegebeanspruchung

Die zur Bestimmung der Biegebeanspruchung benötigten Dehnungsbeträge stellen ausschließlich die durch das Biegen induzierten Formänderungen dar, das uniaxiale Vordehnen wurde nicht berücksichtigt. Die Erfassung der Formänderungen mithilfe der optischen Formänderungsanalyse begann somit erst beim Abstellen. In Abbildung 5-12 ist exemplarisch die gemessene Formänderung nach dem Umformen durch das Maschinenfalzen dargestellt. Während die Aufnahme der Formänderungen beim Abstellen und Vorfalzen aufgrund der verhältnismäßig kleinen Biegewinkel aus einer einzelnen Kameraposition möglich ist, werden beim Fertigfalzen zwei Aufnahmen benötigt. Auf diese Weise wird sichergestellt, dass die tatsächliche Position der maximalen Dehnung sowie die gesamte Formänderungszone erfasst werden. Zur weiteren Analyse werden virtuelle Linienschnitte orthogonal zur Biegeachse erstellt, die sowohl die Formänderungsbeträge als auch die Position jedes gemessenen Punktes auf der abgewickelten Länge des Linienschnitts enthalten.

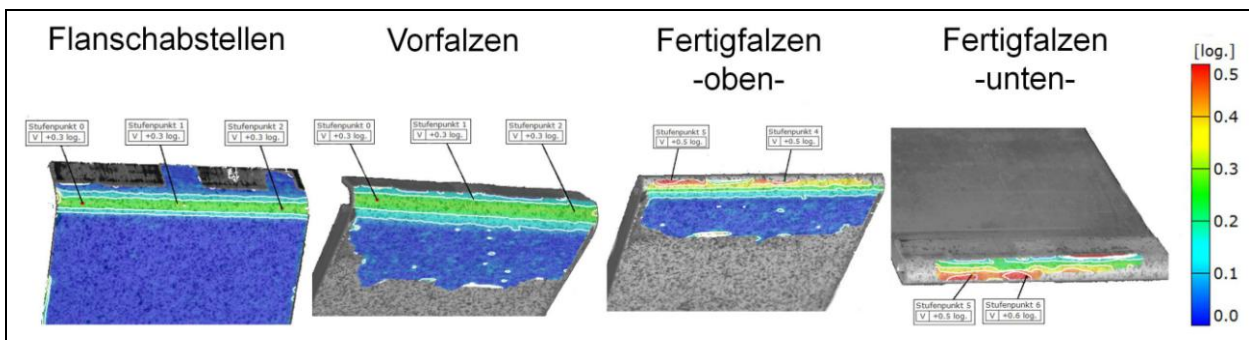


Abbildung 5-12 Darstellung der optisch gemessenen Formänderungen auf der Oberfläche von gefalzten Proben nach dem Abstellen, Vor- und Fertigfalzen



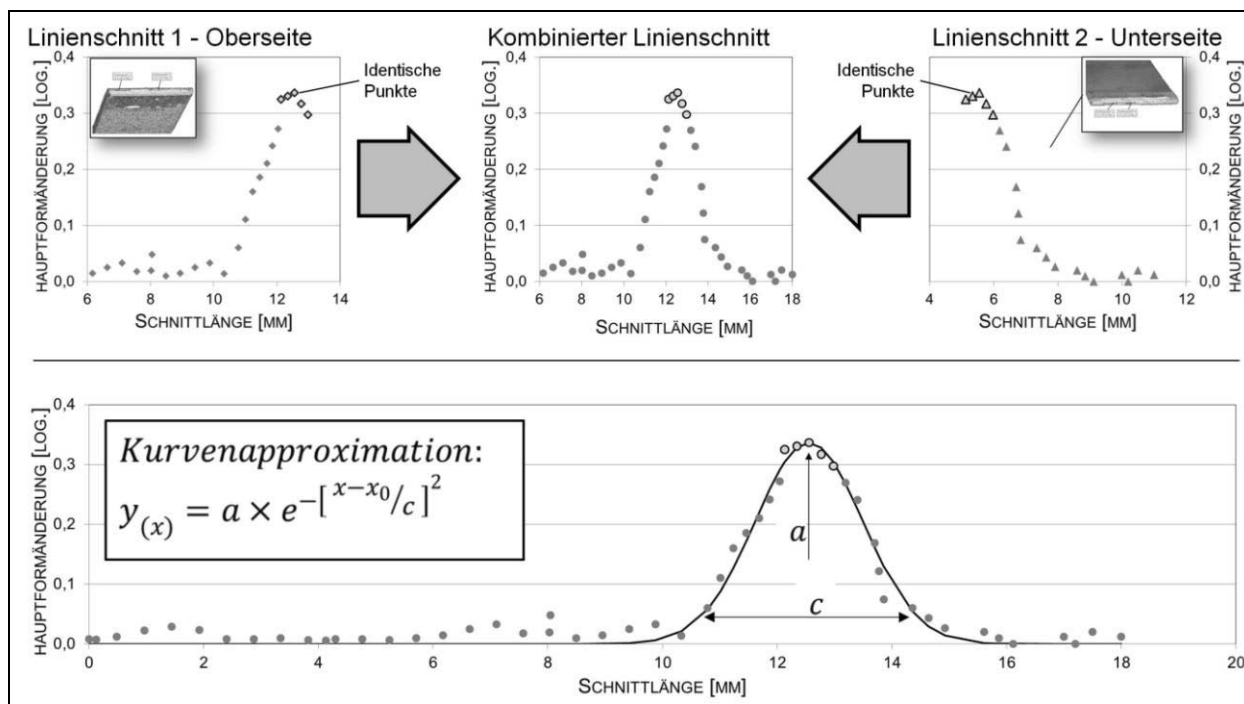


Abbildung 5-13 Bestimmung der Biegebeanspruchung einer gefalzten Probe durch Schnittmontage der Einzelschnitte von Vorder- und Rückseite zu einem virtuellen Gesamtschnitt

Die virtuellen Schnitte beim Abstellen und Vorfalzen, die aus einer Kameraposition aufgenommen werden, stellen einen kontinuierlichen Verlauf an Messwerten dar. Die Aufnahmen der Ober- und der Unterseite beim Fertigfalzen werden zunächst zu einem kontinuierlichen Verlauf zusammengeführt und dann analog zum Abstellen und Vorfalzen ausgewertet. Das Zusammenfügen der virtuellen Schnitte erfolgt nach dem in Abbildung 5-13 dargestellten Prinzip, bei dem die beiden Schnitte mithilfe gemeinsamer räumlicher Punkte zueinander ausgerichtet werden und anschließend aus den Abständen der einzelnen Messpunkte die neue Länge des Schnittes berechnet wird. Die Auswertung der Schnitte erfolgt automatisiert. Die glockenförmige Idealkurve wird mithilfe der Methode der kleinsten Fehlerquadrate auf die gemessenen, virtuellen Schnittlinien approximiert und die Breite der Formänderungszone  $c$  sowie die größte Formänderung  $a$  werden bestimmt.

## 5.2 Betrachtung der Prozesskette zur Herstellung von Fahrzeugen

Die Beanspruchung des Werkstoffs beim Falzen stellt nach Kap. 2.3 im Wesentlichen eine biegeinduzierte Beanspruchung dar. Diese Biegebeanspruchung wird vor allem während der Einzelteilherstellung und des Zusammenbaus der Baugruppe erzeugt. Die durch das Richten der Bleche im Presswerk, den Anbau der Baugruppen (ZSB) an die Rohkarosse und durch die thermischen Prozesse im KTL-Ofen erzeugten Biegebeanspruchungen werden in diesem Zusammenhang nicht betrachtet.

Im ersten Abschnitt dieses Kapitels wird die prozessuale Entwicklung der Oberflächenqualität, die nach Kap. 2.3 die Beanspruchung beim Biegen widerspiegelt, innerhalb der gesamten Prozesskette zur Herstellung von verkaufsfähigen Fahrzeugen betrachtet. Dies umfasst die Anlieferung des Halbzeugs, die Herstellung des Einzelteils, den Zusammenbauprozess sowie die Applikation der Korrosionsschutzbeschichtung und des Decklacks (Abbildung 5-14). Daran anschließend wird die Beanspruchung des Werkstoffs durch die Umformvorgänge in dieser Prozesskette untersucht.

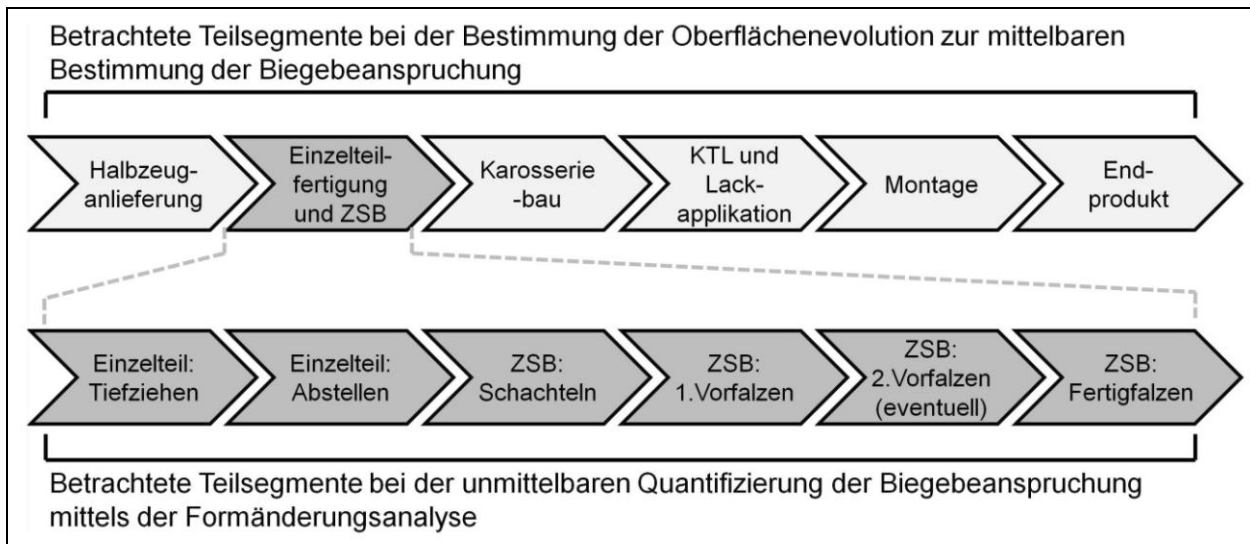


Abbildung 5-14 Darstellung der untersuchten Prozesskette und des Teilprozesses der Türen und Klappenfertigung [ALL13]

### 5.2.1 Betrachtung der Beanspruchungen bei der Herstellung von Anbauteilen

Aus dem Stand der Technik ist bekannt, dass die Oberflächenaufrauung beim Biegen lediglich einen qualitativen Rückschluss auf die Beanspruchung des Werkstoffs zulässt. In diesem Kapitel wird die Beanspruchung des Werkstoffs bei der Herstellung von Karosserieanbauteilen bis zur Lackapplikation betrachtet.

Der Referenzprozess, der die reale Fertigungskette in einem vereinfachten Laborversuch darstellen soll, wird hier exemplarisch für die Legierung 2 mit der Nennblechdicke  $s_0 = 1,25$  mm beschrieben. In einem ersten Schritt wurden Probenkörper erzeugt, welche die wesentlichen umformtechnischen Merkmale von Karosserieanbauteilen aufweisen. Hierzu zählen die Werkstoffeigenschaften einer heute gebräuchlichen Aluminiumlegierung für Außenhautbauteile, die Vorbeanspruchung analog zum Tiefziehen der Außenhaut sowie ein abgestellter (um  $90^\circ$  nach unten gebogenen) Flansch. Diese Proben wurden dann in einem zweiten Schritt in den Serienprozess der KTL-Beschichtung und der Lackapplikation eingeschleust. Somit bildet dieser Referenzprozess die Fertigungskette von der Platine bis zum fertiglackierten, verkaufsfähigen Fahrzeug ab. Der Referenzprozess war so gestaltet, dass zwischen jedem Prozessschritt einzelne

Proben entnommen und deren Oberflächenrauheit gemessen werden konnten. Zusätzlich wurde während der Erzeugung der Probenkörper die simulierte Tiefzieh- und Biegebelastung unterbrochen, um jeweils die Oberflächenrauheit in Zwischenschritten zu messen.

Das simulierte Tiefziehen der Proben erfolgte durch uniaxiales Vordehnen der ebenen Blechzuschnitte. Das Biegen der Proben erfolgte mithilfe des Plättchenbiegens. Für die Bestimmung der Oberflächenrauheit wurden die beschriebenen Messgeräte eingesetzt (vgl. Kap. 5.1). Im Folgenden wird die prozessuale Entwicklung der Oberflächenrauheit am Beispiel einer um 10 % uniaxial vorgedehnten Probe beschrieben, die bis zu einem Restschließwinkel von  $\alpha_{Rest} = 20^\circ$  weiter gebogen wurde. Die einzelnen Schritte der umformtechnischen Herstellung werden dabei zunächst einzeln betrachtet. Darauf aufbauend erfolgt die Betrachtung der gesamten Fertigungskette bis zum ZSB Tür bzw. ZSB Klappe.

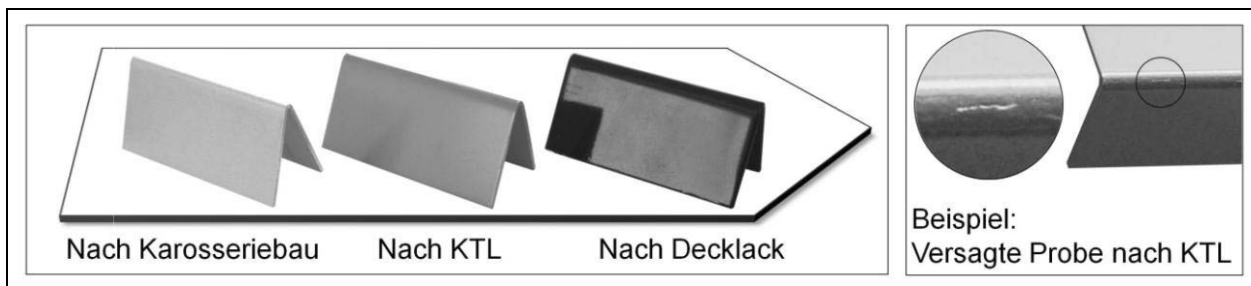


Abbildung 5-15 Biegeproben zur Untersuchung der Oberflächevolution im Lackprozess (links), Beispiel einer Biegeprobe mit Rissen nach KTL (rechts)

Die Blechproben wiesen zum Zeitpunkt der Anlieferung des Halbzeugs eine mittlere Oberflächenrauheit von  $R_a = 1,2 \mu\text{m}$  und damit eine für den Einsatz in der Automobilindustrie geeignete Oberflächenrauheit auf. Während des Vordehnens wurde ein Anstieg der Oberflächenrauheit festgestellt. Für die hier eingesetzte Legierung und den definierten Vordehnungszustand beträgt die gemittelte Oberflächenrauheit am Ende des Vordehnens  $R_a = 1,5 \mu\text{m}$ . Die Aufrauung der Oberfläche infolge von uniaxialer Dehnung ist bekannt, weshalb an dieser Stelle auf [BEC98; RAA03; ROT06; SAC04] verwiesen wird. Das anschließende Umbiegen der Bauteilkanten erfolgt mit einem Biegeradius von  $r_{St} = 0,4 \text{ mm}$  (stempelseitig). Der Versuch wurde dabei zu definierten Zeitpunkten unterbrochen, um die prozessuale Entwicklung der Oberflächenrauheit zu bestimmen. Die Auswertung der gemittelten Rauheit in Abhängigkeit von der plastischen Formänderung zeigt, dass das Biegen bzw. das Abstellen zu einer deutlichen Aufrauung der Oberfläche führt (Abbildung 5-16). Der Anstieg verhält sich linear zur Dehnung. Diese Erkenntnis deckt sich mit bekannten Untersuchungsergebnissen für andere Aluminiumwerkstoffe [LUC13; SAR04].

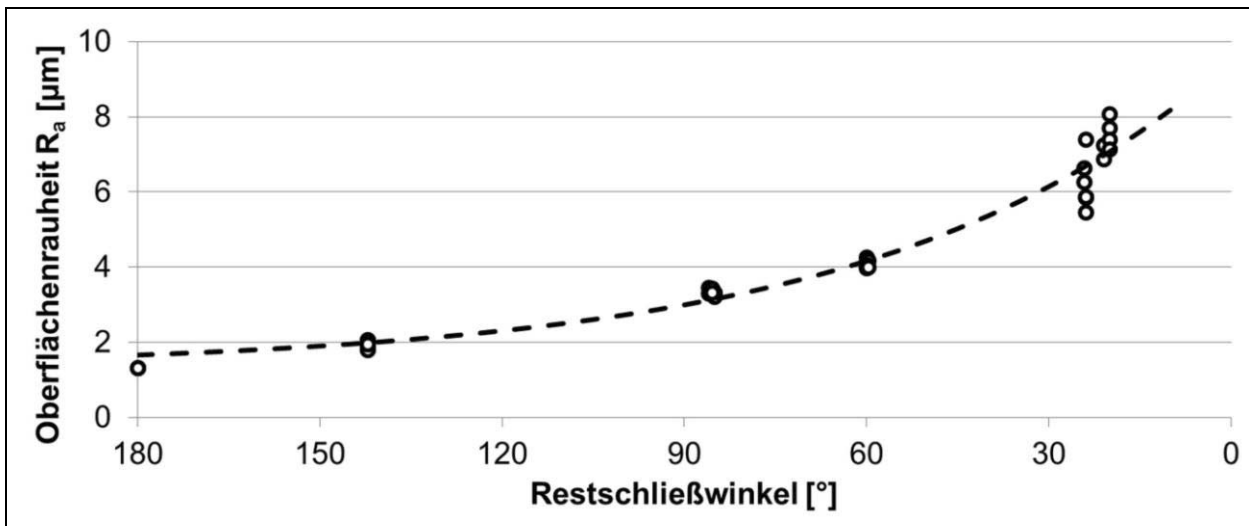


Abbildung 5-16 Entwicklung der Oberflächenrauheit in Abhängigkeit vom Restschließwinkel  $\alpha_{rest}$  beim Plättchenbiegen

Die gebogenen Blechproben durchliefen dann einen Serienprozess für KTL, Basis- und Decklack. Einzelne Proben wurden bereits nach KTL entnommen, um auch hier die Entwicklung der Oberflächenrauheit messen zu können. Die kombinierten Ergebnisse aus Lackapplikation und Probenherstellung sind in Abbildung 5-17 dargestellt. Das Schaubild zeigt, dass die Aufrauung der Oberfläche infolge der Dehnung des Blechwerkstoffs durch die Beschichtung der Proben nahezu vollständig kompensiert wird. Die Oberfläche weist nach dem Fertiglackieren eine deutlich ebenere Struktur auf. Dies ist auf das teilweise Auffüllen von Rauheitstälern, die eine bestimmte Tiefe nicht unterschreiten, durch die Beschichtung bzw. den Lack zurückzuführen. Bei der Auslegung von Biegeprozessen ist folglich darauf zu achten, dass die Oberflächenaufrauung während der Fertigung den vom Deck- und Basislack sowie der kathodischen Tauchlackierung und den Werkstoffeigenschaften abhängigen, spezifischen Grenzwert nicht überschreitet. Dieser Grenzwert muss nicht gleichbedeutend mit dem Versagen des Werkstoffs durch Einschnürung und Bruch sein, sondern hängt vielmehr von den Ansprüchen des Fahrzeugherstellers an die Oberflächenqualität von gebogenen Kanten ab. Ebenso ist bekannt, dass während der Lackapplikation in Folge der Oberflächenspannung des Substrats sog. Fettkanten entstehen (erhöhter Lackauftrag). Deren Größe (Überhöhung von 80 - 160  $\mu\text{m}$ , Breite 2 - 4 mm) beeinflusst das Erscheinungsbild der lackierten Blechkante maßgeblich. Die Ausprägung der Fettkante hängt von den Substrateigenschaften, der Krümmung an der Blechkante, der applizierten Schichtdicke und von der Orientierung der Blechkante während der Lackapplikation (horizontal oder vertikal) ab. Somit wird auch das Auffüllen von Rauheitstälern an der Biegekante von der lokalen Substratdicke infolge der Fettkantenbildung mitbestimmt.

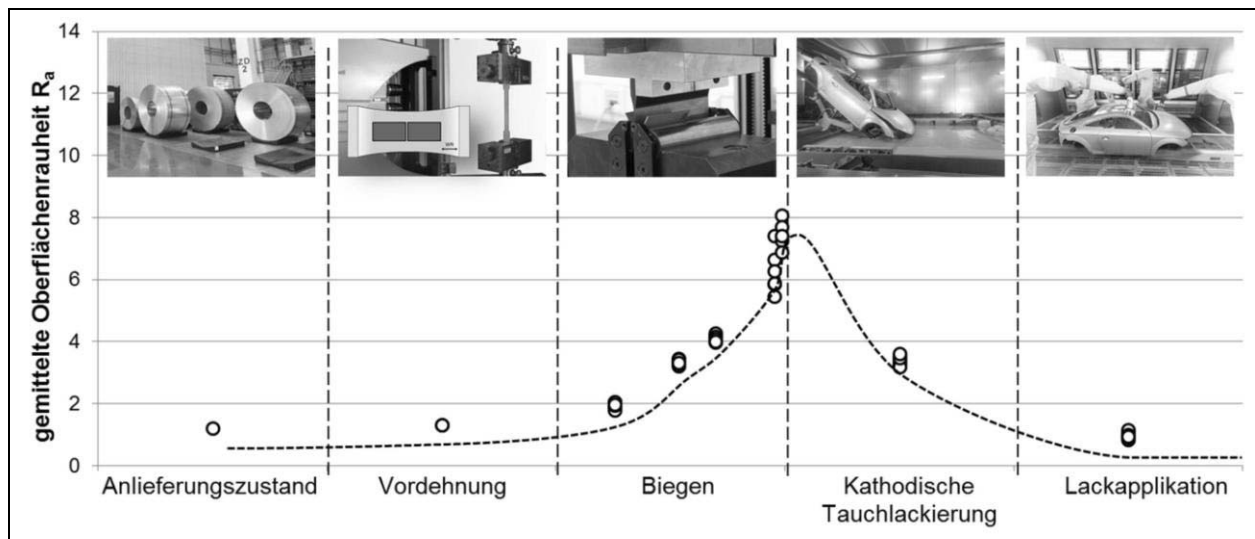


Abbildung 5-17 Entwicklung der gemittelten Oberflächenrauheit entlang der Prozesskette zur Herstellung von lackierten Türen/Klappen von der Anlieferung des Halbzeugs bis zur lackierten Karosserie

### 5.2.2 Explizite Bestimmung der Oberflächenaufrauhung während des Falzens

Die Entwicklung der Oberflächenqualität von gefalzten Blechkanten an Karosserieanbauteilen entlang der Fertigungskette ist in Kap. 5.2.1 anhand eines Referenzprozesses (Biegeversuch) beschrieben. In diesem Kapitel wird dieser Laborversuch durch einen seriennahen Maschinenfalzversuch substituiert, um die Entwicklung der Oberflächenrauheit beim Falzen genauer zu erfassen. Eine Betrachtung der Lackapplikation erfolgt an dieser Stelle nicht mehr. Der seriennahe Maschinenfalzprozess besteht aus dem Vordehnen der Blechprobe, dem Abstellen des Bauteilflanschs sowie dem Vor- und Fertigfalzen der Probe. Hierzu wurde der in Kap. 5.1 beschriebene Versuchsaufbau verwendet. Während der Versuchsdurchführung wurde der Falzprozess analog zu Kap. 5.2.1 unterbrochen, um einen Einblick in die prozessuale Entwicklung der Aufrauhung zu erhalten (Abbildung 5-18). Für die Untersuchung wurde sowohl Legierung 1 als auch Legierung 2 verwendet. Die Nennblechdicke beträgt bei beiden Legierungen  $s_0 = 1,25$  mm.

Zunächst werden die Ergebnisse für Legierung 2 vorgestellt. Während des Abstellens des Flanschs steigt die gemessene Rauheit an der Biegekante nur gering an. Beim weiteren Biegen des Flanschs während des Vorfalzens fällt die Streuung der Messwerte größer aus. Im Mittel ist jedoch der zu erwartende Anstieg der Rauheit nicht zu beobachten. Vielmehr scheint die Aufrauhung der Oberfläche zu stagnieren. Mit dem Beginn des Fertigfalzens ab einem Restschließwinkel von  $\alpha_{Rest} = 45^\circ$  nimmt die Rauheit an der Kante zu. Mit fortschreitender Biegung kommt es zu einem exponentiellen Anstieg der gemessenen Rauheitswerte. Am Ende des hier aufgezeigten Prozesses liegt eine deutlich aufgeraute Oberfläche mit leichten Anrissen vor. Diese Oberfläche wird der 3. Phase aus Kap. 2.3 zugeordnet.

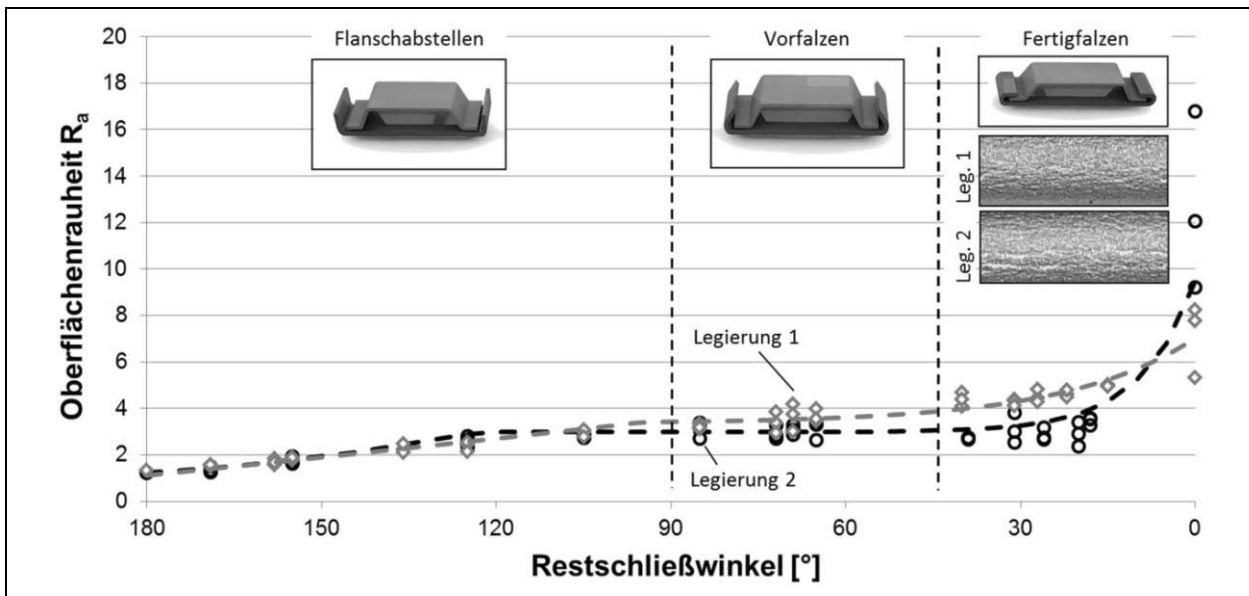


Abbildung 5-18 Entwicklung der Oberflächenrauheit während des Maschinenfalzens von Legierung 1 und 2

Dieselbe Versuchsdurchführung wurde mit Legierung 1 wiederholt. Der Versuch wurde in denselben Zeitpunkten unterbrochen, was den Vergleich beider Legierungen erlaubt. Während des Abstellens des Flanschs ist kein Unterschied zwischen den Legierungen erkennbar. Beide weisen nach dem Abstellen des Flanschs eine im Vergleich zur Vordehnung leicht erhöhte Oberflächenrauheit auf, siehe Abbildung 5-18. Beim anschließenden Vorfalzen auf einen Restschließwinkel von  $\alpha_{Rest} = 45^\circ$  ist ebenfalls kein merklicher Unterschied zwischen den Legierungen feststellbar. Im letzten Schritt, dem Fertigfalzen, zeigen sich schließlich merkliche Unterschiede. Legierung 1 weist bereits zu Beginn des Fertigfalzens bei großen Restschließwinkeln eine höhere Oberflächenrauheit im Vergleich zu Legierung 2 auf. Der gemessene Unterschied ist größer als die Versuchsstreuung. Im weiteren Verlauf des Fertigfalzens steigt die Rauheit weiter an, ein stark exponentieller Anstieg wie bei Legierung 2 liegt jedoch nicht vor. Dies führt am Ende des Fertigfalzens zu einer deutlich reduzierten Oberflächenrauheit. Dieser Unterschied ist auch bei optischer Begutachtung der gefalzten Kanten sichtbar. Die Ergebnisse zeigen, dass Legierung 1 im Vergleich zu Legierung 2 für Biegeprozesse hinsichtlich biegeinduziertem Versagen besser geeignet ist.

Für die Rückwärtsauslegung der Umformschritte ist der Rückschluss von der Qualität der lackierten Oberfläche zur Qualität der unbeschichteten Oberfläche nach dem Falzen von Interesse. Auf diese Weise kann ein Grenzwert der Oberflächenrauheit nach dem Falzen ermittelt werden, der bei bekanntem KTL- und Lackprozess zu qualitativ hochwertigen Oberflächen führt. Die Auslegung der umformtechnischen Fertigungsschritte erfolgt dann mit dem Ziel, diesen Grenzwert nicht zu überschreiten. Im Rahmen dieser Untersuchung wurden gezielt gebogene Proben mit definierten Oberflächenrauheiten erzeugt. Die Oberfläche dieser Proben wurde nach dem Biegen messtechnisch erfasst. Die Proben wurden dem Serienlackprozess übergeben und

nach dem Lackieren von fachlich ausgebildeten Oberflächenauditoren bewertet, erneut digitalisiert und mit dem Urteil aus dem Oberflächenaudit verglichen. Auf Basis dieses Vergleichs lässt sich jener Grenzwert für Oberflächenrauheit nach dem Falzen bestimmen, der zu verkaufsfähigen Oberflächen am lackierten Fahrzeug führt.

Für das Audit wurden Biegeproben mit gemittelten Oberflächenrauheiten  $3,0 \mu\text{m} < R_a < 5,2 \mu\text{m}$  verwendet. Es wurden jeweils drei identische Proben angefertigt. Die Proben wurden dann zwei Auditoren zur unabhängigen Bewertung vorgelegt. Aus der Einteilung in Gut- und Schlechteile wird der Anteil an auditierten Gutteilen bestimmt. In Abbildung 5-19 ist der Anteil an Gutteilen im Audit der lackierten Proben in Abhängigkeit von der Oberflächenrauheit des unlackierten Rohbauteils dargestellt. Die experimentellen Ergebnisse werden mit einer Sprungfunktion  $\theta(R_a)$  approximiert. Die Sprungfunktion kann dabei die Werte  $\theta = 1$  (Gutteil) und  $\theta = 0$  (Schlechtteil) annehmen. Die Funktionsstelle  $c_{sp}$  stellt den Übergang von Gut- zu Schlechteilen dar (Abbildung 5-19). Diese Stelle beschreibt somit den Grenzwert der Oberflächenrauheit an gebogenen Kanten, der im Karosserierohbau nicht überschritten werden sollte.

Die Bewertung der gebogenen Proben im Qualitätsaudit beinhaltet trotz mehrfacher Bewertung identischer Proben sowie zufällig eingestreuter Kontrollproben und die Bewertung durch mehrere Auditoren an unterschiedlichen Tagen noch einen subjektiven Anteil. Dieser subjektive Aspekt, die messtechnischen und fertigungstechnischen Toleranzen bei der Probenherstellung führen zu einer Unschärfe der Sprungfunktion. Daher wird als Rauheitsgrenze der konservative Wert  $c_{sp} = 4,1 \mu\text{m}$  gewählt. Der Vergleich mit Abbildung 5-18 zeigt, dass beide Legierungen diesen Grenzwert bereits kurz vor Abschluss des Fertigfalzens erreichen. Beide Probenreihen führen demnach zu ungenügenden Ergebnissen hinsichtlich der Aufrauung der Blechoberfläche an der Falzkante.

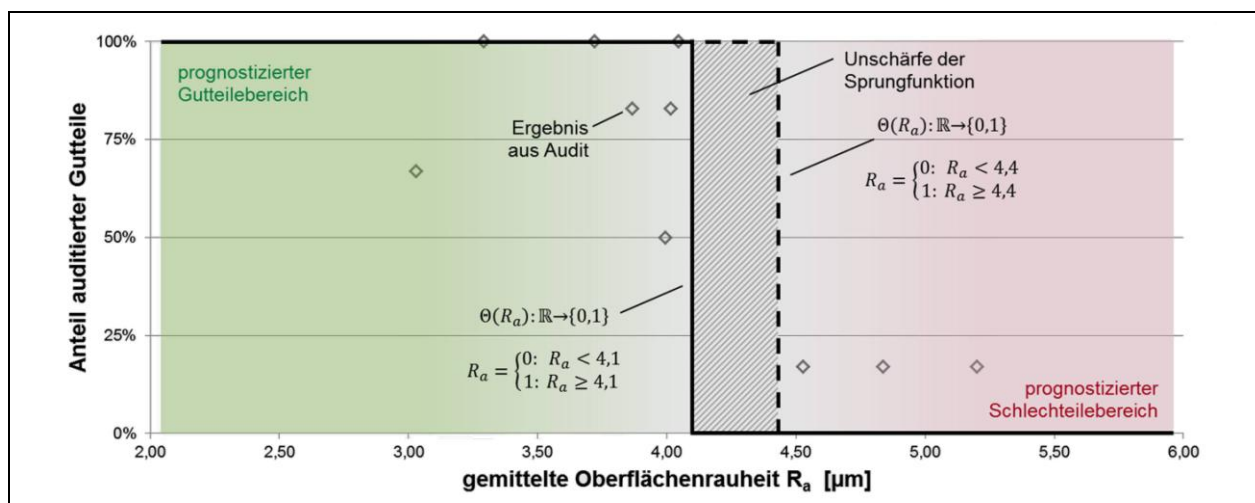


Abbildung 5-19 Bewertung von gebogenen Kanten an lackierten Proben in Abhängigkeit von der gemittelten Oberflächenrauheit

### 5.3 Betrachtung der Werkstoffbeanspruchung während des Falzens

Die Untersuchungen von Denninger [DEN14] haben gezeigt, dass Aluminiumblechwerkstoffe (AA 6xxx) beim Biegen bzw. Falzen durch eine starke Dehnungslokalisierung am Biegeradius versagen. Das Biegeversagen wird dabei maßgeblich durch den max. Dehnungsbetrag auf der Außenfaser und die Größe des Formänderungsbereichs an der gebogenen Kante bestimmt. Im Rahmen dieser Arbeit wurde daher der Biegebewertungsfaktor zur Bewertung der auftretenden Biegebeanspruchungen beim Falzen eingesetzt. Durch den Quotienten aus gemessener bzw. prognostizierter Beanspruchung mit dem werkstoffspezifischen Grenzwert der Biegebeanspruchung wurde die Versagenswahrscheinlichkeit bestimmt.

Zur detaillierteren Betrachtung der Biegebeanspruchungen wird zunächst die prozessuale Entwicklung der Beanspruchung entlang der Prozesskette zur Herstellung von Anbauteilen analysiert. Während der Versuchsdurchführung wurden die Formänderungen mithilfe der optischen Formänderungsanalyse erfasst und nach jedem Teilschritt (Vordehnen, Flanschabstellen, Vor- und Fertigfalzen) ausgewertet. Auf diese Weise entsteht ein Einblick in den schrittweisen Fortschritt der Biegebeanspruchung entlang der Prozesskette. Dies ermöglicht die Bewertung der einzelnen Prozessschritte hinsichtlich ihres Beitrags zur kumulierten Biegebeanspruchung sowie die Quantifizierung von Maßnahmen zu deren Reduktion.

Die statistische Absicherung der experimentellen Ergebnisse (Formänderungsbeträge, Breite der Umformzone und Biegebeanspruchung) wurde durch jeweils drei Proben mit identischen Versuchsparametern sichergestellt. Jede dieser Proben wurde anhand von drei Linienschnitten (Kap. 5.1) ausgewertet. In der nachfolgenden Ergebnisdarstellung sind die Mittelwerte aller gemessenen Werte sowie das Streuband der Ergebnisse, bestehend aus dem höchsten bzw. dem niedrigsten Messwert abgebildet (vgl. Abbildung 5-20).

Zur Bewertung des Fertigungsprozesses ist die vom eingesetzten Werkstoff ertragbare Biegebeanspruchung von Interesse. Zu diesem Zweck wurde die Biegebarkeitsgrenze der Legierungen 1 und 2 experimentell ermittelt. Hierzu wurde der Plättchenbiegeversuch genutzt. Aus den Legierungen 1 und 2 wurden Blechstreifen ausgeschnitten, die auf 10 % uniaxial in Walzrichtung vorgedehnt wurden. Aus diesen Streifen wurden jeweils fünf Biegeproben hergestellt. Im Anschluss an die Biegeversuche, die bei Werkstoffversagen beendet wurden, sind die plastischen Formänderungen auf der Oberfläche der Biegeproben optisch gemessen worden. Anhand von Gleichung 2-4 wird die Biegebeanspruchung ermittelt. Die Ergebnisse zeigen, dass Legierung 2 zum Zeitpunkt des Versagens einen Biegebewertungsfaktor von  $BBF_{krit,2} = 0,17$  aufweist, der deutlich niedriger ist als bei Legierung 1. Hierbei erhöht sich der



Biegebewertungsfaktor bis zum Versagen auf  $BBF_{krit,1} = 0,27$ . Legierung 1 verfügt damit über deutlich bessere Biegeeigenschaften hinsichtlich der ertragbaren Beanspruchung als Legierung 2.

### 5.3.1 Beanspruchung des Werkstoffs während des Maschinenfalzens

Zunächst wird der allgemeine zeitliche Fortschritt der Werkstoffbeanspruchung infolge des Biegens während des Falzprozesses sowohl für Maschinen- als auch für Rollfalzprozesse betrachtet. Beide Falztechnologien wurden in Laborversuchen abgebildet. Die nachfolgend aufgeführten Ergebnisse wurden an Falzproben für Maschinenfalzen (Legierung 1; Abstellradius 0,4 mm; Vordehnung 5%) ermittelt. In einem ersten Schritt werden die maximalen Hauptformänderungsbeträge an der Biegekante betrachtet. Das vom Lieferanten angelieferte Halbzeug auf Coils stellt dabei den initialen Werkstoffzustand dar.

Während des uniaxialen Vordehnens der Blechprobe, das den Tiefziehvorgang simuliert, wird eine erste Formänderung eingebracht, die mit 5 % zwar relativ gering ist, jedoch konventionell tiefgezogenen Bauteilen entspricht. Das Abstellen des Bauteilflanschs führt zu einer drastischen Erhöhung des maximalen Formänderungsbetrags auf circa 50 % auf der Außenfaser. Das anschließende Vorfalzen auf einen Restschließwinkel von ca.  $\alpha_{Rest} = 45^\circ$  führt lediglich zu einem geringen Anstieg der Formänderungen (ca. +5 %). Der letzte Schritt des Falzvorgangs, das Fertigfalzen, führt jedoch zu einer deutlichen Erhöhung des gemessenen Hauptformänderungsbetrags an der Falzkante. Somit haben die Prozessteilschritte des Abstellens und Fertigfalzens einen signifikanten Einfluss auf den gesamten Hauptformänderungsbetrag auf der Außenseite der Falzschlaufe (vgl. Abbildung 5-20).

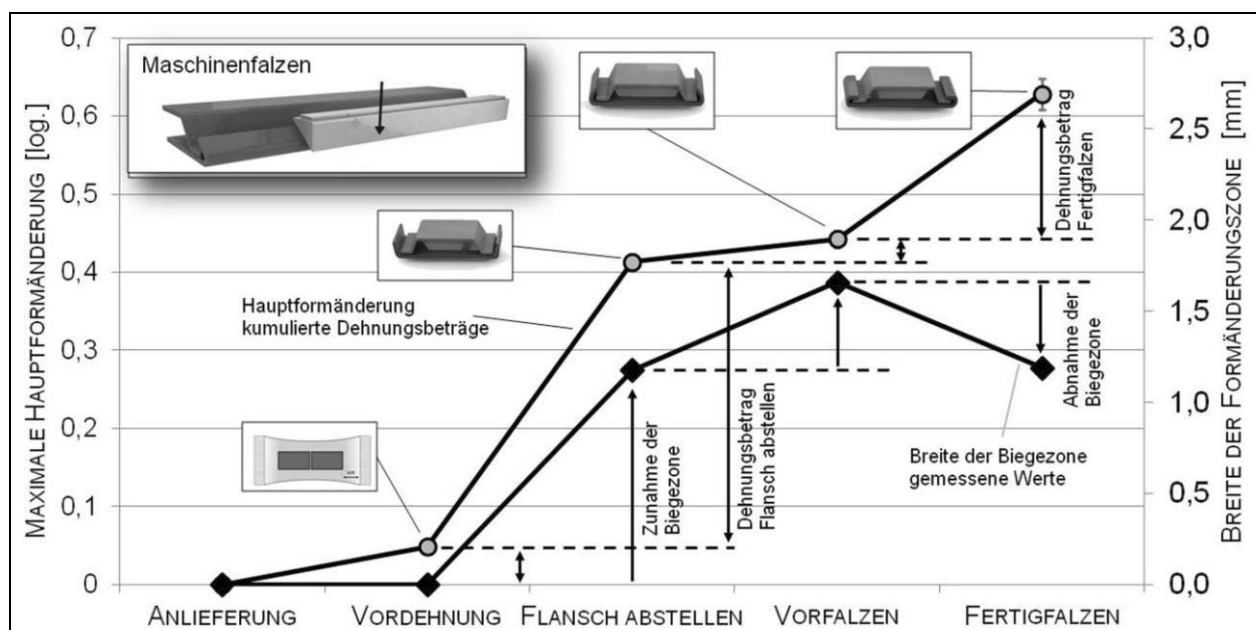


Abbildung 5-20 Darstellung der fortschreitenden Entwicklung der max. Hauptformänderung und der Breite der Biegezone an der Falzkante beim Maschinenfalzen

Neben der größten Formänderung an der Biegekante ist die Größe der Biegezone, die den Bereich der plastischen Formänderung beim Biegen beschreibt, ein wesentlicher Faktor für das Entstehen der Biegebeanspruchung. Die Darstellung der Biegezone BAZ erfolgt analog zu der des Hauptformänderungsverlaufs während des Herstellprozesses (Abbildung 5-20). Während des uniaxialen Vordehnens auf 5 % erfährt die Probe keine Biegung. Den ersten Biegeprozess in der experimentellen Prozesskette stellt das Flanschabstellen dar. Die gewählten Versuchsparmeter (Abstellradius, Nennblechdicke ...) führen zu einer Biegezone von  $BAZ \approx 1,2$  mm auf der Außenseite der Probe. Während des Vorfalzens wurde eine noch größere Umformzone von  $BAZ \approx 1,6$  mm gemessen. Dies ist gewissermaßen die größte gemessene Formänderungszone in diesem Prozess, da beim Fertigfalzen eine Lokalisierung der Dehnungen und somit eine geringere Biegezone beobachtet wurde, siehe Abbildung 5-20.

Auf Basis der ermittelten maximalen Hauptformänderung und der Größe der Biegezone lässt sich die Biegebeanspruchung bestimmen. In Abbildung 5-21 ist deren prozessuale Entwicklung entlang der Fertigungskette dargestellt. Während des ebenen Vordehnens tritt keine Biegebeanspruchung auf. Das Abstellen des Bauteilflanschs führt dann zu einer ersten Biegebeanspruchung. Die großen Hauptformänderungen werden auf einer großen Breite der Formänderungszone (Biegezone BAZ) verteilt. Dies führt zu einer homogenen Verteilung der Dehnungen ohne drastischen, lokalen Anstieg innerhalb der Biegezone. Die Biegebeanspruchung ist demnach gering. Während des Vorfalzens treten nur geringe zusätzliche Formänderungen auf der Oberfläche des Biegeteils auf. Diese verteilen sich gleichzeitig auf einen im Vergleich zum Flanschabstellen größeren Bereich. In Konsequenz liegt eine leicht reduzierte Beanspruchung am Ende des Vorfalzens vor. Der Anstieg der Formänderungen und die simultane Reduzierung der Biegezone führen zu einer deutlich höheren Beanspruchung des Werkstoffs beim Fertigfalzen. Die Beanspruchung erhöht sich um über 100 % im Vergleich zum Flanschabstellen und Vorfalzen. Die werkstoffliche Versagensgrenze wird hier erreicht (Legierung 1).

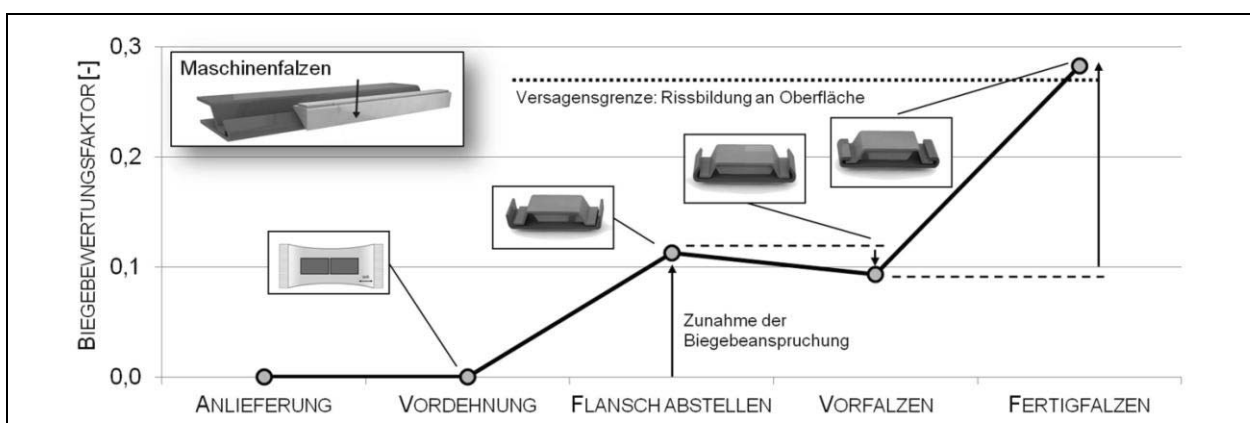


Abbildung 5-21 Darstellung der fortschreitenden Entwicklung der Biegebeanspruchung an der Falzkante beim Maschinenfalzen

### 5.3.2 Beanspruchung des Werkstoffs während des Rollfalzens

Die Proben für das Rollfalzen wurden identisch (Vordehnung und Abstellradius) zu den Versuchen zum Maschinenfalzen vorbereitet. Die Vorrichtungparameter beim Zusammenbau (Offset der Falzrollen, Anstellwinkel der Falzrollen) waren derart gewählt, dass sich eine ähnliche Geometrie der Schlaufe bei gleichen Eingangsgrößen ausbildet.

Der Verlauf der plastischen Formänderungen während der ersten drei Prozessschritte (Anlieferungszustand, Vordehnung, Flanschabstellen) entspricht aufgrund der identischen Präparation der Proben den Werten des Maschinenfalzens. An das Abstellen des Bauteilflanschs schließt sich der eigentliche Rollfalzprozess an. Dieser wird in drei Stufen mit identischen Biegewinkeln durchgeführt. Zwischen dem Abstellen und dem 1. Vorfalzen ist keine Veränderung des maximalen Dehnungsbetrags auf der Falzschlaufe festzustellen. Auch im weiteren Verlauf der gemessenen Kurve ist keine Zunahme der maximalen Formänderung zu beobachten. Der gemessene Dehnungsbetrag am Ende des Fertigfalzens entspricht nahezu dem Dehnungsbetrag nach dem Flanschabstellen, Abbildung 5-22. Die Messungenauigkeit beträgt  $\pm 10\%$ .

Die Größe der Biegezone in allen Umformstufen ist in Abbildung 5-22 dargestellt. Die ersten drei Prozessschritte scheinen identisch mit den Beobachtungen beim Maschinenfalzen (vgl. Abbildung 5-20). Die geringen Änderungen der Breite der Biegezone während des Falzens befinden sich im Rahmen der Ungenauigkeiten messtechnischer Erfassung von Dehnungsbeträgen. An der fertiggefalzten Probe wird eine Biegezone mit der abgewickelten Länge von  $BAZ \approx 1,2$  mm gemessen, dies entspricht der Umformzone während des Flanschabstellens. Beim 1. Vorfalzen, 2. Vorfalzen und Fertigfalzen der Proben ist somit keine messbare Änderung der Umformzone festzustellen.

Aus den gemessenen Werten der Formänderungsbeträge und der Biegezone wird die Biegebeanspruchung entwickelt, Abbildung 5-23. Die Beanspruchung bis nach dem Abstellen des Flanschs entspricht unter Berücksichtigung der Messungenauigkeit den Beobachtungen beim Maschinenfalzprozess. Der dreistufige Rollfalzprozess zum Schließen der Falzschlaufe erhöht die Biegebeanspruchung der Falzkante nicht signifikant. Insgesamt liegt die gemessene Beanspruchung der Schlaufe weit unterhalb der werkstofflichen Versagensgrenze (Legierung 1).

