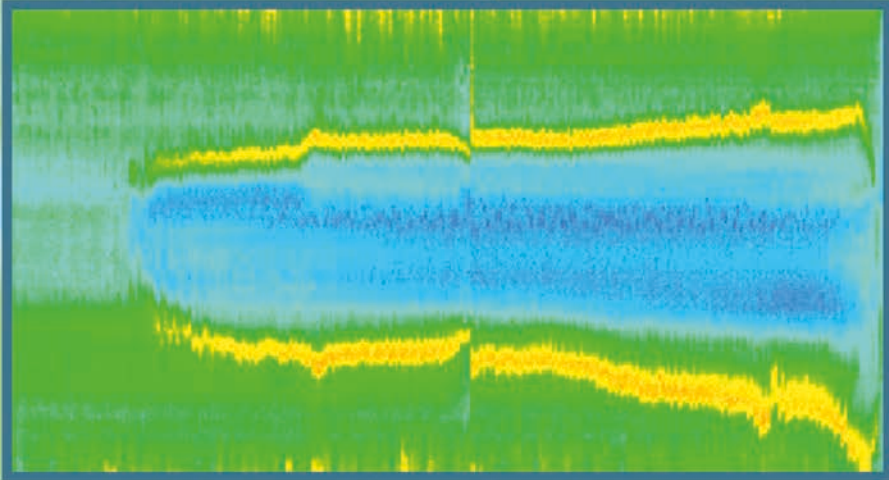




FAU Studien aus dem Maschinenbau 462

Barbara Hansen

Methode zur Berücksichtigung von
Schwankungen der tribologischen
Halbzeugeigenschaften für die
umformtechnische Herstellung von
Karosseriebauteilen im Serienprozess

Barbara Hansen

Methode zur Berücksichtigung von Schwankungen der
tribologischen Halbzeugeigenschaften für die umformtechnische
Herstellung von Karosseriebauteilen im Serienprozess

FAU Studien aus dem Maschinenbau

Band 462

Herausgeber der Reihe:

Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke

Prof. Dr.-Ing. Nico Hanenkamp

Prof. Dr.-Ing. habil. Tino Hausotte

Prof. Dr.-Ing. habil. Marion Merklein

Prof. Dr.-Ing. Sebastian Müller

Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt

Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartzack

Barbara Hansen

**Methode zur Berücksichtigung von
Schwankungen der tribologischen
Halbzeugeigenschaften für die
umformtechnische Herstellung von
Karosseriebauteilen im Serienprozess**

Dissertation aus dem Lehrstuhl für Fertigungstechnologie (LFT)
Prof. Dr.-Ing. habil. Marion Merklein

Erlangen
FAU University Press
2025

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Kontakt: Barbara Hansen, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, ( <https://ror.org/oof7hpc57>), ORCID: 0009-0005-3652-5030

Bitte zitieren als

Hansen, Barbara. 2025. *Methode zur Berücksichtigung von Schwankungen der tribologischen Halbzeugeigenschaften für die umformtechnische Herstellung von Karosseriebauteilen im Serienprozess*. FAU Studien aus dem Maschinenbau Band 462. Erlangen: FAU University Press.

DOI: 10.25593/978-3-96147-821-7

Das Werk, einschließlich seiner Teile, ist urheberrechtlich geschützt.
Die Rechte an allen Inhalten liegen bei ihren jeweiligen Autoren.
Sie sind nutzbar unter der Creative-Commons-Lizenz BY-NC.

Der vollständige Inhalt des Buchs ist als PDF über OPEN FAU der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg abrufbar:
<https://open.fau.de/home>

Verlag und Auslieferung:
FAU University Press, Universitätsstraße 4, 91054 Erlangen

Druck: docupoint GmbH

ISBN: 978-3-96147-820-0 (Druckausgabe)
eISBN: 978-3-96147-821-7 (Online-Ausgabe)
ISSN: 2625-9974
DOI: 10.25593/978-3-96147-821-7

**Methode zur Berücksichtigung von Schwankungen
der tribologischen Halbzeugeigenschaften für die
umformtechnische Herstellung von
Karosseriebauteilen im Serienprozess**

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

zur
Erlangung des Doktorgrades Dr.-Ing.

vorgelegt von

Barbara Hansen, M.Sc.

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

Tag der mündlichen

Prüfung: 25. Oktober 2024

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Marion Merklein
Prof. Dr.-Ing. Stephan Tremmel,
Universität Bayreuth

Vorwort

*„Man merkt nie, was getan wurde.
Man sieht immer nur, was noch getan werden muß.“*

Marie Curie (1867-1934)

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als Doktorandin im Presswerk der BMW Group am Standort Regensburg. Mein besonderer Dank gilt Frau Prof. Dr.-Ing. habil. Marion Merklein der Ordinaria des Lehrstuhls für Fertigungstechnologie für die umfassende Betreuung meiner Arbeit und der Möglichkeit zur Promotion. Für die Übernahme des Koreferats und das Interesse an meiner Arbeit danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Stephan Tremmel. Bedanken möchte ich mich darüberhinaus bei Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Hinnerk Hagenah für die wissenschaftlichen Anregungen sowie bei Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Michael Lechner für sein Engagement und die Ratschläge, welche zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Die Erkenntnisse dieser Arbeit wurden im Rahmen des Projekts *Presswerk 4.0* der BMW Group in einer Zusammenarbeit zwischen der Technischen Planung am Standort München und dem Presswerk am Standort Regensburg erarbeitet. Für die wohlwollende Förderung und großzügige Unterstützung meiner Arbeit bedanke ich mich bei Herrn Klaus Mölzl, Herrn Christian Zernickow und Herrn Michael Haberl.

Ein herzlicher Dank gilt postum Herrn Dr.-Ing. Josef Meinhardt sowie Herrn Dr.-Ing. Stephan Purr für das mir entgegengebrachte Vertrauen und die hilfreichen fachlichen Diskussionen. Darüberhinaus möchte ich mich bei allen Kollegen für die gute Zusammenarbeit und Hilfsbereitschaft bedanken.

Abschließend gilt mein besonderer Dank meiner Familie und meinen Freunden, die mich auf meinem bisherigen Lebensweg bedingungslos und uneingeschränkt unterstützt haben.

Regensburg, im Januar 2025

Barbara Hansen

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnis	vii
1 Einleitung	1
2 Stand der Technik und Forschung	3
2.1 Umformtechnik im Automobilbau.....	3
2.1.1 Fertigungsprozess von Karosseriebauteilen.....	3
2.1.2 Umformverfahren zur Herstellung von Karosseriebauteilen	4
2.1.3 Einflussfaktoren auf den Umformprozess und resultierende Qualitätsmerkmale	5
2.2 Tribologie in der Blechumformung.....	9
2.2.1 Das tribologische System	10
2.2.2 Einflussfaktoren auf die Reibung in der Blechumformung	13
2.2.3 Modellversuche zur Ermittlung des Reibverhaltens	20
2.3 Reibung in der Umformsimulation	22
2.4 Halbzeugeigenschaften und Chargenschwankungen in der Blechumformung.....	24
2.4.1 Schwankungen der Schmierstoffmenge und Schmierstoffverteilung	25
2.4.2 Schwankungen der Rauheit	27
2.4.3 Weitere Schwankungen von Halbzeugeigenschaften	28
2.5 Zusammenfassende Bewertung	31
3 Zielsetzung der Arbeit und methodische Vorgehensweise.....	33
4 Werkstoffe und Versuchsmethoden.....	35
4.1 Untersuchtes Halbzeug und Karosseriebauteil.....	35
4.2 Anlagen und Werkzeug für die Herstellung des Karosseriebauteils ..	36
4.3 Messtechnik zur Halbzeugcharakterisierung.....	38
4.3.1 Methoden zur Oberflächencharakterisierung	38
4.3.2 Methode zur Ermittlung der Schmierstoffauflagemenge	41
4.3.3 Methode zur Blechdickenmessung	41
4.3.4 IMPOC-System zur Ermittlung der mechanischen Eigenschaften	42
4.4 Methode zur Reibungscharakterisierung	43
4.4.1 Versuchsanlage und Werkzeug	43
4.4.2 Untersuchte Halbzeuge.....	45
4.5 Finite-Elemente-Simulation.....	46

5	Ursachenanalyse und Charakterisierung von im Serienprozess erfassten Halbzeugeigenschaften.....	49
5.1	Erfassung und Charakterisierung von Schwankungen der Schmierstoffmenge und Schmierstoffverteilung	50
5.1.1	Erfassung der Schmierstoffmesswerte und Prüfung der Datenreduzierung.....	50
5.1.2	Schwankungen der Schmierstoffmenge und -verteilung	56
5.1.3	Einflussfaktoren auf die Schmierstoffverteilung	73
5.2	Erfassung und Charakterisierung von Schwankungen der Rauheit ...	82
5.2.1	Prüfung des Inline-Rauheitsmessverfahrens SRM	82
5.2.2	Schwankungen der Rauheit	88
5.3	Zusammenfassende Bewertung der Charakterisierung von Chargenschwankungen	96
6	Methode zur Charakterisierung der tribologischen Bedingungen bei Chargenschwankungen	99
6.1	Methodik zur Halbzeugcharakterisierung und Reibungscharakterisierung	99
6.2	Charakterisierung der Halbzeuge	102
6.3	Charakterisierung der Reibung	111
7	Numerisch gestützte Analyse zum Aufbau eines Prozessverständnisses bei schwankenden tribologischen Bedingungen	119
7.1	Vorgehensweise zur Übertragung der Erkenntnisse in die FE-Simulation	120
7.1.1	Validierung des bestehenden Simulationsmodells	120
7.1.2	Überführung der Streifenziehversuche in die Simulation.....	123
7.2	Analyse und Bewertung der Auswirkung von Chargenschwankungen auf das Umformverhalten	126
8	Zusammenfassende Prozessbewertung für die Herstellung von Karosseriebauteilen im Serienprozess	135
9	Zusammenfassung und Ausblick	139
10	Summary and outlook	143
	Literaturverzeichnis	147

Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnis

Formelzeichen

Symbol	Einheit	Beschreibung
a,b,c	-	Gewichtungsfaktor
l	mm	Ziehlänge im Streifenziehversuch
n	-	Verfestigungsexponent
n	-	Druckexponent
n _H	min ⁻¹	Hubzahl
p _N	MPa	Flächenpressungen im Streifenziehversuch
p _o	MPa	Referenzdruck
r	-	Korrelationskoeffizient
r ₉₀	-	Senkrechte Anisotropie in 90° Walzrichtung
s	g/m ²	Schmierstoffmenge
s _{Spez}	g/m ²	Spezifikation der Schmierstoffmenge
s _B	mm	Blechdicke
s _{B,Spez}	mm	Spezifikation der Blechdicke
t	s	Beanspruchungsdauer
v	mm/s	Gleitgeschwindigkeit
v _{rel}	mm/min	Relativgeschwindigkeit
x ₁ , x ₂ , x ₃ , x ₄ , x ₅ , x ₆ ,	-	Koeffizient
Δx	μm	Abweichung der projizierten Laserline
Δz	μm	Höhenvariation
A	mm ²	Kontaktfläche der Reibbacken
A _g	%	Gleichmaßdehnung
A ₈₀	%	Bruchdehnung
F _B	kN	Blechhalterkraft
F _N	N	Normalkraft
F _R	N	Reibungskraft

F_{RH}	N	Reibungskraft zwischen Blech und starrer Reibbacke
F_{RV}	N	Reibungskraft zwischen Blech und beweglicher Reibbacke
F_z	N	Ziehkraft
R_a	μm	Arithmetische Mittenrauwert nach DIN EN 10049
R_m	N/mm^2	Zugfestigkeit
$R_{p0,2}$	N/mm^2	Streckgrenze
RP_c	cm^{-1}	Spitzenzahl nach DIN EN ISO 4287
R_z	μm	Gemittelte Rautiefe nach DIN EN ISO 4287
ΔSB	-	Balligkeit des Bleches
T	$^{\circ}\text{C}$	Temperatur
V_{cl}	mm^3/m^2	Geschlossenes Leervolumen
α	$^{\circ}$	Einfallswinkel des Lichts
α_{clm}	%	Maximum des geschlossenen Leerflächenanteils
η	mm^2/s	Viskosität des Schmierstoffes
μ	-	Reibzahl
μ_G	-	Gleitreibung
μ_H	-	Haftreibung
μ_o	-	Referenzreibzahl
σ	-	Standardabweichung zur Charakterisierung der Homogenität der Schmierstoffverteilung

Abkürzungen

Abkürzung	Beschreibung
3D	Dreidimensional
AFO	Arbeitsfolge
AG	Aktiengesellschaft
BMW	Bayerische Motoren Werke
CAD	Computer Aided Design
CCD	Charge-Coupled Device
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
CR ₃	Cold Rolles Mild Steel
DIN	Deutsches Institut für Normung
DLC	Diamond Like Carbon
EBT	Electron Beam Texturing
EDT	Electrical Discharge Texturing
EU	Europäische Union
FE	Finite Elemente
FEM	Finite-Elemente-Methode
FLD	Forming Limit Diagramm
GGG70L	Legiertes Gusseisen mit Kugelgraphit
IMPOC	Impulse Magnetic Online Process Controler
LFT	Lehrstuhl für Fertigungstechnologie
LSTC	Livermore Software Technology Corporation
LT	Laser Texturing
M	Messspur
MF	Mill-Finish (Texturierung)
max	Maximum
min	Minimum
OFIS	Portable Oil Film Measurement
OFM	Online Oil Film Measurement
OS	Oberseite

P	Probe
Pos	Position
PRETEX®	Precision Texturing
S	Segment
SBT	Shot Blast Texturing
SF	Schmierstofffrei
SRM	Surface Roughness Measurement
St	Streifen
US	Unterseite
VDA	Verband der Automobilindustrie
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
X ₁	BMW Kompakt-SUV (Sport Utility Vehicle) der X-Serie
Z	Schmelztauchveredeln mit Zinküberzug
ZA	Schmelztauchveredeln mit Zink-Aluminium-Überzug
ZE	Elektrolytische Verzinkung
ZF	Schmelztauchveredeln mit Zink-Eisen-Überzug
ZM	Schmelztauchveredeln mit Zink-Magnesium-Überzug

1 Einleitung

Das Umweltbewusstsein unserer Gesellschaft hat in den vergangenen Jahren einen zunehmend hohen Stellenwert eingenommen [1]. Auch in der Industrie kommt dem Umwelt- und Klimaschutz eine besondere Bedeutung zu. Dabei ist nicht nur ein umweltfreundliches Produkt, sondern auch eine nachhaltige Produktion von Relevanz [2]. Getrieben von ambitionierten gesetzlichen Forderungen, die CO₂-Emissionen zu senken, muss sich die Automobilindustrie, welche mit Abstand der bedeutendste Industriezweig in Deutschland ist [3], neuen Herausforderungen stellen. Demzufolge wurden im Rahmen des Übereinkommens von Paris [4] verbindliche Zielvorgaben definiert, die u.a. eine Reduzierung der CO₂-Emissionen in der EU bis 2030 um 40 % gegenüber dem Jahr 1990 vorgeben [5]. Um dieses Ziel zu erreichen, sind Fahrzeuge unterschiedlicher Antriebstechnologien eine Option. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, das Gewicht der Karosserie zu senken, um bei konventionellen Verbrennungsmotoren den Kraftstoffverbrauch und folglich die CO₂-Emissionen zu reduzieren [6]. Leichtbauwerkstoffe wie Aluminium [7] und Magnesium [8] zeichnen sich durch eine deutlich geringere Dichte im Vergleich zu Stahl aus und tragen so zu einer Reduzierung des Karosseriegewichts bei. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, durch eine Reduzierung der Materialstärke der Bauteile eine Gewichtsreduktion zu realisieren [9], wenn dies die Bauteilanforderungen zulassen. Eine weitere Herausforderung besteht in den kontinuierlich steigenden Anforderungen der Kunden [10], welche neben Fahrassistenzsystemen [11] ein markantes Fahrzeugdesign [12] umfassen. Der derzeit aktuelle Designtrend sieht scharfe Kanten und kleine Radien an der Außenhautkarosserie vor [9]. Umformtechnisch anspruchsvolle Geometrien wie beispielsweise die Formgebung eines Seitenrahmens, führen im Zusammenhang mit geringen Materialstärken zu einer Auslegung der Karosseriebauteile an der Grenze der Realisierbarkeit. Die Folge ist ein kleines Prozessfenster für die Herstellung von Karosseriebauteilen in guter Qualität. Die Herstellung von Karosseriebauteilen basiert auf einem komplizierten Prozess, der von verschiedenen Faktoren beeinflusst wird. Folglich reagiert der Prozess sensibel gegenüber Schwankungen der Einflussfaktoren, zu denen unter anderem die Halbzeugeigenschaften der Platinen zählen. Insbesondere die Reibungsbedingungen während des Umformprozesses wirken sich auf den Materialfluss aus und spiegeln sich in der Bauteilqualität wider. Schwankungen hinsichtlich des tribologischen Verhaltens können zu Qualitätsmängeln am Bauteil und folglich zu Ausschuss und Nacharbeit

führen. Etwa ein Drittel des produzierten Stahls geht Schätzungen zufolge bedingt durch Ausschuss und spanende Bearbeitung verloren [13], welcher jedoch mittels hohem Energieaufwand recycelt und weiterverwertet wird. Aufgrund der kurzen Entwicklungszeit kommen vermehrt virtuelle Methoden zum Einsatz, um die umformtechnische Herstellbarkeit von Karosseriebauteilen abzusichern [14]. Dabei ist es Ziel der Umformsimulation, durch Modellierung der Reibung, des Werkstoffes sowie des Prozesses, den Umformprozess möglichst nah an den realen Gegebenheiten abzubilden. Obwohl das Auftreten von Chargenschwankungen bekannt ist, werden diese bei der umformtechnischen Auslegung der Werkzeuge nur sehr eingeschränkt berücksichtigt. So erfolgt die Modellierung der Reibung in der Industrie in der Regel weiterhin mittels konstanter Reibungsbedingungen. Ein Grund dafür ist, dass Chargenschwankungen insbesondere der für die Tribologie relevanten Halbzeugeigenschaften bisher nur unzureichend bekannt sind. Im Rahmen der vierten industriellen Revolution, welche die Digitalisierung der Produktion beschreibt, eröffnen sich neue Möglichkeiten, die Herstellung von Produkten durch Datenanalysen effizienter zu gestalten [15]. Durch den Einsatz verschiedener Inline-Messsysteme können die Einflussfaktoren auf den Herstellungsprozess von Karosseriebauteilen im Presswerk erfasst werden [16]. Folglich ist es möglich, eine Transparenz über den gesamten Prozess vom Zuschnitt der Platinen bis hin zum fertigen Karosseriebauteil zu schaffen. Somit können beispielsweise Schwankungen der Halbzeugeigenschaften bestimmt werden, welche die Untersuchung der Auswirkungen auf den Umformprozess und die Ableitung von Handlungsmöglichkeiten auf Basis einer großen Datenmenge erlauben. Übergeordnetes Ziel der Arbeit ist die Erarbeitung eines besseren Verständnisses hinsichtlich des Auftretens von Chargenschwankungen und deren Auswirkung auf umgeformte Karosseriebauteile. Dazu wird zunächst das Vorkommen von tatsächlich auftretenden Schwankungen insbesondere hinsichtlich der für die Tribologie relevanten Eigenschaften im Serienprozess analysiert. Durch eine Charakterisierung der Halbzeugeigenschaften und die anschließende Untersuchung des Reibverhaltens werden die Haupteinflussfaktoren identifiziert, deren Ergebnisse für die Umformsimulation dienen. Die gewonnenen Erkenntnisse bilden die Grundlage, um künftig die Werkzeuge bereits in der Entwicklungsphase robust gegenüber potenziellen Materialschwankungen auslegen zu können. Dies führt folglich zu einer potenziellen Steigerung der Produktivität sowie zu einer Reduzierung der aufgrund von Qualitätsmängeln verausschussten Karosseriebauteile.

2 Stand der Technik und Forschung

Das folgende Kapitel beinhaltet die für diese Arbeit relevanten wissenschaftlichen und technischen Grundlagen. Der erste Abschnitt thematisiert den Stand der Technik und Forschung zum allgemeinen Herstellungsprozess von Karosseriebauteilen und die Faktoren, welche diesen beeinflussen. Anschließend werden die bisherigen Erkenntnisse hinsichtlich auftretender Chargenschwankungen und deren Auswirkung auf das Umformverhalten dargelegt. Es folgen Erläuterungen zu den bisher bekannten Wirkzusammenhängen und den Modellversuchen zur Untersuchung des tribologischen Verhaltens in der Blechumformung. Des Weiteren wird ein Überblick über die Ansätze zur Modellierung der Reibung in der Umformsimulation gegeben. Das Kapitel schließt mit einer zusammenfassenden Bewertung ab.

2.1 Umformtechnik im Automobilbau

Einer der anspruchsvollsten Prozessschritte bei der Herstellung von Karosseriebauteilen ist der Umformprozess. Eine Vielzahl von Faktoren nimmt Einfluss auf das Umformverhalten und spiegelt sich infolgedessen in der Bauteilqualität wider. Im Folgenden wird näher auf den seriellen Fertigungsprozess von Karosseriebauteilen im Presswerk, die Umformverfahren sowie auf die den Umformprozess beeinflussenden Faktoren eingegangen. Darüber hinaus werden die Versagensarten, welche während der Umformung auftreten können, erläutert.

2.1.1 Fertigungsprozess von Karosseriebauteilen

Der Herstellungsprozess von Karosseriebauteilen gliedert sich in zwei wesentliche Prozessschritte. Dem Wertstrom folgend beginnt der Prozess mit dem Ablängen der Coils, den sogenannten Blechbändern beispielsweise aus Stahl oder Aluminium, welche zu Platinen vereinzelt werden. Dies geschieht in der Platinenschneidanlage, auch Coilanlage genannt, welche in drei Anlagenbereiche unterteilt ist: Bandzuführanlage, Schnittpresse und Platinenstapelanlage. In der Bandzuführanlage wird das Coil abgehaspelt und gerichtet, um mögliche Verspannungen im Blech zu lösen. Die Platinengeometrie ist entsprechend der Bauteilgeometrie vorgegeben, sodass der Zuschnitt von Rechteck-, Trapez- und Formplatinen individuell erfolgt. Die auf Paletten abgestapelten Platinen werden anschließend nach einer

kurzen Zwischenlagerung im zweiten Prozessschritt an den Pressen zu Karosseriebauteilen weiterverarbeitet. Neben schwungradgetriebenen Transferpressen kommen vermehrt Pressenlinien mit Servo-Antrieb zum Einsatz, welche sich durch einen anpassungsfähigen Bewegungsablauf und eine hohe Ausbringungsleistung auszeichnen [17]. Die Zuführung der Platinen an der Presse erfolgt über einen Platinenlader, gefolgt von Robotern, die die Platinen vereinzeln und in das Werkzeug der Kopfpresse, dem Ziehwerkzeug, einlegen. Zusätzlich besteht die Möglichkeit des Aufbringens eines Schmierstoffes [9] in Form einer Sprühbeschichtung. Des Weiteren können Verschmutzungen auf der Platinenoberfläche mithilfe einer Bürstanlage entfernt werden. Je nach Bauart der Presse erfolgt die Bauteilfertigung, angefangen beim Umformen zu einem Ziehteil bis hin zum fertigen Karosseriebauteil, in vier bis sechs Arbeitsfolgen, welche zusätzlich Nachform-, Beschnitt- und Abkantvorgänge umfassen. Als Transportsystem in der Presse kommen Crossbar-Roboter oder Saugerbrücken-Transportsysteme zum Einsatz, welche das Bauteil ohne beziehungsweise mit einer Zwischenablage durch die Anlage befördern. Das finale Bauteil wird am Auslaufband hinsichtlich seiner Qualität geprüft, in entsprechende Behälter verräumt und im Karosseriebau weiterverarbeitet.

2.1.2 Umformverfahren zur Herstellung von Karosseriebauteilen

In Abhängigkeit der Bauteilgeometrie finden verschiedene Umformverfahren bei der Herstellung von Karosseriebauteilen Anwendung. Diese werden nach DIN 8582 [18] in Abhängigkeit der vorliegenden Spannungszustände eingeteilt. Das Tiefziehen ist als „Zugumformen zum Anbringen von Vertiefungen in einem ebenen oder gewölbten Werkstück aus Blech, wobei die Oberflächenvergrößerung durch Verringern der Blechdicke erreicht wird“ [19], definiert. Dem angehört das Streckziehen, welches als „Tiefziehen eines Zugschnittes mit einem starren Stempel, wobei das Werkstück am Rand fest eingespannt ist“ [19], beschrieben wird. Bei diesem Verfahren wird das Werkstück durch Spannvorrichtungen oder starre Werkzeugelemente eingespannt und anschließend über den formgebenden Stempel umgeformt. Durch die Umformung kommt es zu einem Recken des Blechs, welche gleichzeitig eine Verringerung der Blechdicke zur Folge hat und zu einer Kaltverfestigung führt, wodurch das Bauteil seine Festigkeit erlangt. Um eine vorzugsweise gleichmäßige Formänderung zu erzielen, ist eine möglichst geringe Reibung zwischen Platine und Stempel erwünscht [20]. Dieses Verfahren dient der Herstellung großflächiger ebener Bauteile [20], wie

beispielsweise Frontklappen. Ein weiteres Umformverfahren ist das Tiefziehen, welches für die Herstellung einer Vielzahl von Karosseriebauteilen angewendet wird. Dabei handelt es sich nach DIN 8584 - 3 um „Zugdruckumformen eines Blechzuschnittes [...] zu einem Hohlkörper oder Zugdruckumformen eines Hohlkörpers zu einem Körper mit kleinerem Umfang“ [21]. Eine Änderung der Blechdicke ist bei diesem Verfahren nicht beabsichtigt. Beim Tiefziehen mit starrem Stempel wird die Platine zwischen der formgebenden Matrize und dem Blechhalter eingelegt und anschließend mittels des Stempels in die Matrize gezogen. Die über den Blechhalter aufgebrauchte Kraft dient der Steuerung des Materialflusses.

Die Herstellung von Karosseriebauteilen mit umformtechnisch anspruchsvollen Geometrien umfasst eine Verfahrenskombination aus Tiefziehen, Streckziehen und Biegen, welches auch als Karosserieziehen bezeichnet wird [9]. Zudem ist der Aufbau der Umformwerkzeuge für Karosseriebauteile erheblich aufwendiger. Entsprechend der Bauteilgeometrie umfasst das Werkzeug in der Regel mehrere Ziehstufen, diverse unterschiedliche Radien, Platineneinweiser sowie Sicken und Blechhalterdistanzierungen. Letztere dienen zur Steuerung des Materialflusses [22]. Die Faktoren, welche den Umformprozess beeinflussen und sich in der Bauteilqualität durch verschiedenen Fehler- und Versagensarten widerspiegeln können, werden in folgenden vorgestellt.

2.1.3 Einflussfaktoren auf den Umformprozess und resultierende Qualitätsmerkmale

Durch zahlreiche Faktoren wird der Herstellungsprozess von Karosseriebauteilen negativ beeinflusst, welche die Bauteilqualität beeinträchtigen und zu Nacharbeit oder Ausschuss führen können. Die Bauteilqualität betreffend werden verschiedene Qualitätsmerkmale unterschieden. Diese lassen sich in Oberflächenfehler, geometrische Fehler sowie fundamentale Fehler, welche zu einem Versagen des Werkstoffes führen [9], kategorisieren und gelten sowohl für Außenhautbauteile wie auch für Strukturbauteile.

Qualitätsmerkmale

Oberflächenfehler umfassen beispielsweise Dellen, Beulen, Kratzer und Nachlaufkanten, welche insbesondere bei Außenhautbauteilen nicht tolerierbar sind, jedoch zum Teil nachgearbeitet werden können. Das Auftreten von Oberflächenfehlern kann zumeist auf eine Verschmutzung des Werkzeugs durch beispielsweise Zinkabrieb von der Platine [23] oder

Schmierstofftropfenbildung zurückgeführt werden und kann durch eine Reinigung der Werkzeuge behoben werden. Anhau- und Nachlaufkanten treten beim Kontakt unter Zugspannung zwischen dem Werkzeug und der Platine auf und zeichnen sich auch im lackierten Zustand als Linie am Bauteil ab [24]. Die Position der Anhau- und Nachlaufkanten kann sich durch Unterschiede im Materialfluss ändern [25]. Diese sind jedoch nicht gänzlich vermeidbar. Im Gegensatz zur Karosserieaußenhaut, bei der ein makelloses Erscheinungsbild nach dem Lackierprozess gewünscht ist, können Oberflächenfehler an Strukturbauteilen, sofern sie die Folgeprozesse nicht beeinträchtigen, akzeptiert werden.

Ein weiteres vom Materialfluss abhängiges Qualitätsmerkmal ist die Maßhaltigkeit des Bauteils [26], welche beispielsweise durch einen Wechsel der Presse [27], der Halbzeugcharge oder der Reibung beeinflusst wird [9]. Bedingt durch die anisotropen Werkstoffeigenschaften kommt es zu einem elastischen Rückfederungsverhalten, oft auch als Aufsprungverhalten bezeichnet, beim Öffnen des Ziehwerkzeugs, wodurch es zu geometrischen Abweichungen des Bauteils kommen kann [28].

Zu den fundamentalen Fehlern gehören beim Umformen von Karosseriebauteilen das Auftreten von Rissen und Falten [22], bedingt durch das begrenzte Formänderungsvermögen metallischer Werkstoffe [29]. Diese führen zu einem gänzlichen Versagen des Bauteils und sind weder bei Außenhautbauteilen noch bei Strukturbauteilen zulässig und führen zu Ausschuss. Eine Nacharbeit des Fehlers ist nicht möglich, da die Funktionalität des Bauteils nicht mehr gewährleistet werden kann [25]. Durch eine gezielte Steuerung des Materialflusses kann das Auftreten von Rissen und Falten beeinflusst werden. Eine nicht ausreichende Schmierung oder eine zu hohe Blechhalterkraft führen dazu, dass das Nachfließen des Materials aus dem Flanschbereich in die Matrize behindert wird. Dadurch kommt es zunächst zu einer Dehnung, gefolgt von einer Einschnürung des Materials und im Weiteren zu einem Riss. Dieser tritt in der Regel aufgrund der hohen Belastung im Bereich der Stempelkante auf [30]. Beim Auftreten von Falten werden in Abhängigkeit des Entstehungsbereichs zwei Arten unterschieden. Im Flanschbereich treten Falten 1. Art auf, welche aufgrund einer zu geringen Niederhalterkraft entstehen. Ursache für das Auftreten von Falten 2. Art im Bereich der freien Umformzone kann beispielsweise ein zu großer Ziehspalt sein [29].

Einflussfaktoren auf den Umformprozess

Eine Vielzahl von Faktoren, welche Einfluss auf den Umformprozess nehmen, lassen sich in Anlehnung an Rittmeier [31] in pressen-, werkzeug- und

halbzeugseitige Einflussfaktoren unterteilen. Zum Teil handelt es sich dabei um Störgrößen, welche nicht direkt beeinflusst werden können. Zudem gibt es Stellgrößen, anhand derer eine Adaptierung des Umformprozesses möglich ist. Eine Übersicht wichtiger den Umformprozess beeinflussenden Faktoren, welche sich unter anderem in der Bauteilqualität widerspiegeln, ist in Bild 1 dargestellt.



Bild 1: Wichtige Einflussfaktoren auf dem Umformprozess und Merkmale der resultierenden Bauteilqualität

Pressenseitige Einflussfaktoren

Bei auftretenden Qualitätsproblemen während des Umformens von Karosseriebauteilen werden verschiedene Stellgrößen zur gezielten Anpassung des Prozesses eingesetzt. Zu den wesentlichen pressenseitigen Stellgrößen gehören die Blechhalterkraft, die Hubzahl und die Applikation eines zusätzlichen Schmierstoffes.

Maßgeblich für den Materialfluss der Platine ist die wirkende Rückhalterkraft zwischen Blechhalter und Matrize, welche unter anderem durch die Blechhalterkraft bestimmt wird [32]. Je nach Pressenbauart variiert die Anzahl an Verdrängerzylindern, über die das Ziehkissen und folglich die Blechhalterkraft geändert werden kann. Bei asymmetrischer Bauteilgeometrie werden lokal zielgerichtet Blechhalterkräfte zur Beeinflussung des

Materialflusses eingesetzt [20]. Die Reibungskraft ist nach dem Coulomb'schen Reibgesetz [33] direkt proportional zur Normalkraft bzw. zur Blechhalterkraft. Dies hat zur Folge, dass mit einer Erhöhung der Blechhalterkraft die Reibungskraft steigt und somit der Materialfluss gehemmt wird. Umgekehrt kann eine Reduzierung der Blechhalterkraft das Einlaufen der Platine in die Matrize begünstigen und somit dem Auftreten von Rissen entgegenwirken.

Eine Erhöhung der Hubzahl geht mit einer Steigerung der Anlagenproduktivität einher [29]. Da die Hubzahl jedoch die Stoßelgeschwindigkeit und somit die Umformgeschwindigkeit bestimmt, ist sie nicht beliebig veränderbar [34]. Die Werkzeugerwärmung, welche durch die Umformung und Reibung entsteht [35], ist beispielsweise von der Hubzahl anhängig [36]. Zwar nimmt das Formänderungsvermögen eines Werkstoffes mit zunehmender Temperatur zu [9], jedoch führt eine zu starke Erwärmung zu einem Versagen des Schmierstoffes [37], wodurch es zu einem Anstieg der Reibungskraft kommt. Diese kann ursächlich für einen inadäquaten Materialfluss sein. Demnach kann eine zu große Umformgeschwindigkeit zu einer Rissbildung am Bauteil führen [38]. Eine weitere Stellgröße, mit der der Materialfluss adaptiert werden kann, ist das Aufbringen eines zusätzlichen Schmierstoffes in der Presse [39], welcher zur lokalen Reduzierung der Reibung dient.

Während des Umformprozesses erfahren die Presse und das Umformwerkzeug aufgrund hoher Belastungen eine elastische Verformung. Insbesondere die Durchbiegung des Pressentischs und des Stoßels haben eine Auswirkung auf die Werkzeugwirkflächen [40]. Die unerwünschte Änderung des Werkzeugschlusses an den Wirkflächen kann eine unzureichende Druckverteilung auf das Bauteil zur Folge haben [41]. Des Weiteren kann die Asymmetrie der Bauteilgeometrie während des umformtechnischen Ziehvorgangs aufgrund einer außermittigen Belastung zu einer Verkipfung des Stoßels führen [42], wodurch es ebenfalls zu einer inhomogenen Druckverteilung kommt, welche die Bauteilqualität beeinträchtigen kann.

Werkzeugseitige Einflussfaktoren

Zur Steuerung des Materialflusses dienen verschiedene Sickengeometrien sowie Distanzierungen, welche im Blechhalter des Umformwerkzeugs integriert sind. Klemmsicken werden dazu genutzt, den Materialfluss gänzlich zu unterdrücken, wohingegen Laufsicken den Materialfluss hemmen [28]. Blechhalterdistanzen, zum Teil auch als Ziehhilfen bezeichnet [9], werden im Blechhalter eingebaut, um einen Teil der Blechhalterkraft aufzunehmen [32]. Dadurch wird die auf den Platinenflansch wirkende

Kraft verringert und folglich der Materialfluss lokal begünstigt [43]. Des Weiteren dienen Blechhalterdistanzen dazu, Blechdickenschwankungen zu kompensieren, damit der Materialfluss über die Ziehsicken reguliert werden kann [9]. Im Werkzeug integrierte Platineneinweiser ermöglichen ein wiederholgenaues Einlegen der Platine ins Ziehwerkzeug [9]. Harsch et al. [27] zeigen, dass sich die Lage der Platine auf den Materialfluss auswirkt. Durch weniger Kontaktfläche zwischen Blechhalter und Platine wird das Material weniger zurückgehalten [27]. Folglich kann eine fehlerhafte Lage der Platine ursächlich für das Auftreten von Rissen oder Falten sein.

Halbzeugseitige Einflussfaktoren

Die Halbzeugeigenschaften sind ein weiterer Faktor, welcher Auswirkung auf das Umformverhalten hat. Die mechanischen Eigenschaften von Halbzeugen werden durch verschiedene Werkstoffkennwerte, welche beispielsweise im Zugversuch [44] ermittelt werden, beschrieben. Dazu zählen unter anderem die Zugfestigkeit R_m , die 0,2 % -Dehngrenze $R_{p0,2}$, die Gleichmaßdehnung A_g und die Bruchdehnung A_{80} [45]. Somit sind hohe Dehnungskennwerte ein Indikator für ein hohes Umformvermögen [46]. Weitere Werkstoffkennwerte umfassen die senkrechte Anisotropie r_{90} [47] und den Verfestigungsexponenten n . Die Kaltverfestigung eines Werkstoffes, infolge einer zunehmenden Formänderung, wird durch den n -Wert beschrieben [20] und ist ein Maß für die Streckziehfähigkeit [29]. Des Weiteren haben die geometrischen Gegebenheiten des Halbzeugs und demzufolge auch die der Platine einen Einfluss auf die Umformung. Bei einer Erhöhung der Blechdicke steigt das Risiko für Risse, wohingegen bei einer Reduzierung der Blechdicke die Tendenz zur Faltenbildung zunimmt [48]. Zudem ist es möglich, dass es zu Geometrieabweichungen der Platine aufgrund von Abweichungen der Lage des Blechbands im Schnittwerkzeug während des Schneidprozesses in der Coilanlage kommt [49]. Folglich ändern sich die Kontaktbedingungen im Bereich des Blechhalters während des Umformprozesses, was zu einer Änderung des Materialflusses führt [22]. Die Halbzeugeigenschaften, welche sich auf das Reibverhalten auswirken, umfassen unter anderem die Schmierstoffmenge, die Oberflächentopografie sowie die Oberflächenverzinkung bzw. Oberflächenpassivierung. Detaillierte Erläuterungen zu den tribologischen Einflussfaktoren und Wirkzusammenhängen folgen in Abschnitt 2.2.

2.2 Tribologie in der Blechumformung

Bei der Herstellung von Karosseriebauteilen wird die Bauteilqualität entscheidend durch den Materialfluss und damit, neben den mechanischen

Materialeigenschaften, durch die tribologischen Bedingungen bestimmt. Nicht immer ist eine geringe Reibung erwünscht. Zur Übertragung der Umformkräfte ist beispielsweise eine hohe Reibung erforderlich. Folglich ist eine gezielte Beeinflussung der tribologischen Bedingungen entscheidend [50]. Im folgenden Abschnitt werden daher die für die Blechumformung relevanten tribologischen Mechanismen und Faktoren, welche Einfluss auf das Reibverhalten haben, erläutert sowie die Modellversuche zur Ermittlung des Reibverhaltens vorgestellt.

2.2.1 Das tribologische System

Der Begriff Tribologie leitet sich aus dem griechischen *tribein* für *reiben* ab und bedeutet demnach Reibungslehre. Die Gesellschaft für Tribologie definiert die Tribologie als „[...] die Wissenschaft und Technik von aufeinander einwirkenden Oberflächen in Relativbewegung. Sie umfasst das Gesamtgebiet von Reibung und Verschleiß, einschließlich Schmierung, und schließt entsprechende Grenzflächenwechselwirkungen sowohl zwischen Festkörpern als auch zwischen Festkörpern und Flüssigkeiten oder Gasen ein“ [51]. Das tribologische System setzt sich aus einer Systemstruktur und einem Beanspruchungskollektiv zusammen [51]. Die Systemstruktur besteht aus einem Grundkörper und einem Gegenkörper in einem Umgebungsmedium, wobei die Körper mit bzw. ohne ein Zwischenmedium in Kontakt stehen [52]. Reibung resultiert folglich in Abhängigkeit der im Beanspruchungskollektiv zusammengefassten Größen, welche auf die Systemstruktur wirken. Zu diesen zählen unter anderem die wirkende Normalkraft F_N , die Gleitgeschwindigkeit v sowie die Beanspruchungsdauer t und die Temperatur T [51].

Zusätzlich wird Reibung in Abhängigkeit vom Bewegungszustand in Haftreibung und Bewegungsreibung unterschieden. Haftreibung beschreibt den Zustand, bei der keine ausreichende Krafteinleitung vorhanden ist, um eine Relativbewegung zwischen den Kontaktpartnern zu bewirken. Demgegenüber befinden sich bei der Bewegungsreibung, zu der auch die Gleitreibung gehört, die Kontaktpartner in Relativbewegung zueinander [51]. Birkert et al. [9] beschreiben das mehrmalige Wechseln zwischen Haft- und Gleitreibung als Ruckgleiten, welches auch als Stick-Slip-Effekt bezeichnet wird.

Die wissenschaftlichen Untersuchungen zur Reibung reichen bis ins 15. Jahrhundert zurück, in dem Leonardo da Vinci die ersten Reibgesetze formulierte. Die heute bekannten Reibgesetze, welche sich auf die Festkörperreibung beziehen, sind auf Guillaume Amontons und Charles

Augustin de Coulomb zurückzuführen. Diese beschreiben die Proportionalität der Reibungskraft F_R zur Normalkraft F_N und zum anderen die Unabhängigkeit der Reibungskraft von der Kontaktfläche A und der Gleitgeschwindigkeit v . Daraus leitet sich das Coulomb'sche Reibgesetz mit dem Proportionalitätsfaktor μ , auch Reibzahl genannt, ab:

$$\mu = \frac{F_R}{F_N} \quad (1)$$

Eine Berücksichtigung der Schmierung erfolgt an dieser Stelle nicht, weshalb Stribeck [53] eine Differenzierung der Reibung unter Berücksichtigung der Viskosität des Schmierstoffes η , der Gleitgeschwindigkeit v und der Normalkraft F_N vornimmt. Folglich werden für gewöhnlich vier verschiedene Reibzustände bzw. Schmierungszustände unterschieden:

- Festkörperreibung,
- Grenzreibung,
- Mischreibung und
- Hydrodynamische Reibung.

Treten die beiden Reibpartner unmittelbar in Kontakt, ohne die Verwendung eines Schmierstoffes, liegt Festkörperreibung bzw. trockene Reibung vor. Charakteristisch für die Festkörperreibung ist die hohe Neigung zur Kaltverschweißung, abrasivem Verschleiß und folglich einem hohen Reibzahlniveau. Die Grenzreibung ist dadurch gekennzeichnet, dass eine Oxidschicht und ein dünner Schmierstofffilm zwischen den Reibpartnern vorhanden sind, sodass kein direkter Kontakt zwischen den Oberflächen besteht. Der Schmierstofffilm ist jedoch zu gering, um einen hydrodynamischen Druck aufzubauen und verringert lediglich die Adhäsionsneigung zwischen den Reibpartnern. Demgegenüber beschreibt die Flüssigkeitsreibung die vollständige Trennung der Reibpartner durch einen Schmierstoff. Folglich ist die Summe der Rautiefen beider Reibpartner kleiner als die Dicke des Schmierstofffilms. Bei der Flüssigkeitsreibung werden zwei Schmierungszustände unterschieden: hydrostatische und hydrodynamische Schmierung. Hydrostatische Schmierung liegt vor, wenn sich in geschlossenen Volumenbereichen der rauen Oberfläche ein Druck aufbaut, da der Schmierstoff nicht entweichen kann. Im Gegensatz dazu fließt bei einer hydrodynamischen Schmierung der Schmierstoff unter Einwirkung einer Relativbewegung in angrenzende Volumenbereiche. Die Trennung der Reibpartner erfolgt daher infolge des Tragens der Drucklast durch den Schmierstoff. Die Mischreibung liegt bei gleichzeitiger Anwesenheit von Flüssigkeits- und Grenzreibung vor. Dementsprechend sind Teilbereiche

der Oberfläche durch einen Schmierstofffilm gänzlich voneinander getrennt, wobei die Reibpartner in anderen Bereichen in direkten Kontakt stehen.

Reibung geht immer mit einer tribologischen Beanspruchung einher und kann zu Verschleiß führen. „Verschleiß ist der fortschreitende Materialverlust aus der Oberfläche eines festen Körpers, hervorgerufen durch mechanische Ursachen, d.h. Kontakt und Relativbewegung eines festen, flüssigen oder gasförmigen Gegenkörpers“ [51]. In Abhängigkeit des Beanspruchungskollektivs und der Systemstruktur werden vier Verschleißmechanismen unterschieden:

- Adhäsion,
- Abrasion,
- Oberflächenzerrüttung (Ermüdung) und
- Tribochemische Reaktionen.

Adhäsion tritt auf, wenn zwei metallische Oberflächen an lokalen Kontaktstellen eine atomare Bindung eingehen [54]. Dadurch kommt es lokal zu einer Kaltverschweißung der Kontaktpartner [51]. Kuwer [55] gibt als Ursache für das Auftreten von Adhäsion eine nicht zusammenhängende Benetzung der Oberflächen mit einem Zwischenmedium an [55]. Unterscheiden sich die Kontaktpartner hinsichtlich ihrer Härte und Rauheit, besteht die Möglichkeit, dass die Rauheitsspitzen des härteren Kontaktpartners in die des weicheren eindringen [56] und durch die Relativbewegung Riefen oder einen Materialabtrag verursachen [51]. Dieser Mechanismus wird als Abrasion bezeichnet. Die Oberflächenzerrüttung geht mit einer Ermüdung und Rissbildung in Oberflächenbereichen durch eine alternierende Belastung einher [51]. Laut Kuwer [55] sind beim Tiefziehen aufgrund der schwelenden Belastung keine Oberflächenzerrüttung zu erwarten, da normalerweise keine wechselnden Belastungen auftreten. Aufgrund mechanischer Beanspruchung oder thermisch aktivierten chemischen Reaktionen zwischen den Kontaktpartnern, dem Zwischenmedium und dem Umgebungsmedium entwickeln sich chemische Reaktionen, welche als tribochemische Reaktionen bezeichnet werden [55] und die Entstehung von Reaktionsschichten bzw. Reaktionspartikel verursachen [51]. Die verschiedenen Verschleißmechanismen können in Kombination auftreten. Eine gleichzeitige Überlagerung mehrerer Verschleißmechanismen tritt bei einer Änderung des Beanspruchungskollektivs ein [51].

2.2.2 Einflussfaktoren auf die Reibung in der Blechumformung

Reibung und Verschleiß werden von verschiedenen Faktoren beeinflusst und wirken sich auf die Bauteilqualität aus. Entsprechend der Systemstruktur können diese dem Grund- und Gegenkörper, dem Zwischenmedium und dem Beanspruchungskollektiv zugeordnet werden.

In der Blechumformung setzt sich das tribologische System aus Blech und Werkzeug sowie einem Schmierstoff als Zwischenmedium zusammen. Dabei weist die Werkzeugoberfläche eine höhere Härte als die des Halbzeugs auf. Im Gegensatz dazu besitzt die Blechoberfläche eine höhere Rauheit im Vergleich zur Werkzeugoberfläche. Zudem sind die tribologischen Gegebenheiten durch geringe Relativgeschwindigkeiten, niedrige Flächenpressungen und große Kontaktflächen gekennzeichnet. Der überwiegend vorliegende Schmierzustand in der Blechumformung ist die Mischreibung [57].

Grund- und Gegenkörper

Umformwerkzeuge dienen der Formgebung eines Bauteils. Gleichzeitig sind sie aufgrund der hohen wirkenden Kräfte enormen Belastungen ausgesetzt. In der Regel wird für jedes Bauteil nur ein Werkzeugsatz gefertigt [58], welcher über den gesamten Modellzyklus eines Fahrzeugprojektes zum Einsatz kommt. Somit erfährt das Werkzeug in der Regel mehrere hunderttausend und vereinzelt Millionen von Hieben im Rahmen seiner Laufzeit. Demzufolge werden an die Werkzeuge hohe Anforderungen gestellt, um Bauteile gleichbleibend hoher Qualität zu produzieren. Bereits die Wahl des Werkzeugwerkstoffes ist entscheidend [38] und bestimmt unter anderem die tribologischen Bedingungen. Für die umformtechnische Herstellung von Karosseriebauteilen werden im Bereich der Serienproduktion vorwiegend Werkzeuge aus dem Werkstoff GGG70L eingesetzt [9]. Dabei handelt es sich um legiertes Gusseisen mit Kugelgraphit. Dieser zeichnet sich durch eine hohe Festigkeit und Zähigkeit aus [45]. Ein Arbeitsschritt bei der Anfertigung der Werkzeuge umfasst die mechanische Bearbeitung des Gusses. Die Oberfläche der Werkzeuge wird im Anschluss an die Fräsbearbeitung manuell geschliffen und zum Teil poliert [40]. Üblicherweise weist die Werkzeugoberfläche in der Blechumformung eine Güte von $R_z = 0,90 \pm 0,10 \mu\text{m}$ auf [59]. Die gemittelte Rautiefe R_z [60] entspricht dabei der „Summe aus der Höhe der größten Profilspitze Z_p und der Tiefe des größten Profiltals Z_v innerhalb einer Einzelmessstrecke“ [61].

Mit dem Ziel, die Reibung zu reduzieren, besonders belastete Werkzeugbereiche vor übermäßigem Verschleiß zu schützen und die Werkzeugstandzeit zu verlängern, werden verschiedene Oberflächenbehandlungsverfahren eingesetzt [29]. Die Eigenschaften der Werkzeugoberfläche lassen sich beispielsweise mittels Wärmebehandlung oder durch Aufbringen einer Oberflächenbeschichtung anpassen. DLC-Schichten (engl.: diamond-like carbon) sind amorphe kohlenstoffreiche Schichten [62], welche zum Teil diamantähnliche Bindungsstrukturen aufweisen und sich aufgrund der hohen Härte durch eine geringe Adhäsionsneigung [63] und hohe Verschleißbeständigkeit auszeichnen [64].

Zusätzlich zum Schutz der Werkzeugoberfläche dienen die Oberflächenbeschichtungen zur Adaption der Reibungsbedingungen [65]. In Untersuchungen von Zhao und Tremmel [66] wurde gezeigt, dass die Reibung durch den Einsatz von DLC-Schichten unter schmierstofffreien Bedingungen reduziert werden kann. In diesem Zusammenhang haben sich insbesondere wolframmodifizierte, amorphe Kohlenstoffschichten als vorteilhaft erwiesen, wie Weikert und Tremmel [67] darlegen. Merklein et al. [68] stellen das Verschleißverhalten von mehreren Oberflächenbeschichtungen gegenüber und legen dar, dass eine höhere Oberflächenhärte die Adhäsionsneigung verringert. Löffler et al. [69] untersuchen zudem chrombasierte Hartstoffschichten und zeigen ebenfalls, dass die Reibung im Vergleich zu einer unbeschichteten geschliffenen Oberfläche reduziert werden kann. Zu den mechanischen Oberflächenbehandlungen zählt das Festklopfen, welches sich in den vergangenen Jahren etabliert hat. Wied [70] setzte dieses Verfahren erstmals an Werkzeugen großflächiger Bauteile ein, welches dazu dient, die Werkzeugoberfläche zu härten und gleichzeitig zu glätten. Steitz et al. [71] nutzten ebenfalls dieses Verfahren, um gezielt Schmierstofftaschen in einer Werkzeugoberfläche zu erzeugen, welche eine Reduzierung der Reibung ermöglichen. Merklein et al. [72] untersuchen ferner das Reibverhalten unterschiedlicher Werkzeugoberflächen und zeigen anhand von Streifenziehversuchen, dass die Orientierung der Oberflächenbeschaffenheit des Werkzeugs zur Ziehrichtung einen geringeren Einfluss als die Rauheit der Oberfläche hat. Zudem gibt es Hinweise darauf, dass eine zu glatte Werkzeugoberfläche zu einem Anstieg der Reibung führt. Untersuchungen von Merklein und Steiner [73] verdeutlichen, dass der bekannte Einfluss von Prozessparametern auf das Reibverhalten nicht von geschmierten auf trockene Systeme übertragen werden kann. So zeigt sich, dass eine Veränderung der Ziehgeschwindigkeit unter schmierstofffreien Bedingungen keinen wesentlichen Einfluss auf das Reibverhalten hat.

In der Automobilindustrie kommen hauptsächlich Stahl- und Aluminiumbleche unterschiedlicher Güte für die Karosserie zum Einsatz. Zu den beiden wesentlichen Einflussfaktoren, die das Reibverhalten halbzeugseitig beeinflussen, gehören die Oberflächenbeschichtung und die Oberflächentopografie der Halbzeuge. Der Herstellungsprozess von Blechbändern aus Stahl sieht nach dem Kaltwalzprozess eine Oberflächenbeschichtung vor, welche hauptsächlich zum Korrosionsschutz dient [74]. Während der Umformung steht somit die Oberflächenbeschichtung in direktem Kontakt mit dem Werkzeug. Bei Aluminium wird die Oberfläche in Form einer chemischen oder elektrochemischen Oxidation passiviert und somit eine gleichmäßig dünne Konversationsschicht [75] auf Titan/Zirkon-Basis [76] aufgebracht. Die Oberfläche von Stahlbändern erhält hingegen eine Verzinkung, die vornehmlich durch eine Schmelztauchveredelung erfolgt. Nach VDA 239 – 100 [77] werden fünf Verzinkungsarten unterschieden. In den vergangenen Jahren sind zu den etablierten Verzinkungen, wie der Elektrolytischen Verzinkung (ZE [78]), der Feuerverzinkung (Z [79]) und der Galvannealed-Verzinkung (ZF [79]), die Schmelztauchveredelungen mit Aluminium-Anteil (ZA [79]) hinzugekommen. Insbesondere die Schmelztauchveredelung mit Zink-Magnesium-Überzug (ZM [77]) hat aufgrund seiner guten Korrosionsschutzeigenschaften im Vergleich zu den konventionellen Zinkbeschichtungen an Bedeutung gewonnen [80]. Zink-Magnesium-Beschichtungen weisen eine höhere Härte als die einer Feuerverzinkungsschicht auf [81] und können sich somit auf das Reibverhalten auswirken. Rakotomahefa [82] weist nach, dass eine Zink-Magnesium-Beschichtung eine reibmindernde Wirkung hat im Vergleich zu einer Feuerverzinkungsschicht. Zudem haben Untersuchungen von Emmens [83] gezeigt, dass Beschichtungen mit einer niedrigen Härte zu einem Anstieg der Reibung führen. In der Automobilindustrie sind Zinkschichtmengen mit einem Mengengewicht von beidseitig 100 g/m² üblich. Dies entspricht in Abhängigkeit der Zinkdichte einer Zinkschichtdicke von etwa 7 µm bis 8 µm [79].

An die Oberflächenveredelung schließt das Nachwalzen, auch Dressieren genannt, an. Dies dient einer Anpassung der mechanischen Werkstoffeigenschaften und der Halbzeugoberfläche, welche ebenfalls die Reibung beeinflusst. Zwei wesentliche Anforderungen, die an die Beschaffenheit der Oberfläche gestellt werden, sind zum einen ein makelloses Erscheinungsbild nach dem Lackierprozess [84] und zum anderen eine ausreichende Anzahl und gleichmäßige Verteilung von Schmierstofftaschen [85]. Diese werden zum Aufbau einer hydrodynamischen Schmierung während des

Umformprozesses benötigt. Während des Dressierprozesses wird die Oberfläche gezielt mit einer Textur versehen und eine definierte Rauheit erzeugt. Dazu werden Walzen unterschiedlicher Texturierungen eingesetzt, dessen Negativ auf die Oberfläche übertragen wird. Staeves [86] stellt die für Stahl üblichen Texturierungsverfahren und Oberflächencharakteristik gegenüber. Im Wesentlichen werden fünf Verfahren und daraus resultierende Topografien unterschiedenen:

- Shot Blast Texturing (SBT),
- Electrical Discharge Texturing (EDT),
- Laser Texturing (LT),
- Electron Beam Texturing (EBT) und
- Precision Texturing (PRETEX®).

Mit dem EDT-, SBT-, und PRETEX®-Verfahren lassen sich stochastische Oberflächen erzeugen, die unregelmäßige Strukturen aufweisen. Im Vergleich dazu sind Oberflächen bei denen das LT- oder EBT-Verfahren angewendet wurde, durch stochastische oder pseudostochastische Strukturen gekennzeichnet [86]. Gorbunov [87] vergleicht die Verfahren hinsichtlich der möglichen zu erzeugenden Rauheit der Dressierwalzen. Demzufolge sind für PRETEX® mit R_a gleich $0,2\text{ }\mu\text{m}$ die geringsten arithmetischen Mittenrauwerte zu verzeichnen. Gleichzeitig sind für die mit diesem Verfahren erzeugten Oberflächen eine Spitzenzahl RP_c von bis zu 200 cm^{-1} möglich. EDT- und EBT-Oberflächen können Spitzenzahl RP_c von bis zu 150 cm^{-1} aufweisen. Das Rauheitsspektrum für den arithmetischen Mittenrauwerte R_a liegt zwischen $0,5\text{ }\mu\text{m}$ und $10,0$ bzw. $25,0\text{ }\mu\text{m}$. Zur Texturierung von Aluminium-Oberflächen findet neben der standardmäßigen Mill-Finish-Oberfläche (MF) [88] zur Aufrauung der Walzen insbesondere das EDT-Verfahren Anwendung, da die erzeugte Struktur einen adäquaten Schmierstoffspeicher impliziert [75]. Pfestorf [89] definiert dreidimensionale Oberflächenkenngrößen zur Charakterisierung der Blechoberfläche in Hinblick auf das tribologische Verhalten und zeigt, dass der maximale geschlossene Leerflächenanteil α_{clm} und das geschlossene Leervolumen V_{cl} mit der Reibzahl in Verbindung stehen. Dennoch erfolgt in der Praxis die Bestimmung der Rauheit für Blechhalbzeuge weiterhin anhand des arithmetischen Mittenrauwerths R_a und der Spitzenzahl RP_c [90].

Eine Vielzahl von Untersuchungen thematisiert den Einfluss der Rauheit auf das Reibverhalten, deren Ergebnisse jedoch zum Teil uneindeutig und inkonsistent sind [57]. Sgarabotto et al. [91] untersuchen den Einfluss unterschiedlicher Rauheitsniveaus auf das Reibverhalten. Ein genereller An-

stieg der Reibung in Abhängigkeit der Rauheit konnte nicht ermittelt werden. Die Ergebnisse zeigen, dass das höchste Rauheitsniveau nicht mit den höchsten Reibzahlen einhergeht.

Zwischenmedium

Die tribologischen Bedingungen in der Blechumformung werden maßgeblich durch das eingesetzte Zwischenmedium bestimmt. Unterschieden wird zwischen gasförmigen, flüssigen, konsistenten und festen Schmierstoffarten [92]. In der Blechumformung kommen jedoch vorwiegend flüssige und konsistente Schmierstoffe zum Einsatz, welche Anforderungen hinsichtlich des Umformprozesses wie auch der Folgeprozesse zur Herstellung einer Karosserie erfüllen müssen. Eine wachsende Nachfrage nach effizienter Ressourcennutzung regen hingegen die Forschung zur Realisierung von schmierstofffreien Umformprozessen an [93].

Schmierstoffe dienen dazu, die Oberfläche von Stahl- und Aluminiumcoils sowie von Platinen während des Transportes vom Walzwerk ins Presswerk und während der anschließenden Lagerung vor Korrosion zu schützen [92]. In der Regel wird der Schmierstoff, welcher im Walzwerk auf die Coiloberfläche appliziert wird, für den Umformprozess zur Herstellung der Karosseriebauteile genutzt. Der Schmierstofffilm auf den Bauteilen wirkt sich jedoch auch auf die nachfolgenden Fügeprozesse aus und beeinflusst beispielsweise die Schweiß- und Klebprozesse im Karosseriebau [39]. Zusätzlich ist die Abwaschbarkeit des Schmierstoffes unerlässlich, da die Bauteile vor dem Lackierprozess schmierstofffrei sein müssen. Gewünscht ist zudem die Verwendung möglichst geringer Schmierstoffmengen, da diese zu einer Verunreinigung der Reinigungsbäder in der Lackiererei führen [94]. Des Weiteren dient der verwendete Schmierstoff zur Unterstützung des Ziehvorgangs und muss demzufolge entsprechende Voraussetzungen für den Umformprozess erfüllen. Zu diesen zählen vor allem der Abtransport von Verschmutzungen, beispielsweise durch Zinkpartikel und die Reduzierung der Reibung [92], um Zinkabrieb und Werkzeugverschleiß vorzubeugen. Des Weiteren dienen Schmierstoffe dazu, den Materialfluss gezielt zu steuern, wie Müllerschön [95] in seinen Untersuchungen zeigt.

Im Allgemeinen kommen hauptsächlich zwei Schmierstoffarten im Walzwerk respektive Presswerk zum Einsatz. Für die Schmierstoffarten haben sich die englischsprachigen Definitionen durchgesetzt und werden somit in Prelubricants, kurz Prelubes, und Hotmelts unterteilt. Die Prüfverfahren und Begriffsdefinitionen sind im VDA-Lastenheft 230 - 123 [96] beschrieben. Prelubes sind Korrosionsschutzöle mit Schmierungseigenschaften,

welche hauptsächlich auf Stahlblechen aufgebracht werden. Dabei handelt es sich um Schmierstoffe mit einer hohen Viskosität. Im Gegensatz dazu besitzen Hotmelts, welche unter anderem als Trockenschmierstoffe oder nach dem englischsprachigen Begriff als Drylubes bezeichnet werden, bei Raumtemperatur eine pastöse, wachsartige Konsistenz, die höhere Anforderungen an die Schmierungseigenschaften im Vergleich zu Prelubes erfüllen. Hotmelts werden auf Stahlwerkstoffen sowie hauptsächlich auf Aluminiumblechen appliziert [96]. Die Schmierstoffmenge für Aluminium ist nach VDA 230 - 200 [76] mit $1,0 \pm 0,3 \text{ g/m}^2$ angegeben, wohingegen es für Prelubes keine Vorgaben gibt. Liewald und Wagner [28] geben für Prelubes eine Auflagemenge zwischen $0,5 \text{ g/m}^2$ und $1,5 \text{ g/m}^2$ an.

Ist die im Walzwerk aufgebrachte Schmierstoffmenge für die umformtechnische Herstellung der Bauteile nicht ausreichend, besteht die Möglichkeit einen zusätzlichen Schmierstoff zu verwenden. Dazu werden lokal Ziehöle eingesetzt, welche unter dem englischen Begriff „Spot lubricants“ zusammengefasst werden. Diese dienen als Zusatzbeölung und werden in der Presse, kurz vor der Umformung, auf die Platine appliziert. Bei Spot lubricants handelt es sich um Schmierstoffe, die erhöhte Anforderungen hinsichtlich der Schmiereigenschaften erfüllen [96] und somit durch einen gezielten Auftrag die Reibung lokal reduzieren können.

Die verschiedenen Schmierstoffarten und Schmierstoffmengen sind Faktoren, die das Reibverhalten beeinflussen und bereits in einer Vielzahl von Untersuchungen erforscht wurden. Filzek [97] untersucht das Reibverhalten verschiedener Schmierstoffarten auf feuerverzinkten Stahlblechen im Streifenziehversuch. Die Gegenüberstellung der Schmierstoffe für mehrere Flächenpressungen zwischen 1 und 17 N/mm^2 zeigt, dass mit Hotmelt insbesondere bei höheren Flächenpressungen geringere Reibzahlen erreicht werden als mit Prelube. Bis zu einer Flächenpressung von 5 N/mm^2 weisen beide Schmierstoffe ein ähnliches Reibverhalten auf. Die Reibzahl unter Verwendung des Spot lubricants bleibt hingegen auch bei unterschiedlichen Flächenpressungen nahezu konstant. Der Einfluss unterschiedlicher Schmierstoffmengen von Prelube auf das Reibverhalten eines feuerverzinkten Stahlbleches wird von Zöller [50] untersucht. Ein signifikanter Unterschied der Reibung zwischen Schmierstoffmengen von $0,5 \text{ g/m}^2$ und $1,0 \text{ g/m}^2$ ist nicht erkennbar, wohingegen bei einer Schmierstoffmenge von $2,0 \text{ g/m}^2$ eine deutlich niedrigere Reibzahlen verzeichnet werden. Ähnliche Untersuchungen führte Meiler [98] anhand von Aluminiumblechen mit Hotmelt durch und zeigt, dass die Reibung mit zunehmender Schmierstoff-

menge abnimmt. Zusätzlich untersuchten Meiler et al. [99] das Reibverhalten an Karosseriebauteilen und zeigen damit, dass Hotmelt im Vergleich zu einem Spot lurbicant eine reibreduzierende Wirkung hat.

Im Allgemeinen ist jedoch zu berücksichtigen, dass zwischen der Schmierstoffmenge und der Oberflächentopografie ein Abhängigkeitsverhältnis besteht. Als Voraussetzung für einen statischen und hydrodynamischen Druckaufbau in den Schmierstofftaschen, müssen die Rauheitstäler mit ausreichend Schmierstoff gefüllt sein. Demzufolge ist davon auszugehen, dass bei einer geringen Rauheit eine geringe Menge Schmierstoff ausreichend ist, wohingegen bei einer hohen Rauheit entsprechend mehr Schmierstoff erforderlich ist, um diese zu füllen.

Beanspruchungskollektiv

Neben den die Systemstruktur betreffenden Faktoren wird das Reibverhalten durch die aus dem Beanspruchungskollektiv hervorgehenden Parameter beeinflusst. Zu diesen zählen die wirkenden Kräfte, die Geschwindigkeit, die Temperatur sowie die Beanspruchungsdauer [52].

Bedingt durch die von außen wirkenden Kräfte und die Bauteilgeometrie treten im Bereich des Blechhalters unterschiedliche Flächenpressungen auf. Infolge einer Krafterhöhung nimmt die Flächenpressung zwischen Werkzeug und Werkstück zu, wodurch es, bedingt durch den Schmierstoff, in den Rauheitstälern zu einem Druckaufbau kommt. Dieser Effekt ist auf eine hydrostatische und hydrodynamische Schmierung zurückzuführen [100]. Folglich nimmt mit zunehmender Flächenpressung die Reibung, unter sonst gleichbleibenden Bedingungen, ab [101]. Merklein et al. [102] untersuchen die Auswirkung unterschiedlicher Flächenpressungen und Ziehgeschwindigkeiten auf das Reibverhalten auf feuerverzinktem Stahl mit einer Schmierstoffmenge von $1,0 \text{ g/m}^2$. Die Ergebnisse zeigen einen signifikanten Einfluss der Flächenpressung auf das Reibverhalten, wohingegen die Ziehgeschwindigkeit keinen eindeutigen Einfluss zeigt. Untersuchungen von Zöller [50] belegen, dass eine Erhöhung der Ziehgeschwindigkeit, bei konstanter Flächenpressung, eine Abnahme der Reibung zur Folge hat. In weiteren Untersuchungen von Merklein et al. [103] konnte dargelegt werden, dass neben der Relativgeschwindigkeit und der Flächenpressung die Festigkeit des Werkstücks einen Einfluss auf die Einglättung der Werkstückoberfläche hat.

Resultierend aus der Umform- und Reibungswärme kommt es zu einer Erwärmung des Werkzeugs. Während eines Produktionsauftrags steigt die

Werkzeugtemperatur an und erreicht dabei Werte von um die 45 °C im Bereich des Blechhalters [34]. Lokal sind zudem kurzzeitig Temperaturen von über 90 °C möglich [104]. Mit zunehmender Temperatur verringert sich die Viskosität des Schmierstoffes, wodurch Werkzeug und Platine weniger voneinander getrennt sind [105] und es zu einer höheren Reibwirkung kommt. Filzek et al. [106] bestätigen dies durch Untersuchungen hinsichtlich des Einflusses der Temperatur auf die Reibung und zeigt, dass mit einer Temperaturerhöhung die Reibung zunimmt. Die Beanspruchungsdauer gibt die Zeitspanne an, in der es durch wirkende tribologische Beanspruchungen zu einem Verschleiß des Werkzeugs kommt [51]. Bei der Herstellung von Karosseriebauteilen liegt die Beanspruchungsdauer je Bauteil bei wenigen Zehntelsekunden [86]. Die Gesamtbeanspruchungsdauer ist somit unter anderem von der Anzahl der produzierten Bauteile abhängig.

2.2.3 Modellversuche zur Ermittlung des Reibverhaltens

Die vorangegangenen Erläuterungen haben gezeigt, dass die Reibung von vielen Einflussfaktoren und komplexen Wechselwirkungen geprägt ist. Die Untersuchung einzelner Faktoren anhand von industriellen Umformprozessen ist jedoch nicht möglich. Zur Charakterisierung des Reibverhaltens wurden daher in der Vergangenheit verschiedene Modellversuche zur experimentellen Untersuchung einzelner Faktoren entwickelt. Diese dienen beispielsweise dazu, den Einfluss von verschiedenen Zinkschichten, Schmierstoffen und Werkzeugbeschichtungen zu untersuchen. Nachstehend werden die wichtigsten Modellversuche zur Quantifizierung der Reibung in der Blechumformung vorgestellt.

Die Differenzierung der Modellversuche zur Ermittlung des Reibverhaltens erfolgt anhand der Verfahrensart in verfahrensgebundene und verfahrensfreie Untersuchungsmethoden [107]. Zu den verfahrensgebundenen Methoden zählt z. B. die Näpfchen-Tiefziehprüfung nach Swift, welche an die industriellen Tiefziehprozesse angelehnt ist. Bei diesem Versuch werden Blechronden mit unterschiedlich großen Durchmessern bei unverändertem Stempeldurchmesser zu einem zylindrischen Napf gezogen. Der Tiefziehversuch nach Erichsen [108] wird in der Regel zur Bestimmung der Streckziehfähigkeit eines Werkstoffes herangezogen und des Weiteren zum Vergleich des tribologischen Verhaltens unterschiedlicher Schmierstoffe [107]. Durch das Eindrücken eines Stempels in eine fest eingespannte Blechrunde entsteht eine Beule, dessen Tiefe als Kennwert dient. Bei beiden Versuchsmodellen gilt das Auftreten eines Risses als Verfahrensgrenze.

Nachteilig ist jedoch, die Abhängigkeit der Ergebnisse von der Werkzeuggeometrie. Zudem ist eine Trennung der Reib- und Umformkräfte, sowie eine gezielte Änderung der Prozessparameter in der Regel nicht möglich [107].

Die verfahrensfreien Methoden hingegen sind unabhängig von der Geometrie des Werkzeugs und dienen der Untersuchung einzelner Einflussfaktoren. Zur Untersuchung des Reibverhaltens in der Blechumformung ist der Streifenziehversuch der am weitesten verbreitete Modellversuch [109]. Dieser ermöglicht eine realitätsnahe Abbildung der tribologischen Bedingungen sowie eine gezielte Variation der Prozessparameter [110]. Bay et al. [111] unterscheiden acht verschiedene Verfahrensvarianten des Streifenziehversuchs, darunter auch Verfahrenskombinationen, um verschiedene Gegebenheiten im Flanschbereich und im Radienbereich von Realwerkzeugen abzubilden.

Um die tribologischen Bedingungen im Flanschbereich zu untersuchen, werden der klassische Streifenziehversuch, der sogenannte Flachbahnversuch sowie der Ziehsickenversuch angewendet. Beim Flachbahnversuch wird ein Blechstreifen zwischen zwei ebenen Reibbacken eingespannt und unter Beaufschlagung einer definierten Kraft durch diese hindurchgezogen. Die Reibzahl wird folglich aus dem Verhältnis von ermittelter Reibungskraft F_R zu Normalkraft F_N nach dem Coulomb'schen Reibungsgesetz berechnet. Ein typischer Kraft-Weg-Verlauf zeigt zunächst einen starken Anstieg der Reibungskraft, die daraufhin abrupt abfällt, da zunächst die Haftreibung μ_H überwunden werden muss, bevor Gleitreibung μ_G eintritt. Anschließend stellt sich in der Regel ein stationäres Reibniveau ein [50]. Des Weiteren ist es möglich, das Reibverhalten im Blechhalterbereich durch Integration von Formelementen in Form von Sicken und Ziehwülsten in den Reibbacken nachzubilden. Beim Ziehsickenversuch erfährt das Blech eine mehrfache Wechselbiegung, wodurch sich die Ziehkraft anteilig aus Umform- und Reibanteilen zusammensetzt [86]. Des Weiteren kommt es zu einer Veränderung der Oberfläche, wie Schmid und Merklein [112] zeigen.

