

Tobias Kloska

**Leichtbaupotenziale im Fahrwerk –  
Multi-Material-Design durch simultane  
Umformung von Metallblechen und  
Urformung von langfaserverstärkten  
Thermoplasten (LFT)**

**Leichtbaupotenziale im Fahrwerk –  
Multi-Material-Design durch simultane Umformung von  
Metallblechen und Urformung von langfaserverstärkten  
Thermoplasten (LFT)**

Tobias Kloska



**Siegener Schriftenreihe Automobiltechnik**  
Hrsg. von Xiangfan Fang

Band 4

# Leichtbaupotenziale im Fahrwerk – Multi-Material-Design durch simultane Umformung von Metallblechen und Urformung von langfaserverstärkten Thermoplasten (LFT)

Von der Naturwissenschaftlich - Technischen Fakultät  
der Universität Siegen  
zur Erlangung des Grades eines Doktors  
der Ingenieurwissenschaften  
genehmigte Dissertation

vorgelegt von  
Dipl.-Ing. Tobias Kloska

Tag der mündlichen Prüfung:	02. Dezember 2019
Betreuer u. erster Gutachter:	Professor Dr.-Ing. Xiangfan Fang
Zweiter Gutachter:	Professor Dr.-Ing. Dietmar Drummer, Universität Erlangen-Nürnberg

## **Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

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

## **Impressum**

### **Herausgeber:**

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Xiangfan Fang  
Lehrstuhl für Fahrzeugleichtbau  
Universität Siegen  
Breite Straße 11  
57076 Siegen  
Telefon: +49 271 740 2384  
Fax: +49 271 740 3786  
E-Mail: [info.flb@uni-siegen.de](mailto:info.flb@uni-siegen.de)

### **Druck:**

Uni Print, Universität Siegen

Siegen 2020: universi – Universitätsverlag Siegen  
[www.uni-siegen.de/universi](http://www.uni-siegen.de/universi)

Gedruckt auf alterungsbeständigem holz- und säurefreiem Papier.

**ISSN: 2568-0374 (Siegener Schriftenreihe Automobiltechnik)**

**ISBN: 978-3-96182-056-6**

Die Publikation erscheint unter der  
Creative Commons Lizenz CC-BY-SA



## **Vorwort**

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Fahrzeugleichtbau (FLB) der Universität Siegen von 2013 bis 2018.

In erster Linie gilt mein Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. Xiangfan Fang, von dem nicht nur die Grundidee des hier vorgestellten Verfahrens stammt, sondern der mir auch stets mit Rat und Tat zur Seite stand und dem neben der fachlichen auch die persönliche Entwicklung seiner Mitarbeiter am Herzen liegt. Herrn Prof. Dr.-Ing. Dietmar Drummer, der in Funktion als Zweitgutachter viele hilfreiche Anmerkungen gab und zudem ein besonderes Interesse für die Thematik zeigte, gebührt mein besonderer Dank. Den Herren Prof. Dr.-Ing. Claus-Peter Fritzen und apl. Prof. Dr. rer. nat. habil. Vladimir Kobelev danke ich für ihre Bereitschaft, als Mitglieder der Promotionskommission zu fungieren und ebenfalls fachliche Hinweise zu dieser Arbeit beizutragen.

Bedanken möchte ich mich auch bei meinen Arbeitskollegen am FLB, die für ein harmonisches Arbeitsklima gesorgt haben und denen ich auch außerhalb meiner Arbeitszeit in Freundschaft verbunden war und bleiben werde – namentlich hervorheben möchte ich Dr.-Ing. Marco Grote, Daniel Heidrich, Timo Schlichting, Fan Zhang und Petra Kauschke. Meinem langjährigen studentischen Mitarbeiter Julian Lück danke ich für seine umfangreiche Unterstützung bei Versuchen, Simulationen und Auswertungen. Ein Dank gilt auch jenen Studierenden, die im Rahmen von Bachelor- und Masterarbeiten Teilergebnisse zu dieser Arbeit beigetragen haben.

Ein Großteil der Ergebnisse in dieser Arbeit wurden im Rahmen eines vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Verbundprojekts mit dem Namen „MultiForm“ erarbeitet, weshalb an dieser Stelle mein Dank dem BMBF sowie den handelnden Personen beim Projektträger Karlsruhe und allen beteiligten Projektpartnern gebührt. Ohne die aktive Mitarbeit der Firmen Weber Fibertech, voestalpine Automotive Components Schwäbisch Gmünd, SimpaTec und Sprick Technologies wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen. Ebenfalls bedanken möchte ich mich bei den assoziierten Projektpartnern Altair Engineering, Bond-Laminates, Evonik Resource Efficiency und der Volkswagen AG.

Von ganzem Herzen danke ich auch meinen Eltern für den mir ermöglichten Werdegang und die mir vermittelten Werte sowie meiner lieben Frau Kristin für ihre große Liebe, Unterstützung und Geduld zu jeder Zeit.

Netphen-Herzhausen, 2019

*Tobias Kloska*



## Kurzzusammenfassung

Der moderne Fahrzeugbau verfolgt mit den kunden- und marktbezogenen Anforderungen nach Komfort und Sicherheit auf der einen Seite sowie einem möglichst geringen Kraftstoffverbrauch und der Einhaltung von Schadstoffgrenzwerten auf der anderen Seite zwei übergeordnete Ziele. Der werkstoffliche Leichtbau muss als tragende Säule innerhalb der Fahrzeugentwicklung demnach sowohl den Sicherheitsaspekt berücksichtigen als auch zur Reduktion der Fahrzeugmasse und somit zur Verringerung des Kraftstoffverbrauchs bzw. des Schadstoffausstoßes beitragen. Neben der Entwicklung neuer, hochfester und mittels Warmumformung hergestellter Stahlgüten zur Verringerung von Blechdicken sowie Mischbauweisen mit Aluminium und Magnesium werden zunehmend auch faserverstärkte Kunststoffe im Fahrzeugbau eingesetzt. Bei Anwendung dieser sogenannten Multi-Material-Bauweise bis auf Bauteilebene resultiert gleichzeitig ein Bedarf nach wirtschaftlichen und kombinierten Herstellungsverfahren für Kunststoff-Metall-Hybridbauteile.

