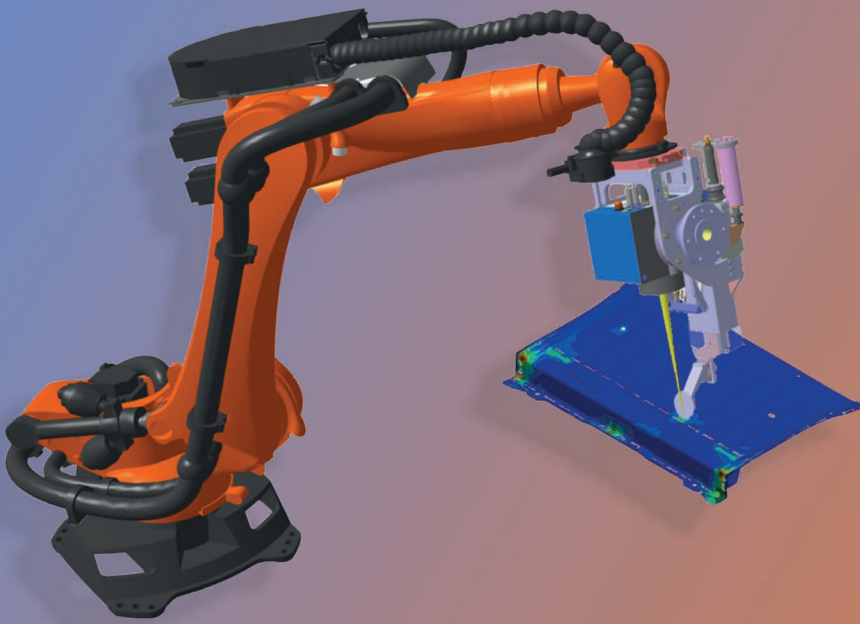




FAU Studien aus dem Maschinenbau 384

Felix Bauer

Ein Beitrag zur digitalen Auslegung
von Fügeprozessen im Karosseriebau
mit Fokus auf das Remote-Laser-
strahlschweißen unter Einsatz
flexibler Spanntechnik

Felix Bauer

Ein Beitrag zur digitalen Auslegung von Fügeprozessen im
Karosseriebau mit Fokus auf das Remote-Laserstrahlschweißen
unter Einsatz flexibler Spanntechnik

FAU Studien aus dem Maschinenbau

Band 384

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. Michael Schmidt

Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartzack

Felix Bauer

Ein Beitrag zur digitalen Auslegung von Fügeprozessen im Karosseriebau

**mit Fokus auf das Remote-Laserstrahlschweißen unter
Einsatz flexibler Spanntechnik**

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

Erlangen
FAU University Press
2022

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

Bitte zitieren als

Bauer, Felix. 2022. *Ein Beitrag zur digitalen Auslegung von Fügeprozessen im Karosseriebau mit Fokus auf das Remote-Laserstrahlschweißen unter Einsatz flexibler Spanntechnik*. FAU Studien aus dem Maschinenbau Band 384. Erlangen: FAU University Press. DOI: 10.25593/978-3-96147-498-1

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

Der vollständige Inhalt des Buchs ist als PDF über den OPUS-Server der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg abrufbar:
<https://opus4.kobv.de/opus4-fau/home>

Verlag und Auslieferung:

FAU University Press, Universitätsstraße 4, 91054 Erlangen

Druck: docupoint GmbH

ISBN: 978-3-96147-497-4 (Druckausgabe)
eISBN: 978-3-96147-498-1 (Online-Ausgabe)
ISSN: 2625-9974
DOI: 10.25593/978-3-96147-498-1

**Ein Beitrag zur digitalen Auslegung von
Fügeprozessen im Karosseriebau
mit Fokus auf das Remote-Laserstrahlschweißen
unter Einsatz flexibler Spanntechnik**

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

zur
Erlangung des Doktorgrades Dr.-Ing.

vorgelegt von

Felix Bauer

aus Ostfildern

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

Tag der mündlichen

Prüfung: 15.11.2021

Vorsitzender des

Promotionsorgans: Prof. Dr.-Ing. Knut Graichen

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. habil. Marion Merklein
Prof. Dr.-Ing. Karl Roll

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Doktorand in der Abteilung Digitale Fabrik der Daimler AG in Sindelfingen unter Betreuung durch Frau Dr.-Ing. Alexandra Werber und Herrn Dr.-Ing. Oliver Kurz. Wissenschaftlich betreut wurde die Arbeit durch Frau Prof. Dr.-Ing. habil. Marion Merklein, der Ordinaria des Lehrstuhls für Fertigungstechnologie der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg. Ihr möchte ich für die Übernahme des Hauptreferats, die vielen Denkanstöße und ihre prägende Rolle meinen besonderen Dank aussprechen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Karl Roll danke ich für die Übernahme des Koreferats, die umfassende Unterstützung der Arbeit und die vielen wertvollen Ratschläge. Zudem möchte ich mich bei Prof. Dr.-Ing. habil. Dipl.-Inf. Hinnerk Hagenah, Dr.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing. Univ. Michael Lechner und Martin Rosenschon bedanken, die mich mit viel Engagement unterstützt haben.

Des Weiteren möchte ich mich für die Beiträge meiner Kollegen bei der Daimler AG ganz herzlich bedanken. Insbesondere bei meinen Betreuern Dr.-Ing. Alexandra Werber und Dr.-Ing. Oliver Kurz, die mich mit vielen fruchtbaren Diskussionen und hohem Engagement auf dem Weg zur Promotion begleitet haben. Mein großer Dank gilt auch meinem Teamleiter Dr. Günter Wöhlke und meinen Abteilungsleitern Rainer Eißrich und Peter Mayer, die mich stets unterstützt und mir den für diese Arbeit benötigten Raum zum Verfügung gestellt haben. Besonders möchte ich Dr.-Ing. Michael Piott für die tolle gemeinsame Zeit in unserer Doktoranten-Ecke danken. Insbesondere bedanken möchte ich mich bei den Kollegen Klaus Wiegand, Thomas Kast, Dr.-Ing. Klaus Goth, Dr.-Ing. David Lamping, Dr.-Ing. Claus-Dieter Reiniger, Martin Grünbaum, Oliver Berker, Marc Sautter, Werner Greule, Ivica Paurevic und Dieter Gehring für die umfassende Unterstützung auf den Gebieten der Prozesssimulation, Mess-, Füge- und Werkstofftechnik sowie bei der Durchführung von Versuchen. Ein großer Dank geht auch an meine Studenten Tobias Seiberlich, Jonas Kormann, Julian Barth, Mathias Kredler, Martin Brezina und Jonathan Krauß, die mit ihren Arbeiten zum Gelingen dieser Dissertation beigetragen haben.

Meinen Eltern danke ich für die stetige Unterstützung meines Werdegangs. Außerordentlich danke ich meiner Frau und meinen beiden Töchtern, die mir viel Kraft und die benötigte Zeit für diese Arbeit gegeben haben. Danke!

Neuhausen, im Januar 2022

Felix Bauer

Für meinen Opa Engelbert

Inhaltsverzeichnis

	Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnis	ix
1	Einleitung	1
2	Stand der Technik und Forschung	3
2.1	Laserstrahlschweißen	3
2.1.1	Robotergeführtes Remote-Laserstrahlschweißen	4
2.1.2	Remote-Laserstrahlschweißen zinkbeschichteter Stahlbleche im Überlappstoß	5
2.1.3	Konventionelle Spanntechnik beim Remote- Laserstrahlschweißen im Karosseriebau	7
2.2	Flexible Spanntechnik.....	7
2.2.1	Flexible Fügevorrichtungen im Karosseriebau	8
2.2.2	Flexible Spanntechnik für das Laserstrahlschweißen im Karosseriebau	8
2.2.3	Mitlaufende Spanntechnik für das robotergeführte Remote- Laserstrahlschweißen	9
2.3	Ausgewählte Gebiete der Prozesssimulation im Karosseriebau.....	12
2.3.1	Prozesssimulation in der Blechumformung.....	13
2.3.2	Modellierung des Bauschinger-Effekts	13
2.3.3	Modellierung von Fügeprozessen im Karosseriebau.....	14
2.3.4	Prozesssimulation Rollfalzen.....	16
2.3.5	Prozesssimulation Laserstrahlschweißen	18
2.3.6	Digitale Fertigungsprozesskette zur virtuellen Fertigung von Karosserieteilen	20
2.4	Zusammenfassende Bewertung des Standes der Technik	24
3	Zielsetzung der Arbeit und Vorgehensweise	27
4	Werkstoffe, Versuchsanlagen, Methoden und Simulationssoftware	31
4.1	Verwendete Werkstoffe	31
4.2	Versuchsaufbauten zur Ermittlung der für die Modellierung des Bauschinger-Effekts erforderlichen Parameter	33
4.2.1	Zug-Druckversuch	33
4.2.2	Wechselbiegeversuch	34
4.3	Versuchsaufbauten der mitlaufenden Spanntechnik	36
4.3.1	Herstellung der Prinzipbauteile	36
4.3.2	Versuchsaufbau der Spannversuche mit Prinzipbauteilen.....	37

4.3.3	Versuchsaufbau der Spann- und Fügeversuche mit Prinzipbauteilen	39
4.4	Anfertigung und Auswertung von Bauteilschliffen	39
4.5	Erfassung der Geometrie von Lasernoppen	40
4.6	Digitalisierung von L-Proben mittels Calipri-Gap.....	41
4.7	FE-Simulationsprogramm LS-DYNA®	42
5	Untersuchung der Spann- und Fügeprozesse von Prinzipbauteilen	43
5.1	Experimentelle Untersuchung des Spannprozesses	43
5.1.1	Charakterisierungsversuche des Spannvorgangs von L-Proben mit Spannunterlage	43
5.1.2	Untersuchung der Prozessgrenzen	47
5.2	An auftretende Lastfälle angepasste Werkstoffcharakterisierung.....	49
5.2.1	Ermittlung der Bauschinger-Koeffizienten durch Zug-Druckversuche	49
5.2.2	Ermittlung von Parametern durch Wechselbiegeversuche zur Berücksichtigung des Bauschinger-Effekts in den Materialkarten	51
5.3	Simulationsmodell für das weggesteuerte Spannen.....	53
5.3.1	Aufbau des Simulationsmodells für das weggesteuerte Spannen	54
5.3.2	Validierung des Simulationsmodells für das weggesteuerte Spannen	56
5.3.3	Erkenntnisse aus der Validierung des Simulationsmodells	63
5.4	Untersuchung von Einflussgrößen auf die Höhe erforderlicher Spannkraften für das Spannen von Prinzipbauteilen	64
5.4.1	Simulationspläne zur Untersuchung der Einflussfaktoren	66
5.4.2	Untersuchungsergebnisse	68
5.4.3	Ursachen für die Beeinflussung der erforderlichen Spannkraft durch die Umformhistorie	75
5.5	Simulationsmodell für das kraftgesteuerte Spannen	79
5.5.1	Validierungsversuche des Spannvorgangs von L-Proben ohne Spannunterlage	81
5.5.2	Aufbau des Simulationsmodells für das kraftgesteuerte Spannen	83
5.5.3	Validierung des Simulationsmodells für das kraftgesteuerte Spannen	84
5.6	Simulationsmodell für das Spannen und Fügen von Prinzipbauteilen	86
5.6.1	Validierungsversuche des Spann- und Fügevorgangs mit Prinzipbauteilen	87

5.6.2	Modellierung der Schweißnaht durch Balkenelemente und Spotweld-Kontakte	91
5.6.3	Modellierung der Lasernoppen beim Fügen von Stahlbauteilen	91
5.6.4	Validierung des Simulationsmodells für das Fügen von Prinzipbauteilen	94
5.6.5	Simulative Untersuchung des Einflusses der Rollengeschwindigkeit auf resultierende Fügespalte	96
5.6.6	Simulative Untersuchung des Einflusses der Noppenhöhe auf resultierende Fügespalte	99
5.7	Zusammenfassung der Ergebnisse	101
6	Berechnung der Spann- und Fügeprozesse von Karosserieteilen ...	103
6.1	Übertragung der Simulationsmodelle auf reale Karosserieteile	103
6.1.1	Weggesteuerter Spannvorgang mit Spannrolle	106
6.1.2	Kraftgesteuerter Spannvorgang mit Spannrolle	109
6.2	Validierung des Simulationsmodells für Karosserieteile durch den Fügeversuch mit einem Heckwagen	110
6.2.1	Abgleich der Versuchs- und Simulationsergebnisse	113
6.3	Ausbau des Simulationsmodells zur Ermittlung erforderlicher Spannkräfte durch Berechnung mit geregelter Spannkraft	117
6.3.1	Funktionsweise des kraftgeregelten Simulationsmodells	118
7	Simulative Technologieuntersuchung	121
7.1	Simulative Untersuchung und Auslegung von Bauteilen und deren Spann- und Fügeprozesse	121
7.1.1	Auslegung von Bauteiltoleranzen und Spannkräften	122
7.1.2	Untersuchung des Einflusses der Umformhistorie auf resultierende Fügespalte	125
7.1.3	Untersuchung der Nachgiebigkeit der Bauteile in der Fügevorrichtung	127
7.1.4	Auslegung der Fügevorrichtung	129
7.1.5	Ermittlung eines optimierten Spannkraftverlaufs zum Erzielen eines definierten Fügspalts	131
7.1.6	Ermittlung eines Prozessfensters	133
7.1.7	Anpassungen der untersuchten Bauteile und des Spann- und Fügeprozesses auf Basis der simulativen Untersuchung und Auslegung	138
7.1.8	Absicherung der modifizierten Bauteile und deren Spann- und Fügeprozesse	140
7.2	Handlungsempfehlung zur frühzeitigen, digitalen Auslegung von Bauteilen, Fügeprozessen und Fügevorrichtungen	144
7.2.1	Eingangsdaten Bauteile	147

7.2.2	Eingangsdaten Fügevorrichtung	148
7.2.3	Eingangsdaten Prozessparameter	148
7.2.4	Einlegen und Spanner Schließen	149
7.2.5	Fügeprozess	149
7.2.6	Auswertung	150
7.2.7	Übertragbarkeit auf weitere Fügeverfahren.....	151
7.3	Hinweise für den Einsatz der mitlaufenden Spanntechnik.....	153
8	Zusammenfassung und Ausblick.....	155
9	Summary and outlook.....	159
	Literaturverzeichnis	163
	Anhang	179
	Anhang 1: Simulative Generierung von L-Proben	179
	Anhang 2: Übersicht Kontaktdefinitionen.....	181
	Anhang 3: Simulationspläne mit Zentral Zusammengesetztem Versuchsplan	182

Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnis

<i>Symbol</i>	<i>Einheit</i>	<i>Beschreibung</i>
a_i	MPa	werkstoffspezifischer Chaboche Parameter
b	mm	Abweichung vom Sollmaß
d_s	mm	Fügespalt
d_i	mm	Abstand zwischen den Knoten <i>i</i> oberes Bauteil und <i>i</i> unteres Bauteil in Längsrichtung des Spotweld-Elements <i>i</i>
d_{Ziel}	mm	Ziel-Abstand zwischen den Auswertungs-Knoten des oberen und des unteren Bauteils in Längsrichtung der Spotweld-Elemente
h	mm	Hubhöhe
k	-	untersuchte Faktoren
k_f	MPa	Fließspannung
k_{fo}	MPa	Anfangsfließspannung
k_{fi}	MPa	Fließspannung bei Erstbelastung
k_{f2}	MPa	Fließspannung nach Lastwechsel
l_{SW}	mm	Schweißnahtlänge
m	-	Faktorstufenkombinationen
n	-	Anzahl
n_o	-	Berechnungen des Zentrumspekts
p	-	Zuordnungen von Faktoren zu Wechselwirkungen höherer Ordnung
$S_F, S_{F,max}, S_{F,min}$	-	Skalierungsfaktor, maximaler Skalierungsfaktor, minimaler Skalierungsfaktor
t	s	Zeit
$t_{i,i}$	s	Zeitpunkt zu dem sich die Spannrolle 1,5 mm vor dem Spotweld-Element <i>i</i> befindet

$t_{2,i}$	s	Zeitpunkt zu dem sich die Spannrolle am Spotweld-Element i befindet und zu dem dieses aktiviert wird
$t_{1,i+1}$	s	Zeitpunkt zu dem sich die Spannrolle 1,5 mm vor dem Spotweld-Element $i+1$ befindet
C_i	-	werkstoffspezifischer Chaboche Parameter
E	GPa	Elastizitätsmodul
F_K	N	Spannkraft an Kraftmessdose
F_p	N	pneumatische Spannkraft
F_S	N	Spannkraft
$F_{S,i}$	N	vom Sensor i ausgegebene Spannkraft
$F_{S,initial}$	N	Anfangsspannkraft
$F_{S,max}, F_{S,min}$	N	maximal, minimal zulässige Spannkraft, minimal zulässige Spannkraft
$F_{S,Aktiv,i}$	N	für den Zeitpunkt der Aktivierung des Spotweld-Elements i berechnete Spannkraft
α	-	Signifikanzniveau
α_A	°	Anstellwinkel
α_B	°	Biegewinkel
α_{BK}	-	Bauschinger-Koeffizient
α_F	°	Falzwinkel
α_Z	-	Verlängerungsfaktor
σ_Y	MPa	Spannung in y-Richtung
φ	-	Umformgrad oder wahre Dehnung
φ_{vor}	-	Vordehnung

<i>Abkürzung</i>	<i>Beschreibung</i>
AA	Aluminum Association
Biegesim	Biegesimulation
CAD	Computer Aided Design
CFD	Computational Fluid Dynamics
DIN	Deutsches Institut für Normung e. V.
DoE	Design of Experiments
$E(\varphi)$	von der plastischen Dehnung abhängiger E-Modul
FE	Finite Elemente
FEM	Finite Elemente Methode
Geo	Geometrie
Hist	Umformhistorie
Laser	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
LFT	Lehrstuhl für Fertigungstechnologie
Sim	Simulation
Yb:YAG	Ytterbium dotierter Yttrium-Aluminium-Granat

1 Einleitung

Die Automobilindustrie wird zunehmend mit individuellen Kundenwünschen und sich schnell ändernden Märkten konfrontiert [1]. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, wird eine stetig wachsende Anzahl von Fahrzeugvarianten in immer kürzeren Produktzyklen angeboten. Dies hat zur Folge, dass auch die Produktentwicklungszeiten verringert werden müssen. Hinzu kommt der schwer abzuschätzende Anstieg der Absatzzahlen elektrisch angetriebener Fahrzeuge [2]. Für diese Fahrzeuge wird, neben der Fertigung auf eigenständigen Produktionslinien, auch eine Integration in die Fertigungslinien konventionell angetriebener Fahrzeuge verfolgt [3]. Auf Grund der oben genannten Herausforderungen wird in der Automobilindustrie neben der Digitalisierung zur Reduktion der Entwicklungszeiten die Steigerung der Flexibilität in der Karosseriefertigung vorangetrieben.

Im Rahmen einer durchgängigen digitalen Fertigungsprozesskette wird in der Automobilindustrie angestrebt, den vollständigen Herstellungsprozess von der Umformung des Einzelteils bis hin zur lackierten Karosserie abzubilden [4]. Ziel des Einsatzes digitaler Methoden zur Fertigungsprozess- und Bauteilauslegung ist, neben der Verkürzung von Entwicklungszeiten, die Reduktion von Entwicklungsressourcen durch frühzeitiges Identifizieren erforderlicher Anpassungen [5]. Dabei gilt es, bereits in der frühen digitalen Phase der Produktentwicklung, vor der Anfertigung der ersten Bauteile in Hardware, die Fertigungsprozesse digital zu untersuchen und auszulegen. Die digitale Fertigungsprozesskette umfasst heute bereits Modelle zur Absicherung der Herstellbarkeit umgeformter Einzelteile [6], einiger Karosseriefügeprozesse [7] sowie Modelle für Tauch-, Beschichtungs- und Lackierungsprozesse [8] bis hin zu Modellen der Decklackierung zur Ermittlung der Schichtdickenverteilung [9]. Ein offenes Feld stellt die bereits in [10] geforderte digitale Abbildung einer Spannrolle für Laserstrahlschweißprozesse im Karosseriebau dar.

In der Karosseriefertigung leisten flexible Fügestationen bei der Integration unterschiedlicher Fahrzeugmodelle in eine Fertigungslinie einen wichtigen Beitrag [11]. Ein dabei zunehmend eingesetztes Fügeverfahren ist das robotergeführte Remote-Laserstrahlschweißen. Dieses zeichnet sich im Vergleich zum Fügeverfahren des Widerstandspunktschweißens durch geringere Taktzeiten, belastungsgerechte Nahtmuster, geringere Anforderungen an die Zugänglichkeit und reduzierte Flanscbreiten aus [12]. Mittels Remote-Laserstrahlschweißen lassen sich sowohl Bauteile aus Stahl als

auch aus Aluminium fügen [13]. Die neue Spanntechnik der mitlaufenden Spanntechnik ermöglicht beim robotergeführten Remote-Laserstrahlschweißen eine zusätzliche Steigerung der Flexibilität des Fügeverfahrens. Dabei wird anstelle von ortsfesten Prozessspannern in der Schweißvorrichtung eine am Schweißroboter angebrachte und pneumatisch betriebene Spannrolle zum Spannen der Bauteile im Fügebereich eingesetzt [14]. Durch den Verzicht auf ortsfeste Prozessspanner und den Einsatz dieser flexiblen Spanntechnik können Geometrie, Anzahl und Positionen der Schweißnähte allein durch Änderung des Roboterprogramms angepasst werden. Somit können vereinfachte und leichter wechselbare Schweißvorrichtungen eingesetzt werden. Diese Steigerung der Flexibilität ist vergleichbar mit dem Ersatz eines Backenfalzprozesses durch einen robotergeführten Rollfalzprozess. Während der Backenfalzprozess eine vergleichsweise komplexe Fügevorrichtung mit integrierten Falzbacken benötigt, können beim Rollfalzprozess die Bauteile mit einer vereinfachten Fügevorrichtung ohne Falzbacken gefügt werden [15]. Neben der Steigerung der Flexibilität im Vergleich zum herkömmlichen Verfahren wird durch den Einsatz der mitlaufenden Spanntechnik bzw. des Rollfalzens auch die Zugänglichkeit für Handhabungstechnik verbessert. Bisher sind die Erfahrungswerte mit der neuen Technologie der mitlaufenden Spanntechnik begrenzt und Fügeversuche zur Auslegung des Prozesses aufwendig. Beim Einsatz dieser Technologie sollen die resultierenden Fügespalte der gefügten Schweißnähte gering gehalten werden, um die Festigkeit der Fügeverbindungen nicht negativ zu beeinträchtigen. Des Weiteren gilt es, die Spannkkräfte möglichst gering zu halten, um der Beeinträchtigung der Bauteiloberfläche durch die von der Spannrolle verursachte Rille, entgegenzuwirken.

Ziel dieser Arbeit ist der Aufbau von Prozessverständnis hinsichtlich des neuen Spann- und Fügeprozesses. Hierzu werden Versuche und Finite Elemente (FE-)Simulationsmodelle zur Abbildung und Auslegung des Spann- und Fügeprozesses mit mitlaufender Spanntechnik erarbeitet. Die Simulationsmodelle sollen die frühzeitige digitale Auslegung der Prozessparameter des Spann- und Fügeprozesses, der Bauteiltoleranzen und der eingesetzten Fügevorrichtung ermöglichen, um auf eine Absicherung mit Prototypen verzichten zu können. Darüber hinaus soll ein Prozessfenster des Spann- und Fügeprozesses mit mitlaufender Spanntechnik ermittelt werden.

2 Stand der Technik und Forschung

Dieses Kapitel fasst den gegenwärtigen Stand in Forschung und Industrie auf den Gebieten des Remote-Laserstrahlschweißens, der flexiblen Spann-technik und der digitalen Fertigungsprozesskette im Karosseriebau zusammen. Darüber hinaus werden ausgewählte Gebiete der FE-Prozesssimulation mit Relevanz für die Prozesssimulation des flexiblen Spannvorgangs beim robotergeführten Remote-Laserstrahlschweißen beschrieben.

2.1 Laserstrahlschweißen

Beim Laserstrahlschweißen handelt es sich nach [16] um ein Schmelzschweißverfahren. Dabei werden die zu fügenden Bauteile mittels Laserstrahl aufgeschmolzen und stoffschlüssig verbunden. Abhängig vom Werkstoff und der Oberflächenbeschaffenheit der Fügepartner sowie von der Wellenlänge der Laserstrahlung wird ein Teil der Laserstrahlung reflektiert und ein Teil von den Fügepartnern absorbiert [17]. Der absorbierte Teil erwärmt die Fügepartner bis zum aufschmelzen oder verdampfen. Die Laserstrahlung ist monochromatisch und kohärent, durch eine exakte Fokussierung lassen sich hohe Energiedichten von etwa 10^6 W/cm^2 [18] für das Laserstrahlschweißen realisieren. Das Akronym Laser kommt aus dem Englischen und steht für: „Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (Lichtverstärkung durch stimulierte Strahlungsemission)“ [19].

Das Laserstrahlschweißen ist in der industriellen Anwendung auf Grund seines großen Aspektverhältnisses (Verhältnis von Schweißnahttiefe zu Schweißnahtbreite, welches beim Tiefschweißen Werte größer 10 zu 1 annehmen kann), dem vergleichsweise geringen Bauteilverzug durch eine geringe Wärmeeinflusszone, der hohen Bearbeitungsgeschwindigkeit und Automatisierbarkeit sehr beliebt [20]. Im Karosseriebau wird das Verfahren sowohl für Stahl- als auch für Aluminiumbauteile eingesetzt und führt als linienförmiges Fügeverfahren im Allgemeinen zu steiferen Strukturen als punktförmige Fügeverfahren. Auch Karosserieteile mit unterschiedlichen Blechdicken können mittels Laserstrahlschweißen gefügt werden [21]. Im Gegensatz zum Widerstandspunktschweißen, bei dem die Bauteile beim Schweißen durch die Elektroden der Schweißzange aneinandergedrückt werden, benötigt das Laserstrahlschweißen zusätzliche Spanntechnik, um die zu fügenden Bauteile im Bereich der Schweißnaht in Kontakt zu bringen. Hierzu wird auf die Abschnitte 2.1.3 und 2.2 verwiesen.

2.1.1 **Robotergeführtes Remote-Laserstrahlschweißen**

Das robotergeführte Remote-Laserstrahlschweißen, auch als „Welding-on-the-fly“ bekannt, zeichnet sich durch seine hohe Effizienz hinsichtlich der Bearbeitungszeit und die geringe erforderliche Bauteilflanschbreite gegenüber dem Widerstandspunktschweißen aus [12]. Abhängig von der verwendeten Laserleistung ermittelte Oefele [22] beim Schweißen eines Karosserieteils (Heckfensterrahmen) eine Reduktion der Taktzeit um 76 % bis 80 % gegenüber dem Widerstandspunktschweißen. Das Verfahren des robotergeführten Remote-Laserstrahlschweißens wird laut Bea [12] bei der Daimler AG seit 2007 in der Serienproduktion eingesetzt. Dabei wird der Laserstrahl durch eine Scanneroptik mit hoher Geschwindigkeit positioniert und mittels Roboter über das zu bearbeitende Bauteil auf einer ruhigen Bahn mit einem konstanten Arbeitsabstand von ca. 500 mm geführt. Durch die schnell beweglichen Umlenkspiegel der Scanneroptik kann der Laserstrahl innerhalb von Sekundenbruchteilen (die Repositionierung einer Achse benötigt maximal 30 ms) auf die gewünschte Stelle fokussiert werden. Dies ist ferngesteuert (remote) im gesamten Arbeitsfeld in zwei Dimensionen (x- und y-Richtung) möglich, ohne dass dabei die Scanneroptik selbst bewegt werden muss. Verfügt die Scanneroptik zusätzlich über eine bewegliche Fokussieroptik, so ist darüber hinaus eine Positionierung des fokussierten Laserstrahls in z-Richtung möglich. Der Laserstrahl wird über ein flexibles Lichtleitkabel von der Laserquelle (einem Festkörperlaser) zur, durch den Roboter bewegten, Scanneroptik geführt [12]. Bild 1 zeigt ein System des robotergeführten Remote-Laserstrahlschweißens. Die Positionierung des fokussierten Laserstrahls durch die Scanneroptik wird in der Detaildarstellung veranschaulicht. Die Fokussierung des Laserstrahls in z-Richtung erfolgt durch die bewegliche Fokussieroptik. Über einen statischen Umlenkspiegel wird der Laserstrahl zu den beiden drehbaren Umlenkspiegeln geleitet, die ihn in x- und y-Richtung positionieren. Die Laserquelle muss für das robotergeführte Remote-Laserstrahlschweißen einen Laserstrahl mit hoher Strahlqualität generieren, um trotz der langen Brennweite der Fokussieroptik einen Fokusedurchmesser zu erreichen, der 600 μm nicht überschreitet, um den gewünschten Tiefschweißeffekt (siehe [20]) zu erreichen. Durch die programmierbare Strahlführung können beliebige, belastungsgerechte Nahtmuster realisiert werden. Dabei kommen hauptsächlich Linien, Kreise, Klammern und Nähte in S-Form zum Einsatz. Im Gegensatz zum Widerstandspunktschweißen ist beim robotergeführten Remote-Laserstrahlschweißen eine einseitige Bauteilzugänglichkeit für den Schweißroboter ausreichend [12].

Durch die Verwendung kurzer, an die erwartete Bauteilbelastung angepasster Nahtabschnitte kann der Wärmeeintrag ins Bauteil und der daraus resultierende Wärmeverzug gegenüber langen, durchgezogenen Schweißnähten verringert werden [23]. Darüber hinaus besteht beim Remote-Laserstrahlschweißen die Möglichkeit, die Schweißnahtqualität nach dem eigentlichen Schweißvorgang zu erhöhen. Hierzu wird mittels defokussiertem Laserstrahl und mit gegenüber dem Schweißvorgang erhöhter Geschwindigkeit in kreisenden Bewegungen der Werkstoff im Nahtbereich erneut aufgeschmolzen und somit geglättet [24].

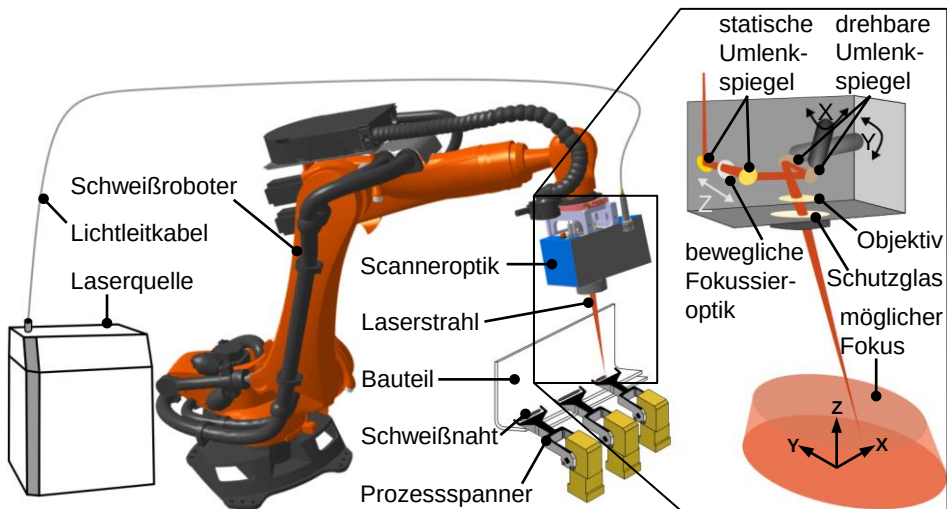


Bild 1: Robotergeführtes Remote-Laserstrahlschweißen mit Detaildarstellung der Scanneroptik

2.1.2 Remote-Laserstrahlschweißen zinkbeschichteter Stahlbleche im Überlappstoß

Für kaltumgeformte Karosserieteile aus Stahlblech werden hauptsächlich Bleche mit einer Zinkbeschichtung eingesetzt, die den Korrosionsschutz der Bauteile erheblich verbessern. Dabei kommen sowohl elektrolytisch als auch feuerverzinkte Bleche zum Einsatz [21]. Beim Remote-Laserstrahlschweißen von Stahlblechen mit Überlappstoß erschwert die Zinkbeschichtung das Erreichen einer guten Schweißnahtqualität. Der Grund hierfür ist der Siedepunkt von Zink, welcher mit 906 °C deutlich unter dem Schmelzpunkt von Stahl (1536 °C) liegt [25]. Beim Schweißen verdrängt der Zinkdampf die Stahlschmelze im Nahtbereich [24]. Während der Zinkdampf auf der Ober- und Unterseite des zu fügenden Blechstapels unge-

hindert verdampft, kann das Verdampfen der Zinkbeschichtung in der Fügeebene einen starken negativen Einfluss auf die Schweißnahtqualität haben. Ist kein Fügespalt zwischen den Blechen vorhanden, in den der Zinkdampf entweichen kann, entstehen Blasen aus Zinkdampf in der Schmelze. Diese Blasen entweichen explosionsartig, wobei es zum Auswurf von Schmelze und daraus resultierend zu Löchern in der Schweißnaht kommt. Nicht ausgetretener Zinkdampf führt zu Poren in der erstarrten Schmelze. Durch einen definierten Fügespalt zwischen den zu fügenden Blechen kann das Zink dort verdampfen, bevor der Stahlwerkstoff der Bleche aufgeschmolzen wird. Somit erfolgt keine negative Beeinflussung der Schweißnahtqualität durch den Zinkdampf [24].

Ein definierter Fügespalt zwischen verzinkten Stahlblechen kann durch Lasernoppen realisiert werden [26]. Mittels Remote-Laserstrahlschweißen können Lasernoppen vor dem Schweißvorgang innerhalb kurzer Zeit nahe der Schweißnahtposition (siehe Bild 2) erzeugt werden. Durch den Einsatz eines Remote-Lasers kann die Noppenanzahl, -position und -höhe variabel angepasst werden. Dies ist vorteilhaft gegenüber dem mechanischen Einpressen von Noppen, bei dem darüber hinaus Werkzeugverschleiß auftritt und die Gefahr des unbeabsichtigten Lochens der Bauteile besteht [25]. Weitere Alternativen zur Distanzierung von verzinkten Stahlblechen beim Laserstrahlschweißen stellen die von Omboko [27] verwendeten Glaskugeln und die von Mickel [28] beschriebene Spreizrolle (siehe Abschnitt 2.2.1) dar. Nach Reiniger [24] können Lasernoppen für Stähle, die über eine Streckgrenze von bis zu 400 MPa verfügen, durch Wärmeleitungsschweißen mit Prozesszeiten zwischen 12 ms und 50 ms je Lasernoppe erstellt werden. Die Ausbildung der Noppen erfolgt dabei infolge von Konvektionsströmungen in der Schmelze. Für Stähle mit höheren Streckgrenzen eignet sich das lokale Tiefschweißen zum Aufbringen der Lasernoppen. Reiniger empfiehlt ein Spaltmaß von ca. 0,10 mm und das Vermeiden von Spalten größer 0,20 mm zum Erreichen einer guten Schweißnahtqualität. Lasernoppen zur Zinkentgasung beim Remote-Laserstrahlschweißen werden bereits in der Großserie erfolgreich eingesetzt [24].

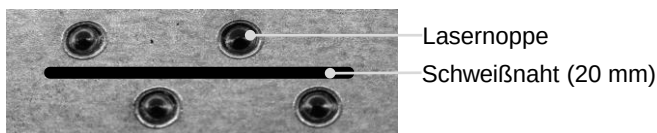


Bild 2: Lasernoppen auf dem Unterblech mit skizziertem Schweißnahtverlauf

2.1.3 Konventionelle Spanntechnik beim Remote-Laserstrahlschweißen im Karosseriebau

Zur Verarbeitung von Bauteilen im Karosseriebau werden diese in Vorrichtungen eingespannt. Die Ausrichtung der Bauteile erfolgt dabei über punktförmige bzw. flächige Auflagen, in Kombination mit Spannern sowie über Löcher bzw. Langlöcher in Kombination mit Stiften und Bolzen [29]. Die für die Ausrichtung und Fixierung der Bauteile relevanten Spanner werden auch Geometriespanner genannt. Karosserieteile weisen stets Abweichungen zum Sollmaß auf, die im Rahmen der vorgegebenen Bauteiltoleranz zulässig sind. Bei punktförmigen Fügeverfahren im Karosseriebau, wie dem Widerstandspunktschweißen, Clinchen, Halbhohlstanznieten, Vollstanznieten, Reibelementschweißen, Bolzensetzen und Fließblochschauben, werden die Bauteile im Fügebereich durch den Fügevorgang zusammengespreßt. Aus diesem Grund ist eine zusätzliche Prozessspanntechnik im Allgemeinen nicht erforderlich. Beim linienförmigen Fügeverfahren des Laserstrahlschweißens müssen die Bauteile dagegen zusätzlich im Fügebereich gespannt werden. Hierzu werden aufwendige Fügevorrichtungen verwendet [21]. Durch die Vielzahl von Schweißnähten beim Remote-Laserstrahlschweißen von Bauteilen ist eine hohe Anzahl von Spannelementen erforderlich [13]. Die Bauteile werden dabei im Nahtbereich durch Prozessspanner (siehe Bild 1) gespannt, um beim Laserstrahlschweißen zulässige Fügespalte sicherzustellen. Zu hohe Fügespalte wirken sich negativ auf die Qualität der Schweißnaht aus [20].

2.2 Flexible Spanntechnik

Um die Flexibilität von Fügevorrichtungen zu erhöhen, können diese mechanisiert werden. Hierzu werden Spanner, anstelle eines ortsfesten Einbaus in der Fügevorrichtung, mit Stellmotoren in die Fügevorrichtung integriert. Somit können diese Spanner auf definierten Achsen bewegt und flexibel positioniert werden [11]. Alternativ besteht die Möglichkeit, die Komplexität der Vorrichtung und die erforderliche Anzahl der Prozessspanner auf ein Minimum zu reduzieren und die zu fügenden Bauteile mittels einer am Schweißroboter mitgeführten Spanntechnik zu spannen. Durch die somit deutlich einfacher gestaltbare Fügevorrichtung verringern sich deren Fertigungskosten, die Zugänglichkeit für Handhabungstechnik verbessert sich und die Flexibilität des Fügeverfahrens erhöht sich erheblich. Auf diese Weise können Änderungen der Nahtgeometrie durch Umprogrammieren des Roboters umgesetzt werden, ohne dass hierfür ortsfeste Prozessspanner modifiziert werden müssen. Darüber hinaus lässt sich

die einfachere Vorrichtung leichter wechseln bzw. kann diese für unterschiedlich ausgeführte Bauteile eingesetzt werden, was unter anderem im Hinblick auf eine wachsende Anzahl der Fahrzeugvarianten attraktiv ist.

2.2.1 Flexible Fügevorrichtungen im Karosseriebau

Eine Erhöhung der Flexibilität sowie eine Reduktion der Einricht- und Justageprozesse im Karosseriebau werden durch mechanisierte Fügevorrichtungen möglich. Diese verwenden Spanner, deren Positionen innerhalb eines definierten Arbeitsweges auf bis zu drei Achsen verstellt werden können. Dazu werden die Spanner nicht auf einer Grundplatte, sondern auf hydraulischen Verstellmodulen montiert. Der Antrieb der Verstellmodule wird dabei ausgelagert, um diese kompakt zu gestalten. Somit können Justageprozesse ohne Unterbrechung der Produktion durchgeführt und digital dokumentiert werden [11]. Durch den Einsatz dieser flexiblen Fügevorrichtungen können in Kombination mit flexiblen Greifersystemen Bauteile verschiedener Baureihen gefügt werden [30].

2.2.2 Flexible Spanntechnik für das Laserstrahlschweißen im Karosseriebau

Der Einsatz einer am Schweißroboter geführten, mitlaufenden Spannrolle wurde bereits mehrfach untersucht. Rippl stellte in [31] das Laserstrahlschweißen mit einer Spannrolle vor. Die Aufgabe der Spannrolle bestand dabei neben dem Spannen der Bauteile darin, das Schweißen in Fokusslage sicherzustellen. Die Spannrolle und der gesamte Schweißkopf waren durch einen Druckzylinder in Strahlrichtung einachsrig beweglich. Für Flansche im Fenster- und Türbereich bestand die Möglichkeit, mit Hilfe einer zusätzlichen Gegenrolle Schweißaufgaben durchzuführen, die bis dahin nur durch Widerstandspunktschweißen realisierbar waren. In [32] wurde eine kraftgeregelte Spannrolle vorgestellt. Diese pneumatisch betriebene Spannrolle wurde zum Schweißen der Dachnaht in eine PKW-Fertigungslinie integriert. Eine mitlaufende Spanntechnik wurde in [33] mit einem Andruckpin anstelle einer Spannrolle zum Schweißen einer Dachnaht verwendet. Darüber hinaus wurden auch Spannrollen mit einschwenkbaren Gegenrollen eingesetzt [34]. Des Weiteren werden Spannzangen in Kombination mit einer Wobble-Optik, in der Großserie zum Fügen von B-Säulen eingesetzt [35]. Durch die verwendete Wobble-Optik kann der Laserstrahl auf dem Bauteil im Bereich einiger Millimeter oszillieren und somit Nahtmuster mit hoher Schweißnahtqualität erzeugen [36].

Spannrollen kommen auch beim Laserstrahlschweißen verzinkter Stahlbleche (siehe Abschnitt 2.1.2) zur Sicherstellung des definierten Fügespalts zur Zinkentgasung zum Einsatz. Dies erfordert allerdings im Fügebereich neben einer seitlichen Zugänglichkeit auch den Zugang von oben und unten. Vom Schweißroboter mitgeführte Spannfinger werden bei der Audi AG verwendet um zinkbeschichtete Bleche im Nahtbereich gezielt zu distanzieren [37]. Auch bei der BMW AG werden Spannrollen beim Laserstrahlschweißen eingesetzt [38]. Laserbearbeitungsköpfe in Kombination mit einer Spannrolle bzw. einem Spannfinger, mit zwei Spannrollen bzw. zwei Spannfiguren (von oben und unten) [39] werden bei der Volkswagen AG bereits in der Serienproduktion eingesetzt. Dort kommen des Weiteren zwei Spannrollen in Kombination mit einer Spreizrolle [28], die zwischen den Bauteilen hindurchgeführt wird und so den definierten Fügespalt sicherstellt, zum Einsatz.

Ferner werden industrielle Systeme, bestehend aus einem Laserbearbeitungskopf und einer daran angebrachten Spanntechnik, durch die thyssenkrupp System Engineering GmbH [40] und die HIGHYAG Lasertechnologie GmbH [41] angeboten. Die IPG Laser GmbH hat eine Wobble-Optik mit daran angebrachter Spannzanze entwickelt [36]. Darüber hinaus bietet die Scansonic IPT GmbH eine Rolle zum Spannen von Bauteilen für Laserbearbeitungssysteme an, bei der die Spannkraft durch einen elektrischen Antrieb aufgebracht wird [42]. Die in diesem Abschnitt beschriebenen Systeme weisen alle die Schwäche auf, dass sie frei programmierbare Nahtmuster nicht realisieren können. Des Weiteren lassen sich, durch die jeweils direkt am Laserbearbeitungskopf angebrachte Spanntechnik, keine mit Prozessspannern gespannten Bauteilbereiche kollisionsfrei fügen. Auch das Erzeugen von Lasernoppen mittels defokussiertem Laserstrahl ist mit den in diesem Abschnitt beschriebenen Laserbearbeitungsköpfen nicht möglich.

2.2.3 Mitlaufende Spanntechnik für das robotergeführte Remote-Laserstrahlschweißen

Bei der Daimler AG wird der Einsatz einer patentierten [43] mitlaufenden Spanntechnik erprobt. Die von Lamping [14] entwickelte flexible Spanntechnik verfügt über eine pneumatisch betriebene, kugelgelagerte Spannrolle mit einem Durchmesser von 96 mm in Kombination mit einem Scannersystem (siehe Bild 3). Dabei wird die pneumatisch erzeugte Spannkraft über die Spannrolle in die Bauteile geleitet. Durch die Verwendung eines kraftgesteuerten Pneumatikzylinders wird die aufgebrachte Spannkraft

von der Robotersteifigkeit, die eine Herausforderung beim Rollfalzprozess darstellt [44], entkoppelt. Der flexible Spannvorgang erfolgt parallel zur Schweißnaht mit einem Abstand von 5 mm und mit einem Anstellwinkel der Spannrolle von 5° gegenüber der z-Achse, um kurze Fügeflansche zu ermöglichen, ohne die Spannrolle einer zu hohen thermischen Belastung auszusetzen [14].

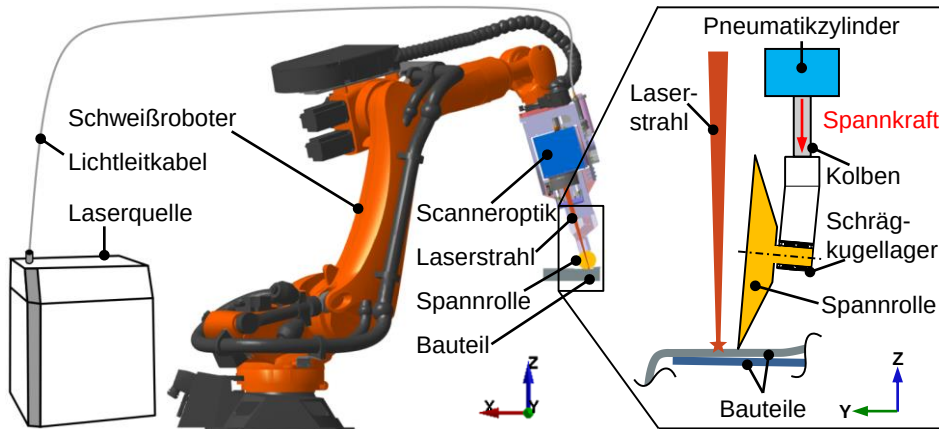


Bild 3: Robotergeführtes Remote-Laserstrahlschweißen mit Prinzipskizze der mitlaufenden Spann Technik

Direkt am Schweißroboter sind die Scanneroptik und die mitlaufende Spann Technik angebracht. Diese Technologie kombiniert die Vorteile der freien Strahlsteuerung des Remote-Laserstrahlschweißens mit der Flexibilitätssteigerung der in Abschnitt 2.2.1 vorgestellten Varianten der flexiblen Spann Technik, die bisher in Verbindung mit Laserbearbeitungsköpfen eingesetzt wurden. Durch den Einsatz einer Scanneroptik ergibt sich gegenüber den Verfahren aus Abschnitt 2.2.1 die Möglichkeit, frei programmierbare Nahtmuster zu verwenden, die darüber hinaus nach dem Schweißvorgang geglättet werden können (siehe Abschnitt 2.1.1). Durch den Einsatz der Scannertechnologie können innerhalb von Sekundenbruchteilen für das Schweißen verzinkter Stahlbleche erforderliche Lasernoppen (Abschnitt 2.1.2) aufgebracht werden. Des Weiteren können in Bereichen, in denen aus Gründen der Zugänglichkeit ein Spannen durch die mitlaufende Spann Technik nicht möglich ist, Prozessspanner eingesetzt werden und die Schweißnähte entsprechend durch herkömmliches Remote-Laserstrahlschweißen aufgebracht werden. Die Spannrolle kann dabei, ausgehend von der Fokusslage um bis zu 60 mm in z-Richtung eingefahren werden, wodurch Kollisionen vermieden werden können. Dies ermöglicht das Platzieren von Geometriespannern direkt neben einer Schweißnaht, die dabei

die Aufgabe eines Prozessspanners mit übernehmen können. Die Naht am Spanner kann damit ohne den Einsatz der Spannrolle (die eingefahren wird bzw. mit einer angepassten Roboterbahn) geschweißt werden. Somit ergibt sich durch den Einsatz der mitlaufenden Spanntechnik eine enorme Steigerung der Flexibilität gegenüber den in Abschnitt 2.2.1 vorgestellten Verfahren. Mit der Erhöhung der Flexibilität, durch den Einsatz der mitlaufenden Spanntechnik, geht beim Aufsetzen und Umsetzen der Spannrolle auf dem Bauteil ein Geschwindigkeitsverlust gegenüber dem herkömmlichen robotergeführten Remote-Laserstrahlschweißen einher [14].

Eine Herausforderung bei diesem Spannprozess stellt die Auslegung der Fügevorrichtung, der aufgebrachten Spannkraft, der vorgegebenen Rollenbahn und die Tolerierung der zu fügenden Bauteile dar. Eine umfangreiche Beschreibung der Tolerierung im Automobilbau findet sich in [29]. Beim Einsatz herkömmlicher Prozessspanner wird ein nichtmaßhaltiger Fügeflansch durch diese mit einem geringen definierten Fügespalt bzw. mit einem Nullspalt gespannt [13]. Dazu wird der Prozessspanner bei der Inbetriebnahme der Vorrichtung innerhalb kurzer Zeit auf das gewünschte resultierende Spaltmaß eingestellt. Beim Einsatz der mitlaufenden Spanntechnik ergeben sich, abhängig von den Schweißparametern, der aufgebrachten Spannkraft, der Geometrie von Bauteil und Vorrichtung, der Bahn und Geschwindigkeit der Spannrolle auf dem Bauteil und der Abweichung vom Sollmaß der zu fügenden Bauteile, Fügespalte. Zu hohe Fügespalte wirken sich negativ auf die Schweißnahtqualität aus [20]. Während eine zu gering gewählte Spannkraft zu unzulässig hohen Fügespalten führt, können durch eine zu hohe Spannkraft die Bauteile ungewollt plastisch deformiert werden. Des Weiteren hinterlässt die Spannrolle, die im Kontaktbereich mit einem Radius von 1,05 mm abgerundet ist, eine Rille auf der Oberfläche des gespannten Bauteils. Auf die Verwendung eines Druckfingers anstelle einer Spannrolle wird verzichtet, da dieser die Bauteiloberfläche zerkratzt und eine deutlich tiefere ungleichmäßige Rille hinterlässt. Beim Spannen von Aluminiumblechen mit 300 N Spannkraft bilden sich des Weiteren Späne am Rand der vom Spannfinger verursachten Rille. Aus Lackhaftungs- und Korrosionsschutzgründen wird eine möglichst geringe Beeinträchtigung der Bauteiloberfläche der Strukturbauteile angestrebt [14].

Auf Grund der begrenzten Erfahrung mit der neuartigen Technologie stellt die Auslegung des Spann- und Fügeprozesses sowie die fertigungsgerechte Bauteilgestaltung und -tolerierung eine enorme Herausforderung dar. Die Vorbereitung, Durchführung und Auswertung von Spann- und Fügeversuchen mit der mitlaufenden Spanntechnik sind zeit- und kostenintensiv.

2.3 Ausgewählte Gebiete der Prozesssimulation im Karosseriebau

Zur Reduzierung der Entwicklungszeiten neuer Baureihen wird in der Automobilindustrie im Rahmen einer durchgängigen digitalen Fertigungsprozesskette angestrebt, den vollständigen Herstellungsprozess vom Umformen des Einzelteils bis hin zur lackierten Karosserie abzubilden [4]. Neben den von Roller in [8] beschriebenen Computational Fluid Dynamics (CFD)-Modellen von Tauch-, Beschichtungs- und Lackierungsprozessen wird dabei die FE-Simulation zur Modellierung der Bauteilherstellungsprozesse [45] eingesetzt.

Die Finite Elemente Methode (FEM) ist ein numerisches Berechnungsverfahren, das im Ingenieurwesen seit vielen Jahren für struktur- und thermomechanische Berechnungen herangezogen wird [46]. Zur analytischen Berechnung realer strukturmechanischer Probleme mit komplexer Geometrie, überlagerten Lastfällen, komplexen Randbedingungen (wie nachgiebige Kontaktpartner) und unterschiedlichen Werkstoffen müssen diese meist stark vereinfacht werden. Wird ein Problem zu stark vereinfacht, so kann es nicht ausreichend realitätsnah abgebildet werden. Mittels FEM ist es möglich, komplexe strukturmechanische Probleme numerisch zu lösen, die sich analytisch nur durch starke Vereinfachung berechnen lassen. Demnach wird beim Einsatz der FEM die unendliche Anzahl von Freiheitsgraden eines Kontinuums durch ein finites (endliches) System ersetzt, um dieses numerisch zu behandeln [47]. Bei der räumlichen Diskretisierung des Kontinuums stehen in kommerziellen Simulationsprogrammen mit Stab-, Balken-, Scheiben-, Platten-, Schalen-, Volumen- und Kreisring-Elementen eine Vielzahl von Elementtypen zur Verfügung [46].

Auf Basis der Berechnungsergebnisse aus der FE-Prozesssimulation können sowohl die Fertigungsprozesse als auch die Geometrie und die Werkstoffe von Bauteilen in einer digitalen Entwicklungsphase angepasst werden, um frühzeitig deren Herstellbarkeit abzusichern. Somit können aufwendige Versuche und Werkzeugnachbearbeitungen reduziert bzw. vermieden und die Entwicklungszeit der Fertigungsprozesse erheblich verkürzt werden. In den folgenden Abschnitten wird der Stand der Forschung, der für die Modellierung des Fügeprozesses mit mitlaufender Spanntechnik relevanten Gebiete der FE-Prozesssimulation, beschrieben. Darüber hinaus wird der Stand der Forschung bei der Integration der FE-Simulation von Karosseriefertigungsprozessen in eine digitale Prozesskette aufgezeigt.

2.3.1 Prozesssimulation in der Blechumformung

Die Herstellbarkeit umgeformter Einzelteile und deren Geometrie nach ihrer Rückfederung kann mittels Prozesssimulation vorhergesagt werden. Dadurch kann die Werkzeuggeometrie bereits in der Konstruktionsphase angepasst werden, um die Rückfederung der Bauteile zu kompensieren [48]. Auf dem Gebiet der Blechumformung wird bei FE-Berechnungen zwischen den impliziten und expliziten Verfahren der Zeitintegration unterschieden (siehe [49]). Die Simulation des Umformprozesses wird dabei in die Simulationsschritte „Einlegen“ der Platine, „Schließen“ des Niederhalters und „Umformen“ z.B. durch Tiefziehen sowie „Rückfederung“ des umgeformten Bauteils unterteilt [50].

Um die FE-Simulation zielführend zur Auslegung von Umformprozessen einzusetzen, ist die ausreichende Beschreibung der mechanischen Werkstoffeigenschaften unabdingbar [51]. Während für ein elastisches Werkstoffmodell in der FE-Simulation neben der Dichte die Angabe des E-Moduls (Elastizitätsmoduls) und der Querkontraktionszahl für eine mechanische Beschreibung des Werkstoffverhaltens ausreichen, bedarf es für ein elastoplastisches Werkstoffmodell zur Berechnung von Umformvorgängen weiterer Parameter. Das elastische Werkstoffverhalten kann entsprechend dem elastischen Werkstoffmodell beschrieben werden, wobei die Möglichkeit besteht, den E-Modul dehnungsabhängig zu beschreiben. Eine Berechnung mit dehnungsabhängiger Beschreibung des E-Moduls ermöglicht beispielsweise eine verbesserte Vorhersage der rückgefederten Ziehteilgeometrie gegenüber einer Berechnung mit konstantem E-Modul [52]. Das plastische Werkstoffverhalten wird von der Fließortkurve, der Fließkurve und der Grenzformänderungskurve beschrieben (siehe [53]).

2.3.2 Modellierung des Bauschinger-Effekts

Blechwerkstoffe werden sowohl während des Umformvorgangs als auch bei darauffolgenden Spann- und Fügeprozessen unter wechselnder Belastungsrichtung umgeformt bzw. deformiert. Der Wechsel der Belastungsrichtung führt häufig zu einer Reduktion der Fließspannung. Dieses Verhalten von Werkstoffen wurde von Bauschinger [54] entdeckt und beschrieben. Durch den Bauschinger-Koeffizienten α_{BK} , der nach Gleichung (1) aus der erreichten Fließspannung bei Erstbelastung k_{f_1} und der Fließspannung nach dem Lastwechsel k_{f_2} berechnet wird, kann der Bauschinger-Effekt quantifiziert werden. Zur Charakterisierung des Bauschinger-Effekts dienen der Zug-Druckversuch [55], der Wechselbiegeversuch [56], der zyklische Scherversuch [57] oder der ebene Torsionsversuch

[58]. Hauptgrund für den Bauschinger-Effekt bei Raumtemperatur ist das Aufstauen von Versetzungen infolge einer plastischen Vordehnung, die im Fall einer Dehnungsumkehr bei geringerer erforderlicher Spannung entzerrt werden [59].

$$\alpha_{BK} = \left| \frac{k_{f_2}}{k_{f_1}} \right| \quad (1)$$

Beim Tiefziehen erfolgt eine Wechselbiegebeanspruchung wenn der Werkstoff eine Ziehsecke durchläuft und beim Auftreten eines Hohlzugs [60]. Das Ziehteil unterliegt beim Hohlzug einer Biegebelastung am Matrizenradius, gefolgt von einer Rückbiegung am Auslauf des Matrizenradius beim Übergang zur Zarge [21]. Der Bauschinger-Effekt wirkt sich dabei auf die resultierende Bauteilgeometrie aus. Durch eine Berücksichtigung des Bauschinger-Effekts in der Umformsimulation können die Werkzeuge und der Umformprozess zur verbesserten Kompensation von Rückfederungseffekten angepasst werden [52].

Der Bauschinger-Effekt lässt sich über die Fließbedingung in der Werkstoffmodellierung berücksichtigen [59]. Mit Hilfe eines Rückspannungstensors, der die Fließortkurve verschiebt, kann nach Chaboche und Rousselier [61] das isotrop-kinematische Verfestigungsverhalten modelliert werden. Die Materialparameter zur Beschreibung des Rückspannungstensors können mittels oben genannter Charakterisierungsversuche und einer anschließenden inversen Parameteridentifikation ermittelt werden. Durch den Einsatz von zwei Rückspannungstermen erhöht sich dabei die Abbildungsgenauigkeit gegenüber der Verwendung von einem [62]. Beim Ansatz von Chaboche und Rousselier handelt es sich um eine Weiterentwicklung des Modells von Armstrong und Frederik [63]. Ein weitaus komplexeres Modell haben Yoshida und Uemori [64] entwickelt. Dieses verwendet zwei Fließflächen und berücksichtigt gezielt das Stagnieren der Kaltverfestigung und die frühe Rückplastifizierung des Werkstoffs. Für dieses Modell müssen sieben Parameter durch inverse Parameteridentifikation bestimmt werden [62].

2.3.3 Modellierung von Fügeprozessen im Karosseriebau

Neben den Umformprozessen zur Anfertigung von Blecheinzelteilen im Presswerk (siehe Abschnitt 2.3.1) kann durch die FE-Prozesssimulation auch das Fügen mehrerer Bauteile zu einem Zusammenbau [65] berechnet werden. Somit können bereits vor der realen Herstellung von Karosserieteilen deren Geometrie und Fügeprozesse digital analysiert und verbessert

werden. Der Fokus liegt dabei auf der Maßhaltigkeit der berechneten Zusammenbauten [45].

In der FE-Prozesssimulation können heutzutage eine Vielzahl von Fügeprozessen im Karosseriebau berechnet werden. Die Prozesssimulation des Falzens wird dabei besonders häufig eingesetzt, da hiermit unter anderem das vom Kunden wahrgenommene Spaltmaß von Anbauteilen an Fahrzeugkarosserien verbessert werden kann [45]. Neben dem Rollfalzen [44] (siehe Abschnitt 2.3.4) kann auch das Backenfalzen [66] im Rahmen einer Prozesssimulation ausgelegt werden. Darüber hinaus wird mittels Fügeersatzmodellen das mechanische Fügen durch Clinchen und Nieten berechnet [67]. Bei Fügeersatzmodellen handelt es sich in der Regel um Balken oder Volumenelemente [68], die mittels Tied-Bedingungen (welche u.a. in [69] näher beschrieben werden) die Bauteile im Bereich der Fügestelle verbinden. Zudem können durch Fügeersatzmodelle gezielt Spannungen in die modellierten Bauteile induziert werden [70]. Das punktförmige thermische Verfahren des Widerstandspunktschweißens wird ebenfalls unter Verwendung von Fügeersatzmodellen in der Prozesssimulation berechnet [71]. Des Weiteren werden linienförmige Schweißverfahren unter Einsatz von Fügeelementen zur Modellierung der Schweißnaht berechnet, dabei können die Bauteile sowohl durch Schalenelemente als auch durch Volumenelemente modelliert werden [72]. Ferner ist eine Berechnung von Schweißverfahren ohne zusätzliche Fügeelemente möglich (siehe Abschnitt 2.3.5) [73]. Klebstoff zwischen den zu fügenden Bauteilen wird in der Simulation von Fügeprozessen im Karosseriebau in der Regel nicht modelliert, da sein viskoses Verhalten eine erhebliche Herausforderung für die FE-Simulation darstellt. Eine Berücksichtigung der Schichtdicke des nicht ausgehärteten Klebstoffs ist durch ein Kontaktoffset zwischen den Bauteilen möglich [45]. Eine ausgehärtete Klebeverbindung kann durch Tied-Bedingungen modelliert werden.

Das allgemeine Vorgehen bei der FE-Simulation von Fügeprozessen im Karosseriebau lässt sich in die in Bild 4 dargestellten Prozessschritte unterteilen. Dabei wird im ersten Simulationsschritt das Einlegen der Bauteile in die Vorrichtung simuliert. Im darauffolgenden Simulationsschritt werden die Spanner, nach Möglichkeit in der Reihenfolge des geplanten realen Prozesses, geschlossen. Daraufhin erfolgt der Simulationsschritt des eigentlichen Fügeprozesses von einem oder mehreren der oben genannten Fügeverfahren. Zur Untersuchung der Geometrie der gefügten Bauteile wird im nächsten Simulationsschritt eine Berechnung der Rückfederung durchgeführt. Dabei kann durch die Vorgabe von Randbedingungen der Einfluss einer Messvorrichtung modelliert werden. Darüber hinaus kann auch eine

freie Rückfederung berechnet und der Zusammenbau daraufhin in zwei weiteren Simulationsschritten in die Messvorrichtung eingelegt und eingespannt werden. Nach dem letzten Simulationsschritt erfolgt ein Abgleich mit der auf CAD-Daten basierenden Sollgeometrie. Bei flächigen, nachgiebigen Zusammenbauten gilt es dabei die Schwerkraft, zumindest für die Untersuchung der Maßhaltigkeit, zu berücksichtigen. Auf Basis des Abgleichs können Anpassungen an der Geometrie der Einzelteile bzw. am Fügeprozess abgeleitet werden.

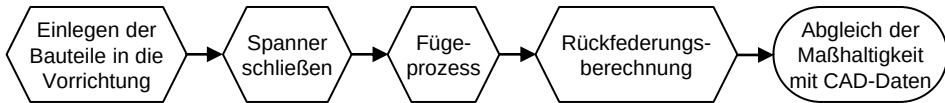


Bild 4: Allgemeine Prozessschritte bei der FE-Simulation von Fügeprozessen im Karosseriebau

2.3.4 Prozesssimulation Rollfalzen

Das Rollfalzen weist, als Alternative zu einem herkömmlichen Fertigungsverfahren mit komplexerer Fügevorrichtung sowie durch die Krafteinleitung über eine Rolle in die Bauteile, Gemeinsamkeiten mit dem Spannvorgang der mitlaufenden Spanntechnik auf. Das Rollfalzen, welches nach [74] den Fertigungsverfahren Fügen durch Umformen zugeordnet ist, wird im Karosseriebau zum Fügen von Anbauteilen eingesetzt [44]. Die Prozessschritte des Rollfalzens sind schematisch in Bild 5 dargestellt. Dabei wird der Falzkleber in der Vorrichtung oder bereits vorgelagert aufgebracht (a). Daraufhin wird das Innenteil in das bereits im Presswerk abgekantete Außenteil gelegt (b). Durch den Einsatz von Spannern wird sichergestellt, dass die Bauteile nicht verrutschen. Um den Falz zu schließen, sind mehrere Falzschnitte (meist drei bis vier) mit abnehmendem Falzwinkel α_F erforderlich (c). Oftmals werden diese Falzschnitte von verschiedenen, an einem drehbaren Rollenträger angebrachten, Rollen durchgeführt [21].

Neben der Erhöhung der Flexibilität und dem Einsatz einfacherer Fügevorrichtungen gegenüber dem herkömmlichen Fügeverfahren wird beim Rollfalzen und mit mitlaufender Spanntechnik mehr Zeit für den Fügevorgang benötigt. Während beim herkömmlichen robotergeführten Remote-Laserstrahlschweißen mit in die Fügevorrichtung integrierten Prozessspannern gespannt wird (siehe Abschnitt 2.1.3), kommen beim herkömmlichen Backenfalten in die Fügevorrichtung integrierte Falzbacken zum Einsatz [21]. Darüber hinaus wird bei beiden Technologien die Kraft über eine am Industrieroboter geführte Rolle in die Bauteile eingeleitet. Der Unterschied

zwischen der mitlaufenden Spanntechnik und dem Rollfalzen in der industriellen Anwendung ist dabei, dass die Falzrolle starr am Roboterarm angebracht ist, während die Spannrolle der mitlaufenden Spanntechnik über einen Pneumatikzylinder mit dem Roboterarm verbunden ist. Durch die Verwendung eines Industrieroboters kann für beide Verfahren die Bahn programmiert und durch Programmänderungen angepasst werden. Des Weiteren können mit einer Rolle unterschiedliche Bauteile gespannt und gefügt werden.

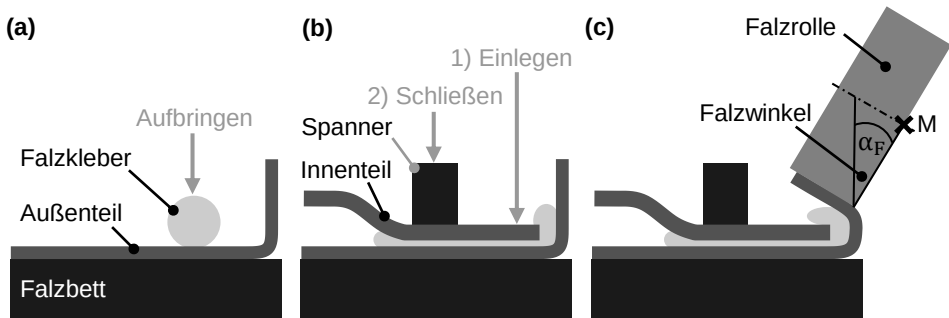


Bild 5: Rollfalzprozess; (a) Applikation des Falzklebers auf das abgekannte Außenteil; (b) Einlegen des Innenteils und Schließen der Spanner; (c) Falzen mit Falzrolle

Durch den Einsatz der Rollfalzsimulation können geometrische Faktoren wie der Falzverlust, die Lage der Radiuseinsatzlinie, die Falzhöhe, die Falzlänge, die erforderliche Länge des Falzflansches und die Maßhaltigkeit der gefügten Bauteile vorhergesagt und digital untersucht werden [75]. Darüber hinaus wurden Reaktionskräfte zwischen Falzrolle und Falzflansch in der Rollfalzsimulation von Cerretti [76] und Arroyo [77] untersucht und von letzterem mit Messergebnissen abgeglichen. Während anfänglich Prozessparameter an einfachen Geometrien mit linearen Rollenbahnen untersucht wurden [78], kann durch gezielte Steuerung der Falzrolle [79] auch der Rollfalzprozess für gekrümmte Prinzipbauteile und reale Bauteile in LS-DYNA® simuliert werden. Dabei wird die Falzrolle an einem lokalen Koordinatensystem, das im falzradiusseitigen Schnittpunkt der Rollensymmetrieachse mit der Mantelfläche der Falzrolle definiert ist (Punkt M in Bild 5c), geführt und über dessen Ausrichtung orientiert. Burchitz präsentierte in [80] mit dem AutoForm-HemPlanner® eine kommerzielle Software, mit der sowohl die Werkzeuggeometrie und deren Kinematik für den Backen- bzw. Rollfalzprozess auf Basis von CAD-Daten generiert als auch die Berechnung mittels FE-Simulation durchgeführt werden können. Die sich aus der Berechnung ergebende Bauteilgeometrie und die Reaktionskräfte zwischen Werkzeugen und Bauteil können nach der Berechnung

ausgewertet werden. Die Bahnkurven und die erzeugte Werkzeuggeometrie lassen sich für den Aufbau einer realen Fügestation exportieren. Mittels einer Rollensteuerung für Karosserieteile [79] entwickelte Eisele simulationsbasierte Metamodelle anhand von charakteristischen Bauteilgeometrien, um den Falzverlust und die Radiuseinsatzlinie zu prognostizieren. Darüber hinaus präsentierte Kaiser in [81] eine Methode zur Analyse der Geometrie rollgefalzter Karosserieaußenhautteile. Diese ermöglicht es, die Falzflanschlänge, den Falzverlust, die Faltenbildung und plastische Dehnungen durch ein von ihm erstelltes FE-basiertes Metamodell vorherzusagen [82]. Des Weiteren berechnete Kästle [83] die Simulationsprozesskette vom Umformprozess der Einzelteile bis zum Rollfalzen des Zusammenbaus einer Motorhaube mit der Rückfederungssimulation des Zusammenbaus nach dem Falzen zur Beurteilung der Maßhaltigkeit. Für seine Methode nutzte er zur Generierung der Falzbahn eine weiterentwickelte Version des in [80] präsentierten AutoForm-HemPlanners®. Zubeil [84] entwickelte ein Versagenskriterium mit dem sich unter anderem bei der simulativen Auslegung des Rollfalzprozesses die Verfahrensgrenzen infolge der im Bauteil auftretenden Biegebelastung ermitteln lassen.

2.3.5 Prozesssimulation Laserstrahlschweißen

In der Automobilindustrie existiert ein hoher Bedarf an Schweißsimulationen [85]. Die Simulation des Laserstrahlschweißprozesses von Karosserieteilen dient dabei hauptsächlich der Vorhersage von thermisch bedingten Eigenspannungen und des resultierenden Schweißverzugs. Durch deren frühzeitige Kenntnis können Prozessparameter des Schweißprozesses und die Auslegung der Schweißvorrichtung angepasst werden [86]. Die hierzu eingesetzte Schweißsimulation lässt sich nach Radaj [87] durch die Teilbereiche der Prozesssimulation, Struktursimulation und Werkstoffsimulation untergliedern. Dabei wird die thermomechanische Modellierung der Schweiß eigenspannungen und des Schweißverzugs mit der thermodynamischen Modellierung des Temperaturfelds und des Gefügestands gekoppelt [88].

Der Schweißverzug einer Remote-laserstrahlgeschweißten Fahrzeugaure wurde simulativ in [89] durch eine thermomechanische Simulation in Simufact® untersucht und mit einem Schweißversuch abgeglichen. Dabei wurde gezeigt, dass durch Anpassung der Schweißsequenz, der Schweißverzug um bis zu 30 % reduziert werden kann. Schützle stellte in [90] ein Simulationsmodell in PAM-STAMP® zur Beurteilung der Maßhaltigkeit la-

serstrahlgeschweißter Karosserieanbauteile aus Aluminium vor. Zur Reduktion der Berechnungszeit erfolgten seine Berechnungen mechanisch unter Verwendung von Fügeersatzmodellen mit Ersatzlasten. Loose zeigte in [72] die Zusammenbausimulation einer geschweißten Box aus Volumenelementen mit vorangegangener Umformsimulation. Alle Fertigungsschritte wurden dabei durchgängig in LS-DYNA® simuliert und der Schweißvorgang wurde thermomechanisch gekoppelt berechnet. Neben den plastischen Dehnungen wurde auch die Vergleichsspannung ausgewertet. Des Weiteren wurde an Schalenelementen eine durchgängige Simulationsprozesskette vom Laserstrahlschweißen der Bleche über den Umformvorgang zur Crashbeanspruchung einer einfachen Bauteilgeometrie präsentiert. Die beiden lasergeschweißten Bauteilhälften waren dabei durch ihr Netz miteinander verbunden. Durch eine vor dem Schweißvorgang gezielt eingebrachte Vorverformung ließ sich der resultierende Schweißverzug erheblich reduzieren. In [73] stellte Klöppel mehrere Neuerungen in LS-DYNA® vor, die für die Simulation mit Schalenelementen und Volumenelementen kompatibel sind und demonstrierte diese beispielhaft an kleinen Modellen. Durch die Neuerungen wird das Potential der Schweißsimulation komplexer Bauteile erheblich gesteigert und die Integrierbarkeit der Schweißsimulation in eine Simulationsprozesskette stark verbessert. Die Neuerungen umfassen die Möglichkeit, gekrümmte Bahnen zu definieren, auf denen die Wärmequelle mit definierbaren Geschwindigkeiten und Orientierungen geführt werden kann. Darüber hinaus kann durch eine neue Kontaktdefinition auf das Definieren zusätzlicher Fügeelemente verzichtet werden. Diese neue Kontaktdefinition ist in der Lage, den Kontakt zwischen Bauteilen beim Überschreiten einer definierten Temperatur lokal mit einer Tied-Bedingung zu versehen. Durch diese werden die Bauteile im entsprechenden Bereich mechanisch verbunden. Zusätzlich wird in diesem Bereich mit der Aktivierung der Tied-Bedingung der Wärmeübergangskoeffizient des thermischen Kontakts angepasst.

Über die Modellierung von Lasernoppen für das Laserstrahlschweißen verzinkter Stahlbleche (siehe Abschnitt 2.1.2) im Rahmen der FE-Prozesssimulation sind keine Veröffentlichungen bekannt. Auch alternative distanzierende Elemente zur Zinkentgasung zwischen den Fügepartnern wurden bisher in der Literatur nicht modelliert. So verzichtete Omboko [27] in der FE-Simulation auf die Modellierung der durch Glaskugeln bei seinen Schweißversuchen realisierten Distanzierung (von 0,2 mm) zwischen den verzinkten Stahlblechen. Perret [85] modellierte eine Distanzierung von 0,2 mm zur Zinkentgasung lediglich in der Schweißsimulation ebener Bleche (bei der Modellierung von Karosserieteilen wurde darauf verzichtet).

Hierzu wurde ein Abstand von 0,2 mm im Rahmen der Vernetzung der mittels Volumenelementen modellierten ebenen Bleche realisiert. Es erfolgte dabei keine Modellierung von distanzierenden Elementen. Darüber hinaus ist die Abbildung von optisch vermessenen, realen Gussbauteilen in einer Schweißsimulation in der Literatur bisher nicht veröffentlicht.