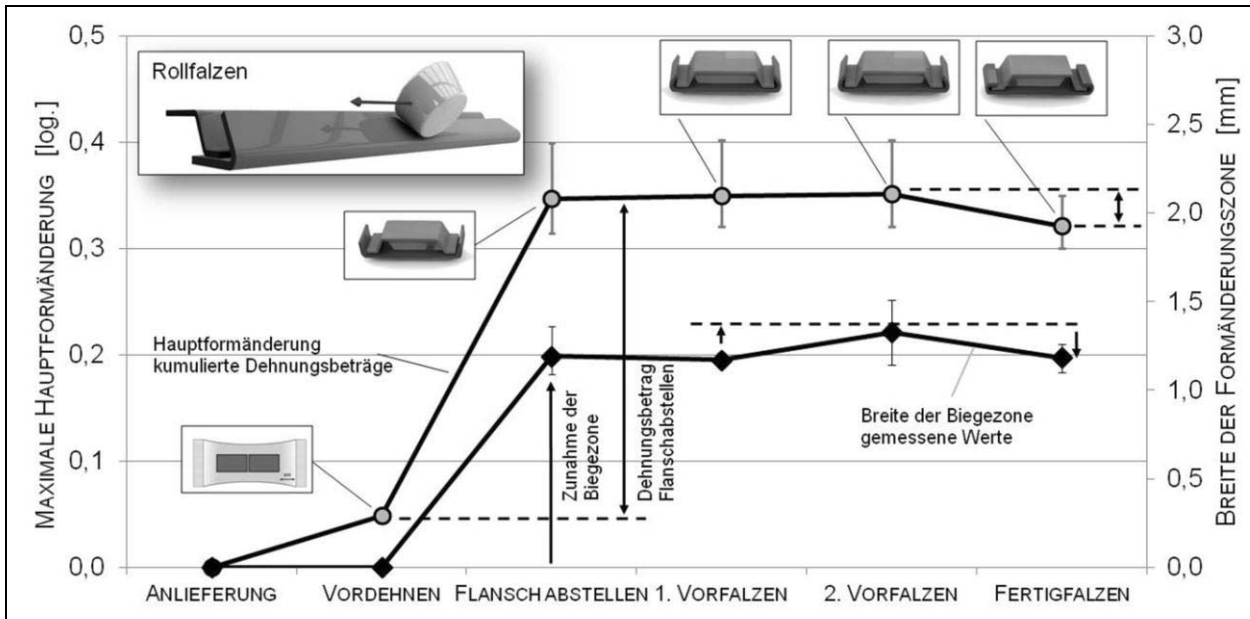


Abbildung 5-22 Darstellung der fortschreitenden Entwicklung der max. Hauptformänderung und der Breite der Biegezone an der Falzkante beim Rollfalzen

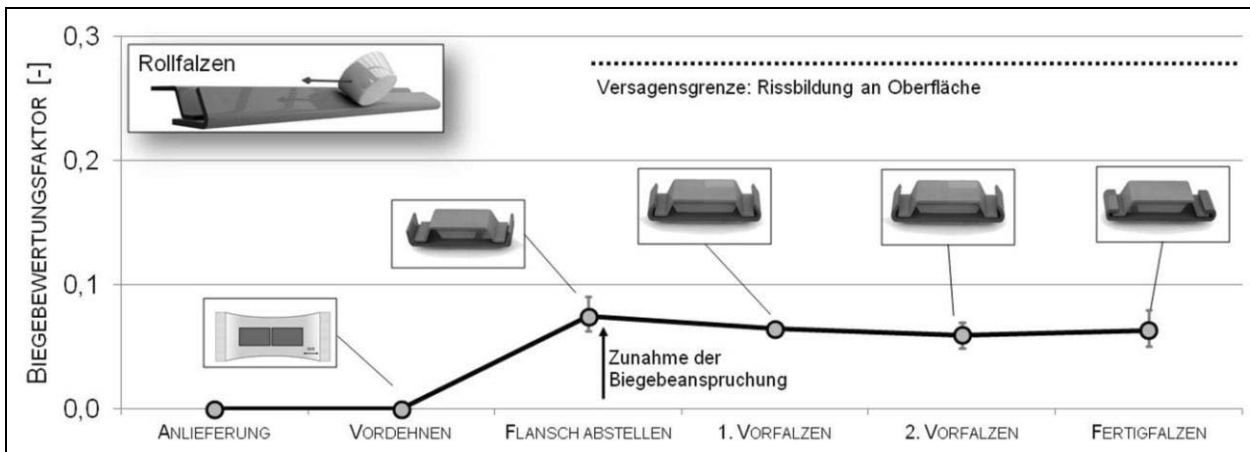


Abbildung 5-23 Darstellung der fortschreitenden Entwicklung der Biegebeanspruchung an der Falzkante beim Rollfalzen

### 5.3.3 Zwischenfazit zur Werkstoffbeanspruchung beim Falzen

Die vergleichende Betrachtung der Falzprozesse Maschinen- und Rollfalzen zeigt, dass eindeutige Unterschiede hinsichtlich der Biegebeanspruchung, der Biegezone und der Dehnungsbeträge auf der Außenfaser der Biegekante bestehen. Beim Maschinenfalzen treten eine deutliche Lokalisierung der Formänderungszone und eine gleichzeitige drastische Erhöhung der Dehnungsbeträge durch das Fertigfalzen auf. Dieser Effekt ist beim Rollfalzen nicht zu beobachten, vielmehr ist hier kein Anstieg der Biegebeanspruchung bis zum Fertigfalzen messbar.

Beim Maschinenfalzen werden die plastischen Dehnungen und somit auch die Beanspruchung stets an einer lokal eng definierten Position eingebracht. Die Dehnungsbeträge der einzelnen Fertigungsstufen überlagern sich und führen zu einem hohen kumulierten Dehnungsbetrag,

Abbildung 5-24. Diese konstruktive Interferenz der Dehnungen ist auf die statische Position der Formänderung auf der Falzschleife zurückzuführen und entspricht den Vorgängen beim Plättchenbiegen. Eine gleichartige Lokalisierung der Formänderungszone ist auch dort gegeben.

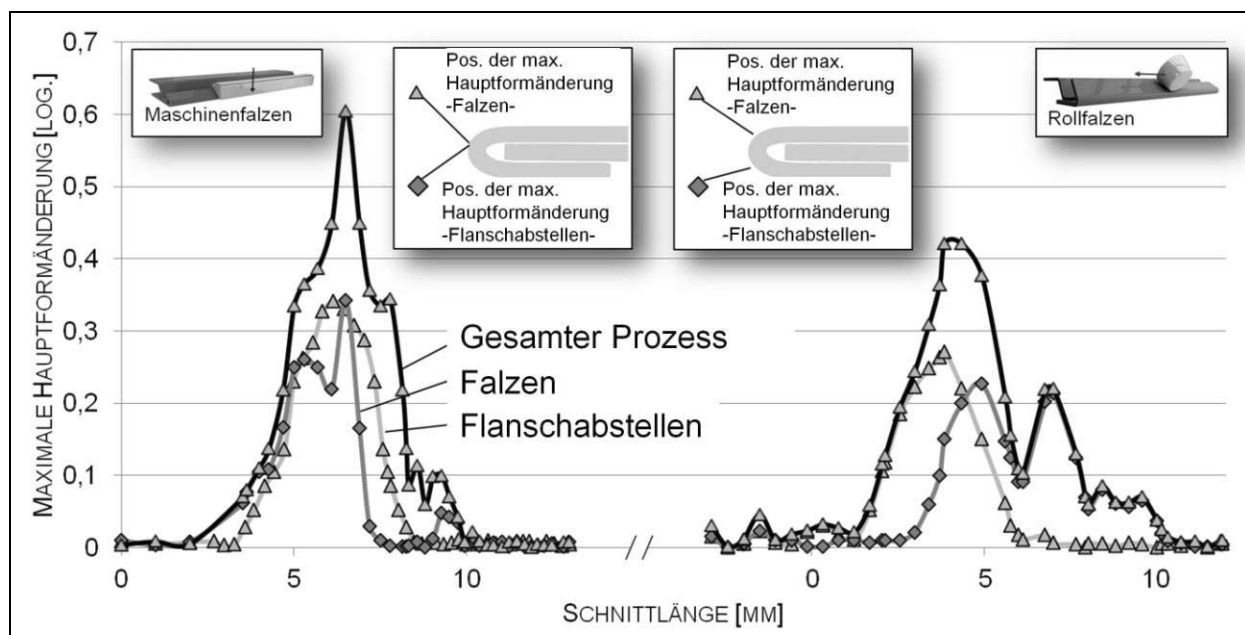


Abbildung 5-24 Verteilung der optisch gemessenen plastischen Formänderung auf der abgewickelten Länge der Falzschleife innerhalb der Prozessstufen beim Maschinen- und Rollfalzen

Bei dem hier dargestellten Rollfalzvorgang tritt keine derartig kritische Überlagerung der Dehnungsbeträge auf. Die Formänderungen der einzelnen Fertigungsstufen sind auf der abgewickelten Strecke der Falzschleife örtlich zueinander verschoben (destruktive Interferenz). Neben dem daraus folgenden geringeren kumulierten Dehnungsmaximum tritt auch eine geringere Lokalisierung der Formänderungszone auf, die sich ebenfalls positiv auf die Werkstoffbeanspruchung auswirkt, Abbildung 5-24. Die unterschiedlichen Positionen der Formänderungszonen sind nicht ausschließlich technologiebedingt, vielmehr werden die Größe der Formänderungszone und die Dehnung der Außenfaser durch die werkstofflichen und fertigungstechnischen Bedingungen des Herstellprozesses bestimmt. Durch die bewusste Steuerung der Fertigungsparameter kann eine destruktive Interferenz erzeugt werden, die zu einer Reduktion der Biegebeanspruchung im Falzprozess führt.

## 5.4 Betrachtung der Schlaufengeometrie während des Falzens

Während des mehrstufigen Umformprozesses des Falzens kommt es infolge der sequentiellen Biegung des Bauteilflanschs zu einer Verschiebung der Umformzone. Dies bewirkt auch eine Veränderung der Außenkontur des Bauteils im gebogenen Bereich. Hierbei ändern sich infolge der fortschreitenden Biegung und des fortschreitenden Falzverlusts die Größe und die momentane Lage des sichtbaren Bereichs der Falzschleife. In diesem Kapitel wird die schritt-

weise Entwicklung des Schlaufenradius während der einzelnen Phasen des Falzprozesses für Maschinen- und für Rollfalzen dargestellt.

### 5.4.1 Schlaufengeometrie während des Maschinenfalzens

Die nachfolgend aufgeführten Ergebnisse wurden an Falzproben für Maschinenfalzen ermittelt (Legierung 1; Abstellradius 0,4 mm; Vordehnung 5 %). Zur Darstellung der schrittweisen Entwicklung der Außenkontur der Falzschleife werden in diesem Abschnitt die Begriffe „sichtbare Schlaufenlänge“ und „sichtbare Schlaufentiefe“ auch für das abgestellte Bauteil und die vorgefalzte Probe verwendet.

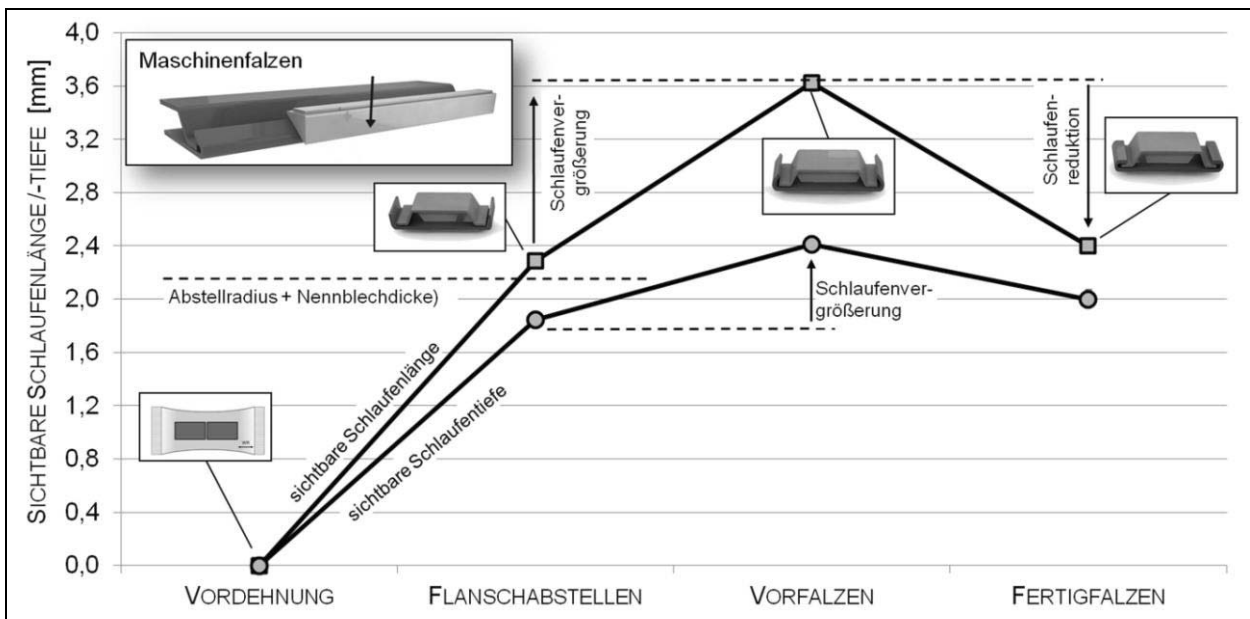


Abbildung 5-25 Entwicklung der sichtbaren Schlaufenlänge und -tiefe der Falzverbindung beim Maschinenfalzen

Zu Beginn der Versuchsdurchführung liegt ein ebener Blechabschnitt vor. Dieser wird beim Abstellen des Flanschs um den Abstellradius gebogen. Die sichtbare Schlaufenlänge der resultierenden Außenkontur entspricht nahezu der sichtbaren Schlaufentiefe. Es liegt somit näherungsweise eine kreisförmige Kontur vor (vgl. Kap. 5.1.1). Beim anschließenden Vorfalzen steigt der Wert der sichtbaren Schlaufenlänge weiter an. Die Ursache hierfür ist die freie Biegung des Bauteilflanschs. Am Kontaktpunkt von Bauteilflansch und Falzwerkzeug wird die zur Biegung notwendige Kraft eingeleitet. Der Bauteilflansch dient als Kraftübertragungszone. Das auf diese Weise erzeugte Biegemoment  $M_B$  bewirkt die Biegung in der Umformzone. Aufgrund der lokalen Niederhaltung des Außenteils durch das Innenteil einerseits und der hohen Werkstoffverfestigung im Bereich des bereits gebogenen Probenabschnitts andererseits wird die Position der Umformzone beim Vorfalzen begrenzt. Das Einrollen der Schleife, das den Falzverlust bewirkt, führt zu einer scheinbaren Vergrößerung des sichtbaren Schlaufenbereichs (Abbildung 5-25).

Während des Fertigfalzens wird die Schlaufe vollständig geschlossen und der Radiusansatzpunkt verschiebt sich in Richtung der Bauteilumrisslinie. Die sichtbare Schlaufenlänge verkürzt sich somit. In dem hier betrachteten Fall entspricht die sichtbare Schlaufenlänge am Ende des Prozesses der des Einzelteils. Dies ist hauptsächlich auf das gewählte Verhältnis aus Nennblechdicke des Innenteils und des Abstellradius zurückzuführen. Bei Abstellradien  $r_A \ll s_{0,A}$  wird dieser Wert beim Flachfalzen nicht mehr erreicht. Die schrittweise Entwicklung der sichtbaren Schlaufentiefe verhält sich ähnlich. Auch hier ist der erzielte Wert nach dem Fertigfalzen in derselben Tendenz von den gewählten Nennblechdicken und Abstellradien abhängig. Die Streuung der Messergebnisse fällt infolge der verwendeten automatisierten Messmethode gering aus.

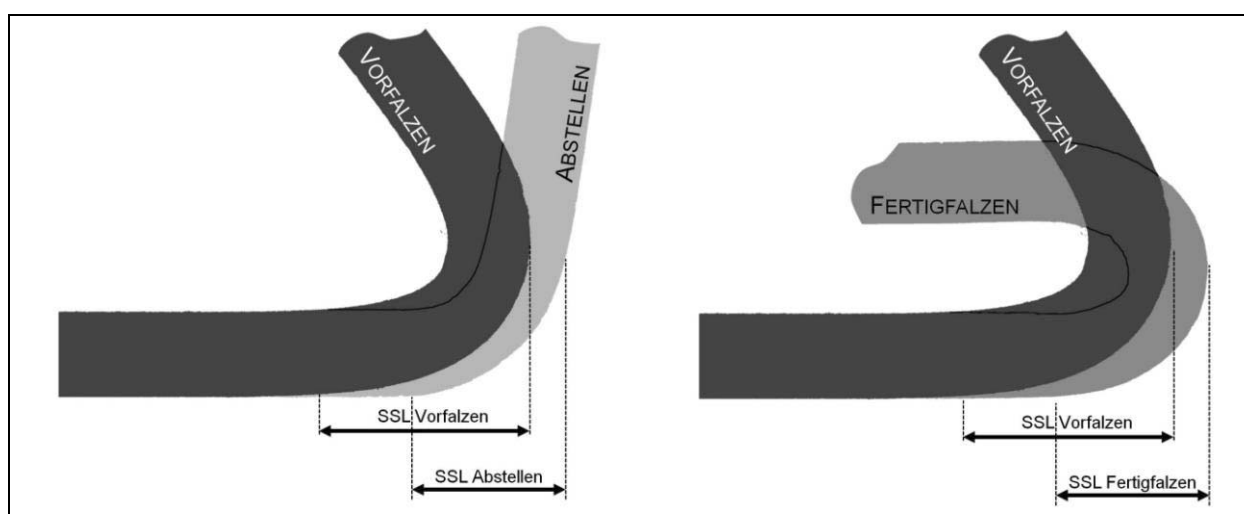


Abbildung 5-26 Bildliche Darstellung der zeitlichen Entwicklung der sichtbaren Schlaufenlänge für die Prozessschritte Abstellen, Vor- und Fertigfalzen

### 5.4.2 Schlaufengeometrie während des Rollfalzens

Entsprechend den Untersuchungen zur schrittweisen Entwicklung der Schlaufengeometrie beim Maschinenfalzen wird nun das Rollfalzen betrachtet. Das Abstellen des Bauteilflanschs auf einen Restschließwinkel von  $90^\circ$  erfolgt analog zu den Maschinenfalzversuchen, die ersten Vorgänge sind daher identisch. Während des Rollfalzvorgangs, bestehend aus dem 1. und dem 2. Vorfalzen sowie dem Fertigfalzen, reduziert sich die sichtbare Länge der herzustellenden Falzschleife kontinuierlich, siehe Abbildung 5-27. Das Abheben des Außenteils während des Vorfalzens stellt sich hierbei in geringerem Maße ein als beim Maschinenfalzen. Die dort beobachtete scheinbare Vergrößerung der Schlaufe ist beim Rollfalzen nicht zu erkennen. Dies ist auf die veränderte Position des Innenblechs zurückzuführen, dessen Beschnittkante sich in dem hier betrachteten Fall näher am abgestellten Flansch befindet.

Die sichtbare Schlaufentiefe entwickelt sich innerhalb des Rollfalzens vergleichbar zur sichtbaren Schlaufenlänge. Nach dem Abstellen des Flanschs ist eine deutliche Reduktion zu

beobachten (vgl. Abbildung 5-27). Die in diesem Beispiel gewählten Roboterbahnen während des Vor- und Fertigfalzens führen zu einer übermäßigen Reduktion der sichtbaren Schlaufen-tiefe. Dies zeigt, dass am Ende des Rollfalzvorgangs, wie auch beim Maschinenfalzen, eine elliptische Falzgeometrie vorliegt.

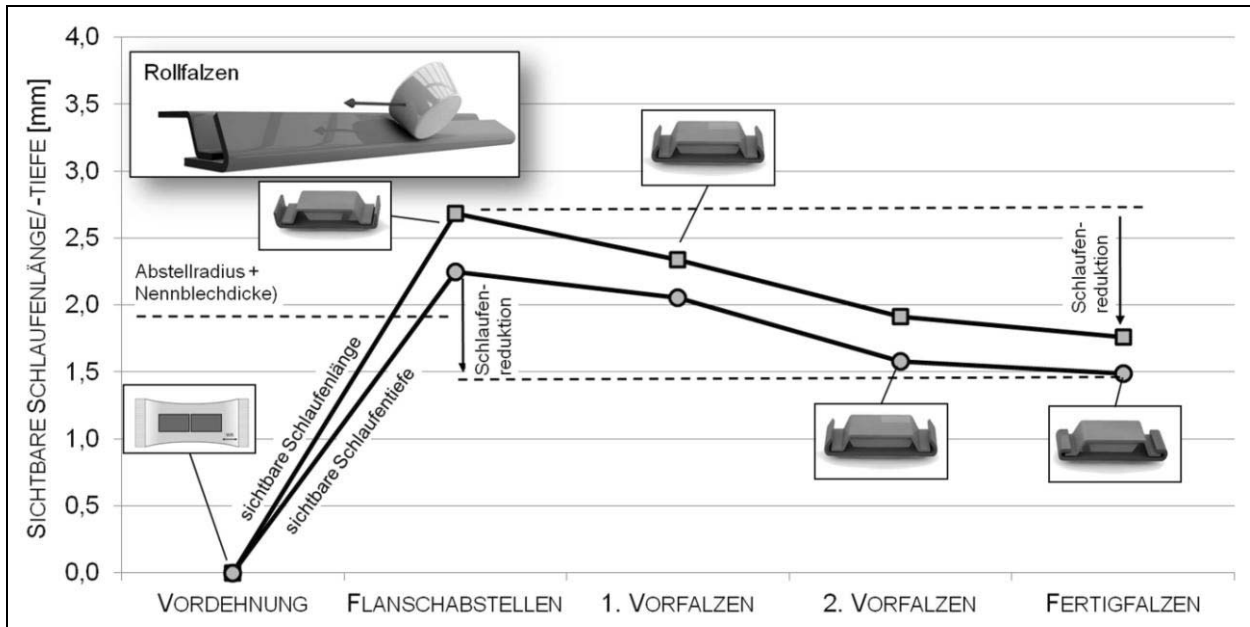


Abbildung 5-27 Darstellung der schrittweisen Entwicklung der sichtbaren Schlaufenlänge und -tiefe der Falzverbindung beim Rollfalzen

### 5.4.3 Zwischenfazit zur Schlaufengeometrie beim Falzen

Zur Untersuchung der Schlaufengeometrie wurde zunächst die Eignung verschiedener skalarer Messgrößen zur Beschreibung der dimensional Ausführung der Schlaufe betrachtet. Dabei zeigte sich, dass Best-fit-Kreise die reale Kontur nicht ausreichend genau beschreiben. Dies ist sowohl bei der Betrachtung der gesamten Schlaufenkontur als auch bei der Betrachtung des sichtbaren Teils der Schlaufe zu beobachten. Durch die Anwendung einer Ellipse wird die Schlaufenkontur deutlich besser approximiert ( $R^2 = 0,97$ ). Zur weiteren Untersuchung werden daher die halbe Länge der ersten Halbachse ( $SSL$ ) und die halbe Länge der zweiten Halbachse ( $SST$ ) zur Charakterisierung der Falzschlaufe verwendet (vgl. Kap. 5.1.1).

Mithilfe dieser Messgrößen wurde die fortschreitende Entwicklung der Schlaufengeometrie entlang der Prozesskette betrachtet. Dabei zeigt sich, dass beim Maschinenfalzen die sichtbare Schlaufenlänge und -tiefe zunächst bis zum Vorfalzen größer werden, bevor beim Fertigfalzen die endgültige Schlaufenform erzeugt wird. Im Gegensatz dazu findet beim Rollfalzen eine kontinuierliche Reduktion der sichtbaren Schlaufenlänge und -tiefe statt.



## 5.5 Einflussgrößen auf die Biegebeanspruchung und die Schlaufengeometrie

Das Teilmodell „Herstellbarkeit von Falzschlaufen“ soll mithilfe von experimentell gewonnenen Daten kalibriert werden. Hierfür wurden Maschinen- und Rollfalzversuche gemäß des Versuchsplans (vgl. Abbildung 5-28) durchgeführt und mit den in Kap. 5.1 beschriebenen Methoden ausgewertet. Die Auswertung der Versuche umfasst die Geometrie der Falzschleife (sichtbare Schlaufenlänge und -tiefe) nach dem Fertigfalzen sowie die Biegebeanspruchung des Werkstoffs (Biegebewertungsfaktor) beim Falzen.

Werkstoff		Konstruktion		Einzelteil		Zusammenbau		Maschinenfalzen		Rollfalzen		
Außenblech: Aluminiumlegierung	Außenblech: Werkstoffalter	Außenblech: Nennblechdicke	Innenblech: Nennblechdicke	Außenblech: Vorbeanspruchung	Flanschabstellen: Abstellradius	Außenblech: Flanschlänge	Innenblech: Positionierung:	Max. Falzkraft	Vorfalzwinkel	Offset 1. Vorfalzen	Offset 2. Vorfalzen	Offset Fertigfalzen
Legierung 1	< 5 Wochen	1,04 mm	1,25 mm	0 %	0,1 mm	7,2 mm	- 0,5 mm	6200 N	42°	0,0 mm	0,0 mm	1,0 mm
Legierung 2	< 10 Wochen	1,25 mm	1,50 mm	2 %	0,3 mm	8,2 mm	0,0 mm	6800 N	45°	0,5 mm	0,5 mm	2,0 mm
	< 15 Wochen	1,50 mm		5 %	0,4 mm	9,2 mm	0,5 mm	7400 N	50°	1,0 mm	1,0 mm	3,0 mm
	...			...	...	...	...			...	...	

Abbildung 5-28 Verteilung der optisch gemessenen plastischen Formänderung auf der abgewickelten Länge der Falzschleife innerhalb der Prozessstufen beim Maschinen- und Rollfalzen

Auf Basis der Erkenntnisse zur Biegebeanspruchung bei Falzen und der Schlaufengeometrie sowie deren prozessualer Entwicklung wurde ein detaillierter Versuchsplan zur Ermittlung bzw. Bewertung von Einflussparameter erstellt. Dabei wurden sowohl fertigungstechnische Prozessschwankungen (z. B. Bauteilbeschnitt) als auch gestalterische Möglichkeiten bei der Bauteilentwicklung (z. B. Flanschlänge) berücksichtigt. Es wurde zwischen den beiden Fertigungstechnologien Maschinen- und Rollfalzen unterschieden. Ausgehend von dieser Unterscheidung entstand ein kombinierter Versuchsplan, der die Prozessschritte der Werkstoffauswahl, der konstruktiven Auslegung, der Einzelteilherstellung und des Zusammenbaus enthält.

Die werkstofflichen Parameter umfassen die Wahl der Aluminiumlegierung des Außenteils und die bekannte oder unbekannt Alterung des Werkstoffs vor der Verarbeitung. Während der Bauteilentwicklung, d. h. vor der Freigabe des Produkts und der Anfertigung der Fertigungseinheiten, werden die konstruktiven Rahmenbedingungen des Falzens festgelegt. Hierzu zählen die Nennblechdicke des Außen- und Innenteils sowie die Wahl der Falztechnologie für die

Serienumsetzung. Anschließend wird die Fertigungskette des Einzelteils und des Falzens im Versuchsplan betrachtet. Bei der Einzelteilmontage wird maßgeblich der Flanschbereich des Bauteils betrachtet, der durch den Vordehnungsbetrag und den Abstellradius charakterisiert wird. Beim anschließenden Falzen stehen in Abhängigkeit von der eingesetzten Falztechnologie teilweise unterschiedliche Einflussgrößen zur Verfügung (vgl. Abbildung 5-29).

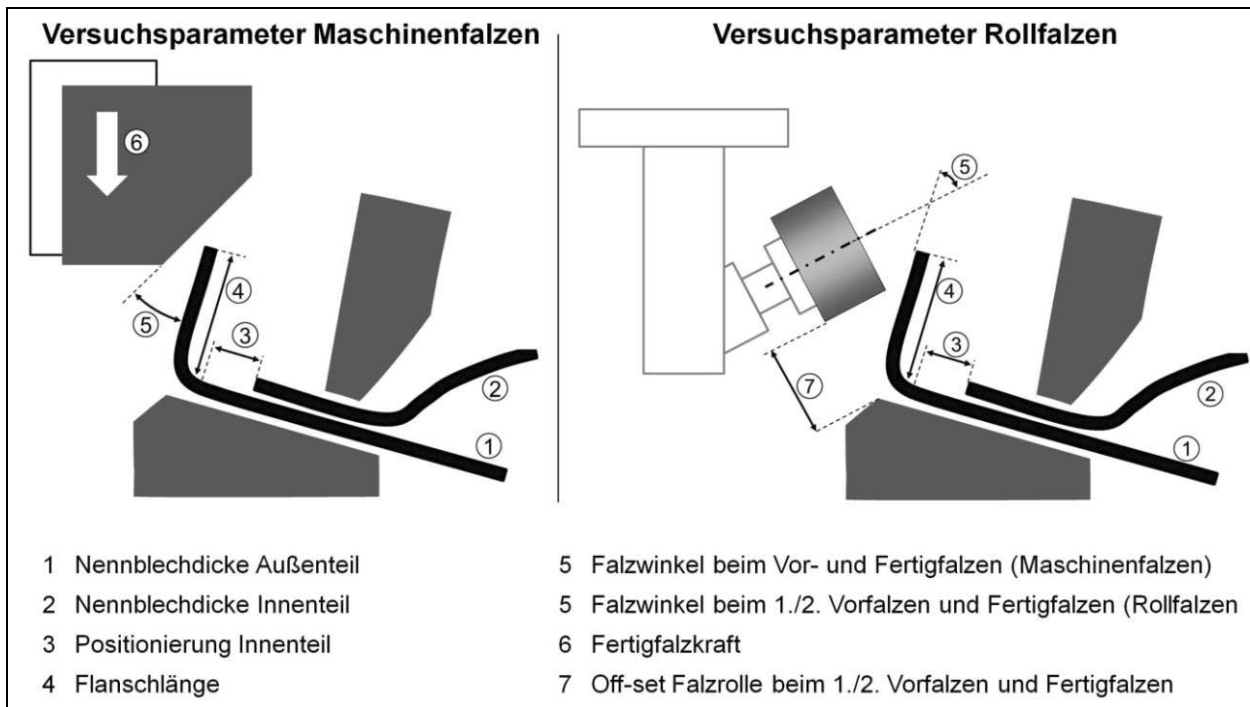


Abbildung 5-29 Versuchsparameter beim Maschinen- und Rollfalzen

Bei beiden Technologien wird die Länge des Flanschs, die Position des Innenblechs und die Ausrichtung der Biegeachse zur Walzrichtung betrachtet. Beim Maschinenfalzen umfasst dies im Speziellen die Untersuchung des Vorfalzwinkels sowie die maximale Falzkraft. Beim Rollfalzen werden der Vorfalzwinkel und das Offset der Falzrolle in den drei Falzbahnen untersucht. Ein Ausschnitt aus dem One-Factor-at-a-Time Versuchsplan ist in Abbildung 5-30 dargestellt.

Bei der Wahl der Faktorstufen wurde die technische Umsetzbarkeit der Abstufungen berücksichtigt. Das Vordehnen, mit dem das Tiefziehen simuliert wird, unterliegt dabei keinen Einschränkungen. Sowohl Bauteile mit geringen Dehnungsbeträgen ( $\varphi \leq 5\%$ ) als auch Bauteile mit Bereichen sehr hoher Dehnungen ( $\varphi \geq 10\%$ , z. B. in der Nähe von Designlinien an Türen) sind vorstellbar. Die Positionierung des Innenblechs hingegen ist technischen Zwängen unterworfen. Ein großer Abstand zwischen dem abgestellten Flansch des Außenteils und der Beschnittkante des Innenteils erfordert zur Erzielung einer ausreichenden Falzüberdeckung sehr lange Flansche am Außenteil, die unwirtschaftlich sind. Gleichzeitig kann das Innenteil nicht beliebig nahe an die Falzwurzel geschoben werden, da sonst die Klebung zwischen Außen- und Innenteil im Serienprozess nicht sicher herstellbar ist.

Versuchsnummer	Werkstoff		Konstruktion		Einzelteil	Zusammenbau			Maschinenfalzen		Rollfalzen		
	Außenblech: Aluminiumlegierung	Außenblech: Werkstoffalter	Außenblech: Nennblechdicke	Innenblech: Nennblechdicke	Außenblech: Vorbeanspruchung	Flanschabstellen: Abstellradius	Außenblech: Flanschlänge	Positionierung: Innenblech	Max. Falzkraft	Vorfalzwinkel	Offset 1. Vorfalzen	Offset 2. Vorfalzen	Offset Fertigfalzen
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
017	Legierung 2	< 5 Wochen	1,04 mm	1,25 mm	7 %	0,3 mm	7,2 mm	0,0 mm	6800 N	45°	---	---	---
018	Legierung 2	< 5 Wochen	1,04 mm	1,25 mm	7 %	1,0 mm	7,2 mm	0,0 mm	6800 N	45°	---	---	---
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
052	Legierung 2	< 5 Wochen	1,04 mm	1,25 mm	5 %	1,0 mm	7,2 mm	0,0 mm	---	---	1,0 mm	0,5 mm	2,0 mm
053	Legierung 2	< 5 Wochen	1,04 mm	1,25 mm	10 %	1,0 mm	7,2 mm	0,0 mm	---	---	1,0 mm	0,5 mm	2,0 mm
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

Abbildung 5-30 Ausschnitt aus dem kombinierten Versuchsplan zur experimentellen Untersuchung von Einflussgrößen auf die Biegebeanspruchung und die Schlaufengeometrie beim Falzen

### 5.5.1 Einflussgrößen auf die Biegebeanspruchungen beim Falzen

Die nachfolgenden Untersuchungen zeigen zunächst das Werkstoffverhalten der beiden untersuchten Aluminiumlegierungen, dann werden prozessualen Einflussgrößen beim Maschinen- und Rollfalzen dargestellt.

Trotz identischer Versuchsparameter beim Abstellen und Falzen zeigt sich, dass Legierung 1 eine im Mittel ca. 10 % höhere Formänderung nach dem Falzen an der Biegekante aufweist als Legierung 2. Die gemittelte Biegezone ist gleichzeitig 20 % kleiner, somit ergibt sich für Legierung 1 ein höherer Biegebewertungsfaktor als für Legierung 2. Die Dehnungen lokalisieren sehr stark an der Biegekante. Der werkstoffspezifische Grenzwert, der die Grenze der Biegebarkeit darstellt, ist bei Legierung 1 jedoch größer als jener von Werkstoff 2. Bei Berücksichtigung dieses werkstofflichen Einflussfaktors (Legierung 2: 0,17; Legierung 1: 0,27) ergeben sich nahezu identische gemittelte Biegequotienten (vgl. Kap. 2.3.4). Die Prozesssicherheit gegenüber Werkstoffversagen durch Biegen mit den hier gewählten Parametern ist bei beiden Legierungen ähnlich einzuschätzen. Allerdings fällt auf, dass die Versuchsergebnisse von Legierung 2 eine deutlich höhere Streuung der Ergebnisgrößen aufweisen, d.h. einige Proben weisen bereits höhere Biegequotienten auf. Auch die weiteren Versuchsergebnisse zeigen im Allgemeinen, dass Legierung 1 geringere Biegequotienten, d. h. eine höhere Sicherheit gegenüber Werkstoffversagen, aufweist. Es wird somit festgestellt, dass der falzoptimierte Werkstoff (Legierung 1), dessen erhöhtes Biegevermögen im Plättchenbiegeversuch nachgewiesen wurde (vgl. Kap. 5.1.1), beim Falzen ein geringfügig höhere Biegebarkeit aufweist als Werkstoff 2. Auch die Oberfläche an der gebogenen Blechkante ist bei Werkstoff 1 minimal besser.

Des Weiteren zeigt sich, dass die natürliche Alterung des Aluminiumwerkstoffs zu der erwarteten Veränderung der Werkstoffeigenschaften (ermittelt im Zugversuch) führt, die Biegebeanspruchung infolge der Alterung jedoch nicht ansteigt. Die Ergebnisse sind in Anhang - B dargestellt.

### Prozessuale Einflussgrößen beim Maschinenfalzen

Die Ergebnisse zum Maschinenfalzen zeigen, dass im Wesentlichen die werkstofflichen (Legierungstyp) und die konstruktiven Variablen (Nennblechdicke des Außenteils) die Biegebeanspruchung beim Falzen von Aluminiumanbauteilen dominieren. Die Untersuchung weist für beide Einflussgrößen einen Effekt von ca. 66 % auf, d. h. die Biegebeanspruchung wird zu 66 % durch jeden dieser Faktoren prädisponiert (vgl. Abbildung 5-31). Beide Größen stellen jedoch unveränderliche Randbedingungen im Produktentstehungsprozess von Türen und Klappen dar, da sie die Steifigkeit und Festigkeit des ZSB's sowie dessen Wirtschaftlichkeit aufgrund der Beschaffungskosten des Blechhalbzeugs bestimmen.

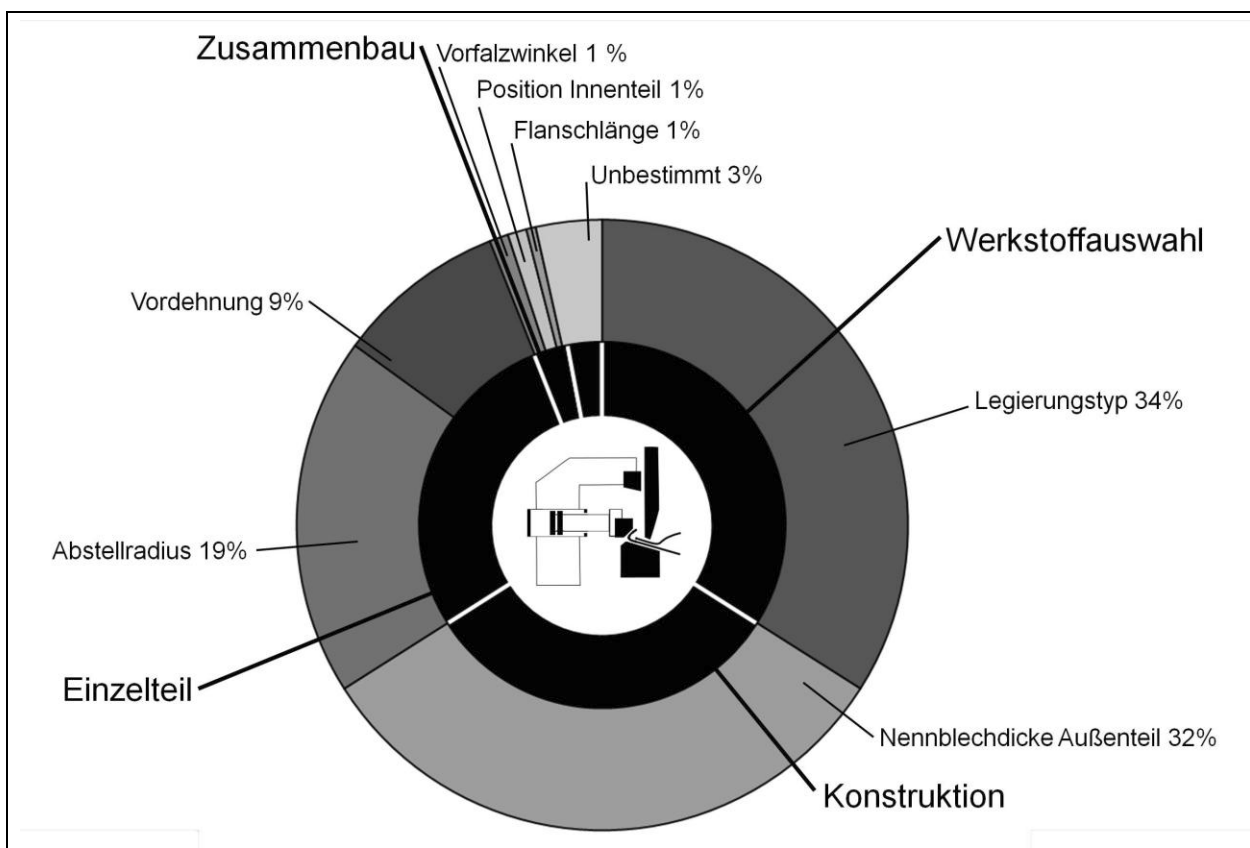


Abbildung 5-31 Effekte des Maschinenfalzens auf die Biegebeanspruchung an der Falzkante

Der Fertigungsprozess, unterteilt in die Teilschritte Einzelteilherstellung und Zusammenbau, bestimmt die entstehende Biegebeanspruchung an der Falzkante zu ca. 33 %. Dabei trägt die Einzelteilherstellung den weitaus größeren Teil bei (ca. 85%).

Die Ergebnisse der Maschinenfalzversuche zeigen, dass die Vordehnung, die das Tiefziehen simuliert, einen signifikanten Einfluss auf die Biegebeanspruchung aufweist. Bei großen Vordehnungsbeträgen (z. B. 10 %) ergibt sich ähnlich wie beim Plättchenbiegen eine starke Dehnungslokalisierung an der Falzkante. Diese Lokalisierung zeigt sich in der Verringerung der Biegezone sowie in einem Anstieg des größten Dehnungsbetrags an der Falzkante (vgl. Abbildung 5-31). Die Biegebeanspruchung ist bei großen Vordehnungen entsprechend größer als bei verhältnismäßig geringen Vordehnungen. Der Radius beim Abstellen des Außenblechs hat ebenso einen signifikanten Einfluss auf die Breite der Biegezone und die Dehnungsbeträge nach dem Fertigfalzen der Falzprobe. So führen kleine Abstellradien zu einer Erhöhung der Formänderungen an der Falzkante, gleichzeitig führen sie auch zu einer Lokalisierung der Umformzone, d. h. die Biegebeanspruchung bzw. die Biegedehnung werden erhöht (vgl. Abbildung 5-32).

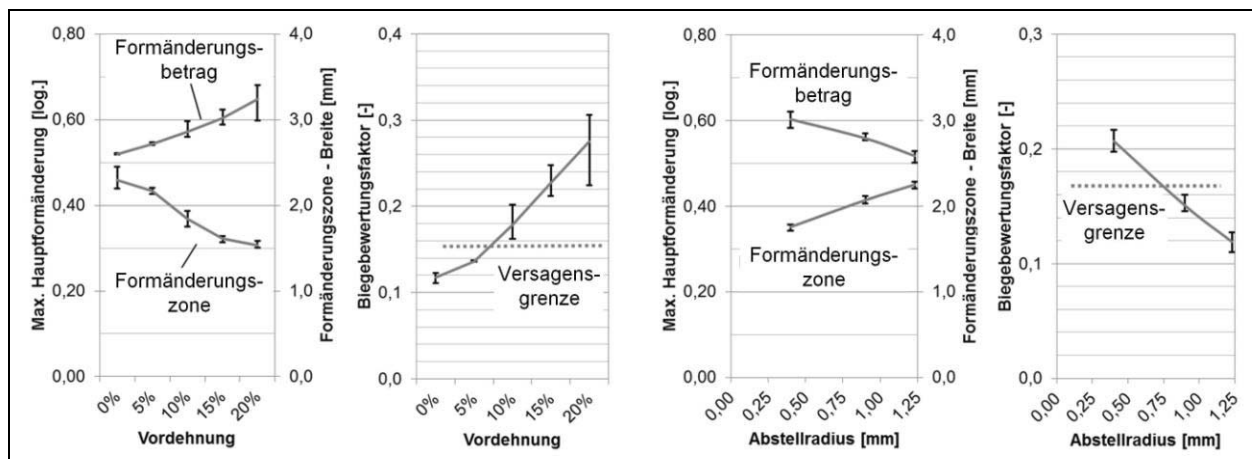


Abbildung 5-32 Experimentelle Ergebnisse zu den Einflussfaktoren Vordehnung und Abstellradius beim Maschinenfalzen

Der Zusammenbauprozess wird aufgrund der thematischen Ausrichtung dieser Arbeit im Umfang der experimentellen Studie verstärkt betrachtet. Hierbei werden die Flanschlänge, die Position des Innenblechs, der Falzwinkel und die Falzkraft getrennt untersucht. Der Einfluss der Flanschlänge auf die Biegebeanspruchung des Falzflanschs infolge unbeabsichtigter Beschnittschwankungen, die nur eine geringe Veränderung des Umrisses des Einzelteils bewirken, ist sehr gering. Der Vorfalzwinkel hat keinen Einfluss auf die Biegezone, bewirkt jedoch eine Veränderung der größten Formänderung beim Falzen und führt somit in Summe ebenfalls zu einer Beeinflussung der Biegebeanspruchung. Generell sind zur Reduktion der Beanspruchung große Restschließwinkel zu bevorzugen. Die Falzkraft zeigt im Rahmen dieser Untersuchung keinen Einfluss auf die Biegebeanspruchung beim Maschinenfalzen. Die Positionierung des Innenblechs auf dem Außenblech zeigt einen geringen Einfluss auf die Messgrößen der

Biegezone und des Formänderungsbetrags. Eine Beeinflussung der Biegebeanspruchung durch die örtliche Position von Innen- und Außenteil zeigt sich nicht.

Die Übereinstimmung zwischen den Versuchsergebnissen und dem approximierten Modell zur Beschreibung der Biegebeanspruchung ist sehr hoch (vgl. Abbildung 5-31). Lediglich 3 % der resultierenden Biegebeanspruchung lassen sich nicht eindeutig mit den Eingangsvariablen beschreiben. Die Ursachen für diese geringen Abweichungen sind die Schwankungen der Nennblechdicke des Innen- und Außenteils im Rahmen der Lieferbedingungen sowie die Toleranzkette des mehrstufigen Fertigungsprozesses.

### **Prozessuale Einflussgrößen beim Rollfalzen**

Das Rollfalzen wurde mithilfe des in Kapitel 5.1.2 beschriebenen Prüfstands experimentell untersucht. Die Einteilung der Einflussgrößen orientierte sich an den Versuchen zum Maschinenfalzen. Zusätzlich wurden die rollfalzspezifischen Größen (z. B. erhöhte Anzahl an Vorfalzoperationen im Vergleich zum Maschinenfalzen) betrachtet. Zu diesen Themengebieten wurden folgende Effekte gemessen:

Die uniaxiale Vordehnung des Außenblechs und der Abstellradius stellen Einflussgrößen aus der Einzelteilerfertigung dar. Der Vordehnungsbetrag beeinflusst die Biegebeanspruchung auf ähnliche Weise wie beim Maschinenfalzen (vgl. Abbildung 5-33). Infolge der erhöhten Kaltverfestigung zeigt sich eine Lokalisierung der Dehnungsbeträge, was zu einem Anstieg der Biegebeanspruchung führt. Das Abstellen des Flanschs wird durch die Größe des Abstellradius geprägt. Mit zunehmender Größe des Abstellradius reduziert sich proportional der höchste Formänderungsbetrag auf der Schlaufe. Dies führt zu einer deutlichen Reduktion der Biegebeanspruchung.

Der Zusammenbauprozess wurde anhand von drei Einflussfaktoren betrachtet. Die Flanschlänge sowie die Position des Innenblechs relativ zum abgestellten Flansch haben keinen Effekt auf die Größe der Biegezone und den höchsten Formänderungsbetrag.

Der wesentliche, methodische Unterschied zwischen Maschinen- und Rollfalzen liegt in der flexiblen Programmierung der Werkzeugbewegung beim Rollfalzen. Im Rahmen dieser Arbeit wurde der Offset der Falzrolle in allen Bearbeitungsschritten betrachtet. Bei der Untersuchung des 1. Vorfalzens ist erst bei sehr großen Offsetwerten eine Veränderung der Biegebeanspruchung zu beobachten. Dies ist auf den daraus resultierenden großen Restbiegewinkel beim 2. Vorfalzen zurückzuführen. Das Offset der Rolle beim 2. Vorfalzen hat keinen Effekt auf die maximale Hauptformänderung an der Falzschlaufe. Die Breite der Biegezone wird jedoch leicht reduziert, was in Summe zu einer leichten Reduktion der Biegebeanspruchung führt. Das

Rollenoffset beim Fertigfalzen zeigt keinen Effekt auf die Höhe des Formänderungsbetrags, jedoch wird die Biegezone beeinflusst. Dies führt insgesamt zu einer Reduktion der Biegebeanspruchung.

Die einzelnen Effekte sind in Abbildung 5-33 dargestellt. Demnach haben der Abstellradius und die Vordehnung den größten Einfluss auf die Biegebeanspruchung beim Rollfalzen. Die Möglichkeiten, die Biegebeanspruchung während des Rollfalzens zu steuern, bietet das Offset der Falzrollen beim 2. Vorfalzen und beim Fertigfalzen.