Die vorliegende Arbeit beschreibt die Entwicklung eines solchen Fertigungsverfahrens namens „Hybridpressen“, welches die Kaltumformung von Stahlblechen mit dem Fließpressen von langfaserverstärkten Thermoplasten in einem simultanen Prozessschritt kombiniert und gleichzeitig beide Werkstoffe durch Einsatz eines Haftvermittlers stoffschlüssig miteinander verbindet. Dazu werden die erforderlichen Werkzeug- und Dichtkonzepte für verschiedene Geometrien erarbeitet, die Verbindungseigenschaften ermittelt sowie relevante Prozessparameter identifiziert und optimiert. Mit Hilfe einer entwickelten Auslegungs- und Optimierungsmethode auf Basis der Finite-Elemente-Methode (FEM) wird es möglich, Stahlbauteile durch Blechdickenreduktion und gleichzeitige Verstärkung mit einer Rippenstruktur aus faserverstärktem Kunststoff bis zu 20 % leichter zu gestalten, ohne dabei einen Verlust in den mechanischen Bauteileigenschaften zu erhalten. Der gesamte Prozess von der Auslegung des Bauteils und Werkzeugs bis zur Fertigung auf Serienanlagen wird anhand eines realen Vorderachs-Querlenkers demonstriert.

## **Abstract**

Modern vehicle construction follows two overriding goals with customer- and market-related requirements for comfort and safety on the one hand and the lowest possible fuel consumption and compliance with emission limits on the other hand. Accordingly, lightweight construction based on materials must, as a supporting pillar within vehicle development, consider both the safety aspect and the reduction of vehicle mass and thus contribute to the reduction of fuel consumption and pollutant emissions. In addition to the development of new, high-strength steel grades produced by hot forming to reduce sheet thicknesses and mixed construction methods with aluminum and magnesium, fiber-reinforced plastics are also increasingly being used. The application of this so-called multi-material construction method down to the component level simultaneously results in a demand for economic and combined manufacturing processes for hybrid components made of plastics and metal.

This work describes the development of such a production process called “hybrid forming”, which combines the cold forming of steel sheets with the compression molding of long fiber reinforced thermoplastics in a simultaneous process step and at the same time connects both materials by using an adhesion promoter. The required tool and sealing concepts for different geometries are developed, the joining properties are determined, and relevant process parameters are identified and optimized. With the aid of a developed design and optimization method based on the finite elements method (FEM), it will be possible to make steel components up to 20% lighter by reducing sheet thickness and simultaneously reinforcing them with a ribbed structure made of fiber-reinforced plastic without losing any of the components’ mechanical properties. The entire process, from the component and tool design to the manufacturing on series production lines, is demonstrated using a real front axle control arm.

# Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung .....	1
1.1	Einführung in die Thematik.....	1
1.2	Zielsetzung und Gliederung der Arbeit .....	2
2	Grundlagen und Stand der Technik.....	5
2.1	Tiefziehen mit Wirkmedien .....	5
2.1.1	Hydromechanische Umformung von Blechen.....	5
2.1.2	Hydromechanische Umformung von Rohren und Profilen .....	9
2.1.3	Blechumformung mit Polymeren als Wirkmedium .....	11
2.2	Kunststoffurformung – Spritzgießen und Fließpressen.....	16
2.2.1	Einfluss der Faserlänge.....	17
2.2.2	Werkzeug- und Anlagentechnik.....	19
2.3	Kombinierte Fertigungsverfahren für Kunststoff-Metall-Hybridbauteile .....	21
2.3.1	Umspritzen von vorgeformten Metallblechen.....	21
2.3.2	Verfahrenskombination Tiefziehen + Spritzgießen .....	22
2.3.3	Tiefziehen + Fließpressen als serielle Verfahren.....	23
2.3.4	Verfahrenskombination Innenhochdruckumformung + Spritzgießen.....	24
2.4	Faserverbundwerkstoffe in Fahrwerkslenkern .....	25
2.4.1	Auslegung von Fahrwerkslenkern .....	25
2.4.2	Optimierungsmethoden mit Hilfe der FEM.....	26
2.4.3	Beispielanwendungen .....	27
2.5	Verbindungstechnik Hybridbauteile .....	30
2.5.1	Direktverbindungen ohne Haftvermittler .....	30
2.5.2	Verbindungen mit polymeren Haftvermittlern.....	31
2.5.3	Lasteinleitungselemente für Metall-FVK-Hybridbauteile .....	33
2.6	Zusammenfassung und Erkenntnisse aus dem Stand der Technik .....	34
3	Verfahren Hybridpressen.....	37
3.1	Grundidee und Prozessbeschreibung .....	37
3.2	Verwendete Anlagentechnik.....	38
3.2.1	Pressentechnologie.....	38
3.2.2	Werkzeugtechnologie.....	39
3.2.3	Infrarotstrahlung.....	39
3.3	Werkstoffeigenschaften.....	40
3.3.1	LFT .....	41
3.3.2	Stahlwerkstoffe.....	43



---

3.3.3	Haftvermittlersystem .....	43
3.3.4	Schmiermittel .....	44
3.4	Verfahrensparameter .....	45
3.5	Prozesssimulation .....	46
3.6	Resultierende Anwendungsgebiete .....	46
4	Werkzeug- und Prozessauslegung .....	47
4.1	Offenes U-Profil – Variante 1 .....	47
4.1.1	Geometrie .....	47
4.1.2	Stempelvarianten .....	48
4.1.3	Ergebnisse .....	49
4.2	Offenes U-Profil – Variante 2 .....	52
4.2.1	Geometrie .....	52
4.2.2	Werkzeug .....	53
4.2.3	Dichtkonzept .....	54
4.2.4	Prozessführung .....	58
4.3	Geschlossenes Profil (Wannengeometrie) .....	60
4.3.1	Geometrie .....	60
4.3.2	Werkzeug .....	61
4.3.3	Dichtkonzept und Prozessführung .....	62
5	Bewertung der Blechumformung .....	67
5.1	U-Profil .....	68
5.1.1	Geometrische Ausformung .....	68
5.1.2	Werkstoffliche Beanspruchung .....	69
5.2	Wannengeometrie .....	71
5.2.1	Geometrische Ausformung .....	71
5.2.2	Werkstoffliche Beanspruchung .....	76
6	Verbindungseigenschaften des Haftvermittlers .....	79
6.1	Zugversuche .....	79
6.1.1	Scherzug-Versuch .....	79
6.1.2	Kopfzug-Versuch .....	81
6.1.3	Schälzug-Versuch .....	82
6.2	Einflüsse auf die Verbindungseigenschaften .....	84
6.2.1	Verbindungsfestigkeit .....	85
6.2.2	Mikroskopie .....	85
7	Methodenentwicklung zur Bauteil实现legung mittels FEM .....	89