2.3.6 Digitale Fertigungsprozesskette zur virtuellen Fertigung von Karosserieteilen

Im Rahmen der in Bild 6 dargestellten digitalen Fertigungsprozesskette im Karosseriebau werden heute bereits Modelle zur Absicherung der Herstellbarkeit umgeformter Einzelteile [6], der Fügeprozesse im Karosseriebau [7], der Tauch-, Beschichtungs- und Lackierungsprozesse [8] sowie der Schichtdickenverteilung der Decklackierung [9] eingesetzt. Dabei existieren bereits einige Modelle zur Abbildung punktförmiger und linienförmiger Fügeprozesse im Karosseriebau, die im Rahmen einer digitalen Fertigungsprozesskette vorrangig Umformprozesse der Einzelteile berücksichtigen. Diese Modelle werden in diesem Abschnitt beschrieben.

Digitale Fertigungsprozesskette

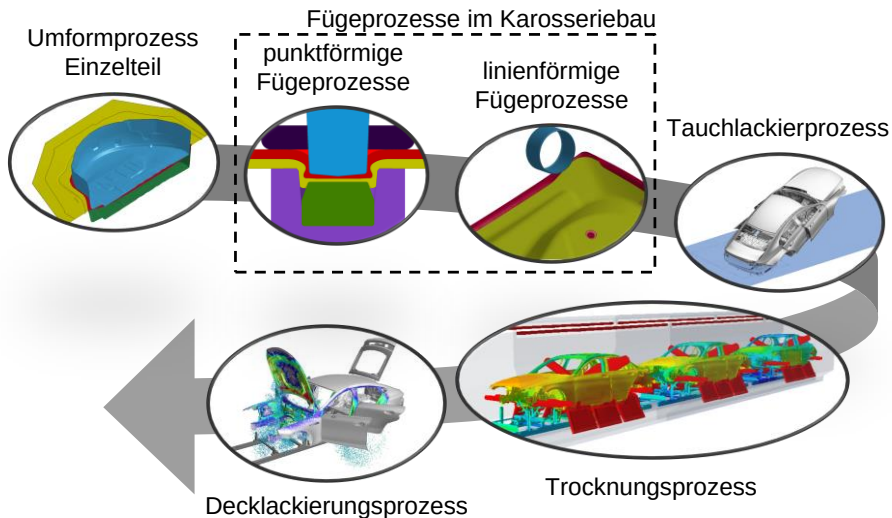


Bild 6: Digitale Fertigungsprozesskette im Karosseriebau basierend auf Methoden der FE- und CFD-Simulation

Der Einsatz von Bauteilen aus einer vorangegangenen Umformsimulation ermöglicht es, den Einfluss des Umformprozesses auf den Zusammenbau zu untersuchen und darüber hinaus die Genauigkeit der Vorhersage durch die Berücksichtigung der Umformhistorie (Spannungen, Dehnungen,

Blechdickenverteilung und Bauschinger-Effekt) zu erhöhen [91]. Alternativ können auch vernetzte Bauteile aus CAD-Daten [92] oder aus Vermesungsergebnissen von realen Bauteilen ohne Umformhistorie [75] verwendet werden. Durch Mapping kann die Umformhistorie (Blechdickenverteilung, Spannungen und Dehnungen) aus der Umformsimulation auf eine vernetzte Geometrie für eine darauffolgende Simulation übertragen werden [93]. Infolge unterschiedlicher Vernetzung und Abweichungen der Bauteilgeometrie muss beim Mapping zwischen Integrationspunkten, Elementen und Knoten interpoliert werden [94], dabei kommt es zu einem Verlust an Genauigkeit.

In den letzten Jahren gab es einige Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der digitalen Fertigungsprozesskette. Im Folgenden werden jeweils der Kern und das Entwicklungspotential der Arbeiten zu digital verketteten Umform- und Fügeprozessen im Karosseriebau beleuchtet. Fleischer [66] untersuchte im Rahmen einer Simulationsprozesskette in LS-DYNA®, bestehend aus Umformoperationen mit dem anschließendem Fügeprozess des Backenfaltens, den Zusammenbau einer Fahrzeugschürze. Der in der durchgängigen Prozesskette berechnete Zusammenbau bestand aus der Türaußenhaut, dem Türinnenblech und dem Heckleuchtentopf. Dabei wurden die Simulationsergebnisse stets in den darauffolgenden Simulationsschritt übertragen und damit die Umformhistorie in Form von Spannungen, Dehnungen und Blechdickenverteilung direkt berücksichtigt. Es erfolgte jedoch keine Rückfederungsberechnung zwischen den Umform- und Fügeoperationen. Erst nach dem modellierten Fügeprozess des Backenfaltens wurde die Rückfederung des gesamten Zusammenbaus berechnet. Das Rückfederungsergebnis der gefügten Baugruppen wurde nicht experimentell validiert und der Einfluss der Umformhistorie nicht untersucht.

Eckert [67] berechnete das Fügen durch Clinchen bzw. Halbhohlstanzen einer Versuchsbaugruppe eines verallgemeinerten Karosserieanbauteils aus Aluminium. Die Baugruppe bestand aus einem Innenteil und einem Verstärkungsteil. Die Berechnung erfolgte mit einem mechanischen Ersatzmodell in PAM-STAMP®. Die dabei im Bereich der Fügestellen aufgetragenen Ersatzlasten wurden auf Basis des Verzugs einfacher Probengeometrie gefittet und beeinflussten den Verzug der geclinchten Versuchsbaugruppe nur geringfügig. Für die halbhohlstanzgenietete Baugruppe war ein Übertrag nicht möglich, da für diese Fügetechnik eine starke Abhängigkeit von der Spannsituation ermittelt wurde. Für das Clinchen erfolgte ein Abgleich mit dem experimentell ermittelten Verzug. Die Bauteilgeometrie der beiden Einzelteile wurde dazu optisch mittels GOM ATOS vermessen und durch Knoten-Mapping in FE-Netze überführt. Die Übereinstimmung von

Versuch und Simulation wurde als sehr gut bewertet. Darüber hinaus wurden die Fügespalte der geclinchten und halbhohlstanzenierten Versuchsbaugruppe mittels GOM ATOS ausgewertet und mit der Simulation abgeglichen. Die Fügespalte stimmten teilweise qualitativ überein. Es wurde darauf hingewiesen, dass durch die verwendete Messtechnik die Fügespalte nicht ausreichend genau erfasst werden können. Darüber hinaus wurde die Prozesskette mit den vorgelagerten Umformoperationen der Einzelteile durchgehend in PAM-STAMP® berechnet, um den Einfluss der Eigenspannungen auf den resultierenden Bauteilverzug dieser Versuchsbaugruppe zu ermitteln. Während sich der Einfluss der Eigenspannungen beim Clinchen als vernachlässigbar herausstellte, war beim Halbhohlstanzen ein Einfluss der Eigenspannungen erkennbar. Es erfolgte kein Abgleich des Verzugs aus der simulierten Prozesskette mit den Ergebnissen der Fügeversuche.

Omboko [27] modellierte das Laserstrahlschweißen eines Seitenteil-Verstärkungsrahmens mit dem mechanischen Ersatzmodell einer Schrumpfkraft in Abaqus™. Dabei wurde die Umformhistorie der vorhergehenden Umformprozesse von sieben Karosserieteilen aus AutoForm® in Form von Spannungen, Dehnungen und Blechdickenverteilung auf die Bauteile gemappt. Die Geometrie der Bauteile entstammte jedoch nicht aus deren Umformsimulationen, sondern entsprach der Bauteil-Sollgeometrie aus dem CAD-Datensatz. Für den mechanisch modellierten Fügeprozess wurden einige gravierende Vereinfachungen vorgenommen. So erfolgte die Fügesimulation ohne die Berücksichtigung von Kontakten zwischen den gefügten Bauteilen. Zwischen den Spannern der Fügevorrichtung und den Bauteilen wurden ebenfalls keine Kontakte modelliert, sondern stattdessen die Knoten der Bauteile im Bereich des Spannerkontakts mit Randbedingungen versehen. Des Weiteren erfolgte in der Simulation keine Berücksichtigung des zwischen den verzinkten Bauteilen durch Glaskugeln erzeugten Spalts von 0,2 mm zur Zinkentgasung. Der simulativ prognostizierte Verzug zeigte sich zumeist in der entgegengesetzten Richtung des experimentell ermittelten Verzugs. Dabei kam der simulativ prognostizierte Verzug am nächsten an den experimentell ermittelten heran, wenn von der gemappten Umformhistorie lediglich die Blechdicke berücksichtigt wurde. Die Berücksichtigung von Spannungen und Dehnungen wirkte sich dagegen negativ auf die Übereinstimmung aus.

Schützle [90] modellierte das Laserstrahlschweißen einer Versuchsbaugruppe aus einem Innenteil und einem Verstärkungsteil eines verallgemeinerten Karosserieanbauteils aus Aluminium mit einem mechanischen Ersatzmodell in PAM-STAMP®. Bei der Baugruppe handelte es sich um die

von Eckert in [67] verwendete, praxisnahe, zweiteilige Versuchsbaugruppe. Die in der Umformsimulation in PAM-STAMP® berechnete Blechdickenverteilung wurde auf die vermessenen Bauteile gemappt. Der berechnete Schweißverzug wurde mit Versuchen abgeglichen. Dabei zeigte sich ein deutlicher Einfluss der drei unterschiedlichen Probengeometrien, die für die iterative Kalibrierung des mechanischen Fügeersatzmodells mit Versuchen verwendet wurden. Bei den drei Probengeometrien handelte es sich um einen Ausschnitt aus der Versuchsbaugruppe, abgekantete Profile zur Abbildung nahtnaher Bereiche und ebene Bleche. Das berechnete Verzugsresultat der Baugruppe bei Verwendung der ebenen Bleche zur Kalibrierung der mechanischen Ersatzlast stimmte nicht mit den Versuchsergebnissen überein. Die beste Übereinstimmung konnte mit dem Ausschnitt aus der Versuchsbaugruppe als Kalibrierungsgrundlage erzielt werden. Des Weiteren wurde die durchgängige Prozesskette des gefügten Zusammenbaus mit vorhergehender Umformsimulation und Rückfederungsberechnung untersucht. Dabei wurde der für den Fügeprozess berechnete Bauteilverzug aus der durchgängigen Prozesskette mit dem Bauteilverzug aus der Berechnung mit optisch vermessenen Bauteilen und dem Bauteilverzug bei der Verwendung der CAD-Sollgeometrie verglichen. Während der berechnete Bauteilverzug bei den ersten beiden Modellierungsarten gut miteinander übereinstimmte, waren bei der Verwendung der CAD-Sollgeometrie deutliche Unterschiede gegenüber den ersten beiden Modellierungsarten erkennbar. Die Ergebnisse der drei Modellierungsarten stimmten jedoch qualitativ überein.

In [45] wurde von Kästle erstmalig für ein reales Karosserieanbauteil die gesamte Prozesskette von den Umformoperationen der Einzelteile bis hin zum gefügten Zusammenbau simuliert und experimentell validiert. Die simulativ ermittelte Maßhaltigkeit, der aus neun Blechteilen bestehenden Motorhaube, stimmte dabei mit der optisch mittels GOM ATOS erfassten Maßhaltigkeit der experimentell gefügten Motorhaube überein. Die Umformsimulation erfolgte in AutoForm®, die Berechnung der Fügeprozesse in LS-DYNA®. Die Bauteilgeometrie wurde dabei nach der Umformsimulation für die anschließenden Fügeprozesse neu vernetzt. Die Blechdickenverteilung und die plastischen Dehnungen wurden durch Mapping übertragen. Das Fügen der Innenteile erfolgte durch Clinchen, die Beplankung der Motorhaube wurde durch Rollfalzen mit den Innenteilen gefügt. Darüber hinaus wurde simulativ aufgezeigt, wie sich die Maßhaltigkeit eines Anbauteils durch gezieltes Überbiegen einzelner Innenteile verbessern lässt.

Die Simulationsmodelle in den oben beschriebenen Arbeiten weisen an mehreren Stellen noch Verbesserungspotential auf. Die Arbeit von Kästle

[45] zeigt auf, wie sich durch geometrische Anpassungen an Einzelteilen die Maßhaltigkeit damit gefertigter Anbauteile verbessern lässt. Dies ist ein Beispiel für den erfolgreichen Einsatz einer digitalen Fertigungsprozesskette zur Bauteil- und Prozessauslegung. In den beleuchteten Arbeiten wird kein übertragbares Konzept zur Entwicklung von Simulationsmodellen von Fügeprozessen für den Einsatz im Rahmen der digitalen Fertigungsprozesskette im Karosseriebau aufgezeigt. Darüber hinaus findet sich kein allgemein übertragbares Konzept zur Abbildung und Auslegung von Fügeprozessen im Karosseriebau unter der Berücksichtigung der Verfügbarkeit an Daten von Bauteilen, Fügevorrichtungen und Fügeprozessparametern im Rahmen des Fahrzeugentwicklungsprozesses.

2.4 Zusammenfassende Bewertung des Standes der Technik

Der Einsatz der mitlaufenden Spanntechnik beim robotergeführten Remote-Laserstrahlschweißen ermöglicht einen enormen Flexibilitätsgewinn im Karosseriebau (siehe Abschnitt 2.2.3). Bei ihrer Verwendung zum Spannen der Bauteile im Nahtbereich kann die Anzahl erforderlicher Prozessspanner erheblich reduziert und teilweise sogar vollständig auf diese verzichtet werden. Durch die somit deutlich einfacher gestaltete Fügevorrichtung können deren Fertigungskosten verringert und die Zugänglichkeit für Handhabungstechnik verbessert werden. Da die Position der Schweißnähte allein durch die Programmierung des Schweißroboters und der mitlaufenden Spanntechnik angepasst werden kann, ohne dass ortsfeste Prozessspanner neu positioniert werden müssen, erhöht sich die Flexibilität des Fügeverfahrens erheblich. Somit kann die Fügevorrichtung einfacher gewechselt bzw. eine Fügevorrichtung für unterschiedlich ausgeführte Bauteile eingesetzt werden. Dies ist im Hinblick auf eine zunehmende Anzahl der Fahrzeugvarianten besonders von Vorteil. Grundsätzlich denkbar wäre auch der Einsatz der mitlaufenden Spanntechnik in Kombination mit einer mechanisierten Fügevorrichtung (siehe Abschnitt 2.2.1), um die Flexibilität weiter zu erhöhen.

Da die mitlaufende Spanntechnik in Kombination mit dem robotergeführten Remote-Laserstrahlschweißen (siehe Abschnitt 2.1.1) eingesetzt wird, ergibt sich eine weitere Steigerung der Flexibilität gegenüber dem Einsatz flexibler Spanntechnik in Kombination mit scannerlosen Systemen. Somit können Schweißnähte, die aus Gründen der Zugänglichkeit bzw. der Prozesssicherheit nicht unter Einsatz der Spannrolle geschweißt werden können, herkömmlich durch Prozessspanner gespannt (siehe Abschnitt 2.1.3)

und vom Scannersystem gefügt werden. Auch das Aufbringen von Lasernoppen, welche die Zinkentgasung beim Schweißen verzinkter Stahlbleche zuverlässig in der Großserie sicherstellen (siehe Abschnitt 2.1.2), kann durch den robotergeführten Remote-Laser innerhalb kurzer Zeit auf dem unteren zu fügenden Bauteil erfolgen. Für die neue Technologie der mitlaufenden Spanntechnik sind wenige Erfahrungswerte vorhanden, darüber hinaus sind Fügeversuche aufwendig (siehe Abschnitt 2.2.3). Dabei gilt es, zur Sicherstellung der Schweißnahtqualität, die resultierenden Fügespalte (siehe Abschnitt 2.1.3) zwischen den gefügten Bauteilen gering zu halten. Um die in der Automobilproduktion geforderte Schweißnahtqualität und kurze Entwicklungszeiten realisieren zu können, bedarf es daher eines digitalen Simulationsmodells des Spann- und Fügeprozesses.

Die FE-Simulation wird bereits intensiv zur Auslegung der Fertigungsprozesse von Blecheinzelteilen eingesetzt (siehe Abschnitt 2.3.1). Werkstoffmodelle ermöglichen dabei die Modellierung der Eigenschaften von Blechwerkstoffen in der FE-Simulation. Beim Fügeprozess des Rollfalzens wird, wie beim Spannen, durch die mitlaufende Spanntechnik Kraft über eine Rolle in die zu fügenden Bauteile eingeleitet. Aus diesem Grund sollten sich einige Aspekte der Prozesssimulation des Rollfalzens auf die Spannsimulation mit mitlaufender Spanntechnik übertragen lassen (siehe Abschnitt 2.3.4). Bei der Prozesssimulation des Laserstrahlschweißens wird in der Literatur der Fokus auf Schweißverzug und Eigenspannungen in den gefügten Bauteilen gerichtet und nicht auf die resultierenden Fügespalte. Darüber hinaus findet sich in der Literatur kein Hinweis zur Berücksichtigung von Lasernoppen in der Prozesssimulation (siehe Abschnitt 2.3.5), die einen definierten Fügespalt zur Zinkentgasung ermöglichen.

Während die Prozesse des Clinchens und Rollfalzens bereits im Rahmen der digitalen Fertigungsprozesskette, unter Berücksichtigung der vorangegangenen Umformprozesse, erfolgreich mit Karosserieteilen validiert wurden, weisen weitere verkettete Simulationsmodelle von Umform- und Fügeprozessen im Karosseriebau noch Verbesserungspotential auf (siehe Abschnitt 2.3.6). Es findet sich kein übertragbares Konzept zur Entwicklung von Simulationsmodellen von Fügeprozessen für den Einsatz im Rahmen der digitalen Fertigungsprozesskette im Karosseriebau. Darüber hinaus fehlt in der Literatur ein allgemeines, in den Fahrzeugentwicklungsprozess eingebundenes Konzept zur digitalen Abbildung und Auslegung von Fügeprozessen. Des Weiteren stellt die in [10] geforderte Modellierung einer Spannrolle für Laserstrahlschweißprozesse im Karosseriebau insgesamt ein offenes Feld auf dem Gebiet der Prozesssimulation dar.

3 Zielsetzung der Arbeit und Vorgehensweise

Ziel dieser Arbeit ist die experimentelle und digitale Untersuchung des Spann- und Fügeprozesses beim robotergeführten Remote-Laserstrahlschweißen mit mitlaufender Spanntechnik zur Erarbeitung von prozess- und bauteilseitigen Maßnahmen zur Reduktion resultierender Fügespalte und erforderlicher Spannkkräfte. Hierzu gilt es, eine validierte Abbildung des Spann- und Fügeprozesses mit mitlaufender Spanntechnik mittels FE-Simulation zu erarbeiten. Der Spann- und Fügeprozess soll zum Aufbau von Prozessverständnis experimentell und simulativ zur Ermittlung von Prozessgrenzen und Wirkzusammenhängen geometrischer und werkstofftechnischer Parameter untersucht werden. Auf Basis der Untersuchungen gilt es, ein Prozessfenster für die neue Technologie der mitlaufenden Spanntechnik zu bestimmen.

Die erarbeiteten Simulationsmodelle sollen bereits in der frühen digitalen Entwicklungsphase die Auswahl der für diese Spann- und Füge-technologie geeigneten Bauteile, die fertigungsgerechte Auslegung der Bauteiltoleranzen, die Auslegung der Fertigungsprozessparameter und der Fügevorrichtung sowie die digitale Untersuchung realer Bauteile und Prozesse, mit dem Fokus auf resultierende Fügespalte und erforderliche Spannkkräfte, ermöglichen. Die Lücke der Modellierung von Spannprozessen mit Spannrollen im Rahmen der digitalen Fertigungsprozesskette im Karosseriebau soll durch die Simulationsmodelle dieser Arbeit geschlossen werden. Darüber hinaus soll aus der Vorgehensweise zur Abbildung und Auslegung des Spann- und Fügeprozesses mit mitlaufender Spanntechnik ein übertragbares Konzept zur Abbildung und Auslegung von Fügeprozessen im Rahmen der digitalen Fertigungsprozesskette im Karosseriebau abgeleitet werden. Dieses Konzept soll, neben der Berücksichtigung von Eingangsdaten aus der digitalen Bauteil- und Prozessentwicklung, auch die Berücksichtigung vermessener realer Bauteil- und Fügevorrichtungsgeometrie sowie erfasseter realer Fügeprozessparameter ermöglichen. Die Vorgehensweise zur experimentellen und digitalen Untersuchung von Fügeprozessen im Rahmen dieser Arbeit ist in Bild 7 dargestellt.

Mit einem Versuch zur Charakterisierung erforderlicher Spannkkräfte an Prinzipbauteilen gilt es, zunächst die Prozessgrenzen der mitlaufenden Spanntechnik zu untersuchen und eine Basis zur Validierung, der in mehreren Ausbaustufen erarbeiteten Simulationsmodelle, zu schaffen. Diese Modelle sollen erstmalig den flexiblen Spannvorgang mit einer Spannrolle

in der FE-Simulation abbilden. Zum Aufbau von Prozessverständnis werden mit Hilfe von Methoden des Design of Experiments die Einflüsse von Werkstoffparametern, geometrischen Einflussfaktoren und der Umformhistorie auf die erforderlichen Spannkkräfte simulativ untersucht. Die Modellierung des Fügeprozesses mittels Remote-Laserstrahlschweißen baut auf dem Simulationsmodell des Spannprozesses auf und wird durch Fügeversuche mit Prinzipbauteilen validiert.

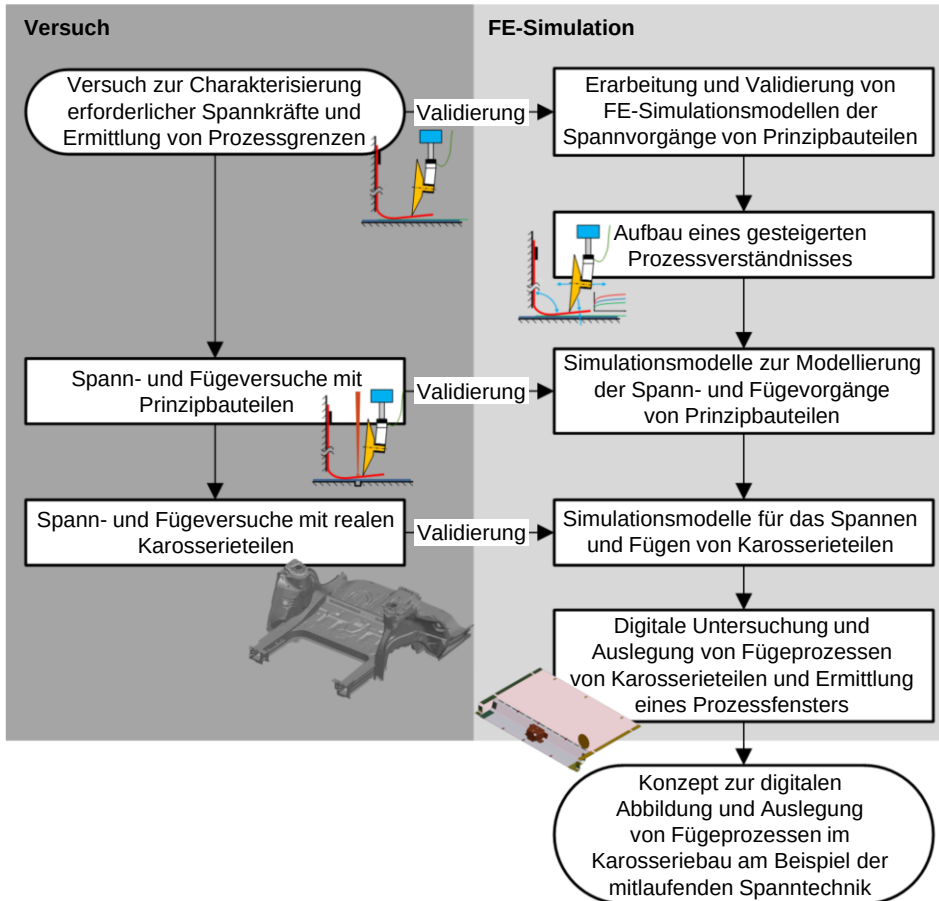


Bild 7: Vorgehensweise zur experimentellen und digitalen Untersuchung von Fügeprozessen

Darauf aufbauend wird der Übertrag des Simulationsmodells auf reale Karosserieteile angestrebt. Hierfür ist es erforderlich, dass die Bauteile unabhängig von den Koordinatenachsen und der Bauteilgeometrie, auf Bahnen im dreidimensionalen Raum mit der Spannrolle gespannt und gefügt wer-

den können. Durch einen Spann- und Fügeversuch am Beispiel des Zusammenbaus eines realen Heckwagens wird das Simulationsmodell validiert. Darüber hinaus wird das Simulationsmodell dahingehend ausgebaut, dass erstmalig in der FE-Simulation Spannkkräfte sensorbasiert während der Berechnung angepasst werden können. Damit kann unter Vorgabe von Zielfügespalten ein zum Erreichen dieser Zielfügespalte optimierter Spannkraftverlauf in einer einzelnen Simulation berechnet werden.

Durch die digitale Untersuchung und Auslegung des Spann- und Fügeprozesses des Zusammenbaus eines Heckwagens gilt es, dessen prozesssichere Fertigung unter Einsatz der mitlaufenden Spanntechnik zu ermöglichen. Hierzu wird die Auslegung des Spannprozesses und der Fügevorrichtung in Abhängigkeit von der Bauteiltoleranz durchgeführt. Des Weiteren wird ein Prozessfenster für erforderliche Spannkkräfte, zulässige Blechdicken und zulässige Bauteiltoleranzen bestimmt. Abschließend wird ein Konzept für den Einsatz von Simulationsmodellen zur frühzeitigen, digitalen und fertigungsgerechten Auslegung von Bauteilen, Fügeprozessen und Fügevorrichtungen im Karosseriebau und eine Handlungsempfehlung für den Einsatz der mitlaufenden Spanntechnik aufgezeigt.

4 Werkstoffe, Versuchsanlagen, Methoden und Simulationssoftware

Dieses Kapitel dient der Beschreibung der in den Versuchen und in der FE-Simulation eingesetzten Werkstoffe. Ferner werden die Anfertigung von Proben, die Versuchsaufbauten und die Auswertungsmethoden dargelegt. Darüber hinaus wird auf den Übertrag realer Bauteile in die Simulation und auf die Simulationsumgebung eingegangen. Dabei wird für die FE-Simulation in dieser Arbeit das Programm LS-DYNA® verwendet, das sich bereits auf dem Gebiet der Umform- und Fügeprozesse des Karosseriebaus bewährt hat (siehe Abschnitt 2.3.6).

4.1 Verwendete Werkstoffe

In dieser Arbeit werden Aluminium- und Stahlwerkstoffe verwendet, die im Karosseriebau in Strukturbauteilen eingesetzt werden, da der Fokus des Einsatzes der mitlaufenden Spanntechnik auf Strukturbauteile gerichtet ist. Die naturharte Aluminiumlegierung AA5182 der 5xxx-Serie wird häufig für umgeformte Strukturbauteile eingesetzt. Die für die Prinzipbauteile verwendete Werkstoffcharge mit einer durch eine Bügelmessschraube bestimmten Blechdicke von 1,98 mm ($\pm 0,007$ mm) wird durch Zugversuche (nach [95]) in 0° , 45° und in 90° zur Walzrichtung, hydraulische Tiefungsversuche [96], Zug-Druckversuche und Wechselbiegeversuche charakterisiert. Auf Basis der Charakterisierungsergebnisse wird die LS-DYNA® Materialkarte *MAT_BARLAT_YLD2000, auch als *MAT_133 bekannt [97], aufgebaut. Diese verwendet zur Beschreibung des Fließsorts das Modell Barlat 2000 [98]. Die Fließkurve wird nach Hockett-Sherby [99] approximiert. Die Berücksichtigung der isotrop-kinematischen Verfestigung erfolgt nach Chaboche und Rousselier [61]. Der Werkstoff weist einen E-Modul von 69 GPa und eine Anfangsfließspannung von 138 MPa auf. Die charakterisierte Fließkurve bei Raumtemperatur ist in Bild 8a dargestellt. Das Vorgehen bei den Zug-Druck- und Wechselbiegeversuchen wird in Abschnitt 4.2 beschrieben und die Ergebnisse werden in Abschnitt 5.2.1 bzw. Abschnitt 5.2.2 dargestellt. In dieser Arbeit wird AA5182 für alle Blechbauteile der Zusammenbauten und für alle realen Prinzipbauteile aus Aluminium verwendet.

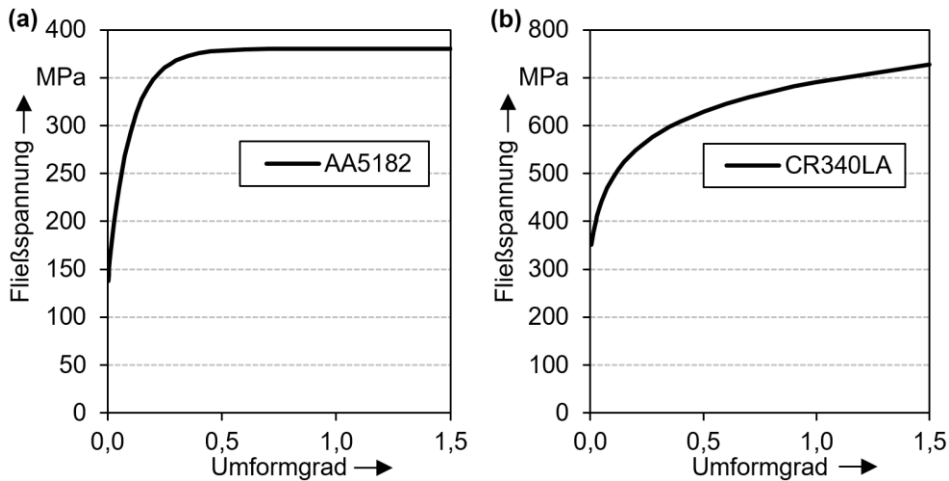


Bild 8: Charakterisierte Fließkurven bei Raumtemperatur von: (a) AA5182 und (b) CR340LA

Die mikrolegierte hochfeste Stahlgüte CR340LA zeichnet sich durch eine gute Umformbarkeit aus und wird ebenfalls häufig für Strukturbauteile eingesetzt. Der Stahlwerkstoff der für die Prinzipbauteile verwendeten Werkstoffcharge weist eine Blechdicke von 1,24 mm ($\pm 0,008$ mm) auf. Der Stahlwerkstoff wird mit den bereits beim Aluminiumwerkstoff aufgeführten Versuchen charakterisiert und ebenfalls durch die Materialkarte *MAT_BARLAT_YLD2000 in LS-DYNA® modelliert. Der Zugversuch wird dabei gemäß [100] durchgeführt. Das Approximieren der Fließkurve erfolgt nach Ghosh [101]. Der Werkstoff weist einen E-Modul von 205 GPa und eine Anfangsfließspannung von 356 MPa auf. Die Fließkurve bei Raumtemperatur ist in Bild 8b dargestellt. In dieser Arbeit wird CR340LA für alle realen Prinzipbauteile aus Stahl eingesetzt. Aus Korrosionsschutzgründen sind die CR340LA Platinen feuerverzinkt und benötigen beim Laserstrahlschweißen Lasernoppen zur Zinkentgasung (siehe Abschnitt 2.1.2).

Zur simulativen Untersuchung des Einflusses von mechanischen Werkstoffeigenschaften auf die zum Erreichen eines Nullspalts unterhalb der Spannrolle erforderlichen Spannkkräfte, werden Aluminium- und Stahlwerkstoffe mit höherer und mit geringerer Festigkeit als AA5182 bzw. CR340LA verwendet. Alle ausgewählten Werkstoffe werden in automobilen Strukturbauteilen eingesetzt. Bei AA5454 handelt es sich um eine 5xxx-Legierung mit vergleichsweise geringer Festigkeit und bei AA6111 um eine 6xxx-Legierung mit höherer Festigkeit als AA5182. Bei den Stahlwerkstoffen wird mit CR3 ein weicher Tiefziehstahl mit geringer Festigkeit und mit

CR330Y590T-DP ein hochfester Dualphasenstahl mit vergleichsweise hoher Festigkeit gewählt. Der E-Modul, die Anfangsfließspannung k_{f_0} und der Bauschinger-Koeffizient α_{BK} (siehe Gleichung (1) für eine Vordehnung von 0,12) der Werkstoffe sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Auch die vier hinzugenommenen Werkstoffe wurden durch Zugversuche in 0°, 45° und in 90° zur Walzrichtung, hydraulische Tiefungsversuche und Zug-Druckversuche charakterisiert.

Tabelle 1: Untersuchte Werkstoffe und deren mechanische Eigenschaften

Werkstoff	E-Modul [GPa]	k_{f_0} [MPa]	α_{BK} [-]
AA5454	69	106	0,62
AA5182	69	138	0,59
AA6111	70	160	0,72
CR3	204	164	0,64
CR340LA	205	356	0,41
CR330Y590T-DP	210	375	0,40

4.2 Versuchsaufbauten zur Ermittlung der für die Modellierung des Bauschinger-Effekts erforderlichen Parameter

Zur Charakterisierung des Werkstoffverhaltens von AA5182 und CR340LA bei Lastumkehr werden im Rahmen dieser Arbeit der miniaturisierte Zug-Druckversuch [55] und der Wechselbiegeversuch [102] eingesetzt. Auf Basis der Wechselbiegeversuche erfolgt durch inverse Parameteridentifikation die Ermittlung der Parameter zur Berücksichtigung des Bauschinger-Effekts (siehe Abschnitt 2.3.2) in den Materialkarten für die FE-Simulation.

4.2.1 Zug-Druckversuch

Für den Zug-Druckversuch werden Proben, deren Geometrie rechts in Bild 9 dargestellt ist, an einer Universalprüfmaschine Z100 der Zwick Roell AG in 0° zur Walzrichtung geprüft. Die maximal zulässige Prüfkraft beträgt dabei 100 kN und wird von einer Kraftmessdose der Genauigkeitsklasse 0,5

aufgezeichnet. Die Proben werden durch hydraulische Spannbacken eingespannt und mittels Stabilisierungsplatten gegen Ausknicken gesichert. Des Weiteren wirken die Miniaturisierung der Probengeometrie gegenüber dem Zugversuch nach DIN EN ISO 6892-1 [103] und die Säulenführung der Prüfvorrichtung einem Ausknicken entgegen.

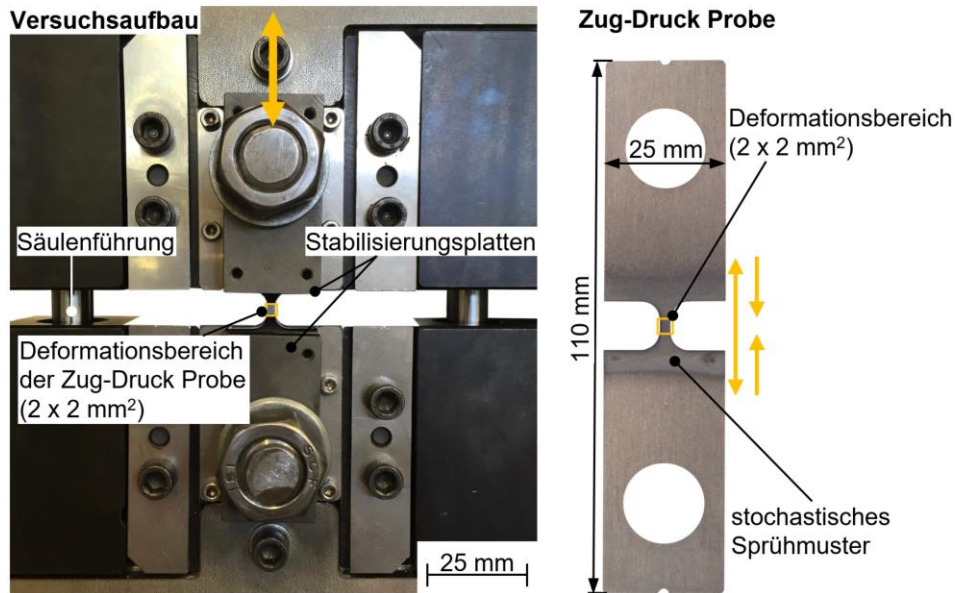


Bild 9: Zug-Druckversuch: Aufbau und Probe

Die Proben werden mit vorgegebenem Verfahrensweg der Traverse entsprechend der Darstellung in Bild 9 zuerst auf Zug und dann auf Druck belastet. Die Prüfung erfolgt mit den Dehnraten von $0,00667 \text{ s}^{-1}$ für AA5182 und $0,004 \text{ s}^{-1}$ für CR340LA (orientiert am Zugversuch). Die Prüfkraft und der Traversenweg werden rechnergestützt durch die Zwick-Software testXpert® II erfasst. Die optische Erfassung der Dehnungen im $2 \times 2 \text{ mm}^2$ großen Deformationsbereich erfolgt durch ein optisches ARAMIS 5M-System der GOM GmbH. Zur statistischen Absicherung erfolgen drei Versuche je Prüfkongfiguration.

4.2.2 Wechselbiegeversuch

Eine weitere Möglichkeit zur Charakterisierung des Werkstoffverhaltens bei Lastumkehr bietet der Wechselbiegeversuch, der eine Spannungs- und Dehnungsumkehr in der Biegeprobe ermöglicht. Dieser zeichnet sich durch eine hohe Reproduzierbarkeit sowie durch einen vergleichsweise einfachen und robusten Versuchsaufbau aus. Die Gefahr des Ausknickens,

die beim Zug-Druckversuch besteht, existiert beim Wechselbiegeversuch nicht. Während beim Zug-Druckversuch aus den aufgenommenen Spannungen und Dehnungen mit dem Bauschinger-Koeffizienten α_{BK} direkt der Bauschinger-Effekt charakterisiert werden kann, ist beim Wechselbiegeversuch eine inverse Bestimmung der Werkstoffparameter mittels FE-Simulation erforderlich [102].

Der Versuchsaufbau und eine Biegeprobe sind in Bild 10 dargestellt. Die Probe wird durch die beiden äußeren, auf einem Schlitten in x-Richtung geführten, passiven Spanneinheiten und durch die zentrale aktive Spanneinheit eingespannt. Die Walzrichtung des Probenwerkstoffs entspricht der x-Richtung der Vorrichtung. Die maximal zulässige Prüfkraft beträgt dabei 100 kN und wird wie bei den Zug-Druckversuchen von einer Kraftmessdose der Genauigkeitsklasse 0,5 aufgezeichnet. Die aktive Spanneinheit wird durch die Traverse der Universalprüfmaschine Z100 der Zwick Roell AG in z-Richtung mit einem Lastwechsel verfahren, dabei werden die auf Schlitten gelagerten passiven Spanneinheiten in x-Richtung verschoben. Die Probe wird dabei um die Biegeradien gebogen. Durch die gewählten Hubhöhen h und Biegeradien können die Umformbedingungen variiert werden. Auch hier werden die Prüfkraft und der Traversenweg rechnergestützt durch die Zwick-Software testXpert® II erfasst. Neben der Auswertung des Kraft-Hub-Verlaufs ist auch eine Auswertung der rückgefederten Geometrie möglich.

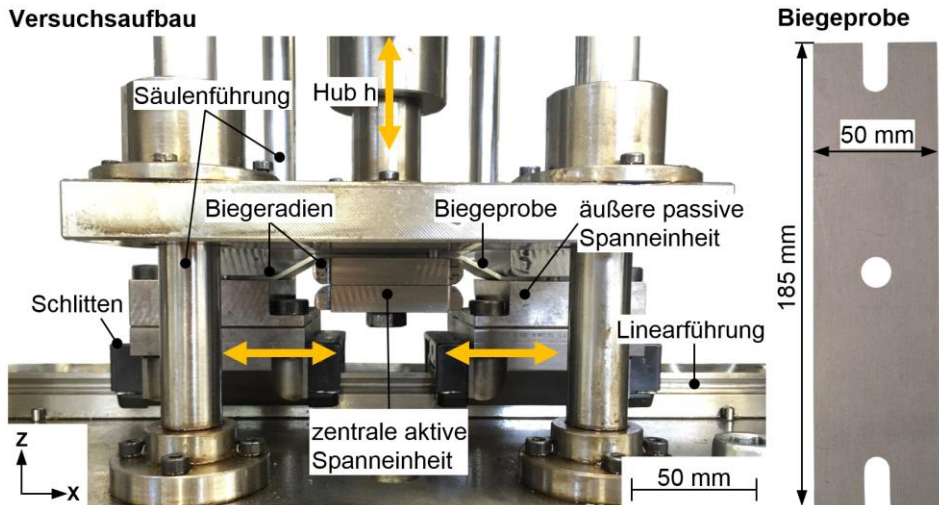


Bild 10: Wechselbiegeversuch: Aufbau und Probe

4.3 Versuchsaufbauten der mitlaufenden Spanntechnik

Zur Charakterisierung erforderlicher Spannkkräfte und zur Validierung der Simulationsmodelle werden Spann- und Fügeversuche an Prinzipbauteilen durchgeführt. Prinzipbauteile bilden für ein untersuchtes Fertigungsverfahren charakteristische Bauteilbereiche geometrisch vereinfacht und verallgemeinert ab. Somit können, durch den Einsatz von Prinzipbauteilen mit gezielter Variation der zu untersuchenden Parameter, einzelne Effekte gezielt analysiert und auf weitere Bauteile übertragbare Ergebnisse erzielt werden. Die Anfertigung der Prinzipbauteile und die eingesetzten Versuchsaufbauten zum Spannen bzw. Spannen und Fügen mit mitlaufender Spanntechnik werden in den drei folgenden Abschnitten beschrieben.

4.3.1 Herstellung der Prinzipbauteile

Für die Untersuchung des Spann- und Fügeprozesses beim Remotelaserstrahlschweißen mit mitlaufender Spanntechnik werden Prinzipbauteile eingesetzt, die vereinfacht und verallgemeinert gespannte Bauteilflansche von Karosserieteilen geometrisch abbilden. Die Prinzipbauteile sollen sich in großer Stückzahl unter Variation ihres gezielt nichtmaßhaltig ausführbaren Fügeflansches anfertigen lassen. Des Weiteren soll durch Anordnung des Spann- bzw. Fügepartners die Spannsituation variiert werden können. Als Prinzipbauteile werden daher L-Proben ausgewählt. Die Bezeichnung L-Probe der Prinzipbauteile orientiert sich am L-förmigen Profil der Proben (siehe Bild 11). Dabei handelt es sich um durch Biegen umgeformte Blechteile, die einen Bauteilflansch mit einer Länge von 20 mm aufweisen. Der Biegewinkel α_B wird nach dem Biegevorgang durch optische Vermessung geprüft (siehe Abschnitt 4.6). Die Beschreibung der dazugehörigen Versuchsaufbauten erfolgt in den beiden folgenden Abschnitten.

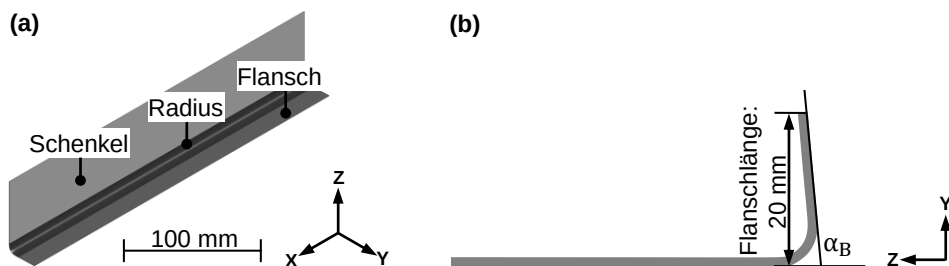


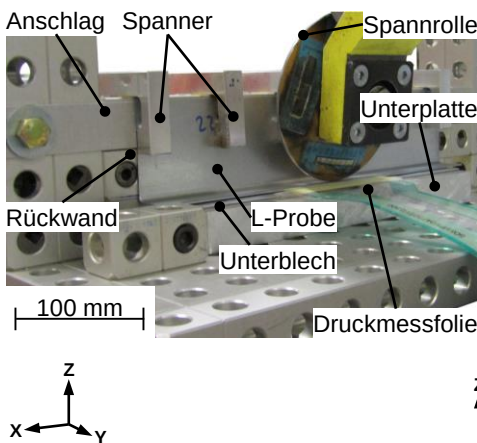
Bild 11: (a) Isometrische- und (b) Seitenansicht der L-Probe (Prinzipbauteile)

Die L-Proben werden aus Platinen mit den Maßen $240 \times 68 \text{ mm}^2$ durch freies Biegen in einem V-Gesenk gefertigt. Hierzu wird eine servoelektrische Abkantpresse (E-Brake 35-130T der SafanDarley BV) mit Werkzeugen der WILA BV (Stempelradius von 3 mm) verwendet.

4.3.2 Versuchsaufbau der Spannversuche mit Prinzipbauteilen

Bild 12 zeigt den Versuchsaufbau mit Spannunterlage. Bei diesem Versuchsaufbau wird das Unterblech unterhalb der Spannrolle durch eine Unterplatte abgestützt und eine L-Probe mit einem Biegewinkel α_B größer 90° zur Modellierung eines nichtmaßhaltigen Fügeflansches verwendet. Der Aufbau der Vorrichtung erfolgt mit Bauteilen aus dem Baukastensystem Alufix Classic der Witte Barskamp KG, die sich durch eine hohe Steifigkeit auszeichnen. Die L-Proben werden mit Hilfe von Anschlägen reproduzierbar positioniert. Die L-Probe liegt linienförmig auf dem Unterblech bzw. der Druckmessfolie auf. In x-Richtung befindet sich ein seitlicher Anschlag. Unterblech und Unterplatte weisen lediglich eine Länge in x-Richtung von 216 mm auf, wodurch die 240 mm lange L-Probe über sie hinausragt. Somit wird sichergestellt, dass aus dem Biegevorgang der L-Probe resultierende geometrische Randeffekte, die Positionierung der L-Probe nicht beeinflussen. Mittig unter der L-Probe wird zwischen dem Unterblech und der L-Probe eine Druckmessfolie mit 56 mm breitem Sensorbereich (Tekscan 5051 mit 62 Sensoren pro cm^2) des I-Scan Systems der Tekscan Incorporation angebracht.

Versuchsaufbau



Prinzipskizze

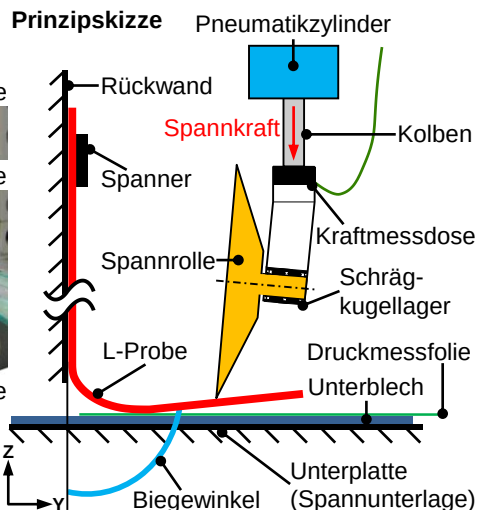


Bild 12: Versuchsaufbau und Prinzipskizze der Spannversuche mit Spannunterlage

Die Spannrolle der mitlaufenden Spanntechnik (siehe Abschnitt 2.2.3) fährt, geführt von einem KUKA KR210 R2700 prime Industrieroboter, in x-Richtung mit konstantem Abstand zur Rückwand und spannt den Flansch der L-Probe gegen das Unterblech. Ein Spaltschluss unterhalb der Spannrolle wird dabei entsprechend der Beschreibung in [104] durch die Druckmessfolie detektiert. Die aufgebrachte Spannkraft wird durch eine Kraftmessdose (Kistler 9301B, Bereich ± 1500 N, Genauigkeit: $\pm 6,9$ N) aufgezeichnet. Diese ist entsprechend Bild 13 in die mitlaufende Spanntechnik integriert. Dabei nimmt eine Linearführung mit einem Kugelwagen die Querkräfte in x- und y-Richtung auf. Somit entspricht die in z-Richtung aufgebrachte pneumatische Spannkraft F_p der durch die Kraftmessdose gemessenen Spannkraft F_K und der ins Bauteil geleiteten Spannkraft F_S .

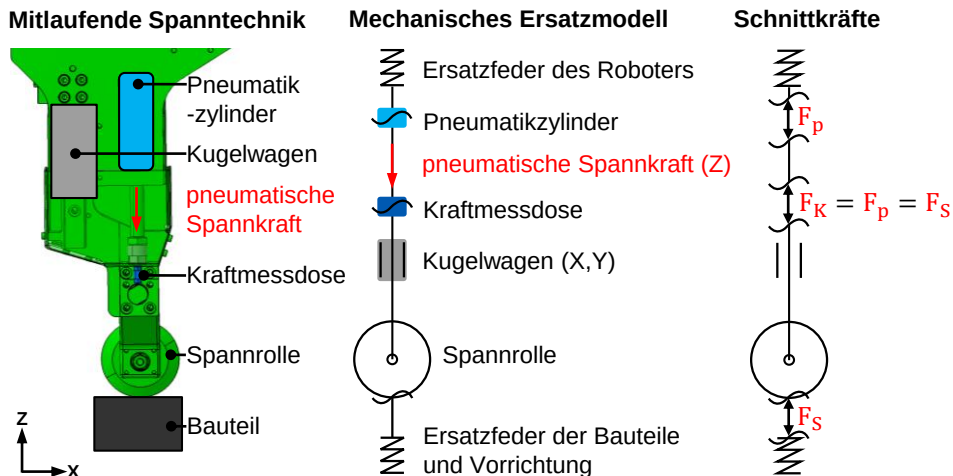
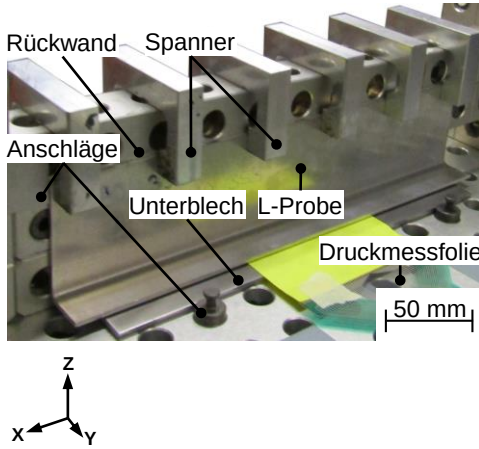


Bild 13: Integration der Kraftmessdose in die mitlaufende Spanntechnik mit Darstellung der Schnittkräfte

Beim in Bild 14 dargestellten Versuchsaufbau ohne Spannunterlage wird eine L-Probe mit einem Biegewinkel von 90° verwendet. Gegenüber dem Versuchsaufbau mit Spannunterlage entfällt die Unterplatte, so dass keine Abstützung des Unterblechs unterhalb der Spannrolle erfolgt. Der nicht-maßhaltige Fügeflansch wird durch einen definierten Anstellwinkel des Unterblechs mittels einer Anstellaufgabe realisiert.

Versuchsaufbau



Prinzipskizze

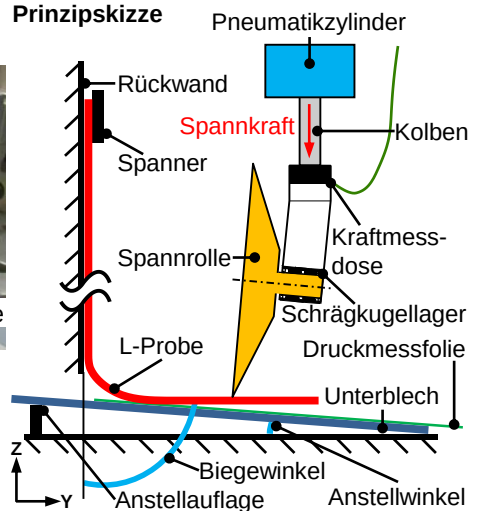


Bild 14: Versuchsaufbau und Prinzipskizze der Spannversuche ohne Spannunterlage

4.3.3 Versuchsaufbau der Spann- und Fügeversuche mit Prinzipbauteilen

Bei den Spann- und Fügeversuchen werden die Bauteile über die an der mitlaufenden Spanntechnik angebrachte Scanneroptik (siehe Abschnitt 2.1.1) mittels Remote-Laserstrahlschweißen durch einen Yb:YAG-Laser in einem Abstand von 5 mm zur Spannrolle gefügt. Dabei handelt es sich um einen Tiefschweißprozess (siehe [20]). Die Laserleistung beträgt 5,8 kW beim Schweißen der Aluminiumbleche und 4,4 kW beim Schweißen der verzinkten Stahlbleche. Bei letzteren werden Lasernoppen (siehe Abschnitt 2.1.2) zur Zinkentgasung eingesetzt.

Der Versuchsaufbau der Spann- und Fügeversuche entspricht im Wesentlichen dem der Spannversuche ohne Spannunterlage. Bei den Änderungen handelt es sich um den Verzicht auf die Druckmessfolie, da geschweißt wird. Des Weiteren wird zum Schutz der Vorrichtung bei einer möglichen Durchschweißung ein Folienblech verwendet. Es erfolgt die Auswertung der resultierenden Fügepalte an den Schweißnähten und der aufgetragenen Spannkraft.

4.4 Anfertigung und Auswertung von Bauteilschliffen

Die Fügepalte werden an Makroschliffen quer zur Schweißnaht optisch mittels Stereolichtmikroskop SZX12 der OLYMPUS® Corporation (siehe

Bild 15a) ausgewertet. Hierzu werden die Bauteile an der jeweiligen Nahtmitte quer zur Schweißnaht getrennt (siehe Bild 15b). Die herausgetrennten Probenstücke werden anschließend für die Untersuchung unter dem Mikroskop geschliffen. Die Makroschliffe werden mit 25-facher Vergrößerung unter dem Stereolichtmikroskop untersucht. Die Auswertung mit einer Wiederholgenauigkeit von $\pm 0,01$ mm erfolgt mittels integrierter Kamera (OLYMPUS® DP26). Der Fügespalt d_s wird links und rechts von der erstarrten Schmelze an der erkennbaren Blechkante gemessen (siehe Bild 15c). Meist ergibt sich dabei auf einer Seite ein größerer Fügespalt als auf der anderen. Der resultierende Fügespalt wird aus dem Mittelwert des rechten und linken Fügespalts bestimmt, um den mit erstarrter Schmelze gefüllten Spalt in der Nahtmitte anzunähern. Fügespalte unter 0,05 mm sind schwer messbar, da bei diesen der entstehende Grat nicht entfernt werden kann. Tritt an einem Schliff links und rechts der Schweißnaht kein messbarer Fügespalt auf, so wird die Schweißnaht an der Messstelle als spaltfrei gewertet. Tritt an einem Schliff nur einseitig ein messbarer Fügespalt auf, so wird der Spalt auf der gegenüberliegenden Seite der Schweißnaht mit 0,025 mm und damit der Hälfte eines zuverlässig messbaren Fügespalts, gewertet. Dies erfolgt, um den Fehler bei der Mittelwertbildung zur Berechnung des resultierenden Fügespalts möglichst gering zu halten.

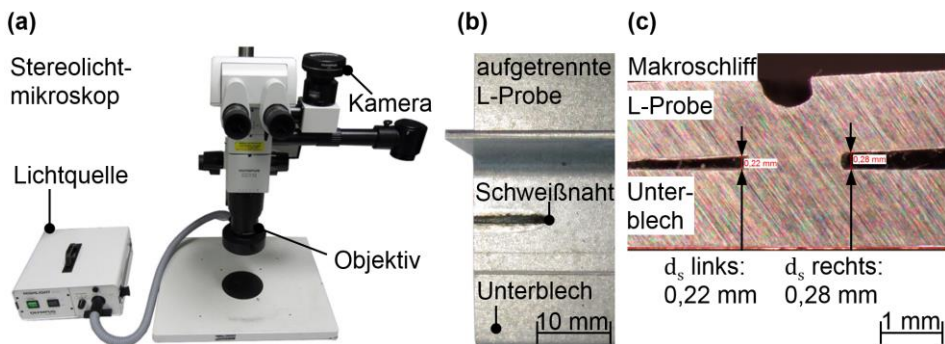


Bild 15: (a) Stereolichtmikroskop OLYMPUS® SZX12; (b) quer zur Schweißnaht getrennte L-Probe; (c) ausgewerteter Fügespalt an Makroschliff

4.5 Erfassung der Geometrie von Lasernoppen

Bei den Spann- und Fügeversuchen mit zinkbeschichteten CR340LA Blechen werden Lasernoppen, die in Bild 16a abgebildet sind, zum Sicherstellen eines Fügespalts eingesetzt. Durch den stets vorhandenen Fügespalt kann das beim Laserstrahlschweißen verdampfende Zink entweichen, ohne Fehlstellen in der Schweißnaht zu verursachen (siehe Abschnitt 2.1.2). Die Lasernoppen sollen in der FE-Simulation modelliert werden. Zur Erfassung

der Geometrie wird das Digitalmikroskop VHX-600D der KEYENCE® Corporation (siehe Bild 16b) mit dem KEYENCE® Objektiv VH-Z20R verwendet. Es ermöglicht die Aufnahme eines dreidimensionalen Bilds durch eine digitale Tiefenzusammensetzung mehrerer Bilder [105]. Die Geometrie der Lasernoppen wird mit 100-facher Vergrößerung aufgenommen. Bild 16c zeigt oben die erfasste Geometrie einer Lasernoppe mit Falschfarbendarstellung der Höhe, Bild 16c zeigt unten das Höhenprofil des rot markierten Schnitts durch die Lasernoppe. Die erfasste Geometrie des Noppenabdrucks auf dem Fügeflansch einer L-Probe, der während des Spann- und Fügeprozesses auf die Noppe gedrückt wurde, ist in Bild 16d dargestellt. Der Noppenabdruck wird mit 200-facher Vergrößerung aufgenommen, da hier das Messfeld kleiner gewählt werden kann.

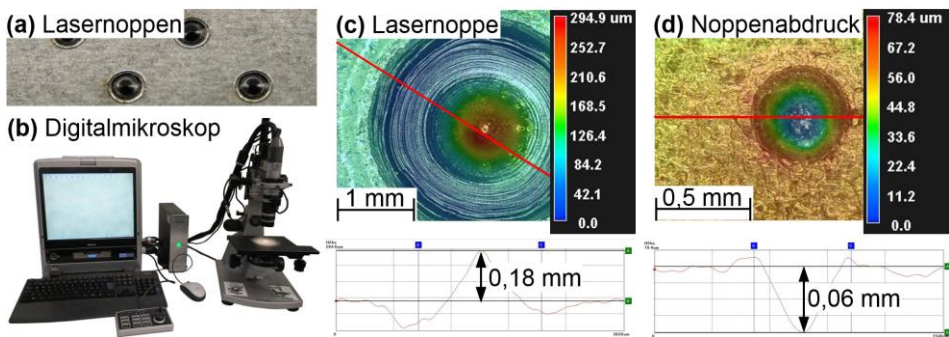


Bild 16: (a) Lasernoppen; (b) Digitalmikroskop; (c) erfasste Geometrie mit Höhenprofil und Schnittdarstellung einer Lasernoppe und (d) eines Noppenabdrucks

4.6 Digitalisierung von L-Proben mittels Calipri-Gap

Zum Messen des Biegewinkels der gefertigten L-Proben wird ein mobiles, handgeführtes Calipri-Gap C10 Messgerät der NextSense GmbH verwendet. Mit dem Calipri-Gap Messgerät wird das Profil der L-Proben mittels Lasertriangulation an drei Messschnitten (siehe Bild 17) vermessen. Das Calipri-Gap wird in der Automobilindustrie zur Falz- und Spaltnessung genutzt [106]. Die im Rahmen der Prüfmittelüberwachung bei der Daimler AG ermittelte Genauigkeit des verwendeten Geräts beträgt 0,02 mm. Ein Abgleich der Messgenauigkeit bei der Bestimmung des Biegewinkels von L-Proben in [104] zwischen dem Calipri-Gap und GOM ATOS, mit einem taktilen Koordinatenmessgerät als Referenz, zeigt für das Calipri-Gap eine geringfügig höhere Ergebnisgüte. Der Messaufwand bei der Verwendung des Calipri-Gaps ist dabei um ein Vielfaches geringer. Daher wird zur Vermessung von L-Proben das Calipri-Gap eingesetzt. Neben einer Auswertung des Biegewinkels kann auch das erfasste Profil der L-Probe exportiert und

von einem CAD-Programm eingelesen werden. Dies erfolgt mit dem vermessenen Profil von Messschnitt 2 in der Probenmitte (siehe Bild 17), wo später die erforderliche Spannkraft untersucht wird (siehe Abschnitt 4.3). Im CAD-Programm kann aus dem vermessenen Oberflächenprofil durch Extrudieren der Messkurve und durch einen Versatz der generierten Fläche die Mittelfläche erzeugt werden. Diese wird daraufhin für die FE-Simulation vernetzt. Es werden die Preprozessoren LS-PrePost® der Livermore Software Technology Corporation, HyperMesh® der Altair Engineering Incorporation und ANSA™ der BETA CAE Systems SA verwendet.

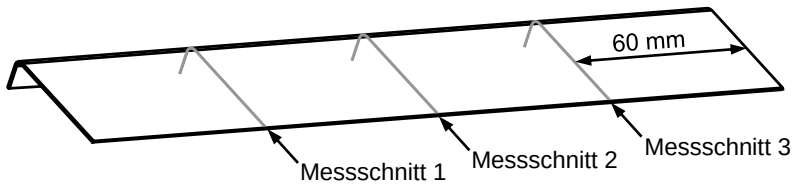


Bild 17: Messschnitte der L-Probe (im Abstand von 60 mm verteilt)

4.7 FE-Simulationsprogramm LS-DYNA®

Im Rahmen dieser Arbeit kommt ausschließlich das FE-Simulationsprogramm LS-DYNA® zum Einsatz. Dabei kann mit den in dieser Arbeit entwickelten Simulationsmodellen der Spann- und Fügevorgang in LS-DYNA® auch mit Simulationsergebnissen aus anderen Programmen, wie z. B. den Ergebnissen einer Umformsimulation aus AutoForm®, berechnet werden. Hierzu müssen die Daten entweder direkt im Keyword-Format exportiert oder von einem weiteren Programm (z. B. ANSA™) konvertiert werden.

Für die FE-Simulation wird in dieser Arbeit der LS-DYNA® Solver R9.0 verwendet. Die Berechnung des Spann- und Fügevorgangs erfolgt mit vollintegrierten Schalenelementen mit sieben Integrationspunkten über der Dicke. Diese Anzahl genügt den Anforderungen einer exakten Rückfederungssimulation [107], bei der ihre Anzahl kritisch ist. Daher werden sieben Integrationspunkte in einer Vielzahl von Arbeiten auf dem Feld der Rückfederungs- und Fugesimulation, unter anderem in [108], verwendet. Die Vernetzung der Bauteile erfolgt durch viereckige Schalenelemente, da sich dreieckige Schalenelemente bei Biegebelastungen zu steif verhalten [109]. Bei Prinzipbauteilen kommen ausschließlich viereckige Schalenelemente zum Einsatz, bei Karosserieteilen lässt sich ein marginaler Anteil an dreieckigen Schalenelementen aus geometrischen Gründen nicht vermeiden. Die Berücksichtigung der Kontaktflächen von Werkzeugen und Vorrichtungen erfolgt entsprechend der Modellierung in der Zusammenbausimulation [45] stets durch Starrkörper.

5 Untersuchung der Spann- und Fügeprozesse von Prinzipbauteilen

Für einen breiten Einsatz der neuen mitlaufenden Spanntechnik in der Karosseriefertigung wird neben einem grundlegenden Prozessverständnis auch ein Simulationsmodell zur Auslegung des Spann- und Fügeprozesses benötigt. In diesem Kapitel erfolgt die experimentelle Untersuchung des Spann- und Fügeprozesses von Prinzipbauteilen (siehe Abschnitt 4.3) sowie die Erarbeitung validierter Simulationsmodelle des Prozesses. Damit soll auf experimenteller und simulativer Basis ein grundlegendes Prozessverständnis für den neuen Spann- und Fügeprozess aufgebaut werden.

Ausgehend von der Modellierung einfacher Spannversuche werden die Simulationsmodelle stetig ausgebaut und mit Spann- und Fügeversuchen von Prinzipbauteilen abgeglichen. Der Spann- und Fügeprozess wird mechanisch berechnet. Dabei werden erstmalig in der Prozesssimulation auch die Lasernoppen zur Zinkentgasung beim Laserstrahlschweißen verzinkter Stahlbleche berücksichtigt. Es erfolgt eine Untersuchung der Einflüsse der Umformhistorie, der Werkstoffparameter und der geometrischen Einflussfaktoren auf erforderliche Spannkraften. Darüber hinaus werden die Einflüsse der Noppenhöhe und der Geschwindigkeit der Spannrolle auf resultierende Fügepalte untersucht.

5.1 Experimentelle Untersuchung des Spannprozesses

Zum Aufbau von Prozessverständnis des neuen Spannprozesses mit mitlaufender Spanntechnik und zur Untersuchung der Prozessgrenzen werden Versuche zur Charakterisierung erforderlicher Spannkraften durchgeführt. Mit einem neuartigen Versuchsaufbau werden die zum spaltfreien Spannen eines nichtmaßhaltigen Fügeflansches benötigten Spannkraften und die Beeinträchtigung der Bauteiloberfläche infolge des Spannprozesses mittels Proben aus AA5182 und CR340LA untersucht.

5.1.1 Charakterisierungsversuche des Spannvorgangs von L-Proben mit Spannunterlage

Für die Charakterisierung von Spannkraften, die zum spaltfreien Spannen eines nichtmaßhaltigen Fügeflansches erforderlich sind, werden die in Abschnitt 4.3.1 beschriebenen L-Proben aus AA5182 (Blechdicke 1,98 mm) und

CR340LA (Blechdicke 1,24 mm) eingesetzt. Die L-Proben werden durch freies Biegen im Gesenk angefertigt.

Da durch die mitlaufende Spann Technik Spannkkräfte von bis zu 1000 N aufgebracht werden können, ist eine Vorrichtung mit ausreichender Steifigkeit erforderlich. Durch Anschläge wird eine reproduzierbare Position der L-Proben sichergestellt. Die Charakterisierungsversuche werden mit dem in Abschnitt 4.3.2 beschriebenen Versuchsaufbau durchgeführt. Mit einem Biegewinkel der L-Proben von über 90° wird ein nichtmaßhaltiger Fügeflansch nachgestellt. Durch Variation des entsprechend Abschnitt 4.6 optisch vermessenen Biegewinkels und der damit einhergehenden Abweichung vom Sollmaß des Fügeflansches soll die Charakterisierung mit unterschiedlich hohen Spalten durchgeführt werden. Hierzu werden für beide Werkstoffe jeweils drei Konfigurationen mit unterschiedlich hohen Biegewinkeln eingesetzt. Die verwendeten mittleren Biegewinkel sind in Tabelle 2 aufgelistet, dabei werden je Konfiguration drei Proben geprüft.

Tabelle 2: Mittlere Biegewinkel mit Standardabweichungen der L-Proben für Spannversuche mit Spannunterlage ($n = 3$)

Werkstoff	Biegewinkel α_B Konfiguration 1	Biegewinkel α_B Konfiguration 2	Biegewinkel α_B Konfiguration 3
AA5182	90,8°±0,04°	91,4°±0,02°	91,9°±0,02°
CR340LA	90,8°±0,02°	91,4°±0,07°	91,8°±0,04°

Eine zwischen der L-Probe und dem Unterblech angebrachte Druckmessfolie detektiert einen während des Spannvorgangs geschlossenen Spalt unterhalb der Spannrolle. Der Schweißroboter führt die mitlaufende Spann Technik auf einer vorgegebenen Bahn mit einer konstanten Geschwindigkeit von 100 mm/s im Abstand von 14 mm zur Rückwand über den Flansch der L-Probe. Dieser Abstand basiert auf internen Normen des Abstands von Laserschweißnähten, die in dieser Versuchsreihe noch nicht erzeugt werden, und Spann Technik zum Radiusauslauf eines Fügeflansches. Demnach darf die Spannrolle, entsprechend dem Prozessspanner in der Norm, einen Abstand zur Rückwand von 14 bis 18 mm aufweisen. Damit wird eine freie Flanschüberlappung von mindestens 3,5 mm zwischen Radiusauslauf und Nahtmitte und ein Abstand der Spannrolle zur Flansch kante von mindestens 2 mm zur Sicherstellung der Prozesssicherheit und Verbindungsfestigkeit gewährleistet. Es wird ein Abstand von 14 mm gewählt, um einen möglichst kurzen Fügeflansch zu realisieren, da im Karosseriebau zur

Gewichtsreduktion ebenfalls möglichst kurze Fügeflansche angestrebt werden. Die Spannkraft der mitlaufenden Spanntechnik wird kraftgesteuert durch einen Pneumatikzylinder aufgebracht (siehe Abschnitt 2.2.3). Die Vorgabe der Spannkraft erfolgt basierend auf Vorversuchen und wird so gewählt, dass bei der ersten Überfahrt der Spannrolle kein Spaltschluss auftritt. In den darauffolgenden Überfahrten wird die Spannkraft stets in 20 N Schritten erhöht, bis ein durchgängiger Spaltschluss von der Druckmessfolie unterhalb der Spannrolle detektiert wird. Während bei Spann- und Fügevorgängen von Karosserieteilen die Spannkraft in 50 N Schritten vorgegeben werden kann, werden hier 20 N Schritte gewählt. Durch die Schrittweite von 20 N soll die Anzahl der Spannvorgänge gering gehalten werden, um der plastischen Verformung der Fügeflansche infolge einer erhöhten Anzahl der Spannvorgänge entgegenzuwirken. Auf eine geringere Schrittweite bei der Erhöhung der Spannkraft wird daher verzichtet. Die Reduktion des Biegewinkels infolge der Spannversuche beträgt im Mittel $0,24^\circ$ bei den AA5182-Proben und $0,16^\circ$ bei den CR340LA-Proben. Die Anzahl der Spannvorgänge je Probe beträgt im Mittel fünf, dabei wird die Spannkraft viermal um 20 N erhöht. Des Weiteren werden während der Versuche die Position der Spannrolle, die auf Basis des pneumatischen Drucks berechnete Spannkraft und die über die Kraftmessdose aufgenommene Spannkraft aufgezeichnet.

Die über der x-Koordinate je einer L-Probe aus AA5182 und aus CR340LA aufgezeichneten Kraft-Weg-Verläufe sind in den Diagrammen von Bild 18 dargestellt. Die Verläufe basieren auf den aufgezeichneten Daten der Kraftmessdose und der Pneumatikeinheit. Die mitlaufende Spanntechnik wird vom Schweißroboter mit konstanter Geschwindigkeit bewegt. Ab einer programmierten Rollenposition über dem Bauteil beginnt der Spannvorgang. Dabei verfährt der Pneumatikzylinder die Spannrolle weggesteuert, bis er einen Gegendruck durch das Aufsetzen der Spannrolle detektiert und regelt dann auf die vorgegebene Spannkraft. Es fällt auf, dass die von der Pneumatikeinheit erfassten Spannkräfte von der durch die Kraftmessdose erfassten abweichen. Die Abweichung der durch die Pneumatikeinheit ermittelten Spannkräfte ist auf die variierenden Steifigkeiten des Roboters und des Bauteils zurückzuführen. Die von der Pneumatikeinheit ermittelten Spannkräfte weisen eine unzureichende Genauigkeit für Charakterisierungsversuche auf. Daher wird zur Ermittlung der aufgebrachten Spannkräfte eine Kraftmessdose in die mitlaufende Spanntechnik integriert (siehe Abschnitt 4.3.2). Die für den Spaltschluss erforderliche Spannkraft wird durch den Mittelwert der von der Kraftmessdose erfassten Spannkräfte im Bereich der Druckmessfolie (in Bild 18 grau unterlegt) bestimmt,

da in diesem mittleren Bereich der L-Proben der Spaltschluss detektiert wird. Die im Bereich der Druckmessfolie gemittelte erforderliche Spannkraft der L-Proben in Bild 18 beträgt 493 N (Standardabweichung 4 N) für AA51825 und 300 N (Standardabweichung 3 N) für CR340LA. Vor und hinter dem Bereich der Druckmessfolie zeigt sich jeweils eine lokale Erhöhung bzw. Verringerung der mittels Kraftmessdose gemessenen Spannkraft (markiert in Bild 18). Diese Änderungen der Spannkraft sind auf die Änderung der Probennachgiebigkeit zurückzuführen. Durch die im Bereich der Probenmitte unterlegte Druckmessfolie ergibt sich für Bereiche außerhalb der Probenmitte ein Spalt von 0,2 mm zwischen L-Probe und Unterblech.

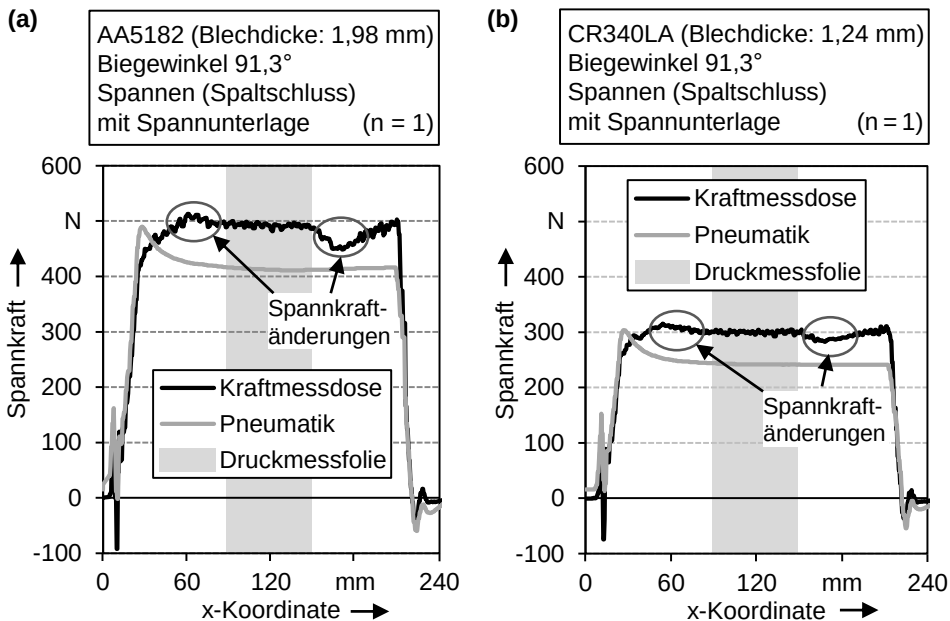


Bild 18: Kraft-Weg-Verläufe des Spannvorgangs einer L-Probe mit einem Biegewinkel von $91,3^\circ$ aus (a) AA5182 und (b) CR340LA

Der Vergleich zwischen den ermittelten erforderlichen Spannkraften der AA5182 und CR340LA Probe in Bild 18 zeigt, dass bei einem Biegewinkel von $91,3^\circ$ für die AA5182 Probe eine deutlich höhere Spannkraft erforderlich ist. Diese liegt 35,7 % über der Spannkraft der CR340LA Probe. Der Werkstoff AA5182 verfügt zwar über einen um 66,3 % geringeren E-Modul und eine um 61,1 % geringere Anfangsfließspannung als CR340LA (siehe Tabelle 1), allerdings ist seine Blechdicke um 59,7 % höher als die des Werkstoffs CR340LA. Aus der höheren Blechdicke von AA5182 resultiert ein um 155,0 % erhöhter Biege widerstand, der hinsichtlich der erforderlichen

Spannkraft gegenüber den Werkstoffkennwerten mit geringerer Steifigkeit und Festigkeit überwiegt.