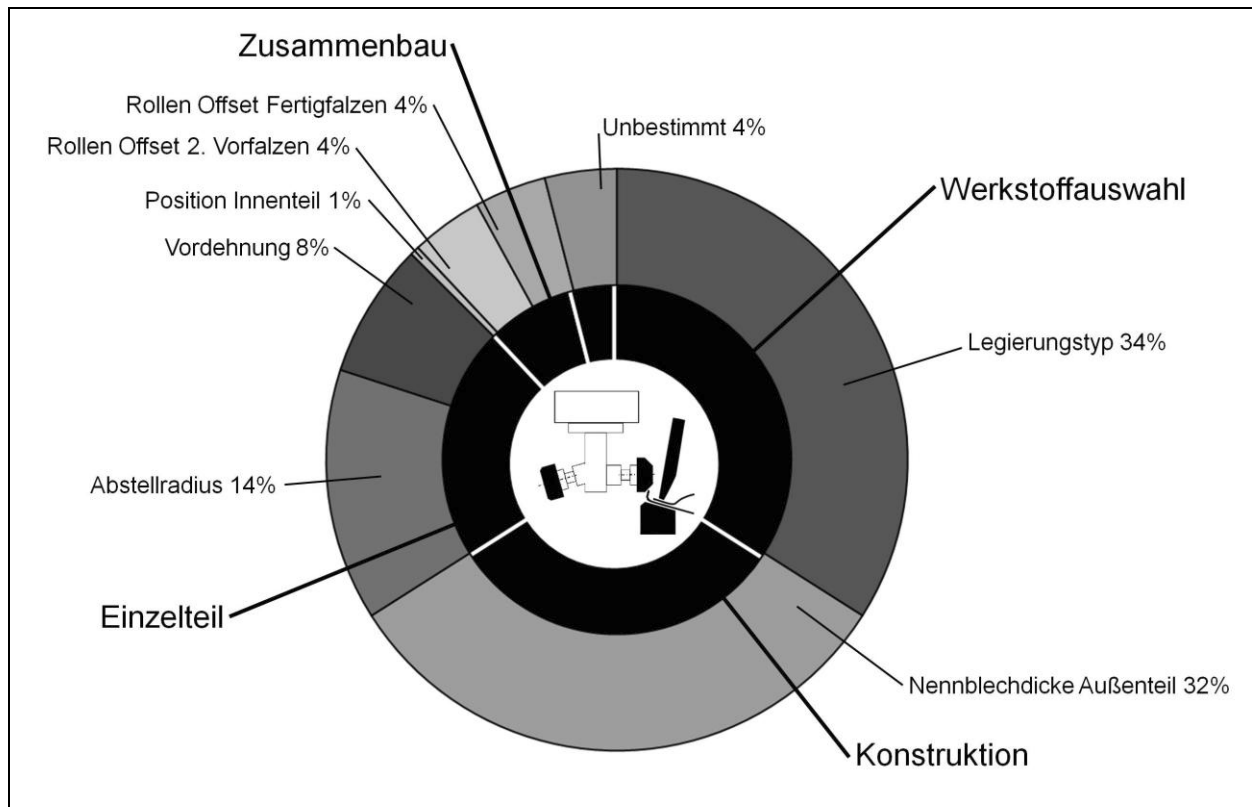


Abbildung 5-33 Effekte des Rollfalzens auf die Biegebeanspruchung an der Falzkante

### 5.5.2 Einflussgrößen auf die Schlaufengeometrie beim Falzen

Die dimensionale Schlaufenform und deren Entstehung beim Maschinen- und Rollfalzen werden in diesem Kapitel in kompakter Weise dargestellt. Das Vorgehen entspricht der Betrachtung der Biegebeanspruchung. Während der Versuchsdurchführung wurden die folgenden Punkte festgestellt:

Bei den werkstofflichen Einflussgrößen auf die dimensionale Schlaufenform (Schlaufenlänge und -tiefe) wurden zwei Legierungen analysiert. Unabhängig vom gewählten Vordehnungsbetrag weisen die Proben, die aus Legierung 2 hergestellt wurden, geringere Falzradien sowie Schlaufenlängen und -tiefen im Vergleich zu denen aus Legierung 1 auf.

### Einflussgrößen beim Maschinenfalzen

Die Betrachtung der konstruktiven und methodischen Einflussgrößen auf die sichtbare Schlaufenlänge und -tiefe umfasst die Nennblechdicke des Außen- und des Innenteils. Bei dicken Außenblechen wird ein hohes Kraftniveau zum Falzen benötigt, das die aufgebrauchte Niederhalterkraft übersteigt und somit zu einer Verschiebung der Biegezone infolge des Abhebens des Bauteils vom Falzbett in Richtung Bauteilzentrum führt. Dies bewirkt gleichzeitig eine Verschiebung der Radiusansatzlinie nach innen, wodurch die sichtbare Schlaufenlänge vergrößert wird. Die Nennblechdicke des Innenteils beeinflusst beim Maschinenfalzen die Schlaufentiefe und -länge mittelbar durch die Erhöhung des Packmaßes.

Innerhalb der Prozesskette zur Herstellung von Karosserieanbauteilen bestimmt die Einzelteilmontage die sichtbare Schlaufenlänge maßgeblich (vgl. Abbildung 5-34). Die Wahl des Abstellradius und die Vordehnung des Außenblechs tragen ca. 90 % zur Schlaufenlänge bei. Der Vorfalzwinkel hat während des Zusammenbaus den größten Effekt auf die sichtbare Schlaufenlänge. Die Position des Innenteils zeigt nur eine geringe Auswirkung. Das Kraftniveau beim Fertigfalzen, sofern es zum vollständigen Schließen der Falzschleufe ausreicht, hat keinen Einfluss auf die Ausführung des Flachfalzes. Ebenso wird keine Abhängigkeit zwischen der Flanschlänge und der resultierenden Schlaufenlänge festgestellt.

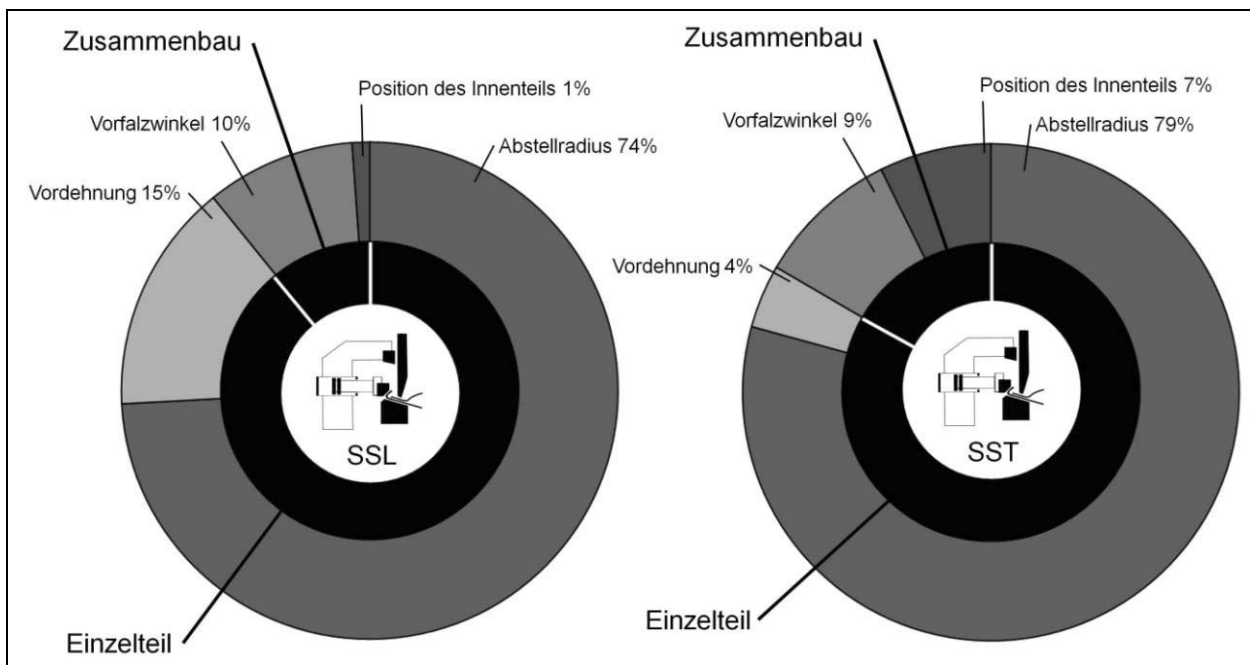


Abbildung 5-34 Effekte des Maschinenfalzens auf die sichtbare Schlaufenlänge der Falzkante

Die sichtbare Schlaufentiefe wird ebenfalls maßgeblich durch den Einzelteilprozess geprägt (vgl. Abbildung 5-34). Dabei hat der Abstellradius den größten Effekt (ca. 80 %). Während des Zusammenbaus zeigt sich wiederum die Abhängigkeit der dimensional Schlaufenausführung von den Parametern „Vorfalzwinkel“ und „Position des Innenteils“. Beide beeinflussen



gleichermaßen die sichtbare Schlaufentiefe. Fertigfalzkraft und Flanschlänge haben keinen Einfluss auf die sichtbare Schlaufentiefe.

### Einflussgrößen beim Rollfalzen

Die Bauteilkontur beim Rollfalzen prägt sich vergleichbar zum Maschinenfalzen aus. Jedoch ist die Abhängigkeit von der Herstellung des Außenteils weniger ausgeprägt, ca. 60 % der sichtbaren Schlaufenlänge sind hierdurch bestimmt (vgl. Abbildung 5-35). Auch hier hat der Abstellradius den größten Einfluss. Im Vergleich zum Maschinenfalzen ist der Einfluss der Position des Innenteils gleich stark ausgeprägt, jedoch kann durch die Positionierung der Falzrolle maßgeblich die dimensionale Gestalt der Falzschleife beeinflusst werden. Das Offset der Falzrolle während der drei Falzdurchgänge trägt ca. 40 % zur sichtbaren Schlaufenlänge bei. Hierbei sind das 2. Vorfalzen und das Fertigfalzen wichtige Einflussfaktoren. Ein Effekt der Flanschlänge auf die Ausführung der sichtbaren Schlaufenlänge wird in den experimentellen Untersuchungen nicht festgestellt.

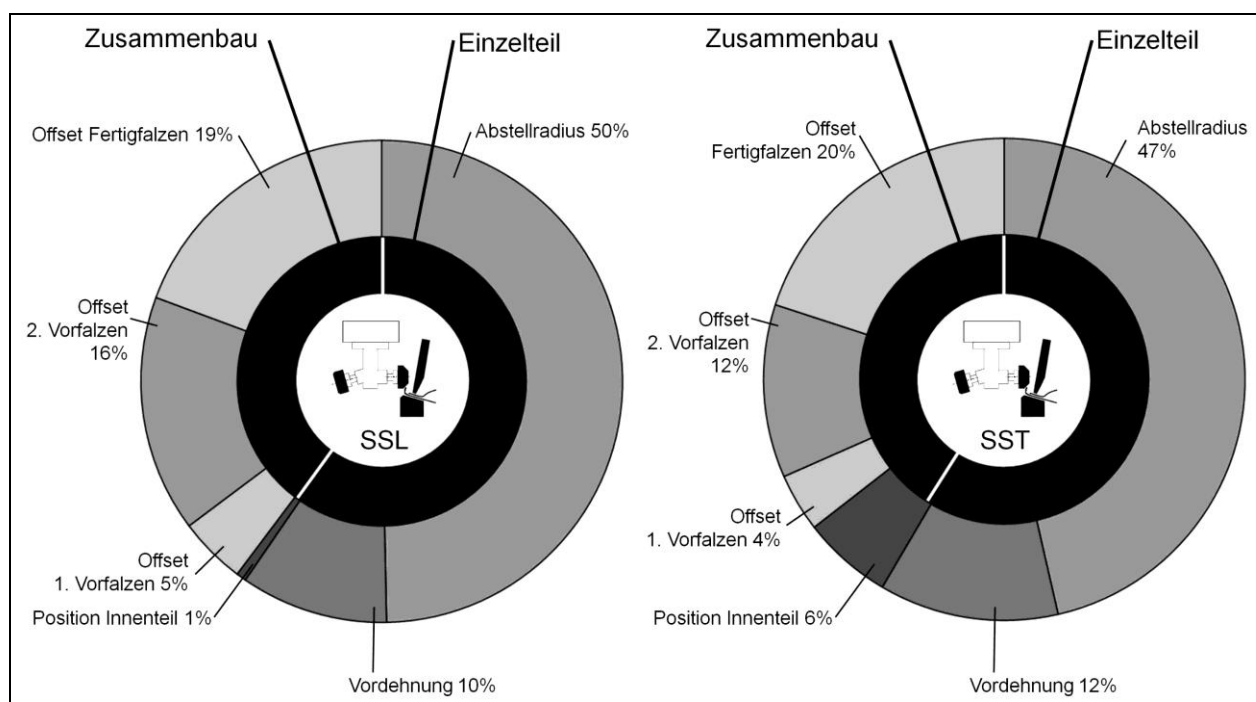


Abbildung 5-35 Effekte des Rollfalzens auf die sichtbare Schlaufenlänge und -tiefe der Falzkante

Die sichtbare Schlaufentiefe beim Rollfalzen wird von denselben Prozessgrößen wie die sichtbare Schlaufenlänge geprägt. Wiederum hat die Einzelteilherstellung mit ca. 59 % den größten Einfluss. Beim Zusammenbau sind die Position der Falzrolle während den drei Falzdurchgängen sowie die Positionierung des Innenteils die signifikanten Einflussgrößen. (vgl. Abbildung 5-35).

### **5.5.3 Zwischenfazit zu den Einflussgrößen**

Die Untersuchung von Einflussgrößen auf die Biegebeanspruchung und die Schlaufengeometrie beim Maschinen- und Rollfalzen basiert auf den in Kapitel 5.3 und Kapitel 5.4 gezeigten prozessualen Entwicklungen der genannten Größen während des Prozesses. Die Ergebnisse zeigen, dass die Zielgrößen Biegebeanspruchung und sichtbare Schlaufenlänge durch unterschiedliche Faktoren beeinflusst werden. Ebenso sind Unterschiede zwischen dem Roll- und Maschinenfalzen festzustellen.

In einem ersten Schritt wird gezeigt, dass die Wahl des Werkstoffs die Biegebeanspruchung und die Schlaufengröße maßgeblich bestimmt. Im beschriebenen Fall wird durch den Einsatz der Legierung 2 eine hochwertigere Schlaufe hergestellt. Gleichzeitig besitzt die Legierung eine verbesserte Biegebarkeit, die zu einer erhöhten Sicherheit gegen Biegeversagen führt. Während des Umformprozesses nimmt die Größe des Abstellradius sowohl beim Maschinen- als auch beim Rollfalzen eine signifikante Rolle ein. Hinsichtlich der Biegebeanspruchung bestimmt der Radius beim Abstellen die kumulierte Biegebeanspruchung am Prozessende bei beiden Falztechnologien. Die Schlaufengeometrie wird ebenso stark beeinflusst, wenngleich beim Rollfalzen auch wichtige Zusammenbaufaktoren bestehen (z. B. Rollenoffset).

## 6 ANMUTUNG VON KAROSSERIESPALTEN UND FALZSCHLAUFEN

### *APPEARANCE OF GAPS AND HEMMING ROPES OF CAR BODIES*

Die Betrachtung der Anmutung von Karosseriefugen als Detail einer Fahrzeuggestalt sowie die Einflussmöglichkeiten zur Steigerung der Anmutungsqualität von Karosseriefugen sind Bestandteil dieses Kapitels. Aus dem Stand der Technik ist bekannt, dass die Anmutung die erste, noch unreflektierte und emotionale Wirkung eines Produkts beschreibt. Innerhalb der Wirkungskette wird zwischen der Wahrnehmung des Objekts und der Erkennung des Produkts unterschieden. Während die Wahrnehmung auf physikalischen und physiologischen Gesetzen basiert, ist die Erkennung von Produkteigenschaften bzw. -qualitäten von psychologischen und soziologischen Aspekten geprägt.

Zur Bewertung der Anmutungsqualität von Falzschlaufen werden die Teilaspekte „Wahrnehmung“ und „Erkennung“ zunächst einzeln betrachtet. Die Wahrnehmung von Karosseriefugen erfolgt durch das Auge des Betrachters. Die Voraussetzung hierfür ist die physische Wahrnehmbarkeit, d.h. die Falzschlaufe muss ein ausreichend großes Abbild auf der Netzhaut erzeugen. Dieses Abbild wiederum ist von der Objektgröße und dem Abstand des Objektes vom Betrachter abhängig. Für die Ermittlung der Wahrnehmungsgrenze von heute gängigen Falzverbindungen und Karosseriefugen wurde zunächst eine Feldstudie zur Ermittlung typischer Fugen- und Falzgeometrien durchgeführt. Diese bildeten gleichzeitig die Basis für die theoretischen Betrachtungen der wahrgenommenen Größe der Karosseriefuge im anschließenden Textabschnitt. Dabei wurden Einflussgrößen auf die wahrgenommene Größe von Karosseriefugen (z. B. Blickwinkel) untersucht und bewertet.

Die Untersuchung zur Erkennung von Anmutungsqualitäten gliedert sich in zwei Abschnitte. Zunächst wird der Begriff „Anmutungsqualität“ im Rahmen dieser Arbeit definiert und an zwei einfachen Beispielen aufgezeigt. Im Anschluss daran werden in einer statistischen Probandenbefragung signifikante Einflussgrößen auf die Anmutungsqualität ermittelt. Hierfür werden den Probanden verschiedene Fugengeometrien zur vergleichenden Bewertung vorgelegt. Anhand der Ergebnisse, d. h. der Präferenzen der Probanden für bestimmte Schlaufengeometrien, wird die Anmutungsqualität in Abhängigkeit von Fugenmerkmalen dargestellt.

Aus den beiden Teilergebnissen lässt sich dann die gesamte Kette der Wahrnehmung und Erkennung von Falzschlaufen ableiten. Die Wahrnehmung beschreibt dabei die Abbildung von geometrischen Merkmalen einer realen Schlaufe im neuronalen Netz des Gehirns. Dieses neuronale Abbild beinhaltet die wahrgenommene Schlaufenmerkmale, die nicht identisch mit der geometrischen Ausführung sein müssen (z. B. reduzierte Fugenbreite bei nicht senkrechter Betrachtung). Die Ergebnisse des Erkennens liefern dann die Verknüpfungen zwischen diesen

wahrgenommenen Merkmalen und der damit assoziierten Anmutungsqualität. Somit ist ein Zusammenhang zwischen den geometrischen Merkmalen einer Falzschlaufe und deren Anmutungsqualität hergestellt.







## 6.1 Feldstudie zur fertigungstechnischen Ausführung von Falzschlaufen

Im Rahmen der Feldstudie wurden die geometrischen Ausführungen heutiger Premiumfahrzeuge erfasst. Die festgestellten Merkmale und deren Größe wurden in den nachfolgenden Untersuchungen als Referenzen betrachtet.

### 6.1.1 Durchführung der Feldstudie

Im Rahmen der Feldstudie zur Ausführung von Falzschlaufen und Fahrzeugfugen von Premiumfahrzeugen (nach [VER02]) wurden sechs Modelle von drei Premiumherstellern betrachtet. Die untersuchten Fahrzeugmodelle sind im nachfolgenden pseudonymisiert, siehe Tabelle 6-1.

Tabelle 6-1: Untersuchte Fahrzeuge in der Feldstudie, Einteilung nach [VER02]

HERSTELLER	MODELL	BAUJAHR	FAHRZEUGKLASSE	BEZEICHNUNG	ABBILDUNG
A	1	2013	Luxusklasse	A-1-2013	
A	2	2014	Oberklasse	A-2-2014	
B	1	2013	Luxusklasse	B-1-2013	
B	2	2006	Oberklasse	B-2-2006	
B	2	2013	Oberklasse	B-2-2013	
C	1	2013	Luxusklasse	C-1-2013	

An jedem Fahrzeug wurden die Fugen zwischen Kotflügel und Vordertür sowie Vordertür und Fondtür mithilfe des in Kapitel 5.1.1 beschriebenen Lichtschnittsensors gemessen. Entlang der abgewickelten Länge der Fuge wurden im Abstand von  $\Delta y_{Mess} = 50$  mm, beginnend an der Fensterbank, Messwerte aufgenommen. Die gemessenen Rohdaten wurden mit einem Algorithmus hinsichtlich der Fugenbreite und dem Radius der gefalzten bzw. abgestellten Kante an der Fuge ausgewertet. Zusätzlich wurde an jeder Messstelle die Schlaufe vollständig (sichtbare Strakseite und verdeckte Rückseite) digitalisiert (vgl. Abbildung 6-1).

Bei der Durchführung der Feldstudie wurden Fahrzeuge in verschiedenen Autohäusern analysiert. Um eine Einflussnahme durch Außenstehende zu vermeiden, wurden sie kurzfristig ohne vorherige Ankündigung aufgesucht. Alle gemessenen Fahrzeuge waren für den direkten Verkauf an Kunden vorgesehen. Unfall- und Transportschäden, die zu irregulären Abweichungen der dimensional Eigenschaften führen können, wurden von den Anbietern auf Nachfrage verneint. Durch diese Maßnahmen kann davon ausgegangen werden, dass die analysierten Fahrzeuge

repräsentativ für die gesamte Baureihe sind. Das innerhalb der Feldstudie eingesetzte Messsystem und der Auswertalgorithmus wurden vorab auf Reproduzierbarkeit und Messgenauigkeit geprüft (Kapitel 5.1.1), wobei sehr geringe Toleranzen festgestellt wurden. Die Messergebnisse genügen den Ansprüchen an die Genauigkeit.

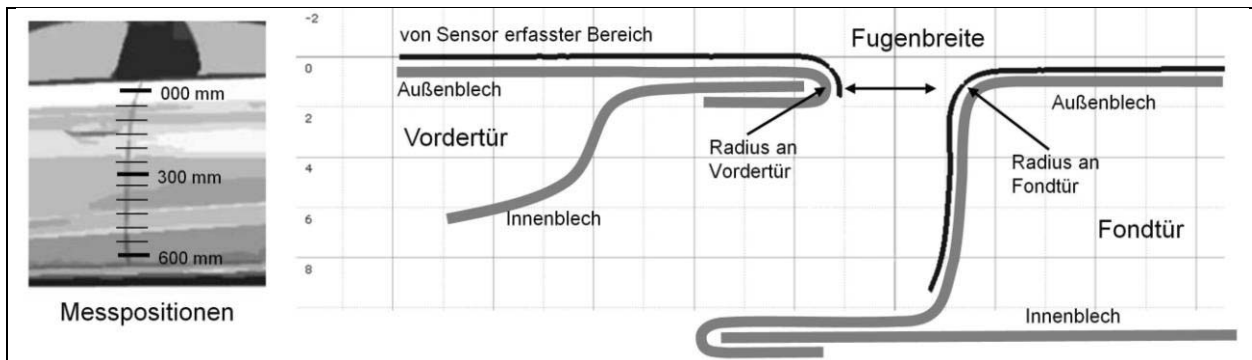


Abbildung 6-1 Messstellen am Beispiel der Fuge zwischen Vordertür und Fondtür (links) und Darstellung eines gemessenen Linienschnitts (rechts), Bild nach [AUD15B]

## 6.1.2 Ergebnisse der Feldstudie

Die geometrischen Merkmale einer Karosseriefuge werden durch die Fugenbreite und die Bauteilradien der aneinandergrenzenden Anbauteile bestimmt. Anhand der gemessenen Fugen in der Feldstudie werden heute gängige Fugenmerkmale als Referenz für die theoretischen Betrachtungen ermittelt. Hierzu werden die gemessenen Fugenbreiten und Falzradien exemplarisch dargestellt. Zusätzlich wird die „zeitliche Entwicklung“ der Merkmale anhand unterschiedlicher Fahrzeuggenerationen einer Modellreihe aufgezeigt. Die Darstellung der Ergebnisse umfasst:

- ◆ Gemessene Fugenbreite an der A-Säule von Premiumfahrzeugen
- ◆ Vergleich der Fugenbreite an der A-Säule von zwei Fahrzeuggenerationen
- ◆ Gemessene Falzradien an der Vordertür von Premiumfahrzeugen (B-Säule)
- ◆ Vergleich der Falzradien an der Vordertür von zwei Fahrzeuggenerationen (B-Säule)

Die Fugenbreiten an der A-Säule weisen große Unterschiede zwischen den Fahrzeugherstellern auf (vgl. Abbildung 6-2). Die gemessenen Werte weichen um bis zu 1 mm voneinander ab. Im Mittel beträgt die Fugenbreite 4,0 mm. Auf Höhe der Designkante (Messpositionen  $y_{Mess} = 100 \text{ mm} - 150 \text{ mm}$ ) ist eine erhöhte Fugenbreite sowie eine allgemein große Abweichung zum restlichen Fugenverlauf zu erkennen. Mit Ausnahme von Fahrzeug C-1-2013 liegt unterhalb der Designlinie bei allen Fahrzeugen ein harmonischer Verlauf der gemessenen Fugenbreite vor. Der Vergleich zweier Fahrzeuge aus unterschiedlichen Fahrzeuggenerationen (2006, 2013) zeigt eine deutliche Reduzierung der Fugenbreite in den vergangenen Jahren. Die Reduzierung beträgt im Mittel 13 %.

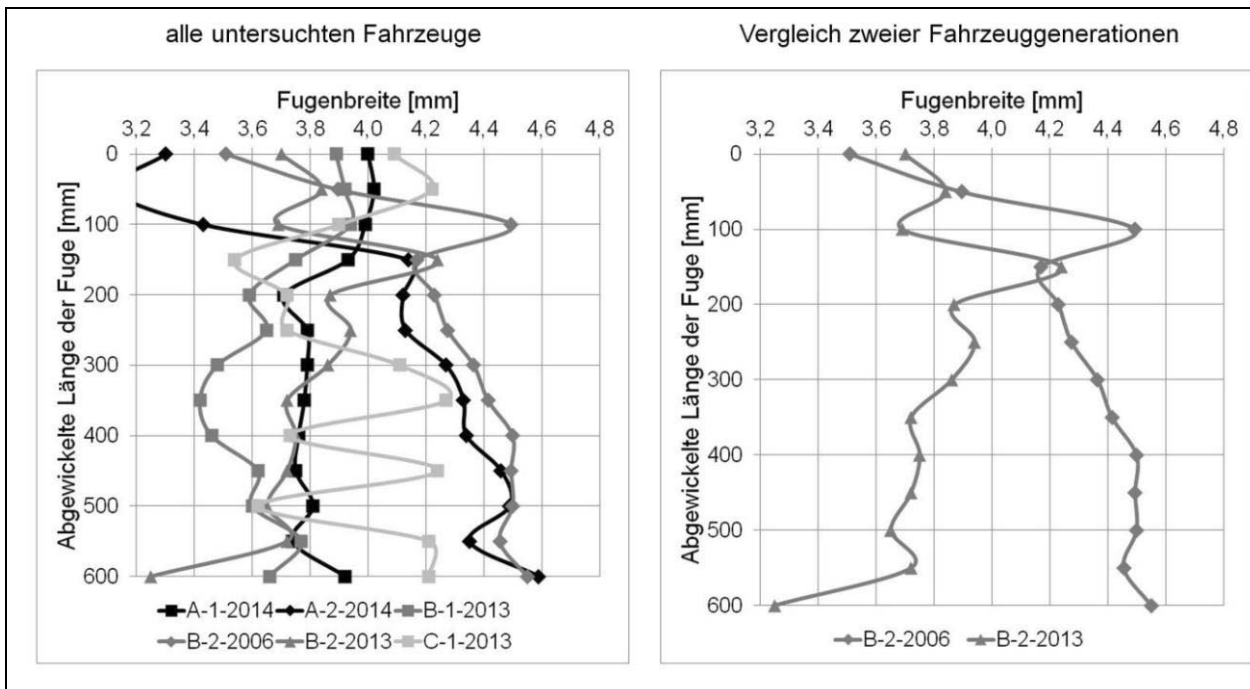


Abbildung 6-2 Gemessene Fugenbreiten an der A-Säule von Premiumfahrzeugen

Die gemessenen Falzradien an der Vordertür der Fahrzeuge an der Fuge zur Fondtür (Säule B) sind in Abbildung 6-3 dargestellt. Wie auch bei der Betrachtung der Fugenbreite zeigen sich hier deutliche Unterschiede zwischen den Herstellern, den Fahrzeugtypen und der Modelljahre. Die gemessenen Radien befinden sich größtenteils in einem Streuband zwischen 1,3 mm und 2,3 mm (einzelne Messwerte fallen höher aus). Der Mittelwert beträgt 1,8 mm. Die Messkurven weisen in einzelnen Abschnitten jeweils einen harmonischen Verlauf auf. Jedoch zeigen sich an den Rändern teilweise starke Abweichungen (z. B. Fahrzeug A-2-2014 an der Bordkante). Der Vergleich der Fahrzeuggenerationen (2006, 2013) zeigt, dass das neuere Fahrzeug absolut größere Radien aufweist. Auch sind größere Unterschiede zwischen der rechten und linken Fugenseite festzustellen (hier nicht dargestellt). Als Ursachen hierfür sind der Einsatz neuer Werkstoffe und größere Nennblechdicken für Außen- und Innenblech zu nennen. Die gemessenen Radien unterscheiden sich im Mittel um 23 %.

Mithilfe der vollständigen Schlaufendigitalisierung lassen sich zusätzlich Informationen über die Falzverbindungen sammeln. Diese Informationen, z. B. Packmaß, erlauben den Rückschluss auf Nennblechdicken. In Abbildung 6-3 sind die gemessenen Falzschlaufen aus zwei aufeinanderfolgenden Fahrzeuggenerationen der Oberklasse dargestellt. Die gemessenen Kurven zeigen, dass die neuere Fahrzeuggeneration ein höheres Packmaß aufweist. Das höhere Packmaß ist ein Indiz für höhere Nennblechdicken und legt nahe, dass für das neue Fahrzeug modernere oder andere Werkstoffe (z. B. Aluminium) verwendet werden.

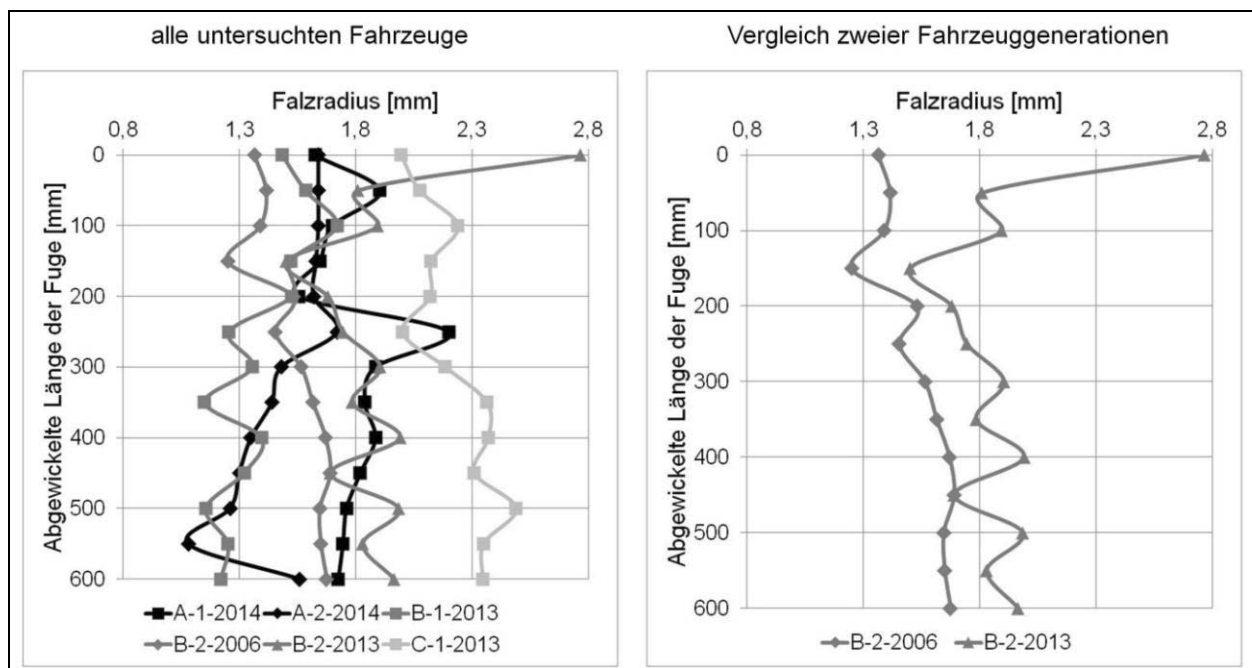


Abbildung 6-3 Gemessene Falzradien an der Vordertür (Säule B) von Premiumfahrzeugen

Die Ergebnisse der Marktanalyse zeigen in der betrachteten Fahrzeugklasse für die untersuchten Premiumhersteller ähnliche Herausforderungen. Diese betreffen sowohl die Fertigung des Bauteilradius als auch die Herstellung von dimensional hochwertigen Bauteilen:

- ◆ Die Premiumhersteller nutzen zur Fertigung der Anbauteile größtenteils identische Falzmethoden (Flachfalz). Die Radien an der Fuge sind daher ähnlich.
- ◆ Durch den Einsatz von Leichtbauwerkstoffen werden höhere Nennblechdicken benötigt, die das Packmaß und somit auch den Falzradius erhöhen. Dies kann durch den Einsatz moderner Falzmethoden (z. B. Keilfalz) teilweise kompensiert werden, falls die Beanspruchung des Werkstoffs und die zur Verfügung stehende Fertigungstechnik es zulassen.
- ◆ Die Radien an den Karosseriefugen sind nicht symmetrisch ausgeführt, z. B. weist die Vordertür an der Säule B einen Radius von 2,2 mm auf, während die Fondtür an derselben Stelle an der B-Säule einen Radius von 3,1 mm aufweist (Fahrzeug A-1-2014).
- ◆ Inhomogene Fugenbreiten resultieren aus dem unregelmäßigen Umrissverlust des Bauteils beim Falzen. Dieser Falzverlust muss zur Sicherstellung homogener Fugenverläufe bei der Auslegung der Einzelteile berücksichtigt werden.
- ◆ Komplexe Dehnungszustände (z. B. an Designkanten) erschweren die Einhaltung der vom Fahrzeugdesigner geforderten, gleichbreit bleibende Fugenbreite und des erwünschten Radius an der Falzschlaufe.
- ◆ Weisen die Kanten zweier aneinandergrenzender Bauteile nur gering schwankende Radien der Falzschlaufe auf, so lässt sich eine schmale, homogene Fugenbreite erzielen.

### 6.1.3 Ableitung der Wahrnehmungsgrenze

Die Wahrnehmung eines Designmerkmals (z. B. Karosseriefuge) ist dann möglich, wenn die Wahrnehmungsgrenze überschritten wird. Im Fall der visuellen Wahrnehmung handelt es sich um die Sichtbarkeitsgrenze, die durch die Größe der Abbildung der Fuge auf der Netzhaut bestimmt wird. Für die folgende Untersuchung wird angenommen, dass die Beobachtung im Zentrum der maximalen Sehschärfe des Auges (Auflösungsvermögen  $d_{\text{Auge}} = 1/60^\circ$ ) stattfindet. Die Wahrnehmungsgrenze ist dann erreicht, wenn die Abbildung der Fuge das Auflösungsvermögen des Auges erreicht. Die wahrgenommene Fugenbreite, d.h. die Abbildung der realen Fuge auf der Netzhaut, wird von den geometrischen Fugenmerkmalen und dem Blickwinkel des Betrachters bestimmt. So erscheint die Fuge bei Blickwinkeln, die nicht orthogonal zum Spalt ausgerichtet sind, für den Betrachter schmaler (vgl. Abbildung 6-4).

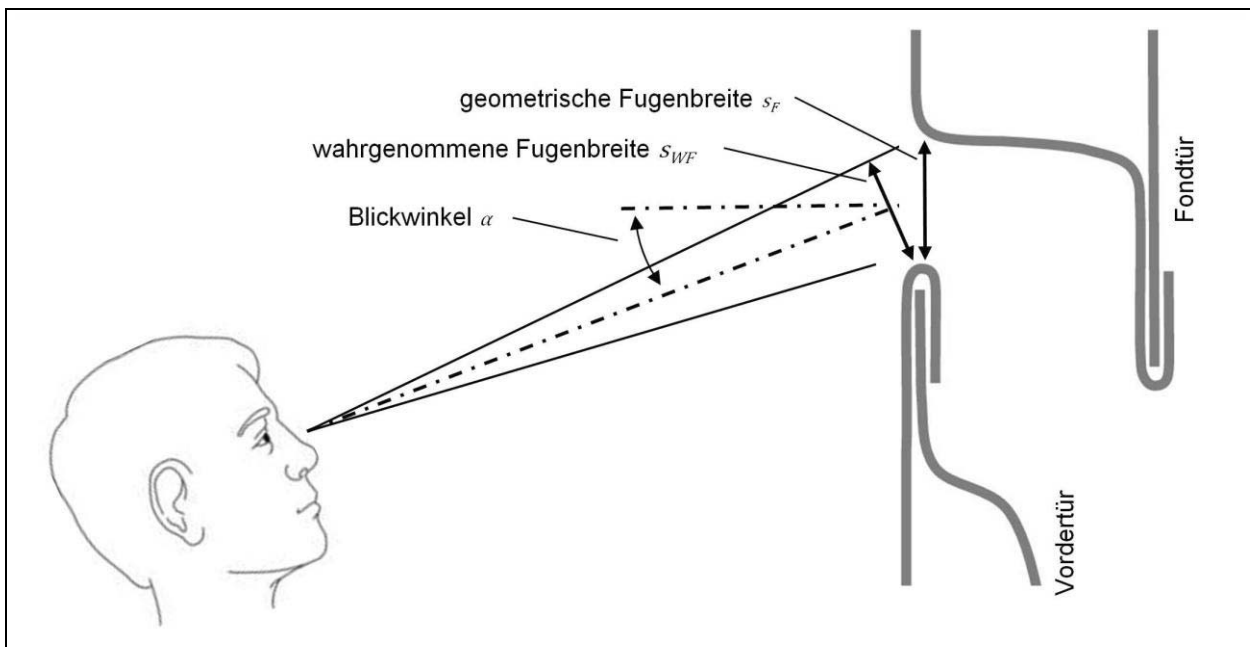


Abbildung 6-4 Abhängigkeit der wahrnehmbaren Fugenbreite einer Karosseriefuge vom Blickwinkel

Aus der trigonometrischen Beziehung von Blickabstand, wahrgenommener Objektgröße und des vom Objekt ausgefüllten Winkelmaßes  $\kappa$  im Sichtfeld des Beobachters kann die Wahrnehmungsgrenze  $s_{WG}$  ermittelt werden (vgl. Gleichung 6-1). Bei orthogonaler Betrachtung einer Fuge (Fugenbreite 2,0 mm) beträgt die Wahrnehmungsgrenze 6.8 m.

$$s_{WG} = \frac{\text{Objektgröße}}{2 \cdot \tan \frac{\kappa}{2}} = \frac{s_{WF}}{2 \cdot \tan \frac{1/60}{2}} \quad \text{Gleichung 6-1}$$

Bei nicht senkrechter Betrachtung muss die Reduktion der wahrgenommenen Fugenbreite mit betrachtet werden. Die scheinbar schmalere Fuge führt auch zu einer Verschiebung der Wahrnehmungsgrenze in Richtung der Karosseriefuge. Es zeigt sich, dass mit größer werdenden Blickwinkeln  $\alpha$  die Wahrnehmungsgrenze drastisch reduziert wird, d. h. der Betrachter muss sich näher am Objekt befinden um die Fugenbreite bewerten zu können. Innerhalb der in



Abbildung 6-5 dargestellten grauschattierten Kreise ist die Wahrnehmung der Fuge noch möglich. Die Untersuchungsergebnisse zeigen, dass große Blickwinkel ( $|\alpha| > 60^\circ$ ) die Wahrnehmbarkeit des Merkmals Fugenbreite drastisch reduzieren. So ist diese bereits bei einem Winkel von  $\alpha = 60^\circ$  um 50 % geringer ausgeprägt im Vergleich zur senkrechten Betrachtung. Nachfolgend werden deshalb ausschließlich Blickwinkel  $|\alpha| < 60^\circ$  betrachtet.

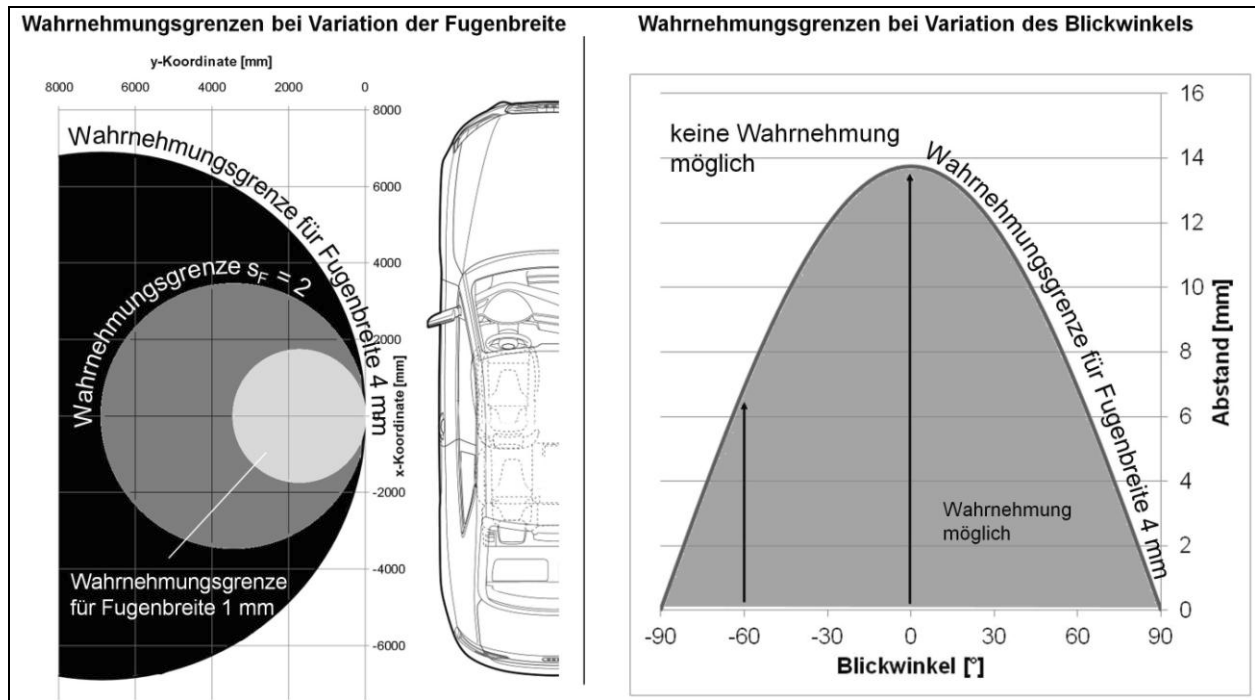


Abbildung 6-5 Ermittlung der Wahrnehmungsgrenzen beim Betrachten von Karosseriefugen

## 6.2 Betrachtung der wahrgenommenen Schlaufenmerkmale

Die Erkennung der Anmutungsqualität einer Karosseriefuge durch einen Betrachter setzt die Wahrnehmung der Fuge sowie deren Merkmale voraus. Die Wahrnehmungsgrenze bei der Betrachtung von heute gängigen Fugengeometrien wurde im vorangegangenen Abschnitt aufgezeigt. In diesem Abschnitt werden die sichtbaren und wahrnehmbaren Merkmale von Karosseriefugen beschrieben. Ein Anschauungsmodell einer Fuge dient dann zur Untersuchung und Quantifizierung von Einflussgrößen auf diese wahrnehmbaren Merkmale. Hierbei werden in einer Parameterstudie betrachtungsabhängige (z. B. Blickwinkel), technische und fertigungstechnische (z. B. Bauteilversatz) Parameter untersucht.

### 6.2.1 Methodik zur theoretischen Untersuchung von wahrnehmbaren Schlaufenmerkmalen

Zur Quantifizierung der Einflussgrößen auf die Wahrnehmung von Fugen- und Schlaufenmerkmalen wurde eine Parameterstudie durchgeführt. Die Basis der Studie bildete ein Anschauungsmodell einer Karosseriefuge, das aufgrund seines parametrisierten Aufbaus die gezielte Variation von Einflussparametern ermöglichte. Die mithilfe dieses Anschauungsmodells

erzeugten Fugenansichten wurden hinsichtlich der charakteristischen Fugenmerkmale bewertet. Die Bewertung erfolgte automatisiert um objektive und reproduzierbare Ergebnisse zu erhalten. Im Anschluss an die Auswertung der Bilder wurden die Ergebnisse bewertet und die Signifikanz der Einflussparameter auch die jeweilige Fugencharakteristik aufgezeigt.

### Aufbau des Anschauungsmodells

Aus den Betrachtungen in [DÉS15] ist bekannt, dass bei der qualitativen Bewertung von Oberflächen und Geometrien die drei Komponenten Beleuchtung, Objekt und Betrachter berücksichtigt werden müssen. Im Rahmen dieser Untersuchung wurde daher die relative Position dieser drei Faktoren variiert. Das Anschauungsmodell, mit dem die Wahrnehmung von Karosseriefugen untersucht wurde, besteht aus einer parametrisierten Konstruktion der Karosseriefuge (z. B. zwischen Vorder- und Fondtür) mit Radien an den Bauteilkanten, variabler Beleuchtung und der Betrachterposition in einer physikalisch bestimmten Umgebung, Abbildung 6-6. Das Anschauungsmodell ermöglicht somit die separate Untersuchung jedes Einflussparameters mit definierten Randbedingungen.

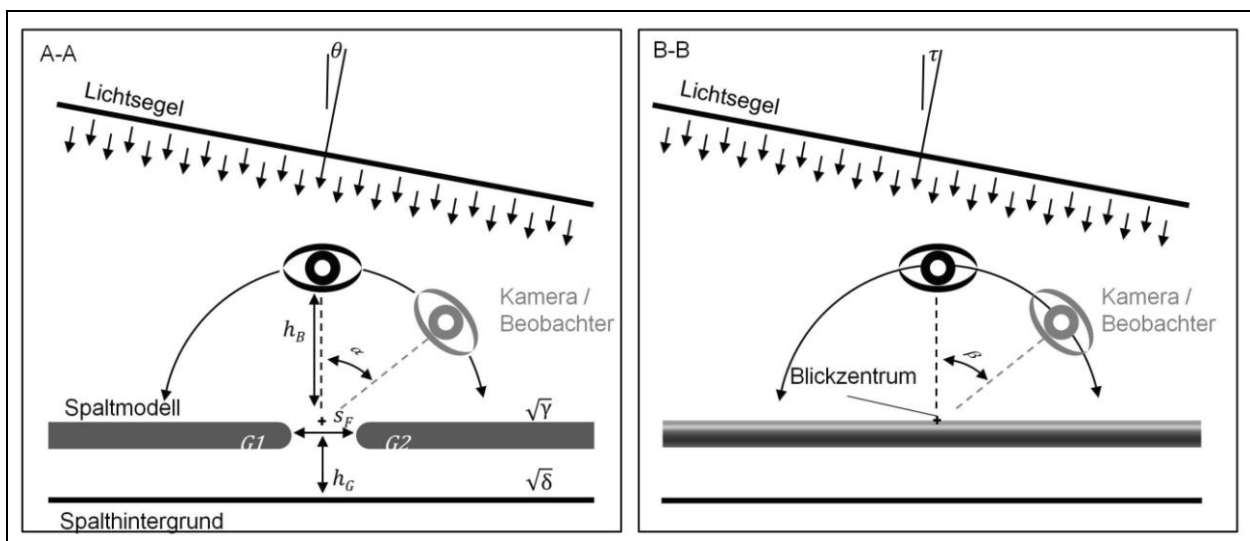


Abbildung 6-6 Transversaler (A-A) und longitudinaler Schnitt (B-B) durch das Anschauungsmodell zur Analyse der Wahrnehmung von Karosseriefugen und Bezeichnung der Modellparameter

Das Modell ist gekennzeichnet durch:

- ◆ den Blickwinkel  $\alpha$  des Betrachters orthogonal zum Spaltverlauf ( $\alpha = 0^\circ \rightarrow$  senkrecht zur Oberfläche, nach rechts positiv, nach links negativ),
- ◆ den Blickwinkel  $\beta$  des Betrachters parallel zum Spaltverlauf ( $\beta = 0^\circ \rightarrow$  senkrecht zur Oberfläche, nach oben positiv, nach unten negativ),
- ◆ das Blickzentrum  $Z$  in der Mitte der Spaltweite,
- ◆ die Punktnormale  $N$  im Blickzentrum  $Z$  senkrecht zur Oberfläche,
- ◆ den Blickabstand  $h_B$  zwischen Betrachter und Blickzentrum,

- ◆ den Lichteinfallswinkel  $\theta$  orthogonal zum Spaltverlauf  
( $\theta = 0^\circ \rightarrow$  senkrecht zur Oberfläche, nach rechts positiv, nach links negativ),
- ◆ den Lichteinfallswinkel  $\tau$  parallel zum Spaltverlauf  
( $\tau = 0^\circ \rightarrow$  senkrecht zur Oberfläche, nach oben positiv, nach unten negativ),
- ◆ die Fugenbreite  $s_F$  horizontal gemessen zwischen den Umrisslinien der Anbauteile,
- ◆ die linke Falzschlaufengeometrie  $G1$ ,
- ◆ die rechte Falzschlaufengeometrie  $G2$ ,
- ◆ den vertikalen Versatz der Bauteile  $s_V$ ,
- ◆ den flächigen Spalthintergrund  $H$  parallel zur Oberfläche des Spaltmodells,
- ◆ den senkrechten Abstand  $h_G$  des Spalthintergrunds zur Oberfläche des Spaltmodells,
- ◆ die Oberflächeneigenschaft  $\gamma$  des Spaltmodells  
( $\gamma = 0 \rightarrow$  absolute Lichtabsorption,  $\gamma = 1 \rightarrow$  volle Lichtreflektion),
- ◆ die Oberflächeneigenschaft  $\delta$  des Spalthintergrunds  
( $\delta = 0 \rightarrow$  absolute Lichtabsorption,  $\delta = 1 \rightarrow$  volle Lichtreflektion).