---

7.1	Auslegungslastfälle .....	90
7.2	Blechdickenauswahl.....	91
7.3	Dickenoptimierung der LFT-Schicht .....	92
7.4	Optimierung der Rippenstruktur .....	94
7.5	Konstruktion der Rippenstruktur (CAD) .....	96
7.6	Bewertung des hybriden Designs.....	97
7.7	Bewertung der Optimierungsmethode .....	99
8	Auslegung und Fertigung des Demonstrators.....	101
8.1	Bauteilauslegung und Optimierung.....	101
8.1.1	Optimierung der Rippenstruktur .....	102
8.1.2	Spannungen und Gewichtsvergleich .....	103
8.1.3	Versuche zur Fügetechnik.....	105
8.2	Werkzeugauslegung und -optimierung .....	106
8.3	Prozessauslegung.....	108
8.4	Bewertung von Blechumformung und -beanspruchung .....	109
8.4.1	Bewertung der Ausformung.....	109
8.4.2	Mechanische Werkstoffbeanspruchung.....	113
8.5	Beschnitt mittels 3D-Wasserstrahlschneiden.....	115
8.6	Lageranbindung mittels eingepresster Stahlhülse .....	116
8.7	Finales Ergebnis nach dem Beschnitt .....	118
9	Hybridpressen – industrielle Umsetzbarkeit und Relevanz .....	121
9.1	Anlagentechnik.....	121
9.2	Werkzeugtechnik.....	121
9.3	Prozesszeiten.....	122
9.4	Einsatzgebiete.....	123
9.5	Anwender des Verfahrens .....	123
10	Zusammenfassung und Ausblick.....	125
10.1	Zusammenfassung.....	125
10.2	Ausblick.....	126
11	Literaturverzeichnis .....	129
12	Anhang.....	137
12.1	A1: Technische Daten WKP 2000 S (hydraulische Presse).....	137
12.2	A2: Federkennlinien Gasdruckfedern .....	138
12.3	A3: Werkstoffdaten des verwendeten LFTs (PA6-LGF40).....	139
12.4	A4: Spannungen im „lochfreien“ Original-Querlenker aus Kap. 7.1.....	141

---

12.5	A5: Spannungen im optimierten Hybrid-Querlenker aus Kap. 7.6 .....	142
12.6	A6: Spannungen im optimierten Hybrid-Querlenker aus Kap. 8.1 .....	143
12.7	A7: Definition Technology Readiness Level (TRL) nach [109].....	144

# Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

## Abkürzungen

BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i> (numerische Strömungsmechanik)
CFK	kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff
DIN	Deutsche Industrienorm
FEM	Finite-Elemente-Methode
FDS®	<i>Flow Drill Screw</i> (fließlochformende Schraube)
FLB	Lehrstuhl für Fahrzeugleichtbau der Universität Siegen
FLC	<i>Forming Limit Curve</i> (Grenzformänderungskurve)
FLD	<i>Forming Limit Diagram</i> (Grenzformänderungsdiagramm)
FVK	Faserverbundkunststoff
GFK	glasfaserverstärkter Kunststoff
GFxx	Glasfaseranteil in Höhe von xx %
GMT	Glasmattenverstärkte Thermoplaste
HBU	Hochdruckblechumformung
HFH	Hydroform-Hybrid(technologie)
IHB	Innenhochdruck-Blechumformung
IHU	Innenhochdruckumformung
IMA	<i>In-Mold Assembly</i> („Verbinden im Werkzeug“)
IR	Infrarotstrahlung
KTL	Kathodische Tauchlackierung
LDR	<i>Limiting Drawing Ratio</i> (Grenzziehverhältnis)
LFT	Langfaserverstärkter Thermoplast
MLA	Mehrlenkerachse
PA	Polyamid
PIF	<i>Polymer Injection Forming</i> (Blechumformung durch Polymerinjektion)
PMA	<i>Post-Molding Assembly</i> („Verbinden außerhalb des Werkzeugs“)
PMH	Polymer-Metall-Hybrid
pvt	Druck / spezifisches Volumen / Temperatur (-Diagramm)
PP	Polypropylen
PS	Polystyrol
RBE	<i>rigid body element</i> (Starr-Elementtyp in der FEM)

RPS	Referenz-Punkt-System
RT	Raumtemperatur
TPU	thermoplastisches Polyurethan
TRL	<i>Technology Readiness Level</i> (Technologie-Reifegrad)
UD	unidirektional verstärkt
UT	unterer Totpunkt (Punkt der maximalen Werkzeugschließung)

## Symbole

$\beta_{0,max}$	Grenzziehverhältnis
$\dot{\gamma}$	Schergeschwindigkeit [1/s]
$d_0$	Stempeldurchmesser [mm]
$d$	Faserdurchmesser [mm]
$D_0$	Platinen-/Rondendurchmesser [mm]
$l$	Länge bzw. Faserlänge [mm]
$l_c$	Kritische Faserlänge [mm]
$l_n$	Anzahlgewichtete Faserlänge [mm]
$L_{mv}$	Volumengewichtete mittlere Faserlänge [mm]
$\eta$	Viskosität [Ns/m <sup>2</sup> ]
$p_i$	Innendruck [bar]
$R_m$	Zugfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]
$r_{min}$	kleinster Innenradius eines Bauteils [mm]
$\sigma_F$	Faserspannung [N/mm <sup>2</sup> ]
$s_0$	Ausgangsblechdicke [mm]
$\tau, \tau_i$	Schubspannung [N/mm <sup>2</sup> ]

# 1 Einleitung

## 1.1 Einführung in die Thematik

Der automobiler Leichtbau hat in den letzten Jahren durch gestiegene gesetzliche Anforderungen hinsichtlich des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes von Kraftfahrzeugen einerseits, eine allgemeine Schadstoffdiskussion zur Gesundheitsgefährdung vor allem in Großstädten und die fortschreitende Elektrifizierung der Mobilität andererseits sowie nicht zuletzt durch den öffentlich wahrgenommenen „Dieselskandal“ und ungenaue Angaben der Fahrzeughersteller zum Schadstoffausstoß zunehmend an Bedeutung gewonnen. Auch im Hinblick auf die politisch motivierte Förderung der Elektromobilität durch eine Begrenzung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes als Mittelwert aller zugelassenen Fahrzeuge auf einen Wert von 95 g/km CO<sub>2</sub> bis zum Jahr 2021, was einem durchschnittlichen Kraftstoffverbrauch von 3,6 Litern Diesel oder 4,1 l Benzin auf 100 km entspricht [1], sowie der weiteren und vom EU-Parlament beschlossenen Reduzierung um 37,5 % bis zum Jahr 2030 [2] wird deutlich, dass auch in Zukunft nicht auf leichte Fahrzeuge verzichtet werden kann. Gleichzeitig belegen diese Werte, dass die vorgegebenen CO<sub>2</sub>-Ziele nur durch eine signifikante Anzahl an Elektrofahrzeugen zu realisieren sind, wobei der nicht unerhebliche CO<sub>2</sub>-Ausstoß während der Stromerzeugung in der Gesamtrechnung berücksichtigt werden muss.