Bild 19a zeigt den Spannversuch mit Spannunterlage einer CR340LA L-Probe mit einem Biegewinkel von $91,4^\circ$. Die Versuchsergebnisse der drei Konfigurationen (siehe Tabelle 2) der Spannversuche mit Spannunterlage, die mit jeweils drei L-Proben je Konfiguration durchgeführt werden, sind in Bild 19b dargestellt. Die drei Konfigurationen beider Werkstoffe zeigen einen näherungsweise linearen Anstieg der erforderlichen Spannkraft mit zunehmendem Biegewinkel. Dabei weisen die Aluminiumproben mit zunehmendem Biegewinkel einen deutlich steileren Anstieg als die Stahlproben auf. Diese und weitere Einflussgrößen auf erforderliche Spannkraft für das Spannen von L-Proben mit Spannunterlage werden in Abschnitt 5.4 untersucht.

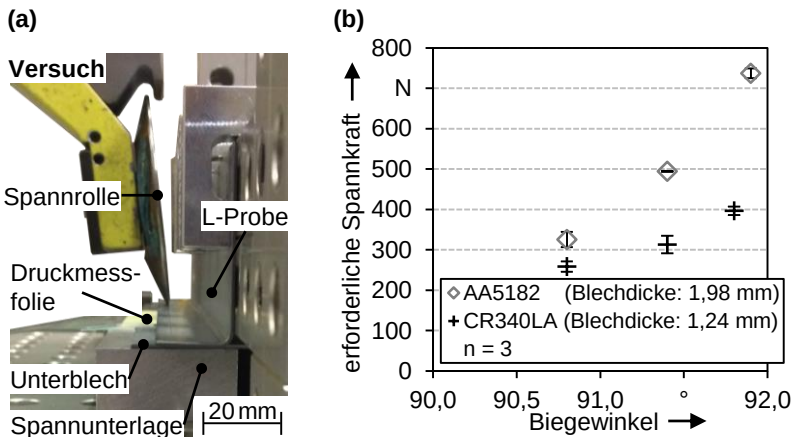


Bild 19: (a) Spannversuch mit Spannunterlage; (b) experimentell ermittelte erforderliche Spannkraft für das Spannen von L-Proben mit Spannunterlage aus AA5182 und CR340LA

5.1.2 Untersuchung der Prozessgrenzen

Für den Einsatz der mitlaufenden Spanntechnik besteht die Voraussetzung, dass die geometrische Zugänglichkeit zum Bauteil gegeben ist. Die Bauteilzugänglichkeit lässt sich durch standardisierte Methoden in kommerzieller Software zur Roboter Offline-Programmierung absichern. Die durch die mitlaufende Spanntechnik aufbringbare Spannkraft ist durch den eingesetzten Pneumatikzylinder (siehe Bild 13) begrenzt und beträgt im verwendeten System nominal 1000 N. Beim Spannvorgang mit der Spannrolle hinterlässt diese eine Rille auf der Blechoberfläche. Die Rille

beeinträchtigt die Lackanhaftung im auf den Fügeprozess folgenden Lackierungsprozess negativ. Darüber hinaus verringert die Rille, durch die von ihr verursachte Kerbwirkung, die Bauteilfestigkeit. Aus diesen Gründen wird im Folgenden für das Spannkraftspektrum der mitlaufenden Spanntechnik der Zusammenhang zwischen der Höhe der Spannkraft und der resultierenden Rillentiefe auf den Blechen untersucht.

Im Rahmen der Untersuchung werden ebene Bleche aus AA5182 und CR340LA mit der Spannrolle gegen eine Spannunterlage (vgl. Bild 19) gespannt. Dabei wird jede Spannkraft auf drei Probenblechen aufgebracht. Die Rille wird analog zum Erfassen der Noppenhöhe bzw. der Abdrucktiefe der Lasernoppen (siehe Abschnitt 4.5) durch das Digitalmikroskop mit 100-facher Vergrößerung erfasst und ausgewertet (siehe Bild 20a).

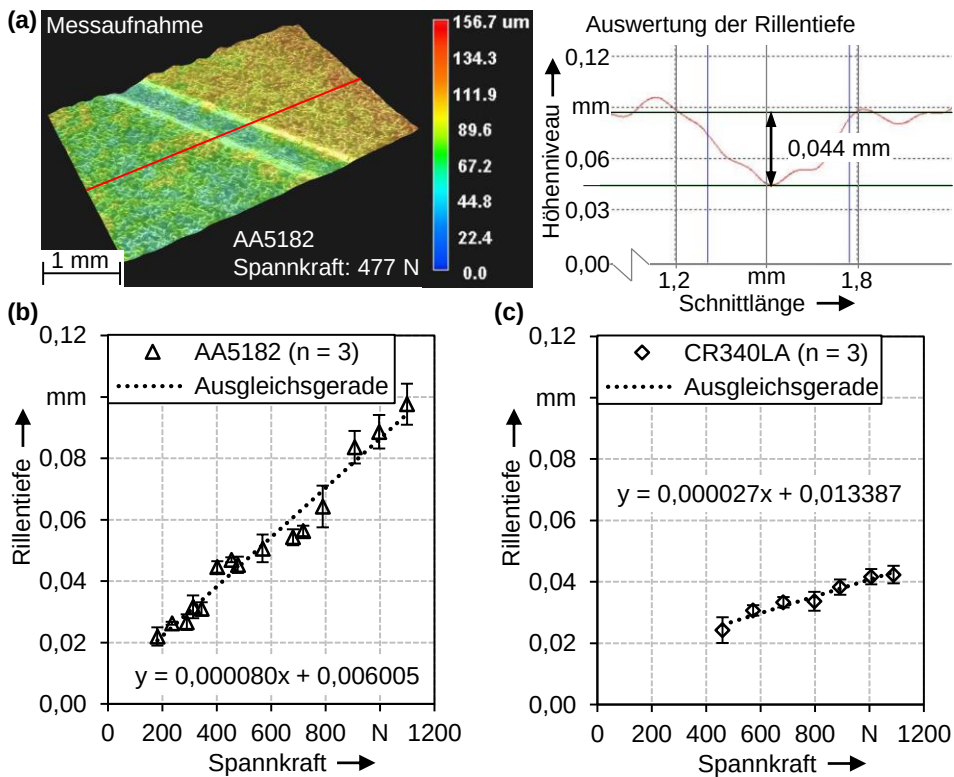


Bild 20: Rillen auf ebenen Blechen – verursacht durch den Spannvorgang der mitlaufenden Spanntechnik; (a) erfasste Geometrie mit dem Höhenprofil als Falschfarbenbild einer Rille auf AA5182 und Schnittdarstellung zur Auswertung deren Tiefe; Rillentiefen auf ebenen Blechen aus (b) AA5182 und (c) CR340LA in Abhängigkeit der aufgetragenen Spannkraft

Die gemessenen Rillentiefen sind in Bild 20b für AA5182 und in Bild 20c für CR340LA über der aufgetragenen Spannkraft aufgetragen. Für beide Werkstoffe zeigt sich ein näherungsweise linearer Zusammenhang zwischen der Rillentiefe und der aufgetragenen Spannkraft. An den Steigungen der Ausgleichsgeraden wird für den weicheren AA5182 eine deutlich stärkere Zunahme der Rillentiefe mit ansteigender Spannkraft gegenüber dem härteren CR340LA deutlich. Der Stahlwerkstoff verfügt darüber hinaus über eine erheblich höhere Anfangsfließspannung und Festigkeit (siehe Abschnitt 4.1), auf die der schwächere Anstieg der Rillentiefe ebenfalls zurückgeführt werden kann. Bei AA5182 können bereits bei 182 N zuverlässig messbare Rillentiefen von über 0,02 mm ermittelt werden, bei CR340LA ist dies erst bei 459 N der Fall. Die ermittelten Verläufe aus Bild 20b und c können zur Abschätzung der resultierenden Rillentiefe bei der Spannkraftauslegung der mitlaufenden Spanntechnik herangezogen werden. Die zulässige Rillentiefe wird dabei auf Basis der Anforderungen an die Crashfestigkeit und an die Lackierung bauteilspezifisch definiert. Für den in Abschnitt 6.2 untersuchten Heckwagen beträgt die zulässige Rillentiefe aus Gründen der Crashfestigkeit 0,05 mm.

5.2 An auftretende Lastfälle angepasste Werkstoffcharakterisierung

Während des Spannvorgangs unter Einsatz der mitlaufenden Spanntechnik (siehe Abschnitt 4.3.2) werden die L-Proben in die entgegengesetzte Richtung des Biegevorgangs der Probenanfertigung (siehe Abschnitt 4.3.1) gebogen. Der Wechsel der Belastungsrichtung bewirkt bei Blechwerkstoffen auf Grund des Bauschinger-Effekts eine Reduktion der Fließspannung (siehe Abschnitt 2.3.2). Infolge der verringerten Fließspannung reduzieren sich die Prozesskräfte bei einem Wechselbiegevorgang. In der FE-Simulation kann durch die Umformhistorie und durch den Einsatz entsprechender Materialmodelle der Bauschinger-Effekt berücksichtigt werden.

5.2.1 Ermittlung der Bauschinger-Koeffizienten durch Zug-Druckversuche

Der Bauschinger-Effekt lässt sich durch den Bauschinger-Koeffizienten α_{BK} entsprechend Gleichung (1) aus dem Verhältnis der erreichten Fließspannung bei Erstbelastung k_{f_1} und der Fließspannung nach dem Lastwechsel k_{f_2} quantifizieren. Die Zug-Druckversuche werden entsprechend dem in Abschnitt 4.2.1 beschriebenen Vorgehen durchgeführt. Es werden für

AA5182 und CR340LA Prüfprofile mit Vordehnungen (φ_{vor}) von 0,03; 0,06 und 0,12 mit jeweils drei Wiederholungen geprüft. Durch die Variation der Vordehnung kann deren Einfluss auf den resultierenden Bauschinger-Koeffizienten überprüft werden. Bei den Prüfprofilen wird ein Traversenweg bis zum Erreichen der wahren Dehnung von $\varphi = 0$ zur Bestimmung des Bauschinger-Koeffizienten mit einem Lastwechsel ausgewertet. Dies ist ausreichend, da die L-Proben nur um wenige Grad in die entgegengesetzte Richtung ihrer vorhergehenden Umformung zurückgebogen werden.

In Bild 21 sind die resultierenden Spannungs-Dehnungskurven der drei Prüfprofile beider Werkstoffe aufgetragen. Die erreichte Fließspannung bei Erstbelastung k_{f1} sowie die Fließspannung nach dem Lastwechsel k_{f2} sind dabei markiert. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird jeweils eine der drei Kurven eines jeden Prüfprofils dargestellt. Die ermittelten Bauschinger-Koeffizienten sind in Tabelle 3 zusammengefasst. Es wird deutlich, dass die Vordehnung die Bauschinger-Koeffizienten beeinflusst. Dies wurde auch im Rahmen von Untersuchungen in [110] ermittelt, dort wurden zur Bestimmung des Bauschinger-Koeffizienten Vordehnungen von ca. 50 % der Bruchdehnung empfohlen. Die im Zugversuch ermittelte Bruchdehnung in Walzrichtung von AA5182 beträgt 0,22 und die von CR340LA 0,30. Entsprechend wird für die charakterisierten Werkstoffe jeweils der durch Prüfprofil 3 ($\varphi_{\text{vor}} = 0,12$) ermittelte Bauschinger-Koeffizient von 0,59 für AA5182 und von 0,41 für CR340LA verwendet. Damit ist der Bauschinger-Effekt bei CR340LA deutlich stärker ausgeprägt als bei AA5182.

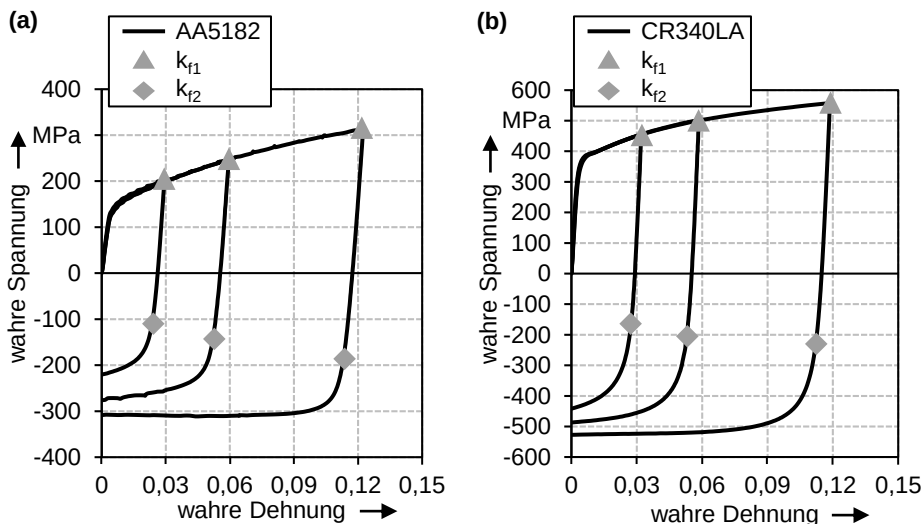


Bild 21: Ergebnisse der Zug-Druckversuche von (a) AA5182 und (b) CR340LA

Die in Tabelle 3 aufgeführten Bauschinger-Koeffizienten liegen, orientiert an der Literatur, für AA5182 im erwarteten Bereich. In [110] wurden für $\varphi_{\text{vor}} = 0,03; 0,06; 0,12$ mit den mittleren Bauschinger-Koeffizienten von $\alpha_{\text{BK}} = 0,58; 0,60; 0,60$ vergleichbare Werte ermittelt. Für mikrolegierte hochfeste Stähle finden sich keine Untersuchungsergebnisse in der Literatur. Hochfeste Stähle zeigen in [110] (DP-K 45/78) und in [111] (HCT780X) ebenfalls einen deutlich stärkeren Bauschinger-Effekt als die Aluminiumlegierungen AA5182 bzw. AA6014-T4.

Tabelle 3: Ermittelte Bauschinger-Koeffizienten mit Standardabweichungen und $n = 3$

Prüfprofil	α_{BK} AA5182	α_{BK} CR340LA
1 ($\varphi_{\text{vor}} = 0,03$)	$0,53 \pm 0,01$	$0,36 \pm 0,01$
2 ($\varphi_{\text{vor}} = 0,06$)	$0,56 \pm 0,01$	$0,41 \pm 0,01$
3 ($\varphi_{\text{vor}} = 0,12$)	$0,59 \pm 0,01$	$0,41 \pm 0,01$

5.2.2 Ermittlung von Parametern durch Wechselbiegeversuche zur Berücksichtigung des Bauschinger-Effekts in den Materialkarten

Um den Einfluss des Bauschinger-Effekts auf das Wechselbiegeverhalten der charakterisierten Werkstoffe in den Materialkarten zu berücksichtigen, werden Wechselbiegeversuche (siehe Abschnitt 4.2.2) in Kombination mit einer inversen Parameteridentifikation durchgeführt. Der Wechselbiegeversuch wird gewählt, da die Wechselbiegebelastung der Versuchsproben der Belastung der L-Proben während des Biege- und Spannvorgangs am nächsten kommt. Da in dieser Arbeit der Fokus auf den Prozesskräften und nicht auf der rückgefederten Bauteilgeometrie liegt, erfolgt neben der Auswertung des Kraft-Hub-Zusammenhangs im für die Spann- und Fügevorgänge relevanten Bereich keine Auswertung der rückgefederten Probengeometrie. Zur Beschreibung des isotrop-kinematischen Verfestigungsverhaltens wird das Modell von Chaboche und Rousselier (siehe Abschnitt 2.3.2) mit zwei Rückspannungstermen gewählt, das nach [112] im Vergleich zum Modell von Yoshida und Uemori bei einem deutlich geringeren Optimierungsaufwand dieselbe Güte der Ergebnisse liefert.

Die Biegewinkel der L-Proben von 90° und höher lassen sich im Wechselbiegeversuch aus geometrischen Gründen nicht realisieren. Der in LS-DYNA® ausgewertete maximale Umformgrad der durch Biegesimulation

generierten L-Proben (siehe Anhang 1) mit einem Biegewinkel von $91,5^\circ$ beträgt im Radiusbereich für AA5182 0,28 und für CR340LA 0,22. Um vergleichbare Umformgrade im Radiusbereich zu erreichen, werden die Wechselbiegeversuche für beide Werkstoffe nicht um einen Biegeradius von 3 mm, der dem Biegewerkzeugradius der L-Proben entspräche, sondern um einen Radius von 2 mm gebogen. Dadurch werden in LS-DYNA® für die Wechselbiegeprobe aus AA5182 ein Umformgrad von 0,26 und für die Wechselbiegeprobe aus CR340LA ein Umformgrad von 0,23 erreicht. Es werden jeweils drei Wiederholungen der Versuche durchgeführt. Die resultierenden gemittelten Kraft-Hub-Verläufe aus den Versuchen sind in Bild 22 schwarz dargestellt.

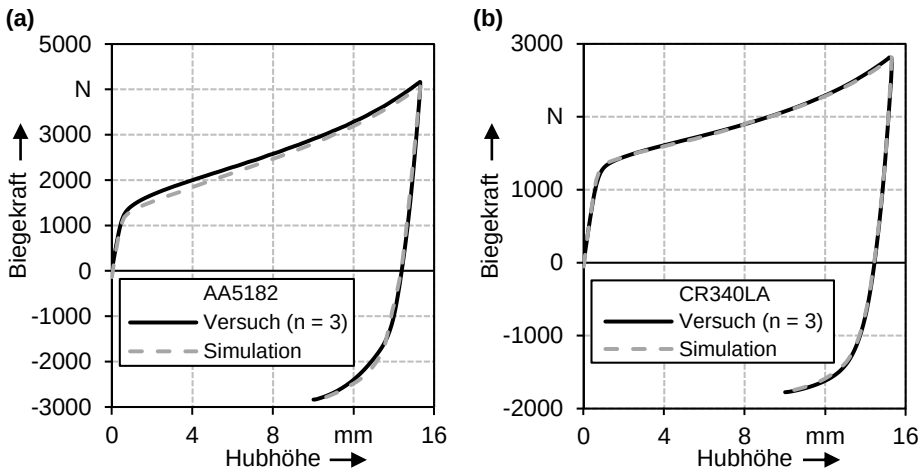


Bild 22: Ergebnisse der experimentellen Wechselbiegeversuche und der FE-Simulation mit gefitteten Materialparametern von (a) AA5182 und (b) CR340LA

Der symmetrische Versuchsaufbau ermöglicht es, die inverse Parameteridentifikation mit einem Viertelmodell durchzuführen. Hierzu wird der in [102] beschriebene Simulationsaufbau verwendet. Im Rahmen einer inversen Parameteridentifikation mittels „Successive Response Surface Method“ in LS-OPT® werden die vier Parameter für zwei Rückspannungsterme des isotrop-kinematischen Verfestigungsansatzes nach Chaboche und Rousseilier durch Optimierung angenähert. Dabei wird die Abweichung zwischen den experimentell ermittelten und simulierten Kraft-Hub-Verläufen minimiert. Die Methodik der inversen Parameteridentifikation unter Verwendung des Wechselbiegeversuchs ist ausführlich in [62] beschrieben. In Tabelle 4 sind die ermittelten Chaboche-Parameter C_i und a_i zusammengefasst. Die damit berechneten Kraft-Hub-Verläufe (grau gestrichelt in

Bild 22 dargestellt) sind nahezu deckungsgleich mit den experimentell ermittelten Verläufen. Der in LS-DYNA® ausgewertete Umformgrad im Radiusbereich der Proben des Wechselbiegeversuchs beträgt für AA5182 0,24 und für CR340LA 0,22 und liegt damit im Bereich des Umformgrads der L-Proben (siehe oben).

Tabelle 4: Chaboche-Parameter aus inverser Parameteridentifikation

Werkstoff	C_1	a_1 [MPa]	C_2	a_2 [MPa]
AA5182	56,09	43,07	1,27	37,89
CR340LA	23,81	105,08	501,85	254,92

5.3 Simulationsmodell für das weggesteuerte Spannen

Um erstmalig in der Prozesssimulation die in [10] geforderte Modellierung einer Spannrolle für das Laserstrahlschweißen zu realisieren, soll ein Simulationsmodell zur Ermittlung der zum Spaltschluss unterhalb der Spannrolle erforderlichen Spannkkräfte erarbeitet und validiert werden. Hierfür werden die Charakterisierungsversuche aus Abschnitt 5.1.1 mit dem Prinzipbauteil „L-Probe“ als experimentelle Referenz herangezogen. Die L-Probe verfügt über einen gängigen, nichtmaßhaltigen Fügeflansch und wird in Spannversuchen mit den Werkstoffen AA5182 (Blechdicke 1,98 mm) und CR340LA (Blechdicke 1,24 mm) gegen ein ebenes Unterblech, das auf einer Spannunterlage angebracht ist, gespannt. Dabei werden die für den Spaltschluss unterhalb der Spannrolle erforderlichen Spannkkräfte ermittelt.

Zur Untersuchung des Einflusses der Umformhistorie auf die erforderlichen Spannkkräfte in der Simulation werden die L-Proben numerisch mittels Umformsimulation und anschließender Berechnung der Rückfederung generiert. Die simulative Generierung von L-Proben mit Umformhistorie wurde in [113] veröffentlicht und ist in Anhang 1 beschrieben. Mit der darauffolgenden Spannsimulation können die erforderlichen Spannkkräfte von L-Proben mit und ohne Umformhistorie abgeglichen werden.

5.3.1 Aufbau des Simulationsmodells für das weggesteuerte Spannen

Die Prozesssimulation des Spannvorgangs wird in Anlehnung an die allgemeine FE-Simulation von Fügeprozessen im Karosseriebau (siehe Abschnitt 2.3.3) in die Simulationsschritte „Einlegen“, „Spanner Schließen“ und „Spannen“ unterteilt (siehe Bild 23). Die Berechnung wird in LS-DYNA® (siehe Abschnitt 4.7) durchgeführt. Dabei wird das Simulationsergebnis stets als „dynain“-Datei zwischen den Simulationsschritten übergeben.

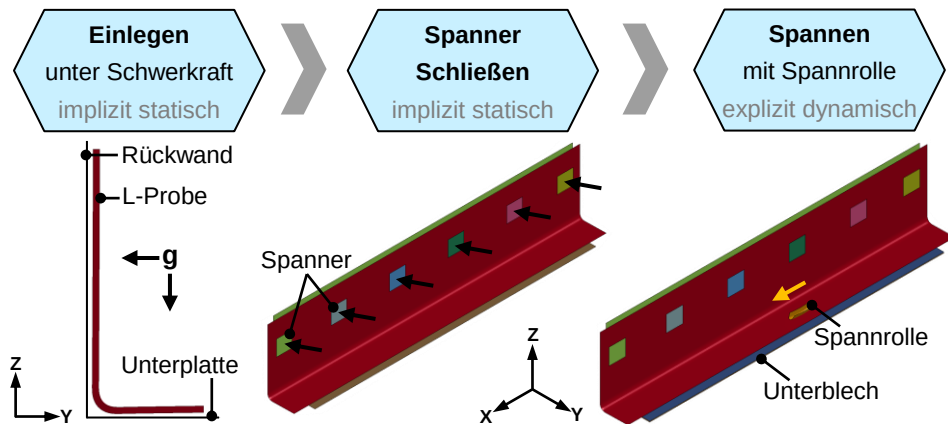


Bild 23: Berechnungsschritte des Simulationsmodells zum Spannen von L-Proben mit Spannunterlage

Entsprechend der Darstellung in Bild 23 erfolgt das Einlegen der L-Probe in die Vorrichtung unter in negativer y - und z -Richtung wirkender Schwerkraft und wird implizit statisch berechnet. Auch die Berechnung des „Spanner Schließens“ erfolgt implizit statisch. Gegenüber dem implizit dynamischen Verfahren werden beim statischen Verfahren in der Berechnung keine Beschleunigungen berücksichtigt, wodurch sich die Berechnungszeit in etwa auf die Hälfte reduziert. Die statisch implizite Berechnung wird für die ersten beiden Berechnungsschritte gewählt, da es sich hierbei im Experiment um quasistatische Vorgänge handelt. In der Literatur finden sich auch explizit berechnete Vorgänge des „Spanner Schließens“ [114]. Diese Berechnungen profitieren von der numerischen Stabilität [49] des expliziten Verfahrens. Zur Berechnung eines Gleichgewichtszustands ohne schwingende Bauteile muss dagegen auf ein implizites Verfahren zurückgegriffen werden. Die Kontaktflächen der Vorrichtung und der Spanner werden als Starrkörper modelliert. Das Schließen der Spanner erfolgt mit

einer, durch eine Kraftmessdose am Versuchsaufbau ermittelten, Spannkraft von 1200 N je Spanner, die auch im darauffolgenden Simulationsschritt „Spannen“ aufgebracht wird.

Der letzte Simulationsschritt, das „Spannen“, dient der Ermittlung der für den Spaltschluss unterhalb der Spannrolle erforderlichen Spannkraft. Da ein ebenes Unterblech zum Einsatz kommt, wird dieses erst ab dem „Spannen“ modelliert und zuvor die Unterplatte um die Blechdicke angehoben. Die Berechnung des Spannvorgangs erfolgt durch das explizite Verfahren. Das durch das Calipri-Gap (siehe Abschnitt 4.6) erfasste Profil der Spannrolle wird als FE-Netz in der Simulation verwendet. Zum Einsatz kommt dabei ein 20° Ausschnitt der Spannrolle, der ausreicht, um den Kontaktbereich der Spannrolle mit den Bauteilen zu modellieren. Die verwendeten Kontaktdefinitionen sind in Anhang 2 aufgelistet. Da die Spannrolle kugelgelagert ist (siehe Abschnitt 2.2.3) und im Kontaktbereich mit der L-Probe hohe Kontaktdrücke auftreten (bereits 320 MPa bei der geringsten erforderlichen Spannkraft von 227 N), wird das Abrollen als schlupffrei angenommen. Aus diesem Grund wird der Kontakt zwischen der Spannrolle und den Bauteilen reibungsfrei modelliert.

Im Versuch wird die Spannrolle stets mit konstanter Geschwindigkeit in x-Richtung über die L-Probe bewegt. Für den Simulationsschritt des „Spannens“ der L-Probe erfolgen dagegen das Anfahren der Spannrolle in negativer z-Richtung auf die L-Probe und die Überfahrt in x-Richtung nacheinander, um Schwingungen im Modell möglichst gering zu halten. Die Bewegung der Spannrolle wird mit weichen Übergängen durch „Smooth-Curves“ definiert. Die Vorgabe der Bewegung der Spannrolle erfolgt weggesteuert. Dabei wird der tiefste Knoten der Spannrolle, mit dem Abstand der Blechdicke der L-Probe zur Oberseite des ebenen Unterblechs, auf dem Flansch der L-Probe geführt. Aus der gewählten Bewegungskurve ergibt sich dabei eine maximale Geschwindigkeit bei der Überfahrt der Spannrolle von 6,28 m/s. Die Berechnungszeit der AA5182 L-Probe aus Bild 18a beträgt bei parallelisierter Berechnung unter Einsatz von 32 Rechenkernen 59 min 25 s. Der Spannvorgang von L-Proben kann auch implizit dynamisch berechnet werden [115]. Die für die L-Probe mit vier Rechenkernen berechnete Spannkraft erhöht sich dabei um 8,3 % gegenüber der expliziten Berechnung (welche die Spannkraft bereits um 3,7 % überschätzt) bei einer vergleichbaren Rechenzeit von 50 min 8 s. Des Weiteren ist eine Anwendung des impliziten Verfahrens zur Berechnung des Spann- und Fügevorgangs von Karosserieteilen mit einer kraftgesteuerten Spannrolle (siehe Abschnitt 6.1.2) nicht möglich, da der Solver für diesen Fall kein Gleichge-

wicht berechnen kann. Darüber hinaus ist die Simulation des Spannvorgangs mit impliziter Zeitintegration nur einhergehend mit starken Schwingungen des Spannkraftverlaufs parallelisierbar. Bei nicht parallelisierter Berechnung benötigen Modelle von Karosserieteilen hohe, nicht vertretbare Berechnungszeiten. Daher erfolgt die Berechnung des Spannvorgangs bzw. des Spann- und Fügevorgangs in dieser Arbeit mit expliziter Zeitintegration.

5.3.2 Validierung des Simulationsmodells für das weggesteuerte Spannen

Für die Validierung des in Abschnitt 5.3.1 beschriebenen Simulationsmodells werden unterschiedliche Modellierungsarten der L-Proben, die in Bild 24 dargestellt sind, in der FE-Simulation untersucht und mit den Versuchsergebnissen abgeglichen. Bei den Modellierungsarten handelt es sich um die auf dem optischen Messergebnis des Calipri-Gaps basierende Probengeometrie (siehe Abschnitt 4.6) ohne Umformhistorie (I). Des Weiteren wird basierend auf dem Biegewinkel von (I) die L-Probe simulativ durch eine Biegesimulation (siehe Anhang 1) mit Umformhistorie generiert (III). Die Umformhistorie von (III) wird auf die aus dem optischen Messergebnis generierte Geometrie (I) gemappt, somit kann mit der optisch erfassten Geometrie mit Umformhistorie (II) gerechnet werden. Bei der gemappten Umformhistorie handelt es sich um Spannungen, Dehnungen und die Blechdickenverteilung.

Zum Abgleich der Spannkkräfte, der aus dem optischen Messergebnis generierten Geometrie (I) mit den Spannkkräften der Geometrie aus der Biegesimulation, wird die Geometrie aus der Biegesimulation ohne Umformhistorie (IV) untersucht. Darüber hinaus wird die L-Probe aus der Biegesimulation mit einem von der plastischen Dehnung abhängigen E-Modul (V) geprüft. Der Verlauf der relativen Reduktion des E-Moduls für AA5182 wird aus [102] entnommen. Dabei beträgt die Reduktion des E-Moduls, die bis zu einer Vordehnung von 0,18 aufgenommen ist, bis zu 27,5 %. Der Verlauf der relativen Reduktion des E-Moduls für CR340LA wird aus [52] für den Tiefziehstahl DCo4 entnommen und weist bis zu einer Vordehnung von 0,19 eine maximale Reduktion von 10,1 % auf. Die relative Reduktion des E-Moduls aus der Literatur wird in den Materialkarten (*MAT_BARLAT_YLD2000) ausgehend vom ohne Vordehnung charakterisierten E-Modul berücksichtigt.

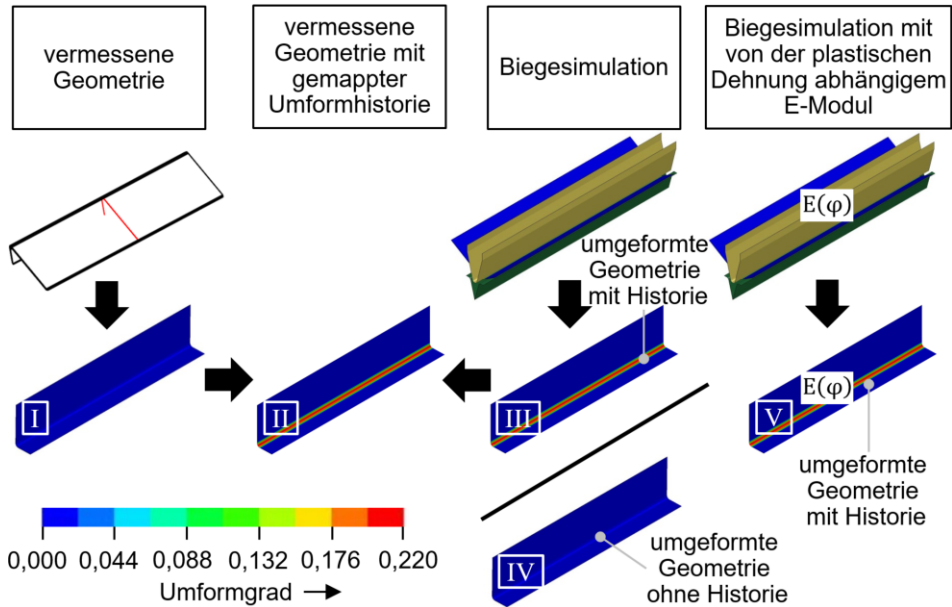


Bild 24: Untersuchte Modellierungsarten der L-Proben

Im Rahmen dieser Arbeit wird von einer sehr guten (Abweichung bis 5 %), guten (Abweichung bis 10 %) oder akzeptablen (Abweichung bis 20 %) Übereinstimmung von Spannkraften zwischen Simulation und Versuch gesprochen. Die in der FE-Simulation, unter Einsatz der Modellierungsarten aus Bild 24, ermittelten Spannkraften sowie das über den Bereich der Druckmessfolie gemittelte Versuchsergebnis aus Abschnitt 5.1.1 (siehe Bild 18a) der L-Probe aus AA5182 sind in Bild 25a und b über der x-Position der Spannrolle aufgetragen. Die exemplarisch gewählte L-Probe entstammt der mittleren Konfiguration. Der Verlauf der erforderlichen Spannkraft, der auf dem optischen Messergebnis des Calipri-Gaps basierenden Probengeometrie ohne Umformhistorie (I), wird für AA5182 in Bild 25a und für CR340LA in Bild 26a ungefiltert dargestellt. Da in der expliziten FE-Simulation stets ein leichtes Oszillieren der Spannkraft auftritt, werden im Folgenden aus Gründen der Übersichtlichkeit die Kraft-Weg-Kurven aus der FE-Simulation durch den SAE Filter in LS-PrePost® mit 1000 Hz gefiltert. Des Weiteren werden zur Vergleichbarkeit die in der FE-Simulation berechneten Spannkraftverläufe über den Bereich der Druckmessfolie gemittelt. Bild 25a zeigt, dass die Berechnung der erforderlichen Spannkraft mit der auf dem optischen Messergebnis des Calipri-Gaps basierenden Probengeometrie ohne Umformhistorie (I) die erforderliche Spannkraft um 8,7 % überschätzt und gut mit dem Versuchsergebnis übereinstimmt. Die durch Biegesimulation angefertigte L-Probe mit Umformhistorie (III) weist bei

einer Abweichung von 3,7 % die mit Abstand beste (sehr gute) Übereinstimmung mit dem Versuchsergebnis auf. Der erkennbare Einfluss der Umformhistorie wird in Abschnitt 5.4 weiter untersucht. Aus einem (in Bild 25a durch Pfeile markierten) Ergebnisvergleich zwischen der durch Biegesimulation angefertigten L-Probe mit Umformhistorie (III) und der entsprechenden L-Probe ohne Umformhistorie (IV) resultiert, dass durch das Entfernen der Umformhistorie die erforderliche Spannkraft um 9,0 % zunimmt. Die Abweichung zwischen den erforderlichen Spannkraften der Probengeometrie aus der Biegesimulation (IV) und der auf dem optischen Messergebnis basierenden Probengeometrie (I) beträgt lediglich 2,7 % und verdeutlicht somit die Plausibilität der Biegesimulation.

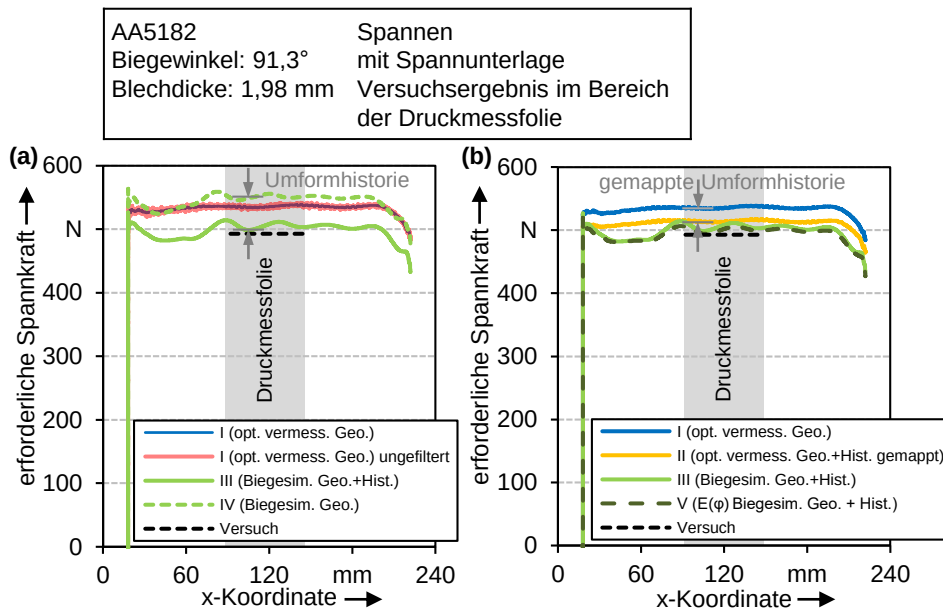


Bild 25: Kraft-Weg-Kurven aus der Simulation mit unterschiedlich modellierten L-Proben (siehe Bild 24) mit Versuchsergebnissen von AA5182

Ein Mapping der Umformhistorie der L-Probe aus der Biegesimulation (III) auf die auf dem optischen Messergebnis basierende Probengeometrie (I) erfolgt für Modellierungsart II. Dabei werden, wie in [113] beschrieben, die Blechdickenverteilung, Spannungen und Dehnungen übertragen. Es erfolgt keine Übertragung der History-Variablen (siehe [116]). Da diese die Rückspannungstensoren zur Modellierung des Bauschinger-Effekts nach Chaboche (siehe Abschnitt 2.3.2) enthalten, wird der Bauschinger-Effekt nur geringfügig auf Basis des Dehnungszustands berücksichtigt. Aus die-

sem Grund ist die erforderliche Spannkraft der L-Probe ohne Umformhistorie (I) lediglich um 4,2 % höher als die der L-Probe mit gemappter Umformhistorie (II) (markiert durch Pfeile Bild 25b). Demgegenüber beträgt der Einfluss der vollständigen Umformhistorie 9,0 % (siehe Abgleich zwischen IV und III in Bild 25a). Dabei gilt es festzuhalten, dass auch die gemappte Umformhistorie die erforderliche Spannkraft an das Versuchsergebnis annähert. Die Spannkraft wird mit gemappter Umformhistorie lediglich um 4,4 % überschätzt und liegt damit im Bereich sehr guter Übereinstimmung. Die Generierung einer L-Probe durch Biegesimulation mit einem von der plastischen Dehnung abhängigen E-Modul, der auch in der Spann-Simulation berücksichtigt wird, (V) wirkt sich nur geringfügig auf die erforderliche Spannkraft aus. Ein Vergleich mit der durch Biegesimulation mit konstantem E-Modul erzeugten L-Probe (III) zeigt eine Reduktion der erforderlichen Spannkraft von 1,0 % durch den von der plastischen Dehnung abhängigen E-Modul.

In der Biegesimulation (siehe Anhang 1) ergibt sich bei Berücksichtigung des von der plastischen Dehnung abhängigen E-Moduls und der Eindringtiefe des Stempels der L-Probe III (mit konstantem E-Modul) eine Reduktion des Biegewinkels um 0,8 %. Dies ist auf die stärkere Rückfederung bei einem von der plastischen Dehnung abhängigen E-Modul zurückzuführen, welche auch in [52] beschrieben wird. Für die in der Spannsimulation verwendete L-Probe (V) wird auch hier die Eindringtiefe des Stempels angepasst (siehe Anhang 1), um den gewünschten Biegewinkel zu erhalten.

Das Versuchsergebnis der CR340LA L-Probe aus Abschnitt 5.1.1 (siehe Bild 18b) der mittleren Konfiguration und die in der Simulation berechneten erforderlichen Spannkraften sind in Bild 26a und b dargestellt. Die berechnete erforderliche Spannkraft der auf dem optischen Messergebnis basierenden L-Probe (I) überschätzt die im Versuch ermittelte Spannkraft mit 48,1 % sehr deutlich. Dagegen stimmt das Ergebnis der durch Biegesimulation hergestellten L-Probe (III) sehr gut mit dem des Versuchs überein und unterschätzt dieses um lediglich 3,6 %. Auch bei CR340LA sind die Spannkraften der Geometrie aus der Biegesimulation (IV) und der auf dem optischen Messergebnis basierenden Geometrie (I) mit einer Abweichung von 3,9 % eng zusammen und zeigen die Plausibilität der Biegesimulation. Beim (durch einen Pfeil in Bild 26a markierten) Abgleich der berechneten Spannkraften der durch Biegesimulation hergestellten L-Probe mit Umformhistorie (III) und der entsprechenden L-Probe mit entfernter Umformhistorie (IV) zeigt sich der bei diesem Werkstoff ein gegenüber AA5182 deutlich höherer Einfluss der Umformhistorie auf die erforderlichen Spannkraften. Dies ist auf den bei CR340LA deutlich stärker ausgeprägten

Bauschinger-Effekt (siehe Abschnitt 5.2.1) zurückzuführen. Die unberücksichtigte Umformhistorie führt zu einer Erhöhung der Spannkraft um 47,6 %, bei AA5182 sind es dagegen lediglich 9,0 %.

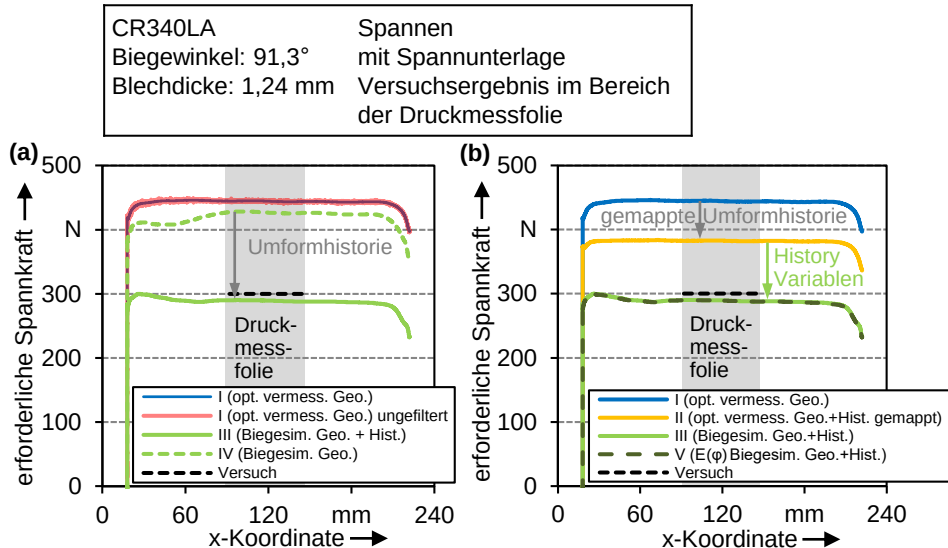


Bild 26: Kraft-Weg-Kurven aus der Simulation mit unterschiedlich modellierten L-Proben (siehe Bild 24) mit Versuchsergebnissen von CR340LA

Auch bei CR340LA führt das Mapping der Umformhistorie der L-Probe aus der Biegesimulation (III) auf die auf dem optischen Messergebnis basierende Probengeometrie (I) zu einer Reduktion der berechneten erforderlichen Spannkraft der L-Probe (II). Die in Bild 26b dargestellten Kraft-Weg-Verläufe zeigen den Verlauf von (II) deutlich unter dem von (I). Die erforderliche Spannkraft der L-Probe ohne Umformhistorie (I) ist um 16,2 % höher als die der L-Probe mit gemappter Umformhistorie (II). Im Vergleich dazu beträgt die Differenz zwischen der Spannkraft von III mit vollständiger Umformhistorie und der entsprechenden L-Probe IV ohne Umformhistorie 47,6 % (siehe Bild 26a). Wie bei AA5182 verringert sich der Einfluss der Umformhistorie durch die beim Mapping unberücksichtigten History-Variablen, die in der Simulation zu einer abgeschwächten Berücksichtigung des Bauschinger-Effekts führen. Auch bei CR340LA wirkt sich der von der plastischen Dehnung abhängige E-Modul von L-Probe V mit einer Reduktion der Spannkraft um 0,1 % gegenüber III nur geringfügig auf das Ergebnis aus (siehe Bild 26b). Der aus der Biegesimulation resultierende Biegewinkel der L-Probe reduziert sich auch bei CR340LA mit einem von der plastischen Dehnung abhängigen E-Modul gegenüber der L-Probe mit konstantem E-Modul bei derselben Eindringtiefe. Die Eindringtiefe des

Stempels wird zum Erzielen des gewünschten Biegewinkels angepasst (siehe Anhang 1). Da der Einfluss des von der plastischen Dehnung abhängigen E-Moduls sich vernachlässigbar auf die berechneten erforderlichen Spannkkräfte auswirkt (vergleiche V mit III in Bild 25b und Bild 26b für AA5182 und CR340LA), wird auf die Charakterisierung des von der plastischen Dehnung abhängigen E-Moduls für die verwendeten Werkstoffchargen verzichtet. Auswirkungen eines von der plastischen Dehnung abhängigen E-Moduls werden im weiteren Verlauf der Arbeit nicht untersucht.

Die berechneten erforderlichen Spannkkräfte stimmen bei der Verwendung von L-Proben aus der Biegesimulation mit Umformhistorie (III) für beide Werkstoffe am besten (Abweichung bei AA518 und CR340LA von 4,4 % und 3,6 %) mit dem Versuchsergebnis überein. Aus diesem Grund erfolgt für das Spannen der L-Proben mit Spannunterlage ein Abgleich der weiteren Versuchsergebnisse mit L-Proben aus der Biegesimulation mit Umformhistorie (III).

Die Ergebnisse der weiteren Charakterisierungsversuche aus Abschnitt 5.1.1 mit variierten Biegewinkeln (siehe Tabelle 2), der mit Spannunterlage gespannten L-Proben, werden ebenfalls zur Validierung des Simulationsmodells herangezogen. Für jede der 18 im Versuch geprüften L-Proben wird eine Spannsimulation mit dem entsprechenden, optisch erfassten Biegewinkel (siehe Abschnitt 4.6) durchgeführt. Hierzu werden L-Proben, die durch Biegesimulation angefertigt sind (III), verwendet. Zur Untersuchung des Einflusses der Umformhistorie werden für beide Werkstoffe die drei Proben der Konfiguration 2 (mit Biegewinkel $91,4^\circ$) auch mit entfernter Umformhistorie (IV) simuliert.

Bild 27a zeigt für die drei Konfigurationen mit AA5182 einen Anstieg der erforderlichen Spannkkräfte mit zunehmendem Biegewinkel. Dies trifft sowohl bei den experimentell bestimmten als auch bei den simulativ ermittelten erforderlichen Spannkkräften zu. Die mittlere absolute Abweichung zwischen Versuch und Simulation beträgt 10,3 %. Damit handelt es sich um eine akzeptable Übereinstimmung zwischen Simulation und Experiment. Die Abweichungen zwischen Versuch und Simulation der ersten und zweiten Konfiguration betragen 12,5 % und 3,9 % (41 N und 19 N) und liegen damit innerhalb der 50 N Schritte, in welchen beim Fügen von Karosserieteilen die Spannkraft festgelegt wird (siehe Abschnitt 5.1.1). Die Abweichung der dritten Konfiguration beträgt 14,4 % (106 N). Grund für die bei dieser Konfiguration vergleichsweise hohen experimentell ermittelten Spannkkräfte sind mehrere Überfahrten mit der Spannrolle, bei denen der Spalt nur in Radiusnähe und nicht unterhalb der Spannrolle geschlossen war. Die

Spannkraft wurde dabei entsprechend der Festlegung in Abschnitt 5.1.1 bis zum Spaltschluss unterhalb der Spannrolle erhöht. Mögliche weitere Gründe für die Abweichungen zwischen den Versuchs- und Simulationsergebnissen sind geringe Ungenauigkeiten bei der Modellierung der L-Proben in der FE-Simulation sowie die Schrittweite von 20 N, mit der die Spannkraft im Versuch erhöht wird.

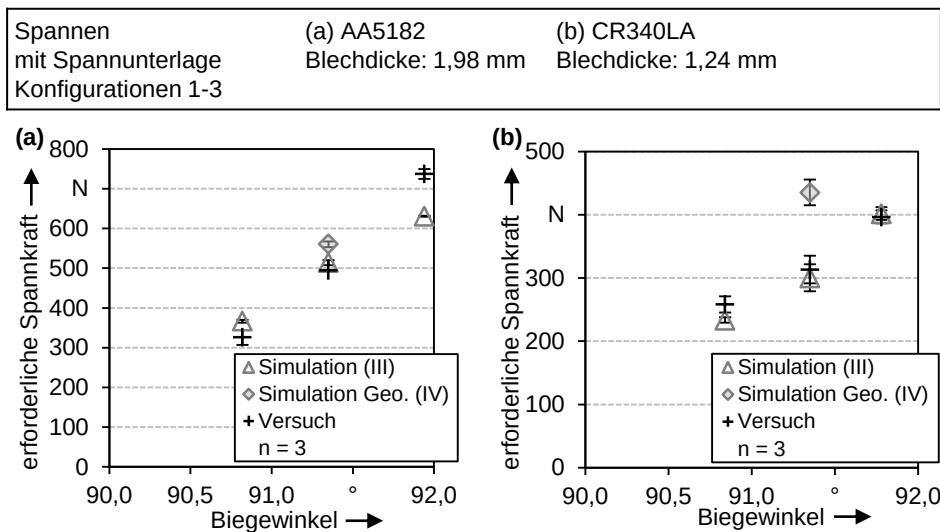


Bild 27: In der Simulation mit (III) und ohne Umformhistorie (IV) sowie experimentell ermittelte erforderliche Spannkraften für das Spannen mit Spannunterlage von (a) AA5182 und (b) CR340LA

Der Einfluss der Umformhistorie auf die erforderlichen Spannkraften von AA5182 wird für die drei Proben der mittleren Konfiguration durch zusätzliche Simulationen mit entfernter Umformhistorie (IV) untersucht. Dabei werden durch die Berücksichtigung der Umformhistorie die berechneten erforderlichen Spannkraften um 9,1 % gegenüber den erforderlichen Spannkraften ohne Umformhistorie reduziert.

Auch für die drei Konfigurationen von CR340LA ist ein Anstieg der erforderlichen Spannkraften mit zunehmendem Biege Winkel in Bild 27b erkennbar. Die mittlere absolute Abweichung zwischen Versuch und Simulation beträgt 5,1 % und ist damit im Bereich guter Übereinstimmung. Die drei Konfigurationen weichen um 9,7 %, 4,2 % und 1,3 % (25 N, 13 N und 5 N) vom Versuchsergebnis ab und sind damit innerhalb der Schrittweite von 50 N, mit der die Spannkraft beim Fügen von Karosserieteilen festgelegt wird. Die zweite und dritte Konfiguration befinden sich sogar innerhalb der

20 N Schritte, mit denen die Spannkraft im Charakterisierungsversuch erhöht wird. Auch hier wird der Einfluss der Umformhistorie für die drei L-Proben der mittleren Konfiguration untersucht. Dieser beträgt 45,0 % für CR340LA und führt damit zu einer erheblichen Reduktion der berechneten erforderlichen Spannkraft.

5.3.3 Erkenntnisse aus der Validierung des Simulationsmodells

Die Erkenntnisse aus der Validierung des Simulationsmodells für das weggesteuerte Spannen sind:

- Die weggesteuerte Spannsimulation liefert experimentell validierte, plausible Spannkraft für Spannvorgänge mit Spannunterlage.
- Durch Biegesimulation generierte Prinzipbauteile ohne Umformhistorie zeigen sehr gut übereinstimmende Spannkraft mit Prinzipbauteilen aus optisch vermessener Geometrie. Die Biegesimulation eignet sich daher zur Generierung von Probengeometrie und ermöglicht die Untersuchung des Einflusses der Umformhistorie.
- Die Berücksichtigung der Umformhistorie in der Simulation verringert die berechneten erforderlichen Spannkraft. Bei AA5182 mit geringerem Bauschinger-Effekt ($\alpha_{BK} = 0,59$) ist dieser Einfluss geringer (9,1 %), als er es bei CR340LA (45,0 %) mit höherem Bauschinger-Effekt ($\alpha_{BK} = 0,41$) ist. Die Berücksichtigung der Umformhistorie führt dabei zu einer verbesserten Übereinstimmung mit den Versuchsergebnissen.
- Ein Mapping von Umformhistorie führt zu einer Abschwächung des verringernden Einflusses der Umformhistorie auf erforderliche Spannkraft. Dabei wird dieser Einfluss bei AA5182 um 53,3 % und bei CR340LA um 66,0 % reduziert. Dies ist auf das Entfernen der History-Variablen beim Mapping zurückzuführen. Dadurch wird die Umformhistorie auf Spannungen und Dehnungen reduziert. Aus diesem Grund erfolgt keine Berücksichtigung der zur Berechnung des Bauschinger-Effekts erforderlichen Rückspannungstensor im Materialmodell.
- Ein im Materialmodell berücksichtigter, von der plastischen Dehnung abhängiger, E-Modul zeigt einen vernachlässigbaren Einfluss auf erforderliche Spannkraft ($\leq 1,0$ %).

Diese Erkenntnisse lassen sich auf die simulationsbasierte Dimensionierung herkömmlicher Spannvorrichtungen für Blechbauteile übertragen.

Bei den untersuchten Einflussgrößen handelt es sich um Werkstoffparameter, geometrische Einflussfaktoren und die Umformhistorie. Zur Untersuchung des Einflusses von Werkstoffparametern werden für CR340LA der E-Modul und durch die Skalierung der Fließkurve, entsprechend dem Diagramm in Bild 28b, die Verfestigung variiert. Die Skalierung der Fließkurve zur Abbildung eines streuenden Verfestigungsverhaltens erfolgt in Orientierung an den Verläufen der in [118] charakterisierten Fließkurven von acht Werkstoffchargen des Stahlwerkstoffs DCo5. Darüber hinaus werden jeweils drei Stahl- und Aluminiumwerkstoffe mit unterschiedlichen Festigkeiten (siehe Tabelle 1) untersucht. Für jeden Werkstoff werden die geometrischen Faktoren der Blechdicke, des Biegewinkels und des Spannrollenabstands zur Rückwand variiert (hellblau in Bild 28a). Des Weiteren wird auch für jeden Werkstoff der Einfluss der Umformhistorie geprüft. Hierzu werden für jeden Werkstoff jeweils die gleichen Simulationspläne mit und ohne Umformhistorie berechnet und die Ergebnisse verglichen.

Die neben der Umformhistorie untersuchten Faktoren sind in Tabelle 5 zusammengefasst. Die Variation der Faktoren erfolgt mit jeweils fünf Stufen, wodurch quadratische Zusammenhänge und Zusammenhänge höherer Ordnung erfasst werden können (siehe Abschnitt 5.4.1). In Anlehnung an intern abgesicherte Blechdicken für das Remote-Laserstrahlschweißen (zulässige Blechdicke von Stahlwerkstoffen 0,8 bis 2 mm und von Aluminiumwerkstoffen 1,2 bis 2 mm) werden die Blechdicken der Stahlwerkstoffe von 0,8 mm bis 1,68 mm und die der Aluminiumwerkstoffe von 1,24 mm bis 1,98 mm variiert. Damit werden die in den Charakterisierungsversuchen (siehe Abschnitt 5.1.1) eingesetzten Blechdicken (1,24 mm für CR340LA und 1,98 mm für AA5182) als Faktorstufen untersucht. Die Biegewinkel werden in Anlehnung an die untersuchten Konfigurationen aus Abschnitt 5.1.1 zur Modellierung eines nichtmaßhaltigen Fügeflansches zwischen 91° und 92° variiert. Der Abstand der Spannrolle zur Rückwand wird entsprechend interner Normen (siehe Abschnitt 5.1.1) des Abstands von Spanntechnik zum Radiusauslauf eines Fügeflansches zwischen 14 mm und 18 mm variiert. Die Faktoren E-Modul und Verfestigung werden ausgehend von den charakterisierten Werten um $\pm 10\%$ variiert, um den Einfluss von Schwankungen der Werkstoffparameter zu untersuchen. Dabei wird zur Variation der Verfestigung, entsprechend der Darstellung in Bild 28b, die Fließkurve skaliert. Um den Einfluss des Bauschinger-Effekts realitätsnah bei der Berechnung mit skaliertem Fließkurve zu berücksichtigen, erfolgt für jede skalierte Fließkurve eine inverse Parameteridentifikation der Chaboche-Parameter mit entsprechend skaliertem Kraft-Weg-Kurve (siehe Abschnitt 5.2.2).

Tabelle 5: Neben der Umformhistorie untersuchte Faktoren und deren Grenzen

Faktor (jeweils 5 Stufen)	Aluminium		CR340LA		weitere Stähle	
	min.	max.	min.	max.	min.	max.
Blechdicke [mm]	1,24	1,98	0,8	1,68	0,8	1,68
Biegewinkel [°]	91	92	91	92	91	92
Spannrollenabstand [mm]	14	18	14	18	14	18
E-Modul [GPa]	-	-	184,5	225,5	-	-
skalierte Verfestigung [%]	-	-	90	110	-	-

5.4.1 Simulationspläne zur Untersuchung der Einflussfaktoren

Zur Untersuchung der Einflüsse der oben beschriebenen Faktoren auf die erforderlichen Spannkraften, wird auf die Methoden der statistischen Versuchsplanung (engl. Design of Experiments – DoE) zurückgegriffen. Zielgröße ist hierbei die erforderliche Spannkraft zum Schließen des Spalts. Bei den Faktoren handelt es sich um die untersuchten Einflussgrößen aus Tabelle 5. Dabei sind die Anforderungen an den Simulationsplan das Erfassen von Zusammenhängen quadratischer Ordnung zwischen der Zielgröße und den Faktoren zur Ermittlung von Extrema. Des Weiteren sollte keine zu hohe Anzahl der Faktorstufen je Faktor erforderlich sein, da sich sonst der Aufwand für die Biegesimulationen zur simulativen Herstellung der L-Proben und die inverse Parameteridentifikation der Chaboche-Parameter zur Berücksichtigung des Bauschinger-Effekts in den Materialkarten stark erhöht.

Ein Zentral Zusammengesetzter Versuchsplan, der in [119] umfassend beschrieben wird, erlaubt das Erfassen von quadratischen Zusammenhängen und von Zusammenhängen höherer Ordnung bei fünf Faktorstufen je Faktor (siehe Anhang 3). Die Höhe der Ordnung ist dabei abhängig von der Anzahl der Zuordnungen (p) von Faktoren zu Wechselwirkungen höherer Ordnung [119]. Die Anzahl der Faktorstufenkombinationen m berechnet sich nach [119] mittels Gleichung (2).

$$m = 2^{k-p} + 2k + n_0 \quad (2)$$

Die Anzahl untersuchter Faktoren (siehe Tabelle 5) wird dabei durch k und die Anzahl der Berechnungen des Zentrumspekts durch $n_0 (= 1)$ beschrieben. Für CR340LA erfolgt eine Zuordnung des Faktors „skalierte Verfestigung“ zur Vierfachwechselwirkung zwischen den übrigen vier Faktoren ($p = 1$). Bei den übrigen untersuchten Werkstoffen erfolgt keine Zuordnung eines Faktors ($p = 0$). Die qualitativen Größen Werkstoff und Umformhistorie können nicht als Faktoren untersucht werden. Um deren Einfluss dennoch zu erfassen, werden für jeden Werkstoff zwei Simulationspläne (einer mit und einer ohne Umformhistorie) erstellt. Durch Vergleiche zwischen den Simulationsplänen lassen sich so die Einflüsse der Werkstoffe und der Umformhistorie ermitteln. Die verwendeten zwölf Simulationspläne sind in Anhang 3 zusammengefasst. Der erforderliche Simulationsumfang umfasst dabei insgesamt 54 Spannsimulationen für den Werkstoff CR340LA und für die übrigen fünf Werkstoffe jeweils 30 Spannsimulationen. Des Weiteren müssen durch Biegesimulationen 70 L-Proben mit Umformhistorie generiert werden. Für vier modifizierte Materialkarten müssen inverse Parameteridentifikationen zur Ermittlung der Chaboche-Parameter durchgeführt werden. Aus diesen Gründen wird im Rahmen dieser Arbeit der Zentral Zusammengesetzte Versuchsplan mit fünf Faktorstufen je Faktor verwendet. Die Simulationspläne genügen durch die Wahl der Faktorstufen (siehe Anhang 3) mit den normierten Werten von ± 1 und den verwendeten Verlängerungsfaktoren α_z , die für CR340LA 1,547 und für die übrigen Simulationspläne 1,215 betragen, den Anforderungen eines orthogonalen Simulationsplans [119]. Somit werden Vermengungen zwischen den Effekten von Faktoren, den Effekten von Zwei-Faktor-Wechselwirkungen und quadratischen Effekten ausgeschlossen und die Versuchspläne genügen den Anforderungen der Auflösung von V [120]. Im Gegensatz zu einem vollständig faktoriellen Versuchsplan werden Drei-Faktor-Wechselwirkungen, die nach [119] selten von praktischer Bedeutung sind, mit Zwei-Faktor-Wechselwirkungen vermengt. Ein vollständig faktorieller Versuchsplan zur Abbildung quadratischer Effekte hätte allein für den Werkstoff CR340LA zweimal 243 Faktorstufenkombinationen, womit hier das Neunfache an Spannsimulationen im Vergleich zum Zentral Zusammengesetzten Versuchsplan notwendig wäre. Da dies für die Untersuchung von Effekten von Faktoren, Zwei-Faktor-Wechselwirkungen und quadratischen Effekten vergleichsweise ineffizient wäre, wird vom Einsatz eines vollfaktoriellen Versuchsplans abgesehen.

5.4.2 Untersuchungsergebnisse

Durch Regressionsanalyse mittels Minimierung der Fehlerquadrate werden auf Basis der Simulationsergebnisse unter Einsatz der Software Minitab® polynomiale Metamodelle zweiter Ordnung aufgestellt. Die Metamodellierung ermöglicht effiziente Analysen der untersuchten Zusammenhänge. Zudem kann durch die Metamodelle die erforderliche Spannkraft innerhalb des untersuchten Faktorraums für jede beliebige Faktorstufenkombination abgeschätzt werden. Das korrigierte Bestimmtheitsmaß (siehe [121]) der zwölf Metamodelle weist Werte $\geq 0,991$ und damit nahe 1 auf. Somit sind die ermittelten Metamodelle gut geeignet, die untersuchten Zusammenhänge abzubilden. Es erfolgt die Ermittlung der Effekte der untersuchten Faktoren (siehe Tabelle 5) und deren Wechselwirkungen auf die Zielgröße (erforderliche Spannkraft). Die standardisierten Effekte sind exemplarisch für die Werkstoffe AA5185 und CR340LA unter Berücksichtigung der Umformhistorie in Form eines Pareto-Diagramms in Bild 29 dargestellt. Die Grenze der statistischen Signifikanz, gemäß [122] mit einem Signifikanzniveau von $\alpha = 0,05$, ist dabei rot markiert. Alle untersuchten Faktoren beider Werkstoffe zeigen einen signifikanten Effekt auf die Zielgröße. Damit bestätigt sich die erwartete Relevanz der untersuchten Faktoren für die Höhe der erforderlichen Spannkraft.

Die Blechdicke wirkt sich bei beiden Werkstoffen mit Abstand am stärksten auf die erforderliche Spannkraft aus. Der Effekt der Blechdicke beträgt jeweils mehr als das Doppelte des zweistärksten Effekts, der jeweils dem Biegewinkel zugeordnet ist. Dieses Verhältnis zeigt sich auch bei den vier übrigen Werkstoffen unter Berücksichtigung der Umformhistorie. Auffällig ist, dass bei CR340LA die stärkste Wechselwirkung zwischen Blechdicke und Spannrollenabstand ausgeprägter ist als der Effekt des singulären Spannrollenabstands. Dagegen liegt der Effekt des Spannrollenabstands bei AA5182 an dritter Stelle, über der auch bei diesem Werkstoff stärksten Wechselwirkung zwischen Blechdicke und Spannrollenabstand. Dies ist auf die unterschiedlichen untersuchten Blechdicken der Stahl- und Aluminiumwerkstoffe zurückzuführen. Die Blechdicke weist als einziger Faktor einen signifikanten quadratischen Effekt auf. Darüber hinaus zeigen die Blechdicke und der Biegewinkel eine signifikante Wechselwirkung. Die oben aufgegriffenen Effekte werden im Folgenden mit Hilfe von Bild 30b und Bild 31b näher untersucht. Die Effekte der untersuchten Schwankungen des E-Moduls und des Verfestigungsverhaltens sind noch im Bereich statistischer Signifikanz, spielen jedoch im Vergleich zu den übrigen untersuchten Faktoren eine untergeordnete Rolle. Dabei führt im Mittel eine Erhöhung des E-Moduls um 10 % zu einer um 16,3 N erhöhten erforderlichen

Spannkraft. Eine um 10 % erhöhte Verfestigung führt im Mittel zu einer Erhöhung der Spannkraft von 15,8 N.

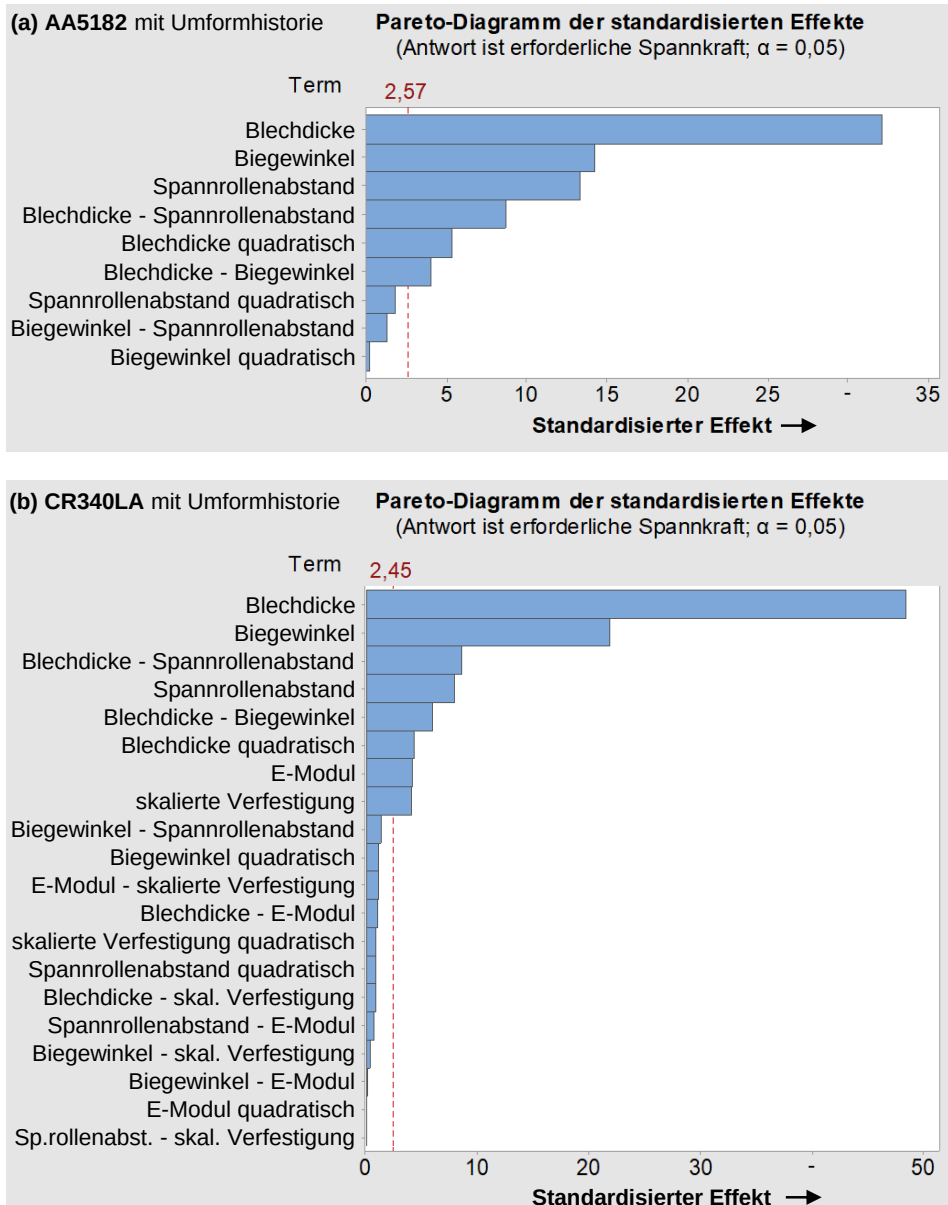


Bild 29: Effekte von AA5182 (a) und CR340LA (b) mit Umformhistorie auf die Zielgröße „erforderliche Spannkraft“

Die Diagramme in Bild 30 und Bild 31 zeigen den Effekt der Blechdicke und des Biegewinkels bzw. der Blechdicke und des Spannrollenabstands auf die

erforderliche Spannkraft von AA5182 und CR340LA. Auf den horizontalen Achsen sind jeweils die beiden betrachteten Faktoren und auf der vertikalen Achse die erforderliche Spannkraft aufgetragen. Die in den durchgeführten Simulationen ermittelten, erforderlichen Spannkräfte sind als schwarze Punkte dargestellt. Häufig liegen dabei mehrere Punkte direkt übereinander (und nicht auf der eingefärbten Fläche). Dies ist auf die unterschiedlichen Faktorstufen der übrigen, nicht auf den horizontalen Achsen aufgetragenen, Faktoren zurückzuführen. Das für den jeweiligen Simulationsplan aufgestellte quadratische Metamodell ist als gekrümmte Fläche in den Diagrammen dargestellt. Dabei wird für die nicht auf den horizontalen Achsen aufgetragenen Faktoren (siehe Tabelle 5) die jeweils mittlere Faktorstufe (Zentrumspunkt) gewählt. Die farbigen Niveaulinien konstanter Kraft sind zur Orientierung auf die jeweilige Grundfläche projiziert.

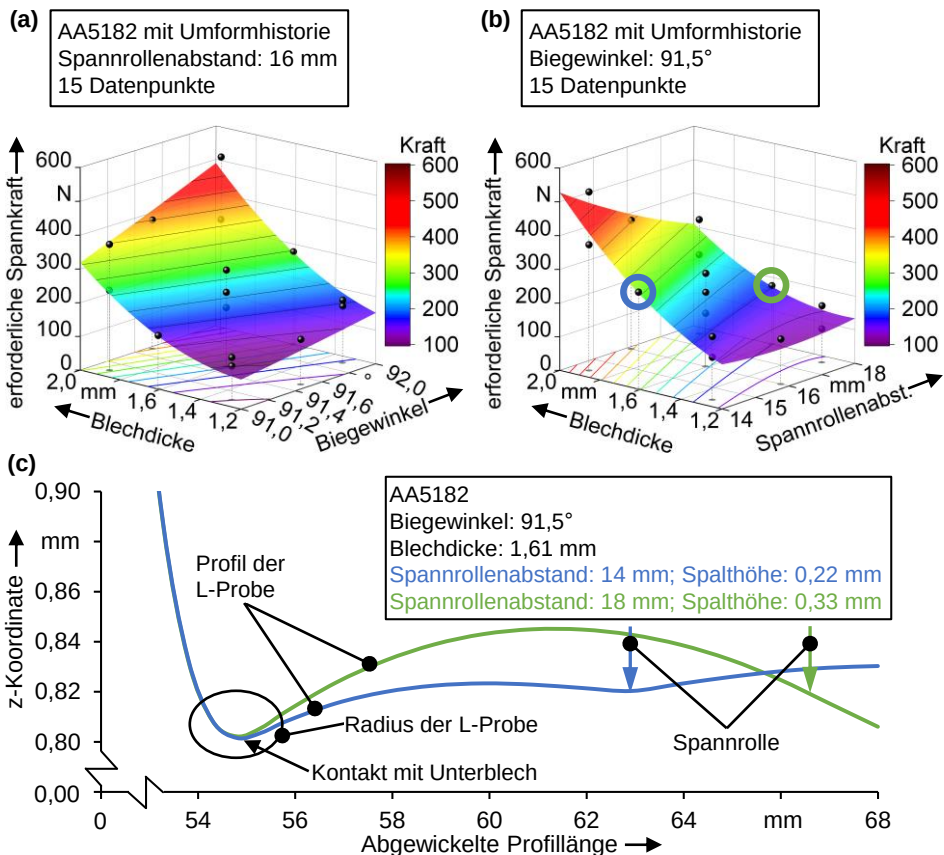


Bild 30: Einflüsse (a) der Blechdicke und des Biegewinkels; (b) des Spannrollenabstands und der Blechdicke auf die erforderliche Spannkraft und auf die Nachgiebigkeit (c) der L-Proben aus AA5182

Bild 30a zeigt die Einflüsse der Blechdicke und des Biegewinkels auf die erforderliche Spannkraft für AA5182. Dabei steigt mit zunehmender Blechdicke die erforderliche Spannkraft an. Die Blechdicke weist einen signifikanten quadratischen Effekt auf (siehe Bild 29), daher verstärkt sich mit zunehmender Blechdicke deren Effekt. Dies ist auf den zunehmenden Anstieg des Biege widerstands mit zunehmender Blechdicke zurückzuführen und an der zunehmenden Steigung der erforderlichen Spannkraft mit zunehmender Blechdicke erkennbar. Mit zunehmendem Biegewinkel steigt die erforderliche Spannkraft näherungsweise linear an. Die Wechselwirkung zwischen Blechdicke und Biegewinkel bewirkt mit zunehmendem Biegewinkel ein Ansteigen des Effekts der Blechdicke.