Die Falzschlaufen  $G1$  und  $G2$  zeichnen sich durch ihre geometrische Form aus. Beide haben ellipsenförmige Querschnitte mit der horizontalen Halbachse  $SSL$  (sichtbare Schlaufenlänge) und der vertikalen Halbachse  $SST$  (sichtbare Schlaufentiefe). Für  $SSL = SST$  stellt die Falzschleife einen perfekten Kreis mit  $R = SSL$  dar, siehe Abbildung 6-7.

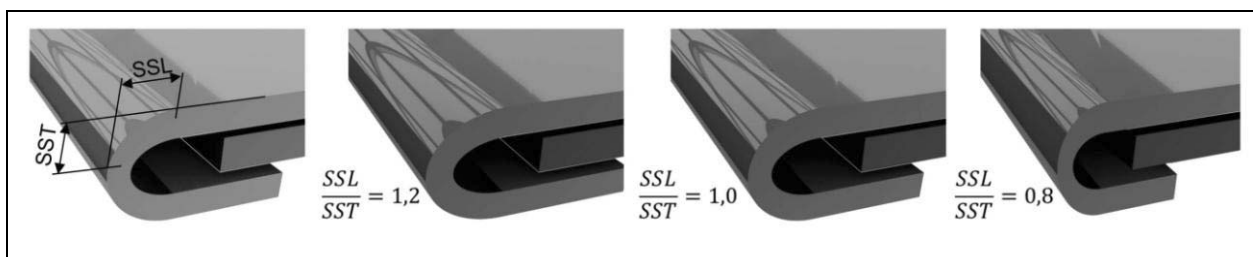


Abbildung 6-7 Darstellung der Falzschlaufen im Anschauungsmodell für verschiedene Quotienten aus sichtbarer Schlaufenlänge und sichtbarer Schlaufentiefe

Nach [EUG09] stellt die Reflektion auf der Oberfläche eines Objekts nicht nur eine physikalische Eigenschaft des Objekts dar, sondern bildet vielmehr eine separate Teilgestalt. Nicht nur die Gesamtmenge an Licht, das von einer Oberfläche reflektiert wird, sondern auch die Schärfe der reflektierten Bilder beeinflussen die Wahrnehmung. Dementsprechend werden die hier verwendeten Oberflächen mit reflektierenden Eigenschaften versehen.

Im Rahmen der Untersuchung wurden digitale Bilder aus dem Blickpunkt des Beobachters erstellt. Innerhalb dieser Bilder wurden die Helligkeitsgradienten betrachtet, um eine Aussage über die Wahrnehmung in Abhängigkeit von den Einflussparametern zu treffen (siehe Auswertungssystematik).

In den Untersuchungen von [FER14] wird gezeigt, dass bei der Darstellung von Objekten in Bildern zwischen der Qualität des Mediums (z. B. Pixel) und der Qualität der Information im Bild unterschieden werden muss. Bei der vergleichenden sequentiellen Darstellung von Bildern spielt die Qualität des Mediums bei der Erkennung von visuellen Eigenschaften eine untergeordnete Rolle. Für die Untersuchung werden daher Bilder mit identischer Bildgröße, Auflösung und Helligkeit erzeugt.

### Auswertungssystematik

Das zuvor vorgestellte Anschauungsmodell von Karosseriefugen dient der Erzeugung von definierten Ansichten der Fuge zur Quantifizierung von Einflussgrößen auf die Wahrnehmung. Die Auswertung der erstellten Ansichten folgt den an einer realen Fuge sichtbaren Größen. Diese charakteristischen Größen sind in Abbildung 6-8 für senkrechte Betrachtungswinkel dargestellt und wurden zur Kalibrierung des Ansichtsmodells verwendet. Generell sind beide Größen stets als momentane, von den Licht- und Blickbedingungen abhängige Größen zu sehen.

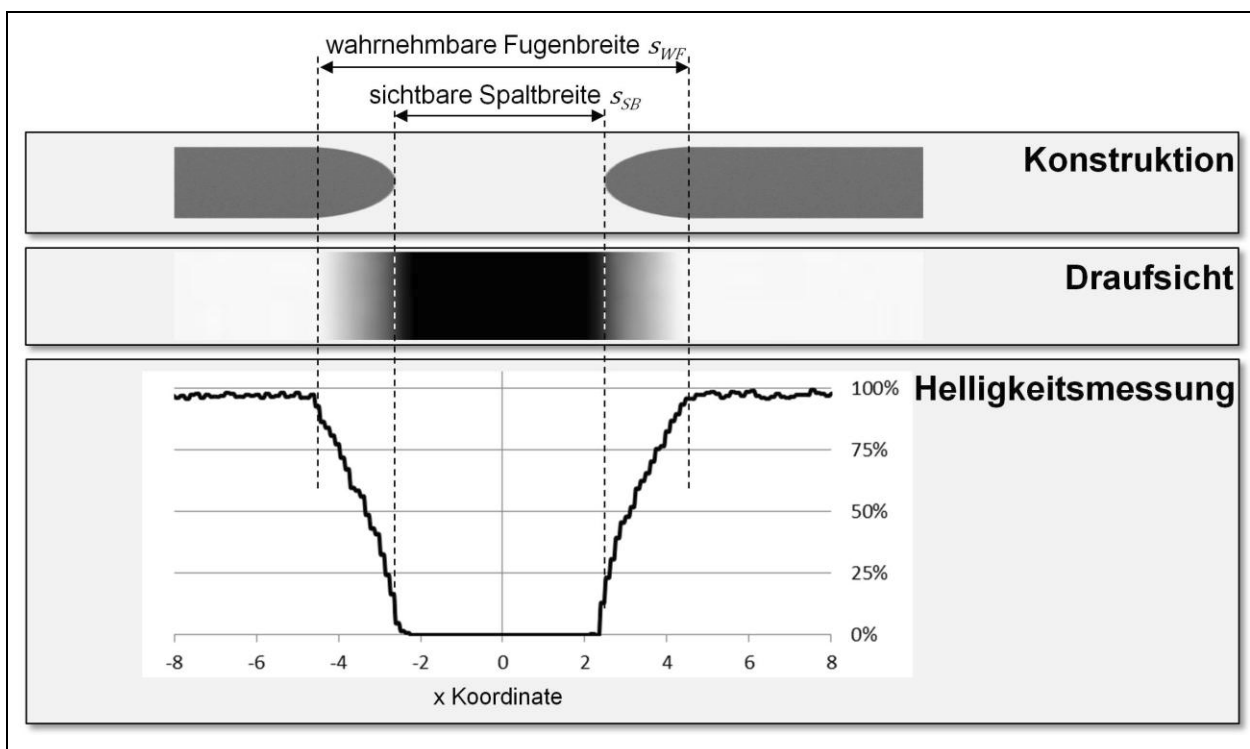


Abbildung 6-8 Schnittdarstellung des konstruierten Ansichtsmodells (oben), Ansicht von oben auf das Ansichtsmodell (mittig) und Helligkeitsverteilung in einem virtuellen Schnitt durch das Ansichtsmodell zur Ermittlung der wahrnehmbaren Fugenbreite und der sichtbaren Spaltbreite (unten)

Die sichtbare Spaltbreite  $s_{SB}$  bezeichnet die aus einer definierten Blickposition und bei definierten Lichtverhältnissen sichtbare Strecke zwischen den benachbarten Anbauteilen, die anhand der minimalen Helligkeitswerte innerhalb der Ansicht deutlich zu erkennen ist. Die wahrgenommene Fugenbreite  $s_{WF}$  bezeichnet die momentan wahrnehmbare Strecke reduzierter

Helligkeit an der Fuge benachbarter Anbauteile und umfasst auch stets die sichtbare Spaltbreite. Anfang und Ende der Strecke sind durch sich ändernde Helligkeitswerte auf den Bauteilen gekennzeichnet. Beide charakteristischen Strecken sind in den erstellten Ansichten anhand der messbaren Helligkeitswerte der Pixel bestimmbar. Hierzu wird ein virtueller Schnitt senkrecht zum sichtbaren Fugenverlauf im Blickzentrum erstellt, siehe Abbildung 6-8. Sowohl Anfang als auch Ende der Strecke reduzierter Helligkeit (wahrnehmbare Fugenbreite) sind durch ein Abfallen der Helligkeit auf 95 % der maximalen Helligkeit innerhalb des virtuellen Schnitts definiert. Die sichtbare Spaltbreite ergibt sich aus der Länge der Strecke mit Helligkeitswerten  $< 5\%$  der maximalen Helligkeit. Die Quantifizierung der charakteristischen Größen erlaubt nun die gezielte Untersuchung der Einflussfaktoren.

### 6.2.2 Ergebnisse der theoretischen Betrachtung

Die Studie zur Quantifizierung der Einflussfaktoren und deren Bewertung wurde mithilfe der Statistiksoftware Design-Expert durchgeführt. Die Untersuchung der Einflussfaktoren auf die wahrnehmbare Fugenbreite untergliedert sich in zwei Teile. In der ersten Studie wurden primäre Einflussfaktoren (z. B. Blickwinkel und Lichtbedingungen) auf die wahrnehmbare Fugenbreite betrachtet. Dies dient einerseits der Bewertung von technisch nicht veränderbaren Randbedingungen (z. B. Blickwinkel) hinsichtlich deren Beeinflussung der wahrgenommenen Fugenbreite, andererseits werden ideale Fugengeometrien (d.h. ohne fertigungstechnische Prozessschwankungen) betrachtet. In der zweiten Studie erfolgte dann die Betrachtung von fertigungstechnischen Einflussfaktoren (z. B. Bündigkeit).

Tabelle 6-2: Merkmale des Anschauungsmodells und deren Stufen zur Quantifizierung der primären Einflussfaktoren

MODELLMERKMAL	MERKMALSWERT IM VERSUCHSPLAN CODIERUNG IM VERSUCHSPLAN		MODELLMERKMAL	MERKMALSWERT IM VERSUCHSPLAN CODIERUNG IM VERSUCHSPLAN	
	-1	+1		-1	+1
Blickwinkel $\alpha$	0°	+36°	Blickabstand $h_B$	140 mm	
Blickwinkel $\beta$	0°	+36°	Hintergrundabstand $h_G$	8 mm	12 mm
Lichteinfallswinkel $\theta$	0°	+36°	Fugenbreite $s_F$	3,2 mm	4,8 mm
Lichteinfallswinkel $\tau$	0°	+36°	Modelloberfläche $\gamma$	1	
Schlaufengeometrie $G1 = G2$	R = 1,34 mm	R = 2,04 mm	Hintergrundoberfläche $\delta$	0	

#### Primäre Einflussfaktoren auf die wahrnehmbare Fugenbreite

Die während der Studie variierten Faktoren und deren Abstufung sowie die Kodierung innerhalb des Versuchsplans sind in Tabelle 6-2 dargestellt. Es wurden 7 Parameter variiert (jeweils 2 Stufen).

Die mit dem Ansichtsmodell ermittelten Fugenansichten sind exemplarisch in Abbildung 6-9 dargestellt. Die Auswertung erfolgt analog zur vorgestellten Auswertemethodik (Kap. 6.2.1).

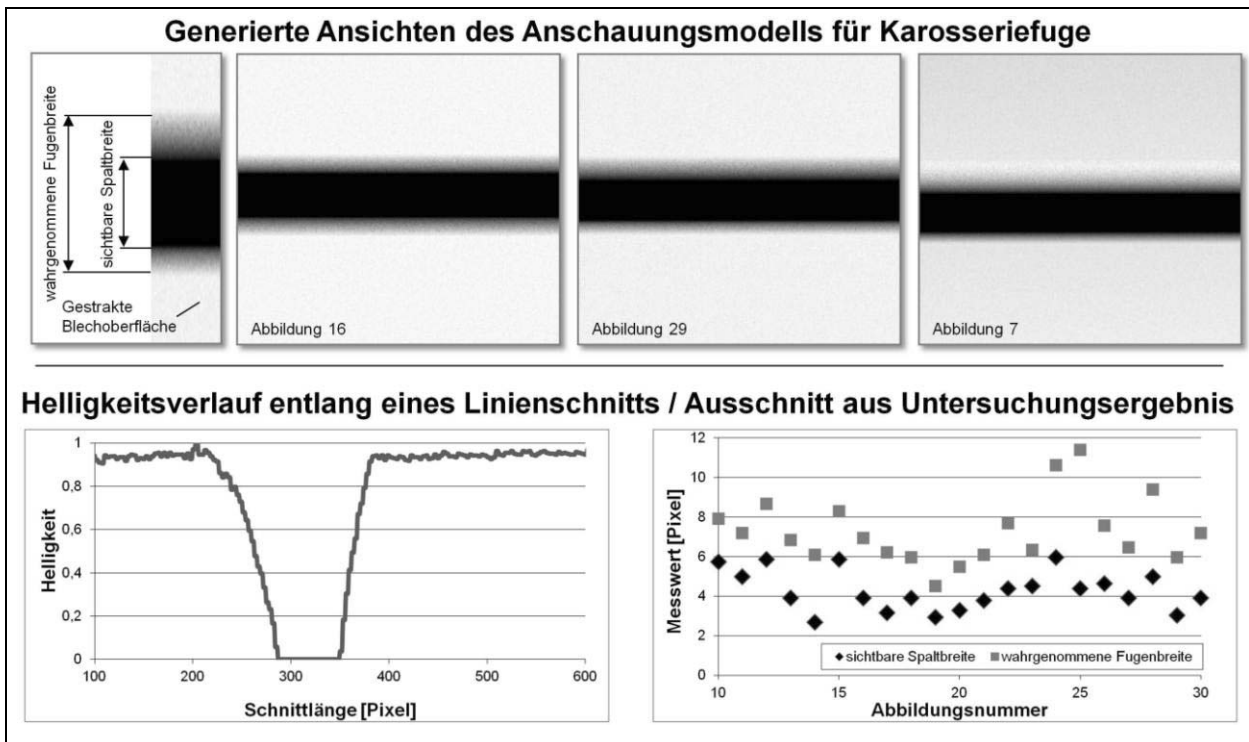


Abbildung 6-9 Auszug aus den Ansichtsmodellen zur Untersuchung der Wahrnehmung von Schlaufenmerkmalen und gemessene sichtbare Spaltbreite und wahrnehmbare Fugenbreite (Ausschnitt)

Zunächst werden die Ergebnisse hinsichtlich der Beeinflussung der sichtbaren Spaltbreite betrachtet. Die Ergebnisse zeigen, dass die sichtbare Spaltbreite im Wesentlichen von den Faktoren Fugenbreite  $s_F$  und Blickwinkel  $\alpha$  abhängt, die zusammen ca. 96 % des Messwerts bestimmen. Dabei weist die Fugenbreite mit 76 % den größten Effekt auf. Alle weiteren Faktoren sowie die Wechselwirkungen (hier nicht dargestellt) zwischen ihnen haben nur einen äußerst geringen Einfluss, siehe Abbildung 6-10. Der trigonometrische Zusammenhang zwischen Blickwinkel und Fugenbreite (vgl. Kap 6.1.3) bestimmt den Wert der sichtbaren Spaltbreite (Strecke zwischen zwei Anbauteilen mit geringsten Helligkeitswerten). Eine Vergrößerung des sichtbaren Spalts bei nicht senkrechter Betrachtung infolge einer Veränderung der Falzradien am Spalt tritt aufgrund der verhältnismäßig kleinen Radien kaum ins Gewicht. Auch eine Variation der Lichteinfallswinkel (längs oder quer zur Fuge) führt zu keiner sichtbaren Aufhellung des Fugenrands im Vergleich zur vollreflektierenden Oberfläche des Spaltmodells. Die Auswertung der Fugenbilder hinsichtlich der wahrnehmbaren Fugenbreite erfolgt nach derselben Systematik. Die Darstellung der Ergebnisse in einem Paretdiagramm, das einzelne Effekte ab 4 % als signifikant bewertet, zeigt, dass im Vergleich zu den vorangegangenen Betrachtungen mehr Einflussgrößen zu betrachten sind (vgl. Abbildung 6-11). Den größten Einfluss hat die Fugenbreite  $s_F$ , gefolgt von Bauteilradius  $R$ , Lichteinfallswinkel  $\theta$  und Blickwinkel  $\alpha$ . Die restlichen Hauptfaktoren sowie die Wechselwirkungen tragen nur sehr wenig zum Ergebnis bei. Die Fugenbreite sowie der Bauteilradius stellen positive Effekte dar, d. h. höhere Eingangswerte

führen zu größeren Ausgangsgrößen. Dies wird auch anhand einer einfachen senkrechten Betrachtung des Spalts deutlich. Der Lichteinfallswinkel  $\theta$  und der Blickwinkel  $\alpha$  stellen negative Effekte dar, d. h. eine Erhöhung der Eingangswerte führt zu geringeren Systemantworten. Ebenso wie bei der sichtbaren Fugenbreite führen größere Blickwinkel  $\alpha$  zu kleineren wahrnehmbaren Streckenlängen. Jedoch ist der Effekt deutlich geringer. Der Lichteinfallswinkel  $\theta$ , der für die momentane sichtbare Spaltbreite keinen Effekt aufweist, nimmt hier eine starke Rolle ein.

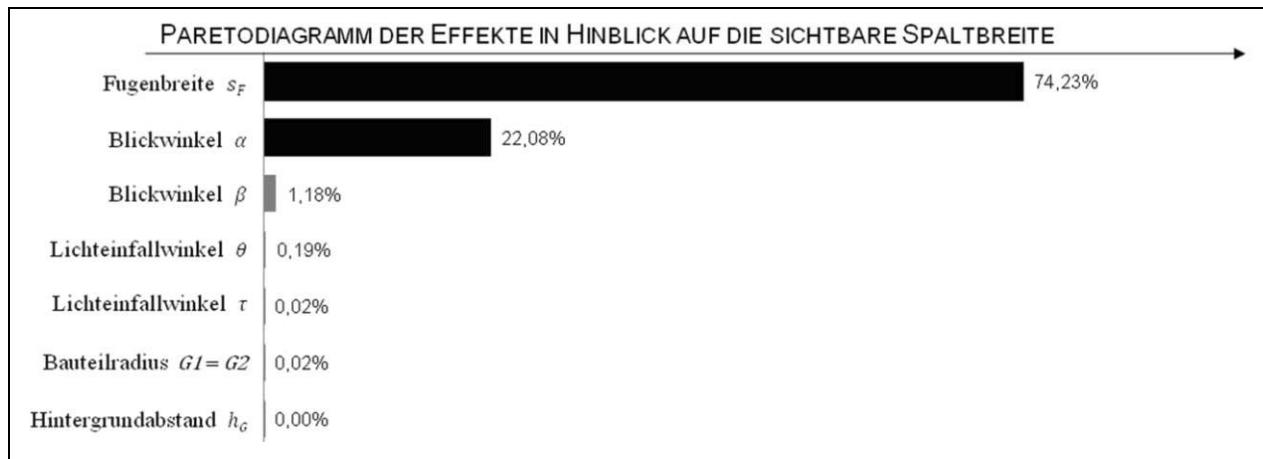


Abbildung 6-10 Paretodiagramm der Effekte der primären Einflussfaktoren auf die sichtbare Spaltbreite

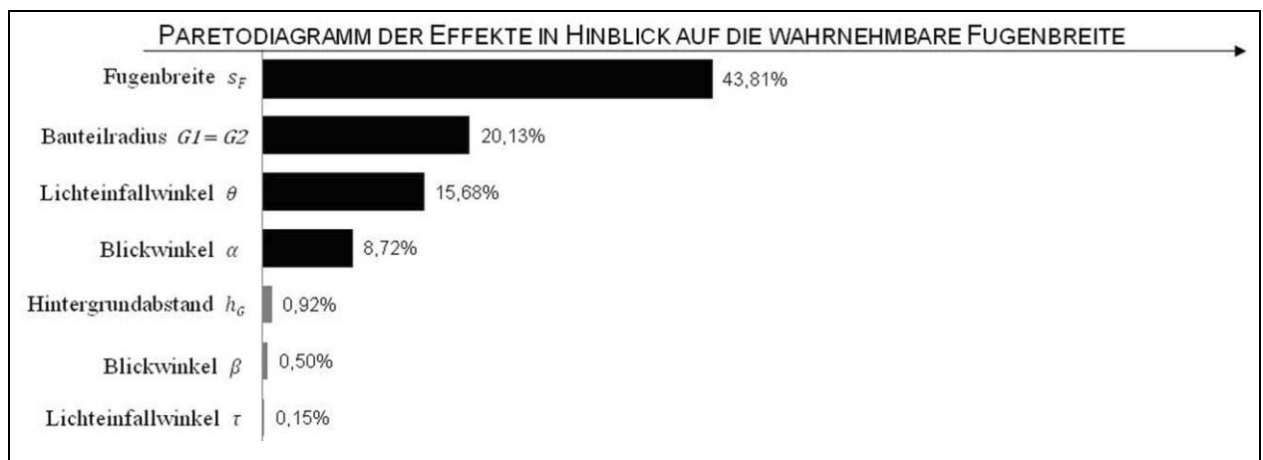


Abbildung 6-11 Paretodiagramm der Effekte der primären Einflussfaktoren auf die wahrnehmbare Fugenbreite

Die gemeinsame Betrachtung beider zuvor aufgeführten Ergebnisse zeigt, dass die konstruktiv festgelegte Fugenbreite und der Betrachtungswinkel  $\alpha$  die Wahrnehmung der Karosseriefugen dominieren. Die tatsächliche Größe des Bauteilradius und der Lichteinfallswinkel  $\theta$  leisten ebenfalls einen erheblichen Beitrag, während der Hintergrundabstand  $h_G$ , der Blickwinkel  $\beta$  und der Lichteinfallswinkel  $\tau$  sowie die Wechselwirkungen zwischen den Hauptfaktoren keine nennenswerten Effekte zeigen. Zur Wahrnehmung von Karosseriefugen ist somit festzuhalten, dass bei der Auslegung und Optimierung dieser Fugen der Einfluss der Peripherie (z. B. Lichteinfall) zu berücksichtigen ist.

Dies wird anhand eines Fallbeispiels ausgeführt, das sich mit den Fugen zwischen Kotflügel und Frontklappe (Fuge 1) sowie zwischen Frontklappe und Scheinwerfer (Fuge 2) befasst. Beide Fugen treffen an der äußeren oberen Ecke des Scheinwerfers zusammen (Abbildung 6-12). Diese Stelle ist von einem Betrachter, der sich in Fahrtrichtung vor dem Fahrzeug befindet und auf diese Stelle blickt, sichtbar. Für einen Punkt A der Fuge 1 gilt somit:

- ◆ Blickwinkel  $\alpha_A = 0^\circ$ , Blickwinkel  $\beta_A = 50^\circ$
- ◆ Lichteinfallswinkel  $\theta_A = 0^\circ$ , Lichteinfallswinkel  $\tau_A = 0^\circ$
- ◆ Schlaufengeometrie  $G1 = G2$ , mit  $R = 2,0$  mm
- ◆ Blickabstand  $h_B$ , Hintergrundabstand  $h_G$ , Spaltweite  $s_F$ , Modelloberfläche  $\gamma$ , Hintergrundoberfläche  $\delta$  entsprechen Fuge 2

Fuge 2 verläuft quer zur Fuge 1, somit drehen sich Blickwinkel und Beleuchtung relativ zum Betrachter um  $90^\circ$ . Somit gilt für einen Punkt B der Fuge 2:

- ◆ Blickwinkel  $\alpha_B = 50^\circ$ , Blickwinkel  $\beta_B = 0^\circ$
- ◆ Lichteinfallswinkel  $\theta_B = 60^\circ$ , Lichteinfallswinkel  $\tau_B = 0^\circ$
- ◆ Schlaufengeometrie  $G1 = G2$ , mit  $R = 2,0$  mm
- ◆ Blickabstand  $h_B$ , Hintergrundabstand  $h_G$ , Spaltweite  $s_F$ , Modelloberfläche  $\gamma$ , Hintergrundoberfläche  $\delta$  entsprechen Fuge 1

Während bei Betrachtung der Fuge 1 zwischen Vorderkotflügel und Frontklappe der Lichteinfall nahezu senkrecht zur Fuge stattfindet ( $\theta_A = 0^\circ$ ), beträgt dieser bei der Fuge 2 zwischen Frontklappe und Leuchte bzw. Stoßfänger bereits  $\theta_B = 60^\circ$ . Die wahrgenommene Fugenbreite reduziert sich somit im Vergleich zu Fuge 1 um 30 %. Das Resultat ist die Wahrnehmung unterschiedlicher Fugenmaße, obwohl sie konstruktiv und fertigungstechnisch identisch ausgeführt sind.



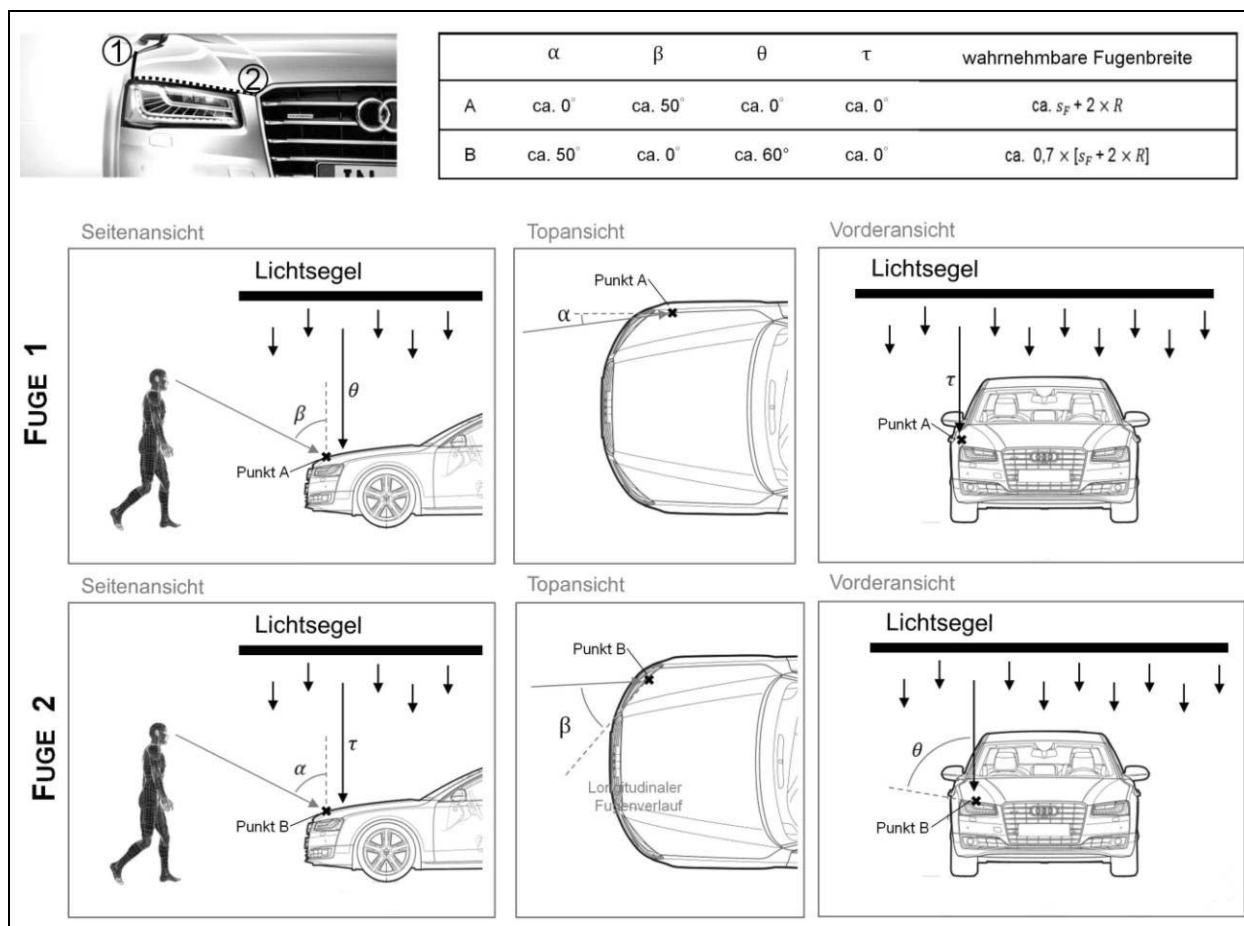


Abbildung 6-12 Darstellung zum Fallbeispiel für die Auswirkung unterschiedlicher Beleuchtungssituationen relativ zur Fuge auf die wahrgenommene Fugenbreite, Bilder nach [AUD15B]

### Sekundäre Einflussfaktoren auf die wahrgenommene Fugenbreite

Nachdem die Auswirkung der Fahrzeugumgebung bzw. des Betrachtungsraums bekannt sind, werden nun die fertigungstechnischen Details (sekundäre Einflussfaktoren) an der Karosseriefuge betrachtet. Hierzu zählen:

- ◆ asymmetrische Falzschlaufen an den gegenüberliegenden Kanten der Fuge  $G1/G2$
- ◆ Versatz der gegenüberliegenden Bauteile in z-Normalenrichtung  $s_V$
- ◆ Verhältnis der Halbachsen bei elliptisch geformten Falzschlaufen  $SSL/SST$
- ◆ Wechselwirkungen mit den Haupteinflussfaktoren aus der vorangegangenen Betrachtung der primären Einflussfaktoren (z. B. Blickwinkel  $\alpha$ )

Der Versuchsplan (vgl. Tabelle 6-3) umfasste die Variation von fünf Parametern in zwei Stufen. Im Gegensatz zur Betrachtung der primären Einflussfaktoren wurden hier auch Wechselwirkungen zwischen den Faktoren mit betrachtet.

Die Ergebnisse werden für die sichtbare Spaltbreite und die wahrgenommene Fugenbreite getrennt dargestellt. Der signifikante Haupteffekt der sekundären Einflussparameter auf die sichtbare Spaltbreite entspricht den Resultaten der bereits untersuchten Primärparameter. Hier

zeigt sich ebenfalls die Bedeutung des Betrachtungswinkels. Die geometrischen Bauteilfaktoren Asymmetrie, Bauteilversatz und das Halbachsenverhältnis besitzen nur einen sehr geringen Einfluss, siehe Abbildung 6-13. Die Ursache hierfür entspricht den zuvor ausgeführten Erläuterungen bei den primären Einflussgrößen. Die sichtbare Spaltbreite wird durch die trigonometrische Beziehung zwischen Blickwinkel und Fugenbreite bestimmt. Die im Vergleich zur Fugenbreite kleinen Werte des Bauteilversatzes und der Bauteilradien haben nur einen sehr geringen Einfluss.

Tabelle 6-3: Merkmale und Stufen des Anschauungsmodells zur Quantifizierung der sekundären Einflussfaktoren

MODELLMERKMAL	MERKMALSWERT IM VERSUCHSPLAN CODIERUNG IM VERSUCHSPLAN		MODELLMERKMAL	MERKMALSWERT IM VERSUCHSPLAN CODIERUNG IM VERSUCHSPLAN	
	-1	+1		-1	+1
Blickwinkel $\alpha$	0°	+36°	Blickabstand $h_B$	140 mm	
Blickwinkel $\beta$	0°		Hintergrundabstand $h_G$	8 mm	
Lichteinfallswinkel $\theta$	0°	+36°	Fugenbreite $s_F$	4,0 mm	
Lichteinfallswinkel $\tau$	0°		Halbachsenverhältnis $SSL/SST$	0,8	1,2
Schlaufenasymmetrie $G1/G2$	0,8	1,2	Modelloberfläche $\gamma$	1	
Bauteilversatz	-1,0 mm	+1,0 mm	Hintergrundoberfläche $\delta$	0	

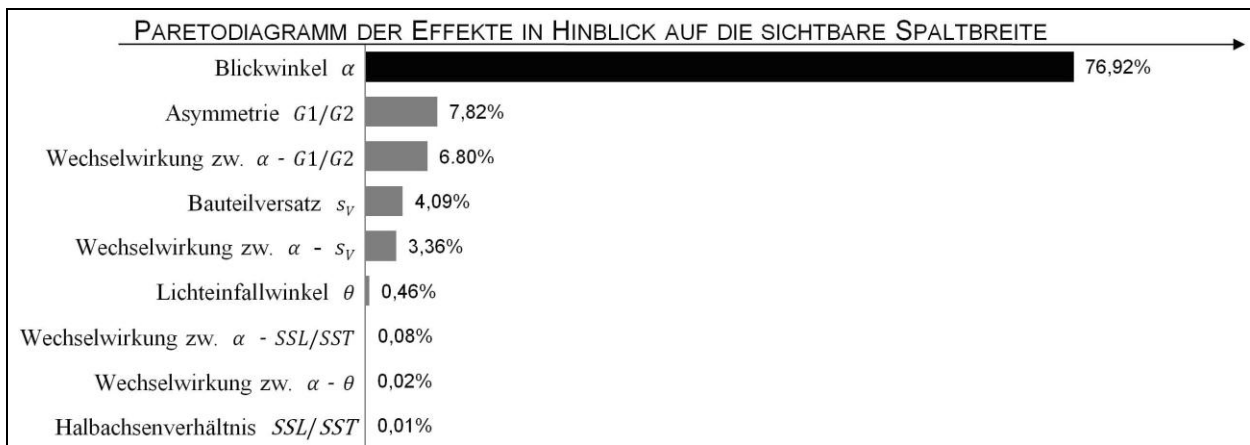


Abbildung 6-13 Paretodiagramm der Effekte der sekundären Einflussfaktoren auf die sichtbare Spaltbreite

Zusätzlich zur sichtbaren Fugenbreite wird die von einem Beobachter wahrnehmbare Fugenbreite untersucht. Die Auswertung der berechneten Fugendarstellungen zeigt, dass im Vergleich zu den vorher genannten Resultaten eine große Anzahl von signifikanten Hauptfaktoren und Wechselwirkungen auftritt. Der Blickwinkel  $\alpha$  stellt wiederum den wichtigsten Einflussfaktor dar, siehe Abbildung 6-14. Zu den signifikanten Einzelfaktoren zählt ebenso die Asymmetrie der Falzschlaufen an der Fuge. Diese hat auch starke Wechselwirkungen mit anderen, nicht fertigungsbedingten Faktoren. So zeigen sich signifikante Wechselwirkungen mit dem Lichteinfall und der Beobachterposition. Der fertigungstechnische Einflussfaktor Bauteilversatz und das Halbachsenverhältnis der Falzschlaufe weisen keinen nennenswerten

Haupteffekt auf. Jedoch ist deren Kombination von Bedeutung: Diese trägt ca. 16 % zur wahrgenommenen Fugenbreite bei.

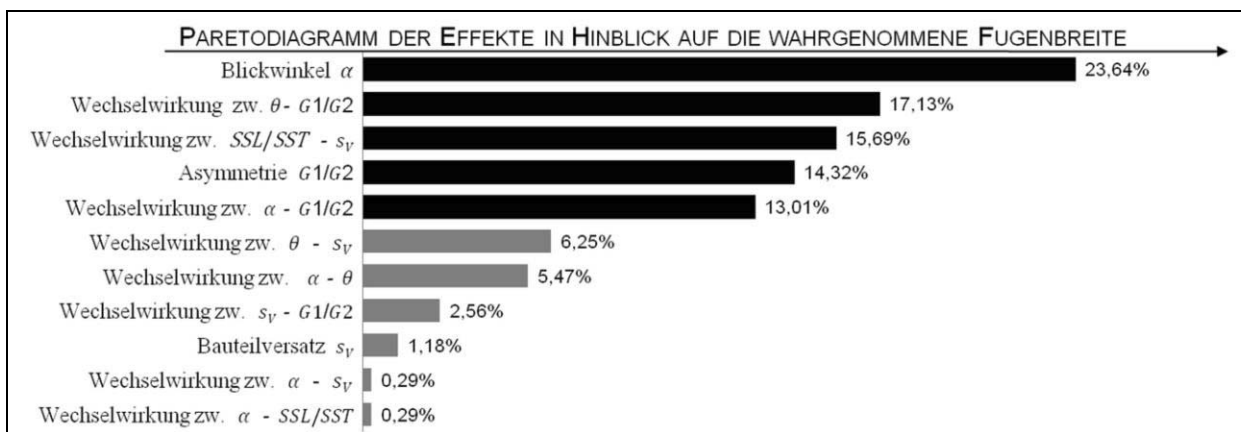


Abbildung 6-14 Paretodiagramm der Effekte der sekundären Einflussfaktoren auf die wahrgenommenen Fugenbreite

Anhand des Fallbeispiels 2 (Abbildung 6-15) werden Möglichkeiten zur Gestaltung von Karosseriefugen mit dem Ziel der Kompensation unterschiedlich wahrgenommener Fugenbreiten vorgestellt. Ausgehend von der dargestellten Blicksituation werden die Fugen zwischen Seitenwandrahmen und Heckklappe (Fuge 1) sowie Heckspoiler und Heckklappe (Fuge 2) betrachtet.

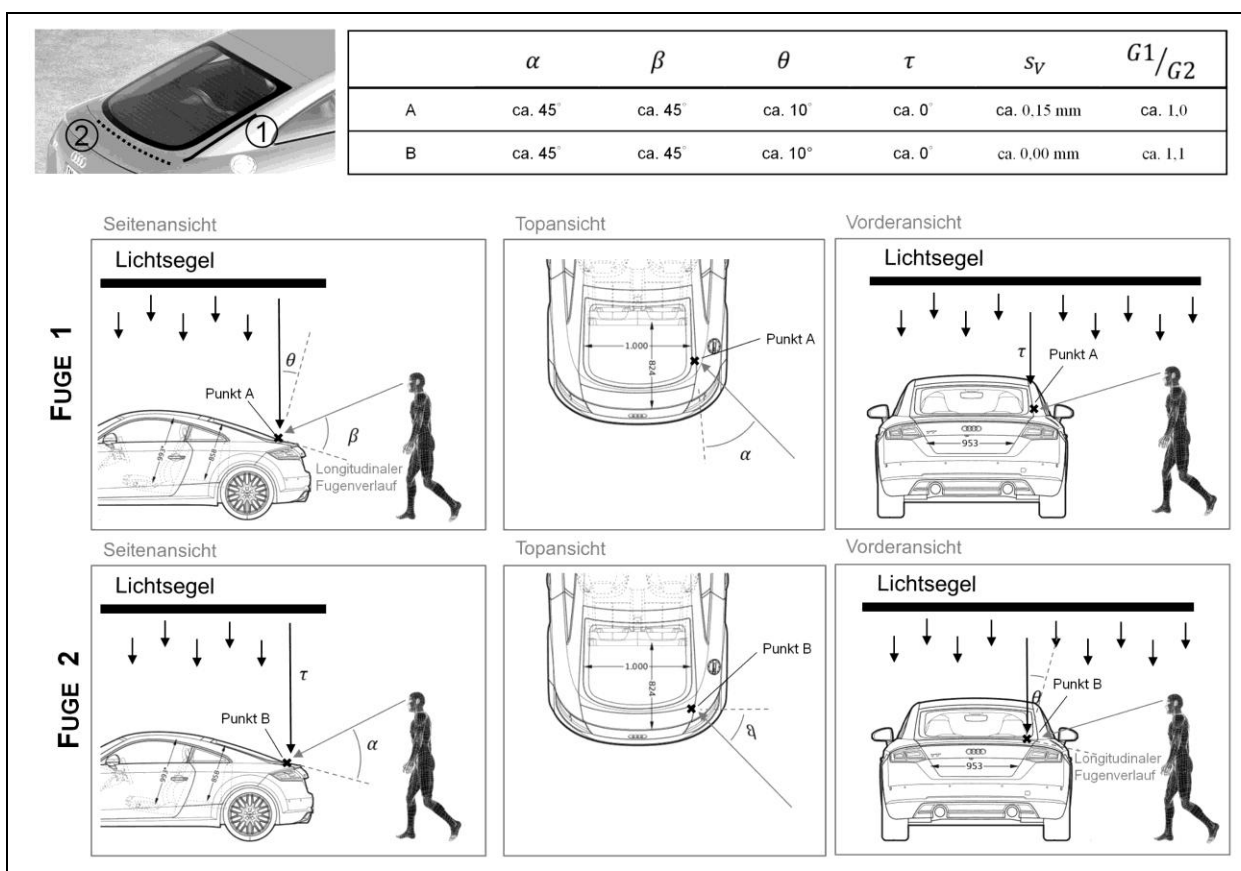


Abbildung 6-15 Darstellung zu Fallbeispiel 2 für die Gestaltung von Karosseriefugen mit dem Ziel der Kompensation des Bauteilversatzes

In der Ausgangssituation besteht ein vertikaler Bauteilversatz an Fuge 1 von 0,15 mm. Die Radien an den Flanken der Karosseriefuge sind symmetrisch ausgeführt. Die Fuge 2 weist in der Ausgangssituation keinen Versatz auf. Bei nahezu identischem Betrachtungswinkel und identischer Belichtungssituation erscheinen die Fugen unterschiedlich groß. Dies kann aus fertigungstechnischer Sicht durch das Anpassen der Anbausituation gelöst werden. Aufgrund der nur geringen Komplexität des Fertigungsprozesses und der Fertigungsanlagen für den Heckspoiler wird dieser maßlich angepasst. Im geschilderten Beispiel kann dies durch das Anpassen des Falzradius an der Bauteilberandung erfolgen. Das Vergrößern des sichtbaren Falzradius um 10 % im Vergleich zur Ausgangssituation führt zu gleich groß wahrgenommenen Karosseriefugen.

### 6.2.3 Zwischenfazit zu den Schlaufenmerkmalen

Bei der Betrachtung einer Karosseriefuge ist ein charakteristischer Helligkeitsverlauf quer zur Fugenrichtung erkennbar. Der Helligkeitsverlauf ist gekennzeichnet durch einen im Vergleich zur Umgebung sehr dunklen Bereich (sichtbare Spaltbreite), an dessen Rändern sich ein Bereich mit ansteigenden Helligkeitsbeiträgen anschließt. Dieser Bereich mit Helligkeitsgradient wird vom Betrachter als Teil der Fuge wahrgenommen. Die sichtbare Fugenbreite ergibt sich somit aus der sichtbaren Spaltbreite und den angrenzenden Bereich ansteigender Helligkeit.

Im Rahmen dieser Studie wurden Ansichtsmodelle bzw. Ansichten von Fugen mit variierenden Parametern (z. B. Fugenbreite) erstellt. In einem Linienschnitt senkrecht zum Fugenverlauf wurden dann die beiden zuvor geschilderten Bereiche anhand des Helligkeitsverlaufs identifizieren. Anhand der gewonnenen Messwerte lässt sich feststellen, dass die sichtbare Spaltbreite von verhältnismäßig wenigen Faktoren abhängt, während die wahrnehmbare Fugenbreite eine Vielzahl an Einflussgrößen besitzt. Die für die Anmutungsqualität von Fugen und Falzschlaufen bedeutsame „wahrgenommene Fugenbreite“ hängt maßgeblich von den nachfolgend aufgeführten Faktoren ab:

- ◆ geometrische Fugenbreite
- ◆ sichtbare Schlaufenlänge der Falzschlaufe
- ◆ Blickwinkel des Betrachters
- ◆ Asymmetrie der Fugen  
(d.h. unterschiedlich große Falzradien aneinander grenzender Bauteile)
- ◆ Lichteinfallswinkel

### 6.3 Definition der Anmutungsqualität von Falzschlaufen

Im Stand der Technik ist die bilaterale Wirkungskette Produkt-Mensch als Grundlage der Produktgestaltung beschrieben. Innerhalb dieser Wirkungskette ist das Verhalten des Menschen gegenüber dem Produkt durch die Wahrnehmung und das Erkennen von Produkteigenschaften z. B. Produktherkunft geprägt. Die Wahrnehmung findet dabei zeitlich vor dem Erkennen statt und lässt sich auf Basis von grundlegenden physikalischen Gesetzmäßigkeiten erklären. Das Erkennen von Objekten und Produkten stellt einen latenten Prozess des menschlichen Verstands dar, an dessen Ende Aussagen zu den subjektiv erkannten Produkteigenschaften getätigt werden können, die sich in analoge und konkrete Inhalte unterscheiden lassen (vgl. Kap. 2.1).

Die Anmutung stellt eine analoge Erkennungsform dar und kennzeichnet eine erste, noch nicht reflektierte Erkennung. Im Sprachgebrauch von Marketing, Journalismus, Fahrzeugherstellern und Kunden wird der Begriff „Anmutung“ zur Beschreibung von Eigenschaften des Exterieurs verwendet, jedoch folgt diese Verwendung nicht der zuvor aufgeführten Definition aus der Wahrnehmungspsychologie, sondern wird zur Stilisierung des Designs eines Fahrzeugs, der Qualität der Verarbeitung der Fahrzeugaußenhaut und zur Bewertung dieser Eigenschaften im Vergleich zu anderen Fahrzeugen gebraucht.

In dieser Arbeit werden die Begriffe aus der Wahrnehmungspsychologie im Anwendungsfall der Karosseriefugen auf der Außenhaut verwendet. Demnach bezeichnet die Anmutung eine erste, noch vage und verbal ungenau beschreibbare Wirkung, die eine Karosseriefuge beim Betrachter hervorruft. Dieses Erkennen setzt die Wahrnehmung der Karosseriefuge voraus. Im Fall von Fahrzeugen geschieht dies primär über den optischen Apparat des Auges. Ebenso ist auch eine haptische Wahrnehmung, z. B. mit der Handfläche, denkbar. Das Erkennen einer Karosseriefuge erfolgt anhand von analogen Verhaltensmustern. Die verbalen Äußerungen stellen demnach Analogien zu bekannten Formen, Dimensionen, Berandungsverläufen und Proportionen dar.

Die Aufgabe des Designers besteht darin, den Wunsch seines Klienten (z. B. Automobilbau: Vorstände [GRA05]) hinsichtlich der Eigenschaften des Produkts umzusetzen. Die Fahrzeugaußenhaut als erster visueller Kontaktpunkt zwischen Kunde und Produkt nimmt dabei eine entscheidende Rolle ein. Eine gut gestaltete Produktform enkodiert die vom Klienten gewünschten Eigenschaften auf eine Weise, welche die eindeutige Dekodierung durch den Kunden innerhalb kürzester Zeit ermöglicht. In diesem Fall verfügt das Produkt über eine hohe Anmutungsqualität. Ein schlecht gestaltetes Produkt führt zu einer ungenauen Dekodierung der Inhalte. Die Anmutungsqualität lässt sich so als die Intensität beschreiben, mit der eine zuvor festgelegte, beabsichtigte Wirkung beim Betrachter erzeugt wird. Zur Quantifizierung der Anmutungsqualität  $Q_{Anmutung}$  wird Gleichung 6-2 verwendet. Der Definitionsbereich für

$Q_{Anmutung}$  ist demnach  $0 \leq Q_{Anmutung} \leq 1$ . Der Grenzwert  $Q_{Anmutung} \approx 1$  beschreibt das vollständige Erkennen der Produktinhalte von allen Beobachtern, während  $Q_{Anmutung} \approx 0$  keinerlei richtige Dekodierung der Inhalte darstellt.

$$Q_{Anmutung} = \frac{\text{Anzahl richtige Dekodierungen}}{\text{Anzahl aller Dekodierungen}} = \frac{N_{pos. Erkennung}}{N_{pos. Erkennung} + N_{neg. Erkennung} + N_{keine Erkennung}} \quad \text{Gleichung 6-2}$$

Die Gleichung zeigt, dass für die Bewertung von Karosseriefugen hinsichtlich deren Anmutungsqualität die Kenntnis über die beabsichtigten Erkennungsinhalte notwendig ist. Die reine Bewertung von gemessenen skalaren Werten (Radien, Spaltweiten und Fugenverläufe) ist nicht zielführend. Dies wird nachfolgend anhand zweier Beispiele erklärt.

In Fallbeispiel 1 wird angenommen, dass ein Fahrzeug und dessen Karosseriefugen jugendlich, wild und revolutionär wirken sollen. Dies kann beispielsweise durch zusätzliche Gestaltelemente umgesetzt werden, die im Widerspruch zur Gestaltung von etablierten Fahrzeugmodellen stehen. Diese zusätzlichen Elemente können durch sehr große Fugen (d. h.  $> 12$  mm) und große Radien erzeugt werden (Abbildung 6-16). Der Fahrzeughersteller sollte dabei im Rahmen der Qualitätssicherung auf den parallelen, harmonischen Verlauf der Fugen achten. Die Fugenbreite dominiert aufgrund der verhältnismäßig großen Abmessungen gegenüber den Bauteilradien und sollte den Schwerpunkt der Optimierung darstellen, während Radien und Bauteilversatz eine untergeordnete Rolle spielen. In diesem Fallbeispiel werden die gleichmäßig breiten Fugen von der Mehrzahl der Betrachter als jugendlich und revolutionär dekodiert. Die breiten Fugen besitzen demnach eine hohe Anmutungsqualität.