Um die Reibungsbedingungen im Bereich der Ziehkantenrundung eines Werkzeugs abzubilden, wird der Umlenkversuch eingesetzt [113]. Dabei wird ein Blechstreifen mit einer 90° Umlenkung fest eingespannt und mit einer definierten Kraft über einen zylindrischen Formkopf gezogen. Um die dabei resultierenden Reib- und Umformkräfte voneinander trennen zu können, wird der Versuch mit drehbarem und festem Formkopf durchgeführt. Unter Verwendung der Euler-Eytelwein-Gleichung ist es möglich,

die Reibzahl zu berechnen, wobei die Streifenziehkraft durch den Biegeanteil reduziert werden muss [38].

Der Keilzugversuch nach Reihle [114] ist ein Versuch zur Abbildung der Reibung in Werkzeugbereichen, in denen eine tangentiale Stauchung des Bauteils auftritt. Bei dem Versuch wird ein Blechstreifen unter Beaufschlagung einer Normalkraft durch eine keilförmige Fläche gezogen, bei der der Ausgangsquerschnitt größer als der Endquerschnitt ist. Die Berechnung der Reibzahl erfolgt aus dem Verhältnis von Ziehkraft zu doppelter Normalkraft [29]. Weitere Versuchsmodelle zur Bestimmung der Reibung wie z. B. der Stift-Scheibe-Versuch sind nicht speziell für die Reibungscharakterisierung in der Blechumformung vorgesehen und werden daher an diese Stelle nicht erläutert. Die hier vorgestellten Modellversuche zeichnen sich durch eine gute Reproduzierbarkeit [115] und individuelle Modifikation der Prozessparameter zur Untersuchung der tribologischen Bedingungen aus. Nachteilig ist jedoch, dass die in den einzelnen Modellversuchen erarbeiteten Ergebnisse nicht vergleichbar sind, da diese in keiner Norm standardisiert sind.

2.3 Reibung in der Umformsimulation

Immer kürzere Entwicklungszeiten von Fahrzeugprojekten und der hohe Kostendruck in der Automobilindustrie haben dazu geführt, dass die Finite-Elemente-Methode (FEM) als numerisches Verfahren in den vergangenen Jahren zunehmend an Bedeutung gewonnen hat. Die numerische Simulation ermöglicht es, die mit hohem Aufwand und Kosten verbundenen experimentellen Untersuchungen, zur Absicherung der umformtechnischen Herstellbarkeit, zu ersetzen [116]. Demzufolge dient sie dazu, Aussagen hinsichtlich des Auftretens von Rissen und Falten am Bauteil sowie eine Vorhersage über das Rückfederungsverhalten treffen zu können [29]. Dabei wird der reale Umformprozess anhand physikalischer Beschreibungen nachgebildet. Diese beinhalten jedoch zum Teil Annahmen und Vereinfachungen [117], um unter anderem die Rechenzeit gering zu halten. Demnach wird beispielsweise in der konventionellen Umformsimulationen das elastische Deformationsverhalten des Werkzeugs vernachlässigt und als Starrkörperelement angenommen [118]. Des Weiteren ist es üblich, homogen verteilte Anfangsdrücke [27] und eine konstante Blechdicke anzunehmen [119]. In der industriellen Umformsimulation ist es ebenfalls ein weit verbreiteter Ansatz, die Reibungsbedingungen in Anlehnung an das Coulomb'sche Reibungsgesetz als Konstante zu definieren. Die Erläuterungen in Abschnitt 2.2.2 haben jedoch gezeigt, dass die Reibung von einer

Vielzahl an Faktoren beeinflusst wird. Daher wurden in der Vergangenheit verschiedene Modellversuche durchgeführt. Die Erkenntnisse hinsichtlich der physikalischen Zusammenhänge wurden anschließend zur Definition von Reibmodellen anhand mathematischer Beschreibungen herangezogen. Filzek et al. [106] nutzen den klassischen Streifenzugversuch zur Untersuchung des Reibverhaltens bei verschiedenen Kontaktnormalspannungen und leiten ein druckabhängiges Reibmodell ab. Dieses kann für jedes tribologisches System anhand experimenteller Untersuchungen aus dem Streifenziehversuch spezifiziert werden. Die zu ermittelnden Koeffizienten sind die Referenzreibzahl μ_0 , der Referenzdruck p_0 und der Druckexponent n , welcher zwischen $0 < n \leq 1$ liegt.

$$\mu(p) = \mu_0 \cdot \left(\frac{p}{p_0}\right)^{n-1} \quad (2)$$

Zöller [50] entwickelte ebenfalls ein druckabhängiges Reibmodell auf der Basis von Streifenziehversuchen. Um jedoch zu verhindern, dass die obere Grenze der Funktion über die Haftreibzahl hinaus überschritten wird, erfolgt eine Subtraktion des logarithmischen Teils der Funktion von der Haftreibzahl μ_H . Des Weiteren dienen die Koeffizienten b und c als Gewichtungsfaktoren, um die Druckabhängigkeit der Reibzahl zu beeinflussen.

$$\mu(p) = \mu_H - b \cdot \ln\left(\frac{\max(p, p_0)}{p_0}\right)^c \quad (3)$$

Netsch [107] entwickelte zudem ein geschwindigkeits- und druckabhängiges Reibmodell, dessen Grundlage ebenfalls Streifenziehversuche bilden. Die Funktion wird durch Nullsetzen der Koeffizienten x_2 und x_3 druckunabhängig. Durch zusätzliches Nullsetzen der Koeffizienten x_4 und x_6 resultiert das Coulomb'sche Reibgesetz.

$$\mu(p, v) = \frac{x_1}{(v + v_0)^{x_4}} \cdot (p + p_0)^{x_2 \cdot v^{x_5}} \cdot e^{x_3 \cdot p} + \left[\mu_0 - \frac{x_1}{v_0^{x_4}} \cdot e^{x_3 \cdot p} \right] \cdot e^{x_6 \cdot v} \quad (4)$$

Ein weiterer die Reibung beeinflussender Faktor ist die Temperatur, weshalb Grueebler und Hora [120] ein temperaturabhängiges Reibmodell erarbeiteten. Dieses setzt sich aus zwei Gleichungen durch Multiplikation zusammen. Die Geschwindigkeitsabhängigkeit der Reibung wird als linear angenommen. Da die Viskosität des Schmierstoffes temperaturabhängig ist

und im Zusammenhang mit der Kontaktbildung zwischen den Reibpartnern steht, wird diese ebenfalls berücksichtigt. Die Koeffizienten a , b und c sind Konstanten, wohingegen T die Temperatur in Kelvin beschreibt.

$$\mu(T) = (k_1 \cdot v_{rel} + k_2) \cdot \left(1 - a \cdot v_{rel} \cdot e^{\frac{b}{T+c}}\right) \quad (5)$$

Hol [121] erarbeitete zudem ein Reibmodell, bei dem neben der Druckabhängigkeit auch die Oberflächentopografie des Werkstücks und die Schmierstoffmenge berücksichtigt wird. Folglich ermöglicht dieses Modell eine Differenzierung zwischen Grenzreibung und Mischreibung. Die Beschreibung der Reibung erfolgt unter Verwendung mathematischer Funktionen wie beispielsweise der Reynolds-Gleichung zur Darstellung der hydrodynamischen Druckverteilung des Schmierstoffes. Zusätzlich wird die Oberflächentopografie und dessen Verhalten hinsichtlich einer auftretenden Einglättung mathematisch beschrieben. Folglich lässt sich dieses Reibmodell nicht auf eine Gleichung reduzieren.

Um die Qualität der Vorhersagegenauigkeit umformtechnischer Prozesse zu steigern, ist jedoch eine möglichst realitätsnahe Abbildung der realen Gegebenheiten erforderlich. Diese beinhalten die Schwankungen der Halbzeugeigenschaften, welche sich ebenfalls auf das Reibverhalten auswirken. Daher wird im nachfolgenden Kapitel auf die bisher bekannten Chargenschwankungen von Halbzeugeigenschaften eingegangen.

2.4 Halbzeugeigenschaften und Chargenschwankungen in der Blechumformung

Für die Herstellung von Karosseriebauteilen kommen Halbzeuge vornehmlich aus Stahl und Aluminium zum Einsatz, welche in einem Walzprozess erzeugt werden. Der Herstellungsprozess von Halbzeugen wird von verschiedenen Faktoren beeinflusst, welche sich auf deren Eigenschaften auswirken. Die Zusammensetzung der Legierungsbestandteile, die Wärmebehandlung des Walzguts sowie die Prozessparameter beim Dressieren beeinflussen die mechanischen Eigenschaften sowie die Rauheit und führen zu schwankenden Halbzeugeigenschaften. Folglich können Schwankungen der Halbzeugeigenschaften innerhalb eines Coils aber auch von Coil zu Coil auftreten. Dass sich die Verwendung unterschiedlicher Halbzeugchargen auf das Umformverhalten auswirkt, zeigt Faass [32] anhand von Untersuchungen schwankender mechanischer Eigenschaften, die zu einem Auftreten von Rissen im Serienprozess führen. Untersuchungen von Maier [122]

zur optischen Einlaufwegmessung bei einem Türinnenblech zeigen, dass sich unterschiedliche Halbzeugchargen auf das Umformverhalten auswirken, welche sich in der Position der Anhaukante widerspiegeln. Um ein gleichbleibendes Umformergebnis zu erzielen, sind möglichst geringe Streuungen der tribologischen Zusammenhänge bedeutend [115].

Die Halbzeugeigenschaften werden in der Regel mittels konventioneller Messmethoden im Labor ermittelt. Zur Bestimmung der Rauheit bzw. Oberflächentopografie wird das Tastschnittverfahren [60] oder die Konfokalmikroskopie genutzt [123]. Der Zugversuch dient der Ermittlung der mechanischen Eigenschaften metallischer Werkstoffe [44]. Des Weiteren wird die Schmierstoffauflagemenge gravimetrisch bestimmt sowie die Blechdicke mithilfe einer Bügelmessschraube. In den vergangenen Jahren wurden jedoch vermehrt Inline-Messsysteme zur Prozessüberwachung entwickelt, welche auch im Presswerk Anwendung finden [124]. Diese ermöglichen es, die Halbzeugeigenschaften direkt am laufenden Band zu erfassen und Analysen auf Basis einer großen Datenmenge durchzuführen.

Die bisherigen Erkenntnisse in Hinblick auf das Auftreten von mechanischen und die das tribologische Verhalten betreffenden Halbzeugschwankungen und deren Auswirkung auf das Reibverhalten bzw. Umformverhalten wird in diesem Kapitel erläutert. In den ersten beiden Abschnitten wird der Wissensstand bezüglich Halbzeugschwankungen, welche das tribologische Verhalten beeinflussen, wie der Schmierstoffmenge- und -verteilung, sowie der Rauheit dargelegt. Die Erkenntnisse über das Auftreten von Schwankungen weiterer Halbzeugeigenschaften, wie der Blechdicke und den mechanischen Eigenschaften, erfolgt im dritten Abschnitt.

2.4.1 Schwankungen der Schmierstoffmenge und Schmierstoffverteilung

Aus umwelttechnischen Gründen finden sogenannte Waschprozesse [98], bei denen die Coils bzw. Platinen im Presswerk vor dem Umformvorgang mit Waschölen gewaschen und erneut mit Schmierstoff beaufschlagt werden, immer weniger Anwendung. Daher ist die Anlieferung möglichst homogen beölter Coils gefordert. Wie bereits in Abschnitt 2.2.2 erläutert, werden im Presswerk im Wesentlichen die durch den VDA [96] freigegebenen Schmierstoffe Hotmelt und Prelube eingesetzt. Ein Nachteil von Prelube-Schmierstoffen ist, dass sie aufgrund ihrer niedrigen Viskosität dazu neigen, aus dem aufgehaspelten Coil abzufließen [125]. Prozessbedingt überträgt sich beim Walzen die Durchbiegung der Arbeitswalzen auf das Walz-

gut, wodurch eine konvexe Form des Blechbands über die Bandbreite entsteht [126]. Die Blechbanddicke ist folglich in der Mitte, in Bandlängenrichtung, wenige Mikrometer höher. Im aufgehaspelten Zustand des Blechbands kommt es zu einem Druckaufbau in der Bandmitte, wodurch der zuvor homogen aufgetragene Schmierstoff aus der Mitte des Bands in die Seitenbereiche fließt [125]. Demzufolge liegt in der Coilmitte häufig eine geringere Schmierstoffmenge als in den Seitenbereichen vor. Dieser Effekt wird auch als Schmierstoffumverteilung bezeichnet.

Mohr et al. [127] untersuchen die Auswirkung der Lagerzeit von Coils auf die Schmierstoffumverteilung und weisen nach, dass mit zunehmender Lagerdauer die Umverteilung zunimmt. Nach zweiwöchiger Lagerdauer hat sich die Schmierstoffauflagemenge in der Bandmitte um ca. 20 % reduziert. Die Reduktion der Schmierstoffmenge nimmt im weiteren Verlauf zu und beträgt nach sechs Wochen 60 %. Des Weiteren ist eine Zunahme der Schmierstoffumverteilung in den Sommermonaten zu erwarten, da dieser Effekt mit steigender Temperatur begünstigt wird [128]. Zusätzlich wird angemerkt, dass die Umverteilung mit steigender Schmierstoffmenge zunimmt [127]. Angaben über mögliche Schwankungen der Schmierstoffmenge in Coillängenrichtung werden nicht erläutert. Bei den von Mohr et al. [127] durchgeführten Untersuchungen im Jahr 2000 werden Schmierstoffmengen zwischen $1,8 \text{ g/m}^2$ und $2,5 \text{ g/m}^2$ verwendet. Zudem geben sie an, dass aus Gründen einer besseren Umformbarkeit bei Feinblechen Forderungen nach bis zu $2,2 \text{ g/m}^2$ Schmierstoffschichtdicken bestünden. Zum Teil sind Schmierstoffangaben von bis zu $4,0 \text{ g/m}^2$ in der Literatur zu finden [92]. Heutzutage kommen in der Regel Schmierstoffmengen unter $1,5 \text{ g/m}^2$ zum Einsatz. Die Alterung eines Coils [9] und eine zu hohe Schmierstoffmenge können zur Bildung von Ölnestern führen, wohingegen ein zu geringer Auftrag den Korrosionsschutz beeinträchtigt.

Um die Schmierstoffmenge weiter reduzieren zu können, wird an Prelube-Schmierstoffen der 2. Generation geforscht, welche bei geringerer Schmierstoffauflagemenge die Reibeigenschaften der bisherigen Prelubes erfüllen sollen. Filzek et al. [128] zeigen anhand von Reibuntersuchungen im Streifenziehversuch, dass bei gleicher Schmierstoffmenge von $1,3 \text{ g/m}^2$ die Reibung unter Verwendung eines Prelubes der 2. Generation um ca. 10 bis 15 % geringer ist im Vergleich zu einem Prelube der 1. Generation. Eine Reduzierung der Schmierstoffmenge wirkt sich vorteilhaft auf die Schmierstoffumverteilung im Coil aus und führt zu homogenen Reibungsbedingungen im Umformprozess.

Untersuchungen von Purr [49] verdeutlichen die Schmierstoffverteilung über die Coillänge, gemittelt über die Coilbreite und zeigen, dass die Schmierstoffmenge zum Teil zum Ende hin eines Coils abnehmen. Im Gegensatz zu Prelube-Schmierstoffen zeichnen sich Hotmelts durch gute Reibeigenschaften aus, bei denen der Effekt der Schmierstoffumverteilung aufgrund der wachsartigen Konsistenz nicht auftritt [98]. Hotmelt-Schmierstoffe konnten sich jedoch auf Stahloberflächen bedingt durch einen höheren Applikationsaufwand im Walzwerk nicht durchsetzen und finden nur in Ausnahmefällen bei umformtechnisch sehr anspruchsvollen Bauteilen Anwendung.

2.4.2 Schwankungen der Rauheit

Die Rauheit von Stahl- und Aluminiumblechen wird während des Dressierens im Walzwerk definiert, wobei hohe Anforderungen für die in der Automobilindustrie eingesetzten Bleche bestehen. Die Spezifizierung für Stahlcoils erfolgt unabhängig von der Oberflächentexturierung anhand der Rauheitskenngrößen Mittenrauwert R_a und der Spitzenzahl RP_c [90]. Nach DIN 239-100 [77] sind die Anforderungen bzgl. der Rauheit zwischen Kunde und Lieferant zu vereinbaren. Für Aluminiumbleche sind demgegenüber Rauheitsspezifikationen in Abhängigkeit der Oberflächentextur detailliert beschrieben. Demnach gilt die EDT-Struktur bei diesem Werkstoff als Standard. Des Weiteren ist ein Mittenrauwert zwischen $R_a = 0,7 \mu\text{m}$ und $R_a = 1,3 \mu\text{m}$ zu erfüllen. Die Spitzenzahl ist hingegen von der Oberflächengüte abhängig und mit $RP_c \geq 50 \text{ cm}^{-1}$ für Außenhautbauteile und $RP_c \geq 40 \text{ cm}^{-1}$ für Strukturbauteile spezifiziert. Der Mittenrauwert für Oberflächen mit einer Mill-Finish-Struktur ist zwischen $R_a = 0,2 \mu\text{m}$ und $R_a = 0,6 \mu\text{m}$ festgelegt [76]. Dennoch unterliegt die Rauheit Schwankungen, wie die folgenden Untersuchungen zeigen. Faaß [32] ermittelt beidseitig den Mittenrauwert mehrerer Platinen aus verschiedenen Coils an drei Positionen über die Coilbreite bzw. Platinenbreite. Die Ergebnisse zeigen, dass die Rauheit an den beiden außenliegenden Messpositionen höher ist als in der Mitte des Coils bzw. der Platine. Zudem unterliegen die Messwerte hohen Streuungen, welche zum Teil die Rauheitsspezifikation überschreiten.

Neumann [34] untersucht die Rauheit über die Coillänge und -breite anhand des Mittenrauwertes und legt dar, dass keine signifikanten Schwankungen auftreten. In Untersuchungen von Pfestorf [89] wird auch der Mittenrauwert zur Charakterisierung der Rauheit über die Coilbreite

herangezogen, für welchen ebenfalls keine signifikanten Schwankungen ermittelt wurden. Ergebnisse für das geschlossene Leervolumen V_{cl} und den maximal geschlossenen Leerflächenanteil α_{clm} zeigen hingegen, dass in der Coilmitte die höchsten Messwerte für diese beiden Kenngrößen erfasst werden und es deutliche Unterschiede zwischen den in den Außenbereichen erfassten Messwerte gibt. Vermutet wird, dass nicht immer eine gleichmäßige Durchbiegung der Dressierwalzen gegeben ist. Des Weiteren charakterisiert Thamm [104] die Beschaffenheit eines Coils anhand des maximal geschlossenen Leerflächenanteils α_{clm} und zeigt, dass dieser von Coilende zu Coilanfang um ca. 6 % abnimmt. Purr [49] nutzt ein Inline-Messsystem zur Ermittlung der Rauheit über die Coillänge und -breite von zehn Coils. Die Untersuchungen legen dar, dass bei den verwendeten Coils keine signifikanten Schwankungen der Rauheit über die Coilbreite erkennbar sind. Des Weiteren werden die über die Coillänge erfassten Messwerte der Coils gegenübergestellt, welche lediglich als Indikator gelten, da das verwendete System nur bedingt für die Messung der Rauheit auf mit Schmierstoff versehenen Oberflächen geeignet ist. Die Ergebnisse zeigen dennoch, dass die Rauheit zum Ende des Coils tendenziell abnimmt. Außerdem sind vereinzelt unterschiedliche Rauheitsniveaus zwischen den Coils zu verzeichnen.

2.4.3 Weitere Schwankungen von Halbzeugeigenschaften

Neben der Schmierstoffmenge, Schmierstoffverteilung und der Rauheit sind die Blechdicke und die mechanischen Werkstoffeigenschaften zwei weitere Halbzeugeigenschaften, die ebenfalls Schwankungen unterliegen können. Diese Eigenschaften haben zum Teil keine direkte Auswirkung auf das Reibverhalten, sind jedoch für den Umformprozess nicht zu vernachlässigen.

Chargenschwankungen hinsichtlich der Blechdicke

Ein Qualitätsmerkmal beim Walzen ist die Planheit der Blechbänder. Der Herstellungsprozess von Coils wird jedoch von verschiedenen Faktoren beeinflusst, welche sich beim Warm- und Kaltwalzen auf die Bandgeometrie auswirken [129]. Die Balligkeit der Walzen dient der Kompensation einer Walzendurchbiegung, welche dennoch nicht gänzlich vermieden werden kann. Dadurch wird eine höhere Blechdickenreduktion in den Randbereichen im Vergleich zur Bandmitte erzielt [130]. Die technischen Lieferbedingungen für Stahl- [131] und Aluminiumbänder [132] unterliegen den in den jeweiligen Normen beschriebenen Toleranzen und sind für Stahl von der Nenndicke und Steckgrenze bzw. der Nennbreite abhängig.

Schwankungen der Blechdicke über die Coillbreite untersucht Neumann [34] anhand von 20 Messpositionen für 27 Platinen. Die Ergebnisse bestätigen, dass die höchste Blechdicke in der Platinenmitte bzw. Coillmitte zu verzeichnen ist. Die maximale Blechdickendifferenz einer Platine wird mit 0,015 mm bei einer Nennblechdicke von 0,80 mm angegeben. Purr [49] nutzt ein Inline-Messsystem zur Ermittlung der Blechdicke am laufenden Band für zehn Coils. Dabei erfolgt die Messung an drei Positionen, über die Bandbreite verteilt, unter anderem in der Bandmitte. Die Untersuchung zeigt, dass die Banddicke von der Mitte des Coils aus in Richtung der Randbereiche abnimmt. Zudem sind zum Teil signifikante Unterschiede der Streubreite an den jeweiligen Messpositionen zu verzeichnen. In weiteren Untersuchungen wird die Schwankung der Blechdicke über die Coilllänge dargelegt. Bei einzelnen Coils wird ein Abfall der Banddicke zum Ende eines Coils hin festgestellt. Thamm [104] untersucht ebenfalls die Schwankung der Blechdicke über die Länge eines Coils und zeigt, dass die Blechdicke vom Coillanfang bis hin zur Coillmitte zunächst abnimmt und anschließend leicht ansteigt. Schwankungen, welche die Toleranzgrenzen überschreiten, sind nicht zu verzeichnen.

Schwankungen hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften

Der Fokus von Untersuchungen hinsichtlich auftretender Chargenschwankungen metallischer Werkstoffe liegt bisher auf den mechanischen Werkstoffeigenschaften. Die Eigenschaften von Halbzeugen aus Stahl und Aluminium resultieren aus den Legierungsanteilen des Werkstoffes und dem Herstellungsprozess im Walzwerk, wodurch Schwankungen unvermeidbar sind. Diese beeinflussen jedoch das Umformergebnis bei der Herstellung von Karosseriebauteilen und können zu Qualitätsproblemen führen.

Schwankungen der mechanischen Eigenschaften treten von Coil zu Coil und innerhalb eines Coils auf. So untersuchen Held et al. [133] die Auswirkung schwankender Werkstoffeigenschaften innerhalb eines Coils auf die Umformbarkeit. Die Ergebnisse der Zugversuche unter 0° zur Walzrichtung verzeichnen einen Anstieg der Werte für die Streckgrenze und die Zugfestigkeit über die Coilllänge. Die Anisotropie-Werte und die Werte für den Verfestigungsexponenten nehmen hingegen ab. Über die Coillbreite sind keine signifikanten Änderungen festzustellen. Die Zugversuche unter 45° und 90° zur Walzrichtung zeigen eine ähnliche Tendenz für die Streckgrenze und die Zugfestigkeit. Die Ergebnisse der numerischen Umformsimulationen, unter Verwendung coilllängenspezifischer Materialkarten, verdeutlichen, dass in Abhängigkeit der Coilllänge die Überschreitung des

Grenzformänderungsvermögens insbesondere in kritischen Bauteilbereichen zunimmt. Hoffmann et al. [134] stellen die mechanischen Eigenschaften von Bauteilen, bei denen Risse während der Produktion aufgetreten sind, Bauteilen guter Qualität gegenüber und stellen eine Korrelation zwischen der Zugfestigkeit und dem Auftreten von Rissen fest.

Die mechanischen Eigenschaften einer großen Anzahl von Coils wurde erstmals von Wiebenga et al. [135] untersucht. Auf Basis von 41 Coils wurden experimentelle und numerische Untersuchungen durchgeführt, um die Streubreite der mechanischen Eigenschaften anhand von 17 Werkstoffkenngrößen zu analysieren. Die Ergebnisse zeigen den Einfluss der Materialstreuung anhand der experimentell durchgeführten Napfversuche, deren Umformerergebnisse mit Hilfe der numerischen Napfversuche reproduziert werden konnten. Sturm [136] ermittelt ebenfalls die Streubreite verschiedener Werkstoffkenngrößen anhand mehrerer Chargen einer Stahlgüte und zeigt auf, dass die mechanischen Eigenschaften innerhalb der vorgegebenen Toleranz liegen und der vorgegebene Toleranzbereich nicht ausgeschöpft wird. Die Streubreite der jeweiligen Werkstoffkenngrößen ist zudem für Chargen eines Herstellers geringer im Vergleich mehrerer Hersteller. Eine Abhängigkeit der Werkstoffeigenschaften von der Coillänge konnte in diesem Fall nicht nachgewiesen werden.

Neumann [34] nutzt das Wirbelstromverfahren zur Bestimmung der mechanischen Eigenschaften von 51 Coils am laufenden Band in der Coilanlage und zeigt, dass die Häufigkeitsverteilungen der verschiedenen Werkstoffkenngrößen keine Normalverteilung aufweisen. Des Weiteren werden Änderungen der mechanischen Eigenschaften verdeutlicht, die in Bereichen von Schweißnähten auftreten. Ein typischer Abstieg oder Abfall der mechanischen Eigenschaften konnte nicht nachgewiesen werden. Purr [49] untersucht ebenfalls die mechanischen Eigenschaften mittels eines Inline-Messsystems und verzeichnet einen charakteristischen Verlauf der Messwerte für die Coillänge. In der Regel nimmt die Festigkeit zum Ende eines Coils ab. Des Weiteren weisen der Coilanfang und das Coilende größere Streuungen auf. Neben dem Walzprozess können auch Alterungsprozesse eine Veränderung der mechanischen Eigenschaften hervorrufen, weshalb für Aluminium [76] und verschiedene Stahlgüten [137] eine Gültigkeitsdauer der Kennwerte definiert ist. Um beispielsweise das Auftreten von Fließfiguren bei kalt nachgewalzten Stahlgüten zu vermeiden, wird eine zeitnahe Verarbeitung empfohlen.

2.5 Zusammenfassende Bewertung

Der umformtechnische Herstellungsprozess von Karosseriebauteilen wird durch eine Vielzahl von Faktoren beeinflusst, welche sich in dem Auftreten von Rissen und Falten äußert und folglich die Bauteilqualität beeinträchtigt. Einen wesentlichen Beitrag haben in diesem Zusammenhang die Halbzeugeigenschaften und demzufolge auch die vorherrschenden tribologischen Bedingungen. Die verschiedenen das Reibverhalten in der Blechumformung beeinflussenden Faktoren wurden bereits in zahlreichen wissenschaftlichen Untersuchungen analysiert. Diese beschränken sich jedoch in der Regel auf experimentelle Untersuchungen nach statistischem Versuchsplan anhand kleiner Blechformteile im Labormaßstab und sind mit den fluktuierenden Prozessbedingungen bei der Herstellung von großflächigen Karosseriebauteilen im Serienprozess nicht vergleichbar.

Obwohl die in den Untersuchungen erlangten Erkenntnisse zur Modellierung der Reibung für die FE-Simulation in mathematische Beschreibungen transferiert wurden, erfolgt die standardmäßige Absicherung der Herstellbarkeit eines Bauteils in der Industrie in der Regel unter Verwendung des Coulomb'schen Reibgesetzes. Des Weiteren wird dabei von homogenen Reibungsbedingungen ausgegangen, ungeachtet den natürlich auftretenden Schwankungen der Halbzeugeigenschaften. Folglich fehlen bisher Erkenntnisse über das Umformverhalten unter schwankenden tribologischen Bedingungen, wie sie im Serienprozess vorherrschen. Lediglich an einer geringen Menge an Chargen konnten diese Schwankungen untersucht werden, weshalb die Erkenntnisse hinsichtlich des Umfangs begrenzt sind. Folglich werden diese bei der Auslegung der Werkzeuge nicht miteinbezogen. Tatipala et al. [138] berücksichtigen exemplarisch inhomogene Schmierstoffbedingungen in der Simulation bei einem Türinnenblech. Eine systematische Analyse der schwankenden tribologischen Bedingungen sowie eine Gegenüberstellung der Simulationsergebnisse und der im Serienprozess produzierten Karosseriebauteile fehlen jedoch.

Die in den vergangenen Jahren entwickelten Methoden zur Inline-Messung von Halbzeugeigenschaften ermöglichen es, teilweise Chargenschwankungen anhand einer großen Datenmenge zu erfassen und zu analysieren. Demzufolge ist es ebenfalls möglich, die Ursache für das Auftreten von Qualitätsmängeln wie Rissen oder Falten im Serienprozess zu untersuchen. Dennoch liegen bisher keine umfassenden Erkenntnisse über das Auftreten von Schwankungen der Schmierstoffmenge und Schmierstoffverteilung sowie insbesondere der Rauheit anhand einer großen Datenmenge vor. Ein Grund dafür ist, dass bisher keine geeignete Methode vorhanden ist, um

die Rauheit im Serienprozess zu erfassen. Des Weiteren ist nicht durchgehend bekannt, durch welche Faktoren die Schwankungen der Halbzeugeigenschaften beeinflusst werden und welche Charakteristik diese aufzeigen können. Darüber hinaus fehlen Erkenntnisse, wie sich diese Schwankungen auf das Reibverhalten und folglich auf den Umformprozess und die Qualität von Karosseriebauteilen auswirken sowie eine Methode zur Abbildung der Schwankungen in der Simulation. Damit zukünftig die Werkzeuge für die Herstellung von Karosseriebauteilen entsprechend der im Serienprozess auftretenden Schwankungen der Halbzeugeigenschaften ausgelegt werden können, ist folglich die Erarbeitung von Methoden zur tiefgreifenden Analyse des Prozesses unumgänglich. Des Weiteren ist der Aufbau eines eingehenden Prozessverständnisses erforderlich, um diese Wissenslücken zu schließen.

3 Zielsetzung der Arbeit und methodische Vorgehensweise

Der Herstellungsprozess von Karosseriebauteilen unterliegt Schwankungen, welche unter anderem auf fluktuierende Halbzeugeigenschaften zurückzuführen sind und damit Auswirkung auf die Bauteilqualität haben. Durch die Vermeidung von Verschwendung sowie die Reduzierung von Nacharbeit und Ausschuss, aufgrund mangelnder Qualität bei der Herstellung von Karosseriebauteilen, kann zu einer Ressourcenschonung und demzufolge zu einer nachhaltigen Produktion in der Automobilindustrie beigetragen werden.

Zur Realisierung dieses Bestrebens ist es das übergeordnete Ziel der vorliegenden Arbeit, ein Verständnis über das Auftreten von Schwankungen der die Tribologie beeinflussenden Halbzeugeigenschaften und deren Einfluss auf das Reibverhalten respektive Umformverhalten bei der Herstellung von Karosseriebauteilen im Serienprozess zu erarbeiten. Die in dieser Arbeit zugrunde gelegte methodische Vorgehensweise, dargestellt in Bild 2, ist in vier Schwerpunktthemen unterteilt, welche die *Qualifizierung von Inline-Messsystemen* zur Erfassung von Halbzeugeigenschaften, die *Ursachenanalyse* für das Auftreten von Schwankungen und die *Charakterisierung von Halbzeugeigenschaften*, die zur *Untersuchung des Reibverhaltens* im Streifenziehversuch, sowie die *numerische Analyse* des Umformverhaltens umfassen.

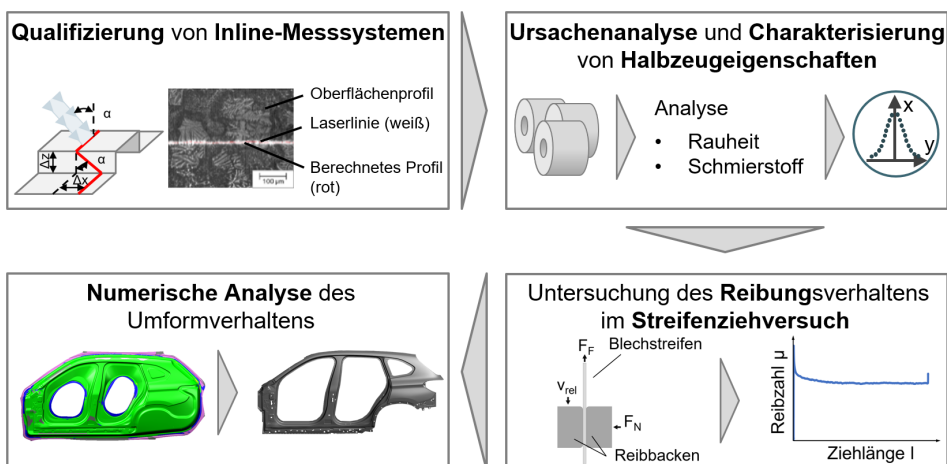


Bild 2: Zielsetzung und methodische Vorgehensweise in der vorliegenden Arbeit

Für die Erfassung der Halbzeugeigenschaften, welche die Tribologie beeinflussen, ist zunächst die Qualifizierung geeigneter Inline-Messsysteme erforderlich. Diese sollen es ermöglichen, zerstörungsfrei am laufenden Band in der Coilanlage die Eigenschaften der Halbzeuge aus dem Serienprozess zu detektieren und eine große Datenmenge für die anschließenden Untersuchungen zu generieren. Voraussetzung für die Nutzung der Daten zur Charakterisierung der Halbzeuge ist ein vorangehender Eignungsnachweis der Systeme und die Eignung des Datenumfangs. Die Merkmale der Halbzeuge, zu denen Rauheit und Schmierstoff zählen, besitzen statistische Eigenschaften unterschiedlicher Ausprägung, kurz Schwankungen, welche wichtige Einflussfaktoren auf das Reibverhalten bilden. Um die Charakteristik der statistischen Eigenschaften sowie deren Verhalten zu ermitteln, werden die inline erfassten Daten dazu genutzt, typische Änderungen der Schmierstoffmenge und Schmierstoffverteilung innerhalb eines Coils sowie zwischen mehreren Coils zu identifizieren. Zugleich gilt es, die Ausprägung, welche die Schwankungen annehmen können, zu untersuchen. Gegenstand der Untersuchungen ist zudem die Bestimmung von Einflussfaktoren, die ursächlich für die Schwankungen der Halbzeugeigenschaften sind, um Handlungsempfehlungen für den Herstellungsprozess ableiten zu können. Auf Basis der Erkenntnisse hinsichtlich der Charakterisierung der Halbzeugeigenschaften wird anschließend das Reibverhalten unterschiedlicher tribologischer Bedingungen unter Verwendung von Halbzeugen im Anlieferzustand in Laborversuchen untersucht. Dazu werden unter gleichbleibenden Randbedingungen Streifenziehversuche durchgeführt, um die Auswirkung der identifizierten Schwankungen der Halbzeugeigenschaften auf das Reibverhalten zu analysieren. Die Ermittlung der Reibzahlen dient dazu, einen potenziellen halbzeugseitigen Haupteinflussfaktor auf das Reibverhalten zu identifizieren. Die experimentell ermittelten Reibzahlen werden wiederum dazu genutzt, schwankende tribologische Bedingungen in der Simulation abzubilden, um den Einfluss inhomogener Reibungsbedingungen auf das Umformverhalten von Karosseriebauteilen zu analysieren und die Auswirkung realer Prozessbedingungen auf die Bauteilqualität zu verifizieren. Anhand dieser Untersuchungen soll zudem geprüft werden, ob eine Verbesserung der Vorhersagegenauigkeit der FE-Simulation durch Abbildung der realen tribologischen Bedingungen erzielt werden kann. Dazu werden die Ergebnisse der numerischen Untersuchungen anhand von realen Karosseriebauteilen in der Serienproduktion validiert. Abschließend werden die Erkenntnisse hinsichtlich der schwankenden tribologischen Bedingungen und deren Auswirkung auf den Umformprozess bewertet sowie eine Methode zu Problembehebung abgeleitet.

4 Werkstoffe und Versuchsmethoden

Im nachstehenden Kapitel wird das im Rahmen dieser Arbeit genutzte Karosseriebauteil, das dazugehörnde Serienwerkzeug sowie die in der Serienproduktion verwendeten Anlagen vorgestellt. Des Weiteren werden die Spezifikationen des Halbzeugs dargelegt. Es folgen Erläuterungen zu den Messmethoden, welche zur Halbzeugcharakterisierung herangezogen werden. Darüber hinaus erfolgt die Vorstellung des zur Charakterisierung des tribologischen Systems genutzten Versuchsaufbaus. Abschließend werden das verwendete Simulationsprogramm und das FE-Modell, welches für die numerischen Untersuchungen verwendet wird, vorgestellt.

4.1 Untersuchtes Halbzeug und Karosseriebauteil

Für die in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen wird ein Karosseriebauteil aus der Serienproduktion des aktuellen Bauteilspektrums eingesetzt. Das Karosseriebauteil und die entsprechenden Spezifikationen für das Halbzeug werden im Folgenden erläutert.

Der Seitenrahmen gehört aufgrund seiner Größe und komplexen Geometrie zu einer der umformtechnisch anspruchsvollsten Karosseriebauteile. Das Bauteil ist geprägt von einer markanten Charakterlinie, welche im Heckbereich oberhalb der Rückleuchte verläuft, sowie hohen Ziehtiefen im Bereich der Türeinstiege. Für die Untersuchungen in dieser Arbeit wird der linke Seitenrahmen X_1 des aktuellen BMW Kompakt-SUV (engl.: sport utility vehicle) der X-Serie, verwendet, wie in Bild 3 abgebildet. Bei dem Karosseriebauteil handelt es sich um ein Außenhautbauteil, welches hohen Oberflächenqualitätsanforderungen unterliegt. Die Blechdicke des Seitenrahmens ist mit $s_{BSpez} = 0,75 \pm 0,07$ mm festgelegt. Für das Karosseriebauteil wird ein weicher Tiefziehstahl der Güte CR3 eingesetzt, welcher mit einem im Schmelzbad aufgetragenen Zinküberzug beschichtet ist. Die Auflagenmasse beträgt 50 g/m^2 je Seite. Eine Übersicht der mechanischen Kennwerte für CR3 ist in Tabelle 1 abgebildet. Des Weiteren ist die Oberfläche mit einer EDT-Struktur (Electro Discharge Texturing) versehen. Die Rauheit ist nach internen Vorgaben für den arithmetischen Mittenrauwert mit $Ra_{Spez} = 1,10 - 1,60 \text{ }\mu\text{m}$ spezifiziert. Zusätzlich ist eine Spitzenzahl $RPc_{Spez} \geq 50 \text{ cm}^{-1}$ festgelegt. Um die Halbzeuge vor Korrosion zu schützen, ist die Oberfläche mit einer Menge von $s_{Spez} = 0,80 \pm 0,30 \text{ g/m}^2$ Schmierstoff versehen. Dabei handelt es sich um einen sogenannten Prelubricant Schmier-

stoff, kurz Prelube, mit einer Viskosität von $58 \text{ mm}^2/\text{s}$ bei 40°C . Die Halbzeuge für die Herstellung der Karosseriebauteile werden jeweils von nur einem Halbzeuglieferanten geliefert.

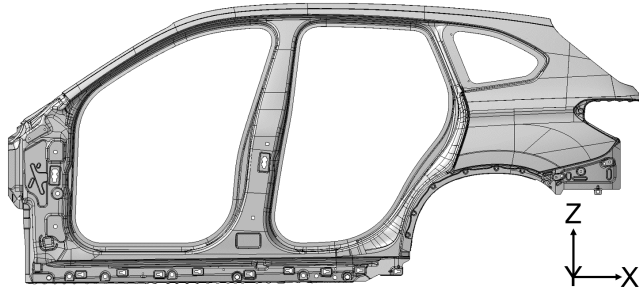


Bild 3: Linker Seitenrahmen X1 des BMW Kompakt-SUV der X-Serie

Tabelle 1: Mechanische Kennwerte von kaltgewalztem weichen Stahl CR3 nach VDA 239 - 100 [77]

Parameter	Spezifikation
Zugfestigkeit R_m	270 – 350 MPa
Streckgrenze $R_{p0,2}$	140 – 210 MPa
Bruchdehnung A_{80}	$\geq 38 \%$
Senkrechte Anisotropie r_{90}	$\geq 1,8$
Verfestigungsexponent n	$\geq 0,18$

4.2 Anlagen und Werkzeug für die Herstellung des Karosseriebauteils

Die Platinen für die Herstellung des Seitenrahmens werden auf einer Platinschneidanlage mit Servoantrieb der Firma Schuler geschnitten. Bei der Platine für den Seitenrahmen handelt es sich um eine Formplatine, welche die Kontur des Bauteils darstellt und Entlastungslöcher im Bereich der Türeinstiege besitzt. Die Abmaße der Platine über die Länge und Breite umfassen $3475 \text{ mm} \times 1780 \text{ mm}$. Die Formplatine des Seitenrahmens ist in Bild 4 abgebildet. Zudem beträgt die Breite der Coils aus denen die Platinen geschnitten werden 1780 mm , wodurch der Zuschnitt der Platinen über die

Coilbreite erfolgt. In der Coilanlage sind verschiedene Systeme zur Erfassung der Halbzeugeigenschaften am laufenden Band integriert, welche in Abschnitt 4.3. näher beschrieben werden.

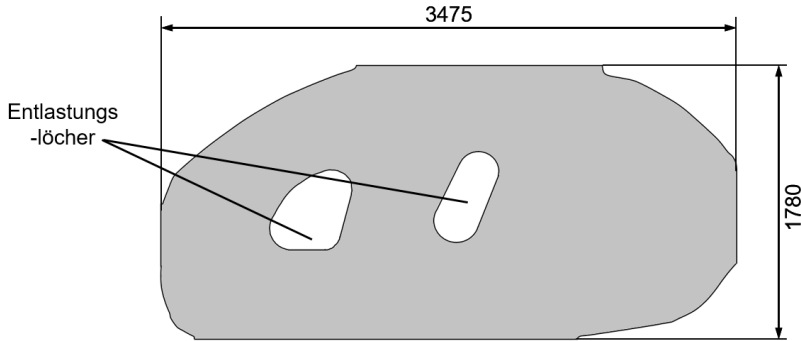


Bild 4: Platine zur Herstellung des Seitenrahmens X₁

Zur Herstellung der Karosseriebauteile dient eine Pressenlinie der Firma Schuler, welche ebenfalls über einen Servoantrieb verfügt und sich im Vergleich zu konventionellen, weggebundenen und kraftgebundenen Pressen durch eine hohe Ausbringungsleistung auszeichnet [9]. Die einfachwirkende Presse verfügt über fünf Arbeitsstufen, in denen aus den Platinen durch Umform-, Nachform- und Beschnittprozesse Karosseriebauteile gefertigt werden. Der Umformprozess erfolgt in der ersten Arbeitsstufe, in der sogenannten Kopfpresse, welche über ein 6-Punkt-Ziehkissen verfügt. Folglich wird die Kraftübertragung über sechs Hydraulikzylinder gesteuert [116]. Die Kraft der Hydraulikzylinder kann individuell angepasst werden, um den Materialfluss entsprechend zu steuern. Die Werkzeuge für den Seitenrahmen sind aus legiertem Grauguss GGG70L gefertigt und bestehen aus den Hauptkomponenten Blechhalter, Stempel und Matrize. Das Werkzeug des Seitenrahmens verfügt über einen äußeren Blechhalter sowie zwei innere Blechhalter im Bereich der Türeinstiege. Eine gesonderte Anpassung der inneren Blechhalterkräfte ist aufgrund der Kopplung über den Pressentisch nicht möglich. Des Weiteren verfügen die Werkzeuge über Blechhalterdistanzen, um den Materialfluss lokal steuern zu können. Zusätzlich sind im Werkzeug zur Steuerung des Materialflusses Zieh sicken integriert. Die Formgebung erfolgt hauptsächlich in der ersten Arbeitsstufe. Der Seitenrahmen wird durch Zuführung einer Platine in einer Einzelteilmontage hergestellt. Dabei wird durch Einsatz eines Roboters die wiederholgenaue Ablage der Platine in das Ziehwerkzeug durch mehrere

sogenannte Platineneinweiser sichergestellt. In Bild 5 ist das Werkzeug zur Fertigung des Seitenrahmens X_1 dargestellt.

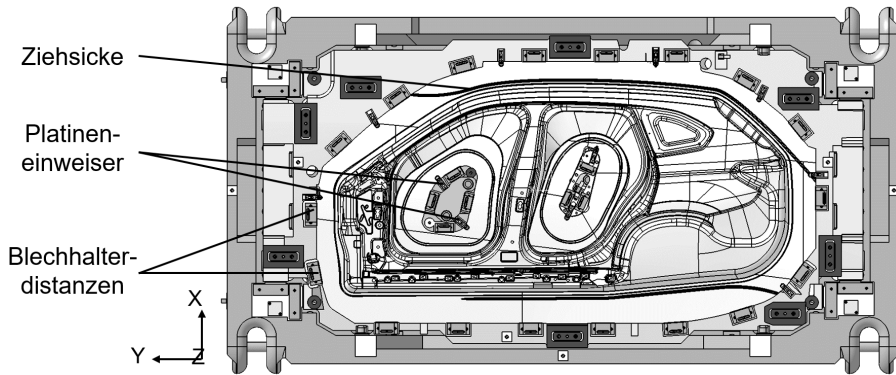


Bild 5: Draufsicht auf das Unterteil des Ziehwerkzeugs (1.AFO) zur Herstellung des linken Seitenrahmens X_1

4.3 Messtechnik zur Halbzeugcharakterisierung

Zur Charakterisierung der Halbzeuge dienen konventionelle Messsysteme, die vorzugsweise für Laborversuche eingesetzt werden, sowie Inline-Messsysteme, welche in der Coilanlage integriert sind. Ein Vorteil von Inline-Messsystemen ist, dass die Erfassung der Halbzeugeigenschaften am laufenden Band ohne Produktionsunterbrechungen erfolgen kann. Diese ermöglichen die Erfassung und im Weiteren die Charakterisierung der Schwankungen der Halbzeugeigenschaften. Im Fokus dieser Arbeit stehen Systeme zur Ermittlung der Rauheit, der Schmierstofffilmdicke sowie der Blechdicke.

4.3.1 Methoden zur Oberflächencharakterisierung

Zur Charakterisierung der Oberfläche werden zwei verschiedene Messsysteme mit unterschiedlichen Messprinzipien verwendet. Zur Ermittlung der Rauheit im Rahmen der Streifenziehversuche wird ein konventionelles taktils Rauheitsmesssystem eingesetzt und die Rauheit nach dem Tastschnittverfahren bestimmt. Um die Schwankungen der Rauheit innerhalb eines Coils und von mehreren Chargen anhand eines größeren Umfangs an Coils erfassen zu können, erfolgt die Rauheitsmessung inline, am laufenden Band, mittels eines laserbasierten Systems. Die beiden Messprinzipien und

die zur Charakterisierung genutzten Rauheitskenngrößen werden im Folgenden erläutert.

Taktilen Rauheitsmessprinzip

Die Bestimmung der Rauheit erfolgt neben der immer populärer werden den optischen Rauheitsmessung mittels konfokalem Weißlichtmikroskop [123], in der Industrie vorwiegend über das konventionelle Tastschnittverfahren [139], welches zur Erfassung der zweidimensionalen Oberflächenkenngrößen dient. Bei dieser Methode wird die Oberfläche, unter einer definierten Vorschubgeschwindigkeit und Messstrecke, mit einer Diamanttastspitze abgefahren. Die dadurch resultierenden vertikalen Bewegungen des Tasters werden in elektrische Signale konvertiert, anhand derer anschließend die Berechnung des Oberflächenprofils erfolgt [60]. Das Tastschnittverfahren ist nach DIN 4287 genormt [61]. Die Charakterisierung der Halbzeugoberfläche im Rahmen der Streifenziehversuche erfolgt in dieser Arbeit mittels eines taktilen Rauheitsmesssystems. Dabei handelt es sich um das System MarSurf XR 20 mit Vorschubgerät GD 25 der Firma Mahr. Die Messbedingungen für die Erfassung der Rauheitskenngrößen arithmetischer Mittenrauwert R_a und der Spitzenzahl RP_c sind für metallische Flacherzeugnisse, welche in der Automobilindustrie Anwendung finden, nach DIN 10049 genormt [90]. Ein Nachteil der taktilen Rauheitsmessung ist die potenzielle Beschädigung insbesondere weicher Oberflächen durch die Diamanttastspitze, welche zu einer Verfälschung des Messergebnisses führen kann.

Prinzip der Inline-Rauheitsmessung

Um die Rauheit und potenzielle Rauheitsschwankungen über die Coillänge und -breite sowie zwischen verschiedenen Chargen zu untersuchen, wird ein berührungsloses, laserbasiertes Rauheitsmesssystem verwendet. Dabei handelt es sich um das SRM-System (Surface Roughness Measurement) der Firma Amepa [140], welches vornehmlich für die Anwendung am laufenden Band in Walzwerken konzipiert wurde. Die Bestimmung der Rauheit basiert auf dem Prinzip einer zweidimensionalen Lasertriangulation. Dabei wird mittels eines Lasers eine dünne Linie, unter einem definierten Winkel, auf die Oberfläche projiziert. Aufgrund der unruhigen Oberflächentopografie infolge der aufgetragenen Textur wird die Laserlinie auf der Oberfläche gebrochen und verzerrt dargestellt. Gleichzeitig wird ein Bild der projizierten Laserlinie mittels eines Mikroskops und einer CCD-Kamera (engl.: charge-coupled device) aufgenommen. Anhand des bekannten Einfallswinkels des Lichts α und der messbaren Abweichung der projizierten Laserlinie

Δx erfolgt die Berechnung der Höhenvariation Δz nach dem Prinzip der Trigonometrie und folglich der Rauheit.

$$\Delta z = \Delta x \cdot \cot(\alpha) \quad (6)$$

Bild 6 zeigt eine schematische Darstellung des Messprinzips und exemplarisch eine Aufnahme einer EDT-Oberfläche mittels der CCD-Kamera. Damit die aufzunehmende Oberfläche im Fokus der Kamera liegt, ist ein Abstandssensor zur automatischen Fokusregelung integriert. Zusätzlich wird das Band über eine Stützrolle geführt, um mögliche Bandschwingungen zu reduzieren. Da die Änderung der Laserlinie in direktem Zusammenhang zur Oberfläche, durch die der Laserstrahl reflektiert wird, steht, kann folglich die Rauheit bestimmt werden. Die Rauheit der Oberfläche wird auf Basis des arithmetischen Mittenrauwerts R_a , der Spitzenzahl RP_c und zusätzlich durch die gemittelte Rautiefe R_z charakterisiert. Der Messbereich für den Mittenrauwert liegt zwischen $0,3 \mu\text{m}$ und $5,0 \mu\text{m}$ sowie die Auflösung bei $0,01 \mu\text{m}$. Da das System in erster Linie für den Einsatz auf unbeölten Oberflächen gedacht ist, erfolgt die Untersuchung des Einflusses des Schmierstoffes auf die Rauheitsmessung in dieser Arbeit. Des Weiteren wird ein Abgleich zwischen der laserbasierten Rauheitsmessung und der taktilen Rauheitsmessung geschaffen.

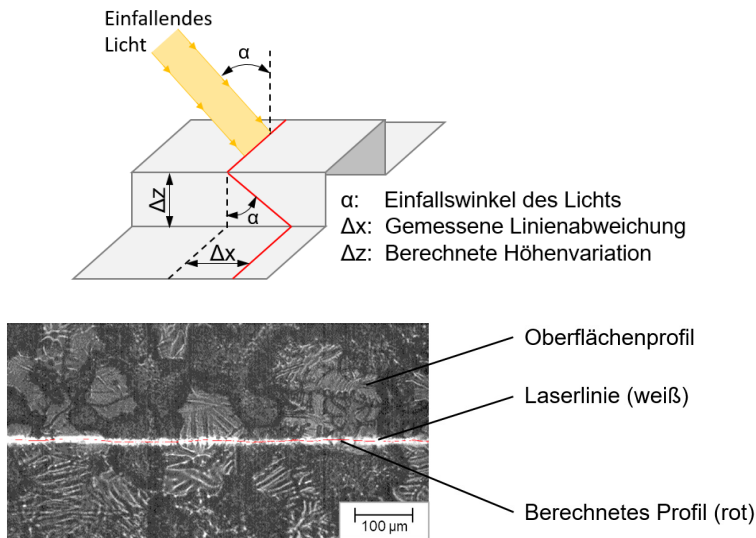


Bild 6: Schematische Darstellung der Bestimmung des Rauheitsprofils (oben) nach [141] und exemplarische Darstellung einer Aufnahme der Oberflächentopografie mittels CCD-Kamera (unten)

4.3.2 Methode zur Ermittlung der Schmierstoffauflagemenge

Um die Schmierstoffauflagemenge auf der Blechoberfläche zu ermitteln, werden das OFIS-Handmessgerät sowie das OFM-System der Firma Amepa verwendet. Beim OFIS-Handmessgerät handelt es sich um ein mobiles System, welches die lokale Bestimmung der Schmierstoffmenge auf der Blechoberfläche ermöglicht. Im Gegensatz dazu ist das OFM-System ein traversierendes System, welches für den Einsatz in Walzwerken und Coilanlagen konzipiert ist und am laufenden Band die Schmierstoffauflagemenge erfasst. Beide Systeme basieren auf dem Prinzip der Lichtabsorption nach dem Lambert-Beer-Gesetz [142]. Dieses besagt, dass die Absorptionsintensität eines Lichtstrahls proportional zur Intensität des in ein Medium durchdringenden Lichtstrahls [143], in Abhängigkeit der Schichtdicke des Mediums und der Konzentration der gelösten Substanzen [144], ist. Um die Schmierstoffmenge zu ermitteln, wird die Materialoberfläche durch eine sich im Messkopf befindende Lichtquelle angestrahlt. Dabei durchdringt das Licht den Schmierstofffilm und wird von der Materialoberfläche reflektiert, wodurch das Licht ein weiteres Mal den Schmierstofffilm durchbricht. Ein Teil des reflektierten Lichts wird anschließend von der Detektionseinheit erfasst und für die Bestimmung der Schmierstoffschichtdicke ausgewertet. Zu berücksichtigen ist, dass das Messergebnis vom spektralen Reflexionsvermögen der Blechoberfläche abhängig ist. Daher werden für die verschiedenen Werkstoffe und Oberflächenbeschichtungen entsprechende Kalibrierfaktoren eingesetzt. Der Messbereich beider Systeme liegt zwischen $0,10 \text{ g/m}^2$ und $5,00 \text{ g/m}^2$. Die Messauflösung des OFM-Systems ist mit $0,01 \text{ g/m}^2$ angegeben, wohingegen eine Messgenauigkeit seitens des Herstellers nicht angegeben wird. Purr [49] kommt zu dem Ergebnis, dass das OFM-System ausreichend genau ist, um die Schmierstoffauflagemenge zu ermitteln und Chargenschwankungen zu charakterisieren. Der Nachweis wurde durch den Abgleich von inline und gravimetrisch gemessenen Proben erbracht. Da eine Verschmutzung des Messkopfes durch Schmierstoffpartikel in der Luft nicht ausgeschlossen werden kann, wird die Funktionsfähigkeit mittels der im System integrierten Validiereinheit regelmäßig geprüft.

4.3.3 Methode zur Blechdickenmessung

Zur Bestimmung der Blechdicke wird das Messsystem LTM-BASE der Firma Roland Electronic eingesetzt, welches für den Einsatz in der metallverarbeitenden Industrie konzipiert ist. Dabei handelt es sich um ein

berührungsloses System, welches das Funktionsprinzip der Lasertriangulation zugrunde legt. Bei diesem Prinzip wird das Licht einer Laserquelle auf die Materialoberfläche fokussiert und auf einen Positionsdetektor reflektiert. Durch Änderung des Abstands zwischen Laserquelle und Materialoberfläche verändert sich die Position des Lichts auf dem Detektor, wodurch über die Winkeländerung der Abstand bestimmt werden kann. Das System basiert auf einer Differenzmessung mittels Lasertriangulationsensoren. Folglich messen zwei sich gegenüberliegende Lasersensoren jeweils den Abstand zur Materialoberfläche. Durch Subtraktion der Summe der beiden gemessenen Abstände vom bekannten Abstand der Lasersensoren zueinander resultiert die Dicke des Materials. Das System ist für Blechdicken zwischen 0,05 mm und 8,00 mm ausgelegt. Die Abtastfrequenz beträgt bis zu 50 kHz. Des Weiteren werden die Auflösung der Sensoren vom Hersteller mit einer Auflösung von 0,1 μm sowie die Wiederholgenauigkeit mit $\pm 10,0 \mu\text{m}$ angegeben. Um mögliche Störeinflüsse, wie beispielsweise Temperatureffekte, zu kompensieren, verfügt das Messsystem über eine integrierte Kalibriereinheit. Das Kalibriernormal verfährt automatisch vor jedem Coilwechsel in den Messspalt zum Abgleich des Systems. Die Genauigkeit des Systems ist mit einer maximalen Messabweichung von 5 μm angegeben. Demzufolge ist das Messsystem ausreichend genau, um Schwankungen der Blechdicke innerhalb der in Abschnitt 4.1. beschriebenen Spezifikationen zu erfassen.

4.3.4 IMPOC-System zur Ermittlung der mechanischen Eigenschaften

Da die mechanischen Eigenschaften der Werkstoffe neben den für die Tribologie relevanten Eigenschaften ebenfalls das Umformverhalten beeinflussen, werden diese zusätzlich mittels eines Inline-Messsystems bestimmt. Zum Einsatz kommt das zerstörungsfreie, magnet-induktive Messsystem IMPOCpro (Impulse Magnetic Online Process Controller) [145] der Firma EMG. Das System ist in der Coilanlage verbaut und erfasst die Eigenschaften der Stahlbänder in der Bandmitte des laufenden Bands. Dazu ist jeweils ein Messkopf, bestehend aus Magnetisierungsspule und Magnetfeldsensor, auf der Ober- und Unterseite des Stahlbands angebracht. Das laufende Band wird durch die Spulen fortlaufend magnetisiert. Die Erfassung des Gradienten der magnetischen Restfeldstärke erfolgt über die Magnetfeldsensoren, welche in Durchlaufrichtung des Bands hinter der Magnetisierungsspule angebracht ist. Der Gradient der magnetischen Restfeldstärke wird als IMPOC-Wert bezeichnet und mit der Einheit A/m^2 angegeben. Kebe et al. demonstrieren den Zusammenhang zwischen der

Festigkeit des Materials und des IMPOC-Werts anhand von drei verschiedenen Werkstoffgütern [146]. Folglich ist es möglich, die Zugfestigkeit R_m sowie die Streckgrenze $R_{p0,2}$ über Wechselbeziehungen zwischen dem Gradienten und beispielsweise im Zugversuch ermittelten mechanischen Eigenschaften herzustellen. An dieser Stelle wird jedoch auf die direkte Ermittlung der Zugfestigkeit und Streckgrenze verzichtet. Das System dient somit als Indikator für die Festigkeit der Halbzeuge. Ausgelegt ist das System für ferromagnetische Stahlbänder mit einer Blechdicken zwischen 0,15 mm und 3,00 mm [147]. Die Genauigkeit des Systems wird mit $\pm 5\%$ angegeben [147]. Purr [49] untersucht die Übereinstimmung zwischen im Zugversuch und mittels des IMPOC-Systems gemessenen mechanischen Eigenschaften und kommt zu dem Ergebnis, dass eine ausreichende Genauigkeit des IMPOC-Systems vorliegt, um starke Schwankungen innerhalb einer Halbzeuggüte zu erfassen. Zudem ist die IMPOC-Messung stark blechdickenabhängig.

4.4 Methode zur Reibungscharakterisierung

Die Charakterisierung des Reibverhaltens verschiedener Chargen erfolgt in dieser Arbeit mittels des Streifenziehversuchs. Der Versuchsaufbau und die genutzten Parameter sowie die Eigenschaften werden in diesem Abschnitt erläutert. Des Weiteren folgt die Vorstellung der verwendeten Anlage einschließlich der genutzten Werkzeuggeometrie. Abschließend wird auf die Halbzeugspezifikationen der untersuchten Chargen eingegangen.

4.4.1 Versuchsanlage und Werkzeug

Der Streifenzugversuch ist eine etablierte Methode zur Charakterisierung des Reibverhaltens in der Blechumformung. Um die Reibzahl verschiedener Chargen zu ermitteln, findet in dieser Arbeit der Flachbahnversuch Anwendung, welcher das Reibverhalten zwischen Platine und Blechhalter im Serienwerkzeug, in Anlehnung an reale Bedingungen, nachbildet. Die Durchführung der Versuche erfolgt auf einer von der BMW Group eigens konstruierten Streifenziehanlage. Eine schematische Darstellung des Streifenziehversuchs und der Versuchsanlage ist in Bild 7 dargestellt. Die Versuchsanlage besteht aus einer Universalprüfmaschine, welche als Zugvorrichtung dient und einer Werkzeugvorrichtung. Diese besteht aus einer starren und einer über Säulen geführten Platte, auf denen die jeweiligen Reibbacken montiert sind. Über einen Hydraulikzylinder verfährt die bewegliche Reibbacke F_{RV} in Richtung der starren Reibbacke F_{RH} und

bringt eine definierte Normalkraft F_N , auf den sich zwischen den Reibbacken befindenden Blechstreifen, auf. Die maximal mögliche Normalkraft F_N beträgt 60 kN und wird über eine Kraftmessdose erfasst. Zusätzlich werden die Bewegung und eine potenzielle Verkipfung der beweglichen Reibbacke über drei Wegsensoren gemessen. Über die in der Universalprüfmaschine integrierte Kraftmessdose wird die Ziehkraft F_Z erfasst. Folglich entspricht die Ziehkraft F_Z der Summe der Reibkräfte der beweglichen Reibbacke F_{RV} und der starren Reibbacke F_{RH} , welche für das Hindurchziehen des Blechstreifens durch die Reibbackenpaarung benötigt wird. Für die Untersuchungen werden Reibbacken mit einer Kontaktfläche von 70 mm x 150 mm verwendet. Des Weiteren sind die Kanten der Reibbacken mit einem Radius von 5 mm versehen.

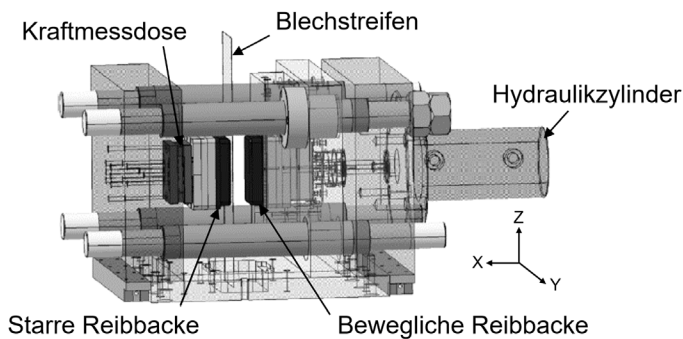


Bild 7: Konstruktiver Aufbau der in dieser Arbeit verwendeten Streifenziehanlage

Als Werkzeugwerkstoff wurde in Anlehnung an die Serienwerkzeuge zur Herstellung von Karosseriebauteilen ein Grauguss der Legierung GGG70L eingesetzt. Die maximale Ziehlänge l beträgt $l_{\max} = 300$ mm. Des Weiteren liegt die maximale Ziehgeschwindigkeit $v_{\max}$ bei 400 mm/min. Die Reibzahl μ errechnet sich nach dem Coulomb'schen Reibgesetz, für den doppelseitigen Flachbahnversuch wie in Gleichung 7 beschrieben.

$$\mu = \frac{F_{RV} + F_{RH}}{2 * F_N} = \frac{F_Z}{2 * F_N} \quad (7)$$

Da der Fokus in dieser Arbeit auf variierenden Halbzeugeigenschaften liegt, werden die Eigenschaften der Parameter nicht modifiziert. Die Versuche werden mit einer Ziehgeschwindigkeit v_{rel} von 400 mm/min und

einer Flächenpressungen von $p_N = 2,0 \text{ MPa}$ durchgeführt. Eine Übersicht der verwendeten Parameter ist in Tabelle 2 gegeben.

Tabelle 2: Übersicht der Parameter zur Reibzahlermittlung im Streifenziehversuch

Parameter	Eigenschaft
Kontaktfläche der Reibbacken	80 mm x 150 mm
Ziehlänge l	300 mm
Reibbackenwerkstoff	GGG70L
Ziehgeschwindigkeit v_{rel}	400 mm/min
Flächenpressung p_N	2,0 MPa

4.4.2 Untersuchte Halbzeuge

Für die Herstellung von Karosseriebauteilen werden Halbzeuge eingesetzt, die produktions- und prozessbedingt natürlichen Schwankungen unterliegen. Um das tribologische Verhalten von schwankenden Halbzeugeigenschaften zu untersuchen, werden in dieser Arbeit Streifenziehversuche unter Verwendung mehrerer Chargen durchgeführt. Als Auswahlkriterium gelten die Oberflächenbeschichtung, die Schmierstoffart sowie der Lieferant. Um beispielsweise den Einfluss verschiedener, lieferantenbedingter Oberflächentexturierungen zu vermeiden, erfolgt die Halbzeugauswahl anhand des Seitenrahmens X_1 . Die Halbzeuge des Bauteils stammen von einem Lieferanten und sind nach den BMW Group internen Richtlinien für Aussenhautbauteile spezifiziert. Folglich werden Halbzeuge für die Untersuchungen herangezogen, welche mit einer schmelztauchveredelten Zink-Beschichtung mit einer Auflagenmasse von 50 g/m^2 je Seite versehen sind und eine EDT-Struktur aufweisen. Des Weiteren liegt die Rauheitsspezifikation für den arithmetischen Mittenrauwert zwischen $R_a = 1,10$ und $R_a = 1,60 \text{ }\mu\text{m}$. Zusätzlich ist eine Spitzenzahl $RP_c \geq 50 \text{ cm}^{-1}$ definiert. Die Spezifikation für die Schmierstoffmenge beträgt $0,8 \pm 0,3 \text{ g/m}^2$. Bei den vom Lieferanten applizierten Schmierstoffen handelt es sich um den Prelube-Schmierstoff Multridraw PL 61 von der Firma Zeller & Gmelin GmbH & Co. KG bzw. Anticorit PL 3802 39 S von der Firma Fuchs Schmierstoffe GmbH. Die beiden Schmierstoffe sind jeweils nach VDA 230 – 213 [96] freigeprüfte Prelube-Schmierstoffe für die Anwendung in der Automobilindustrie, welche vornehmlich dem Korrosionsschutz der Coils beim

Transport und Lagerung dienen. Eine Übersicht der Auswahlkriterien ist in Tabelle 3 gegeben.

Tabelle 3: Halbzeugspezifikationen der verwendeten Coils zur Untersuchung des tribologischen Systems

Eigenschaft	Spezifikation
Oberflächenbeschichtung	Z ₁₀₀
Oberflächentexturierung	EDT
Mittenrauwert R_{Spez}	1,10 - 1,60 μm
Spitzenzahl RP_{Spez}	$\geq 50 \text{ 1/cm}$
Schmierstoffmenge s_{Spez}	$0,8 \pm 0,3 \text{ g/m}^2$
Schmierstoffart	Prelube

4.5 Finite-Elemente-Simulation

In der Blechumformung dient die Finite-Elemente-Simulation, kurz FE-Simulation, dazu, das Umformverhalten von Bauteilen virtuell zu analysieren und die Auslegung der Werkzeuge abzusichern [14]. Grundlage bildet die Finite-Elemente-Methode (FEM), welche ein numerisches Verfahren ist, bei dem eine physikalische Aufgabenstellung durch Diskretisierung in finite Elemente beschrieben wird und anschließend durch Aufstellung und Berechnung eines Systems von Differentialgleichungen gelöst wird [117]. Folglich kann beispielsweise das Auftreten von Rissen und Falten sowie das Rückfederungsverhalten vorausgesagt werden. Um die Auswirkung der experimentell ermittelten Reibzahlen, wie in Abschnitt 4.4. beschrieben, auf das Umformverhalten zu analysieren, werden in dieser Arbeit Simulationen für das Bauteil Seitenrahmen X₁ der BMW Kompakt-SUV X-Serie durchgeführt. Ziel ist es, die im Serienprozess vorliegenden tribologischen Bedingungen aufgrund von Chargenschwankungen in der Simulation abzubilden, um ein grundlegendes Verständnis über den Einfluss auf das Umformergebnis zu erhalten. Diese Untersuchungen werden im Weiteren, zur Abgrenzung von der konventionellen Simulation, als seriennahe Simulation bezeichnet.

Für die Untersuchungen wird die kommerziell erhältliche FE-Software LS-DYNA® Version 971 der Firma Livermore Software Technology Corporation

(LSTC) verwendet [148]. Dabei handelt es sich um eine in der Automobil-, Luft- und Raumfahrtindustrie sowie in der Forschung weit verbreitete Software für nichtlineare physikalische Aufgabenstellungen [149]. In Vorbereitung für die numerischen Untersuchungen wurden zunächst die Werkzeuggraden ausgemessen sowie die Einstellung der Blechhalterdistanzen erfasst und in das bestehende CAD-Modell übertragen. Des Weiteren wurden die im Serienprozess verwendete Hubzahl und die Blechhalterkraft zur Simulation herangezogen. Anschließend erfolgte der Abgleich des Materialflusses zwischen simuliertem und realem Ziehteil zur Validierung des Modells. Geringe Unterschiede zwischen dem realen und dem virtuellen Ziehteil können nicht gänzlich vermieden werden, da für die Simulation vereinfachte Bedingungen angenommen werden. Demzufolge wird beispielsweise die Pressendurchbiegung in der Standardsimulation nicht berücksichtigt und eine Gesamtkraft, in diesem Fall bestehend aus allen sechs Zylinderkräften, für den Blechhalter angenommen. Die Werkzeugkomponenten wie auch die Platine liegen in Form von Starrkörperelementen vor. Zudem sind geometrisch modellierte Sicken im Modell abgebildet. Die Diskretisierung der Platine und der Werkzeugkomponenten erfolgt durch Schalenelemente. Des Weiteren basiert die Kontaktmodellierung zwischen Werkzeug und Platine auf dem Penalty-Verfahren [117]. Für die Simulation des Karosseriebauteils wird die bereits existierende Standardmaterialkarte für den Werkstoff CR3 verwendet. Die Beschreibung des Fließsorts für das verwendete Materialmodell erfolgt nach Barlat'89 [150]. Die Reibung wird nach dem Coulomb'schen Reibmodell modelliert. Für den gegenüberstellenden Vergleich der Ergebnisse werden zusätzlich zur seriennahen Simulation Standardsimulationen durchgeführt, bei denen eine Reibzahl für die gesamte Platine verwendet wird. Die Standardreibzahl für Stahlhalbzeuge ist für den Serienprozess mit $\mu_s = 0,12$ hinterlegt. Zusätzlich werden die im Streifenziehversuch ermittelten Reibzahlen für die seriennahe Simulation herangezogen. Für die Bewertung des Umformergebnisses dient das Grenzformänderungsdiagramm (engl.: forming limit diagram, FLD).

5 Ursachenanalyse und Charakterisierung von im Serienprozess erfassten Halbzeugeigenschaften

Die Rauheit und die Schmierstoffauflage sind zwei entscheidende Einflussfaktoren auf das Reibverhalten bei der Herstellung von Karosseriebauteilen. Um den Einfluss von Schwankungen, hinsichtlich der die Tribologie beeinflussenden Halbzeugeigenschaften auf das Umformverhalten untersuchen zu können, ist zunächst eine Charakterisierung der tatsächlich auftretenden Schwankungen erforderlich. Bisherige Untersuchungen von Chargenschwankungen beschränken sich auf in Laborversuchen ermittelte Daten oder auf Berechnungsmodelle. Durch den Einsatz von Inline-Messsystemen ist es möglich, Materialeigenschaften während der Produktion am laufenden Band zu erfassen, welche zur Charakterisierung von Chargenschwankungen auf Basis einer großen Datenmengen herangezogen werden können.