Die Einflüsse der Blechdicke und des Spannrollenabstands zur Rückwand sind in Bild 30b für AA5182 dargestellt. Bei geringen Blechdicken führt ein geringerer Abstand der Spannrolle zur Rückwand zu geringeren erforderlichen Spannkraften. Bei hohen Blechdicken hingegen bewirkt ein geringerer Abstand der Spannrolle höhere erforderliche Spannkraften. Im Gegensatz zu den übrigen Wechselwirkungen, die lediglich die Stärke eines Faktoreffekts beeinflussen, ändert diese Wechselwirkung zusätzlich zur Stärke auch die Richtung des Faktoreffekts. Der Effekt der Wechselwirkung ist in Bild 30b als Änderung der Krümmungsrichtung der ersten gegenüber den übrigen projizierten Linien der Kraftniveaus erkennbar. Grund für diese Wechselwirkung sind zwei überlagerte Effekte, die je nach Blechdicke und Spannrollenabstand unterschiedlich stark ausgeprägt sind und sich im Folgenden mit Hilfe von Bild 30c erklären lassen. Die Biegung der L-Probe ist für die beiden in Bild 30b blau bzw. grün markierten Konfigurationen in Bild 30c dargestellt. Dabei wird für die blau dargestellte Konfiguration mit geringem Spannrollenabstand der Flansch hauptsächlich in Radiusnähe gebogen, während bei der grün dargestellten Konfiguration mit hohem Spannrollenabstand der gesamte Flansch gebogen wird. Für hohe Blechdicken überwiegt die Hebelwirkung der Spannrolle (welche bei Zunahme die Spannkraft reduziert) gegenüber der zu schließenden Spalthöhe (welche bei Zunahme die Spannkraft erhöht). Der Hebelarm ist dabei der Abstand in y-Richtung der Spannrolle zum Kontakt der L-Probe im Radiusbereich mit dem Unterblech (siehe Bild 30c). Die zu schließende Spalthöhe befindet sich zwischen der L-Probe und dem Unterblech unterhalb der Spannrolle. Für geringe Blechdicken dominiert dagegen die zu schließende Spalthöhe unterhalb der Spannrolle gegenüber der Hebelwirkung der Spannrolle.

Das Diagramm in Bild 31a zeigt den Effekt der Blechdicke und des Biegewinkels auf die erforderliche Spannkraft von CR340LA. Dabei steigt auch

hier die erforderliche Spannkraft mit zunehmender Blechdicke und zunehmendem Biegewinkel an. Die Blechdicke weist auch für CR340LA einen quadratischen Effekt auf (siehe Bild 29). Infolge der Wechselwirkung zwischen Blechdicke und Biegewinkel führt ein zunehmender Biegewinkel zu einem Anstieg des Effekts der Blechdicke.

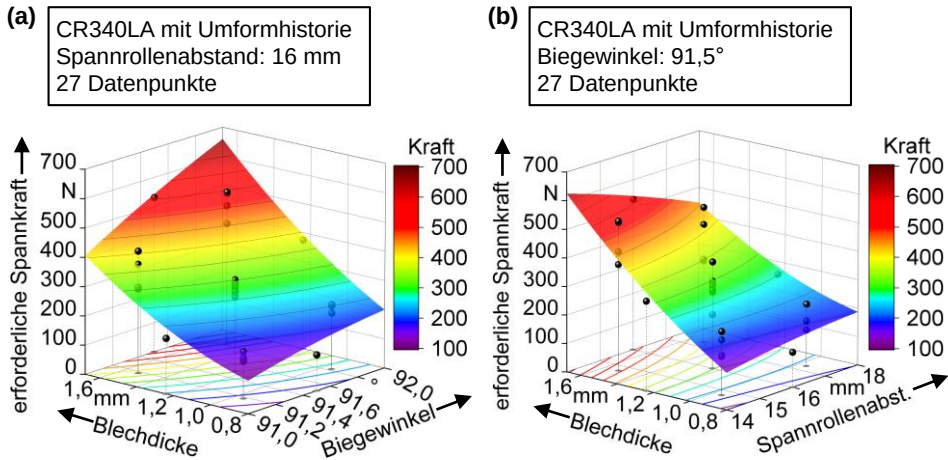


Bild 31: Einflüsse (a) der Blechdicke und des Biegewinkels; (b) des Spannrollenabstands und der Blechdicke auf die erforderliche Spannkraft der L-Proben aus CR340LA

Der Effekt der Blechdicke und des Spannrollenabstands auf erforderliche Spannkräfte ist für CR340LA in Bild 31b dargestellt. Der Effekt des Spannrollenabstands auf erforderliche Spannkräfte bei CR340LA beträgt weniger als die Hälfte des Effekts des Spannrollenabstands bei AA5182 (siehe Bild 29). Dies ist auf den mit zunehmender Blechdicke ansteigenden Effekt des Spannrollenabstands zurückzuführen. Da für AA5182 höhere Blechdicken untersucht werden (siehe Tabelle 5), ist der Effekt des Spannrollenabstands bei AA5182 höher. Die Untersuchung höherer Blechdicken für AA5182 erfolgt auf Grund des Einsatzes höherer Blechdicken in Strukturbauteilen aus Aluminium. Der Effekt des Spannrollenabstands ist darüber hinaus bei den drei untersuchten Stahlwerkstoffen stets geringer als die Wechselwirkung zwischen Blechdicke und Spannrollenabstand, die sich auch in Bild 31b durch die Änderung der Krümmungsrichtung der projizierten Linien der Kraftniveaus zeigt. Auf Grund der vergleichsweise geringeren Blechdicken bei den Stahlwerkstoffen ist der singuläre Effekt des Spannrollenabstands schwächer ausgeprägt als die Wechselwirkung zwischen Blechdicke und Spannrollenabstand (siehe Bild 29b). Dabei überwiegt für hohe Blechdicken die Hebelwirkung der Spannrolle (Spannkraft reduzierend) gegenüber der zu schließenden Spalthöhe (Spannkraft stei-

gernd) bei der Ermittlung der erforderlichen Spannkraft. Für geringe Blechdicken überwiegt dagegen die zu schließende Spalthöhe unterhalb der Spannrolle gegenüber der Hebelwirkung der Spannrolle.

Für alle untersuchten Werkstoffe zeigt sich durch die Berücksichtigung der Umformhistorie aus der simulativen Anfertigung der L-Proben (siehe Anhang 1) eine Reduktion der erforderlichen Spannkraft gegenüber den Berechnungen mit unberücksichtigter Umformhistorie. Der Einfluss der Umformhistorie wird auf den Bauschinger-Effekt zurückgeführt. Die Reduktionen der Spannkraft in Abhängigkeit der Bauschinger-Koeffizienten sind in Bild 32 dargestellt. Die Bauschinger-Koeffizienten der nicht im Rahmen dieser Arbeit charakterisierten Werkstoffe CR330Y590T-DP, CR3, AA6111 und A5454 werden durch simulierte Zug-Druckversuche an einem Ein-Element-Modell, entsprechend der Beschreibung in [110], identifiziert. Bei der Verwendung der ermittelten Bauschinger-Koeffizienten für eine Vordehnung von $\varphi_{\text{vor}} = 0,12$ ergibt sich der in Bild 32a dargestellte Zusammenhang zwischen der Reduktion der Spannkraft und dem Bauschinger-Koeffizienten. Dabei weicht der Wert von CR330Y590T-DP deutlich und von AA6111 leicht von der Tendenz der übrigen Werte ab. Wird dagegen der Bauschinger-Koeffizient bei einer Vordehnung von $\varphi_{\text{vor}} = 0,06$ verwendet, so ergibt sich der in Bild 32b dargestellte näherungsweise reziproke Zusammenhang mit einem deutlich fallenden Einfluss der Umformhistorie mit fallender Intensität des Bauschinger-Effekts. Der plausiblere Verlauf bei der Verwendung der Vordehnung von 0,06 lässt sich dadurch erklären, dass die Vordehnungen im beim Spannvorgang am stärksten beanspruchten Bereich des Radiusauslaufs, in dem die L-Proben auf dem Unterblech aufliegen, deutlich näher an 0,06 als an 0,12 liegen. Diese betragen im Bereich des Radiusauslaufs für die jeweils mittlere Konfiguration 0,050 bzw. 0,062 bei AA5182 bzw. CR340LA. Das Ergebnis des Aluminiumwerkstoffs AA6111 mit hoher Festigkeit weicht dabei vom Verlauf der übrigen Werkstoffe ab. Eine Erklärung für die Abweichung können die für diesen Werkstoff vergleichsweise hohen erforderlichen Spannkraft und die Zunahme des Effekts der Umformhistorie mit zunehmender Spannkraft sein. Da sich die Umformhistorie bei den untersuchten Werkstoffen zu einer mittleren Spannkraftdifferenz von bis zu 39 % führt, erfolgt in Abschnitt 5.4.3 eine gezielte Untersuchung der Beeinflussung der erforderlichen Spannkraft durch die Umformhistorie.

mittlere Differenz der erforderlichen Spannkkräfte zwischen Simulationen ohne (IV) und mit Umformhistorie (III) (siehe Abschnitt 5.3.2) beim Spannen mit Spannunterlage

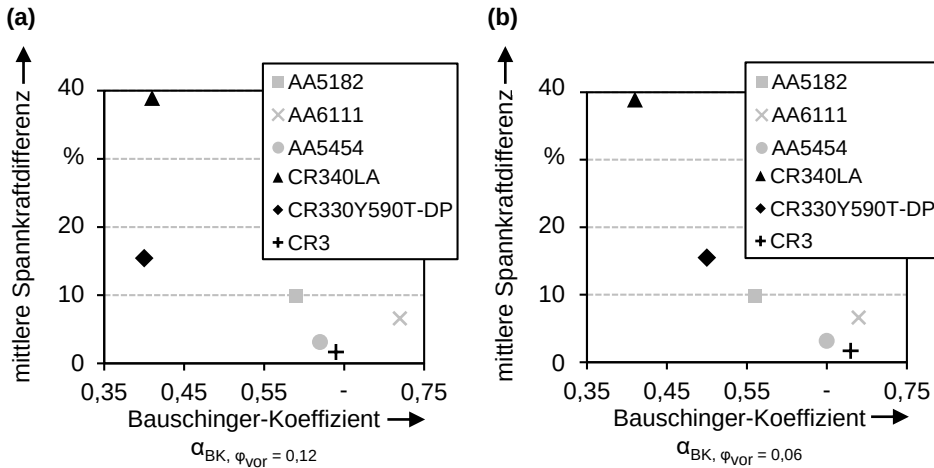


Bild 32: Mittlerer Einfluss der Umformhistorie auf die erforderliche Spannkraft – aufgetragen über den bei einer Vordehnung von (a) $\varphi_{vor} = 0,12$ und (b) $\varphi_{vor} = 0,06$ ermittelten Bauschinger-Koeffizienten der Werkstoffe

Für die Untersuchung des Effekts der Anfangsfließspannung der Werkstoffe der L-Proben werden Simulationen mit entfernter Umformhistorie verwendet, da sich der werkstoffabhängige Einfluss des Bauschinger-Effekts teilweise signifikant (siehe Bild 32) auf die erforderlichen Spannkkräfte auswirkt. Auf Grund der unterschiedlichen Blechdickenbereiche werden zudem die Stahl- und die Aluminiumwerkstoffe getrennt ausgewertet, um den Effekt der Blechdicke nicht mit dem Effekt des Werkstoffs zu vermengen. Bild 33 zeigt die Zusammenhänge zwischen der mittleren erforderlichen Spannkraft und der Anfangsfließspannung der Stahlwerkstoffe (a) und der Aluminiumwerkstoffe (b). Ein näherungsweise linearer Anstieg der erforderlichen Spannkkräfte mit der Höhe der Anfangsfließspannung ist dabei für beide Werkstoffgruppen erkennbar. Der Effekt der Höhe der Anfangsfließspannung auf die erforderlichen Spannkkräfte ist darauf zurückzuführen, dass die L-Proben bei den Spannvorgängen plastisch verformt werden (siehe Abschnitt 5.1.1). Der lineare Zusammenhang deckt sich mit dem linearen Effekt der skalierten Verfestigung von CR340LA (siehe Bild 29b). Die Differenz der mittleren erforderlichen Spannkraft zwischen dem Aluminiumwerkstoff mit der geringsten und der höchsten Anfangsfließspannung beträgt dabei 12,5 %, bei den Stahlwerkstoffen sind es 23,1 %. Die Höhe der Anfangsfließspannung des Werkstoffs sollte daher bei der Auslegung erforderlicher Spannkkräfte berücksichtigt werden.

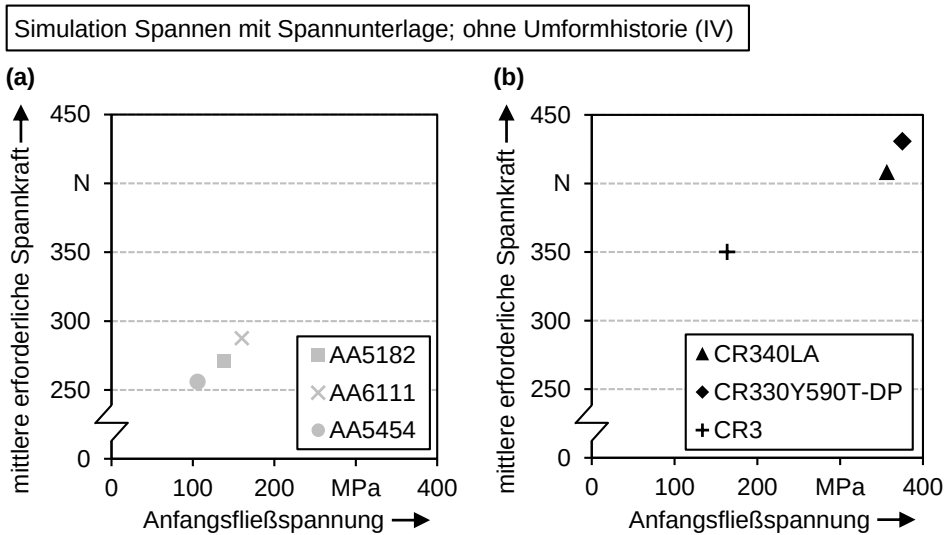


Bild 33: Mittlere erforderliche Spannkraft (a) der Aluminiumwerkstoffe und (b) der Stahlwerkstoffe ohne Umformhistorie

5.4.3 Ursachen für die Beeinflussung der erforderlichen Spannkraft durch die Umformhistorie

In diesem Abschnitt werden die Ursachen für die Beeinflussung der erforderlichen Spannkraft durch die Umformhistorie ermittelt. Bereits in Abschnitt 5.3.2 wurde gezeigt, dass die in der Simulation ermittelten Spannkraft von der Modellierungsart der L-Probe beeinflusst werden. In Abschnitt 5.4.2 wurde für AA5182 ein mittlerer Einfluss der Umformhistorie auf die erforderliche Spannkraft von 10 % und für CR340LA von 39 % ermittelt. Die Umformhistorie umfasst die Berücksichtigung von Spannungen, Dehnungen, Blechdickenverteilung und des Bauschinger-Effekts. Um deren Einflüsse näher zu untersuchen, wird jeweils die mittlere Konfiguration (der Zentrumspunkt) des Zentral Zusammengesetzten Versuchsplans von AA5182 und CR340LA aus Abschnitt 5.4 gewählt. Bei diesen Konfigurationen handelt es sich jeweils um einen Biegewinkel von $91,5^\circ$, einen Spannrollenabstand zur Rückwand von 16 mm und um die charakterisierten Werkstoffparameter. Die Blechdicke von AA5182 beträgt 1,61 mm und die von CR340LA 1,24 mm.

Die Berücksichtigung der Blechdickenverteilung wirkt sich lediglich mit 0,06 % bei AA5182 und mit 0,07 % bei CR340LA auf die erforderliche Spannkraft aus. Diese vernachlässigbar geringe Beeinflussung ist auf eine

maximale Änderung der Blechdicke infolge der Umformsimulation von lediglich 0,1 % bei beiden Werkstoffen zurückzuführen. Die Spannungen und Dehnungen sowie die Berücksichtigung des Bauschinger-Effekts wirken sich dagegen deutlich stärker auf die erforderliche Spannkraft aus. Bei AA5182 führen eine Berücksichtigung des Bauschinger-Effekts und der Spannungen und Dehnungen zu einer Spannkraftreduktion von 9,5 %. Ohne Berücksichtigung des Bauschinger-Effekts beträgt die Spannkraftreduktion infolge der übrigen Umformhistorie 2,7 %. Bei CR340LA führen eine Berücksichtigung des Bauschinger-Effekts mit den Spannungen und Dehnungen zu einer Spannkraftreduktion von 40,8 %. Wird der Bauschinger-Effekt nicht berücksichtigt, so beträgt die Spannkraftreduktion infolge der übrigen Umformhistorie noch 10,4 %. Da die Effekte bei CR340LA qualitativ den Effekten bei AA5182 entsprechen, jedoch bei CR340LA ausgeprägter sind, werden die Ursachen-Wirkungs-Zusammenhänge im Folgenden am Beispiel von CR340LA dargestellt. Bild 34 zeigt für CR340LA die erforderlichen Spannkräfte und Spannungsverläufe auf der Bauteiloberseite während des Spannvorgangs mit der modellierten Spannrolle. Dabei werden die L-Proben mit Berücksichtigung des Bauschinger-Effekts mit Spannungen und Dehnungen, nur mit Spannungen und Dehnungen und ohne Umformhistorie untersucht. Aus Gründen der Übersichtlichkeit ist nur in der ersten Abbildung die modellierte Spannrolle dargestellt. Dabei zeigt sich bei den ersten beiden L-Proben ein ungleichmäßiger Spannungsverlauf im Auslauf des Radiusbereichs, der in Bild 35 aufgegriffen wird.

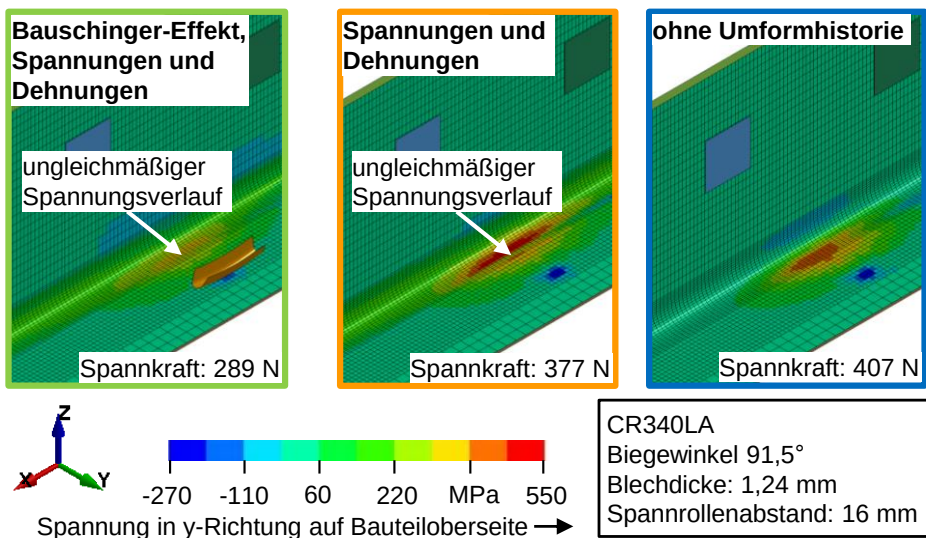


Bild 34: Spannungsverlauf und erforderliche Spannkräfte in der Simulation unterschiedlich modellierter L-Proben während des Spannvorgangs

5.4 Untersuchung von Einflussgrößen auf die Höhe erforderlicher Spannkkräfte für das Spannen von Prinzipbauteilen

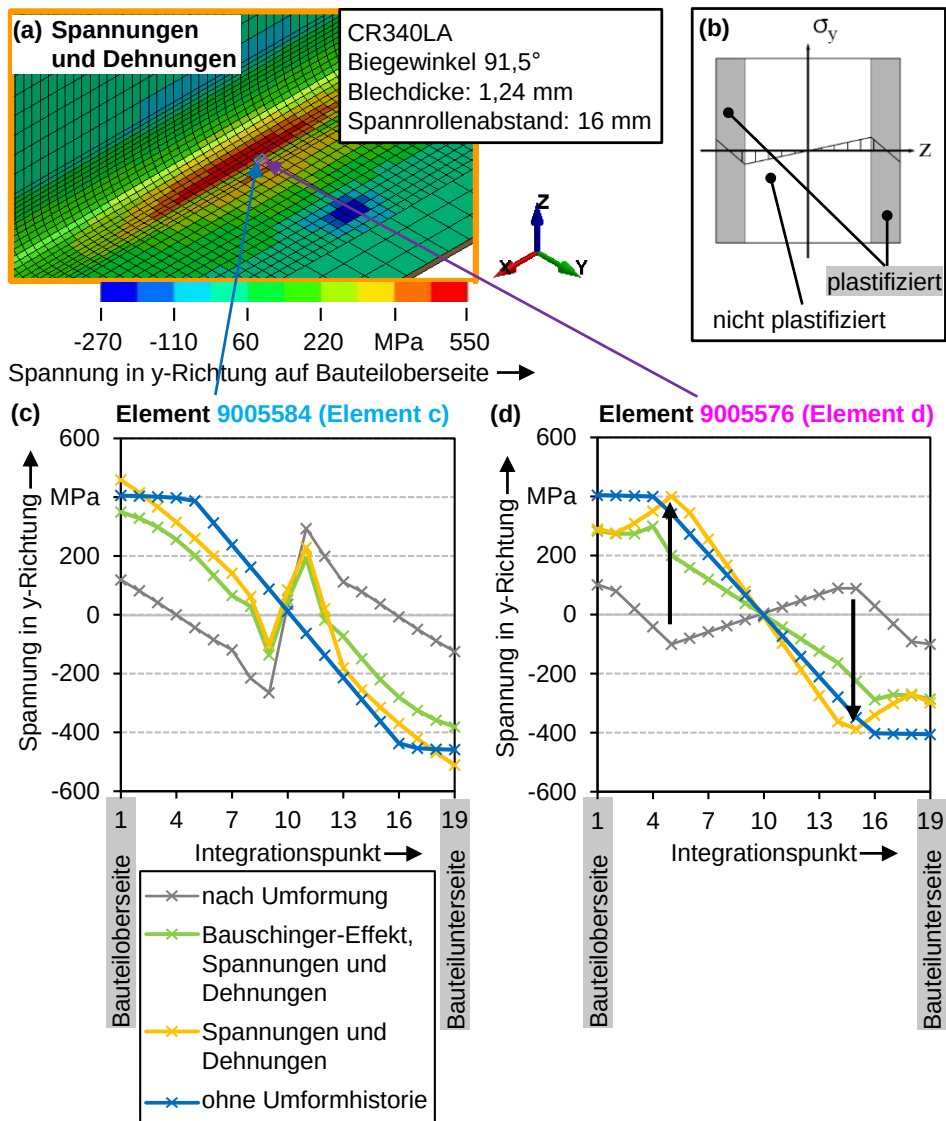


Bild 35: (a) Spannungsverlauf auf der Bauteiloberseite der L-Probe beim Spannvorgang; Spannungsverteilung über der Blechdicke eines durch Biegen hergestellten Bauteils nach [123]; Spannungsverteilung über die Blechdicke von Element 9005584 (c) und Element 9005576 (d)

Der ungleichmäßige Spannungsverlauf ist in der Detailansicht in Bild 35a ebenfalls erkennbar. Um diesen Spannungsverlauf zu untersuchen erfolgt eine Auswertung der Spannungsverteilung in y-Richtung (σ_y , orthogonal zur Biegelinie bei der vorrangegangenen Umformung und beim Spannvorgang) über der Blechdicke. Hierzu werden das Element 9005584 (in

Bild 35c, im Folgenden als Element *c* bezeichnet), dessen σ_y 459 MPa beträgt und das Element 9005576 (in Bild 35d, im Folgenden als Element *d* bezeichnet), welches mit 290 MPa eine deutlich geringere Spannung in *y*-Richtung als die umliegenden Elemente auf der Bauteiloberseite aufweist, ausgewertet.

Der Spannungszustand nach dem Umformprozess (siehe Anhang 1) durch freies Biegen im Gesenk ist in Bild 35c und d grau dargestellt und stimmt für beide Elemente qualitativ mit dem Spannungsverlauf der Eigenspannungen nach dem Biegen aus der Literatur [123] überein. Zur besseren Darstellung des Spannungsverlaufs wurden in diesem Abschnitt in der Simulation 19 Integrationspunkte über der Blechdicke verwendet. Gegenüber Element *c* (und den übrigen Elementen in *y*-Richtung) sind die maximalen Eigenspannungen von Element *d* deutlich geringer. Dabei verfügt Element *d* über einen deutlich breiteren nicht plastifizierten Bereich (zwischen den Integrationspunkten 5 und 15). In diesem herrschen im oberen Teil des Blechs Druck- und im unteren Teil des Blechs Zugspannungen. Wird nun die L-Probe mit der Spannrolle gespannt, so wird der Gleichgewichtszustand der Spannungen im Bauteil, der sich nach der Rückfederung eingestellt hat, aufgehoben. Der obere Teil des Blechs wird auf Zug und der untere Teil auf Druck belastet. Die Eigenspannungen im nicht plastifizierten Bereich unterstützen dabei in Element *d* die durch die Spannrolle eingeleitete Last. Dies führt zu einer Umkehr der maximalen Eigenspannungen (in Bild 35d durch Pfeile markiert) für die gelbe und grüne Kurve, aus den Simulationen mit den Spannungen und Dehnungen aus der vorangegangenen Umformsimulation und damit zu einer Reduktion der erforderlichen Spannkraft gegenüber der Simulation ohne Umformhistorie (blaue Kurve). Die Spannungsumkehr in Element *d* führt zu einer erhöhten Nachgiebigkeit der L-Probe in diesem Bereich, die wiederum zu einer Reduktion der Spannkraft führt (siehe Bild 36). Der Spannungsverlauf über der Blechdicke der übrigen Elemente im Flanschbereich mit abweichender *y*-Koordinate wird in Bild 35c mit Element *c* beispielhaft dargestellt. Dort wird der Spannungsverlauf infolge des Spannvorgangs auf der oberen Hälfte der Blechdicke in Richtung Zugspannungen und auf der unteren Hälfte der Blechdicke in Richtung Druckspannungen verschoben. Es erfolgt bei diesen Elementen keine Umkehr der Spitzen der Eigenspannungen, die zu Spannungsmaxima über der Blechdicke führen.

Bild 36 zeigt die Profile der auf Höhe der Spannrolle normal zu *x*-Achse geschnittenen L-Proben. Bei Berücksichtigung des Bauschinger-Effekts und der Spannungen und Dehnungen (grüne Kurve) zeigt die L-Probe die höchste Nachgiebigkeit und benötigt die geringsten Spannkräfte. Die

höchste Nachgiebigkeit der drei modellierten Proben ist somit auf den Bauschinger-Effekt (siehe Abschnitt 2.3.2) zurückzuführen, der sich durch eine Reduktion der Fließspannung bei Umkehr der Lastrichtung (Spannvorgang in entgegengesetzter Richtung der vorangegangenen Biegeumformung) zeigt. Ohne den modellierten Bauschinger-Effekt und mit den Spannungen und Dehnungen (orange Kurve) zeigt sich eine gegenüber der L-Probe ohne Umformhistorie (blaue Kurve) erhöhte Nachgiebigkeit, die sich in einer Spannkraftreduktion von 10,4 % äußert. Dabei verringert sich die Steigung der orangenen Kurve gegenüber der blauen Kurve im Bereich von Element *d*, in dem es zur Spannungsumkehr (siehe Bild 35d) kommt. Die für CR340LA aufgezeigten Zusammenhänge treten auch bei AA5182 auf, jedoch auf Grund des schwächeren Bauschinger-Effekts von AA5182 mit einer schwächeren Ausprägung.

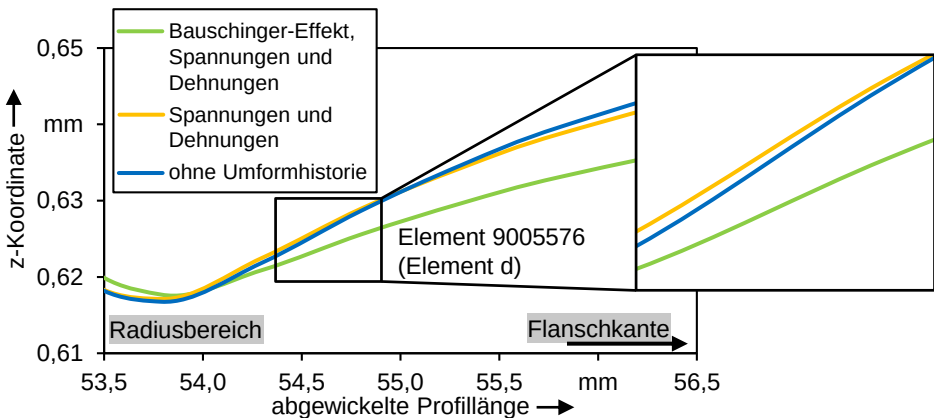


Bild 36: Schnittprofile der L-Proben aus Bild 34 und Bild 35 – normal zur x-Achse auf Höhe der Spannrolle geschnitten

5.5 Simulationsmodell für das kraftgesteuerte Spannen

Die mitlaufende Spanntechnik kann neben dem Spannen mit Spannunterlage, bei dem die gespannten Bauteile auf der Unterseite unterhalb der Spannrolle abgestützt werden können (siehe Bild 37a), auch Bauteile ohne Spannunterlage spannen. Dabei erfolgt keine Abstützung der Bauteile unterhalb der Spannrolle (siehe Bild 37b), wodurch neben dem oberen Bauteil nun auch das untere Bauteil infolge der aufgebrachten Spannkraft nachgeben kann. Die Möglichkeit, Bauteile mit nur einseitiger Zugänglichkeit ohne Spannunterlage zu spannen, erhöht den Einsatzbereich der mitlaufenden Spanntechnik im Karosseriebau. Darüber hinaus kann die Komplexität einer Schweißvorrichtung durch den Verzicht auf Spannunterlagen

deutlich reduziert werden (siehe Abschnitt 7.1.4). Somit lässt sich die Flexibilität der Vorrichtung erhöhen, um beispielsweise Bauteile mehrerer Fahrzeugvarianten in einer Vorrichtung zu fügen, deren Schweißnähte sich an unterschiedlichen Positionen befinden.

Eine zu hoch gewählte Spannkraft beim Spannen ohne Spannunterlage führt nicht nur zu einer unnötig tiefen Rille, welche die Spannrolle auf der Bauteiloberfläche hinterlässt (siehe Abschnitt 5.1.2), sondern auch zu einer Deformation der gespannten Bauteile. Aus diesem Grund gilt es, die Höhe der Spannkraft beim Spannen mit einseitiger Zugänglichkeit bzw. ohne Spannunterlagen präzise auszulegen. Dabei besteht die Möglichkeit, dass aus Gründen der Geometrie-, Werkstoff- und Blechdickenkombination ein Spaltschluss unterhalb der Spannrolle nicht realisierbar ist.

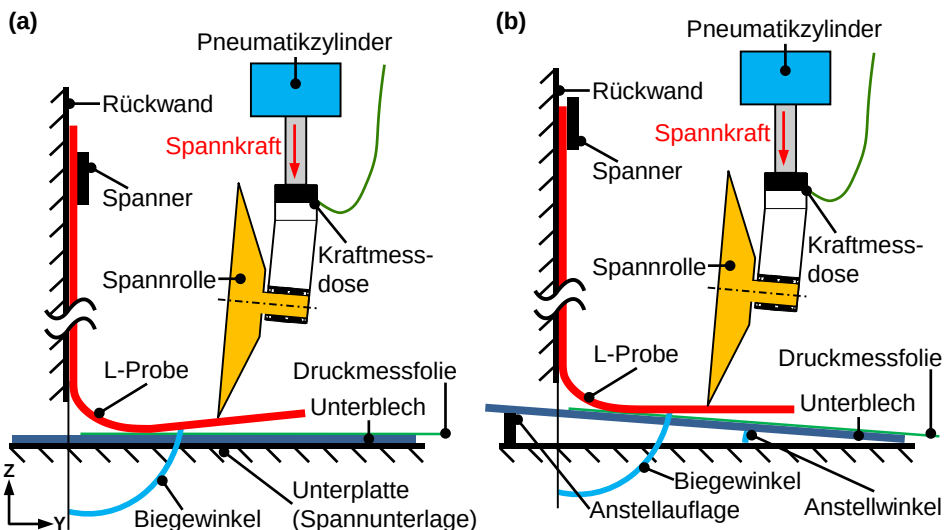


Bild 37: Spannen von L-Proben durch die mitlaufende Spanntechnik (a) mit Spannunterlage; (b) ohne Spannunterlage

Das Simulationsmodell zur Ermittlung der zum Spaltschluss unterhalb der Spannrolle erforderlichen Spannkraft wird vom Spannen mit Spannunterlage auf das Spannen ohne Spannunterlage übertragen und durch das Spannen mit Kraftvorgabe erweitert. Dabei wird auch hier auf das Prinzipbauteil der L-Probe und auf ebene Unterbleche mit den Werkstoffen AA5182 (Blechdicke 1,98 mm) und CR340LA (Blechdicke 1,24 mm) zur Validierung des Simulationsmodells zurückgegriffen. Für Versuchskonfigurationen ohne Spannunterlage wird ein angestelltes Unterblech verwendet (siehe Bild 37b). Dadurch ergibt sich die Möglichkeit, die Abweichung vom Sollmaß im Flanschbereich zwischen den Bauteilen über den Anstellwinkel

des Unterblechs einzustellen. Die L-Probe wird dabei mit einem Biegewinkel von 90° verwendet. Auch hier werden, wie bereits in Abschnitt 5.3, L-Proben numerisch mittels Umformsimulation generiert, um den Einfluss der Umformhistorie auf die erforderlichen Spannkkräfte zu untersuchen.

5.5.1 Validierungsversuche des Spannvorgangs von L-Proben ohne Spannunterlage

Für die Validierungsversuche wird der Versuchsaufbau für das Spannen ohne Spannunterlage aus Abschnitt 4.3.2 verwendet. Die Validierungsversuche erfolgen in Anlehnung an die Spannversuche mit Spannunterlage, die in Abschnitt 5.1.1 beschrieben sind. Das Unterblech liegt dabei nicht, wie bei den Spannversuchen mit Spannunterlage, flächig auf der Unterplatte auf, sondern wird mittels einer Anstellauflage mit einem definierten Anstellwinkel positioniert (siehe Bild 37b). Durch die gezielte Variation des Anstellwinkels wird die modellierte Abweichung vom Sollmaß im Flanschbereich eingestellt. Neben dem L-Probenflansch wird bei diesem Versuchsaufbau während des Spannvorgangs auch das Unterblech verformt. Dabei werden für beide Werkstoffe drei Konfigurationen mit zunehmendem Anstellwinkel geprüft. Die Biegewinkel der L-Proben betragen im Mittel für AA5182 $90,1^\circ \pm 0,07^\circ$ und für CR340LA $90,0^\circ \pm 0,09^\circ$ (Sollbiegewinkel von 90°). Die Anstellwinkel der drei Konfigurationen sind in Tabelle 6 zusammengefasst. Dabei sind die Anstellwinkel der Unterbleche aus AA5182 stets 1° unter denen der entsprechenden Konfiguration mit CR340LA, um die auch hier vergleichsweise hohen erforderlichen Spannkkräfte der Proben aus AA5182 im Rahmen zu halten. Im Gegensatz zu den Spannversuchen mit Spannunterlage existiert bei der Vorbereitung dieser Versuche bereits ein Simulationsmodell (siehe Abschnitt 5.5.2), dessen Grundlage bereits durch Spannversuche mit Spannunterlage validiert ist (siehe Abschnitt 5.3). Dadurch ist es möglich, die Versuche ohne Spannunterlage so auszulegen, dass mit den Versuchen mit Spannunterlage vergleichbare Kraftniveaus erreicht werden. Diese liegen für AA5182 zwischen 326 N und 737 N und für CR340LA zwischen 258 N und 397 N (siehe Bild 19b). Darüber hinaus lässt sich somit die mittlere Anzahl der Spannkrafterhöhungen bei den Spannversuchen von vier (Versuche mit Spannunterlage) auf zwei (Versuche ohne Spannunterlage) reduzieren. Dabei wird auch hier die Spannkraft in 20 N-Schritten erhöht. Für den Abstand der Spannrolle zur Rückwand werden hier ebenfalls 14 mm gewählt und die Geschwindigkeit der Spannrolle beträgt 100 mm/s. Der Spaltschluss wird durch die Druckmessfolie ermittelt und die Spannkraft durch eine Kraftmessdose aufgezeichnet. Jede L-Probe wird zur Übertragung in die FE-Simulation mittels

Calipri-Gap (siehe Abschnitt 4.6) vermessen. Während der Versuche wird für jede L-Probe ein separates Unterblech verwendet. Infolge des Spannvorgangs werden die Biegewinkel der L-Proben aus AA5182 im Mittel um $0,24^\circ$ und die der L-Proben aus CR340LA um $1,10^\circ$ reduziert.

Tabelle 6: Anstellwinkel der Unterbleche für Spannversuche ohne Spannunterlage ($n = 3$)

Werkstoff	Anstellwinkel α_A Konfiguration 1	Anstellwinkel α_A Konfiguration 2	Anstellwinkel α_A Konfiguration 3
AA5182	2°	3°	4°
CR340LA	3°	4°	5°

Bild 38a zeigt den Spannversuch ohne Spannunterlage einer L-Probe aus AA5182 mit einem Anstellwinkel von 3° (Konfiguration 2). Für jede Konfiguration (siehe Tabelle 6) werden jeweils drei L-Proben beider Werkstoffe geprüft.

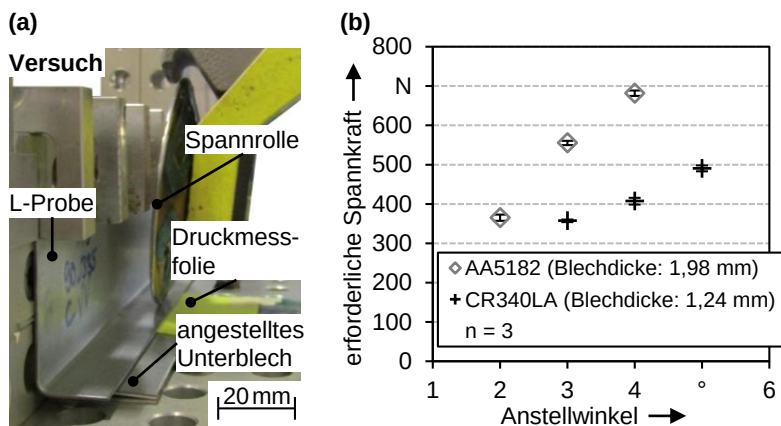


Bild 38: (a) Spannversuch ohne Spannunterlage; (b) experimentell ermittelte erforderliche Spannkraft für das Spannen von L-Proben mit angestelltem Unterblech ohne Spannunterlage aus AA5182 und CR340LA

Die Versuchsergebnisse sind in Bild 38b für die jeweils drei untersuchten Konfigurationen mit den Werkstoffen AA5182 und CR340LA dargestellt. Die für den Spaltschluss unterhalb der Spannrolle erforderlichen Spannkraft zeigen für beide Werkstoffe einen näherungsweise linearen Anstieg mit zunehmendem Anstellwinkel des Unterblechs. Der zunehmende Anstellwinkel führt dabei zu einem zunehmenden Spalt zwischen den L-Proben und den Unterblechen, der in den Versuchen durch die Spannrolle geschlossen wird. Wie bereits bei den Spannversuchen mit Spannunterlage

(siehe Abschnitt 5.1.1) sind auch beim Spannen ohne Spannunterlage mit einem nachgiebigen Unterblech die erforderlichen Spannkkräfte von AA5182 deutlich höher als von CR340LA und steigen mit zunehmendem Spalt stärker an als bei CR340LA. Dies ist auch hier auf die um 0,74 mm höhere Blechdicke von AA5182 zurückzuführen, die zu einem erhöhten Biege widerstand der L-Proben und der Unterbleche führt.

5.5.2 Aufbau des Simulationsmodells für das kraftgesteuerte Spannen

Die Simulation des kraftgesteuerten Spannens ohne Spannunterlage wird, wie bereits die Simulation des weggesteuerten Spannens mit Spannunterlage in die drei, in Bild 39 dargestellten, Schritte „Einlegen“, „Spanner Schließen“ und „Spannen“ unterteilt. Der Unterschied gegenüber dem in Abschnitt 5.3.1 beschriebenen Vorgehen für das Spannen mit Spannunterlage bei den Schritten „Einlegen“ und „Spanner Schließen“ liegt in der Berücksichtigung des angestellten Unterblechs.

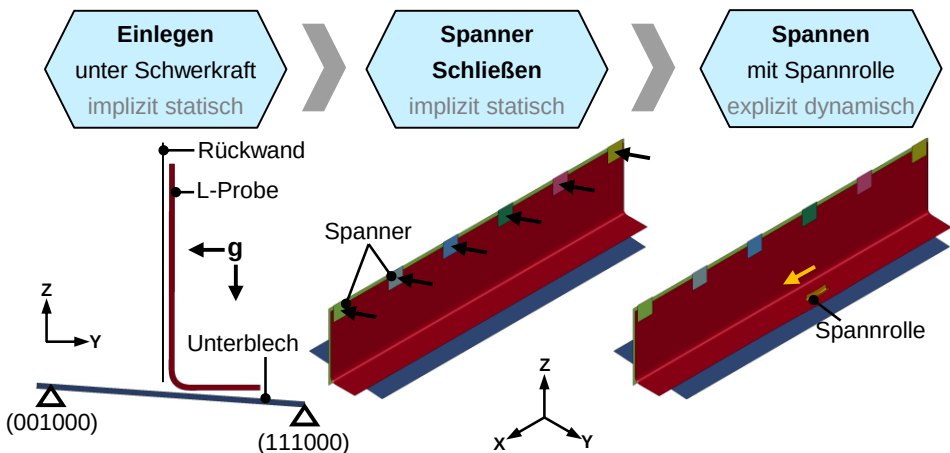


Bild 39: Berechnungsschritte des Simulationsmodells zum Spannen von L-Proben ohne Spannunterlage

Beim Spannen mit Spannunterlage haben die ersten beiden Simulationsschritte keine Auswirkung auf das Unterblech, so dass bei diesen beiden Simulationsschritten die Unterplatte um die Blechdicke des Unterblechs in z -Richtung angehoben wird, um Rechenzeit zu sparen. Das Unterblech wird anschließend in der Spannsimulation berücksichtigt. Dagegen wird das Unterblech beim Spannen ohne Spannunterlage bereits ab dem ersten Simulationsschritt berücksichtigt, da es sich leicht unter der L-Probe und der Schwerkraft durchbiegt. Entsprechend dem realen Versuchsaufbau

(siehe Abschnitt 4.3.2) werden für die untere Kante des Unterblechs die Translationen in x-, y- und z-Richtung und im Bereich des Kontakts mit der Anstellaufgabe die Translationen in z-Richtung eingeschränkt. Da beim Versuchsaufbau des Spannens ohne Spannunterlage keine Unterplatte verwendet wird (vergleiche Bild 14 mit Bild 12), sind die Positionen der Spanner auf der L-Probe im Vergleich zum Spannen mit Spannunterlage in positive z-Richtung verschoben.

Im Gegensatz zum Spannen mit Spannunterlage ist hier die z-Position der Spannrolle zum Erzielen eines geschlossenen Spalts unterhalb der Spannrolle für den Simulationsschritt „Spannen“ unbekannt. Diese hängt vom Anstellwinkel des Unterblechs, dessen Nachgiebigkeit und der Nachgiebigkeit und Geometrie der L-Probe ab. Daher kann die erforderliche Spannkraft nicht in einer weggesteuerten Spannsimulation bestimmt werden. Aus diesem Grund werden mehrere Spannsimulationen mit einer kraftgesteuerten Spannrolle durchgeführt. Die Spannrolle wird weggesteuert auf die L-Probe gefahren, dann erfolgt die Kraftvorgabe über das Keyword *LOAD_RIGID_BODY. Der Spaltschluss unterhalb der Spannrolle wird dabei durch Auswertung des Kontaktdrucks zwischen der L-Probe und dem Unterblech über die „intforce“-Datei ermittelt. Die erforderliche Spannkraft wird stets iterativ auf 5 N genau angenähert.

5.5.3 Validierung des Simulationsmodells für das kraftgesteuerte Spannen

Auf Grund des in Abschnitt 5.3.2 ermittelten Einflusses der Umformhistorie auf die erforderlichen Spannkraften der L-Proben in Höhe von 9,1 % für AA5182 und 45,0 % für CR340LA beim Spannen mit Spannunterlage, werden auch für das Spannen ohne Spannunterlage L-Proben mit Umformhistorie verwendet (Modellierungsart III in Bild 24). Dabei wird auch hier für jede im Versuch geprüfte L-Probe durch Biegesimulation ein digitales Abbild erzeugt (siehe Anhang 1) und gespannt. Zusätzlich wird für die zweite Konfiguration mit dem jeweils mittleren Anstellwinkel für beide Werkstoffe der Einfluss der Umformhistorie auf die erforderlichen Spannkraften für das Spannen ohne Spannunterlage untersucht. Hierzu wird die erforderliche Spannkraft in der FE-Simulation mit durch Biegesimulation gefertigten L-Proben, deren Umformhistorie entfernt ist (Modellierungsart IV in Bild 24), ermittelt und mit den Ergebnissen mit Umformhistorie abgeglichen.

Die Versuchs- und Simulationsergebnisse sind in Bild 40 für die drei untersuchten Konfigurationen der beiden Werkstoffe dargestellt. Die mittlere

absolute Abweichung zwischen Versuch und Simulation von AA5182 liegt damit im Bereich sehr guter Übereinstimmung und beträgt 3,8 %. Sie setzt sich aus den Abweichungen von 4,5 %, 6,6 % und 0,2 % (17 N, 37 N und 2 N) für die drei Konfigurationen zusammen und liegt damit stets innerhalb der 50 N Schritte, in denen beim Fügen von Karosserieteilen die Spannkraft festgelegt wird (siehe Abschnitt 5.1.1). Mögliche Gründe für die Abweichungen zwischen den Versuchs- und Simulationsergebnissen sind geringe Ungenauigkeiten bei der Modellierung der L-Proben in der FE-Simulation sowie die Schrittweite von 20 N, mit der die Spannkraft im Versuch erhöht wird. Des Weiteren wird die für den Spaltschluss in der Simulation erforderliche Spannkraft iterativ bis auf 5 N angenähert (siehe Abschnitt 5.5.2).

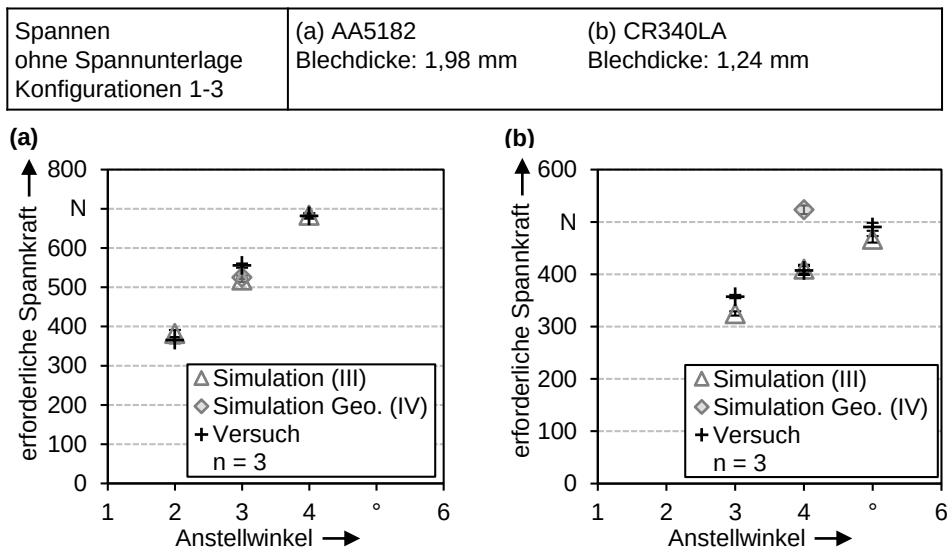


Bild 40: In der Simulation mit (III) und ohne (IV) Umformhistorie sowie experimentell ermittelte erforderliche Spannkraften für das Spannen ohne Spannunterlage für (a) AA5182 und (b) CR340LA

Der Einfluss der Umformhistorie wird für die drei Proben der jeweils mittleren Konfiguration durch zusätzliche Simulationen mit L-Proben ohne Umformhistorie (IV) untersucht. Die Berücksichtigung der Umformhistorie führt zu einer Reduktion der erforderlichen Spannkraft. Maßgeblich ist dabei auf Grund der Wechselbiegebelastung der Bauschinger-Effekt mit Spannungen und Dehnungen (siehe Abschnitt 5.4.3). Für AA5182 ohne Spannunterlage verringert sich die erforderliche Spannkraft durch die Berücksichtigung der Umformhistorie um 1,3 %. Der Einfluss der Umformhistorie ist hier deutlich geringer als bei der Simulation des Spannens ohne Spannunterlage von AA5182, bei welcher der Einfluss 9,1 % beträgt. Dies ist

darauf zurückzuführen, dass beim Spannvorgang mit Spannunterlage lediglich der Flanschbereich und der umgeformte Radiusbereich der L-Probe verformt werden. Dagegen wird beim Spannen ohne Spannunterlage zusätzlich zum Flansch- und Radiusbereich der L-Probe das ebene, nicht umgeformte Unterblech verformt. Dadurch verringert sich der Einfluss der Umformhistorie beim Spannen ohne Spannunterlage.

Die mittlere absolute Abweichung zwischen Versuch und Simulation von CR340LA beträgt 4,9 % und liegt damit noch im Bereich sehr guter Übereinstimmung. Die einzelnen Abweichungen der drei Konfigurationen betragen 9,0 %, 0,7 % und 4,9 % (32 N, 3 N und 24 N) und liegen damit ebenfalls stets innerhalb der 50 N Schritte, die beim Fügeprozess von Karosserieteilen zur Definition Spannkraft verwendet werden. Bei CR340LA liegt, wie bei AA5182, auf Grund der Zunahme von nachgiebigen, nicht umgeformten Bereichen der gespannten Bauteile, der Einfluss der Umformhistorie mit 27,6 % deutlich unter dem beim Spannen mit Spannunterlage (45,0 %). Auch beim Spannen ohne Spannunterlage ist der Einfluss der Umformhistorie bei CR340LA deutlich ausgeprägter als bei AA5182. Dies ist, wie beim Spannen mit Spannunterlage, auf den deutlich stärker ausgeprägten Bauschinger-Effekt bei CR340LA (siehe Abschnitt 5.2.1) zurückzuführen.

5.6 Simulationsmodell für das Spannen und Fügen von Prinzipbauteilen

Zur digitalen Auslegung des flexiblen Fügeverfahrens Remote-Laserstrahlschweißen unter Einsatz der mitlaufenden Spanntechnik muss neben dem Spannvorgang mit einer Spannrolle auch der Fügevorgang in der Simulation abgebildet werden. Während in den vorherigen Abschnitten die Modellierung des Spannvorgangs mit mitlaufender Spanntechnik in der FE-Simulation behandelt wurde, wird in diesem Abschnitt das Simulationsmodell zur Modellierung des Fügevorgangs durch Remote-Laserstrahlschweißen ausgebaut. Der Spann- und Fügevorgang wird mechanisch simuliert, da der thermische Verzug beim Remote-Laserstrahlschweißen vergleichsweise gering ist (siehe [124]) und darüber hinaus für eine thermomechanisch gekoppelte Berechnung keine Materialmodelle mit Berücksichtigung des Bauschinger-Effekts zur Verfügung stehen [97]. In der FE-Simulation werden zeitabhängig aktivierte, mechanische Fügeelemente für die Modellierung der Anbindung zwischen den Blechen eingesetzt. Darüber hinaus werden auch die Lasernoppen beim Fügen verzinkter Stahlbleche (siehe

Abschnitt 2.1.2) in Form von Volumenelementen berücksichtigt. Die Simulationsmodelle werden mit den Ergebnissen von Fügeversuchen von Prinzipbauteilen ohne Spannunterlage (siehe Bild 41) abgeglichen. Für die Validierung werden Prinzipbauteile ohne Spannunterlage gewählt, da diese durch die fehlende Abstützung der Unterbleche in einer komplexeren Spannsituation als Prinzipbauteile mit Spannunterlage gefügt werden. Geschweißt wird dabei mit einem Yb:YAG-Laser in einem Abstand von 5 mm zur Spannrolle. Beim Schweißen von AA5182 beträgt die Laserleistung 5,8 kW und die Schweißgeschwindigkeit 133,3 mm/s. Beim Schweißen von CR340LA sind es 4,4 kW und 108,3 mm/s.

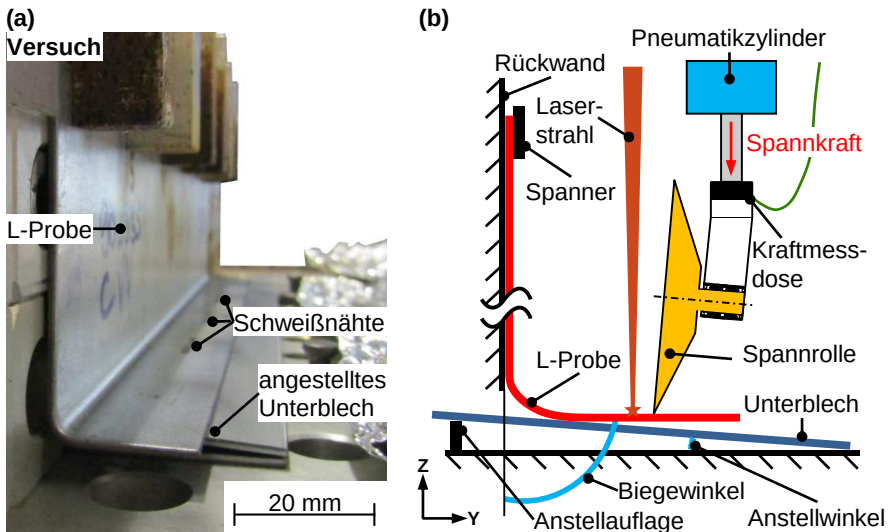


Bild 41: Fügeversuche mit Prinzipbauteilen ohne Spannunterlage; (a) im Versuch gefügte L-Probe; (b) Prinzipskizze der Versuche

5.6.1 Validierungsversuche des Spann- und Fügevorgangs mit Prinzipbauteilen

Im Folgenden werden Fügeversuche, zur Validierung des in den nächsten Abschnitten 5.6.2 und 5.6.3 zur Modellierung des Spann- und Fügevorgangs ausgebauten Simulationsmodells, durchgeführt. Die Fügeversuche werden mit dem in Abschnitt 4.3.3 beschriebenen Versuchsaufbau ohne Spannunterlage, der für eine AA5182 Probe in Bild 41a und in Bild 41b als Prinzipskizze dargestellt ist, durchgeführt. Die Fügeversuche sollen darüber hinaus zur Untersuchung des Einflusses der aufgetragenen Spannkraft auf resultierende Fügespalte herangezogen werden. Dabei werden auf dem Flansch der L-Proben aus AA5182 und CR340LA, der mit einem

Sollbiegewinkel von 90° ($90,0^\circ \pm 0,06^\circ$ für AA5182 und $90,0^\circ \pm 0,08^\circ$ für CR340LA) gefertigt ist, jeweils drei Schweißnähte entsprechend Bild 42a erzeugt. Diese sind symmetrisch über die Länge der L-Probe, mit einem Abstand von 25 mm zwischen den Schweißnähten, verteilt. Für AA5182 beträgt die Länge der Schweißnähte l_{SW} 35 mm und für CR340LA 20 mm. Dabei handelt es sich um gängige Nahtlängen der beiden Werkstoffe beim Remote-Laserstrahlschweißen. Die verwendeten Unterbleche werden entsprechend den Spannversuchen ohne Spannunterlage (siehe Abschnitt 5.5.2) mit einem definierten Anstellwinkel verwendet. Dabei wird jeweils der Anstellwinkel der mittleren Konfiguration der Spannversuche gewählt (3° für AA5182 und 4° für CR340LA). Vor dem Fügen der verzinkten L-Proben aus CR340LA werden Lasernoppen zur Zinkentgasung (siehe Abschnitt 2.1.2) in der Vorrichtung auf die Unterbleche aufgebracht. Die im Rahmen dieser Arbeit verwendete Anordnung der Lasernoppen gegenüber den Schweißnähten auf zinkbeschichteten Stahlblechen ist in Bild 42b dargestellt.

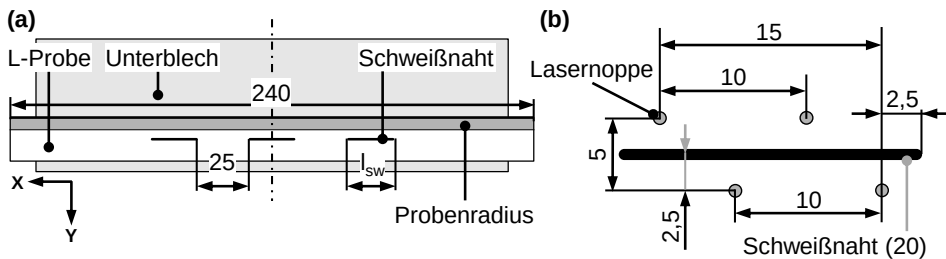


Bild 42: (a) Verteilung der Schweißnähte auf dem Flansch der L-Proben; (b) Schematische Anordnung von Lasernoppen und Schweißnaht auf zinkbeschichteten Stahlblechen (Maße in mm)

Die L-Proben aus AA5182 werden beim Fügen mit mittleren Spannkräften von $120 \pm 2,2$ N, $239 \pm 0,3$ N und $358 \pm 0,5$ N und die L-Proben aus CR340LA mit $122 \pm 0,7$ N, $242 \pm 0,8$ N und $359 \pm 1,7$ N gespannt. Mit den drei verschiedenen Sollspannkräften von 120 N, 240 N und 360 N werden jeweils drei L-Proben aus AA5182 und CR340LA gefügt. Die Spannkräfte werden von der bereits bei den Spannversuchen eingesetzten Kraftmessdose aufgezeichnet (siehe Abschnitt 4.3.2). Bei den Fügeversuchen wird die Spannrolle der mitlaufenden Spanntechnik vom Schweißroboter auf einer vorgegebenen Bahn in einem Abstand von 16 mm zur Rückwand über den Flansch der L-Probe geführt. Damit werden interne Normen des Abstands von Spanntechnik zum Radiusauslauf eines Fügeflansches erfüllt. Gegenüber den Spannversuchen (siehe Abschnitt 5.1.1) wird dabei der Abstand zur Rückwand um 2 mm erhöht, um deutlichere Fügespalte zu erhalten.

Um den Schweißprozess zuverlässig durchzuführen, wird die Spannrolle mit einer konstanten Geschwindigkeit von 50 mm/s bewegt. Gegenüber einer Rollengeschwindigkeit von 100 mm/s führt eine Geschwindigkeit von 50 mm/s zu einem präziseren und reproduzierbareren Schaltverhalten des Lasers, der über einen Profinet® Feldbus mit einer Zykluszeit von 12 ms angesteuert wird. Dies führt zu einer Reduktion der möglichen Positionsabweichung des Lasers gegenüber der Spannrolle entlang der Bahn, die sich dadurch auf 0,6 mm halbiert.

Beim Schweißen der 35 mm langen Naht von AA5182 beginnt der Laser mit dem Schweißvorgang, wenn die Spannrolle bereits 7,5 mm entlang der Naht gespannt hat. Der Zustand für den Zeitpunkt, an dem sich der Laser in der Mitte der Schweißnaht befindet, ist Bild 43a dargestellt. Die Bewegungen der Spannrolle und des Laserstrahls beim Schweißen einer Naht von AA5182 sind in Bild 43a dargestellt. Die Differenz der Geschwindigkeit zwischen Spannrolle und Laser beträgt dabei 83,3 mm/s.

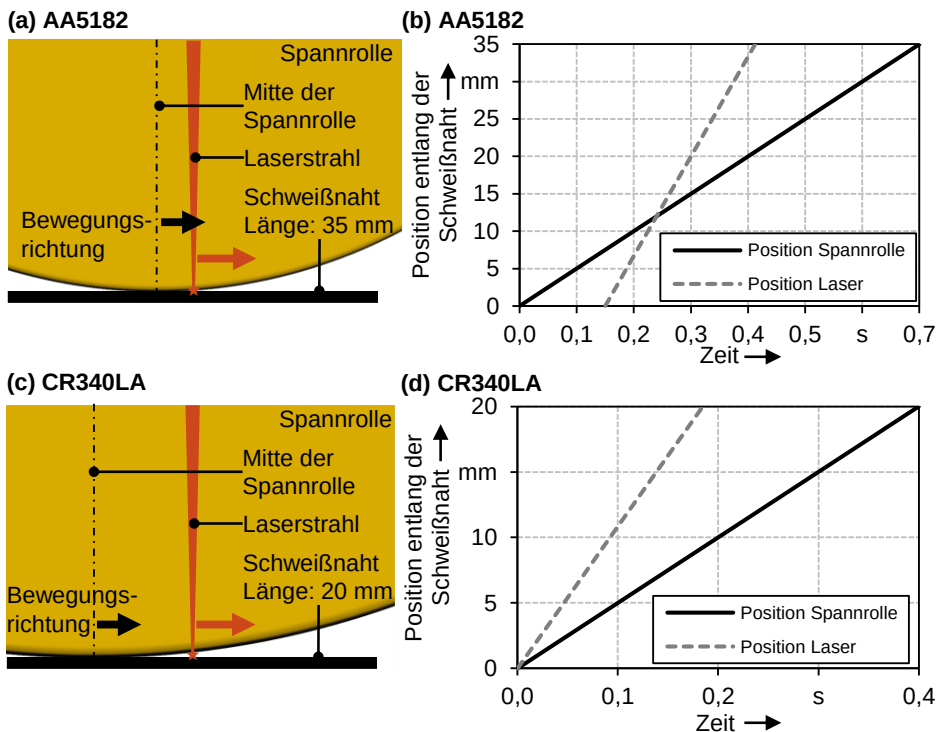


Bild 43: Bewegungen von Spannrolle und Laserstrahl entlang der Schweißnähte von L-Proben aus AA5182 (a) Skizze für den Zustand Laser an Nahtmitte; (b) benötigte Zeit für das Spannen bzw. Laserstrahlschweißen einer Naht (ab Spannrolle an Nahtbeginn) und aus CR340LA (c) Skizze für den Zustand Laser an Nahtmitte; (d) benötigte Zeit für das Spannen bzw. Laserstrahlschweißen einer Naht

Beim Fügen von L-Proben aus CR340LA startet der Laser mit dem Schweißvorgang, wenn sich die Spannrolle am Beginn der Schweißnaht befindet. Die Bewegungen von Spannrolle und Laserstrahl entlang der Schweißnaht von L-Proben aus CR340LA sind in Bild 43c und d dargestellt. Auf Grund der Geschwindigkeitsdifferenz von 58,3 mm/s sind der Laser und die Spannrolle nur zu Beginn des Schweißvorgangs an der selben Position entlang der Schweißnaht. Der Einfluss der Geschwindigkeit der Spannrolle auf die resultierenden Fügespalte beim Schweißen von Prinzipbauteilen wird in Abschnitt 5.6.5 simulativ untersucht.

Die aus den Fügeversuchen resultierenden Fügespalte werden mit dem in Abschnitt 4.4 beschriebenen Vorgehen jeweils in der Mitte der Schweißnähte ausgewertet und sind für AA5182 in Bild 44a dargestellt. Die resultierenden Fügespalte weisen einen abfallenden Verlauf mit zunehmender Spannkraft auf. Dabei kann bei einer Spannkraft von 358 N kein Fügespalt ermittelt werden, da dieser stets auf beiden Seiten der Schweißnaht unterhalb des zuverlässig messbaren Bereichs (bis 0,05 mm, siehe Abschnitt 4.4) liegt.

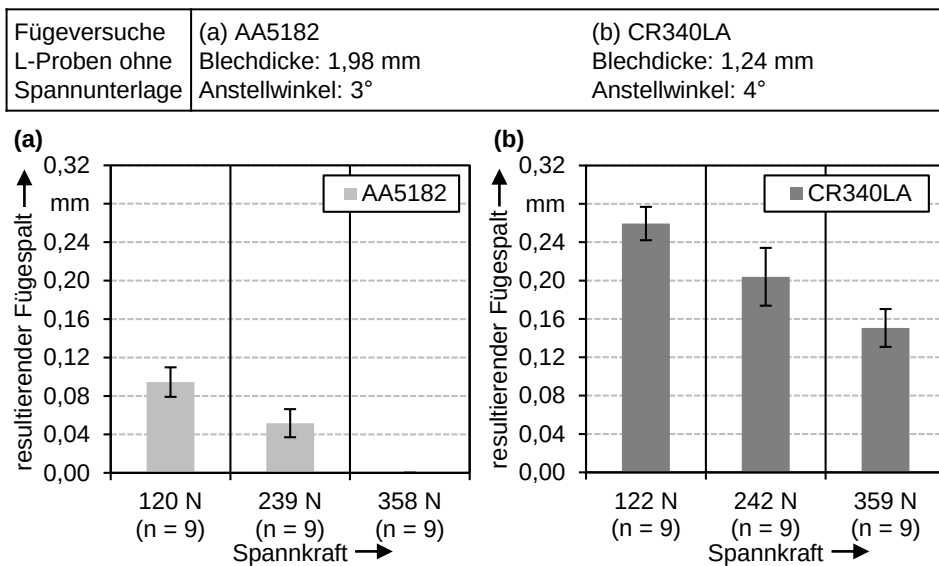


Bild 44: Aus dem Fügeversuch ohne Spannunterlage resultierende Fügespalte von Proben aus (a) AA5182 und (b) CR340LA

Die resultierenden Fügespalte von CR340LA sind in Bild 44b dargestellt. Auf Grund der Lasernoppen und des um 1° höheren Anstellwinkels sind die Fügespalte stets höher als die der Schweißnähte von AA5182. Auch die Fügespalte von CR340LA weisen einen abfallenden Verlauf mit zunehmender

Spannkraft auf. Während sich die Fügespalte bei der Spannkraft von 122 N außerhalb der Streubreite der Noppenhöhe von $0,18 \pm 0,026$ mm (siehe Bild 45) befinden, liegt der mittlere Fügespalt bei 242 N mit 0,20 mm innerhalb der Streubreite der Noppenhöhe. Da die Fügespalte in Bild 44b bei 359 N unter der mittleren Noppenhöhe liegen, kann hier von einem ausgeprägten Eindringen der Noppen in den Flansch der L-Proben ausgegangen werden. Die Validierung des Simulationsmodells für das Fügen ohne Spanunterlage erfolgt in Abschnitt 5.6.4.

5.6.2 Modellierung der Schweißnaht durch Balkenelemente und Spotweld-Kontakte

Zur Modellierung der Schweißnaht werden Balkenelemente in Kombination mit Spotweld-Kontakten (siehe Anhang 2), im Folgenden als „Spotweld-Elemente“ bezeichnet, verwendet. Diese verbinden die Mittelflächen der Schalenelemente beider Fügepartner. Die Spotweld-Elemente verfügen über die elastischen Werkstoffeigenschaften der durch sie verbundenen Fügepartner. Die Aktivierung der Spotweld-Kontakte erfolgt zu einer vorgegebenen, auf Basis der Bewegung des Lasers berechneten, Zeit. Zum Zeitpunkt der Aktivierung werden die Balkenelemente in ihrer Längsrichtung verlängert bzw. verkürzt, so dass sich ihre Knoten auf den Mittelflächen der zu verbindenden Schalenelemente befinden, die ab diesem Zeitpunkt durch das Spotweld-Element verbunden sind. Da die Spotweld-Elemente bei den L-Proben stets nacheinander aktiviert werden, erhält jedes einzelne Balkenelement eine eigene Partdefinition und eine eigene Spotweld-Kontaktdefinition. Dabei ist nach [69] darauf zu achten, dass sich die einzelnen Spotweld-Kontaktdefinitionen keine angrenzenden Knoten von Schalenelementen teilen.

5.6.3 Modellierung der Lasernoppen beim Fügen von Stahlbauteilen

Wie bereits in Abschnitt 2.1.2 beschrieben, werden Lasernoppen zum Sicherstellen eines Fügespalts beim Laserstrahlschweißen zinkbeschichteter Stahlbleche aufgebracht. Durch den Fügespalt kann das während des Schweißprozesses verdampfende Zink entweichen, ohne die Nahtqualität negativ zu beeinflussen. In der Literatur finden sich keine Ergebnisse zur Abdrucktiefe der Lasernoppen. Darüber hinaus sind zur Modellierung von Lasernoppen in der FE-Prozesssimulation keine Veröffentlichungen bekannt (siehe Abschnitt 2.3.5).

Um die Lasernoppen zu charakterisieren, werden diese entsprechend dem in Abschnitt 4.5 beschriebenen Vorgehen mit einem Digitalmikroskop optisch vermessen. Hierzu werden jeweils zwölf unbeanspruchte Lasernoppen auf jeweils vier Unterblechen vermessen (siehe Bild 16c). Des Weiteren werden für zwei gefügte L-Proben die Noppen und deren Abdrücke im Flansch (siehe Bild 16d), resultierend aus Fügeversuchen mit einer Spannkraft von 121 N und 364 N, vermessen. Die Ergebnisse sind in Bild 45 zusammengefasst. Diese zeigen eine mittlere Noppenhöhe von 0,18 mm mit einer Standardabweichung von 0,02 mm bei der Vermessung der 48 Noppen auf den Unterblechen, die nicht gespannt und nicht gefügt wurden. Die gefügten L-Proben werden in Längsrichtung ihrer Naht aufgetrennt, dabei werden einzelne Noppen beschädigt, die nicht gewertet werden. Die im Nahtbereich ausgewerteten Noppen liegen im Streubereich der 48 unbeanspruchten Noppen, wodurch von keiner Verringerung ihrer Höhe auszugehen ist. Dies ist auf die von Reiniger [24] beschriebene erhöhte Härte der Lasernoppen zurückzuführen. Die mittlere Tiefe der Abdrücke der Lasernoppen im Flansch der L-Probe liegt bei einer Spannkraft von 121 N bei 0,04 mm und bei einer Spannkraft von 364 N bei 0,06 mm, mit einer Standardabweichung von jeweils 0,02 mm. Die sich aus der Differenz der Noppenhöhe und der Abdrucktiefe der Noppen bestimmte mittlere Distanzierung beträgt für das untersuchte Spannkraftspektrum 0,13 mm.

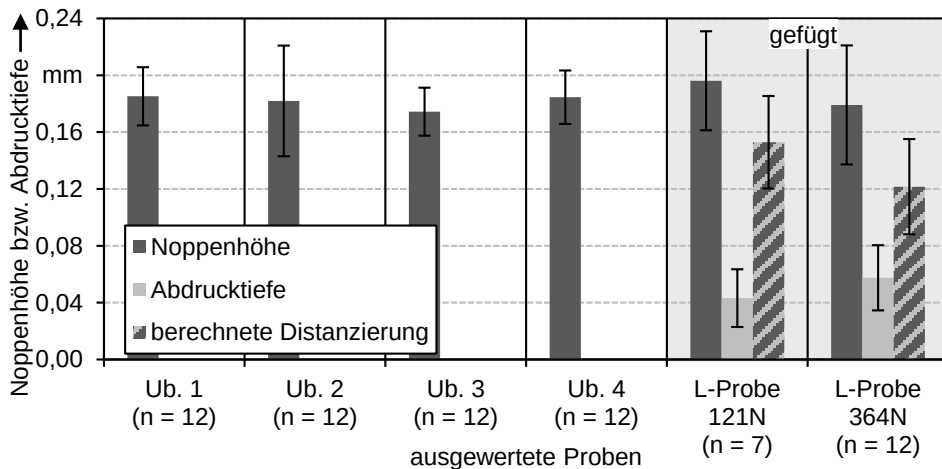


Bild 45: Ermittelte Höhe der Lasernoppen (Mittelwert 0,18 mm) auf Unterblechen (UB.) sowie die Tiefe ihrer Abdrücke im Flansch von L-Proben und die daraus berechnete resultierende Distanzierung

Die Modellierung der Lasernoppen im Bereich der Schweißnähte (siehe Bild 46a) erfolgt in der FE-Simulation durch jeweils ein Volumenelement

(Hexaeder-Element) pro Lasernoppe. Diese Elemente sind über eine Tied-Bedingung mit den Schalenelementen des Unterblechs verknüpft (siehe Anhang 2). Eine Darstellung eines Unterblechs mit Noppen und Spotweld-Elementen in der FE-Simulation findet sich in Bild 46b und mit einer L-Probe beim Fügevorgang in Bild 46c. Die Kantenlänge der quadratischen Grundfläche der Noppen von 1 mm liegt zwischen den Durchmessern der plastischen Noppenabdrücke und der Noppen. Da die Volumenelemente auf der Mittelebene der Unterbleche angebracht sind, ergibt sich die Höhe der Noppen aus der halben Blechdicke der Unterbleche (0,64 mm) und der mittleren Distanzierung (0,13 mm, siehe oben). Um den Einfluss der Noppenhöhe auf resultierende Fügespalte zu ermitteln, wird in Abschnitt 5.6.6 eine simulative Untersuchung durchgeführt. Die Kontaktdefinitionen im Rahmen der Modellierung der Noppen sind in Anhang 2 aufgelistet. Die Noppen erhalten die Werkstoffeigenschaften des Unterblechs. Die Anordnung der Noppen gegenüber den Schweißnähten erfolgt entsprechend Bild 42b. Das oben bestimmte Maß (siehe Bild 45) der mittleren Distanzierung von 0,13 mm wird für alle Noppen in Fügesimulationen von CR340LA mit Prinzipbauteilen verwendet. Diese befinden sich innerhalb des Spannkraftspektrums (ca. 120 N bis 360 N), für das die Distanzierung durch die Lasernoppen ermittelt wurde.