Der Begriff „Leichtbau“ umfasst die drei Kernbereiche des konstruktiven, werkstofflichen und verfahrenstechnischen Leichtbaus durch neue Fertigungsverfahren. Da die Fahrzeugmasse als Multiplikator in der Berechnung aller Fahrwiderstände außer dem des Luftwiderstands enthalten ist, besteht ein direkter Einfluss auf den Kraftstoffverbrauch und somit den Schadstoffausstoß eines Fahrzeugs. Mit einer Gewichtsreduktion von 100 kg der Gesamtfahrzeugmasse können nach rein physikalischer Berechnung ca. 0,28 l Diesel bzw. 0,35 l Benzin pro 100 km eingespart werden [3]. Nach MENDE [4] gilt bei einem Diesel-Fahrzeug der Kompaktklasse für eine Kraftstoffeinsparung von 0,04 l/100 km das Äquivalent von 1 g/km CO<sub>2</sub>-Reduktion, so dass durch 100 kg Gewicht ca. 7 g/km CO<sub>2</sub> eingespart werden können. Neben der Fahrzeugindustrie ist der Leichtbau auch in der Luftfahrtindustrie allgegenwärtig. Einer Studie von MCKINSEY & COMPANY [5] zufolge wird der weltweite Gesamtmarkt für Leichtbauwerkstoffe in der Fahrzeugtechnik, Luftfahrttechnik und Windenergie für das Jahr 2030 auf 300 Mrd. EUR geschätzt.

Im Bereich des werkstofflichen Leichtbaus liegt das vordergründige Ziel neben dem Einsatz von höher- und höchstfesten Stahllegierungen sowie Verfahren zur Steigerung der Festigkeit bei gleichzeitig guter Umformbarkeit (z.B. Warmumformung) bisher darin, den richtigen Werkstoff an der richtigen Stelle zu vertretbaren Kosten in einer Multi-Material-Bauweise möglichst gewichtssparend einzusetzen. Durch den Einsatz von Stahl, Aluminium und faserverstärkten Kunststoffen in Kombination sollen die positiven Eigenschaften der einzelnen Werkstoffe bestmöglich genutzt und die weniger guten Eigenschaften jeweils durch einen anderen Werkstoff ausgeglichen werden. Infolge dieser Entwicklung treten die Themen Zusammenbau, Füge-technik und Vermeidung von Kontaktkorrosion in den Vordergrund und stellen gleichzeitig eine Hürde zum wirtschaftlichen Leichtbau dar. Genau darin liegt auch der Fokus der aktuellen wissenschaftlichen Forschung begründet, neue und kombinierte Fertigungsverfahren zu entwickeln, die bisher getrennte und etablierte Prozesse durch neue Werkzeug- und Prozesstechnologien miteinander vereinen. Der häufig verwendete Begriff der „Kombinationstechnologie“ wird von BÜRKLE und WOBBE [6] dabei wie folgt definiert: *„Die Kombination mindestens zweier in sich eigenständiger etablierter Technologien zu einem In-Line-Verfahren“*. Insbesondere gilt dies für die Prozesse der Metallumformung und Kunststoffumformung unter Einsatz von haftvermittelnden Substanzen oder formschlüssigen Verbindungen zur Reduzierung von nachträglichen Fügeoperationen.

Diese werkstoffliche Verfahrenskombination einerseits und die Möglichkeit, wirtschaftliche Hybridbauteile aus Stahl und faserverstärktem Kunststoff herzustellen, stellen die Motivation für das patentierte Verfahren namens „Hybridpressen“ dar [7], welches in der vorliegenden Arbeit von der Grundidee her entwickelt und beschrieben wird. Neben der Kaltumformung von Metallblechen wird das Fließpressen von langfaserverstärkten Thermoplasten (LFT) als Kunststoffumformprozess eingesetzt, woraus einige Vorteile gegenüber dem Spritzgießen resultieren (siehe Kap. 2.2). Auf der einen Seite kann eine vergleichbare Anlagen- und Werkzeugtechnik in Form von hydraulischen Pressen und Umformwerkzeugen aus der Metallumformung eingesetzt werden und auf der anderen Seite ergeben sich durch die Verwendung von langen Verstärkungsfasern (25 mm) höhere mechanische Eigenschaften gegenüber kurzfaserverstärkten Spritzgusswerkstoffen. Eine Besonderheit des Verfahrens stellt jedoch die simultane Umformung von Metall und LFT in einem gemeinsamen Umformwerkzeug und durch nur einen Prozessschritt dar, wobei die hohe Viskosität des LFTs im plastifizierten Zustand als eine Art Wirkmedium zur Umformung des Metallblechs genutzt wird. Dieses Prinzip ist aus der hydromechanischen Umformung (z.B. Innenhochdruckumformung) mit wasser- und ölbasierten Medien bekannt und wurde auch bereits durch einen Einsatz von plastifizierten Kunststoffschmelzen belegt (siehe Kap. 2.1.3). Die Verbindung zwischen Metall und LFT wird mit Hilfe eines Haftvermittlers realisiert, der bereits vor Prozessbeginn als Beschichtung auf das Metallblech aufgebracht werden kann. Im Hinblick auf den Leichtbaugedanken ist es im Rahmen der Bauteilauslegung für dieses Verfahren möglich, die Blechdicke eines reinen Stahlbauteils zu reduzieren und durch eine geeignete Verstärkungsstruktur aus LFT so zu gestalten, dass die mechanischen Eigenschaften erhalten bleiben oder sogar in Teilbereichen übertroffen werden. Die aus dem Prozess resultierenden Bauteile weisen eine metallische Oberfläche auf und haben innenseitig eine vollflächige Verstärkungsstruktur aus LFT mit einem Rippendesign. Somit stellt die äußere Blechstruktur sicher, dass im Falle eines LFT-Versagens die Bauteilintegrität erhalten bleibt.

Im automobilen Umfeld gibt es eine Vielzahl von Bauteilen, deren Anforderungen aus der Sichtweise der Fahrzeughersteller nicht ausschließlich durch den Einsatz von faserverstärkten Kunststoffen abgebildet werden können – so z.B. ein gutmütiges Versagensverhalten unter besonderen Lastbedingungen im Fahrwerksbereich. Während bei metallischen Werkstoffen ein bevorstehendes Versagen durch plastische Verformung oder Risse visuell erkennbar wird, versagen faserverstärkte Kunststoffe in der Regel ohne eine vergleichbare Vorankündigung und zumeist katastrophal. Aus diesem Grund gibt es bisher nur wenige Ansätze, faserverstärkte Kunststoffe im Bereich der radführenden Strukturbauteile eines Fahrwerks einzusetzen. Beispielhaft sei der Einsatz einer glasfaserverstärkten Querblattfeder als Teil einer PKW-Hinterachse genannt [8], [9]. Im Bereich der Super-Sportwagen existiert ein Konzept von Lamborghini, auch radführende Lenkerbauteile durch eine gepresste Formmasse aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff zu realisieren [10]. Weitere Beispiele befinden sich zurzeit noch im Forschungsstadium (siehe Kap. 2.4.3).