Als Grundlage für die Datenerfassung dient das von Purr [49] entwickelte Konzept zur Erfassung von Einfluss- und Ergebnisgrößen des Herstellungsprozesses von Karosseriebauteilen. Dabei werden die Halbzeugeigenschaften in der Coilanlage am laufenden Band gemessen und die Platinen mit einem Code gekennzeichnet, wodurch eine platinengenaue Zuordnung der Eigenschaften möglich ist. Die Identifizierung der Platinen und Speicherung der Verarbeitungsparameter erfolgt an der Presse. Des Weiteren können nachfolgend Merkmale der Bauteilqualität hinterlegt werden. Folglich bietet das Konzept die Möglichkeit, die Auswirkung von schwankenden Halbzeugeigenschaften auf die Bauteilqualität im Serienprozess zu untersuchen.

Zusätzlich zu den bereits bestehenden Systemen wird in dieser Arbeit ein weiteres Inline-Rauheitsmesssystem qualifiziert, welches eine genauere Untersuchung von Schwankungen der Rauheit ermöglicht. Purr [49] weist die grundsätzliche Verwendungsmöglichkeit des Systems zur Untersuchung von Wirkzusammenhängen zwischen Materialeigenschaften und der Bauteilqualität in der Produktion nach. Fundierte Untersuchungen hinsichtlich des Auftretens von Schwankungen im Hinblick auf die, das tribologische Verhalten beeinflussenden Halbzeugeigenschaften und deren Wechselwirkung mit der Bauteilqualität wurden bisher nicht durchgeführt und stehen daher im Fokus dieser Arbeit.

Im Folgenden wird die Erfassung der Daten im Serienprozess bezüglich der Schmierstoffauflage analysiert sowie die Erfassung der Daten der Rauheit qualifiziert. Des Weiteren werden Faktoren, welche die Messungen beeinflussen können, untersucht und die Eignung der Daten als Voraussetzung für die anschließende Charakterisierung von Chargenschwankungen geprüft und abschließend bewertet. Es folgt eine Analyse und Charakterisierung der das tribologische Verhalten beeinflussenden Halbzeugeigenschaften hinsichtlich des Auftretens von Schwankungen. Des Weiteren werden Untersuchungen für verschiedene potenziell ursächliche Einflussfaktoren durchgeführt, die der Identifikation der Ursache für das Auftreten der Schwankungen dienen.

5.1 Erfassung und Charakterisierung von Schwankungen der Schmierstoffmenge und Schmierstoffverteilung

Ziel dieses Kapitels ist es, auf Grundlage eines großen Umfangs an Coils ein Verständnis über das Auftreten von Schwankungen der Schmierstoffmenge und Schmierstoffverteilung innerhalb eines Coils wie auch zwischen mehreren Coils zu erarbeiten. Dazu werden die in der Coilanlage erfassten Daten analysiert. Zur effizienten Datennutzung wird im Weiteren eine Reduzierung der inline erfassten Datenmenge der Schmierstoffmesswerte geprüft. Zudem erfolgt die Untersuchung verschiedener Einflussfaktoren, welche ursächlich für das Auftreten von Schwankungen der Schmierstoffmenge und -verteilung im Presswerk sein können. Die Analyse der Ursache-Wirkzusammenhänge zwischen dem Auftreten von Chargenschwankungen, welche sich durch inhomogene Schmierstoffbedingungen äußern und den Einflussfaktoren, welche für diese ursächlich sind, dient dem Aufbau eines tieferen Prozessverständnisses. Die erlangten Erkenntnisse bilden die Grundlage für die späteren Untersuchungen des Reibverhaltens im Streifenziehversuch.

5.1.1 Erfassung der Schmierstoffmesswerte und Prüfung der Datenreduzierung

Zur Ermittlung der Schmierstoffmenge wird ein optisches System verwendet, dessen Messprinzip bereits in Abschnitt 4.3.2 beschrieben ist. Die Messköpfe des Systems sind auf einer Achse quer zur Durchlaufrichtung des Blechbands in der Coilanlage integriert. Um die Schmierstoffauflage

beidseitig ermitteln zu können, wird die Coiloberseite und -unterseite jeweils mit einem Messkopf abgescannt, welcher die Coiloberfläche kontinuierlich traversierend abfährt, während das abgehaspelte Coil durch die Coilanlage hindurchgeführt wird. Die Messköpfe verfahren parallel zueinander, um beidseitig ein Schmierstoffprofil in Form einer Heatmap (deut.: Wärmekarte, zweidimensionale Darstellungsform zur farblichen Visualisierung von Daten) über die gesamte Coiloberfläche zu erzeugen. In Bild 8 ist rechts exemplarisch eine Aufzeichnung der Schmierstoffwerte für die Ober- und Unterseite eines Coils als Heatmap abgebildet. Auf der linken Bildseite sind jeweils die Messwerte über die Coilbreite für die Ober- und Unterseite als Liniendiagramm für den Bandmeter 2187 dargestellt.

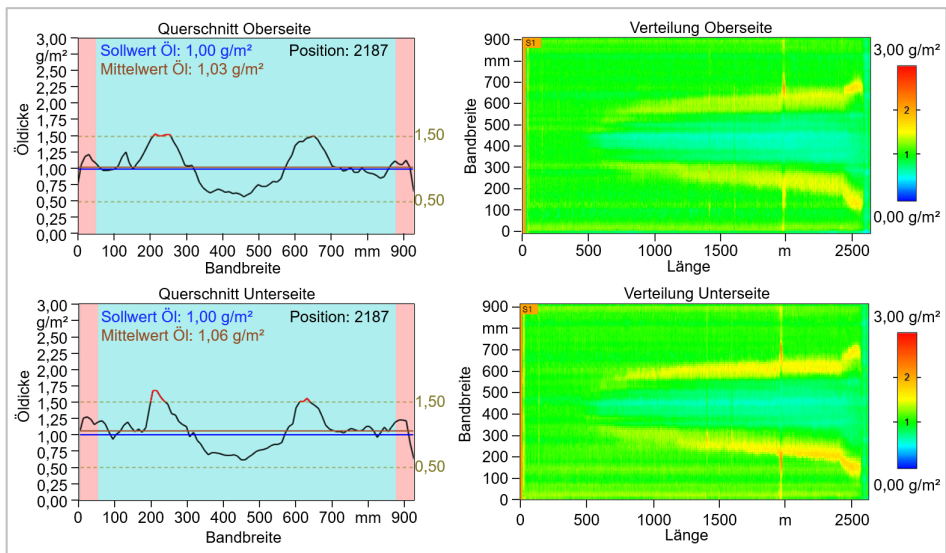


Bild 8: Exemplarische Darstellung der Schmierstoffmenge für die Ober- und Unterseite eines Coils als Heatmap (rechts) und als Liniendiagramm über die Coilbreite (links)

Bild 9 zeigt eine schematische Darstellung des Verfahrenswegs eines Messkopfes über die Coiloberfläche zur Bestimmung der Schmierstoffmenge in der Coilanlage. Die Traversiergeschwindigkeit der Messköpfe beträgt 250 mm/s , wodurch die Anzahl der Messwerte in Abhängigkeit der Breite des Coils variiert. Die Anzahl der Messwerte in Coillängenrichtung ergeben sich aus der Vorschublänge der Platine und der dadurch resultierenden Bandgeschwindigkeit. Zusätzlich zeigt die Darstellung die Messposition der Blechdickenmessung. Ebenfalls quer zur Durchlaufrichtung des Blechbands sind drei fest auf einer Achse verbaut Messköpfe in der Coilanlage implementiert, die zur Bestimmung der Blechdicke dienen. Sie sind in der

Bandmitte und jeweils im Abstand von 400 mm und 600 mm zur Bandmitte positioniert, um zusätzlich die Balligkeit des Blechs bestimmen zu können. Das Messprinzip ist in Abschnitt 4.3.3 beschrieben. Die Validierung der Messsysteme ist in der Arbeit von Purr [49] erfolgt, wodurch die Eignung der Systeme zur Erfassung der Schmierstoffmenge und der Blechdicke bereits nachgewiesen wurde.

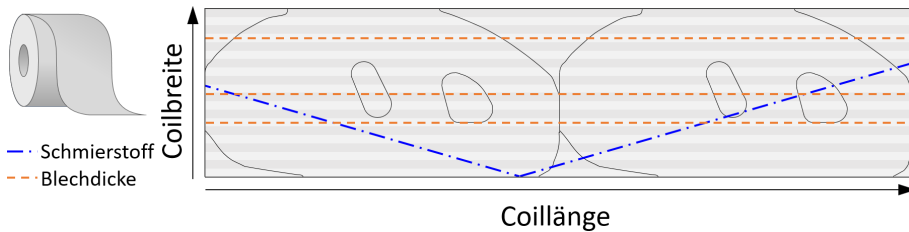


Bild 9: Schematische Darstellung der Inline-Messposition für die Erfassung der Schmierstoffmenge und der Blechdicke

Validierung der inline erfassten Messwerte

Die in der Coilanlage erfassten Ursprungsmesswerte für die Schmierstoffmenge werden, zur Erleichterung der Auswertbarkeit, 20 Messspuren über die Coilbreite zugeordnet. Eine Voraussetzung für die anschließende Charakterisierung einer schwankenden Schmierstoffmenge und -verteilung ist die Prüfung der Aussagefähigkeit der Daten bei Reduzierung der Datenmenge. Hierzu werden die Ursprungsmessdaten, der den Messspuren zugeordneten Daten gegenübergestellt, um eine Verfälschung bzw. Schwächung der Validität der Daten ausschließen zu können.

Für die Analyse der Daten dient ein Coil, dass entsprechend der Spezifikation mit einer Schmierstoffmenge von $s_{\text{spez}} = 0,80 \pm 0,30 \text{ g/m}^2$ beaufschlagt ist und für den Zuschnitt der Seitenrahmenplatten herangezogen wird. Das Coil weist eine Breite von 1780 mm auf und durchläuft die Coilanlage mit einer Bandgeschwindigkeit von ca. 76 m/min. Folglich beträgt die Länge eines Coilabschnitts, in dem der Messkopf einmal das Coil überquert ca. 9 m. Dabei wird die Schmierstoffmenge fortlaufend in 5 mm Abständen erfasst. Anschließend werden die Messwerte in einem Messdatenarray abgelegt. Die Ermittlung der Werte je Spur erfolgt mithilfe eines Skalierungsfaktors, der die Coilbreite berücksichtigt und dem Index, welcher der Spur entspricht, wodurch der passende Wert aus dem Array bestimmt wird.

Da insbesondere unterschiedlich stark ausgeprägte Schmierstoffverteilungen für die Charakterisierung der Schwankungen von Interesse sind, wird

die Gültigkeit der Daten exemplarisch anhand eines Coilabschnitts mit homogener wie auch einer inhomogenen Schmierstoffverteilung untersucht. Bisher ist es nicht möglich, die Charakteristik der Schmierstoffverteilung anhand einer Kenngröße zu beurteilen. Daher wird die Standardabweichung als Indikator für die Schmierstoffverteilung bzw. Schmierstoffumverteilung [49] herangezogen. Zur Bewertung der Homogenität der Schmierstoffverteilung wurde die Standardabweichung, über die entlang der Coilbreite ermittelten Messwerte, bestimmt. In Bild 10 sind die Standardabweichungen der Ursprungsmessdaten (σ_{UD}) über die Coilbreite und der über die 20 Messspuren gemittelten Messwerte (σ_{20}) anhand von zwei Positionen im Coil dargestellt. Da aus Erfahrung bekannt ist, dass in der Regel die äußeren Windungen eines Coils eine homogenere Schmierstoffverteilung als die inneren Windungen aufweisen, wurden jeweils ein zufällig gewählter Bandabschnitt am Coilanfang sowie am Coilende für die Analyse ausgewählt. Die Position 1 entspricht dem Bandlängenabschnitt bei Bandmeter 93 sowie die Position 2 dem Bandlängenabschnitt bei Bandmeter 1995. Die jeweiligen Standardabweichungen, welche für die Messwerte an Position 1 ermittelt wurden, betragen $\sigma_{Pos1,UD} = 0,115$ und $\sigma_{Pos1,20} = 0,112$.

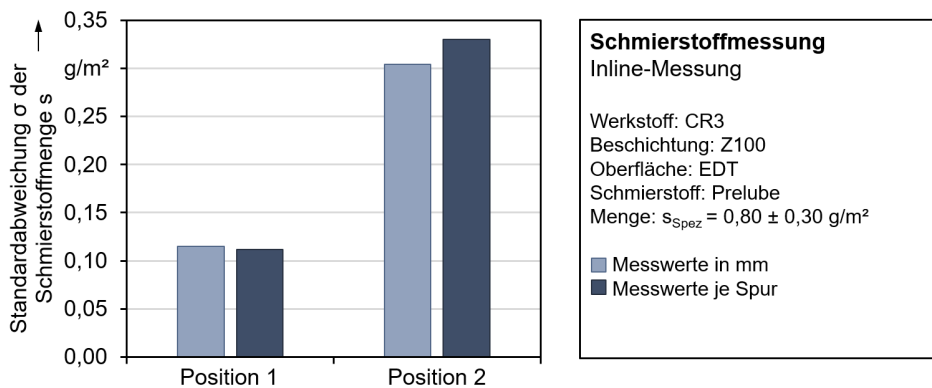


Bild 10: Gegenüberstellung der Standardabweichungen der Schmierstoffmesswerte für zwei Positionen im Coil anhand unterschiedlicher Datenmengen; Coillängenposition 1 an Bandmeter 93 und Coillängenposition 2 an Bandmeter 1995

Da die Differenz zwischen den ermittelten Standardabweichungen mit $\Delta\sigma_{Pos1} = 0,003$ einen sehr niedrigen Wert aufweist, ist davon auszugehen, dass kein signifikanter Unterschied zwischen den Daten besteht. Die Standardabweichungen der Messwerte an Position 2 betragen $\sigma_{Pos2,UD} = 0,304$ und $\sigma_{Pos2,20} = 0,330$ und liegen deutlich über den Standardabweichungen der für Position 1 ermittelten Schmierstoffwerte. In diesem Fall deutet der

Wert der Standardabweichung auf eine ausgeprägte inhomogene Schmierstoffverteilung hin. Da die Differenz zwischen den Standardabweichungen mit $\Delta_{\text{Pos2}} = 0,026$ einen Unterschied von ca. 8 % zeigt, ist davon auszugehen, dass eine Abweichung zwischen den Daten vorliegt, welche im Weiteren anhand einer graphischen Darstellung analysiert wird.

Zur Verdeutlichung sind in Bild 11 und Bild 12 die Schmierstoffmesswerte für die jeweiligen Bandpositionen des untersuchten Coils anhand der 20 Messspuren sowie den Einzelmesswerten über die Coilbreite abgebildet. Die graphische Darstellung bestätigt die Standardabweichungen als geeigneten Indikator [49] für die Beschreibung der Homogenität der Schmierstoffverteilung über die Coilbreite. Die niedrigere Standardabweichung bei Position 1 (vgl. Bild 11) spiegelt sich in einer homogenen Schmierstoffverteilung wider, wohingegen bei Position 2 (vgl. Bild 12), bei der die Standardabweichung um fast ein dreifaches höher ist, eine signifikant inhomogenere Schmierstoffverteilung vorliegt. Anhand der beiden Graphen ist für die Position 1 (vgl. Bild 11) zu erkennen, dass die Werte von Messspur M1 bis Messspur M7 bzw. von Coilbreite 1 mm bis 600 mm bei ca. $0,70 \text{ g/m}^2$ Schmierstoff liegen. Bis zur Messspur M12 bzw. Coilbreite 1000 mm nehmen die Schmierstoffwerte ab. Die minimale Schmierstoffmenge liegt bei ca. $0,49 \text{ g/m}^2$. Anschließend steigt die Schmierstoffmenge nahezu kontinuierlich an, bis sie bei Messspur M20 bzw. bei ca. 1770 mm Coilbreite ihr Maximum erreicht und ca. $0,93 \text{ g/m}^2$ beträgt.

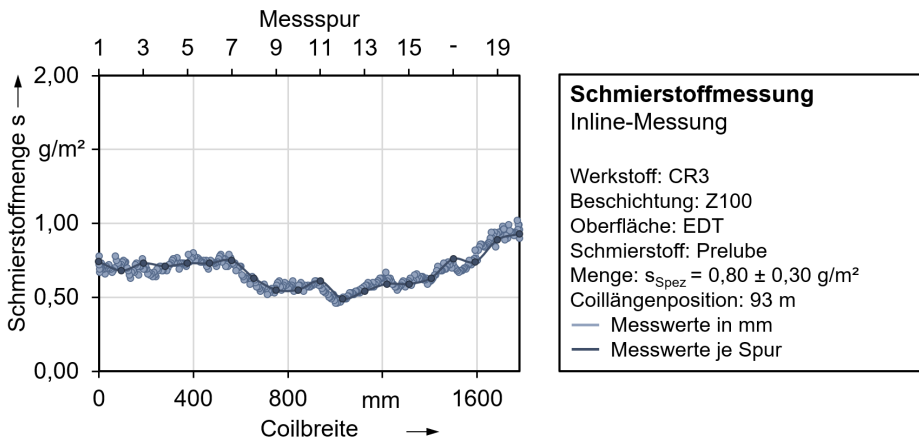


Bild 11: Schmierstoffverteilung über die Coilbreite an Coillängenposition 1 an Bandmeter 93

Die Gegenüberstellung der beiden Graphen für die Schmierstoffmesswerte über die Coilbreite bei Position 2 zeigt eine inhomogene Schmierstoffverteilung über die Coilbreite (vgl. Bild 12), welche typischerweise mit einer

geringen Schmierstoffmenge in der Bandmitte und einem Anstieg der Schmierstoffmenge in den Randbereichen einhergeht [127]. Die Charakteristik der Schmierstoffverteilung wird durch beide Graphen kenntlich. Die höchsten Schmierstoffwerte liegen bei Messspur M₄ bzw. Coilbreite 300 mm und Messspur M₁₄ bzw. Coilbreite 1225 mm, wobei durch die Zuordnung der Ursprungsdaten zu den Messspuren zum Teil eine Glättung der Daten vorgenommen wird. So liegt die maximale Schmierstoffmenge bei den Ursprungsdaten bei $s_{\max,UD} = 1,64 \text{ g/m}^2$, wohingegen bei der Zuordnung zu den Messspuren die höchste Schmierstoffmenge $s_{\max,20} = 1,46 \text{ g/m}^2$ beträgt. In der Bandmitte zwischen Messspur M₇ und Messspur M₁₃ sind die geringsten Schmierstoffmengen zu verzeichnen, welche zwischen ca. $0,34 \text{ g/m}^2$ und ca. $0,47 \text{ g/m}^2$ liegen. Eine mögliche Ursache für die hohe Übereinstimmung der jeweiligen Graphen ist, da davon ausgegangen werden kann, dass im Walzwerk der Schmierstoff gleichmäßig auf die ebene Oberfläche aufgetragen wird und dieser folglich einen nahezu geschlossenen Film bildet, wodurch keine abrupten Änderungen auftreten. Demzufolge wird durch die Mittelung der Messwerte je Messspur die Aussagekraft nicht entkräftet.

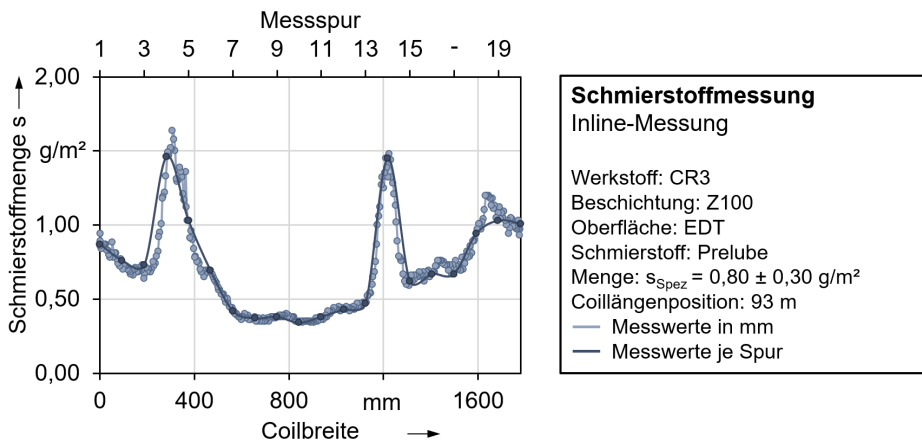


Bild 12: Schmierstoffverteilung über die Coilbreite an Coillängenposition 2 an Bandmeter 1995

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Standardabweichung ein geeignetes Maß zur Identifikation einer inhomogenen Schmierstoffverteilung ist, auch wenn die Charakteristik der Verteilung lediglich graphisch beschrieben werden kann. Des Weiteren zeigt die graphische Gegenüberstellung der Ursprungsmesswerte zu den Messwerten je Spur, dass, obwohl teilweise die Höchstwerte geglättet werden, die Aussagekraft

hinsichtlich der Verteilungscharakteristik des Schmierstoffes nicht erlischt. Schlussfolgernd zeigen die Untersuchungen, dass die Reduzierung der Datenmenge durch die Mittelung und Zuordnung der Schmierstoffmesswerte auf 20 Spuren ausreichend genau ist und die Charakteristik der Schmierstoffverteilung anhand eines größeren Umfangs an Daten erfolgen kann. Dies ermöglicht es, Faktoren, die Einfluss auf die Verteilung des Schmierstoffes haben, zu analysieren und zu bewerten.

5.1.2 Schwankungen der Schmierstoffmenge und -verteilung

Zur Untersuchung von im Serienprozess auftretenden Schwankungen der Schmierstoffmenge und -verteilung wurden die Daten von 128 Coils, welche zur Herstellung des Seitenrahmens X₁, der BMW Kompakt-SUV X-Serie, dienen, herangezogen. Der Produktionszeitraum der Coils im Walzwerk erstreckt sich über neun Monate zwischen November und Juli des Folgejahres. Der Verarbeitungszeitraum vom Glühprozess im Walzwerk bis hin zum Zuschnitt der Coils im Presswerk liegt zwischen 12 und 70 Tagen.

Ziel dieses Abschnitts ist es, ein Verständnis über das Auftreten von schwankenden Schmierstoffbedingungen zu erarbeiten. Zunächst erfolgt eine gesamthafte Analyse der zur Verfügung stehenden Daten, um den Umfang der Schwankungen zwischen den Coils zu untersuchen. In einem zweiten Schritt werden die Schwankungen, welche innerhalb eines Coils auftreten, analysiert. Bedingt durch den Herstellungsprozess der Coils im Walzwerk und dem anschließenden Logistikprozess gibt es zwei wesentliche Faktoren, die einen potenziellen Einfluss auf die Schmierstoffverteilung haben können. Die Lagerdauer ist ein bekannter Einflussfaktor [127], welcher im kleinen Umfang bereits untersucht wurde und im Zusammenhang mit dem Auftreten einer inhomogenen Schmierstoffverteilung steht. Ein weiterer Faktor, welcher untersucht wird, ist der Einfluss der Balligkeit des Bleches über die Coilbreite auf das Verteilungsverhalten des Schmierstoffes. Die Untersuchung des Ausmaßes, welches die Umverteilung bei heutzutage verwendeten Schmierstoffen, Blechdicken und Lagerungszeiträumen haben kann, ist Teil dieses Abschnitts. Zudem können aus den Untersuchungen Empfehlungen für den Produktionsprozess an der Presse abgeleitet werden. Voraussetzung für die anschließenden Streifenziehversuche ist es, einen Erkenntnisstand über das Auftreten von Schmierstoffschwankungen zu schaffen, welche als Datenbasis für die Auswahl geeigneter Coils dient. So konnten Annen et al. [151] bereits anhand von numerischen Untersuchungen zeigen, dass Chargenschwankungen, abge-

bildet durch unterschiedliche Reibzahlen und Blechdicken, in Abhängigkeit des Prozesszustandes einen Einfluss auf die Blechdickenreduktion und damit das Umformergebnis haben.

Häufigkeitsverteilung der Schmierstoffmenge mehrerer Coils

Um die Schwankungsbreite der Schmierstoffmenge bewerten zu können, werden die Coils zunächst gesamthaft anhand ihrer Schmierstoffmenge klassifiziert. Dazu wird zunächst untersucht, in welchem Streubereich die Schmierstoffmengen der Coils liegen. Die werkseitig vorgegebene Schmierstoffmenge für die Coils, aus denen die Platinen für den Seitenrahmen X1 geschnitten werden, beträgt $s_{\text{spez}} = 0,80 \pm 0,30 \text{ g/m}^2$ auf der Coiloberseite, wie auch auf der Coilunterseite. Prozessbedingte Unterschiede der Applikationsmenge des Schmierstoffes im Walzwerk sind jedoch nicht gänzlich auszuschließen. Zur Bestimmung der Häufigkeitsverteilung werden die Schmierstoffmengen jeweils für die Coiloberseite und die Coilunterseite anhand aller über die Coillänge und Coilbreite ermittelten Messwerte gemittelt. Die Häufigkeitsverteilungen der Schmierstoffmittelwerte aller 128 Coils sind in Bild 13 für die Coiloberseite und in Bild 14 für die Coilunterseite anhand eines Histogramms dargestellt.

Die Grafik zeigt, dass auf der Coiloberseite ca. 91 % der Coils eine mittlere Schmierstoffmenge zwischen $0,73 \text{ g/m}^2$ und $0,83 \text{ g/m}^2$ aufweisen. Etwa 7 % der Coils weisen eine niedrigere Schmierstoffmenge auf und bei ca. 2 % liegt die durchschnittliche Schmierstoffmenge über $0,83 \text{ g/m}^2$. Demzufolge liegen die Durchschnittswerte für die Schmierstoffmenge für die Coiloberseite innerhalb der werkseitigen Vorhaben von $s_{\text{spez}} = 0,80 \pm 0,30 \text{ g/m}^2$.

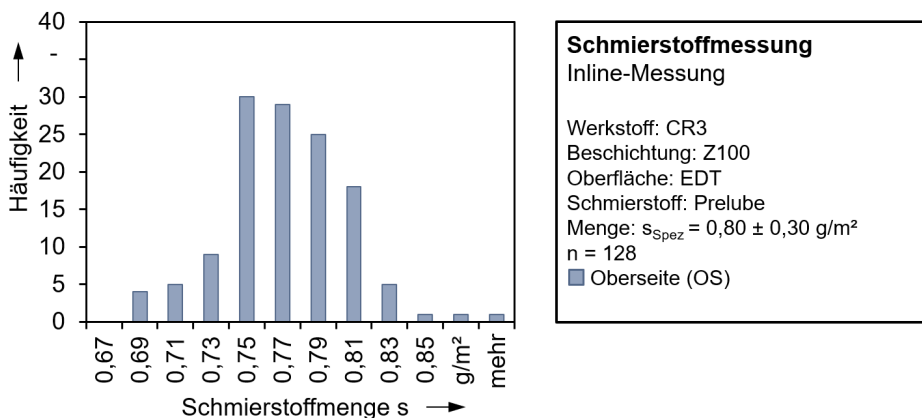


Bild 13: Häufigkeitsverteilung der Schmierstoffmittelwerte aufsummiert über das gesamte Coil für die Coiloberseite

Ein ähnliches Ergebnis zeigt sich für die Messwerte der Coilunterseite, bei der ca. 90 % der Coils eine durchschnittliche Schmierstoffmenge zwischen $0,73 \text{ g/m}^2$ und $0,85 \text{ g/m}^2$ aufweisen. Des Weiteren besitzen ca. 2 % der Coils eine durchschnittliche Schmierstoffmenge unterhalb von $0,73 \text{ g/m}^2$ und ca. 8 % der Coils eine Menge über $0,85 \text{ g/m}^2$ auf der Unterseite. Insgesamt liegt auch die Schmierstoffmittelwert für die Coilunterseite aller untersuchten Coils innerhalb der vorgegebenen Spezifikation.

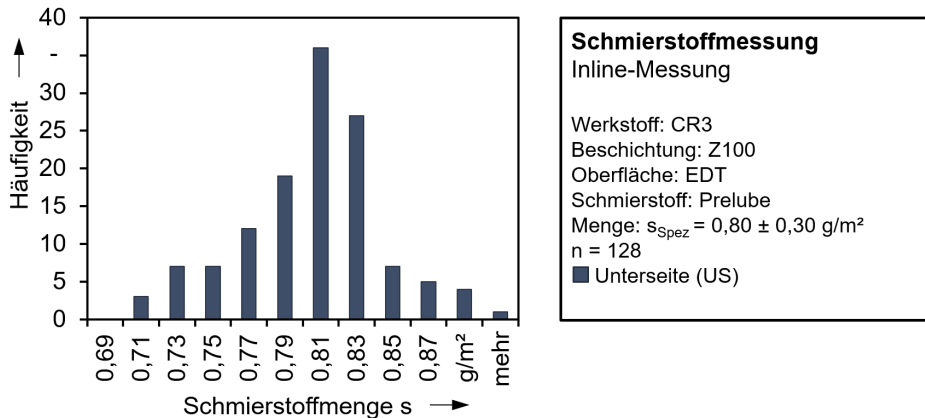


Bild 14: Häufigkeitsverteilung der Schmierstoffmittelwerte aufsummiert über das gesamte Coil für die Coilunterseite

Die durchschnittliche Schmierstoffmenge des gesamten Coilumfangs beträgt für die Coiloberseite (OS) $s_{0,OS} = 0,76 \text{ g/m}^2$ und auf der Coilunterseite (US) $s_{0,US} = 0,80 \text{ g/m}^2$. Ein potenzieller Grund für die tendenziell höheren Messwerte auf der Unterseite könnte sein, dass die jeweiligen Messköpfe, durch die Verbausituation in der Anlage, in unterschiedlichen Positionen zum Blechband stehen. Aufgrund des optischen Messprinzips (vgl. Abschnitt 4.3.2) hat der Winkel, in dem der Lichtstrahl auf die Oberfläche trifft, einen Einfluss auf das Messergebnis. Die Differenz der durchschnittlichen Schmierstoffmengen des gesamten Coilumfangs liegt bei ca. 5 % und ist als vernachlässigbar zu bewerten.

Im Walzwerk wird in der Regel beidseitig die gleiche Schmierstoffmenge auf die Blechbandoberfläche aufgebracht, bevor es zu einem Coil aufgehaspelt wird. Grundsätzlich ist ein Niveauunterschied der Schmierstoffmenge auf der Ober- und Unterseite nicht gänzlich auszuschließen. Daher wird an dieser Stelle ein Zusammenhang zwischen den Schmierstoffmengen auf der Coiloberseite und der Coilunterseite geprüft. In Bild 15 ist ein Vergleich der

für die jeweilige Coilseite ermittelten Schmierstoffmesswerte anhand eines Streudiagramms dargestellt.

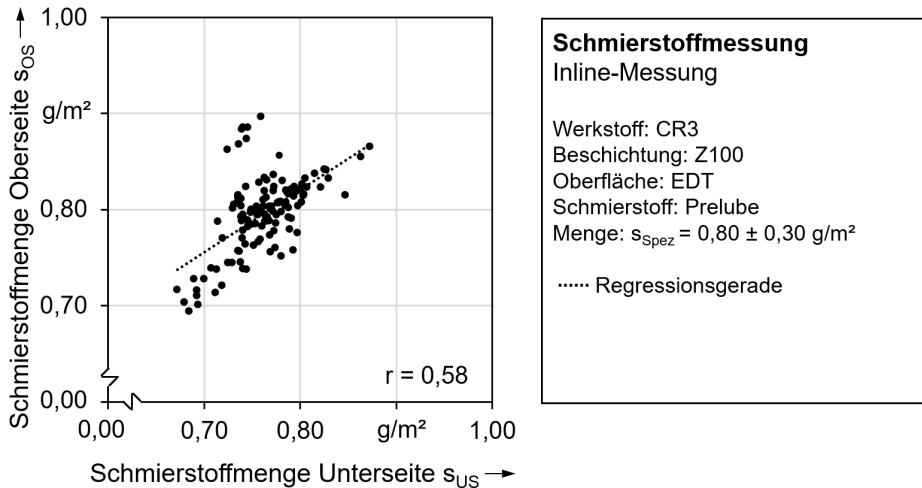


Bild 15: Korrelation der durchschnittlichen Schmierstoffmenge auf der Coiloberseite und auf der Coilunterseite

Der Korrelationskoeffizient von $r = 0,58$ deutet auf einen schwach positiven Zusammenhang hin [152]. Folglich ist davon auszugehen, dass auf beiden Seiten in etwa die gleiche durchschnittliche Schmierstoffmenge vorliegt. Eine geringe Schmierstoffmenge auf der Oberseite geht folglich mit einer geringen Schmierstoffmenge auf der Unterseite einher. Demzufolge kann ausgeschlossen werden, dass eine Seite mit einer geringen Schmierstoffmenge versehen ist, während die andere Seite eine hohe Menge an Schmierstoff ausweist. Dieser Effekt war zu erwarten, da davon auszugehen ist, dass die gleiche Menge Schmierstoff auf die jeweilige Coilseite appliziert wird und folglich der Schmierstoff in den Schmierstofftaschen der jeweiligen Oberfläche beim Abhaspeln des Coils anhaftet. Die Untersuchungen zeigen, dass geringe Schwankungen der Schmierstoffmenge von Coil zu Coil auftreten, welche jedoch innerhalb der Spezifikation liegen. Des Weiteren weist die Coiloberseite und die Coilunterseite in etwa die gleiche durchschnittliche Schmierstoffmenge auf. Es ist jedoch davon auszugehen, dass sich das Reibverhalten bei der Herstellung vom Karosseriebauteilen unter Verwendung von Coils, welche eine durchschnittliche Schmierstoffmenge an der unteren Spezifikationsgrenze besitzen, im Vergleich zu Coils, bei denen die durchschnittliche Schmierstoffmenge an der oberen Spezifikationsgrenze liegt, unterscheidet. Da eine geringe Schmierstoffmenge zu

einer höheren Reibung führt, kann das Auftreten von Rissen, ohne Anpassung der Prozessparameter an der Presse, nicht ausgeschlossen werden. Umgekehrt kann eine höhere Schmierstoffmenge zu einer Faltenbildung führen. Um bei einem Produktionsauftrag die Änderungen der Prozessparameter und damit die Anlagenstillstände so gering wie möglich zu halten, sollten Coils mit möglichst ähnlichen Schmierstoffmengen für einen Auftrag herangezogen werden. Inwieweit sich die Schmierstoffverteilung über die Coilbreite zwischen Ober- und Unterseite unterscheidet, wird im folgenden Abschnitt untersucht.

Charakteristik der Schmierstoffverteilung

Die Untersuchungen von Mohr et al. [127] haben gezeigt, dass insbesondere Schwankungen der Schmierstoffverteilung über die Coilbreite zu erwarten sind. Zudem zeigen die vorangegangenen Untersuchungen, dass die Schmierstoffmenge, unabhängig von ihrer Verteilung, auf der Coiloberseite und -unterseite in einer Wechselbeziehung stehen. Infolgedessen wird an dieser Stelle ein Zusammenhang der Verteilungscharakteristik über die Coilbreite zwischen der Coiloberseite und -unterseite analysiert. Zur Charakterisierung der Schwankungen dient die Standardabweichung σ [49] der über die Coilbreite ermittelten Schmierstoffmesswerte, welche wiederum den Mittelwert über die Coillänge der jeweiligen Messspur bilden. Die Gegenüberstellung der Standardabweichungen je Coil, für die jeweiligen Coilseite, ist in Bild 16 anhand eines Streudiagramms dargestellt.

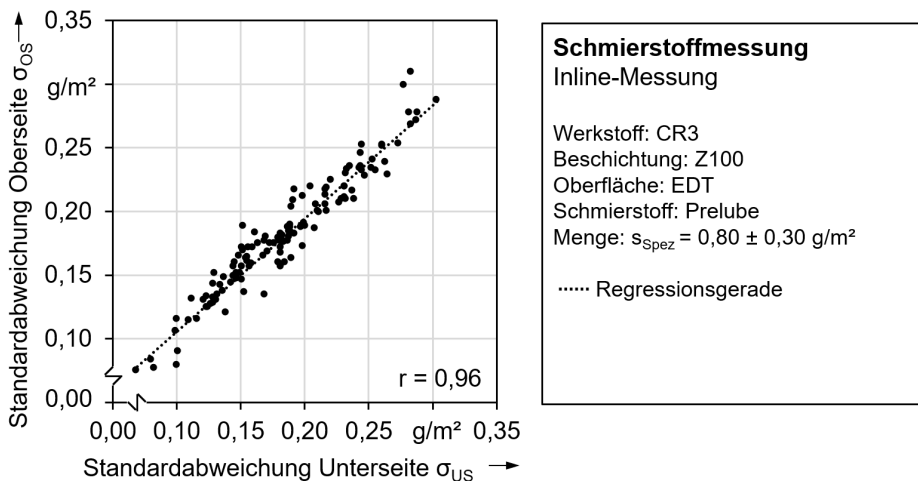


Bild 16: Korrelation der Schmierstoffverteilung anhand der Standardabweichung über die Coilbreite zwischen Coilober- und Unterseite

Es zeigt sich, dass eine signifikante Übereinstimmung der Verteilungscharakteristik zwischen der Coiloberseite und -unterseite besteht. Diese wird durch einen Korrelationskoeffizienten von $r = 0,96$, welcher einen stark positiven Zusammenhang [152] kennzeichnet, bekräftigt. Folglich geht eine starke Schmierstoffumverteilung auf der Coiloberseite (OS) mit selbiger auf der Unterseite (US) einher. Demgegenüber ist beidseitig mit einer geringen Schmierstoffumverteilung zu rechnen. Coils, bei denen lediglich eine Seite eine inhomogene Schmierstoffverteilung aufweist, wohingegen die andere Seite eine homogene Verteilung des Schmierstoffes zeigt, sind nahezu auszuschließen.

Zur Bewertung der Charakteristik der Schwankungen dient ebenfalls die Standardabweichung der Schmierstoffwerte für die Coilbreite, welche für eine Klassifizierung herangezogen wird. In Bild 17 sind die Häufigkeitsverteilungen der Standardabweichung für die Coiloberseite und Coilunterseite gegenübergestellt. Purr [49] gibt an, dass eine hohe Standardabweichung mit einer hohen Schmierstoffumverteilung einhergeht. Die auf Basis der 128 Coils ermittelten Standardabweichungen liegen in einem Bereich zwischen $\sigma_{\min} = 0,07$ und $\sigma_{\max,US} = 0,31$ auf der Unterseite bzw. $\sigma_{\max,OS} = 0,30$ auf der Oberseite. Die Grafik zeigt, dass die prozentuale Häufigkeit der Standardabweichungen σ kleiner 0,12 für die Ober- und Unterseite ca. 8 % bzw. ca. 7 % beträgt, welche auf eine geringe Schmierstoffumverteilung hindeuten.

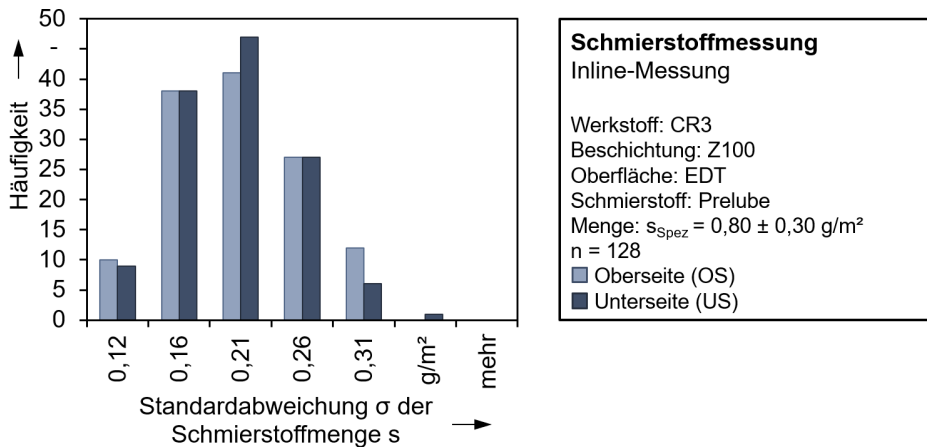


Bild 17: Histogramm der für die Coilober- und Unterseite ermittelten Standardabweichungen der Schmierstoffmenge als Indikator für die Schmierstoffumverteilung

Die Standardabweichungen über $\sigma = 0,26$ kennzeichnet folglich Coils mit einer hohen Schmierstoffumverteilung. Der Anteil dieser Coils liegt bei ca. 9 % bzw. 5 % jeweils für die Coiloberseite wie auch für die Unterseite. Dementsprechend sind die Anteile, bei denen von einer mittleren Schmierstoffumverteilung auszugehen ist und die Standardabweichung größer $\sigma = 0,12$ und kleiner als $\sigma = 0,31$ beträgt, bei 83 % bzw. 88 %. Eine Annahme für die hohe Übereinstimmung der Häufigkeitsverteilung für die Schmierstoffmenge auf den jeweiligen Coilseiten ist, dass in der Regel im Walzwerk die gleiche Schmierstoffmenge auf die Coiloberfläche appliziert wird. Zudem ist davon auszugehen, dass die Schmierstoffverteilung auf beiden Seiten des Coils eine vergleichbare Charakteristik aufweist. Dieser Zusammenhang wird im Folgenden genauer analysiert. Eine mögliche Ursache für den hohen Anteil an Coils mit einer mittleren Schmierstoffumverteilung ist, dass, wie die Untersuchungen von Mohr et al. [127] gezeigt haben, die Lagerdauer ein Faktor ist, welcher Einfluss auf die Verteilung des Schmierstoffes hat. Folglich führt eine Nichteinhaltung des FIFO-Prinzips (engl.: first in first out) bei der Lagerverwaltung, in wenigen Ausnahmefällen, zu einer kürzeren bzw. längeren Lagerdauer der Coils, welche sich in den Häufigkeiten von unter 10 % widerspiegeln. Der Einfluss der Lagerdauer auf die Schmierstoffumverteilung wird in Abschnitt 5.1.3 ausführlich untersucht.

Um die unterschiedlich starke Ausprägung der Schmierstoffumverteilung spezifischer charakterisieren zu können, wurden auf Basis der Häufigkeitsverteilung Coils mit einer geringen, mittleren und hohen Standardabweichung zur weiteren Analyse herangezogen. In Bild 18 sind die Standardabweichungen der Schmierstoffmenge von drei Coils (Coil_A, Coil_B und Coil_C) jeweils für die Coiloberseite und -unterseite dargestellt.

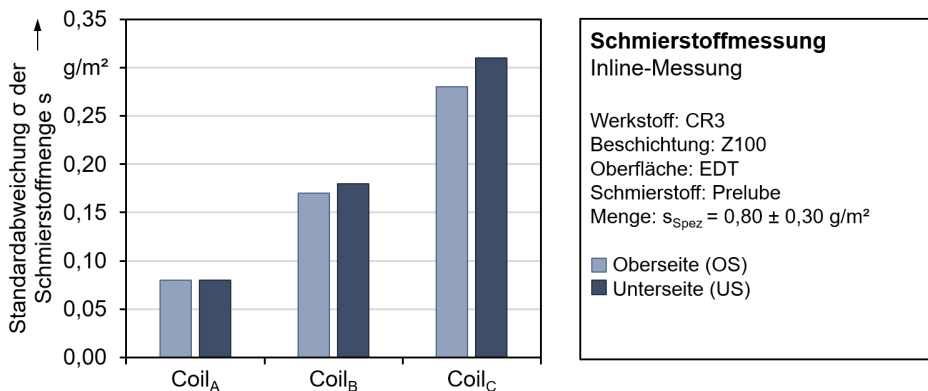


Bild 18: Darstellung der Standardabweichung σ der Schmierstoffmenge s für die Coiloberseite und Coilunterseite für drei Coils

Die Standardabweichung der Schmierstoffmenge beträgt für Coil_A jeweils für die Ober- und Unterseite $\sigma_{\text{CoilA}} = 0,08$, welche auf eine geringe Schmierstoffumverteilung hindeutet. Coil_B weist für die Coiloberseite eine Standardabweichung von $\sigma_{\text{CoilB,OS}} = 0,17$ und für die Unterseite von $\sigma_{\text{CoilB,US}} = 0,18$ auf. Beide Werte lassen eine mittlere Schmierstoffumverteilung vermuten. Die Standardabweichungen der Schmierstoffmenge für Coil_C zeigen Werte von $\sigma_{\text{CoilC,OS}} = 0,28$ und $\sigma_{\text{CoilC,US}} = 0,31$, entsprechend für die Coiloberseite und Coilunterseite. Daraus lässt sich schließen, dass eine stark inhomogene Verteilung der Schmierstoffmenge vorliegen muss, welche im Weiteren anhand der Schmierstoffwerte über die Coilbreite auf Basis der 20 Messspuren analysiert wird. In Bild 19 sind exemplarisch die Schmierstoffmesswerte für die Ober- und Unterseite über die Coilbreite der drei Coils (Coil_A, Coil_B und Coil_C), welche sich durch ihre Standardabweichung der Schmierstoffverteilung unterscheiden, dargestellt. Die Werte einer Messspur ergeben sich aus dem Mittelwert aller über die Spur ermittelten Schmierstoffmesswerte. Die für Coil_A ermittelten Messwerte für die Coiloberseite und -unterseite zeigen eine nahezu homogene Schmierstoffverteilung über die Coilbreite und werden durch eine Standardabweichung von $\sigma_{\text{CoilA}} = 0,08$ bestätigt. Die Messwerte aller 20 Messspuren liegen innerhalb der vorgegebenen Spezifikation. Die Gegenüberstellung der Schmierstoffmittelwerte je Messspur für die Coiloberseite und -unterseite zeigt, dass keine homogene Schmierstoffverteilung über die Coilbreite bei Coil_B gegeben ist. Dies spiegelt sich ebenfalls in den Standardabweichungen von $\sigma_{\text{CoilB,OS}} = 0,17$ und $\sigma_{\text{CoilB,US}} = 0,18$ wider. Die Messwerte liegen bis auf eine Ausnahme innerhalb der Spezifikation, wobei das gesamte Spezifikationspektrum ausgeschöpft wird. Somit liegen die Werte bei Messspur M7 und M8 sowie bei Messspur M15 und M16 mit ca. 1,05 bis 1,13 g/m² an der oberen Grenze. In der Coilmitte im Bereich von Messspur M10 bis M13 betragen die Messwerte zwischen 0,55 und 0,62 g/m² Schmierstoff, welche wiederum an der unteren Spezifikationsgrenze liegen. Das Coil_C zeichnet sich durch hohe Standardabweichungen von $\sigma_{\text{CoilC,OS}} = 0,28$ bzw. $\sigma_{\text{CoilC,US}} = 0,31$ auf den jeweiligen Seiten aus. Die Schmierstoffmenge ist stark inhomogen über die Coilbreite verteilt und übersteigt sowohl die obere als auch die untere Spezifikationsgrenze. Insbesondere die Werte bei Messspur M6 und M7 wie auch bei Messspur M16 und M17, bei denen die Werte zwischen 1,20 g/m² und 1,45 g/m² liegen, überschreiten das vorgegebene Schmierstoffmaximum von $s_{\text{Spez,max}} = 1,10$ g/m². Ähnlich wie bei Coil_B weisen auch bei Coil_C die Messspuren M10 bis M13 die geringsten Schmierstoffmengen auf. In diesem Fall beträgt die Menge zwischen 0,39 g/m² und 0,44 g/m² und liegt dementsprechend unterhalb der zulässigen minimalen Schmierstoffmenge von $s_{\text{Spez,min}} = 0,50$ g/m².

5 Ursachenanalyse und Charakterisierung von im Serienprozess erfassten Halbzeugeigenschaften

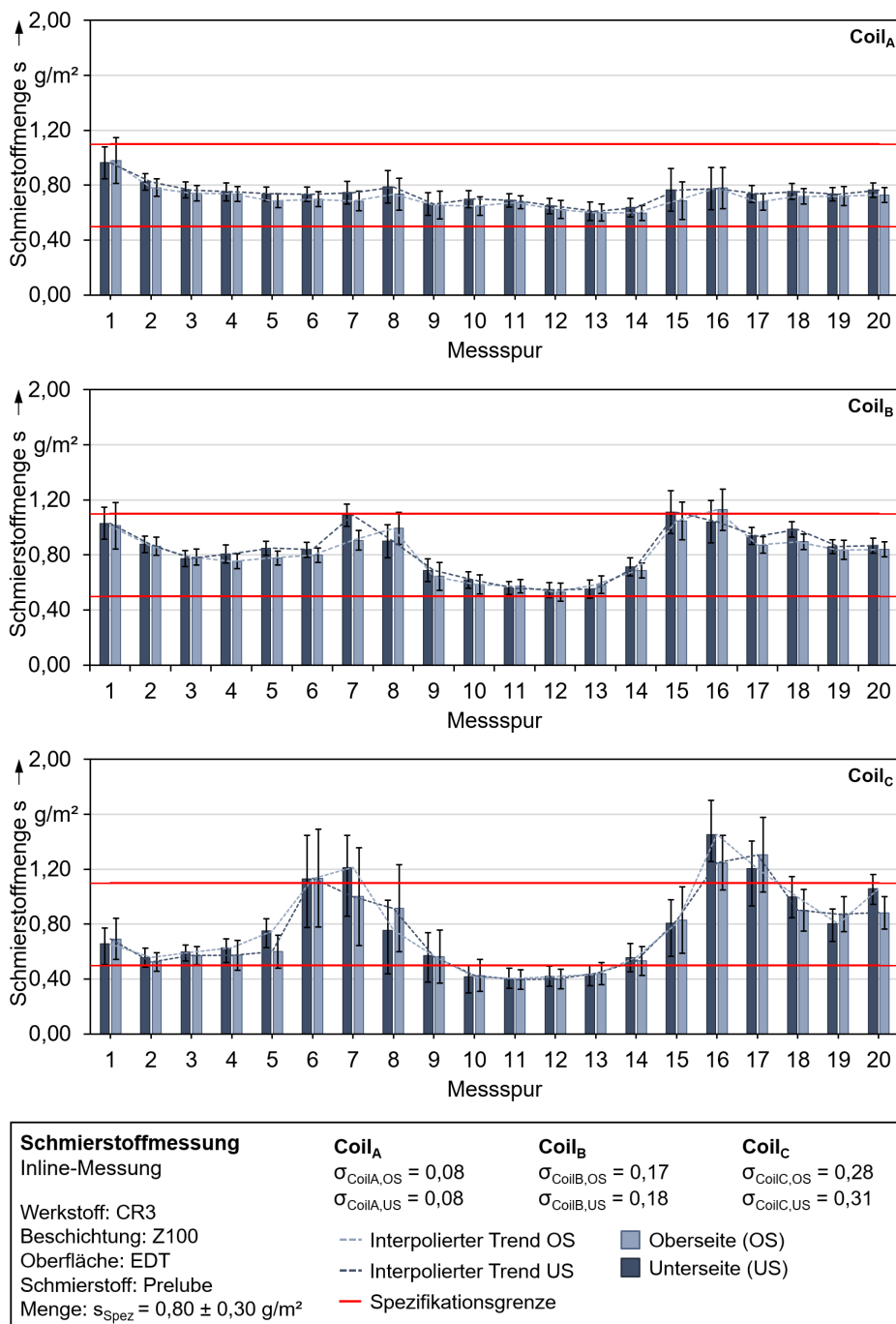


Bild 19: Schmierstoffmengen dreier Coils mit unterschiedlich starker Schmierstoffumverteilung Coil_A (oben), Coil_B (mitte) und Coil_C (unten)

Insbesondere anhand von Coil_C wird ersichtlich, dass die Schmierstoffmenge aus der Coilmitte in Richtung der Randbereiche verdrängt wird. Entgegen der Beschreibungen von Irle et al. [145], welche eine hohe Schmierstoffmenge in den äußeren Randbereichen aufgrund einer Schmierstoffumverteilung feststellen, scheint sich der Schmierstoff in diesem Fall an einer bestimmten Position zwischen der Coilmitte und dem Coilrand anzusammeln. Dieser Effekt ist bereits anhand der Messwerte von Coil_B zu erkennen und tritt bei Coil_C in stärkerer Ausprägung auf. Ein Grund dafür könnte ein ungleichmäßiges Blechdickenprofil über die Coilbreite sein, welches durch das im Walzwerk verwendete Walzgerüst hervorgerufen wird. Des Weiteren deuten die Standardabweichungen der einzelnen Messspuren darauf hin, dass sich die Schmierstoffverteilung in Coillängenrichtung nur geringfügig ändert. Eine Ausnahme bilden die Werte für die Messspuren M6 bis M8 und M15 bis M17, insbesondere bei Coil_C. Die im Vergleich zu den anderen Messspuren signifikant höheren Schwankungen deuten darauf hin, dass eine inhomogene Schmierstoffverteilung über die Coillänge vorliegt. Diese Hypothese wird im nächsten Abschnitt analysiert. Zusätzlich verdeutlichen die Grafiken, dass die Schmierstoffverteilung auf der Coiloberseite und -unterseite der gleichen Charakteristik entsprechen.

Die hohe Übereinstimmung der Schmierstoffmesswerte der einzelnen Messspuren jeweils auf der Ober- und Unterseite der Coils werden durch die dazugehörigen Korrelationskoeffizienten bekräftigt. Die Korrelationskoeffizienten der drei Coils, welche $r_A = 0,96$, $r_B = 0,94$ und $r_C = 0,95$ betragen, bestätigen einen nahezu perfekten bzw. stark positiven Zusammenhang [152] zwischen den Messwerten der jeweiligen Coilseite. Bild 20 zeigt die Gegenüberstellung der Schmierstoffwerte für die Coiloberseite und Coilunterseite für Coil_A, Coil_B und Coil_C anhand von Korrelationsdiagrammen. Die hohe Übereinstimmung der Schmierstoffmenge und Schmierstoffverteilung über die Coilbreite war zu erwarten, da davon auszugehen ist, dass die gleiche Schmierstoffmenge auf die jeweiligen Bandseiten im Walzwerk appliziert wird und zudem die Coiloberseite sowie die Coilunterseite den gleichen Faktoren, welche Einfluss auf die Homogenität der Verteilung des Schmierstoffes nehmen, ausgesetzt sind. Demzufolge werden die Messwerte der Coiloberseite zur weiteren Analyse der Charakteristik der Schmierstoffverteilung, sowie für die weiteren Untersuchungen der Einflussfaktoren auf die Umverteilung herangezogen.

5 Ursachenanalyse und Charakterisierung von im Serienprozess erfassten Halbzeugeigenschaften

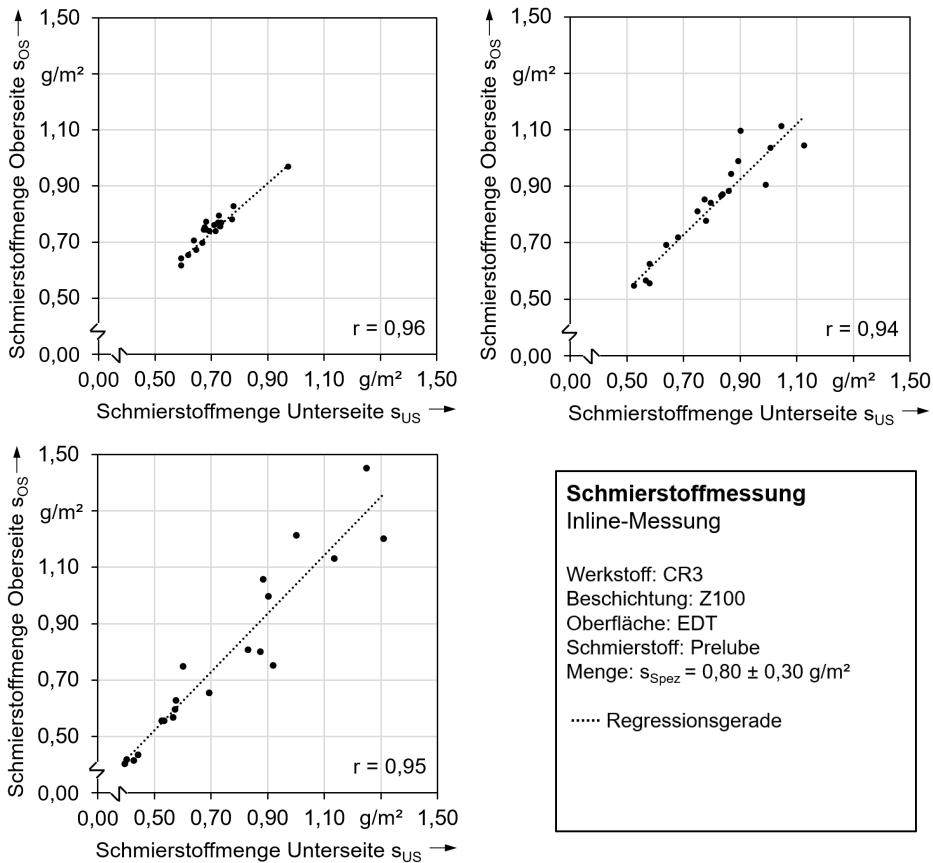


Bild 20: Korrelation der Schmierstoffverteilung zwischen Ober- und Unterseite für Coil_A (oben links), Coil_B (oben rechts) und Coil_C (unten rechts).

Schwankungen der Schmierstoffmenge innerhalb eines Coils

Die vorangegangenen Untersuchungen haben gezeigt, dass die Schmierstoffmenge über die Breite eines Coils Schwankungen unterschiedlicher Ausprägung unterliegen kann. Zur Ermittlung der Umverteilungscharakteristik über die Länge und Breite innerhalb der Coils wurden die Coils in Abschnitte von 250 m unterteilt und für die entsprechenden Bereiche die Schmierstoffmenge je Messspur gemittelt. Die Messwerte beziehen sich jeweils auf die Coiloberseite. In Bild 21 und Bild 22 sind exemplarisch die Messwerte über die Coilbreite für Coil_A und Coil_D für fünf Abschnitte im Coil dargestellt. Zusätzlich zeigen die Grafiken ein Diagramm mit den Messwerten aller zehn Abschnitte im Coil. Die beiden Coils unterscheiden sich anhand ihrer Umverteilungscharakteristik, welche entsprechend der

Standardabweichung mit $\sigma_A = 0,08$ und $\sigma_D = 0,150$ durch eine homogene Schmierstoffverteilung ($Coil_A$) bzw. eine mittelstark ausgeprägte inhomogene Schmierstoffverteilung ($Coil_D$) gekennzeichnet sind.

Die für $Coil_A$ ermittelten Messwerte zeigen, dass die Schmierstoffmenge in allen fünf Abschnitten im Coil innerhalb der Spezifikation liegt. Die durchschnittliche Schmierstoffmenge in den Abschnitten im Coil beträgt zwischen $0,69 \text{ g/m}^2$ und $0,73 \text{ g/m}^2$. Des Weiteren zeigen die Diagramme, dass etwa bis zur Hälfte des Coils bei Bandmeter 1250 eine homogene Schmierstoffverteilung vorliegt. Lediglich vereinzelt sind höhere Werte für die Messspuren M8 und M9 bzw. für die Messspuren M15 und M16 zu verzeichnen. Im weiteren Verlauf ist eine zunehmende Umverteilung des Schmierstoffes zu erkennen. Die durchschnittliche Schmierstoffmenge von Messspur M10 bis M14 beträgt im Bereich der ersten Position im Coil $0,66 \text{ g/m}^2$, wohingegen die durchschnittliche Schmierstoffmenge im letzten Coilabschnitt $0,59 \text{ g/m}^2$ aufweist. Zudem liegt die minimale Schmierstoffmenge im ersten Coilabschnitt bei $0,59 \text{ g/m}^2$ (M9), während im neunten Abschnitt das Schmierstoffminimum einen Wert von $0,53 \text{ g/m}^2$ (M12) aufzeigt. Dies deutet darauf hin, dass der Schmierstoff aus der Coilmitte in die Randbereiche verdrängt wird. Ein Grund dafür könnte die zunehmende Flächenpressung der inneren Wicklungen eines Coils sein. Ein signifikanter Trend anhand der Standardabweichung für die Schmierstoffmenge je Coilabschnitt ist nicht zu verzeichnen. Dies kann damit begründet werden, dass bei $Coil_A$ mit einer Standardabweichung von $\sigma_A = 0,08$ grundsätzlich eine geringe Schmierstoffumverteilung vorliegt.

Die Schmierstoffwerte, welche in den verschiedenen Abschnitten für $Coil_D$ ermittelt wurden, zeigen eine ähnliche Charakteristik über die Coillänge (vgl. Bild 22). In diesem Fall weisen hingegen lediglich die ersten 250 Bandmeter eine homogene Schmierstoffverteilung auf. Aus den Diagrammen ist zu entnehmen, dass im weiteren Verlauf die Schmierstoffumverteilung mit zunehmender Bandlänge zunimmt und zum Ende des Coils hin eine stark ausgeprägte Umverteilungscharakteristik zu erkennen ist. Im ersten Abschnitt sind Schmierstoffmengen zwischen $0,63 \text{ g/m}^2$ und $0,99 \text{ g/m}^2$ zu verzeichnen. Bereits in Abschnitt 3 beträgt das Schmierstoffminimum $0,54 \text{ g/m}^2$. Vergleichbare Werte ergeben sich im Abschnitt 5 zwischen Messspur M9 und M13. Diese liegen zwischen $0,55 \text{ g/m}^2$ und $0,61 \text{ g/m}^2$. Im selben Abschnitt sind zudem Schmierstoffwerte an der oberen Spezifikationsgrenze zu erkennen.

5 Ursachenanalyse und Charakterisierung von im Serienprozess erfassten Halbzeugeigenschaften

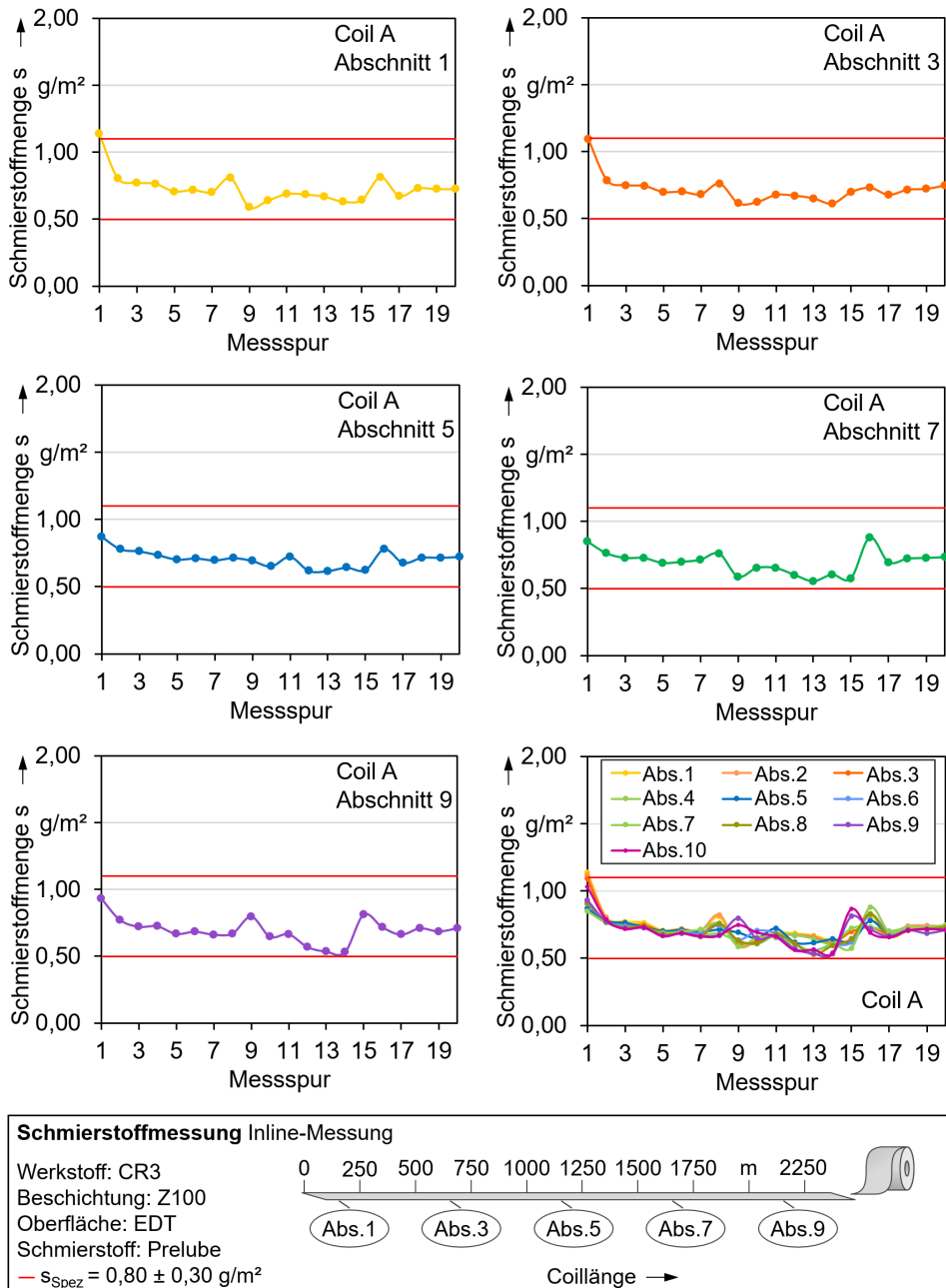


Bild 21: Exemplarische Darstellung der Schmierstoffverteilung von fünf Abschnitten (Abs.) im Coil über die Coillbreite in Abhängigkeit der Position in Coillängenrichtung für Coil_A

5.1 Erfassung und Charakterisierung von Schwankungen der Schmierstoffmenge und Schmierstoffverteilung

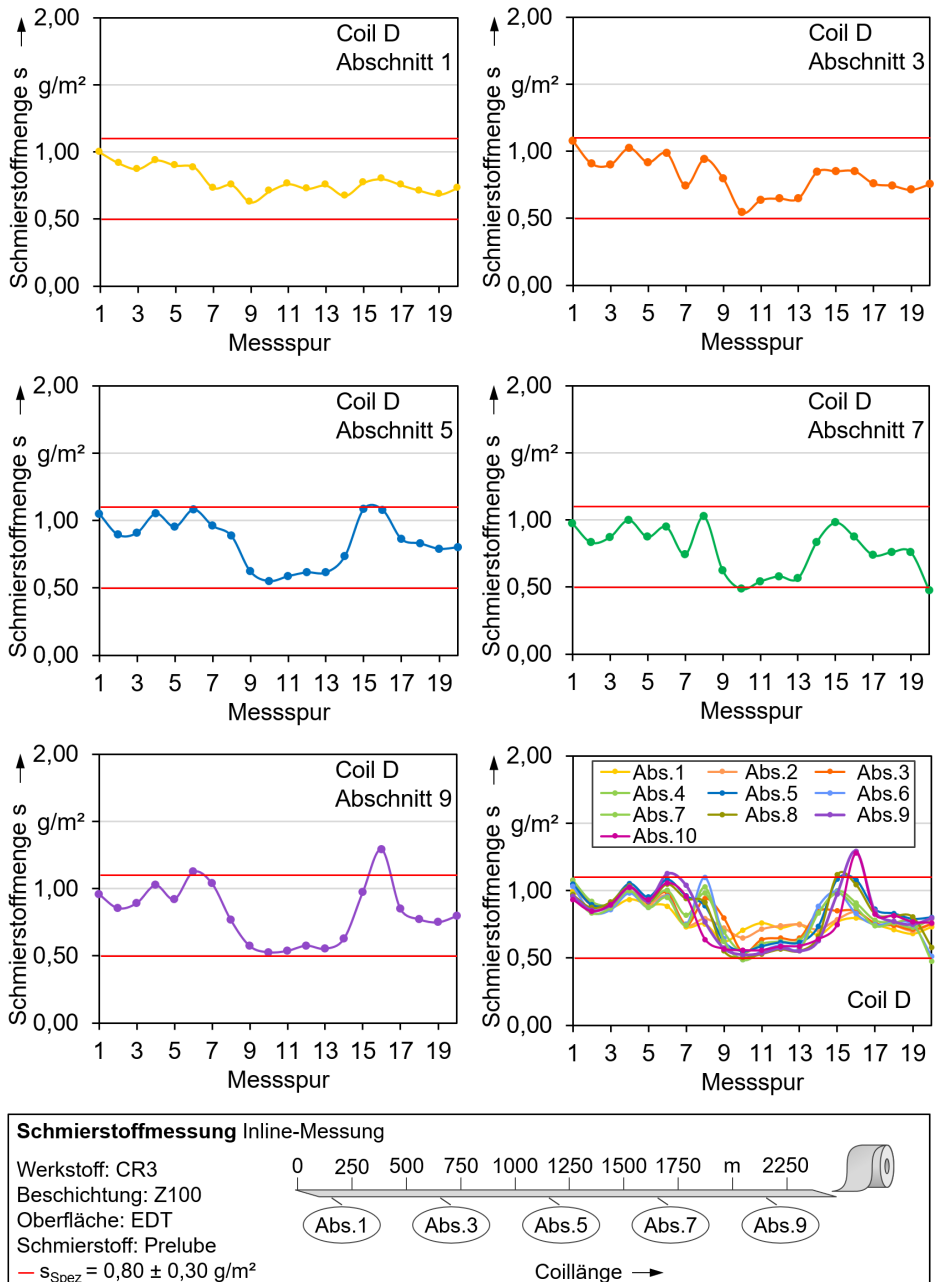


Bild 22: Exemplarische Darstellung der Schmierstoffverteilung von fünf Abschnitten (Abs.) im Coil über die Coillbreite in Abhängigkeit der Position in Coillängenrichtung für Coil_D

An Messspur M6, M15 und M16 ergeben sich Messwerte von ca. $1,08 \text{ g/m}^2$. Im letzten Abschnitt des Coils zwischen Bandmeter 2000 und Bandmeter 2250 ist die ausgeprägteste Schmierstoffumverteilung zu verzeichnen. Zwischen Messspur M9 und M14 liegen die Schmierstoffmengen zwischen $0,53 \text{ g/m}^2$ und $0,63 \text{ g/m}^2$ und befinden sich damit an der unteren Spezifikationsgrenze der zulässigen Schmierstoffmenge. Darüber hinaus ist in diesem Coilabschnitt auch die höchste Schmierstoffmenge mit $1,29 \text{ g/m}^2$ für Messspur M19 zu verzeichnen, welche die obere Spezifikationsgrenze von $s_{\text{Spez,max}} = 1,10 \text{ g/m}^2$ überschreitet. Zur Verdeutlichung der Zunahme der Schmierstoffumverteilung über die Coillänge sind im Bild 23 die Standardabweichungen der Schmierstoffmenge über die Coilbreite für die zuvor im Querschnitt dargestellten fünf Coilabschnitte abgebildet. Es ist zu erkennen, dass der erste Abschnitt (Abs. 1) mit einer Standardabweichung von $\sigma_{\text{Abs.1}} = 0,10$ eine geringe Schmierstoffumverteilung aufweist. Die Abschnitte Abs. 3 bis Abs. 9 besitzen hingegen eine mittlere Schmierstoffumverteilung und verzeichnen Werte zwischen $\sigma = 0,14$ und $\sigma = 0,21$ für die Standardabweichung der Schmierstoffmenge über die Coilbreite. Zudem ist eine signifikante Zunahme der Schmierstoffumverteilung über die Coillänge anhand der Trendlinie zu erkennen.