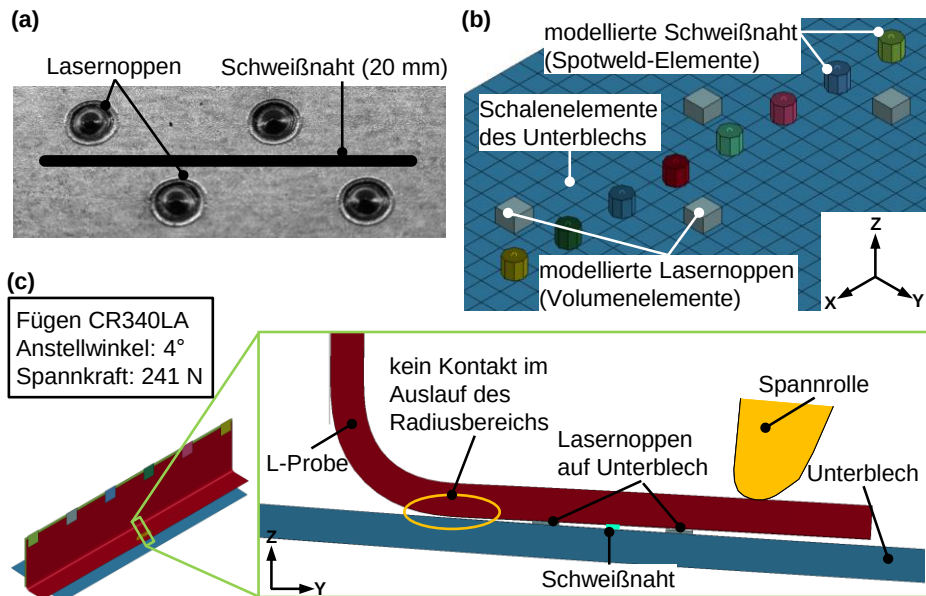


Bild 46: (a) Lasernoppen und Schweißnaht auf einem Unterblech; (b) Modellierung der Schweißnaht und der Lasernoppen durch Spotweld-Elemente und durch Volumenelemente in der FE-Simulation; (c) Schnittdarstellung im Nahtbereich beim Fügen

5.6.4 Validierung des Simulationsmodells für das Fügen von Prinzipbauteilen

Das Simulationsmodell des Spann- und Fügevorgangs ohne Spannunterlage basiert auf dem Simulationsmodell des entsprechenden Spannvorgangs aus Abschnitt 5.5.2. Dabei werden zusätzlich entsprechend Abschnitt 5.6.2 die Schweißnähte und entsprechend Abschnitt 5.6.3 für CR340LA die Lasernoppen modelliert (siehe Bild 46). Die Fügesimulation erfolgt kraftgesteuert (siehe Abschnitt 5.5.2) mit den im Versuch durch die Kraftmessdose aufgezeichneten Spannkraften.

Für die Validierung des Simulationsmodells des Spann- und Fügevorgangs ohne Spannunterlage werden die mikroskopisch ausgewerteten Ergebnisse (siehe Abschnitt 4.4) aus Abschnitt 5.6.1 verwendet. Die Standard-Überprüfung der Fügespalte, von mit mitlaufender Spanntechnik gefügten Karosserieteilen, wird mit einer Fühlerlehre durchgeführt. Die Stärke des dünnsten eingesetzten Fühlerblechs beträgt dabei 0,10 mm, da Fühlerbleche mit einer Stärke von 0,05 mm bei den Überprüfungen häufig ausknicken. Daran orientiert wird im Rahmen dieser Arbeit bis zu einer Abweichung von 0,05 mm zwischen Simulation und Versuch von einer sehr guten Übereinstimmung, von einer guten Übereinstimmung bis 0,10 mm und von einer akzeptablen Übereinstimmung bis 0,20 mm gesprochen. Die Auswertung der Fügespalte in der FE-Simulation erfolgt entsprechend der Versuchsauswertung in der Nahtmitte. Hierzu werden die in Abschnitt 5.6.2 beschriebenen Spotweld-Elemente vermessen. Der resultierende Fügespalt ergibt sich aus der gemessenen Länge abzüglich der beiden halben Schalendicken der Fügepartner.

Die Simulationsergebnisse von AA5182 sind in Bild 47a zusammen mit den Versuchsergebnissen dargestellt. Die Simulationsergebnisse zeigen dabei eine näherungsweise linear fallende Tendenz mit zunehmender Spannkraft. Sie überschätzen die Versuchsergebnisse bei 120 N um 0,04 mm und bei 239 N um 0,02 mm und weisen damit eine sehr gute Übereinstimmung auf. Für 358 N liegt auf Grund des Fügespalts von unter 0,05 mm auf beiden Seiten der Schweißnaht kein messbares Versuchsergebnis vor. In der Simulation wird für die Spannkraft von 358 N ein Fügespalt von 0,03 mm ermittelt. Dieser liegt unterhalb der bei den Versuchsproben messbaren Fügespalte.

Auch die in Bild 47b dargestellten Fügespalte von CR340LA aus der Simulation werden entsprechend dem Versuchsergebnis mit zunehmender Spannkraft reduziert. Bei der Erhöhung der Spannkraft von 242 N auf 359 N

beträgt die Reduktion des Fügespalts lediglich 0,01 mm. Dies ist darauf zurückzuführen, dass bereits bei 242 N der Flansch der L-Probe nahezu vollständig auf den modellierten Lasernoppen aufliegt. Die Simulation überschätzt dabei für die Spannkraften von 122 N und 359 N die experimentell ermittelten Fügespalte um jeweils 0,03 mm und zeigt somit eine sehr gute Übereinstimmung. Die Mittelwerte der simulativ ermittelten Fügespalte liegen dabei jeweils 0,01 mm über der Schwankungsbreite der experimentell ermittelten Fügespalte. Bei der mittleren Spannkraft stimmt das Versuchsergebnis sehr gut mit dem Simulationsergebnis überein. Dabei befinden sich die Simulationsergebnisse innerhalb des Streubereichs der Versuchsergebnisse. Die Abweichung der beiden Mittelwerte beträgt 0,01 mm.

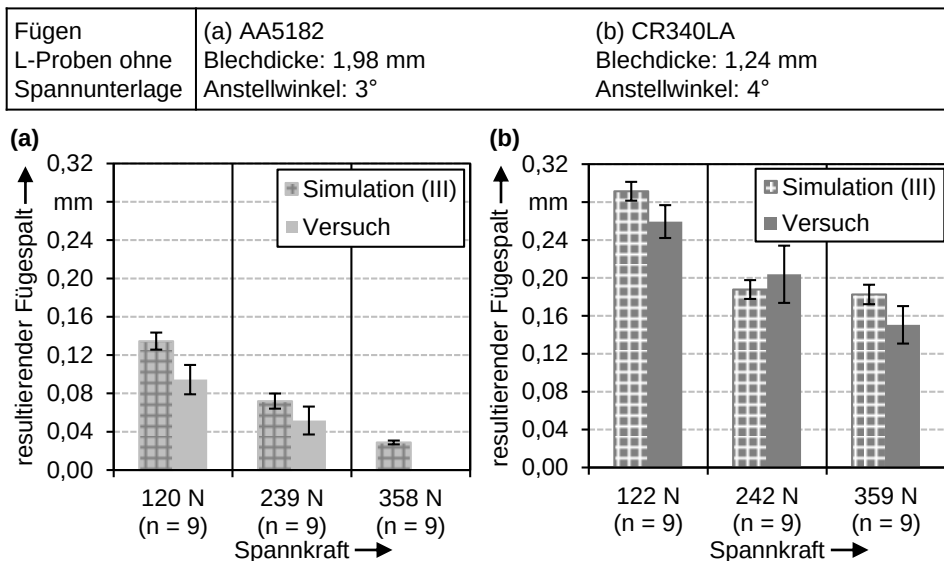


Bild 47: Resultierende Fügespalte beim Fügen ohne Spannunterlage in der Simulation und im Versuch von (a) AA5182 und (b) CR340LA

Der Einfluss der Umformhistorie wird für beide Werkstoffe für den Fügevorgang mit der mittleren Spannkraft untersucht. Bei AA5182 ist der Einfluss der Umformhistorie vernachlässigbar gering. Infolge der entfernten Umformhistorie erhöht sich hierbei der Fügespalt um 0,0002 mm (0,3 %). Bei CR340LA beträgt die Erhöhung 0,05 mm. Der Fügespalt wird somit um 26,5 % erhöht. Damit zeigt sich auch hier für CR340LA ein deutlicher Einfluss der Umformhistorie.

5.6.5 Simulative Untersuchung des Einflusses der Rollengeschwindigkeit auf resultierende Fügespalte

Im Folgenden wird der Einfluss der Rollengeschwindigkeit auf das Maß der resultierenden Fügespalte und deren Verläufe über der Länge der Schweißnähte untersucht. Hierzu werden L-Proben mit einem Biegewinkel von 90° ohne Spannunterlage, mit variiertem Relativgeschwindigkeit zwischen Spannrolle und Laser, in der FE-Simulation gefügt. Dabei handelt es sich um eine L-Probe aus AA5182 und eine L-Probe aus CR340LA, die jeweils mit einer Spannkraft von 240 N gespannt und gefügt werden. Die Anstellwinkel der Unterbleche betragen für AA5182 und CR340LA 3° und 4° , entsprechend den Validierungsversuchen in Abschnitt 5.6.1. Die Höhe der modellierten Noppen auf dem Unterblech der L-Probe aus CR340LA entspricht mit 0,15 mm dem mittleren, der von Reiniger [24] empfohlenen Werte (zwischen 0,10 mm und 0,20 mm). Für die Untersuchung des Einflusses der Rollengeschwindigkeit betragen die modellierten Geschwindigkeiten des Lasers 133,3 mm/s für AA5182 und 108,3 mm/s für CR340LA (siehe Abschnitt 5.6). Die Geschwindigkeit und Leistung des Lasers werden im Rahmen der Auslegung des Schweißprozesses unter Berücksichtigung der zu fügenden Werkstoff- und Blechdickenkombination definiert. Dabei wird der Fokus auf die Einschweißtiefe, die Nahtanbindung, den Nahteinfall und die Vermeidung von Rissen gerichtet. Die modellierten Geschwindigkeiten der Spannrolle betragen für beide Werkstoffe 100 mm/s, 50 mm/s und 30 mm/s. Um Einflüsse infolge einer erhöhten Dynamik im Simulationsmodell, bedingt durch eine höhere Rollengeschwindigkeit, zu vermeiden, wird in den Simulationen stets dieselbe Rollengeschwindigkeit verwendet. Stattdessen werden die Aktivierungszeitpunkte der Spotweld-Elemente und damit der jeweilige Schweißbeginn und die Relativgeschwindigkeit des Lasers gegenüber der Spannrolle angepasst.

Die Bewegungsverläufe von Spannrolle und Laserstrahl entlang der Schweißnähte sind in Bild 48a für AA5182 und in Bild 48c für CR340LA dargestellt (vergleiche mit Bild 43). Der Laser beginnt bei beiden Werkstoffen mit dem Schweißvorgang, wenn sich, entsprechend dem Versuch, die Spannrolle 10 mm vor der Nahtmitte befindet. Bei der Nahtlänge von 20 mm der CR340LA Nähte beginnt der Laser daher mit dem Schweißvorgang, wenn sich die Spannrolle am Nahtbeginn befindet. Bei AA5182 dagegen gibt es unterschiedliche Zeitpunkte für den Schweißbeginn (siehe Bild 48a). Während bei CR340LA der Laser ab Schweißbeginn der Spannrolle vorausseilt, überholt der Laser bei AA5182 stets die Spannrolle während des Schweißvorgangs. Dabei sind Laser und Spannrolle bei einer Rollenge-

schwindigkeit von 100 mm/s 5 mm vor dem Nahtende an derselben Position entlang der Schweißnaht, bei 50 mm/s ist dies 5,5 mm vor Nahtmitte und bei 30 mm/s 7,8 mm vor Nahtmitte der Fall.

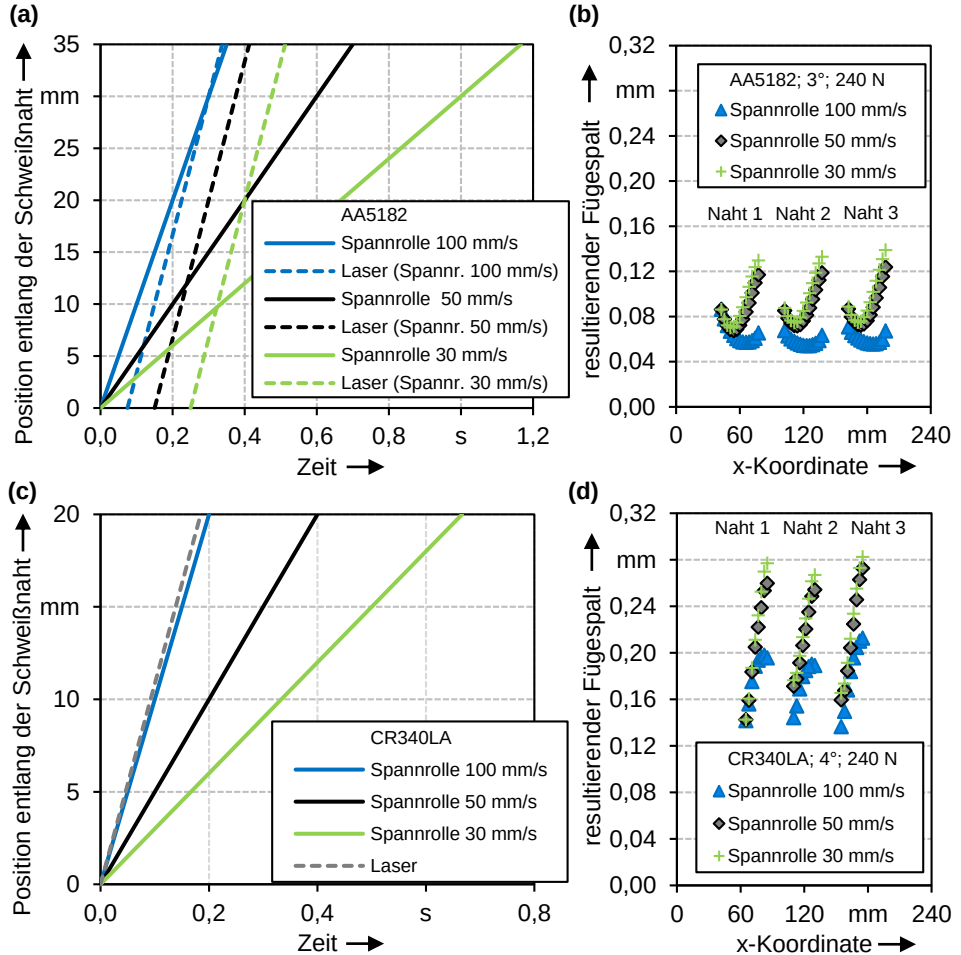


Bild 48: Einfluss der Rollengeschwindigkeit auf resultierende Fügespalte - Bewegung von Spannrolle und Laserstrahl entlang der Schweißnähte mit variiert Rollengeschwindigkeit beim Fügen von (a) AA5182 und (c) CR340LA mit den entsprechenden Verläufen der Fügespalte entlang der drei Schweißnähte der L-Proben ohne Spannunterlage in (b) und (d)

Bild 48b zeigt den Einfluss der Rollengeschwindigkeit auf die Verläufe der resultierenden Fügespalte von AA5182. Während eine Rollengeschwindigkeit von 100 mm/s zu den geringsten Fügespalten führt, erhöhen sich die Fügespalte gegenüber diesen bei den beiden geringeren Geschwindigkeiten deutlich (im Mittel um 41 % bei 50 mm/s und um 55 % bei 30 mm/s). Eine

Rollengeschwindigkeit von 100 mm/s, bei welcher der Laser die Spannrolle erst kurz vor dem Nahtende überholt, führt zu einem fallenden Verlauf des Fügespalts, der nach dem Überholen des Lasers kurz vor dem Nahtende ansteigt. Bei den beiden geringeren Geschwindigkeiten steigt der Verlauf des Fügespalts, nachdem der Laser die Spannrolle überholt hat, deutlich an. Ursache für diesen Effekt ist der zunehmende Abstand zwischen der Spannrolle und dem Laser, der dazu führt, dass der gefügte Bereich schwächer gespannt wird. Da der Laser bei allen Geschwindigkeiten bei derselben nahtspezifischen Spannrollenposition mit dem Schweißvorgang beginnt, sind die Fügespalte zu Beginn der ersten Schweißnaht für alle drei Geschwindigkeiten gleich. Bei der zweiten und dritten Naht ist eine Differenz zwischen den Fügespalten bereits ab Nahtbeginn erkennbar. Dieser Effekt wird durch den erhöhten Fügespalt am Ende der ersten bzw. zweiten Naht, infolge der geringeren Rollengeschwindigkeiten, verursacht.

In Bild 48d sind die Verläufe der Fügespalte von CR340LA dargestellt. Auch sie zeigen eine deutliche Abhängigkeit von der Rollengeschwindigkeit, wobei auch hier bei einer Rollengeschwindigkeit von 100 mm/s die geringsten Fügespalte auftreten. Bei einer Verringerung der Geschwindigkeit nehmen die Fügespalte zu (im Mittel um 18 % bei 50 mm/s und um 23 % bei 30 mm/s). Die relative Zunahme der Fügespalte liegt damit für beide Geschwindigkeitsänderungen unter der von AA5182. Dies ist hauptsächlich auf den Einfluss der Lasernoppen zurückzuführen, die erhöhte Fügespalte bei CR340LA verursachen, da der Flansch der L-Probe auf den Lasernoppen aufliegt (siehe Bild 46c). Der Einfluss der Lasernoppen auf resultierende Fügespalte wird in Abschnitt 5.6.6 untersucht. Die absolute Zunahme der Fügespalte infolge einer von 100 mm/s auf 50 mm/s reduzierten Rollengeschwindigkeit beträgt bei CR340LA 0,033 mm, während sie bei AA5182 lediglich 0,025 mm beträgt. Der Verlauf des Fügespalts steigt bei CR340LA über die Länge der Schweißnähte stets bis kurz vor dem Nahtende an. Dieser Effekt ist darauf zurückzuführen, dass die Schweißnähte 2,5 mm vor der ersten Lasernoppe beginnen (siehe Bild 42b) und der Laser (mit gegenüber der Spannrolle erhöhter Geschwindigkeit) und die Spannrolle gemeinsam am Nahtbeginn starten. Durch die folgenden vier Lasernoppen und das Vorseilen des Lasers steigen die Fügespalte an. Bei einer Spannrollengeschwindigkeit von 100 mm/s befindet sich der Laser am Nahtende lediglich 1,5 mm vor der Spannrolle (siehe Bild 48c). Der Fügespalt nimmt bei dieser Rollengeschwindigkeit am Nahtende ab, da die Auswirkung der letzten Noppenposition von 2,5 mm vor dem Nahtende überwiegt. Bei den beiden geringeren Rollengeschwindigkeiten überwiegt das Vorseilen des Lasers gegenüber der Spannrolle, wodurch lediglich der Anstieg des Fügespalts

zum Nahtende hin abnimmt. Des Weiteren nimmt die Steigung der Fügespaltverläufe mit abnehmender Rollengeschwindigkeit zu. Dieser Effekt ist darauf zurückzuführen, dass mit abnehmender Rollengeschwindigkeit der Laser der Spannrolle stärker vorausseilt. Durch den daraus resultierenden zunehmenden Abstand des Lasers zur Spannrolle steigen die Fügespalte stärker an.

Der Fügespalt am Nahtbeginn der ersten Schweißnaht liegt stets unter dem Maß der modellierten Lasernoppen von 0,15 mm, da die Schweißnähte 2,5 mm vor der ersten Lasernoppe beginnen. Bei der zweiten und dritten Schweißnaht weist der Nahtbeginn lediglich für die Rollengeschwindigkeit von 100 mm/s geringere Fügespalte als die Höhe der modellierten Lasernoppen auf. Dies ist auf die erhöhten Fügespalte am Nahtende der ersten bzw. zweiten Naht bei den beiden geringeren Rollengeschwindigkeiten zurückzuführen, die wiederum erhöhte Fügespalte am Nahtbeginn der zweiten bzw. dritten Naht verursachen. Wie bei AA5182 weisen daher die ersten Fügespalte der zweiten und dritten Naht am Nahtbeginn für die beiden geringeren Rollengeschwindigkeiten bereits höhere Werte auf, obwohl die Spannrolle und der Laser bei allen Rollengeschwindigkeiten gemeinsam starten.

Es gilt festzuhalten, dass beim Fügen von AA5182 und CR340LA die im Rahmen der Auslegung des Spannprozesses definierte Rollengeschwindigkeit einen erheblichen Einfluss auf die resultierenden Fügespalte hat. Um möglichst geringe Fügespalte zu erzielen, sollten Laser und Spannrolle parallel über das zu fügende Bauteil geführt werden.

5.6.6 Simulative Untersuchung des Einflusses der Noppenhöhe auf resultierende Fügespalte

Um den Einfluss der Noppenhöhe auf das Maß der resultierenden Fügespalte zu untersuchen, werden L-Proben aus CR340LA ohne Spannunterlage mit variiertter Höhe der Lasernoppen in der FE-Simulation gefügt. Die L-Proben verfügen über einen Biegewinkel von 90° und der Anstellwinkel der Unterbleche beträgt entsprechend der Validierungsversuche 4° (siehe Abschnitt 5.6.1). Die Spannkkräfte entsprechen mit 120 N, 240 N und 360 N den Sollspannkkräften aus den Validierungsversuchen, deren Rollengeschwindigkeit von 50 mm/s modelliert wird. Die untersuchten Noppenhöhen von 0,10 mm, 0,15 mm und 0,20 mm orientieren sich an den in Abschnitt 5.6.3 experimentell ermittelten Noppenhöhen und Distanzierungen durch ins Bauteil eingedrungene Noppen und den von Reiniger [24] empfohlenen Werten (zwischen 0,10 mm und 0,20 mm).

Die gemittelten resultierenden Fügespalte über der gesamten Nahtlänge für das Fügen der Prinzipbauteile sind in Bild 49 dargestellt. Die Fügespalte nehmen bei jeder Spannkraft mit steigender Noppenhöhe zu. Bei einer Spannkraft von 120 N beträgt die Zunahme des Fügespalts bei einer Noppenhöhe von 0,15 mm gegenüber einer Noppenhöhe von 0,10 mm lediglich 0,016 mm. Bei den übrigen Steigerungen der Noppenhöhe um 0,050 mm bei identischer Spannkraft, beträgt die resultierende Zunahme des Fügespalts im Mittel 0,045 mm und entspricht damit näherungsweise dem Maß der Erhöhung der Noppen. Der Effekt der geringen Zunahme des Fügespalts bei einer Noppenhöhe von 0,10 mm gegenüber einer Noppenhöhe von 0,15 mm bei einer Spannkraft von 120 N ist darauf zurückzuführen, dass hier bei einer Noppenhöhe von 0,10 mm der Flansch der L-Probe zu keinem Zeitpunkt auf den Noppen aufliegt. Mit zunehmender Spannkraft wird die Differenz zwischen der absoluten Noppenhöhe und dem resultierenden Fügespalt reduziert, da sich die oberen Bauteile mit zunehmender Spannkraft stärker an die Lasernoppen auf den Unterblechen (siehe Bild 46c) anschmiegen. Bei 120 N beträgt die Differenz zwischen der absoluten Noppenhöhe und dem resultierenden Fügespalt 0,157 mm, bei 240 N 0,063 mm und bei 360 N nur noch 0,043 mm. Die Standardabweichungen der Fügespalte in diesem Abschnitt sind auf den über die Nahtlänge ansteigenden Verlauf der Fügespalte beim Fügen von CR340LA mit einer Rollengeschwindigkeit von 50 mm/s zurückzuführen (siehe Bild 47).

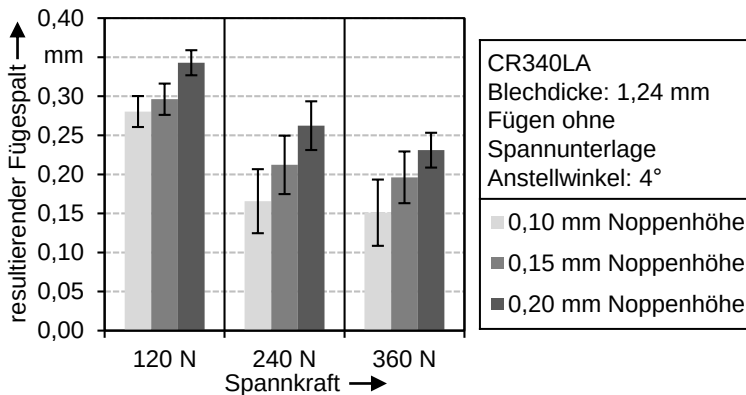


Bild 49: Simulativ ermittelte Fügespalte für variierte Höhen der modellierten Lasernoppen beim Fügen von L-Proben aus CR340LA ohne Spannunterlage

Es gilt festzuhalten, dass sich die Noppenhöhe maßgeblich auf die resultierenden Fügespalte auswirkt. Eine Änderung der Noppenhöhe führt zu einer Änderung der resultierenden Fügespalte um den näherungsweise

gleichen Betrag. Voraussetzung ist dabei, dass das obere Bauteil auf den Noppen des unteren Bauteils aufliegt.

5.7 Zusammenfassung der Ergebnisse

In diesem Kapitel wurden neue Simulationsmodelle zum flexiblen Spannen mit einer Spannrolle vorgestellt. Zur Validierung der Simulationsmodelle wurden in Spannversuchen an Prinzipbauteilen, mit und ohne Spannunterlage, die zum Spaltschluss unterhalb der Spannrolle erforderlichen Spannkkräfte untersucht.

Für die beiden im Rahmen der Validierung eingesetzten und charakterisierten Strukturwerkstoffe AA5182 und CR340LA zeigten sich bei einem Wechsel der Belastungsrichtung die Auswirkungen des Bauschinger-Effekts. Diese waren bei CR340LA deutlich stärker ausgeprägt als bei AA5182. Die Spannsimulation, die sowohl unter Vorgabe der vollständig definierten Rollenbahn als auch mit freier vertikaler Positionierung der Spannrolle und Vorgabe der Spannkraft durchgeführt wurde, stimmt mit einer mittleren Abweichung von 6,0 % gut mit den Versuchen überein. Auf Grund des bei CR340LA deutlich stärker ausgeprägten Bauschinger-Effekts zeigte in der Spannsimulation die Umformhistorie bei diesem Werkstoff einen deutlich höheren Einfluss auf die erforderlichen Spannkkräfte als bei AA5182. Die L-Proben aus AA5182 wiesen bei vergleichbarer Abweichung vom Sollmaß deutlich höhere erforderliche Spannkkräfte als die aus CR340LA auf. Dies ist auf den erhöhten Biege­widerstand, welcher aus der um 0,74 mm höheren Blechdicke von AA5182 resultiert, zurückzuführen.

Die simulative Untersuchung von geometrischen Einflussfaktoren bestätigte den hohen und mit Abstand stärksten Einfluss der Blechdicke auf erforderliche Spannkkräfte. Dies ist auf den von der Blechdicke maßgeblich beeinflussten Biege­widerstand der Bauteile zurückzuführen. Während die Blechdicke im Fahrzeugbau durch Vorgaben der Crashfestigkeit und des akustischen Komforts im Fahrzeuginnenraum festgelegt wird, können jedoch im Rahmen der Auslegung von Spannprozessen die fertigungsge­rechte Tolerierung der Bauteile (zulässige Biege­winkel) und die Führung der Spannrolle (Spannrollenabstand) beeinflusst werden. Durch die Ver­ringerung zulässiger Biege­winkel und damit der zu schließenden Spalthöhe können erforderliche Spannkkräfte signifikant reduziert werden. Auf Grund einer Wechselwirkung zwischen Blechdicke und Spannrollenabstand über­wiegt bei hohen Blechdicken die Hebelwirkung der Spannrolle (Spannkraft reduzierend) und bei geringeren Blechdicken die zu schließende Spalthöhe

(Spannkraft steigernd). Erforderliche Spannkräfte lassen sich daher bei hohen Blechdicken durch Erhöhen des Spannrollenabstands zum Radiusauslauf verringern und bei geringen Blechdicken durch Reduzieren des Spannrollenabstands zum Radiusauslauf. Im Rahmen der simulativen Untersuchung der Einflüsse von Werkstoffparametern konnte ein Zusammenhang zwischen der Anfangsfließspannung und der Höhe der erforderlichen Spannkräfte aufgezeigt werden. Dabei steigt die Höhe der erforderlichen Spannkräfte näherungsweise linear mit der Anfangsfließspannung an. Darüber hinaus konnte der Einfluss der Umformhistorie auf erforderliche Spannkräfte, unterteilt in Spannungen mit Dehnungen und den Bauschinger-Effekt, durch die daraus resultierende Spannungsverteilung im Bereich des Radiusauslaufs und die wiederum daraus resultierende Nachgiebigkeit im Flanschbereich, erklärt werden. Dabei überwiegt auf Grund der Wechselbiegebelastung der Bauschinger-Effekt. Es gilt festzuhalten, dass sich auch die Wahl des Bauteilwerkstoffs signifikant auf die erforderlichen Spannkräfte auswirkt. Im Rahmen der simulativen Spannkraftauslegung ist der Einfluss der Umformhistorie zu prüfen und bei einem signifikanten Einfluss zu berücksichtigen.

Zur Berechnung des Spann- und Fügevorgangs unter Einsatz der mitlaufenden Spanntechnik erfolgte eine Erweiterung des Simulationsmodells. Zu dessen Validierung wurden Fügeversuche mit Prinzipbauteilen durchgeführt. Die bei CR340LA eingesetzten Lasernoppen zur Zinkentgasung wurden charakterisiert und im Rahmen dieser Arbeit erstmalig in der FE-Simulation modelliert. Die Fugesimulation neigte dabei zu einem leichten Überschätzen der Fügespalte. In simulativen Untersuchungen zeigte sich ein deutlicher Einfluss der Verhältnisse von Spannrollen- zur Lasergeschwindigkeit und -position. Um geringe resultierende Fügespalte zu erzielen, sollte die Spannrolle möglichst nah an der aktuell geschweißten Stelle der Schweißnaht über das Bauteil geführt werden. Dadurch werden die Nahtbereiche des Bauteils in im Moment ihrer Verbindung optimal durch die Spannrolle gespannt. Darüber hinaus wurde der Einfluss der Höhe der Lasernoppen auf die resultierenden Fügespalte untersucht. Dabei konnte ein maßgeblicher Einfluss der Noppenhöhe auf resultierende Fügespalte aufgezeigt werden. So wirkt sich unter der Voraussetzung, dass das obere Bauteil mit den Lasernoppen des unteren Bauteils in Kontakt ist, eine Änderung der Noppenhöhe mit näherungsweise demselben Betrag auf die Höhe der resultierenden Fügespalte aus.

6 Berechnung der Spann- und Fügeprozesse von Karosserieteilen

Durch eine digitale Absicherung des Spann- und Fügeprozesses unter Einsatz der mitlaufenden Spanntechnik von Karosserieteilen in der frühen digitalen Entwicklungsphase können die Qualität der Fügestellen erhöht und die Entwicklungszeit der Bauteile und des Spann- und Fügeprozesses verkürzt werden. Hierzu werden Simulationsmodelle benötigt, die den Spann- und Fügeprozess geometrieunabhängig für Karosserieteile abbilden und darüber hinaus einen optimalen Spannkraftverlauf ermitteln können. Damit kann in der frühen digitalen Entwicklungsphase die Auswahl der für diese Spann- und Fügetechnologie geeigneten Bauteile getroffen werden, die fertigungsgerechte Auslegung der Bauteilgeometrie und der Bauteiltoleranzen vorgenommen werden. Des Weiteren kann die Auslegung der Fertigungsprozessparameter und der Fügevorrichtung mit dem Fokus auf erforderliche und zulässige Spannkräfte sowie resultierende Fügespalte erfolgen. Dadurch kann die Qualität der Fügeverbindungen erhöht und der Umfang der Absicherung mit Prototypenteilen reduziert bzw. auf eine Hardwareabsicherung verzichtet werden.

Für die Modellierung der Prozessschritte Spannen und Fügen von Karosserieteilen unter Einsatz der mitlaufenden Spanntechnik sollen Simulationsmodelle mit unterschiedlichem Komplexitätsgrad und Bearbeitungsaufwand erarbeitet werden. Diese sollen, je nach Wahl des Modells, eine schnelle und grobe Abschätzung erforderlicher Spannkräfte, die Modellierung eines realen Spannkraftverlaufs sowie die Ermittlung eines zum Erreichen gewünschter Fügespalte optimierten Spannkraftverlaufs ermöglichen.

6.1 Übertragung der Simulationsmodelle auf reale Karosserieteile

Die Modellierung des Spann- und Fügeprozesses, zur Berechnung der resultierenden Fügespalte von Prinzipbauteilen, wird auf reale Karosserieteile übertragen. Da Karosserieteile eine komplexe Geometrie mit einer Vielzahl von Schweißnähten aufweisen können, bedarf es einer umfassenden Weiterentwicklung der Simulationsmodelle von einfachen Prinzipbauteilen mit Rollenbahnen und Schweißnähten in x-Achsrichtung (siehe

Kapitel 5). Die Herausforderung besteht darin, dass die Simulationsmodelle für Karosserieteile unabhängig von den Achsrichtungen des Koordinatensystems anwendbar sein müssen. Sie sollen darüber hinaus für das Spannen und Fügen von Blech- auf Blech- und für Blech- auf Gussbauteilen anwendbar sein. Dabei müssen Schweißnähte und Spannpfade auch auf gekrümmten Flächen realisierbar sein. Der Spannvorgang soll sowohl durch die vollständige Beschreibung der Rollenbahn (weggesteuert) als auch mit Vorgabe eines definierten Spannkraftverlaufs (kraftgesteuert) berechnet werden können. Für den Einsatz der Simulationsmodelle in der frühen digitalen Phase ist des Weiteren ein möglichst automatisierter Aufbau der Simulationsmodelle auf Basis von CAD-Geometrie von Vorteil.

Das Vorgehen zur mechanischen Berechnung des Spann- und Fügevorgangs von Karosserieteilen ist in Bild 50 dargestellt. Grundlage für das Simulationsmodell sind die optisch vermessene Bauteilgeometrie, die CAD-Daten bzw. das FE-Netz der Bauteile sowie die Geometrie der Schweißnähte in Form von Kurven auf den Bauteilen. Im Rahmen der Geometrie-vorbereitung werden die Mittelflächen von Blechbauteilen durch Schalenelemente für den Einsatz in der FE-Simulation vernetzt. Bei Gussbauteilen wird die Bauteiloberfläche durch Schalenelemente vernetzt und für diese Elemente daraufhin ein Versatz um die halbe Wandstärke, die das Bauteil unterhalb der Spannrolle aufweist, realisiert. Dies gewährleistet einen homogenen Bauteilkontakt zwischen Guss- und Blechbauteilen. Damit können optisch vermessene Karosserieteile aus Gusswerkstoff erstmalig, modelliert durch nachgiebige Schalenelemente, in einer Fugesimulation eingesetzt werden. Den Schalenelementen wird daraufhin die Dicke dieser Wandstärke zugewiesen. Die Vernetzung erfolgt nahezu ausschließlich mit rechteckigen Schalenelementen (vereinzelte Dreieckselemente sind bei einer Vernetzung mit rechteckigen Elementen bei Karosserieteilen nicht zu vermeiden) mit einer Elementkantenlänge von 1 mm im Flanscbereich, entsprechend der mit Prinzipbauteilen in Kapitel 5 validierten Modellierung. Mit zunehmender Entfernung vom Flanscbereich wird die Elementkantenlänge erhöht und beträgt im ebenen Bauteilbereich, in dem kein Kontakt zwischen den Bauteilen auftritt, 8 mm. Reale Bauteile werden durch GOM ATOS optisch vermessen und digitalisiert. Das konturfolgende FE-Netz, welches auf der CAD-Geometrie basiert, kann daraufhin auf die Geometrie des unregelmäßigen Dreiecksnetzes aus der optischen Bauteilvermessung durch Knoten-Mapping übertragen werden. Damit lässt sich die optisch vermessene Bauteilgeometrie in ein FE-Netz überführen. Für das Knoten-Mapping kommt der Virtual Part Inspector der inpro mbH mit dem in [125] beschriebenen Vorgehen zum Einsatz. Auch Netze (mit bzw.

ohne Umformhistorie) aus der Umformsimulation (siehe Abschnitt 5.3.2) können verwendet werden. Diese können direkt eingesetzt oder bei einer erforderlichen Neuvernetzung auf das entsprechende Netz durch Mapping der Knoten und der Umformhistorie auf das neue Netz übertragen werden (siehe Bild 24). Beim Einsatz von nichtmaßhaltiger CAD-Geometrie kann diese entweder direkt vernetzt werden oder entsprechend den optisch vermessenen Bauteilen durch Knoten-Mapping auf ein bereits erzeugtes FE-Netz übertragen werden. Mit diesem breiten Spektrum an möglichem Bauteilinput wird der Herausforderung der Datenverfügbarkeit in der frühen Phase der Bauteilentwicklung begegnet.

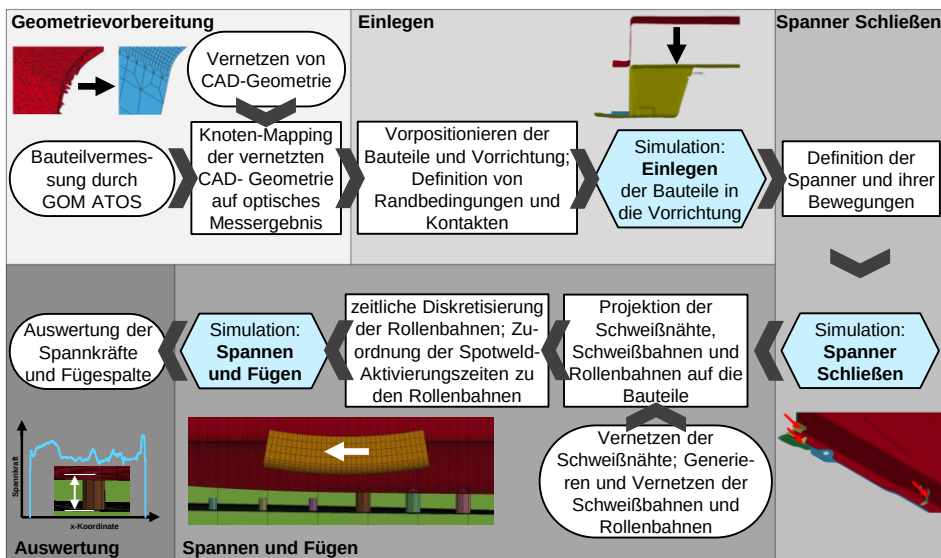


Bild 50: Vorgehen bei der Simulation des Spannens und Fügens von Karosserieteilen

Zur Vorbereitung der Einlegesimulation werden die Kontaktflächen der Spanner, Spannunterlagen und Auflagen der Vorrichtung vernetzt und entsprechend dem Simulationsmodell aus Abschnitt 5.3.1 durch Starrkörper modelliert. Die Bauteile werden gemäß dem realen Einlegevorgang über der modellierten Vorrichtung vorpositioniert. Dabei werden die Führungsstifte durch Lagerung des dazugehörigen Lochbereichs der Bauteile über das Keyword `*CONSTRAINED_NODAL_RIGID_BODY_SPC` berücksichtigt. Dies ermöglicht den Verzicht auf die geometrische Modellierung der Führungsstifte und der dazugehörigen berechnungsintensiven Kontaktmodellierung mit den Schalenelementen der Lochkanten. Über das Keyword `*BOUNDARY_PRESCRIBED_MOTION_SET` wird das Führen der Bauteile

beim Einlegevorgang definiert. Dadurch lässt sich die Anzahl der Kontaktdefinitionen gegenüber einer berechnungsintensiveren geometrisch modellierten Führung reduzieren. Entsprechend dem validierten Simulationsmodell des Spannvorgangs werden zwischen den Bauteilen Automatic- und zwischen den Bauteilen und der Vorrichtung Forming-Kontakte definiert. Auch hier erfolgt der Simulationsschritt „Einlegen“ unter Schwerkraft und wird implizit statisch berechnet.

Für den Simulationsschritt „Spanner Schließen“ werden die Bewegungsbahnen der Spanner in der Simulation über das Keyword `*BOUNDARY_PRESCRIBED_MOTION_RIGID` vorgegeben. Dabei gilt es, die reale Reihenfolge zu beachten, in der die Spanner geschlossen werden. Andernfalls kann sich die modellierte Spannsituation mit nichtmaßhaltigen Bauteilen von der realen unterscheiden. Die Ergebnisse werden auch hier zwischen den einzelnen Simulationsschritten stets als „dynain“-Datei übergeben. Die Berechnung des Simulationsschritts „Spanner Schließen“ erfolgt entsprechend den Modellen der Prinzipbauteile statisch implizit.

6.1.1 Weggesteuerter Spannvorgang mit Spannrolle

Die Vorbereitung der Geometrie sowie die Simulation des „Einlegens“ und des „Spanner Schließens“ werden in der FE-Simulation von Fügeprozessen im Karosseriebau (siehe Abschnitt 2.3.3) häufig in ähnlicher Weise zum Vorgehen in dieser Arbeit umgesetzt. Zum flexiblen Spannen mit einer Spannrolle beim Laserstrahlschweißen finden sich dagegen in der Literatur keine Simulationsmodelle. Lenz fordert jedoch in [10] die Modellierung einer Spannrolle für Laserstrahlschweißprozesse in der FE-Simulation.

Die größte Ähnlichkeit zum Spannprozess mit mitlaufender Spanntechnik weist das Rollfalzen auf (siehe Abschnitt 2.3.4). Dabei werden die Falzrollen in der Regel vollständig modelliert und an ihren Naben entlang einer aufwendig berechneten Bahn (ohne Vorgabe der Kontaktkraft) geführt [45]. In dieser Arbeit wird dagegen der 20°-Ausschnitt der Spannrolle (siehe Abschnitt 5.3.1) an seinem untersten Knoten direkt auf dem Bauteil entlanggeführt. Die auf den Kontaktbereich reduzierte Modellierung der Spannrolle in Kombination mit der Führung am untersten Knoten reduziert den Prüfungsumfang von Elementen mit möglichen Bauteilkontakten während der Simulation und senkt damit die Berechnungszeit um 3 %. Das Generieren der Rollenbahn erfolgt dabei auf Basis der Schweißnahtgeometrien, die in Form von CAD-Daten vorliegen. Auf eine aufwendige Erzeugung der Rollenbahn in einer separaten Software kann verzichtet werden.

Darüber hinaus kann die Spannrolle unter Vorgabe eines definierten Spannkraftverlaufs (siehe Abschnitt 6.1.2) eingesetzt werden.

Zum Generieren der Rollenbahn für das in Bild 50 dargestellte Simulationsmodell wird zunächst im CAD-Programm eine Kurve durch die einzelnen Kurven der Schweißnähte auf dem Bauteil, im Folgenden als „Schweißbahn“ bezeichnet, gelegt (rot gestrichelt in Bild 51a). Ausgehend von der Schweißbahn wird, mit einem Versatz von 5 mm, entsprechend dem Abstand der Spannrolle zur Schweißnahtmitte (siehe Abschnitt 2.2.3), die Rollenbahn auf der Bauteiloberfläche generiert. Beide Bahnen und die Kurven der Schweißnähte werden in HyperMesh® vernetzt. Die Knoten der Rollenbahn werden dabei auf die Schweißbahn projiziert und die Knotennummern der beiden Bahnen zur späteren Zuordnung in aufsteigender Reihenfolge vergeben. Für das Spannen ohne Spannunterlage bzw. das kraftgesteuerte Spannen, das in Abschnitt 6.1.2 beschrieben wird, empfiehlt es sich, die Knoten in ANSA™ auf den Flansch des unteren Bauteils zu projizieren, um sie an die eingespannte Geometrie des unteren Bauteils anzupassen. Dabei muss ein Versatz um die halbe Dicke des unteren und um die Blechdicke des oberen Bauteils berücksichtigt werden.

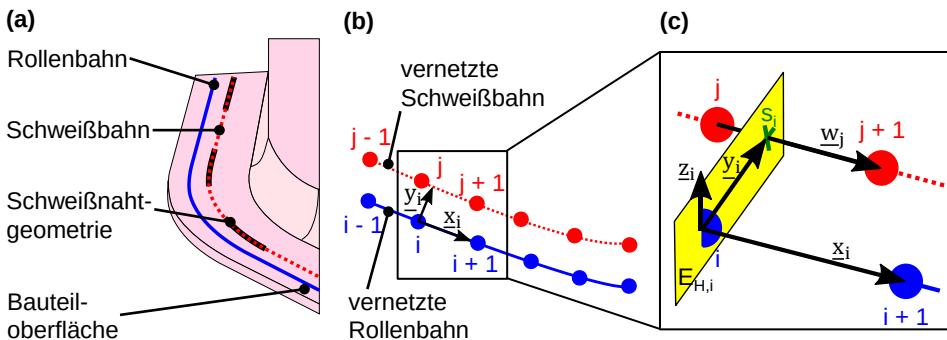


Bild 51: Generieren der Rollenbahn für die FE-Simulation; (a) im CAD-Programm; (b) und (c) durch ein Microsoft® Excel Makro

Die vernetzten Kurven werden in eine Microsoft® Excel Datei eingelesen, um damit die von den Koordinatenachsen unabhängige Rollenbewegung und die Schweißnähte zu modellieren. Hierzu werden die Knoten der Schweißbahn denen der Rollenbahn zugeordnet. Über den Knotenabstand wird geprüft, ob es sich dabei stets um den nächstgelegenen Knoten handelt, um eine fehlerhafte Zuordnung infolge von starken Krümmungen der Bahn bzw. eine fehlerhafte Projektion der Knoten auf die Schweißbahn auszuschließen. Die Knoten der vernetzten Schweißnähte werden zur späteren Aktivierung der Schweißnaht jeweils dem nächstgelegenen Knoten der

Schweißbahn zugeordnet. In der Darstellung in Bild 51b wird dem Knoten i der Rollenbahn der Knoten j der Schweißbahn zugeordnet. Für den Zustand der Spannrolle am Knoten i wird zwischen diesem Knoten und dem Knoten $i+1$ der Vektor $\underline{x}_i$ in Richtung der Rollenbewegung aufgespannt. Der rechte Winkel zur Bewegungsrichtung der Spannrolle wird durch den Vektor $\underline{y}_i$ (von Knoten i zu Punkt s_i) definiert. Die Orientierung der Spannrolle soll auch bei einer leicht versetzten Positionierung der Bahnknoten zueinander (siehe Bild 51b und c) sichergestellt werden. Hierzu wird die Hilfsebene $E_{H,i}$ (siehe Bild 51c), die durch den Knoten i und $\underline{x}_i$ als Normalenvektor definiert ist, mit dem Vektor $\underline{w}_j$ (von Knoten j nach $j+1$) zur Bestimmung des Schnittpunkts s_i verwendet. Der Vektor $\underline{z}_i$ ergibt sich aus dem Vektorprodukt von $\underline{x}_i$ und $\underline{y}_i$. Die Vektoren müssen zur Verwendung in LS-DYNA® normiert werden und ein Rechtssystem beschreiben [126]. Befindet sich die Schweißbahn in Bewegungsrichtung der Spannrolle rechts von der Rollenbahn, so ist ein Rechtssystem definiert. Befindet sich die Schweißbahn auf der anderen Seite, so müssen die Vektoren von $\underline{x}_i$ und $\underline{z}_i$ mit -1 multipliziert werden. Im nächsten Schritt erfolgt die zeitliche Diskretisierung der Rollenbahn. Für die Berechnung von Karosserieteilen wird eine Rollengeschwindigkeit von 15 m/s definiert (15 % der Rollengeschwindigkeit der Rollfalzsimulation [44]), bei der die dynamischen Effekte im Simulationsmodell das Simulationsergebnis nicht erkennbar beeinträchtigen. Die Rollenbewegung wird über das Keyword *BOUNDARY_PRESCRIBED_MOTION_NODE mit den drei zeitabhängigen Kurven der Rollenbahnkoordinaten und dem untersten Knoten der Spannrolle definiert. Es besteht die Möglichkeit, die Spannrolle orthogonal zur Bauteilfläche über den Vektor $\underline{z}_i$ anzuheben. Dadurch können die Spannkraften gezielt verringert und infolge dessen die Fügepalte erhöht werden. Die Orientierung der Spannrolle erfolgt über das lokale Rollenkoordinatensystem, das durch die drei zeitabhängigen Kurven der Rollenbahnkoordinaten und den neun zeitabhängigen Kurven der $\underline{x}_i$, $\underline{y}_i$ und $\underline{z}_i$ Vektoren über das Keyword *BOUNDARY_PRESCRIBED_ORIENTATION_RIGID_DIRCOS definiert ist. Die Aktivierungszeiten der Spotweld-Elemente werden aus der Zuordnung ihrer Schweißnahtknoten zu den Rollenbahnknoten ermittelt, die mit Hilfe der Schweißbahnknoten erfolgt. Dabei können unterschiedliche Geschwindigkeiten von Spannrolle und Laser sowie deren Positionierung zueinander bei Schweißbeginn an den einzelnen Nähten (siehe Bild 48) berücksichtigt werden. Aus den Knoten der vernetzten Schweißnahtkurven werden, über die entsprechenden $\underline{z}_i$ Vektoren unter Vorgabe der gewünschten Länge, Balkenelemente (siehe Abschnitt 5.6.2) generiert. Auch

die Lasernoppen (siehe Abschnitt 5.6.3) können für die einzelnen Schweißnähte unter Angabe ihrer Position relativ zum Nahtmittelpunkt für die Simulation von verzinkten Stahlblechen erstellt werden. Die so generierten Daten können durch ein Microsoft® Excel Makro direkt als von LS-DYNA® lesbare key-Datei exportiert und in der Simulation eingesetzt werden. Die Berechnung des Simulationsschritts „Spannen und Fügen“ wird auch hier entsprechend dem Modell zum Fügen der Prinzipbauteile (siehe Abschnitt 5.6) mit expliziter Zeitintegration durchgeführt. Im Rahmen der Auswertung können die von der Spannrolle aufgebrachten Kontaktkräfte und die resultierenden Fügespalte über die Länge der Spotweld-Elemente untersucht werden.

6.1.2 Kraftgesteuerter Spannvorgang mit Spannrolle

Beim Einsatz des weggesteuerten Simulationsmodells aus Abschnitt 6.1.1 kann grundsätzlich eine Spann- und Fügesimulation mit einem Nullspalt unterhalb der Spannrolle durchgeführt werden. Während dazu beim Spannen ohne Spannunterlage unterhalb der Spannrolle mehrere Iterationen zur Ermittlung der erforderlichen z-Verschiebung der Spannrolle im Rollenkoordinatensystem erforderlich sind, genügt beim Spannen mit Spannunterlage eine Simulation. Durch den Nullspalt unterhalb der Spannrolle treten insbesondere beim Einsatz einzelner Spannunterlagen (die beispielsweise in Bild 58a dargestellt sind) teilweise hohe Spannkkräfte auf, wenn sich die Spannrolle den Spannunterlagen nähert. Grund hierfür ist das Biegen der Bauteile um die Kanten der Spannunterlagen infolge der weggesteuerten Rollenbewegung. Des Weiteren handelt es sich beim Spalt unterhalb der Spannrolle nicht um den Fügespalt. Dieser befindet sich um 5 mm versetzt zur Spannrolle und weist meist ein anderes Maß als der Spalt unterhalb der Spannrolle auf. Aus diesen Gründen empfiehlt sich eine weggesteuerte Berechnung hauptsächlich, um erforderliche Spannkkräfte grob abzuschätzen. Durch ein leichtes Anheben der Spannrollenbahn um beispielsweise 0,10 mm in z-Richtung des Rollenkoordinatensystems kann dabei überhöhten Spannkkräften im Bereich von Spannunterlagen entgegengewirkt werden.

Für einen Abgleich der in der Simulation berechneten Fügespalte mit den im Versuch ermittelten bzw. zur Auslegung der im Versuch vorgegebenen Spannkraft empfiehlt sich die Simulation mit Spannkraftvorgabe. Dieses Simulationsmodell basiert, wie bereits das Modell der Prinzipbauteile in Abschnitt 5.6, auf dem weggesteuerten Simulationsmodell. Der translatorische z-Freiheitsgrad im bewegten Rollenkoordinatensystem muss auch

für die Berechnung von Karosserieteilen zur Vorgabe der Spannkraft bei der Beschreibung der Rollenbewegung freigelassen werden. Da für die Beschreibung durch das Keyword `*BOUNDARY_PRESCRIBED_MOTION_NODE` kein bewegtes Koordinatensystem für die Spannrolle verwendet werden kann [97], wird die Spannrolle hier durch eine Geschwindigkeitsvorgabe der Spannrolle in x-Richtung des Rollenkoordinatensystems realisiert. Hierzu wird das Keyword `*BOUNDARY_PRESCRIBED_MOTION_RIGID_LOCAL` und eine Geschwindigkeit von Null in y-Richtung des Rollenkoordinatensystems verwendet. Über das Keyword `*LOAD_RIGID_BODY` wird, auf ein über dem tiefsten Knoten der Spannrolle zusätzlich angebrachtes Dreieckselement in z-Richtung des Rollenkoordinatensystems (orthogonal zur Bauteiloberfläche), ein zeitabhängiger Spannkraftverlauf aufgebracht. Auch die Keywords zur kraftgesteuerten Berechnung können durch ein Microsoft® Excel Makro exportiert werden.

6.2 Validierung des Simulationsmodells für Karosserieteile durch den Fügeversuch mit einem Heckwagen

Zur Validierung des auf Karosserieteile übertragenen, kraftgesteuerten Simulationsmodells durch einen Fügeversuch wird der Zusammenbau eines Heckwagens, bestehend aus dem Heckboden, zwei Längsträgern, einem Querträger und einer Konsole (in Bild 52a dargestellt), gewählt. Während es sich bei den übrigen Bauteilen um Blechteile aus AA5182 handelt, sind die beiden Längsträger aus Aluminiumguss. Der Heckboden wird auf vier Bahnen (siehe Bild 52b) durch die mitlaufende Spanntechnik gespannt und durch das Remote-Laserstrahlschweißen von 36 Schweißnähten gefügt. Bei acht weiteren laserstrahlgeschweißten Nähten kommen aus Zugänglichkeitsgründen Prozessspanner anstelle der mitlaufenden Spanntechnik zum Einsatz. Die vorgegebenen Spannkräfte betragen dabei für die Bahnen 1, 3 und 4 300 N. Für die Bahn 2 betragen sie 500 N, um bei den beiden vergleichbaren Bahnen 2 und 3 auf den Längsträgern die Auswirkung der Spannkräfte auf die Fügespalte zu untersuchen. Um Kollisionen zu vermeiden, muss die mitlaufende Spanntechnik durch den Roboter während des Spannvorgangs teilweise um die y-Achse geneigt werden (siehe Bild 3). Somit wird die normal zur Bauteiloberfläche aufgebrachte Spannkraft im Mittel um 1,7 % (maximal um 5,1 %) reduziert. Die im Versuch aufgenommene Spannkraft wird, entsprechend der Stellung des Roboters und der daraus resultierenden Neigung der Spannrolle, bei der Auswertung der Versuchsergebnisse und der Spannkraftvorgabe in der Simulation reduziert.

Die Simulation erfolgt durch den Einsatz des in Abschnitt 6.1 beschriebenen Modells. Dabei werden die Bauteile vor dem Fügeversuch mittels GOM ATOS (Genauigkeit aus Prüfmittelüberwachung $\pm 0,016$ mm) digitalisiert. Darüber hinaus werden die Spannerpositionen der Vorrichtung im geschlossenen Zustand nach dem Fügevorgang ebenfalls durch GOM ATOS erfasst, um diese entsprechend der Empfehlung in [127] möglichst exakt in der Simulation zu berücksichtigen.

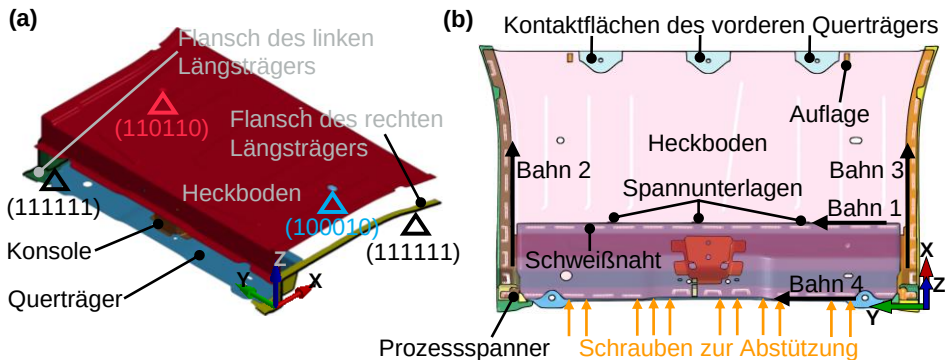


Bild 52: Zusammenbau eines Heckwagens: FE-Modell (a) des Einlegevorgangs mit Randbedingungen; (b) des gefügten Zusammenbaus mit Schweißnähten

Die Modellierung der Bauteile erfolgt basierend auf der optisch erfassten Bauteilgeometrie ohne Umformhistorie. Bei AA5182 wies die Umformhistorie in den Untersuchungen in Kapitel 5 stets einen sehr geringen Einfluss auf die resultierenden Fügespalte auf. Aus diesem Grund wird die optisch erfasste Geometrie, mit starken Abweichungen zum Sollmaß von bis zu 2,1 mm im Flanschbereich, anstelle des Ergebnisses einer Umformsimulation verwendet. Die Blechteile werden durch *MAT_BARLAT_YLD2000 modelliert und die Gussteile beim „Einlegen“ und „Spanner Schließen“ elastisch durch *MAT_ELASTIC und beim „Spannen und Fügen“ elastoplastisch durch *MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY. Dies erfolgt, um lokale Spannungsspitzen auszugleichen, die bei elastischer Modellierung während des dynamischen Spannvorgangs zu starken Schwingungen führen. Es erfolgt eine Modellierung des Flanschbereichs der beiden Längsträger. Im Übergangsbereich zu hohen Wandstärken mit Rippen werden die Elemente der Längsträger fest eingespannt (siehe Bild 52a). Die Lagerungen des Zentrier- und des Langlochs sind in Bild 52a rot bzw. blau dargestellt. Dabei definiert eine 1 einen gesperrten und eine 0 einen freien Freiheitsgrad. Nach der Berechnung des Einlegevorgangs werden die Spanner, unter Berücksichtigung ihrer vermessenen Endpositionen, geschlos-

sen. Bahn 1 wird dabei von drei Spannunterlagen abgestützt. Zur Abstützung von Bahn 4 werden nach dem Schließen der Spanner Schrauben an den in Bild 52b eingezeichneten Positionen von unten an den Flansch gedreht. Deren Kontaktflächen werden in der Simulation ebenfalls an den entsprechenden Stellen an der Unterseite des Querträgerflansches berücksichtigt.

Die Spann- und Fugesimulation erfolgt kraftgesteuert (siehe Abschnitt 6.1.2) mit den im Versuch aufgezeichneten Spannkraften. Dabei wird jede der in Bild 52b eingezeichneten Bahnen in einem separaten Simulationsschritt berechnet. Bahn 4, bei der die Spannrolle in der Mitte abhebt, um nicht mit dem dort angebrachten Spanner zu kollidieren, wird entsprechend in zwei Simulationsschritte unterteilt. Durch die Unterteilung in mehrere Simulationsschritte lässt sich die Berechnungszeit des gesamten Fügevorgangs halbieren. Somit müssen nur die Spotweld-Elemente der auf der aktuellen Bahn zu fügenden Schweißnähte auf einzelne Kontakte mit unterschiedlichen Aktivierungszeiten aufgeteilt werden. Die übrigen, bereits aktivierten Spotweld-Elemente können in einer Kontaktdefinition zusammengefasst werden, wodurch die Berechnungszeit erheblich reduziert wird. Entsprechend der Darstellung in Bild 53a verfügen die Schweißnähte über eine Länge von 35 mm. Der Laser beginnt dabei mit dem Schweißvorgang, wenn sich die Spannrolle 15 mm vor Nahtmitte befindet. Die Spannrolle weist mit 100 mm/s die zu diesem Zeitpunkt steuerungstechnisch höchste realisierbare Geschwindigkeit auf. Die Geschwindigkeit des Lasers (133,3 mm/s) wird dabei unter Berücksichtigung der zu fügenden Werkstoff- und Blechdickenkombination definiert (siehe Abschnitt 5.6.5).

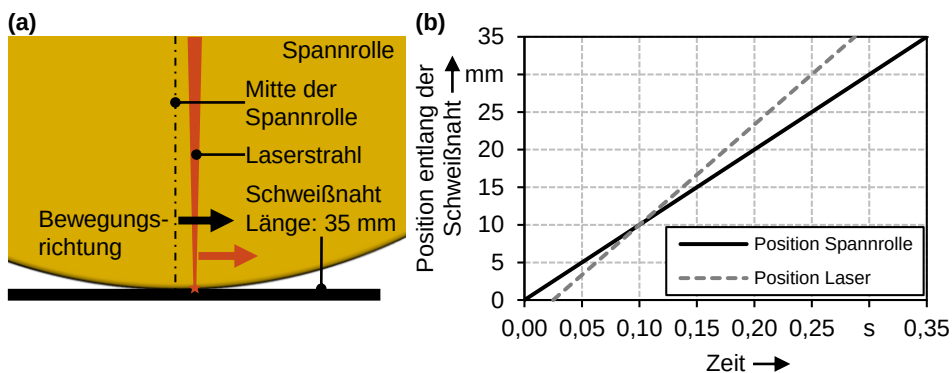


Bild 53: Bewegungen von Spannrolle und Laserstrahl entlang der Schweißnähte des Heckwagens (a) Skizze für den Zustand Laser an Nahtmitte; (b) benötigte Zeit für das Spannen bzw. Laserstrahlschweißen einer Naht (ab Spannrolle an Nahtbeginn)

Die Bewegungen von Spannrolle und Laserstrahl entlang einer Schweißnaht sind in Bild 53b dargestellt und werden entsprechend in der Simulation berücksichtigt. Die Berücksichtigung der Aktivierungszeiten der Schweißnähte, die nicht mit der Spannrolle gespannt werden, erfolgt entsprechend der Schweißreihenfolge des realen Zusammenbaus.

6.2.1 Abgleich der Versuchs- und Simulationsergebnisse

Die Schweißnähte werden aus dem im Versuch gefügten Zusammenbau herausgetrennt. Die Auswertung der resultierenden Fügespalte erfolgt in der Mitte der Schweißnähte, an den entsprechend Abschnitt 4.4 aufbereiteten Bauteilschliffen durch das Stereolichtmikroskop mit 20-facher Vergrößerung. Die Spannpfade der mitlaufenden Spanntechnik sowie das der Auswertung zugrunde liegende Koordinatensystem sind in der Box in Bild 54 dargestellt. Die Diagramme zeigen für die vier Bahnen den Verlauf der Spannkraft auf der primären und den Verlauf der resultierenden Fügespalte auf der sekundären y-Achse für Versuch und Simulation aufgetragen über der x- bzw. y-Koordinate des Zusammenbaus. Die Schweißnähte sind nummeriert. Dabei sind die durch die mitlaufende Spanntechnik gespannten Schweißnähte durch unterstrichene Nummern gekennzeichnet. Darüber hinaus ist ein zulässiger Fügespalt von 0,5 mm markiert. Bis zu diesem Maß bindet die Schweißnaht zuverlässig an.

Die Ergebnisse von Bahn 1 (Fügen des Heckbodens mit dem Querträger) sind in Bild 54a dargestellt. Die pneumatische Spannkraft ist im Versuch mit 300 N vorgegeben und weicht von diesem Wert auf Grund von variierenden Steifigkeiten des Roboters, der Bauteile und der Vorrichtung deutlich ab. Aus diesem Grund wird die Kraftmessdose zum Aufzeichnen der aufgetragenen Spannkraft eingesetzt (siehe Abschnitt 5.1.1). Der durch die Kraftmessdose erfasste Spannkraftverlauf wird für alle vier Bahnen erfolgreich in die Simulation übertragen. Die Spannrolle beginnt mit dem Spannvorgang von Bahn 1 auf Grund eingeschränkter Zugänglichkeit erst an der Mitte der ersten Naht (10) und endet an der Mitte der letzten (22). Im Gegensatz zu den übrigen Nähten des Zusammenbaus können diese beiden Nähte aus Zugänglichkeitsgründen im Versuch nicht ausgewertet werden. Die übrigen Nähte von Bahn 1 weisen sowohl im Versuch als auch in der Simulation einen geschlossenen Fügespalt auf.

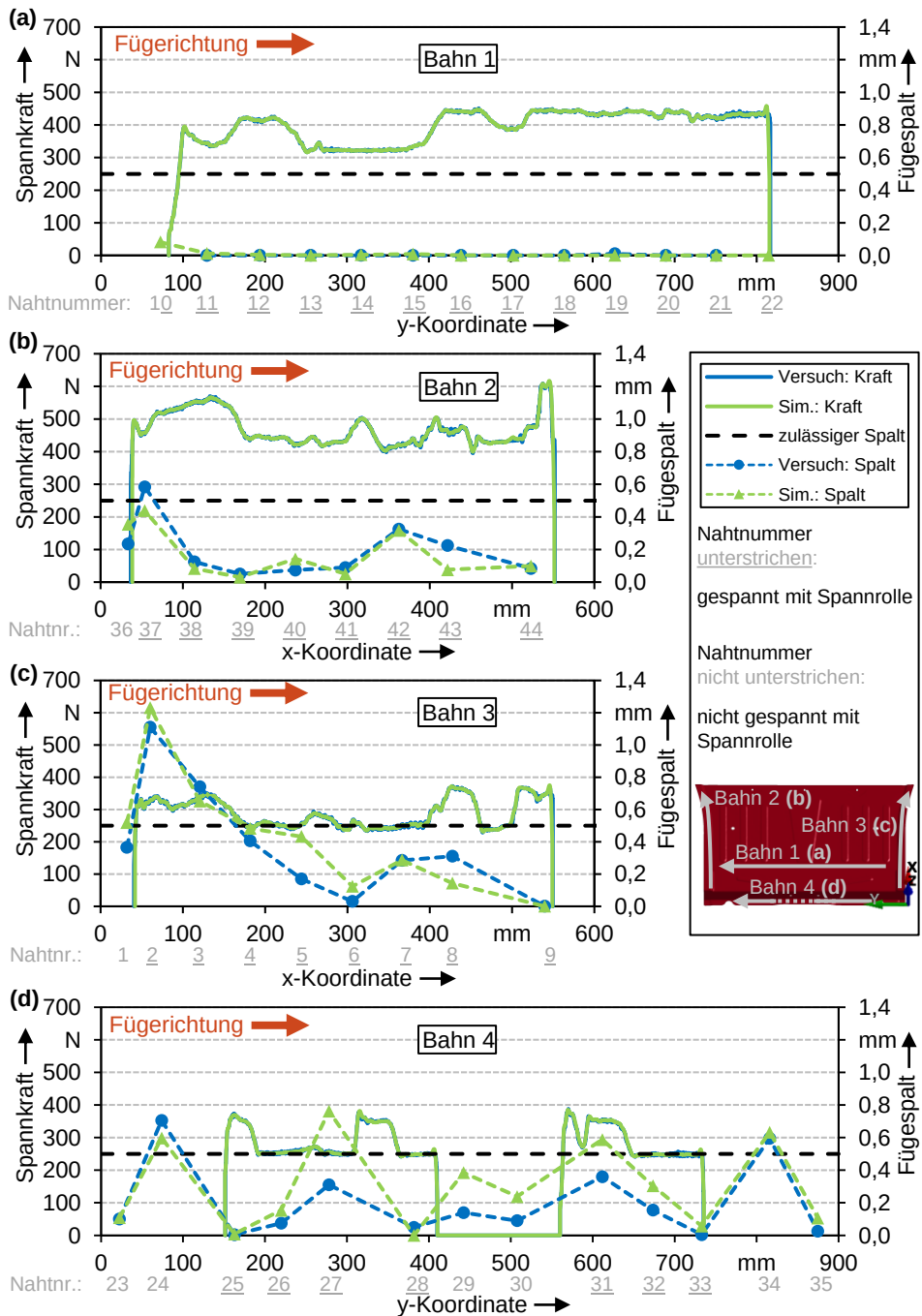


Bild 54: Spannkkräfte und resultierende Fügespalte des Heckwagens aus Versuch und Simulation: (a) Bahn 1; (b) Bahn 2; (c) Bahn 3; (d) Bahn 4

Die Ergebnisse von Bahn 2 (Fügen des Heckbodens mit dem linken Längsträger) sind in Bild 54b dargestellt. Zum Vergleich der resultierenden Fügespalte mit Bahn 3 wird hier eine Spannkraft von 500 N vorgegeben. Bis auf Naht 36 werden alle Nähte dieser Bahn durch die Spannrolle gespannt. Auf Grund der Abweichungen zum Sollmaß der Bauteile werden an allen Nähten Fügespalte ermittelt. Die Verläufe der Fügespalte von Simulation und Versuch stimmen miteinander überein. Dabei übersteigt der Spalt der Naht 37 im Versuch mit 0,59 mm das zulässige Spaltmaß, während die Simulation ein noch zulässiges Spaltmaß von 0,44 mm prognostiziert. Diese Abweichung zwischen Simulation und Versuch ist auf die komplexe Spannsituation zu Beginn von Bahn 2 und 3 zurückzuführen. Der untere Bauteilflansch des Heckbodens wird dort von einem Spanner gegen den Querträger und von einem weiteren Spanner mit zwei Kontaktflächen (in z- und x-Richtung) gegen den linken bzw. rechten Längsträger gespannt. Zu Beginn des Spannvorgangs mit der Spannrolle (auf Bahn 2 und 3) wird der Flansch des Heckbodens um die Kante des jeweiligen Längsträgers gebogen. Um diese komplizierte Spannsituation mit stark nichtmaßhaltigen Karosserieteilen im Simulationsmodell möglichst genau abzubilden, werden die Spanner im geschlossenen Zustand (mit eingespannten realen Karosserieteilen) optisch mittels GOM ATOS dreidimensional vermessen. Infolge der Komplexität der Spannsituation lassen sich allerdings bei den ersten beiden Nähten von Bahn 2 und 3 Abweichungen von bis zu 0,15 mm, beim Abgleich der Fügespalte zwischen Simulation und Versuch, nicht vermeiden. Die qualitativen Verläufe der Fügespalte stimmen dabei auch für die jeweils ersten beiden Nähte von Bahn 2 und 3 überein.

Die Ergebnisse von Bahn 3 (Fügen des Heckbodens mit dem rechten Längsträger) sind in Bild 54c dargestellt. Hier wird eine Spannkraft von 300 N vorgegeben. Dies führt, wie erwartet, zu deutlich höheren Fügespalten als auf Bahn 2, auf der mit einer Spannkraftvorgabe von 500 N gespannt wird. Die Nähte 2 und 3 weisen in Versuch und Simulation Fügespalte deutlich über dem zulässigen Maß auf. Auch hier wird bis auf die erste Naht (1) jede Naht mit der Spannrolle gespannt und die Verläufe der Fügespalte von Versuch und Simulation stimmen überein.

Die Ergebnisse von Bahn 4 (Fügen des Heckbodens mit dem rechten Längsträger durch Naht 23, mit dem Querträger durch Naht 24 bis 34 und mit dem linken Längsträger durch Naht 35) sind in Bild 54d dargestellt. Die vorgegebene Spannkraft beträgt 300 N. Die Nähte 23, 24, 29, 30, 34 und 35 werden nicht durch die Spannrolle, sondern durch Prozessspanner gespannt. Der Querträger wird dabei von unten durch Schrauben abgestützt

(siehe Bild 52b). Der Verlauf der Fügespalte in der Simulation stimmt auch hier mit dem des Versuchs überein. Allerdings werden die Fügespalte teilweise (insbesondere an Naht 27 und 31) deutlich überschätzt. Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass im Versuch die Schrauben zur Abstützung nicht nur bis zur Berührung des Querträgerflansches, sondern mehrere Zehntelsmillimeter höhergeschraubt wurden. In der Simulation und im Versuch zeigen sich an Naht 24 und 34 Fügespalte über dem zulässigen Maß von 0,5 mm.

Auf Grund der erheblichen Abweichungen der Prototypenbauteile zum Sollmaß von bis zu 2,1 mm im Flanschbereich (bei einer zulässigen Bauteiltoleranz von 1 mm) treten Fügespalte über dem zulässigen Maß von 0,5 mm auf. Deutliche Fügespalte sind für die Validierung des Simulationsmodells von Vorteil, da diese besser ausgewertet werden können als geringe. Es ist anzumerken, dass ein solches Überschreiten der Bauteiltoleranzen in der ersten Hardware Phase des Fahrzeugentwicklungsprozesses nicht ungewöhnlich ist. Für den Einsatz der mitlaufenden Spanntechnik in der Serienproduktion ist dagegen eine höhere Maßhaltigkeit der Bauteile erforderlich. Die mittlere absolute Abweichung der Fügespalte, der nicht durch Schrauben abgestützten Nähte, beträgt 0,06 mm bei einem mittleren Fügespalt im Versuch von 0,19 mm. Bei vereinzelten Abweichungen stimmen die qualitativen Verläufe der Fügespalte der Simulation mit denen des Versuchs überein. Die Simulation weist dabei eine gute Übereinstimmung mit den Versuchsergebnissen auf. Der maximale im Versuch ermittelte Fügespalt beträgt 1,11 mm und ist auf die starke Nichtmaßhaltigkeit der Prototypenteile und das Biegen des oberen Radiusbereichs des Heckbodens um die Kante der Längsträger während des Spann- und Fügeprozesses zurückzuführen. Hier sind Verbesserungen für den Serienprozess erforderlich, die in Abschnitt 7.1.7 diskutiert werden. Das Simulationsmodell des Zusammenbaus umfasst 232614 Elemente. Die Berechnungszeit für die Simulation von „Einlegen“ und „Spanner Schließen“ beträgt insgesamt 3 Stunden 43 Minuten beim Einsatz von 4 Prozessoren. Die Simulation des Spann- und Fügeprozesses benötigt bei der Verwendung von 128 Prozessoren 23 Stunden 25 Minuten. Mit der erreichten Genauigkeit und der für das Fügen von 44 Schweißnähten akzeptablen Berechnungszeit empfiehlt sich das Simulationsmodell für den Einsatz in der Prozess- und Bauteilauslegung.

6.3 Ausbau des Simulationsmodells zur Ermittlung erforderlicher Spannkkräfte durch Berechnung mit geregelter Spannkraft

Mit dem erarbeiteten kraftgesteuerten Simulationsmodell lässt sich iterativ (unter Variation der Spannkraftvorgabe) ein Spannkraftverlauf für gewünschte Zielfügespalte annähern. Auch beim Einsatz des weggesteuerten Simulationsmodells sind zum Annähern gewünschter Fügespalte mehrere iterative Simulationsschleifen erforderlich, da der Spalt unterhalb der Spannrolle nicht dem Spalt an der Fügestelle entspricht (siehe Bild 55a) und sich die Bauteile unter der Spannrolle verformen.

Ziel ist es, unter der Vorgabe von Fügespalten einen zum Erreichen dieser Zielfügespalte optimierten Spannkraftverlauf mit einer einzelnen Simulation zu berechnen. Um mit einer kraftgeregelter Simulation vorgegebene Fügespalte zu erreichen, wird das Simulationsmodell aus Abschnitt 6.1 um den Einsatz einer adaptiven Spannkraft erweitert. Dabei wird die Spannkraft der modellierten Spannrolle während der Simulation in Abhängigkeit des aktuellen, über Sensoren erfassten Spaltmaßes am nächsten Spotweld-Element (siehe Bild 55) angepasst. In der Literatur findet sich keinerlei vergleichbare Anwendung von Sensoren in der Prozesssimulation.