In Fallbeispiel 2 wird angenommen, dass ein Premiumfahrzeug eines etablierten Herstellers neu entwickelt wird. Dieses Fahrzeug soll elegant, stilvoll, qualitativ hochwertig und dynamisch wirken, um die gesamte Produktpalette der Fahrzeugmarke positiv aufzuwerten. Da die Fahrzeugaußenhaut horizontale Strukturen und Designmerkmale aufweist, führen vertikale Fugen zu einer optischen Störung der Design- und Formsprache und sollten ebenso wie zusätzliche Formelemente vermieden werden. Um die Störung der Formsprache so gering wie möglich zu halten, sollten die Fugen möglichst schmal wirken bzw. schmal ausgeführt sein (Abbildung 6-17). Im Rahmen der Qualitätssicherung ist daher auf kleine Fugenbreiten und kleine Falzradien zu achten. In diesem Beispiel führen demnach kleine Fugenbreiten zu einer hohen Anmutungsqualität.



Abbildung 6-16

Fallbeispiel 1: Fahrzeug mit großen Fugen und Radien zur Erzeugung von zusätzlichen Formelementen, Fugen überbreit dargestellt, Abbildung nach [PEU15]



Abbildung 6-17

Fallbeispiel 2: Fahrzeug mit schmalen Fugen und Radien zur Erzeugung einer geschlossenen, ungestörten Gestalt, Fugen grafisch entfernt, Abbildung nach [DAI15]

## 6.4 Ermittlung der Anmutungsqualität von Falzschlaufen

Die Anmutung eines Objektes ist im Allgemeinen eine noch unreflektierte Bezeichnung und Bewertung durch den Betrachter. Die Anmutung hat somit stets einen gewissen subjektiven Charakter, der durch den Erfahrungsschatz und die Werte des Betrachters mitgeprägt wird. Eine rein theoretische Quantifizierung der Anmutungsqualität gestaltet sich entsprechend kompliziert. Im Rahmen dieser Untersuchung wird die Anmutungsqualität von Karosserie-fugen betrachtet. Die subjektiven Empfindungen der Betrachter werden nicht einzeln betrachtet, vielmehr erfolgt eine statistische Erhebung mit zahlreichen Teilnehmern was zu einer „gemittelten“ und damit objektiveren Bewertung führt.

### 6.4.1 Durchführung der quantitativen Erhebung

Die Vorgehensweise zu Ermittlung der Anmutungsqualität von Falzschlaufen und Karosserie-fugen unterteilt sich in Definition der Anmutungsqualität (vgl. Kap. 6.3), Erstellung des Fragebogens, Probandenauswahl, Durchführung der Erhebung und Auswertung.

#### Aufbau und Durchführung der Befragung

Die Erhebung wurde mit einem Online Fragebogen durchgeführt. Der Fragebogen umfasste 102 Fragen, wobei die ersten Fragen zur späteren Charakterisierung der Probandengruppe genutzt wurden (z. B. Worauf achten Sie beim Autokauf?). Die Befragung zur Anmutungsqualität von Falzschlaufen umfasst 91 Fragen.

Zur Charakterisierung der teilnehmenden Probanden wurden vorab 11 Fragen gestellt. Anhand der Ergebnisse wurde überprüft ob sich die Probanden der Gruppe „Kunden von Premiumfahrzeugen“ zuordnen lassen. Zum Abgleich der Ergebnisse wurde eine bereits vorliegende größere Studie zum Kaufverhalten von Fahrzeugen (vgl. [ALL13]) genutzt. Die

häufigsten Entscheidungsgründe nach [ALL13] wurden vorgegeben und konnten mit unwichtig / eher unwichtig / gleichgültig / eher wichtig / sehr wichtig bewertet werden.

Die Fragen „Worauf achten Sie beim Autokauf?“ zur Charakterisierung der Probandengruppe umfassten die vorgegebenen Themengebiete

- ◆ Interieur
- ◆ Fahrzeugmarke
- ◆ Qualität
- ◆ Exterieur
- ◆ Kaufpreis
- ◆ Antriebsleistung
- ◆ Sicherheit

Zusätzlich wurde zur weiteren Charakterisierung das Alter der Probanden, deren Geschlecht, deren Zugehörigkeit zu einer Berufsgruppe und der derzeit genutzte Fahrzeugtyp erfasst. Bei den Angaben zum Alter wurden drei Gruppen vordefiniert (< 30 Jahre / 30 – 50 Jahre / > 50 Jahre), sodass sich die Probanden zu einer der Gruppen zuordnen konnten. Bei der Angabe der Berufsgruppen wurden fünf Auswahlmöglichkeiten vorgegeben (Student / Angestellter / Leitender Angestellter / Beamter / Selbstständiger). Auch die Auswahl des derzeit genutzten Fahrzeugtyps wurde durch ein Vordefinieren der Antwortmöglichkeiten vereinfacht. Es erfolgte eine grobe Einteilung in Cabrio / Kleinwagen / Kombi / Limousine / SUV / Van. Weitere Detailangaben zur Person wurden nicht abgefragt. Die Umfrage erfolgte anonym. Einen Auszug aus dem Fragenkatalog ist in Abbildung 6-18 dargestellt.

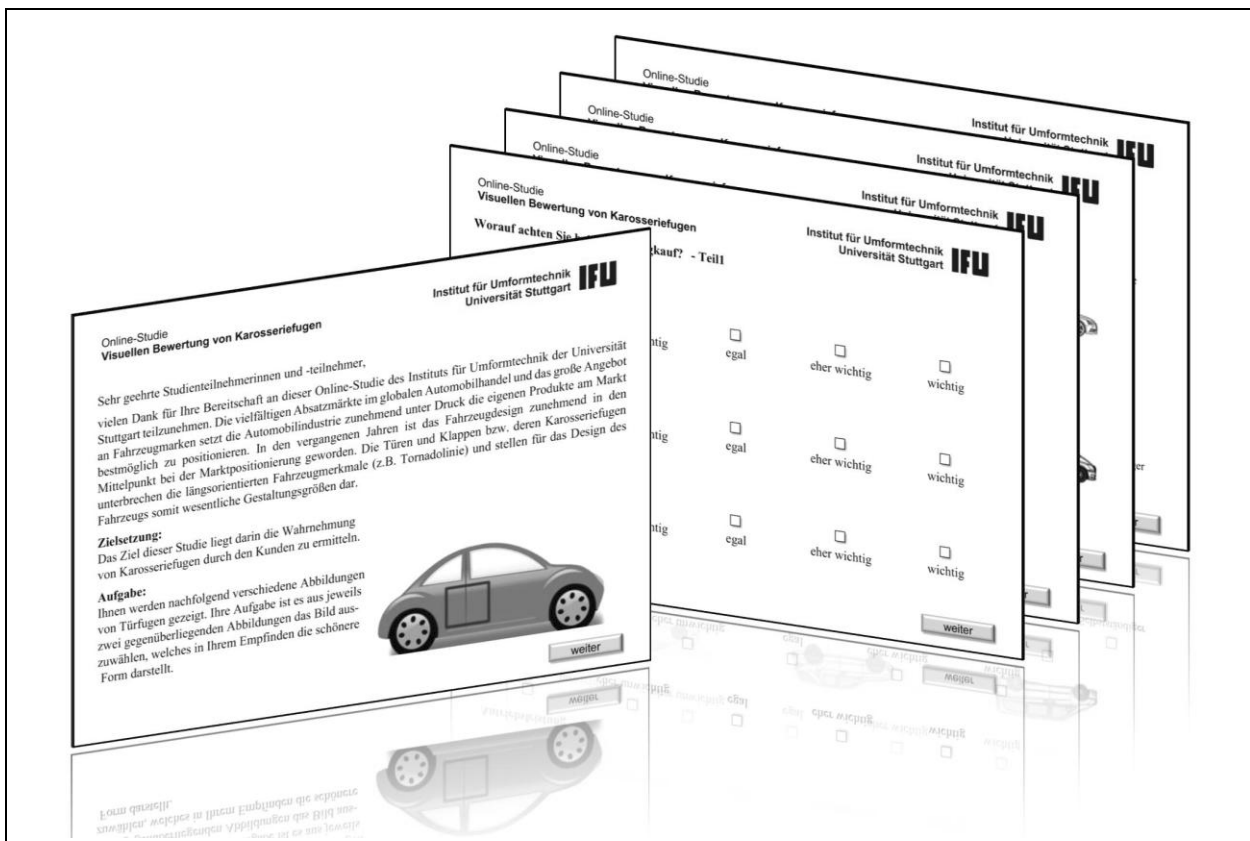


Abbildung 6-18 Auszug aus den allgemeinen Teil der Befragung zur Anmutungsqualität



Den größten Teil der Umfrage stellten die Fragen zur Anmutungsqualität von Falzschlaufen dar. Den Probanden wurden jeweils zwei gerenderte Abbildungen von Fahrzeugfugen aus identischen Blickwinkeln vorgelegt (vgl. Abbildung 6-19). Die Abbildungen unterschieden sich in mindestens einem Merkmal (z. B. Falzradius). Die Probanden wurden dann aufgefordert die Abbildung die Ihnen besser gefällt zu selektieren. Daran anschließend wurde automatisch das nächste Abbildungspaar zur Bewertung vorgelegt.

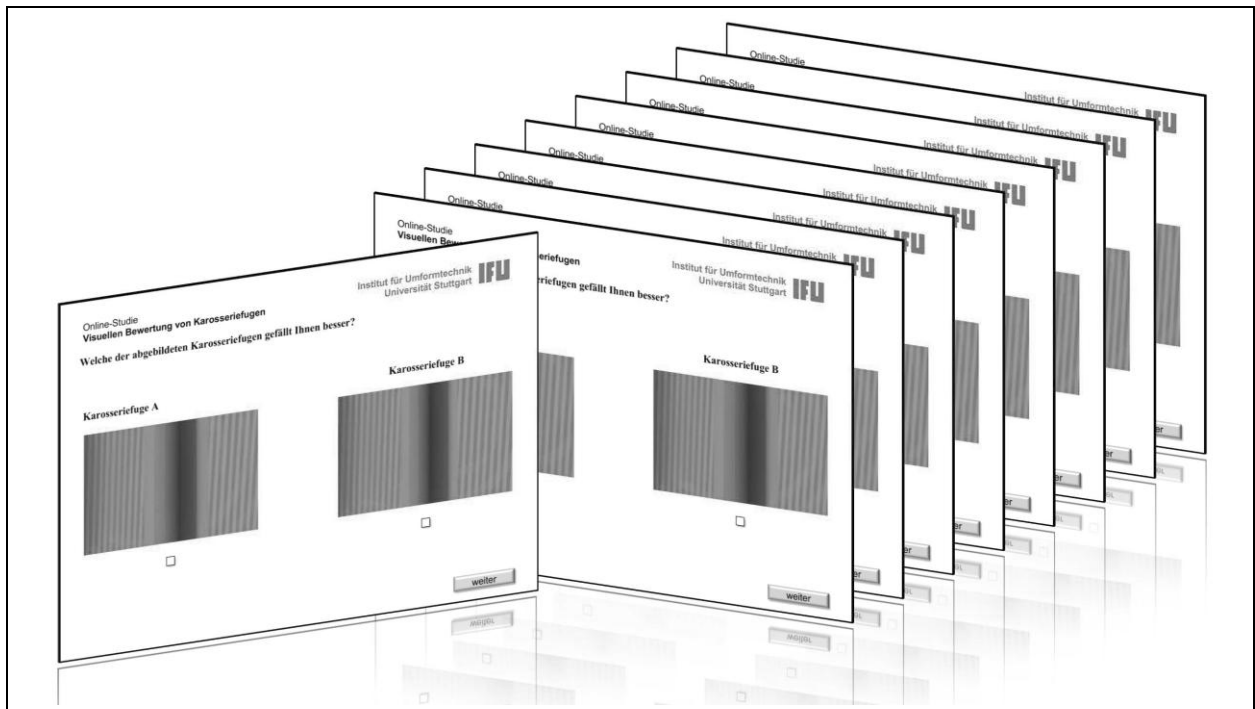


Abbildung 6-19 Auszug aus den Fragen zur Anmutungsqualität von verschiedenen Schlaufenausführungen

Während der Befragung wurden die Merkmale:

- ◆ Spaltbreite (2,4 mm / 2,7 mm / 3,0 mm / 3,3 mm / 3,6 mm)
- ◆ Blickwinkel ( $-45^\circ$  /  $0^\circ$  /  $+45^\circ$ , orthogonal zum Spaltverlauf)
- ◆ Bauteilfarbe (Blau / Silber / Dunkelgrün / Schwarz / Dunkelblau / Rot / Weiß)
- ◆ Falzradius (1,6 mm / 1,8 mm / 2,0 mm / 2,2 mm / 2,4 mm)

variiert. Die gerenderten Darstellungen von Karosseriefugen kennzeichnen sich analog zum Anschauungsmodell (vgl. Kap. 6.2) durch:

- |                        |                                      |
|------------------------|--------------------------------------|
| ◆ Blickwinkel $\alpha$ | ◆ Lichteinfallswinkel $\theta$       |
| ◆ Blickwinkel $\beta$  | ◆ Lichteinfallswinkel $\tau$         |
| ◆ Spaltbreite $s_F$    | ◆ linke Falzschlaufengeometrie $G1$  |
| ◆ Spalthintergrund $H$ | ◆ rechte Falzschlaufengeometrie $G2$ |
| ◆ Lichtsegels $G_S$    | ◆ Oberflächeneigenschaft $\gamma$    |
| ◆ Blickabstand $h_B$   | ◆ Oberflächeneigenschaft $\delta$    |

Nach der Befragung der Probanden wurden die Antworten in einer Datenbank gespeichert und anschließend manuell ausgewertet. Bei der Erstellung der Fragebögen wurde auf eine randomisierte Gegenüberstellung von Fugensituationen geachtet, um eine Mustererkennung und somit die Induktion scheinbar richtiger Antworten durch die Probanden zu vermeiden.

### Probandenauswahl

Zur Ermittlung der Anmutungsqualität wurde eine statistische Erhebung durchgeführt. Die Probanden für diese Erhebung wurden in einem kombinierten Verfahren aus „typischer Auswahl“ und „Schneeballverfahren“ ausgewählt. Bei der typischen Auswahl wurden nach subjektivem Ermessen aus der Gesamtheit einige Primärelemente mit charakteristischen Eigenschaften ausgewählt. Diese Elemente dienten als Ausgangspunkt für das „Schneeballverfahren“. Dabei wurde im Anschluss der Befragung der Primärelemente um Weitergabe der Fragen an weitere Personen gebeten, die dann im zweiten Schritt befragt worden sind. Im Vorfeld der Untersuchung wurden folgende Merkmale zur Auswahl der Primärelemente definiert:

- ◆ Technisches Verständnis  $A_{Tech}$  (technisch geschult/nicht technisch geschult),
- ◆ Kundengruppe  $B_{Kunde}$  (heutige/zukünftige Kunden von Premiumfahrzeugen) und
- ◆ Geschlecht  $C_{Gesch}$  (weiblich/männlich).

Aus den Schnittmengen  $U_i = A_{Tech} \cap B_{Kunde} \cap C_{Gesch}$  dieser Merkmale (z. B. technisch nicht geschult // zukünftige Kunden von Premiumfahrzeugen // männlich) wurden einzelne Elemente ausgewählt und befragt. Durch die Weiterverteilung der Befragung per E-Mail wurden weitere Elemente dieser Schnittmenge in die Erhebung eingefügt.

### 6.4.2 Ergebnisse der Befragung

Zur Ermittlung der Anmutung von Karosseriefugen wurde eine quantitative Erhebung durchgeführt, die sich an gängige Methoden zur quantitativen Marktforschung orientiert. Das Ziel war die zahlenmäßige Erfassung psychologischer Zusammenhänge zwischen der Schlaufengeometrie und der Anmutungsqualität. [FAN11] Die quantitative Marktforschung bedient sich standardisierter Methoden, um statistisch zuverlässige Ergebnisse zu gewährleisten. Hier wird ein Auswahlverfahren eingesetzt, das eine Rückführung der Ergebnisse eines Samplings auf die Gesamtheit ermöglicht. [HÜT65; KEP96; KOC09]

#### Charakterisierung der Probandengruppe

Ausgehend von einer typischen Auswahl wurden während der quantitativen Befragung 153 Personen befragt, davon 49 % männlich und 51 % weiblich. Die demografische Betrachtung der teilnehmenden Altersgruppen zeigt, dass vor allem die Altersgruppen 18 – 29 Jahre (51 %) und

30–49 Jahre (32 %) stark vertreten sind. Die Gruppe der über 50-Jährigen beträgt 17 % der gesamten Teilnehmerzahl. Die Umfrage stellt somit einen repräsentativen Meinungsquerschnitt des zukünftigen Fahrzeugmarkts dar.

Zu Beginn der Meinungserfassung wurden die Probanden hinsichtlich ihrer Entscheidungsgründe beim Fahrzeugkauf befragt. Die Umfrageergebnisse wurden mit allgemeinen Befragungsergebnissen zur Wichtigkeit von Fahrzeugmerkmalen (z. B. Interieur) innerhalb eines Fahrzeugsegments verglichen, daraus wurde eine Zuordnung der Probandengruppe zum Fahrzeugsegment vorgenommen. Die beste Übereinstimmung wurde mit den Gründen zum Kauf von Mittelklassefahrzeugen erzielt, siehe Abbildung 6-20. Die quantitative Befragung eignet sich somit zur Bewertung der Wahrnehmung und Erkennung von Designmerkmalen von Premiumfahrzeugen.

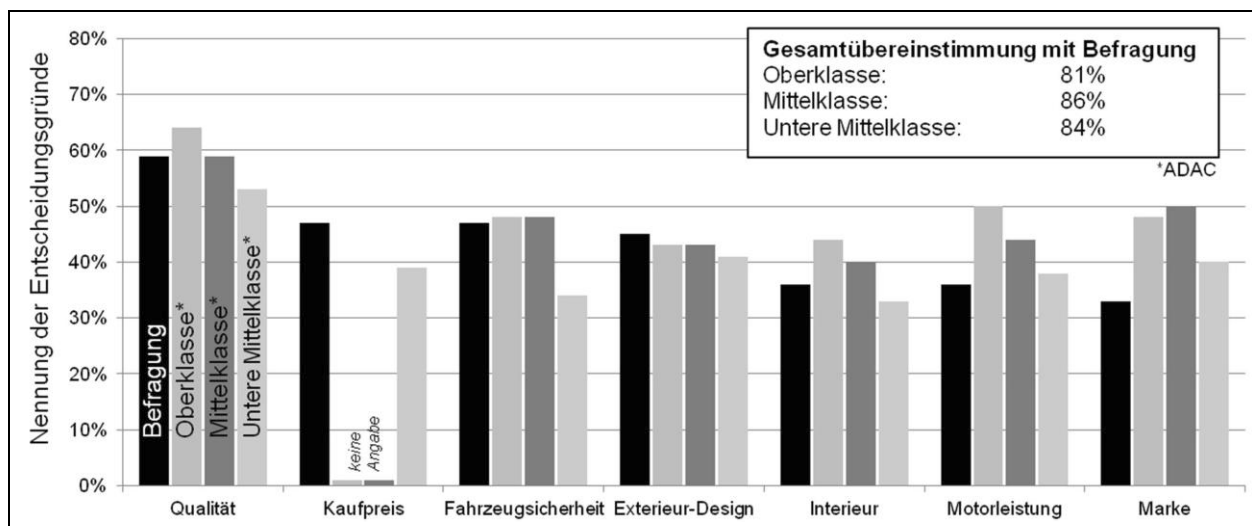


Abbildung 6-20 Entscheidungsgründe beim PKW-Kauf in der quantitativen Erhebung, getrennt nach Fahrzeugklassen nach [ALL13]

### Qualitätsurteil der Probandengruppe

Die Anzahl der Nennungen bei der vergleichenden Betrachtung von Fugen für eine der dargestellten Karosseriefugen bildet die Grundlage für die Auswertung.

Die Ergebnisse der Befragung werden zunächst quantifiziert und in Relation zu einem Referenzwert gesetzt. Die Anzahl der Probanden, die eine Fugensituation A als ästhetischer als die Referenzfuge empfinden, wird im Verhältnis zu den Probanden betrachtet, welche die Referenzfuge als ästhetischer als die Fugensituation A empfanden (vgl. Gleichung 6-3). Die Referenzfuge mit  $s_F = 3,0$  mm und  $R = 2,0$  mm stellt einen repräsentativen Fall der echten Fugenausführung an Karosserien des Premiumsegments nach Kap. 6.1 dar. Probanden, die keine Präferenz nennen, werden nicht berücksichtigt. Der somit ermittelte relative ästhetische Wert der

Fuge  $Q_{Fr}$  ist für einen senkrechten Betrachtungswinkel in Abbildung 6-21 für Variationen der Fugenbreite und des Falzradius dargestellt.

$$Q_{Fr, Fuge A} = \frac{\text{Anzahl der genannten Präferenzen für Fugensituation A}}{\text{Anzahl der genannten Präferenzen für Referenzfuge}} \quad \text{Gleichung 6-3}$$

Aus den so quantifizierten Ergebnissen werden die Effekte der Einflussfaktoren (Blickwinkel  $\alpha$ , Fugenbreite  $s_F$ , Bauteilradius  $R$ ) hinsichtlich der Wahrnehmung der Qualität der Fuge ermittelt. Es zeigt sich, dass die Faktoren Bauteilradius  $R$  und Fugenbreite  $s_F$  den größten Einfluss auf die wahrgenommene Fugenqualität aufweisen. Der Blickwinkel spielt hierbei eine untergeordnete Rolle. Diese Erkenntnis deckt sich mit der theoretischen Untersuchung.

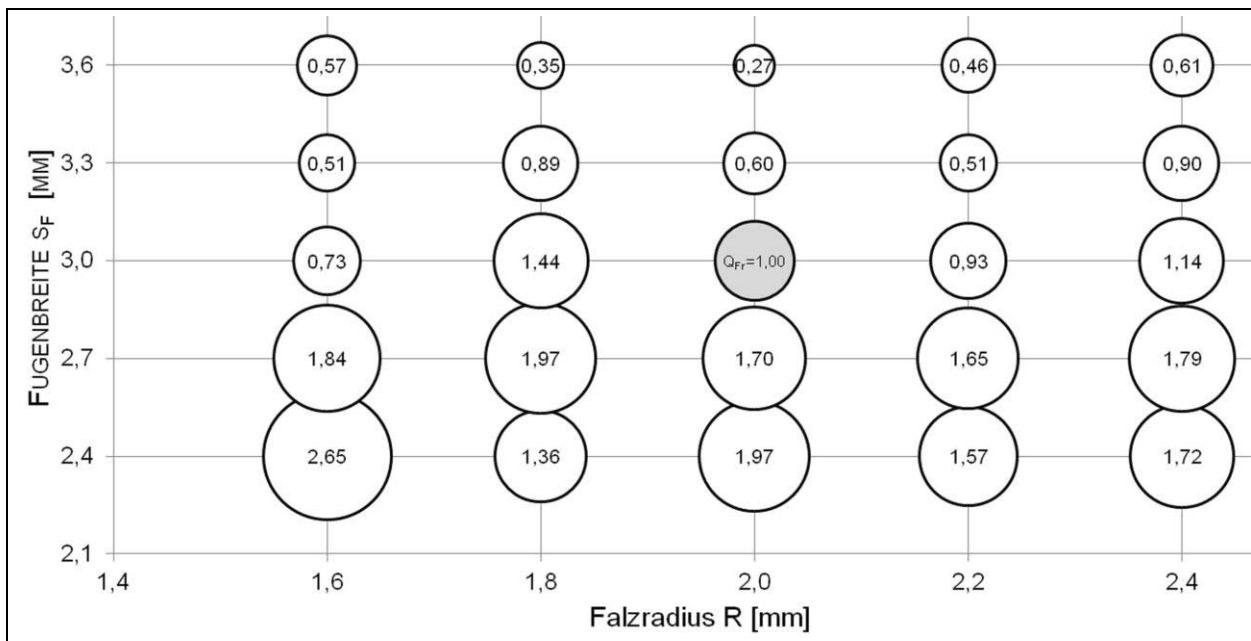


Abbildung 6-21 Ergebnis der quantitativen Befragung bei senkrechter Betrachtung der Fuge in Abhängigkeit von der Fugenbreite und des Bauteilradius, dargestellt als Wert  $Q_{Fr}$ , gesamte Gruppe

Die gruppenspezifische Erkennung der Qualität der Karosseriefuge wird anhand der Unterscheidung zwischen männlichen Probanden ( $n=76$ ) und weiblichen Probanden ( $n=77$ ) durchgeführt, deren Auswertung analog zur Betrachtung der gesamten Gruppe erfolgt. Die Trends sind für beide Gruppen ähnlich. Große Bauteilradien und große Fugenbreiten führen zu einer reduzierten Fugenqualität im Vergleich zur Referenzsituation. Der Blickwinkel hat keinen Einfluss. Zusätzlich zur Untersuchung der geschlechterspezifischen Bewertung der Fugenqualität wird das Alter der Probanden als Einflussfaktor berücksichtigt. Es wird festgestellt, dass die bei der Betrachtung der Gesamtgruppe aufgezeigte Tendenz zur positiveren Beurteilung von Fugen mit kleinen Falzradien und kleinen Fugenbreiten auch in allen Altersgruppen zu erkennen ist. Unterschiede zeigen sich lediglich in der Stärke des gemessenen Effekts. Generell sind die Auswirkungen einer Veränderung (z. B. Vergrößerung der Fugenbreite) auf die wahrgenommene

Fugenqualität bei der Gruppe der unter 30-Jährigen stärker ausgeprägt als bei den über 30-Jährigen (vgl. Abbildung 6-22).

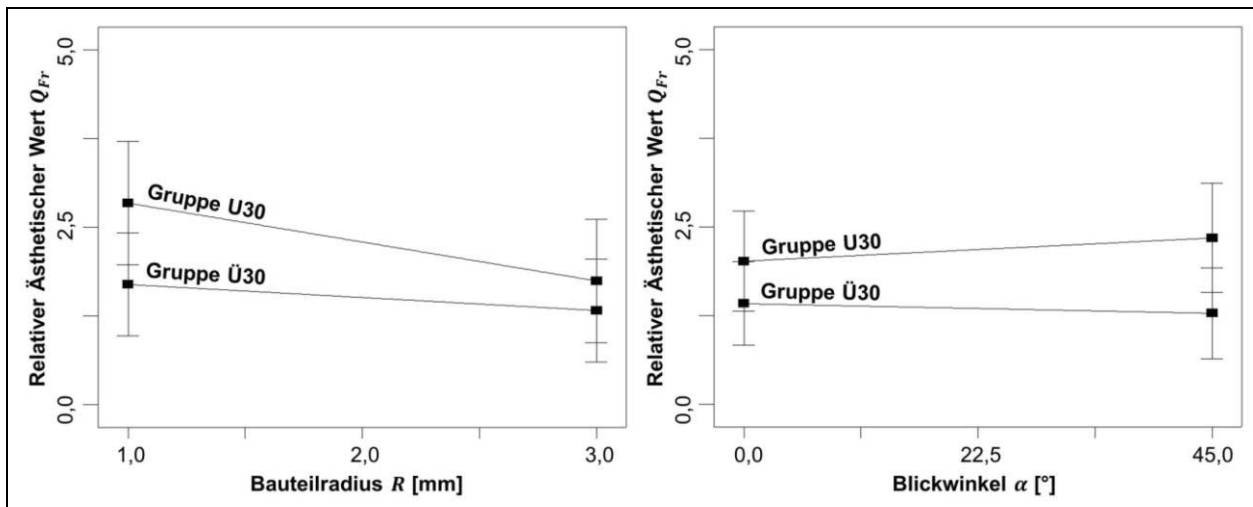


Abbildung 6-22 Einflussfaktoren auf die empfundene Fugenqualität der Probandengruppen U30 und Ü30

Im letzten Abschnitt der Befragung wird der Einfluss der Farbe der Bauteillackierung auf die wahrgenommene Fugenqualität betrachtet. Da die Bevorzugung einzelner Farben durch die Probanden aufgrund eines modischen Zeitgeistes nicht ausgeschlossen werden kann, werden die Ergebnisse der Befragung mit den Zulassungszahlen des Kraftfahrt-Bundesamtes abgeglichen. Die erzielten Resultate der Online-Studie weisen jedoch kein signifikantes Ergebnis hinsichtlich eines Zusammenhangs zwischen der Anmutungsqualität einer Karosseriefuge und der Bauteilfarbe auf. Die Ergebnisse entsprechen einer allgemeinen, dem Zeitgeist folgenden Vorliebe für Fahrzeugfarben (vgl. Abbildung 6-23).

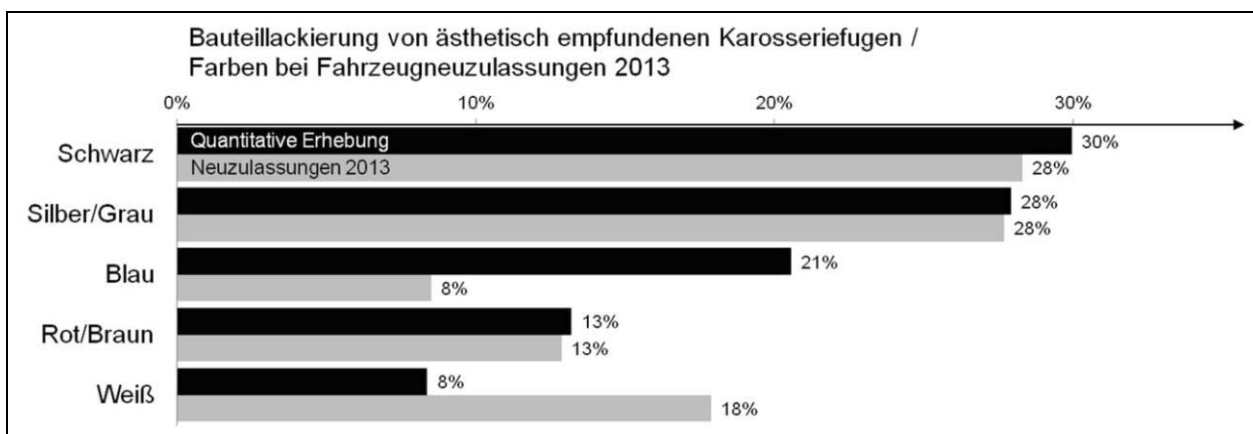


Abbildung 6-23 Ergebnis der quantitativen Befragung hinsichtlich der Bewertung identischer Fugen mit unterschiedlicher Bauteilfarbe und allgemein bevorzugte Fahrzeugfarben nach [KRA14] [ALL13]

### **6.4.3 Zwischenfazit zur Ermittlung der Anmutungsqualität von Karosseriefugen**

Die Resultate der gesamten Gruppe der quantitativen Erhebung zeigen, dass die Fugenbreite  $s_F$  und der Falzradius an der Fuge  $R$  die signifikanten Einflussgrößen auf die empfundene Fugenqualität darstellen, wobei der Faktor Fugenbreite dominiert. Diese Ergebnisse werden auch in den Untergruppen bzw. Altersgruppen, wenngleich in unterschiedlich starker Ausprägung der Einzeleffekte, beobachtet. Die Signifikanz der Einflussfaktoren und deren Rangfolge in der Bewertung stimmen mit den Ergebnissen der theoretischen Studien zur wahrnehmbaren Fugenbreite überein.

## 7 VALIDIERUNG UND ANWENDUNG DES PROGNOSEMODELLS

### *MANUFACTURING OF HEMMING ROPES*

Die Anwendbarkeit des Prognosemodells zur Vorhersage der Anmutung und der Herstellbarkeit von Falzschlaufen wurde anhand eines realen Karosserieanbauteils validiert. Für diese Validierung wurde ein gefalztes Karosserieanbauteil aus Aluminium benötigt, dessen prozessualen Fertigungsparameter (z.B. Abstellradius des Außenteils) bekannt sind oder nachvollzogen werden können (z.B. messtechnisch). Für dieses Realbauteil wurde anhand von Ergebnissen aus Technologieversuchen zum Biegen und Falzen die Biegebeanspruchung an der Falzkante und die dimensionale Schlaufenform vorhergesagt. Diese Vorhersage wurde dann am Realteil überprüft. Hierbei wurde die Formänderung gemessen bzw. die Schlaufenform bestimmt.

### 7.1 Aufbau des Hemming Quality Diagram

Das Hemming Quality Diagram HQD stellt einen kausalen Zusammenhang zwischen der Biegebeanspruchung beim Falzen von Aluminiumblechwerkstoffen und der erzielbaren Anmutungsqualität einer solchen Falzverbindung dar. Auf Basis von technologischen Versuchen zum Maschinenfalzen und der durchgeführten Probandenbefragung werden nachfolgend die Herstellbarkeit und die Anmutungsqualität der Falzverbindung der Serientür aus Aluminium prognostiziert.

#### 7.1.1 Prognose der Herstellbarkeit

In Kap. 4.2 wird gezeigt, dass die Herstellbarkeit einer Falzschleife aus Aluminium durch zwei Gleichungen beschrieben wird. Zum Einen wird die Biegebeanspruchung prognostiziert, zum Anderen werden die dimensionalen Eigenschaften der entstehenden Falzschleife vorhergesagt. Beide Gleichungen beschreiben die Beanspruchung bzw. die Schlaufenform in Abhängigkeit der Fertigungsparameter.

Auf Grundlage der experimentellen Untersuchungen (Kap. 5) werden die Gleichungen nachfolgend beispielhaft ermittelt. Für die Prognose der Biegebeanspruchung (vgl. Gleichung 7-1) wird dabei ein linearer Gleichungsansatz verwendet. Die Herleitung der Gleichung wird für die Legierung 1, Nennblechdicke  $s_{0,A} = 1,04$  mm und Maschinenfalzen vorgenommen. Für Rollfalzen, andere Legierungen und Nennblechdicken erfolgt eine analoge Vorgehensweise.

$$f_{\text{Biegebeanspruchung}} : f(\text{Falztechnologie, Werkstoff, Prozessparameter, ...}) \quad \text{Gleichung 7-1}$$

In den experimentellen Versuchen zum Maschinenfalzen wurde bereits die Signifikanz von einzelnen Einflussgrößen bestimmt. Nachfolgend werden nur noch die Variablen mit großem

Effekt auf die Herstellbarkeit bzw. die Biegebeanspruchung (hier als Biegequotient nach [DEN14]) betrachtet. Folgende Vereinfachungen werden eingeführt:

- ◆  $BQ \neq f(x_{IB})$  Position des Innenblechs hat sehr geringen Einfluss auf die Biegebeanspruchung an der Blechkante
- ◆  $BQ \neq f(\alpha_{VF})$  Vorfalzwinkel hat sehr geringen Einfluss auf die Biegebeanspruchung
- ◆  $BQ \neq f(l_{Flansch})$  Flanschlänge hat sehr geringen Einfluss auf die Biegebeanspruchung

Durch diese Vereinfachungen bleibt zur Beschreibung der Biegebeanspruchung:

$$f_{Biegebeanspruchung} = \frac{1}{\eta} \cdot f(r_A, \varphi) = \frac{1}{\eta} \cdot (I + J \cdot r_A + L \cdot \varphi) \quad \text{Gleichung 7-2}$$

Dabei bezeichnet  $\eta$  den werkstoffspezifischen Grenzwert der ertragbaren Biegebeanspruchung ohne Rissbildung an der Oberfläche der Falzkante. Bei  $f_{Biegebeanspruchung} < 1$  wird eine rissfreie Falzkante prognostiziert, während bei  $f_{Biegebeanspruchung} \geq 1$  die Blechoberfläche Risse aufweist (d.h. Bauteilversagen).

Zur näherungsweisen Lösung der Gleichung wird die Regressionsanalyse eingesetzt. Die Werte der experimentellen Falzuntersuchung werden mithilfe der Methode der kleinsten Fehlerquadrate durch Anpassen der allgemeinen Gleichung approximiert. Die Parameter  $p = (I, J, L)$  werden so angepasst, dass die Summe aus den Abweichungen der durch die Funktion prognostizierten Werte und der experimentellen Werte aus den technologischen Versuchen für Maschinenfalzen minimal wird. Die numerische Lösung ist in Tabelle 7-1 abgebildet. Das Bestimmtheitsmaß  $R^2$  der Lösung beträgt 0,88.

Tabelle 7-1: Lösungswerte des Minimierungsproblems zur Approximation der Biegebeanspruchung

PARAMETER DER MODELLFUNKTION	LÖSUNG DES MINIMIERUNGSPROBLEMS	PARAMETER DER MODELLFUNKTION	LÖSUNG DES MINIMIERUNGSPROBLEMS
I	0,041	L	0,008
J	-0,204		

Aus den technologischen Falzversuchen lässt sich in gleicher Weise die dimensionale Ausführung der Falzverbindung ermitteln. Die dimensionale Ausführung der Falzschlaufe wiederum ist die Folge des Fertigungsprozesses und dessen Randbedingungen. In einer allgemeinen Form ist dies in für das Maschinenfalzen dargestellt.

$$f_{Falzgeometrie} : f(\text{Falztechnologie}, \text{Werkstoff}, \text{Prozessparameter}, \dots) \quad \text{Gleichung 7-3}$$

Die Betrachtung der experimentellen Ergebnisse in Kap. 5.5 (Legierung 1, Nennblechdicke  $s_{0,A} = 1,04$  mm) ermöglicht die Darstellung der Falzgeometrie durch den Faktor „sichtbare Schlaufengeometrie“. Es können folgende Vereinfachungen eingeführt werden:



- ◆  $SSL_{Prognose} \neq f(x_{IB})$  Position des Innenblechs hat geringen Einfluss auf die Geometrie der Falzschlaufe
- ◆  $SSL_{Prognose} \neq f(l_{Flansch})$  Flanschlänge hat geringen Einfluss auf die Geometrie der Falzschlaufe

Nach der Einführung der Vereinfachungen bleibt eine einfache lineare Gleichung mit vier unbekanntem Faktoren (Gleichung 7-4). Diese Faktoren werden mithilfe der mathematischen Regression bestimmt. Die numerische Lösung ist in Tabelle 7-2 abgebildet. Das Bestimmtheitsmaß  $R^2$  beträgt 0,79. Auf diese Weise kann die sichtbare Schlaufenlänge auf Basis der Falzparameter bestimmt werden.

$$SSL_{Prognose} = f(r_A, \alpha_{VF}, \varphi) = M + N \cdot r_A + O \cdot \alpha_{VF} + P \cdot \varphi \quad \text{Gleichung 7-4}$$

Tabelle 7-2: Lösungswerte des Minimierungsproblems zur Approximation der sichtbaren Schlaufenlänge

PARAMETER DER MODELLFUNKTION	LÖSUNG DES MINIMIERUNGSPROBLEMS	PARAMETER DER MODELLFUNKTION	LÖSUNG DES MINIMIERUNGSPROBLEMS
M	0,660	O	0,029
N	0,611	P	- 0,007

## 7.1.2 Prognose der Anmutungsqualität

Die Anmutung der herzustellenden Falzschlaufe an der exemplarischen Vordertür wird anhand der Untersuchungen in Kap. 6.4 prognostiziert. Hierzu werden die Ergebnisse aus Kap. 6.4 in die allgemeine Gleichung zur Beschreibung der Anmutungsqualität von Falzschlaufen nach Kap. 4.3 eingefügt.

Zur Darstellung der Qualität einer beliebigen Karosseriefuge durch eine mathematische Gleichung wird diese zunächst als allgemeine Gleichung mit mehreren Variablen betrachtet, siehe Gleichung 7-5. Die Variablen wurden bereits in Kap. 4.3 definiert oder sind aus dem Stand der Technik als Einflussgrößen bekannt.

$$f_{Anmutungsqualität} = f(\alpha, \beta, \theta, \tau, s_F, h_B, h_G, \gamma, \delta, R, \frac{G1}{G2}, s_V, \frac{SSL}{SST}) \quad \text{Gleichung 7-5}$$

In den theoretischen Studien wurde gezeigt, dass der Blickwinkel des Betrachters parallel zum Spaltverlauf, der Lichteinfallswinkel orthogonal und parallel zum Spaltverlauf sowie der senkrechte Abstand des Spalthintergrunds keinen bzw. nur einen vernachlässigbaren Einfluss auf die wahrnehmbare Fugenbreite besitzen. Des Weiteren wurde gezeigt, dass die Bedingungen der Wahrnehmbarkeit zum Erkennen der Anmutung zwingend erfüllt sein müssen. Sie werden durch den Faktor des Blickabstands des Betrachters und die Oberflächeneigenschaft des Spaltmodells und des Spalthintergrundes definiert. Ein Einfluss auf die empfundene Qualität kann somit ausgeschlossen werden. Ebenso ist aus der theoretischen Studie bekannt, dass die wahrnehmbare

Fugenbreite  $s_{WF}$  im Wesentlichen durch die Fugenbreite, die Geometrie der Falzschlaufen, den vertikalen Bauteilversatz und die Asymmetrie der rechten zur linken Falzschlaufe beschrieben werden kann. Somit folgt:

$$f_{Anmutungsqualität} = f(\alpha, s_F, R, s_{WF}) \quad \text{Gleichung 7-6}$$

Die allgemeine Funktion  $f(\alpha, s_F, R, s_{WF})$  wird mithilfe der Methode der kleinsten Fehlerquadrate auf die gemessenen quantifizierten Werte der Umfrage mit den Messdaten  $(R, s_F, Q_{Fr})$  und der Fugensituation  $i$ , mit  $i \in (1, \dots, n)$  und  $i, n \in \mathbb{N}$ , angewandt. Im Rahmen dieser Arbeit wird angenommen, dass die Funktion  $f(\alpha, s_F, R, s_{WF})$  eine Exponentialfunktion darstellt:

$$f(\alpha, s_F, R, s_{Fb}) = [A \cdot (90 - \alpha) + B \cdot R + C \cdot s_F + D \cdot s_{WF}] \cdot e^E \quad \text{Gleichung 7-7}$$

Die Summe der quadrierten Differenzen zwischen den gemessenen Werten  $y_i = Q_{Fr}$  und den geschätzten Werten der Modellfunktion  $\hat{y}_i = f(\alpha, s_F, R, s_{WF})_i$  stellt die Güte der gewählten Approximation dar. Die Parameter  $p = (A, \dots, E)$  werden so angepasst, dass die Summe aus den Abweichungen der durch die Modellfunktion prognostizierten Werte und der gemessenen Werte minimal wird ( $\min_p \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$ ). Die numerische Lösung der Modellfunktion weist ein Bestimmtheitsmaß  $R^2$  von 0,80 auf.

Zur Veranschaulichung der Modellfunktion sind nachfolgend charakteristische Merkmale der Funktion in Abhängigkeit der einzelnen Variablen dargestellt. Die größten Effekte auf die empfundene Fugenqualität haben die Variablen Bauteilradius und Fugenbreite, siehe Abbildung 7-1. In beiden Fällen führen ansteigende Werte der Variablen zu einer reduzierten empfundenen Fugenqualität. Die Effekte sind ähnlich groß, lediglich die Steigung der Kurven unterscheidet sich. Die Modellgleichung in Abhängigkeit vom Bauteilradius weist mit  $\lim_{R \rightarrow \infty} (-\infty)$  einen stetigen negativen Steigungsverlauf auf. Für die Steigung der Fugenbreite gilt  $\lim_{s_F \rightarrow \infty} (0)$ . Anschaulich bedeutet dies, dass bei sehr großen Fugenbreiten  $s_F > 5$  mm nur noch eine sehr geringe Änderung der Fugenqualität zu beobachten ist. Gleiches gilt für sehr kleine Radien.

Große Betrachtungswinkel  $\alpha$  führen zu verhältnismäßig kleinen wahrnehmbaren Fugenbreiten und somit zu einer höheren empfundenen Fugenqualität, siehe Abbildung 7-2. Die Größe dieses Effekts scheint also gering. Einen größeren Effekt weist die Variable Bauteilversatz auf. Ein großer Bauteilversatz führt demnach zu einer Reduzierung der wahrnehmbaren Fugenbreite und zu einer höheren Fugenqualität. Die Asymmetrie der Bauteilradien zeigt lediglich einen geringen Einfluss auf die erzielbare Fugenqualität.

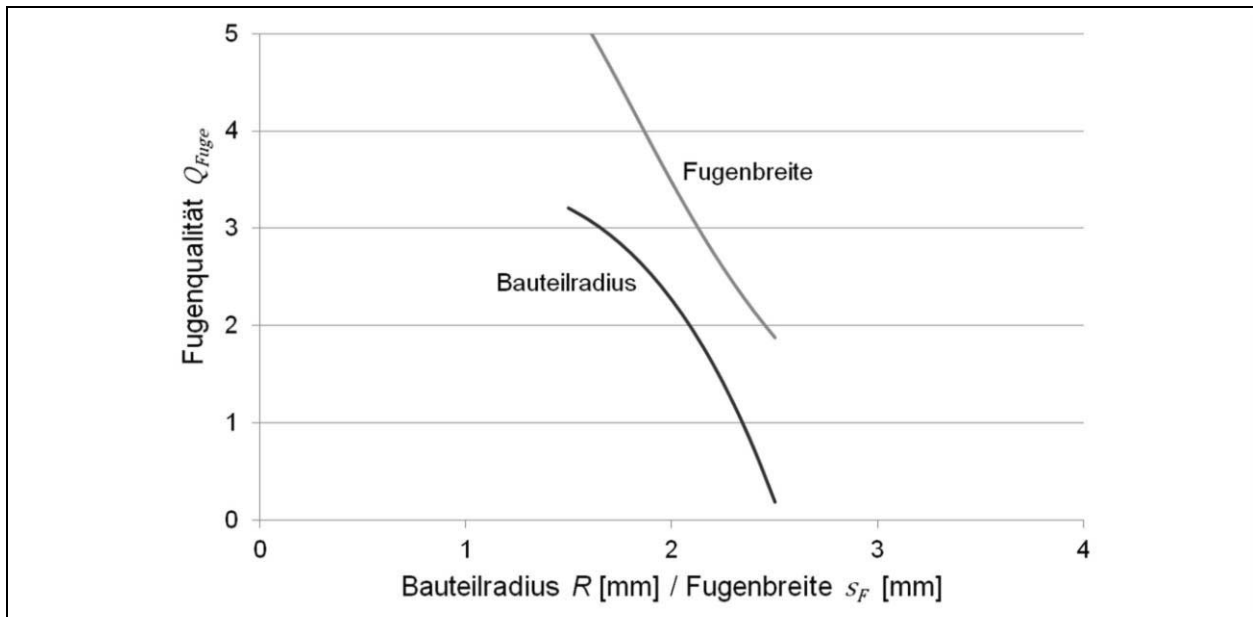


Abbildung 7-1 Modellcharakteristik in Abhängigkeit von den Variablen Bauteilradius und Fugenbreite

Die letzte Variable der Modellgleichung, das Halbachsenverhältnis von elliptischen Falzschlaufen, hat einen geringen Einfluss auf die Fugenqualität. Große Halbachsenverhältnisse, d. h. große sichtbare Schlaufenlängen im Vergleich zur Schlaufentiefe, führen zu geringen empfundenen Fugenqualitäten.

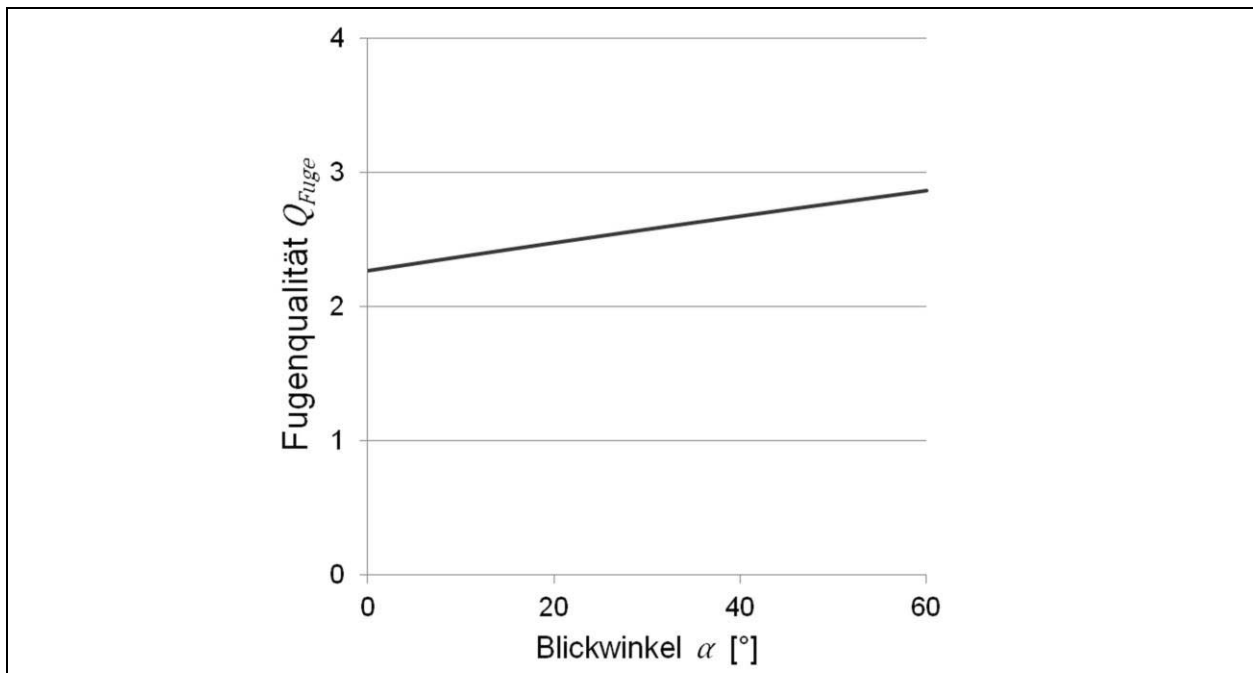


Abbildung 7-2 Modellcharakteristik in Abhängigkeit vom Blickwinkel

Die ermittelte Modellgleichung zeigt insgesamt eine sehr gute Übereinstimmung zu den Ergebnissen der quantitativen Erhebung. Dies zeigt sich sowohl in der guten Regression der Gleichung ( $R^2 = 0,80$ ) als auch in der guten Übereinstimmung der Effekte (vgl. Abbildung 7-3). Während der Ermittlung der Modellgleichung wurden lineare und polynomische Approximationsgleichungen als weitere Modelle hinsichtlich ihrer Eignung zur Beschreibung des realen

Verhaltens untersucht. Jedoch zeigt keines der Modelle eine gute Übereinstimmung mit den Messwerten bei gleichzeitiger guter Übereinstimmung mit den gemessenen Effekten.