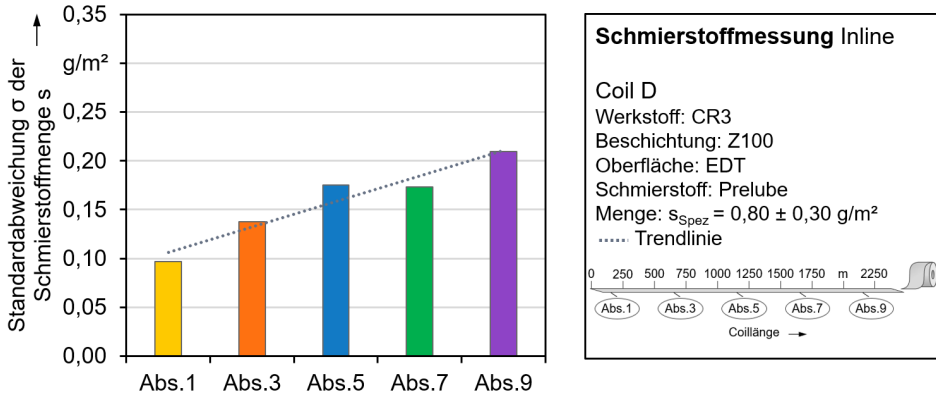


Bild 23: Exemplarische Darstellung der Standardabweichungen der Schmierstoffmenge von fünf Abschnitten (Abs.) im Coil über die Coilbreite für Coil_D

Die Analyse der beiden Coils zeigt, dass die Schmierstoffverteilung in Coillängenrichtung unabhängig von der Ausprägung der Umverteilung zunimmt. Ein möglicher Grund für die zunehmende Umverteilung des Schmierstoffes über die Coillänge ist, dass beim Aufhaspeln des Blechbands im Walzwerk zunächst ein fester Kern gewickelt wird und im weiteren Verlauf die Wicklungen mit einer geringen Wickelspannung aufgehaspelt

werden. Die geringere Wickelspannung der äußeren Windungen trägt dazu bei, dass die Windungen im Coilinneren weniger unter Spannung stehen und folglich vor Beschädigungen geschützt werden [153]. Demzufolge liegen im Coilinneren höhere Flächenpressungen vor, die dazu führen, dass der Schmierstoff in die Seitenbereiche des Coils verdrängt wird.

Die durchschnittliche Schmierstoffmenge in den jeweiligen Abschnitten von Coil_D beträgt zwischen 0,77 g/m² und 0,85 g/m². Im Vergleich zu Coil_A liegen die Schmierstoffwerte ca. 0,10 g/m² höher. Zugleich zeigt die Schmierstoffumverteilung eine stärker ausgeprägte Charakteristik. Obwohl die Vermutung nahe liegt, dass eine Korrelation zwischen der Schmierstoffmenge und der Ausprägung der Umverteilung besteht, konnte dieser Zusammenhang nicht eindeutig nachgewiesen werden, wie aus Bild 24 zu entnehmen ist. Dies wird ebenfalls durch einen Korrelationskoeffizienten von $r = 0,36$ bestärkt, welcher einem schwach positiven Zusammenhang entspricht.

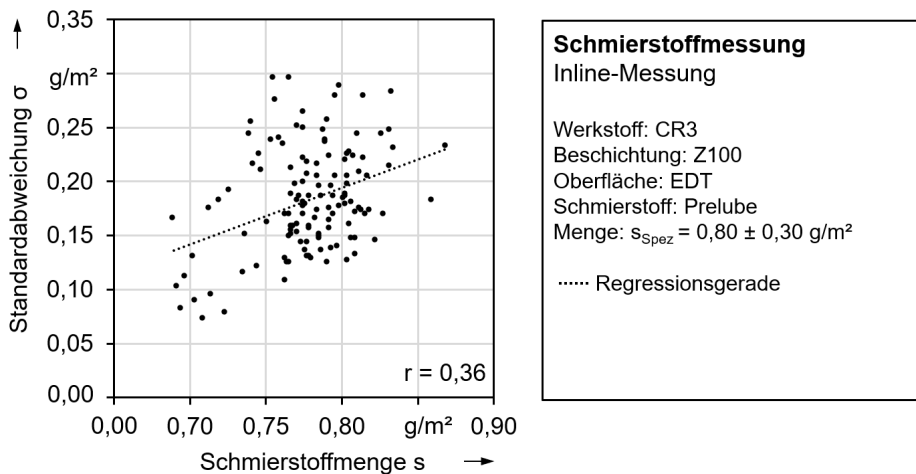


Bild 24: Streudiagramm der durchschnittlichen Schmierstoffmenge je Coil und der Standardabweichung als Maß für die Schmierstoffumverteilung

Zusammenfassend haben die Untersuchungen gezeigt, dass die durchschnittliche Schmierstoffmenge auf der Coiloberseite und Coilunterseite der werkseitig vorgegebenen Spezifikation entsprechen. Zudem konnte nachgewiesen werden, dass die Umverteilungscharakteristik des Schmierstoffes sowie die Schmierstoffmenge auf den jeweiligen Coilseiten eine hohe Übereinstimmung aufzeigen. Die Standardabweichung als Maß für die Ausprägung der Schmierstoffumverteilung hat sich bestätigt, wodurch belegt werden kann, dass mehr als 80 % der Coils eine mittelstark bis stark

ausgeprägte Schmierstoffumverteilung aufweisen. Die Charakteristik der Umverteilung ist bei allen Coils nahezu übereinstimmend, wobei sich diese anhand der Ausprägung unterscheidet. Des Weiteren hat sich gezeigt, dass eine Umverteilung der Schmierstoffmenge von Coil zu Coil wie auch innerhalb eines Coils mit zunehmender Bandlänge auftritt. Ein Zusammenhang zwischen der Schmierstoffmenge und der Umverteilung des Schmierstoffes auf der Oberfläche konnte nicht eindeutig nachgewiesen werden. Tabelle 4 fasst die wesentlichen Erkenntnisse hinsichtlich der Schwankungen der Schmierstoffmenge und Schmierstoffverteilung noch einmal zusammen.

Tabelle 4: Zusammenfassung der Erkenntnisse aus den Untersuchungen zur Charakterisierung von Schwankungen der Schmierstoffmenge und Schmierstoffverteilung

Nr.	Untersuchter Effekt	Erkenntnis
1	Schwankung der Schmierstoffmenge von Coil zu Coil - Oberseite (OS) bzw. Unterseite (US)	Innerhalb der werkseitigen Vorgaben
2	Schwankung der Schmierstoffmenge zwischen OS und US	Nahezu gleiche Schmierstoffmenge
3	Schwankung der Schmierstoffverteilung zwischen OS und US	Nahezu gleiche Schmierstoffverteilung
4	Schwankung der Schmierstoffverteilung von Coil zu Coil	Homogene Schmierstoffverteilung bei $\leq$ ca. 10 % der Coils
		Inhomogene Schmierstoffverteilung bei $\geq$ ca. 80 % der Coils
		Stark inhomogene Schmierstoffverteilung bei $\leq$ ca. 10 % der Coils
5	Schwankung der Schmierstoffverteilung über die Coillänge	Zunahme inhomogener Schmierstoffverteilung
6	Korrelation Schmierstoffmenge und Schmierstoffverteilung	Kein signifikanter Zusammenhang

In Hinblick auf eine störungsfreie Produktion sollten nach Möglichkeit Coils mit der gleichen Schmierstoffcharakteristik verarbeitet werden, da davon auszugehen ist, dass diese vergleichbare, für die Tribologie relevante, Eigenschaften besitzen und dementsprechend ein vergleichbares

Reibverhalten zeigen. Dies hätte zur Folge, dass weniger Anpassungen der Prozessparameter wie beispielsweise Änderungen der Blechhalterkräfte während einer Abpressung vorgenommen werden müssten. Darüber hinaus ist davon auszugehen, dass vornehmlich bei der Abpressung der letzten Platinen aus einem Coil Qualitätsprobleme auftreten, da diese eine tendenziell stärkere Schmierstoffumverteilung aufweisen im Vergleich zu den ersten Platinen eines Coils.

5.1.3 Einflussfaktoren auf die Schmierstoffverteilung

Die vorangegangenen Untersuchungen haben gezeigt, dass die Charakteristik der Schmierstoffverteilung unterschiedliche Ausprägungen annehmen kann. Als ursächlich werden drei wesentliche Einflussfaktoren angenommen. Dazu zählen die Lagerdauer des Coils [127], die Flächenpressung, welche durch das Aufhaspeln des Blechbands wirkt [125] und mit der Balligkeit des Blechs einhergeht, sowie die Temperatur [127], der die Coils während des Transports und der Lagerung ausgesetzt sind. Im Fokus dieser Arbeit steht die Erfassung der produktionsrelevanten Daten im Presswerk, weshalb keine Temperaturwerte während des Transports und der Lagerung erfasst wurden. Es ist jedoch davon auszugehen, dass mit steigender Temperatur die Schmierstoffviskosität abnimmt und folglich eine Verdrängung des Schmierstoffes in die Randbereiche des aufgehaspelten Coils begünstigt wird. Im Folgenden wird der Einfluss der Lagerdauer und der Balligkeit des Bleches auf die Schmierstoffumverteilung untersucht.

Einfluss der Lagerdauer

Die Untersuchungen zur Bestimmung des Einflusses der Lagerdauer auf das Verteilungsverhalten des Schmierstoffes werden zunächst anhand von zwei Umfängen mit jeweils drei Coils vorgenommen, welche sich anhand des Glühdatums im Walzwerk differenzieren und zusätzlich nach unterschiedlich langer Lagerdauer zu Platinen vereinzelt wurden. Die Bewertung der Umverteilungscharakteristik erfolgt wiederum auf Basis der über die Coillänge gemittelten Schmierstoffmittelwerte je Messspur.

In Bild 25 (oben) sind die Messwerte von drei Coils (Coil_A, Coil_E und Coil_F) dargestellt, deren Glühdatum auf Anfang Mai datiert wird und welche nach ca. 19 bzw. 25 Tagen an der Coilanlage weiterverarbeitet wurden. Zu erkennen ist, dass alle drei Coils eine nahezu homogene Schmierstoffverteilung über die Coilbreite, innerhalb der Spezifikationsgrenzen, aufweisen. Die durchschnittliche Schmierstoffmenge der Coils beträgt $s_{\emptyset, \text{CoilA}} = 0,71 \text{ g/m}^2$, $s_{\emptyset, \text{CoilE}} = 0,69 \text{ g/m}^2$ sowie $s_{\emptyset, \text{CoilF}} = 0,73 \text{ g/m}^2$ und ist damit etwas unterhalb

der geforderten Durchschnittsmenge von $s_{\text{Spez}} = 0,80 \pm 0,30 \text{ g/m}^2$. Mit Ausnahme der Randbeölung von Coil_F, bei der die Schmierstoffmenge an Messspur M1 $s_{\text{max,CoilF}} = 1,36 \text{ g/m}^2$ beträgt, befinden sich die Messwerte innerhalb der werkseitigen Vorgaben. Des Weiteren ist aus dem Bild zu entnehmen, dass die Graphen einen nahezu konstanten Verlauf über die Coilbreite zeigen, bei dem lediglich die Messwerte der Messspuren M8 und M16 geringfügig höhere Schmierstoffmengen aufweisen. Die Messwerte liegen mit $s_{\text{M8,CoilA}} = 0,74 \text{ g/m}^2$ und $s_{\text{M16,CoilA}} = 0,78 \text{ g/m}^2$, $s_{\text{M8,CoilF}} = 0,86 \text{ g/m}^2$ und $s_{\text{M16,CoilF}} = 0,87 \text{ g/m}^2$, sowie $s_{\text{M8,CoilE}} = 0,79 \text{ g/m}^2$ und $s_{\text{M16,CoilE}} = 0,79 \text{ g/m}^2$ über den jeweiligen Schmierstoffdurchschnittswerten.

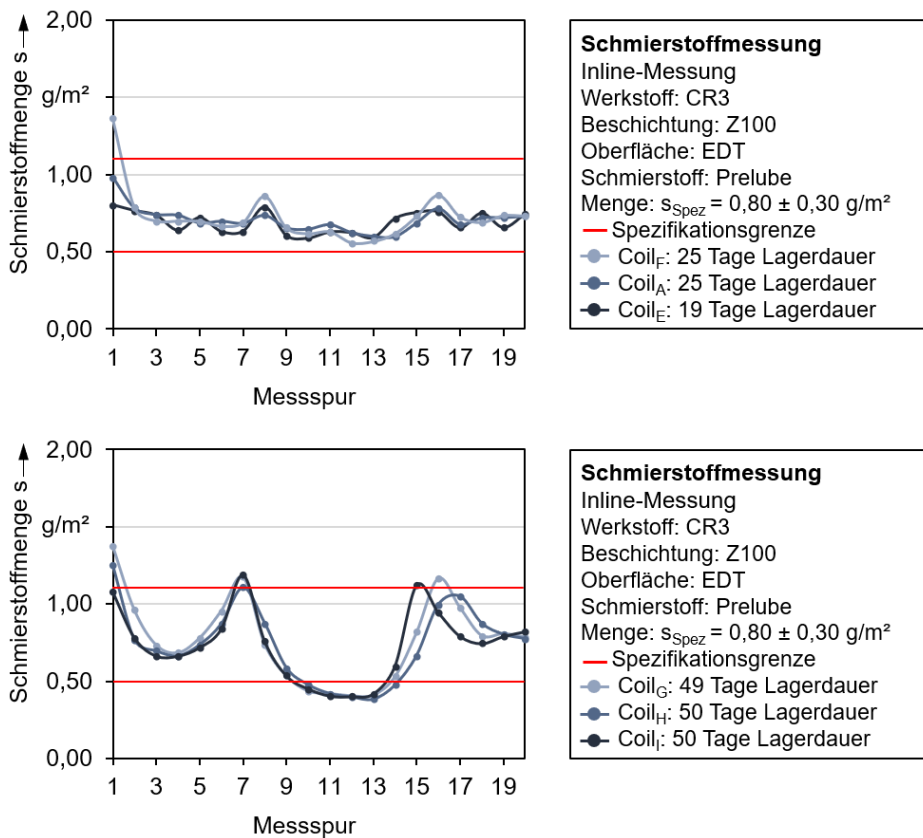


Bild 25: Schmierstoffverteilung über die Coilbreite in Abhängigkeit der Lagerdauer der Coils

Die geringsten Schmierstoffmengen befinden sich wiederum in der Coilmitte bei Messspur M10 und M12 mit Werten von beispielsweise $s_{\text{min,CoilE}} = 0,59 \text{ g/m}^2$ und $s_{\text{min,CoilF}} = 0,56 \text{ g/m}^2$. Demgegenüber sind in Bild 25 (unten) die Schmierstoffmesswerte der drei Coils des zweiten Umfangs

dargestellt. Diese Coils wurden Ende Mai im Walzwerk gegläht und anschließend nach einer Lagerdauer von ca. 49 bzw. 50 Tagen an der Coilanlage zu Platinen geschnitten. Die durchschnittliche Schmierstoffmenge je Coil liegt zwischen $s_{\emptyset, \text{CoilG}} = 0,77 \text{ g/m}^2$ und $s_{\emptyset, \text{CoilH/I}} = 0,74 \text{ g/m}^2$. Es ist deutlich zu erkennen, dass wiederum alle drei Coils eine ähnliche Charakteristik der Schmierstoffverteilung aufweisen. Zudem zeigen die Graphen, dass eine signifikant inhomogene Schmierstoffverteilung vorliegt. Die Messwerte der Spuren M10 bis M13 liegen mit Werten zwischen ca. 0,40 und 0,45 g/m^2 unterhalb der vorgegebenen Schmierstoffspezifikation von $s_{\text{Spez, min}} = 0,50 \text{ g/m}^2$. Die Werte der Messspuren M7 und M15 bzw. M16 überschreiten zum Teil die obere Spezifikationsgrenze ($s_{\text{Spez, max}} = 1,10 \text{ g/m}^2$) mit Schmierstoffmengen von beispielsweise $s_{\text{M7, CoilG}} = 1,17 \text{ g/m}^2$, $s_{\text{M7, CoilH}} = 0,11 \text{ g/m}^2$ sowie $s_{\text{M7, CoilI}} = 1,19 \text{ g/m}^2$. Die Gegenüberstellung der beiden Coilumfänge zeigt, dass Coils, welche annähernd die gleiche Lagerdauer haben, eine vergleichbare Charakteristik der Schmierstoffverteilung aufweisen. Zudem ist zu vermuten, dass eine lange Lagerdauer mit einer starken Schmierstoffumverteilung einhergeht.

Um Rückschlüsse auf den Einfluss der Lagerdauer auf die Schmierstoffverteilung ziehen zu können, erfolgt im Weiteren die Analyse von weiteren vier Coils eines Glühdatums, wobei jeweils zwei Coils nach kurzer Lagerdauer von ca. 22 bzw. 26 Tagen und zwei Coils nach langer Lagerdauer von 47 bzw. 51 Tagen zu Platinen vereinzelt wurden. Die Diagramme in Bild 26 zeigen, dass bereits nach kurzer Lagerdauer von 22 Tagen eine inhomogene Schmierstoffverteilung über die Coilbreite für Coil_K zu erkennen ist. Eine ähnlich ausgeprägte Charakteristik der Schmierstoffverteilung ist ebenfalls für Coil_J zu verzeichnen, dessen Lagerdauer 26 Tage beträgt. Bei beiden Coils, Coil_J und Coil_K, beträgt die Standardabweichung als Indikator für die Homogenität der Schmierstoffverteilung $\sigma = 0,18$. Dies deutet auf eine mittlere Umverteilung des Schmierstoffes hin. Zusätzlich sind die durchschnittlichen Schmierstoffmengen mit Werten von $s_{\emptyset, \text{CoilJ}} = 0,79 \text{ g/m}^2$ und $s_{\emptyset, \text{CoilK}} = 0,77 \text{ g/m}^2$ nahezu gleich. Die graphische Darstellung zeigt, dass die Verteilung der Schmierstoffmengen eine ähnliche Charakteristik verzeichnet, jedoch auch Unterschiede zwischen den beiden Coils zu erkennen sind. Demzufolge beträgt das Schmierstoffminimum für beide Coils bei Messspur M10 $s_{\text{min}} = 0,47 \text{ g/m}^2$ und unterschreitet an dieser Stelle die vorgegebene Spezifikationsgrenze. Die weiteren Messwerte sind mit Ausnahme von Messspur M1 von Coil_K innerhalb der Vorgaben. Die Schmierstoffmenge an Messspur M15 und M16 liegt mit Werten von 1,09 g/m^2 und 1,06 g/m^2 zudem an der oberen Spezifikationsgrenze. Zusätzlich weisen die

Messspuren M9 bis M13 Schmierstoffmengen unter $0,60 \text{ g/m}^2$ auf und befinden sich damit unterhalb der Durchschnittswerte. Insbesondere die niedrigen Schmierstoffmengen in der Coilmitte deuten auf eine beginnende Umverteilung des Schmierstoffes hin.

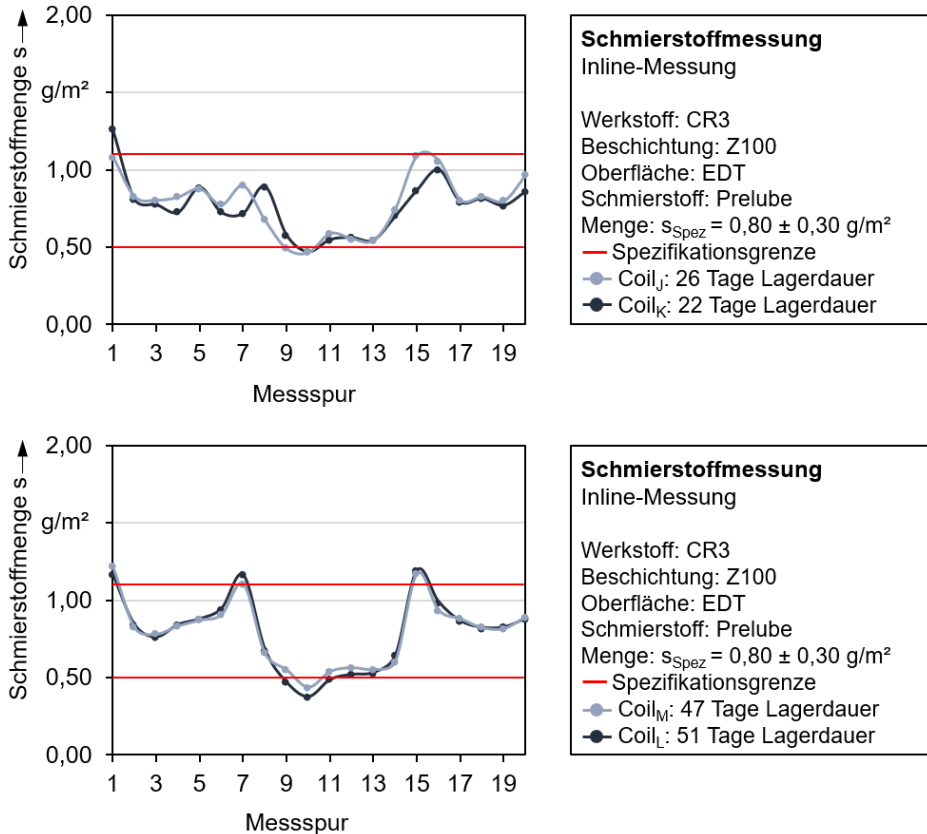


Bild 26: Schmierstoffverteilung über die Coilbreite in Abhängigkeit der Lagerdauer der Coils

Die beiden Coils, welche nach einer Lagerdauer von 47 bzw. 51 Tagen weiterverarbeitet wurden, zeigen eine signifikante Übereinstimmung der Schmierstoffumverteilung. Die maximale Differenz der einzelnen Messspuren liegt unter $0,10 \text{ g/m}^2$ und ist an Messspur M9 mit $0,08 \text{ g/m}^2$ am höchsten. In diesem Fall herrscht eine ausgeprägte inhomogene Schmierstoffverteilung über die Coilbreite vor, wie sie auch für Coil_G, Coil_H und Coil_I, bei denen die Lagerdauer ebenfalls um die 50 Tage beträgt, zu verzeichnen ist. Die Standardabweichung für Coil_M und Coil_L beträgt $\sigma_{\text{CoilM}} = 0,21$ bzw. $\sigma_{\text{CoilL}} = 0,23$. Demzufolge ist eine ausgeprägtere Umverteilung des Schmierstoffes bei Coil_M und Coil_L im Vergleich zu Coil_J und Coil_K

gegeben. Die Schmierstoffmengen zwischen Messspur M8 und M14 betragen unter $0,70 \text{ g/m}^2$ und unterschreiten zum Teil die zulässige Vorgabe von $s_{\text{Spez,min}} = 0,50 \text{ g/m}^2$. Im Gegensatz dazu wird die zulässige Schmierstoffmenge an Messspur M7 und M16 mit Werten über $1,10 \text{ g/m}^2$ überschritten. Der Vergleich der Schmierstoffverteilung über die Coillbreite der vier Coils (Coil_J bis Coil_M) zeigt, dass eine Umverteilung des Schmierstoffes mit einer zunehmenden Lagerdauer einhergeht. Diese spiegelt sich auch in den Werten der Standardabweichung wider. Diese betragen für die nach ca. 22 bzw. 26 Tagen zu Platinen geschnittenen Coils jeweils $\sigma = 0,18$ und für die nach 47 bzw. 51 Tagen an der Schnittpresse weiterverarbeiteten Coils $\sigma = 0,21$ bzw. $\sigma = 0,23$. In diesem Fall liegt bereits nach kurzer Zeit eine Schmierstoffumverteilung vor, dessen Ausprägung mit zunehmender Lagerdauer zunimmt, wie bereits von Mohr et al. [127] beschrieben. Demzufolge kann die Lagerdauer der Coils als signifikanter Einflussfaktor auf die Homogenität der Schmierstoffverteilung bestätigt werden.

Der Vergleich aller fünf Coils (Coil_A, Coil_E, Coil_F, Coil_J und Coil_K), welche nach einer Lagerdauer zwischen 19 und 26 Tagen an der Coilanlage zu Platinen geschnitten wurden, zeigt, dass neben der Lagerdauer weitere Faktoren in Wechselwirkung mit der Schmierstoffumverteilung stehen, da bei Coil_J und Coil_K bereits nach kurzer Lagerdauer eine inhomogene Schmierstoffverteilung vorliegt. Daher wird im Weiteren eine potenzielle Wechselwirkung zwischen der Balligkeit des Blechs und der Verteilung des Schmierstoffes über die Coillbreite analysiert.

Die Untersuchungen zeigen, dass die Lagerdauer der Coils einen signifikanten Einfluss auf die Homogenität der Schmierstoffverteilung hat. So konnte gezeigt werden, dass die Inhomogenität der Schmierstoffverteilung mit zunehmender Lagerdauer zunimmt. Um Qualitätsproblemen aufgrund inhomogener tribologischer Bedingungen vorzubeugen, ist eine zeitnahe Verarbeitung der Coils mit möglichst kurzer Lagerdauer empfehlenswert. Ferner werden für einen Produktionsauftrag an der Presse in der Regel Platinen mehrerer Coils benötigt. Folglich sollten vorzugsweise Platinen aus Coils, welche im besten Fall die gleiche Lagerdauer aufweisen, verwendet werden. Dadurch kann einer mehrfachen Adaption der Pressenparameter aufgrund von Coilwechseln, welche mit Änderungen der Schmierstoffverteilung einhergehen, entgegengewirkt werden.

Einfluss der Blechdicke auf die Schmierstoffumverteilung

Das Dickenprofil des Blechbands wird bereits durch den Warmwalzprozess definiert [154] und ist im Kaltwalzprozess lediglich bedingt einstellbar.

Mohr et al. [127] nennen das Blechbandprofil als einen Grund für eine inhomogene Schmierstoffverteilung über die Coillbreite. Da die Blechdicke in der Mitte des Bands am höchsten ist und zu den Rändern hin abnimmt, wird der Schmierstoff im aufgehaspelten Zustand in die Randbereiche verdrängt. Zusätzlich ist davon auszugehen, dass die Flächenpressung in der Bandmitte, bedingt durch die Balligkeit des Blechs, höher ist als in den Randbereichen. Folglich liegt die Vermutung nahe, dass je planer das Blechdickenprofil ist, desto geringer ist die Schmierstoffumverteilung.

Zur Untersuchung, inwieweit eine unterschiedlich starke Balligkeit die Schmierstoffverteilung beeinflusst, wurden zwei Coils (Coil_N und Coil_O), welche sich durch das Dickenprofil des Blechs über die Bandbreite unterscheiden, herangezogen. Die Blechdicke wird, wie in Abschnitt 5.1.1. beschrieben, kontinuierlich an drei Positionen über die Coillbreite erfasst (vgl. Bild 9). Durch das ins Verhältnis setzen der Messwerte der jeweiligen Positionen ergeben sich Werte, die die Balligkeit des Blechbands beschreiben. Die Berechnung der Balligkeit Δ_{SB} erfolgt nach Gleichung (8):

$$\Delta_{SB} = \frac{s_{B,2} - \left(\frac{s_{B,1} + s_{B,3}}{2} \right)}{s_{B,2}} \quad (8)$$

$s_{B,1}$: Blechdicke an Messposition 1

$s_{B,2}$: Blechdicke an Messposition 2

$s_{B,3}$: Blechdicke an Messposition 3

Da sich gezeigt hat, dass die Lagerdauer einen wesentlichen Einfluss auf die Umverteilung des Schmierstoffes hat, werden zwei Coils mit ähnlicher Lagerdauer für die Untersuchungen herangezogen. In Bild 27 sind die inline ermittelten Blechdickenmesswerte der beiden Coils für die drei Messpositionen über eine Coillänge von 2500 m dargestellt. Festzustellen ist, dass der Verlauf der Messwerte über die Coillänge einem linearen Trend folgt und Schwankungen der Blechdicke lediglich im hundertstel Bereich zu erkennen sind. Zudem ist ein kontinuierlicher Abfall der Messwerte von weniger als 1 % vom Anfang zum Ende des Bands hin zu verzeichnen.

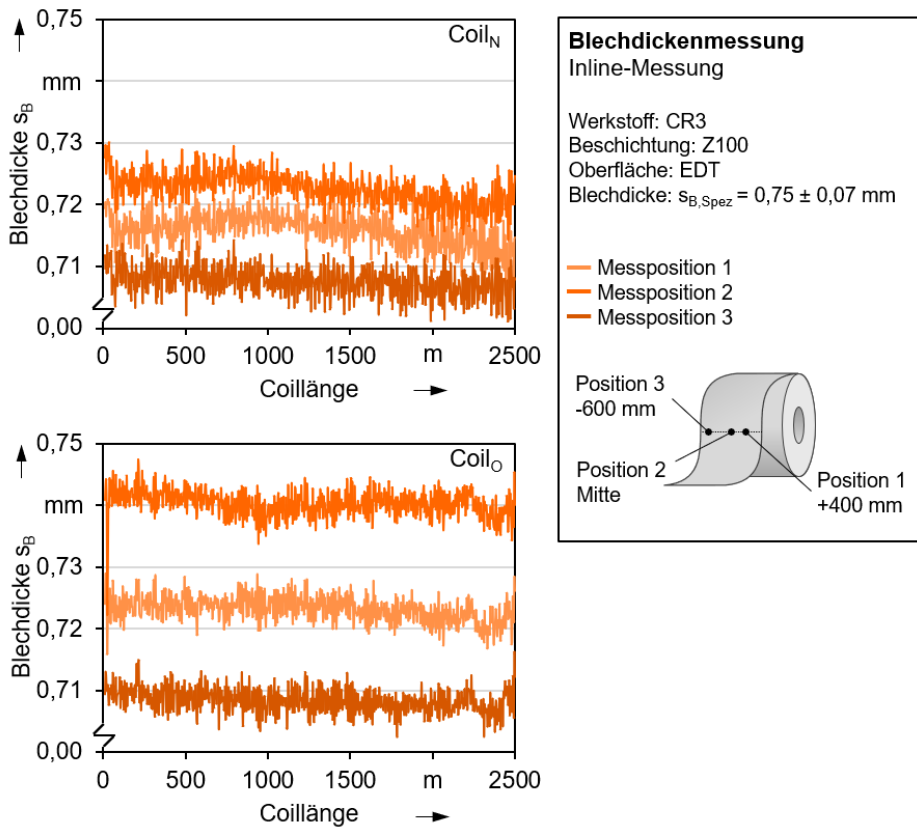


Bild 27: Messwerte der Blechdicke für zwei Coils über die Coillänge erfasst an drei Messpositionen über die Coillbreite

In Bild 28 (oben) sind die durchschnittlichen über die Coillänge gemessenen Blechdicken dargestellt. Die durchschnittliche Blechdicke in der Mitte des Bands von Coil_N beträgt $s_{B,2\varnothing-N} = 0,723$ mm, wohingegen die durchschnittliche Blechdicke von Coil_O bei $s_{B,2\varnothing-O} = 0,740$ mm liegt. Des Weiteren beträgt die durchschnittliche Blechdicke an Messposition 3, welche sich am weitesten von der Coilmitte entfernt befindet, bei beiden Coils $s_{B,\varnothing-N/O} = 0,708$ mm. Demzufolge weisen die Coils unterschiedliche Blechdickenprofile über die Coillbreite auf. Die Balligkeit für Coil_N beträgt $\Delta_{SB,N} = 0,016$ und $\Delta_{SB,O} = 0,033$ für Coil_O. Demzufolge ist anzunehmen, dass die Schmierstoffverteilung bei Coil_O aufgrund der höheren Balligkeit eine stärkere Umverteilung aufweist. Daher wurden im Weiteren die über die Coillbreite gemessenen Schmierstoffmesswerte anhand der Standardabweichung bewertet und dem Verhältnis der Blechdicken als Indikator für die

Balligkeit des Blechs gegenübergestellt. Die beiden Coils wurden nach 15 bzw. 13 Tagen Lagerdauer an der Coilanlage zu Platinen geschnitten und weisen entsprechend den Standardabweichungen von $\sigma_N = 0,20$ und $\sigma_O = 0,21$ eine mittlere Schmierstoffumverteilung über die Coilbreite auf. Die Schmierstoffmesswerte sind in Bild 28 (unten) dargestellt und zeigen eine nahezu übereinstimmende Charakteristik. Ein Zusammenhang zwischen der Ausprägung der Schmierstoffumverteilung und der Balligkeit des Blechs ist nicht festzustellen. Folglich ist davon auszugehen, dass die Balligkeit des Blechs keinen signifikanten Einfluss auf die Umverteilung hat oder die Unterschiede zwischen den Blechdickenprofilen zu gering sind.

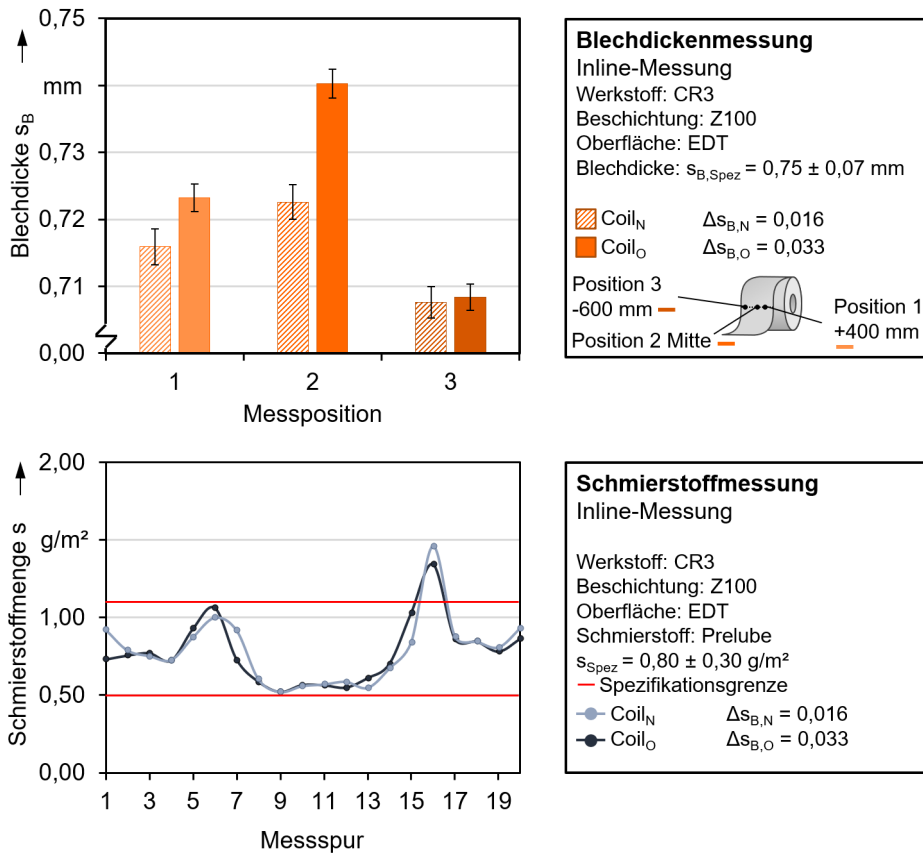


Bild 28: Blechdicke an drei Messpositionen für zwei Coils (oben) und die dazugehörige Verteilung der Schmierstoffmenge über die Coilbreite (unten)

Zusammenfassend legen die Untersuchungen zur Charakterisierung der Schmierstoffverteilung dar, dass es signifikante Unterschiede zwischen den Coils hinsichtlich der Schmierstoffverteilung über die Coilbreite gibt. Des

Weiteren konnte gezeigt werden, dass zusätzlich die Verteilung des Schmierstoffes in Abhängigkeit der Coillbreite über die Coilllänge Schwankungen unterliegen kann. Zudem ergibt sich aus den Untersuchungen, dass der größte Anteil der Coils eine mittlere Schmierstoffumverteilung aufweist. Lediglich bei einem geringen Umfang an Coils ist die Verteilung des Schmierstoffes homogen bzw. stark inhomogen ausgeprägt. Als wesentlicher Einflussfaktor auf die Umverteilung konnte die Lagerdauer vom Glühen des Coils bis zum Platinenschnitt identifiziert werden. Da anzunehmen ist, dass inhomogene tribologische Bedingungen den Umformprozess von Karosseriebauteilen, insbesondere von Seitenrahmen, negativ beeinflussen und zu Qualitätsproblemen führen können, ist eine Verarbeitung der Coils nach möglichst kurzer Lagerdauer empfehlenswert. Eine inhomogene Verteilung des Schmierstoffes könnte zur Folge haben, dass das Material ungleichmäßig in die Matrize fließt. Durch eine zu starke Hemmung oder eine inadequate Begünstigung des Materialflusses, aufgrund eines inhomogenen Reibverhaltens, ist das Auftreten von Qualitätsproblemen wie Risse oder Falten nicht auszuschließen. Demzufolge ist eine Anpassung der Prozessparameter an der Presse erforderlich, um die tribologischen Bedingungen korrigieren zu können. Die Balligkeit des Blechbands konnte wiederum nicht als Einflussfaktor auf die Schmierstoffumverteilung bestätigt werden. Tabelle 5 fasst die zwei wesentlichen Erkenntnisse dieses Abschnitts noch einmal zusammen.

Tabelle 5: Zusammenfassung der Erkenntnisse aus den Untersuchungen der Einflussfaktoren auf die Schmierstoffverteilung

Nr.	Untersuchter Effekt	Erkenntnis
1	Einfluss der Lagerdauer der Coils auf die Schmierstoffumverteilung	Signifikanter Zusammenhang – Zunahme der Schmierstoffumverteilung mit zunehmender Lagerdauer
2	Einfluss der Balligkeit des Blechbands auf die Schmierstoffumverteilung	Zusammenhang nicht nachweisbar

5.2 Erfassung und Charakterisierung von Schwankungen der Rauheit

Neben bereits bestehenden Inline-Messsystemen wird im Rahmen dieser Arbeit ein zusätzlich in der Coilanlage implementiertes Rauheitsmesssystem verwendet. Untersuchungen von Purr [49] zeigen, dass keine Eignung für die Messung der Rauheit mittels des SORM-Verfahrens [155] nachgewiesen werden konnte. Demzufolge wird die Erfassung der Rauheit mittels des SRM-Systems [140] (vgl. Abschnitt 4.3.1) qualifiziert und bewertet.

Eine Voraussetzung für die Untersuchung von schwankenden Halbzeugeigenschaften ist eine Prüfung über die Eignung des Systems, welche in einem ersten Schritt im Rahmen von Laborversuchen erfolgt. In diesem Zusammenhang wird der Einfluss des Schmierstofffilms auf die Rauheitsmessung untersucht. Im Weiteren erfolgt eine Analyse der auftretenden Schwankungen der Rauheit auf Basis von im Serienprozess gewonnenen Daten. Ziel ist es, Erkenntnisse über Schwankungen der Rauheit innerhalb eines Coils und des Weiteren über mehrere Coils zu erlangen.

5.2.1 Prüfung des Inline-Rauheitsmessverfahrens SRM

Mit dem Ziel, Chargenschwankungen hinsichtlich der Rauheit mittels eines Inline-Messsystems charakterisieren zu können, ist zunächst eine Qualifizierung des verwendeten Systems erforderlich. Da die Rauheit in der Coilanlage auf einer mit Schmierstoff versehenen Oberfläche erfasst wird, ist ein Einfluss des Schmierstoffes auf die Rauheitsmessung nicht auszuschließen, wie Purr [49] in seinen Untersuchungen ebenfalls für ein optisches Rauheitsmesssystem nachweist. Im Rahmen der folgenden Untersuchungen wird ein optisches, laserbasiertes Rauheitsmesssystem verwendet, dessen Messprinzip bereits in Abschnitt 4.3.1 erläutert wurde.

Taktile Validierung

Für die Qualifizierung des Systems wurden zunächst Messungen mit einem baugleichen stationären System durchgeführt und diese taktilen Referenzmessungen gegenübergestellt. Die Auswahl des Werkstoffs der Blechproben im Rahmen der Untersuchung erfolgte auf Basis der zuvor festgelegten Musterbauteile (Abschnitt. 4.1). Bei den untersuchten Proben handelt es sich um Bleche mit schmelztauchveredelter Zink-Beschichtung (Z) und mit einer nach dem EDT-Verfahren texturierten Oberfläche. Um Blechproben mit möglichst unterschiedlichem Rauheitsniveau zu untersuchen, wurden zusätzlich Blechproben von Strukturbauteilen verwendet. Die zu erwar-

tenden Rauheitswerte liegen somit, basierend auf den werkseitig vorgegebenen Spezifikationen, zwischen $R_a = 1,10 \mu\text{m}$ und $R_a = 1,80 \mu\text{m}$. Zudem wurden die Blechproben aus unterschiedlichen Coils entnommen. Um einen möglichen Einfluss des Schmierstoffes auf der Blechoberfläche, welcher sich auf die Messungen auswirken könnte, zu vermeiden, erfolgt zunächst eine Reinigung der Blechproben in einem Ultraschallbad. Anschließend wurde die Rauheit an 15 Positionen auf der Probe mittels des optischen Rauheitsmesssystems ermittelt. In einem weiteren Schritt erfolgte die taktile Bestimmung der Rauheitsmesswerte an den entsprechenden Positionen, an denen zuvor die optische Messung durchgeführt wurde. In Bild 29 sind die mit dem optischen sowie mit dem taktilen Messsystem ermittelten Rauheitswerte gegenübergestellt. Die Ergebnisse der taktilen Rauheitsmessung zeigen, dass obwohl die Blechproben aus unterschiedlichen Coils stammen, das potenziell mögliche Rauheitsspektrum von $R_a = 1,10 \mu\text{m}$ bis $R_a = 1,80 \mu\text{m}$ nicht ausgeschöpft wird. Die taktilen Rauheitswerte liegen zwischen $R_a = 1,26 \mu\text{m}$ und $R_a = 1,35 \mu\text{m}$ und befinden sich innerhalb der Spezifikation.

Die Werte für Probe 1 zeigen mit $R_{a\text{optisch}} = 1,24 \mu\text{m}$ bzw. $R_{a\text{taktil}} = 1,26 \mu\text{m}$ die geringste Rauheit und zugleich eine hohe Übereinstimmung. Für die Probe 2 ist ebenfalls eine hohe Übereinstimmung der optisch sowie taktil ermittelten Rauheitsmesswerte zu verzeichnen, welche $R_{a\text{optisch}} = 1,36 \mu\text{m}$ und $R_{a\text{taktil}} = 1,35 \mu\text{m}$ betragen. Bei Probe 3 und Probe 4 liegen die optisch ermittelten Rauheitsmesswerte mit jeweils ca. 3 % geringfügig über den taktil gemessenen Werten. Diese betragen $R_{a\text{taktil}} = 1,30 \mu\text{m}$ für Probe 3 bzw. $R_{a\text{taktil}} = 1,31 \mu\text{m}$ für Probe 4.

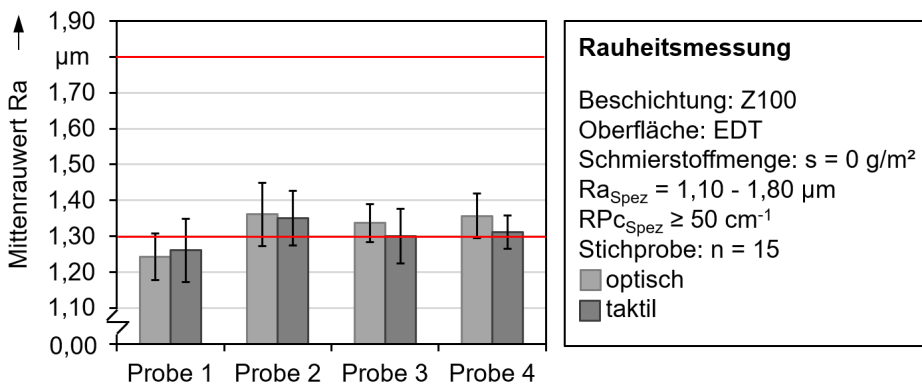


Bild 29: Gegenüberstellung der taktil und optisch gemessenen Rauheitswerte für den arithmetischen Mittenrauwert R_a auf feuerverzinkten Blechproben mit EDT-Oberfläche

Eine mögliche Ursache für die Differenz zwischen den Messwerten besteht darin, dass die Oberflächenstruktur aufgrund der Texturierung stark variieren und eine Abweichung aufgrund einer Änderung bei der Positionierung der Messsysteme nicht gänzlich ausgeschlossen werden kann. Ein weiterer potenzieller Faktor, welcher eine Abweichung zwischen den optischen und taktilen Messungen zur Folge haben kann, ist die Beschaffenheit der Oberflächenverzinkung. Obwohl alle Blechproben eine schmelztauchveredelte Feuerverzinkung aufweisen, sind Abweichungen in der chemischen Zusammensetzung nicht ausgeschlossen, welche zu einer Änderung des Reflexionsverhaltens der Oberfläche führen kann und folglich wiederum die optische Rauheitsmessung beeinflusst [156]. Zusammenfassend zeigt die Gegenüberstellung der optischen und taktilen Rauheitsmessung im schmierstofffreien Zustand der Blechproben insbesondere für den arithmetischen Mittenrauwert eine ausreichend genaue Übereinstimmung. Da das Messsystem in der Coilanlage auf mit Schmierstoff versehenen Oberflächen zum Einsatz kommt, erfolgt im Weiteren die Untersuchung des Schmierstoffes als Einflussfaktor auf die optische Rauheitsmessung.

Einfluss des Schmierstofffilms auf die Rauheitsmessung

Die Erfassung der Rauheit erfolgt in dieser Arbeit mittels eines optischen Inline-Messsystems. Da die Rauheitsmessung durch den Schmierstoff auf der Coiloberfläche beeinflusst werden kann, wird in diesem Abschnitt der Schmierstofffilm als Einflussfaktor auf die Rauheitsmessung untersucht. Ursächlich für die Beeinträchtigung der Rauheitsmessung ist, dass der Laserstrahl, welcher bei der Messung auf die Oberfläche trifft, den Schmierstofffilm passieren muss. Dies hat zur Folge, dass die Lichtstrahlen, welche an der verzinkten, rauen Oberflächentopografie reflektieren, durch den Schmierstoff als Zwischenmedium abgelenkt werden. Dies kann zu einer Verfälschung des Messergebnisses führen, welche an dieser Stelle analysiert wird. Untersuchungen von Mohr et al. [127] haben gezeigt, dass es zu Abweichungen der Schmierstoffmenge insbesondere über die Coilbreite kommen kann. Daher wird an dieser Stelle der Einfluss unterschiedlicher Schmierstoffmengen auf die Rauheitsmessung untersucht. Dazu wird für die Rauheitsmessung wie auch für die Schmierstoffmessung ein baugleiches, stationäres System verwendet. Die Rauheits- und Schmierstoffmessung wird an 15 Positionen auf den Blechproben durchgeführt. Zunächst wird die Messung der Rauheit im schmierstofffreien Zustand durchgeführt, welche als Referenz dient. Im Anschluss werden die Blechproben mit einem in der Stahlindustrie üblichen Prelube-Schmierstoff beaufschlagt. Nach jeder Messreihe wird die Schmierstoffmenge reduziert und die

Schmierstoff- und Rauheitsmessung an den gleichen Positionen wiederholt. Da erfahrungsgemäß die vorkommenden Schmierstoffmengen im Presswerk $2,50 \text{ g/m}^2$ nicht übersteigen, resultiert für die Untersuchungen ein Schmierstoffspektrum von Mengen zwischen $0,00 \text{ g/m}^2$ und $2,50 \text{ g/m}^2$. In Bild 30 sind die erfassten Schmierstoff- und Rauheitsmesswerte dargestellt.

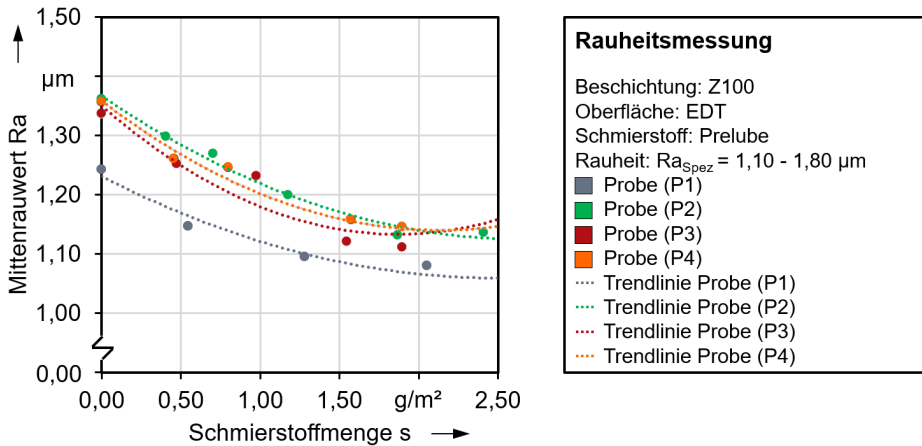


Bild 30: Einfluss unterschiedlicher Schmierstoffmengen auf die Rauheitsmessung, dargestellt für den Mittenrauwert Ra

Die Messwerte für den Mittenrauwert Ra lassen erkennen, dass mit zunehmender Schmierstoffmenge die gemessene Rauheit bei allen vier Proben abnimmt. Anhand der Trendlinien, welche die jeweilige Abnahme der Rauheitswerte in Abhängigkeit der Schmierstoffmenge hervorhebt, wird deutlich, dass diese einen ähnlichen Verlauf aufweisen. Die Trendlinien der Proben P2 bis P4, dessen Rauheit im schmierstofffreien Zustand (SF) Werte von $Ra_{P2/4,SF} = 1,36 \text{ µm}$ und $Ra_{P3,SF} = 1,34 \text{ µm}$ aufweisen, liegen nah beieinander. Die Trendlinie der Probe 1 befindet sich unterhalb der anderen Trendlinien. In diesem Fall ist die Ausgangsrauheit niedriger als die der anderen drei Proben und beträgt $Ra_{P1,SF} = 1,24 \text{ µm}$. Bild 31 veranschaulicht exemplarisch die Gegenüberstellung der Ausgangsrauheitswerte der vier Proben im schmierstofffreien Zustand mit den gemessenen Rauheitswerten, bei der die Schmierstoffauflangemenge ca. $2,0 \text{ g/m}^2$ beträgt. Die Ergebnisse zeigen, dass die gemessene Rauheit bei allen vier Proben zwischen 13 % und 17 % niedriger ist als die wahre Rauheit. So beträgt beispielsweise die Rauheit für Probe P2 im schmierstofffreien Zustand $Ra_{P2,SF} = 1,36 \text{ µm}$, wohingegen mit einer Schmierstoffmenge von ca. $1,9 \text{ g/m}^2$ lediglich eine Rauheit von $Ra_{P2,1,9 \text{ g/m}^2} = 1,13 \text{ µm}$ erfasst wird.

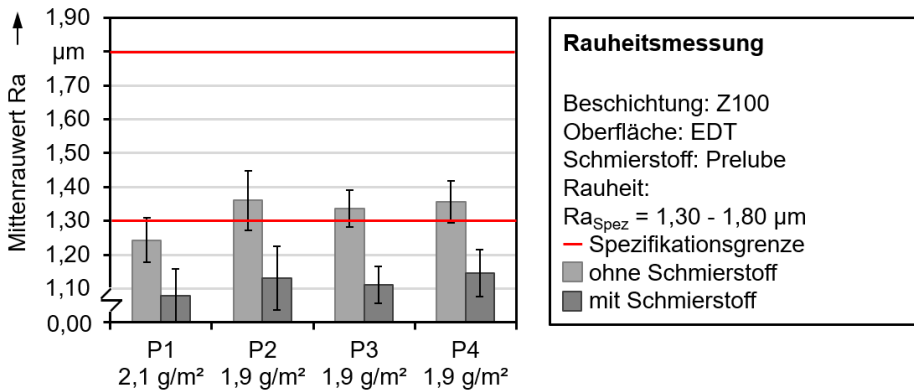


Bild 31: Einfluss der Schmierstoffmenge von ca. 2,0 g/m² auf die Rauheitsmessung, dargestellt für den Mittenrauwert Ra

Die Spezifikation für die Schmierstoffmenge der Coils im Anlieferzustand beträgt $s_{\text{Spez}} = 0,80 \pm 0,30 \text{ g/m}^2$. Bei einer homogenen Verteilung des Schmierstofffilms auf der Coiloberfläche und einer Schmierstoffmenge von ca. 0,80 g/m² ist folglich davon auszugehen, dass die wahre Rauheit ca. 10 % über der gemessenen Rauheit liegt. Im Gegensatz dazu ist bei stark unterschiedlichen Schmierstoffmengen über die Coilbreite hinweg mit einer zunehmenden Verfälschung der wahren Rauheit zu rechnen.

Bild 32 veranschaulicht die Rauheitsmesswerte für die Spitzenzahl RP_c der selben Proben, für die die Werte ebenfalls im schmierstofffreien Zustand und mit unterschiedlich starker Schmierstoffauflagemenge ermittelt wurden. Die zur Verdeutlichung herangezogenen Trendlinien zeigen für die Proben P2 bis P4 einen vergleichbaren Verlauf. In diesem Fall ist ein Anstieg der gemessenen Spitzenzahl mit zunehmender Schmierstoffmenge zu verzeichnen. Die Spitzenzahlen für die Proben P3 und P4 betragen im schmierstofffreien Zustand $RP_{c,P3,SF} = 66 \text{ cm}^{-1}$ bzw. $RP_{c,P4,SF} = 67 \text{ cm}^{-1}$, deren Trendlinien einen ähnlichen Verlauf zeigen. Die Trendlinie für die Probe 2 liegt darunter und weist einen flacheren Verlauf im Vergleich zu den Proben P3 und P4 auf, wobei ebenfalls ein Anstieg der Messwerte mit zunehmender Schmierstoffmenge erkennbar ist. Im Gegensatz dazu zeigt die Trendlinie für die Probe P1 einen nahezu horizontalen Verlauf. In diesem Fall ist kein signifikanter Einfluss der unterschiedlichen Schmierstoffmengen auf die gemessene Rauheit nachweisbar.

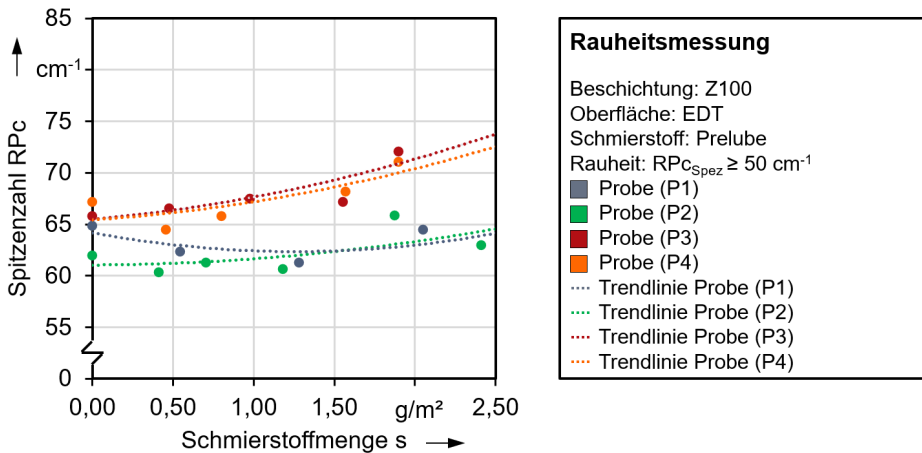


Bild 32: Einfluss unterschiedlicher Schmierstoffmengen auf die Rauheitsmessung, dargestellt für die Spitzenzahl RP_c

Die Gegenüberstellung der Spitzenzahlen RP_c zwischen den im schmierstofffreien Zustand ermittelten Messwerten und den Werten, bei denen die Proben mit ca. $2,00 \text{ g/m}^2$ Schmierstoff versehen sind, ist in Bild 33 dargestellt. Die Grafik zeigt, dass die gemessene Rauheit für die Proben P2 bis P4 im schmierstofffreien Zustand geringere Werte aufweist als im mit Schmierstoff beaufschlagten Zustand. Die prozentuale Zunahme der Messwerte beträgt für die Probe P2 und die Probe P4 ca. 6 %. Für die Probe P3 ist eine Zunahme der gemessenen Rauheit von ca. 10 % zu verzeichnen, wohingegen für Probe P1 kein signifikanter Einfluss der Schmierstoffmenge auf die Messung der Spitzenzahl zu erkennen ist.

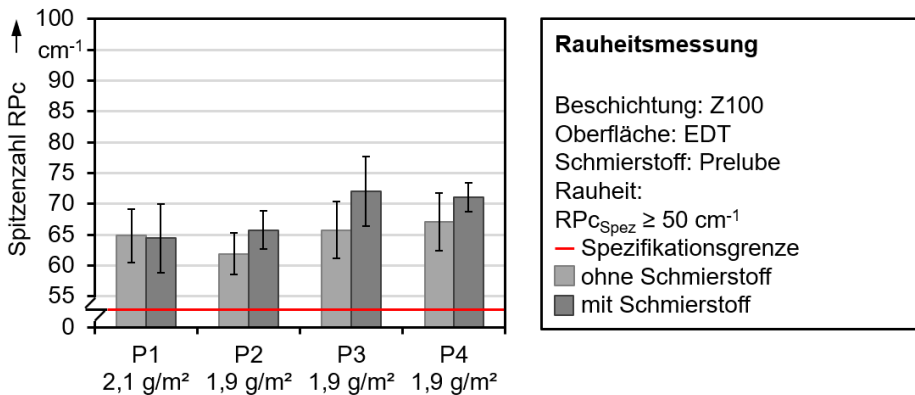


Bild 33: Einfluss unterschiedlicher Schmierstoffmengen auf die Rauheitsmessung, dargestellt für die Spitzenzahl RP_c

Zusammenfassend zeigen die Untersuchungen, dass das optische Rauheitsmesssystem zur Ermittlung der Rauheit in der Coilanlage herangezogen werden kann, unter der Berücksichtigung, dass die Messwerte durch den Schmierstofffilm auf der Coiloberfläche beeinträchtigt werden. Die im schmierstofffreien Zustand ermittelten Messwerte weisen eine sehr gute Übereinstimmung mit den taktilen Referenzmessungen auf. Die Gegenüberstellung der mit Schmierstoff und ohne Schmierstoff gemessenen Rauheitswerte verdeutlicht, dass mit zunehmender Schmierstoffmenge die gemessenen Mittenrauwerte abnehmen. Auf Oberflächen mit einem homogenen Schmierstofffilm ist folglich, unter Berücksichtigung einer Änderung des gemessenen Rauheitsniveaus, keine Beeinträchtigung der Messung zu erwarten. Da die Rauheitsmessung in der Coilanlage immer auf mit Schmierstoff versehenen Oberflächen erfolgt und zugleich der Einfluss auf die Messung bekannt ist, wird an dieser Stelle auf eine Korrektur der Messwerte verzichtet und die Werte im Weiteren als Indikator herangezogen. Folglich eignet sich das System zur Charakterisierung von schwankenden Halbzeugeigenschaften der Rauheit innerhalb eines sowie mehrerer Coils.

5.2.2 Schwankungen der Rauheit

Zur Analyse von Schwankungen der Rauheit im Serienprozess wird im nachstehenden Abschnitt zunächst auf die Methode zur Erfassung der Rauheit mittels eines Inline-Rauheitsmesssystems eingegangen. Diese dient als Grundlage für die Charakterisierung der Schwankungen. Anschließend erfolgen Untersuchungen hinsichtlich des Auftretens von Schwankungen der Rauheit. Ziel ist es, potenzielle Unterschiede der Rauheit über die Coillänge und Coilbreite zu ermitteln sowie Unterschiede zwischen mehreren Coils zu identifizieren. Die Erkenntnisse über das Auftreten von Schwankungen der Rauheit dienen ebenfalls als Basis zur Auswahl geeigneter Coils für die anschließenden Streifenziehversuche.

Inline-Rauheitsmessung

Die Rauheitsmessung auf Basis eines Inline-Rauheitsmesssystems bietet die Möglichkeit, die Coiloberfläche anhand einer großen Datenmenge zu charakterisieren und mögliche Schwankungen über die Coilbreite und Coillänge zu erfassen sowie die Gegenüberstellung und den Vergleich der Rauheit mehrerer Coils. Dazu wird ein optisches Rauheitsmesssystem, wie in Abschnitt 4.3.1 beschrieben, verwendet, welches als traversierendes System in der Coilanlage integriert ist und bis zu fünf, über die Coilbreite definierte, Messpositionen anfährt. Um die Rauheit bestmöglich über die

Coilbreite charakterisieren zu können, wird die Rauheit an allen fünf möglichen Positionen erfasst. Die Messpositionen sind in Abhängigkeit der Coilbreite definiert. An den jeweiligen Positionen detektiert das System über eine individuell einstellbare Länge die Oberfläche zur Ermittlung der Rauheit, bevor es zur nächsten Messposition verfährt. Da das System während des Verfahrens zur nächsten Messposition keine Rauheitswerte erfasst, wurde eine Länge von 200 Coil-Metern gewählt, an der der Messkopf an einer Position verbleibt, um eine möglichst große Menge an Daten aufzunehmen. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, eine feste Messposition zu wählen, an der über die gesamte Coillänge hinweg gemessen wird. Das System nutzt einen Messkopf, welcher auf einer Achse quer zur Durchlaufrichtung des Coils in der Anlage angeordnet ist. Um einen Einfluss von Schwingungen des Blechbands, während dem Durchlauf durch die Anlage, auf die Rauheitsmessung zu vermeiden, wird das Band zur Beruhigung über zwei Umlenkrollen geführt. Diese dienen gleichzeitig für einen definierten Abstand zwischen Blechoberfläche und Messkopf. Eine schematische Darstellung der Messpositionen ist in Bild 34 dargestellt.

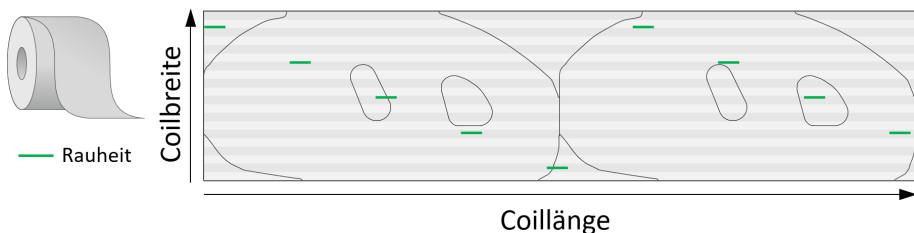


Bild 34: Schematische Darstellung der Inline-Messpositionen für die Erfassung der Rauheit

Schwankungen der Rauheit über die Coillänge

Neben den zuvor beschriebenen Schwankungen der Schmierstoffmenge und -verteilung über die Coillänge und -breite sind ebenfalls schwankende Halbzeugeigenschaften hinsichtlich der Rauheit zu erwarten. Dennoch ist davon auszugehen, dass diese eine schwache Ausprägung zeigen, da sich die Rauheit durch den Transport vom Walzwerk ins Presswerk und durch die anschließende Lagerung nicht verändert. Um das Auftreten von Schwankungen der Rauheit zu bewerten, wird in einem ersten Schritt die Rauheit über die Coillänge anhand von 15 Coils (Coil₁ bis Coil₁₅) analysiert. Anschließend werden Untersuchungen zur Charakterisierung der Schwankungen der Rauheit über die Coilbreite auf Basis eines Umfangs von 11 weiteren Coils (Coil₁₆ bis Coil₂₆) durchgeführt.

Die Untersuchungen erfolgen an Coils, welche vom gleichen Lieferanten bezogen werden, wie das Material zur Herstellung des Seitenrahmens X1. Bei der Beschichtung der Coils handelt es sich um eine im Schmelztauchverfahren veredelte Feuerverzinkung (Z100) mit einer EDT-Struktur. Die Coilbreite beträgt 1135 mm. Da die Halbzeuge für die Herstellung eines Strukturbauteils verwendet werden, ist die Rauheit mit $Ra_{Spez} = 1,30 - 1,80 \mu m$ spezifiziert. Für die Spitzenzahl ist keine Spezifikation vorgegeben. Des Weiteren ist die Schmierstoffmenge auf $s_{Spez} = 1,00 \pm 0,50 g/m^2$ festgelegt.

Zur Charakterisierung der Schwankungen der Rauheit und zur besseren Vergleichbarkeit der Coils, anhand des Rauheitsniveaus, wird die Rauheit zunächst über die gesamte Bandlänge in der Mitte des Coils erfasst. In Bild 35 sind die Mittelwerte über die gesamte Coillänge für Coil₁ bis Coil₁₅ dargestellt. Die Ergebnisse für den Mittenrauwert zeigen, dass die Rauheit, mit Ausnahme eines Coils (Coil₁₂), innerhalb der Spezifikation liegt.

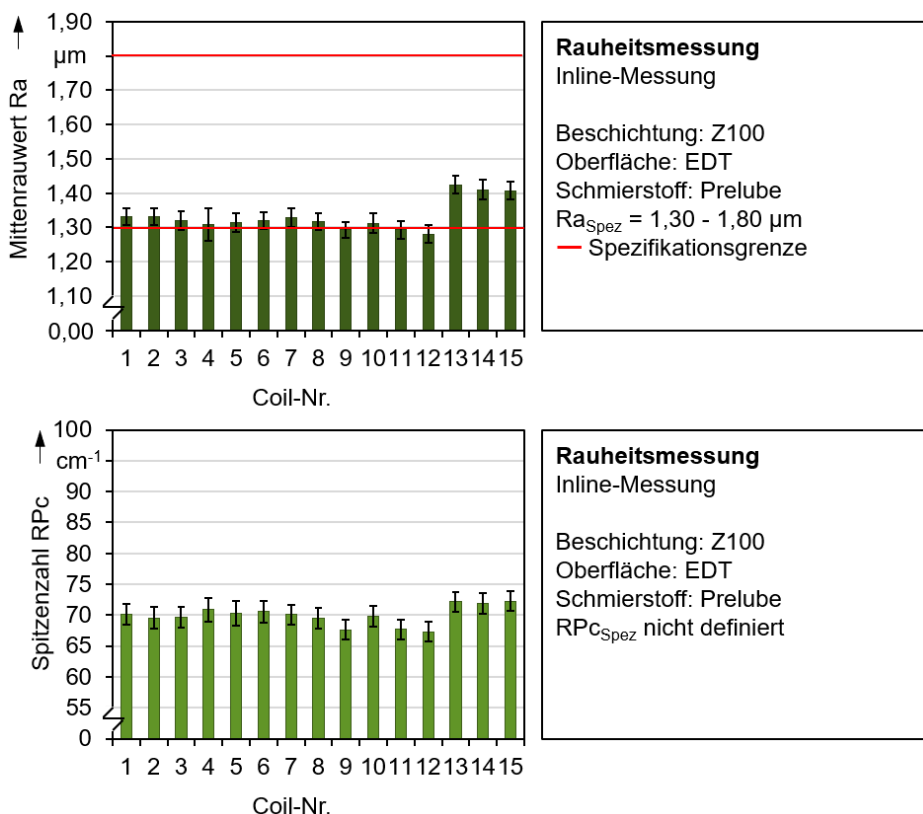


Bild 35: Inline-Messwerte für den Mittenrauwert Ra (oben) und die Spitzenzahl RPe (unten), gemessen über gesamte Coillänge an Messspur M3

Die Mittenrauwerte liegen zwischen $Ra_{\min} = 1,28$ und $Ra_{\max} = 1,42 \mu\text{m}$. Festzustellen ist zudem, dass drei der Coils (Coil₁₃ bis Coil₁₅) eine signifikant höhere Rauheit aufweisen. Dennoch zeigt sich, dass die Rauheit aller Coils im unteren Drittel der vorgegebenen Spezifikation liegt und diese folglich nicht ausgeschöpft wird. Zu vermuten ist, dass die Erzeugung einer höheren Rauheit im Walzwerk mit einem höheren Verschleiß der Dressierwalzen einhergeht, weshalb eine geringe Rauheit angestrebt wird. Die Mittelwerte für die Spitzenzahl liegen zwischen $RPC_{\min} = 67 \text{ cm}^{-1}$ und $RPC_{\max} = 72 \text{ cm}^{-1}$. Die höchsten Spitzenzahlen sind hier ebenfalls für Coil₁₃ bis Coil₁₅ zu verzeichnen. Ein Grund dafür könnte ein Wechsel der Dressierwalzen oder eine Änderung des Dressiergrads sein. Pfestorf [89] vermutet, dass bei höheren Dressiergraden die Rauheitsspitzen auf der Oberfläche der Dressierwalzen verschleifen bzw. abbrechen. Demzufolge deuten die höheren Spitzenzahlen und Mittenrauwerte auf eine Veränderung im Dressierprozess hin.

In Bild 36 ist der Verlauf der Messwerte über die Coillänge in der Coilmitte (Messspur M3) für den Mittenrauwert und die Spitzenzahl exemplarisch für Coil₁₅ dargestellt. Zu erkennen ist, dass die Rauheit sowohl für den Mittenrauwert Ra wie auch für die Spitzenzahl RPC einen nahezu konstanten, homogenen Verlauf über die gesamte Coillänge zeigt. Der durchschnittliche Mittenrauwert beträgt $Ra_0 = 1,41 \mu\text{m}$. Zudem streuen die Messwerte zwischen $Ra_{\min} = 1,30 \mu\text{m}$ und $Ra_{\max} = 1,49 \mu\text{m}$. Die Spitzenzahl streut zwischen $RPC_{\min} = 67 \text{ cm}^{-1}$ und $RPC_{\max} = 77 \text{ cm}^{-1}$ und beträgt im Durchschnitt über die gesamte Coillänge $RPC_{\min} = 72 \text{ cm}^{-1}$. Die Messungen zeigen, dass keine signifikante Änderung des Rauheitsniveaus über die Coillänge von 1600 Metern auftritt. Dieses Ergebnis war zu erwarten, da ein Verschleiß der Dressierwalzen erst nach mehreren Kilometern Bandlänge anzunehmen ist. Pfestorf [89] analysiert die Veränderung der Coiloberfläche in Abhängigkeit der Nutzungsdauer der Dressierwalze und kommt zu keinem eindeutigen Ergebnis hinsichtlich einer Abnahme der untersuchten Rauheitskenngrößen über die Coillänge. Untersuchungen von Neumann [34] legen ebenfalls dar, dass keine signifikante Zunahme oder Abnahme des Mittenrauwerths Ra über die Coillänge festzustellen ist. Zusammenfassend zeigen die Ergebnisse, dass keine signifikante Änderung der Rauheit über die Coillänge innerhalb eines Coils auftritt. Unterschiede des Rauheitsniveaus sind lediglich zwischen verschiedenen Coils zu verzeichnen. Inwieweit Schwankungen der Rauheit über die Coilbreite auftreten, wird im nächsten Abschnitt untersucht.

5 Ursachenanalyse und Charakterisierung von im Serienprozess erfassten Halbzeugeigenschaften

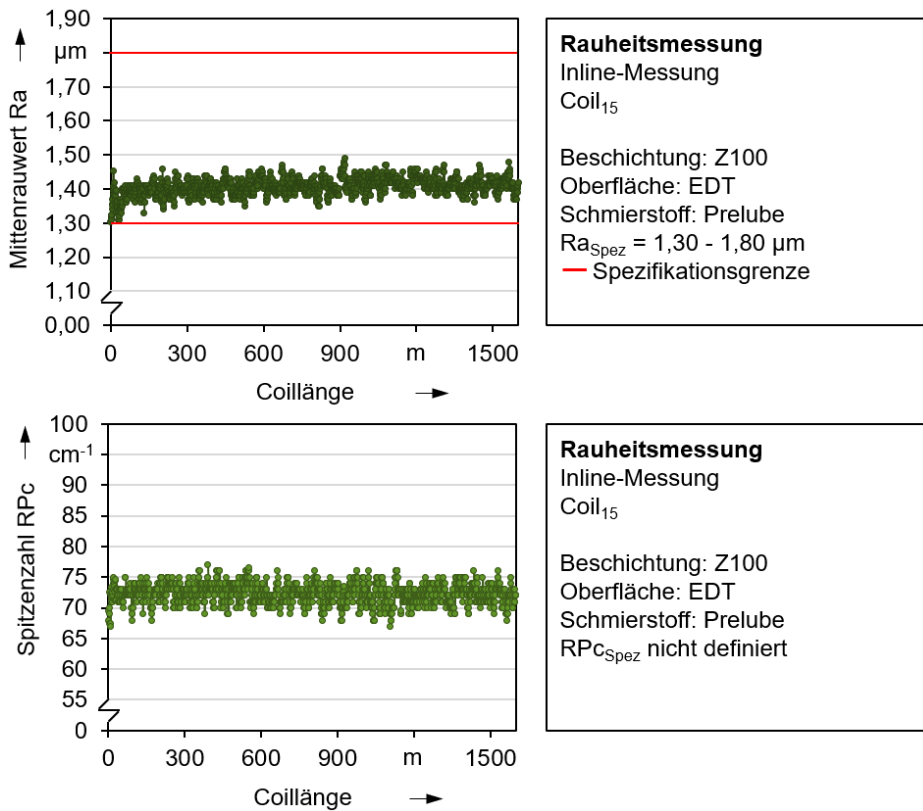


Bild 36: Messwerte des Mittenrauheits Ra (oben) und der Spitzenzahl RPC (unten) für Coil₁₅ über eine Coillänge von 1608 m

Schwankungen der Rauheit über die Coilbreite

Um eine Aussage über das Auftreten von Schwankungen der Rauheit in Abhängigkeit der Coilbreite treffen zu können, wurden an weiteren 11 Coils die Rauheit, wie zuvor beschrieben (siehe Bild 35) an fünf definierten Positionen, erfasst. Da die verschiedenen Coils unterschiedliche Längen aufweisen, wurden zur Charakterisierung der Schwankungen jeweils die ersten 1000 Meter herangezogen, sodass für jede Messspur Werte über eine Länge von 200 Metern vorliegen.