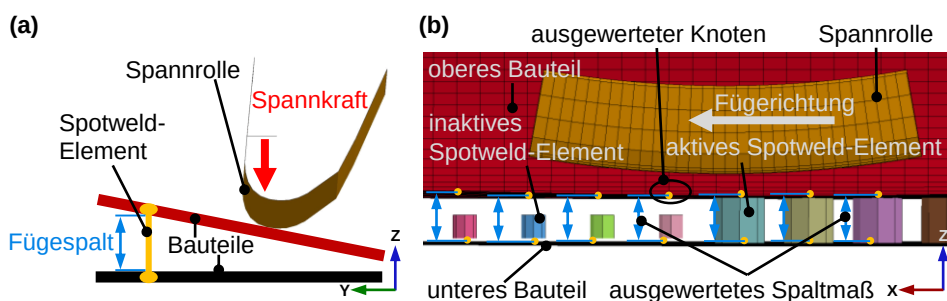


Bild 55: (a) Darstellung des modellierten Spann- und Fügeprozesses an einer Fügestelle;
(b) Auswertung des Spaltmaßes an den zu fügenden Bauteilen

Für den Einsatz dieses Modells müssen die gewünschten Zielfügespalte, eine Anfangsspannkraft (auf Basis von Erfahrungswerten oder einer weggesteuerten Simulation) und der Bereich der zulässigen Spannkraft definiert werden. Nach der Zuordnung der Spotweld-Elemente zur Rollenbahn und der Berechnung der Aktivierungszeitpunkte der Spotweld-Elemente (siehe Abschnitt 6.1.1) werden automatisiert durch ein Microsoft® Excel Makro die Bauteilknoten beider Bauteile mit den geringsten Abständen zu

den oberen bzw. unteren Knoten der Spotweld-Elemente ermittelt und diesen zugeordnet. Ferner werden die zur Berechnung mit geregelter Spannkraft benötigten, in Abschnitt 6.3.1 beschriebenen, Keywords erzeugt.

6.3.1 Funktionsweise des kraftgeregelten Simulationsmodells

Der Ablauf der Simulation mit geregelter Spannkraft ist in Bild 56a dargestellt. Zu Beginn des Spannvorgangs wird die definierte Anfangsspannkraft durch die Spannrolle aufgebracht. Das Spaltmaß zwischen den zu fügenden Bauteilen (siehe Bild 55b) wird in Längsrichtung der Spotweld-Elemente an den nächstgelegenen Knoten auf den zu fügenden Bauteilen ausgewertet. Diese Auswertung erfolgt, da die Spotweld-Elemente erst zum Zeitpunkt ihrer Aktivierung auf die zum Verbinden der Fügepartner erforderliche Länge verlängert werden. Zuvor ist ihre Länge konstant und ändert sich nicht mit dem aktuellen Spalt zwischen den Fügepartnern. Ab der Aktivierung eines Spotweld-Elements wird die Spannkraft konstant gehalten, bis sich die Spannrolle 1,5 mm vor der Aktivierungsposition des nächsten Spotweld-Elements befindet. Das Blockschaltbild der Spannkraftregelung mit dem Spaltmaß als Zielgröße ist in Bild 56b dargestellt. Im Rahmen der Regelung wird dabei die Differenz zwischen dem Soll- und Ist-Spaltmaß der gespannten und zu fügenden Bauteile am jeweils nächstgelegenen Spotweld-Element mit Hilfe der Stellgröße der Spannkraft minimiert. Die Nachgiebigkeit der gespannten und zu fügenden Bauteile stellt dabei die Störgröße dar.

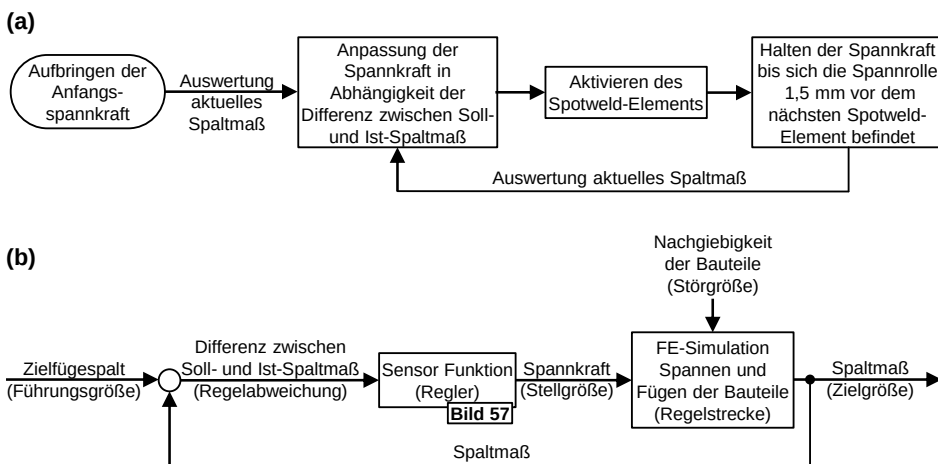


Bild 56: (a) Ablauf Simulation mit geregelter Spannkraft; (b) Blockschaltbild der Spannkraftregelung

In Bild 57 ist die Funktion zur Regelung der von der Spannrolle in der FE-Simulation aufgebrauchten Spannkraft zum Erreichen der Zielfügespalte veranschaulicht. Die Simulationszeit wird dabei über einen Zeitsensor (Keyword *SENSOR_DEFINE_MISC) erfasst. Für jedes Spotweld-Element wird ein Abstandssensor (Keyword *SENSOR_DEFINE_NODE) zum Erfassen der Abweichung des Ist-Spaltmaßes vom Soll-Spaltmaß zwischen dem oberen und dem unteren Bauteil an der Fügestelle eingesetzt. Die Regelung der Spannkraft $F_{S,i}$ für das Spotweld-Element i beginnt dabei zum Zeitpunkt $t_{1,i}$, zu dem sich die Spannrolle 1,5 mm vor der Aktivierungsposition des Spotweld-Elements i befindet. Hierfür wird das Keyword *SENSOR_DEFINE_FUNCTION eingesetzt, das für jeden Zeitschritt eine Spannkraft für die bewegte Spannrolle berechnet. Die Spannkraft kann dabei Werte im Bereich des definierten zulässigen Spannkraftspektrums von $F_{S,min}$ bis $F_{S,max}$ annehmen. Ein Beginn der Regelung mit einem höheren Abstand der Spannrolle zur Aktivierungsposition führt zu überhöhten Spannkraften, da sich die Spannrolle zu weit von der Auswertungsstelle entfernt befindet. Der Einfluss der Abweichung des Ist-Spaltmaßes vom Soll-Spaltmaß auf die Zielgröße wird dabei mit abnehmender Distanz der Spannrolle zur Aktivierungsposition linear erhöht. Ab dem Erreichen der Aktivierungsposition des Spotweld-Elements i wird die Spannkraft konstant gehalten, bis sich die Spannrolle 1,5 mm vor der Aktivierungsposition des nächsten Spotweld-Elements befindet (von $t_{2,i}$ bis $t_{3,i} = t_{1,i+1}$). Die Spannkraft Funktion (Keyword *DEFINE_CURVE_FUNCTION_TITLE), über welche die Spannkraft der Spannrolle in der Simulation vorgegeben wird, addiert die von allen Sensor Funktionen ausgegebenen Spannkraften. Da stets maximal eine Sensor Funktion eine Spannkraft $\neq 0$ ausgibt, kann somit der für einen definierten Zielfügespalt erforderliche Spannkraftverlauf ermittelt werden. Auch hier können die für die Berechnung erforderlichen LS-DYNA® Keywords durch ein Microsoft® Excel Makro automatisiert exportiert werden.

Durch den Einsatz des oben beschriebenen Simulationsmodells lassen sich die vorgegebenen Zielfügespalte in einer Spann- und Fugesimulation erzielen. Der hierzu in der Simulation ermittelte Spannkraftverlauf kann in Form einer Kurve in LS-PrePost® ausgewertet werden. Die Anwendung des Simulationsmodells erfolgt in Abschnitt 7.1.5.

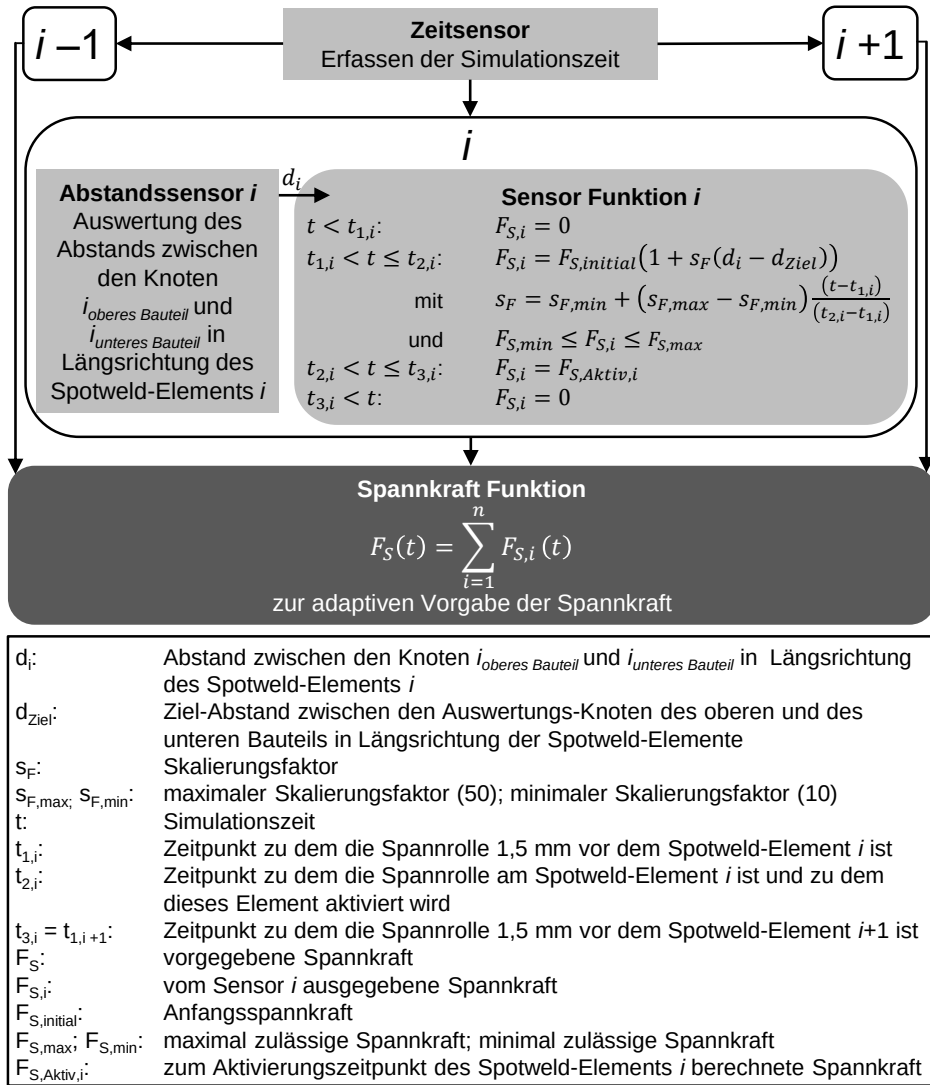


Bild 57: Sensoren und Funktion zur Regelung der Spannkraft

7 Simulative Technologieuntersuchung

Im Folgenden werden digitale Untersuchungen und eine Auslegung des Spann- und Fügeprozesses durchgeführt, um die prozesssichere Fertigung eines Heckwagens mit mitlaufender Spanntechnik zu ermöglichen. Aus den Untersuchungen werden eine verbesserte Vorrichtungsgeometrie und ein Prozessfenster für erforderliche Spannkkräfte, zulässige Blechdicken und Toleranzen zum Erreichen von zulässigen Fügespalten abgeleitet. Darüber hinaus werden auf Basis der so erlangten Erkenntnisse die Bauteilgeometrie, die Fügevorrichtung und der Spann- und Fügeprozess des Heckwagens überarbeitet und simulativ abgesichert.

Aus den simulativen Untersuchungen und Absicherungen wird eine Handlungsempfehlung für die Verwendung von Simulationsmodellen zur frühzeitigen, digitalen und fertigungsgerechten Auslegung von Bauteilen, Fügeprozessen und Fügevorrichtungen im Karosseriebau am Beispiel der mitlaufenden Spanntechnik abgeleitet. Diese Handlungsempfehlung soll den Verzicht auf Absicherungsversuche mit Prototypteilen ermöglichen. Des Weiteren werden, mit dem erlangten Prozessverständnis, Handlungsempfehlungen für den Einsatz der mitlaufenden Spanntechnik gegeben.

7.1 Simulative Untersuchung und Auslegung von Bauteilen und deren Spann- und Fügeprozesse

Zur Weiterentwicklung der Bauteile, mit dem Ziel diese mit ihren Toleranzen fertigungsgerecht zu gestalten und um den Spann- und Fügeprozess und die dabei eingesetzte Vorrichtungsgeometrie zu verbessern, werden Untersuchungen des Spann- und Fügeprozesses mittels FE-Simulation durchgeführt. Der in Abschnitt 6.2 zur experimentellen Validierung des Simulationsmodells verwendete Heckwagen dient dabei als Basis für die Untersuchungen und die auf den Untersuchungen aufbauenden Auslegungen.

Bei den zulässigen Fügespalten von 0,50 mm in Abschnitt 6.2.1 und in [128] handelt es sich um ein Maß, bei dem die Schweißnähte nach [129] noch zuverlässig anbinden. Um eine hohe Nahtqualität zu erreichen, ist beim Laserstrahlschweißen nach [20] ein möglichst geringer Fügespalt anzustreben. Ein Nullspalt lässt sich jedoch für stark nichtmaßhaltige Bauteile teilweise nicht realisieren, bzw. nur mit sehr hohen Spannkkräften, die durch einen höher dimensionierten Pneumatikzylinder aufgebracht werden kön-

nen und zu einer tiefen, von der Spannrolle verursachten Rille auf der Bauteiloberfläche führen (siehe Abschnitt 5.1.2). Diese Rille wirkt sich negativ auf die Lackanhaftung und die Bauteilfestigkeit aus. Darüber hinaus können die Bauteile durch zu hohe Spannkraften plastisch deformiert werden. Aus diesen Gründen wird für eine hohe Schweißnahtqualität ein maximaler Fügespalt von 0,10 mm gemäß [18] angestrebt.

7.1.1 Auslegung von Bauteiltoleranzen und Spannkraften

Für die Auslegung des Spann- und Fügeprozesses mit mitlaufender Spann-technik und den Aufbau von Prozessverständnis soll eine gängige Flanschgeometrie von Karosserieteilen verwendet werden. Beim oberen Fügeflansch des Querträgers des Heckwagens aus Abschnitt 6.2 (Bahn 1) handelt es sich um einen für den Einsatz der mitlaufenden Spann-technik gängigen Fügebereich zweier Karosserieteile. Um allgemeingültige Ergebnisse zu erlangen, werden der Heckboden und der Querträger des Heckwagens in der Bauteilmitte normal zur y-Achse geschnitten und auf ihre ursprüngliche Breite in positive und negative y-Richtung extrudiert. Die Kontaktflächen der beiden Längsträger werden an die Geometrie des Heckbodens und des Querträgers angepasst und zusammen mit den Kontaktflächen der Vorrichtung starr modelliert. Die Geometrie der versteifenden Konsole wird nicht verändert (siehe Bild 58a). Die Blechteile werden auch hier mit Schalenelementen und *MAT_BARLAT_YLD2000 modelliert. Der Heckboden wird auf Bahn 1 von der Spannrolle gespannt (siehe Bild 58b) und mit dem Querträger durch 13 Schweißnähte gefügt. Dabei wird das kraftgesteuerte Modell für Karosserieteile aus Abschnitt 6.1 eingesetzt. Die Bauteilgeometrie wird durch Vernetzen der CAD-Geometrie in die FE-Simulation übertragen.

Zur Ermittlung des Einflusses der Abweichung vom Sollmaß des in z-Richtung tolerierten Fügeflansches des Querträgers (siehe Bild 58a und c) auf resultierende Fügespalte, wird dieser mit einer definierten Abweichung vom Sollmaß (Parameter b) von bis zu ± 2 mm in der Simulation untersucht. Dabei wird eine Abweichung vom Sollmaß infolge von Über- bzw. Unterbiegen des Flansches bei der umformtechnischen Bauteilherstellung abgebildet. Der Zusammenbau wird mit variierten Abweichungen zum Sollmaß des Fügeflansches beim Fügevorgang durch die Spannrolle mit einer Spannkraft von 250 N gespannt, die nach Abschnitt 5.1.2 zu einer Rillentiefe von 0,03 mm führt und sich damit im unteren messbaren Bereich befindet. Die Spannkraft wird in 250 N Schritten auf 750 N erhöht. Die maximal für diesen Zusammenbau zulässige Rillentiefe von 0,05 mm wird bei

einer Spannkraft von 500 N erreicht. Um die Auswirkungen einer weiteren Erhöhung der Spannkraft auf die resultierenden Fügespalte zu untersuchen, wird in diesem Abschnitt auch eine Spannkraft von 750 N aufgebracht. Bei 750 N erhöht sich die Rillentiefe auf 0,07 mm.

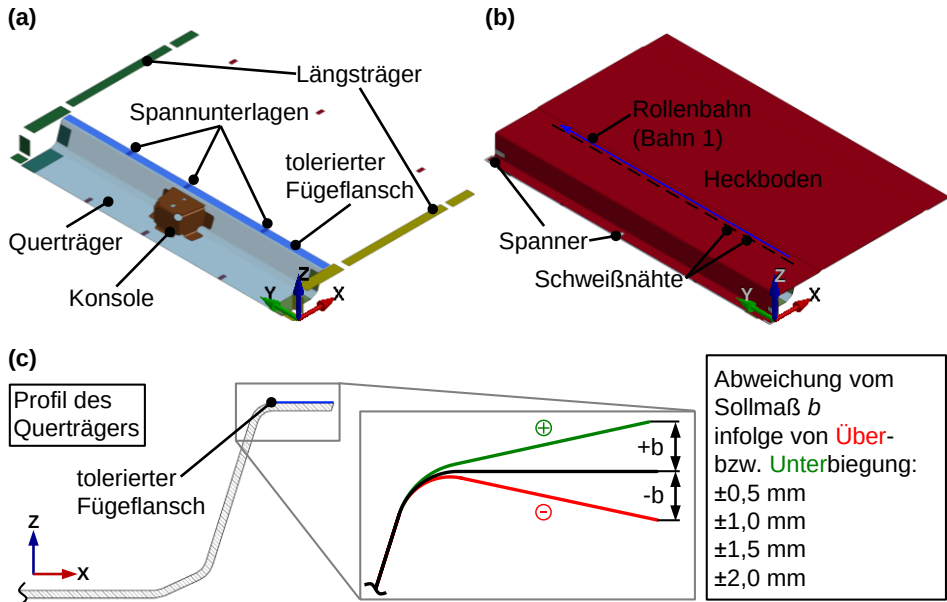


Bild 58: Modell des verallgemeinerten Heckwagens; (a) Zusammenbau in der Vorrichtung ohne Heckboden; (b) Spanner geschlossen mit Heckboden, Schweißnähten und Rollenbahn; (c) nichtmaßhaltig gestalteter Fügeflansch

Es werden die maximalen resultierenden Fügespalte der elf inneren Schweißnähte (Nummer 11 bis 21 in Bild 54a) ausgewertet. Die erste und die letzte Schweißnaht von Bahn 1 wird entsprechend dem Realteil aus Zugänglichkeitsgründen jeweils nur zur Hälfte durch die Spannrolle gespannt (siehe Abschnitt 6.2.1). Infolge des unvollständigen Spannvorgangs weisen diese Schweißnähte stets die größten Fügespalte auf und spiegeln nicht den Einfluss von Prozessparametern auf resultierende Fügespalte vollständig gespannter Schweißnähte wieder. Aus diesem Grund werden sie in der Auswertung der Fügespalte des verallgemeinerten Heckwagens in Kapitel 7 nicht berücksichtigt.

Die resultierenden maximalen Fügespalte der ausgewerteten Schweißnähte sind in Bild 59 in Abhängigkeit der Abweichung vom Sollmaß b (siehe Bild 58c) für Spannkkräfte von 250 N, 500 N und 750 N dargestellt. Wie erwartet, führt die zunehmende Abweichung vom Sollmaß zu höheren

maximalen Fügspalten. Diese lassen sich meist durch das Erhöhen der auf-gebrachten Spannkraften reduzieren. Eine Erhöhung der Spannkraft von 500 N auf 750 N bei Abweichungen zum Sollmaß von $-1,0$ mm bis $+2,0$ mm zeigt nur geringe Auswirkungen auf resultierende maximale Fügspalte. Bei einer Spannkraft von 250 N zeigen sich ab Abweichungen zum Sollmaß von -1 mm bzw. $+1,5$ mm deutlich erhöhte maximale Fügspalte gegenüber den mit höheren Spannkraften gefügten Modellen. Bei einer Spannkraft von 750 N werden stets Fügspalte unterhalb der $0,10$ mm des Zielfügespalts erreicht. Für Abweichungen zum Sollmaß zwischen $-0,5$ mm und $+1,5$ mm sind 250 N zum Erreichen des Zielfügespalts ausreichend. Bei Bauteiletoleranzen in diesem Bereich sollte auf höhere Spannkraften verzichtet werden, um eine unnötig tiefe, durch die Spannrolle verursachte Rille auf der Bauteiloberfläche zu vermeiden. Eine Erhöhung der Spannkraft von 500 N auf 750 N führt lediglich für Abweichungen zum Sollmaß von $-1,5$ mm und $-2,0$ mm zu einer deutlichen Reduzierung der resultierenden Fügspalte. Auf Grund der Lastfälle des Fahrzeugcrashes, welchen der Heckwagen standhalten muss, beträgt die maximal zulässige Rillentiefe für den Heckboden $0,05$ mm, die bei einer Spannkraft von 500 N erreicht wird.

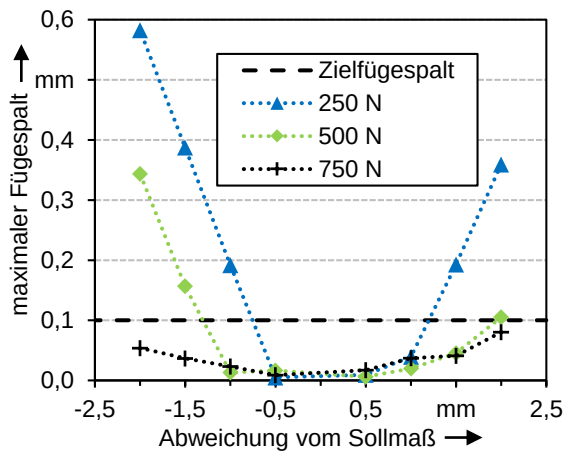


Bild 59: Resultierende maximale Fügspalte für verschiedene Spannkraften in Abhängigkeit der Abweichung vom Sollmaß b des Fügef lansches

Für den Übertrag der Erkenntnisse aus dieser Untersuchung auf weitere Bauteile, die anderen Lastfällen ausgesetzt werden, gilt es festzuhalten, dass bei einer breiten Toleranz eines unteren Bauteils in negative z -Richtung durch eine Erhöhung der Spannkraft auch auf über 500 N eine Reduzierung der resultierenden Fügspalte erzielt werden kann. Dies ist jedoch unter den Aspekten der Crashfestigkeit und Lackierungsanforderungen

nur zulässig, wenn die von der Spannrolle verursachte Rille tiefer als 0,05 mm sein darf. Wird, wie im Fall des untersuchten Zusammenbaus eine Rillentiefe von bis zu 0,05 mm akzeptiert, so ist eine Spannkraft von bis zu 500 N zulässig und wird zum Erzielen möglichst geringer Fügespalte auch empfohlen. Dabei sollte auf Basis der bisherigen Erkenntnisse der Fügeflansch des unteren Bauteils nicht stärker als zwischen $-1,0$ mm und $+1,5$ mm von seinem Sollmaß abweichen. Dies gilt es, im Rahmen zulässiger Fertigungstoleranzen, sicherzustellen. Da jedoch die Blechdicke die erforderlichen Spannkkräfte entscheidend beeinflusst (siehe Abschnitt 5.4.2), werden in Abschnitt 7.1.6 weitere Untersuchungen unter Berücksichtigung der Blechdicke zur Ermittlung eines Prozessfensters durchgeführt. Insgesamt führt ein in negative z-Richtung nichtmaßhaltiger Fügeflansch zu deutlich höheren Fügespalten und wird aus diesem Grund in Abschnitt 7.1.5 eingehender untersucht.

7.1.2 Untersuchung des Einflusses der Umformhistorie auf resultierende Fügespalte

Zur Untersuchung des Einflusses der Umformhistorie auf resultierende Fügspalte an Karosserieteilen, werden im Rahmen einer digitalen Prozesskette die Fertigungsprozesse von den Blechformteilen bis hin zum gefügten Zusammenbau für den Heckwagens aus Abschnitt 7.1.1 simuliert. Die modellierte Prozesskette umfasst die Umformprozesse der Blechformteile des Querträgers (Tiefziehen) und des Bodenblechs (Abkanten) sowie den Spann- und Fügeprozess des Heckwagens mittels Remote-Laserstrahlschweißen mit mitlaufender Spanntechnik.

Die umgeformten Bauteile sind in Bild 60a mit ihren Formabweichungen zum Sollmaß (normal zur Bauteilfläche) dargestellt. Der Heckboden weist Abweichungen zum Sollmaß von bis zu 1,3 mm auf. Der obere Flansch des Querträgers wird gezielt überbogen (siehe Bild 58c) und weicht mit bis zu 2,3 mm vom Sollmaß ab. Die Ergebnisse der in LS-DYNA® durchgeführten Umformsimulation werden nach der Berechnung ihrer Rückfederung direkt in die Spann- und Fügesimulation übernommen. Es wird eine Berechnung mit Umformhistorie (Spannungen, Dehnungen, Blechdickenverteilung und History-Variablen) entsprechend der Modellierungsart (III) aus Abschnitt 5.3.2 und eine Berechnung mit der umgeformten Geometrie ohne Umformhistorie entsprechend der Modellierungsart (IV) aus Abschnitt 5.3.2 durchgeführt. Bild 60b und Bild 60c zeigen die beiden Simulationsmodelle, jeweils mit einem halb dargestellten Heckboden, um die

Sicht auf den Querträger zu ermöglichen. In der Spann- und Fügesimulation werden die Bauteile entsprechend der Empfehlung aus Abschnitt 7.1.1 durch die Spannrolle mit 500 N gespannt.

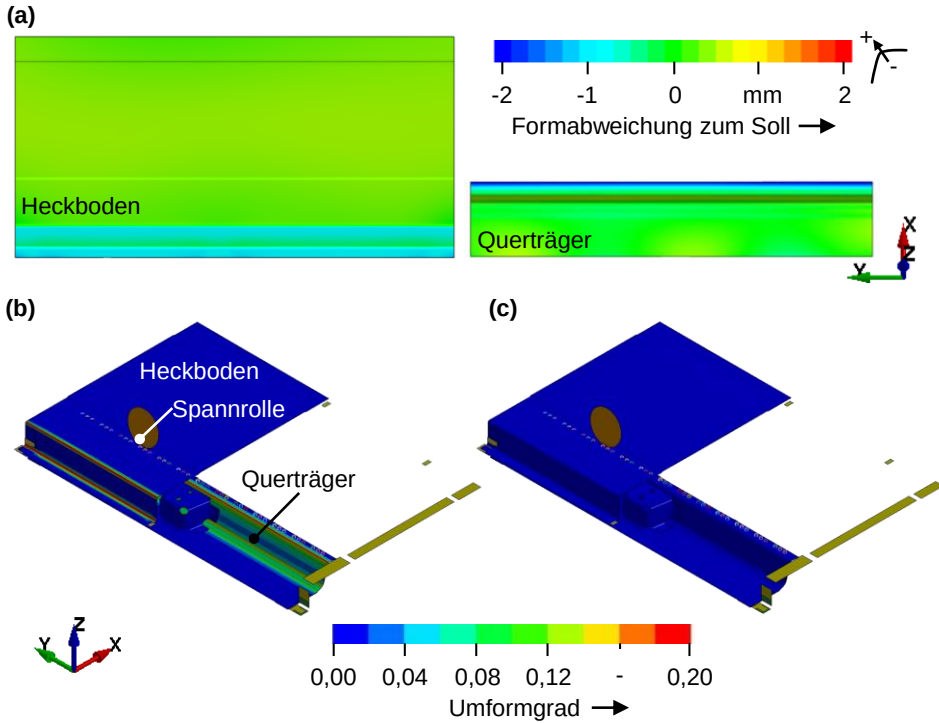


Bild 60: (a) Formabweichungen der Bauteile aus der Umformsimulation; (b) Simulationsmodell des Spann- und Fügeprozesses mit Umformhistorie und (c) ohne Umformhistorie

Auf Grund der Abweichungen des Bodenblechs und des Querträgers zur jeweiligen Sollgeometrie zeigen die beiden Spann- und Fügesimulationen Fügespalte von bis zu 0,43 mm. In Bild 61 sind die mittleren resultierenden Fügespalte des Simulationsmodells mit und ohne Umformhistorie dargestellt. Die Umformhistorie zeigt dabei nur einen geringen Einfluss auf die resultierenden Fügespalte. Dieser beträgt im Mittel 0,008 mm (3,3 %). Die Umformhistorie führt dabei, wie bereits bei den L-Proben (siehe Abschnitt 5.6.4) stets zu einer Verringerung der Fügespalte.

Der geringe Einfluss der Umformhistorie auf die resultierenden Fügespalte des Heckwagens ist auf die geringe Wechselbiegebelastung der umgeformten Bauteilbereiche in Kombination mit dem bei AA5182, im Vergleich zu CR340LA, deutlich schwächer ausgeprägten Bauschinger-Effekt zurückzuführen. So zeigten bereits die Fügesimulationen der L-Proben aus AA5182

in Abschnitt 5.6.4 eine Reduktion der resultierenden Fügespalte durch Berücksichtigung der Umformhistorie von lediglich 0,3 %, während sie bei CR340LA 26,5 % betrug. Auf Grund des geringen Einflusses der Umformhistorie auf die resultierenden Fügespalte des Heckwagens werden die folgenden simulativen Untersuchungen des Spann- und Fügeprozesses des Heckwagens, mit gezielt nichtmaßhaltig konstruierten Bauteilen, ohne Umformhistorie durchgeführt.

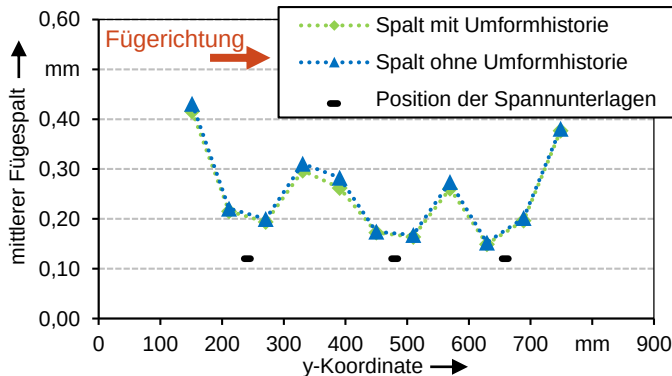


Bild 61: Verläufe der mittleren resultierenden Fügespalte aus der Spann- und Füge-simulation mit und ohne Umformhistorie

7.1.3 Untersuchung der Nachgiebigkeit der Bauteile in der Fügevorrichtung

Die in der Fügevorrichtung eingespannten Bauteile geben während des Spann- und Fügeprozesses mit mitlaufender Spanntechnik gegenüber der Spannrolle nach. Diese Nachgiebigkeit ist abhängig von den eingesetzten Werkstoffen, der Bauteilgeometrie, der Positionierung der Bauteile zueinander und gegenüber der Fügevorrichtung, der Vorrichtungsgeometrie und den Prozessparametern des Spann- und Fügeprozesses. Die Nachgiebigkeit der Bauteile wirkt sich auf die resultierenden Fügespalte aus (siehe Abschnitt 7.1.4).

Eine Untersuchung der Nachgiebigkeit der Bauteile in der Fügevorrichtung kann sowohl mit dem weggesteuerten (siehe Abschnitt 6.1.1) als auch mit dem kraftgesteuerten (siehe Abschnitt 6.1.2) Simulationsmodell durchgeführt werden. Im Rahmen der digitalen Auslegung kann die Nachgiebigkeit der Bauteile in der Fügevorrichtung durch Anpassung der Vorrichtungsgeometrie gezielt beeinflusst werden (siehe Abschnitt 7.1.4). Dadurch lassen sich aus der Nachgiebigkeit der Bauteile resultierende Fügespalte verringern.

In diesem Abschnitt wird eine Untersuchung der Nachgiebigkeit von Bauteilen beispielhaft am Zusammenbau des Heckwagens aus Abschnitt 7.1.1 mit einem um 2 mm in positive z-Richtung nichtmaßhaltigen Querträgerflansch ($b = 2 \text{ mm}$ in Bild 58c) durchgeführt. Gespannt und gefügt wird dabei Bahn 1 aus Bild 58b. Die Führung der weggesteuerten Spannrolle erfolgt auf einer Bahn, die auf der Bauteiloberfläche der CAD-Sollgeometrie des Heckbodens verläuft. Für die kraftgesteuerte Spannrolle wird eine Spannkraft von 500 N definiert. Die Auswertungen sind in Bild 62 über den Bauteilen des Heckwagens veranschaulicht. Der Kraft-Weg-Verlauf der weggesteuerten Simulation ist blau und der Verlauf der z-Koordinate des tiefsten Knotens der kraftgesteuerten Spannrolle (auf der sekundären y-Achse) grün dargestellt. Der Heckboden wird seitlich gegen die starren Flansche der Längsträger und im mittleren Bereich gegen den nichtmaßhaltigen Flansch des Querträgers gespannt und mit diesem gefügt. Das Aufsetzen der Spannrolle auf dem Heckboden bzw. deren Abheben ist durch einen vertikalen Verlauf der beiden Kurven zu Beginn bzw. am Ende der Bahn zu erkennen.

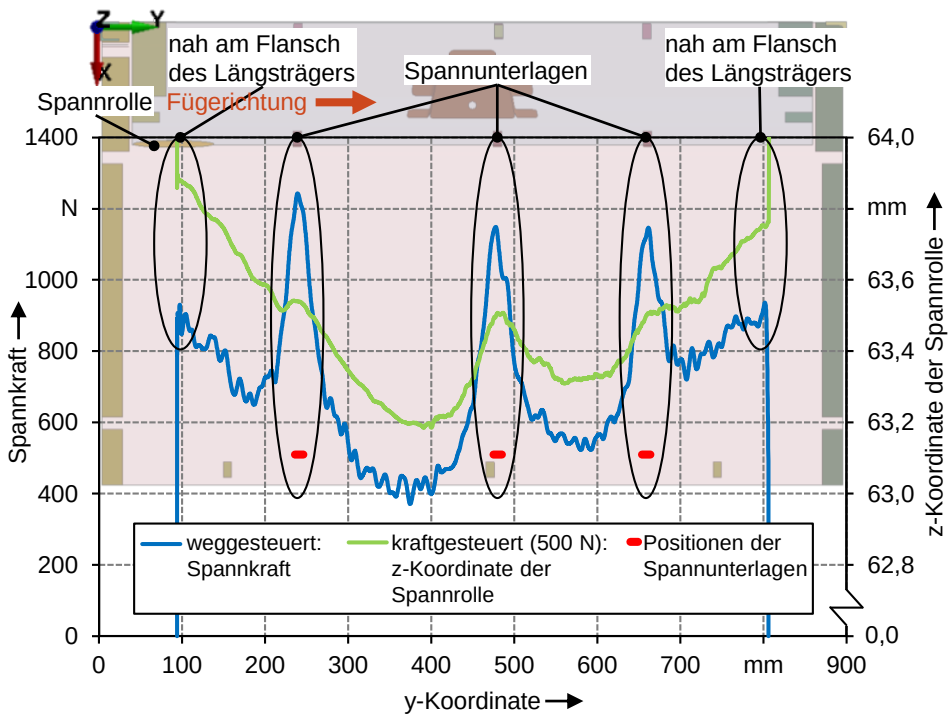


Bild 62: Nachgiebigkeit des Heckwagens aus Abschnitt 7.1.1 (Konfiguration $b = 2 \text{ mm}$): dargestellt durch den Spannkraftverlauf der weggesteuerten Simulation und den Verlauf der z-Koordinate der Spannrolle aus der mit 500 N kraftgesteuerten Simulation

In Bereichen mit verringerter Nachgiebigkeit zeigen sich bei beiden Kurven die in Bild 62 markierten Erhöhungen. Dies ist in den äußeren Bereichen nahe der Auflage des Heckbodens auf den Flanschen des Längsträgers und im Bereich der Spannunterlagen der Fall. Infolge einer verringerten Nachgiebigkeit der Bauteile in der Fügevorrichtung erhöht sich die Spannkraft der weggesteuerten Spannrolle, die mit einer konstanten z-Koordinate von 63,25 mm über den Heckboden geführt wird. Die mit einer Spannkraft von 500 N kraftgesteuerte Spannrolle weist in Bereichen mit verringerter Nachgiebigkeit eine erhöhte z-Koordinate auf, da die Steifigkeit der Bauteile der Spannrolle entgegenwirkt. Die weggesteuerte Spannrolle spannt den Heckboden auf seine CAD-Sollgeometrie. Die hierfür definierte z-Koordinate der Spannrolle von 63,25 mm wird von der kraftgesteuerten Spannrolle lediglich im Bereich zwischen der ersten und zweiten Spannunterlage einmal kurz unterschritten. Daher weist die weggesteuerte Simulation außerhalb dieses Bereichs Spannkraften oberhalb der zulässigen 500 N auf, die zu einer deutlich höheren Rillentiefe als die zulässigen 0,05 mm führen. Unter dem Aspekt der Untersuchung der Bauteilnachgiebigkeit empfiehlt sich die weggesteuerte Simulation, mit deutlich markanteren Ausschlägen der berechneten Spannkraft, gegenüber der kraftgesteuerten Simulation, mit deutlich schwächeren Ausschlägen der berechneten z-Koordinate der Spannrolle.

7.1.4 Auslegung der Fügevorrichtung

Im Folgenden wird der Einsatz schweißnahtspezifischer Spannunterlagen (siehe Bild 63) simulativ geprüft, um die resultierenden Fügespalte ohne eine Erhöhung der Spannkraft, die zu einer tieferen Rille auf der Bauteiloberfläche führen würde, zu reduzieren. Schweißnahtspezifische Spannunterlagen sollen gegenüber Standard Spannunterlagen eine verbesserte Abstützung des Fügeflansches ermöglichen und so dessen Nachgiebigkeit (siehe Abschnitt 7.1.3) während des Spann- und Fügeprozesses verringern. Schweißnahtspezifische Spannunterlagen erhöhen allerdings auch die Komplexität der Fügevorrichtung.

Die Untersuchung in Abschnitt 7.1.1 zeigte, dass ein in negative z-Richtung nichtmaßhaltiger Fügeflansch zu höheren Fügespalten führt, als ein in positive z-Richtung nichtmaßhaltiger (siehe Bild 59). Dies ist darauf zurückzuführen, dass ein in negative z-Richtung nichtmaßhaltiger (überbogener) Fügeflansch zwischen den Spannunterlagen in negative z-Richtung „durchhängt“. Daher wird für diese Untersuchung ein um 2 mm in negative z-Richtung nichtmaßhaltiger Fügeflansch gewählt.

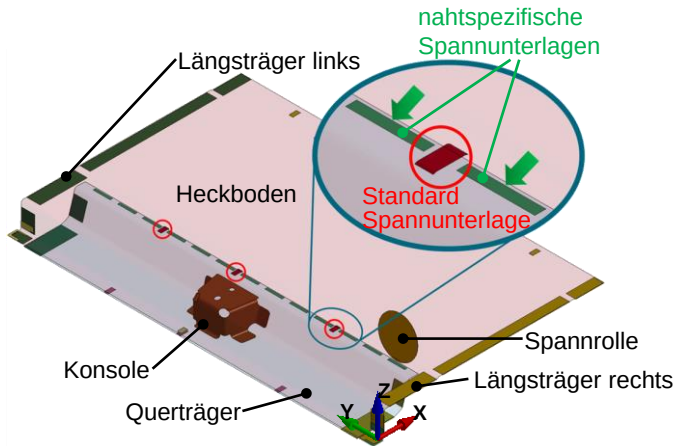


Bild 63: Variation der Spannunterlagen des Heckwagens

Beim Spannvorgang wird der Fügespalt gegenüber dem ungespannten Zustand verringert, jedoch nicht geschlossen und beträgt bis zu 0,34 mm (dargestellt oben in Bild 64a und durch die blaue Kurve in Bild 64b). Der Einsatz von nahtspezifischen Spannunterlagen an jeder Schweißnaht unterhalb der Spannrolle ist in Bild 63 veranschaulicht. Vor dem Spannvorgang liegt der Flansch auf den nahtspezifischen Spannunterlagen auf (siehe Bild 64a unten). Während des Spannvorgangs wird die Spannrolle im Bereich der Schweißnaht durch die Spannunterlage abgestützt. Der Fügespalt wird dadurch nahezu vollständig geschlossen. Dies zeigt die grüne Kurve in Bild 64b, die unterhalb des Zielfügespalts von 0,10 mm verläuft. Der maximale resultierende Fügespalt beträgt dabei lediglich 0,02 mm. Daher können die Spannkraften zum Erreichen des Zielfügespalts geringer ausgelegt werden. Hierzu wird auf den folgenden Abschnitt 7.1.5 verwiesen.

Die Erkenntnisse aus diesem Abschnitt legen bei einer Toleranz des Querträgerflansches von ± 2 mm den Einsatz nahtspezifischer Spannunterlagen nahe, um mit einer Spannkraft von 500 N den Zielfügespalt von 0,10 mm nicht zu überschreiten. Dabei beträgt die Tiefe der zu erwartenden, durch die Spannrolle verursachten, Rille 0,05 mm (gemäß Abschnitt 5.1.2). Alternativ besteht entsprechend Abschnitt 7.1.1 die Möglichkeit, die Toleranz in negativer z-Richtung auf eine Abweichung von 1 mm zu begrenzen und die Vorrichtung weniger komplex auszuführen.

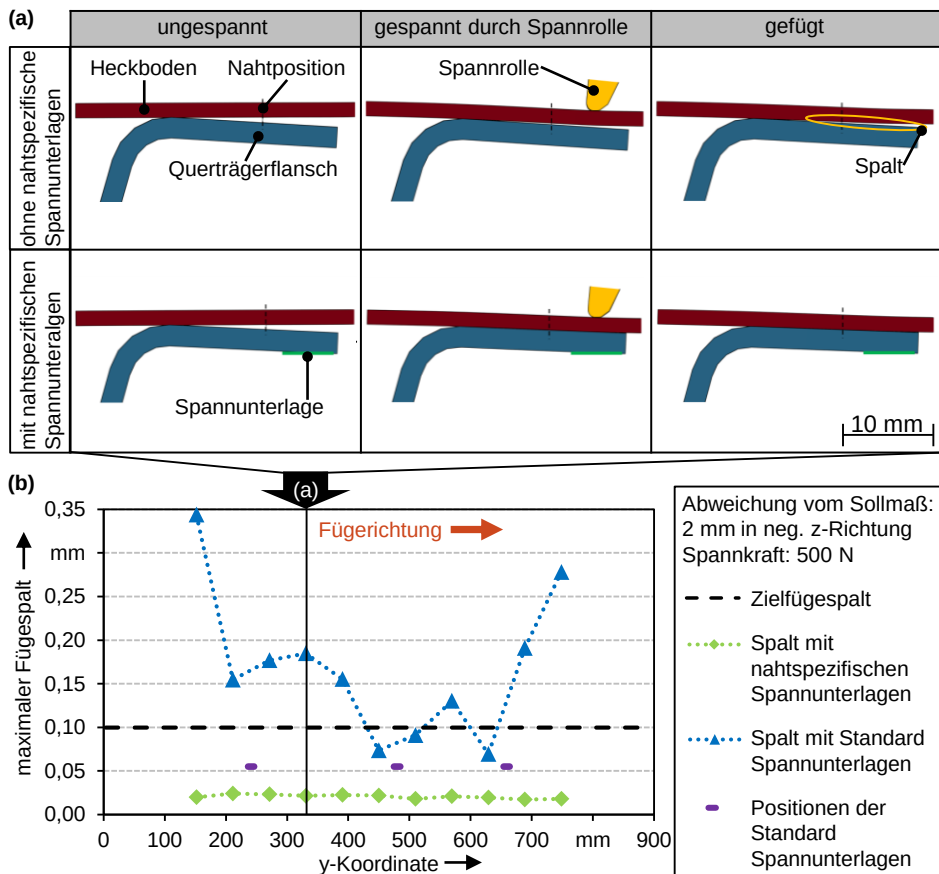


Bild 64: (a) Flanschbereich mit und ohne nahtspezifische Spannunterlagen; (b) resultierende Fügespalte mit und ohne nahtspezifische Spannunterlagen

7.1.5 Ermittlung eines optimierten Spannkraftverlaufs zum Erzielen eines definierten Fügespalts

Durch das Erhöhen der Spannkraft lassen sich die resultierenden Fügespalte reduzieren (siehe Bild 59). Allerdings erzeugt die Spannrolle auf den Bauteilen eine mit zunehmender Spannkraft tiefer werdende Rille, die möglichst gering gehalten werden sollte (siehe Abschnitt 5.1.2). Durch die Spann- und Fugesimulation mit geregelter Spannkraft (siehe Abschnitt 6.3) kann der erforderliche Spannkraftverlauf für einen vorgegebenen Fügespalt mit einer einzelnen Spann- und Fugesimulation ermittelt werden. Der so ermittelte Spannkraftverlauf ermöglicht es, die gewünschten Fügespalte zu realisieren und dabei die von der Spannrolle verursachte Rille auf den Bauteilen zu minimieren.

Zur Verifizierung wird das Simulationsmodell mit geregelter Spannkraft auf den verallgemeinerten Zusammenbau eines Heckwagens aus Abschnitt 7.1.1 mit einem Fügeflansch, der eine Abweichung vom Sollmaß von 2 mm in negative z-Richtung aufweist (siehe Bild 58), angewandt. In der Vorrichtung werden entsprechend der Empfehlung aus Abschnitt 7.1.4 schweißnahtspezifische Spannunterlagen eingesetzt. Der vorgegebene Zielfügespalt beträgt 0,10 mm. Die untere zulässige Spannkraft wird mit 100 N definiert. Geringere Spannkräfte können auf Grund des Eigengewichts der mitlaufenden Spanntechnik nicht zuverlässig aufgebracht werden. Die obere Grenze der zulässigen Spannkraft beträgt 500 N, um die maximal zulässige Rillentiefe von 0,05 mm nicht zu überschreiten. Für die Anfangsspannkraft wird ein Wert von 150 N gewählt.

Die adaptiv berechnete Spannkraft ist in Bild 65 durch die blaue Kurve (mit der primären y-Achse) dargestellt. Das Einschwingen der Spannkraft im Bereich der Regelung und die konstanten Bereiche zwischen den Fügestellen sind dabei in der Detailansicht veranschaulicht. Die aus der Simulation mit geregelter Spannkraft resultierenden Fügespalte sind (mit der sekundären y-Achse) für die einzelnen Spotweld-Elemente durch blaue Dreiecke dargestellt. Deren mittlere absolute Abweichung vom vorgegebenen Zielfügespalt beträgt 0,004 mm. Der auf Basis der Simulation mit geregelter Spannkraft empfohlene Spannkraftverlauf ist als grüne Kurve dargestellt. Dieser setzt sich aus den mit geregelter Spannkraft (blaue Kurve) an den einzelnen Fügestellen ermittelten Spannkraften zusammen (siehe Detaildarstellung in Bild 65).

Da sich das Einschwingen der Spannkraft während deren Regelung auch auf die resultierenden Fügespalte auswirkt, wird das Ergebnis der Simulation mit adaptiver Spannkraft verifiziert. Hierzu erfolgt eine kraftgesteuerte Berechnung mit dem empfohlenen (grünen) Spannkraftverlauf. Dieser führt zu den durch grüne Rauten dargestellten Fügespalten. Diese weichen leicht von den, in der Berechnung mit geregelter Spannkraft ermittelten, Fügespalten ab. Die mittlere absolute Abweichung vom Sollfügespalt (0,10 mm) beträgt jedoch hierbei lediglich 0,008 mm. Die Abweichungen zwischen den Fügespalten mit adaptiver und empfohlener Spannkraft sind darauf zurückzuführen, dass die adaptive Spannkraft während der Regelungsphase schwingt. Dabei wird durch die Regelung auch der Effekt des Schwingens bei der Anpassung der Spannkraft kompensiert. Beim Einsatz der empfohlenen Spannkraftkurve tritt dagegen keine regelungsbedingte Schwingung der Spannkraft auf. Dies führt zu einer Differenz der mittleren absoluten Abweichung vom Sollfügespalt von 0,004 mm zwischen den mit adaptiver und den mit empfohlener Spannkraft ermittelten Fügespalten.

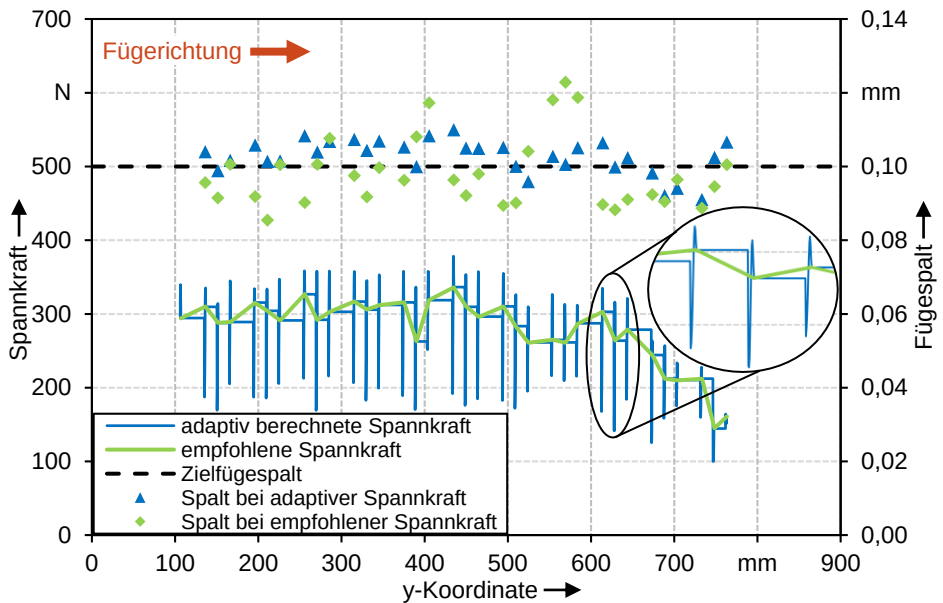


Bild 65: Spannkraften und Fügeseiten aus der Simulation mit geregelter und vorgegebener Spannkraft

Zum gegenwärtigen Zeitpunkt lässt sich dieser Spannkraftverlauf jedoch nicht im realen Fügeprozess realisieren, da für jede Bahn lediglich eine Spannkraft für die Spannrolle vorgegeben werden kann. Des Weiteren ist in der Standardausführung der mitlaufenden Spanntechnik keine Kraftmessdose zur exakten Erfassung der Spannkraft integriert. Für die Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit wurde eine Kraftmessdose in eine prototypische Anlage (siehe Bild 13) integriert. Um in Zukunft einen im Hinblick auf resultierende Fügeseiten und Rillentiefe optimierten Spannkraftverlauf im realen Fügeprozess umsetzen zu können, bedarf es eines geregelten Spannkraftverlaufs. Hierzu müsste die Spannkraft des Pneumatikzylinders, mit Hilfe des Signals einer zwischen dem Pneumatikzylinder und der Spannrolle integrierten Kraftmessdose, zur Realisierung eines vorgegebenen Spannkraftverlaufs geregelt werden.

7.1.6 Ermittlung eines Prozessfensters

Zur Ermittlung erforderlicher Spannkraften, zulässiger Blechdicken und zulässiger Toleranzen soll ein Prozessfenster für das Fügen des verallgemeinerten Heckwagens aus Abschnitt 7.1.1 mit mitlaufender Spanntechnik bestimmt werden. Die zulässigen Spannkraften betragen 100 bis 500 N und sind nach unten durch die Mindestkraft des Pneumatikzylinders und nach

oben durch die maximal zulässige Tiefe (0,05 mm) der von der Spannrolle auf dem Heckwagen verursachten Rille (siehe Abschnitt 5.1.2) begrenzt. Der Heckboden kann im Fahrbetrieb des Fahrzeugs ein Dröhnen verursachen. Um diesem Dröhnen entgegenzuwirken und so den akustischen Komfort im Fahrzeuginnenraum zu verbessern, ist eine Erhöhung der Blechdicke des Heckbodens denkbar, um wiederum dessen Eigenfrequenz zu erhöhen. Die Auswirkung einer Erhöhung der Blechdicke des Heckbodens auf resultierende Fügespalte und erforderliche Spannkkräfte soll daher durch das Simulationsmodell untersucht werden.

Die Untersuchungsergebnisse aus Abschnitt 7.1.1 zeigen, dass die Toleranz des oberen Fügeflansches des Querträgers zu unzulässig hohen resultierenden Fügespalten führen kann. Durch die Anpassung der Geometrie der Fügevorrichtung in Abschnitt 7.1.4 konnten die resultierenden Fügespalte wiederum verringert werden. Eine Abstützung aller Schweißnähte von Bahn 1 soll daher entsprechend der Empfehlung auf Basis der Simulation aus Abschnitt 7.1.4 in der realen Fügevorrichtung zur Reduzierung der Fügespalte umgesetzt werden. Im Rahmen der Konstruktionsänderung der Fügevorrichtung werden anstelle der schmalen, länglichen Spannunterlagen aus Abschnitt 7.1.4, mit Maßen von jeweils 6 mm auf 42 mm in x- und y-Richtung, kompaktere Spannunterlagen (vergleiche Bild 63 mit Bild 66) mit 16 mm auf 20 mm definiert. So kann bei der Fertigung der kompakteren Spannunterlagen auf standardisierte Profile zurückgegriffen werden. Dadurch kann die Fügevorrichtung deutlich einfacher gefertigt werden. Durch die Positionierung der Spannunterlagen zwischen den Schweißnähten kann der Flansch des Querträgers flächig abgestützt werden. Die Auswirkungen des Wechsels zu den kompakteren Spannunterlagen auf die Fügespalte der einzelnen Schweißnähte aus Abschnitt 7.1.4, die mit den schmalen, länglichen Spannunterlagen gefügt wurden, liegen stets unter 0,01 mm und sind damit vernachlässigbar gering.

Der Heckboden wird mit seiner ursprünglichen Blechdicke von 1,75 mm sowie mit den erhöhten Blechdicken von 2,00 und 2,25 mm untersucht. Dabei wird der obere Bereich des Heckbodens (in Bild 66 grau eingerahmt) an seiner Toleranzgrenze (Allgemeintoleranz für Karosserieteile), mit einer Abweichung vom Sollmaß von 0,5 mm in positive z-Richtung, modelliert. Die Abweichung vom Sollmaß des tolerierten oberen Querträgerflansches infolge von Über- bzw. Unterbiegen des Flansches bei der umformtechnischen Bauteilherstellung (siehe Bild 58) wird im Bereich von ± 4 mm in Millimeter-Schritten variiert. Die vollfaktorielle, simulative Untersuchung umfasst damit insgesamt 27 Konfigurationen.

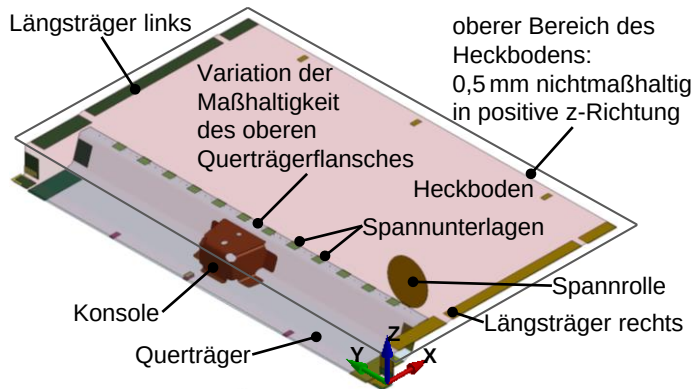


Bild 66: Modell des Heckwagens zur Ermittlung eines Prozessfensters

Für die Berechnung wird das Simulationsmodell mit geregelter Spannkraft (siehe Abschnitt 6.3) eingesetzt, da dieses Modell lediglich eine Berechnung für jede der 27 Konfigurationen zum Ermitteln der erforderlichen Spannkraft und der resultierenden Fügespalte benötigt. Dabei wird das zulässige Spannkraftspektrum mit 100 bis 500 N vorgegeben. Die Anfangsspannkraft wird mit 250 N, der Hälfte der zulässigen maximalen Spannkraft definiert. Der Zielfügespalt wird mit 0,10 mm vorgegeben.

Das ermittelte Prozessfenster für das Fügen des Heckwagens aus Abschnitt 7.1.1 mit mitlaufender Spanntechnik ist in Bild 67 dargestellt. Der Bereich, in dem der Zielfügespalt von 0,10 mm stets erreicht bzw. unterschritten wird, ist grün unterlegt. In diesem Bereich wird jeweils die maximale, adaptiv ermittelte Spannkraft angegeben, die zu einem maximalen Fügespalt von 0,10 mm führt. Dabei handelt es sich um die Spannkraft, die im realen Fügeprozess vorgegeben werden sollte, da zum gegenwärtigen Zeitpunkt im realen Fügeprozess kein Spannkraftverlauf vorgegeben werden kann (siehe Abschnitt 7.1.5). Durch den Einsatz der maximalen, adaptiv ermittelten Spannkraft im realen Fügeprozess kann, die von der Spannrolle auf der Bauteiloberfläche verursachte Rille, gegenüber der Rille beim Einsatz der maximal zulässigen Spannkraft von 500 N, verringert werden.

Die gelb unterlegten Bereiche weisen maximale Fügespalte über dem Zielfügespalt von 0,10 mm auf. Die Fügespalte liegen jedoch noch im zulässigen Bereich von bis zu 0,50 mm (siehe Abschnitt 6.2.1). Die Grenzen der gelben Bereiche und damit die der übrigen Bereiche wurden durch lineare Interpolation der maximal resultierenden Fügespalte bestimmt. Da in den gelben Bereichen der Zielfügespalt überschritten wird, beträgt die maximale, adaptiv ermittelte Spannkraft für alle Konfigurationen dieser Bereiche 500 N (die maximal zulässige Spannkraft). Die rot unterlegten Bereiche

weisen maximale Fügespalte oberhalb der zulässigen 0,50 mm auf. Das Fügen mit mitlaufender Spanntechnik von Konfigurationen aus diesen Bereichen ist nicht zulässig. Auch in den roten Bereichen beträgt die maximale, adaptiv ermittelte Spannkraft für alle Konfigurationen 500 N.

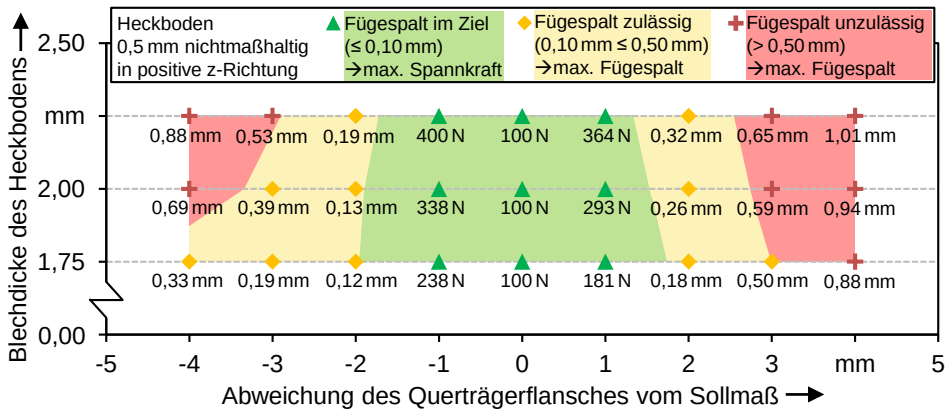


Bild 67: Prozessfenster für das Fügen des verallgemeinerten Heckwagens mit mitlaufender Spanntechnik

Der grüne Bereich, in dem die Fügespalte stets maximal 0,10 mm betragen, verschmälert sich mit zunehmender Blechdicke des nichtmaßhaltigen Heckbodens. Zudem steigt die maximale erforderliche Spannkraft mit zunehmender Blechdicke an. Dies ist auf den erhöhten Biege widerstand infolge der Zunahme der Blechdicke zurückzuführen (siehe Abschnitt 5.4.2). Lediglich für den maßhaltigen Querträger (Abweichung vom Sollmaß von 0 mm) werden stets Fügespalte von unter 0,10 mm erreicht. Aus diesem Grund beträgt die maximale, adaptiv ermittelte Spannkraft für diese Konfigurationen 100 N und damit die minimal zulässige Spannkraft.

Der grüne und die gelben Bereiche sind in Richtung negativer Abweichungen zum Sollmaß breiter als in Richtung positiver Abweichungen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der in negative z-Richtung nichtmaßhaltige Fügeflansch des Querträgers durch Spannun terlagen abgestützt wird (siehe Bild 64a). Bei einer Abweichung vom Sollmaß in positiver z-Richtung muss der Flansch dagegen allein durch die Spannrolle, ohne Unterstützung durch die Fügevorrichtung, in die entgegengesetzte Richtung seiner Abweichung vom Sollmaß gespannt werden. Aus diesem Grund wird bei einer Blechdicke von 1,75 mm für die Abweichung von -4 mm ein maximaler Fügespalt von 0,33 mm erreicht, während für die Abweichung von +4 mm der maximale Fügespalt mit 0,88 mm mehr als das doppelte beträgt. Die beiden roten Bereiche, mit unzulässig hohen Fügespalten von

über 0,50 mm, verbreitern sich mit zunehmender Blechdicke des Heckbodens. Dies ist ebenfalls auf den erhöhten Biege widerstand infolge der Zunahme der Blechdicke zurückzuführen. Infolge dieses Effekts nimmt die Breite der roten Bereiche zu, während die Breite der gelben und des grünen Bereichs mit zunehmender Blechdicke des Bodenblechs abnimmt.

Die Ermittlung des Prozessfensters liefert dabei, neben dem Prozessfenster, mehrere auf die Prozess- und Bauteilauslegung, von unter Einsatz der mitlaufenden Spanntechnik gefügten Zusammenbauten, übertragbare Erkenntnisse. Eine Zunahme der Blechdicke des oberen Bauteils führt zu einer Erhöhung der erforderlichen Spannkraft bzw. zu höheren resultierenden Fügepalten. Dies führt wiederum zu einer Reduktion der fertigungsgerechten Bauteiltoleranzen. Beim Einsatz von Spannunterlagen in der Spannvorrichtung ist eine Anpassung der Geometrie der Spannunterlagen an die jeweilige Länge der einzelnen Schweißnähte nicht erforderlich. Stattdessen kann bei der Geometrie auf standardisierte Spannerprofile mit den Maßen von 16 auf 20 mm zurückgegriffen werden, bei einer vernachlässigbaren Erhöhung der resultierenden Fügepalte von unter 0,01 mm. Während beim Einsatz von Spannvorrichtungen ohne Spannunterlagen ein in negative z-Richtung nichtmaßhaltiger unterer Fügeflansch zu höheren Fügepalten führt als ein in positiver z-Richtung nichtmaßhaltiger, ist dieser richtungsabhängige Effekt beim Einsatz von Spannunterlagen umgekehrt. Mit einem im Bereich von ± 1 mm nichtmaßhaltigen unteren Fügeflansch lassen sich beim Einsatz von Spannunterlagen auch mit Spannkraften unterhalb von 500 N Fügepalte von 0,10 mm erreichen.

Das in diesem Abschnitt beschriebene Vorgehen, bei dem die zu fügenden Bauteile mit definiert nichtmaßhaltiger Geometrie in einer FE-Fügesimulation modelliert werden, lässt sich auf die Auslegung zulässiger Bauteiltoleranzen mit dem Fokus auf zulässige Prozesskräfte von konventionellen Spannern übertragen. Gegebenenfalls kann dabei zusätzlich, entsprechend der Vorgehensweise in diesem Abschnitt, die Blechdicke variiert werden. Anstelle resultierender Fügepalte wird bei einer solchen Auslegung die erforderliche Prozesskraft zum Spannen der Bauteile ausgewertet und im Hinblick auf die Dimensionierung der Fügevorrichtung bewertet. Darüber hinaus kann mit diesem Vorgehen beim Widerstandspunktschweißen der Prozesskraftverlust an den Schweißzangen, bedingt durch nichtmaßhaltige Bauteile, ermittelt werden. Der Prozesskraftverlust an den Schweißzangen wirkt sich direkt auf die Kontakt- und Widerstandsverhältnisse am Schweißpunkt während des Schweißprozesses aus. Dies führt zu einer negativen Beeinflussung der generierten Wärme und damit der Prozessstabilität beim Widerstandspunktschweißen. Durch den Einsatz zusätzlicher

Spanner in der Fügevorrichtung, das Verringern der Bauteiltoleranzen und die Anpassung von Prozessparametern (z. B. Verlängerung der Vorwärmzeit), kann dem Prozesskraftverlust entgegengewirkt werden. Des Weiteren lässt sich das Vorgehen mit definiert nichtmaßhaltiger Geometrie auch auf die Fügесimulation mit Fokus auf die Maßhaltigkeit der gefertigten Zusammenbauten übertragen. Anstelle resultierender Fügесpalte wird dabei die resultierende Abweichung der Geometrie zum Sollmaß ausgewertet. Dabei kann, neben der Kombination nichtmaßhaltiger Bauteile, zusätzlich der Einfluss der Blechdicke der Bauteile auf die Maßhaltigkeit der gefertigten Zusammenbauten untersucht werden. Auf Basis dieser Untersuchungen kann eine fundierte Definition der Bauteiltoleranzen erfolgen.

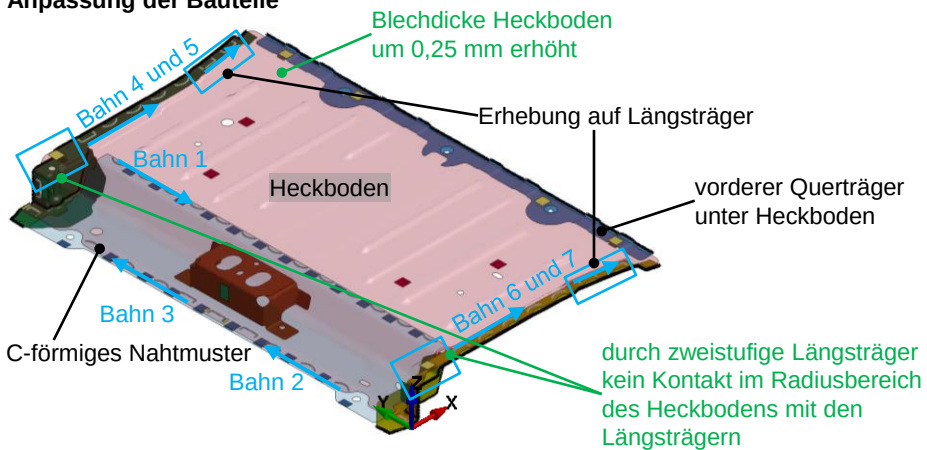
7.1.7 Anpassungen der untersuchten Bauteile und des Spann- und Fügeprozesses auf Basis der simulativen Untersuchung und Auslegung

Auf Basis der simulativen Untersuchung und Auslegung in den Abschnitten 7.1.1 bis 7.1.6 erfolgt eine Reihe von Anpassungen der Bauteile, des Spann- und Fügeprozesses und der Fügevorrichtung gegenüber dem früheren Entwicklungsstand aus Abschnitt 6.2. Darüber hinaus werden weitere Anpassungen der Bauteile, die aus der Weiterentwicklung des Fahrzeugs und der Effizienzsteigerung der Fertigungsprozesse resultieren, durchgeführt. Die Anpassungen der Bauteile und der Vorrichtung sind in Bild 68 dargestellt. Die auf den simulativen Untersuchungen dieser Arbeit basierenden Änderungen sind dabei grün beschriftet.

Die Blechdicke des Heckbodens aus AA5182 wurde zur Verbesserung des akustischen Komforts im Fahrzeuginnenraum um 0,25 mm erhöht. Dies ist gemäß des in Abschnitt 7.1.6 ermittelten Prozessfensters bei Verwendung der schweißnahtspezifischen Spannunterlagen und der gewählten Toleranz des oberen Querträgerflansches von ± 1 mm zulässig. Um Bauraum für das Tanksystem zu gewinnen, wurde im Bereich der jeweils letzten beiden Schweißnähte auf den Längsträgern die Geometrie der Längsträger und des Heckbodens in z-Richtung angehoben. Dadurch muss die Spannrolle für das Spannen dieser Bereiche (das bisher mit jeweils einer Bahn erfolgte) von Bahn 4 zu Bahn 5 bzw. von Bahn 6 zu Bahn 7 angehoben werden, um einen Absatz von 3,5 mm Höhe zu überwinden. Zur Verbesserung der Fügereihenfolge wird das Bauteil „vorderer Querträger unter Heckboden“ (dunkelblau im hinteren Bereich von Bild 68) vor dem Heckboden gefügt und befindet sich daher nun unter dem Heckboden. Um erhöhte Fügесpalte der ersten beiden Schweißnähte auf den beiden Längsträgern

(siehe Abschnitt 6.2.1) infolge der Biegung des Bodenblechs um die beiden Kanten der Längsträgerflansche zu vermeiden, wurden die beiden Längsträger in diesem Bereich durch jeweils zwei Stufen abgesenkt. Dadurch hat der Heckboden im oberen Radiusbereich keinen Kontakt zu den Längsträgern und kann in den Flanschbereichen besser gegen die Längsträger gespannt werden. Des Weiteren wurde zur Steigerung der Verbindungsfestigkeit der Schweißnähte die Möglichkeit frei programmierbarer Nahtmuster beim Remote-Laserstrahlschweißen (siehe Abschnitt 2.1.1) genutzt und C-förmige Nahtmuster gewählt. Durch das angepasste Nahtmuster können die Schweißnähte den Crashlasten besser Stand halten.

Anpassung der Bauteile



Anpassung der Fügevorrichtung

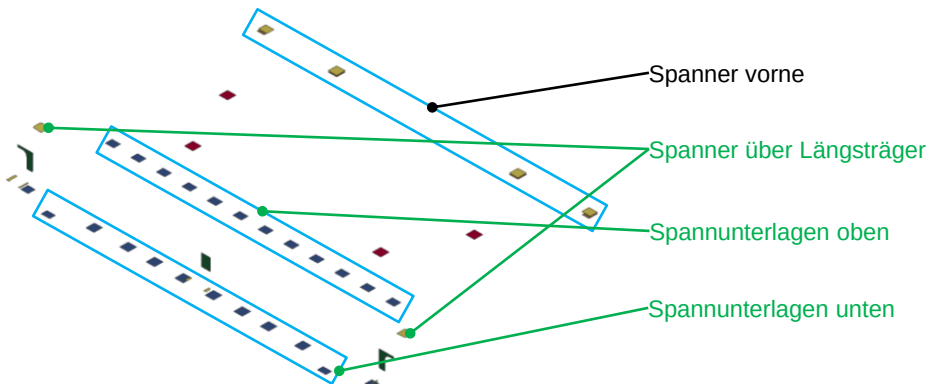


Bild 68: Anpassungen gegenüber den untersuchten Bauteilen und der Vorrichtung des Heckwagens aus Abschnitt 6.2 (grün basierend auf simulativer Untersuchung)

Die Fügevorrichtung wurde zur Verbesserung des Spann- und Fügeprozesses an mehreren Stellen angepasst. Im vorderen Bereich des Heckwagens

werden anstelle von Spannunterlagen vier Spanner eingesetzt, um zusammen mit den beiden zusätzlichen Spannern über den Längsträgern den Heckboden mit verringerten Fügespalten spannen zu können. Die beiden Spanner über den Längsträgern tragen dabei zur Verringerung der Fügespalte der beiden äußeren Schweißnähte von Bahn 1 bei, die auf Grund eingeschränkter Zugänglichkeit nicht vollständig von der Spannrolle gespannt werden können (siehe Abschnitt 6.2.1). Darüber hinaus werden für die Bahnen 1, 2 und 3, zur Verringerung der Nachgiebigkeit der Bauteile (siehe Abschnitt 7.1.3), entsprechend der Empfehlung auf Basis der Simulation in Abschnitt 7.1.4, schweißnahtspezifische Spannunterlagen anstelle vereinzelter Spannunterlagen eingesetzt. Bei den Spannunterlagen handelt es sich um die in Abschnitt 7.1.6 abgesicherte Geometrie. Als Spannkraft werden, entsprechend der Empfehlung aus Abschnitt 7.1.1, für alle sieben Bahnen 500 N gewählt, um möglichst geringe Fügespalte mit einer noch zulässigen Rillentiefe des Spannrollenabdrucks (siehe Abschnitt 5.1.2) zu realisieren. Der Laserstrahl wird beim Fügen parallel zur Spannrolle geführt. Zur Reduktion der Taktzeit erfolgt das Fügen der Bahnen 4 bis 7 außerhalb der Fügevorrichtung. Hierzu wird der Heckwagen in einer Ausschweißstation abgelegt. Der Heckboden wird während des weiteren Schweißvorgangs nur durch die mitlaufende Spanntechnik gespannt. Die simulative Absicherung des angepassten Fügeprozesses des Heckwagens mit mitlaufender Spanntechnik erfolgt in Abschnitt 7.1.8.

7.1.8 Absicherung der modifizierten Bauteile und deren Spann- und Fügeprozesse

Zur digitalen Absicherung der resultierenden Fügespalte werden die in Abschnitt 7.1.7 beschriebenen Anpassungen der Bauteile und des Spann- und Fügeprozesses mittels FE-Simulation untersucht. Dies erfolgt gemäß Abschnitt 7.1.2 ohne Umformhistorie. Hierzu werden die Bauteile, ausgehend von ihrer CAD-Sollgeometrie, an ihre Toleranzgrenzen konstruiert. Dabei wird jeweils die Toleranzgrenze gewählt, die zu einem maximalen Spalt zwischen den Einzelteilen führt. Die nichtmaßhaltig konstruierten Bauteile sind in Bild 69 mit ihren in z-Richtung verschobenen Flanschen dargestellt. Die beiden unteren Längsträgerflansche, über die der Zusammenbau in der Vorrichtung aufgenommen wird und gegen welche die oberen Längsträgerflansche toleriert sind, werden dabei mit ihrer CAD-Sollgeometrie modelliert.