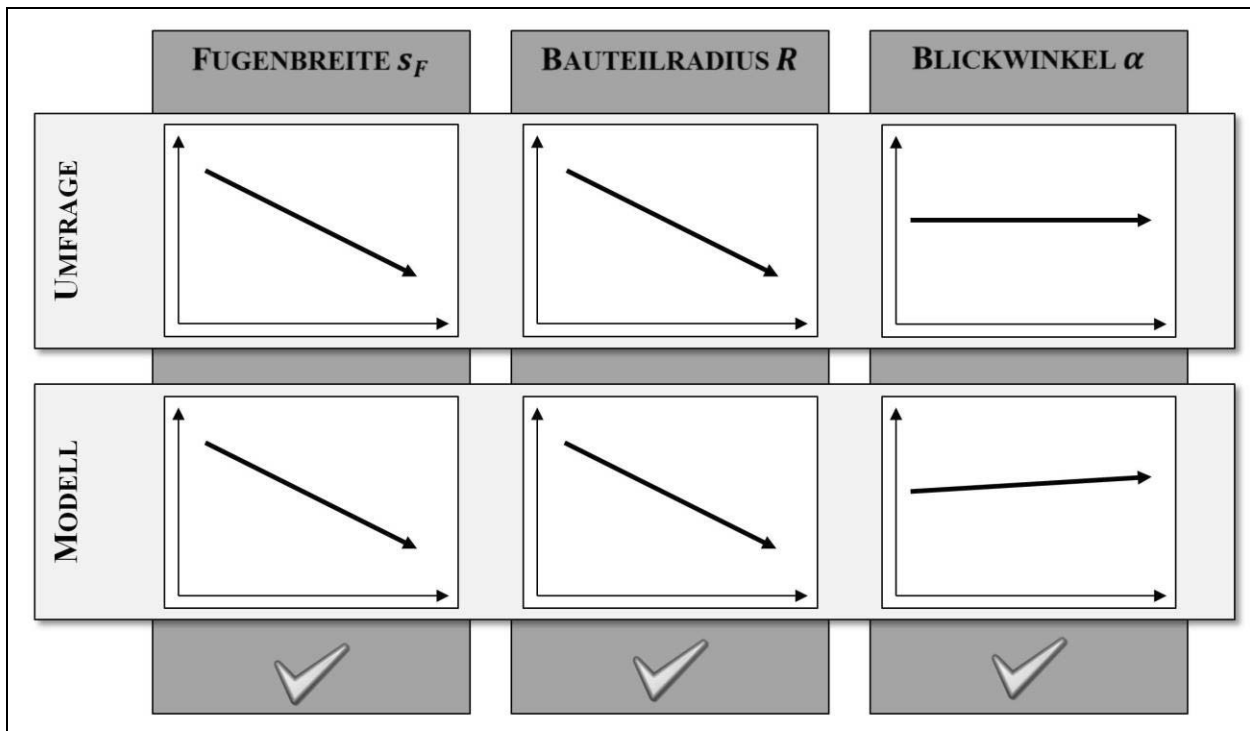


Abbildung 7-3 Vergleich der Modellcharakteristik mit dem Ergebnis der Befragung zur Fugenqualität

### 7.1.3 Zusammenführung der Prognosemodelle

Aus den zuvor dargestellten Modellen zur Prognose der Anmutung und der Herstellbarkeit kann das Hemming Quality Diagram aufgebaut werden. Der Gültigkeitsbereich des Diagramms nach Kap. 4.1 wird hierbei durch Prozessgrenzen, werkstoffliche Grenzen und Qualitätsanforderungen limitiert (vgl. Abbildung 7-4). Die werkstoffliche Grenze wird maßgeblich durch die ertragbare Biegebeanspruchung definiert. Beispielsweise zeigt Werkstoff 2 in den Untersuchungen in Kap. 5.3 gegenüber Werkstoff 1 eine deutlich reduzierte Biegebarkeit, der Arbeitsbereich für das Falzen ist dementsprechend eingeschränkt. Ebenso wird das Falzen durch die technologischen Randbedingungen des Prozesses limitiert, da nicht jede beliebige Kombination von Prozessparametern umsetzbar ist. So ist beispielsweise die Anfertigung von sehr kleinen, gleichmäßigen Abstellradien ( $< 0,4$  mm) entlang des gesamten Bauteilumrisses am Einzelteilwerkzeug technisch kaum möglich. Innerhalb des Arbeitsbereiches in Abbildung 7-4 werden Anmutung und Herstellbarkeit durch die experimentell ermittelte Gleichung beschrieben.

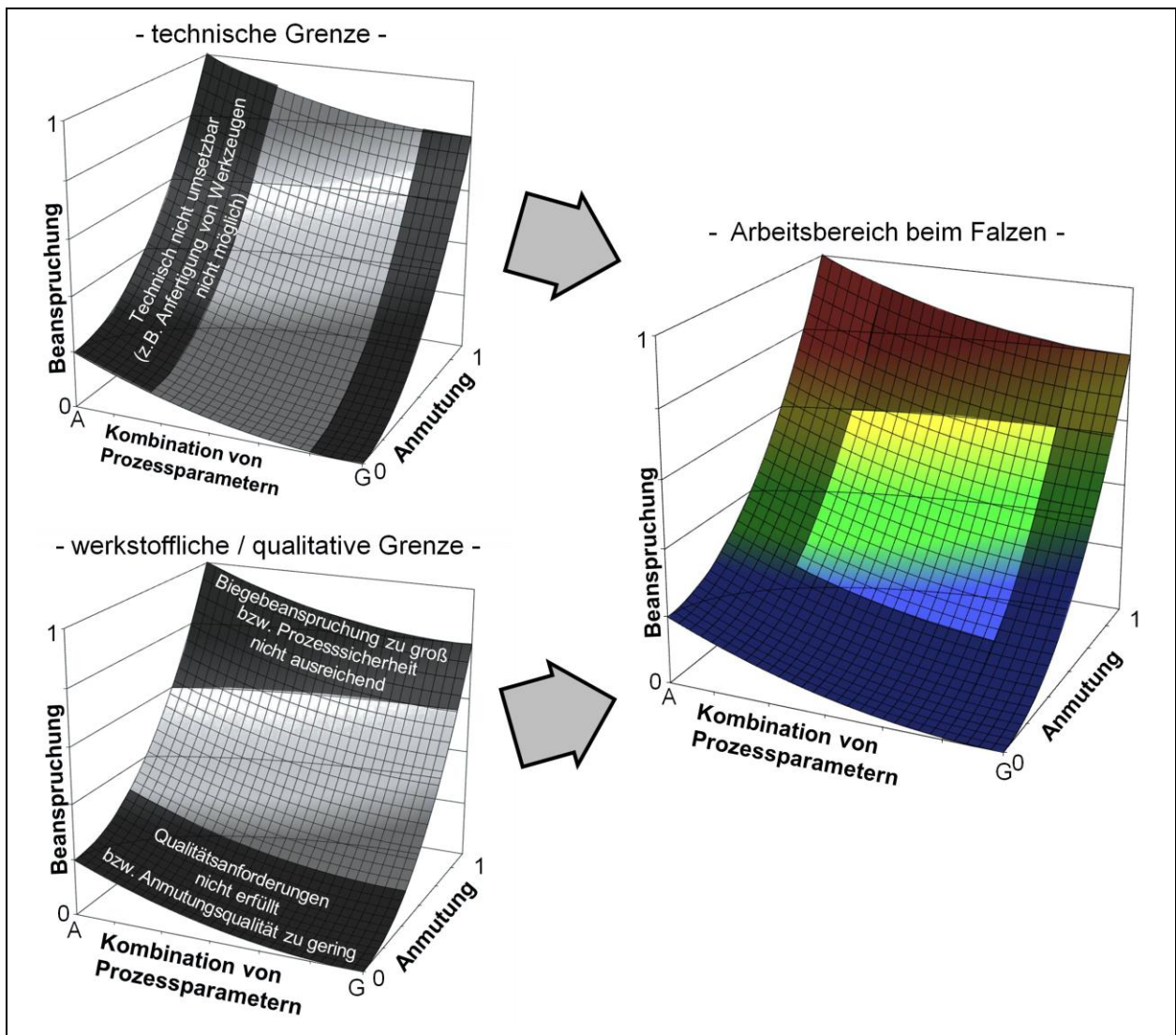


Abbildung 7-4 Aufbau des Hemming Quality Diagram und Grenzen der Prognosefähigkeit

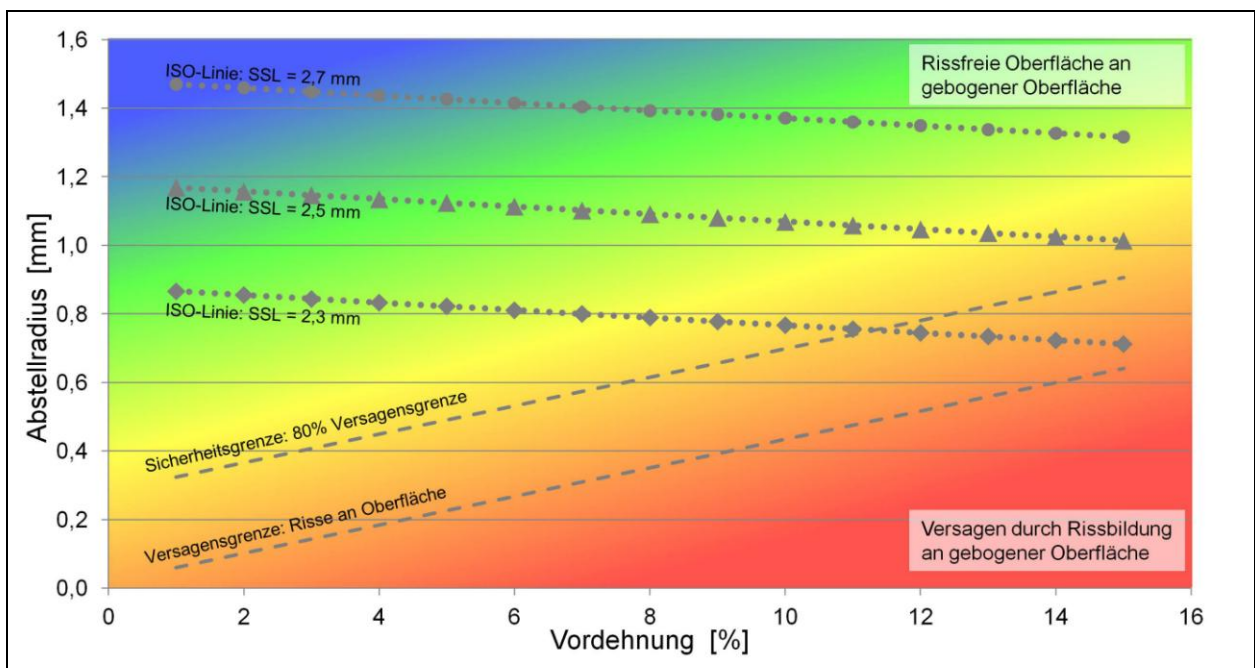


Abbildung 7-5 Vereinfachtes Hemming Quality Diagram mit Haupteinflussgrößen des Fertigungsprozesses

Die vorangegangenen Abschnitte zeigen, dass die Anmutung der Falzschlaufe und deren Herstellbarkeit maßgeblich durch die Prozessparameter Abstellradius und Vordehnungsbetrag bestimmt werden. Im nachfolgenden werden diese Parameter zur Definition des Fertigungsprozesses verwendet. Aus dem mehrdimensionalen HQD aus Kap. 4.1 kann somit ein vereinfachtes Diagramm abgeleitet werden (vgl. Abbildung 7-5). Das Diagramm zeichnet sich durch die Abbildung der Prozessparameter auf den Hauptachsen und durch die Angabe von Bereichen mit gleicher Biegebeanspruchung bzw. gleicher Anmutungsqualität (ISO-Linie) aus. Mithilfe dieses HQD's kann nun eine einfache Prozessbewertung vorgenommen werden.

## 7.2 Validierung am Realbauteil

Für die Validierung wurde die Vordertür eines aktuellen Serienmodells verwendet. Das Außenblech der Tür entspricht Werkstoff 1 aus Kap. 5. Die Nennblechdicke des Außenteils beträgt 1,04 mm. Das Innenblech weist eine Nennblechdicke von 1,50 mm auf.

In diesem Beispiel wird angenommen, dass sich die Vordertür noch im Entwicklungsstadium befindet und ein erstes Fertigungskonzept für das Falzen bewertet werden soll. Zu diesem Zeitpunkt der Fahrzeugentwicklung sind noch keine Machbarkeitsuntersuchungen zum Einzelteil oder zum ZSB durchgeführt worden. Die Bewertung der Konstruktionsunterlagen erfolgt auf Basis von Vorgängermodellen und vergleichbaren Baureihen. Aus der Konzeptionierung des Produktes sind die Nennblechdicken und Werkstoffe zur Erfüllung der Vorgaben des Lastenhefts bekannt. Folgende Annahmen können damit getroffen werden:

- ◆ Vordehnungsbetrag ca. 8 %, z. B. Schätzung aus Vorgängermodell
- ◆ Abstellradius  $r_A = 0,8$  mm, z. B. Schätzung aus Vorgängermodell oder Radienplan
- ◆ Anmutungsqualität  $SSL = 2,30$  mm, aus Produktdefinition

Anhand dieser Annahmen wurde die Biegebeanspruchung mithilfe von Kap. 7.1.1 prognostiziert. Die vom Modell prognostizierte Biegebeanspruchung (Biegebewertungsfaktor) beträgt  $BBF_{Prognose} = 0,15$  bei 8 % Vordehnung. Somit beträgt der Biegequotient  $BQ_{Prognose} = 0,59$ . Die Biegebeanspruchungen sind für diesen Werkstoff nicht kritisch.

Die beschriebene Falzverbindung wird in einem aktuellen Serienprodukt umgesetzt. Zur Validierung des Modells werden die prognostizierten Werte mit den realen Werten am Produkt abgeglichen. Hierzu wurden Schliffbilder erstellt und die sichtbare Schlaufenlänge als Indikator für die Anmutungsqualität bestimmt. Der mittlere Messwert an der ausgewerteten Bauteilkante beträgt  $SSL_{Messung} = 2,25$  mm. Dieser Wert stimmt sehr gut mit der Vorgabe aus der Bauteilentwicklung ( $SSL = 2,30$  mm) überein.

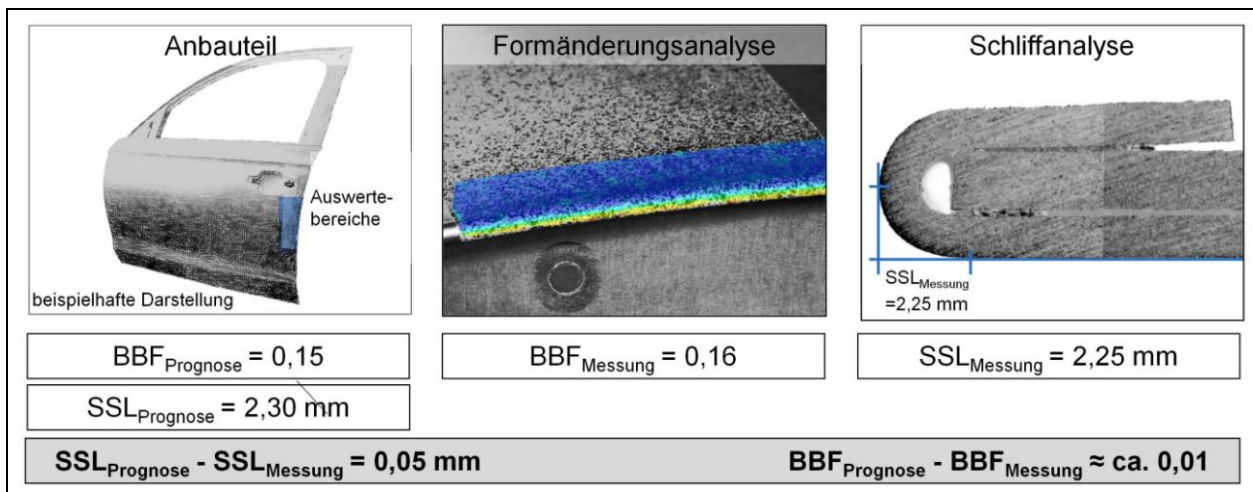


Abbildung 7-6 Bestimmung der Biegebeanspruchung und der dimensionalen Eigenschaften einer Falzschlaufe an einem Serienbauteil zur Validierung des Modells

Zur Bestimmung der Biegebeanspruchung wird die Formänderung des Bauteils entlang der Prozesskette erfasst. Hierzu wurden die in Kapitel beschriebenen Methoden eingesetzt. Die Formänderungen wurden nach dem Tiefziehen, dem Abstellen und nach dem Fertigfalzen gemessen. Nach dem Falzen beträgt die gemessene Biegebeanspruchung  $BBF_{\text{Messung}} = 0,16$ . Die Abweichung des Modells vom tatsächlich erreichten Wert der Biegebeanspruchung beträgt ca. 3%. Das Modell bildet die Realität damit sehr gut ab.

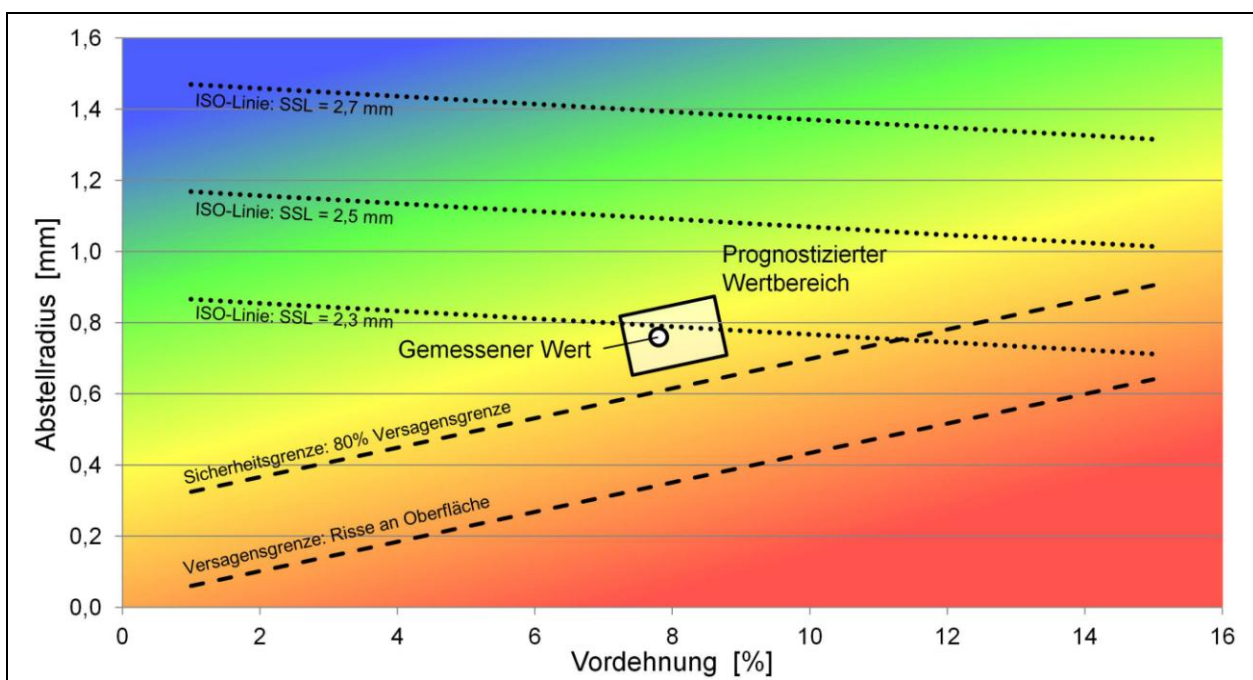


Abbildung 7-7 Hemming Quality Diagramm für das Validierungsbauteil „Vordertür“

## 8 ZUSAMMENFASSUNG DER ERKENNTNISSE

### *CONCLUSION*

Die hohen Ansprüche der Kunden an Premiumfahrzeuge sowohl im Hinblick auf die technologische Leistungsfähigkeit des Fahrzeugs wie auch hinsichtlich der attraktiven Gestaltung des Exterieurs stellen heute zentrale Punkte bei der Planung und Entwicklung solcher Fahrzeuge dar. Gleichzeitig wird der Prozess zur Konzept- und Serienentwicklung von Premiumfahrzeugen durch den hohen Grad an Derivatisierung und die Forderung nach kurzen Produkteinführungszeiten zunehmend komplex. Insbesondere die Fertigung von Anbauteilen für die Fahrzeugaußenhaut steht im Spannungsfeld zwischen der Umsetzung von Designvorgaben, die den Kundenwunsch widerspiegeln, und der Wirtschaftlichkeit zur Auslegung und Absicherung der Herstellbarkeit dieser Teile. Neben den Designmerkmalen auf der flächigen Außenhaut (z. B. Tornadolinie) stehen auch Designmerkmale wie Fugen im Fokus der Fahrzeughersteller.

Die Fugen von Fahrzeugen (z. B. Türfuge) stellen aufgrund Ihrer geringen Breite ( $< 10$  mm) keine selbständigen Formelemente dar, vielmehr wirken die Fugen als Trennlinie zwischen zwei Bauteilen. Diese Trennlinien sind einerseits technisch erforderlich (z. B. um eine Relativbewegung der Bauteile zu ermöglichen), andererseits sind die Fugen für den Kunden sichtbar und stellen somit ein gestalterisches Element der Fahrzeugaußenhaut dar. Im Sinne des Produktdesigns sind Fugen Teil der Produktgestalt, die beim Kunden Aufmerksamkeit erzeugen und Interesse wecken soll. Die „Kommunikation“ zwischen Mensch und Produkt wird durch die Wahrnehmung und die Erkennung des Produkts sowie durch das Verhalten gegenüber dem Produkt bestimmt. Die emotionalen Eindrücke des Kunden, d. h. das Auftreten von negativen oder positiven Stimmungen, werden als Anmutung des Produktes bezeichnet. Diese Anmutung stellt einen diffusen, gefühlsartigen und subjektiv geprägten Eindruck dar. Durch das Projizieren des erlebten Eindrucks auf das Produkt wird die Anmutung gleichzeitig zu einer Objekteigenschaft. Für eine ansprechende Produktgestaltung mit dem Ziel bestimmte Fahrzeugeigenschaften (z. B. Sportlichkeit) zu vermitteln, muss die Anmutung der Karosseriefugen mit betrachtet und bewertet werden. Die zeitlichen Vorgänge während des Erkennens sowie grundsätzliche Zusammenhänge zwischen Formgestalt und Anmutung sind zwar bekannt (vgl. Kap. 2.1), eine Quantifizierung der Anmutungsleistung von Karosseriefugen heutiger Fahrzeuge liegt jedoch nicht vor. Ziel dieser Arbeit ist es daher die Anmutung von Karosseriefugen zu erfassen, zu quantifizieren und fertigungstechnische Einflussgrößen zu ermitteln.



Karosseriefugen werden durch die angrenzenden Anbauteile bestimmt. Hierbei steht vor allem die Falzung der Anbauteile, welche deren Umrandung darstellt, im Fokus. Das Falzen des Außenteils mit dem Innenteil stellt einen Karosseriebauprozess dar. Aus fertigungstechnischer Sicht ist das Falzen der Bauteile ein Biegeprozess, bei dessen Auslegung insbesondere die auftretenden Biegebeanspruchungen betrachtet werden müssen. Die im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Aluminiumblechwerkstoffe der AA 6xxx Reihe weisen eine, im Vergleich zu üblichen Stahlgüten, reduzierte Biegebarkeit auf. Obwohl in den vergangenen Jahren zahlreiche Ansätze zur Bestimmung der Biegebarkeit (vgl. Kap. 2.3.4) dieser Werkstoffe entwickelt wurden, stellt die Auslegung von Falzprozessen für den PKW-Karosseriebau auch heute noch eine große Herausforderung dar. Eine Ursache hierfür ist die eingeschränkte Übertragbarkeit der in einfachsten Laborversuchen ermittelten Biegekriterien, z. B. mithilfe des Plättchenbiegens, auf den komplexen Karosseriebauprozess unter Berücksichtigung der Einzelteilherstellung, z. B. Tiefziehen. Im Rahmen dieser Arbeit wurden daher seriennahe Versuchswerkzeuge für Maschinen- und Rollfalzvorgänge eingesetzt, um einerseits die Biegekriterien zu validieren und andererseits Prozesseinflussgrößen zu quantifizieren.

Damit zukünftige Fertigungsprozesse für Karosserieanbauteile aus Aluminium, welche an ihrer Bauteilumrandung Falzschlaufen mit hoher Anmutungsqualität aufweisen sollen, versagensfrei ausgeführt werden können, ist es Ziel dieser Arbeit ein prinzipielles Modell zur Prognose der Anmutungsqualität der Falzschlaufe und der auftretenden Biegebeanspruchungen zu entwickeln. Das als Hemming Quality Diagram HQD bezeichnete Modell stellt einen kausalen Zusammenhang zwischen der Anmutungsqualität einer Falzschlaufe und deren Herstellbarkeit dar. Die grundlegenden Voraussetzungen hierfür sind die Kenntnisse über die prozessualen Einflussgrößen auf die dimensionalen Eigenschaften der Falzschlaufe (und somit auch deren Anmutungsqualität) sowie auf die Biegebeanspruchungen (und somit der Herstellbarkeit der Falzschlaufe).

Für die Bewertung der Herstellbarkeit wurde zunächst die Biegebarkeit von zwei Aluminiumlegierungen mithilfe des Plättchenbiegens charakterisiert. Die Ergebnisse der Charakterisierung dienten als Referenz bei der nachfolgenden Bewertung der während des Falzens auftretenden Biegebeanspruchungen. Für die Bewertung der Biegebarkeit wurde der Biegebewertungsfaktor nach [DEN14] als Versagenskriterium verwendet. Dieses Kriterium wurde speziell für Aluminiumlegierungen der AA 6xxx Reihe entwickelt und beschreibt das Versagen in Folge einer starken Dehnungslokalisierung an der Falzschlaufe. Für die experimentelle Bestimmung der Biegebeanspruchung wurde zunächst mithilfe der optischen Formänderungsanalyse die Dehnungsverteilung an der Falzkante gemessen und anschließend das

Dehnungsmaximum und die Breite der Formänderungszone bestimmt. Aus dem Verhältnis dieser beiden Größen kann die Biegebeanspruchung abgeleitet werden. Im Anschluss an die Charakterisierung der Werkstoffe wurde die prozessuale, schrittweise Entwicklung der Biegebeanspruchung während des Falzens betrachtet. Hierbei wurde sowohl das Maschinenfalzen mit starren Werkzeugen als auch das Rollfalzen mit einem industriellen Roboter untersucht. Die betrachtete Prozessfolge umfasste dabei sowohl das Tiefziehen und Abstellen der Bauteilflansche des Einzelteils als auch das Falzen. Bei beiden Fertigungstechnologien zeigt sich, dass die Biegebeanspruchung nicht ausschließlich vom Falzprozess abhängt, vielmehr werden die Beanspruchungen bereits bei der Einzelteilherstellung prädisponiert. Aufbauend auf die prozessuale Betrachtung der Fertigungskette wurden mit denselben seriennahen Werkzeugen die Einflussgrößen auf die Biegebeanspruchung untersucht und quantifiziert. Neben den prozessualen Einflussgrößen (z. B. Vorbeanspruchung des Außenblechs beim Tiefziehen) wurden zwei Aluminiumlegierungen und konstruktive Einflussgrößen (z. B. Nennblechdicke des Innenteils) mit betrachtet. Die experimentellen Versuche wurden mit einem statistischen Versuchsplan durchgeführt und ausgewertet. Die Ergebnisse zeigen sowohl für das Maschinen- als auch für das Rollfalzen, dass die Wahl des Blechwerkstoffs und die Nennblechdicken der eingesetzten Blechgüten den weitaus größten Teil der resultierenden Biegebeanspruchung vorherbestimmen. Die prozessualen Größen „Abstellradius“ und „Vorbeanspruchung“ bilden die wichtigsten fertigungstechnischen Einflussgrößen. Beim Maschinenfalzen kann die Biegebeanspruchung nur sehr gering durch die technologischen Parameter des Falzens (z. B. Falzkraft) beeinflusst werden. Beim Rollfalzen ist die Möglichkeit zur Einflussnahme etwas deutlicher ausgeprägt. Hier ist vor allem die Bahn der Falzrolle während des Vorfalzens entscheidend. Im Vergleich zur Beeinflussung der Biegebeanspruchung durch den Einzelteilprozess sind die Stellmöglichkeiten beim Falzen (Maschinen- und Rollfalzen) als gering zu bewerten.

Die experimentellen Untersuchungen dienten neben der Ermittlung der Biegebeanspruchung auch der Ermittlung der dimensionalen Eigenschaften der Falzschlaufe. Für die Bewertung der dimensionalen Eigenschaften werden charakteristische Merkmale, die einerseits messtechnisch erfassbar sind, andererseits die visuellen Eigenschaften der Falzschlaufe in Hinblick auf die Anmutung widerspiegeln, benötigt. Die Analyse der Querschnitte von Falzschlaufen aus Aluminium zeigte, dass die Kontur eines gefalzten Blechabschnitts nur unzureichend durch die Angabe eines Kreisradius beschrieben wird. Deutlich bessere Approximationen wurden mithilfe von Ellipsen erzielt. Für die Bewertung der dimensionalen Eigenschaften wurde eine Ellipse gewählt, deren Hauptachsen die sichtbare Schlaufenlänge und die sichtbare Schlaufentiefe bilden. Die Kontur des Falzes wird auf diese Weise zu ca. 97 % genau wiedergegeben. Analog

zu den experimentellen Untersuchungen zur Biegebeanspruchung wurde die schrittweise Entwicklung der Falzgeometrie innerhalb der Fertigungskette betrachtet. Dabei zeigt sich, dass beim Maschinenfalzen die sichtbare Schlaufenlänge und -tiefe prinzipiell zunächst bis zum Vorfalzen größer werden, bevor beim Fertigfalzen die endgültige Schlaufenform erzeugt wird. Im Gegensatz dazu findet beim Rollfalzen eine kontinuierlich fortschreitende Reduktion der sichtbaren Schlaufenlänge und -tiefe statt. Vergleichbar zu den Betrachtungen der Einflussgrößen auf die Biegebeanspruchung beim Falzen kann für die dimensionale Ausführung festgestellt werden, dass die Einzelteilherstellung die finale Schlaufenform maßgeblich vorbestimmt. Bei beiden Fertigungstechnologien beträgt der Einfluss zwischen 80 – 90 %. Nur ein vergleichsweise geringer Teil der Schlaufengeometrie wird durch das eigentliche Falzen im Karosserierohbau bestimmt.

Nachdem die Herstellbarkeit der Falzverbindung experimentell untersucht wurde, stand in den folgenden Untersuchungen die Ermittlung der Anmutungsqualität im Fokus. In einer Feldstudie wurden zunächst die Falzschlaufen an heutigen Premiumfahrzeugen unterschiedlicher Marken gemessen. Diese Messwerte dienten als Ausgangspunkt für eine theoretische Betrachtung von Fugenmerkmalen und einer Probandenbefragung zur Ermittlung von Einflussgrößen auf die wahrgenommene Anmutungsqualität von Falzschlaufen. Im Rahmen der theoretischen Untersuchung wurde angenommen, dass die Wahrnehmung der Fugengeometrie nicht ausschließlich durch die geometrische Fugenbreite, sondern auch durch die angrenzenden Bauteilgeometrien, bestimmt wird. Die wahrnehmbare Fugenbreite wird demnach durch den Helligkeitsverlauf quer zur Fugenrichtung beeinflusst. Als Haupteinflussgrößen auf diese Helligkeitsverteilung und die wahrnehmbare Fugenbreite wurden die geometrische Fugenbreite, die sichtbare Schlaufenlänge der Falzschlaufe, der Blickwinkel des Betrachters, die Asymmetrie der Fugen und der Lichteinfallswinkel identifiziert.

Für die quantitative Erhebung der Anmutungsqualität wurde ein Fragebogen erstellt, der von der Probandengruppe bearbeitet wurde. Um sicherzustellen, dass die Probanden eine Gruppe von Kunden von Premiumfahrzeugen widerspiegeln, wurde anhand von Kontrollfragen am Beginn des Fragebogens eine Klassifizierung der Teilnehmer vorgenommen. Im Vergleich mit bekannten Merkmalen von Kunden im Premiumsegment wurde festgestellt, dass die durch gezielte Auswahl und anschließendes Schnellballverfahren bestimmten Probanden diese Gruppe repräsentieren. Im Hauptteil des Fragebogens wurden den Teilnehmern Darstellungen von Fugensituationen mit unterschiedlichen geometrischen Merkmalen vorgelegt, die von den Probanden verglichen und bewertet wurden. Die vorgelegten Fugensituationen unterschieden sich in jeweils einem Merkmal und stellten somit einen einfachen statistischen Versuchsplan zur

Untersuchung von Einflussgrößen dar. Die Auswertung der Umfrageergebnisse zeigt, dass die Fugenbreite  $s_F$  und der Falzradius  $R$  an der Fuge die signifikantesten Einflussgrößen auf die empfundene Fugenqualität darstellen. Die Signifikanz der Einflussfaktoren und deren Rangfolge in der Bewertung stimmen mit den Ergebnissen der theoretischen Studien zur wahrnehmbaren Fugenbreite überein.

Anhand der experimentellen und theoretischen Untersuchungsergebnisse zu den Einflussparametern auf die Herstellbarkeit und die Anmutungsqualität von Falzschlaufen beim Maschinen- und Rollfalzen, können die Anmutungsqualität und die Herstellbarkeit in Abhängigkeit der Prozessgrößen (z. B. Vorfalzwinkel) angegeben werden. Durch die Kombination beider Prognosemodelle wird das Hemming Quality Diagram gebildet, das beide Zielgrößen prognostizieren kann. Für die Validierung des HQD wurde ein Serienbauteil aus Aluminium verwendet (Vordertür). Zunächst erfolgte die Prognose der Biegebeanspruchung und der Anmutung anhand von vorgegebenen Prozessgrößen (z. B. Schätzung der Vordehnung aus Vorgängerprojekt), anschließend wurden die dimensionalen Schlaufeneigenschaften sowie die Biegebeanspruchung am Bauteil gemessen. Hierzu wurden die optischer Formänderungsanalyse und die Schliffbildanalyse eingesetzt. Der Vergleich der gemessenen Werte mit den vorhergesagten Prognosewerten zeigt nur geringste Abweichungen.

Abschließend lässt sich festhalten, dass mit dieser Arbeit eine Methode zur Prognostizierung der Anmutungsqualität von Falzschlaufen sowie der auftretenden, werkstofflichen Beanspruchungen bei deren Herstellung dargelegt wurde. Diese übergreifende, d. h. über die technologischen Gesichtspunkte hinausgehende, Bewertung von Falzprozessen basiert auf technologischen Versuchen mit Serienwerkstoffen und technologieunabhängigen Kundenbefragungen. Die Anwendung der Methode wurde im Rahmen dieser Arbeit an einem Serienbauteil aufgezeigt. Für die Auslegung zukünftiger Falzprozesse bietet sich somit die Möglichkeit diese sowohl im Hinblick auf die Herstellbarkeit, als auch im Hinblick auf die Anmutungsqualität der Falzverbindung zu gestalten.

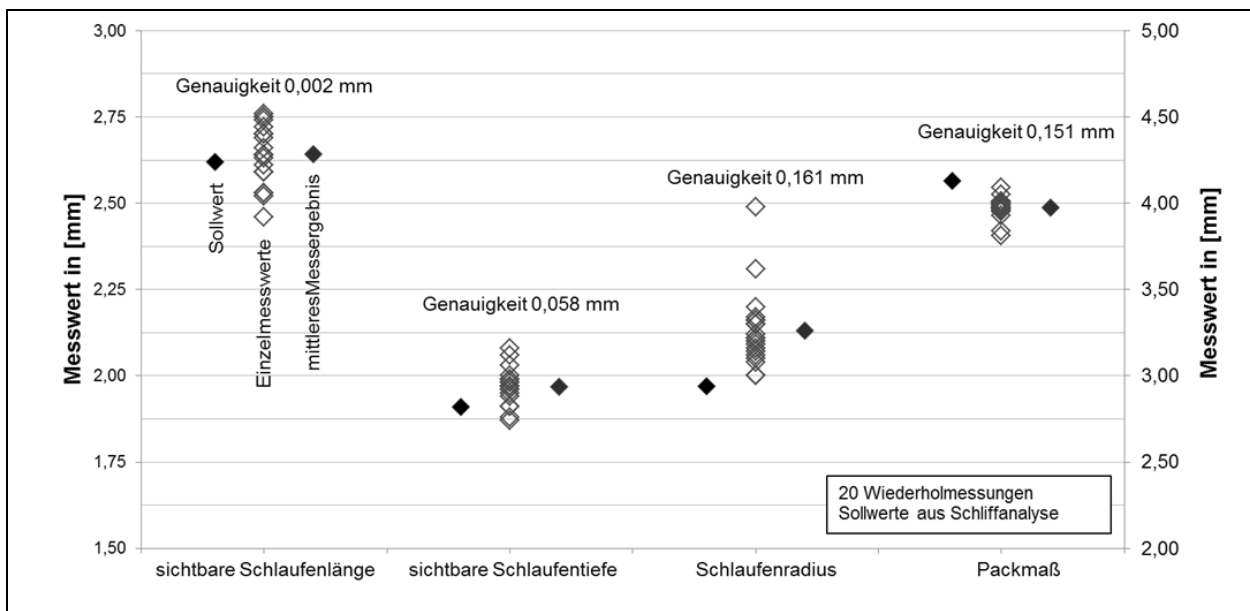


## ANHANG

## APPENDIX

## Anhang - A Genauigkeit und Reproduzierbarkeit der Messungen mit dem Lichtschnittsensor

Zur Bestimmung der Messgenauigkeit wurden  $i = 20$  Wiederholmessungen an einer zufällig ausgewählten Falzprobe von zwei Prüfern durchgeführt und diese mit dem Sollwert, der in einem Schliffbild bestimmt wurden, verglichen. Die Zusammenstellung der Auswertung ist im Bild dargestellt. Es zeigt sich, dass die dimensionalen Merkmale mit ausreichender Präzision bestimmt werden. Die sichtbare Schlaufenlänge und die sichtbare Schlaufentiefe, welche in der experimentellen Untersuchung eingesetzt wurden, wurden mit einer Genauigkeit von  $s_x = |\bar{x} - x_{\text{Soll}}| < 0,06 \text{ mm}$ , mit  $\bar{x} = \sum_{i=1}^{20} x_i$ , ermittelt.

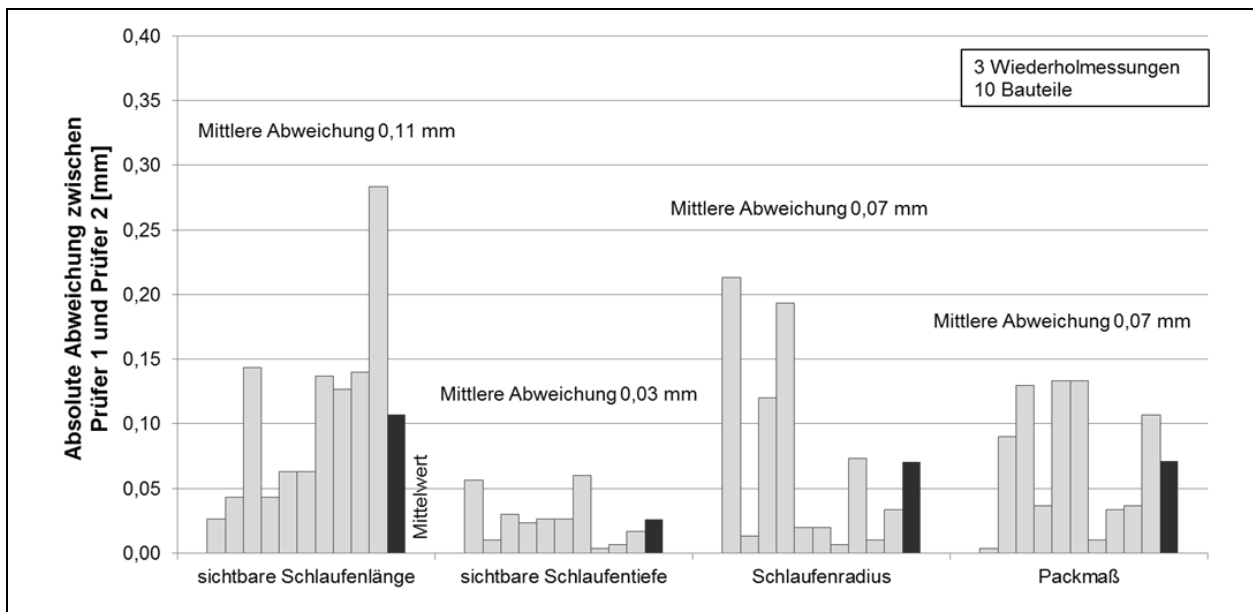


Genauigkeit der gemessenen dimensionalen Eigenschaften von Falzproben mithilfe des Lichtschnittsensors, linke y-Achse: sichtbare Schlaufenlänge und -tiefe, Schlaufenradius, rechte y-Achse: Packmaß

Die Reproduzierbarkeit der Messergebnisse wurde anhand der Abweichung zwischen den mittleren Ergebnissen von Prüfer 1 und Prüfer 2 an  $n = 10$  nacheinander gemessenen Geometrien bestimmt. Jedes Bauteil wurde dabei von jedem Prüfer dreimal gemessen. Die Reproduzierbarkeit  $r_x$  folgt aus Gleichung 8-1. Die Auswertung zeigt, dass die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse sehr hoch ist. Die Abweichung zwischen Prüfer 1 und 2 beträgt im Mittel  $r_x < 0,12 \text{ mm}$ .

$$r_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\bar{x}_{\text{Prüfer 1},i} - \bar{x}_{\text{Prüfer 2},i}|$$

Gleichung 8-1



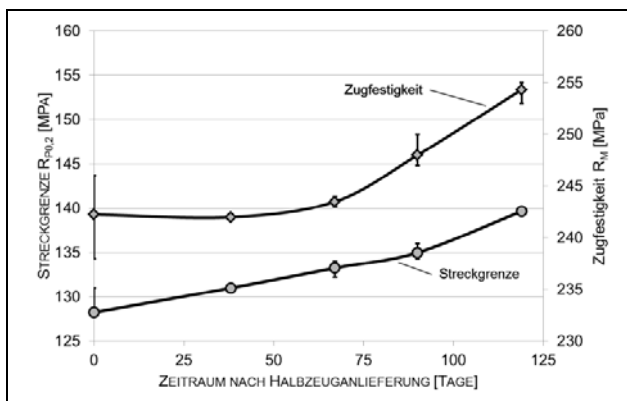
Reproduzierbarkeit der gemessenen dimensionalen Eigenschaften von Falzproben mithilfe des Lichtschnittsensors

## Anhang - B Einfluss der Werkstoffalterung auf die Biegebeanspruchung beim Maschinenfalzen

Die Alterung des Werkstoffs wurden über einen Zeitraum von 120 Tagen betrachtet. Die zeitliche Entwicklung der technologischen Werkstoffeigenschaften, welche im Zugversuch ermittelt wurden, ist nachfolgend dargestellt. Während des Untersuchungszeitraums wurden synchron zur Werkstoffcharakterisierung auch Maschinenfalzversuche mit 10 % vorbeanspruchten Proben durchgeführt. Die gewählte Parameterkombination stellt einen Prozess nahe der Versagensgrenze durch Biegen dar. Aufgrund der kritischen Parameterwahl ist lediglich die Entstehung von Rissen während des Falzens als Qualitätskriterium von Interesse. Der Anstieg der Zugfestigkeit  $R_m$  des Werkstoffs um 5 % sowie die Erhöhung der Streckgrenze  $R_{p0,2}$  um 10 % während den 120 Tagen der Betrachtung weisen keinen sichtbaren Einfluss auf die Oberflächenqualität der gefalzten Verbindung. Keine der gefalzten Proben weist sichtbare Risse an der Oberfläche auf.

Versuchsparameter des Maschinenfalzens von Aluminiumproben zur Untersuchung des Einflusses der Werkstoffalterung des Außenteils auf die Biegebeanspruchung der gefalzten Bauteilkante

	PROZESSPARAMETER	MERKMALSWERT	RAHMENBEDINGUNGEN
WERKSTOFF	Außenblech: Aluminiumlegierung	Legierung 2	Außenblech: Abstellradius: 0,9 mm
	Außenblech: Werkstoffalter	0, 38, 67, 90, 119 Tage nach Anlieferung	Außenblech: Vorbeanspruchung: 10% in WR, uniaxial
	Außenblech: Nennblechdicke	1,04 mm	Innenblech: Nennblechdicke: 1,50 mm



Zeitliche Veränderung der Zugfestigkeit und der Streckgrenze der Legierung 1 durch natürliche Alterungseffekte



Frontalaufnahme der Biegekante der gealterten Proben nach dem Maschinenfalzen



## Anhang - C Probandenbefragung

Probandenbefragung

Seite 1

**Blau oder Rot: Bei welcher Farbe empfinden sie die Karosserie eines Neufahrzeuges als besser?**

### Eine Online-Studie zur visuellen Begutachtung von Karosseriespalten

Liebe Studienteilnehmerinnen und -teilnehmer,

vielen Dank für Ihre Bereitschaft zur Teilnahme an dieser Online-Studie, die Teil meiner Studienarbeit an der Universität Stuttgart am Institut für Umformtechnik ist.

#### Hintergrund

Die vielfältigen Absatzmärkte im globalen Automobilhandel und das große Angebot an Fahrzeugmarken setzt die Automobilhersteller zunehmend unter Druck, die eigenen Produkte am Markt bestmöglich zu positionieren. Ein wichtiger Punkt bei der Platzierung am Markt ist in den letzten Jahren immer mehr das Fahrzeugdesign geworden. Türen, Kotflügel, Motorhauben und Heckdeckel unterbrechen die fließenden Designflächen und -kurven an der Fahrzeugseite.

#### Studienziel

Das Ziel dieser Online-Studie liegt darin, zu ermitteln wie Menschen unterschiedliche Karosseriespalte wahrnehmen.

#### Ihre Aufgabe

Ihnen werden verschiedene Bilder von Türspalten an Karosserien gezeigt. Ihre Aufgabe ist es aus jeweils zwei gegenüberliegenden Bildern, das Bild zu wählen, welches ihrem optischen Empfinden nach die schönere Form darstellt.

#### Studiendauer beträgt ca. 10 Minuten.

Die Daten werden nach wissenschaftlich-ethischen Gesichtspunkten anonymisiert und lediglich zu wissenschaftlichen Zwecken verwendet. Es erfolgt keine Weitergabe persönlicher Daten an Dritte oder Personen, die nicht unmittelbar mit dem Projekt in Verbindung stehen.

#### Achtung

Zwar sind einige Bilder komplett rot, sie unterscheiden sich aber minimal.