In Bild 37 sind die Mittelwerte aller über das Coil erfassten Messwerte für den Mittenrauwert und die Spitzenzahl abgebildet. Der Mittenrauwert für Coil₁₆ bis Coil₂₆ liegt zwischen Ra = 1,32 µm und Ra = 1,35 µm. Auch für diese Coils ist festzustellen, dass sich die Werte innerhalb der Spezifikation befinden, wobei sie wiederum im unteren Drittel der Spezifikation liegen.

Zudem sind keine signifikanten Schwankungen zu erkennen. Ähnliche Ergebnisse sind für die Spitzenzahl RP_c zu verzeichnen. Die Spitzenzahl für $Coil_{16}$ bis $Coil_{26}$ liegen im Mittel zwischen $RP_c = 71 \text{ cm}^{-1}$ und $RP_c = 72 \text{ cm}^{-1}$ und sind mit dem Rauheitsniveau von $Coil_1$ bis $Coil_{15}$ vergleichbar.

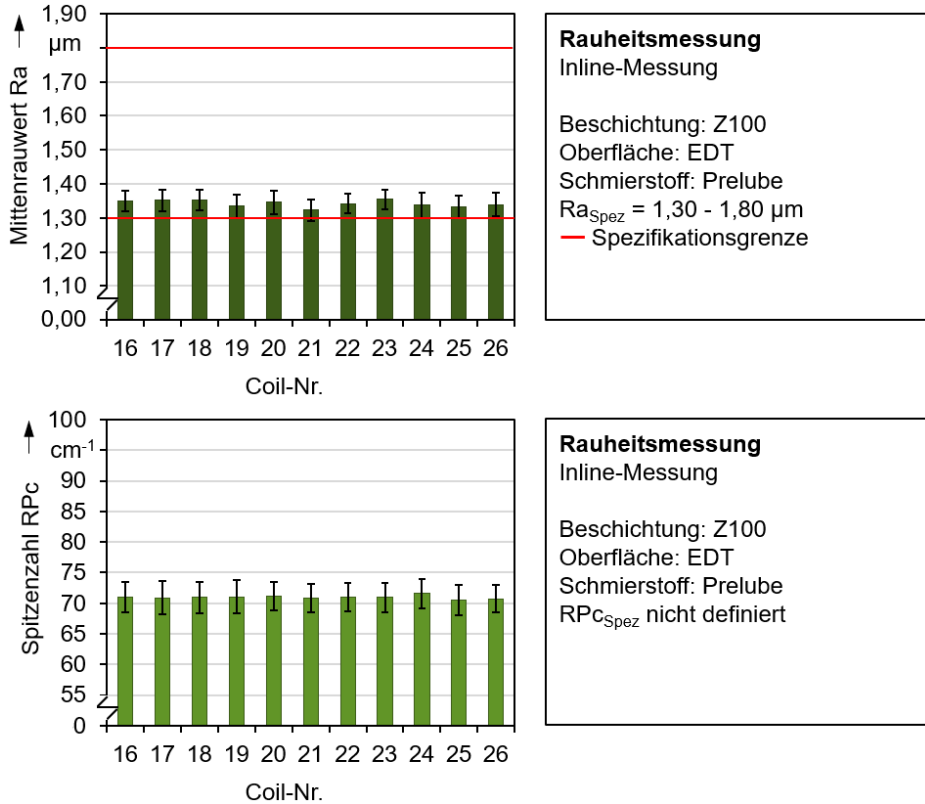


Bild 37: Inline-Messwerte für den Mittenrauwert Ra (oben) und die Spitzenzahl RP_c (unten) über eine Coillänge von 1000 Metern aller über die Coillbreite erfassten Werte

Zur Verdeutlichung der Schwankungen über die Coillbreite sind in Bild 38 exemplarisch die Mittelwerte der jeweils an den fünf Messspuren erfassten Messwerte für den Mittenrauwert und die Spitzenzahl für $Coil_{22}$ dargestellt. Der Mittenrauwert an den jeweiligen Messspuren schwankt zwischen $Ra_{min} = 1,32 \text{ } \mu\text{m}$ und $Ra_{max} = 1,37 \text{ } \mu\text{m}$ sowie die Spitzenzahl zwischen $RP_{c, min} = 69 \text{ cm}^{-1}$ und $RP_{c, max} = 73 \text{ cm}^{-1}$. Die Vermutung von Faaß [32], dass die höchste Rauheit in der Bandmitte vorliegt, kann nicht bestätigt werden. Die Untersuchungen von Neumann [34] belegen ebenfalls, dass keine

Zunahme oder Abnahme des Mittenrauheits R_a über die Coilbreite festgestellt werden kann. Der höchste Mittenrauheitswert wurde für die Messspur M4 ermittelt und zudem die höchste Spitzenzahl RP_c an Messspur M1.

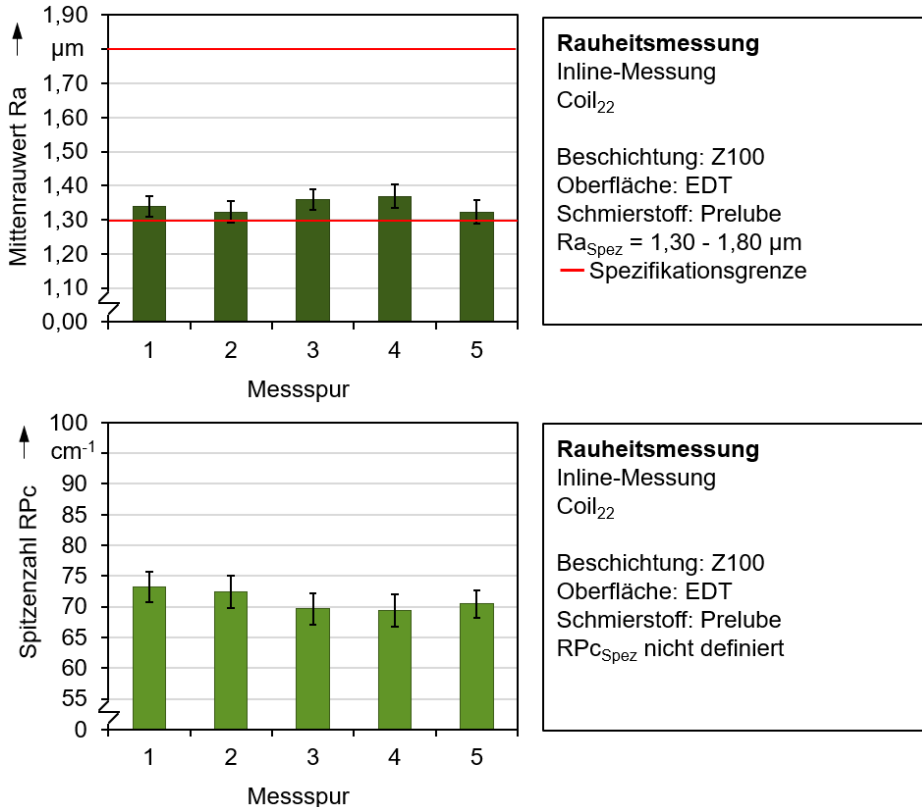


Bild 38: Inline-Messwerte für den Mittenrauheits R_a (oben) und die Spitzenzahl RP_c (unten), gemessen an fünf Positionen über Coilbreite für Coil₂₂

In Bild 39 sind zusätzlich für die fünf Messspuren die Mittelwerte von Coil₁₆ bis Coil₂₆ dargestellt. Es zeigt sich, dass die Charakteristik der Rauheit über die Coilbreite einem Muster folgt. Wie bereits für Coil₂₂, beschrieben, ist auch für die restlichen zehn Coils der höchste Mittenrauheitswert an Messspur M4 zu verzeichnen sowie der geringste Wert an Messspur M2. Das Ergebnis für Coil₂₂ bezüglich der höchsten Spitzenzahl an Messspur M1 spiegelt sich auch in den Ergebnissen der weiteren Coils wider. Ein möglicher Grund für die Charakteristik der Rauheit über die Coilbreite könnte durch eine inhomogene Kraftverteilung der Walze im Dressierprozess sein [89]. Diese könnte zur Folge haben, dass in Bereichen, in denen eine geringere

Kraft auf die Oberfläche wirkt, das Rauheitsprofil der Dressierwalze weniger stark übertragen wird. Dem gegenüber würde in Bereichen, in denen eine höhere Kraft auf die Oberfläche wirkt das Profil der Dressierwalze stärker übertragen, welches sich wiederum in höheren Rauheitsmesswerten widerspiegelt.

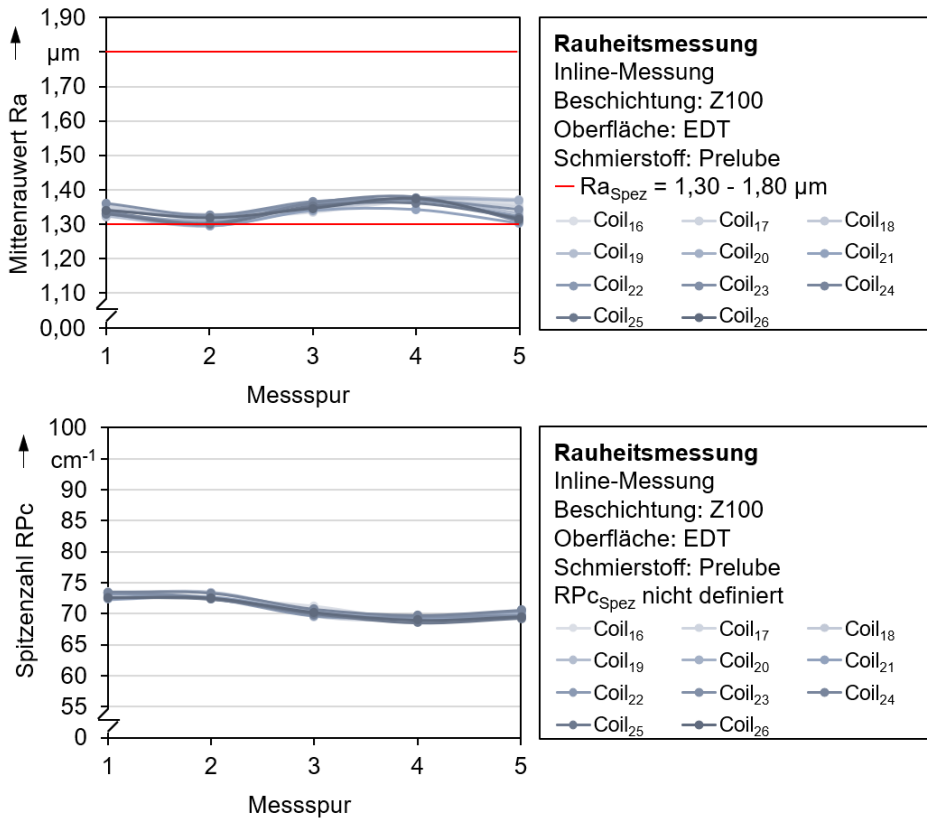


Bild 39: Inline-Messwerte für den Mittenrauwert Ra (oben) und die Spitzenzahl RPC (unten), gemessen an fünf Positionen über die Coillbreite für Coil₁₆ bis Coil₂₆

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Rauheit im Allgemeinen geringen Schwankungen unterliegt. Sowohl die Rauheit innerhalb eines Coils, über die Coillänge und über die Coillbreite, wie auch der Vergleich der Rauheit mehrerer Coils zeigt, dass im untersuchten Umfang keine ausgeprägten Schwankungen, welche die Spezifikation überschreiten, auftreten. Tabelle 6 fasst die wesentlichen Erkenntnisse der untersuchten Effekte noch einmal zusammen.

Tabelle 6: Erkenntnisse der Untersuchungen hinsichtlich der Schwankungen der Rauheit

Nr.	Untersuchter Effekt	Erkenntnis
1	Schwankung der Rauheit von Coil zu Coil	Geringe Schwankungen von Coil zu Coil
		Rauheitsniveau im unteren Drittel der werkseitigen Vorgaben
2	Schwankung der Rauheit über die Coillänge	Keine signifikanten Schwankungen
3	Schwankung der Rauheit über die Coilbreite	Keine signifikanten Schwankungen

Eine mögliche Ursache für die geringen Schwankungen der Rauheit ist ein gleichmäßiger und präzise regulierbarer Dressierprozess im Walzwerk. Des Weiteren ist davon auszugehen, dass die Dressierwalzen in regelmäßigen Abständen getauscht werden, um einem vorzeitigen Verschleiß der Walzen vorzubeugen. Zudem ist keine Veränderung der Rauheit durch den Transport der Coils zu erwarten.

Demzufolge ist davon auszugehen, dass aufgrund der sehr geringen Schwankungen der Rauheit, diese keinen signifikanten Einfluss auf das Reibverhalten und damit auf die Bauteilqualität bei der umformtechnischen Herstellung von Karosseriebauteilen hat. Des Weiteren ist anzunehmen, dass keine signifikanten Änderungen der tribologischen Bedingungen aufgrund einer Änderung des Rauheitsniveaus, bei einem Coilwechsel im Rahmen eines Produktionsauftrags an der Presse, auftreten. Somit ist der Einfluss von Schwankungen der Rauheit auf den Fertigungsprozess als gering zu bewerten.

5.3 Zusammenfassende Bewertung der Charakterisierung von Chargenschwankungen

Im Rahmen dieses Kapitels wurden Untersuchungen zur Charakterisierung von Chargenschwankungen der für die Tribologie relevanten Halbzeugeigenschaften durchgeführt sowie potenzielle Faktoren, welche einen Einfluss auf die Schwankungen haben können, analysiert. So konnte festgestellt werden, dass die durchschnittliche Schmierstoffmenge je Coil innerhalb der werkseitigen Vorgaben liegt, jedoch keine Aussage bezüglich des

Auftretens von schwankenden Schmierstoffmengen innerhalb eines Coils getroffen werden kann. Demnach hat sich gezeigt, dass die Schmierstoffmenge über die Coilbreite zum Teil starken Schwankungen unterliegt, welche lokal die vorgegebene Schmierstoffspezifikation überschreitet und unterschreitet. Die Ausprägung der Inhomogenität der Schmierstoffverteilung (Schmierstoffumverteilung) kann anhand der Standardabweichung der Schmierstoffmesswerte über die Coilbreite charakterisiert werden. Ferner konnte eine zunehmende Schmierstoffumverteilung über die Coillänge identifiziert werden, welche jedoch im Vergleich zur Schmierstoffumverteilung über die Coilbreite gering ausfällt. Zudem ergibt sich aus den Ergebnissen, dass lediglich ein geringer Umfang an Coils eine nahezu homogene sowie stark inhomogene Schmierstoffverteilung aufweist. Der größte Anteil der untersuchten Coils weist eine mittlere Schmierstoffumverteilung auf. Als wesentlicher Faktor, welcher in Wechselwirkung mit der Umverteilung des Schmierstoffes steht, ist die Lagerdauer der Coils. Daraus resultiert, dass sich die Ausprägung der Umverteilungsscharakteristik mit zunehmender Lagerdauer verstärkt. Des Weiteren wurde ein potenzieller Zusammenhang zwischen der Balligkeit des Bleches über die Coilbreite und der Schmierstoffumverteilung untersucht, welcher jedoch nicht als signifikant nachgewiesen werden konnte. Ein möglicher Grund dafür ist, dass der Unterschied hinsichtlich der Balligkeit der Coils zu gering ist, um einen Einfluss zu identifizieren oder andere Einflüsse, wie beispielsweise die Lagerdauer dominieren. Die Untersuchungen hinsichtlich des Auftretens von Schwankungen der Rauheit haben ergeben, dass die Rauheit in Abhängigkeit der Coillänge keine signifikanten Änderungen aufweist. Unterschiede im Rauheitsniveau sind hingegen bei verschiedenen Coils zu verzeichnen. Diese sind jedoch als gering zu bewerten, da das zulässige Rauheitsspektrum nicht ausgeschöpft wird. Zusätzlich hat sich gezeigt, dass die Rauheit über die Coilbreite lediglich geringen Schwankungen unterliegt. Aufgrund der Konstanz der Rauheit ist davon auszugehen, dass diese im vorgegebenen Spektrum keinen signifikanten Einfluss auf das Reibverhalten bei der Herstellung im Serienprozess hat. Die drei wesentlichen Erkenntnisse der Untersuchungen zur Charakterisierung der Halbzeugeigenschaften lauten:

1. Signifikant inhomogene Schmierstoffverteilung über die Coilbreite und zunehmende Inhomogenität über die Coillänge bei durchschnittlichen Schmierstoffmengen je Coil innerhalb der werkseitigen Vorgaben.

2. Lagerdauer zwischen Glühdatum und Platinenzuschnitt als Haupteinflussfaktor auf die Homogenität der Schmierstoffverteilung der Coils.
3. Keine signifikanten Schwankungen der Rauheit über die Coillänge und Coilbreite bei gleichzeitig niedrigem Rauheitsniveau im unteren Drittel der werkseitigen Vorgaben.

Für die nachfolgenden Streifenziehversuche, welche zur Charakterisierung des Reibverhaltens dienen, werden auf Basis dieser Ergebnisse die Kriterien für die Auswahl der Halbzeuge festgelegt. Im Rahmen der Untersuchungen werden Halbzeuge verwendet, welche zur Fertigung von Karosseriebauteilen im Serienprozess dienen. Folglich ergeben sich Restriktionen, sodass eine Priorisierung der Kriterien vorgenommen wird. Da sich gezeigt hat, dass die Schmierstoffmenge die größten Schwankungen aufweist, werden Coils mit stark unterschiedlichen Schmierstoffmengen für die Reibuntersuchungen herangezogen. Somit gilt die Rauheit als zweitrangiges Auswahlkriterium.

6 Methode zur Charakterisierung der tribologischen Bedingungen bei Chargenschwankungen

Die vorangegangenen Untersuchungen zeigen, dass Schwankungen der Halbzeugeigenschaften im Serienprozess auftreten, welche sich auf das Reibverhalten bei der umformtechnischen Herstellung von Karosseriebauteilen auswirken können und sich folglich in der Bauteilqualität widerspiegeln. Daher erfolgt in diesem Kapitel, auf Basis der Erkenntnisse aus Kapitel 5, die Untersuchung der Wirkzusammenhänge zwischen der Schmierstoffmenge sowie der Rauheit und dem resultierenden Reibverhalten. Für die folgenden Untersuchungen werden Coils aus dem Serienprozess herangezogen, welche für die Streifenziehversuche dienen. Es wird zunächst auf die Vorgehensweise im Rahmen der Streifenziehversuche und die Auswertungsmethodik eingegangen. Um die Einflussfaktoren auf das Reibverhalten bewerten zu können, erfolgt eine Untersuchung der Oberflächeneigenschaften der Coils bzw. der Blechstreifen. Im Weiteren werden die Ergebnisse der Oberflächencharakterisierung den in den Streifenziehversuchen ermittelten Reibzahlen gegenübergestellt. Die Untersuchungen dienen dazu, die im Serienprozess vorherrschenden Schwankungen der Reibungsbedingungen zu identifizieren und zu charakterisieren, um Maßnahmen für die Simulation und die numerische Prozessauslegung zum Ziel der Robustifizierung der Produktion ableiten zu können. Ziel ist es, Erkenntnisse über die Homogenität des Reibverhaltens, unter dem Einfluss inhomogener tribologischer Bedingungen aufgrund von Chargenschwankungen, zu gewinnen.

6.1 Methodik zur Halbzeugcharakterisierung und Reibungscharakterisierung

Zur Charakterisierung des Reibverhaltens werden im Rahmen dieser Arbeit Blechstreifen aus acht bisher noch nicht untersuchten Chargen untersucht. Diese entsprechen acht verschiedenen Coils. Die Auswahl der Coils erfolgt anhand der in Abschnitt 4.4.2 definierten Kriterien, welche eine EDT-Oberflächentexturierung, eine feuerverzinkte Oberflächenbeschichtung (Z100) und eine für Aussenhautbauteile entsprechende Oberflächenqualität mit einer Rauheitsspezifikation von $Ra_{Spez} = 1,10 - 1,60 \mu m$ und

$RPC_{\text{Spez}} \geq 50 \text{ cm}^{-1}$ beinhalten. Ein weiteres Kriterium sind die in Kapitel 5 erarbeiteten Erkenntnisse. Demnach werden Coils mit stark schwankenden Schmierstoffmengen für die Untersuchungen herangezogen.

Vorgehensweise zur Halbzeugcharakterisierung

Die Streifen werden, in Durchlaufrichtung des Blechbands durch die Coilanlage, aus dem Blechband bzw. der Platine entnommen. Dementsprechend sind die Streifen in Walzrichtung orientiert. Bild 40 zeigt exemplarisch die Entnahmeposition der Blechstreifen anhand einer Seitenrahmenplatine. Um die im Serienprozess vorliegenden Schmierstoffschwankungen im Streifenziehversuch abzubilden, wird an dieser Stelle auf eine Reinigung und eine erneute Schmierstoffapplikation verzichtet, um keine Veränderung des Anlieferzustands der Blechoberfläche zu erzeugen. Die für die Streifenziehversuche eingesetzten Blechstreifen entsprechen somit dem Anlieferzustand der vom Lieferanten gelieferten Coils. Das Abmaß der Streifen wurde entsprechend der Werkzeuggeometrie (vgl. Abschnitt 4.4.1) breiter festgelegt und beträgt 110 mm x 700 mm.

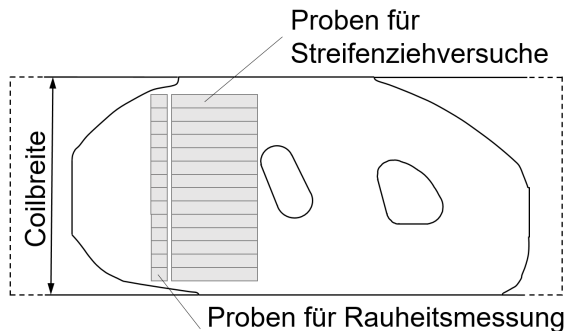


Bild 40: Exemplarische Darstellung der Entnahmeposition der Blechstreifen aus einer Seitenrahmenplatine

Um den Einfluss der Halbzeugeigenschaften auf das Reibverhalten untersuchen zu können, erfolgt zunächst die Charakterisierung der Halbzeugoberfläche. Dazu wird die Schmierstoffmenge entsprechend auf der Ober- und Unterseite der jeweiligen Streifen, mithilfe eines Handmessgerätes zur Schmierstoffmengenbestimmung, ermittelt. Die Messung der Schmierstoffmenge erfolgt an jeweils drei Positionen je Seite unter Verwendung der in Abschnitt 4.3.2 beschriebenen Messmethode. Anschließend wird je Streifen der Mittelwert aus allen Messwerten bestimmt. Des Weiteren erfolgt die Messung der Rauheit. Dazu wird zusätzlich zu den Blech-

streifen, welche für die Streifenziehversuche dienen, eine weitere Blechprobe zur Bestimmung der Rauheit aus der Platine entnommen (vgl. Bild 40). Die Ermittlung der Rauheit erfolgt ebenfalls für die Ober- und Unterseite der jeweiligen Probe mittels eines taktilen Rauheitsmesssystem. Es werden je Probe und Seite vier Wiederholungsmessungen durchgeführt. Die Rauheit einer Blechprobe wird wiederum durch den Mittelwert aller je Probe ermittelten Messwerte beschrieben. Die Durchführung der Rauheitsmessung erfolgt entsprechend der in Abschnitt 4.3.1 beschriebenen Methode.

Vorgehensweise zur Reibungscharakterisierung

Die experimentelle Untersuchung des Reibverhaltens der Blechstreifen erfolgt im Streifenziehversuch. Dazu werden die Blechstreifen, an denen zuvor die Oberflächencharakterisierung vorgenommen wurde, herangezogen, um im Flachbahnversuch, wie in Abschnitt 4.4.1 beschrieben, die jeweilige Reibzahl zu ermitteln. Aus dem Verhältnis der mittels Kraftmessdose erfassten Ziehkraft F_Z und Normalkraft F_N über die Ziehlänge wird die Reibzahl nach dem Coulomb'schen Reibungsgesetz bestimmt. Die Ziehlänge beträgt 300 mm, wobei der zur Bestimmung der Reibzahl verwendete Auswertungsbereich im Kraft-Weg-Diagramm bzw. Reibzahl-Weg-Diagramm zwischen 150 mm und 250 mm liegt. Folglich wird jeder Streifen durch den Mittelwert aller Reibzahlen des Auswertungsbereichs charakterisiert. Bild 41 zeigt exemplarisch einen typischen Verlauf der Reibzahl über die Ziehlänge eines Blechstreifens. Zusätzlich ist der Auswertebereich hervorgehoben, anhand dessen die Charakterisierung der Reibung vorgenommen wird.

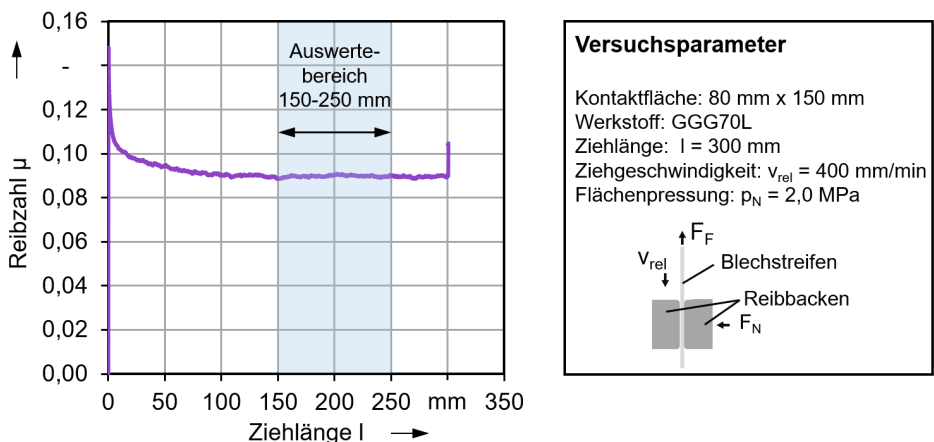


Bild 41: Exemplarische Darstellung eines Verlaufs der Reibzahl über die Ziehlänge mit Auswertebereich

Um den Einfluss der Halbzeugeigenschaften untersuchen zu können, wird keine Änderung der Relativgeschwindigkeit v_{rel} sowie der Flächenpressungen p_N vorgenommen. Tabelle 7 fasst die wichtigsten verwendeten Parameter zur Bestimmung der Reibzahl zusammen.

Tabelle 7: Übersicht der wichtigsten Parameter zur Bestimmung der Reibzahl

Parameter	Eigenschaft
Streifenabmessung	110 mm x 700 mm
Ziehlänge l	300 mm
Auswertungsbereich	150 - 250 mm
Ziehgeschwindigkeit v_{rel}	400 mm/min
Flächenpressung p_N	2,0 MPa

6.2 Charakterisierung der Halbzeuge

Zur Identifikation von Zusammenhängen zwischen den Oberflächeneigenschaften der Coils und dem Reibverhalten werden Untersuchungen zur Charakterisierung der für die Streifenziehversuche verwendeten Blechstreifen vorgenommen. Als vornehmliches Auswahlkriterium für die Versuche gilt die Schmierstoffmenge, da diese, wie in Kapitel 5 beschrieben, stärkeren Schwankungen im Vergleich zur Rauheit unterliegt. Die Oberflächeneigenschaften wurden, wie in Abschnitt 6.1 beschrieben, unter Verwendung von Laborsystemen erfasst.

In diesem Abschnitt wird zunächst auf die ermittelten Halbzeugeigenschaften hinsichtlich der Rauheit und der Schmierstoffmenge der Coils bzw. Blechstreifen eingegangen, welche im Weiteren für die Ermittlung der Reibzahlen herangezogen werden. Zur Verdeutlichung der Charakteristik der Coils erfolgt eine Gegenüberstellung der ermittelten Oberflächeneigenschaften aller Blechstreifen eines Coils jeweils für die Coiloberseite und Coilunterseite anhand eines Mittelwertes.

Schmierstoffmenge aller acht Coils

In Bild 42 sind die Messwerte für die Schmierstoffmenge der Blechstreifen, welche aus acht Coils entnommen wurden, jeweils für die Blechoberseite und Blechunterseite dargestellt. Deutlich zu erkennen ist, dass sich die Schmierstoffmengen der jeweiligen Coils stark voneinander unterscheiden.

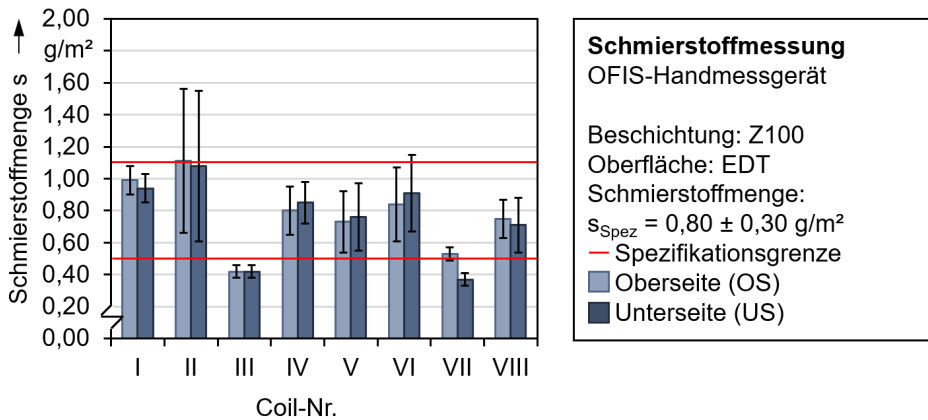


Bild 42: Gegenüberstellung der für die Ober- und Unterseite ermittelten Schmierstoffmesswerte aller acht Coils

Ausgenommen von Coil III und Coil VII, für welche die Schmierstoffmenge mit Durchschnittswerten von $s_{\text{III},\text{OS}} = 0,42 \text{ g/m}^2$ für die Oberseite von Coil III, $s_{\text{III},\text{US}} = 0,42 \text{ g/m}^2$ für die Unterseite von Coil III und $s_{\text{VII},\text{OS}} = 0,37 \text{ g/m}^2$ für die Unterseite von Coil VII unterhalb der werkseitigen Vorgaben liegen, sind die Schmierstoffmittelwerte innerhalb der Spezifikation. Des Weiteren bestätigen sich die Erkenntnisse hinsichtlich der nahezu gleichen Schmierstoffmenge auf der Ober- und Unterseite der Coils. Mit Ausnahme von Coil VII liegt die Differenz der Schmierstoffwerte zwischen Coiloberseite und Coilunterseite bei $\leq 0,07 \text{ g/m}^2$. Bereits in Abschnitt 5.1.2 konnte dargelegt werden, dass ein Zusammenhang zwischen der Schmierstoffmenge sowie der Schmierstoffverteilung über die Coilbreite zwischen den jeweiligen Coilseiten besteht.

Die Standardabweichungen der Schmierstoffmesswerte zeigen ebenfalls für die jeweiligen Seiten eine vergleichbare Größenordnung, wodurch sich auch die Annahme einer vergleichbar homogenen bzw. inhomogenen Schmierstoffverteilung über die Coilbreite bzw. die Blechstreifen erhärtet. Die Blechstreifen aus Coil III und Coil VII weisen neben einer geringen Schmierstoffmenge auch eine geringe Standardabweichung auf. Dies lässt auf eine homogene Verteilung des Schmierstoffes über die Coilbreite schließen. Coil II hingegen besitzt die höchsten durchschnittlichen Schmierstoffmengen mit Werten von $s_{\text{II},\text{OS}} = 1,11 \text{ g/m}^2$ auf der Blechoberseite bzw. $s_{\text{II},\text{US}} = 1,08 \text{ g/m}^2$ auf der Unterseite und zugleich die höchste Standardabweichung. Folglich liegt in diesem Fall eine stark inhomogene Schmierstoffverteilung vor. Zudem liegen die Schmierstoffmengen für

Coil II an der oberen Spezifikationsgrenze. Erneut lässt dies vermuten, dass eine geringe Schmierstoffmenge mit einer homogenen Schmierstoffverteilung und eine hohe Schmierstoffmenge mit einer inhomogenen Schmierstoffverteilung einhergeht. Ein Grund dafür könnte sein, dass bei einer geringen Schmierstoffmenge die Schmierstofftaschen auf der Coiloberfläche mit Schmierstoff gefüllt sind, jedoch keine übermäßigen Schmierstoffmengen vorliegen, welche durch die Coilwicklungen und die vorliegende Flächenpressung in die Randbereiche verdrängt werden. Demgegenüber liegt nahe, dass bei einer hohen Schmierstoffmenge, der Schmierstoff, welcher nicht von den Schmierstofftaschen aufgenommen werden kann, eine Verdrängung in die äußeren Bereiche des Coils erfährt. Dieser Zusammenhang konnte jedoch anhand der Korrelation zwischen der durchschnittlichen Schmierstoffmenge je Coil und der Standardabweichung als Indikator für die Schmierstoffumverteilung nicht eindeutig, wie in Abschnitt 5.1.2 beschrieben, bestätigt werden. Die verbleibenden Coils zeichnen sich durch Schmierstoffwerte zwischen durchschnittlich $s_0 = 0,75$ und $0,98 \text{ g/m}^2$ aus. Die Standardabweichungen der Coils Coil IV, Coil V, Coil VI und Coil VIII deuten mit Werten für die Standardabweichung von $\sigma = 0,12$ bis $0,24$ auf eine mittlere Schmierstoffumverteilung hin. Zusammenfassend zeigen die Daten, dass signifikante Unterschiede hinsichtlich der Schmierstoffmenge und Homogenität der Schmierstoffverteilung bei den acht untersuchten Coils vorliegen.

Rauheit aller acht Coils

Die Untersuchungen der Rauheit für alle acht Coils zeigen, dass die Vorgaben für Aussenhautbauteile in Bezug auf den Mittenrauwert R_a nahezu erfüllt werden. Und die Spezifizierung für die Spitzenzahl RP_c eingehalten wird. Der Vergleich der Rauheitsmesswerte für den Mittenrauwert ist in Bild 43 dargestellt und zeigt, dass Coil I bis Coil V ein übereinstimmendes Rauheitsniveau besitzen. Die maximale Differenz beträgt $0,04 \text{ }\mu\text{m}$ und ist für Coil IV zu verzeichnen. Coil VI bis Coil VIII hingegen zeigen Unterschiede hinsichtlich der Mittenrauwerte R_a für die jeweiligen Seiten. Die Werte für Coil VI und Coil VII verdeutlichen, dass die Unterseite jeweils eine höhere Rauheit aufweist und die Differenz zur Oberseite $0,09 \text{ }\mu\text{m}$ bzw. $0,14 \text{ }\mu\text{m}$ beträgt. Lediglich bei Coil VIII ist die Rauheit auf der Oberseite höher als auf der Unterseite. Der Unterschied beträgt $0,17 \text{ }\mu\text{m}$. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass geringe Unterschiede des Rauheitsniveaus zwischen Coiloberseite und Coilunterseite innerhalb eines Coils auftreten können.

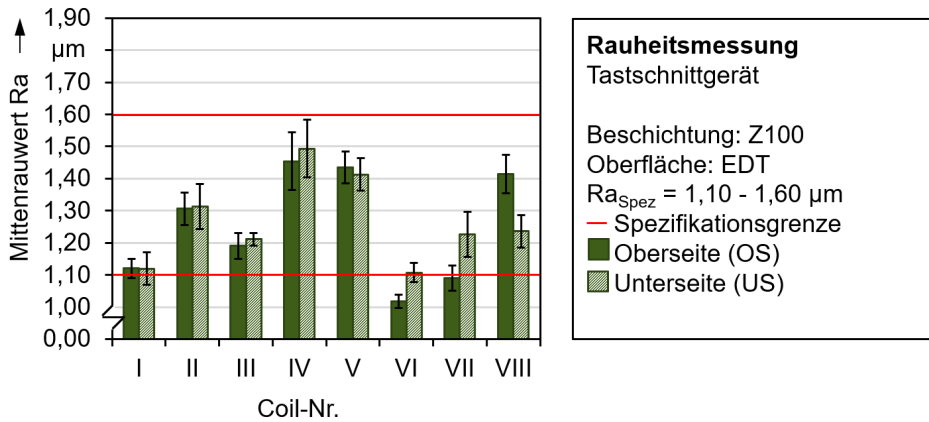


Bild 43: Gegenüberstellung der für die Ober- und Unterseite ermittelten Mittenrauwerte Ra aller acht Coils

Des Weiteren sind Unterschiede des Rauheitsniveaus von Coil zu Coil zu erkennen. Coil VI besitzt mit Werten von $Ra_{CoilVI,OS} = 1,02 \mu m$ und $Ra_{CoilVI,US} = 1,11 \mu m$ die geringsten Mittenrauwerte, welche damit zum Teil die Spezifikationsgrenze unterschreiten. Im Gegensatz dazu betragen die Rauheitswerte von Coil IV jeweils für die Coiloberseite bzw. Coilunterseite $Ra_{CoilIV,OS} = 1,45 \mu m$ sowie $Ra_{CoilIV,US} = 1,49 \mu m$ und befinden sich damit über denen der anderen sieben Coils. Zudem zeigt sich, dass die Werte für die Rauheit der Coils tendenziell an der unteren Spezifikationsgrenze liegen und nicht die gesamte zulässige Vorgabe ausgeschöpft wird. Allumfassend ist festzuhalten, dass das Rauheitsniveau von Coil zu Coil signifikanten Schwankungen unterliegen kann. Die im Serienprozess erfassten Rauheitswerte (vgl. Abschnitt 5.2.2) zeigen anhand einer großen Datenmenge, dass Schwankungen nicht gänzlich auszuschließen sind, jedoch tendenziell selten auftreten und als gering bewertet werden können.

Die Spitzenzahlen RPc auf den jeweiligen Seiten der Coiloberfläche sind bei allen acht Coils hingegen nahezu gleich (vgl. Bild 44). Somit erhärtet sich die Vermutung, dass keine außerordentlichen Unterschiede des Rauheitsniveaus zwischen der Coiloberseite und -unterseite zu erwarten sind. Zudem liegt die Spitzenzahl RPc für alle Coils oberhalb der Vorgabe von $RPc \geq 50 \text{ cm}^{-1}$. Der größte Unterschied zwischen der Coiloberseite und Coilunterseite ist bei Coil II erkennbar. Die Spitzenzahl beträgt $RPc_{CoilII,OS} = 73 \text{ cm}^{-1}$ für die Oberseite und $RPc_{CoilII,US} = 79 \text{ cm}^{-1}$ für die Unterseite, woraus sich eine Differenz von 6 cm^{-1} ergibt, welche als gering bewertet

werden kann. Des Weiteren zeigt sich, dass Coil IV, welches, wie zuvor beschrieben, die höchsten Mittenrauwerte R_a besitzt, in diesem Fall mit Spitzenzahlen von $RP_{C_{CoilIV,OS}} = 63 \text{ cm}^{-1}$ und $RP_{C_{CoilIV,US}} = 61 \text{ cm}^{-1}$ die geringsten Werte aufweist. Die höchsten Spitzenzahlen liegen bei $RP_{C_{CoilV,OS}} = 82 \text{ cm}^{-1}$ und $RP_{C_{CoilV,US}} = 83 \text{ cm}^{-1}$ für die Coiloberseite bzw. -unterseite von Coil V. Folglich sind auch bei der Spitzenzahl von Coil zu Coil signifikante Unterschiede hinsichtlich des Rauheitsniveaus zu verzeichnen, wohingegen nur geringe Unterschiede zwischen dem Rauheitsniveau auf der Coiloberseite und Coilseite festzustellen sind.

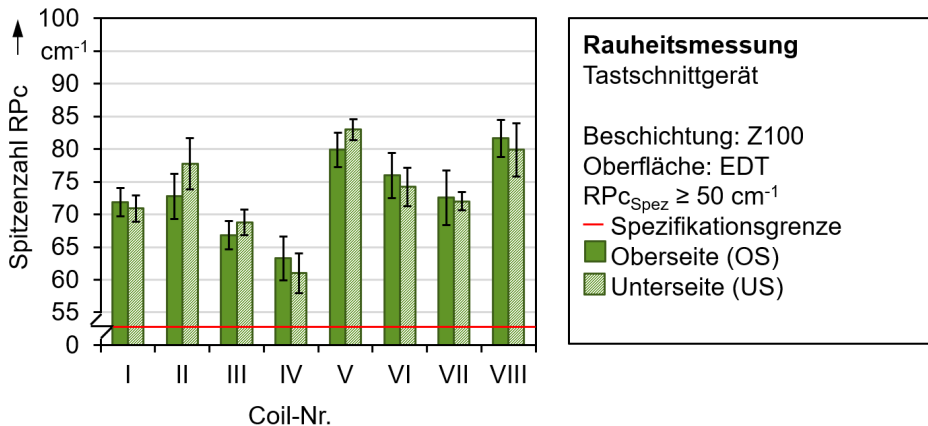


Bild 44: Gegenüberstellung der für die Ober- und Unterseite ermittelten Spitzenzahlen RP_c (unten) aller acht Coils

Tabelle 8 zeigt zusätzlich eine Übersicht der ermittelten Minima, Maxima und Durchschnittswerte der Schmierstoffmenge s , der Spitzenzahl RP_c sowie des Mittenrauerts R_a und fasst die Halbzeugeigenschaften der jeweiligen Coils zusammen. Daraus ergibt sich für die Oberflächeneigenschaften ein Untersuchungsbereich von:

- $s_{\min} = 0,37 \text{ g/m}^2$ bis $s_{\max} = 1,55 \text{ g/m}^2$ für die Schmierstoffmenge,
- $R_{a_{\min}} = 1,03 \text{ }\mu\text{m}$ bis $R_{a_{\max}} = 1,63 \text{ }\mu\text{m}$ für den Mittenrauwert R_a und
- $RP_{c_{\min}} = 59 \text{ cm}^{-1}$ bis $RP_{c_{\max}} = 85 \text{ cm}^{-1}$ für die Spitzenzahl RP_c .

Demzufolge kann anhand der acht aus dem Serienprozess stammenden Coils ein umfassender Bereich von Halbzeugeigenschaften, welche die tatsächlich auftretenden Schwankungen berücksichtigen, abgedeckt und deren Wechselwirkung hinsichtlich des Reibungsverhaltens untersucht werden.

Tabelle 8: Übersicht der Minima, Maxima und Mittelwerte der ermittelten Mittenrauwerte, Spitzenzahlen und Schmierstoffmengen aller acht Coils

Coil	Mittenrauwert Ra in μm			Spitzenzahl RPc in cm^{-1}			Schmierstoff- menge s in g/m^2		
	Min.	Max.	$\emptyset$	Min.	Max.	$\emptyset$	Min.	Max.	$\emptyset$
I	1,06	1,18	1,12	69	74	71	0,83	1,10	0,98
II	1,25	1,38	1,31	74	77	75	0,43	1,55	1,10
III	1,16	1,23	1,20	66	71	68	0,37	0,46	0,42
IV	1,35	1,62	1,47	59	69	62	0,65	1,20	0,83
V	1,36	1,49	1,42	80	85	81	0,54	1,14	0,75
VI	1,03	1,09	1,06	70	79	75	0,55	1,23	0,87
VII	1,12	1,22	1,16	70	75	72	0,38	0,48	0,45
VIII	1,21	1,39	1,33	76	85	81	0,50	0,98	0,73

Schmierstoffmenge der Blechstreifen

In Bild 45 sind exemplarisch die Messwerte der einzelnen Blechstreifen von Coil VI dargestellt. Die Schmierstoffmesswerte für die Oberseite liegen zwischen $s_{\text{min,OS}} = 0,52 \text{ g}/\text{m}^2$ und $s_{\text{max,OS}} = 1,21 \text{ g}/\text{m}^2$ sowie die für die Unterseite zwischen $s_{\text{min,US}} = 0,57 \text{ g}/\text{m}^2$ und $s_{\text{max,US}} = 1,30 \text{ g}/\text{m}^2$. Die Grafik zeigt wiederum, dass die Schmierstoffmesswerte der jeweiligen Streifen auf der Ober- und Unterseite eine signifikante Übereinstimmung aufweisen. Zusätzlich ist erkennbar, dass die Charakteristik der Schmierstoffverteilung über die Coilbreite, welche sich als typisch erwiesen hat, sich ebenfalls in den Messwerten der Blechstreifen, welche sich über die Breite des Coils erstrecken, widerspiegelt. In der Coilmitte, aus der die Streifen St5 und St6 entnommen wurden, weist die Oberfläche mit jeweils $s_{\text{St5}} = 0,58 \text{ g}/\text{m}^2$ für die Ober- und Unterseite bzw. $s_{\text{St6,OS}} = 0,52 \text{ g}/\text{m}^2$ und $s_{\text{St6,US}} = 0,57 \text{ g}/\text{m}^2$ die geringsten Schmierstoffmengen auf, wohingegen in Richtung der Randbereiche des Coils die Schmierstoffmenge zunächst zunimmt und zum linken Randbereich des Coils (Streifen St1 und Streifen St2) im Weiteren wieder abnimmt. Die höchsten Schmierstoffmengen sind für Streifen St3 und St9 zu verzeichnen und befinden sich mit Werten von $s_{\text{St3,OS}} = 1,14 \text{ g}/\text{m}^2$ und $s_{\text{St3,US}} = 1,30 \text{ g}/\text{m}^2$ bzw. $s_{\text{St9,OS}} = 1,21 \text{ g}/\text{m}^2$ und $s_{\text{St9,US}} = 1,25 \text{ g}/\text{m}^2$ über der

Spezifikationsgrenze von $s_{\text{Spez}} = 0,80 \pm 0,30 \text{ g/m}^2$. Folglich liegt eine signifikante Schwankung der Schmierstoffmenge über die Blechstreifen respektive Coilbreite vor, welche sich durch eine inhomogene Schmierstoffverteilung äußert. Für die Oberseite und Unterseite ergeben sich jeweils Standardabweichungen von $\sigma_{\text{OS}} = 0,23$ bzw. $\sigma_{\text{US}} = 0,24$ für die Schmierstoffmenge über die Blechstreifen respektive Coilbreite, welche die Schmierstoffumverteilung bestätigen.

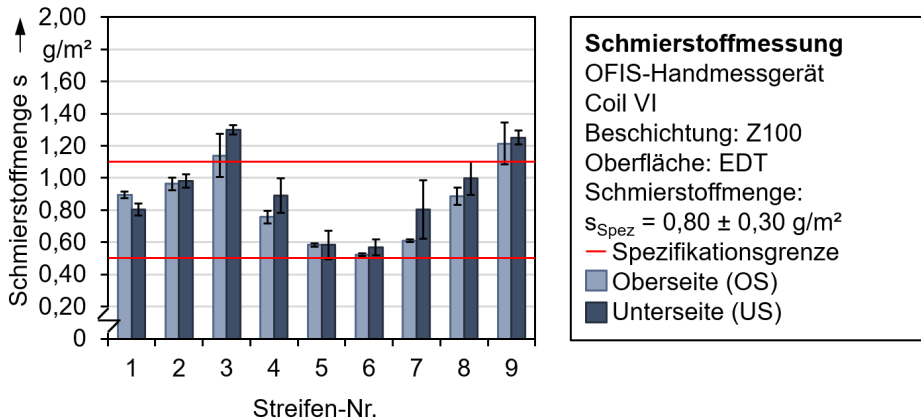


Bild 45: Exemplarische Gegenüberstellung der für die Ober- und Unterseite ermittelten Schmierstoffmesswerte aller neun Blechstreifen von Coil VI

Rauheit der Blechstreifen

Die über die Coilbreite bzw. Blechstreifen ermittelten Rauheitsmesswerte zeigen, dass es bei den Werten für den Mittenrauwert R_a einen Niveauunterschied zwischen der Coiloberseite und Coilunterseite gibt (vgl. Bild 46). Somit liegen die Werte für die Oberseite zwischen $R_{a\text{min,OS}} = 1,00 \mu\text{m}$ (Streifen 1 und Streifen 6) und $R_{a\text{max,OS}} = 1,06 \mu\text{m}$ (Streifen 3), wohingegen die Unterseite Werte zwischen $R_{a\text{min,US}} = 1,06 \mu\text{m}$ (Streifen 8) und $R_{a\text{max,US}} = 1,15 \mu\text{m}$ (Streifen 5) aufweist. Mit Durchschnittswerten von $R_{a0,OS} = 1,02 \mu\text{m}$ und $R_{a0,US} = 1,11 \mu\text{m}$ liegt das Rauheitsniveau für den Mittenrauwert R_a an der unteren Spezifikationsgrenze von $R_{a\text{Spez}} = 1,10 - 1,60 \mu\text{m}$. Gemittelt ist die Rauheit auf der Unterseite ca. 9 % höher als auf der Oberseite. Obwohl ein Unterschied zwischen dem Rauheitsniveau auf der Oberseite und der Unterseite erkennbar ist, kann dieser im Vergleich zur zulässigen Spezifikation von $R_{a\text{Spez}} = 1,10 - 1,60 \mu\text{m}$ als gering bewertet werden. Ein Trend oder eine signifikante Schwankung der Rauheit über die Coilbreite ist hingegen nicht zu verzeichnen.

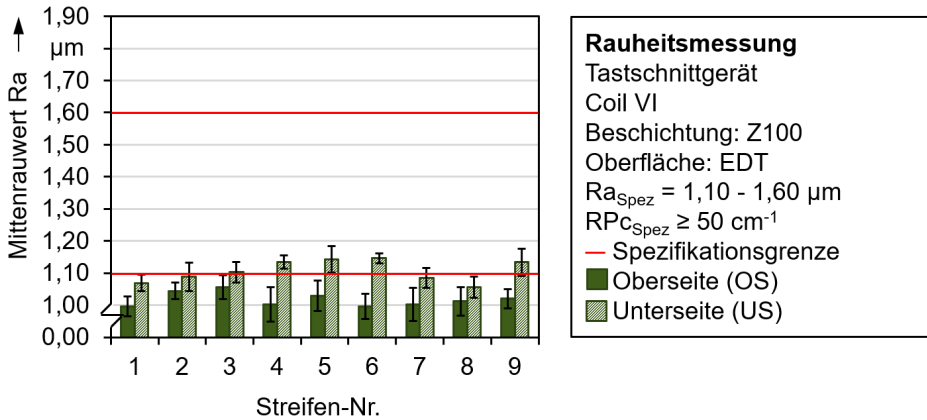


Bild 46: Exemplarische Gegenüberstellung der für die Ober- und Unterseite ermittelten Mittenrauwerte Ra aller neun Blechstreifen von Coil VI

Die Ergebnisse der Rauheitsmessung für die Spitzenzahl RPC sind in Bild 47 abgebildet und liegen mit Werten von $RPC_{min,OS} = 70 \text{ cm}^{-1}$ (Streifen 1) und $RPC_{max,OS} = 81 \text{ cm}^{-1}$ (Streifen 8) für die Oberseite sowie $RPC_{min,US} = 69 \text{ cm}^{-1}$ (Streifen 1) und $RPC_{max,US} = 78 \text{ cm}^{-1}$ (Streifen 7) für die Unterseite deutlich über der geforderten Mindestspitzenzahl von $RPC_{Spez} \geq 50 \text{ cm}^{-1}$. Zudem zeigen die Messwerte keinen signifikanten Unterschied zwischen den jeweiligen Blech- bzw. Coilseiten. Des Weiteren sind für die Spitzenzahl RPC , wie auch für den Mittenrauwert Ra , keine Schwankungen über die Coilbreite zu erkennen.

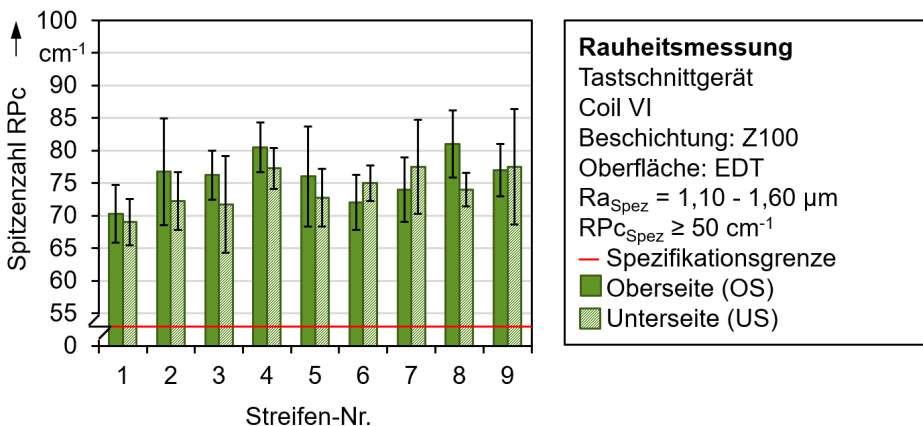


Bild 47: Exemplarische Gegenüberstellung der für die Ober- und Unterseite ermittelten Spitzenzahlen RPC aller neun Blechstreifen von Coil VI

Zusammenfassend hat die Charakterisierung der Halbzeugeigenschaften ergeben, dass für die nachfolgenden Untersuchungen zur Charakterisierung der Reibung das werkseitig vorgegebene Rauheitsspektrum abgedeckt werden kann und die Schmierstoffmenge, wie in der Serienproduktion zu erwarten, die Vorgaben sowohl an der unteren als auch an der oberen Spezifikationsgrenze überschreitet. Zudem geht aus den Untersuchungen hervor, dass die Schmierstoffmenge und Schmierstoffverteilung im Vergleich zu der Rauheit stärkeren Schwankungen unterliegt. Es konnte nachgewiesen werden, dass lediglich geringe Schwankungen der Rauheit über die Coilbreite auftreten, welche die mittels der Inline-Messsysteme ermittelten Erkenntnisse in Abschnitt 5.2.2 bestätigen. Des Weiteren zeigen die Untersuchungen, dass Unterschiede des Rauheitsniveaus zwischen der Ober- und Unterseite eines Coils möglich sind, jedoch als gering zu erachten sind. In Tabelle 9 sind die Erkenntnisse aus den Untersuchungen zur Charakterisierung der Halbzeugeigenschaften anhand der im Labor ermittelten Kenngrößen zusammengefasst. Um bewerten zu können, welche Auswirkungen die tendenziell geringen Schwankungen der Rauheit im Zusammenhang mit den deutlich ausgeprägteren Schwankungen der Schmierstoffmenge auf das Reibverhalten und damit auf den Prozess haben, wird im nachstehenden Kapitel mittels einer Charakterisierung der Reibung untersucht.

Tabelle 9: Zusammenfassung der Erkenntnisse aus den Untersuchungen zur Charakterisierung der Halbzeugeigenschaften anhand der im Labor ermittelten Kenngrößen

Merkmal	Erkenntnis
Schmierstoff	- Signifikante Schwankungen der Schmierstoffmenge - Signifikante Schwankungen der Schmierstoffverteilung - Keine signifikanten Unterschiede der Schmierstoffmenge und Schmierstoffverteilung zwischen Coiloberseite und Coilunterseite
Rauheit	- Signifikante Schwankungen des Rauheitsniveaus von Coil zu Coil - Geringe Unterschiede des Rauheitsniveaus zwischen Coiloberseite und Coilunterseite innerhalb eines Coils - Keine signifikante Schwankung der Rauheit über die Coilbreite

6.3 Charakterisierung der Reibung

In diesem Abschnitt soll der Einfluss der zuvor ermittelten Oberflächeneigenschaften der Halbzeuge auf das Reibverhalten untersucht werden. Ziel ist es, den primären Faktor der Oberflächeneigenschaft auf das Reibverhalten zu identifizieren. Dazu werden zum einen die Reibzahlen exemplarisch eines einzelnen Coils und im Weiteren den gesamten Untersuchungsumfang umfassend analysiert und den Halbzeugeigenschaften gegenübergestellt. Da eine Differenzierung der Halbzeugeigenschaften zwischen Ober- und Unterseite hinsichtlich einer Gegenüberstellung der Reibzahlen zu den Oberflächeneigenschaften nicht möglich ist, wird jeder Streifen mit einer Schmierstoffmenge und einem Wert für die Rauheit charakterisiert.

Reibcharakterisierung eines Coils

Rauheit

Zunächst erfolgt die Charakterisierung der Reibung anhand eines Coils, um die Reibungsbedingungen, welche auf einer Platine vorliegen, zu analysieren. Bild 48 zeigt exemplarisch die Messwerte für den Mittenrauwert R_a für die Blechstreifen, welche aus Coil VI stammen. Die Blechstreifen wurden über die Coilbreite hinweg aus der Platine entnommen. Folglich ergeben sich die Streifennummerierungen von eins bis neun über die Coilbreite. Die Messwerte für den Mittenrauwert R_a zeigen, dass diese mit Werten zwischen $R_{a_{\min}} = 1,03 \mu\text{m}$ und $R_{a_{\max}} = 1,09 \mu\text{m}$ sehr geringen Schwankungen unterliegen und nahezu homogen über die Coilbreite verteilt sind. Folglich liegen die ermittelten Rauheitswerte für den Mittenrauwert R_a knapp unterhalb der vorgegebenen Spezifikationen von $R_{a_{\text{Spez}}} = 1,10 - 1,60 \mu\text{m}$.

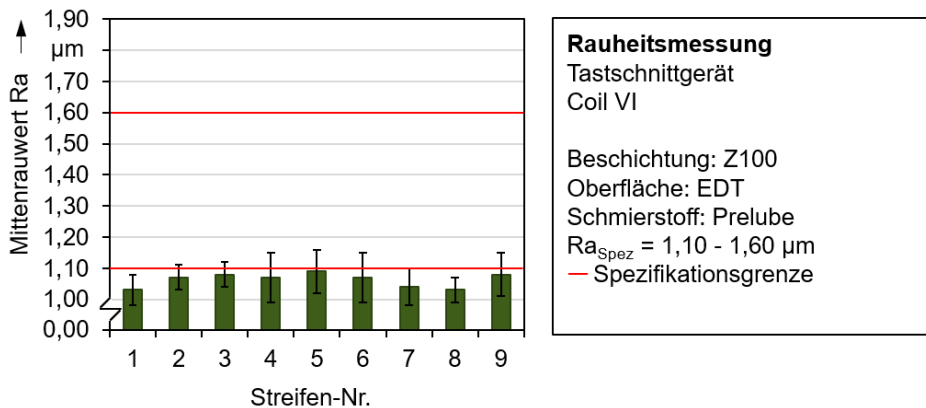


Bild 48: Mittenrauwerte R_a von Coil VI über die Coilbreite dargestellt anhand der Messwerte für neun Blechstreifen

Ein vergleichbares Ergebnis zeigen die Messwerte für die Spitzenzahl RP_c , wie in Bild 49 dargestellt. Diese Werte liegen zwischen $RP_{c_{\min}} = 70 \text{ cm}^{-1}$ so- wie $RP_{c_{\max}} = 79 \text{ cm}^{-1}$ und damit über der geforderternten Mindestspitzen- zahl von $RP_{c_{\text{Spez}}} \geq 50 \text{ cm}^{-1}$. Zudem sind über die Streifen respektive Coilbreite keine signifikanten Schwankungen zu verzeichnen.

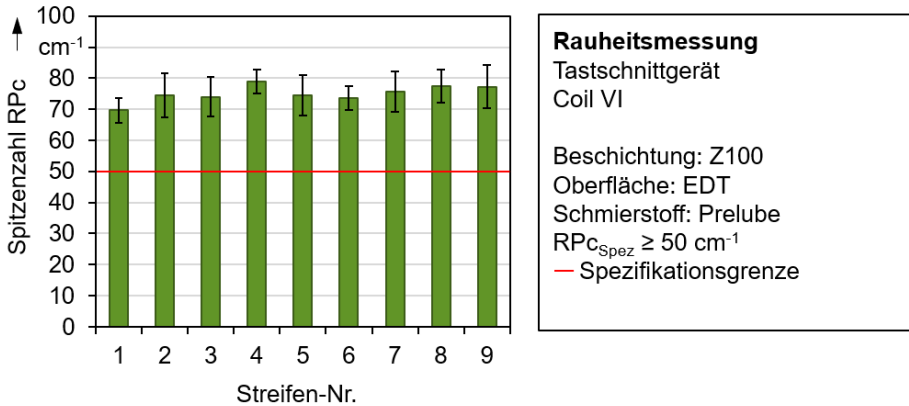
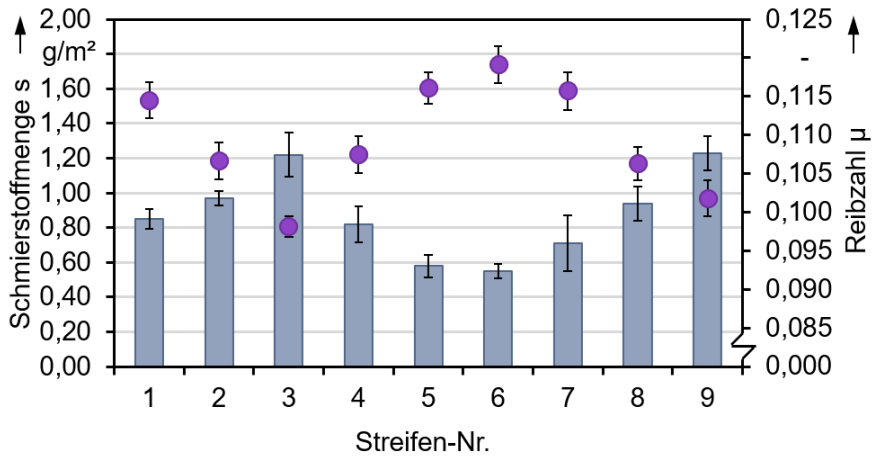


Bild 49: Spitzenzahlen RP_c von Coil VI über die Coilbreite dargestellt anhand der Messwerte für neun Blechstreifen

Schmierstoffmenge und Reibung

In Bild 50 sind die Schmierstoffwerte für die jeweiligen Blechstreifen aus Coil VI den im Streifenziehversuch ermittelten Reibzahlen gegenüberge- stellt. Aus der Grafik wird ersichtlich, dass die Messwerte für die Schmier- stoffmenge der jeweiligen Streifen zwischen $s_{\min} = 0,55 \text{ g/m}^2$ und $s_{\max} = 1,23 \text{ g/m}^2$ liegen und somit eine mittlere bis stark inhomogene Schmier- stoffverteilung über die Coilbreite vorliegt. Die Standardabweichung der Schmierstoffwerte über die Coilbreite beträgt $\sigma_{\text{CoilVI}} = 0,23$. Des Weiteren verdeutlicht die Grafik, dass in der Coilmitte im Bereich von Streifen 4 bis Streifen 8 die geringsten Schmierstoffmengen vorliegen und folglich der Schmierstoff in die Randbereiche des Coils verdrängt wurde. Die über die Coilbreite in die Randbereiche folgenden Streifen, Streifen 3 und Streifen 9, besitzen jeweils die höchste Schmierstoffmenge von $s_{\text{St3}} = 1,22 \text{ g/m}^2$ und $s_{\text{St9}} = 1,23 \text{ g/m}^2$.

Zusätzlich sind in Bild 50 die für Coil VI ermittelten Reibzahlen dargestellt. Die entsprechende Grafik zeigt, dass die Reibzahlen zwischen $\mu_{\min} = 0,098$ und $\mu_{\max} = 0,119$ liegen. Der charakteristische Verlauf einer inhomogenen Schmierstoffverteilung spiegelt sich auch in den über die Coilbreite ermit- telten Reibzahlen wider.



Streifenziehversuch	Schmierstoffmessung
Coil VI	OFIS-Handmessgerät
Ziehlänge: $l = 300 \text{ mm}$	Beschichtung: Z100
Flächenpressung: $p_N = 2,0 \text{ MPa}$	Oberfläche: EDT
Relativgeschwindigkeit:	Schmierstoff: Prelube
$v_{\text{rel}} = 400 \text{ mm/min}$	Menge: $s_{\text{Spez}} = 0,80 \pm 0,30 \text{ g/m}^2$
● Reibzahl	■ Schmierstoffmenge

Bild 50: Gegenüberstellung der Schmierstoffmesswerte und experimentell ermittelten Reibzahlen von Coil VI über die Coilbreite dargestellt anhand der Messwerte für neun Blechstreifen

Demnach geht die niedrigste Reibzahl mit der höchsten Schmierstoffmenge einher und umgekehrt die höchste Reibzahl mit der geringsten Schmierstoffmenge. So besitzt beispielsweise Streifen 6 mit $s_{\text{St6}} = 0,55 \text{ g/m}^2$ Schmierstoff die geringste Schmierstoffmenge und zugleich mit $\mu_{\text{St6}} = 0,119$ die höchste Reibzahl. Auch wenn die Rauheit und die Schmierstoffmenge nicht gänzlich getrennt voneinander bewertet werden können, zeigt der Korrelationskoeffizient mit $r = -0,94$ einen stark negativen Zusammenhang zwischen der Reibzahl und der Schmierstoffmenge (vgl. Bild 51). An dieser Stelle bestätigen sich die Untersuchungsergebnisse von Zöller et al. [157] die ebenfalls eine Abnahme der Reibzahl im Zusammenhang mit einer Zunahme der Schmierstoffmenge feststellt. Demzufolge zeigen die Untersuchungen, dass nicht nur eine inhomogene Schmierstoffverteilung über die Coilbreite vorliegt, sondern zugleich inhomogene Reibungsbedingungen

über die Coilbreite respektive Platinenbreite resultieren, welche sich wiederum auf die Bauteilqualität auswirken können.

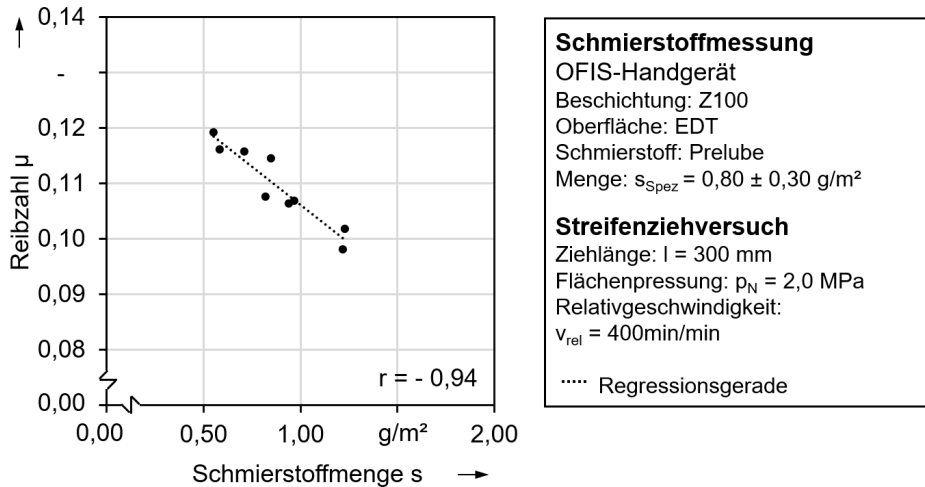


Bild 51: Gegenüberstellung der Schmierstoffmenge und Reibzahlen von Coil VI anhand eines Korrelationsdiagrammes

Da die Rauheit innerhalb eines Coils lediglich geringe Schwankungen aufweist und in diesem Fall die Schmierstoffmenge einen dominierenden Einfluss auf das Reibverhalten hat, wird im Weiteren der Einfluss der Rauheit anhand des gesamten Umfangs ermittelter Reibzahlen der acht untersuchten Coils analysiert und bewertet.

Reibcharakterisierung aller acht Coils

Eine Gegenüberstellung der im Streifenziehversuch bestimmten Reibzahlen, sowie ermittelten Schmierstoffmesswerte und Rauheitsmesswerte für alle Blechstreifen der acht Coils ist anhand eines 3D-Streudiagramms in Bild 52 dargestellt. Zusätzlich werden die Zusammenhänge anhand einer linearen Ebene verdeutlicht. Das untersuchte Rauheitsspektrum umfasst die werkseitig vorgegebene Rauheitsspezifikation für Aussenhautbauteile und liegt zwischen $Ra_{\text{min}} = 1,03 \text{ } \mu\text{m}$ und $Ra_{\text{max}} = 1,63 \text{ } \mu\text{m}$. Die Schmierstoffmenge der einzelnen Blechstreifen liegen im Bereich von $s_{\text{min}} = 0,37 \text{ g/m}^2$ bis $s_{\text{max}} = 1,55 \text{ g/m}^2$ und geht über die werkseitig vorgegebene Spezifikation von $s_{\text{Spez}} = 0,80 \pm 0,30 \text{ g/m}^2$ hinaus. Des Weiteren ergeben sich für die untersuchten Streifen Reibzahlen zwischen $\mu_{\text{min}} = 0,090$ und $\mu_{\text{max}} = 0,119$. In der Grafik wird anhand der Ebene verdeutlicht, dass die Schmierstoffmenge einen wesentlichen Einfluss auf das Reibverhalten hat wohingegen die Rauheit keinen signifikanten Einfluss auf das Reibverhalten zeigt.

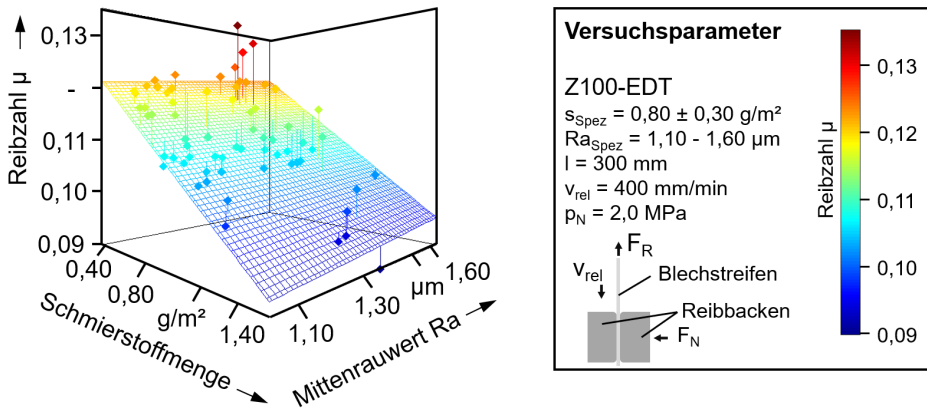


Bild 52: Gegenüberstellung der Reibzahlen, Schmierstoffmesswerte und Rauheitsmesswerte aller acht Coils anhand eines 3D-Streudiagramms mit linearer Ebene

Dies wird zusätzlich durch das in Bild 53 abgebildete Korrelationsdiagramm bestätigt, welches die Wechselbeziehung zwischen der Schmierstoffmenge und der Reibzahl darstellt. Der Korrelationskoeffizient beträgt $r = -0,79$ und bestätigt folglich einen stark negativen Zusammenhang. Dem gegenüber zeigt sich, dass die Rauheit, in dem in dieser Arbeit untersuchten Spektrum, keinen signifikanten Einfluss auf das Reibverhalten hat. Folglich lässt sich die Schmierstoffmenge, welche sich durch die Umverteilung ergibt, als primären Einflussfaktor auf das Reibverhalten identifizieren.