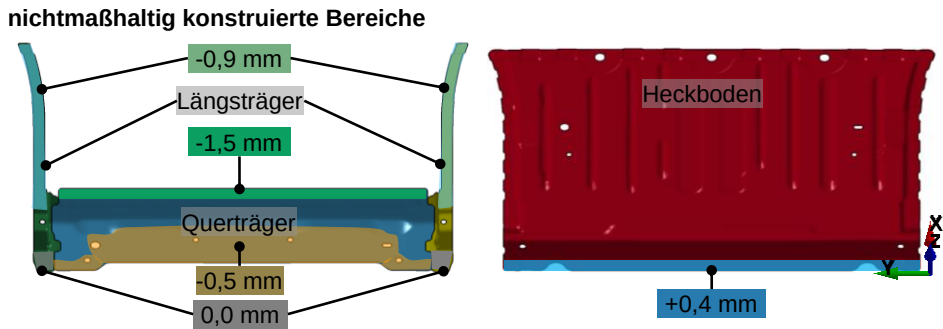


Bild 69: An die Toleranzgrenzen in z-Richtung konstruierte Bauteile des Heckwagens

Zwischen den beiden Längsträgerflanschen und den seitlichen Flanschen des Heckbodens beträgt der maximal tolerierte Spalt $0,9 \text{ mm}$. Dieser Spalt wird über die beiden Längsträgerflansche realisiert. Zwischen dem oberen Querträgerflansch und dem Heckboden beträgt der maximal tolerierte Spalt $1,5 \text{ mm}$ und wird über den oberen Querträgerflansch realisiert. Zwischen dem unteren Längsträgerflansch (der auf Grund seiner Tolerierung gegenüber dem oberen Längsträgerflansch mit seinem Sollmaß modelliert wird) und dem unteren Heckbodenflansch beträgt der maximal tolerierte Spalt $0,4 \text{ mm}$ und wird über den unteren Flansch des Heckbodens realisiert. Zwischen dem unteren Querträgerflansch und dem unteren Heckbodenflansch beträgt der maximal tolerierte Spalt $0,9 \text{ mm}$ und wird über beide Bauteilflansche (Querträgerflansch $-0,5 \text{ mm}$ und Heckbodenflansch $+0,4 \text{ mm}$ in z-Richtung) realisiert, da der untere Flansch des Heckbodens auch mit den beiden unteren Flanschen der Längsträger gefügt wird.

Die Berechnung der resultierenden Fügespalte wird mit dem in Abschnitt 6.1.2 vorgestellten kraftgesteuerten Simulationsmodell mit der für den modifizierten Prozess vorgegebenen Spannkraft von 500 N durchgeführt. Dabei wird an keiner Schweißnaht das Maß des maximal zulässigen Fügespalts von $0,50 \text{ mm}$ überschritten. Allerdings treten bei den hier untersuchten Bauteilen auf jeder Bahn Fügespalte auf, die über dem angestrebten Maß von $0,10 \text{ mm}$ liegen. Die modellierten, in der Vorrichtung eingespannten Bauteile sind mit ihren Schweißnähten und den verwendeten Bahnen in der Mitte von Bild 70a dargestellt. Die Bahnen werden in aufsteigender Reihenfolge gespannt und gefügt. Die Verläufe der berechneten Fügespalte sind, nach Bahnen aufgeteilt, neben und unterhalb des Zusammenbaus angeordnet.

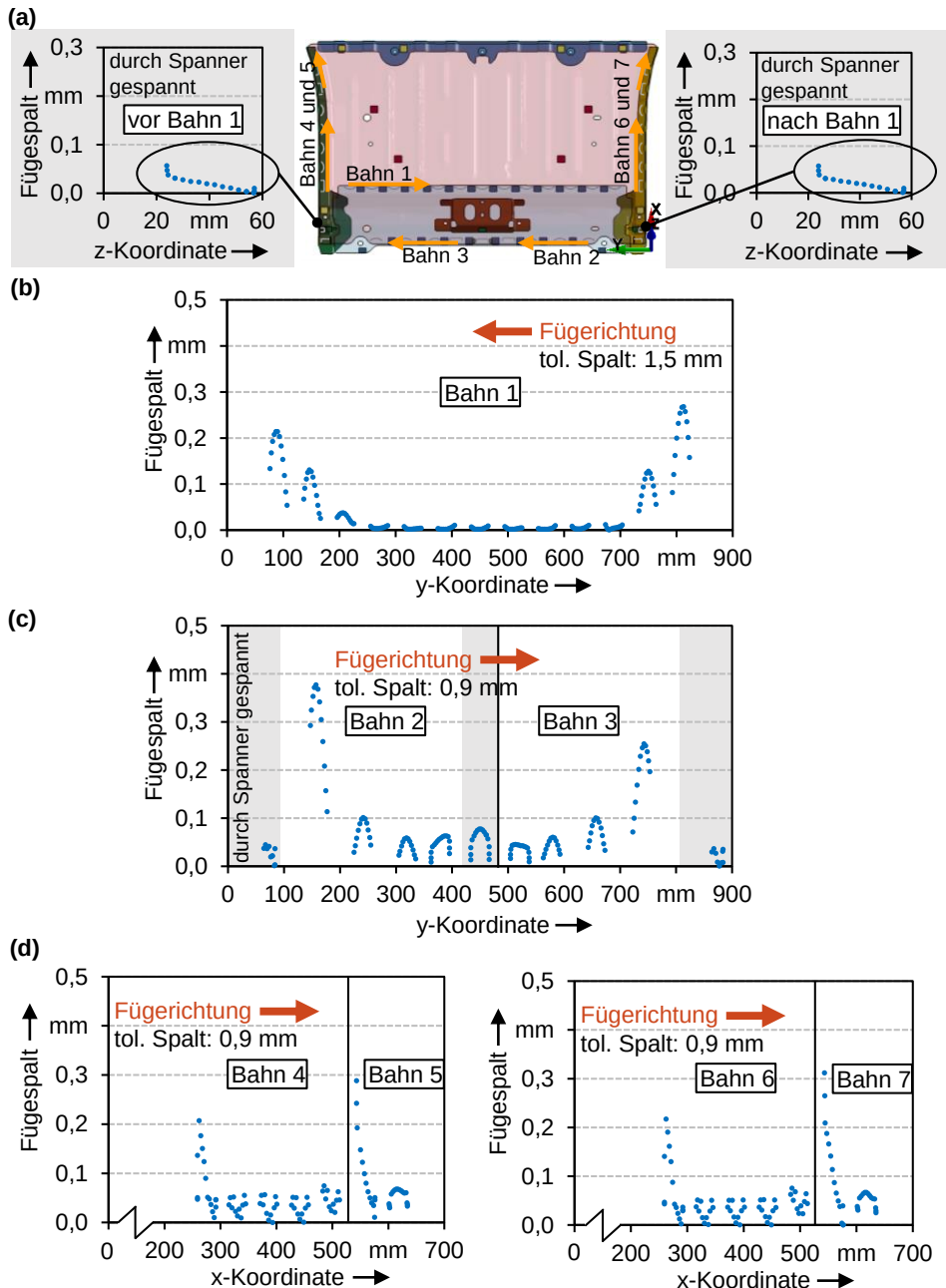


Bild 70: In der Simulation ermittelte Fügespaltverläufe des modifizierten Heckwagens bei einer Spannkraft von 500 N: (a) Heckwagen; (b) Bahn 1; (c) Bahn 2 und 3; (d) Bahn 4 bis 7

Die in Bild 70 dargestellten Verläufe der Fügespalte zeigen ein plausibles Ergebnis, das im Folgenden erklärt wird. In Bild 70a sind links bzw. rechts vom Zusammenbau jeweils die Fügespalte einer Schweißnaht platziert. Diese beiden Schweißnähte werden von Prozessspannern gespannt und vor bzw. nach Bahn 1 gefügt. Die beiden Schweißnähte weisen mit zunehmender z-Koordinate einen verringerten Fügespalt auf. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der untere Flansch des Heckbodens um 0,4 mm in positive z-Richtung verschoben ist (siehe Bild 69 rechts) und dieser Flansch durch den Prozessspanner der letzten Schweißnaht von Bahn 3 bzw. der ersten von Bahn 2 in negative z-Richtung auf sein Sollmaß gedrückt wird. Dadurch wölbt sich die seitliche Kante des Heckbodens im unteren Bereich in negative x-Richtung.

Bild 70b zeigt Bahn 1 mit einem tolerierten Spalt zwischen den gefügten Bauteilen von 1,5 mm. Die beiden äußeren Schweißnähte weisen deutlich erhöhte Fügespalte auf, die den Zielfügespalt von 0,10 mm überschreiten. Auf Grund der eingesetzten Spannunterlagen sind die Schweißnahte im mittleren Bereich von Bahn 1 nahezu spaltfrei. Die erhöhten Fügespalte der beiden äußeren Schweißnähte werden durch das Aufliegen der seitlichen Flansche des Heckbodens auf den Längsträgern, das zu einer Erhöhung des Biege widerstands gegenüber der Spannrolle im Bereich dieser beiden Schweißnähte führt, verursacht. Darüber hinaus werden jeweils die beiden äußeren Schweißnähte nur auf einer Seite durch eine Spannunterlage abgestützt und aus Gründen der Zugänglichkeit auch im modifizierten Fügeprozess (vergleiche Abschnitt 6.2.1) erst ab der Nahtmitte der ersten bzw. bis zur Nahtmitte der letzten Schweißnaht durch die mitlaufende Spanntechnik gespannt. Die beiden zusätzlichen Spanner über den Längsträgern (siehe Bild 68) tragen zur Reduktion der Fügespalte der beiden äußeren Schweißnähte bei.

Der in Bild 70c dargestellte Verlauf der Fügespalte von Bahn 2 und 3 zeigt für die drei mit Prozessspannern gespannten, grau unterlegten Schweißnähte nur geringe Fügespalte von unter 0,10 mm. Die durch die mitlaufende Spanntechnik gespannten Schweißnähte fügen den unteren Flansch des Heckbodens mit dem unteren Flansch des Querträgers. Der maximal tolerierte Spalt zwischen den Bauteilen in diesem Bereich beträgt 0,9 mm. Im Bereich der Bauteilmitte gibt es geringe Fügespalte von unter 0,10 mm. Die erste durch die mitlaufende Spanntechnik gespannte Schweißnaht auf Bahn 2 und die letzte auf Bahn 3 weisen dagegen Fügespalte von bis zu 0,38 mm bzw. 0,25 mm auf. Die erhöhten Fügespalte im Randbereich sind darauf zurückzuführen, dass der Heckboden zu Beginn von Bahn 2 und am

Ende von Bahn 3 gegen die Längsträger aus Aluminiumguss gespannt ist und diese über eine verhältnismäßig hohe Steifigkeit verfügen.

Bild 70d zeigt die Verläufe der Fügespalte der Bahnen 4 bis 7 auf den beiden Längsträgern. Der tolerierte Spalt zwischen den Bauteilen beträgt in diesem Bereich 0,9 mm. Es ist deutlich erkennbar, dass bei allen vier Bahnen jeweils die erste Schweißnaht deutlich erhöhte Fügespalte von über 0,10 mm aufweist. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Bauteile lediglich durch die mitlaufende Spanntechnik, außerhalb der Fügevorrichtung ohne jegliche Unterstützung durch ortsfeste Spanner, gespannt werden. Ab der zweiten Schweißnaht sind die Bauteile im jeweiligen Flanschbereich bereits durch die vorhergehende Schweißnaht gefügt, daraus resultieren für die letzten vier Bahnen ab der zweiten Schweißnaht stets Fügespalte von unter 0,10 mm.

Auch wenn mehrere Schweißnähte des Heckwagens den angestrebten maximalen Fügespalt von 0,10 mm überschreiten, wird der maximal zulässige Fügespalt von 0,50 mm von keiner Schweißnaht überschritten. Damit können die modifizierten Bauteile selbst an ihrer Toleranzgrenze durch den simulativ abgesicherten, überarbeiten Spann- und Fügeprozess in der Karosseriefertigung gefügt werden.

7.2 Handlungsempfehlung zur frühzeitigen, digitalen Auslegung von Bauteilen, Fügeprozessen und Fügevorrichtungen

Zur Steigerung der Bauteilqualität und zur Reduktion der Entwicklungszeit wird im Karosseriebau die Digitalisierung vorangetrieben. Entsprechend der Darstellung des Produktentstehungsprozesses im Automobilbau in Bild 71 beginnt die frühe digitale Phase vor der ersten Hardware Phase, in der dann die ersten realen Prototypen gefertigt werden. Auf die frühe digitale Phase folgen weitere digitale Phasen, welche die Hardware Phasen begleiten. Im darauffolgenden Serienanlauf wird die prototypische Fertigung bis zum „Start of Production“ auf eine Serienfertigung umgestellt. Abhängig von der Phase des Produktentstehungsprozesses stehen dabei unterschiedliche Daten der Bauteile, der Fügeprozesse und der Fügevorrichtungen zur Verfügung.

7.2 Handlungsempfehlung zur frühzeitigen, digitalen Auslegung von Bauteilen, Fügeprozessen und Fügevorrichtungen

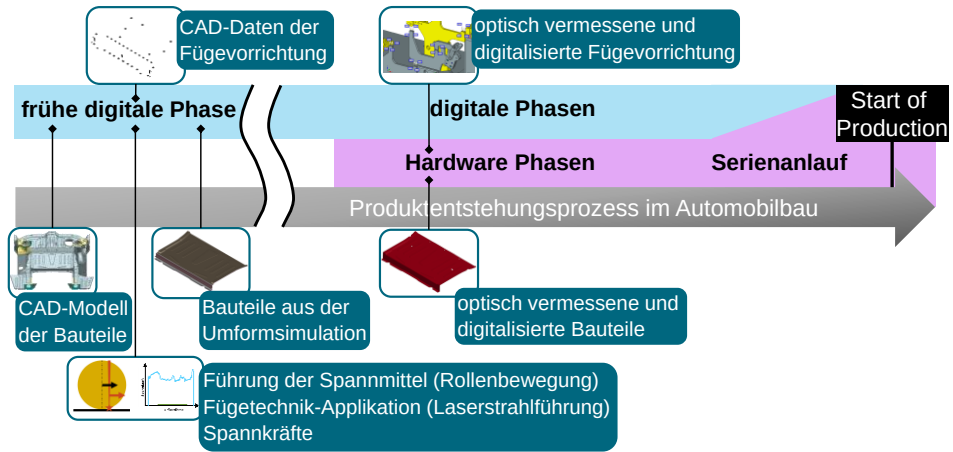


Bild 71: Datenverfügbarkeit im Produktentstehungsprozess

Auf Basis der im Rahmen dieser Arbeit erlangten Erkenntnisse wird in den folgenden Abschnitten eine Handlungsempfehlung zur digitalen Abbildung und Auslegung von Fügeprozessen im Karosseriebau am Beispiel der mitlaufenden Spanntechnik vorgestellt. Die Handlungsempfehlung ist in Bild 72 veranschaulicht.

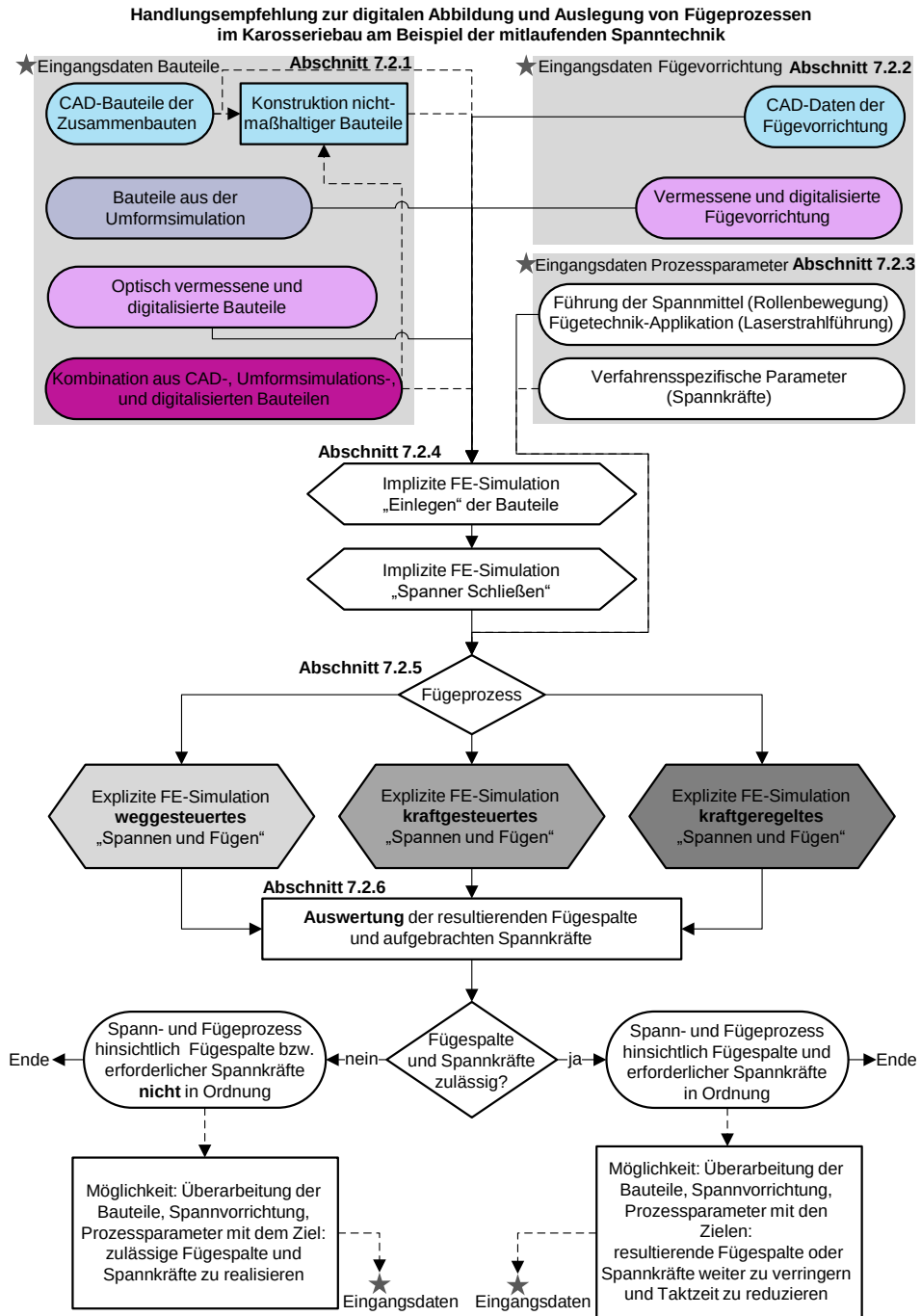


Bild 72: Ablauf im Rahmen der Handlungsempfehlung zur digitalen Abbildung und Auslegung von Fügeprozessen im Karosseriebau am Beispiel der mitlaufenden Spanntechnik

7.2.1 Eingangsdaten Bauteile

In der frühen digitalen Phase stehen mit den CAD-Modellen der Bauteile die ersten Daten zur digitalen Abbildung und Auslegung von Fügeprozessen bereit. Für die digitale Auslegung sollten die Bauteile im Rahmen ihrer Toleranzen bzw. darüber hinaus nichtmaßhaltig umkonstruiert werden (siehe Abschnitt 7.1.1). Damit können geeignete Bauteile für ein Fügeverfahren, z. B. für das Fügen mit mitlaufender Spanntechnik, ausgewählt werden. Des Weiteren können fertigungsgerechte Bauteiltoleranzen, die Geometrie der Fügevorrichtung und die Prozessparameter des Fügeprozesses ausgelegt werden. Darüber hinaus können Auswirkungen von Konstruktionsänderungen, z. B. Änderungen der Flanschgeometrie oder der Blechdicke, untersucht werden. Zur Untersuchung der Einflüsse des Fügeprozesses auf die Bauteilmaßhaltigkeit kann auch die CAD-Sollgeometrie der Bauteile verwendet werden.

Durch den Einsatz von Bauteilen aus der Umformsimulation können durch den Umformprozess bedingte Abweichungen zum Sollmaß und die Umformhistorie berücksichtigt werden (siehe Abschnitt 7.1.2). Dabei sollte neben dem Umformvorgang auch die Rückfederung der Bauteile im Rahmen der Umformsimulation berechnet werden. Mit Bauteilen aus der Umformsimulation kann die Auslegung der Vorrichtungsgeometrie und der Prozessparameter des Fügeprozesses sowie die Auswahl der für ein Fügeverfahren geeigneten Bauteile vorgenommen werden.

Ab der ersten Hardware Phase können gefertigte Einzelteile und Unterzusammenbauten optisch vermessen und ihre Geometrie in die Simulationsumgebung überführt werden (siehe Abschnitt 6.1). Dies wurde in Abschnitt 6.2 erstmalig erfolgreich für Gussbauteile gezeigt. Mit den digitalisierten Bauteilen können eine digitale Auslegung der Prozessparameter und der Vorrichtungsgeometrie mit real auftretenden Abweichungen zum Sollmaß der Bauteile durchgeführt werden. Des Weiteren kann mit einer vermessenen und digitalisierten realen Fügevorrichtung (siehe Abschnitt 6.2) der reale Fügeprozess digital abgebildet und untersucht werden. Abhängig von der Datenverfügbarkeit und den Untersuchungszielen können die Bauteile eines Zusammenbaus auch durch eine Kombination aus CAD-Daten, Ergebnissen der Umformsimulation und optisch vermessenen Bauteilen in der FE-Simulation gefügt werden.

7.2.2 Eingangsdaten Fügevorrichtung

Die Kontaktflächen zwischen der Fügevorrichtung und den Bauteilen liegen in Form von CAD-Daten bereits in der frühen digitalen Phase vor. Damit lassen sich fertigungsgerechte Bauteiltoleranzen und die Prozessparameter des Fügeprozesses digital auslegen (siehe Abschnitt 7.1). Hierbei kann auch die Vorrichtungsgometrie in Abhängigkeit der Bauteiltoleranzen und der Prozessparameter angepasst werden. Darüber hinaus können Auswirkungen von Konstruktionsänderungen der Bauteile, gegebenenfalls mit einer Anpassung der Vorrichtungsgometrie, untersucht werden.

Im Rahmen der Hardware Phasen werden, zum Teil mit manueller Bauteilvorbereitung (z. B. Biegen von Flanschen), die realen Bauteile in den Fügevorrichtungen gefügt. Die Geometrie der dabei eingesetzten Fügevorrichtung kann durch ein optisches bzw. taktilen Messsystem erfasst und in die FE-Simulation übertragen werden. Dies wurde für eine Fügevorrichtung realer Karosserieteile erstmalig in dieser Arbeit erfolgreich durchgeführt (siehe Abschnitt 6.2). Damit können digital die Prozessparameter des Fügeprozesses ausgelegt und die Geometrie der Fügevorrichtung weiterentwickelt werden. Darüber hinaus kann in Kombination mit optisch vermessenen, realen Bauteilen, der reale Fügeprozess digital abgebildet und hinsichtlich der Qualität der Fügstellen, erforderlicher Prozessparameter und resultierender Maßhaltigkeit untersucht werden.

7.2.3 Eingangsdaten Prozessparameter

In der frühen digitalen Phase werden neben der Geometrie der Fügevorrichtung auch die Prozessparameter für den entsprechenden Fügeprozess definiert. Bei den Prozessparametern handelt es sich um die Führung der Spannmittel (z. B. die Bahn der Spannrolle), die Fügetechnik-Applikation (z. B. die Führung des Laserstrahls) und weitere verfahrensspezifische Parameter (z. B. die Spannkraft). Die Prozessparameter werden bisher auf Basis von Erfahrungswerten festgelegt und im Rahmen der Hardwarephasen mittels Trial-and-Error-Methode überarbeitet. Durch die Anwendung dieser Handlungsempfehlung können die Prozessparameter bereits frühzeitig digital, zusammen mit Anpassungen an den Bauteilen und an der Fügevorrichtung, wie in Abschnitt 7.1 gezeigt, ausgelegt werden. Des Weiteren können im Versuch erfasste Prozessparameter in die Simulation übertragen und digital untersucht werden (siehe Abschnitt 6.2). Somit lassen sich, durch frühzeitig mittels FE-Simulation optimierte Prozessparameter, die Qualität der Fügstellen und die Maßhaltigkeit der gefügten Bauteile verbessern.

7.2.4 Einlegen und Spanner Schließen

Zur effizienten Berechnung des Einlegevorgangs unter Schwerkraft von nichtmaßhaltigen Karosserieteilen sind robuste Simulationsmodelle erforderlich. Hierfür wird das in Abschnitt 6.1 beschriebene Simulationsmodell mit impliziter Zeitintegration empfohlen. Neben den konturfolgend vernetzten Bauteilen und Bauteilauflagen der Fügevorrichtung sollten hierbei auch die Führungsstifte der Fügevorrichtung in Form von Randbedingungen an den entsprechenden Löchern der Bauteile berücksichtigt werden.

Das Schließen der Spanner sollte ebenfalls mit impliziter Zeitintegration berechnet werden (siehe Abschnitt 6.1), um eine exakte Positionierung der Bauteile in der Fügevorrichtung sicherzustellen. Dabei gilt es die Reihenfolge zu berücksichtigen, in der die Spanner geschlossen werden.

7.2.5 Fügeprozess

Das bis hierher empfohlene Vorgehen ist nicht auf den Einsatz der mitlaufenden Spanntechnik begrenzt und lässt sich auf Simulationsprozessketten zur Auslegung und Untersuchung weiterer Fügeverfahren im Karosseriebau, bei denen Fügevorrichtungen zum Einsatz kommen, übertragen (siehe Abschnitt 7.2.7). Dabei kann der Fokus der Untersuchung und Auslegung sowohl auf die Maßhaltigkeit der gefügten Bauteile als auch auf die Qualität der Fügestellen gerichtet werden. Im Folgenden wird die verfahrensspezifische Vorgehensweise für den Fügeprozess und dessen Auswertung für das Beispiel-Fügeverfahren Remote-Laserstrahlschweißen mit mitlaufender Spanntechnik vorgestellt.

Die Modellierung des auf das „Einlegen“ und „Spanner Schließen“ folgenden Fügeprozesses sollte auf die Untersuchungsziele angepasst werden. Für den dynamischen und daher mit expliziter Zeitintegration berechneten Spann- und Fügeprozess des Remote-Laserstrahlschweißens mit mitlaufender Spanntechnik, werden der Kontaktbereich der Spannrolle als Starrkörper und die Schweißnähte durch Balkenelemente modelliert. Somit kann die Spannrolle wahlweise auf einer vollständig definierten Bahn (weggesteuert) oder mit einem definierbaren Spannkraftverlauf (kraftgesteuert) über die Bauteile geführt werden. Die resultierenden Fügespalte lassen sich über die Länge der angebundenen Balkenelemente ermitteln. Zur Reduktion der Berechnungszeit empfiehlt es sich, die Kontaktdefinitionen der Balkenelemente bereits gefügter Bahnen zusammenfassen. Für die Berechnung stehen drei Modelle mit zunehmendem Modellierungsaufwand zur Verfügung, die in Bild 72 entsprechend zunehmend dunkler unterlegt sind.

Das weggesteuerte Modell (siehe Abschnitt 6.1.1) ermöglicht eine schnelle und grobe Abschätzung erforderlicher Spannkkräfte. Die Spannrolle wird dabei auf einer definierten Bahn, z. B. auf der Bauteiloberfläche der CAD-Sollgeometrie oder mit einem definierten Abstand zu dieser geführt. Eine Vorgabe der Spannkraft ist dabei nicht möglich. Der Einsatz des weggesteuerten Modells empfiehlt sich, wenn ein Zusammenbau gefügt werden soll, für den noch keine Erfahrungswerte (z.B. durch ein ähnlich gespanntes Vorgängerbauteil) vorliegen. Zur präzisen Auslegung erforderlicher Spannkkräfte wird eine darauffolgende kraftgesteuerte bzw. kraftgeregelte Simulation empfohlen.

Ein realer Spannkraftverlauf kann durch das kraftgesteuerte Modell (siehe Abschnitt 6.1.2) abgebildet werden. Damit lässt sich der reale Spann- und Fügeprozess digital untersuchen. Der Spannkraftverlauf kann des Weiteren frei definiert werden. Mit dem kraftgesteuerten Modell können für das Fügen mit mitlaufender Spanntechnik geeignete Bauteile ausgewählt und deren Geometrie und Toleranzen fertigungsgerecht ausgelegt werden. Ferner können mit diesem Modell die Geometrie der Fügevorrichtung, die Bahn der Spannrolle, und erforderliche Spannkkräfte digital ausgelegt werden.

Die Ermittlung erforderlicher Spannkkräfte für definierte Zielfügespalte ist mit dem kraftgesteuerten Modell nur iterativ möglich. Durch den Einsatz des kraftgeregelten Modells kann ein, zum Erreichen gewünschter Fügespalte, optimierter Spannkraftverlauf durch nur eine Simulation bestimmt werden (siehe Abschnitt 6.3). Der mit diesem Modell ermittelte Spannkraftverlauf muss zum gegenwärtigen Zeitpunkt für den realen Spann- und Fügeprozess auf einen Spannkraftwert je Bahn reduziert werden. Die reale Fügestation der mitlaufenden Spanntechnik sollte dahingehend erweitert werden, dass mit einem vorgegebenen Spannkraftverlauf gespannt werden kann, um den simulativ optimierten Spannkraftverlauf im realen Spann- und Fügeprozess einsetzen zu können (siehe Abschnitt 7.1.5).

7.2.6 Auswertung

Im Rahmen der Auswertung können die aufgebrachten Spannkkräfte durch die Kontaktkräfte zwischen der modellierten Spannrolle und den Bauteilen ermittelt werden. Die resultierenden Fügespalte lassen sich über die Länge der an den Bauteilen angebundenen Balkenelemente bestimmen. Zur Steigerung des Prozessverständnisses empfiehlt sich eine ganzheitliche Analyse der Zusammenhänge zwischen den aufgebrachten Spannkkräften, der Bahn der Spannrolle, den resultierenden Fügespalten, den Abweichungen

der Bauteile zum Sollmaß und der Geometrie der Fügevorrichtung (siehe Abschnitt 7.1).

Sind die aufgebrachten Spannkkräfte und resultierenden Fügespalte im zulässigen Bereich, so kann der Spann- und Fügeprozess im Hinblick auf Spannkkräfte und Fügespalte realisiert werden. Ist diese Bedingung nicht erfüllt, so können die im Rahmen dieser Arbeit identifizierten Maßnahmen zur Anpassung der Prozessparameter, Spannvorrichtung und Bauteile, zum Erreichen des zulässigen Bereichs umgesetzt werden. Hierzu können die Spannkkräfte angepasst, die Rollenbahn verlängert und gegebenenfalls auf der gegenüberliegenden Seite der Schweißnähte positioniert werden. Des Weiteren kann die Geometrie der Fügevorrichtung um weitere Spannunterlagen und Spanner erweitert bzw. können bestehende Spannunterlagen und Spanner neu positioniert und vergrößert werden. Die Abstände zwischen den Schweißnähten können verringert und eine möglichst zur Rollenbahn parallele Nahtgeometrie verwendet werden. Darüber hinaus kann die Bauteilgeometrie durch Verringern der Blechdicke, Verlängern der Fügeflansche, Hinzufügen von Stufen und Verringern der Bauteiltoleranzen angepasst werden. Daraufhin kann die Simulationsprozesskette erneut durchlaufen werden. Befinden sich die Spannkkräfte und resultierenden Fügespalte im zulässigen Rahmen, so können bei Bedarf weitere Kombinationen zur Steigerung der Qualität der Fügestellen und zur Reduktion von Taktzeit untersucht werden.

7.2.7 Übertragbarkeit auf weitere Fügeverfahren

Die in Abschnitt 7.2 vorgestellte Handlungsempfehlung lässt sich bis einschließlich zum Prozessschritt „Spanner Schließen“ auf Simulationsprozessketten zur Auslegung und Untersuchung weiterer Fügeverfahren im Karosseriebau, bei denen Fügevorrichtungen zum Einsatz kommen, übertragen. Hierbei handelt es sich um die punktförmigen Fügeverfahren Clinchen, Stanznieten, Widerstandspunktschweißen, Buckelschweißen, Hochgeschwindigkeits-Bolzensetzen und um die linienförmigen Fügeverfahren Rollfalzen, Laserstrahlschweißen mit und ohne Zusatzwerkstoff, Laserlöten, Metall-Inertgas- und Metall-Aktivgasschweißen.

Die im Rahmen der oben genannten Fügeverfahren gefügten Bauteile liegen ab der frühen digitalen Phase (siehe Bild 71) in Form von CAD-Daten vor und können im Rahmen ihrer Toleranzen bzw. darüber hinaus nichtmaßhaltig umkonstruiert werden (siehe Abschnitt 7.1.1). Umformtechnisch hergestellte Einzelteile werden durch Umformsimulation bezüglich ihrer

Herstellbarkeit und resultierenden Maßhaltigkeit abgesichert. Die Ergebnisse aus der Umformsimulation können als Eingangsdaten der Bauteile in der Fügесimulation verwendet werden (siehe Abschnitt 7.1.2.). Des Weiteren können ab der ersten Hardware Phase gefertigte Bauteile optisch vermessen und in die Fügесimulation übertragen werden (siehe Abschnitt 6.1).

Die Kontaktflächen der Fügevorrichtungen mit den Bauteilen werden in der frühen digitalen Phase auf Basis der Bauteilgeometrie in Form von CAD-Daten erzeugt. Diese Kontaktflächen können zur Modellierung der Fügevorrichtungen in die Fügесimulation übertragen werden (siehe Abschnitt 7.1.1). In den Hardware Phasen werden reale Fügevorrichtungen eingesetzt, deren Geometrie durch optische oder taktile Messung erfasst und in die Fügесimulation übertragen werden kann (siehe Abschnitt 6.2).

Die Prozessparameter der Fügeprozesse werden ab der frühen digitalen Phase definiert. Dabei handelt es sich um die Führung der in der Fügevorrichtung eingesetzten Spanner, die Applikation der Fügetechnik und weitere verfahrensspezifische Parameter. Bei den Parametern für die Applikation der Fügetechnik handelt es sich beispielsweise um die Führung der Clinch-, Niet- bzw. Schweißzange, des Setzkopfs, der Falzrolle, des Brennerkopfs, des Laserschweißkopfs bzw. der Fokussieroptik und des von der Fokussieroptik geführten Laserstrahls sowie um die Drahtgeschwindigkeit beim Löten bzw. Schweißen mit Zusatzwerkstoff. Bei weiteren verfahrensspezifischen Parametern handelt es sich beispielsweise beim Rollfalzen um durch Vakuumsauger fixierte Bauteilbereiche und die Führung von Füllschiebern. Die Prozessparameter können, auf Basis ihrer in den digitalen Phasen definierten Werte (siehe Abschnitt 7.1.1) oder auf Basis von in den Hardware Phasen erfassten Werten (siehe Abschnitt 6.2), in der Fügесimulation abgebildet werden.

Das Einlegen der Bauteile in die modellierten Fügevorrichtungen erfolgt mit einer in den digitalen Phasen definierten Reihenfolge, hierbei können mögliche Anpassungen aus den Hardware Phasen berücksichtigt werden. Bei der Modellierung der Fügevorrichtungen werden neben den Kontaktflächen der Spanner auch die Führung der Bauteile durch Führungsstifte berücksichtigt (siehe Abschnitt 6.1). Beim Prozessschritt „Spanner Schließen“ gilt es, die Reihenfolge entsprechend der Definition im Rahmen der digitalen Phasen bzw. der Hardware Phasen zu berücksichtigen.

Die Prozessschritte des Fügens und der Auswertung sind verfahrensspezifisch und können nicht direkt aus dem in dieser Handlungsempfehlung aufgezeigten Vorgehen auf weitere Fügeverfahren mit Fügevorrichtung übertragen werden. Dabei gilt es, während des Prozessschritts „Fügen“ die

Prozessparameter (siehe oben) zu berücksichtigen. Fügeworkzeuge, die an den Fügstellen in Kontakt mit den Bauteilen kommen, können entsprechend der Fügevorrichtung durch Starrkörper modelliert werden. Dabei handelt es sich um die Clinch-, Niet- bzw. Schweißzange, den Setzkopf und die Falzrolle. Bei thermischen Fügeverfahren kann die zum Fügen eingebrachte Wärme in Form einer Wärmequelle modelliert werden. Beim Löten und Schweißen mit Zusatzwerkstoff sollte im Rahmen der Modellierung der Nahtgeometrie, die in Form von Volumenelementen erfolgen kann, neben dem Drahtdurchmesser des Zusatzwerkstoffs auch die Geschwindigkeit bei der Drahtzuführung in Relation zur Geschwindigkeit des Schweißkopfs berücksichtigt werden. Im Rahmen der Auswertung der Simulationsergebnisse kann der Fokus sowohl auf die Maßhaltigkeit der gefügten Bauteile als auch auf die Qualität der Fügstellen gerichtet werden.

7.3 Hinweise für den Einsatz der mitlaufenden Spanntechnik

Beim Einsatz der mitlaufenden Spanntechnik gilt es, geringe resultierende Fügespalte sicherzustellen, um eine hohe Qualität der Schweißnähte zu erreichen. Hierzu sollte der Abstand zwischen der Spannrolle und der aktuell geschweißten Stelle der Schweißnaht möglichst gering gehalten werden.

Durch das Erhöhen der aufgebrauchten Spannkraft lassen sich die resultierenden Fügespalte reduzieren. Dabei gilt es zu berücksichtigen, dass mit zunehmender Spannkraft eine tiefer werdende Rille von der Spannrolle auf den Bauteilen hinterlassen wird. In den Untersuchungen dieser Arbeit weist die Rille bei einer Spannkraft von 500 N eine Tiefe von 0,05 mm bei AA5182 und von 0,03 mm bei CR340LA auf. Der Einsatz nahtspezifischer Spannunterlagen zum Abstützen der Bauteile unterhalb der Spannrolle empfiehlt sich beim Fügen von Bauteilen mit von der Spannrolle weg gerichteten Abweichungen zum Sollmaß eines nachgiebigen, unteren Bauteils. Mit Hilfe von nahtspezifischen Spannunterlagen können die resultierenden Fügespalte erheblich verringert werden. Zur Vermeidung hoher Fügespalte in nicht gespannten Bereichen, sollten die Bauteile stets entlang der gesamten Nahtlänge der einzelnen Schweißnähte durch die Spannrolle gespannt werden. Ist dies aus Gründen der Zugänglichkeit nicht möglich, sollten zusätzliche Spanner im entsprechenden Bereich in der Fügevorrichtung angebracht werden. Beim Einsatz nahtspezifischer Spannunterlagen führen zur Spannrolle hin gerichtete Abweichungen zum Sollmaß eines nachgiebigen unteren Bauteils zu höheren Fügespalten als Abweichungen in die entgegengesetzte Richtung. Das Biegen eines Bauteils um den Radius

eines anderen Bauteils, infolge des Spannvorgangs der mitlaufenden Spanntechnik, führt zu erhöhten Fügespalten. Durch das Festlegen zusätzlicher Stufen in der Bauteilgeometrie, im Rahmen der Bauteilkonstruktion, kann dieses Biegen um einen Bauteilradius vermieden werden.

Werden im Umformprozess gebogene Flanschbereiche während des Spann- und Fügeprozesses in die entgegengesetzte Richtung der vorangegangenen Umformung gespannt, so liegt eine Wechselbiegebelastung vor. Bei der simulativen Auslegung des Spann- und Fügeprozesses dieser Bauteile empfiehlt sich die Berücksichtigung der Umformhistorie bei Werkstoffen, die einen ausgeprägten Bauschinger-Effekt aufweisen. Voraussetzung hierfür sind präzise Simulationsergebnisse des vorangegangenen Umformprozesses und die durchgängige Berücksichtigung des Bauschinger-Effekts im verwendeten Materialmodell. Der in dieser Arbeit untersuchte Stahlwerkstoff mit einem Bauschinger-Koeffizienten von 0,41 wies bei der Berücksichtigung der Umformhistorie in der Konfiguration ohne Spannunterlage um 27,6 % verringerte, zum Spaltschluss erforderliche Spannkkräfte bzw. um 26,5 % verringerte resultierende Fügespalte aus. Der untersuchte Aluminiumwerkstoff mit einem Bauschinger-Koeffizienten von 0,59 zeigte dagegen einen vernachlässigbaren Einfluss der Umformhistorie, der für die entsprechenden Konfigurationen die erforderlichen Spannkkräfte um 1,3 % bzw. die resultierenden Fügepalte um 0,3 % verringerte.

Ferner wirkt sich die Blechdicke stark auf die zum Spaltschluss erforderlichen Spannkkräfte aus. Daher sollte bei der fertigungsgerechten Tolerierung der Bauteile besonderes Augenmerk auf Bauteile mit hoher Blechdicke gerichtet werden und bei einer Erhöhung der Blechdicke eine erneute digitale Absicherung durchgeführt werden.

Um einen im Rahmen der digitalen Prozessauslegung mittels kraft geregelter FE-Simulation ermittelten Spannkraftverlauf im realen Spann- und Fügeprozess umsetzen zu können, bedarf es einer Weiterentwicklung der mitlaufenden Spanntechnik. Hierzu sollte die Spannkraft des Pneumatikzylinders mit Hilfe des Signals einer zwischen dem Pneumatikzylinder und der Spannrolle integrierten Kraftmessdose, zur Realisierung eines vorgegebenen Spannkraftverlaufs geregelt werden. Damit könnte anstelle der bisherigen, für jede Bahn konstanten Spannkraftvorgabe, ein im Rahmen der digitalen Auslegung an die Nachgiebigkeit der Bauteile angepasster, Spannkraftverlauf realisiert werden.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Durch eine stetige Zunahme der Baureihen und Fahrzeugvarianten, gepaart mit der Verkürzung der Entwicklungszeiten, gewinnen Digitalisierung und Flexibilisierung in der Automobilindustrie vermehrt an Bedeutung. Der Einsatz digitaler Methoden zur Fertigungsprozess- und Bauteilauslegung ermöglicht, neben der Steigerung der Bauteilqualität, die Verkürzung der Entwicklungszeiten durch frühzeitiges Identifizieren erforderlicher Änderungen an den Fertigungsprozessen und Bauteilen. Durch eine digitale Auslegung der Fertigungsprozesse und Bauteile in der frühen Phase der Produktentwicklung kann der Umfang der Absicherungen mit Prototypen reduziert bzw. kann auf diese verzichtet werden.

In der Karosseriefertigung bedarf es flexibler Fügestationen, insbesondere zur Integration elektrisch angetriebener Fahrzeuge, mit schwer kalkulierbaren Stückzahlen, in die Fertigungslinien konventionell angetriebener Fahrzeuge. Die mitlaufende Spanntechnik ermöglicht es, flexibel mit einer am Schweißroboter angebrachten und pneumatisch betätigten Spannrolle, Bauteile beim im Karosseriebau eingesetzten Remote-Laserstrahlschweißen, zu spannen. Bisher waren die Erfahrungswerte für die neue Technologie der mitlaufenden Spanntechnik begrenzt und Fügeversuche zur Auslegung des Prozesses aufwendig. Für den Einsatz dieser Technologie gilt es jedoch, die Fügespalte im Nahtbereich gering (unter 0,5 mm) zu halten und möglichst geringe Spannkkräfte sowie kurze Entwicklungszeiten zu realisieren. Dabei stellte die Modellierung einer Spannrolle in der FE-Simulation von Laserstrahlschweißprozessen bisher in der digitalen Fertigungsprozesskette im Karosseriebau ein offenes Feld dar.

Das Ziel dieser Arbeit war die experimentelle und digitale Untersuchung des Spann- und Fügeprozesses beim robotergeführten Remote-Laserstrahlschweißen mit mitlaufender Spanntechnik zur Erarbeitung von prozess- und bauteilseitigen Maßnahmen zur Reduktion resultierender Fügespalte und erforderlicher Spannkkräfte. Weitere Ziele waren der Aufbau von Prozessverständnis für den Einsatz der mitlaufenden Spanntechnik, das Ermitteln eines Prozessfensters und die Generierung einer Handlungsempfehlung zur frühzeitigen, digitalen Auslegung von Fügeprozessen im Karosseriebau am Beispiel der mitlaufenden Spanntechnik.

Zum Aufbau und zur Validierung von Simulationsmodellen wurde eine Vorgehensweise erarbeitet, die sich auf die Simulationsentwicklung weiterer Fügeprozesse im Karosseriebau übertragen lässt. Im Rahmen dieser

Vorgehensweise wurde zunächst ein Versuch zur Charakterisierung erforderlicher Spannkkräfte mit Prinzipbauteilen erarbeitet. Die eingesetzten Prinzipbauteile, sogenannte L-Proben, verfügen über einen gängigen, nichtmaßhaltigen Fügeflansch. Bei den gewählten und charakterisierten Werkstoffen AA5182 und CR340LA handelt es sich um häufig für Strukturbauteile im Karosseriebau eingesetzte Werkstoffe, da das Einsatzgebiet der mitlaufenden Spanntechnik derzeit auf Strukturteile begrenzt ist. Durch die Spannversuche wurden die für einen Spaltschluss unterhalb der Spannrolle der mitlaufenden Spanntechnik erforderlichen Spannkkräfte ermittelt. Des Weiteren wurde die unerwünschte, von der Spannrolle auf den Bauteilen eingeprägte Rille, deren Tiefe von der Höhe der Spannkraft und dem eingesetzten Bauteilwerkstoff abhängt, untersucht. Die Tiefe der Rille begrenzt abhängig vom Werkstoff, Bauteil und dessen Lastfällen die maximal zulässige Spannkraft.

Das erarbeitete Simulationsmodell modelliert erstmalig in der FE-Simulation den flexiblen Spannvorgang von Bauteilen mit einer Spannrolle. Die durchgeführten Spannversuche mit Prinzipbauteilen bildeten dabei die Basis für die erfolgreiche Validierung des neuen Simulationsmodells und dienten darüber hinaus dem Aufbau von Prozessverständnis. Da die Prinzipbauteile in die entgegengesetzte Richtung der vorangegangenen Umformung gespannt wurden, lag eine Wechselbiegebelastung vor. Dabei zeigte sich für den Werkstoff CR340LA, der in den Werkstoff-Charakterisierungsversuchen einen ausgeprägten Bauschinger-Effekt aufwies, ein starker Einfluss der Umformhistorie auf die in der Simulation zum Spaltschluss unterhalb der Spannrolle erforderlichen Spannkkräfte. Die Berücksichtigung der Umformhistorie führte zu einer Verringerung der berechneten erforderlichen Spannkkräfte. Bei AA5182 waren der Bauschinger-Effekt und der Einfluss der Umformhistorie deutlich geringer ausgeprägt. Zur Steigerung des Prozessverständnisses wurden mittels FE-Simulation unter Einsatz von Methoden des Design of Experiments die Einflüsse von Werkstoffparametern, geometrischen Einflussfaktoren und der Umformhistorie auf die erforderlichen Spannkkräfte untersucht. Dabei zeigte die Blechdicke, die sich stark auf den Biege widerstand auswirkt, den mit Abstand größten Einfluss auf erforderliche Spannkkräfte. Während sich Schwankungen des E-Moduls und der Festigkeit nur geringfügig auf die erforderlichen Spannkkräfte auswirkten, konnte ein Zusammenhang zwischen dem Einfluss der Umformhistorie und der Intensität des Bauschinger-Effekts auf erforderliche Spannkkräfte aufgezeigt werden. Die Ursachen für diesen Effekt, die Auswirkung der Spannungen und Dehnungen sowie des Bauschinger-Effekts

auf die Bauteilnachgiebigkeit, konnten anhand des Spannungsverlaufs im Radiusbereich der Bauteile erklärt werden.

Eine weitere Ausbaustufe des Simulationsmodells ermöglicht es, neben dem Spannen unter Einsatz der mitlaufenden Spanntechnik auch das Fügen durch Remote-Laserstrahlschweißen abzubilden. Bei diesem Simulationsmodell wird das Anbinden der Schweißnähte durch Balkenelemente in Verbindung mit Spotweld-Kontakten modelliert. Im Rahmen dieser Arbeit wurden die Lasernoppen zur Zinkentgasung beim Laserstrahlschweißen in Form von Volumenelementen erstmalig in der FE-Simulation berücksichtigt. Simulative Untersuchungen zeigten, dass sich die Höhe der Lasernoppen maßgeblich auf die resultierenden Fügespalte auswirkt. Auch eine Geschwindigkeitsdifferenz zwischen Laserstrahl und Spannrolle wirkt sich auf resultierende Fügespalte aus. Zum Erzielen geringer Fügespalte sollten die Bauteile durch die Spannrolle stets möglichst nah an der aktuell geschweißten Stelle der Schweißnaht gespannt werden.

Zur Berechnung nichtmaßhaltiger Karosserieteile erfolgte der Übertrag und der Ausbau des mechanischen Simulationsmodells für das Spannen und Fügen der Prinzipbauteile. Für Karosserieteile werden die Bahnen der Spannrolle unabhängig von den Koordinatenachsen auf Basis der CAD-Geometrie der Schweißnähte definiert. Durch eine Berechnung mit einer weggesteuerten Spannrolle lassen sich erforderliche Spannkkräfte und die Nachgiebigkeit der Bauteile abschätzen. Die nächste Ausbaustufe des Simulationsmodells für Karosserieteile ermöglicht die Berechnung mit einer kraftgesteuerten Spannrolle. Damit kann ein aufgezeichneter realer bzw. ein frei definierter Spannkraftverlauf modelliert werden. Das kraftgesteuerte Simulationsmodell kann, unabhängig von der Bauteilgeometrie, auf Blech- und Gussbauteile angewendet werden und wurde experimentell mit einem, aus Blech- und Gussbauteilen bestehenden, Heckwagen validiert. Dabei wurde erstmalig für eine Fügesimulation die Geometrie realer Karosserieteile aus einem Gusswerkstoff optisch erfasst und erfolgreich in die FE-Simulation übertragen. Die höchste Ausbaustufe des Simulationsmodells erlaubt die Vorgabe von Zielfügespalten, um erstmalig in der FE-Simulation sensorbasiert Spannkkräfte während der Simulation anzupassen. Damit lässt sich mit einer einzelnen kraftgeregelten Simulation ein zum Erreichen der vorgegebenen Zielfügespalte optimierter Spannkraftverlauf berechnen.

Durch die digitale Untersuchung und Auslegung des Spann- und Fügeprozesses eines Heckwagens wurden die prozesssichere Fertigung mit der mitlaufenden Spanntechnik dieses komplexen Zusammenbaus ermöglicht und die Potentiale der erarbeiteten Simulationsmodelle aufgezeigt. Darüber

hinaus wurde, durch die Kombination von Versuchen und kraftgeregelten Simulationen mit den Qualitätskriterien des Fügespalts zwischen den Bauteilen und der Tiefe, der von der Spannrolle verursachten Rille auf den Bauteilen, ein Prozessfenster für erforderliche Spannkraft, zulässige Blechdicken und zulässige Bauteiltoleranzen ermittelt. Auf Basis der aus den Untersuchungen abgeleiteten Maßnahmen erfolgte eine Anpassung der Geometrie der Bauteile und der Fügevorrichtung des Heckwagens. Eine signifikante Reduktion resultierender Fügespalte lässt sich demnach durch eine Erhöhung der Spannkraft sowie zusätzlich bzw. alternativ durch eine Reduktion der Blechdicke, eine Verringerung der Bauteiltoleranzen und durch den Einsatz von Spannunterlagen erzielen.

Abschließend kann festgestellt werden, dass mit Hilfe der Versuche und Simulationsmodelle ein gesteigertes Prozessverständnis des neuen Spann- und Fügeprozesses mit mitlaufender Spanntechnik aufgebaut wurde. Des Weiteren wurde simulativ ein Prozessfenster für erforderliche Spannkraft zur Prozessauslegung bestimmt und der reale Fügeprozess digital ausgelegt und abgesichert. Mit den erarbeiteten und validierten Simulationsmodellen können der flexible Prozess des robotergeführten Remote-Laserstrahlschweißens unter Einsatz der mitlaufenden Spanntechnik sowie die zu fügenden Bauteile und die eingesetzten Fügevorrichtungen frühzeitig digital ausgelegt werden. Die erarbeiteten Simulationsmodelle schließen in der digitalen Fertigungsprozesskette die Lücke der Abbildung flexibler Spannprozesse mit Spannrollen. Auf Basis der im Rahmen dieser Arbeit gewonnenen, übertragbaren Erkenntnisse wurde eine Handlungsempfehlung für den Einsatz von Simulationsmodellen zur frühzeitigen, digitalen, fertigungs- und produktgerechten Auslegung von Bauteilen, Fügeprozessen und Fügevorrichtungen im Karosseriebau abgeleitet. Darüber hinaus wurde eine Handlungsempfehlung speziell für den Einsatz der mitlaufenden Spanntechnik aufgezeigt.

Für die Zukunft ist eine Erweiterung der Simulationsmodelle zur Untersuchung der Auswirkungen des Schweißverzugs, der mittels Remotelaserstrahlschweißen und mitlaufender Spanntechnik gefügten Bauteile, denkbar. Damit kann die aus dem Schweißverzug resultierende geometrische Abweichung der Bauteile von ihrem Soll prognostiziert werden. Hierbei sollte der Einsatz der thermomechanisch gekoppelten Berechnung für die Untersuchung der Maßhaltigkeit der gefügten Zusammenbauten geprüft werden, da der thermisch bedingte Verzug erhebliche Auswirkungen auf die Maßhaltigkeit von Zusammenbauten haben kann.

9 Summary and outlook

Due to a growing number of carlines and derivatives, together with the reduction of the development time, in the automotive industry digitalization and flexibilization are becoming more and more important. The use of digital methods for design of production processes and of parts enables, in addition to increasing part quality, to shorten development times by early identifying required changes of production processes and parts. By a digital design of production processes and parts in the early phase of product development, the extend of experiments with prototype parts can be reduced or even avoided as such.

In the Body in White shop flexible joining stations are required, especially for the integration of electric vehicles into the lines of internal combustion engine vehicles. The running clamping technology enables flexible clamping with a pneumatically actuated clamping roll. This roll is mounted on a welding robot, which is used for remote laser welding in the Body in White shop. Yet, the experience with this new clamping technology was limited and experiments for the design of this process are complex. For the use of this technology, resultant joint gaps have to be small (less than 5 mm) and low clamping forces should be realized as well as short development-times. Thereby, modeling of a clamping roll of laser welding processes in the FE-simulation was an open field yet in the digital production process chain in the Body in White shop.

The objective of this work was the experimental and digital investigation of the clamping and joining process by remote laser welding, with the use of a welding robot and running clamping technology in order to develop process- and part-related solutions for reducing the resultant joint gaps and the required clamping forces. Further goals were the development of process knowledge for the use of running clamping technology, the determination of a process window and the generation of recommended actions for the early, digital design of joining processes in the Body in White shop with the example of the running clamping technology.

For the generation and validation of simulation models, a procedure was worked out, which can be transferred to further joining processes in the Body in White shop. Within this procedure, initially an experiment for characterization of required clamping forces was worked out with principle parts. The used principle parts, so called L-specimens have a common flange with a geometrical inaccuracy. Both materials, AA5182 and CR340LA

that are chosen and characterized, are often used for structural Body in White parts, as the field of application of running clamping technology is presently limited to structural parts. With the clamping experiments, clamping forces, required to close the gap between the parts underneath the clamping roll of running clamping technology, were determined. In addition, the unwanted groove, embossed on the parts by the clamping roll, whose depth depends on the level of the clamping force and on the used material of parts, was investigated. The depth of the groove limits, depending on the material, the part and its load cases, the maximum permitted clamping force.

With the worked out simulation model, the flexible clamping process of parts with a clamping roll is modeled for the first time in the FE-simulation. The performed clamping experiments with principle parts formed the basis for the successful validation of the new simulation model and contributed to the development of process knowledge. Because the principle parts were clamped in the opposite direction of the previous forming process, the specimens undergo a load reversal. For the material CR340LA, which showed a strong Bauschinger-effect in the material characterization tests, a strong influence of the forming history on the clamping force, calculated in the simulation to close the gap underneath the clamping roll, was observed. Consideration of forming history data results in lower required clamping forces in calculations. For AA5182 the Bauschinger-effect and the influence of forming history were significantly lower. In order to increase the process knowledge, the influences of material parameters, geometric influence factors and the forming history on the required clamping forces, were investigated by FE-simulation using methods of Design of Experiments. The sheet thickness, which has a strong effect on the bending resistance, had the highest influence by far. While variations of the Young's modulus and yield strength had only a minor effect on the required clamping forces, a correlation between the influence of the forming history and the intensity of the Bauschinger-effect on required clamping forces was identified. The reasons for this effect, the influence of stresses and strains as well as the Bauschinger-effect on the yielding of parts, could be explained by the distribution of stresses in the radius area of the parts.

A further extended simulation model enables, besides clamping with running clamping technology, to model the joining process by remote laser welding. In this simulation model, the connection of weld seams is modeled by beam elements with spotweld contact definitions. In this work, the laser dimples, used for degasification of zinc in remote laser welding, were

considered for the first time in the FE-simulation, by using volume elements. Simulative investigations showed that the height of the laser dimples has a significant influence on the resultant joint gaps. In addition, a speed difference between the laser beam and the clamping roll affects resultant joint gaps. In order to achieve small joint gaps, the parts should always be clamped by the clamping roll as close as possible to the currently welded area of the weld seam.

In order to simulate Body in White parts with geometrical inaccuracies, the mechanical simulation model of the clamping and joining process of principle parts was transferred and extended. For Body in White parts the roller paths are defined independent of the directions of the coordinate axes, based on the CAD-geometry of the weld seams. By calculation with a displacement-controlled clamping roll, required clamping forces and the yielding of parts can be estimated. The next level of extension of the simulation model for Body in White parts enables calculation with a force-controlled clamping roll. Thereby, a recorded experimental or a free defined curve of clamping force can be modeled. The force-controlled simulation model can be applied to sheet metal and casting parts, regardless of the part geometry. The model was validated in experiment with a floor panel assembly, made of sheet metal and casting parts. Hereby, for the first time the geometry of real Body in White parts, made of casting material, was optically scanned and successfully transferred into the FE-simulation. The highest level of extension of the simulation model enables, for the first time in FE-simulation, the specification of target joint gaps, in order to adjust clamping forces sensor-based during the simulation. This means that a single force-regulated simulation can be used to calculate an optimized force curve to achieve specified target joint gaps.

By the digital investigation and design of the clamping and joining process of a floor panel assembly, the process capable production of this complex assembly using running clamping technology was enabled and the potentials of the developed simulation models were demonstrated. Further, by combination of experiments and force-regulated simulations with the quality criteria of joint gaps between the parts and the depth of the groove on the parts embossed by the clamping roll, a process window for required clamping forces, permissible sheet thickness and permissible part tolerances was determined. Based on the solutions derived from the investigations, the geometry of the parts and the joining device of the floor panel assembly were adjusted. A significant reduction of resulting joint gaps can

be achieved by increasing the clamping force and additionally or alternatively by reducing the sheet thickness, reducing the part tolerances and using clamping supports.

In conclusion, it can be said that with the help of the experiments and simulation models, an increased process understanding of the new clamping and joining process with running clamping technology was developed. Furthermore, a process window for required clamping forces for process design was determined by simulation and the real joining process was digitally designed and verified. With the worked out and validated simulation models, the flexible process of remote laser welding by using a welding robot and running clamping technology as well as the joined parts and the used joining device can be digitally designed at an early stage. The worked out simulation models close the gap in the digital production process chain of modelling flexible clamping with clamping rolls. Based on the transferable findings obtained in this work, recommended actions for using simulation models for the early, digital, production- and product-oriented design of parts, joining processes and joining devices in the Body in White shop was deduced. Further, recommended actions especially for the use of running clamping technology were shown.

For the future, an extension of the simulation models to investigate the effects of welding distortions of the parts, joined by remote laser welding with running clamping technology, is conceivable. This enables the prediction of the geometrical deviation of the parts from their target geometry, resulting from welding distortions. Hereby, the use of thermomechanically-coupled calculation for the investigation of the geometrical accuracy of the joined assemblies should be investigated, since thermally induced distortions can have a significant impact on the geometrical accuracy of assemblies.

Literaturverzeichnis

- [1] MirRashed, S.; Mehr, M. R.; Missler-Behr, M.; Luder, A.: Analyzing the causes and effects of complexity on different levels of automobile manufacturing systems. In: IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation; ETFA (Hrsg.): 21th IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), 2016
- [2] https://www.deutschlandfunk.de/elektromobilitaet-zetsche-elektroautos-erst-2025.868.de.html?dram:article_id=389524, (aufgerufen am 21.09.2020)
- [3] Modellierung der zukünftigen elektromobilen Wertschöpfungskette und Ableitung von Handlungsempfehlungen zur Stärkung des Elektromobilitätsstandortes NRW. Abschlussbericht (2014)
- [4] Steinbeck-Behrens, C.; Menke, T.; Steinbeck, J.; Schroeder, M.; Duan, H.; Hoffmann, A.; Brylla, U.; Kulp, S.; Pinner, S.; Rambke, M.; Leck, L.; Awiszus, B.; Bolick, S.; Katzenberger, J.; Schulz, M.; Runde, C.; Czaykowska, A.: Gemeinsamer FuE-Abschlussbericht des Verbundprojektes „Durchgängige Virtualisierung der Entwicklung und Produktion von Fahrzeugen (VIPROF)“, 2012
- [5] Schuh, G.; Arnoscht, J.; Schiffer, M.: Innovationscontrolling. In: Schuh, G. (Hrsg.): Innovationsmanagement, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2012, 249–349
- [6] Roll, K.: Integration of forming simulation in the digital manufacturing process chain. Proceeding of Riken Symposium: Invited keynote, Rikagaku Kenkyūjo (2008)
- [7] Kästle, C.; Liewald, M.; Roll, K.: Rückfederungsberechnung von Karosserieunterbaugruppen im Zusammenbau. In: Europäische Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung (Hrsg.): EFB-Tagungsband Nr. 36: Umformen, Schneiden, Verbinden im Leichtbau Machbarkeit – Produktivität – Qualität, Hannover, 2013, 335–345

- [8] Roller, S.: Integrierte Lackierprozess-Simulation an virtuellen Fahrzeugprototypen in der Digitalen Fabrik. In: Bracht, U. (Hrsg.): Innovationen der Fabrikplanung und -organisation. Band 27, Aachen: Shaker Verlag, 2011
- [9] Ritz, V.: Entwicklung einer numerischen Simulationsmethode zur digitalen Abbildung des automobilen Decklackierprozesses. In: Bracht, U. (Hrsg.): Innovationen der Fabrikplanung und -organisation. Band 39, Aachen: Shaker Verlag, 2018
- [10] Lenz, B.: Finite Elemente-Modellierung des Laserstrahlschweißens für den Einsatz in der Fertigungsplanung. In: Reinhart, G. (Hrsg.): Forschungsberichte des IWB. Band 158, München: Herbert Utz Verlag, 2001
- [11] Fritzsche, R.; Neugebauer, R.; Walzl, M.; Pfeifer, M.: Intelligenter Karosseriebau. wt Werkstattstechnik online 102(2012) 10, 709–715
- [12] Bea, M.; Zuern, M.: Das Laser-Remoteschweißen geht in die zweite Generation. ATZextra 15(2010) 10, 6–11
- [13] Kling, R.: Prozesssicheres Remote-Schweißen für flexible Fertigungskonzepte (PROFI). In: Ostendorf, A. (Hrsg.): Berichte aus dem LZH. " des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF), Garbsen: PZH Produktionstechnisches Zentrum, 2004
- [14] Lamping, D.: Weiterentwicklung des Remote-Laserschweißens für das flexible Verbinden von Aluminium in der Großserie. In: Hahn, O.; Meschut, G. (Hrsg.): Berichte aus dem Laboratorium für Werkstoff- und Fügetechnik. Band 128, Herzogenrath: Shaker Verlag, 2017
- [15] Taub, A. I.; Krajewski, P. E.; Luo, A. A.; Owens, J. N.: The evolution of technology for materials processing over the last 50 years. The automotive example. JOM 59(2007) 2, 48–57
- [16] DIN8593-6:2003-09: Fertigungsverfahren Fügen - Teil 6: Fügen durch Schweißen; Einordnung, Unterteilung, Begriffe, Berlin: Beuth Verlag, 2003
- [17] Fahrenwaldt, H. J.; Schuler, V.; Twrdek, J.: Praxiswissen Schweißtechnik. Werkstoffe, Prozesse, Fertigung, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014, 5. Auflage

- [18] Risse, A.: Lasermaterialbearbeitung. In: Risse, A. (Hrsg.):
Fertigungsverfahren der Mechatronik, Feinwerk- und
Präzisionsgerätetechnik, Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag,
2012, 463–502
- [19] Klocke, F.; König, W.: Fertigungsverfahren 3. Abtragen, Generieren
Lasermaterialbearbeitung, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag,
2007, 4. Auflage
- [20] Bliedtner, J.; Müller, H.; Barz, A.: Lasermaterialbearbeitung.
Grundlagen - Verfahren - Anwendungen - Beispiele, München:
Carl Hanser Verlag, 2013
- [21] Birkert, A.; Haage, S.; Straub, M.: Umformtechnische Herstellung
komplexer Karosserieteile. Auslegung von Ziehanlagen, Berlin
Heidelberg: Springer-Verlag, 2013
- [22] Oefele, F.: Remote-Laserstrahlschweißen mit brillanten
Laserstrahlquellen. In: Reinhart, G.; Zaeh, M. F. (Hrsg.):
Forschungsberichte des IWB. Band 267, München: Herbert Utz
Verlag, 2013
- [23] Feldmann, K.; Schöppner, V.; Spur, G.: Handbuch Fügen,
Handhaben, Montieren, München: Carl Hanser Verlag, 2014, 2.
Auflage
- [24] Reiniger, C.-D.: Fluidodynamische Effekte beim Remote-
Laserstrahlschweißen von Blechen mit Fügespalt. In: Graf, T.
(Hrsg.): Laser in der Materialbearbeitung Forschungsberichte des
IFSW, München: Herbert Utz Verlag, 2015
- [25] Colombo, D.; Previtali, B.: Laser dimpling and remote welding of
zinc-coated steels for automotive applications. The International
Journal of Advanced Manufacturing Technology 72(2014) 5-8, 653–
663
- [26] Gu, H.: Laser lap welding of zinc coated steel sheet with laser-
dimple technology. Journal of Laser Applications 22(2010) 3, 87–91
- [27] Omboko, Y. M.: Numerische Simulation und Kompensation von
Schweißverzügen im Karosseriebau: Beitrag zur Steigerung der
Maßhaltigkeit im Fertigungsprozess. In: Böhm, S.; Fehlbier, M.
(Hrsg.): Fortschrittsberichte aus der Produktionstechnik. Band 4,
Aachen: Shaker Verlag, 2015

- [28] Mickel, P.-M.: Methode zur Eigenschaftsdarstellung von Laserstrahlschweißnähten im Karosseriebau. Institut für Fertigungstechnik. Technische Universität Dresden, 2012
- [29] Bohn, M.; Hetsch, K.: Toleranzmanagement im Automobilbau, München: Carl Hanser Verlag, 2013
- [30] Matthias Putz: Karosseriebau im Wandel - Auswirkungen auf die Wertschöpfungsketten. Vortrag, Chemnitz: 8. Chemnitzer Karosseriekolloquium CBC, (14.11.2017)
- [31] Rippl, P.: Industrieroboter zum Laserstrahlschweißen und -schneiden in der Fahrzeugindustrie. European Laser Marketplace 94 (1994), 216–230
- [32] Tönshoff, H. K.; Breuer, P.; Alvensleben, F. von; Overmeyer, L.; Schumacher, J.: Qualitätssicherung beim ND:YAG-Laserstrahlschweißen von Karosseriebauteilen. In: Geiger, M. (Hrsg.): Schlüsseltechnologie Laser: Herausforderung an die Fabrik 2000, Hannover: Meisenbach Verlag, 1995, 187–196
- [33] Flohr, J.; Bayerlein, H.: Prozeßoptimierung beim Laserstrahlschweißen im Karosseriebau. In: Dausinger, F. (Hrsg.): Proceedings of the 6th European Conference on Laser Treatment of Materials, Stuttgart: AWT; Arbeitsgemeinschaft Wärmebehandlung und Werkstofftechnik e.V., 1996, 41–48
- [34] Rippl, P.: Der Industrieroboter als sechssachsiger Scanner – Remote-Schweißen mit Lasern hoher Strahlqualität. Laser Technik Journal 2(2005) 1, 31–35
- [35] Ellenrieder, G.; Gänsicke, T.; Goede, M.; Herrmann, H. G.: Die Leichtbaustrategien. In: Friedrich, H. E. (Hrsg.): Leichtbau in der Fahrzeugtechnik, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2017, 43–118
- [36] <https://www.ipgphotonics.com/de/products/beam-delivery/process-heads/welding/d50-wobble-and-seam-tracking-head>, (aufgerufen am 21.09.2020)
- [37] Böhm, K.; Reibel, J.; Hein, S.: Der neue AUDI A3 - Laserschweißapplikationen. Vortrag, Bad Nauheim: Automotive Circle International, (28.01.2004)
- [38] Hornig, H.: Reasonable Application of Laser in the Production of the new BMW 5 and 6 Series. Vortrag, Bad Nauheim: Automotive Circle International, (28.01.2004)

- [39] Löffler, K.: WORLD-PREMIERE! Laserapplications Golf V: Concept and Implementation in production. Vortrag, Bad Nauheim: Automotive Circle International, (28.01.2004)
- [40] <https://www.thyssenkrupp-system-engineering.com/de/automobilindustrie/standardloesungen/laserspannkopf-lsk/>, (aufgerufen am 21.09.2020)
- [41] <http://www.highyag.com/DE/Laser-Processing-Heads/laser-processing-RSK.html>, (aufgerufen am 21.09.2020)
- [42] <https://www.scansonic.de/products/adr/>, (aufgerufen am 21.09.2020)
- [43] Goettsch, U.; Goth, K.; Lamping, D.; Pälmer, M.; Reiniger, C.-D.: Verfahren und Vorrichtung zum Fügen von Bauteilen. Patentschrift (DE102015006421 A1), 2015
- [44] Eisele, U.: Ein Beitrag zur verbesserten Auslegung von Rollfalzprozessen. In: Liewald, M. (Hrsg.): Beiträge zur Umformtechnik. Band 65, Frankfurt, Main: DGM Informationsgesellschaft Verlag, 2012
- [45] Kästle, C.: Simulationsmethode zur Beurteilung der Maßhaltigkeit von rollgefalzten Karosseriebaugruppen im Zusammenbau. In: Liewald, M. (Hrsg.): Beiträge zur Umformtechnik. Band 80, 2016
- [46] Klein, B.: FEM. Grundlagen und Anwendungen der Finite-Element-Methode im Maschinen- und Fahrzeugbau, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015, 10. Auflage
- [47] Zienkiewicz, O. C.: The Finite Element Method in Structural and Continuum Mechanics, London: McGraw-Hill, 1967
- [48] Roll, K.; Lemke, T.; Wiegand, K.: Possibilities and Strategies for Simulations and Compensation for Springback, Proceedings of the 6th International Conference and Workshop on Numerical Simulation of 3D Sheet Metal Forming Process (NUMISHEET), 2005, 295–302
- [49] Lange, K.; Roll, K.; Tekkaya, A. E.; Wanheim, T.: Prozeßsimulation und- optimierung. In: Lange, K. (Hrsg.): Umformtechnik Handbuch für Industrie und Wissenschaft, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1993, 306–435

- [50] Roll, K.: Numerische Simulation in der Blechumformung. In: Hoffmann, H.; Spur, G.; Neugebauer, R. (Hrsg.): Handbuch Umformen, München: Carl Hanser Verlag, 2012, 92–97
- [51] Merklein, M.: Charakterisierung von Blechwerkstoffen für den Leichtbau, Bamberg: Meisenbach Verlag, 2006
- [52] Hassan, H. u.: Springback in deep drawing - Accurate prediction and reduction. In: Kleiner, M. (Hrsg.): Dortmunder Umformtechnik. Band 90, Herzogenrath: Shaker Verlag, 2016
- [53] Siegert, K.: Grundlagen der Blechumformung. In: Siegert, K. (Hrsg.): Blechumformung, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2015, 1–72
- [54] Bauschinger, J.: Mittheilung 15: Über die Veränderung der Elastizitätsgrenze und Festigkeit des Eisens und Stahls durch Strecken und Quetschen, durch Erwärmen und Abkühlen und durch oftmals wiederholte Beanspruchung. Mittheilungen aus dem Mechanisch-Technischen Laboratorium der Königlich Technischen Hochschule in München 13(1886), 1–116
- [55] Staud, D.; Merklein, M.: Zug-Druck-Versuche an Miniaturproben zur Erfassung von Parametern für kinematische Verfestigungsmodelle. In: Borsutzki, M. (Hrsg.): Fortschritte der Kennwertermittlung für Forschung und Praxis, Düsseldorf: Verlag Stahleisen, 2009, 211–218
- [56] Yoshida, F.; Urabe, M.; Toropov, V. V.: Identification of material parameters in constitutive model for sheet metals from cyclic bending tests. International Journal of Mechanical Sciences 40(1998) 2-3, 237–249
- [57] Merklein, M.; Biasutti, M.: Forward and reverse simple shear test experiments for material modeling in forming simulations. In: Hirt, G. (Hrsg.): Special edition: 10th International Conference on Technology of Plasticity, ICTP 2011, Düsseldorf: Verlag Stahleisen, 2011, 702–707
- [58] Yin, Q.: Verfestigungs- und Schädigungsverhalten von Blechwerkstoffen im ebenen Torsionsversuch. In: Kleiner, M. (Hrsg.): Dortmunder Umformtechnik. Band 78, Herzogenrath: Shaker Verlag, 2014