Probandenbefragung

Seite 2

### Allgemeine Fragen

#### Alter?

< 30 / 30 - 50 / > 50

#### Geschlecht?

Männlich / Weiblich

#### Berufsgruppe?

Student / Angestellter / Leitender Angestellter / Beamter / Selbstständig

Probandenbefragung

Seite 3

### Worauf achten Sie beim Autokauf?

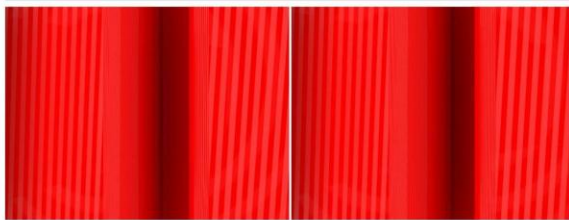
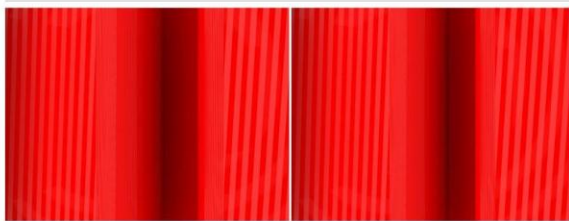
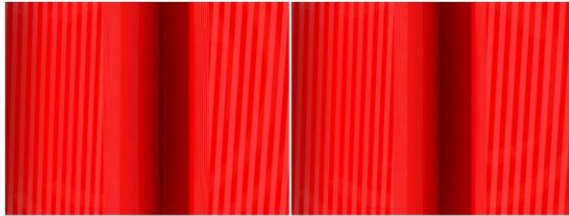
Interieur	min	1 / 2 / 3 / 4 / 5	max
Exterieur / Design	min	1 / 2 / 3 / 4 / 5	max
Leistung	min	1 / 2 / 3 / 4 / 5	max
Marke	min	1 / 2 / 3 / 4 / 5	max
Preis	min	1 / 2 / 3 / 4 / 5	max
Sicherheit	min	1 / 2 / 3 / 4 / 5	max
Qualität	min	1 / 2 / 3 / 4 / 5	max

### Welchen Fahrzeugtyp fahren Sie im Moment?

Cabrio / Coupé / Kleinwagen / Kombi / Limousine / SUV / Van

Probandenbefragung Seite 4

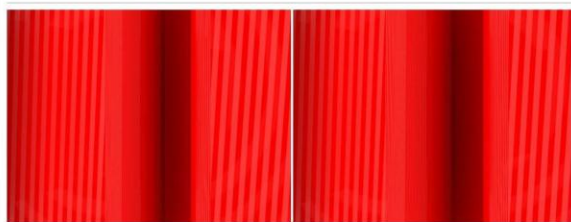
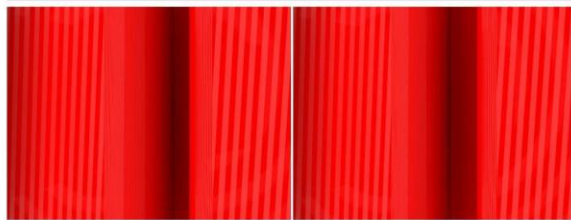
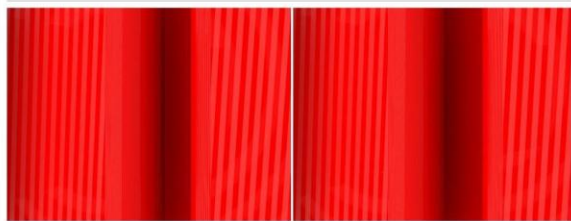
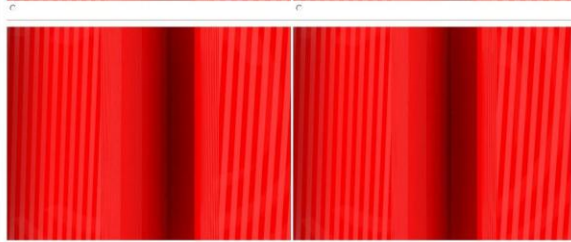
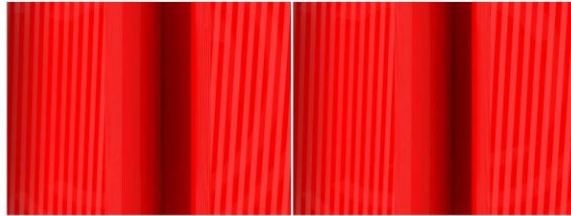
Welcher Türspalt gefällt Ihnen besser? (1/4)



© Hansa-Fenster

Probandenbefragung Seite 5

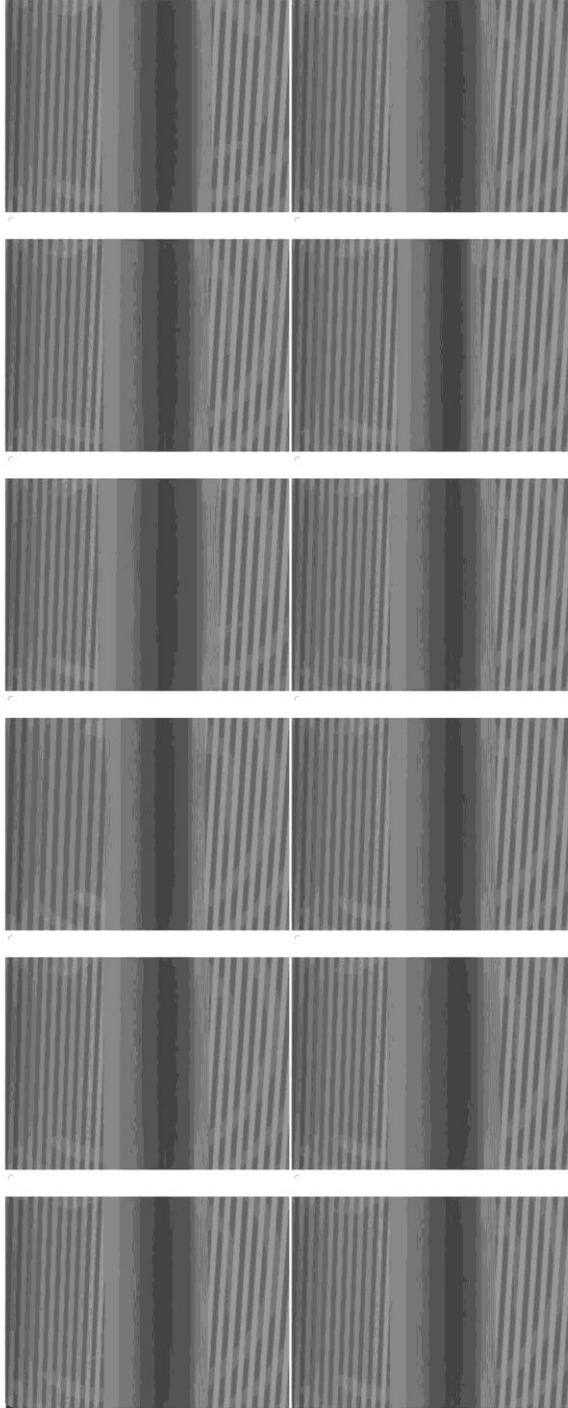
Welcher Türspalt gefällt Ihnen besser? (2/4)



© Hansa-Fenster

Probandenbefragung Seite 6

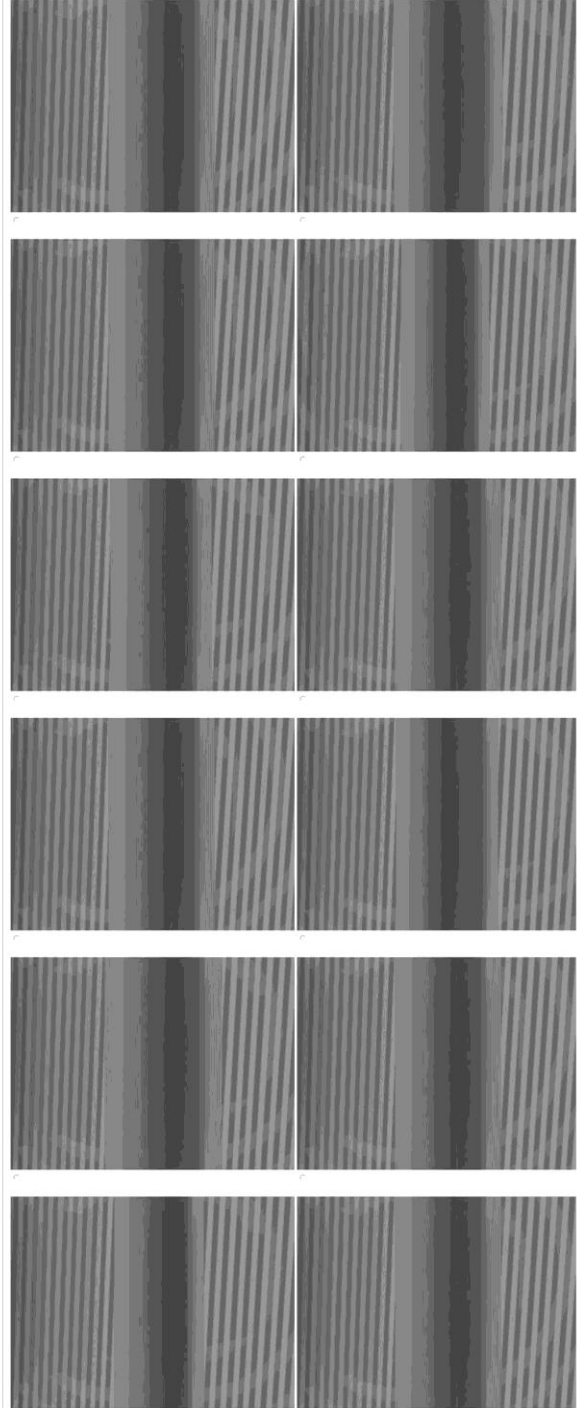
Welcher Türspalt gefällt Ihnen besser? (3/4)



Welcher Türspalt?

Probandenbefragung Seite 7

Welcher Türspalt gefällt Ihnen besser? (4/4)

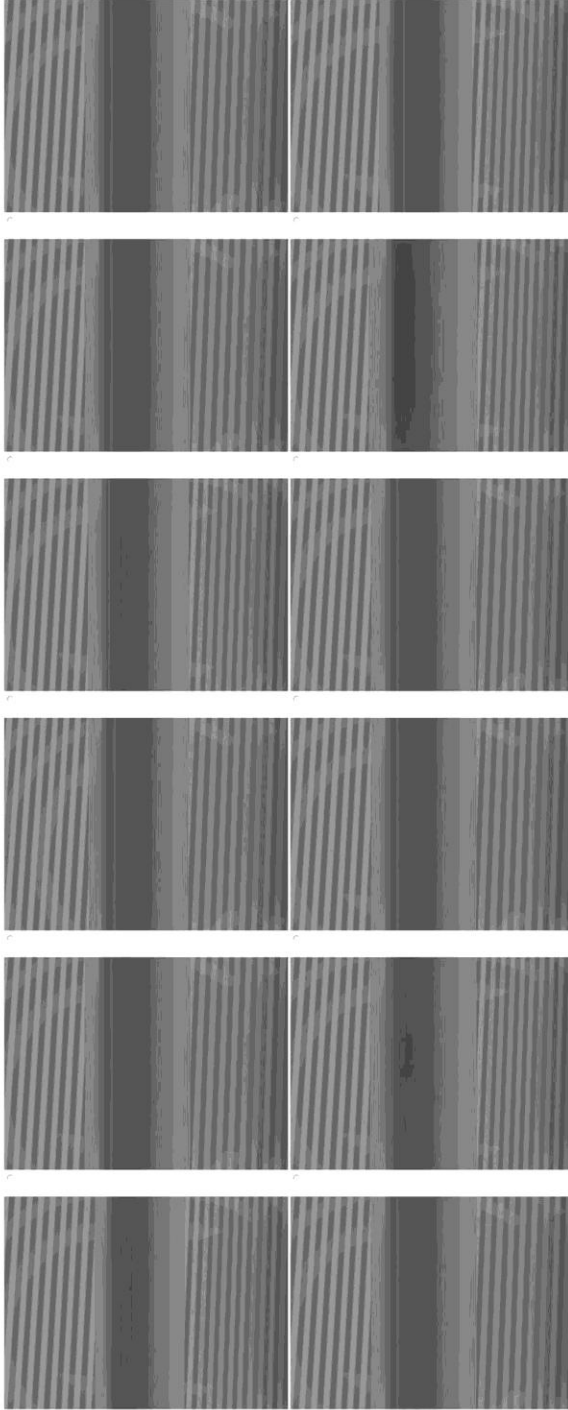


Welcher Türspalt?

Original Umfrage erfolgte in Farbe

Probandenbefragung Seite 8

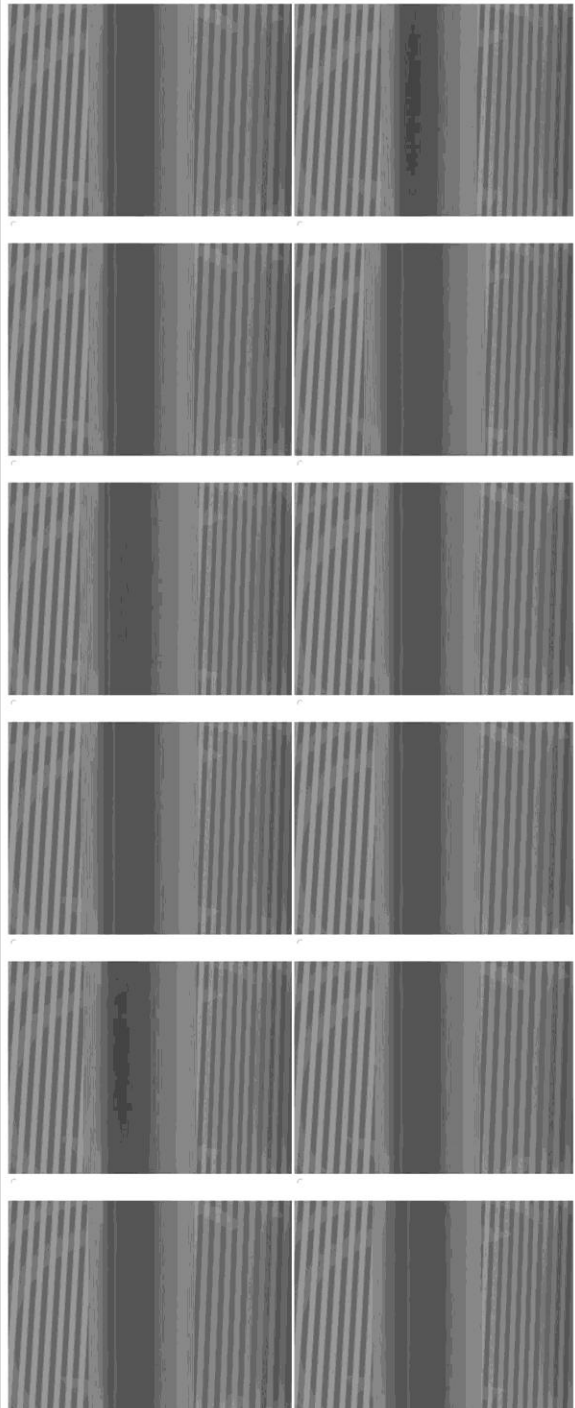
Welcher Türspalt gefällt Ihnen besser? (1/4)



Quelle: T. Meuss, F.

Probandenbefragung Seite 9

Welcher Türspalt gefällt Ihnen besser? (2/4)

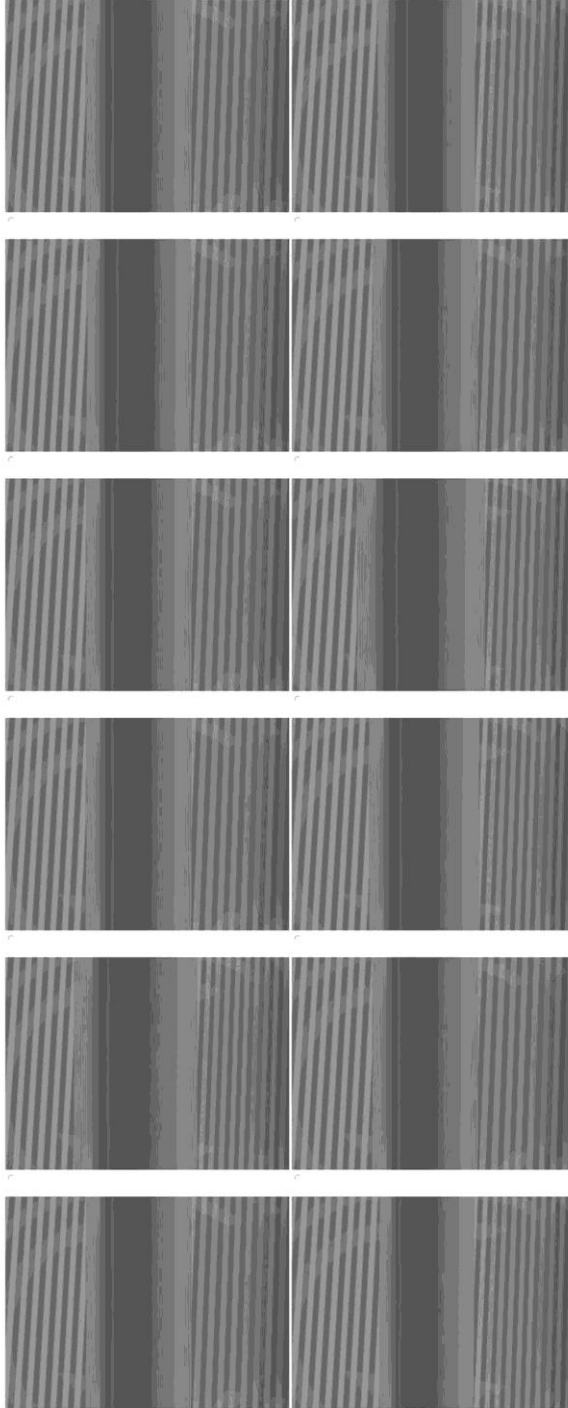


Quelle: T. Meuss, F.

Original Umfrage erfolgte in Farbe

Probandenbefragung Seite 10

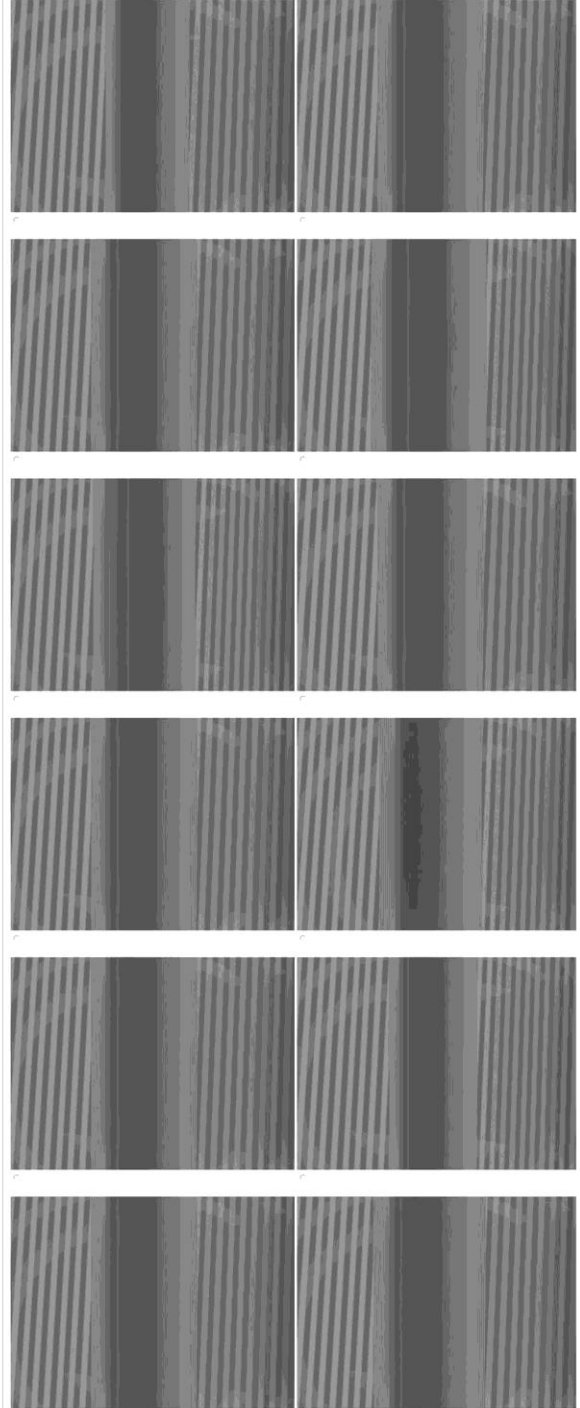
Welcher Türspalt gefällt Ihnen besser? (3/4)



Quelle: F. H. H. H. H. H.

Probandenbefragung Seite 11

Welcher Türspalt gefällt Ihnen besser? (4/4)



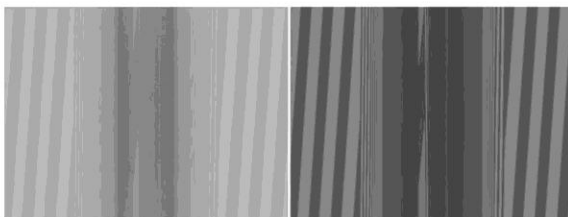
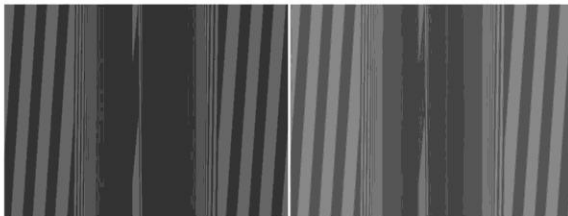
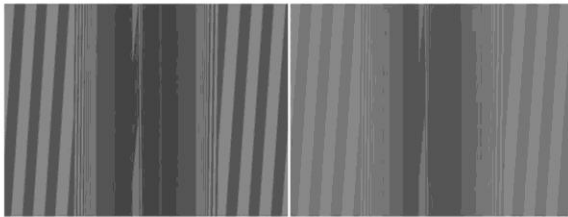
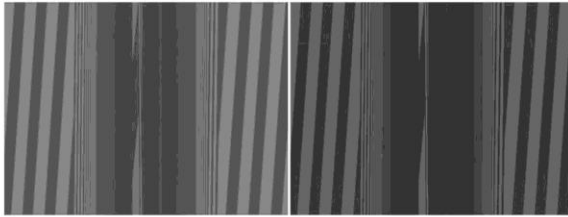
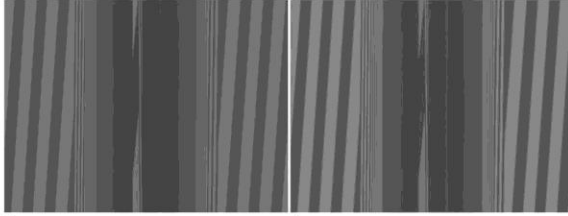
Quelle: F. H. H. H. H.

Original Umfrage erfolgte in Farbe

Probandenbefragung

Seite 12

Welche Farbe gefällt Ihnen besser?

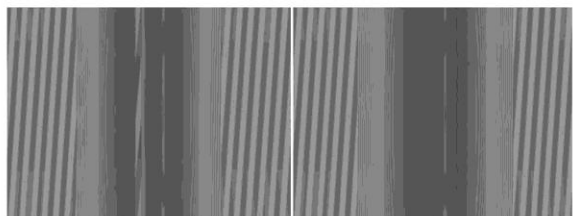
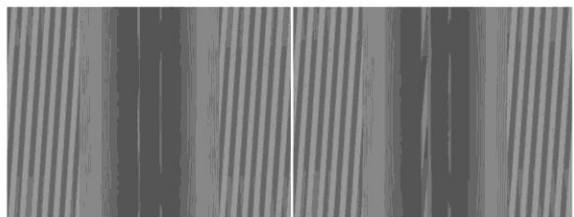
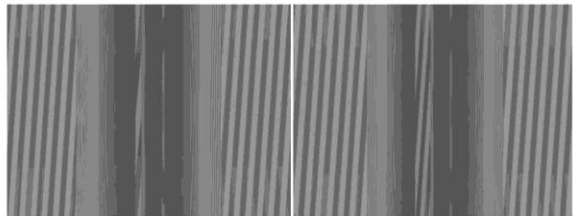
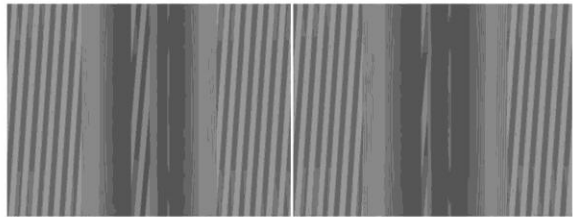
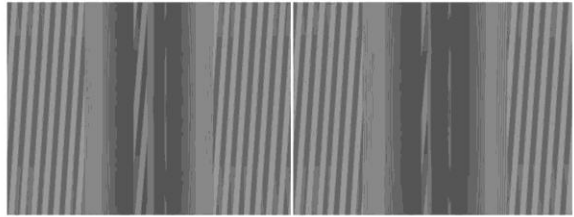
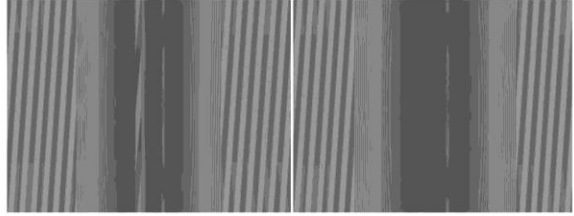


Quelle: [unlesbar]

Probandenbefragung

Seite 13

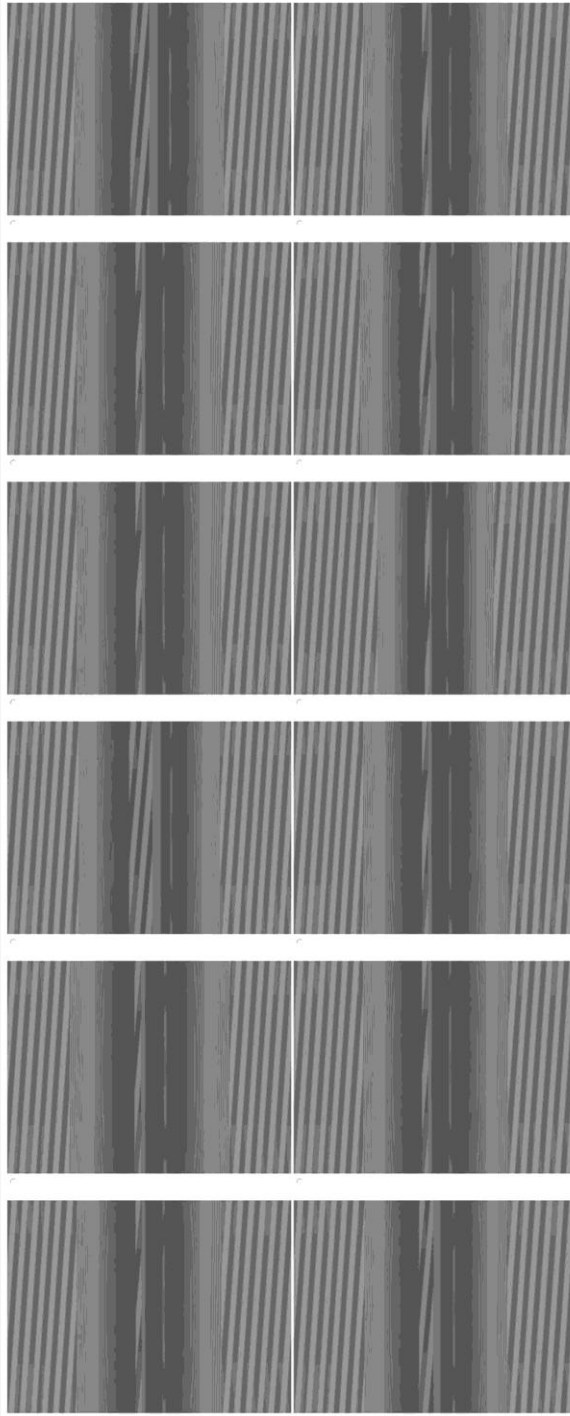
Welcher Türspalt gefällt Ihnen besser? (1/4)



Quelle: [unlesbar]

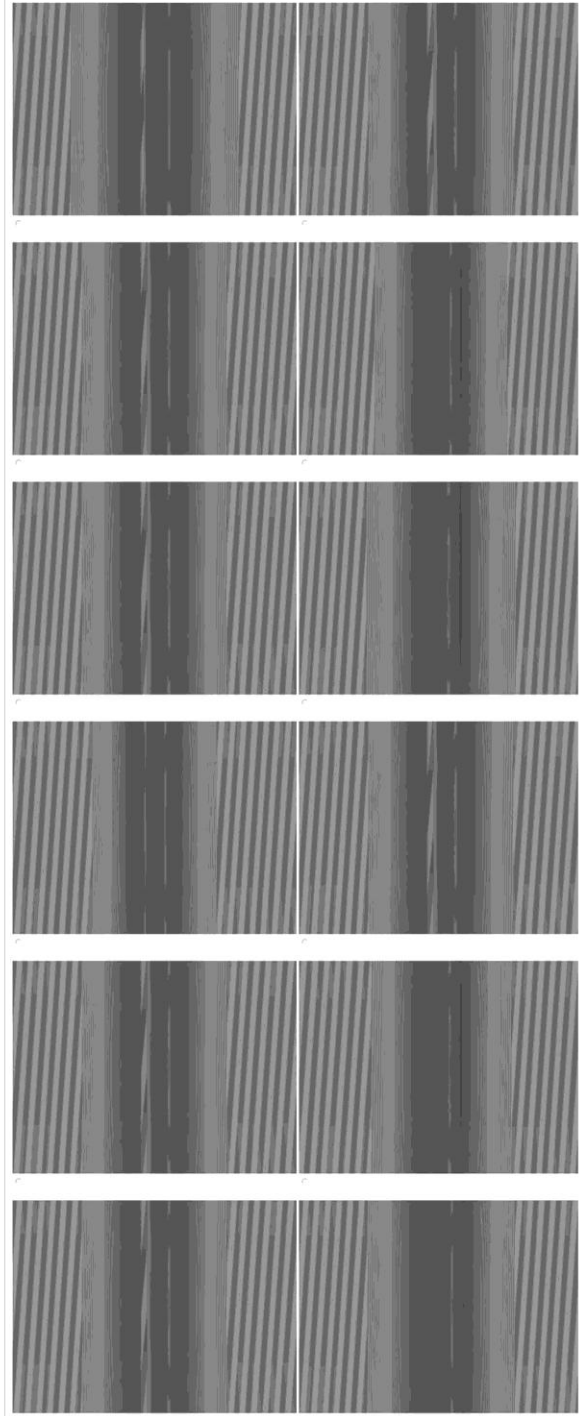
Original Umfrage erfolgte in Farbe

Welcher Türspalt gefällt Ihnen besser? (2/4)



Quelle: F. Wenzel

Welcher Türspalt gefällt Ihnen besser? (3/4)



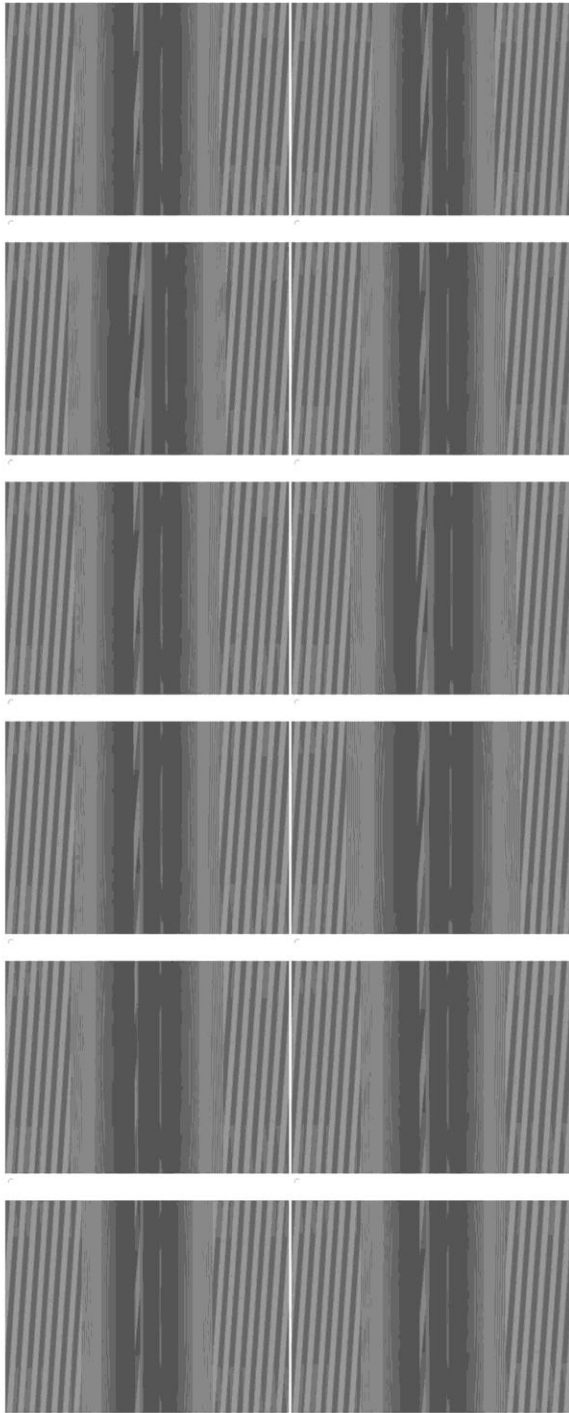
Quelle: F. Wenzel

Original Umfrage erfolgte in Farbe

Probandenbefragung

Seite 16

Welcher Türspalt gefällt Ihnen besser? (4/4)

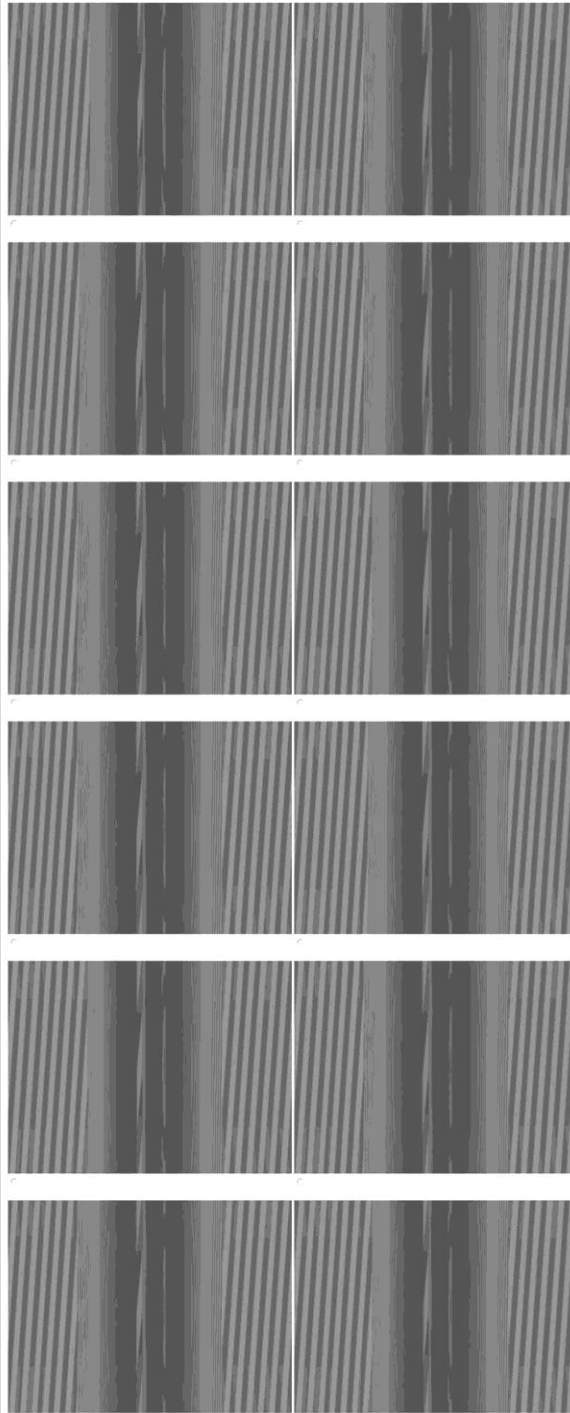


Quelle: [unlesbar]

Probandenbefragung

Seite 17

Welcher Türspalt gefällt Ihnen besser? (1/2)



Quelle: [unlesbar]

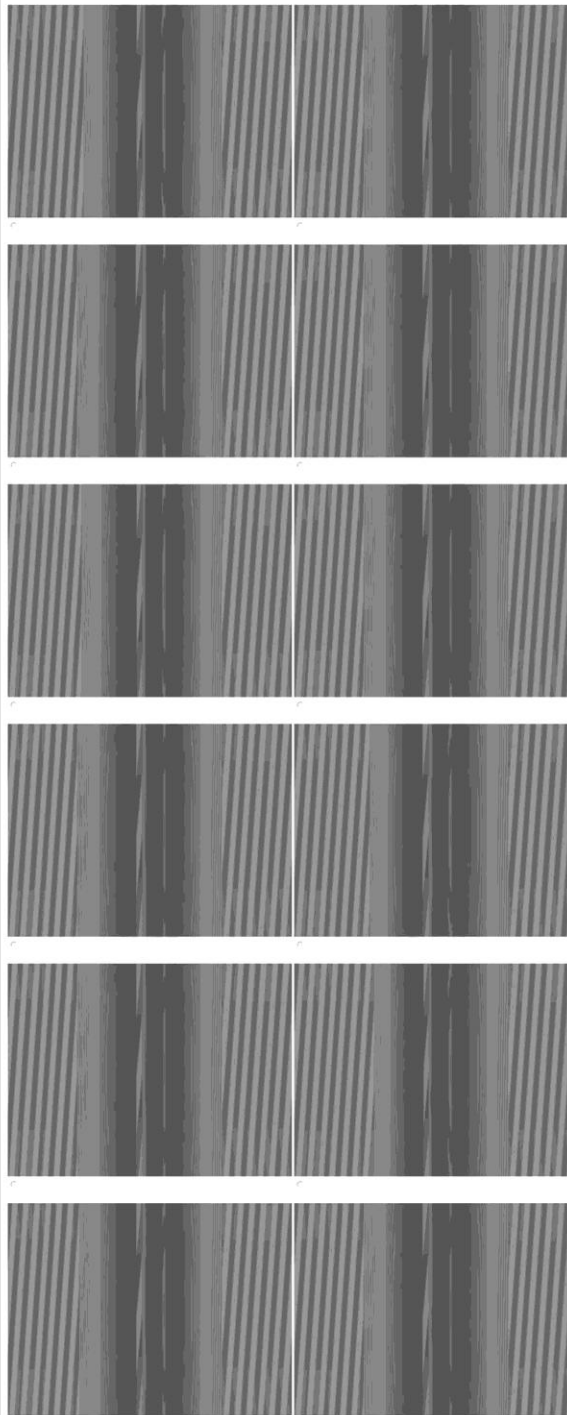
Original Umfrage erfolgte in Farbe



## Probandenbefragung

Seite 18

Welcher Türspalt gefällt Ihnen besser? (2/2)



© 2008, T. W. G. 1

Original Umfrage erfolgte in Farbe

## Schlaufenkonfigurationen

## Systematik

linkes Bild / rechtes Bild / Blickwinkel

Falzradius - Fugenbreite

S = Standardbild (Falzradius 2,0mm, Fugenbreite 3,0 mm, rot)

## Seite 4

1,8-2,4 / S / +45°  
 1,8-3,0 / S / +45°  
 1,8-3,3 / S / +45°  
 2,0-2,7 / S / +45°  
 2,0-3,3 / S / +45°  
 2,2-2,4 / S / +45°

## Seite 6

S / 1,6-2,4 / +45°  
 S / 1,6-2,7 / +45°  
 S / 1,6-3,0 / +45°  
 S / 1,6-3,3 / +45°  
 S / 1,6-3,6 / +45°  
 S / 1,8-2,7 / +45°

## Seite 8

1,6-2,4 / S / -45°  
 1,6-3,6 / S / -45°  
 1,8-2,4 / S / -45°  
 1,8-3,0 / S / -45°  
 1,8-3,3 / S / -45°  
 2,0-2,7 / S / -45°

## Seite 10

S / 1,6-3,3 / -45°  
 S / 1,8-2,7 / -45°  
 S / 1,8-3,6 / -45°  
 S / 2,0-2,4 / -45°  
 S / 2,0-3,3 / -45°  
 S / 2,0-3,6 / -45°

## Seite 12

blau / S / 0°  
 S / dunkelblau / 0°  
 S / dunkelgrau / 0°  
 S / weiß / 0°  
 schwarz / S / 0°  
 silber / S / 0°

## Seite 14

2,0-2,7 / S / 0°  
 2,0-3,6 / S / 0°  
 2,2-3,0 / S / 0°  
 2,2-3,3 / S / 0°  
 2,4-3,3 / S / 0°  
 S / 1,6-2,4 / 0°

## Seite 16

S / 2,2-2,7 / 0°  
 S / 2,2-3,6 / 0°  
 S / 2,4-2,4 / 0°  
 S / 2,4-2,7 / 0°  
 S / 2,4-3,0 / 0°  
 S / 2,4-3,6 / 0°

## Seite 18

1,95 / S / 0°  
 S / 1,50 / 0°  
 S / 1,55 / 0°  
 S / 1,60 / 0°  
 S / 1,65 / 0°  
 S / 1,75 / 0°

## Seite 5

2,2-3,3 / S / +45°  
 2,2-3,6 / S / +45°  
 2,4-2,4 / S / +45°  
 2,4-2,7 / S / +45°  
 2,4-3,0 / S / +45°  
 2,4-3,6 / S / +45°

## Seite 7

S / 1,8-3,6 / +45°  
 S / 2,0-2,4 / +45°  
 S / 2,0-3,6 / +45°  
 S / 2,2-2,7 / +45°  
 S / 2,2-3,0 / +45°  
 S / 2,4-3,3 / +45°

## Seite 9

2,2-3,3 / S / -45°  
 2,4-2,7 / S / -45°  
 2,4-3,0 / S / -45°  
 2,4-3,3 / S / -45°  
 S / 1,6-2,7 / -45°  
 S / 1,6-3,0 / -45°

## Seite 11

S / 2,2-2,4 / -45°  
 S / 2,2-2,7 / -45°  
 S / 2,2-3,0 / -45°  
 S / 2,2-3,6 / -45°  
 S / 2,4-2,4 / -45°  
 S / 2,4-3,6 / -45°

## Seite 13

1,6-3,0 / S / 0°  
 1,6-3,3 / S / 0°  
 1,6-3,6 / S / 0°  
 1,8-2,4 / S / 0°  
 1,8-2,7 / S / 0°  
 1,8-3,6 / S / 0°

## Seite 15

S / 1,6-2,7 / 0°  
 S / 1,8-3,0 / 0°  
 S / 1,8-3,3 / 0°  
 S / 2,0-2,4 / 0°  
 S / 2,0-3,3 / 0°  
 S / 2,2-2,4 / 0°

## Seite 17

1,40 / S / 0°  
 1,45 / S / 0°  
 1,70 / S / 0°  
 1,80 / S / 0°  
 1,85 / S / 0°  
 1,90 / S / 0°

Probandencharakterisierung				
<b>Allgemeine Fragen</b>				
<b>Alter?</b>				
< 30	74 Personen	35 Männer	39 Frauen	
30 – 50	45 Personen	27 Männer	18 Frauen	
> 50	23 Personen	14 Männer	9 Frauen	
<b>Geschlecht?</b>				
Männlich	76 Personen			
Weiblich	67 Personen			
<b>Berufsgruppe?</b>				
		< 30	30 – 50	> 50
Student	47 Personen	46 Personen	1 Person	0 Personen
Angestellter	58 Personen	25 Personen	26 Personen	7 Personen
Leitender Angestellter	14 Personen	1 Person	8 Personen	5 Personen
Beamter	18 Personen	2 Personen	7 Personen	9 Personen
Selbstständig	5 Personen	0 Personen	3 Personen	2 Personen
<b>Worauf achten Sie beim Autokauf?</b>				
Interieur	4 / 20 / 45 / 57 / 14	Antworten		
Exterieur / Design	6 / 13 / 33 / 53 / 36	Antworten		
Leistung	4 / 28 / 38 / 46 / 25	Antworten		
Marke	1 / 32 / 30 / 34 / 30	Antworten		
Preis	0 / 12 / 36 / 48 / 44	Antworten		
Sicherheit	2 / 8 / 37 / 49 / 44	Antworten		
Qualität	0 / 11 / 14 / 58 / 58	Antworten		
<b>Welchen Fahrzeugtyp fahren Sie im Moment?</b>				
Cabrio	9 Antworten			
Coupé	4 Antworten			
Kleinwagen	45 Antworten			
Kombi	51 Antworten			
Limousine	14 Antworten			
SUV	8 Antworten			
Van	12 Antworten			

## LITERATURVERZEICHNIS

## LIST OF REFERENCES

- [AKE78] Akeret, R.: *Versagensmechanismen bei Biegen von Aluminiumblechen und Grenzen der Biegefähigkeit*; in: Aluminium; Ausgabe 54; 1978.
- [ALB12] Albiez, C.; Liewald, M.; Meyer, G., et al.: *Virtual Product - and Process Validation - The Paint Drying Process*. in: Liewald, M.: Proceedings of the International Conference New Developments in Sheet Metal Forming 2012; ISBN: 978-3-88355-390-0; Frankfurt am Main; MAT INFO Werkstoff-Informationsgesellschaft mbH; 2012.
- [ALL13] Allgemeiner Deutscher Automobil-Club e.V.: *PKW-Monitor 2013 - Trendforschung im PKW-Markt eine ADAC Verlag Studie*; 2013.
- [ALT12] Altan, T.; Tekkaya, E.: *Sheet metal forming - Process and applications*; ISBN: 978-1-61503-988-3; Materials Park, Ohio; ASM International; 2012.
- [AND09] Anderson, N.; Leacock, A.; McMurray, R., et al.: *The evolution of yielding in 7075-O aluminium alloy - Experimental observations and modelling*; in: International Journal of Material Forming; Vol. 2; Issue 1; DOI: 10.1007/s12289-009-0492-y; 2009.
- [AUD15A] AUDI AG: *Audi MediaServices*; <https://www.audi-mediaservices.com/>; Ingolstadt; 2015a.
- [AUD15B] AUDI AG: *Modellübersicht*; <http://www.audi.de/>; Ingolstadt; 2015b.
- [BAL02] Balzer, R.: *Modellierung der Außengestalt von Personenkraftwagen zur Ermittlung eines Gestaltwertes*; Dissertation; Stuttgart; 2002.
- [BAR08] Bargel, H.-J.; Schulze, G.: *Werkstoffkunde*; ISBN: 978-3-540-79296-3; DOI: 10.1007/978-3-540-79297-0; Berlin; Springer Verlag; 2008.
- [BAR14] Barth, D.; Drossel, W.; Pfeifer, M., et al.: *The influence of the robot's stiffness on roller hemming processes*. in: Verband Deutscher Elektrotechniker e.V.: Proceedings of the joint conference of ISR 2014 - Conference on Robotics parallel to Automatica; ISBN: 978-3-8007-3601-0; Berlin; VDE-Verlag; 2014.
- [BAU05] Baumgarten, J.; Plapper, P.: *Rollbördeln für die Großserie*; in: VDI-Zeitschrift; Jahrgang 147; Nr. 9; 2005.
- [BEC98] Becker, R.: *Effects of strain localization on surface roughening during sheet forming*; in: Acta Materialia; Vol. 46; Issue 4; DOI: 10.1016/S1359-6454(97)00182-1; 1998.
- [BEY08] Beyer, R.; Becker, F.; Schuler, B., et al.: *Spalt ist nicht gleich Spalt - Über die Philosophie zur Realität*; in: INSPECT; Heft 2; 2008.

- [BIE87] Biederman, I.: *A Theory of Human Image Understanding*; in: *Psychological Review*; Vol. 94; No. 2; 1987.
- [BIE88] Biederman, I.: *Aspects and extensions of a theory of human image understanding*. in: Pylyshyn, Z. W.: *Computational processes in human vision - An interdisciplinary perspective*; ISBN: 978-0-89391-460-8; Norwood, New Jersey; Ablex Publishing Corporation; 1988.
- [BIE12] Bielefeld, K.: *Consumer Neuroscience - Neurowissenschaftliche Grundlagen für den Markenerfolg*; ISBN: 978-3-658-00560-3; Wiesbaden; Springer Fachmedien; 2012.
- [BIR13] Birkert, A.; Haage, S.; Straub, M.: *Umformtechnische Herstellung komplexer Karosserieteile - Auslegung von Ziehanlagen*; ISBN: 978-3-642-34669-9; Berlin; Springer Vieweg Verlag; 2013.
- [BLO95] Bloch, P.: *Seeking the Ideal Form - Product Design and Consumer Response*; in: *Journal of Marketing*; Vol. 59; No. 3; 1995.
- [BÖS06] Bösel, R.: *Das Gehirn - Ein Lehrbuch der funktionellen Anatomie für die Psychologie*; ISBN: 978-3-170-19183-9; Stuttgart; Kohlhammer; 2006.
- [BOT98] Bottema, J.; Lahaye, C.; Baartman, R.: *Recent Developments in AA6016 Aluminium Type Body Sheet Product*. in: Society of Automotive Engineers International (SAE): *Proceedings of the International Congress and Exposition 1998*; Warrendale, Pennsylvania; SAE Technical Paper Series; 1998.
- [BOX88] Box, G.; Bisgaard, S.; Fung, C.: *An explanation and critique of taguchi's contributions to quality engineering*; in: *Quality and Reliability Engineering International*; 4; 2; DOI: 10.1002/qre.4680040207; 1988.
- [BRA07] Braess, H.-H.; Seiffert, U.: *Automobildesign und Technik - Formgebung, Funktionalität, Technik*; ISBN: 978-3-8348-0177-7; Wiesbaden; Friedrich Vieweg & Sohn Verlag; 2007.
- [BRA13] Brand, R.: *Der Zeitreisende - Interview mit Audi Exterieur-Designchef Achim Badstübner*; <http://blog.audi.de/2013/01/30/der-zeitreisende/>; zuletzt geprüft am: Sonntag, 22. Februar 2015; 2013.
- [BÜR05] Bürdek, B.: *Design - Geschichte, Theorie und Praxis der Produktgestaltung*; ISBN: 3-7643-7028-9; Basel; Birkhäuser Verlag; 2005.
- [BÜR12] Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim deutschen Bundestag: *Zukunft der Automobilindustrie - Innovationsreport - Arbeitsbericht Nr. 152*; Berlin; 2012.
- [CAM87] Campbell, F.; Maffei, L.: *Kontrast und Raumfrequenz*. in: Ritter, M.: *Wahrnehmung und visuelles System*; ISBN: 978-3-922-50836-6; Heidelberg; Spektrum der Wiss.; 1987.