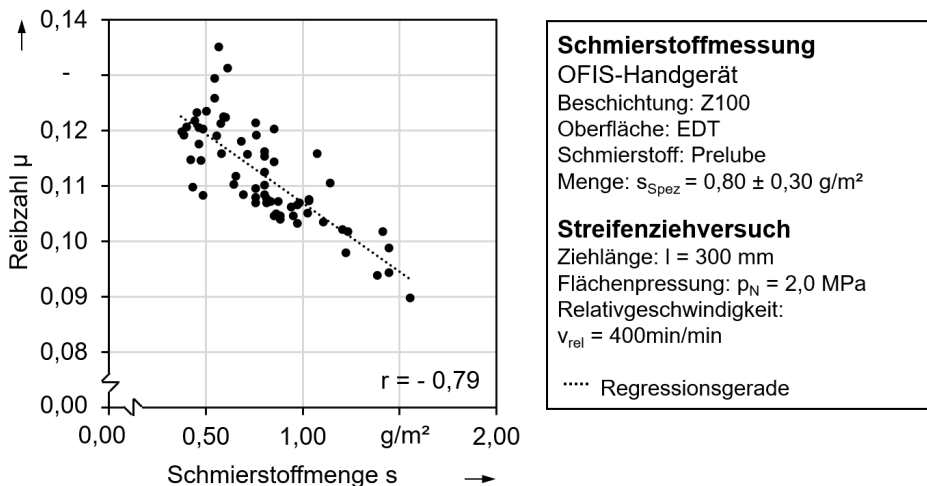


Bild 53: Streudiagramm der experimentell ermittelten Reibzahlen und der Messwerte für die Schmierstoffmengen aller acht Coils

Ein vermuteter Grund dafür ist, dass die spezifizierten Rauheitsvorgaben, welche lediglich einen begrenzten Wertebereich zulassen, vom Lieferanten erfüllt werden und dieser Bereich in Verbindung mit den zulässigen Schmierstoffmengen nicht ausreichend ist, um das Reibverhalten signifikant zu beeinflussen. Folglich ist die Reibzahl auch bei Schwankungen der Rauheit nahezu vollständig durch die Schmierstoffmenge begründbar.

Die Rauheit ist durch ein geringes Rauheitsspektrum von $Ra_{\text{Spez}} = 1,10 - 1,60 \mu\text{m}$ spezifiziert und unterliegt lediglich geringen Schwankungen. Im Vergleich dazu verzeichnet der Schmierstofffilm eine höhere Schichtdicke und unterliegt im Vergleich zur Rauheit höheren Schwankungen. Folglich ist davon auszugehen, dass in der Regel eine ausreichende Schmierstoffmenge vorhanden ist, wodurch die Schmierstofftaschen mit Schmierstoff gefüllt sind und mit steigender Schmierstoffmenge die beiden Kontaktpartner zunehmend voneinander getrennt sind, wodurch eine zunehmende hydrodynamische Reibung vorliegt. Dementsprechend sinkt die Reibzahl mit zunehmender Schmierstoffmenge. Ein Grund dafür, dass der Korrelationskoeffizient zwischen der Schmierstoffmenge und der Reibzahl aller untersuchten Blechstreifen mit $r = -0,79$ einen weniger ausgeprägten Zusammenhang als der eines einzelnen Coils, wie in Bild 51 dargestellt ($r = -0,94$), zeigt, ist damit zu erklären, dass die Oberflächeneigenschaften einzelner Coils, wie beispielsweise von Coil III und Coil VII hinsichtlich der Schmierstoffmenge nur geringe Schwankungen aufweisen (vgl. Tabelle 8), welche sich zu gleich in entsprechend gleichbleibenden Reibzahlen äußern. Die max. Differenz zwischen der größten und der kleinsten Schmierstoffmenge bei Coil VI liegt bei $s_{\Delta\text{min,max,CoilVI}} = 0,68 \text{ g/m}^2$. Die größte Differenz zwischen der größten und der kleinsten Schmierstoffmenge bei Coil III hingegen beträgt $s_{\Delta\text{min,max,CoilIII}} = 0,09 \text{ g/m}^2$. Da keine signifikanten Änderungen der Schmierstoffmenge zu verzeichnen sind, resultieren folglich keine signifikanten Änderungen der Reibungsbedingungen, wodurch nur bedingt eine Korrelation zwischen der Schmierstoffmenge und der Reibzahl nachgewiesen werden kann.

Zusammenfassende Bewertung

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass, auch wenn eine Wechselwirkung zwischen der Rauheit und dem Reibverhalten nicht gänzlich auszuschließen ist, die Schmierstoffmenge einen dominierenden Einfluss auf das Reibverhalten hat und ein signifikanter Zusammenhang nachgewiesen werden konnte. Folglich ist die Schmierstoffmenge die primäre

Einflussgröße auf das Reibverhalten. Tabelle 10 fasst die Erkenntnisse hinsichtlich der Halbzeugeigenschaften und deren Eigenschaften sowie Auswirkung auf die Reibung zusammen.

Tabelle 10: Auswirkung der Halbzeugeigenschaften auf das Reibverhalten

Eigenschaft Halbzeug- eigenschaften	Niveau	Schwankung	Auswirkung auf Reibung
Rauheit	gering bis mittel	gering	gering
Schmierstoff	gering bis hoch	gering bis hoch	hoch

Die Ergebnisse zeigen zudem, dass über die Coilbreite und damit auch über die Platinenbreite inhomogene tribologische Bedingungen in Abhängigkeit der Schmierstoffmenge vorliegen können. Demzufolge liegt die Vermutung nahe, dass die inhomogene Schmierstoffverteilung einen Einfluss auf das Umformverhalten hat und die inhomogenen Reibungsbedingungen zu einem ungleichmäßigen Materialfluss während des Umformvorgangs führen. Daher ist nicht auszuschließen, dass die fluktuierenden tribologischen Bedingungen zu Schwankungen in der Bauteilqualität, wie Rissen oder Faltenbildung, führt.

Zudem haben die Untersuchungen in Abschnitt 5.1 gezeigt, dass die Schmierstoffverteilung starken Schwankungen unterliegt und die Schmierstoffumverteilung in Bandlängenrichtung eine ausgeprägtere Charakteristik annehmen kann. Gemeinsam mit den in diesem Abschnitt erarbeiteten Ergebnissen ist davon auszugehen, dass im Serienprozess, aufgrund der tendenziell stärkeren Schmierstoffumverteilung zum Ende eines Coils hin, diese vermehrt zu inadäquater Bauteilqualität führt. Welchen Einfluss die inhomogenen Reibungsbedingungen auf das Umformverhalten haben, soll in weiteren Untersuchungen unter Verwendung der FE-Simulation analysiert werden.

7 Numerisch gestützte Analyse zum Aufbau eines Prozessverständnisses bei schwankenden tribologischen Bedingungen

Die FE-Simulation ist ein wesentliches Element bei der heutigen Methodenplanung von Karosseriebauteilen [9]. Dabei wird auch die umformtechnische Herstellbarkeit von Karosseriebauteilen, welche durch das Auftreten von Rissen und Falten limitiert ist, zunehmend mithilfe der FE-Simulation verifiziert. Entscheidend für die Genauigkeit der Simulationsergebnisse ist eine möglichst detaillierte und seriennahe Beschreibung der Randbedingungen und Annahmen. Zu diesen zählt die Reibung, welche ein wesentlicher Einflussfaktor auf das Umformergebnis ist und in der Standardsimulation für gewöhnlich durch das Coulomb'sche Reibgesetz beschrieben wird. Demzufolge werden die Reibungsbedingungen durch einen Parameter beschrieben und dementsprechend einer Platine eine Reibzahl zugeordnet. Die vorherigen Ergebnisse haben jedoch gezeigt, dass die Reibungsbedingungen einer Platine lokal variieren. Um ein grundlegendes Prozessverständnis über die Auswirkung von schwankenden tribologischen Bedingungen auf den Umformprozess im Serienprozess und damit auf die Bauteilqualität zu erarbeiten, werden die zuvor gewonnenen Erkenntnisse hinsichtlich der inhomogenen Reibungsbedingungen aufgrund schwankender Schmierstoffmengen auf der Platine in die Simulation übertragen. Somit werden die im Serienprozess tatsächlich vorliegenden Schwankungen für die Simulation herangezogen. Ziel ist es, die Vorhersagegenauigkeit der Simulation zu verbessern, um künftig die Auslegung der Umformwerkzeuge, entsprechend der im Serienprozess vorherrschenden Bedingungen, robuster gegenüber Halbzeugschwankungen gestalten zu können.

Dazu wird in diesem Kapitel zunächst auf die Vorgehensweise im Rahmen der numerischen Untersuchungen eingegangen. Als Grundlage für die numerischen Untersuchungen dienen die Erkenntnisse bezüglich der Charakterisierung der Chargenschwankungen hinsichtlich der für die Tribologie relevanten Halbzeugeigenschaften und die Erkenntnisse aus den vorangegangenen Streifenziehversuchen, welche in die Simulation übertragen werden. Diese haben unter anderem gezeigt, dass zum einen inhomogene Reibungsbedingungen im Serienprozess vorliegen und die Reibung maßgeblich von der Schmierstoffmenge abhängig ist. Ziel der numerischen Unter-

suchungen ist es daher, ein Prozessverständnis hinsichtlich des Einflusses von schwankenden tribologischen Eigenschaften auf das Umformergebnis von Karosseriebauteilen zu schaffen. Abschließend wird die Anwendbarkeit der Methode exemplarisch anhand von zwei Karosseriebauteilen analysiert und bewertet.

7.1 Vorgehensweise zur Übertragung der Erkenntnisse in die FE-Simulation

In diesem Abschnitt erfolgt zunächst die Validierung des bestehenden Simulationsmodells, welches für die numerischen Untersuchungen inhomogener Reibungsbedingungen herangezogen wird. Des Weiteren werden die Vorgehensweise zur Übertragung der in den Streifenziehversuchen gewonnen Erkenntnisse erläutert und die Randbedingungen definiert.

7.1.1 Validierung des bestehenden Simulationsmodells

Die numerischen Untersuchungen werden anhand des linken Seitenrahmens X₁ des BMW Kompakt-SUV der X-Serie durchgeführt. Da das Bauteil seit mehr als einem Jahr im Serienprozess gefertigt wird, liegt ein entsprechendes CAD-Modell des Werkzeugs aus der Entwicklungsphase vor. Bei dem Modell handelt es sich um das Werkzeug der ersten Arbeitsfolge (AFO), in dem der Tiefziehvorgang stattfindet. Da die Werkzeugwirkflächen betreffenden Änderungen sowie Überarbeitungen aufgrund der Einarbeitung der Werkzeuge und Schwierigkeiten im Prozess nicht auszuschließen sind, erfolgt zunächst eine Überprüfung des Simulationsmodells. Eine Rückführung von Änderungen am Realwerkzeug in das CAD-Modell erfolgt in der Regel nicht.

In Vorbereitung auf die Untersuchungen erfolgte in einem ersten Schritt ein Abgleich zwischen dem aktuellen Stand des Serienwerkzeugs und dem Simulationsmodell. Da sich das Werkzeug bereits im Serienprozess befindet und die Einarbeitsphase abgeschlossen ist, wurde das Werkzeug zunächst auf konstruktive Änderungen hin überprüft. Des Weiteren erfolgte eine Vermessung der Radien der Ziehsicken. Die Einstellungen der Blechhalterdistanzen wurden ebenfalls aufgenommen. Um einen Abgleich zwischen dem realen Bauteil und den numerischen Untersuchungen vornehmen zu können, wurden Anpassungen an den CAD-Daten vorgenommen, sofern Differenzen zwischen dem Simulationsmodell und dem Serienwerkzeug bestanden. Zusätzlich wurde die Platinengeometrie dem aktuellen Serienstand angepasst. Anschließend erfolgte die Simulation

unter Berücksichtigung der aktuell verwendeten Hubzahl, welche $n_{H, \text{Seitenrahmen}} = 13 \text{ min}^{-1}$ beträgt. Die angewendete, allumfassende Blechhalterkraft beträgt $F_B = 2100 \text{ kN}$ und setzt sich aus sechs individuell einstellbaren Zylinderkräften zusammen, welche zwischen $F_{B, \text{min}} = 300 \text{ kN}$ und $F_{B, \text{max}} = 450 \text{ kN}$ liegen. Da standardmäßig eine konstante Reibzahl angenommen wird, erfolgt die Simulation mit einer Reibzahl von $\mu_s = 0,12$. Des Weiteren wird die Simulation unter Verwendung der Standard-Materialkarte für den Werkstoff CR3 durchgeführt. Tabelle 11 fasst die für die Simulation verwendeten Parameter und Eigenschaften zusammen.

Tabelle 11: Übersicht der Parameter für die numerische Simulation des Seitenrahmens X1

Parameter	Eigenschaft
Blechhalterkraft F_B	2100 kN
Minimale Zylinderkraft $F_{B, \text{min}}$	300 kN
Maximale Zylinderkraft $F_{B, \text{max}}$	450 kN
Hubzahl n_H	13 min^{-1}
Reibzahl μ_s	0,12

Die Validierung des Simulationsergebnisses erfolgt anhand eines Ziehteils, welches aus einem Produktionsauftrag aus dem Serienprozess entnommen wurde. Die Menge und Verteilung des Schmierstoffes der verwendeten Platine ist in Bild 54 dargestellt. Die Grafik zeigt die Verteilung der Schmierstoffmenge über die Coilbreite anhand der für die Oberseite ermittelten Werte für alle 20 Messspuren. Die Schmierstoffwerte der einzelnen Messspuren liegen zwischen $s_{\text{min}} = 0,85 \text{ g/m}^2$ und $s_{\text{max}} = 1,85 \text{ g/m}^2$, wobei der Maximalwert als Ausreißer gewertet werden kann, da in diesem Fall der Schmierstoff am äußersten Rand des Coils miterfasst wurde. Demzufolge ergibt sich für die Messspuren M2 bis M20 eine Standardabweichung von $\sigma = 0,06$. Insgesamt ist die Schmierstoffverteilung als homogen zu bewerten. Die durchschnittliche Schmierstoffmenge über alle Messspuren beträgt $s_0 = 1,03 \text{ g/m}^2$ und entspricht den werkseitigen Vorgaben von $s_{\text{Spez}} = 0,80 \pm 0,30 \text{ g/m}^2$. Des Weiteren liegt die Blechdicke in der Coilmitte, gemittelt über alle für die Platine inline erfassten Messwerte bei $s_B = 0,755 \text{ mm}$ und erfüllt ebenfalls die Vorgaben von $s_{B, \text{Spez}} = 0,750 \pm 0,07 \text{ mm}$. Die Blechhalterkraft und die Hubzahl entsprechen den ebenfalls für die Simulation

genutzten Werten und entsprechen den im Serienprozess tatsächlich verwendeten Parametereinstellungen der Presse, wie in Tabelle 11 zusammengefasst.

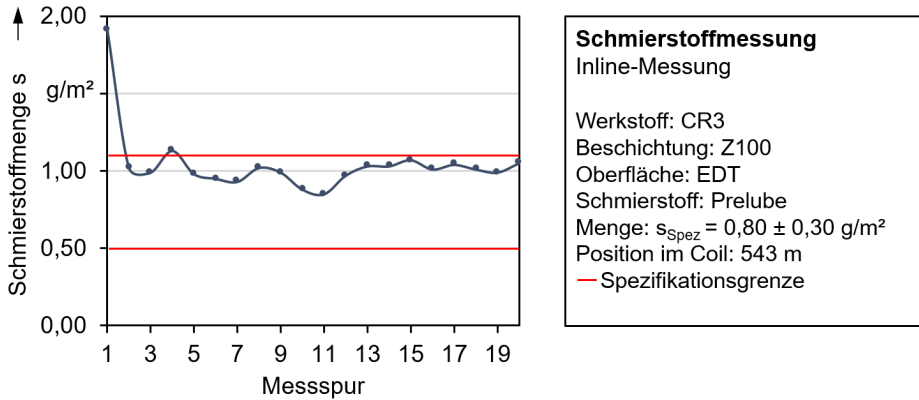


Bild 54: Schmierstoffmittelwert der Platine gemessen an 20 Messspuren über die Coilbreite für die Validierung des Simulationsmodells

Die Bewertung der Übereinstimmung zwischen dem Simulationsergebnis und dem realen Ziehteil erfolgt anhand des Flanscheinzugs. Dazu wird die Kontur des Ziehteils, wie in Bild 55 dargestellt, an 12 Positionen erfasst.

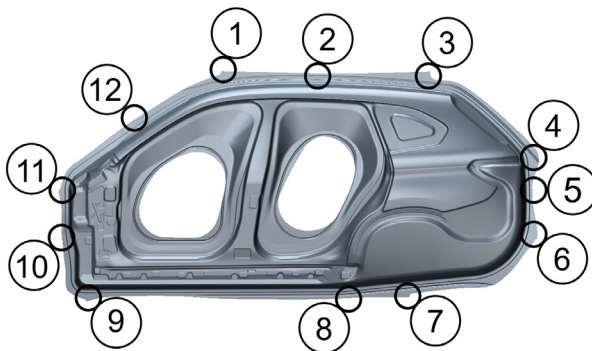


Bild 55: Positionen zur Ermittlung des Flanscheinzugs am Ziehteil eines Seitenrahmens Xi

Die ermittelten Differenzen zwischen dem realen Ziehteil und der Simulation sind in Tabelle 12 dargelegt. Die Abweichungen liegen bis auf eine Ausnahme zwischen $\Delta = 0 \text{ mm}$ und 10 mm . Lediglich an Position 7 ist mit $\Delta_{\text{Pos7}} = 19 \text{ mm}$ eine höhere Abweichung zu verzeichnen. Auf Erfahrungen beruhend, hat sich insbesondere der Heckbereich des Seitenrahmens als risskritisch erwiesen. In diesem Bereich ist an Position 5 keine Differenz

festzustellen. An Position 6 beträgt die Differenz zwischen dem realen und dem numerischen Ziehteil $\Delta_{\text{Pos6}} = 7 \text{ mm}$, welche einer Abweichung von ca. 9 % entspricht. Angesichts der Größe und geometrischen Komplexität des Bauteils können die Differenzen zwischen der Simulation und dem realen Ziehteil als ausreichend genau bewertet werden. Folglich kann das Modell zur weiteren Untersuchung des Einflusses von schwankenden tribologischen Bedingungen herangezogen werden.

Tabelle 12: Differenz zwischen dem numerisch und experimentell ermittelten Flanscheinzug des Seitenrahmens X1 anhand von 12 Positionen

Position	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Differenz in mm	9	4	5	10	0	7	19	10	8	3	6	2

7.1.2 Überführung der Streifenziehversuche in die Simulation

Die experimentellen Untersuchungen unterschiedlicher tribologischer Bedingungen im Streifenziehversuch haben gezeigt, dass die Schmierstoffmenge einen signifikanten Einfluss auf das Reibverhalten hat (vgl. Abschnitt 6.3). Zudem unterliegen Coils in der Regel Schwankungen der Schmierstoffmenge und -verteilung über die Coilbreite und -länge. Diese führen zu inhomogenen tribologischen Bedingungen. In der Standardsimulation wird jedoch von idealen, homogen verteilten Schmierstoffmengen ausgegangen. Schwankungen der Schmierstoffmenge und -verteilung, wie sie in der Serienproduktion vorkommen, werden nicht berücksichtigt. Um die Auswirkung inhomogener Reibungsbedingungen auf die Bauteilqualität mithilfe der FE-Simulation untersuchen zu können, erfolgt zunächst eine Abbildung der Erkenntnisse aus den Streifenziehversuchen in die Simulation.

Die Schmierstoffmenge, welche im Walzwerk auf die Coiloberfläche appliziert wird, wird bauteilspezifisch festgelegt und liegt in der Regel bei $s = 0,80 \text{ g/m}^2$ oder $s = 1,00 \text{ g/m}^2$. Unabhängig von den definierten Schmierstoffmengen erfolgt die Simulation standardmäßig mit einer Reibzahl von $\mu_s = 0,12$, wobei von einer homogenen, über die Platine verteilten, Schmierstoffmenge ausgegangen wird. Demzufolge wird für die im Folgenden beschriebenen, numerischen Untersuchungen die Reibzahl $\mu_s = 0,12$ für eine Schmierstoffmenge von $s = 0,90 \text{ g/m}^2$ festgelegt.

Um den in den Streifenziehversuchen ermittelten Zusammenhang zwischen der Schmierstoffmenge und der Reibzahl (vgl. Abschnitt 6.3) für die Simulation nutzen zu können, erfolgt zunächst ein Niveauausgleich der Reibzahlen. Die Ergebnisse der Streifenziehversuche haben gezeigt, dass die Reibzahl in Beziehung zur Schmierstoffmenge steht und durch eine lineare Trendlinie beschrieben werden kann (vgl. Bild 53). Anhand dieser ergibt sich für eine Schmierstoffmenge von $s = 0,90 \text{ g/m}^2$ eine Reibzahl von $\mu_{0,90} = 0,109$, welche der in der Standardsimulation verwendeten Reibzahl von $\mu_s = 0,120$ gleichgesetzt wird. Zusätzlich erfolgt eine Klassifizierung der Schmierstoffmengen und Zuordnung von Reibzahlen in sechs Gruppen. Tabelle 13 zeigt eine Gegenüberstellung der Reibzahlen zu den jeweiligen Schmierstoffmengen, welche für die weiteren numerischen Untersuchungen dienen.

Tabelle 13: Gegenüberstellung der Werte für die Schmierstoffmenge und der Reibzahl für die numerischen Untersuchungen

Gruppe	Schmierstoffmengen in g/m^2	Reibzahl	Symbol
1	0,40 – 0,59	0,130	μ_1
2	0,60 – 0,79	0,125	μ_2
3	0,80 – 0,99	0,120	μ_s
4	1,00 – 1,19	0,115	μ_3
5	1,20 – 1,39	0,110	μ_4
6	1,40 – 1,59	0,105	μ_5

Um einer Platine verschiedene Reibungsbedingungen zuzuordnen zu können, erfolgt zunächst eine Projektion der Schmierstoffumverteilungsscharakteristik auf die Platinengeometrie, um die jeweiligen Bereiche, in denen unterschiedliche tribologische Bedingungen vorliegen, kennzeichnen zu können. Anschließend wird eine Unterteilung der Platine in Segmente vorgenommen, um in der Simulation den Segmenten verschiedene Parameter zuzuordnen zu können. Im verwendeten Simulationsprogramm (vgl. Abschnitt 4.5) besteht bereits die Möglichkeit, eine Platine in mehrere Segmente zu unterteilen bzw. einem Bauteil mehrere Platinen zuzuordnen. Diese Funktion wird beispielsweise für die Umformsimulation von Tailored Blanks verwendet. Dabei handelt es sich um maßgeschneiderte Platinen,

welche durch eine lokale Variation der Blechdicke, des Materials, der Beschichtung oder der Materialeigenschaften gekennzeichnet sind [158]. In dieser Arbeit erfolgt eine Segmentierung der Platine, um den Segmenten, für die numerischen Untersuchungen, unterschiedliche Reibzahlen entsprechend der vorliegenden Schmierstoffmengen zuordnen zu können. In Bild 56 ist exemplarisch die Unterteilung der Platine in fünf Segmente über die Coillbreite und die entsprechende Zuordnung der Reibzahlen anhand der Schmierstoffmenge dargestellt. Zudem zeigt die Grafik die inline erfassten Schmierstoffmittelwerte über eine Coilllänge von 250 m anhand von 20 Messspuren über die Coillbreite. Die Zuordnung der Reibzahlen erfolgt anhand der in Tabelle 13 definierten Werte. In diesem Beispiel betragen die durchschnittlichen Schmierstoffmengen in den Segmenten S1 und S4 $0,95 \text{ g/m}^2$ bzw. $0,82 \text{ g/m}^2$, welche einer Reibzahl von $\mu_s = 0,120$ entsprechen. In den Segmenten S2 und S5 liegt die durchschnittliche Schmierstoffmenge bei $0,56 \text{ g/m}^2$ bzw. $0,58 \text{ g/m}^2$. Dies entspricht einer Reibzahl von $\mu_1 = 0,130$. Dem Segment S3 wird eine Reibzahl von $\mu_3 = 0,115$ entsprechend der durchschnittlichen Schmierstoffmenge von $1,08 \text{ g/m}^2$ zugeordnet.

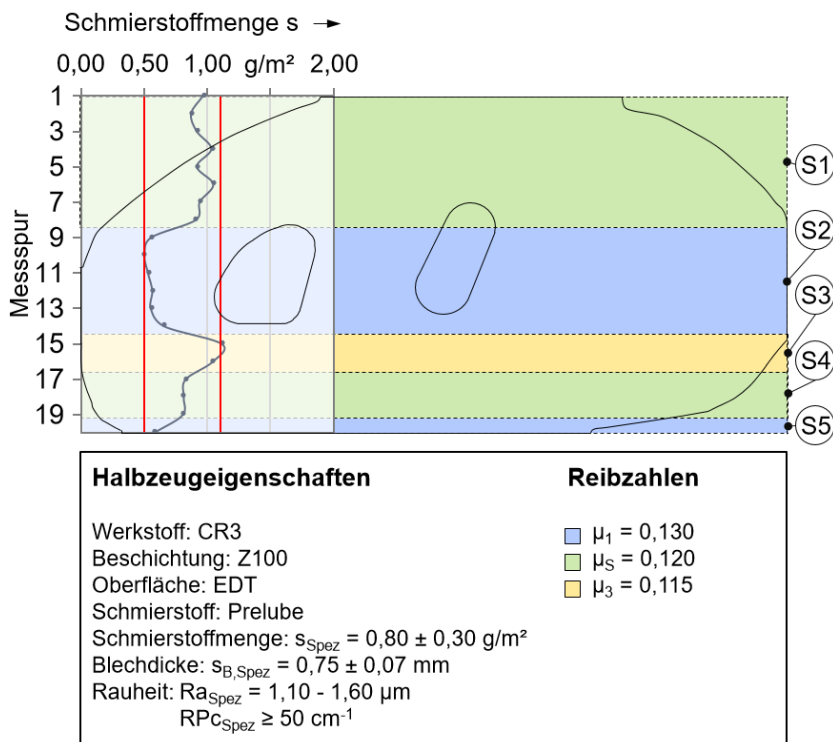


Bild 56: Exemplarische Darstellung der Unterteilung der Platine in Segmente anhand unterschiedlicher Schmierstoffmengen bzw. Reibzahlen

Die numerischen Untersuchungen erfolgen, unter Beibehaltung sämtlicher Randbedingungen, mit Ausnahme der modifizierten Platine mit den entsprechenden Reibzahlen. Die Auswirkung von inhomogenen Reibungsbedingungen auf das Umformergebnis wird im Weiteren genauer analysiert.

7.2 Analyse und Bewertung der Auswirkung von Chargenschwankungen auf das Umformverhalten

Nachfolgend wird das Umformverhalten infolge inhomogener tribologischer Bedingungen aufgrund von schwankenden Schmierstoffmengen unter Verwendung der FE-Simulation analysiert und die Ergebnisse, von im Serienprozess hergestellten Karosseriebauteilen, gegenübergestellt. Zur Validierung der Ergebnisse dienen reale Karosseriebauteile aus verschiedenen Produktionsaufträgen.

Ergebnisse der seriennahen Simulation

Insbesondere Türinnenbleche und Seitenrahmen gelten aufgrund ihrer komplizierten Geometrie als qualitätskritische Karosseriebauteile, bei denen in der Praxis im Vergleich zu anderen Bauteilen häufig Risse auftreten, wie Maier [25] zeigt. Eine inhomogene Schmierstoffverteilung ist eine vermutete Ursache für das Auftreten von Rissen, welche im Folgenden unter Verwendung der FE-Simulation untersucht wird. Um eine potenzielle Wechselwirkung zwischen einer inhomogenen Schmierstoffverteilung auf der Platine und dem Umformverhalten analysieren zu können, werden für die Untersuchungen die Daten von Produktionsaufträgen herangezogen, bei denen Risse am Bauteil aufgetreten sind. Ausgangssituation für die nachstehenden Untersuchungen ist ein Produktionsauftrag des linken Seitenrahmens X₁, des BMW Kompakt-SUV der X-Serie, bei der im Verlauf des Produktionsauftrags Risse im Heckbereich des Ziehteils auf Höhe der Heckleuchte aufgetreten sind. Bild 57 zeigt exemplarisch den Bereich des Bauteils, in dem das Ziehteil des Seitenrahmens gerissen ist.



Bild 57: Exemplarische Darstellung des Bauteilbereichs am linken Seitenrahmen X₁, an dem das Ziehteil gerissen ist

Zur Beschreibung der Reibungsbedingungen für die numerischen Untersuchungen dienen die inline erfassten Schmierstoffwerte des Coils dieses Produktionsauftrags. Um ausschließen zu können, dass eine Veränderung der Blechdicke oder der mechanischen Eigenschaften ursächlich für das Auftreten der Risse ist, wurden diese Halbzeugeigenschaften zunächst geprüft und als Einfluss nehmende Faktoren ausgeschlossen. Da die vorangegangenen Untersuchungen gezeigt haben, dass sich die Schmierstoffumverteilung nicht abrupt ändert, erfolgt zunächst die Analyse der Schmierstoffverteilung über eine Länge von 250 m des Coilabschnitts, in dem die Risse aufgetreten sind.

In Bild 58 sind die über 250 m gemittelten Schmierstoffwerte über die Coilbreite dargestellt. Aus dem Bild ist zu entnehmen, dass die Schmierstoffwerte zwischen $s_{\min} = 0,44 \text{ g/m}^2$ und $s_{\max} = 1,35 \text{ g/m}^2$ liegen. Der Schmierstoffmittelwert über alle Messspuren beträgt $s_0 = 0,79 \text{ g/m}^2$ und befindet sich innerhalb der werkseitigen Vorgaben. Die Standardabweichung liegt wiederum bei $\sigma = 0,26$, welche eine mittlere bis hohe Schmierstoffumverteilung charakterisiert. Insbesondere die Schmierstoffmengen im Bereich zwischen Messspur M8 und Messspur M14 liegen mit einem Durchschnittswert von $s_{\text{ØM8-M14}} = 0,52 \text{ g/m}^2$ an der unteren Spezifikationsgrenze.

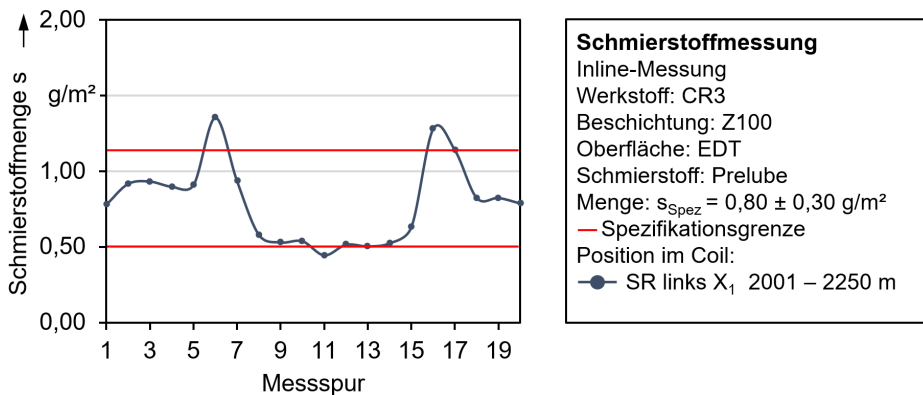


Bild 58: Schmierstoffverteilung über die Coilbreite im Bandlängenabschnitt 2001-2250 m für den linken Seitenrahmen X_1

Entsprechend der Vorgehensweise in Abschnitt 7.1.2 wurden die Daten dazu genutzt, die Platine in Segmente zu unterteilen und die entsprechenden Reibzahlen basierend auf den Schmierstoffmengen (vgl. Tabelle 13) zu-

zuweisen. Dementsprechend ergeben sich für die drei Segmente die Reibzahlen $\mu_1 = 0,130$, $\mu_2 = \mu_5 = 0,120$ und $\mu_3 = 0,115$. Um die Ergebnisse der Simulation bewerten zu können, wurde zusätzlich eine Standardsimulation für den Seitenrahmen X1 mit einer Reibzahl von $\mu_5 = 0,120$ durchgeführt, welche als Referenz dient. Zum besseren Verständnis der im Folgenden beschriebenen Simulationsergebnisse wird die Simulation, bei der die tatsächlichen tribologischen Bedingungen abgebildet werden und demzufolge mehrere Reibzahlen verwendet werden, als seriennahe Simulation bezeichnet. Dem gegenüber steht die konventionelle Standardsimulation. Die Bewertung des Umformverhaltens erfolgt anhand des Heckbereichs des Seitenrahmens sowie eines Bereiches des Türeinstiegs hinten auf Höhe der Charakterlinie. Bild 59 zeigt die beiden Bereiche am Seitenrahmen X1 des BMW Kompakt-SUV der X-Serie.

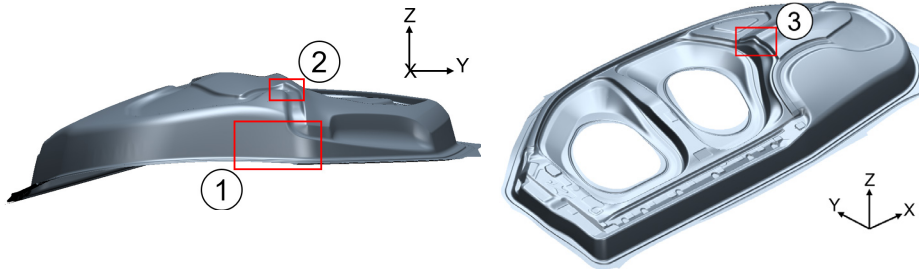


Bild 59: Auswertungsbereiche für die numerischen Untersuchungen. Heckbereich des Seitenrahmens (links) und Türeinstieg hinten (rechts) des BMW Kompakt-SUV X1

In Bild 60 sind die Ergebnisse der Simulationen anhand des Grenzformänderungsdiagramms (Forming Limit Diagramm, FLD) für die Standardsimulation und die seriennahe Simulation gegenübergestellt. Es ist erkennbar, dass der Heckbereich des Bauteils bereits im Rahmen der Standardsimulation einen risskritischen Bereich aufzeigt, welche anhand der FLD-Farbskala gelb dargestellt ist. Unter Verwendung der segmentierten Platine, welcher mehrere Reibzahlen zugeordnet sind, um die inhomogenen tribologischen Bedingungen abzubilden, wird deutlich, dass der Heckbereich (Bereich 1, vgl. Bild 59) zusätzlich zu dem bereits bestehenden ‚Rissrisiko‘ (gelb) das Auftreten von ‚Rissen‘, anhand der FLD-Farbskala rot dargestellt, aufweist. Im Bereich des Heckleuchtenausschnitts tritt ein weiterer Bereich (Bereich 2, vgl. Bild 59) auf, bei dem das Grenzformänderungsvermögen bei der seriennahen Simulation überschritten wird. Dieser Bereich ist durch eine ‚starke Ausdünnung‘ (orange) bis hin zu einem ‚Rissrisiko‘ (gelb) gekennzeichnet. In der Standardsimulation hingegen ist der Heckleuchtenausschnitt mit ‚gut‘ (grün) zu bewerten.

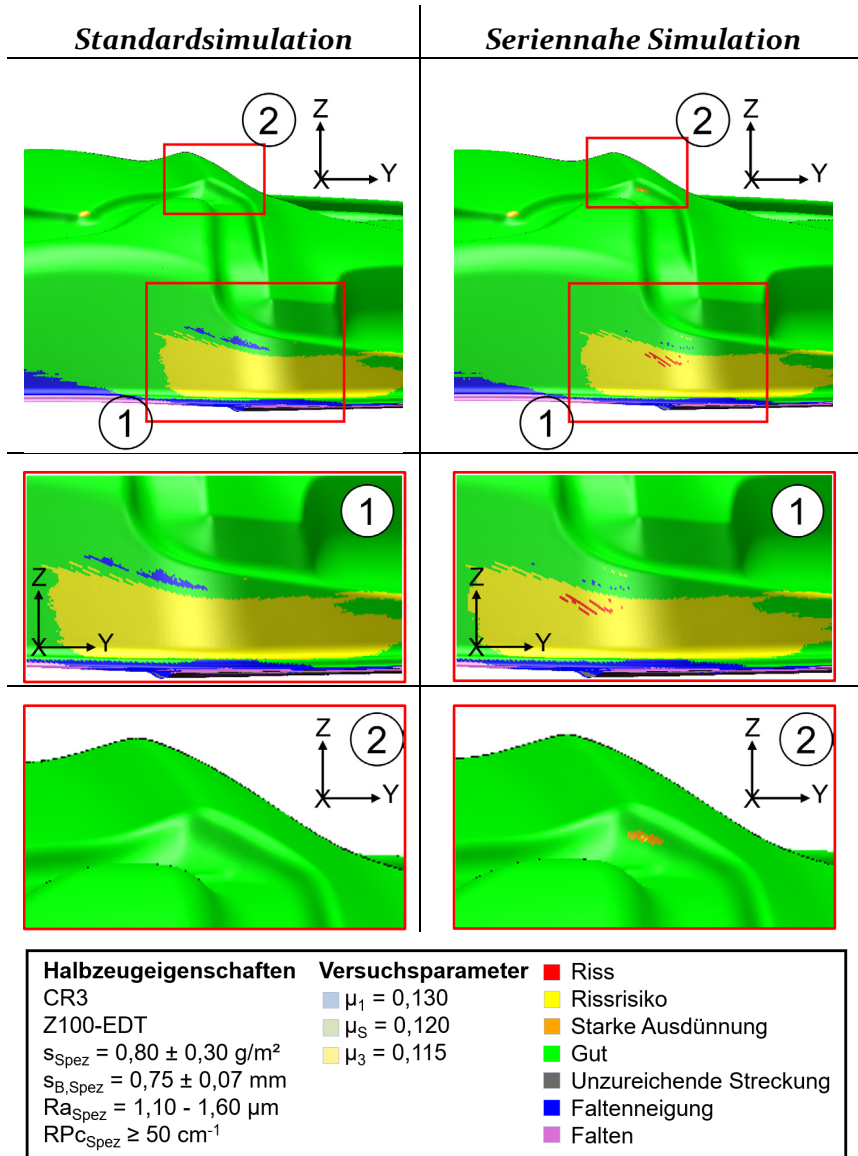


Bild 60: Vergleich der Simulationsergebnisse bei unterschiedlichen Reibungsbedingungen für den Seitenrahmen im Heckbereich

Ein weiterer Bereich am Bauteil, bei dem eine Überschreitung des Grenzformänderungsvermögens zu verzeichnen ist, befindet sich im hinteren Türeinstieg auf Höhe der Charakterlinie (Bereich 3, vgl. Bild 58). Der Vergleich der Simulationsergebnisse in Bild 61 veranschaulicht, dass bei

Verwendung einer konstanten Reibzahl wie auch unter Berücksichtigung inhomogener Reibungsbedingungen ein gleichbleibendes Risiko für das Auftreten von ‚Rissen‘ (rot) am Auslauf der Charakterlinie auftritt. Zusätzlich zeigt sich, dass bei der seriennahen Simulation ein weiterer Bereich durch eine ‚starke Ausdünnung‘ (orange) bis hin zum ‚Rissrisiko‘ (gelb) gekennzeichnet ist. Demzufolge legt der Vergleich der beiden Simulationsergebnisse dar, dass sich die inhomogenen tribologischen Bedingungen negativ auf die Bauteilqualität auswirken. Im Rahmen der seriennahen Simulation sind Bereiche, die in der Standardsimulation als rissrisiko-kritisch (gelb) gelten, hingegen risskritisch (rot).

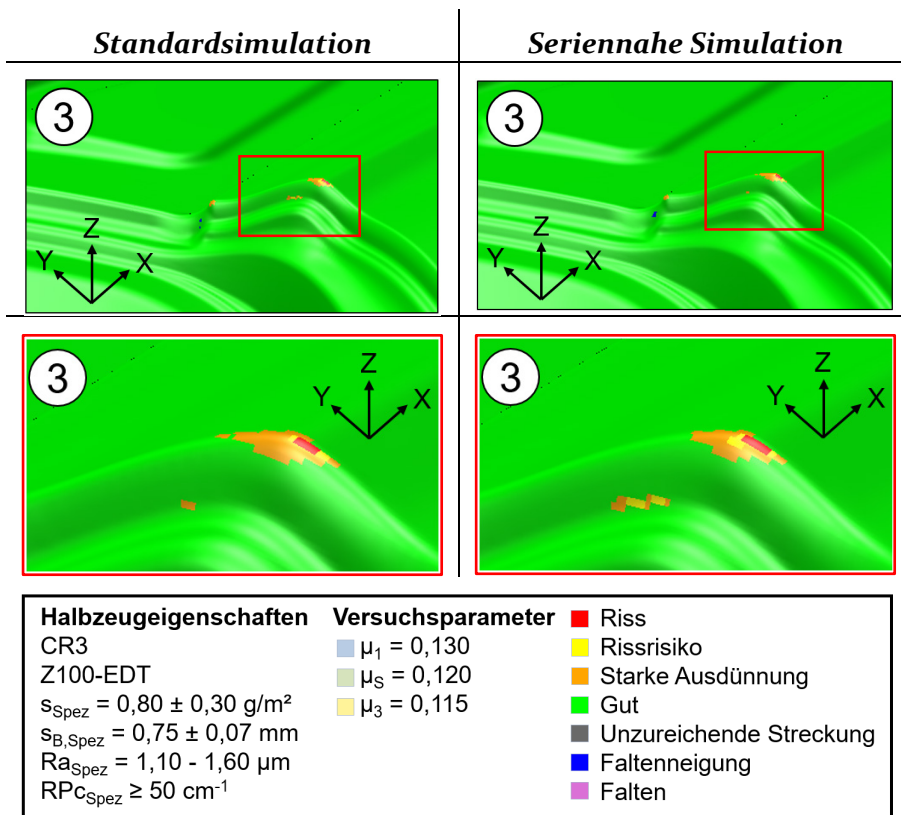


Bild 61: Vergleich der Simulationsergebnisse bei unterschiedlichen Reibungsbedingungen für den Seitenrahmen Xi im Bereich des Türeinstiegs

Der Heckbereich des Seitenrahmens wie auch der Bereich des hinteren Türeinstiegs weisen hohe Ziehtiefen auf. Zusätzlich decken sich diese Be-

reiche mit dem Bereich der Platine, in dem sich, aufgrund einer inhomogenen Schmierstoffverteilung, geringere Schmierstoffmengen befinden. In diesem Zusammenhang ist davon auszugehen, dass eine unzureichende Schmierstoffmenge zu einer zu hohen Reibung führt, wodurch das Nachfließen des Materials in die Matrize behindert wird und eine Ausdünnung des Materials, bis hin zu einem Auftreten von Rissen, die Folge sind. Unter der Annahme homogener tribologischer Bedingungen, wie in der Standardsimulation weitverbreitet, ist von einer ausreichenden Schmierstoffmenge und einer adäquaten Reibung auszugehen, die den Materialfluss begünstigt. Obwohl die Ergebnisse der Standardsimulation und der seriennahen Simulation in weiten Bereichen des Bauteils übereinstimmen, zeigt sich, dass lokal ein erhöhtes Rissrisiko infolge schwankender tribologischer Bedingungen besteht, dessen Risiko bei der Standardsimulation als zu gering bewertet wird. Im Rahmen des vorgestellten Produktionsauftrags eigneten sich die Risse lediglich im Heckbereich und nicht im Bereich des hinteren Türeinstiegs.

Validierung der Erkenntnisse

Bei einem Produktionsauftrag des rechten Seitenrahmens X₁ traten hingegen Risse im Türeinstieg hinten auf Höhe der Charakterlinie auf. Bild 62 zeigt exemplarisch den aufgetretenen Riss am Bauteil des rechten Seitenrahmens.

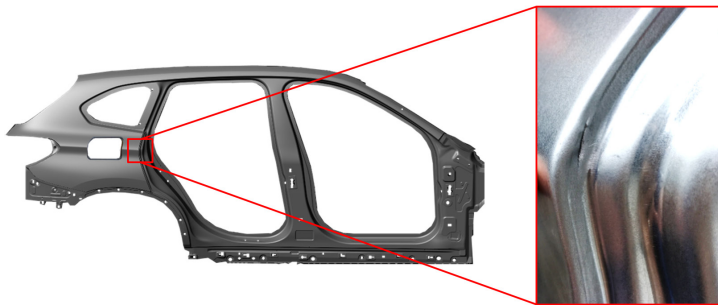


Bild 62: Riss im Türeinstieg hinten auf Höhe der Charakterlinie am rechten Seitenrahmen X₁

Da die numerischen Untersuchungen des linken Seitenrahmens gezeigt haben, dass dieser Bereich des Bauteils infolge inhomogener Reibungsbedingungen als risskritisch zu bewerten ist, erfolgt wiederum eine Analyse der Schmierstoffwerte des Coilabschnitts, in dem die Risse aufgetreten sind. Die Schmierstoffwerte des Coilabschnitts für den rechten Seitenrahmen

sind in Bild 63 dargestellt und verdeutlichen, dass eine inhomogene Schmierstoffverteilung über die Coilbreite vorliegt. Die Messwerte je Spur ergeben sich aus den über eine Länge von 250 m gemittelten Schmierstoffmengen, in denen sich die Risse ereignet haben. Mit einer Standardabweichung von $\sigma = 0,30$ ist dieser Abschnitt des Coils durch eine starke Schmierstoffumverteilung gekennzeichnet. Insbesondere in der Coilmitte von Messspur M7 bis Messspur M14 liegen die Schmierstoffwerte mit durchschnittlich $s_{\emptyset, M7-M14} = 0,54 \text{ g/m}^2$ an der unteren Grenze der Spezifikation. Lokal beträgt die Schmierstoffmenge $s_{\min} = 0,42 \text{ g/m}^2$ und befindet sich folglich unterhalb der Vorgaben von $s_{\text{Spez}, \min} = 0,50 \text{ g/m}^2$, wie für Messspur M12 erkennbar. Mit einem Wert von $s_{\emptyset} = 0,79 \text{ g/m}^2$ liegt die Schmierstoffmenge im Durchschnitt jedoch innerhalb der Vorgaben. Zum Vergleich der Schmierstoffverteilungscharakteristik sind in Bild 63 zudem die Schmierstoffwerte über die Coilbreite der Coilabschnitte des linken Seitenrahmens und des rechten Seitenrahmens gegenübergestellt. Zu erkennen ist, dass sich die Charakteristik der Schmierstoffverteilung der jeweiligen Coilabschnitte für den linken und den rechten Seitenrahmen ähnelt.

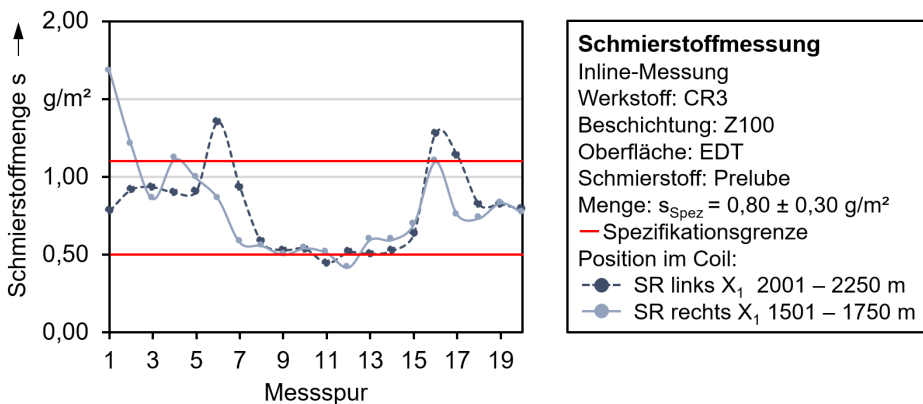


Bild 63: Schmierstoffverteilung über die Coilbreite für den linken und rechten Seitenrahmen X_1 , gemessen zwischen Bandlängenmeter 2001 und 2250 bzw. 1501 und 1750 der Coilabschnitte mit Auftritt von Rissen

Insbesondere in der Mitte der Coils zwischen Messspur M7 bzw. Messspur M8 und Messspur M14 liegen die Schmierstoffwerte mit $s_{\emptyset, \text{Seitenrahmen_links_M8-M14}} = 0,52 \text{ g/m}^2$ für den linken Seitenrahmen und $s_{\emptyset, \text{Seitenrahmen_rechts_M7-M14}} = 0,54 \text{ g/m}^2$ für den rechten Seitenrahmen nahe beieinander. Beide Bereiche entsprechen einer Reibzahl von $\mu = 0,14$ (vgl. Tabelle 13). Da sich in den seriennahen, numerischen Untersuchungen des linken Seitenrahmens gezeigt hat, dass sich der Bereich im hinteren Türeinstieg als riss-

kritisch erweist, ist davon auszugehen, dass auch der rechte Seitenrahmen in den entsprechenden Bereichen das gleiche Umformverhalten aufweist. In der industriellen Praxis wird in der Regel lediglich ein Simulationsmodell für die Seitenrahmen entwickelt, welches aufgrund der übereinstimmenden Geometrie gespiegelt wird. Folglich kann das Auftreten der Risse im Türeinstieg hinten ebenfalls auf die inhomogene Schmierstoffverteilung zurückgeführt werden.

Da zusätzlich zu den tribologischen Bedingungen weitere Faktoren einen Einfluss auf das Umformverhalten haben, kann das lokale Auftreten von Rissen nicht genau prognostiziert werden. Zusammenfassend zeigen die Untersuchungen jedoch, dass unter Berücksichtigung der im Serienprozess vorliegenden tribologischen Bedingungen die seriennahe Simulation eine genauere Vorhersage über das Auftreten von starker Ausdünnung und Rissen am Bauteil gibt. Bei der Standardsimulation werden die Schwankungen, die im Serienprozess auftreten, nicht berücksichtigt. Dies hat zur Folge, dass die Karosseriebauteile, bei denen die Auslegung bereits an der Grenze der Herstellbarkeit liegt, zu optimistisch ausgelegt werden.

8 Zusammenfassende Prozessbewertung für die Herstellung von Karosseriebauteilen im Serienprozess

Im Fokus dieser Arbeit steht die Untersuchung von schwankenden Halbzeugeigenschaften, welche das tribologische Verhalten beeinflussenden und deren Ursachen sowie die Auswirkung auf das Umformverhalten. Dabei konnte gezeigt werden, dass die Schmierstoffverteilung und damit die lokale Schmierstoffmenge, bedingt durch die Lagerdauer, Schwankungen unterliegt, welche als ursächlich für das Auftreten von Rissen bei der Umformung identifiziert werden konnte. Daher gilt es, in Hinblick auf einen nachhaltigen Umgang mit Halbzeugen im Prozess, Maßnahmen zu ergreifen, welche zum einen Schwankungen der Halbzeugeigenschaften bei der Prozessauslegung berücksichtigen und zum anderen zu einer Vermeidung von Schwankungen der Halbzeugeigenschaften beitragen. Im Weiteren wird demzufolge eine allgemeingültige Methode zur Berücksichtigung von Halbzeugschwankungen für die umformtechnische Herstellung von Karosseriebauteilen im Serienprozess definiert.

Abgeleitet aus den vorangegangenen Untersuchungen, welche unter anderem die Charakterisierung von Halbzeugeigenschaften und die numerische Analyse des Umformverhaltens umfassen, wird eine Vorgehensweise für die Berücksichtigung von die Tribologie beeinflussenden Halbzeugschwankungen für die umformtechnische Auslegung von Karosseriebauteilen, vorgestellt. Das methodische Vorgehen gliedert sich in drei Handlungsfelder, wie in Bild 64 dargestellt.

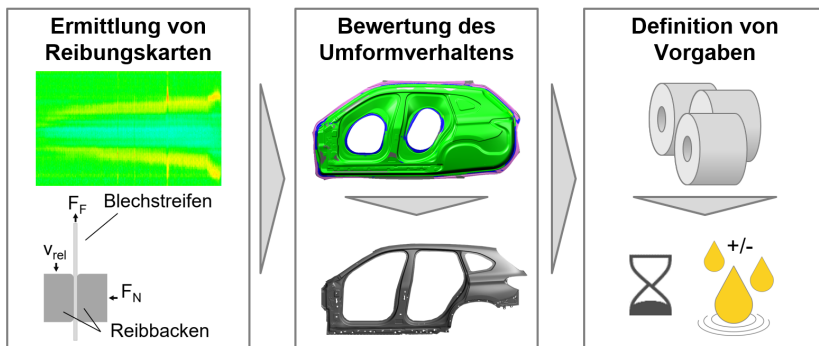


Bild 64: Methodisches Vorgehen zur Berücksichtigung von Schwankungen, der für die Tribologie relevanten Halbzeugeigenschaften für die umformtechnische Herstellung von Karosseriebauteilen

Ermittlung von Reibungskarten

Die Untersuchungen in dieser Arbeit haben gezeigt, dass in der Regel keine homogene Schmierstoffverteilung und demzufolge auch keine homogenen Reibungsbedingungen über die Länge und Breite eines Coils vorliegen. Informationen hinsichtlich der Reibungsbedingungen sind jedoch für die umformtechnische Auslegung der Karosseriebauteile mittels FE-Simulation unerlässlich. Daher müssen zunächst Erkenntnisse hinsichtlich der tribologischen Gegebenheiten geschaffen werden, um diese für die FE-Simulation nutzen zu können. Ähnlich wie bei Materialkarten, welche werkstoffspezifische Informationen enthalten, sind Reibungskarten, welche tribologiespezifische Angaben umfassen, in die Simulation einzubinden. Dazu wird zunächst die Schmierstoffverteilung anhand von inline erfassten Daten charakterisiert, um typische, tatsächlich im Serienprozess auftretende Schwankungen zu ermitteln. Empfehlenswert ist die Charakterisierung anhand unterschiedlicher Coilspezifikationen. Diese sollten insbesondere die Coilbreite, die Schmierstoffart, die Schmierstoffspezifikation und die Angabe des Halbzeuglieferanten enthalten. Mittels der Durchführung von Streifenziehversuchen lassen sich anschließend Reibzahlen in Abhängigkeit der Schmierstoffmenge, welche als Haupteinflussfaktor auf das Reibverhalten identifiziert werden konnte, ermitteln. Die Verteilungscharakteristik unterschiedlicher Ausprägung kann dann wiederum mithilfe der Reibzahlen in eine Reibungskarte zusammengefasst werden und steht für numerische Anwendungen zur Verfügung. Für die Coils des Seitenrahmens X₁ wurden in Abhängigkeit der Schmierstoffmenge, welche mit $s_{\text{Spez}} = 0,80 \pm 0,30 \text{ g/m}^2$ Prelube-Schmierstoff spezifiziert ist, drei Bereiche über die Coilbreite von 1780 mm ermittelt, die unterschiedliche Reibbedingungen besitzen und denen entsprechend Reibzahlen von $\mu_1 = 0,130$, $\mu_5 = 0,120$ und $\mu_3 = 0,115$ zugeordnet werden können (vgl. Abschnitt 7.1.2).

Bewertung des Umformverhaltens

Die FE-Simulation ist ein bewährtes Werkzeug für die Vorhersage des Umformverhaltens bei der Auslegung von Karosseriebauteilen. Bisher werden Schwankungen der Reibung aufgrund inhomogener tribologischer Halbzeugeigenschaften nicht in der Standard-Simulation berücksichtigt. Durch die Verwendung der zuvor definierten Reibungskarten lässt sich jedoch die Vorhersagegenauigkeit erhöhen. Folglich können Bauteile hinsichtlich ihrer Sensibilität gegenüber Schwankungen überprüft werden. Insbesondere bei umformtechnisch anspruchsvollen Bauteilen lassen sich so kritische Bereiche bestimmen. Am Beispiel des Seitenrahmens X₁ hat sich gezeigt, dass durch die Berücksichtigung der tatsächlichen Reibungsbedingungen

Bereiche, die bei der Durchführung einer Standardsimulation als rissunkritisch gelten, als risskritisch erweisen (vgl. Abschnitt 7.2). Zudem lässt sich das Prozessfenster ermitteln, in dem Bauteile guter Qualität trotz Schwankungen gefertigt werden können. Darüber hinaus ermöglicht die Abbildung der tatsächlichen tribologischen Bedingungen eine optimale Bestimmung der Verschachtelung der Platinen auf dem Blechband. Damit kann die Lage und Geometrie der Platine im Coil in Abhängigkeit der Reibungsbedingungen bestimmt werden, wodurch bei kleineren Bauteilen die Möglichkeit besteht, die Verschachtelung so zu wählen, dass riss-kritische Bereiche des Bauteils nicht in Bereichen hoher Reibung liegen. Besteht eine hohe Sensibilität des Bauteils gegenüber schwankenden tribologischen Bedingungen, sodass kein ausreichend großes Prozessfenster für die Fertigung von Bauteilen guter Qualität ermittelt werden kann, ist die Definition neuer Vorgaben zur Reduktion der Schmierstoffumverteilung, wie im Folgenden beschrieben, erforderlich.

Definition von Vorgaben

Die in der Automobilindustrie verwendeten Schmierstoffe dienen vornehmlich dem Schutz vor Korrosion auf der Blechbandoberfläche über den gesamten Zeitraum von der Herstellung der Coils, dem Transport, der Lagerung, sowie nach der Umformung im Presswerk bis hin zur Entfettung für die Folgeprozesse in der Lackiererei [96]. Dabei haben die Untersuchungen hinsichtlich der Ursachen für die Schmierstoffumverteilung gezeigt, dass die Lagerdauer einen signifikanten Einfluss auf die Homogenität der Schmierstoffverteilung hat. Um eine homogene Schmierstoffverteilung auf der Oberfläche zum Zeitpunkt des Platinenschnitts sicherzustellen, sind demzufolge neben der Gültigkeit für die mechanischen Eigenschaften [137] zusätzlich Restriktionen hinsichtlich der Lagerdauer zu definieren und Qualitätsmängel aufgrund inhomogener tribologischer Bedingungen während der Umformung zu unterbinden. Eine inhomogene Schmierstoffverteilung wird nicht gänzlich zu vermeiden sein, jedoch kann diese durch Definition von Vorgaben hinsichtlich einer maximalen Lagerdauer reduziert werden. Falls erforderlich ist diese aufgrund der Temperaturunterschiede in Abhängigkeit der Jahreszeit festzulegen. Darüber hinaus ist beispielsweise ein Bezug von Coils aus China, dem weltweit größten Stahlproduzenten [159], zu überdenken, da sich durch die geographische Lage ein entsprechend langer Transportweg nach Europa und damit eine einhergehend lange Lagerdauer ergibt. Folglich sind für Coils kurze Transportwege und Lagerzeiten zu präferieren bzw. zu definieren.

Darüber hinaus sollten die Vorgaben hinsichtlich der Menge des aufgetragenen Schmierstoffes im Walzwerk neu bewertet werden. Die Lagerdauer hat sich als ein entscheidender Stellhebel für eine homogene Schmierstoffauflage herausgestellt, jedoch ist davon auszugehen, dass eine inhomogene Schmierstoffverteilung auch unter optimalen Transport- und Lagerbedingungen nicht gänzlich zu vermeiden ist. Es hat sich jedoch eine Tendenz dahingehend gezeigt, dass je weniger Schmierstoff sich auf der Coiloberfläche befindet, desto geringer ausgeprägt ist die Umverteilungscharakteristik. Folglich ist zu prüfen, ob der Korrosionsschutz während des Transports und der Lagerung der Coils auch bei geringeren Schmierstoffmengen gegeben ist und eine Reduzierung dieser möglich ist. Ein weiterer Aspekt, der zusätzlich für eine Reduzierung der Schmierstoffmenge spricht, ist, dass Schmierstoffe in der Regel umwelt- und gesundheitsschädliche Stoffe enthalten, deren Verwendung es zu vermeiden oder zu reduzieren gilt. Demzufolge ist eine Wiedereinführung von Waschprozessen, bei denen Coils im Walzwerk mit Korrosionsschutzöl beaufschlagt und anschließend im Presswerk zunächst entfettet und erneut beölt werden, in-diskutabel.

Die vorgestellte Methode zeigt eine strukturierte Vorgehensweise, wie schwankende tribologische Bedingungen bei der Bauteilauslegung sowie im Serienprozess berücksichtigt werden können. Das Vorgehen kann zudem auf andere Bauteile übertragen werden. Eine Reduzierung der Schwankungen der Schmierstoffmenge und Schmierstoffverteilung sowie die Kenntnis über das zur Verfügung stehende Prozessfenster tragen so zu einer Robustifizierung des Prozesses und zu gleich zu einer Ressourcenschonung bei.

9 Zusammenfassung und Ausblick

Im Hinblick auf eine ressourcenschonende und effiziente Herstellung von Karosseriebauteilen gilt es, den Umfang an Ausschuss so gering wie möglich zu halten. Der umformtechnische Herstellungsprozess von Karosseriebauteilen wird durch verschiedene Faktoren beeinflusst, zu denen unter anderem Schwankungen der Halbzeugeigenschaften zählen, welche ursächlich für das Auftreten von Qualitätsmängeln am Bauteil sein können. Diese werden bisher bei der Auslegung der Umformwerkzeuge nicht berücksichtigt. Zudem liegt bislang nur ein unzureichendes Wissen über die im Serienprozess vorkommenden Schwankungen der Halbzeugeigenschaften vor und wie sich diese auf die Bauteilqualität auswirken.

Demzufolge war es Ziel dieser Arbeit, ein grundlegendes Prozessverständnis über das Auftreten von Schwankungen hinsichtlich der für die Tribologie relevanten Halbzeugeigenschaften und deren Auswirkung auf den Umformprozess mit Bezug auf die Bauteilqualität zu erarbeiten. Dazu wurde zunächst eine Charakterisierung der Halbzeugeigenschaften anhand einer Vielzahl an Coils vorgenommen. Im Anschluss erfolgten experimentelle Untersuchungen zur Ermittlung von Reibzahlen unter Verwendung verschiedener tribologischer Bedingungen im Streifenziehversuch. Abschließend wurde eine Analyse des Einflusses von schwankenden Reibungsbedingungen auf Basis numerischer Untersuchungen durchgeführt.

Die Erfassung der Halbzeugeigenschaften erfolgte mithilfe von Inline-Messsystemen, welche die Schmierstoffmenge und Rauheit am laufenden Band in der Coilanlage, vor dem Zuschnitt der Platine, detektieren. Darauf folgend wurden die Daten dazu genutzt, um Schwankungen, innerhalb eines Coils wie auch gegenüberstellend mehrerer Coils, zu charakterisieren. Dabei hat sich gezeigt, dass die Rauheit über die Coillänge und -breite keinen signifikanten Schwankungen unterliegt. Auch der Vergleich mehrerer Coils hat ergeben, dass lediglich geringe Schwankungen auftreten und die werkseitigen Vorgaben nicht vollständig ausgeschöpft werden. Im Vergleich dazu konnten hinsichtlich der Schmierstoffmenge und -verteilung signifikante Schwankungen festgestellt werden. Des Weiteren konnte nachgewiesen werden, dass es in Abhängigkeit der Zeit zu einer Verdrängung des Schmierstoffes aus der Bandmitte in die Bandseitenbereiche kommt und somit inhomogene Reibungsbedingungen auf der Halbzeugoberfläche bzw. Platine vorliegen. Zudem zeigte sich, dass eine in Bandlängenrichtung zunehmende Inhomogenität der Schmierstoffverteilung vorliegen kann. Unterschiede in Bezug auf die Schmierstoffmenge und

Schmierstoffverteilung zwischen der Ober- und Unterseite des Coils konnten nicht festgestellt werden. Die Erkenntnisse dienten für die Auswahl geeigneter Halbzeuge für die experimentellen Untersuchungen.

Zur Identifikation der halbzeugseitigen Haupteinflussgrößen auf das Reibverhalten wurden im Weiteren Streifenziehversuche durchgeführt. Die experimentellen Untersuchungen erfolgten unter Verwendung von Blechstreifen verschiedener Coils aus dem Serienprozess, um die tatsächlichen tribologischen Bedingungen bestmöglich abzubilden. Die vorangegangene Charakterisierung der Blechstreifen hinsichtlich des tribologischen Verhaltens hat ergeben, dass die Rauheit lediglich geringen Schwankungen unterliegt. Zugleich wurden Schmierstoffwerte ermittelt, die von der werkseitig vorgegebenen Spezifikation abweichen und diese sowohl über- als auch unterschreiten. Die Gegenüberstellung der ermittelten Reibzahlen zu den Halbzeugeigenschaften hat gezeigt, dass die Schmierstoffmenge im Vergleich zur Rauheit eine signifikante Auswirkung auf das Reibverhalten hat und somit als ein wesentlicher Faktor identifiziert werden konnte. Folglich konnte nachgewiesen werden, dass eine hohe Schmierstoffmenge mit einer niedrigen Reibzahl und umgekehrt eine geringe Schmierstoffmenge mit einer hohen Reibzahl einhergeht. Darüber hinaus konnte die Erkenntnis gewonnen werden, dass die Schwankungen des im Serienprozess vorliegenden Rauheitspektrums nicht ausreichen, um das Reibverhalten signifikant zu beeinflussen. Somit kann das Reibverhalten nahezu vollständig durch die Schmierstoffmenge erklärt werden. Die im Rahmen dieser Arbeit ermittelten Reibzahlen dienten für die anschließend durchgeführten numerischen Untersuchungen.

Um die Auswirkung inhomogener tribologischer Bedingungen im Serienprozess auf die Bauteilqualität zu analysieren, wurden die bisherigen Erkenntnisse in die FE-Simulation übertragen. Als Grundlage für die Untersuchungen dienten die Prozessparameter und inline erfassten Halbzeugeigenschaften von Produktionsaufträgen aus dem Serienprozess. Zur Abbildung der tatsächlich vorliegenden tribologischen Bedingungen wurden, in Abhängigkeit der lokal auf der Platine vorliegenden Schmierstoffmenge, entsprechend verschiedene Reibzahlen für die numerischen Untersuchungen verwendet. Die Simulationsergebnisse wurden zudem vergleichsweise dem Umformergebnis der realen Karosseriebauteile gegenübergestellt. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass bei der Abbildung der tatsächlichen tribologischen Bedingungen in der Simulation das Auftreten von Rissen am Bauteil mit der Rissbildung am realen Bauteil bei Produktionsaufträgen des Serienprozesses einhergeht. Folglich konnte mittels der numerischen Untersuchungen nachgewiesen werden, dass inhomogene

tribologische Bedingungen, aufgrund der schwankenden Schmierstoffmengen, lokal zu einer höheren bzw. geringeren Reibung führen, wodurch es zu einem inadäquaten Materialfluss kommt. Dieses Qualitätsmerkmal konnte bei der konventionellen Standardsimulation nicht nachgewiesen werden. Im Serienprozess hingegen treten an den in der seriennahen Simulation ermittelten risskritischen Bereichen tatsächliche Risse auf. Demzufolge konnte durch den gegenüberstellenden Vergleich der konventionellen Simulation mit einer Reibzahl und der in dieser Arbeit erarbeiteten seriennahen Simulation, durch die Abbildung der tatsächlichen im Serienprozess vorliegenden tribologischen Bedingungen, gezeigt werden, dass die Vorhersagegenauigkeit des Auftretens von Rissen verbessert werden kann.

Mithilfe des geschaffenen Verständnisses über das Auftreten und die Auswirkung von schwankenden tribologischen Bedingungen bei der Herstellung von Karosseriebauteilen im Serienprozess können zukünftig die Umformwerkzeuge unter Berücksichtigung der charakteristischen Schwankungen ausgelegt werden, um präventiv durch Schwankungen verursachtem Ausschuss entgegenzuwirken. Des Weiteren bietet die Methodik bei kleineren Karosseriebauteilen das Potenzial, die Position der Platine im Coil, in Abhängigkeit der Bauteilgeometrie und der benötigten Reibungsbedingungen, zu definieren und folglich die Platinenauslegung zu optimieren.

10 Summary and outlook

With regard to a resource-saving and efficient production of car body parts, it is important to keep the amount of rejects as low as possible. However, the forming process of car body parts is influenced by various factors, including fluctuations of the semi-finished product properties. These can be the cause of quality defects of the car body parts. Up to now, however, there has been insufficient knowledge about fluctuations of semi-finished product properties occurring in the series production process and how these affect the part quality.

Therefore, the aim of this work was to develop a fundamental process understanding of the occurrence of fluctuations with regard to the tribological properties of semi-finished products and their effect on the forming process with reference to the part quality. For this purpose, first a characterization of the semi-finished product properties was carried out using a large number of coils, followed by experimental investigations to determine coefficients of friction using different tribological conditions by strip drawing tests. Finally, an analysis of the influence of fluctuating friction conditions based on numerical investigations have been carried out.

The semi-finished product properties were recorded with the aid of inline measuring systems which detect the lubricant quantity and surface roughness on the running strip in the coil plant. Subsequently, the data was used to characterize variations within a coil as well as in comparison to several coils. This analysis showed that the surface roughness is not subject to significant fluctuations over the coil length and width. The comparison of several coils also showed that only minor fluctuations occur and that the factory specifications are not fully utilized. In comparison, significant fluctuations were found with regard to the lubricant quantity and distribution. Furthermore, it has been proven that, depending on the time, a displacement of the lubricant from the center of the strip to the side areas of the strip occurs. Thus, inhomogeneous friction conditions exist on the semi-finished product surface or blank. In addition, the investigations have revealed that there can be an increasing inhomogeneity of the lubricant distribution along the strip length. Differences in lubricant quantity and distribution between the upper and lower side of the coil have not been found. The findings were then used to select suitable semi-finished products for the experimental investigations.

In order to identify the main influence of the tribological properties of the semi-finished products on the friction behavior, strip drawing tests were carried out. The experimental investigations were carried out using sheet metal strips of different coils from the series production process in order to map the actual tribological conditions as best as possible. The characterization of the sheet metal strips with regard to the tribological properties has shown that the roughness is subject to only minor fluctuations. At the same time, lubricant values were determined which deviate from the factory-set specification which exceed the upper and lower limit. The comparison of the determined coefficients of friction with the semi-finished product properties has shown that the lubricant quantity has a significant effect on the friction behavior compared to the surface roughness and was thus be identified as the major influencing factor. Consequently, it has been shown that a high lubricant quantity is associated with a low coefficient of friction and, conversely, a low lubricant quantity is associated with a high coefficient of friction. In addition, it was found that the fluctuations of the surface roughness present in the series production process are not sufficient to have a significant influence on the friction behavior. Thus, the friction behavior can be almost completely explained by the lubricant quantity. The friction coefficients determined in this thesis were used for the subsequent numerical investigations.

To analyze the effect of inhomogeneous tribological conditions in the series process on the part quality, the previous findings were transferred to the FE-simulation. The process parameters and inline recorded semi-finished product properties of production orders from the series process served as the basis for the investigations. To map the actually tribological conditions present, different coefficients of friction were used for the numerical investigations, depending on the amount of lubricant locally present on the blank. The simulation results were compared to the forming results of the real car body part. The results have shown that when the actual tribological conditions are mapped in the simulation, the occurrence of cracks on the part went hand in hand with the formation of cracks on the real part of the production orders of the series process. Consequently, it has been proven by means of the numerical investigations that inhomogeneous tribological conditions, due to the fluctuating lubricant quantities, lead locally to higher or lower friction, resulting in an inadequate material flow. This quality attribute could not be proven by the conventional standard simulation. In the series production process, on the other hand, actual cracks occur at the crack-critical areas determined in the near-series simulation.

Consequently, by comparing the conventional simulation using one friction coefficient and the near-series simulation developed in this thesis, it was possible to show that the prediction accuracy of the occurrence of cracks can be improved by mapping the actual tribological conditions present in the series process.

With the help of the accomplished understanding of the occurrence as well as the effect of fluctuating tribological conditions during the production of car body parts in the series production process, the future forming tools can be designed, taking into account the characteristic fluctuations, in order to preventively counteract rejects caused by fluctuations. Furthermore, the methodology offers the potential to define the position of the blank in the coil for smaller car body parts, depending on the part geometry and the required friction conditions to optimize the blank design.