- [59] Banabic, D.: Sheet metal forming processes. Constitutive modelling and numerical simulation, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2010
- [60] Krasovskyy, A.: Verbesserte Vorhersage der Rückfederung bei der Blechumformung durch weiterentwickelte Werkstoffmodelle. Fakultät für Maschinenbau. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2005
- [61] Chaboche, J. L.; Rousselier, G.: On the Plastic and Viscoplastic Constitutive Equations-Part I. Rules Developed With Internal Variable Concept. Journal of Pressure Vessel Technology 105(1983) 2, 153-158
- [62] Wieland, M.; Kaupper, M.; Merklein, M.: Umform- und Rückfederungssimulation von Leichtbauwerkstoffen - Vergleichende Betrachtung von Zug-Druck- und Wechselbiegeversuchen zur Berücksichtigung des Bauschinger-Effekts. In: Europäische Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung (Hrsg.): EFB-Tagungsband Nr. 36: Umformen, Schneiden, Verbinden im Leichtbau Machbarkeit – Produktivität – Qualität, Hannover, 2013, 347-357
- [63] Armstrong, P. J.; Frederick, C. J.: A mathematical representation of the multiaxial Bauschinger effect. GEGB Report RD/B/N731. Berkeley Nuclear Laboratories (1966)
- [64] Yoshida, F.; Uemori, T.: A model of large-strain cyclic plasticity describing the Bauschinger effect and workhardening stagnation. International Journal of Plasticity 18(2002), 661-686
- [65] Zhang, L.; Zhu, X.; Xu, S.; Wang, C.-T.: Advanced Simulation Technology Using LS-DYNA® for Automotive Body Manufacturing Process: From Stamping To Assembly, SAE World Congress & Exhibition, Warrendale: SAE International, 2009
- [66] Fleischer, M.: Absicherung der virtuellen Prozesskette für Folgeoperationen in der Umformtechnik. In: Bletzinger, K.-U. (Hrsg.): Schriftenreihe des Lehrstuhls für Statik TU München. Band 12, Aachen: Shaker Verlag, 2009
- [67] Eckert, A.: Prognose der Maßhaltigkeit punktförmig mechanisch gefügter Karosserieanbauteile. In: Neugebauer, R. (Hrsg.): Berichte aus dem IWU. Band 62, Auerbach: Verlag Wissenschaftliche Scripten, 2012

- [68] Xu, S.; Deng, X.: An evaluation of simplified finite element models for spot-welded joints. *Finite Elements in Analysis and Design* 40(2004) 9-10, 1175-1194
- [69] Livermore Software Technology Corporation: LS-DYNA Dev Theory Manual, 2016
- [70] Tikhomirov, D., Rietman, B., Kose, K., & Makkink, M.: Computing welding distortion: comparison of different industrially applicable methods. In: *Trans Tech Publications (Hrsg.): Advanced materials research*, 2005, 195-202
- [71] Zaeh, M. F.; Papadakis, L.; Langhorst, M.: Simulation of the manufacturing process chain of welded frame structures. *Production Engineering* 2(2008) 4, 385-393
- [72] Loose, T.: Coupled Simulation of Forming and Welding with LS-DYNA for the Design of Distortion-Compensation. 13. LS-DYNA Forum, Bamberg (2014)
- [73] Thomas Klöppel, Mikael Schill, Tobias Loose: Recent Updates for the Heat Transfer Solver in LS-DYNA with focus on computational welding mechanics. *Tagungsband Simulationsforum 2016 Schweißen und Wärmebehandlung, Weimar* (2016), 100-110
- [74] DIN8593-5:2003-09: Fertigungsverfahren Fügen - Teil 5: Fügen durch Umformen; Einordnung, Unterteilung, Begriffe, Berlin: Beuth Verlag, 2003
- [75] Neugebauer, R.; Drossel, W. G.; Rössinger, M.; Eckert, A.; Hecht, B.: Roller Hemming Simulation. State of the Art and Application Limits. *Key Engineering Materials* 611-612(2014), 1062-1070
- [76] Ceretti, E.; Attanasio, A.; Fiorentino, A.; Giardini, C.: Sheet Hemming with Rolling Tools. Analysis and Optimization of the Part Quality. *Key Engineering Materials* 344(2007), 357-364
- [77] Arroyo, A.; Pérez, I.; Gutierrez, M.; Bahillo, J.; Toja, H.: Roller Hemming: A New Simulation Model for the Automotive Industry. In: *Hinduja, S.; Li, L. (Hrsg.): Proceedings of the 36th International MATADOR Conference, London, New York: Springer-Verlag*, 2010, 83-86
- [78] Baumgarten, J.; Plapper, P.: Rollbördeln für die Großserienanwendung. *VDI-Z Integrierte Produktion* 147(2005) 9, 2-5

- [79] Eisele, U.; Roll, K.: Integration von FEM-Rollfalzsimulationen in die virtuelle Prozesskette. In: Europäische Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung (Hrsg.): EFB-Tagungsband Nr. 31: Bauteile der Zukunft - Methoden und Prozesse, Hannover, 2010, 337–358
- [80] Burchitz, I.; Fritsche, D.; Grundmann, G.; Hillmann, M.: Efficient planning and numerical analysis of industrial hemming processes, 8th International Conference and Workshop on Numerical Simulation of 3D Sheet Metal Forming Processes (NUMISHEET), AIP, 2011, 243–250
- [81] Kaiser, C.; Zubeil, M.; Roll, K.; Volk, W.: New approaches for hemming simulation to verify the manufacturing process of hang-on parts. Conference Proceedings: AutoMetForm/SFU 2014 - New Materials for Vehicle Components, Freiberg (2014), 72–79
- [82] Kaiser, C.; Roll, K.; Volk, W.: Increasing the efficiency of designing hemming processes by using an element-based metamodel approach. Journal of Physics: Conference Series (2017) 896, Artikelnummer 012041
- [83] Kästle, C.; Liewald, M.; Roll, K.: Springback Simulation of the Process Chain Press Line Forming and Roller Hemming Processes. Key Engineering Materials 549(2013), 231–238
- [84] Zubeil, M.: Versagensprognose bei der Prozesssimulation von Biegeumform- und Falzverfahren. In: Merklein, M.; Franke, J.; Schmidt, M. (Hrsg.): Fertigungstechnik - Erlangen. Band 250, Bamberg: Meisenbach Verlag, 2014
- [85] Perret, W.: Welding simulation of complex automotive welded assembly - Possibilities and limits of the application of analytical temperature field solutions. In: Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) (Hrsg.): BAM-Dissertationsreihe. Band 108, Berlin: Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), 2013
- [86] Bernhardt, R.; Schafstall, H.; Hwang, I.: Simulate Reality - Deliver Certainty Through the Virtual Weld. Journal of Welding and Joining 34(2016) 5, 41–46
- [87] Radaj, D.: Eigenspannungen und Verzug beim Schweißen. Rechen- und Meßverfahren, Düsseldorf: DVS-Verlag, 2002

- [88] Radaj, D.: Simulation von Temperaturfeld, Eigenspannungen und Verzug beim Schweißen. In: Pollmann, W.; Radaj, D. (Hrsg.): Simulation der Fügetechniken, Düsseldorf: DVS-Verlag, 2001, 32–59
- [89] Thater, R.; Wiethop, P.; Rethmeier, M.: Welding Simulation in Car Body Construction. Laser Technik Journal 12(2015) 2, 33–37
- [90] Schützle, W.: Beitrag zur Prozesskettensimulation geschweißter Aluminium-Karosserieanbauteile. In: Neugebauer, R. (Hrsg.): Berichte aus dem IWU. Band 87, Auerbach: Verlag Wissenschaftliche Scripten, 2015
- [91] Govik, A.; Nilsson, L.; Moshfegh, R.: Finite element simulation of the manufacturing process chain of a sheet metal assembly. Journal of Materials Processing Technology 212(2012) 7, 1453–1462
- [92] Svensson, M.; Mattiasson, K.: Three-dimensional simulation of hemming with the explicit FE-method. Journal of Materials Processing Technology 128(2002) 1–3, 142–154
- [93] Oeckerath, A.; Wolf, K.: Improved Product Design Using Mapping In Manufacturing Process Chains. 10. LS-DYNA Forum, Bamberg (2010), 23–32
- [94] Uwe Scholl: SCAIMapper Kopplung von Umform- und Crashsimulation. 6. LS-DYNA Anwenderforum, Frankenthal (2007), 1–6
- [95] VDA239-300: Experimentelle Ermittlung mechanischer Kennwerte von Walzprodukten aus Aluminiumlegierungen für die CAE-Berechnung Prüfung und Dokumentation, Berlin: Verband der Automobilindustrie e.V., 2015
- [96] Metallische Werkstoffe – Blech und Band – Bestimmung der biaxialen Spannung/Dehnung-Kurve durch einen hydraulischen Tiefungsversuch mit optischen Messsystemen, Berlin: Beuth Verlag, 2014
- [97] Livermore Software Technology Corporation: LS-DYNA R9.0 Keyword Manual Vol II, 2016
- [98] Barlat, F.; Brem, J. C.; Yoon, J. W.; Chung, K.; Dick, R. E.; Lege, D. J.; Pourboghrat, F.; Choi, S.-H.; Chu, E.: Plane stress yield function for aluminum alloy sheets—part 1. Theory. International Journal of Plasticity 19(2003) 9, 1297–1319

- [99] Hockett, J. E.; Sherby, O. D.: Large strain deformation of polycrystalline metals at low homologous temperatures. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 23(1975) 2, 87–98
- [100] SEP1240: Prüf- und Dokumentationsrichtlinie für die experimentelle Ermittlung mechanischer Kennwerte von Feinblechen aus Stahl für die CAE-Berechnung, Düsseldorf: Verlag Stahleisen, 2006
- [101] Hora, P.: Finite Elemente Methode (FEM) Prozess-Simulation in der Blechumformung. In: Siegert, K. (Hrsg.): *Blechumformung*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2015, 257–307
- [102] Merklein, M.; Rosenschon, M.: Verbesserung des Qualifizierungsprozesses von Bauschinger-Parametern durch Wechselbiegeversuche. EFB-Forschungsbericht Nr. 471, Hannover, 2017
- [103] DIN EN ISO 6892-1:2017-02: Metallische Werkstoffe – Zugversuch – Teil 1: Prüfverfahren bei Raumtemperatur, Berlin: Beuth Verlag, 2007
- [104] Bauer, F.; Werber, A.; Seiberlich, T.; Merklein, M.: Untersuchung einer flexiblen Spanntechnik für das Laserschweißen. Tagungsband: 23. Sächsische Fachtagung Umformtechnik: Dresden (2016), 72–81
- [105] KEYENCE Corporation: Digitales Mikroskop VHX-600D Bedienungsanleitung
- [106] NextSense GmbH: Calipri C10 Bedienungsanleitung
- [107] Xu, W. L.; Ma, C. H.; Li, C. H.; Feng, W. J.: Sensitive factors in springback simulation for sheet metal forming. *Journal of Materials Processing Technology* 151(2004) 1-3, 217–222
- [108] Govik, A.; Moshfegh, R.; Nilsson, L.: The effects of forming history on sheet metal assembly. *International Journal of Material Forming* 7(2014) 3, 305–316
- [109] Wriggers, P.: *Nichtlineare Finite-Element-Methoden*, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2001
- [110] Tekkaya, E.; Traphöner, H.; Merklein, M.; Rosenschon, M.: Identifikation spannungsabhängiger Bauschinger-Koeffizienten. EFB-Forschungsbericht Nr. 432, Hannover, 2016

- [111] Rosenschon, M.; Merklein, M.: Process-oriented validation of hardening models in a cyclic bending test. *Procedia Engineering* 207(2017), 1904–1909
- [112] Rosenschon, M.; Suttner, S.; Merklein, M.: Evaluation of kinematic hardening models for multiple stress reversals under continuous cyclic shearing and multi-step bending. 10th European LS-DYNA Conference, Würzburg (2015)
- [113] Bauer, F.; Werber, A.; Merklein, M.: Investigation of a process simulation method for flexible clamping of sheet metal parts. *Procedia Engineering* 207(2017), 1599–1604
- [114] Neugebauer, R.; Bernhardt, O. E.; Wahl, M.; Schulz, F.; Mauermann, R.; Schützle, W.; Werner, S.: Predicting Dimensional Accuracy of Laser Welded Aluminum Add-On Body Parts. *Key Engineering Materials* 549(2013), 463–470
- [115] Bauer, F.; Werber, A.; Seiberlich, T.; Merklein, M.: Process Simulation Model of a Flexible Clamping Technology for Sheet Metal Parts. *Procedia Engineering* 183(2017), 303–308
- [116] <https://www.dynasupport.com/howtos/material/history-variables>, (aufgerufen am 21.09.2020)
- [117] Al-Zaher, A.; ElMaraghy, W.; Pasek, Z. J.: Enabling Car Body Customization through Automotive Framing Systems Design. In: ElMaraghy, H. A. (Hrsg.): *Enabling manufacturing competitiveness and economic sustainability*, Berlin, Heidelberg: Springer, 2012, 445–451
- [118] Emrich, A.: Systematik zur Robustheitsanalyse von Umformprozessen für Karosseriekomponenten aus Blech. In: Liewald, M. (Hrsg.): *Beiträge zur Umformtechnik*. Band 68, Frankfurt, Main: DGM Informationsgesellschaft Verlag, 2013
- [119] Kleppmann, W.: *Versuchsplanung. Produkte und Prozesse optimieren*, München: Carl Hanser Verlag, 2016, 9. Auflage
- [120] Siebertz, K.; van Bebbber, D.; Hochkirchen, T.: *Statistische Versuchsplanung. Design of Experiments (DoE)*, Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2017, 2. Auflage
- [121] Fahrmeir, L.; Kneib, T.; Lang, S.: *Regression. Modelle, Methoden und Anwendungen*, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009, 2. Auflage

- [122] Sachs, L.; Hedderich, J.: Angewandte Statistik. Methodensammlung mit R : mit 180 Tabellen, Berlin, Heidelberg: Springer, 2006, 12, vollst. neu bearb. Aufl.
- [123] Lange, K.: Umformtechnik. Handbuch für Industrie und Wissenschaft, Berlin, Heidelberg, s.l.: Springer Berlin Heidelberg, 1990, Zweite, völlig neubearbeitete und erweiterte Auflage
- [124] Buehrle, J.; Bea, M.; Brockmann, R.: Laser Remote Process Technology on Automotive Manufacture. In: SAE-China and FISTA (Hrsg.): Proceedings of the FISITA 2012 World Automotive Congress, Berlin, Heidelberg: Springer, 2013, 89–97
- [125] Konrad, T.: Simulative Auslegung der Spann- und Fixierkonzepte im Karosserierohbau. In: Franke, J.; Hanenkamp, N.; Merklein, M.; Schmidt, M.; Wartzack, S. (Hrsg.): FAU Studien aus dem Maschinenbau. Band 319, Erlangen: FAU University Press, 2019
- [126] Livermore Software Technology Corporation: LS-DYNA R9.0 Keyword Manual Vol I, 2016
- [127] Drossel, W. G.; Wahl, M.; Schulz, F.; Mauermann, R.; Schützle, W.; Ackert, P.: Improving Surface Based Clamping Simulations by Measuring the Position of Active Surfaces during the Clamping Process. Key Engineering Materials 554-557(2013), 2312–2317
- [128] Bauer, F.; Werber, A.: FE-simulation method for a flexible clamping technology for Body in White assemblies. Production Engineering 13(2019) 3-4, 259–271
- [129] Bachhofer, A.: Schneiden und Schweissen von Aluminiumwerkstoffen mit Festkörperlasern für den Karosseriebau. In: Hügel, H. (Hrsg.): Laser in der Materialbearbeitung Forschungsberichte des IFSW, München: Herbert Utz Verlag, 2000

Verzeichnis promotionsbezogener, eigener Publikationen

- [104] Bauer, F.; Werber, A.; Seiberlich, T.; Merklein, M.: Untersuchung einer flexiblen Spanntechnik für das Laserschweißen. Tagungsband: 23. Sächsische Fachtagung Umformtechnik: Dresden (2016), 72–81
- [113] Bauer, F.; Werber, A.; Merklein, M.: Investigation of a process simulation method for flexible clamping of sheet metal parts. *Procedia Engineering* 207(2017), 1599–1604
- [115] Bauer, F.; Werber, A.; Seiberlich, T.; Merklein, M.: Process Simulation Model of a Flexible Clamping Technology for Sheet Metal Parts. *Procedia Engineering* 183(2017), 303–308
- [128] Bauer, F.; Werber, A.: FE-simulation method for a flexible clamping technology for Body in White assemblies. *Production Engineering* 13(2019) 3-4, 259–271

Verzeichnis promotionsbezogener, studentischer Arbeiten

- [S1] Seiberlich, T.: Entwicklung einer Methodik zum Abschätzen von Spannkraften beim Laserschweißen. Bachelorarbeit. Karlsruhe, 2016
- [S2] Kormann, J.: Ermittlung erforderlicher Spannkraften in Fügevorrichtungen. Masterarbeit. Erlangen, 2016
- [S3] Barth, J.: Simulative Ermittlung erforderlicher Spannkraften an einem toleranzbehafteten Realbauteil. Bachelorarbeit. Karlsruhe, 2017
- [S4] Kredler, M.: Simulative Untersuchung geometrischer und materialspezifischer Einflüsse auf erforderliche Spannkraften beim Laserschweißen. Masterarbeit. Karlsruhe, 2017
- [S5] Brezina, M.: Untersuchung erforderlicher Spannkraften für das Remote-Laserschweißen nichtmaßhaltiger Bauteile mittels FE-Simulation. Masterarbeit. Erlangen, 2017
- [S6] Krauß, J.: Ermittlung sich ergebender Fügespalte beim Remote-Laserschweißen mittels thermomechanisch gekoppelter FE-Simulation. Bachelorarbeit. Karlsruhe, 2018

Anhang

Anhang 1: Simulative Generierung von L-Proben

Für die Spannsimulation werden, wie in Abschnitt 4.6 beschrieben, die L-Proben aus Abschnitt 5.1.1 vor den Spannversuchen optisch vermessen und in FE-Netze überführt. Zur Untersuchung des Einflusses der Umformhistorie auf erforderliche Spannkkräfte werden L-Proben simulativ durch Biegesimulationen (siehe Bild 73a) generiert. Die Werkzeuggeometrie in der Simulation entspricht dabei der zur realen Anfertigung der Proben verwendeten (siehe Abschnitt 4.3.1). Der Simulationsaufbau basiert auf dem der allgemeinen Umformsimulation von Blechformteilen in LS-DYNA®, ohne den Einsatz eines Niederhalters. Dabei werden die Werkzeuge als Starrkörper und die Platine der L-Probe mit Schalenelementen und *MAT_BARLAT_YLD2000, mit den Werkstoffdaten aus Abschnitt 4.1, modelliert. Der Kontakt zwischen der Platine und den Werkzeugen wird durch die Karte *CONTACT_FORMING_ONE_WAY_SURFACE_TO_SURFACE berücksichtigt. Entsprechend dem realen Biegevorgang ist das Gesenk ortsfest und der Stempel wird in negative z-Richtung bewegt. Die Bewegung des Stempels erfolgt weggesteuert über eine „Smooth-Curve“ (siehe [126]), bei der die Geschwindigkeit über einen definierten Zeitraum mit weichen, sinusähnlichen Übergängen erhöht und wieder reduziert wird. Da kein Niederhalter eingesetzt wird, schwingt die Platine bei einer in der Umformsimulation üblichen Werkzeuggeschwindigkeit von circa 3 m/s so stark, dass die resultierende Probengeometrie dadurch beeinflusst wird. Aus diesem Grund wird eine maximale Werkzeuggeschwindigkeit von 0,2 m/s in der Biegesimulation verwendet, bei der die Probengeometrie nicht negativ beeinflusst wird.

Im Anschluss an die Biegesimulation erfolgt entsprechend dem Vorgehen bei der Umformsimulation eine Rückfederungssimulation der L-Probe. Der resultierende Biegewinkel der numerisch gefertigten L-Probe wird vermessen und mit dem Biegewinkel der entsprechenden, auf dem optischen Messergebnis basierenden, L-Probe abgeglichen. Die Eindringtiefe des Stempels in der Biegesimulation wird dabei iterativ auf 0,001 mm genau (dies entspricht einer möglichen Abweichung des Biegewinkels von 0,01° bis 0,02°) angepasst. Die Eindringtiefe wird durch lineare Interpolation auf Basis der Eindringtiefen der letzten beiden Simulation und der daraus resultierenden Biegewinkel definiert.

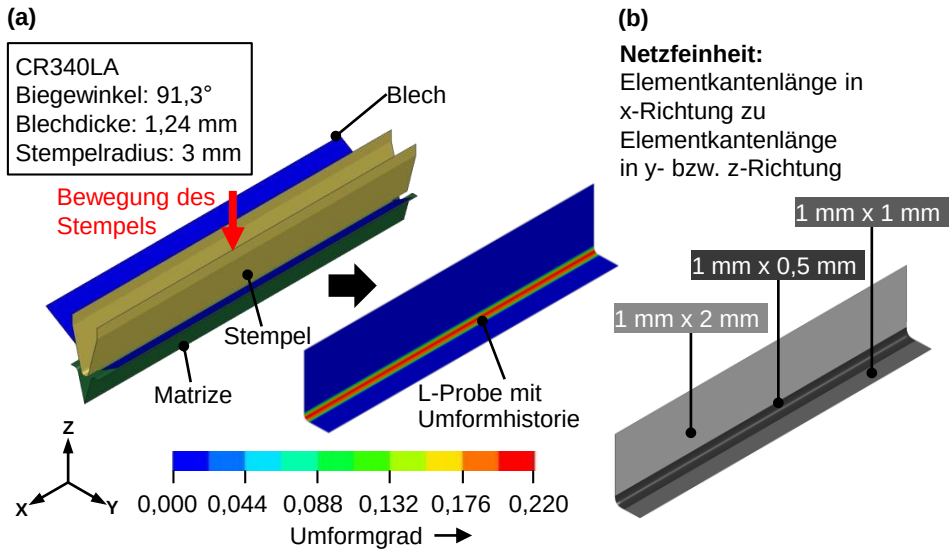


Bild 73: (a) Numerische Anfertigung der L-Proben durch Biegesimulation; (b) Vernetzungsbereiche der L-Probe

Die Vernetzung der L-Proben mit rechteckigen Schalenelementen, die in x-Richtung stets über eine Kantenlänge von 1 mm verfügen, wird entsprechend der Darstellung in Bild 73b in drei Bereiche untergliedert. Dabei wird der Flanschbereich (mittelgrau), der mit der Spannrolle gespannt bzw. durch Fügeelemente gefügt wird, mit einer Netzfeinheit von 1 mm auf 1 mm vernetzt. Der Radiusbereich (dunkelgrau) wird mit einer Netzfeinheit von 1 mm auf 0,5 mm vernetzt, um die gekrümmte Kontur gut abzubilden. Der Bereich des Schenkels (hellgrau), der sich beim Spann- (und Füge-)vorgang in flächigem Kontakt mit der Rückwand und den Spannern befindet, wird mit einer Netzfeinheit von 1 mm auf 2 mm vernetzt. Auf eine adaptive Netzverfeinerung wird verzichtet, um inhomogene Übergangsbereiche, die sich auf die resultierenden Spannkkräfte auswirken, zu vermeiden. Diese Vernetzungsstrategie wird auf alle L-Proben bzw. deren Platinen in der Biegesimulation angewendet.

Anhang 2: Übersicht Kontaktdefinitionen

Eine Übersicht der im Rahmen dieser Arbeit in den Simulationsmodellen verwendeten Kontaktdefinitionen findet sich in Tabelle 7.

Tabelle 7: Übersicht der in den simulierten Spann- und Fügeprozessen verwendeten Kontaktdefinitionen von LS-DYNA®

Kontaktpartner	Kontaktdefinition
Vorrichtung bzw. Spanner zu Bauteil	*CONTACT_FORMING_ONE_WAY_SURFACE_TO_SURFACE
Spannrolle zu Bauteil	*CONTACT_FORMING_SURFACE_TO_SURFACE
Bauteil zu Bauteil	*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE
Bauteil zu Schweißnaht	*CONTACT_SPOTWELD
Unteres Bauteil zu seinen Lasernoppen	*CONTACT_TIED_SURFACE_TO_SURFACE_CONSTRAINED_OFFSET
Oberes Bauteil zu den Lasernoppen des unteren Bauteils	*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE

Anhang 3: Simulationspläne mit Zentral Zusammengesetztem Versuchsplan

Im Folgenden sind die zur Untersuchung erforderlicher Spannkkräfte eingesetzten Simulationspläne dargestellt. Dabei handelt es sich um Zentral Zusammengesetzte Versuchspläne (siehe Bild 74). Der Zentral Zusammengesetzte Versuchsplan wird in [119] umfassend beschrieben und wird an dieser Stelle basierend auf [119] kurz umrissen. Er setzt sich aus einem fraktionell faktoriellen 2^{k-p} bzw. vollständig faktoriellen ($p = 0$) Versuchsplan mit einer Mindestauflösung von V (dem „Würfel“ in Bild 74), einem Zentrums- punkt und einem „Stern“, der durch Variation einzelner Faktoren ausge- hend vom Zentrumspunkt gebildet wird, zusammen. Zum Abschätzen der Versuchsstreuung kann dabei in experimentellen Versuchen die Konfigu- ration des Zentrumspunkts mehrfach geprüft werden.

Der Verlängerungsfaktor α_z ist der Quotient aus der Stufenbreite der Sternpunkte und der Würfelpunkte. Für $\alpha_z \neq 1$ nimmt jeder Faktor fünf Stufen an. Für $\alpha_z = 1$ nimmt jeder Faktor lediglich drei Stufen an. Damit handelt es sich um einen flächenzentrierten Versuchsplan, bei dem Koeffizienten des dazugehörigen Regressionsmodells voneinander abhängig sind. Wird α_z stattdessen nach Gleichung (3) bestimmt, handelt es sich um einen orthogonalen Versuchsplan, bei dem die Koeffizienten des dazugehörigen Regressionsmodells voneinander unabhängig sind [119].

$$\alpha_z^2 = \frac{1}{2} \left(\sqrt{(2^{k-p} + 2k + n_0) 2^{k-p}} - 2^{k-p} \right) \quad (3)$$

Die verwendeten Faktorstufen sind in Tabelle 8, Tabelle 9, und Tabelle 10 dargestellt. Die Simulationspläne sind in Tabelle 11 und Tabelle 12 zusammengefasst.

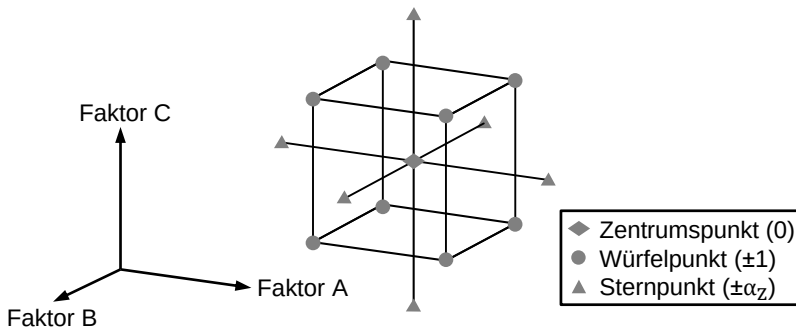


Bild 74: Faktorstufen des Zentral Zusammengesetzten Versuchsplans mit drei Faktoren nach [119]

Tabelle 8: Übersicht der Faktorstufen der Simulationspläne von AA5182, AA6111 und AA5454

Faktor	$-\alpha_Z$	-1	0	1	α_Z
Blechdicke [mm]	1,24	1,306	1,61	1,9148	1,98
Biegewinkel [°]	91	91,089	91,5	91,911	92
Spannrollenabstand [mm]	14	14,354	16	17,646	18

Tabelle 9: Übersicht der Faktorstufen der Simulationspläne CR340LA

Faktor	$-\alpha_Z$	-1	0	1	α_Z
Blechdicke [mm]	0,8	0,956	1,24	1,524	1,68
Biegewinkel [°]	91	91,177	91,5	91,823	92
Spannrollenabstand [mm]	14	14,707	16	17,293	18
E-Modul [GPa]	184,5	191,8	205	218,3	225,5
skalierte Verfestigung [%]	90	93,535	100	106,465	110

Tabelle 10: Übersicht der Faktorstufen der Simulationspläne von CR330Y590T-DP und CR3

Faktor	$-\alpha_Z$	-1	0	1	α_Z
Blechdicke [mm]	0,8	0,878	1,24	1,602	1,68
Biegewinkel [°]	91	91,089	91,5	91,911	92
Spannrollenabstand [mm]	14	14,354	16	17,646	18

Tabelle 11: Simulationspläne (jeweils mit und ohne Umformhistorie) mit Faktorstufen von AA5182, AA6111, AA5454, CR330Y590T-DP und CR3

Simulations- nummer	Blechdicke [mm]	Biegewinkel [°]	Spannrollen- abstand [mm]
1	1	1	1
2	1	1	-1
3	1	-1	1
4	1	-1	-1
5	-1	1	1
6	-1	1	-1
7	-1	-1	1
8	-1	-1	-1
9	α_Z	0	0
10	$-\alpha_Z$	0	0
11	0	α_Z	0
12	0	$-\alpha_Z$	0
13	0	0	α_Z
14	0	0	$-\alpha_Z$
15	0	0	0

Tabelle 12: Simulationspläne (mit und ohne Umformhistorie) mit Faktorstufen von CR340LA

Simulations-nummer	Blech-dicke [mm]	Biege-winkel [°]	Spann-rolle-abstand [mm]	E-Modul [GPa]	skalierte Verfestigung [%]
1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	-1	-1
3	1	1	-1	1	-1
4	1	1	-1	-1	1
5	1	-1	1	1	-1
6	1	-1	1	-1	1
7	1	-1	-1	1	1
8	1	-1	-1	-1	-1
9	-1	1	1	1	-1
10	-1	1	1	-1	1
11	-1	1	-1	1	1
12	-1	1	-1	-1	-1
13	-1	-1	1	1	1
14	-1	-1	1	-1	-1
15	-1	-1	-1	1	-1
16	-1	-1	-1	-1	1
17	α_Z	0	0	0	0
18	$-\alpha_Z$	0	0	0	0
19	0	α_Z	0	0	0
20	0	$-\alpha_Z$	0	0	0
21	0	0	α_Z	0	0
22	0	0	$-\alpha_Z$	0	0
23	0	0	0	α_Z	0
24	0	0	0	$-\alpha_Z$	0
25	0	0	0	0	α_Z
26	0	0	0	0	$-\alpha_Z$
27	0	0	0	0	0

Reihenübersicht

Koordination der Reihe (Stand 2021):

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

Band 4: Karsten Schlüter
Nutzungsgradsteigerung von
Montagesystemen durch den Einsatz
der Simulationstechnik
FAPS, 177 Seiten, 97 Bilder. 1989.
ISBN 3-446-15542-2.

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

Band 6: Rudolf Nuss
Untersuchungen zur Bearbeitungsquali-
tät im Fertigungssystem Laserstrahl-
schneiden
LFT, 206 Seiten, 115 Bilder, 6 Tab. 1989.
ISBN 3-446-15783-2.

Band 7: Wolfgang Scholz
Modell zur datenbankgestützten Planung
automatisierter Montageanlagen
FAPS, 194 Seiten, 89 Bilder. 1989.
ISBN 3-446-15825-1.

Band 8: Hans-Jürgen Wißmeier
Beitrag zur Beurteilung des Bruchverhal-
tens von Hartmetall-Fließpreßmatrizen
LFT, 179 Seiten, 99 Bilder, 9 Tab. 1989.
ISBN 3-446-15921-5.

Band 9: Rainer Eisele
Konzeption und Wirtschaftlichkeit von
Planungssystemen in der Produktion
FAPS, 183 Seiten, 86 Bilder. 1990.
ISBN 3-446-16107-4.

Band 10: Rolf Pfeiffer
Technologisch orientierte
Montageplanung am Beispiel der
Schraubtechnik
FAPS, 216 Seiten, 102 Bilder, 16 Tab. 1990.
ISBN 3-446-16161-9.

Band 11: Herbert Fischer
Verteilte Planungssysteme zur
Flexibilitätssteigerung der
rechnerintegrierten Teilefertigung
FAPS, 201 Seiten, 82 Bilder. 1990.
ISBN 3-446-16105-8.

Band 12: Gerhard Kleineidam
CAD/CAP: Rechnergestützte Montage-
feinplanung
FAPS, 203 Seiten, 107 Bilder. 1990.
ISBN 3-446-16112-0.

Band 13: Frank Vollertsen
Pulvermetallurgische Verarbeitung eines
übereutektoiden verschleißfesten Stahls
LFT, XIII u. 217 Seiten, 67 Bilder, 34 Tab.
1990. ISBN 3-446-16133-3.

Band 14: Stephan Biermann
Untersuchungen zur Anlagen- und
Prozeßdiagnostik für das Schneiden
mit 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 flexib-
len Blechbearbeitungszelle
LFT, 124 Seiten, 41 Bilder, 7 Tab. 1991.
ISBN 3-446-16358-1.

Band 16: Frank Oswald Hake
Entwicklung eines rechnergestützten
Diagnosesystems für automatisierte
Montagezellen
FAPS, XIV u. 166 Seiten, 77 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-16428-6.

Band 17: Herbert Reichel
Optimierung der Werkzeugbereitstellung
durch rechnergestützte
Arbeitsfolgenbestimmung
FAPS, 198 Seiten, 73 Bilder, 2 Tab. 1991.
ISBN 3-446-16453-7.

Band 18: Josef Scheller
Modellierung und Einsatz von
Softwaresystemen für rechnergeführte
Montagezellen
FAPS, 198 Seiten, 65 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-16454-5.

Band 19: Arnold vom Ende
Untersuchungen zum Biegeumforme mit
elastischer Matrize
LFT, 166 Seiten, 55 Bilder, 13 Tab. 1991.
ISBN 3-446-16493-6.

Band 20: Joachim Schmid
Beitrag zum automatisierten Bearbeiten
von Keramikguß mit Industrierobotern
FAPS, XIV u. 176 Seiten, 111 Bilder, 6 Tab.
1991. ISBN 3-446-16560-6.

Band 21: Egon Sommer
Multiprozessorsteuerung für
kooperierende Industrieroboter in
Montagezellen
FAPS, 188 Seiten, 102 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-17062-6.

Band 22: Georg Geyer
Entwicklung problemspezifischer
Verfahrensketten in der Montage
FAPS, 192 Seiten, 112 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-16552-5.

Band 23: Rainer Flohr
Beitrag zur optimalen
Verbindungstechnik in der
Oberflächenmontage (SMT)
FAPS, 186 Seiten, 79 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-16568-1.

Band 24: Alfons Rief
Untersuchungen zur Verfahrensfolge
Laserstrahlschneiden und -schweißen
in der Rohkarosseriefertigung
LFT, VI u. 145 Seiten, 58 Bilder, 5 Tab.
1991. ISBN 3-446-16593-2.

Band 25: Christoph Thim
Rechnerunterstützte Optimierung
von Materialflußstrukturen in der
Elektronikmontage durch Simulation
FAPS, 188 Seiten, 74 Bilder. 1992.
ISBN 3-446-17118-5.

Band 26: Roland Müller
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-Laserstrahlbear-
beitung von Blechformteilen
LFT, 186 Seiten, 92 Bilder, 10 Tab. 1992.
ISBN 3-446-17153-3.

Band 30: Olaf Schrödel
Flexible Werkstattsteuerung mit
objektorientierten Softwarestrukturen
FAPS, 180 Seiten, 84 Bilder. 1992.
ISBN 3-446-17242-4.

Band 31: Hubert Reinisch
Planungs- und Steuerungswerkzeuge zur
impliziten Geräteprogrammierung
in Roboterzellen
FAPS, XI u. 212 Seiten, 112 Bilder. 1992.
ISBN 3-446-17380-3.

Band 32: Brigitte Bärnreuther
Ein Beitrag zur Bewertung des Kommuni-
kationsverhaltens von Automatisierungs-
geräten in flexiblen Produktionszellen
FAPS, XI u. 179 Seiten, 71 Bilder. 1992.
ISBN 3-446-17451-6.

Band 33: Joachim Hutfless
Laserstrahlregelung und Optikdiagnostik
in der Strahlführung einer
CO₂-Hochleistungslaseranlage
LFT, 175 Seiten, 70 Bilder, 17 Tab. 1993.
ISBN 3-446-17532-6.

Band 34: Uwe Günzel
Entwicklung und Einsatz eines Simula-
tionsverfahrens für operative und
strategische Probleme der
Produktionsplanung und -steuerung
FAPS, XIV u. 170 Seiten, 66 Bilder, 5 Tab.
1993. ISBN 3-446-17604-7.

Band 35: Bertram Ehmann
Operatives Fertigungscontrolling durch
Optimierung auftragsbezogener Bearbei-
tungsabläufe in der Elektronikfertigung
FAPS, XV u. 167 Seiten, 114 Bilder. 1993.
ISBN 3-446-17658-6.

Band 36: Harald Kolléra
Entwicklung eines benutzerorientierten
Werkstattprogrammiersystems für das
Laserstrahlschneiden
LFT, 129 Seiten, 66 Bilder, 1 Tab. 1993.
ISBN 3-446-17719-1.

Band 37: Stephanie Abels
Modellierung und Optimierung von
Montageanlagen in einem integrierten
Simulationssystem
FAPS, 188 Seiten, 88 Bilder. 1993.
ISBN 3-446-17731-0.

Band 38: Robert Schmidt-Hebbel
Laserstrahlbohren durchflußbestimmen-
der Durchgangslöcher
LFT, 145 Seiten, 63 Bilder, 11 Tab. 1993.
ISBN 3-446-17778-7.

Band 39: Norbert Lutz
Oberflächenfeinbearbeitung
keramischer Werkstoffe mit
XeCl-Excimerlaserstrahlung
LFT, 187 Seiten, 98 Bilder, 29 Tab. 1994.
ISBN 3-446-17970-4.

Band 40: Konrad Grampp
Rechnerunterstützung bei Test und
Schulung an Steuerungssoftware von
SMD-Bestücklinien
FAPS, 178 Seiten, 88 Bilder. 1995.
ISBN 3-446-18173-3.

Band 41: Martin Koch
Wissensbasierte Unterstützung der
Angebotsbearbeitung in der
Investitionsgüterindustrie
FAPS, 169 Seiten, 68 Bilder. 1995.
ISBN 3-446-18174-1.

Band 42: Armin Gropp
Anlagen- und Prozeßdiagnostik beim
Schneiden mit einem gepulsten
Nd:YAG-Laser
LFT, 160 Seiten, 88 Bilder, 7 Tab. 1995.
ISBN 3-446-18241-1.

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

Band 44: Armin Rothhaupt
Modulares Planungssystem zur
Optimierung der Elektronikfertigung
FAPS, 180 Seiten, 101 Bilder. 1995.
ISBN 3-446-18307-8.

Band 45: Bernd Zöllner
Adaptive Diagnose in der
Elektronikproduktion
FAPS, 195 Seiten, 74 Bilder, 3 Tab. 1995.
ISBN 3-446-18308-6.

Band 46: Bodo Vormann
Beitrag zur automatisierten
Handhabungsplanung komplexer
Blechbiegeteile
LFT, 126 Seiten, 89 Bilder, 3 Tab. 1995.
ISBN 3-446-18345-0.

Band 47: Peter Schnepf
Zielkostenorientierte Montageplanung
FAPS, 144 Seiten, 75 Bilder. 1995.
ISBN 3-446-18397-3.

Band 48: Rainer Klotzbücher
Konzept zur rechnerintegrierten
Materialversorgung in flexiblen
Fertigungssystemen
FAPS, 156 Seiten, 62 Bilder. 1995.
ISBN 3-446-18412-0.

Band 49: Wolfgang Greska
Wissensbasierte Analyse und
Klassifizierung von Blechteilen
LFT, 144 Seiten, 96 Bilder. 1995.
ISBN 3-446-18462-7.

Band 50: Jörg Franke
Integrierte Entwicklung neuer
Produkt- und Produktionstechnologien
für räumliche spritzgegossene
Schaltungsträger (3-D MID)
FAPS, 196 Seiten, 86 Bilder, 4 Tab. 1995.
ISBN 3-446-18448-1.

Band 51: Franz-Josef Zeller
Sensorplanung und schnelle
Sensorregelung für Industrieroboter
FAPS, 190 Seiten, 102 Bilder, 9 Tab. 1995.
ISBN 3-446-18601-8.

Band 52: Michael Solvie
Zeitbehandlung und
Multimedia-Unterstützung in
Feldkommunikationssystemen
FAPS, 200 Seiten, 87 Bilder, 35 Tab. 1996.
ISBN 3-446-18607-7.

Band 53: Robert Hopperdietzel
Reengineering in der Elektro- und
Elektronikindustrie
FAPS, 180 Seiten, 109 Bilder, 1 Tab. 1996.
ISBN 3-87525-070-2.

Band 54: Thomas Rebhahn
Beitrag zur Mikromaterialbearbeitung
mit Excimerlasern - Systemkomponenten
und Verfahrensoptimierungen
LFT, 148 Seiten, 61 Bilder, 10 Tab. 1996.
ISBN 3-87525-075-3.

Band 55: Henning Hanebuth
Laserstrahlhartlöten mit
Zweistrahlschweißtechnik
LFT, 157 Seiten, 58 Bilder, 11 Tab. 1996.
ISBN 3-87525-074-5.

Band 56: Uwe Schönherr
Steuerung und Sensordatenintegration
für flexible Fertigungszellen mit
kooperierenden Robotern
FAPS, 188 Seiten, 116 Bilder, 3 Tab. 1996.
ISBN 3-87525-076-1.

Band 57: Stefan Holzer
Berührungslose Formgebung mit
Laserstrahlung
LFT, 162 Seiten, 69 Bilder, 11 Tab. 1996.
ISBN 3-87525-079-6.

Band 58: Markus Schultz
Fertigungsqualität beim
3D-Laserstrahlschweißen von
Blechformteilen
LFT, 165 Seiten, 88 Bilder, 9 Tab. 1997.
ISBN 3-87525-080-X.

Band 59: Thomas Krebs
Integration elektromechanischer
CA-Anwendungen über einem
STEP-Produktmodell
FAPS, 198 Seiten, 58 Bilder, 8 Tab. 1997.
ISBN 3-87525-081-8.

Band 60: Jürgen Sturm
Prozeßintegrierte Qualitätssicherung
in der Elektronikproduktion
FAPS, 167 Seiten, 112 Bilder, 5 Tab. 1997.
ISBN 3-87525-082-6.

Band 61: Andreas Brand
Prozesse und Systeme zur Bestückung
räumlicher elektronischer Baugruppen
(3D-MID)
FAPS, 182 Seiten, 100 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-087-7.

Band 62: Michael Kauf
Regelung der Laserstrahlleistung und
der Fokusparameter einer
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
Spulenwickeln
FAPS, 186 Seiten, 125 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-092-3.

Band 68: Frank Backes
Technologieorientierte Bahnplanung
für die 3D-Laserstrahlbearbeitung
LFT, 138 Seiten, 71 Bilder, 2 Tab. 1997.
ISBN 3-87525-093-1.

Band 69: Jürgen Kraus
Laserstrahlumformen von Profilen
LFT, 137 Seiten, 72 Bilder, 8 Tab. 1997.
ISBN 3-87525-094-X.

Band 70: Norbert Neubauer
Adaptive Strahlführungen für
CO₂-Laseranlagen
LFT, 120 Seiten, 50 Bilder, 3 Tab. 1997.
ISBN 3-87525-095-8.

Band 71: Michael Steber
Prozeßoptimierter Betrieb flexibler
Schraubstationen in der
automatisierten Montage
FAPS, 168 Seiten, 78 Bilder, 3 Tab. 1997.
ISBN 3-87525-096-6.

Band 72: Markus Pfestorf
Funktionale 3D-Oberflächenkenngrößen
in der Umformtechnik
LFT, 162 Seiten, 84 Bilder, 15 Tab. 1997.
ISBN 3-87525-097-4.

Band 73: Volker Franke

Integrierte Planung und Konstruktion von Werkzeugen für die Biegebearbeitung

LFT, 143 Seiten, 81 Bilder. 1998.

ISBN 3-87525-098-2.

Band 74: Herbert Scheller

Automatisierte Demontagesysteme und recyclinggerechte Produktgestaltung elektronischer Baugruppen

FAPS, 184 Seiten, 104 Bilder, 17 Tab. 1998.

ISBN 3-87525-099-0.

Band 75: Arthur 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 Fokusslage 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
Lebensdauervorhersage für Werkzeuge
der Kaltmassivumformung
LFT, 134 Seiten, 44 Bilder, 15 Tab. 2000.
ISBN 3-87525-136-9.

Band 101: Wolfgang Schlögl
Integriertes Simulationsdaten-Manage-
ment 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 Integra-
tion neuer Bauelementetechnologien in
die Flachbaugruppenfertigung
FAPS, 161 Seiten, 99 Bilder, 10 Tab. 2001.
ISBN 3-87525-151-2.

Band 113: Marcus Reichenberger
Eigenschaften und Einsatzmöglichkeiten
alternativer Elektroniklote in der
Oberflächenmontage (SMT)
FAPS, 165 Seiten, 97 Bilder, 18 Tab. 2001.
ISBN 3-87525-152-0.

Band 114: Alexander Huber
Justieren vormontierter Systeme mit dem
Nd:YAG-Laser unter Einsatz von Aktoren
LFT, 122 Seiten, 58 Bilder, 5 Tab. 2001.
ISBN 3-87525-153-9.

Band 115: Sami Krimi
Analyse und Optimierung von Montage-
systemen in der Elektronikproduktion
FAPS, 155 Seiten, 88 Bilder, 3 Tab. 2001.
ISBN 3-87525-157-1.

Band 116: Marion Merklein
Laserstrahlumformen von
Aluminiumwerkstoffen - Beeinflussung
der Mikrostruktur und der mechanischen
Eigenschaften
LFT, 122 Seiten, 65 Bilder, 15 Tab. 2001.
ISBN 3-87525-156-3.

Band 117: Thomas Collisi
Ein informationslogistisches
Architekturkonzept zur Akquisition
simulationsrelevanter Daten
FAPS, 181 Seiten, 105 Bilder, 7 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-164-4.

Band 118: Markus Koch
Rationalisierung und ergonomische
Optimierung im Innenausbau durch
den Einsatz moderner
Automatisierungstechnik
FAPS, 176 Seiten, 98 Bilder, 9 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-165-2.

Band 119: Michael Schmidt
Prozeßregelung für das Laserstrahl-
Punktschweißen in der Elektronikpro-
duktion
LFT, 152 Seiten, 71 Bilder, 3 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-166-0.

Band 120: Nicolas Tiesler
Grundlegende Untersuchungen zum
Fließpressen metallischer Kleinstteile
LFT, 126 Seiten, 78 Bilder, 12 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-175-X.

Band 121: Lars Pursche
Methoden zur technologieorientierten
Programmierung für die
3D-Lasermikrobearbeitung
LFT, 111 Seiten, 39 Bilder, 0 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-183-0.

Band 122: Jan-Oliver Brassel
Prozeßkontrolle beim
Laserstrahl-Mikroschweißen
LFT, 148 Seiten, 72 Bilder, 12 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-181-4.

Band 123: Mark Geisel
Prozeßkontrolle und -steuerung beim
Laserstrahlschweißen mit den Methoden
der nichtlinearen Dynamik
LFT, 135 Seiten, 46 Bilder, 2 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-180-6.

Band 124: Gerd Eßer
Laserstrahlunterstützte Erzeugung
metallischer Leiterstrukturen auf
Thermoplastsubstraten für die
MID-Technik
LFT, 148 Seiten, 60 Bilder, 6 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-171-7.

Band 125: Marc Fleckenstein
Qualität laserstrahl-gefügter
Mikroverbindungen elektronischer
Kontakte
LFT, 159 Seiten, 77 Bilder, 7 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-170-9.

Band 126: Stefan Kaufmann
Grundlegende Untersuchungen zum
Nd:YAG- Laserstrahlfügen von Silizium
für Komponenten der Optoelektronik
LFT, 159 Seiten, 100 Bilder, 6 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-172-5.

Band 127: Thomas Fröhlich
Simultanes Löten von Anschlußkontak-
ten elektronischer Bauelemente mit
Diodenlaserstrahlung
LFT, 143 Seiten, 75 Bilder, 6 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-186-5.

Band 128: Achim Hofmann
Erweiterung der Formgebungsgrenzen
beim Umformen von
Aluminiumwerkstoffen durch den Ein-
satz prozessangepasster Platinen
LFT, 113 Seiten, 58 Bilder, 4 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-182-2.

Band 129: Ingo Kriebitzsch
3 - D MID Technologie in der
Automobilelektronik
FAPS, 129 Seiten, 102 Bilder, 10 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-169-5.

Band 130: Thomas Pohl
Fertigungsqualität und Umformbarkeit
laserstrahlgeschweißter Formplatinen
aus Aluminiumlegierungen
LFT, 133 Seiten, 93 Bilder, 12 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-173-3.

Band 131: Matthias Wenk
Entwicklung eines konfigurierbaren
Steuerungssystems für die flexible
Sensorführung von Industrierobotern
FAPS, 167 Seiten, 85 Bilder, 1 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-174-1.

Band 132: Matthias Negendanck
Neue Sensorik und Aktorik für
Bearbeitungsköpfe zum
Laserstrahlschweißen
LFT, 116 Seiten, 60 Bilder, 14 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-184-9.

Band 133: Oliver Kreis
Integrierte Fertigung - Verfahrensin-
tegration durch Innenhochdruck-Umfor-
men, Trennen und Laserstrahlschweißen
in einem Werkzeug sowie ihre tele- und
multimediale Präsentation
LFT, 167 Seiten, 90 Bilder, 43 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-176-8.

Band 134: Stefan Trautner
Technische Umsetzung produktbezoge-
ner Instrumente der Umweltpolitik bei
Elektro- und Elektronikgeräten
FAPS, 179 Seiten, 92 Bilder, 11 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-177-6.

Band 135: Roland Meier
Strategien für einen produktorientierten
Einsatz räumlicher spritzgegossener
Schaltungsträger (3-D MID)
FAPS, 155 Seiten, 88 Bilder, 14 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-178-4.

Band 136: Jürgen Wunderlich
Kostensimulation - Simulationsbasierte
Wirtschaftlichkeitsregelung komplexer
Produktionssysteme
FAPS, 202 Seiten, 119 Bilder, 17 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-179-2.

Band 137: Stefan Novotny
Innenhochdruck-Umformen von Blechen
aus Aluminium- und Magnesiumlegie-
rungen bei erhöhter Temperatur
LFT, 132 Seiten, 82 Bilder, 6 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-185-7.

Band 138: Andreas Licha
Flexible Montageautomatisierung zur
Komplettmontage flächenhafter Produkt-
strukturen durch kooperierende
Industrieroboter
FAPS, 158 Seiten, 87 Bilder, 8 Tab. 2003.
ISBN 3-87525-189-X.

Band 139: Michael Eisenbarth
Beitrag zur Optimierung der Aufbau- und
Verbindungstechnik für mechatronische
Baugruppen
FAPS, 207 Seiten, 141 Bilder, 9 Tab. 2003.
ISBN 3-87525-190-3.

Band 140: Frank Christoph
Durchgängige simulationsgestützte
Planung von Fertigungseinrichtungen der
Elektronikproduktion
FAPS, 187 Seiten, 107 Bilder, 9 Tab. 2003.
ISBN 3-87525-191-1.

Band 141: Hinnerk Hagenah
Simulationsbasierte Bestimmung der
zu erwartenden Maßhaltigkeit für das
Blechbiegen
LFT, 131 Seiten, 36 Bilder, 26 Tab. 2003.
ISBN 3-87525-192-X.

Band 142: Ralf Eckstein
Scherschneiden und Biegen metallischer
Kleinstteile - Materialeinfluss und
Materialverhalten
LFT, 148 Seiten, 71 Bilder, 19 Tab. 2003.
ISBN 3-87525-193-8.

Band 143: Frank H. Meyer-Pittroff
Excimerlaserstrahlbiegen dünner
metallischer Folien mit homogener
Lichtlinie
LFT, 138 Seiten, 60 Bilder, 16 Tab. 2003.
ISBN 3-87525-196-2.

Band 144: Andreas Kach
Rechnergestützte Anpassung von
Laserstrahlschneidbahnen
an Bauteilabweichungen
LFT, 139 Seiten, 69 Bilder, 11 Tab. 2004.
ISBN 3-87525-197-0.

Band 145: Stefan Hierl
System- und Prozeßtechnik für das
simultane Löten mit Diodenlaserstrah-
lung von elektronischen Bauelementen
LFT, 124 Seiten, 66 Bilder, 4 Tab. 2004.
ISBN 3-87525-198-9.

Band 146: Thomas Neudecker
Tribologische Eigenschaften keramischer
Blechumformwerkzeuge- Einfluss einer
Oberflächenendbearbeitung mittels
Excimerlaserstrahlung
LFT, 166 Seiten, 75 Bilder, 26 Tab. 2004.
ISBN 3-87525-200-4.

Band 147: Ulrich Wenger
Prozessoptimierung in der Wickeltechnik
durch innovative maschinenbauliche und
regelungstechnische Ansätze
FAPS, 132 Seiten, 88 Bilder, 0 Tab. 2004.
ISBN 3-87525-203-9.

Band 148: Stefan Slama
Effizienzsteigerung in der Montage durch
marktorientierte Montagestrukturen und
erweiterte Mitarbeiterkompetenz
FAPS, 188 Seiten, 125 Bilder, 0 Tab. 2004.
ISBN 3-87525-204-7.

Band 149: Thomas Wurm
Laserstrahljustieren mittels Aktoren-Ent-
wicklung von Konzepten und Methoden
für die rechnerunterstützte Modellierung
und Optimierung von komplexen
Aktorsystemen in der Mikrotechnik
LFT, 122 Seiten, 51 Bilder, 9 Tab. 2004.
ISBN 3-87525-206-3.

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

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

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

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

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

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

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

Band 157: Markus Meiler
Großserientauglichkeit trockenschmier-
stoffbeschichteter Aluminiumbleche im
Presswerk Grundlegende Untersuchun-
gen zur Tribologie, zum Umformverhal-
ten und Bauteilversuche
LFT, 104 Seiten, 57 Bilder, 21 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-221-7.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Band 171: Martin 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 bleifreie Mechatronik-Anwendungen
FAPS, 177 Seiten, 148 Bilder, 24 Tab. 2006.
ISBN 978-3-87525-246-0.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Band 197: Thomas Bigl
Entwicklung, angepasste 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 Rührreibschweißen metallischer
Werkstoffe
LFT, 179 Seiten, 104 Bilder, 36 Tab. 2008.
ISBN 978-3-87525-282-8.

Band 200: Jürgen Lechler
Beschreibung und Modellierung
des Werkstoffverhaltens von
presshärtbaren Bor-Manganstählen
LFT, 154 Seiten, 75 Bilder, 12 Tab. 2009.
ISBN 978-3-87525-286-6.

Band 201: Andreas Blankl
Untersuchungen zur Erhöhung der
Prozessrobustheit bei der Innenhoch-
druck-Umformung von flächigen Halb-
zeugen mit vor- bzw. nachgeschalteten
Laserstrahlfügeoperationen
LFT, 120 Seiten, 68 Bilder, 9 Tab. 2009.
ISBN 978-3-87525-287-3.

Band 202: Andreas Schaller
Modellierung eines nachfrageorientierten
Produktionskonzeptes für mobile
Telekommunikationsgeräte
FAPS, 120 Seiten, 79 Bilder, 0 Tab. 2009.
ISBN 978-3-87525-289-7.

Band 203: Claudius Schimpf
Optimierung von Zuverlässigkeitsunter-
suchungen, Prüfabläufen und Nachar-
beitsprozessen in der Elektronikproduk-
tion
FAPS, 162 Seiten, 90 Bilder, 14 Tab. 2009.
ISBN 978-3-87525-290-3.

Band 204: Simon Dietrich
Sensoriken zur Schwerpunktslagebestim-
mung der optischen Prozessemissionen
beim Laserstrahl-tiefschweißen
LFT, 138 Seiten, 70 Bilder, 5 Tab. 2009.
ISBN 978-3-87525-292-7.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Band 241: Karl-Heinz Leitz
Mikro- und Nanostrukturierung mit kurz
und ultrakurz gepulster Laserstrahlung
LPT, 154 Seiten, 71 Bilder, 9 Tab. 2013.
ISBN 978-3-87525-355-9.

Band 242: Markus Michl
Webbasierte Ansätze zur ganzheitlichen
technischen Diagnose
FAPS, 182 Seiten, 62 Bilder, 20 Tab. 2013.
ISBN 978-3-87525-356-6.

Band 243: Vera Sturm
Einfluss von Chargenschwankungen
auf die Verarbeitungsgrenzen von
Stahlwerkstoffen
LFT, 113 Seiten, 58 Bilder, 9 Tab. 2013.
ISBN 978-3-87525-357-3.

Band 244: Christian Neudel
Mikrostrukturelle und mechanisch-
technologische Eigenschaften
widerstandspunktgeschweißter
Aluminium-Stahl-Verbindungen für
den Fahrzeugbau
LFT, 178 Seiten, 171 Bilder, 31 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-358-0.

Band 245: Anja Neumann
Konzept zur Beherrschung der
Prozessschwankungen im Presswerk
LFT, 162 Seiten, 68 Bilder, 15 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-360-3.

Band 246: Ulf-Hermann Quentin
Laserbasierte Nanostrukturierung mit
optisch positionierten Mikrolinsen
LPT, 137 Seiten, 89 Bilder, 6 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-361-0.

Band 247: Erik Lamprecht
Der Einfluss der Fertigungsverfahren
auf die Wirbelstromverluste von
Stator-Einzelzahnblechpaketen für
den Einsatz in Hybrid- und Elektrofahr-
zeugen
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 Karosseriebau-
teile 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 Prozess
simulation von Biegeumform- und Falz-
verfahren
LFT, 171 Seiten, 90 Bilder, 5 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-365-8.

Band 251: Alexander Kühl
Flexible Automatisierung der
Statorenmontage mit Hilfe einer
universellen ambidexteren Kinematik
FAPS, 142 Seiten, 60 Bilder, 26 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-367-2.

Band 252: Thomas Albrecht
Optimierte Fertigungstechnologien
für Rotoren getriebeintegrierter
PM-Synchronmotoren von
Hybridfahrzeugen
FAPS, 198 Seiten, 130 Bilder, 38 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-368-9.

Band 253: Florian Risch
Planning and Production Concepts for
Contactless Power Transfer Systems for
Electric Vehicles
FAPS, 185 Seiten, 125 Bilder, 13 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-369-6.

Band 254: Markus Weigl
Laserstrahlschweißen von Mischverbindungen aus austenitischen und ferritischen korrosionsbeständigen Stahlwerkstoffen
LPT, 184 Seiten, 110 Bilder, 6 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-370-2.

Band 255: Johannes Noneder
Beanspruchungserfassung für die Validierung von FE-Modellen zur Auslegung von Massivumformwerkzeugen
LFT, 161 Seiten, 65 Bilder, 14 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-371-9.

Band 256: Andreas Reinhardt
Ressourceneffiziente Prozess- und Produktionstechnologie für flexible Schaltungsträger
FAPS, 123 Seiten, 69 Bilder, 19 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-373-3.

Band 257: Tobias Schmuck
Ein Beitrag zur effizienten Gestaltung globaler Produktions- und Logistiknetzwerke mittels Simulation
FAPS, 151 Seiten, 74 Bilder. 2014.
ISBN 978-3-87525-374-0.

Band 258: Bernd Eichenhüller
Untersuchungen der Effekte und Wechselwirkungen charakteristischer Einflussgrößen auf das Umformverhalten bei Mikroumformprozessen
LFT, 127 Seiten, 29 Bilder, 9 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-375-7.

Band 259: Felix Lütteke
Vielseitiges autonomes Transportsystem basierend auf Weltmodellerstellung mittels Datenfusion von Deckenkameras und Fahrzeugsensoren
FAPS, 152 Seiten, 54 Bilder, 20 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-376-4.

Band 260: Martin Grüner
Hochdruck-Blechumformung mit formlos festen Stoffen als Wirkmedium
LFT, 144 Seiten, 66 Bilder, 29 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-379-5.

Band 261: Christian Brock
Analyse und Regelung des Laserstrahl-tiefschweißprozesses durch Detektion der Metaldampffackelposition
LPT, 126 Seiten, 65 Bilder, 3 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-380-1.

Band 262: Peter Vatter
Sensitivitätsanalyse des 3-Rollen-Schubbiegens auf Basis der Finite Elemente Methode
LFT, 145 Seiten, 57 Bilder, 26 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-381-8.

Band 263: Florian Klämpfl
Planung von Laserbestrahlungen durch simulationsbasierte Optimierung
LPT, 169 Seiten, 78 Bilder, 32 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-384-9.

Band 264: Matthias Domke
Transiente physikalische Mechanismen
bei der Laserablation von dünnen
Metallschichten
LPT, 133 Seiten, 43 Bilder, 3 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-385-6.

Band 265: Johannes Götz
Community-basierte Optimierung des
Anlagenengineerings
FAPS, 177 Seiten, 80 Bilder, 30 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-386-3.

Band 266: Hung Nguyen
Qualifizierung des Potentials von
Verfestigungseffekten zur Erweiterung
des Umformvermögens aushärtbarer
Aluminiumlegierungen
LFT, 137 Seiten, 57 Bilder, 16 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-387-0.

Band 267: Andreas Kuppert
Erweiterung und Verbesserung von Ver-
suchs- und Auswertetechniken für die
Bestimmung von Grenzformänderungs-
kurven
LFT, 138 Seiten, 82 Bilder, 2 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-388-7.

Band 268: Kathleen Klaus
Erstellung eines Werkstofforientierten
Fertigungsprozessfensters zur Steigerung
des Formgebungsvermögens von Alumi-
niumlegierungen unter Anwendung einer
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 beschichte-
ter Kaltmassivumformwerkzeuge
LFT, 164 Seiten, 55 Bilder, 11 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-393-1.

Band 271: Matthäus Brela
Untersuchung von Magnetfeld-Messme-
thoden zur ganzheitlichen Wertschöp-
fungsoptimierung und Fehlerdetektion
an magnetischen Aktoren
FAPS, 170 Seiten, 97 Bilder, 4 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-394-8.

Band 272: Michael Wieland
Entwicklung einer Methode zur Prognose
adhäsiven Verschleißes an Werkzeugen
für das direkte Presshärten
LFT, 156 Seiten, 84 Bilder, 9 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-395-5.

Band 273: René Schramm
Strukturierte additive Metallisierung
durch kaltaktives
Atmosphärendruckplasma
FAPS, 136 Seiten, 62 Bilder, 15 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-396-2.

Band 274: Michael Lechner
Herstellung beanspruchungsangepasster
Aluminiumblechhalbzeuge durch
eine maßgeschneiderte Variation der
Abkühlgeschwindigkeit nach
Lösungsglühen
LFT, 136 Seiten, 62 Bilder, 15 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-397-9.

Band 275: Kolja Andreas
Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit
auf das Werkzeugeinsatzverhalten beim
Kaltfließpressen
LFT, 169 Seiten, 76 Bilder, 4 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-398-6.

Band 276: Marcus Baum
Laser Consolidation of ITO Nanoparticles
for the Generation of Thin Conductive
Layers on Transparent Substrates
LPT, 158 Seiten, 75 Bilder, 3 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-399-3.

Band 277: Thomas Schneider
Umformtechnische Herstellung
dünnwandiger Funktionsbauteile
aus Feinblech durch Verfahren der
Blechmassivumformung
LFT, 188 Seiten, 95 Bilder, 7 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-401-3.

Band 278: Jochen Merhof
Sematische Modellierung automatisierter
Produktionssysteme zur Verbesserung
der IT-Integration zwischen Anlagen-
Engineering und Steuerungsebene
FAPS, 157 Seiten, 88 Bilder, 8 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-402-0.

Band 279: Fabian Zöller
Erarbeitung von Grundlagen zur
Abbildung des tribologischen Systems
in der Umformsimulation
LFT, 126 Seiten, 51 Bilder, 3 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-403-7.

Band 280: Christian Hezler
Einsatz technologischer Versuche zur
Erweiterung der Versagensvorhersage
bei Karosseriebauteilen aus höchstfesten
Stählen
LFT, 147 Seiten, 63 Bilder, 44 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-404-4.

Band 281: Jochen Böning
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 Unternehmenscontrol-
lings um die Dimension Energie
FAPS, 164 Seiten, 82 Bilder, 29 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-410-5.

Band 287: Johannes Koch
Grundlegende Untersuchungen zur
Herstellung zyklisch-symmetrischer
Bauteile mit Nebenformelementen durch
Blechmassivumformung
LFT, 125 Seiten, 49 Bilder, 17 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-411-2.

Band 288: Hans Ulrich Vierzigmann
Beitrag zur Untersuchung der
tribologischen Bedingungen in der
Blechmassivumformung - Bereitstellung
von tribologischen Modellversuchen und
Realisierung von Tailored Surfaces
LFT, 174 Seiten, 102 Bilder, 34 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-412-9.

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

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

Band 291: Christian Roos
Remote-Laserstrahlschweißen verzinkter
Stahlbleche in Kehlnahtgeometrie
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
Großorientaugliche Nadelwickeltechnik
für verteilte Wicklungen im
Anwendungsfall der E-Traktionsantriebe
FAPS, 239 Seiten, 147 Bilder, 20 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-425-9.

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

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

Band 301: Tobias Laumer
Erzeugung von thermoplastischen
Werkstoffverbunden mittels simultanem,
intensitätsselektivem
Laserstrahlschmelzen
LPT, 140 Seiten, 82 Bilder, 0 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-428-0.

Band 302: Nora Unger
Untersuchung einer thermisch unter-
stützten Fertigungskette zur Herstellung
umgeformter Bauteile aus der höherfes-
ten Aluminiumlegierung EN AW-7020
LFT, 142 Seiten, 53 Bilder, 8 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-429-7.

Band 303: Tommaso Stellin
Design of Manufacturing Processes for
the Cold Bulk Forming of Small Metal
Components from Metal Strip
LFT, 146 Seiten, 67 Bilder, 7 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-430-3.

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

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

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

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

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

Band 309: Martin Müller
Untersuchung des kombinierten Trenn-
und Umformprozesses beim Fügen art-
ungleicher Werkstoffe mittels
Schneidclinchverfahren
LFT, xi u. 149 Seiten, 89 Bilder, 6 Tab.
2018. ISBN: 978-3-96147-135-5.

Band 310: Christopher Kästle
Qualifizierung der Kupfer-Drahtbond-
technologie für integrierte Leistungs-
module in harschen Umgebungs-
bedingungen
FAPS, xii u. 167 Seiten, 70 Bilder, 18 Tab.
2018. ISBN 978-3-96147-145-4.

Band 311: Daniel Vipavc
Eine Simulationsmethode für das
3-Rollen-Schubbiegen
LFT, xiii u. 121 Seiten, 56 Bilder, 17 Tab.
2018. ISBN 978-3-96147-147-8.

Band 312: Christina Ramer
Arbeitsraumüberwachung und autonome
Bahnplanung für ein sicheres und
flexibles Roboter-Assistenzsystem
in der Fertigung
FAPS, xiv u. 188 Seiten, 57 Bilder, 9 Tab.
2018. ISBN 978-3-96147-153-9.

Band 313: Miriam Rauer
Der Einfluss von Poren auf die
Zuverlässigkeit der Lötverbindungen
von Hochleistungs-Leuchtdioden
FAPS, xii u. 209 Seiten, 108 Bilder, 21 Tab.
2018. ISBN 978-3-96147-157-7.

Band 314: Felix Tenner

Kamerabasierte Untersuchungen der Schmelze und Gasströmungen beim Laserstrahlschweißen verzinkter Stahlbleche

LPT, xxiii u. 184 Seiten, 94 Bilder, 7 Tab.
2018. ISBN 978-3-96147-160-7.

Band 315: Aarief Syed-Khaja

Diffusion Soldering for High-temperature Packaging of Power Electronics

FAPS, x u. 202 Seiten, 144 Bilder, 32 Tab.
2018. ISBN 978-3-87525-162-1.

Band 316: Adam Schaub

Grundlagenwissenschaftliche Untersuchung der kombinierten Prozesskette aus Umformen und Additive Fertigung

LFT, xi u. 192 Seiten, 72 Bilder, 27 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-166-9.

Band 317: Daniel Gröbel

Herstellung von Nebenformelementen unterschiedlicher Geometrie an Blechen mittels Fließpressverfahren der Blechmassivumformung

LFT, x u. 165 Seiten, 96 Bilder, 13 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-168-3.

Band 318: Philipp Hildenbrand

Entwicklung einer Methodik zur Herstellung von Tailored Blanks mit definierten Halbzeugeigenschaften durch einen Taumelprozess

LFT, ix u. 153 Seiten, 77 Bilder, 4 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-174-4.

Band 319: Tobias Konrad

Simulative Auslegung der Spann- und Fixierkonzepte im Karosserierohrbau: 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 Wärme-
behandlungssimulation
LFT, xiv u. 189 Seiten, 75 Bilder, 32 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-209-3.

Band 326: Tobias Gnihl
Modellbasierte Prozesskettenabbildung
rührreibgeschweißter Aluminium-
halbzeuge 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 Aluminiumblechwerk-
stoffen mit ultrafeinkörnigem Gefüge
LFT, ix u. 160 Seiten, 88 Bilder, 14 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-227-7.

Band 329: Stefan Landkammer
Grundsatzuntersuchungen, mathemati-
sche Modellierung und Ableitung einer
Auslegungsmethodik für Gelenkantriebe
nach dem Spinnenbeinprinzip
LFT, xii u. 200 Seiten, 83 Bilder, 13 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-229-1.

Band 330: Stephan Rapp
Pump-Probe-Ellipsometrie zur Messung
transienter optischer Materialeigen-
schaften bei der Ultrakurzpuls-Laser-
materialbearbeitung
LPT, xi u. 143 Seiten, 49 Bilder, 2 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-235-2.

Band 331: Michael Scholz
Intralogs 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 Kon-
text 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 laserdirekt-
strukturierter mechatronisch integrierter
Baugruppen (LDS-MID)
FAPS, ix u. 152 Seiten, 69 Bilder, 12 Tab.
2019. ISBN: 978-3-96147-252-9.

Band 335: Hans Fleischmann
Modellbasierte Zustands- und Prozess-
überwachung auf Basis sozio-cyber-phy-
sischer Systeme
FAPS, xi u. 214 Seiten, 111 Bilder, 18 Tab.
2019. ISBN: 978-3-96147-256-7.

Band 336: Markus Michalski
Grundlegende Untersuchungen zum
Prozess- und Werkstoffverhalten bei
schwingungsüberlagerter Umformung
LFT, xii u. 197 Seiten, 93 Bilder, 11 Tab.
2019. ISBN: 978-3-96147-270-3.

Band 337: Markus Brandmeier
Ganzheitliches ontologiebasiertes
Wissensmanagement im Umfeld der
industriellen Produktion
FAPS, xi u. 255 Seiten, 77 Bilder, 33 Tab.
2020. ISBN: 978-3-96147-275-8.

Band 338: Stephan Purr
Datenerfassung für die Anwendung
lernender Algorithmen bei der Herstel-
lung von Blechformteilen
LFT, ix u. 165 Seiten, 48 Bilder, 4 Tab.
2020. ISBN: 978-3-96147-281-9.

Band 339: Christoph Kiener
Kaltfließpressen von gerad- und schräg-
verzahnten 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 Heißscrimpprozesses
FAPS, xix u. 204 Seiten, 91 Bilder, 27 Tab.
2020. ISBN 978-3-96147-293-2.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Band 352: Jürgen Herrmann
Kumulatives Walzplattieren. Bewertung der Umformeigenschaften mehrlagiger Blechwerkstoffe der ausscheidungshärtbaren 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-Sup-
ported 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 Entwick-
lung einer Auswertemethodik zur Ver-
schleißcharakterisierung im Presshär-
teprozess
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 Auto-
matisierungslösungen
FAPS, xxiv u. 195 Seiten, 108 Bilder, 25
Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-410-3.

Band 365: Daniel Gross
Untersuchungen zur kohlenstoffdioxid-
basierten kryogenen Minimalmengen-
schmierung
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 Werk-
zeugbau 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 Temperatur-
verhaltens 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 fokusabstandsmodulierte 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 Oberflächenmikrostrukturen 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 and 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 Kordaß
Lasergestütztes Verfahren zur selektiven Metallisierung von epoxidharzbasierten Duromeren zur Steigerung der Integrationsdichte für dreidimensionale mechanische 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 abweichungsbehaftete 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 Hilfsfügeelementen - 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. 2022. ISBN 978-3-96147-498-1.

Abstract

The use of pneumatically actuated clamping rolls attached to welding robots enables an increase in flexibility in remote laser welding in the Body in White shop. The design of the clamping forces, the joining devices and the component tolerances suitable for production represent a challenge. In this work, the clamping and joining process of remote laser welding with a clamping roll was investigated. The investigation was carried out by experiments and simulations with sheet metal parts made of steel and aluminum, as well as for cast aluminum components. For the simulative investigation, validated finite element simulation models were developed, which represent the use of a flexible clamping roll in the Body in White shop for the first time. The simulation models enable the calculation of clamping processes in three ways: displacement-controlled with complete specification of the roll movement, force-controlled with specification of the clamping force progress and force-regulated with specification of the desired resultant joint gaps. Based on the investigations, process- and component-related solutions for reducing the required clamping forces and the resultant joint gaps were identified and a fundamental process understanding for the novel manufacturing process was developed.

Der Einsatz von an Schweißrobotern angebrachten, pneumatisch betätigten Spannrollen ermöglicht eine Steigerung der Flexibilität beim Remote-Laserstrahlschweißen im Karosseriebau. Dabei stellen die Auslegung der Spannkräfte, der Fügevorrichtungen und der fertigungsgerechten Bauteiltoleranzen eine Herausforderung dar. Im Rahmen dieser Arbeit wurde der Spann- und Fügeprozess des Remote-Laserstrahlschweißens mit Einsatz einer Spannrolle untersucht. Die Untersuchung erfolgte experimentell und simulativ für Blechformteile aus Stahl und Aluminium sowie für Aluminiumgussbauteile. Zur simulativen Untersuchung wurden validierte Finite-Elemente Simulationsmodelle erarbeitet, die erstmalig den Einsatz einer flexiblen Spannrolle im Karosseriebau abbilden. Die Simulationsmodelle ermöglichen die Berechnung von Spannprozessen auf drei Arten: weggesteuert mit vollständiger Vorgabe der Rollenbewegung, kraftgesteuert mit Vorgabe eines Spannkraftverlaufs und kraftgeregelt mit Vorgabe gewünschter resultierender Fügespalte. Auf Basis der Untersuchungen wurden prozess- und bauteilseitige Maßnahmen zur Reduktion erforderlicher Spannkräfte und resultierender Fügespalte identifiziert und ein grundlegendes Prozessverständnis für den neuartigen Fertigungsprozess aufgebaut.