- [DAH93] Dahl, W.: *Umformtechnik, Plastomechanik und Werkstoffkunde*; ISBN: 3-5405-6682-1; Berlin; Verlag Stahleisen; 1993.
- [DAI15] Daimler AG: *Modellübersicht - Mercedes Benz*; <http://www.mercedes-benz.de>; Stuttgart; 2015.
- [DAN67] Dannenmann, E.: *Oberflächenveränderungen beim Tiefziehen von Näpfen*; in: *Industrie-Anzeiger*; Ausgabe 89; 1967.
- [DEB02] Debuire, F.; Zwilling, V.: *Experimental and Numerical Approaches of Hemming - Application on Steel and Aluminum 6016*. in: Society of Automotive Engineers International (SAE): International Body Engineering Conference and Exhibition 2002 and Automotive and Transportation Technology 2002; ISBN: 978-0-76801-066-4; Detroit, Michigan; Society of Automotive Engineers; 2002.
- [DEN10] Denninger, R.; Liewald, M.: *Verbesserte Vorhersage der Biegebarkeit von Blechwerkstoffen - Detaillierte Betrachtung der lokalen Formänderungen in Karosseriebauteilen*; in: *wt Werkstattstechnik online*; 100; 10; 2010.
- [DEN11] Denninger, R.; Liewald, M.; Sindel, M., et al.: *Investigations on Bendability of Lightweight Materials for Various Load Paths*. in: Menary, G.: *The 14th International Conference on Material Forming: ESAFORM 2011 Proceedings: Part One; Part Two (AIP Conference Proceedings / Materials Physics and Applications)*; ISBN: 978-0-735-40911-8; DOI: 10.1063/1.3589745; Melville, N.Y; American Institute of Physics; 2011.
- [DEN14] Denninger, R.: *Beitrag zur Prozessabsicherung des Einsatzes von Aluminiumblechwerkstoffen für Fahrzeugkarosserien - Beiträge zur Umformtechnik Nr. 73*; Dissertation; Stuttgart; 2014.
- [DÉS15] Désage, S.-F.; Pitard, G.; Pillet, M., et al.: *Extended visual appearance texture features*. in: *The Society for Imaging Science and Technology and the International Society for Optics and Photonics: Proceedings of the Conference Electronic Imaging 2015*; DOI: 10.1117/12.2081622; SPIE; 2015.
- [DIE14] Dietrich, R.: *Delta-Alpha-Problematik bei 1K-Hybrid-Mischbauklebungen - Präsentation*. in: *Niedersächsisches Forschungszentrum Fahrzeugtechnik: Tagungsband zum Symposium Faszination Leichtbau*; 2014.
- [DIN03A] DIN 8582:2003-09: *Fertigungsverfahren Umformen - Einordnung; Unterteilung, Begriffe, Alphabetische Übersicht*. Deutsches Institut für Normung; Berlin; Beuth Verlag GmbH; 2003a.

- [DIN03B] DIN 8586:2003-09: *Fertigungsverfahren Biegeumformen - Einordnung, Unterteilung, Begriffe*. Deutsches Institut für Normung; Berlin; Beuth Verlag GmbH; 2003b.
- [DIN03C] DIN 8593-1:2003-09: *Fertigungsverfahren Fügen - Teil 1: Zusammensetzen - Einordnung, Unterteilung, Begriffe*. Deutsches Institut für Normung; Berlin; Beuth Verlag GmbH; 2003c.
- [DIN03D] DIN EN 1780-1:2003-01: *Aluminium und Aluminiumlegierungen - Bezeichnung von legiertem Aluminium in Masseln, Vorlegierungen und Gussstücken - Teil 1: Numerisches Bezeichnungssystem*. Deutsches Institut für Normung; Berlin; Beuth Verlag GmbH; 2003d.
- [DIN16] DIN EN 515:2016-01: *Aluminium und Aluminiumlegierungen - Halbzeug - Bezeichnungen der Werkstoffzustände*; Berlin; Beuth Verlag GmbH; 2016.
- [DIN05A] DIN EN 573-1:2005-02: *Aluminium und Aluminiumlegierungen - Chemische Zusammensetzung und Form von Halbzeug - Teil 1: Numerisches Bezeichnungssystem*. Deutsches Institut für Normung; Berlin; Beuth Verlag GmbH; 2005a.
- [DIN09] DIN EN ISO 12004-2:2009-02: *Metallische Werkstoffe - Bleche und Bänder - Bestimmung der Grenzformänderungskurve - Teil 2: Bestimmung von Grenzformänderungskurven im Labor*; Berlin; Beuth Verlag GmbH; 2009.
- [DIN10] DIN EN ISO 4287:2010-07: *Geometrische Produktspezifikation - Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren - Benennungen, Definitionen und Kenngrößen der Oberflächenbeschaffenheit*; Berlin; Beuth Verlag GmbH; 2010.
- [DIN05B] DIN EN ISO 7438:2005: *Metallische Werkstoffe - Biegeversuch*. Deutsches Institut für Normung; Berlin; Beuth Verlag GmbH; 2005b.
- [DÖR76] Dörner, V.: *Die Produktform als Mittel der Anmutungsgestaltung - Unter besonderer Berücksichtigung der Quantifizierung und Dynamisierung anmutungshafter Formleistung*; ISBN: 978-3-775-66801-9; Köln; Hanstein Verlag; 1976.
- [DUB07] Dubbel, H.: *Taschenbuch für den Maschinenbau*; ISBN: 978-3-540-49714-1; Berlin; Springer Verlag; 2007.
- [EBL09] Ebling, C.: *Dynamische Aspekte im Kaufverhalten - Die Determinanten von Kaufzeitpunkt, Marken- und Mengenwahl*; ISBN: 978-3-8349-1357-9; Wiesbaden; Gabler Verlag; 2009.

- [ECK12A] Eckert, A.; Rössinger, M.; Schulz, F., et al.: *Numerical and experimental tolerance prognosis in the automotive process*. in: Automotive Circle International: Proceedings of Joining in Car Body Engineering 2012; Hannover; Vincentz Network; 2012a.
- [ECK12B] Eckert, A.: *Prognose der Maßhaltigkeit punktförmig mechanisch gefügter Karosserieanbauteile*; Dissertation; Chemnitz; 2012b.
- [EHR88] Ehrenfels, C.; Fabian, R.: *Philosophische Schriften Band III: Psychologie, Ethik, Erkenntnistheorie - Christian von Ehrenfels*; ISBN: 978-3-88405-034-7; München; Philosophia-Verlag; 1988.
- [EIC11] Eichleiter, F.: *Fertigungs- und prozessbedingte Eigenschaften von Klebverbindungen im Karosseriebau*; Dissertation; Braunschweig; 2011.
- [EIS10] Eisele, U.: *New approaches for validation of roller hemming process simulation*. in: Kolleck, R.: Proceeding of IDDRG Conference Tools and Technologies for the Processing of Ultra High Strength Steels 2010 - 50th Anniversary Conference; ISBN: 3-8512-5108-3; Graz; Technischen Universität Graz; 2010.
- [EIS12] Eisele, U.: *Ein Beitrag zur verbesserten Auslegung von Rollfalzprozessen - Beiträge zur Umformtechnik Nr. 65*; Dissertation; Stuttgart; 2012.
- [EMM08] Emmens, W.; van den Boogaard, A.: *Extended Tensile Testing with Simultaneous Bending*. in: Asnafi, N.: Proceedings of the IDDRG Conference 2008; ISBN: 9-16332-948-4; Olofström; IDDRG; 2008.
- [ESP06] Espinosa, R.: *Finite Elemente Simulation of Warm Forming Assisted Sheet Metal Bending*; Dissertation; Detroit, Michigan; 2006.
- [ESP07] Espinosa, R.; Das, S.; Weaver, J.: *Simulation of Warm Forming Assisted Hemming to Study the Effect of Process Parameters on Product Quality*. in: Society of Automotive Engineers International (SAE): Proceedings of the SAE World Congress 2007; Warrendale, Pennsylvania; SAE Technical Paper Series; 2007.
- [EUG09] Eugene, C.: *Measurement of "total visual appearance" - A CIE challenge of soft metrology*. in: Benoit, E.: Proceedings of the 12th IMEKO TC1 & TC7 joint symposium on "man, science & measurement"; ISBN: 2-9516453-8-4; Annecy-le-Vieux; Polytech'Savoie; 2009.
- [FAA09] Faass, I.: *Prozessregelung für die Fertigung von Karosserieteilen in Presswerken - utg Forschungsberichte Band 49*; Dissertation; München; 2009.
- [FAN03] Fanghänel, J.; Waldeyer, A.: *Anatomie des Menschen*; ISBN: 978-3110165616; Berlin [u.a.]; de Gruyter; 2003.

- [FAN11] Fankhauser, K.; Wälty, H.: *Marktforschung - Grundlagen mit zahlreichen Beispielen, Repetitionsfragen mit Antworten und Glossar*; ISBN: 978-3-715-59470-5; Zürich; Compendio Bildungsmedien; 2011.
- [FAR02] Farin, G.; Hansford, D.: *Reflection Lines: Shape in Automotive Design*; in: *The Magazine of Design & Technology Education*; Vol. 14; No. 3; 2002.
- [FEL14] Feldmann, K.; Schöppner, V.; Spur, G.: *Handbuch Fügen, Handhaben, Montieren*; ISBN: 978-3-44642-827-0; München; Hanser Verlag; 2014.
- [FER14] Ferwerda, J.: *On pictures and stuff - image quality and material appearance*. in: *The Society for Imaging Science and Technology and the International Society for Optics and Photonics: Proceeding of Electronic Imaging 2014*; DOI: 10.1117/12.2036501; SPIE; 2014.
- [FRI02] Fridlyander, I.; Sister, V.; Grushko, O., et al.: *Aluminum Alloys - Promising Materials in the Automotive Industry*; in: *Metal Science and Heat Treatment*; Vol. 44; DOI: 10.1023/A:1021901715578; 2002.
- [FRI76] Friedrich-Liebenberg, A.: *Anmutungsleistungen von Produkten - Zur Katalogisierung, Strukturierung und Stratifikation anmutungshafter Produktleistungen*; ISBN: 978-3775668026; Köln; Hanstein; 1976.
- [GEV06] Gevatter, H.-J.: *Handbuch der Mess- und Automatisierungstechnik in der Produktion*; ISBN: 978-3-54021-207-2; Berlin; Springer Verlag; 2006.
- [GOB06] Gobrecht, J.; Rimpler, E.: *Werkstofftechnik - Metalle*; ISBN: 3-48657-903-7; München; Oldenbourg; 2006.
- [GOL08] Goldstein, E.; Irtel, H.; Plata, G.: *Wahrnehmungspsychologie - Der Grundkurs*; ISBN: 978-3-8274-1766-4; Berlin; Spektrum Akademischer Verlag; 2008.
- [GOO68] Goodwin, G.: *Application of Strain Analysis to Sheet Metal Forming Problems in the Press Shop*. in: *Society of Automotive Engineers International (SAE): 1968 Automotive Engineering Congress and Exposition*; DOI: 10.4271/680093; SAE Technical Paper Series; 1968.
- [GRA05] Grabner, J.; Nothhaft, R.: *Konstruieren von Pkw-Karosserien - Grundlagen, Elemente und Baugruppen, Vorschriftenübersicht*; ISBN: 3-540-23884-0; Berlin; Springer Verlag; 2005.
- [GRO11] Gross, D.; Seelig, T.: *Bruchmechanik - Mit einer Einführung in die Mikromechanik*; ISBN: 978-3-642-10195-3; Berlin; Springer-Verlag; 2011.
- [HAA94] Haasen, P.: *Physikalische Metallkunde*; ISBN: 354-0-57210-4; Berlin; Springer-Verlag; 1994.



- [HAL51] Hall, E.: *The Deformation and Ageing of Mild Steel: III Discussion of Results*; in: Proceedings of the Physical Society. Section B; Vol. 64; Issue 9; DOI: 10.1088/0370-1301/64/9/303; 1951.
- [HEC14] Hecht, B.; Neugebauer, R.; Drossel, W.-G., et al.: *Consideration of robot rigidity in roller hemming processes - An experimental and numerical study*. in: Sfar, H.; Maillard, A.: Proceedings of IDDRG conference 2014 - Innovations for the sheet metal industry; Paris; 2014.
- [HEL09] Held, C.; Schleich, R.; Sindel, M., et al.: *Investigation on the influence of combined shear loads on the forming limit for high strength steels*; in: International Journal of Material Forming; Vol. 2; Issue 1; DOI: 10.1007/s12289-009-0581-y; 2009.
- [HEN11] Henning, F.; Moeller, E.: *Handbuch Leichtbau - Methoden, Werkstoffe, Fertigung*; ISBN: 978-3446422674; München; Hanser; 2011.
- [HIS86] Hishida, Y.; Sato, Y.: *Analysis of hemming processes by the FEM for improving hemming quality*. in: International Deep Drawing Research Group: Proceedings of the 14th Biennial Congress IDDRG - Sheet Metal requirements and Solutions; Düsseldorf; Verein Deutscher Eisenhüttenleute; 1986.
- [HÖN13A] Hönle, S.; Liewald, M.; Sindel, M.: *Beitrag zur Bewertung der Biegebeanspruchung beim Falzen von Aluminiumblechwerkstoffen*; in: UTFscience; 2013; Heft 2; 2013a.
- [HÖN13B] Hönle, S.; Liewald, M.: *Energieeffiziente Auslegung von Falzprozessen*; in: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb; 2013; Ausgabe 12; 2013b.
- [HÖN13C] Hönle, S.; Liewald, M.: *Erfassung und Bewertung von geometrischen Designmerkmalen*; in: MM Maschinenmarkt; 2013; Heft 22; 2013c.
- [HÖN13D] Hönle, S.: *Influence of Material Model Parameters on the Prediction of Bending Loads in Sheet Metal Forming Simulation*; in: Advanced Materials Research; 769; DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.769.165; 2013d.
- [HÖN13E] Hönle, S.; Liewald, M.: *Prozesssichere Gestaltung von Maschinenfalzprozessen unter Berücksichtigung der Werkstoffbeanspruchung von Karosseriekomponenten aus Blech*. in: Brosius, A.: Tagungsband zur 20. Sächsische Fachtagung Umformtechnik 2013; Dresden; 2013e.
- [HÖN14] Hönle, S.; Liewald, M.; Sindel, M.: *Evaluation of Energy Consumption during Hemming*. in: Liewald, M.: Proceedings of the International Conference New Developments in Sheet Metal Forming 2014; ISBN: 978-3-88355-399-3; Frankfurt am Main; MAT INFO Werkstoff-Informationsgesellschaft mbH; 2014.
- [HOR08] Hornbogen, E.; Eggeler, G.; Werner, E.: *Werkstoffe*; ISBN: 978-3-540-71857-4; DOI: 10.1007/978-3-540-71858-1; Berlin; Springer Verlag; 2008.

- [HÜT65] Hüttner, M.: *Grundzüge der Marktforschung - Ein Leitfadens für Studium und Praxis*; ISBN: 978-3-663-00635-0; Wiesbaden; Gabler Verlag; 1965.
- [JON06] Jonkers, B.: *Simulation of the Robot Roller Hemming process*; Thesis; Twente; 2006.
- [KAN10] Kandlbinder, B.: *The Doors of the new BMW 5 Series Sedan - Presentation. in: Automotive Circle International: Proceedings of Doors and Closures in Car Body Engineering 2010*; 2010.
- [KAR06] Karnath, H.-O.; Thier, P.: *Neuropsychologie - 2., aktualisierte und erweiterte Auflage*; ISBN: 9781280617928; Springer; 2006.
- [KÄS13] Kästle, C.; Liewald, M.; Roll, K.: *Springback Simulation of the Process Chain Press Line Forming and Roller Hemming Processes*; in: *Key Engineering Materials*; Vol. 549; DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.549.231; 2013.
- [KEN14] Kenning, P.: *Consumer Neuroscience - Ein transdisziplinäres Lehrbuch*; ISBN: 978-3170207271; Stuttgart; Kohlhammer; 2014, 2014.
- [KEP96] Kepper, G.: *Qualitative Marktforschung - Methoden, Einsatzmöglichkeiten und Beurteilungskriterien*; ISBN: 978-3-8244-0292-2; Wiesbaden; Deutscher Ingenieur-Verlag; 1996.
- [KIE08] Kielholz, A.: *Online-Kommunikation - Die Psychologie der neuen Medien für die Berufspraxis*; ISBN: 978-3-540-76328-4; Berlin; Springer Verlag; 2008.
- [KIE13] Kienzle, O.: *Normungszahlen*; ISBN: 978-3642998324; Berlin; Springer Verlag; 2013.
- [KLE09] Klein, B.: *Leichtbau-Konstruktion - Berechnungsgrundlagen und Gestaltung ; mit Tabellen*; ISBN: 978-3-8348-0701-4; Wiesbaden; Vieweg + Teubner; 2009.
- [KNA13] Knauser, M.; Pollak, B.: *Optisches Messen von Falz- und Formradien an Blechteilen - Aufgaben und Fähigkeiten. in: Verein Deutscher Ingenieure: Messunsicherheit praxisgerecht bestimmen*; ISBN: 978-3-18092-216-4; Düsseldorf; VDI Verlag; 2013.
- [KOC09] Koch, J.: *Marktforschung - Grundlagen und praktische Anwendungen*; ISBN: 978-3-48658-765-4; München; Oldenbourg; 2009.
- [KOP93] Koppelman, U.: *Produktmarketing - Entscheidungsgrundlage für Produktmanager*; ISBN: 9783540559931; Berlin [etc.]; Springer-Ver; 1993.
- [KRA14] Kraftfahrt-Bundesamt: *Fahrzeugzulassungen (FZ) - Neuzulassungen, Besitzumschreibungen, Außerbetriebsetzungen von Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern Jahr 2013 - FZ 7*; [http://www.kba.de/SharedDocs/Publikationen/DE/Statistik/Fahrzeuge/FZ/2013/fz7\\_2013\\_pdf.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=3](http://www.kba.de/SharedDocs/Publikationen/DE/Statistik/Fahrzeuge/FZ/2013/fz7_2013_pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=3); zuletzt geprüft am: Mittwoch, 31. Dezember 2014; Flensburg; 2014.

- [KRA06] Krajewski, p.: *The Effect of Retrogression Heat Treatments on Aluminum Flanging and Trimming*. in: Society of Automotive Engineers International (SAE): Proceedings of the SAE World Congress 2006; Warrendale, Pennsylvania; Society of Automotive Engineers; 2006.
- [KUL09] Kulbe, A.: *Grundwissen Psychologie, Soziologie und Pädagogik - Lehrbuch für Pflegeberufe*; ISBN: 9783170208032; Stuttgart; Kohlhammer; 2009.
- [KUR15] Kurzweil, P.: *Chemie - Grundlagen, Aufbauwissen, Anwendungen und Experimente*; ISBN: 3658086602; Wiesbaden; Springer Fachmedien Wiesbaden; 2015.
- [LAH01] Lahaye, C.; Bottema, J.; De Smet, P., et al.: *Benefits of Using Pre-Treated, Pre-Aged Aluminium 6xxx Sheet Material for Closure Applications*. in: Society of Automotive Engineers International (SAE): Proceedings of the SAE International Body Engineering Conference 2001; ISBN: 978-0-76800-832-6; Detroit, Michigan; Society of Automotive Engineers; 2001.
- [LAH02] Lahaye, C.; Bottema, J.; De Smet, P., et al.: *Aluminium Alloy Selection for Closures with Respect to Functional Demands*. in: Society of Automotive Engineers International (SAE): International Body Engineering Conference and Exhibition 2002 and Automotive and Transportation Technology 2002; ISBN: 978-0-76801-066-4; Detroit, Michigan; Society of Automotive Engineers; 2002.
- [LAN84] Lange, K.: *Umformtechnik - Handbuch für Industrie und Wissenschaft Band 1: Grundlagen*; ISBN: 3-540-13249-X; Berlin; Springer Verlag; 1984.
- [LAN90] Lange, K.: *Umformtechnik - Handbuch für Industrie und Wissenschaft Band 3: Blechbearbeitung*; ISBN: 978-3-54050-039-1; Berlin; Springer Verlag; 1990.
- [LAN02] Lange, K.: *Umformtechnik - Handbuch für Industrie und Wissenschaft*; ISBN: 978-3-54043-686-7; Berlin; Springer Verlag; 2002.
- [LAN07] Lang, F.; Lang, P.: *Basiswissen Physiologie*; ISBN: 978-3-540-71401-9; Berlin; Springer Medizin Verlag; 2007.
- [LEI99] Leitermann, W.; Rudlaff, T.: *Aluminium im PKW-Karosseriebau - Die Alternative mit Zukunft*; in: Materialwissenschaft und Werkstofftechnik; 30; 11; DOI: 10.1002/(SICI)1521-4052(199911)30:11<703::AID-MAWE703>3.0.CO;2-X; 1999.
- [LEM10] LeMaoût, N.; Thuillier, S.; Manach, P.: *Classical and Roll-hemming Processes of Pre-strained Metallic Sheets*; in: Experimental Mechanics; Vol. 50; Issue 7; DOI: 10.1007/s11340-009-9297-7; 2010.
- [LEU10] Leuschel, R.: *Toleranzmanagement in der Produktentwicklung am Beispiel der Karosserie im Automobilbau*; Dissertation; Freiberg; 2010.

- [LIE06] Liewald, M.; Wagner, S.: *Robuste Prozesse in der Blechumformung*. in: Heisel, U.: FtK 2006 - Fertigungstechnisches Kolloquium // FTK 2006, Fertigungstechnisches Kolloquium - Stuttgarter Impulse // Schriftliche Fassung der Vorträge zum Fertigungstechnischen Kolloquium am 20. und 21. September in Stuttgart; ISBN: 3-00-019764-8; Stuttgart; Ges. für Fertigungstechnik; 2006.
- [LIE08] Liewald, M.; Schleich, R.; Held, C.: *Beitrag zur Verbesserung der Werkstoffcharakterisierung in der Umformtechnik*. in: Steinhoff, K.: Umformtechnik im Spannungsfeld zwischen Plastomechanik und Werkstofftechnik; ISBN: 978-3-937057-17-0; Bad Harzburg; GRIPS-Media; 2008.
- [LIE09] Liewald, M.; Held, C.; Schleich, R.: *Characterisation of sheet metal formability - Historical overview and further approaches*; in: steel research international; Vol. 80; Issue 4; DOI: 10.2374/SRI09SP005; 2009.
- [LIE10] Liewald, M.; Schleich, R.: *Development of an Anisotropic Failure Criterion for Characterising the Influence of Curvature on Forming Limits of Aluminium Sheet Metal Alloys*; in: International Journal of Material Forming; 3; S1; DOI: 10.1007/s12289-010-0982-y; 2010.
- [LIE11] Liewald, M.: *Simulation und Virtual Reality im modernen Karosseriebau*. Festkolloquium - Virtueller Engineering- und Planungsprozess in der Prozesskette Karosserie; Herrsching am Ammersee; 22.-23.09.2011.
- [LIE12] Liewald, M.; Wagner, S.; Bolay, C.: *Tiefziehen*. in: Hoffmann, H.: Handbuch Umformen; ISBN: 978-3446427785; München; Hanser; 2012.
- [LIE13A] Liewald, M.; Wagner, S.: *Improved Failure Prediction in Forming of Complex Sheet Metal Parts*; in: Academic Journal of Manufacturing Engineering; Vol. 11; Issue 1; 2013a.
- [LIE13B] Liewald, M.; Hönle, S.; Sindel, M.: *Untersuchung des Kraft- und Energiebedarfs beim Falzen von Aluminiumblechwerkstoffen*; in: UTFscience; Heft 3; 2013b.
- [LIE14A] Liewald, M.: *Deep Drawing*. in: Laperrière, L.; Reinhart, G.: CIRP Encyclopedia of Production Engineering; ISBN: 978-3-642-20616-0; DOI: 10.1007/978-3-642-20617-7\_6502; Berlin, Heidelberg; Springer Berlin Heidelberg; 2014a.
- [LIE14B] Liewald, M.; Hönle, S.; Schmid, P., et al.: *Experimental study of unstretched fiber shifting during hemming processes for automotive aluminum alloys*. in: Bargende, M.; Reuss, H.-C.; Wiedemann, J.: 14. Internationales Stuttgarter Symposium; ISBN: 978-3-658-05129-7; DOI: 10.1007/978-3-658-05130-3\_16; Wiesbaden; Springer Fachmedien Wiesbaden; 2014b.

- [LIE15] Liewald, M.; Höhle, S.; Sindel, M.: *Surface roughening of an aluminum 6016 alloy during bending and hemming*; in: International Journal of Material Forming; DOI: 10.1007/s12289-015-1223-1; 2015.
- [LIN07] Lin, G.; Li, J.; Hu, S., et al.: *A Computational Response Surface Study of Three-Dimensional Aluminum Hemming Using Solid-to-Shell Mapping*; in: Journal of Manufacturing Science and Engineering; Vol 129; Issue 2; DOI: 10.1115/1.2515430; 2007.
- [LIN09] Lin, G.; Hu, S.; Cai, W.: *Evaluation of Formability in Bending/Hemming of Aluminum Alloys Using Plane-Strain Tensile Tests*; in: Journal of Manufacturing Science and Engineering; Vol. 131; Issue 5; DOI: 10.1115/1.3123316; 2009.
- [LIV00] Livatyali, H.; Müderrisoğlu, A.; Ahmetoğlu, M., et al.: *Improvement of hem quality by optimizing flanging and pre-hemming operations using computer aided die design*; in: Journal of Materials Processing Technology; Vol. 98; Issue 1; DOI: 10.1016/S0924-0136(99)00304-0; 2000.
- [LIV01] Livatyali, H.; Altan, T.: *Prediction and elimination of springback in straight flanging using computer aided design methods*; in: Journal of Materials Processing Technology; Vol. 117; Issue 1-2; DOI: 10.1016/S0924-0136(01)01164-5; 2001.
- [LIV02] Livatyali, H.; Wu, H.; Altan, T.: *Prediction and elimination of springback in straight flanging using computer-aided design methods*; in: Journal of Materials Processing Technology; Vol. 120; Issue 1-3; DOI: 10.1016/S0924-0136(01)01161-X; 2002.
- [LIV03] Livatyali, H.; Kinzel, G.; Altan, T.: *Computer aided die design of straight flanging using approximate numerical analysis*; in: Journal of Materials Processing Technology; Vol. 142; Issue 2; DOI: 10.1016/S0924-0136(03)00655-1; 2003.
- [LLO00] Lloyd, D.: *Ductility and Bendability in 6000 Series Automotive Alloys*. in: Das, S.: Automotive Alloys 1999; ISBN: 978-1-11878-760-1; DOI: 10.1002/9781118787601.ch18; Hoboken, New Jersey; John Wiley & Sons Incorporated; 2000.
- [LLO02] Lloyd, D.; Evans, D.; Pelow, C., et al.: *Bending in aluminium alloys AA 6111 and AA 5754 using the cantilever bend test*; in: Materials Science and Technology; Vol. 18; Issue 6; DOI: 10.1179/026708302225003604; 2002.
- [LUC13] Lucachick, G.; Sanchez, L.: *Surface topography changes in aluminum alloy sheet during large plastic straining under cyclic pure bending*; in: Journal of Materials Processing Technology; Vol. 213; Issue 2; DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2012.09.011; 2013.

- [LUD04] Ludwik, P.: *Technologische Studie über Blechbiegung: Ein Beitrag zur Mechanik der Formänderungen - Technischen Blätter 35*; Prag; Verlag des deutschen polytechnischen Vereins; 1904.
- [MÄC53] Mäckelt, H.: *Rationelles Schneiden und Biegen*; in: Schweizerische Technische Zeitschrift STZ; Vol. 50; Heft 43; 1953.
- [MAH98] Mahmudi, R.; Mehdizadeh, M.: *Surface roughening during uniaxial and equi-biaxial stretching of 70-30 brass sheets*; in: Journal of Materials Processing Technology; Vol. 80-81; DOI: 10.1016/S0924-0136(98)00099-5; 1998.
- [MAR73] Marciniak, Z.; Kuczyński, K.; Pokora, T.: *Influence of the plastic properties of a material on the forming limit diagram for sheet metal in tension*; in: International Journal of Mechanical Sciences; 15; 10; DOI: 10.1016/0020-7403(73)90068-4; 1973.
- [MAR02] Marciniak, Z.; Duncan, J.; Hu, S.: *Mechanics of sheet metal forming*; ISBN: 0-75065-300-0; Oxford; Butterworth-Heinemann; 2002.
- [MAR78] Marr, D.; Nishihara, H.: *Representation and Recognition of the Spatial Organization of Three-Dimensional Shapes*; in: Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences; 200; 1140; DOI: 10.1098/rspb.1978.0020; 1978.
- [MAR80] Marr, D.; Hildreth, E.: *Theory of Edge Detection*; in: Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences; 207; 1167; DOI: 10.1098/rspb.1980.0020; 1980.
- [MAT13] Mattei, L.; Daniel, D.; Guiglionda, G., et al.: *Strain localization and damage mechanisms during bending of AA6016 sheet*; in: Materials Science and Engineering: A; Vol. 559; DOI: 10.1016/j.msea.2012.09.028; 2013.
- [MAU11] Mauermann, R.; Jesche, F.; Menzel, S., et al.: *Falzkleben im automobilen Rohbau*. in: Europäische Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung e.V.: Tagungsband des 31. EFB-Kolloquiums Blechverarbeitung 2011: Hochfeste und hybride Materialien - Schnelle Umform- und Fügeverfahren; ISBN: 978-3-86776-363-9; Hannover; Europäische Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung e.V.; 2011.
- [MER06] Merklein, M.: *Charakterisierung von Blechwerkstoffen für den Leichtbau*; ISBN: 9783875252446; Bamberg; Meisenbach; 2006.
- [MIL00] Miller, W.; Zhuang, L.; Bottema, J., et al.: *Recent development in aluminium alloys for the automotive industry*; in: Materials Science and Engineering: A; Vol. 280; Issue 1; DOI: 10.1016/S0921-5093(99)00653-X; 2000.
- [MOR11] Mork, R.: *Qualitätsbewertung und -regelung für die Fertigung von Karosserieteilen in Presswerken auf Basis Neuronaler Netze - Forschungsberichte IWB Band 251*; Dissertation; München; 2011.

- [MÖS83] Mössle, E.: *Einfluß der Blechoberfläche beim Ziehen von Blechteilen aus Aluminiumlegierungen - Berichte aus dem Institut für Umformtechnik der Universität Stuttgart - Band 72*; Dissertation; Stuttgart; 1983.
- [MÜS75] Müschenborn, W.; Sonne, H.-M.: *Einfluss des Formänderungsweges auf die Grenzformänderungen des Feiblechs*; in: *Archiv für das Eisenhüttenwesen*; Band 46; Nr. 9; 1975.
- [NAK68] Nakajima, K.; Kikuma, T.; Hasuka, K.: *Study on the Formability of Steel Sheets*; in: *Yamata Technical Report*; Vol. 264; 1968.
- [NEU00] Neumaier, M.: *Image-Design*; ISBN: 978-3-663-08551-5; Wiesbaden; Deutscher Universitätsverlag; 2000.
- [NII86] Niimi, Y.; Hattori, M.: *Development of processing technique for improving hemming quality*. in: *International Deep Drawing Research Group: Proceedings of the 14th Biennial Congress IDDRG - Sheet Metal requirements and Solutions*; Düsseldorf; Verein Deutscher Eisenhüttenleute; 1986.
- [OEH62] Oehler, G.; Kaiser, F.: *Schnitt-, Stanz- und Ziehwerkzeuge - Unter besonderer Berücksichtigung der neuesten Verfahren und der Werkzeugstähle mit zahlreichen Konstruktions- und Berechnungsbeispielen ; mit 46 Tabellen*; Berlin; Springer Verlag; 1962.
- [OEH11] Oehme, A.: *Ästhetisches Verständnis und ästhetische Wertschätzung von Automobildesign - Eine Frage der Expertise*; ISBN: 978-3-86956-210-0; Potsdam; Universitätsverlag Potsdam; 2011.
- [OST07] Ostermann, F.: *Anwendungstechnologie Aluminium - Kinematik, Elasto-Kinematik und Konstruktion*; ISBN: 3-540-62706-5; Berlin; Springer; 2007.
- [PAP11] Papaioanu, A.; Liewald, M.: *Study on SCS Process by Variation of Geometrical and Tribological Parameters of Forming Die*. in: *International Deep Drawing Research Group: Proceedings of the IDDRG Conference 2011 - Towards sustainable sheet forming processes*; Bilbao; 2011.
- [PET54] Petch, N.: *The fracture of metals*; New York; Macmillan; 1954.
- [PEU15] Peugeot Deutschland GmbH: *Modellübersicht*; [www.peugeot.de](http://www.peugeot.de); Köln; 2015.
- [PRI03] Pritzel, M.; Brand, M.; Markowitsch, H.: *Gehirn und Verhalten - Ein Grundkurs der physiologischen Psychologie*; ISBN: 9783827423405; Spektrum Akademischer Verlag; 2003.
- [RAA03] Raabe, D.; Sachtleber, M.; Weiland, H., et al.: *Grain-scale micromechanics of polycrystal surfaces during plastic straining*; in: *Acta Materialia*; Vol. 51; Issue 6; DOI: 10.1016/S1359-6454(02)00557-8; 2003.

- [RAA10] Raab, G.; Unger, A.; Unger, F.: *Marktpsychologie - Grundlagen und Anwendung*; ISBN: 978-3-8349-2158-1; Wiesbaden; Gabler Verlag; 2010.
- [REI61] Reihle, M.: *Einfluss der Korngröße auf die Oberflächenfeingestalt von Tiefziehteilen*; in: *Mitteilungen der Forschungsgesellschaft Blechverarbeitung*; Nr. 12/13; 1961.
- [REN04] Rennet, A.: *Ermittlung des Einflusses eines Gegenhalters beim 90°-Biegen von Aluminiumblechen - Beiträge zur Umformtechnik Band 45*; Dissertation; Stuttgart; 2004.
- [RIE10] Riedel, M.: *Neuromarketing in der Markenführung am Beispiel bekannter Biermarken*; ISBN: 978-3836694025; Hamburg; Diplomica Verlag; 2010.
- [ROO05] Roos, E.; Maile, K.; Roos-Maile: *Werkstoffkunde für Ingenieure - Grundlagen, Anwendung, Prüfung*; ISBN: 3-540-22034-8; Berlin; Springer Verlag; 2005.
- [ROS99] Rosenthal, P.: *Automobildesign und Gesellschaft - Zu Attraktivitätsaspekten der automobilen Gestaltsymbolik*; Dissertation; Darmstadt; 1999.
- [RÖS11] Rösler, F.: *Psychophysiologie der Kognition - Eine Einführung in die Kognitive Neurowissenschaft*; ISBN: 978-3827425980; Heidelberg; Spektrum Akademischer Verlag; Imprint: Spektrum Akademischer Verlag; 2011.
- [ROT06] Roters, F.; Raabe, D.; Weiland, H.: *Roughening of Coated Aluminium Sheets during Plastic Straining*; in: *Materials Science Forum*; Vol. 519-521; DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.519-521.711; 2006.
- [RUP12] Rupp, G.; Ritz, E.; Rössinger, M., et al.: *Anmutungsqualität von Karosseriebauteilen in Leichtbauweise - Herausforderungen und Lösungen*. in: Neugebauer, R.: *Proceedings of the 4th International Conference on Accuracy in Forming Technology ICAFT 2012*; ISBN: 978-3-94226-761-8; Auerbach; Verlag Wissenschaftliche Scripten; 2012.
- [SAC04] Sachtleber, M.; Raabe, D.; Weiland, H.: *Surface roughening and color changes of coated aluminum sheets during plastic straining*; in: *Journal of Materials Processing Technology*; Vol. 148; Issue 1; DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2004.01.041; 2004.
- [SAR01] Sarkar, J.; Kutty, T.; Conlon, K., et al.: *Tensile and bending properties of AA5754 aluminum alloys*; in: *Materials Science and Engineering: A*; Vol. 316; Issue 1-2; DOI: 10.1016/S0921-5093(01)01226-6; 2001.
- [SAR04] Sarkar, J.; Kutty, T.; Wilkinson, D., et al.: *Tensile properties and bendability of T4 treated AA6111 aluminum alloys*; in: *Materials Science and Engineering: A*; Vol. 369; Issue 1-2; DOI: 10.1016/j.msea.2003.11.022; 2004.



- [SCH79] Schaub, W.: *Untersuchung der Verfahrensgrenzen beim 180°-Biegen von Fein- und Mittelblechen - Berichte aus dem Institut für Umformtechnik - Band 52*; Dissertation; Stuttgart; 1979.
- [SCH07A] Schleich, R.; Papaioanu, A.; Liewald, M.: *Entwicklung eines fertigungsprozessnahen Prüfverfahrens zur Charakterisierung der Falzbarkeit von Karosseriefeinblechwerkstoffen*; in: UTFscience; Heft 4; 2007a.
- [SCH10] Schleich, R.: *Entwicklung eines Versagensmodells für Aluminiumlegierungen zur prädiktiven Bestimmung von lastabhängigen Versagensfällen in der Blechumformung - Beiträge zur Umformtechnik Band 64*; Dissertation; Stuttgart; 2010.
- [SCH07B] Schmidt, R.; Lang, F.: *Physiologie des Menschen - Mit Pathophysiologie*; ISBN: 978-3-540-32908-4; Berlin; Springer Medizin Verlag; 2007b.
- [SCH76] Schmitz-Maibauer, H.: *Der Stoff als Mittel anmutungshafter Produktgestaltung - Grundzüge einer Materialpsychologie*; Dissertation; Köln; 1976.
- [SCH11] Schnelle-Schneyder, M.: *Sehen und Photographie - Ästhetik und Bild*; ISBN: 978-3-642-15149-1; Berlin; Springer Verlag; 2011.
- [SCH13] Schönhammer, R.: *Einführung in die Wahrnehmungspsychologie - Sinne, Körper, Bewegung*; ISBN: 9783825240769; Wien, Wien; UTB; Facultas; 2013.
- [SEE05] Seeger, H.: *Design technischer Produkte, Produktprogramm und -systeme - Industrial Design Engineering*; ISBN: 3-540-23653-8; Berlin; Springer Verlag; 2005.
- [SEE13] Seeger, H.: *Praxisbuch Packaging - Wie Verpackungsdesign Produkte verkauft*; ISBN: 9783864161742; mi-Wirtschaftsbuch; 2013.
- [SEE14] Seeger, H.: *Basiswissen Transportation-Design - Anforderungen - Lösungen - Bewertungen*; ISBN: 978-3-658-04448-0; Wiesbaden; Springer Verlag; 2014.
- [SIE93] Siegert, K.; Mnif, J.: *Untersuchungen über das Falzen (180°-Biegen) von Aluminiumblechen - EFB-Forschungsbericht Nr. 47*; ISBN: 978-3-86776-114-7; Hannover; EFB; 1993.
- [SIE15] Siegert, K.: *Blechumformung - Werkstoffe, Verfahren, Werkzeuge und Maschinen*; ISBN: 978-3-54002-488-0; Berlin; Springer-Verlag; 2015.
- [SIG03] Sigvant, M.: *The Hemming Process, A Numerical and Experimental Study*; Dissertation; Göteborg; 2003.
- [SIN10] Singh, D.; Sharma, J.: *Neuromarketing - A peep into customers minds*; ISBN: 978-8120338685; New Delhi; PHI Learning; 2010.
- [SIX82] Sixtl, F.: *Messmethoden der Psychologie - Theoretische Grundlagen und Probleme*; ISBN: 978-3-40754-611-1; Weinheim; Beltz; 1982.

- [SOM14] Sommer, O.: *Ein Beitrag zur Untersuchung des Verhaltens dünner Flüssigkeitsfilme nahe gekrümmten Substratoberflächen*; Dissertation; Chemnitz; 2014.
- [STE11] Steiner, P.: *Multisensuale Markenführung in der Automobilwirtschaft*. in: Steiner, P.: *Sensory Branding*; ISBN: 978-3-8349-2788-0; DOI: 10.1007/978-3-8349-6602-5\_7; Wiesbaden; Gabler Verlag; 2011.
- [STO11] Stoudt, M.; Hubbard, J.; Leigh, S.: *On the Relationship Between Deformation-Induced Surface Roughness and Plastic Strain in AA5052 - Is it Really Linear?*; in: *Metallurgical and Materials Transactions A*; Vol. 42; Issue 9; DOI: 10.1007/s11661-011-0694-z; 2011.
- [STO14] Stoudt, M.; Hubbard, J.; Carsley, J., et al.: *Characterizing the Hemming Performance of Automotive Aluminum Alloys With High-Resolution Topographic Imaging*; in: *Journal of Engineering Materials and Technology*; 136; 3; DOI: 10.1115/1.4027093; 2014.
- [STO00] Stoughton, T.: *A general forming limit criterion for sheet metal forming*; in: *International Journal of Mechanical Sciences*; Vol. 42; Issue 1; DOI: 10.1016/S0020-7403(98)00113-1; 2000.
- [SVE01] Svensson, M.; Mattiasson, K.: *Simulation of hemming with different element formulations and time integration methods*. in: Mori, K.-i.: *Proceedings of the 7th International Conference on Numerical Methods in Industrial Forming Processes NUMIFORM 2001* Simulation of materials processing - Simulation of materials; ISBN: 9-02651-822-6; Lisse; A.A. Balkema Publishers; 2001.
- [SVE10] Svensson, M.; Mattiasson, K.: *Simulation of hemming of automotive body components with the explicit FE-Method*. in: Onate, E.; Bueda, G.; Suarez, B.: *Proceedings of the European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering ECCOMAS 2000*; ISBN: 8-48992-570-4; Barcelona; 2010.
- [SWI52] Swift, H.: *Plastic instability under plane stress*; in: *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*; Vol. 1; Issue 1; DOI: 10.1016/0022-5096(52)90002-1; 1952.
- [THO80] Thomson, P.; Nayak, P.: *The effect of plastic deformation on the roughening of free surfaces of sheet metal*; in: *International Journal of Machine Tool Design and Research*; Vol. 20; Issue 1; DOI: 10.1016/0020-7357(80)90020-7; 1980.
- [THU08] Thuillier, S.; LeMaoût, N.; Manach, P., et al.: *Numerical simulation of the roll hemming process*; in: *Journal of Materials Processing Technology*; Vol. 198; Issue 1-3; DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2007.07.004; 2008.

- [TUM14] Tumminelli, P.: *Automobildesign – Entwicklung und Formensprache*. in: Ebel, B.; Hofer, M.: *Automotive Management*; ISBN: 978-3-642-34067-3; DOI: 10.1007/978-3-642-34068-0\_21; Berlin; Springer Verlag; 2014.
- [UNG86] Unger, F.; Berekoven, L.: *Konsumentenpsychologie und Markenartikel*; ISBN: 978-3790803549; Heidelberg; Physica-Verlag; 1986.
- [VER02] Verordnung der Europäischen Kommission - Generaldirektion Wettbewerb: *Anwendung von Artikel 81 Absatz 3 des Vertrags auf Gruppen von vertikalen Vereinbarungen und aufeinander abgestimmten Verhaltensweisen im Kraftfahrzeugsektor*; 2002.
- [VER09] Verordnung des Europäischen Parlaments und des Rates: *Typgenehmigung von Kraftfahrzeugen, Kraftfahrzeuganhängern und von Systemen, Bauteilen und selbstständigen technischen Einheiten für diese Fahrzeuge hinsichtlich ihrer allgemeinen Sicherheit - Nr. 661/2009*; 13. Juli 2009.
- [WEI07] Weissbach, W.: *Werkstoffkunde - Strukturen, Eigenschaften, Prüfung ; mit 245 Tabellen*; ISBN: 978-3-8348-0295-8; Wiesbaden; Vieweg; 2007.
- [WEI10] Weissbach, W.: *Werkstoffkunde - Strukturen, Eigenschaften, Prüfung ; mit 246 Tabellen*; ISBN: 978-3-8348-0739-7; Wiesbaden; Vieweg + Teubner; 2010.
- [WER14] Werber, A.; Liewald, M.; Nester, W., et al.: *Development of a new failure prediction criterion in sheet metal forming*; in: *International Journal of Material Forming*; Vol. 7; Issue 4; DOI: 10.1007/s12289-013-1134-y; 2014.
- [WIL81] Wilson, D.; Roberts, W.; Rodrigues, P. M. B.: *Effects of grain anisotropy on limit strains in biaxial stretching: part ii. sheets of cubic metals and alloys with well-developed preferred orientations*; in: *Metallurgical Transactions A*; Vol. 12; Issue 9; DOI: 10.1007/BF02643566; 1981.
- [WIR10] Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa (UN/ECE): *Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung der Kraftfahrzeuge hinsichtlich ihrer vorstehenden Außenkanten - Regelung Nr. 26*; 14.8.2010.
- [WOL52] Wolter, K.: *Freies Biegen von Blechen - VDI-Forschungsheft 435*; Düsseldorf; Deutscher Ingenieur-Verlag; 1952.
- [ZHA00] Zhang, G.; Hao, H.; Wu, X., et al.: *An Experimental Investigation of Curved Surface-Straight Edge Hemming*; in: *Journal of Manufacturing Processes*; Vol. 2; Issue 4; DOI: 10.1016/S1526-6125(00)70025-9; 2000.
- [ZHA01] Zhang, G.; Wu, X.; Hu, S.: *A Study on Fundamental Mechanisms of Warp and Recoil in Hemming*; in: *Journal of Engineering Materials and Technology*; Vol. 123; Issue 4; DOI: 10.1115/1.1396348; 2001.

- [ZHA03] Zhang, G.; Jack Hu, S.; Wu, X.: *Numerical Analysis and Optimization of Hemming Processes*; in: *Journal of Manufacturing Processes*; Vol. 5; Issue 1; DOI: 10.1016/S1526-6125(03)70044-9; 2003.
- [ZUB10] Zubeil, M.; Roll, K.; Merklein, M.: *Untersuchung der Gefügeentwicklung beim Rollfalzen*. in: Kawalla, R.: *Proceedings of the 2nd International Conference on Advanced Metal Forming Processes in Automotive Industry, AutoMetForm 2010 - in Verbindung mit 17. Sächsische Fachtagung Umformtechnik SFU 2010*; ISBN: 3-86012-412-9; Freiberg; Institut für Metallformung; 2010.
- [ZUB11] Zubeil, M.: *Numerical and experimental study of loading conditions in the roller hemming process*. in: Hirt, G.: *Proceedings of the 10th International Conference on Technology of Plasticity ICTP 2011*; ISBN: 3-5140-0784-5; Düsseldorf; Verlag Stahleisen GmbH; 2011.
- [ZUB14] Zubeil, M.: *Versagensprognose bei der Prozesssimulation von Biegeumform- und Falzverfahren - Bericht aus dem Lehrstuhl für Fertigungstechnologie Band 250*; Dissertation; Erlangen; 2014.

**LEBENS LAUF***CURRICULUM VITAE**PERSÖNLICHE DATEN*

Name	Severin Hönle
Geburtsdatum	15.01.1985
Geburtsort	Tübingen

*SCHULISCHE AUSBILDUNG*

1991 - 1995	Karl-Joseph-Leiprecht Grundschule, Rottenburg
1995 - 2004	Eugen-Bolz-Gymnasium, Rottenburg

*UNIVERSITÄRE AUSBILDUNG*

2004 - 2011	Universität Stuttgart Studiengang: Fahrzeug und Motorentechnik (Dipl.-Ing.) 1. Hauptfach: Fahrzeug- und Motorentechnik 2. Hauptfach: PKW-Karosseriebau Diplomarbeit: Institut für Umformtechnik
-------------	---

*BERUFLICHER WERDEGANG*

2009	Universität Stuttgart, Institut für Systemdynamik Studentische Hilfskraft
2010	Universität Stuttgart, Institut für Umformtechnik Studentische Hilfskraft
2010	Audi AG, Qualitätssicherung, Neckarsulm Praktikum
2012 - 2015	Universität Stuttgart, Institut für Umformtechnik Wissenschaftlicher Mitarbeiter
Seit 2015	Audi AG, Anlagen- und Vorrichtungsbau, Neckarsulm Anlagenplaner