Aufgrund der zuvor genannten Anforderungen weisen Bauteile im Fahrwerksbereich des Weiteren naturgemäß hohe Blechdicken auf und bieten daher ein hohes Potenzial zur Reduzierung der Blechdicke durch Werkstoffsubstitution und daraus resultierend zu Gewichtseinsparungen.

## 1.2 Zielsetzung und Gliederung der Arbeit

Die simultane Verfahrenskombination von Tiefziehen und LFT-Fließpressen bietet das Potenzial, leichte Hybridbauteile für eine Anwendung im Fahrwerk und im Vergleich zum aktuellen Stand der Technik wirtschaftlicher herzustellen. Das Ziel dieser Arbeit ist es daher, neben der Prozessentwicklung als solches auch die dazugehörigen Werkzeugkonzepte und Auslegungs-

---

methoden zu entwickeln und das Leichtbaupotenzial des Verfahrens anhand eines realen Demonstrators aus dem Fahrwerkbereich aufzuzeigen.

Zu Beginn der Arbeit werden im Stand der Technik zunächst bekannte Verfahren zur Metallblechumformung mit Hilfe von Wirkmedien vorgestellt und die Besonderheiten bei Verwendung eines Polymers als Wirkmedium erläutert. Es folgt eine vergleichende Gegenüberstellung der bekannten Kunststoffurformverfahren Spritzgießen und Fließpressen im Hinblick auf die erzielbaren Faserlängen und somit auch auf die mechanischen Eigenschaften. Anschließend werden verschiedene kombinierte Fertigungsverfahren zur Metallumformung und Kunststoffurformung vorgestellt, die teilweise ebenfalls Kunststoffschmelzen als Wirkmedien nutzen. Des Weiteren werden Ansätze zur Integration von faserverstärkten Kunststoffen aufgezeigt, die im Rahmen von Forschungsprojekten entstanden sind und sowohl als Hybridbauweisen oder reine Kunststoffbauteile realisiert wurden. Den Abschluss des Kapitels bildet eine Übersicht zur Verbindungstechnik für Kunststoff-Metall-Hybridbauteile.

Der Hauptteil beginnt mit einer detaillierten Beschreibung des im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Prozesses Hybridpressen sowie einer Übersicht über die eingesetzten Werkstoffe und verwendete Anlagentechnik. Dazu werden die Kernmerkmale und Einflussparameter des Prozesses vorgestellt. Im darauffolgenden Kapitel 4 liegt ein besonderes Augenmerk auf der Entwicklung von Werkzeugkonzepten für offene (U-Profil) und geschlossene Profile (Wannengeometrie). Bei der Verwendung einer Kunststoffschmelze als Wirkmedium müssen diese Werkzeugkonzepte während des gesamten Prozesses eine vollständige Dichtigkeit gegenüber dem LFT gewährleisten.

In den Kapiteln 5 und 6 werden sowohl die beiden Geometrien U-Profil und Wanne in Bezug auf die Beanspruchungen im Metallblech analysiert als auch die Verbindungseigenschaften zwischen Metall und LFT durch Einsatz des Haftvermittlers anhand von zwei Prüfgeometrien im Scher-, Kopf- und Schälzugversuch ermittelt.

Anhand eines Vorderachs-Querlenkers als Demonstrator wird sowohl die entwickelte Auslegung- und Optimierungsmethode für das Bauteil auf Basis der Finite-Elemente-Methode (FEM) als auch die Entwicklung des entsprechenden Umformwerkzeugs und die Fertigung des Bauteils erörtert. Mit Hilfe der vorgestellten Optimierungsmethode wird zunächst das Design eines realen Stahlbauteils in ein hybrides Design überführt, welches eine deutlich reduzierte Blechdicke gegenüber dem Original-Bauteil aufweist und durch eine innenliegende LFT-Rippenstruktur vergleichbare mechanische Eigenschaften erzielt. Im Anschluss erfolgt ebenfalls eine Analyse der werkstofflichen Beanspruchung des Metallblechs und eine Bewertung der realisierten Umformung.

Den Abschluss der Arbeit bildet eine grundlegende Betrachtung des Verfahrens Hybridpressen im Hinblick auf einen schnellen Zugang zur industriellen Serienfertigung. Hierbei werden vor allem die Kriterien Taktzeit, erforderliche Anlagentechnik und mögliche Anwender thematisiert.





## 2 Grundlagen und Stand der Technik

Der folgende Stand der Technik behandelt neben Umformverfahren für Metallbleche durch Wirkmedien vordergründig verschiedene und teils kombinierte Fertigungsverfahren für hybride Bauteile aus Stahl und Kunststoff, da auch das in dieser Arbeit entwickelte Verfahren namens Hybridpressen ein solches darstellt. In Kapitel 2.4.3 werden zudem verschiedene Ansätze zum Multi-Material-Leichtbau in Fahrwerkbauteilen vorgestellt und zusammenfassend die Motivation zur Entwicklung des Hybridpressens erläutert.

### 2.1 Tiefziehen mit Wirkmedien

Spätestens seit der Entwicklung der hydromechanischen Umformung (siehe Kapitel 2.1.1) ist bekannt, dass Blechwerkstoffe nicht nur durch das Einwirken von Stempel und Matrize, sondern auch mit Hilfe eines aufgebracht hydrostatischen Drucks in Form von flüssigen Wirkmedien umgeformt werden können. Dabei können Druckmedien, zumeist bestehend aus Öl-Wasser-Emulsionen, sowohl als Ersatz für Stempel und Matrize oder auch beides gleichzeitig genutzt werden [11]. Die vorgestellten Verfahren in den Kapiteln 2.1.3 und 2.3.2 verwenden im Gegensatz zu Flüssigkeiten thermoplastische Kunststoffschmelzen als Wirkmedien. Das Fertigungsverfahren „Tiefziehen mit Wirkmedien“ befindet sich in der zweiten Hauptgruppe „Umformen“ der Fertigungsverfahren nach DIN 8580 und ist nach DIN 8584-3 wie folgt eingegliedert:

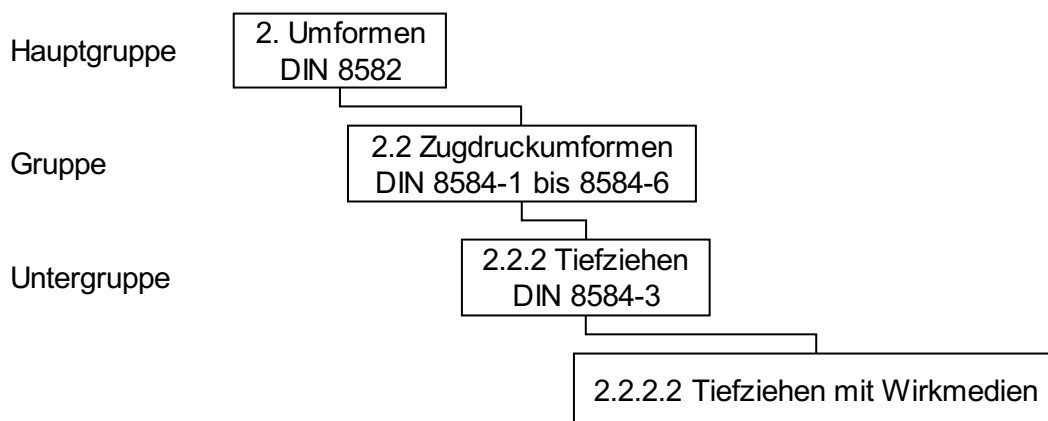


Abbildung 2-1: Einordnung des Tiefziehens mit Wirkmedien als Fertigungsverfahren [11]

Das Tiefziehen mit Flüssigkeiten unter kraftgebundener Wirkung (Druck) kann dabei durch direkten Kontakt oder durch Trennung mittels einer Membran erfolgen. Alternative Verfahren mit formlosen festen Stoffen (z.B. Sand oder Stahlkugeln) stellen lediglich Randerscheinungen dar und werden in dieser Arbeit nicht näher betrachtet.

#### 2.1.1 Hydromechanische Umformung von Blechen

Das grundlegende Prinzip für Umformverfahren auf Basis von Flüssigkeitsdrücken wird in Deutschland erstmals in einem Patent aus dem Jahr 1886 erwähnt, bei dessen beschriebenem Verfahren eine Matrize zur Blechumformung durch eine Flüssigkeit ersetzt werden soll [12]. Die Weiterentwicklung der eigentlichen hydromechanischen Blechumformung beginnt jedoch erst nach dem Zweiten Weltkrieg, als auch die technischen Möglichkeiten zur Regelbarkeit von Drücken und zur Synchronisation mit der kraftgebenden Anlagentechnik in Form von hydraulischen Pressen zur Verfügung stehen [12]. Die ersten Forschungsaktivitäten zu der Thematik entstehen in Deutschland in den 1950er Jahren, wobei erstmals Dichtringe zwischen Blech und Matrize zur Abdichtung eingesetzt werden [13]. Als bedeutende Arbeit dieser Zeit gilt auch jene von

BUERK [14], in dessen Variante des hydromechanischen Tiefziehens die Matrize gegenüber dem konventionellen Tiefziehen durch eine mit Wasser gefüllte Kavität, den sogenannten Wasserkasten, ersetzt wird. Das geschlossene Volumen entsteht dabei zwischen Kavität, dem umzuformenden Blech sowie der Dichtfläche zwischen Blech und einer Kavität, die mittels Niederhaltern und einem umlaufenden Dichtring entsteht. Das zu formende Blech wird zunächst auf den Wasserkasten gelegt und anschließend mit Hilfe der Niederhalter geklemmt. Durch die Stempelbewegung und das Eintauchen in das Fluid wird ein Druck erzeugt, der das Blech mit gleichmäßiger Kraft gegen den Stempel formt. Dabei bildet der Teil des Blechs, der weder zwischen Kavität und Niederhalter geklemmt wird noch bereits am Stempel anliegt, aufgrund des steigenden Fluidpegels eine nach oben gerichtete Sicke (*bead*) aus (siehe Abbildung 2-2). Dieses Phänomen führt gleichzeitig dazu, dass das Blech beim Einzug nicht über den Radius der Kavität gezogen wird, sondern ausgehend von dieser Sicke über den Stempel abrollt. Die Begrenzung des Fluiddrucks wird durch entsprechende Ventile am Wasserkasten gewährleistet.

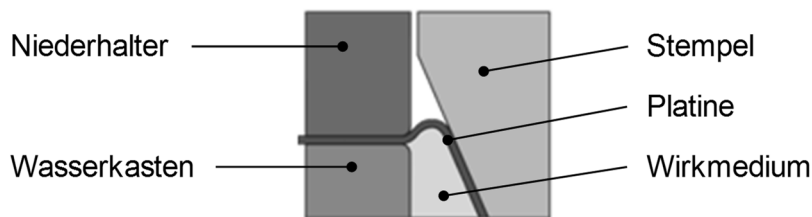


Abbildung 2-2: Einzugsverhalten der Platine am Ziehradius [12]

Untersucht wurden von BUERK [14] ausschließlich konisch zulaufende und zudem rotationsymmetrische Stempelformen. Gegenüber dem Standard-Tiefziehverfahren konnten durch die verbesserten Kraft- und Reibbedingungen höhere Umformgrade bis zu einem geometrischen Verhältnis des Platinen- zu Stempeldurchmessers mit dem Wert von  $\beta=3$  ermittelt werden. Der Kennwert  $\beta$  stellt ein Maß für die maximale Umformbarkeit einer runden Platine dar und wird als Grenzziehverhältnis  $\beta_{0,max}$  oder im Englischen als *limiting drawing ratio* (LDR) bezeichnet. Der Kennwert ist dabei wie folgt definiert [15]:

$$\beta_{0,max} = \frac{D_{0,max}}{d_0} \quad \text{Gleichung 2-1}$$

$d_0$ : Stempeldurchmesser [mm]

$D_{0,max}$ : maximal ohne Versagen ziehbarer Rondendurchmesser [mm]

In der aktuelleren Literatur finden sich Angaben für das Grenzziehverhältnis des konventionellen Tiefziehens von 1,8-2,2 und für das hydromechanische Tiefziehen von 2,6-2,8 [16]. Auf Basis dieses grundlegenden Verfahrens, bei dem die Matrize eines Werkzeugs durch eine Flüssigkeit ersetzt wird, wurden inzwischen eine Vielzahl verschiedener Abwandlungen und Erweiterungen der hydromechanischen Umformung entwickelt, die auch aus Gründen des Patentschutzes und zur Abgrenzung mit Eigennamen belegt wurden. Während im Englischen hauptsächlich der Begriff *Hydroforming* verwendet wird [12], sind auch die folgenden Bezeichnungen gebräuchlich [13]: „Hydromec“, „Tiefziehen mit hydraulischem Gegendruck“, „hydraulisches Tiefen“ oder „Hydro-Umformen“. Des Weiteren nutzen einige der genannten Verfahren eine flexible Elastomer-Membran zwischen Blechplatine und dem Wirkmedium, um einerseits den direkten Kontakt zum Wirkmedium zu vermeiden und um andererseits scharfe Kanten oder Hinterschnitte formen zu können [17].