Literaturverzeichnis

- [1] https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-10-17_texte_128-2019_sekundaeranalyse-umweltbewusstseinstudie.pdf (aufgerufen am 27.09.2022).
- [2] Springer Fachmedien Wiesbaden: Umweltperformance als wichtiges Kriterium. ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift Extra, 10, 2014, 130-135.
- [3] <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Textsammlungen/Branchenfokus/Industrie/branchenfokus-automobilindustrie.html> (aufgerufen am 14.10.2023).
- [4] https://unfccc.int/files/essential_background/convention/application/pdf/english_paris_agreement.pdf (aufgerufen am 27.11.2020).
- [5] Amtsblatt der Europäischen Union: Verordnung (EU) 2019/631 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 17. April 2019 zur Festsetzung von CO₂-Emissionsnormen für neue Personenkraftwagen und für neue leichte Nutzfahrzeuge und zur Aufhebung der Verordnungen (EG) Nr. 443/2009 und (EU) Nr. 510/2011, L 111/13, 2020.
- [6] Eckstein, L., Göbbels, R., Göbbelsist, R., Goede, M., Laue, T., Wohlecker, R.: Analyse sekundärer Gewichtseinsparpotenziale in Kraftfahrzeugen. ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift, 113(1), 2011, 68-76.
- [7] Ribes, H.: Aluminiumlegierungen im Leichtbau von kleinen Nutzfahrzeugen und Großraumkombis. ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift, 6(1), 2019, 44-47.
- [8] Hillebrecht, M., Kiel, B., Letzig, D., Yi, S.: Herstellung von Karosseriebauteilen aus Magnesiumblech. ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift, 117(11), 2015, 28-33.
- [9] Birkert, A., Haage, S., Straub, M.: Umformtechnische Herstellung komplexer Karosserieteile - Auslegung von Ziehanlagen, Berlin, Heidelberg: Springer, 2013.
- [10] Diez, W.: Automobil-Marketing - Navigationssystem für neue Absatzstrategien, München: mi-Wirtschaftsbuch, 2009, 1. Auflage.

- [11] Wallentowitz, H., Leyers, J.: Technologietrend in der Fahrzeugtechnik - Dimensionen, Verläufe und Interaktionen. In: Ebel, B., Hofer, M.B. (Hrsg.): Automotive Management - Strategie und Marketing in der Automobilwirtschaft. Berlin, Heidelberg: Springer Gabler, 2014, 2. überarb. und akt. Auflage, 29–55.
- [12] Achleitner, A., Antony, P., Berger, E., Burgers, C., Döllner, G., Ebner, N., Futschik, H.D., Gruber, M., Kiesgen, G., Inderka, R.B., Malottki, S. von, Mohrdieck, C.H., Noreikat, K.E., Urstöger, M., Schildhauer, C., Schulze, H., Wagner, M., Wolff, K., Wöhr, M.: Formen und neue Konzepte. In: Pischinger, S., Seiffert, U. (Hrsg.): Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2016, 131–251.
- [13] <https://www.springerprofessional.de/umformen/produktion---produktionstechnik/eigenschaftsgeregelte-umformprozess-fuer-mehrnachhaltigkeit/15595540?searchResult=1.Eigenschaftsgeregelte%20Umformprozess%20of%C3%BCr%20mehr%20Nachhaltigkeit> (aufgerufen am 27.08.2022).
- [14] Roll, K.: Numerische Simulation in der Blechumformung. In: Hoffmann, H., Spur, G., Neugebauer, R. (Hrsg.): Handbuch Umformen. München: Carl Hanser Fachbuchverlag, 2012, 2. vollst. neu bearb. Auflage, 92–97.
- [15] <https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/DE/Downloads/Publication/acatech-themenfelder-industrie-4-0.html> (aufgerufen am 27.09.2022).
- [16] Purr, S., Wendt, A., Meinhardt, J., Moelzl, K., Werner, A., Hagenah, H., Merklein, M.: Data-driven inline optimization of the manufacturing process of car body parts. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 159(012002), 2016.
- [17] Dietrich, J.: Praxis der Umformtechnik. - Umform- und Zerteilverfahren, Werkzeuge, Maschinen, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2018, 12. überarbeitete und erweiterte Auflage.
- [18] DIN 8582:2003-09: Fertigungsverfahren Umformen - Einordnung, Unterteilung, Begriffe, Alphabetische Übersicht. Deutsches Institut für Normung e.V.: Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2003.
- [19] DIN 8585-4:2003-09: Fertigungsverfahren Zugumformen - Teil 4: Tiefen; Einordnung, Unterteilung, Begriffe. Deutsches Institut für Normung e.V.: Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2003.

- [20] Liewald, M., Wagner, S.: Fertigungsverfahren - S3 Umformen. In: Grote, K.-H., Feldhusen, J. (Hrsg.): Dubbel - Taschenbuch für den Maschinenbau. Berlin, Heidelberg: Springer, 2014, 24. Auflage, 1372–1390.
- [21] DIN 8584-3:2003-09: Fertigungsverfahren Zugdruckumformen - Teil 3: Tiefziehen Einordnung, Unterteilung, Begriffe. Fertigungsverfahren Zugdruckumformen: Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2003.
- [22] Siegert, K.: Tiefziehen. In: Siegert, K. (Hrsg.): Blechumformung - Verfahren, Werkzeuge und Maschinen. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2015, 101–140.
- [23] <https://www.bbr.de/weniger-zinkabrieb-im-presswerkzeug-71759> (aufgerufen am 18.09.2017).
- [24] Hahn, M.: Beurteilung der Ausprägung von Anhaul- und Nachlaufkanten mit Hilfe der FEM. Dissertation, Technische Universität München, 2004.
- [25] Maier, S.J.: Inline-Qualitätsprüfung im Presswerk durch intelligente Nachfolgewerkzeuge. Dissertation, Technische Universität München, 2018.
- [26] Schmidt-Jürgensen, R.: Untersuchungen zur Simulation rückfederungsbedingter Formabweichungen beim Tiefziehen. Dissertation, Universität Hannover, 2002.
- [27] Harsch, D., Heingärtner, J., Hortig, D., Hora, P.: Process Windows for Sheet Metal Parts based on Metamodels. Journal of Physics Conference Series, 734(3), 2016, 32014.
- [28] Liewald, M., Wagner, S.: Tiefziehen - Werkzeuge für die Blechumformung. In: Hoffmann, H., Spur, G., Neugebauer, R. (Hrsg.): Handbuch Umformen. München: Carl Hanser Fachbuchverlag, 2012, 2. vollst. neu bearb. Auflage, 501–517.
- [29] Doege, E., Behrens, B.-A.: Handbuch Umformtechnik - Grundlagen, Technologien, Maschinen, Berlin, Heidelberg: Springer, 2010, 2. bearb. Auflage.
- [30] Liewald, M., Wagner, S.: Tiefziehen im Erstzug. In: Hoffmann, H., Spur, G., Neugebauer, R. (Hrsg.): Handbuch Umformen. München: Carl Hanser Fachbuchverlag, 2012, 2. vollst. neu bearb. Auflage, 445–458.

- [31] Rittmeier, S.: Systemunterstützte Umformung. Dissertation, Technische Universität Dresden, 2007.
- [32] Faass, I.: Prozessregelung für die Fertigung von Karosserieteilen in Presswerken. Dissertation, Technische Universität München, 2009.
- [33] Coulomb, C.A.: *Théorie des machines simples, en ayant égard au frottement de leurs parties, et à la roideur des cordages*, Paris: Bachelier, 1809.
- [34] Neumann, A.: Konzept zur Beherrschung der Prozessschwankungen im Presswerk. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2013.
- [35] Groche, P., Engels, M.: Thermische Einflüsse in der Blechumformung - Prognose thermisch stationärer Zustände für mehrstufige Umformprozesse. *wt Werkstattstechnik online*, 101(H. 10), 2011, 692–698.
- [36] K. Roll, P. Bogon, C. Ziebert: Innovative Methoden zur Auslegung von Umformwerkzeugen im Fahrzeugbau BMBF-Verbundprojekt IM-AUF. *wt Werkstattstechnik - Online*, 97(10), 2007, 753–759.
- [37] van der Heide, E.: *Lubricant failure in sheet metal forming processes*, University of Twente, 2002.
- [38] Klocke, F., König, W.: *Fertigungsverfahren 4 - Umformen*, Berlin, Heidelberg: Springer, 2006, 5. neu bearb. Auflage.
- [39] Meiler, M., Jaschke, H.: *Lubrication of Aluminium Sheet Metal within the Automotive Industry*. *Advanced Materials Research*, 6-8, 2005, 551–558.
- [40] Träger, M.: *Untersuchung des Einflusses der Pressenelastizität auf den Einarbeitsprozess von Karosseriewerkzeugen*. Dissertation, Technische Universität München, 2007.
- [41] Zgoll, F., Kuruva, S., Götze, T., Volk, W.: Virtual die spotting: Compensation of elastic behavior of forming presses. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 651(012021), 2019.
- [42] Penter, L., Ihlenfeldt, S., Hardtmann, A.: Durchgängige Modellierung des Tiefziehens mit erweiterter Maschinen-Prozess-Simulation. In: Landgrebe, D., Drossel, W.-G., Putz, M. (Hrsg.) *5th International Conference on Accuracy in Forming Technology ICAFT*, 22. Sächsische Fachtagung Umformtechnik SFU, Chemnitz, 2015, 1-18.

- [43] Mork, R.: Qualitätsbewertung und -regelung für die Fertigung von Karosserieteilen in Presswerken auf Basis neuronaler Netze. Dissertation, Technische Universität München, 2012.
- [44] DIN EN ISO 6892-1:2020-06: Metallische Werkstoffe – Zugversuch – Teil 1: Prüfverfahren bei Raumtemperatur. Deutsches Institut für Normung e.V.: Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2020.
- [45] Ruge, J., Wohlfahrt, H.: Technologie der Werkstoffe, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2013, 9. überarbeitete und aktualisierte Auflage.
- [46] Girschewski, B.: Optimierung des Umformprozesses ziehkritischer Blechteile. Dissertation, Technische Universität München, 2004.
- [47] ISO 10113:2020-01: Metallische Werkstoffe - Blech und Band - Bestimmung der senkrechten Anisotropie. Deutsches Institut für Normung e.V.: Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2020.
- [48] Bräunlich, H.: Blecheinzugsregelung beim Tiefziehen mit Niederhalter - Ein Beitrag zur Erhöhung der Prozessstabilität. Dissertation, Technische Universität Chemnitz, 2002.
- [49] Purr, S.: Datenerfassung für die Anwendung lernender Algorithmen bei der Herstellung von Blechformteilen. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2020.
- [50] Zöllner, F.: Erarbeitung von Grundlagen zur Abbildung des tribologischen Systems in der Umformsimulation. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2016.
- [51] https://neu.gft-ev.de/wp-content/uploads/2002_AB_7_Tribologie.pdf (aufgerufen am 28.08.2022).
- [52] Czichos, H.: Tribologische Systeme. In: Czichos, H., Habig, K.-H. (Hrsg.): Tribologie-Handbuch - Tribometrie, Tribomaterialien, Tribotechnik. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015, 4. vollst. überarb. u. erw. Auflage, 13–25.
- [53] Stribeck, R.: Die wesentlichen Eigenschaften der Gleit- und Rollenlager. In: : Mitteilungen über Forschungsarbeiten auf dem Gebiete des Ingenieurwesens: Julius Springer, 1903, 1–47.
- [54] Sommer, K., Heinz, R., Schöfer, J.: Verschleiß metallischer Werkstoffe - Erscheinungsformen sicher beurteilen, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014, 2. korr. und erg. Auflage.

- [55] Kuwer, C.-J.: Verschleißreduktion beim Tiefziehen von X5 CrNi 18-10. Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, 2007.
- [56] Czichos, H.: Reibung. In: Czichos, H., Habig, K.-H. (Hrsg.): Tribologie-Handbuch - Tribometrie, Tribomaterialien, Tribotechnik. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015, 4. vollst. überarb. u. erw. Auflage, 93–126.
- [57] Blaich, M., Dannenmann, E., Mössle, E.: Tribologie der Blechumformung. In: Lange, K. (Hrsg.): Umformtechnik - Handbuch für Industrie und Wissenschaft. Band 3: Blechbearbeitung. Berlin, Heidelberg: Springer, 1990, 2. völlig neubearbeitete und erweiterte Auflage, 78–109.
- [58] Eversheim, W., Klocke, F.: Werkzeugbau mit Zukunft - Strategie und Technologie, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1998.
- [59] Zhao, R., Tremmel, S.: Tribologisches Einsatzverhalten von diamantähnlichen Kohlenstoffschichten (DLC) auf Werkzeugstahl gegenüber Stahl- und Aluminiumblechwerkstoffen für Trockentiefziehprozesse. Tribologie und Schmierungstechnik, 63(6), 2016, 35–42.
- [60] Volk, R.: Rauheitsmessung - Theorie und Praxis, Berlin: Beuth, 2013, 2. überarb. Auflage.
- [61] DIN EN ISO 4287:2010-07: Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren - Benennungen, Definitionen und Kenngrößen der Oberflächenbeschaffenheit. Deutsches Institut für Normung e.V.: Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2010.
- [62] VDI 2840:2012-06: Kohlenstoffschichten - Grundlagen, Schichttypen und Eigenschaften. Verein Deutscher Ingenieure: Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2012.
- [63] Uhlmann, E.: Tribologie in der Produktionstechnik. In: Czichos, H., Habig, K.-H. (Hrsg.): Tribologie-Handbuch - Tribometrie, Tribomaterialien, Tribotechnik. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015, 4. vollst. überarb. u. erw. Auflage, 555–582.
- [64] Fontaine, J., Donnet C., Erdemir A.: Fundamentals of the Tribology of DLC Coatings. In: Donnet, C., Erdemir, A. (Hrsg.): Tribology of Diamond-Like Carbon Films - Fundamentals and Applications. Boston, MA: Springer US, 2008, 139–154.

- [65] Weikert, T., Tremmel, S., Wartack, S.: Gezielte Anpassung lokaler Reibungszustände unter Einsatz wolframmodifizierter amorpher Kohlenstoffschichten (a-C:H:W). In: Gesellschaft für Tribologie e.V. (Hrsg.) 56. Tribologie-Fachtagung: Reibung, Schmierung und Verschleiß, Göttingen, 2015, 1–10.
- [66] Zhao, R., Tremmel, S.: PVD-/PECVD-DLC Thin Coatings as a Potential Solution for Tailored Friction Conditions for Dry Sheet Metal Forming Tools. In: Bobzin, K., Bouzakis, K.-D., Denkena, B., Maier, H.J., Merklein, M. (Hrsg.) 12th International Conference THE "A" Coatings 2016, Hannover, 2016, 193–200.
- [67] Weikert, T., Tremmel, S.: Amorphous Carbon Coatings for Sheet-Bulk Metal Forming Tools. In: Merklein, M., Tekkaya, A.E., Behrens, B.-A. (Hrsg.): Sheet Bulk Metal Forming - Research Results of the TCRC73. Cham: Springer International Publishing, 2021, 1. Auflage, 192–215.
- [68] Merklein, M., Schrader, T., Engel, U.: Wear Behavior of PVD-Coatings. *Tribology in Industry*, 34(2), 2012, 51–56.
- [69] Löffler, M., Andreas, K., Engel, U., Weikert, T., Tremmel, S., Wartack, S., Stangier, D., Tillmann, W., Merklein, M.: Surface modifications for adaption of tribological conditions in sheet-bulk metal forming processes. In: Bobzin, K., Bouzakis, K.-D., Denkena, B., Maier, H.J., Merklein, M. (Hrsg.) 12th International Conference THE "A" Coatings 2016, Hannover, 2016, 13–20.
- [70] Wied, J.: Oberflächenbehandlung von Umformwerkzeugen durch Festklopfen. Dissertation, Technische Universität Darmstadt, 2011.
- [71] Steitz, M., Stein, P., Groche, P.: Influence of Hammer-Peened Surface Textures on Friction Behavior. *Tribology Letters*, 58(24), 2015, 1–8.
- [72] Merklein, M., Andreas, K., Steiner, J.: Influence of tool surface on tribological conditions in conventional and dry sheet metal forming. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing - Green Technology*, 2(2), 2015, 131–137.
- [73] Merklein, M., Steiner, J.: Investigation of Influencing Parameters for Tribological Conditions in Dry Forming Processes. In: Zhang, S.-H. (Hrsg.) International Deep Drawing Research Group Conference IDDRG 2015, Shanghai, 2015, 534–541.
- [74] https://www.wvstahl.de/wp-content/uploads/D566_Zink_Magnesium_veredelte_Feinbleche.pdf (aufgerufen am 28.08.2022).

- [75] Ostermann, F.: Anwendungstechnologie Aluminium, Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2014, 3. neu bearb. Auflage.
- [76] VDA 239-200: Flacherzeugnisse aus Aluminium. Verband der Automobilindustrie e.V., Berlin, 2017.
- [77] VDA 239-100: Flacherzeugnisse aus Stahl zur Kaltumformung. Verband der Automobilindustrie e.V., Berlin, 2016.
- [78] DIN EN 10152:2017-06: Elektrolytisch verzinkte kaltgewalzte Flacherzeugnisse aus Stahl zum Kaltumformen – Technische Lieferbedingungen. Deutsches Institut für Normung e.V.: Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2017.
- [79] DIN EN 10346:2015: Kontinuierlich schmelztauchveredelte Flacherzeugnisse aus Stahl zum Kaltumformen - Technische Lieferbedingungen. Deutsches Institut für Normung e.V.: Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2015.
- [80] Jandel, A.-S., Meuthen, B.: Coil Coating - Bandbeschichtung: Verfahren, Produkte und Märkte, Wiesbaden: Springer, 2013, 3. überarb. u. akt. Auflage.
- [81] Shindo, H., Okada, T., Asai, K., Nishimura, K., Nishimura, N.: Developments and properties of Zn-Mg galvanized steel sheet 'DYMAZINC' having excellent corrosion resistance. Nippon Steel Technical Report(79), 1999, 63–67.
- [82] Rakotomahefa, M.: Fundamentals of lubricated friction in deep drawing of zinc coated sheet metal considering contacting surface morphology and chemistry. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie, 2020.
- [83] Emmens, W.C.: Tribology of flat contacts and its application in deep drawing. Dissertation, University of Twente, 1997.
- [84] Nunes, E., Oliveira, A.F. de, Sekeres, T., Wichern, C., Plaut, R.L.: Inter-Relationship among Skin Pass Reduction, 3D and 2D Roughness Parameters and the Stampability/Paintability of Cold Rolled Steel Sheets for the Automotive Industry: A Preliminary Analysis. Materials Science Forum, 783-786, 2014, 1039–1045.
- [85] Koll, T., Bretschneider, M., Klinkberg, T., Luther, F., Maas, B.: Optimierter Dressierprozess verbessert die Eigenschaften verzinkter Stahloberflächen - Optimizing the surface of galvanized sheet steel

- by an improved temper rolling process. *stahl und eisen*, 136(10), 2016, 53–57.
- [86] Staeves, J.: Beurteilung der Topografie von Blechen im Hinblick auf die Reibung bei der Umformung. Dissertation, Technische Universität Darmstadt, 1998.
 - [87] Gorbunov, A.V., Belov, V.K., Begletsov, D.O.: Texturing of rollers for the production of auto-industry sheet. *Steel in Translation*, 39(8), 2009, 696–699.
 - [88] Mössle, E.: Einfluss der Blechoberfläche beim Ziehen von Blechteilen aus Aluminiumlegierungen. Dissertation, Universität Stuttgart, 1983.
 - [89] Pfestorf, M.: Funktionale 3D-Oberflächenkenngrößen in der Umformtechnik. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 1997.
 - [90] DIN EN 10049:2014-03: Messung des arithmetischen Mittenrauwertes Ra und der Spitzenzahl R_{Pc} an metallischen Flacherzeugnissen. Deutsches Institut für Normung e.V.: Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2014.
 - [91] Sgarabotto, F., Ghiotti, A., Bruschi, S.: Effects of Surface Roughness on Frictional Behaviour of Solid Organic Lubricants for Sheet Metal Forming Processes. *Key Engineering Materials*, 549, 2013, 381–388.
 - [92] Möller, U.J., Boor, U.: *Schmierstoffe im Betrieb*, Düsseldorf: VDI-Verlag, 1987.
 - [93] Merklein, M., Schmidt, M., Tremmel, S., Wartzack, S., Andreas, K., Häfner, T., Zhao, R., Steiner, J.: Investigation of Tribological Systems for Dry Deep Drawing by Tailored Surfaces. *Dry Metal Forming Open Access Journal*, 1, 2015, 42–56.
 - [94] Tolazzi, M., Meiler, M., Merklein, M.: Tribological Investigations on Coated Steel Sheets Using the Dry Film Lubricant Drylube E1. *AMR*, 6-8, 2005, 565–572.
 - [95] Müllerschön, H.: Beeinflussung des Werkstoffflusses beim Ziehen nicht-axialsymmetrischer Blechformteile durch Variation der Platinbefettung. Dissertation, Universität Stuttgart, 1997.
 - [96] VDA 230-213: Prüfverfahren für die Produktklassen Prelube, Prelube 2, Hotmelt, Spot lubricant. Verband der Automobilindustrie e.V., 2018.

- [97] Filzek, J.: Friction Behaviour of new Lubricants for Sheet Metal Forming. In: Bartz, W.J. (Hrsg.) 15th International Colloquium Tribology, Stuttgart/Ostfildern, 2006, 1–4.
- [98] Meiler, M.: Großserientauglichkeit trockenschmierstoffbeschichteter Aluminiumbleche im Presswerk. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2005.
- [99] Meiler, M., Pfestorf, M., Geiger, M., Merklein, M.: The use of dry film lubricants in aluminum sheet metal forming. *Wear*, 255(7-12), 2003, 1455–1462.
- [100] Azushima, A.: Direct Observation of Contact Behavior to Interpret the Pressure Dependence of the Coefficient of Friction in Sheet Metal Forming. *CIRP Annals*, 44(1), 1995, 209–212.
- [101] Hu, Z.: Analyse des tribologischen Größeneffekts beim Blechumformen. Dissertation, Universität Bremen, 2009.
- [102] Merklein, M., Zöller, F., Sturm, V.: Experimental and Numerical Investigations on Frictional Behaviour under Consideration of Varying Tribological Conditions. *Advanced Materials Research*, 966-967, 2014, 270–278.
- [103] Merklein, M., Geiger, M., Kaupper, M.: Tribology and influence of tool coatings on frictional conditions within forming of advanced high strength steels. In: Bouzakis, K.-D., Bach, F.-W., Denkena, B., Geiger, M. (Hrsg.) 7th International Conference "THE" Coatings, Chalkidiki, Greece, 2008, 39–46.
- [104] Thamm, U.: Bewertung von Tiefziehprozessen durch Infrarot-Thermografie. Dissertation, Technische Universität Chemnitz, 1999.
- [105] Groche, P., Callies, T.: Tribology in Sheet Metal Forming with Regard to Challenges in Lightweight Construction. *Advanced Materials Research*, 6-8, 2005, 93–100.
- [106] Filzek, J., Ludwig, M., Groche, P.: Improved FEM Simulation of Sheet Metal Forming with Friction Modelling using Laboratory Tests. In: International Deep Drawing Research Group (Hrsg.) International Deep Drawing Research Group Conference 2011, 2011, 1–10.
- [107] Netsch, T.: Methode zur Ermittlung von Reibmodellen für die Blechumformung. Dissertation, Technische Universität Darmstadt, 1995.

- [108] DIN EN ISO 20482:2014-03: Metallische Werkstoffe – Bleche und Bänder – Tiefungsversuch nach Erichsen. Deutsches Institut für Normung e.V.: Beuth Verlag GmbH, 2014.
- [109] Wagner, S.: Tribologische Untersuchungen in der Blechumformung. In: Bullinger, H.-J., Heisel, U., Pritschow, G., Westkämper, E. (Hrsg.) FTK'97 Fertigungstechnisches Kolloquium, Stuttgart, 1997, 544–548.
- [110] Groche P., Möller N.: Verschleiß von Graugusswerkzeugen beim Tiefziehen von verzinkten höherfesten Blechen - Untersuchung der Einflüsse auf Art und Menge des Verschleißes von Graugusswerkzeugen. wt Werkstattstechnik online, 99(10), 2009, 740–746.
- [111] Bay, N., Olsson, D.D., Andreasen, J.L.: Lubricant test methods for sheet metal forming. Tribology International, 41(9-10), 2008, 844–853.
- [112] Schmid, H., Merklein, M.: Influence of a drawbead passage in deep drawing processes on surface values and the tribological system. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 967(012008), 2020.
- [113] Witthüser, K.-P.: Untersuchung von Prüfverfahren zur Beurteilung der Reibungsverhältnisse beim Tiefziehen. Dissertation, Leibnitz Universität Hannover, 1980.
- [114] Reihle, M.: Verhalten des Gleitreibungskoeffizienten von Tiefziehblechen bei hohen Flächenpressungen. Dissertation, Technische Hochschule Stuttgart, 1959.
- [115] Groche, P., Filzek, J.: Tribologie. In: Hoffmann, H., Spur, G., Neugebauer, R. (Hrsg.): Handbuch Umformen. München: Carl Hanser Fachbuchverlag, 2012, 2. vollst. neu bearb. Auflage, 77–91.
- [116] Schuler GmbH: Handbuch der Umformtechnik, Berlin, Heidelberg: Springer, 1996.
- [117] Wagner, M.: Lineare und nichtlineare FEM - Eine Einführung mit Anwendungen in der Umformsimulation mit LS-DYNA®, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2019, 2. Auflage.
- [118] Chen, J., Xu, D., Xia, G., Li, X., Chen, J., Zhang, J., Yan, W., Li, Y.: Geometric compensation for automotive stamping die design integrating structure deflection and blank thinning. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 66(9-12), 2013, 1449–1456.

- [119] Klamser, M.: Ziehen von Blechformteilen auf einfachwirkenden Pressen mit hydraulischer Zieheinrichtung im Pressentisch. Dissertation, Universität Stuttgart, 1994.
- [120] Grueebler, R., Hora, P.: Temperature dependent friction modeling for sheet metal forming. *International Journal of Material Forming*, 2(1), 2009, 251–254.
- [121] Hol, J.: Multi-scale friction modeling for sheet metal forming. Dissertation, University of Twente, 2013.
- [122] Maier, S., Wierer, M., Kautz, T., Volk, W.: Optische Einlaufwegmessung in Nachfolgewerkzeugen - Digital Shadow in automobilen Presswerken. *wt Werkstattstechnik online*, 106(10), 2016, 695–698.
- [123] Schuth, M., Buerakov, W.: Handbuch optische Messtechnik - Praktische Anwendungen für Entwicklung, Versuch, Fertigung und Qualitätssicherung, München: Carl Hanser, 2017.
- [124] Purr, S., Meinhardt, J., Lipp, A., Werner, A., Ostermair, M., Glück, B.: Stamping Plant 4.0 - Basics for the Application of Data Mining Methods in Manufacturing Car Body Parts. *Key Engineering Materials*, 639, 2015, 21–30.
- [125] Losch, A.: Drylubes for Sheet Metal Forming. In: Bartz, W.J. (Hrsg.) 14th International Colloquium Tribology, Ostfildern, 2004, 1803–1812.
- [126] Tran, D.C., Tardif, N., Limam, A.: Experimental and numerical modeling of flatness defects in strip cold rolling. *International Journal of Solids and Structures*, 69-70, 2015, 343–349.
- [127] Mohr, K.P., Bode R., Dechêne, W.: Unerfüllbare Wünsche - Gleichmäßige Ölverteilung in kaltgewalzten Coils derzeit nicht erfüllbar. *bbr Bänder Bleche Rohre*(41), 2000, 81–84.
- [128] Filzek, J., Schröder, H., Keil, D., Aha, B., Zimmermann, R.: Grundlagen für die Reibungsberücksichtigung in der Prozessauslegung und –regelung mit Prelube der zweiten Generation. In: Europäische Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung e.V (Hrsg.) 38. EFB-Kolloquiums Blechverarbeitung, Bad Boll, 2018, 147–166.
- [129] Lukasson-Herzig, A.M.: Optimierung der Stahlbandgeometrie im Hinblick auf den Bandsäbel in Warmbreitbandstrassen. Dissertation, Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, 2007.

- [130] Overhagen, C.: Walzmodelle Umformtechnik Profil Planheit Kalibrierung Flachprodukte Langprodukte. Dissertation, Universität Duisburg-Essen, 2018.
- [131] DIN EN 10143:2006-09: Kontinuierlich schmelztauchveredeltes Blech und Band aus Stahl - Grenzabmaße und Formtoleranzen. Deutsches Institut für Normung e.V.: Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2006.
- [132] DIN EN 485-4:2019-05: Aluminium und Aluminiumlegierungen - Bänder, Bleche und Platten - Teil 4: Grenzabmaße und Formtoleranzen für kaltgewalzte Erzeugnisse. Deutsches Institut für Normung e.V.: Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2019.
- [133] Held, C., Liewald, M., Sindel, M.: Untersuchungen zum Einfluss werkstofflicher Schwankungen innerhalb eines Coils auf die Umformbarkeit - Ergebnisse experimenteller Werkstoffcharakterisierungen an Blechwerkstoffen an unterschiedlichen Positionen im Coil und Auswirkungen auf den Umformprozess. wt Werkstattstechnik online, 99(10), 2009, 732–739.
- [134] Hoffmann, H., Zäh, M.F., Faass, I., Mork, R., Golle, M., Griesbach, B., Kerschner, M.: Automatic Process Control in Press Shops. Key Engineering Materials, 344, 2007, 881–888.
- [135] Wiebenga, J.H., Atzema, E.H., An, Y.G., Vegter, H., van den Boogaard, A.H.: Effect of material scatter on the plastic behavior and stretchability in sheet metal forming. Journal of Materials Processing Technology, 214(2), 2014, 238–252.
- [136] Sturm, V.: Einfluss von Chargenschwankungen auf die Verarbeitungsgrenzen von Stahlwerkstoffen. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2013.
- [137] DIN EN 10130:2007-02: Kaltgewalzte Flacherzeugnisse aus weichen Stählen zum Kaltumformen - Technische Lieferbedingungen. Deutsches Institut für Normung e.V.: Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2007.
- [138] Tatipala, S., Pilthammar, J., Sigvant, M., Wall, J., Johansson, C.M.: Introductory study of sheet metal forming simulations to evaluate process robustness. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 418(012111), 2018.
- [139] Keferstein, C.P., Marxer, M., Bach, C.: Fertigungsmesstechnik - Alles zu Messunsicherheit, konventioneller Messtechnik und Multisensorik, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2018, 9. überarb. und erw. Auflage.

- [140] <https://amepa.de/de/produkte/srm-rauigkeit/> (aufgerufen am 19.07.2020).
- [141] Moréas, G., van de Velde, F., Bilstein, W.: Advanced Sensor for On-line Topography in Continuous Annealing Lines. *Revue de Metallurgie*, 13 (5), 2006, 233–237.
- [142] <https://amepa.de/de/produkte/ofm-online-oelfilmmessung/> (aufgerufen am 10.07.2020).
- [143] Gribnau, F.B., Kruyt, H.R., Ornstein, L.S.: Über die Gültigkeit des Lambert-Beer'schen Gesetzes in hydrophoben Kolloiden. *Kolloid-Zeitschrift*, 75(3), 1936, 262–268.
- [144] Beer: Bestimmung der Absorption des rothen Lichts in farbigen Flüssigkeiten. *Annalen der Physik und Chemie*, 162(5), 1852, 78–88.
- [145] Irle, M., Aha, B., Zimmermann, R.: EMG - Online-Qualitätssicherung für den Abpressprozess: Festigkeit, Rauheit und Ölaufgabe in Kombination. In: Europäische Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung e.V (Hrsg.) 36. Kolloquiums Blechverarbeitung, Fellbach, 2016, 105–126.
- [146] <https://www.ndt.net/article/dgzfp2011/papers/miuc1.pdf> (aufgerufen am 19.07.2020Uhr).
- [147] https://www.emg.elexis.group/fileadmin/user_upload/emg/Prospekte/IMPOC_Prospekt_DE_Revo00_01-2018.pdf (aufgerufen am 29.08.2022).
- [148] https://ftp.lstc.com/anonymous/outgoing/jday/manuals/ls-dyna_971_manual_k_rev1.pdf (aufgerufen am 18.02.2022).
- [149] <https://www.dynamore.de/de/download/flyer/2020/firmenbroschüre> (aufgerufen am 18.02.2022).
- [150] Barlat, F., Lian, K.: Plastic behavior and stretchability of sheet metals. Part I: A yield function for orthotropic sheets under plane stress conditions. *International Journal of Plasticity*, 5(1), 1989, 51–66.
- [151] Annen, C., Gödel, V., Hora, P., Merklein, M., Oberpriller, B.: Einfluss von Chargenschwankungen in Abhängigkeit des Prozesszustandes - Numerische Analyse des Einflusses auf das Versagen von Blechbauteilen. *wt Werkstattstechnik online*, 100(5), 2010, 440–445.
- [152] Kronthaler, F.: Statistik angewandt mit Excel - Datenanalyse ist (k)eine Kunst, Berlin, Heidelberg: Springer, 2021, 2. Auflage.

- [153] Bär, W., Schnell, U.: Simulation des dynamischen Verhaltens einer Umwickelstation. In: Ameling, W. (Hrsg.) 5. Symposium Simulationstechnik, Aachen, 1988, 356–361.
- [154] Savari, M.Z.: Kaltwalzen von Band Vergleich des stationären und instationären Kaltwalzprozesses. Dissertation, Universität Duisburg-Essen, 2020.
- [155] https://www.emg.elexis.group/fileadmin/user_upload/emg/Prospekte/SORM3plus_Prospekt_DE_Revo0_07-2017.pdf (aufgerufen am 29.08.2022).
- [156] Pfeifer, T., Schmitt, R.: Fertigungsmesstechnik, München: Oldenbourg, 2010, 3., überarb. und erw. Auflage.
- [157] Zöller, F., Sturm, V., Merklein, M.: The Flattening Effect of Workpiece Surfaces and its Influence on the Tribological Conditions. In: Zhang, S.-H. (Hrsg.) International Deep Drawing Research Group Conference IDDRG 2015, Shanghai, 2015, 504–510.
- [158] Merklein, M., Johannes, M., Lechner, M., Kuppert, A.: A review on tailored blanks - Production, applications and evaluation. Journal of Materials Processing Technology, 214(2), 2014, 151–164.
- [159] <https://www.springerprofessional.de/metalle/produktion---produktionstechnik/china-bleibt-mit-abstand-groesster-stahlproduzent/25857816> (aufgerufen am 23.11.2023).

Verzeichnis promotionsbezogener, eigener Publikationen

- [P1] Hansen, B.; Purr, S.; Meinhardt, J.; Merklein, M.: Investigation of the tribological behavior of car body parts in series production. In: *Procedia Manufacturing* 27 (2019), S. 51–56.
- [P2] Hansen, B.; Hoebler, M.; Purr, S.; Meinhardt, J.; Merklein, M.: Basics for inline measurement of tribological conditions in series production of car body parts. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 651(12050) (2019)
- [P3] Hansen, B.; Wagner, P.; Purr, S.; Merklein, M.: Investigations of batch fluctuation regarding tribological conditions in series production of car body parts. In: *International Journal of Material Forming* 14 (2021), S. 871–884.

Verzeichnis promotionsbezogener, studentischer Arbeiten

- [S1] Höbler, M.: Experimentelle Untersuchungen zur Oberflächenrauheitsmessung von Feiblechen mittels eines optischen Inline-Rauheitsmesssystems, Regensburg, 2018.
- [S2] Wagner, P.: Experimentelle Untersuchung des Einflusses von Chargenschwankungen auf das Reibverhalten für die Herstellung von Karosseriebauteilen Regensburg, 2019.

Reihenübersicht

Koordination der Reihe (Stand 2025):

Geschäftsstelle Maschinenbau, Dr.-Ing. Oliver Kreis, www.mb.fau.de/diss/

Im Rahmen der Reihe sind bisher die nachfolgenden Bände erschienen.

Band 1 – 52

Fertigungstechnik – Erlangen

ISSN 1431-6226

Carl Hanser Verlag, München

Band 53 – 307

Fertigungstechnik – Erlangen

ISSN 1431-6226

Meisenbach Verlag, Bamberg

ab Band 308

FAU Studien aus dem Maschinenbau

ISSN 2625-9974

FAU University Press, Erlangen

Die Zugehörigkeit zu den jeweiligen Lehrstühlen ist wie folgt gekennzeichnet:

Lehrstühle:

FAPS	Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik
FMT	Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik
KTmflk	Lehrstuhl für Konstruktionstechnik
LFT	Lehrstuhl für Fertigungstechnologie
LGT	Lehrstuhl für Gießereitechnik
LPT	Lehrstuhl für Photonische Technologien
REP	Lehrstuhl für Ressourcen- und Energieeffiziente Produktionsmaschinen

Band 1: Andreas Hemberger

Innovationspotentiale in der rechnerintegrierten Produktion durch wissensbasierte Systeme
FAPS, 208 Seiten, 107 Bilder. 1988.
ISBN 3-446-15234-2.

Band 2: Detlef Classe

Beitrag zur Steigerung der Flexibilität automatisierter Montagesysteme durch Sensorintegration und erweiterte Steuerungskonzepte
FAPS, 194 Seiten, 70 Bilder. 1988.
ISBN 3-446-15529-5.

Band 3: Friedrich-Wilhelm Nolting

Projektiertung von Montagesystemen
FAPS, 201 Seiten, 107 Bilder, 1 Tab. 1989. ISBN 3-446-15541-4.

Band 4: Karsten Schlüter

Nutzungsgradsteigerung von Montagesystemen durch den Einsatz der Simulationstechnik
FAPS, 177 Seiten, 97 Bilder. 1989.
ISBN 3-446-15542-2.

Band 5: Shir-Kuan Lin

Aufbau von Modellen zur Lageregelung von Industrierobotern
FAPS, 168 Seiten, 46 Bilder. 1989.
ISBN 3-446-15546-5.

Band 6: Rudolf Nuss

Untersuchungen zur Bearbeitungsqualität im Fertigungssystem Laserstrahlschneiden
LFT, 206 Seiten, 115 Bilder, 6 Tab. 1989. ISBN 3-446-15783-2.

Band 7: Wolfgang Scholz

Modell zur datenbankgestützten Planung automatisierter Montageanlagen
FAPS, 194 Seiten, 89 Bilder. 1989.
ISBN 3-446-15825-1.

Band 8: Hans-Jürgen Wißmeier

Beitrag zur Beurteilung des Bruchverhaltens von Hartmetall-Fließpreßmatrizen
LFT, 179 Seiten, 99 Bilder, 9 Tab. 1989. ISBN 3-446-15921-5.

Band 9: Rainer Eisele

Konzeption und Wirtschaftlichkeit von Planungssystemen in der Produktion
FAPS, 183 Seiten, 86 Bilder. 1990.
ISBN 3-446-16107-4.

Band 10: Rolf Pfeiffer

Technologisch orientierte Montageplanung am Beispiel der Schraubtechnik
FAPS, 216 Seiten, 102 Bilder, 16 Tab. 1990. ISBN 3-446-16161-9.

Band 11: Herbert Fischer

Verteilte Planungssysteme zur Flexibilitätsteigerung der rechnerintegrierten Teilefertigung
FAPS, 201 Seiten, 82 Bilder. 1990.
ISBN 3-446-16105-8.

Band 12: Gerhard Kleineidam

CAD/CAP: Rechnergestützte Montagefeinplanung
FAPS, 203 Seiten, 107 Bilder. 1990.
ISBN 3-446-16112-0.

Band 13: Frank Vollertsen

Pulvermetallurgische Verarbeitung eines übereutektoiden verschleißfesten Stahls
LFT, XIII u. 217 Seiten, 67 Bilder, 34 Tab. 1990. ISBN 3-446-16133-3.

Band 14: Stephan Biermann

Untersuchungen zur Anlagen- und Prozeßdiagnostik für das Schneiden mit CO₂-Hochleistungslasern
LFT, VIII u. 170 Seiten, 93 Bilder, 4 Tab. 1991. ISBN 3-446-16269-0.

Band 15: Uwe Geißler

Material- und Datenfluß in einer flexiblen Blechbearbeitungszelle
LFT, 124 Seiten, 41 Bilder, 7 Tab. 1991. ISBN 3-446-16358-1.

Band 16: Frank Oswald Hake

Entwicklung eines rechnergestützten Diagnosesystems für automatisierte Montagezellen
FAPS, XIV u. 166 Seiten, 77 Bilder. 1991. ISBN 3-446-16428-6.

Band 17: Herbert Reichel

Optimierung der Werkzeugbereitstellung durch rechnergestützte Arbeitsfolgenbestimmung
FAPS, 198 Seiten, 73 Bilder, 2 Tab. 1991. ISBN 3-446-16453-7.

Band 18: Josef Scheller

Modellierung und Einsatz von Softwaresystemen für rechnergeführte Montagezellen
FAPS, 198 Seiten, 65 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-16454-5.

Band 19: Arnold vom Ende

Untersuchungen zum Biegeumformung mit elastischer Matrize
LFT, 166 Seiten, 55 Bilder, 13 Tab. 1991. ISBN 3-446-16493-6.

Band 20: Joachim Schmid

Beitrag zum automatisierten Bearbeiten von Keramikguß mit Industrierobotern
FAPS, XIV u. 176 Seiten, 111 Bilder, 6 Tab. 1991. ISBN 3-446-16560-6.

Band 21: Egon Sommer

Multiprozessorsteuerung für kooperierende Industrieroboter in Montagezellen
FAPS, 188 Seiten, 102 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-17062-6.

Band 22: Georg Geyer

Entwicklung problemspezifischer Verfahrensketten in der Montage
FAPS, 192 Seiten, 112 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-16552-5.

Band 23: Rainer Flohr

Beitrag zur optimalen Verbindungstechnik in der Oberflächenmontage (SMT)
FAPS, 186 Seiten, 79 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-16568-1.

Band 24: Alfons Rief

Untersuchungen zur Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden und -schweißen in der Rohkarosseriefertigung
LFT, VI u. 145 Seiten, 58 Bilder, 5 Tab. 1991. ISBN 3-446-16593-2.

Band 25: Christoph Thim

Rechnerunterstützte Optimierung von Materialflußstrukturen in der Elektronikmontage durch Simulation
FAPS, 188 Seiten, 74 Bilder. 1992.
ISBN 3-446-17118-5.

Band 26: Roland Müller

CO₂-Laserstrahlschneiden von kurzglasverstärkten Verbundwerkstoffen
LFT, 141 Seiten, 107 Bilder, 4 Tab. 1992. ISBN 3-446-17104-5.

Band 27: Günther Schäfer

Integrierte Informationsverarbeitung bei der Montageplanung
FAPS, 195 Seiten, 76 Bilder. 1992.
ISBN 3-446-17117-7.

Band 28: Martin Hoffmann

Entwicklung einer CAD/CAM-Prozesskette für die Herstellung von Blechbiegeteilen
LFT, 149 Seiten, 89 Bilder. 1992.
ISBN 3-446-17154-1.

Band 29: Peter Hoffmann

Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden und -schweißen: Prozeßführung und Systemtechnik in der 3D-Laserstrahlbearbeitung von Blechformteilen
LFT, 186 Seiten, 92 Bilder, 10 Tab. 1992. ISBN 3-446-17153-3.

Band 30: Olaf Schrödel

Flexible Werkstattsteuerung mit objektorientierten Softwarestrukturen
FAPS, 180 Seiten, 84 Bilder. 1992.
ISBN 3-446-17242-4.

Band 31: Hubert Reinisch

Planungs- und Steuerungswerkzeuge zur impliziten Geräteprogrammierung in Roboterzellen
FAPS, XI u. 212 Seiten, 112 Bilder. 1992. ISBN 3-446-17380-3.

Band 32: Brigitte Bärnreuther

Ein Beitrag zur Bewertung des Kommunikationsverhaltens von Automatisierungsgeräten in flexiblen Produktionszellen
FAPS, XI u. 179 Seiten, 71 Bilder. 1992. ISBN 3-446-17451-6.

Band 33: Joachim Hutfless

Laserstrahlregelung und Optikdiagnostik in der Strahlführung einer CO₂-Hochleistungslaseranlage
LFT, 175 Seiten, 70 Bilder, 17 Tab. 1993. ISBN 3-446-17532-6.

Band 34: Uwe Günzel

Entwicklung und Einsatz eines Simulationsverfahrens für operative und strategische Probleme der Produktionsplanung und -steuerung
FAPS, XIV u. 170 Seiten, 66 Bilder, 5 Tab. 1993. ISBN 3-446-17604-7.

Band 35: Bertram Ehmman

Operatives Fertigungscontrolling durch Optimierung auftragsbezogener Bearbeitungsabläufe in der Elektronikfertigung
FAPS, XV u. 167 Seiten, 114 Bilder. 1993. ISBN 3-446-17658-6.

Band 36: Harald Kolléra

Entwicklung eines benutzerorientierten Werkstattprogrammiersystems für das Laserstrahlschneiden
LFT, 129 Seiten, 66 Bilder, 1 Tab. 1993. ISBN 3-446-17719-1.

Band 37: Stephanie Abels

Modellierung und Optimierung von Montageanlagen in einem integrierten Simulationssystem
FAPS, 188 Seiten, 88 Bilder. 1993. ISBN 3-446-17731-0.

Band 38: Robert Schmidt-Hebbel

Laserstrahlbohren durchflußbestimmender Durchgangslöcher
LFT, 145 Seiten, 63 Bilder, 11 Tab. 1993. ISBN 3-446-17778-7.

Band 39: Norbert Lutz

Oberflächenfeinbearbeitung keramischer Werkstoffe mit XeCl-Excimerlaserstrahlung
LFT, 187 Seiten, 98 Bilder, 29 Tab. 1994. ISBN 3-446-17970-4.

Band 40: Konrad Grampp

Rechnerunterstützung bei Test und Schulung an Steuerungssoftware von SMD-Bestücklinien
FAPS, 178 Seiten, 88 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18173-3.

Band 41: Martin Koch

Wissensbasierte Unterstützung der Angebotsbearbeitung in der Investitionsgüterindustrie
FAPS, 169 Seiten, 68 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18174-1.

Band 42: Armin Gropp

Anlagen- und Prozeßdiagnostik beim Schneiden mit einem gepulsten Nd:YAG-Laser
LFT, 160 Seiten, 88 Bilder, 7 Tab. 1995. ISBN 3-446-18241-1.

Band 43: Werner Heckel

Optische 3D-Konturerfassung und on-line Biegewinkelmessung mit dem Lichtschnittverfahren
LFT, 149 Seiten, 43 Bilder, 11 Tab. 1995. ISBN 3-446-18243-8.

Band 44: Armin Rothhaupt

Modulares Planungssystem zur Optimierung der Elektronikfertigung
FAPS, 180 Seiten, 101 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18307-8.

Band 45: Bernd Zöllner

Adaptive Diagnose in der Elektronikproduktion
FAPS, 195 Seiten, 74 Bilder, 3 Tab. 1995. ISBN 3-446-18308-6.

Band 46: Bodo Vormann

Beitrag zur automatisierten Handhabungsplanung komplexer Blechbiegeteile
LFT, 126 Seiten, 89 Bilder, 3 Tab. 1995. ISBN 3-446-18345-0.

Band 47: Peter Schnepf

Zielkostenorientierte Montageplanung
FAPS, 144 Seiten, 75 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18397-3.

Band 48: Rainer Klotzbücher

Konzept zur rechnerintegrierten Materialversorgung in flexiblen Fertigungssystemen
FAPS, 156 Seiten, 62 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18412-0.

Band 49: Wolfgang Greska

Wissensbasierte Analyse und Klassifizierung von Blechteilen
LFT, 144 Seiten, 96 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18462-7.

Band 50: Jörg Franke

Integrierte Entwicklung neuer Produkt- und Produktionstechnologien für räumliche spritzgegossene Schaltungsträger (3-D MID)
FAPS, 196 Seiten, 86 Bilder, 4 Tab. 1995. ISBN 3-446-18448-1.

Band 51: Franz-Josef Zeller

Sensorplanung und schnelle Sensorregelung für Industrieroboter
FAPS, 190 Seiten, 102 Bilder, 9 Tab. 1995. ISBN 3-446-18601-8.

Band 52: Michael Solvie

Zeitbehandlung und Multimedia-Unterstützung in Feldkommunikationssystemen
FAPS, 200 Seiten, 87 Bilder, 35 Tab. 1996. ISBN 3-446-18607-7.

Band 53: Robert Hopperdietzel

Reengineering in der Elektro- und Elektronikindustrie
FAPS, 180 Seiten, 109 Bilder, 1 Tab. 1996. ISBN 3-87525-070-2.

Band 54: Thomas Rebhahn

Beitrag zur Mikromaterialbearbeitung mit Excimerlasern - Systemkomponenten und Verfahrensoptimierungen

LFT, 148 Seiten, 61 Bilder, 10 Tab.
1996. ISBN 3-87525-075-3.

Band 55: Henning Hanebuth

Laserstrahlhartlöten mit Zweistrahltechnik

LFT, 157 Seiten, 58 Bilder, 11 Tab.
1996. ISBN 3-87525-074-5.

Band 56: Uwe Schönherr

Steuerung und Sensordatenintegration für flexible Fertigungszellen mitkooperierenden Robotern

FAPS, 188 Seiten, 116 Bilder, 3 Tab.
1996. ISBN 3-87525-076-1.

Band 57: Stefan Holzer

Berührungslose Formgebung mit Laserstrahlung

LFT, 162 Seiten, 69 Bilder, 11 Tab.
1996. ISBN 3-87525-079-6.

Band 58: Markus Schultz

Fertigungsqualität beim 3D-Laserstrahlschweißen von Blechformteilen

LFT, 165 Seiten, 88 Bilder, 9 Tab.
1997. ISBN 3-87525-080-X.

Band 59: Thomas Krebs

Integration elektromechanischer CA-Anwendungen über einem STEP-Produktmodell

FAPS, 198 Seiten, 58 Bilder, 8 Tab.
1997. ISBN 3-87525-081-8.

Band 60: Jürgen Sturm

Prozeßintegrierte Qualitätssicherung in der Elektronikproduktion

FAPS, 167 Seiten, 112 Bilder, 5 Tab.
1997. ISBN 3-87525-082-6.

Band 61: Andreas Brand

Prozesse und Systeme zur Bestückung räumlicher elektronischer Baugruppen (3D-MID)

FAPS, 182 Seiten, 100 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-087-7.

Band 62: Michael Kauf

Regelung der Laserstrahlleistung und der Fokusparameter einer CO₂-Hochleistungslaseranlage

LFT, 140 Seiten, 70 Bilder, 5 Tab.
1997. ISBN 3-87525-083-4.

Band 63: Peter Steinwasser

Modulares Informationsmanagement in der integrierten Produkt- und Prozeßplanung

FAPS, 190 Seiten, 87 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-084-2.

Band 64: Georg Liedl

Integriertes Automatisierungskonzept für den flexiblen Materialfluß in der Elektronikproduktion

FAPS, 196 Seiten, 96 Bilder, 3 Tab.
1997. ISBN 3-87525-086-9.

Band 65: Andreas Otto

Transiente Prozesse beim Laserstrahlschweißen

LFT, 132 Seiten, 62 Bilder, 1 Tab.
1997. ISBN 3-87525-089-3.

Band 66: Wolfgang Blöchl

Erweiterte Informationsbereitstellung an offenen CNC-Steuerungen zur Prozeß- und Programmoptimierung

FAPS, 168 Seiten, 96 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-091-5.

Band 67: Klaus-Uwe Wolf

Verbesserte Prozeßführung und Prozeßplanung zur Leistungs- und Qualitätssteigerung beim Spulenvickeln

FAPS, 186 Seiten, 125 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-092-3.

Band 68: Frank Backes

Technologieorientierte Bahnplanung für die 3D-Laserstrahlbearbeitung

LFT, 138 Seiten, 71 Bilder, 2 Tab.
1997. ISBN 3-87525-093-1.

Band 69: Jürgen Kraus

Laserstrahlumformen von Profilen

LFT, 137 Seiten, 72 Bilder, 8 Tab.
1997. ISBN 3-87525-094-X.

Band 70: Norbert Neubauer

Adaptive Strahlführungen für CO₂-Lasieranlagen

LFT, 120 Seiten, 50 Bilder, 3 Tab.
1997. ISBN 3-87525-095-8.

Band 71: Michael Steber

Prozeßoptimierter Betrieb flexibler Schraubstationen in der automatisierten Montage

FAPS, 168 Seiten, 78 Bilder, 3 Tab.
1997. ISBN 3-87525-096-6.

Band 72: Markus Pfestorf

Funktionale 3D-Oberflächenkenngrößen in der Umformtechnik

LFT, 162 Seiten, 84 Bilder, 15 Tab.
1997. ISBN 3-87525-097-4.

Band 73: Volker Franke

Integrierte Planung und Konstruktion von Werkzeugen für die Biegebearbeitung

LFT, 143 Seiten, 81 Bilder. 1998.
ISBN 3-87525-098-2.

Band 74: Herbert Scheller

Automatisierte Demontagesysteme und recyclinggerechte Produktgestaltung elektronischer Baugruppen

FAPS, 184 Seiten, 104 Bilder, 17 Tab. 1998. ISBN 3-87525-099-0.

Band 75: Arthur Meßner

Kaltmassivumformung metallischer Kleinstteile - Werkstoffverhalten, Wirkflächenreibung, Prozeßauslegung

LFT, 164 Seiten, 92 Bilder, 14 Tab.
1998. ISBN 3-87525-100-8.

Band 76: Mathias Glasmacher

Prozeß- und Systemtechnik zum Laserstrahl-Mikroschweißen

LFT, 184 Seiten, 104 Bilder, 12 Tab.
1998. ISBN 3-87525-101-6.

Band 77: Michael Schwind

Zerstörungsfreie Ermittlung mechanischer Eigenschaften von Feinblechen mit dem Wirbelstromverfahren

LFT, 124 Seiten, 68 Bilder, 8 Tab.
1998. ISBN 3-87525-102-4.

Band 78: Manfred Gerhard

Qualitätssteigerung in der Elektronikproduktion durch Optimierung der Prozeßführung beim Löten komplexer Baugruppen

FAPS, 179 Seiten, 113 Bilder, 7 Tab.
1998. ISBN 3-87525-103-2.

Band 79: Elke Rauh

Methodische Einbindung der Simulation in die betrieblichen Planungs- und Entscheidungsabläufe

FAPS, 192 Seiten, 114 Bilder, 4 Tab.
1998. ISBN 3-87525-104-0.

Band 80: Sorin Niederkorn

Meßeinrichtung zur Untersuchung der Wirkflächenreibung bei umformtechnischen Prozessen
LFT, 99 Seiten, 46 Bilder, 6 Tab.
1998. ISBN 3-87525-105-9.

Band 81: Stefan Schuberth

Regelung der Fokuslage beim Schweißen mit CO₂-Hochleistungslasern unter Einsatz von adaptiven Optiken
LFT, 140 Seiten, 64 Bilder, 3 Tab.
1998. ISBN 3-87525-106-7.

Band 82: Armando Walter Colombo

Development and Implementation of Hierarchical Control Structures of Flexible Production Systems Using High Level Petri Nets
FAPS, 216 Seiten, 86 Bilder. 1998.
ISBN 3-87525-109-1.

Band 83: Otto Meedt

Effizienzsteigerung bei Demontage und Recycling durch flexible Demontagetechnologien und optimierte Produktgestaltung
FAPS, 186 Seiten, 103 Bilder. 1998.
ISBN 3-87525-108-3.

Band 84: Knuth Götz

Modelle und effiziente Modellbildung zur Qualitätssicherung in der Elektronikproduktion
FAPS, 212 Seiten, 129 Bilder, 24 Tab. 1998. ISBN 3-87525-112-1.

Band 85: Ralf Luchs

Einsatzmöglichkeiten leitender Klebstoffe zur zuverlässigen Kontaktierung elektronischer Bauelemente in der SMT
FAPS, 176 Seiten, 126 Bilder, 30 Tab. 1998. ISBN 3-87525-113-7.

Band 86: Frank Pöhlau

Entscheidungsgrundlagen zur Einführung räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3-D MID)
FAPS, 144 Seiten, 99 Bilder. 1999.
ISBN 3-87525-114-8.

Band 87: Roland T. A. Kals

Fundamentals on the miniaturization of sheet metal working processes
LFT, 128 Seiten, 58 Bilder, 11 Tab.
1999. ISBN 3-87525-115-6.

Band 88: Gerhard Luhn

Implizites Wissen und technisches Handeln am Beispiel der Elektronikproduktion
FAPS, 252 Seiten, 61 Bilder, 1 Tab.
1999. ISBN 3-87525-116-4.

Band 89: Axel Sprenger

Adaptives Streckbiegen von Aluminium-Strangpreßprofilen
LFT, 114 Seiten, 63 Bilder, 4 Tab.
1999. ISBN 3-87525-117-2.

Band 90: Hans-Jörg Pucher

Untersuchungen zur Prozeßfolge Umformen, Bestücken und Laserstrahllöten von Mikrokontakten
LFT, 158 Seiten, 69 Bilder, 9 Tab.
1999. ISBN 3-87525-119-9.

Band 91: Horst Arnet

Profilbiegen mit kinematischer Gestalterzeugung
LFT, 128 Seiten, 67 Bilder, 7 Tab.
1999. ISBN 3-87525-120-2.

Band 92: Doris Schubart

Prozeßmodellierung und Technologieentwicklung beim Abtragen mit CO₂-Laserstrahlung
LFT, 133 Seiten, 57 Bilder, 13 Tab.
1999. ISBN 3-87525-122-9.

Band 93: Adrianus L. P.

Coremans
Laserstrahlsintern von Metallpulver - Prozeßmodellierung, Systemtechnik, Eigenschaften laserstrahlgesinterter Metallkörper
LFT, 184 Seiten, 108 Bilder, 12 Tab.
1999. ISBN 3-87525-124-5.

Band 94: Hans-Martin Biehler

Optimierungskonzepte für Qualitätsdatenverarbeitung und Informationsbereitstellung in der Elektronikfertigung
FAPS, 194 Seiten, 105 Bilder. 1999.
ISBN 3-87525-126-1.

Band 95: Wolfgang Becker

Oberflächenausbildung und tribologische Eigenschaften excimerlaserstrahlbearbeiteter Hochleistungskeramiken
LFT, 175 Seiten, 71 Bilder, 3 Tab.
1999. ISBN 3-87525-127-X.

Band 96: Philipp Hein

Innenhochdruck-Umformen von Blechpaaren: Modellierung, Prozeßauslegung und Prozeßführung
LFT, 129 Seiten, 57 Bilder, 7 Tab.
1999. ISBN 3-87525-128-8.

Band 97: Gunter Beitinger

Herstellungs- und Prüfverfahren für thermoplastische Schaltungsträger
FAPS, 169 Seiten, 92 Bilder, 20 Tab.
1999. ISBN 3-87525-129-6.

Band 98: Jürgen Knoblach

Beitrag zur rechnerunterstützten verursachungsgerechten Angebotskalkulation von Blechteilen mit Hilfe wissensbasierter Methoden
LFT, 155 Seiten, 53 Bilder, 26 Tab.
1999. ISBN 3-87525-130-X.

Band 99: Frank Breitenbach

Bildverarbeitungssystem zur Erfassung der Anschlußgeometrie elektronischer SMT-Bauelemente
LFT, 147 Seiten, 92 Bilder, 12 Tab.
2000. ISBN 3-87525-131-8.

Band 100: Bernd Falk

Simulationsbasierte Lebensdauer vorhersage für Werkzeuge der Kaltmassivumformung
LFT, 134 Seiten, 44 Bilder, 15 Tab.
2000. ISBN 3-87525-136-9.

Band 101: Wolfgang Schlögl

Integriertes Simulationsdaten-Management für Maschinenentwicklung und Anlagenplanung
FAPS, 169 Seiten, 101 Bilder, 20 Tab. 2000. ISBN 3-87525-137-7.

Band 102: Christian Hinsel

Ermüdungsbruchversagen hartstoffbeschichteter Werkzeugstähle in der Kaltmassivumformung
LFT, 130 Seiten, 80 Bilder, 14 Tab.
2000. ISBN 3-87525-138-5.

Band 103: Stefan Bobbert

Simulationsgestützte Prozessauslegung für das Innenhochdruck-Umformen von Blechpaaren
LFT, 123 Seiten, 77 Bilder. 2000.
ISBN 3-87525-145-8.

Band 104: Harald Rottbauer

Modulares Planungswerkzeug zum Produktionsmanagement in der Elektronikproduktion
FAPS, 166 Seiten, 106 Bilder, 2001.
ISBN 3-87525-139-3.

Band 105: Thomas Hennige

Flexible Formgebung von Blechen durch Laserstrahlumformen
LFT, 119 Seiten, 50 Bilder, 2001.
ISBN 3-87525-140-7.

Band 106: Thomas Menzel

Wissensbasierte Methoden für die rechnergestützte Charakterisierung und Bewertung innovativer Fertigungsprozesse
LFT, 152 Seiten, 71 Bilder, 2001.
ISBN 3-87525-142-3.

Band 107: Thomas Stöckel

Kommunikationstechnische Integration der Prozeßebene in Produktionssysteme durch Middleware-Frameworks
FAPS, 147 Seiten, 65 Bilder, 5 Tab. 2001. ISBN 3-87525-143-1.

Band 108: Frank Pitter

Verfügbarkeitssteigerung von Werkzeugmaschinen durch Einsatz mechatronischer Sensorlösungen
FAPS, 158 Seiten, 131 Bilder, 8 Tab. 2001. ISBN 3-87525-144-X.

Band 109: Markus Korneli

Integration lokaler CAP-Systeme in einen globalen Fertigungsdatenverbund
FAPS, 121 Seiten, 53 Bilder, 11 Tab. 2001. ISBN 3-87525-146-6.

Band 110: Burkhard Müller

Laserstrahljustieren mit Excimer-Lasern - Prozeßparameter und Modelle zur Aktorkonstruktion
LFT, 128 Seiten, 36 Bilder, 9 Tab. 2001. ISBN 3-87525-159-8.

Band 111: Jürgen Göhringer

Integrierte Telediagnose via Internet zum effizienten Service von Produktionssystemen
FAPS, 178 Seiten, 98 Bilder, 5 Tab. 2001. ISBN 3-87525-147-4.

Band 112: Robert Feuerstein

Qualitäts- und kosteneffiziente Integration neuer Bauelementetechnologien in die Flachbaugruppenfertigung
FAPS, 161 Seiten, 99 Bilder, 10 Tab. 2001. ISBN 3-87525-151-2.

Band 113: Marcus Reichenberger

Eigenschaften und Einsatzmöglichkeiten alternativer Elektroniklote in der Oberflächenmontage (SMT)
FAPS, 165 Seiten, 97 Bilder, 18 Tab. 2001. ISBN 3-87525-152-0.

Band 114: Alexander Huber

Justieren vormontierter Systeme mit dem Nd:YAG-Laser unter Einsatz von Aktoren
LFT, 122 Seiten, 58 Bilder, 5 Tab. 2001. ISBN 3-87525-153-9.

Band 115: Sami Krimi

Analyse und Optimierung von Montagesystemen in der Elektronikproduktion
FAPS, 155 Seiten, 88 Bilder, 3 Tab. 2001. ISBN 3-87525-157-1.

Band 116: Marion Merklein

Laserstrahlumformen von Aluminiumwerkstoffen - Beeinflussung der Mikrostruktur und der mechanischen Eigenschaften
LFT, 122 Seiten, 65 Bilder, 15 Tab. 2001. ISBN 3-87525-156-3.

Band 117: Thomas Collisi

Ein informationslogistisches Architekturkonzept zur Akquisition simulationsrelevanter Daten
FAPS, 181 Seiten, 105 Bilder, 7 Tab. 2002. ISBN 3-87525-164-4.

Band 118: Markus Koch

Rationalisierung und ergonomische Optimierung im Innenausbau durch den Einsatz moderner Automatisierungstechnik
FAPS, 176 Seiten, 98 Bilder, 9 Tab. 2002. ISBN 3-87525-165-2.

Band 119: Michael Schmidt

Prozeßregelung für das Laserstrahl-Punktschweißen in der Elektronikproduktion
LFT, 152 Seiten, 71 Bilder, 3 Tab. 2002. ISBN 3-87525-166-0.

Band 120: Nicolas Tiesler

Grundlegende Untersuchungen zum Fließpressen metallischer Kleinstteile
LFT, 126 Seiten, 78 Bilder, 12 Tab. 2002. ISBN 3-87525-175-X.

Band 121: Lars Pursche

Methoden zur technologieorientierten Programmierung für die 3D-Lasermikrobearbeitung
LFT, 111 Seiten, 39 Bilder, 0 Tab. 2002. ISBN 3-87525-183-0.

Band 122: Jan-Oliver Brassel

Prozeßkontrolle beim Laserstrahl-Mikroschweißen
LFT, 148 Seiten, 72 Bilder, 12 Tab. 2002. ISBN 3-87525-181-4.

Band 123: Mark Geisel

Prozeßkontrolle und -steuerung beim Laserstrahlschweißen mit den Methoden der nichtlinearen Dynamik
LFT, 135 Seiten, 46 Bilder, 2 Tab. 2002. ISBN 3-87525-180-6.

Band 124: Gerd Eßer

Laserstrahlunterstützte Erzeugung metallischer Leiterstrukturen auf Thermoplastsubstraten für die MID-Technik
LFT, 148 Seiten, 60 Bilder, 6 Tab. 2002. ISBN 3-87525-171-7.

Band 125: Marc Fleckenstein

Qualität laserstrahl-gefügter Mikroverbindungen elektronischer Kontakte
LFT, 159 Seiten, 77 Bilder, 7 Tab. 2002. ISBN 3-87525-170-9.

Band 126: Stefan Kaufmann

Grundlegende Untersuchungen zum Nd:YAG- Laserstrahlfügen von Silizium für Komponenten der Optoelektronik
LFT, 159 Seiten, 100 Bilder, 6 Tab. 2002. ISBN 3-87525-172-5.

Band 127: Thomas Fröhlich

Simultanes Löten von Anschlußkontakten elektronischer Bauelemente mit Diodenlaserstrahlung
LFT, 143 Seiten, 75 Bilder, 6 Tab. 2002. ISBN 3-87525-186-5.

Band 128: Achim Hofmann

Erweiterung der Formgebungsgrenzen beim Umformen von Aluminiumwerkstoffen durch den Einsatz prozessangepasster Platinen

LFT, 113 Seiten, 58 Bilder, 4 Tab.
2002. ISBN 3-87525-182-2.

Band 129: Ingo Kriebitzsch

3 - D MID Technologie in der Automobilelektronik

FAPS, 129 Seiten, 102 Bilder, 10 Tab. 2002. ISBN 3-87525-169-5.

Band 130: Thomas Pohl

Fertigungsqualität und Umformbarkeit laserstrahlgeschweißter Formplatinen aus Aluminiumlegierungen

LFT, 133 Seiten, 93 Bilder, 12 Tab.
2002. ISBN 3-87525-173-3.

Band 131: Matthias Wenk

Entwicklung eines konfigurierbaren Steuerungssystems für die flexible Sensorführung von Industrierobotern

FAPS, 167 Seiten, 85 Bilder, 1 Tab.
2002. ISBN 3-87525-174-1.

Band 132: Matthias Negendanck
Neue Sensorik und Aktorik für Bearbeitungsköpfe zum Laserstrahlschweißen

LFT, 116 Seiten, 60 Bilder, 14 Tab.
2002. ISBN 3-87525-184-9.

Band 133: Oliver Kreis

Integrierte Fertigung - Verfahrensintegration durch Innenhochdruck-Umformen, Trennen und Laserstrahlschweißen in einem Werkzeug sowie ihre tele- und multimediale Präsentation

LFT, 167 Seiten, 90 Bilder, 43 Tab.
2002. ISBN 3-87525-176-8.

Band 134: Stefan Trautner

Technische Umsetzung produktbezogener Instrumente der Umweltpolitik bei Elektro- und Elektronikgeräten

FAPS, 179 Seiten, 92 Bilder, 11 Tab.
2002. ISBN 3-87525-177-6.

Band 135: Roland Meier

Strategien für einen produktorientierten Einsatz räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3-D MID)

FAPS, 155 Seiten, 88 Bilder, 14 Tab.
2002. ISBN 3-87525-178-4.

Band 136: Jürgen Wunderlich

Kostensimulation - Simulationsbasierte Wirtschaftlichkeitsregelung komplexer Produktionssysteme

FAPS, 202 Seiten, 119 Bilder, 17 Tab.
2002. ISBN 3-87525-179-2.

Band 137: Stefan Novotny

Innenhochdruck-Umformen von Blechen aus Aluminium- und Magnesiumlegierungen bei erhöhter Temperatur

LFT, 132 Seiten, 82 Bilder, 6 Tab.
2002. ISBN 3-87525-185-7.

Band 138: Andreas Licha

Flexible Montageautomatisierung zur Komplettmontage flächenhafter Produktstrukturen durch kooperierende Industrieroboter

FAPS, 158 Seiten, 87 Bilder, 8 Tab.
2003. ISBN 3-87525-189-X.

Band 139: Michael Eisenbarth

Beitrag zur Optimierung der Aufbau- und Verbindungstechnik für mechatronische Baugruppen

FAPS, 207 Seiten, 141 Bilder, 9 Tab.
2003. ISBN 3-87525-190-3.

Band 140: Frank Christoph

Durchgängige simulationsgestützte Planung von Fertigungseinrichtungen der Elektronikproduktion

FAPS, 187 Seiten, 107 Bilder, 9 Tab.
2003. ISBN 3-87525-191-1.

Band 141: Hinnerk Hagenah

Simulationsbasierte Bestimmung der zu erwartenden Maßhaltigkeit für das Blechbiegen

LFT, 131 Seiten, 36 Bilder, 26 Tab.
2003. ISBN 3-87525-192-X.

Band 142: Ralf Eckstein

Scherschneiden und Biegen metallischer Kleinstteile - Materialeinfluss und Materialverhalten

LFT, 148 Seiten, 71 Bilder, 19 Tab.
2003. ISBN 3-87525-193-8.

Band 143: Frank H. Meyer-Pittroff

Excimerlaserstrahlbiegen dünner metallischer Folien mit homogener Lichtlinie

LFT, 138 Seiten, 60 Bilder, 16 Tab.
2003. ISBN 3-87525-196-2.

Band 144: Andreas Kach

Rechnergestützte Anpassung von Laserstrahlschneidbahnen an Bauteilabweichungen

LFT, 139 Seiten, 69 Bilder, 11 Tab.
2004. ISBN 3-87525-197-0.

Band 145: Stefan Hierl

System- und Prozesstechnik für das simultane Lötten mit Diodenlaserstrahlung von elektronischen Bauelementen

LFT, 124 Seiten, 66 Bilder, 4 Tab.
2004. ISBN 3-87525-198-9.

Band 146: Thomas Neudecker

Tribologische Eigenschaften keramischer Blechumformwerkzeuge - Einfluss einer Oberflächenendbearbeitung mittels Excimerlaserstrahlung

LFT, 166 Seiten, 75 Bilder, 26 Tab.
2004. ISBN 3-87525-200-4.

Band 147: Ulrich Wenger

Prozessoptimierung in der Wickeltechnik durch innovative maschinenbauliche und regelungstechnische Ansätze

FAPS, 132 Seiten, 88 Bilder, 0 Tab.
2004. ISBN 3-87525-203-9.

Band 148: Stefan Slama

Effizienzsteigerung in der Montage durch marktorientierte Montagestrukturen und erweiterte Mitarbeiterkompetenz

FAPS, 188 Seiten, 125 Bilder, 0 Tab.
2004. ISBN 3-87525-204-7.

Band 149: Thomas Wurm

Laserstrahljustieren mittels Aktoren-Entwicklung von Konzepten und Methoden für die rechnerunterstützte Modellierung und Optimierung von komplexen Aktorsystemen in der Mikrotechnik

LFT, 122 Seiten, 51 Bilder, 9 Tab.
2004. ISBN 3-87525-206-3.

Band 150: Martino Celeghini
Wirkmedienbasierte Blechumformung: Grundlagenuntersuchungen zum Einfluss von Werkstoff und Bauteilgeometrie
LFT, 146 Seiten, 77 Bilder, 6 Tab.
2004. ISBN 3-87525-207-1.

Band 151: Ralph Hohenstein
Entwurf hochdynamischer Sensor- und Regelsysteme für die adaptive Laserbearbeitung
LFT, 282 Seiten, 63 Bilder, 16 Tab.
2004. ISBN 3-87525-210-1.