Insgesamt lassen sich die verschiedenen Verfahren jedoch nach ihrer Wirkungsweise und nach jenem Bauteil des Werkzeugs unterscheiden, welches durch ein Wirkmedium ersetzt werden soll (Stempel, Matrize oder Niederhalter). Im Folgenden werden beispielhaft zwei Verfahren im Detail beschrieben, bei denen im ersten Fall die Matrize und im zweiten Fall der Stempel durch ein Wirkmedium ersetzt wird, da dies ein Hauptunterscheidungsmerk darstellt. Verfahren mit flüssigkeitsgesteuerter Niederhalterfunktion sind selten und werden daher nicht thematisiert.

Wie bereits oben beschrieben, wird beim hydromechanischen Tiefziehen durch Stempelkontakt die zu formende Blechplatte direkt auf dem vollständig mit Wirkmedium gefüllten Wasserkasten platziert (siehe [Abbildung 2-3](#)). Im zweiten Schritt werden die Niederhalter zugefahren und mit einer Kraft beaufschlagt, die einerseits die Dichtigkeit gegenüber dem Wirkmedium gewährleistet und andererseits noch ein Nachfließen der Blechplatte in die Kavität ermöglicht. Die Blechumformung beginnt, sobald der erste Teil des Stempels die Flüssigkeitslinie (Füllstand) überschreitet und somit ein passiver Aufbau des Innendrucks  $p_i$  innerhalb der Kavität entsteht. Durch das weitere Eintauchen des Stempels steigt der Druck bis auf einen gewünschten Sollwert (bis zu  $>1.000$  bar, vgl. Kap. 2.1.2) an und wird danach über ein Auslassventil mit angeschlossenen Proportional-, Servo- oder Druckbegrenzungsventil bis zum Ende des Umformprozesses gesteuert [16]. Bei der hier dargestellten Anordnung muss die verwendete Presse doppelwirkend ausgeführt sein, also zwei unabhängige Bewegungen von Niederhalter und Stempel ermöglichen.

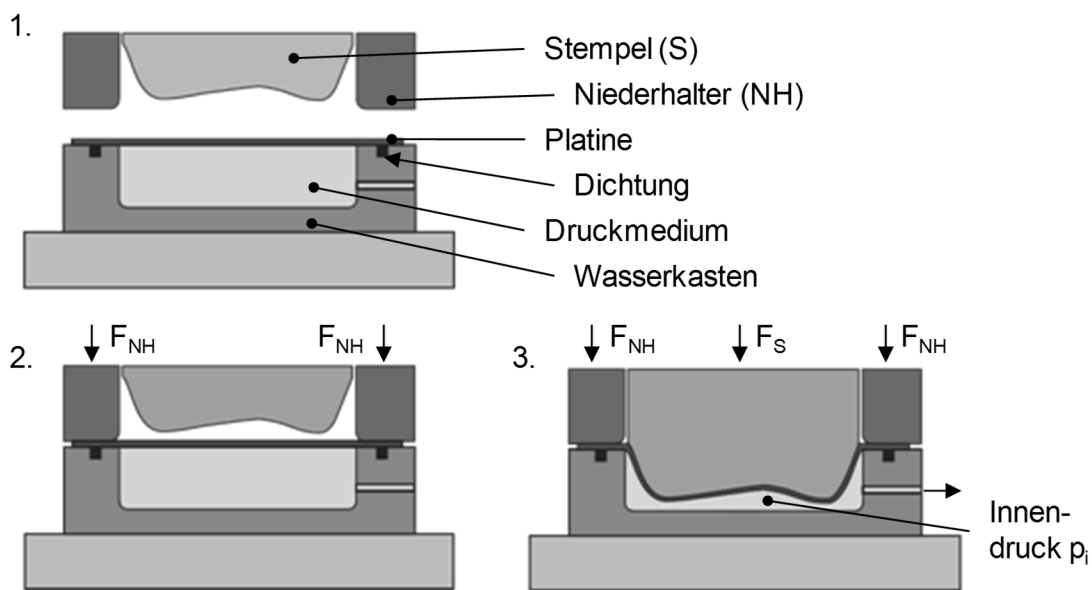


Abbildung 2-3: Umformvorgang des „Hydromec“-Verfahrens [12]

Eine Abwandlung des gezeigten Verfahrens stellt auch das sogenannte „aktive hydromechanische Tiefziehen“ dar, bei dem das Blech zunächst entgegen der Stempelbewegung rein durch einen Druckaufbau des Wirkmediums und somit zunächst entgegen der eigentlichen Ziehrichtung vorgeformt wird ([Abbildung 2-4](#)). Dieser Schritt erfolgt zeitlich zwischen den Einzelschritten 2. und 3. aus [Abbildung 2-3](#). Das aktive hydromechanische Tiefziehen verfolgt dabei zwei wesentliche Ziele. Einerseits kann bei sehr großen Platinen (z.B. für Motorhauben) eine höhere Formänderung erreicht und somit die Formstabilität des Bauteils nach der Umformung erhöht werden und andererseits wird durch die nahezu reibungsfreie Vorformung ohne Stempelkontakt bereits eine gleichmäßige Ausdünnung der Platine erzielt, die bei der eigentlichen Umformung in Ziehrichtung zu einer reduzierten Ausdünnung im Randbereich und somit zu einer verringerten Rissneigung führt [12].

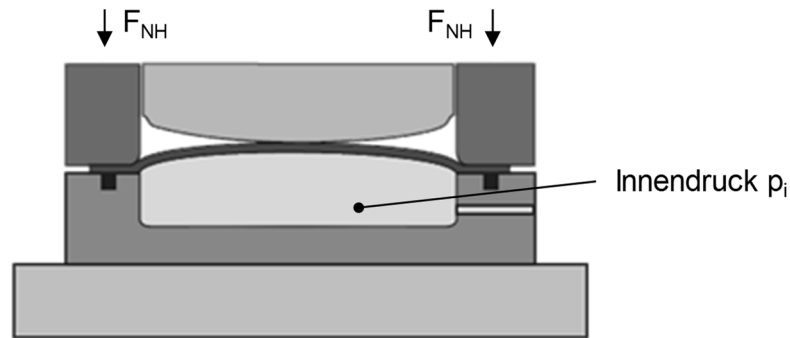


Abbildung 2-4: Zwischenschritt des aktiven hydromechanischen Tiefziehens [12]

Verfahren, bei denen das Wirkmedium den Ziehstempel des Werkzeugs ersetzt, werden als „Hochdruckblechumformung“ (HBU) oder „Innenhochdruck-Blechumformung“ (IHB) bezeichnet, da das Blech von „innen“ heraus geformt und die finale Bauteilkontur rein von der Matrizenform bestimmt wird. Der dazugehörige Verfahrensablauf ist in [Abbildung 2-5](#) dargestellt. Im Vergleich zum hydromechanischen Tiefziehen kann die Blechplatte nach Aufbringen des Innendrucks zunächst frei verformen bzw. sich aufweiten, bevor mit fortschreitendem Füllprozess ein erster Kontakt zur formgebenden Matrize entsteht. Im Gegensatz zum hydromechanischen Tiefziehen ist die bis zur vollständigen Ausformung entstehende Reibung zwischen Blechplatte und Matrize somit als nachteilig anzusehen [12]. Ein Nachfließen des Blechs in die Kavität erfolgt nicht.