Band 152: Angelika Hutterer
Entwicklung prozessüberwachender Regelkreise für flexible Formgebungsprozesse
LFT, 149 Seiten, 57 Bilder, 2 Tab.
2005. ISBN 3-87525-212-8.

Band 153: Emil Egerer
Massivumformen metallischer Kleinstteile bei erhöhter Prozesstemperatur
LFT, 158 Seiten, 87 Bilder, 10 Tab.
2005. ISBN 3-87525-213-6.

Band 154: Rüdiger Holzmann
Strategien zur nachhaltigen Optimierung von Qualität und Zuverlässigkeit in der Fertigung hochintegrierter Flachbaugruppen
FAPS, 186 Seiten, 99 Bilder, 19 Tab.
2005. ISBN 3-87525-217-9.

Band 155: Marco Nock
Biegeumformen mit Elastomerwerkzeugen Modellierung, Prozessauslegung und Abgrenzung des Verfahrens am Beispiel des Rohrbiegens
LFT, 164 Seiten, 85 Bilder, 13 Tab.
2005. ISBN 3-87525-218-7.

Band 156: Frank Niebling
Qualifizierung einer Prozesskette zum Laserstrahlsintern metallischer Bauteile
LFT, 148 Seiten, 89 Bilder, 3 Tab.
2005. ISBN 3-87525-219-5.

Band 157: Markus Meiler
Großserientauglichkeit trocken-schmierstoffbeschichteter Aluminiumbleche im Presswerk Grundlegende Untersuchungen zur Tribologie, zum Umformverhalten und Bauteilversuche
LFT, 104 Seiten, 57 Bilder, 21 Tab.
2005. ISBN 3-87525-221-7.

Band 158: Agus Sutanto
Solution Approaches for Planning of Assembly Systems in Three-Dimensional Virtual Environments
FAPS, 169 Seiten, 98 Bilder, 3 Tab.
2005. ISBN 3-87525-220-9.

Band 159: Matthias Boiger
Hochleistungssysteme für die Fertigung elektronischer Baugruppen auf der Basis flexibler Schaltungs-träger
FAPS, 175 Seiten, 111 Bilder, 8 Tab.
2005. ISBN 3-87525-222-5.

Band 160: Matthias Pitz
Laserunterstütztes Biegen höchstfester Mehrphasenstähle
LFT, 120 Seiten, 73 Bilder, 11 Tab.
2005. ISBN 3-87525-223-3.

Band 161: Meik Vahl
Beitrag zur gezielten Beeinflussung des Werkstoffflusses beim Innenhochdruck-Umformen von Blechen
LFT, 165 Seiten, 94 Bilder, 15 Tab.
2005. ISBN 3-87525-224-1.

Band 162: Peter K. Kraus
Plattformstrategien - Realisierung einer varianz- und kostenoptimierten Wertschöpfung
FAPS, 181 Seiten, 95 Bilder, 0 Tab.
2005. ISBN 3-87525-226-8.

Band 163: Adrienn Cser
Laserstrahlschmelzabtrag - Prozessanalyse und -modellierung
LFT, 146 Seiten, 79 Bilder, 3 Tab.
2005. ISBN 3-87525-227-6.

Band 164: Markus C. Hahn
Grundlegende Untersuchungen zur Herstellung von Leichtbauverbundstrukturen mit Aluminiumschaumkern
LFT, 143 Seiten, 60 Bilder, 16 Tab.
2005. ISBN 3-87525-228-4.

Band 165: Gordana Michos
Mechatronische Ansätze zur Optimierung von Vorschubachsen
FAPS, 146 Seiten, 87 Bilder, 17 Tab.
2005. ISBN 3-87525-230-6.

Band 166: Markus Stark
Auslegung und Fertigung hochpräziser Faser-Kollimator-Arrays
LFT, 158 Seiten, 115 Bilder, 11 Tab.
2005. ISBN 3-87525-231-4.

Band 167: Yurong Zhou
Kollaboratives Engineering Management in der integrierten virtuellen Entwicklung der Anlagen für die Elektronikproduktion
FAPS, 156 Seiten, 84 Bilder, 6 Tab.
2005. ISBN 3-87525-232-2.

Band 168: Werner Enser
Neue Formen permanenter und lösbarer elektrischer Kontaktierungen für mechatronische Baugruppen
FAPS, 190 Seiten, 112 Bilder, 5 Tab.
2005. ISBN 3-87525-233-0.

Band 169: Katrin Melzer
Integrierte Produktpolitik bei elektrischen und elektronischen Geräten zur Optimierung des Product-Life-Cycle
FAPS, 155 Seiten, 91 Bilder, 17 Tab.
2005. ISBN 3-87525-234-9.

Band 170: Alexander Putz
Grundlegende Untersuchungen zur Erfassung der realen Vorspannung von armierten Kaltfließpresswerkzeugen mittels Ultraschall
LFT, 137 Seiten, 71 Bilder, 15 Tab.
2006. ISBN 3-87525-237-3.

Band 171: Martin Prechtel
Automatisiertes Schichtverfahren für metallische Folien - System- und Prozesstechnik
LFT, 154 Seiten, 45 Bilder, 7 Tab.
2006. ISBN 3-87525-238-1.

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

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

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

Band 175: Peter Wölflick

Innovative Substrate und Prozesse mit feinsten Strukturen für blei-freie Mechatronik-Anwendungen
FAPS, 177 Seiten, 148 Bilder, 24 Tab. 2006.

ISBN 978-3-87525-246-0.

Band 176: Attila Komlodi

Detection and Prevention of Hot Cracks during Laser Welding of Aluminium Alloys Using Advanced Simulation Methods

LFT, 155 Seiten, 89 Bilder, 14 Tab. 2006. ISBN 978-3-87525-248-4.

Band 177: Uwe Popp

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

Band 178: Veit Rückel

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

Band 179: Manfred Dirscherl

Nicht-thermische Mikrojustier-technik mittels ultrakurzer Laser-pulse
LFT, 154 Seiten, 69 Bilder, 10 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-251-4.

Band 180: Yong Zhuo

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

Band 181: Stefan Lang

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

Band 182: Hans-Joachim Krauß

Laserstrahlinduzierte Pyrolyse prä-keramischer Polymere
LFT, 171 Seiten, 100 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-258-3.

Band 183: Stefan Junker

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

Band 184: Rainer Kohlbauer

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

Band 185: Klaus Lamprecht

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

Band 186: Bernd Zolleiß

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

Band 187: Michael Kerausch

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

Band 188: Matthias Weber

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

Band 189: Thomas Frick

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

Band 190: Joachim Hecht

Werkstoffcharakterisierung und Prozessauslegung für die wirkmedienbasierte Doppelblech-Umformung von Magnesiumlegierungen
LFT, 107 Seiten, 91 Bilder, 2 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-270-5.

Band 191: Ralf Völkl

Stochastische Simulation zur Werkzeuglebensdaueroptimierung und Präzisionsfertigung in der Kaltmassivumformung
LFT, 178 Seiten, 75 Bilder, 12 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-272-9.

Band 192: Massimo Tolazzi

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

Band 193: Cornelia Hoff

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

Band 194: Christian Alvarez

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

Band 195: Andreas Kunze

Automatisierte Montage von makromechatronischen Modulen zur flexiblen Integration in hybride Pkw-Bordnetzsysteme
FAPS, 160 Seiten, 90 Bilder, 14 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-278-1.

Band 196: Wolfgang Hußnätter

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

Band 197: Thomas Bigl

Entwicklung, angepasste Herstellungsverfahren und erweiterte Qualitätssicherung von einsatzgerechten elektronischen Baugruppen

FAPS, 175 Seiten, 107 Bilder, 14 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-280-4.

Band 198: Stephan Roth

Grundlegende Untersuchungen zum Excimerlaserstrahl-Abtragen unter Flüssigkeitsfilmen

LFT, 113 Seiten, 47 Bilder, 14 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-281-1.

Band 199: Artur Giera

Prozesstechnische Untersuchungen zum Rührreißschweißen metallischer Werkstoffe

LFT, 179 Seiten, 104 Bilder, 36 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-282-8.

Band 200: Jürgen Lechler

Beschreibung und Modellierung des Werkstoffverhaltens von presshärtbaren Bor-Manganstählen

LFT, 154 Seiten, 75 Bilder, 12 Tab. 2009. ISBN 978-3-87525-286-6.

Band 201: Andreas Blankl

Untersuchungen zur Erhöhung der Prozessrobustheit bei der Innenhochdruck-Umformung von flächigen Halbzeugen mit vor- bzw. nachgeschalteten Laserstrahlfügeoperationen

LFT, 120 Seiten, 68 Bilder, 9 Tab. 2009. ISBN 978-3-87525-287-3.

Band 202: Andreas Schaller

Modellierung eines nachfrageorientierten Produktionskonzeptes für mobile Telekommunikationsgeräte

FAPS, 120 Seiten, 79 Bilder, 0 Tab. 2009. ISBN 978-3-87525-289-7.

Band 203: Claudius Schimpf

Optimierung von Zuverlässigkeitsuntersuchungen, Prüfabläufen und Nacharbeitsprozessen in der Elektronikproduktion

FAPS, 162 Seiten, 90 Bilder, 14 Tab. 2009. ISBN 978-3-87525-290-3.

Band 204: Simon Dietrich

Sensoriken zur Schwerpunktslagebestimmung der optischen Prozessmissionen beim Laserstrahl-tiefschweißen

LFT, 138 Seiten, 70 Bilder, 5 Tab. 2009. ISBN 978-3-87525-292-7.

Band 205: Wolfgang Wolf

Entwicklung eines agentenbasierten Steuerungssystems zur Materialflussorganisation im wandelbaren Produktionsumfeld

FAPS, 167 Seiten, 98 Bilder. 2009. ISBN 978-3-87525-293-4.

Band 206: Steffen Polster

Laserdurchstrahlschweißen transparenter Polymerbauteile

LFT, 160 Seiten, 92 Bilder, 13 Tab. 2009. ISBN 978-3-87525-294-1.

Band 207: Stephan Manuel Dörfler

Rührreißschweißen von walzplattiertem Halbzeug und Aluminiumblech zur Herstellung flächiger Aluminiumschaum-Sandwich-Verbundstrukturen

LFT, 190 Seiten, 98 Bilder, 5 Tab. 2009. ISBN 978-3-87525-295-8.

Band 208: Uwe Vogt

Seriennahe Auslegung von Aluminium Tailored Heat Treated Blanks

LFT, 151 Seiten, 68 Bilder, 26 Tab. 2009. ISBN 978-3-87525-296-5.

Band 209: Till Laumann

Qualitative und quantitative Bewertung der Crashtauglichkeit von höchstfesten Stählen

LFT, 117 Seiten, 69 Bilder, 7 Tab. 2009. ISBN 978-3-87525-299-6.

Band 210: Alexander Diehl

Größeneffekte bei Biegeprozessen-Entwicklung einer Methodik zur Identifikation und Quantifizierung

LFT, 180 Seiten, 92 Bilder, 12 Tab. 2010. ISBN 978-3-87525-302-3.

Band 211: Detlev Staud

Effiziente Prozesskettenauslegung für das Umformen lokal wärmebehandelter und geschweißter Aluminiumbleche

LFT, 164 Seiten, 72 Bilder, 12 Tab. 2010. ISBN 978-3-87525-303-0.

Band 212: Jens Ackermann

Prozesssicherung beim Laserdurchstrahlschweißen thermoplastischer Kunststoffe

LPT, 129 Seiten, 74 Bilder, 13 Tab. 2010. ISBN 978-3-87525-305-4.

Band 213: Stephan Weidel

Grundlegende Untersuchungen zum Kontaktzustand zwischen Werkstück und Werkzeug bei umformtechnischen Prozessen unter tribologischen Gesichtspunkten

LFT, 144 Seiten, 67 Bilder, 11 Tab. 2010. ISBN 978-3-87525-307-8.

Band 214: Stefan Geißdörfer

Entwicklung eines mesoskopischen Modells zur Abbildung von Größeneffekten in der Kaltmassivumformung mit Methoden der FE-Simulation

LFT, 133 Seiten, 83 Bilder, 11 Tab. 2010. ISBN 978-3-87525-308-5.

Band 215: Christian Matzner

Konzeption produktspezifischer Lösungen zur Robustheitssteigerung elektronischer Systeme gegen die Einwirkung von Betaung im Automobil

FAPS, 165 Seiten, 93 Bilder, 14 Tab. 2010. ISBN 978-3-87525-309-2.

Band 216: Florian Schüßler

Verbindungs- und Systemtechnik für thermisch hochbeanspruchte und miniaturisierte elektronische Baugruppen

FAPS, 184 Seiten, 93 Bilder, 18 Tab. 2010. ISBN 978-3-87525-310-8.

Band 217: Massimo Cojutti

Strategien zur Erweiterung der Prozessgrenzen bei der Innenhochdruck-Umformung von Rohren und Blechpaaren

LFT, 125 Seiten, 56 Bilder, 9 Tab. 2010. ISBN 978-3-87525-312-2.

Band 218: Raoul Plettke

Mehrkriterielle Optimierung komplexer Aktorsysteme für das Laserstrahljustieren

LFT, 152 Seiten, 25 Bilder, 3 Tab. 2010. ISBN 978-3-87525-315-3.

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

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

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

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

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

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

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

Band 226: Peter Sebastian Feuser
Ein Ansatz zur Herstellung von pressgehärteten Karosseriekomponenten mit maßgeschneiderten mechanischen Eigenschaften: Temperierte Umformwerkzeuge. Prozessfenster, Prozesssimulation und funktionale Untersuchung
LFT, 195 Seiten, 97 Bilder, 60 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-328-3.

Band 227: Murat Arbak
Material Adapted Design of Cold Forging Tools Exemplified by Powder Metallurgical Tool Steels and Ceramics
LFT, 109 Seiten, 56 Bilder, 8 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-330-6.

Band 228: Indra Pitz
Beschleunigte Simulation des Laserstrahlumformens von Aluminiumblechen
LPT, 137 Seiten, 45 Bilder, 27 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-333-7.

Band 229: Alexander Grimm
Prozessanalyse und -überwachung des Laserstrahlhartlötens mittels optischer Sensorik
LPT, 125 Seiten, 61 Bilder, 5 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-334-4.

Band 230: Markus Kaupper
Biegen von höhenfesten Stahlblechwerkstoffen - Umformverhalten und Grenzen der Biegebarkeit
LFT, 160 Seiten, 57 Bilder, 10 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-339-9.

Band 231: Thomas Kroiß
Modellbasierte Prozessauslegung für die Kaltmassivumformung unter Berücksichtigung der Werkzeug- und Pressenauffederung
LFT, 169 Seiten, 50 Bilder, 19 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-341-2.

Band 232: Christian Goth
Analyse und Optimierung der Entwicklung und Zuverlässigkeit räumlicher Schaltungsträger (3D-MID)
FAPS, 176 Seiten, 102 Bilder, 22 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-340-5.

Band 233: Christian Ziegler
Ganzheitliche Automatisierung mechatronischer Systeme in der Medizin am Beispiel Strahlentherapie
FAPS, 170 Seiten, 71 Bilder, 19 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-342-9.

Band 234: Florian Albert
Automatisiertes Laserstrahllöten und -reparaturlöten elektronischer Baugruppen
LPT, 127 Seiten, 78 Bilder, 11 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-344-3.

Band 235: Thomas Stöhr
Analyse und Beschreibung des mechanischen Werkstoffverhaltens von presshärtbaren Bor-Manganstählen
LFT, 118 Seiten, 74 Bilder, 18 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-346-7.

Band 236: Christian Kägeler
Prozessdynamik beim Laserstrahlschweißen verzinkter Stahlbleche im Überlappstoß
LPT, 145 Seiten, 80 Bilder, 3 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-347-4.

Band 237: Andreas Sulzberger
Seriennahe Auslegung der Prozesskette zur wärmeunterstützten Umformung von Aluminiumblechwerkstoffen
LFT, 153 Seiten, 87 Bilder, 17 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-349-8.

Band 238: Simon Opel
Herstellung prozessangepasster Halbzeuge mit variabler Blechdicke durch die Anwendung von Verfahren der Blechmassivumformung
LFT, 165 Seiten, 108 Bilder, 27 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-350-4.

Band 239: Rajesh Kanawade
In-vivo Monitoring of Epithelium Vessel and Capillary Density for the Application of Detection of Clinical Shock and Early Signs of Cancer Development
LPT, 124 Seiten, 58 Bilder, 15 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-351-1.

Band 240: Stephan Busse
Entwicklung und Qualifizierung eines Schneidclinchverfahrens
LFT, 119 Seiten, 86 Bilder, 20 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-352-8.

Band 241: Karl-Heinz Leitz

Mikro- und Nanostrukturierung mit kurz und ultrakurz gepulster Laserstrahlung
LPT, 154 Seiten, 71 Bilder, 9 Tab.
2013. ISBN 978-3-87525-355-9.

Band 242: Markus Michl

Webbasierte Ansätze zur ganzheitlichen technischen Diagnose
FAPS, 182 Seiten, 62 Bilder, 20 Tab.
2013. ISBN 978-3-87525-356-6.

Band 243: Vera Sturm

Einfluss von Chargenschwankungen auf die Verarbeitungsgrenzen von Stahlwerkstoffen
LFT, 113 Seiten, 58 Bilder, 9 Tab.
2013. ISBN 978-3-87525-357-3.

Band 244: Christian Neudel

Mikrostrukturelle und mechanisch-technologische Eigenschaften widerstandspunktgeschweißter Aluminium-Stahl-Verbindungen für den Fahrzeugbau
LFT, 178 Seiten, 171 Bilder, 31 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-358-0.

Band 245: Anja Neumann

Konzept zur Beherrschung der Prozessschwankungen im Presswerk
LFT, 162 Seiten, 68 Bilder, 15 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-360-3.

Band 246: Ulf-Hermann Quentin

Laserbasierte Nanostrukturierung mit optisch positionierten Mikrolinsen
LPT, 137 Seiten, 89 Bilder, 6 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-361-0.

Band 247: Erik Lamprecht

Der Einfluss der Fertigungsverfahren auf die Wirbelstromverluste von Stator-Einzelzahnblechpaketen für den Einsatz in Hybrid- und Elektrofahrzeugen
FAPS, 148 Seiten, 138 Bilder, 4 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-362-7.

Band 248: Sebastian Rösel

Wirkmedienbasierte Umformung von Blechhalbzeugen unter Anwendung magnetorheologischer Flüssigkeiten als kombiniertes Wirk- und Dichtmedium
LFT, 148 Seiten, 61 Bilder, 12 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-363-4.

Band 249: Paul Hippchen

Simulative Prognose der Geometrie indirekt pressgehärteter Karosseriebauteile für die industrielle Anwendung
LFT, 163 Seiten, 89 Bilder, 12 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-364-1.

Band 250: Martin Zubeil

Versagensprognose bei der Prozesssimulation von Biegeumform- und Falzverfahren
LFT, 171 Seiten, 90 Bilder, 5 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-365-8.

Band 251: Alexander Kühn

Flexible Automatisierung der Statorenmontage mit Hilfe einer universellen ambidexteren Kinematik
FAPS, 142 Seiten, 60 Bilder, 26 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-367-2.

Band 252: Thomas Albrecht

Optimierte Fertigungstechnologien für Rotoren getriebeintegrierter PM-Synchronmotoren von Hybridfahrzeugen
FAPS, 198 Seiten, 130 Bilder, 38 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-368-9.

Band 253: Florian Risch

Planning and Production Concepts for Contactless Power Transfer Systems for Electric Vehicles
FAPS, 185 Seiten, 125 Bilder, 13 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-369-6.

Band 254: Markus Weigl

Laserstrahlschweißen von Mischverbindungen aus austenitischen und ferritischen korrosionsbeständigen Stahlwerkstoffen
LPT, 184 Seiten, 110 Bilder, 6 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-370-2.

Band 255: Johannes Noneder

Beanspruchungserfassung für die Validierung von FE-Modellen zur Auslegung von Massivumformwerkzeugen
LFT, 161 Seiten, 65 Bilder, 14 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-371-9.

Band 256: Andreas Reinhardt

Ressourceneffiziente Prozess- und Produktionstechnologie für flexible Schaltungsträger
FAPS, 123 Seiten, 69 Bilder, 19 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-373-3.

Band 257: Tobias Schmuck

Ein Beitrag zur effizienten Gestaltung globaler Produktions- und Logistiknetzwerke mittels Simulation
FAPS, 151 Seiten, 74 Bilder.
2014. ISBN 978-3-87525-374-0.

Band 258: Bernd Eichenhüller

Untersuchungen der Effekte und Wechselwirkungen charakteristischer Einflussgrößen auf das Umformverhalten bei Mikroumformprozessen
LFT, 127 Seiten, 29 Bilder, 9 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-375-7.

Band 259: Felix Lütteke

Vielseitiges autonomes Transportsystem basierend auf Weltmodellerstellung mittels Datenfusion von Deckenkameras und Fahrzeugsensoren
FAPS, 152 Seiten, 54 Bilder, 20 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-376-4.

Band 260: Martin Grüner

Hochdruck-Blechumformung mit formlos festen Stoffen als Wirkmedium
LFT, 144 Seiten, 66 Bilder, 29 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-379-5.

Band 261: Christian Brock

Analyse und Regelung des Laserstrahltiefschweißprozesses durch Detektion der Metaldampffackelposition
LPT, 126 Seiten, 65 Bilder, 3 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-380-1.

Band 262: Peter Vatter

Sensitivitätsanalyse des 3-Rollen-Schubbiegens auf Basis der Finite Elemente Methode
LFT, 145 Seiten, 57 Bilder, 26 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-381-8.

Band 263: Florian Klämpfl

Planung von Laserbestrahlungen durch simulationsbasierte Optimierung
LPT, 169 Seiten, 78 Bilder, 32 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-384-9.

Band 264: Matthias Domke

Transiente physikalische Mechanismen bei der Laserablation von dünnen Metallschichten
LPT, 133 Seiten, 43 Bilder, 3 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-385-6.

Band 265: Johannes Götz

Community-basierte Optimierung des Anlagenengineerings
FAPS, 177 Seiten, 80 Bilder, 30 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-386-3.

Band 266: Hung Nguyen

Qualifizierung des Potentials von Verfestigungseffekten zur Erweiterung des Umformvermögens aus-härtbarer Aluminiumlegierungen
LFT, 137 Seiten, 57 Bilder, 16 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-387-0.

Band 267: Andreas Kuppert

Erweiterung und Verbesserung von Versuchs- und Auswertetechniken für die Bestimmung von Grenzformänderungskurven
LFT, 138 Seiten, 82 Bilder, 2 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-388-7.

Band 268: Kathleen Klaus

Erstellung eines Werkstofforientierten Fertigungsprozessfensters zur Steigerung des Formgebungsvermögens von Aluminiumlegierungen unter Anwendung einer zwischengeschalteten Wärmebehandlung
LFT, 154 Seiten, 70 Bilder, 8 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-391-7.

Band 269: Thomas Svec

Untersuchungen zur Herstellung von funktionsoptimierten Bauteilen im partiellen Presshärtprozess mittels lokal unterschiedlich temperierter Werkzeuge
LFT, 166 Seiten, 87 Bilder, 15 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-392-4.

Band 270: Tobias Schrader

Grundlegende Untersuchungen zur Verschleißcharakterisierung beschichteter Kaltmassivumformwerkzeuge
LFT, 164 Seiten, 55 Bilder, 11 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-393-1.

Band 271: Matthäus Brela

Untersuchung von Magnetfeld-Messmethoden zur ganzheitlichen Wertschöpfungsoptimierung und Fehlerdetektion an magnetischen Aktoren
FAPS, 170 Seiten, 97 Bilder, 4 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-394-8.

Band 272: Michael Wieland

Entwicklung einer Methode zur Prognose adhäsiven Verschleißes an Werkzeugen für das direkte Presshärten
LFT, 156 Seiten, 84 Bilder, 9 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-395-5.

Band 273: René Schramm

Strukturierte additive Metallisierung durch kaltaktives Atmosphärendruckplasma
FAPS, 136 Seiten, 62 Bilder, 15 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-396-2.

Band 274: Michael Lechner

Herstellung beanspruchungsangepasster Aluminiumblechhalbzeuge durch eine maßgeschneiderte Variation der Abkühlgeschwindigkeit nach Lösungsglühen
LFT, 136 Seiten, 62 Bilder, 15 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-397-9.

Band 275: Kolja Andreas

Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit auf das Werkzeugeinsatzverhalten beim Kaltfließpressen
LFT, 169 Seiten, 76 Bilder, 4 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-398-6.

Band 276: Marcus Baum

Laser Consolidation of ITO Nanoparticles for the Generation of Thin Conductive Layers on Transparent Substrates
LPT, 158 Seiten, 75 Bilder, 3 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-399-3.

Band 277: Thomas Schneider

Umformtechnische Herstellung dünnwandiger Funktionsbauteile aus Feinblech durch Verfahren der Blechmassivumformung
LFT, 188 Seiten, 95 Bilder, 7 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-401-3.

Band 278: Jochen Merhof

Sematische Modellierung automatisierter Produktionssysteme zur Verbesserung der IT-Integration zwischen Anlagen-Engineering und Steuerungsebene
FAPS, 157 Seiten, 88 Bilder, 8 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-402-0.

Band 279: Fabian Zöller

Erarbeitung von Grundlagen zur Abbildung des tribologischen Systems in der Umformsimulation
LFT, 126 Seiten, 51 Bilder, 3 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-403-7.

Band 280: Christian Hezler

Einsatz technologischer Versuche zur Erweiterung der Versagensvorhersage bei Karosseriebauteilen aus höchstfesten Stählen
LFT, 147 Seiten, 63 Bilder, 44 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-404-4.

Band 281: Jochen Bönig

Integration des Systemverhaltens von Automobil-Hochvoltleitungen in die virtuelle Absicherung durch strukturmechanische Simulation
FAPS, 177 Seiten, 107 Bilder, 17 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-405-1.

Band 282: Johannes Kohl

Automatisierte Datenerfassung für diskret ereignisorientierte Simulationen in der energieflexiblen Fabrik
FAPS, 160 Seiten, 80 Bilder, 27 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-406-8.

Band 283: Peter Bechtold

Mikroschockwellenumformung mittels ultrakurzer Laserpulse
LPT, 155 Seiten, 59 Bilder, 10 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-407-5.

Band 284: Stefan Berger

Laserstrahlschweißen thermoplastischer Kohlenstofffaserverbundwerkstoffe mit spezifischem Zusatzdraht
LPT, 118 Seiten, 68 Bilder, 9 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-408-2.

Band 285: Martin Bornschlegl

Methods-Energy Measurement - Eine Methode zur Energieplanung für Fügeverfahren im Karosseriebau
FAPS, 136 Seiten, 72 Bilder, 46 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-409-9.

Band 286: Tobias Rackow

Erweiterung des Unternehmenscontrollings um die Dimension Energie
FAPS, 164 Seiten, 82 Bilder, 29 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-410-5.

Band 287: Johannes Koch

Grundlegende Untersuchungen zur Herstellung zyklisch-symmetrischer Bauteile mit Nebenformelementen durch Blechmassivumformung
LFT, 125 Seiten, 49 Bilder, 17 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-411-2.

**Band 288: Hans Ulrich
Vierzigmann**

Beitrag zur Untersuchung der tribologischen Bedingungen in der Blechmassivumformung - Bereitstellung von tribologischen Modellversuchen und Realisierung von Tailored Surfaces
LFT, 174 Seiten, 102 Bilder, 34 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-412-9.

Band 289: Thomas Senner
Methodik zur virtuellen Absicherung der formgebenden Operation des Nasspressprozesses von Gelege-Mehrschichtverbunden
LFT, 156 Seiten, 96 Bilder, 21 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-414-3.

Band 290: Sven Kreitlein
Der grundoperationsspezifische Mindestenergiebedarf als Referenzwert zur Bewertung der Energieeffizienz in der Produktion
FAPS, 185 Seiten, 64 Bilder, 30 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-415-0.

Band 291: Christian Roos
Remote-Laserstrahlschweißen verzinkter Stahlbleche in Kehlnahtgeometrie
LPT, 123 Seiten, 52 Bilder, 0 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-416-7.

Band 292: Alexander Kahrmanidis
Thermisch unterstützte Umformung von Aluminiumblechen
LFT, 165 Seiten, 103 Bilder, 18 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-417-4.

Band 293: Jan Tremel
Flexible Systems for Permanent Magnet Assembly and Magnetic Rotor Measurement / Flexible Systeme zur Montage von Permanentmagneten und zur Messung magnetischer Rotoren
FAPS, 152 Seiten, 91 Bilder, 12 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-419-8.

Band 294: Ioannis Tsoupis
Schädigungs- und Versagensverhalten hochfester Leichtbauwerkstoffe unter Biegebeanspruchung
LFT, 176 Seiten, 51 Bilder, 6 Tab.
2017. ISBN 978-3-87525-420-4.

Band 295: Sven Hildering
Grundlegende Untersuchungen zum Prozessverhalten von Silizium als Werkzeugwerkstoff für das Mikroscherschneiden metallischer Folien
LFT, 177 Seiten, 74 Bilder, 17 Tab.
2017. ISBN 978-3-87525-422-8.

Band 296: Sasia Mareike Hertweck
Zeitliche Pulsformung in der Lasermikromaterialbearbeitung - Grundlegende Untersuchungen und Anwendungen
LPT, 146 Seiten, 67 Bilder, 5 Tab.
2017. ISBN 978-3-87525-423-5.

Band 297: Paryanto
Mechatronic Simulation Approach for the Process Planning of Energy-Efficient Handling Systems
FAPS, 162 Seiten, 86 Bilder, 13 Tab.
2017. ISBN 978-3-87525-424-2.

Band 298: Peer Stenzel
Großserientaugliche Nadelwickeltechnik für verteilte Wicklungen im Anwendungsfall der E-Traktionsantriebe
FAPS, 239 Seiten, 147 Bilder, 20 Tab.
2017. ISBN 978-3-87525-425-9.

Band 299: Mario Lušić
Ein Vorgehensmodell zur Erstellung montageführender Werkerinformationssysteme simultan zum Produktentstehungsprozess
FAPS, 174 Seiten, 79 Bilder, 22 Tab.
2017. ISBN 978-3-87525-426-6.

Band 300: Arnd Buschhaus
Hochpräzise adaptive Steuerung und Regelung robotergeführter Prozesse
FAPS, 202 Seiten, 96 Bilder, 4 Tab.
2017. ISBN 978-3-87525-427-3.

Band 301: Tobias Laumer
Erzeugung von thermoplastischen Werkstoffverbunden mittels simultanem, selektivem Laserstrahlschmelzen
LPT, 140 Seiten, 82 Bilder, 0 Tab.
2017. ISBN 978-3-87525-428-0.

Band 302: Nora Unger
Untersuchung einer thermisch unterstützten Fertigungskette zur Herstellung umgeformter Bauteile aus der höherfesten Aluminiumlegierung EN AW-7020
LFT, 142 Seiten, 53 Bilder, 8 Tab.
2017. ISBN 978-3-87525-429-7.

Band 303: Tommaso Stellin
Design of Manufacturing Processes for the Cold Bulk Forming of Small Metal Components from Metal Strip
LFT, 146 Seiten, 67 Bilder, 7 Tab.
2017. ISBN 978-3-87525-430-3.

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

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

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

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

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

Band 309: Martin Müller

Untersuchung des kombinierten Trenn- und Umformprozesses beim Fügen artungleicher Werkstoffe mittels Schneidlinchverfahren

LFT, xi u. 149 Seiten, 89 Bilder, 6 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-135-5.

Band 310: Christopher Kästle
Qualifizierung der Kupfer-Drahtbondtechnologie für integrierte Leistungsmodule in harschen Umgebungsbedingungen

FAPS, xii u. 167 Seiten, 70 Bilder, 18 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-145-4.

Band 311: Daniel Vipavc

Eine Simulationsmethode für das 3-Rollen-Schubbiegen

LFT, xiii u. 121 Seiten, 56 Bilder, 17 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-147-8.

Band 312: Christina Ramer

Arbeitsraumüberwachung und autonome Bahnplanung für ein sicheres und flexibles Roboter-Assistenzsystem in der Fertigung

FAPS, xiv u. 188 Seiten, 57 Bilder, 9 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-153-9.

Band 313: Miriam Rauer

Der Einfluss von Poren auf die Zuverlässigkeit der Lötverbindungen von Hochleistungs-Leuchtdioden

FAPS, xii u. 209 Seiten, 108 Bilder, 21 Tab. 2018.

ISBN 978-3-96147-157-7.

Band 314: Felix Tenner

Kamerabasierte Untersuchungen der Schmelze und Gasströmungen beim Laserstrahlschweißen verzinkter Stahlbleche

LPT, xxiii u. 184 Seiten, 94 Bilder, 7 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-160-7.

Band 315: Aarief Syed-Khaja

Diffusion Soldering for High-temperature Packaging of Power Electronics

FAPS, x u. 202 Seiten, 144 Bilder, 32 Tab. 2018. ISBN 978-3-87525-162-1.

Band 316: Adam Schaub

Grundlagenwissenschaftliche Untersuchung der kombinierten Prozesskette aus Umformen und Additive Fertigung

LFT, xi u. 192 Seiten, 72 Bilder, 27 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-166-9.

Band 317: Daniel Gröbel

Herstellung von Nebenformelementen unterschiedlicher Geometrie an Blechen mittels Fließpressverfahren der Blechmassivumformung

LFT, x u. 165 Seiten, 96 Bilder, 13 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-168-3.

Band 318: Philipp Hildenbrand

Entwicklung einer Methodik zur Herstellung von Tailored Blanks mit definierten Halbzeugeigenschaften durch einen Taumelprozess

LFT, ix u. 153 Seiten, 77 Bilder, 4 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-174-4.

Band 319: Tobias Konrad

Simulative Auslegung der Spann- und Fixierkonzepte im Karosserie-rohbau: Bewertung der Baugruppenmaßhaltigkeit unter Berücksichtigung schwankender Einflussgrößen

LFT, x u. 203 Seiten, 134 Bilder, 32 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-176-8.

Band 320: David Meinel

Architektur applikationsspezifischer Multi-Physics-Simulationskonfiguratoren am Beispiel modularer Triebzüge

FAPS, xii u. 166 Seiten, 82 Bilder, 25 Tab. 2019.
ISBN 978-3-96147-184-3.

Band 321: Andrea Zimmermann

Grundlegende Untersuchungen zum Einfluss fertigungsbedingter Eigenschaften auf die Ermüdungsfestigkeit kaltmassivumgeformter Bauteile

LFT, ix u. 160 Seiten, 66 Bilder, 5 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-190-4.

Band 322: Christoph Amann

Simulative Prognose der Geometrie nassgepresster Karosseriebauteile aus Gelege-Mehrschichtverbunden

LFT, xvi u. 169 Seiten, 80 Bilder, 13 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-194-2.

Band 323: Jennifer Tenner

Realisierung schmierstofffreier Tiefziehprozesse durch maßgeschneiderte Werkzeugoberflächen

LFT, x u. 187 Seiten, 68 Bilder, 13 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-196-6.

Band 324: Susan Zöller

Mapping Individual Subjective Values to Product Design KTMfK, xi u. 223 Seiten, 81 Bilder, 25 Tab. 2019.

ISBN 978-3-96147-202-4.

Band 325: Stefan Lutz

Erarbeitung einer Methodik zur semiempirischen Ermittlung der Umwandlungskinetik durchhärtender Wälzlagerstähle für die Wärmebehandlungssimulation

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

Band 326: Tobias Gnibl

Modellbasierte Prozesskettenabbildung rührreibgeschweißter Aluminiumhalbzeuge zur umformtechnischen Herstellung höchstfester Leichtbau-strukturteile

LFT, xii u. 167 Seiten, 68 Bilder, 17 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-217-8.

Band 327: Johannes Bürner

Technisch-wirtschaftliche Optionen zur Lastflexibilisierung durch intelligente elektrische Wärmespeicher

FAPS, xiv u. 233 Seiten, 89 Bilder, 27 Tab. 2019.
ISBN 978-3-96147-219-2.

Band 328: Wolfgang Böhm

Verbesserung des Umformverhaltens von mehrlagigen Aluminiumblechwerkstoffen mit ultrafeinkörnigem Gefüge

LFT, ix u. 160 Seiten, 88 Bilder, 14 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-227-7.

Band 329: Stefan Landkammer

Grundsatzuntersuchungen, mathematische Modellierung und Ableitung einer Auslegungsmethodik für Gelenkantriebe nach dem Spinnenprinzip

LFT, xii u. 200 Seiten, 83 Bilder, 13 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-229-1.

Band 330: Stephan Rapp

Pump-Probe-Ellipsometrie zur Messung transienter optischer Materialeigenschaften bei der Ultrakurzpuls-Lasermaterialbearbeitung

LPT, xi u. 143 Seiten, 49 Bilder, 2 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-235-2.

Band 331: Michael Scholz

Intralogistics Execution System mit integrierten autonomen, servicebasierten Transportentitäten
FAPS, xi u. 195 Seiten, 55 Bilder, 11 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-237-6.

Band 332: Eva Bogner

Strategien der Produktindividualisierung in der produzierenden Industrie im Kontext der Digitalisierung
FAPS, ix u. 201 Seiten, 55 Bilder, 28 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-246-8.

Band 333: Daniel Benjamin Krüger

Ein Ansatz zur CAD-integrierten muskuloskelettalen Analyse der Mensch-Maschine-Interaktion
KTmfk, x u. 217 Seiten, 102 Bilder, 7 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-250-5.

Band 334: Thomas Kuhn

Qualität und Zuverlässigkeit laserdirektstrukturierter mechatronisch integrierter Baugruppen (LDS-MID)
FAPS, ix u. 152 Seiten, 69 Bilder, 12 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-252-9.

Band 335: Hans Fleischmann

Modellbasierte Zustands- und Prozessüberwachung auf Basis sozio-cyber-physischer Systeme
FAPS, xi u. 214 Seiten, 111 Bilder, 18 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-256-7.

Band 336: Markus Michalski

Grundlegende Untersuchungen zum Prozess- und Werkstoffverhalten bei schwingungsüberlagerter Umformung
LFT, xii u. 197 Seiten, 93 Bilder, 11 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-270-3.

Band 337: Markus Brandmeier

Ganzheitliches ontologiebasiertes Wissensmanagement im Umfeld der industriellen Produktion
FAPS, xi u. 255 Seiten, 77 Bilder, 33 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-275-8.

Band 338: Stephan Purr

Datenerfassung für die Anwendung lernender Algorithmen bei der Herstellung von Blechformteilen
LFT, ix u. 165 Seiten, 48 Bilder, 4 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-281-9.

Band 339: Christoph Kiener

Kaltfließpressen von gerad- und schrägverzahnten Zahnrädern
LFT, viii u. 151 Seiten, 81 Bilder, 3 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-287-1.

Band 340: Simon Spreng

Numerische, analytische und empirische Modellierung des Heißcrimprozesses
FAPS, xix u. 204 Seiten, 91 Bilder, 27 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-293-2.

Band 341: Patrik

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

Band 342: Emanuela Affronti

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

Band 343: Julia Degner

Grundlegende Untersuchungen zur Herstellung hochfester Aluminiumblechbauteile in einem kombinierten Umform- und Abschreckprozess
LFT, x u. 172 Seiten, 61 Bilder, 9 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-307-6.

Band 344: Maximilian Wagner

Automatische Bahnplanung für die Aufteilung von Prozessbewegungen in synchrone Werkstück- und Werkzeugbewegungen mittels Multi-Roboter-Systemen
FAPS, xxi u. 181 Seiten, 111 Bilder, 15 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-309-0.

Band 345: Stefan Härter

Qualifizierung des Montageprozesses hochminiaturisierter elektronischer Bauelemente
FAPS, ix u. 194 Seiten, 97 Bilder, 28 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-314-4.

Band 346: Toni Donhauser

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

Band 347: Philipp Amend

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

Band 348: Matthias Ehlert

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

Band 349: Thomas Sander

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

Band 350: Florian Pilz

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

Band 351: Sebastian Josef Katona

Evaluation und Aufbereitung von Produktsimulationen mittels abweichungsbehafteter Geometrie-modelle
KTmfk, ix u. 147 Seiten, 73 Bilder, 11 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-336-6.

Band 352: Jürgen Herrmann

Kumulatives Walzplattieren. Bewertung der Umformeigenschaften mehrlageriger Blechwerkstoffe der ausschheidungshärtbaren Legierung AA6014
LFT, x u. 157 Seiten, 64 Bilder, 5 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-344-1.

Band 353: Christof Küstner

Assistenzsystem zur Unterstützung der datengetriebenen Produktentwicklung
KTmfk, xii u. 219 Seiten, 63 Bilder, 14 Tab. 2020.

ISBN 978-3-96147-348-9.

Band 354: Tobias Gläsel

Prozessketten zum Laserstrahlschweißen von flachleiterbasierten Formspulenwicklungen für automobiler Traktionsantriebe
FAPS, xiv u. 206 Seiten, 89 Bilder, 11 Tab. 2020.

ISBN 978-3-96147-356-4.

Band 355: Andreas Meinel

Experimentelle Untersuchung der Auswirkungen von Axialschwingungen auf Reibung und Verschleiß in Zylinderrollenlagern
KTmfk, xii u. 162 Seiten, 56 Bilder, 7 Tab. 2020.

ISBN 978-3-96147-358-8.

Band 356: Hannah Riedle

Haptische, generische Modelle weicher anatomischer Strukturen für die chirurgische Simulation
FAPS, xxx u. 179 Seiten, 82 Bilder, 35 Tab. 2020.

ISBN 978-3-96147-367-0.

Band 357: Maximilian Landgraf

Leistungselektronik für den Einsatz dielektrischer Elastomere in aktorischen, sensorischen und integrierten sensomotorischen Systemen
FAPS, xxiii u. 166 Seiten, 71 Bilder, 10 Tab. 2020.

ISBN 978-3-96147-380-9.

Band 358: Alireza Esfandiyari

Multi-Objective Process Optimization for Overpressure Reflow Soldering in Electronics Production
FAPS, xviii u. 175 Seiten, 57 Bilder, 23 Tab. 2020.

ISBN 978-3-96147-382-3.

Band 359: Christian Sand

Prozessübergreifende Analyse komplexer Montageprozessketten mittels Data Mining
FAPS, XV u. 168 Seiten, 61 Bilder, 12 Tab. 2021.

ISBN 978-3-96147-398-4.

Band 360: Ralf Merkl

Closed-Loop Control of a Storage-Supported Hybrid Compensation System for Improving the Power Quality in Medium Voltage Networks
FAPS, xxvii u. 200 Seiten, 102 Bilder, 2 Tab. 2021.

ISBN 978-3-96147-402-8.

Band 361: Thomas Reitberger

Additive Fertigung polymerer optischer Wellenleiter im Aerosol-Jet-Verfahren
FAPS, xix u. 141 Seiten, 65 Bilder, 11 Tab. 2021.

ISBN 978-3-96147-400-4.

Band 362: Marius Christian**Fechter**

Modellierung von Vorentwürfen in der virtuellen Realität mit natürlicher Fingerinteraktion
KTmfk, x u. 188 Seiten, 67 Bilder, 19 Tab. 2021.

ISBN 978-3-96147-404-2.

Band 363: Franziska Neubauer

Oberflächenmodifizierung und Entwicklung einer Auswertemethodik zur Verschleißcharakterisierung im Presshärteprozess
LFT, ix u. 177 Seiten, 42 Bilder, 6 Tab. 2021.

ISBN 978-3-96147-406-6.

Band 364: Eike Wolfram**Schäffer**

Web- und wissensbasierter Engineering-Konfigurator für roboterzentrierte Automatisierungslösungen
FAPS, xxiv u. 195 Seiten, 108 Bilder, 25 Tab. 2021.

ISBN 978-3-96147-410-3.

Band 365: Daniel Gross

Untersuchungen zur kohlenstoffdioxidbasierten kryogenen Minimalmengenschmierung
REP, xii u. 184 Seiten, 56 Bilder, 18 Tab. 2021.

ISBN 978-3-96147-412-7.

Band 366: Daniel Junker

Qualifizierung laser-additiv gefertigter Komponenten für den Einsatz im Werkzeugbau der Massivumformung
LFT, vii u. 142 Seiten, 62 Bilder, 5 Tab. 2021.

ISBN 978-3-96147-416-5.

Band 367: Tallal Javied

Totally Integrated Ecology Management for Resource Efficient and Eco-Friendly Production
FAPS, xv u. 160 Seiten, 60 Bilder, 13 Tab. 2021.

ISBN 978-3-96147-418-9.

Band 368: David Marco Hochrein

Wälzlager im Beschleunigungsfeld – Eine Analysestrategie zur Bestimmung des Reibungs-, Axialschub- und Temperaturverhaltens von Nadelkränzen –
KTmfk, xiii u. 279 Seiten, 108 Bilder, 39 Tab. 2021.

ISBN 978-3-96147-420-2.

Band 369: Daniel Gräf

Funktionalisierung technischer Oberflächen mittels prozessüberwachter aerosolbasierter Drucktechnologie
FAPS, xxii u. 175 Seiten, 97 Bilder, 6 Tab. 2021.

ISBN 978-3-96147-433-2.

Band 370: Andreas Gröschl

Hochfrequent fokusbereichsmodierte Konfokalsensoren für die Nanokoordinatenmesstechnik
FMT, x u. 144 Seiten, 98 Bilder, 6 Tab. 2021.

ISBN 978-3-96147-435-6.

Band 371: Johann Tüchsen

Konzeption, Entwicklung und Einführung des Assistenzsystems D-DAS für die Produktentwicklung elektrischer Motoren
KTmfk, xii u. 178 Seiten, 92 Bilder, 12 Tab. 2021.

ISBN 978-3-96147-437-0.

Band 372: Max Marian

Numerische Auslegung von Oberflächenmikrotexturen für geschmierte tribologische Kontakte
KTmfk, xviii u. 276 Seiten, 85 Bilder, 45 Tab. 2021.

ISBN 978-3-96147-439-4.

Band 373: Johannes Strauß

Die akustooptische Strahlformung in der Lasermaterialbearbeitung
LPT, xvi u. 113 Seiten, 48 Bilder.

2021. ISBN 978-3-96147-441-7.

Band 374: Martin Hohmann

Machine learning und hyper spectral imaging: Multi Spectral Endoscopy in the Gastro Intestinal Tract towards Hyper Spectral Endoscopy LPT, x u. 137 Seiten, 62 Bilder, 29 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-445-5.

Band 375: Timo Kordatz

Lasergestütztes Verfahren zur selektiven Metallisierung von epoxidharzbasierten Duromeren zur Steigerung der Integrationsdichte für dreidimensionale mechatronische Package-Baugruppen FAPS, xviii u. 198 Seiten, 92 Bilder, 24 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-443-1.

Band 376: Philipp Kestel

Assistenzsystem für den wissensbasierten Aufbau konstruktionsbegleitender Finite-Elemente-Analysen KTmfk, xviii u. 209 Seiten, 57 Bilder, 17 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-457-8.

Band 377: Martin Lerchen

Messverfahren für die pulverbettbasierte additive Fertigung zur Sicherstellung der Konformität mit geometrischen Produktspezifikationen FMT, x u. 150 Seiten, 60 Bilder, 9 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-463-9.

Band 378: Michael Schneider

Inline-Prüfung der Permeabilität in weichmagnetischen Komponenten FAPS, xxii u. 189 Seiten, 79 Bilder, 14 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-465-3.

Band 379: Tobias Sprügel

Sphärische Detektorflächen als Unterstützung der Produktentwicklung zur Datenanalyse im Rahmen des Digital Engineering KTmfk, xiii u. 213 Seiten, 84 Bilder, 33 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-475-2.

Band 380: Tom Häfner

Multipulseffekte beim Mikro-Materialabtrag von Stahllegierungen mit Pikosekunden-Laserpulsen LPT, xxviii u. 159 Seiten, 57 Bilder, 13 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-479-0.

Band 381: Björn Heling

Einsatz und Validierung virtueller Absicherungsmethoden für abweichungs-behaftete Mechanismen im Kontext des Robust Design KTmfk, xi u. 169 Seiten, 63 Bilder, 27 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-487-5.

Band 382: Tobias Kolb

Laserstrahl-Schmelzen von Metallen mit einer Serienanlage – Prozesscharakterisierung und Erweiterung eines Überwachungssystems LPT, xv u. 170 Seiten, 128 Bilder, 16 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-491-2.

Band 383: Mario Meinhardt

Widerstandselementschweißen mit gestauchten Hilfsfügelementen - Umformtechnische Wirkzusammenhänge zur Beeinflussung der Verbindungsfestigkeit LFT, xii u. 189 Seiten, 87 Bilder, 4 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-473-8.

Band 384: Felix Bauer

Ein Beitrag zur digitalen Auslegung von Fügeprozessen im Karosseriebau mit Fokus auf das Remote-Laserstrahlschweißen unter Einsatz flexibler Spanntechnik LFT, xi u. 185 Seiten, 74 Bilder, 12 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-498-1.

Band 385: Jochen Zeitler

Konzeption eines rechnergestützten Konstruktionssystems für optomechatronische Baugruppen FAPS, xix u. 172 Seiten, 88 Bilder, 11 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-499-8.

Band 386: Vincent Mann

Einfluss von Strahloszillation auf das Laserstrahlschweißen hochfester Stähle LPT, xiii u. 172 Seiten, 103 Bilder, 18 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-503-2.

Band 387: Chen Chen

Skin-equivalent opto-/elastofluidic in-vitro microphysiological vascular models for translational studies of optical biopsies LPT, xx u. 126 Seiten, 60 Bilder, 10 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-505-6.

Band 388: Stefan Stein

Laser drop on demand joining as bonding method for electronics assembly and packaging with high thermal requirements LPT, x u. 112 Seiten, 54 Bilder, 10 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-507-0

Band 389: Nikolaus Urban

Untersuchung des Laserstrahlschmelzens von Neodym-Eisen-Bor zur additiven Herstellung von Permanentmagneten FAPS, x u. 174 Seiten, 88 Bilder, 18 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-501-8.

Band 390: Yiting Wu

Großflächige Topographiemessungen mit einem Weißlichtinterferenzmikroskop und einem metrologischen Rasterkraftmikroskop FMT, xii u. 142 Seiten, 68 Bilder, 11 Tab. 2022. ISBN: 978-3-96147-513-1.

Band 391: Thomas Papke

Untersuchungen zur Umformbarkeit hybrider Bauteile aus Blechgrundkörper und additiv gefertigter Struktur LFT, xii u. 194 Seiten, 71 Bilder, 16 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-515-5.

Band 392: Bastian Zimmermann

Einfluss des Vormaterials auf die mehrstufige Kaltumformung vom Draht LFT, xi u. 182 Seiten, 36 Bilder, 6 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-519-3.

Band 393: Harald Völkl

Ein simulationsbasierter Ansatz zur Auslegung additiv gefertigter FLM-Faserverbundstrukturen KTmfk, xx u. 204 Seiten, 95 Bilder, 22 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-523-0.

Band 394: Robert Schulte

Auslegung und Anwendung prozessangepasster Halbzeuge für Verfahren der Blechmassivumformung LFT, x u. 163 Seiten, 93 Bilder, 5 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-525-4.

Band 395: Philipp Frey

Umformtechnische Strukturierung metallischer Einleger im Folgeverbund für mediendichte Kunststoff-Metall-Hybridbauteile LFT, ix u. 180 Seiten, 83 Bilder, 7 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-534-6.

Band 396: Thomas Johann Luft

Komplexitätsmanagement in der Produktentwicklung - Holistische Modellierung, Analyse, Visualisierung und Bewertung komplexer Systeme
KTmfk, xiii u. 510 Seiten, 166 Bilder, 16 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-540-7.

Band 397: Li Wang

Evaluierung der Einsetzbarkeit des lasergestützten Verfahrens zur selektiven Metallisierung für die Verbesserung passiver Intermodulation in Hochfrequenzanwendungen
FAPS, xxii u. 151 Seiten, 72 Bilder, 22 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-542-1.

Band 398: Sebastian**Reitelshöfer**

Der Aerosol-Jet-Druck Dielektrischer Elastomere als additives Fertigungsverfahren für elastische mechatronische Komponenten
FAPS, xxv u. 206 Seiten, 87 Bilder, 13 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-547-6.

Band 399: Alexander Meyer

Selektive Magnetmontage zur Verringerung des Rastmomentes permanenterregter Synchronmotoren
FAPS, xv u. 164 Seiten, 90 Bilder, 18 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-555-1.

Band 400: Rong Zhao

Design verschleißreduzierender amorpher Kohlenstoffschichtsysteme für trockene tribologische Gleitkontakte
KTmfk, x u. 148 Seiten, 69 Bilder, 14 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-557-5.

Band 401: Christian P. J.**Schwarzer**

Kupfersintern als Fügetechnologie für Leistungselektronik
FAPS, xxvii u. 234 Seiten, 125 Bilder, 24 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-566-7.

Band 402: Alexander Horn

Grundlegende Untersuchungen zur Gradierung der mechanischen Eigenschaften pressgehärteter Bauteile durch eine örtlich begrenzte Aufkohlung
LFT, xii u. 204 Seiten, 58 Bilder, 6 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-568-1.

Band 403: Artur Klos

Werkstoff- und umformtechnische Bewertung von hochfesten Aluminiumblechwerkstoffen für den Karosseriebau
LFT, x u. 192 Seiten, 73 Bilder, 12 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-572-8.

Band 404: Harald Schmid

Ganzheitliche Erarbeitung eines Prozessverständnisses von Tiefziehprozessen mit Ziehsicken auf Basis mechanischer und tribologischer Analysen
LFT, xiii u. 211 Seiten, 78 Bilder, 5 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-577-3.

Band 405: Johannes Henneberg

Blechmassivumformung von Funktionsbauteilen aus Bandmaterial
LFT, viii u. 176 Seiten, 101 Bilder, 2 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-579-7.

Band 406: Anton Schmailzl

Festigkeits- und zeitoptimierte Prozessführung beim quasi-simultanen Laser-Durchstrahlsschweißen
LPT, xiii u. 157 Seiten, 84 Bilder, 7 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-583-4.

Band 407: Alexander Wolf

Modellierung und Vorhersage menschlichen Interaktionsverhaltens zur Analyse der Mensch-Produkt Interaktion
KTmfk, x u. 207 Seiten, 69 Bilder, 10 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-585-8.

Band 408: Tim Weikert

Modifikationen amorpher Kohlenstoffschichten zur Anpassung der Reibungsbedingungen und zur Erhöhung des Verschleißschutzes
KTmfk, xvii u. 258 Seiten, 91 Bilder, 9 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-589-6.

Band 409: Stefan Götz

Frühzeitiges konstruktionsbegleitendes Toleranzmanagement
KTmfk, ix u. 276 Seiten, 127 Bilder, 13 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-593-3.

Band 410: Markus Hubert

Einsatzpotenziale der Rotations-schneidtechnologie in der Verarbeitung von metallischen Funktionsfolien für mechatronische Produkte
FAPS, xviii u. 139 Seiten, 86 Bilder, 7 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-603-9.

Band 411: Manfred Vogel

Grundlagenuntersuchungen und Erarbeitung einer Methodik zur Herstellung maßgeschneiderter Halbzeuge auf Basis eines neuartigen flexiblen Walzprozesses
LFT, ix u. 176 Seiten, 61 Bilder, 11 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-605-3.

Band 412: Michael Weigelt

Multidimensionale Optionenanalyse alternativer Antriebskonzepte für die individuelle Langstreckenmobilität
FAPS, xv u. 222 Seiten, 89 Bilder, 38 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-607-7.

Band 413: Frank Bodendorf

Machine Learning im Cost Engineering des Supply Managements
FAPS, xiii u. 165 Seiten, 75 Bilder, 13 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-609-1.

Band 414: Maximilian Metzner

Planung und Simulation taktiler, intelligenter und kollaborativer Roboterfähigkeiten in der Montage
FAPS, xix u. 174 Seiten, 72 Bilder, 3 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-611-4.

Band 415: Tina Buker

Ein Ansatz zur Reduktion produktinduzierter Nutzerstigmatisierung durch Förderung einer gleichermaßen gebrauchstauglichen wie emotionalen Produktgestalt
KTmfk, x u. 236 Seiten, 54 Bilder, 44 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-613-8.

Band 416: Marlene Kuhn

Model-based Traceability System Development for Complex Manufacturing Applying Blockchain and Graphs
FAPS, xv u. 167 Seiten, 63 Bilder, 10 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-615-2.

Band 417: Benjamin Lengenfelder

Remote photoacoustic sensing using speckle-analysis for biomedical imaging

LPT, xv u. 124 Seiten, 86 Bilder, 10 Tab. 2023. ISBN 978-3-96147-617-6.

Band 418: Benjamin Pohrer

Analyse des Zusammenhangs zwischen dem tribochemischen Aufbau von Grenzschichten und der Ausbildung von White Etching Crack-Schäden

KTmfk, xv u. 258 Seiten, 103 Bilder, 10 Tab. 2023. ISBN 978-3-96147-621-3.

Band 419: Matthias Friedlein

Zuverlässigkeitsmethoden zur Beschleunigung von Qualifizierungsuntersuchungen für Steckkontakte

FAPS, xxv u. 162 Seiten, 98 Bilder, 7 Tab. 2023.

ISBN 978-3-96147-625-1.

Band 420: Thomas Stoll

Laser Powder Bed Fusion von Kupfer auf Aluminiumoxid-Keramiken

FAPS, xxvii u. 236 Seiten, 103 Bilder, 11 Tab. 2023. ISBN 978-3-96147-631-2.

Band 421: Eric Eschner

Relation of Particle Motion and Process Zone Formation as a Basis for Sensing Approaches within PBF-LB/M

LPT, xiv u. 143 Seiten, 87 Bilder, 0 Tab. 2023.

ISBN 978-3-96147-633-6.

Band 422: Fanuel Mehari

Laser-induced Breakdown Spectroscopy (LIBS) as a diagnostics tool for biological tissue analysis.

LPT, xv u. 145 Seiten, 68 Bilder, 12 Tab. 2023. ISBN 978-3-96147-641-1.

Band 423: Uwe Leicht

Ultraschallüberlagertes Umformen und Verstemmen von Stahlwerkstoffen

LFT, xi u. 165 Seiten, 65 Bilder, 6 Tab. 2023. ISBN 978-3-96147-643-5.

Band 424: Thomas Braun

Potenzialanalyse der plasmabasierten, strukturierten Metallisierung thermoaktiver Oberflächen im industriellen Hausbau

FAPS, xvii u. 152 Seiten, 72 Bilder, 11 Tab. 2023. ISBN 978-3-96147-653-4.

Band 425: Reinhardt Seidel

Modellbasierte Optimierung des Selektivwellenlötprozesses

FAPS, xxii u. 167 Seiten, 73 Bilder, 23 Tab. 2023.

ISBN 978-3-96147-651-0.

Band 426: Matthias Lenzen

Maßgeschneiderte Werkstoffcharakterisierung für die numerische Auslegung von Blechumformprozessen

LFT, xi u. 187 Seiten, 77 Bilder, 13 Tab. 2023. ISBN 978-3-96147-663-3.

Band 427: Matthias Graser

Analyse lokaler Kurzzeitwärmebehandlungsmethoden zur Verbesserung des Umformverhaltens und der Bauteileigenschaften von Aluminiumstrangpresshohlprofilen

LFT, xi u. 169 Seiten, 81 Bilder, 1 Tab. 2023.

ISBN 978-3-96147-666-4.

Band 428: Markus Lieret

Sicheres autonomes Flugrobotersystem für den Einsatz im Produktions- und Logistikumfeld

FAPS, xix u. 198 Seiten, 54 Bilder, 7 Tab. 2023.

ISBN 978-3-96147-668-8.

Band 429: Petar Vukovic

Simulation komplexer Kommunikationssysteme in der Fertigungsautomatisierung

FAPS, xiv u. 163 Seiten, 57 Bilder, 21 Tab. 2023. ISBN 978-3-96147-673-2.

Band 430: Fabian Knieps

Finite Elemente Simulation dünnschichtiger Verpackungsgestricke: Entwicklung einer geeigneten Charakterisierungs- und Validierungsstrategie

LFT, xix, 189 Seiten, 122 Bilder, 17 Tab. 2023. ISBN 978-3-96147-689-3

Band 431: Julian Seßner

Multimodale Bildsegmentierung gering strukturierter Umgebungen für die Navigation am Beispiel eines Assistenzsystems für sehbeeinträchtigte Personen

FAPS, xxv, 203 Seiten, 57 Bilder, 25 Tab. 2023. ISBN 978-3-96147-697-8

Band 432: Benjamin Samuel Lutz

Smart Manufacturing System for Process Optimization Regarding Deviations among Material Batches

FAPS, xix, 208 Seiten, 77 Bilder, 14 Tab. 2023. ISBN 978-3-96147-703-6

Band 433: Michael Jüttner

Bewertung von Kantenpressungen auf Basis von Simulationen mehrfach überrollter elasto-plastischer Kontakte

KTmfk, xii, 162 Seiten, 59 Bilder, 7 Tab. 2024.

ISBN 978-3-96147-713-5.

Band 434: Sebastian Wiesenmayer

Untersuchungen zur Stoffflusssteuerung beim Fügen durch Umformen von hochfesten Aluminiumlegierungen mittels lokaler Kurzzeitwärmebehandlung

LFT, xii u. 197 Seiten, 81 Bilder, 19 Tab. 2024. ISBN 978-3-96147-715-9.

Band 435: Clara-Maria Kuball

Grundlegende Untersuchungen zur umformtechnischen Herstellung von Halbhohlstanzen aus hochverfestigenden Werkstoffen

LFT, viii u. 180 Seiten, 64 Bilder, 13 Tab. 2024.

ISBN 978-3-96147-717-3.

Band 436: Martin Roth

Sampling-based Tolerance-Cost Optimization: The Key to Optimal Tolerance Allocation

KTmfk, xxxvii u. 337 Seiten, 97 Bilder, 56 Tab. 2024.

ISBN 978-3-96147-719-7.

Band 437: Stephan Schirdewahn

Verbesserung des tribologischen Einsatzverhaltens im Presshärteprozess durch Verwendung maßgeschneiderter laserimplantierter Werkzeuge

LFT, viii u. 177 Seiten, 63 Bilder, 7 Tab. 2024. ISBN 978-3-96147-721-0.

Band 438: Andreas Rohrmoser
Erarbeitung eines grundlegenden Verständnisses zum Fließpressen betriebsangepasster Verzahnungen für den Einsatz in der Materialpaarung Metall-Kunststoff
LFT, x u. 166 Seiten, 94 Bilder, 6 Tab. 2024. ISBN 978-3-96147-723-4.

Band 439: Andreas Selmaier
DMAICS-Zyklus zur Digitalisierung in produzierenden Unternehmen
FAPS, xv u. 185 Seiten, 73 Bilder, 19 Tab. 2024. ISBN 978-3-96147-733-3.

Band 440: Thomas Kistner
Entwicklung von Modellen der Oberflächenform für die Messunsicherheitsbestimmung von taktilen Koordinatenmessungen durch Simulation
FMT, xiii u. 134 Seiten, 64 Bilder, 9 Tab. 2024.
ISBN 978-3-96147-735-7.

Band 441: Fabian Dworschak
Selbstverstärkendes Lernen als Beitrag zur Automatisierung der Anpassungskonstruktion
KTmfk, x, 205 Seiten, 87 Bilder, 16 Tab. 2024. ISBN 978-3-96147-739-5.

Band 442: Martin Killmann
Vorspannung und Ermüdung von Kaltmassivumformwerkzeugen für unrunde Bauteilgeometrien
LFT, ix u. 160 Seiten, 85 Bilder, 6 Tab. 2024. ISBN 978-3-96147-741-8.

Band 443: Ann-Kathrin Wiemann
Beitrag zur Messunsicherheitsermittlung für die Messung großer Zahnräder zur Erweiterung des virtuellen Koordinatenmessgerätes der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt
FMT, xxiv u. 133 Seiten, 41 Bilder, 22 Tab. 2024.
ISBN 978-3-96147-747-0.

Band 444: Andreas Jobst
Eigenspannungen beim Voll-Vorwärts-Fließpressen – Entstehung, Einstellung und Stabilität
LFT, ix u. 162 Seiten, 89 Bilder, 5 Tab. 2024.
ISBN 978-3-96147-749-4.

Band 445: Martin Anton Kraus
Grundlagenwissenschaftliche Untersuchungen zum Kaltfließpressen kleinster metallischer Pin-Strukturen aus der Blechebene
LFT, x u. 191 Seiten, 64 Bilder, 10 Tab. 2024.
ISBN 978-3-96147-757-9.

Band 446: Moritz Späth
Assessment of microcirculation by shifted position-diffuse reflectance imaging (SP-DRI)
LPT, xi u. 109 Seiten, 37 Bilder, 8 Tab. 2024. ISBN 978-3-96147-759-3.

Band 447: Benedikt Göddeke
Methode zur Auswahl eines alternativen Blechwerkstoffes für flexibel gewalzte und direkt warmumgeformte Karosseriestrukturbau-teile
LFT, xvi u. 222 Seiten, 66 Bilder, 27 Tab. 2024. ISBN 978-3-96147-762-3.

Band 448: Jan Hafenecker
Systematische Untersuchung zur Blechumformung von Hybridbauteilen
LFT, xxi u. 173 Seiten, 78 Bilder, 6 Tab. 2024.
ISBN 978-3-96147-764-7.

Band 449: Sven Wirsching
Numerische Optimierung von sekundären, geschmierten Punkt- und Ellipsenkontakten zur gezielten Auslegung von Rollenlagern
KTmfk, xxv u. 206 Seiten, 70 Bilder, 16 Tab. 2024.
ISBN 978-3-96147-766-1.

Band 450: Tobias Lechler
Der Digitale Zwilling im Ramp-down automatisierter Produktionssysteme
FAPS, xvii u. 152 Seiten, 83 Bilder, 4 Tab. 2024.
ISBN 978-3-96147-691-6.

Band 451: Eva Russwurm
Kombinierte Material- und Energieflussimulation gleichstrombasierter, automatisierter Produktionsanlagen
FAPS, xvi u. 165 Seiten, 67 Bilder, 13 Tab. 2024.
ISBN 978-3-96147-770-8.

Band 452: Janik Schaudé
Untersuchungen zur rasterkraft- und konfokalmikroskopischen Charakterisierung nanometrologischer Referenzkörper
FMT, x u. 167 Seiten, 74 Bilder, 4 Tab. 2024.
ISBN 978-3-96147-776-0.

Band 453: Philipp Bräuer
Nahinfrarot-Laser-Strukturierung und nasschemische Metallisierung von Aluminiumoxid mittels Laser-Absorptionsschicht
FAPS, xx u. 152 Seiten, 55 Bilder, 19 Tab. 2024.
ISBN 978-3-96147-780-7.

Band 454: Andreas Michael Müller
Definition and applications of the spatially discrete metrological descriptor framework for triangle mesh geometry data in 3D coordinate metrology
FMT, x u. 220 Seiten, 75 Bilder, 16 Tab. 2024.
ISBN 978-3-96147-782-1.

Band 455: Sina Martin
Einstellung anisotroper Eigenschaften dielektrischer Elastomersysteme mittels eines selektiven Druckverfahrens
FAPS, xxiii u. 166 Seiten, 76 Bilder, 6 Tab. 2024.
ISBN 978-3-96147-789-0.

Band 456: Manuel Reck
Grundlegendes Prozessverständnis zur Herstellung von Bauteilen mit texturierten Oberflächen durch Mikroprägen in einem kombinierten Umformprozess
LFT, ix u. 170 Seiten, 83 Bilder, 10 Tab. 2025.
ISBN 978-3-96147-798-2.

Band 457: Simone Neermann
Untersuchung photonischer Sinterverfahren und Entwicklung eines neuen elektrischen Messverfahrens zur Qualifizierung der Sinterung gedruckter Elektronik
FAPS, xix u. 145 Seiten, 75 Bilder, 6 Tab. 2025. ISBN 978-3-96147-800-2.

Band 458: Christian Witzgall

Berücksichtigung vorausgegangener Ermüdungsschädigung in der Crashtestsimulation kurzfaserverstärkter Thermoplaste
KTmfk, xxiv u. 201 Seiten, 109 Bilder, 19 Tab. 2025.
ISBN 978-3-96147-802-6.

Band 459: Lorenz Butzhammer

3-D-Scantrajektorien für die dimensionelle Röntgen-Computertomographie durch adaptive Messobjektneigung
FMT, xvi u. 212 Seiten, 81 Bilder, 2 Tab. 2025.
ISBN 978-3-96147-812-5.

Band 460: Benjamin Gerschütz

Identifikation von Anwendungsfällen und Integration datengetriebener Methoden im Produktentwicklungsprozess
KTmfk, xi u. 209 Seiten, 56 Bilder, 17 Tab. 2025.
ISBN 978-3-96147-814-9.

Band 461: Andreas Winkler

Numerische Verschleißmodellierung von trocken-, misch- und grenzreibungsbehafteten Wälzkontakten
KTmfk, xx u. 263 Seiten, 118 Bilder, 30 Tab. 2025
ISBN 978-3-96147-816-3

Band 462: Barbara Hansen

Methode zur Berücksichtigung von Schwankungen der tribologischen Halbzeugeigenschaften für die umformtechnische Herstellung von Karosseriebauteilen im Serienprozess
LFT, x u. 163 Seiten, 64 Bilder, 13 Tab. 2025
ISBN 978-3-96147-820-0

Abstract

In recent years, environmentally friendly products and a sustainable production have become increasingly important in our society. As a result, it is important to avoid rejects due to quality defects producing car body parts using forming technology. Causal for the occurrence of quality defects include fluctuations of the properties of semi-finished products, which influence the forming process but are not sufficiently considered in the design of car body parts. One reason for this is that fluctuations regarding the semi-finished product properties which influences friction has not yet been sufficiently investigated. The aim of the work is therefore to develop a comprehensive understanding of the process, from which a method for considering fluctuations regarding the for the Tribology relevant semi-finished product properties in the forming production of car body parts in the series process is derived. For this purpose, inline measuring systems are first qualified, which are used to record the semi-finished product properties on the running strip. Following a characterization of the fluctuations, the findings are used for numerical investigations and validated using real car body parts from the series production process. The investigations show that the friction behaviour is essentially influenced by an inhomogeneous lubricant distribution on the surface of the semi-finished product. The consideration of the real tribological conditions present in the series production process therefore leads to an improvement in the prediction accuracy in the forming simulation.

In den vergangenen Jahren haben umweltfreundliche Produkte sowie eine nachhaltige Produktion einen zunehmenden Stellenwert in unserer Gesellschaft eingenommen. Demzufolge gilt es, Ausschuss aufgrund von Qualitätsmängeln bei umformtechnisch hergestellten Karosseriebauteilen zu vermeiden. Ursächlich für das Auftreten von Qualitätsmängeln sind unter anderem Schwankungen der Halbzeugeigenschaften, welche den Umformprozess beeinflussen, jedoch bei der Auslegung der Bauteile nur unzureichend berücksichtigt werden. Ein Grund dafür ist, dass insbesondere Schwankungen der Halbzeugeigenschaften, welche die Reibung beeinflussen, bisher nicht ausreichend untersucht sind. Ziel der Arbeit ist es daher, ein durchgängiges Prozessverständnis zu erarbeiten, aus dem sich eine Methode zur Berücksichtigung von Schwankungen der für die Tribologie relevanten Halbzeugeigenschaften für die umformtechnische Herstellung von Karosseriebauteilen im Serienprozess ableitet. Dazu werden zunächst Inline-Messsysteme qualifiziert, welche zur Erfassung der Halbzeugeigenschaften am laufenden Band dienen. Im Anschluss an eine Charakterisierung der Schwankungen werden die erarbeiteten Erkenntnisse für numerische Untersuchungen genutzt sowie eine Validierung anhand von Realbauteilen aus dem Serienprozess vorgenommen. Die Untersuchungen zeigen, dass das Reibverhalten im Wesentlichen durch eine inhomogene Schmierstoffverteilung auf der Halbzeugoberfläche beeinflusst wird. Die Berücksichtigung der realen im Serienprozess vorliegenden tribologischen Bedingungen führt demnach zu einer Verbesserung der Vorhersagegenauigkeit in der Umformsimulation.

ISBN 978-3-96147-820-0