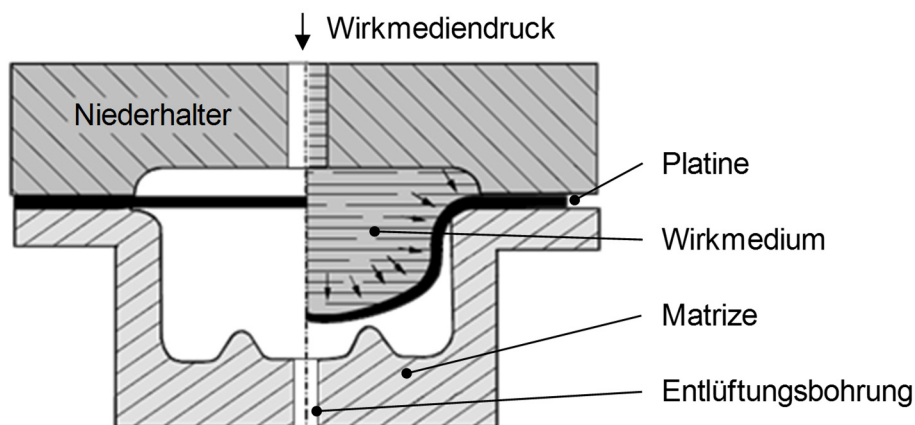


Abbildung 2-5: Prinzip der Hochdruckblechumformung [15]

SIEGERT ET AL. [18] beschreiben zwei zusätzliche Verfahrenserweiterungen für das hydromechanische Tiefziehen und die Innenhochdruck-Blechumformung, die neben der reinen Umformung durch den Wirkmediendruck einen weiteren, vorgeschalteten Prozessschritt des konventionellen Tiefziehens integrieren. Der Vorteil dieser kombinierten Verfahren ist das kontrollierte Einzugsverhalten der Blechplatten vom konventionellen Tiefziehen her ohne den zusätzlichen Einsatz eines deutlich aufwändigeren Dichtkonzepts der hydromechanischen Umformung.

Zusammenfassend ergeben sich durch die Anwendung der hydromechanischen Umformung gegenüber dem konventionellen Tiefziehen folgende Vorteile [15] [16] [17]:

- Höhere Grenzziehverhältnisse bzw. größere Ziehtiefen
- Geringere Werkzeugkosten, da entweder Stempel oder Matrize ersetzt werden
- Höhere Beulsteifigkeit der Bauteile durch Kaltverfestigungen
- Umformung unterschiedlicher Blechwerkstoffe und -dicken in einem Werkzeug

- Geringere Reibung zwischen Stempel / Blech / Matrize durch Einsatz eines Wirkmediums → höhere Umformgrade mit verbesserter Oberflächenqualität erzielbar
- Reduzierte Anzahl von Ziehstufen bei komplexen Bauteilgeometrien

Demgegenüber stehen folgende Nachteile [15] [17]:

- Höhere Zykluszeiten im Vergleich zu einem Standard-Tiefziehprozess
- Verwendung hoher Wirkmediendrucke zur Ausformung von feinen Konturen
- Pressen mit höherer maximaler Presskraft als für eine reine Blechumformung erforderlich wäre, da zusätzlich der Flüssigkeitsdruck kompensiert werden muss
- Aufwändige Dichtkonzepte und umlaufende Flanschflächen an jedem Bauteil

Als Anwendungsgebiete der hydromechanischen Umformung haben sich sowohl die Automobil- als auch die Luftfahrtindustrie etabliert. Im Automobilbereich lassen sich vier Bereiche mit hoher Eignung für die hydromechanische Umformung definieren, wobei die beiden letztgenannten rein der Umformung von Rohren und Profilen (siehe nächster Abschnitt) zuzuordnen sind: Blechbauteile (z.B. Hauben und Klappen), Struktur- und Karosseriebauteile, Fahrwerkbauteile und Abgasbauteile (z.B. 3D-Strukturen) [12].

### 2.1.2 Hydromechanische Umformung von Rohren und Profilen

Die hydromechanische Umformung von Rohren oder stranggepressten Profilen wird als „Innenhochdruckumformen (IHU)“ bezeichnet und unterscheidet zwei Verfahrensvarianten: mit und ohne Einsatz von Axialkräften. Die Wirkungsweise der Axialkräfte ist dabei vergleichbar mit dem Nachfließen beim konventionellen Tiefziehen und resultiert somit in höheren Umformgeschwindigkeiten [18]. Das Verfahren wird vor allem für hohlförmige Bauteile mit komplexer Geometrie angewendet, die ansonsten nur schwer durch andere umformtechnische Verfahren und mit einem zusätzlichen fügetechnischen Aufwand herzustellen wären [19]. Im Vergleich zu den in Kapitel 2.1.1 beschriebenen Verfahren müssen bei der Innenhochdruckumformung beide Werkzeughälften des geteilten Werkzeugs die Kontur des finalen Bauteils aufweisen und zu Beginn des Prozesses bereits vollständig geschlossen sein. Zusätzlich können die Werkzeuge aktive Formelemente enthalten, die über integrierte steuer- oder regelbare Achsen bewegt werden müssen.

Der Prozessablauf des Innenhochdruckumformens mit Axialkräften bzw. mit Axialbewegung ist in der nachfolgenden Abbildung 2-6 am Beispiel der Formung eines rohrförmigen T-Profils dargestellt. Im ersten Schritt erfolgt das Einfüllen des Wirkmediums durch die offenen Enden des Rohres / Profils durch mindestens einen der beiden Axialstempel, die zugleich auch die Abdichtung gewährleisten. Nach der vollständigen Füllung des Ausgangshalbzeugs wird der zur Umformung erforderliche Druck aufgebracht und es werden simultan die Axialstempel ins Werkzeug geführt. Im vierten Schritt, auch als „Kalibrierung“ bezeichnet, erfolgt die Aufbringung des zulässigen Maximaldrucks bis zur finalen Ausformung des T-Profils. Diese Phase wird ohne eine weitere Bewegung der Axialstempel oder des Gegenhaltestempels ausgeführt, so dass die weitere Ausformung allein aus der Blechdicke durch Ausdünnung resultiert. Die Höhe des erforderlichen Kalibrierungsdrucks kann dabei nach Gleichung 2-2 berechnet werden.

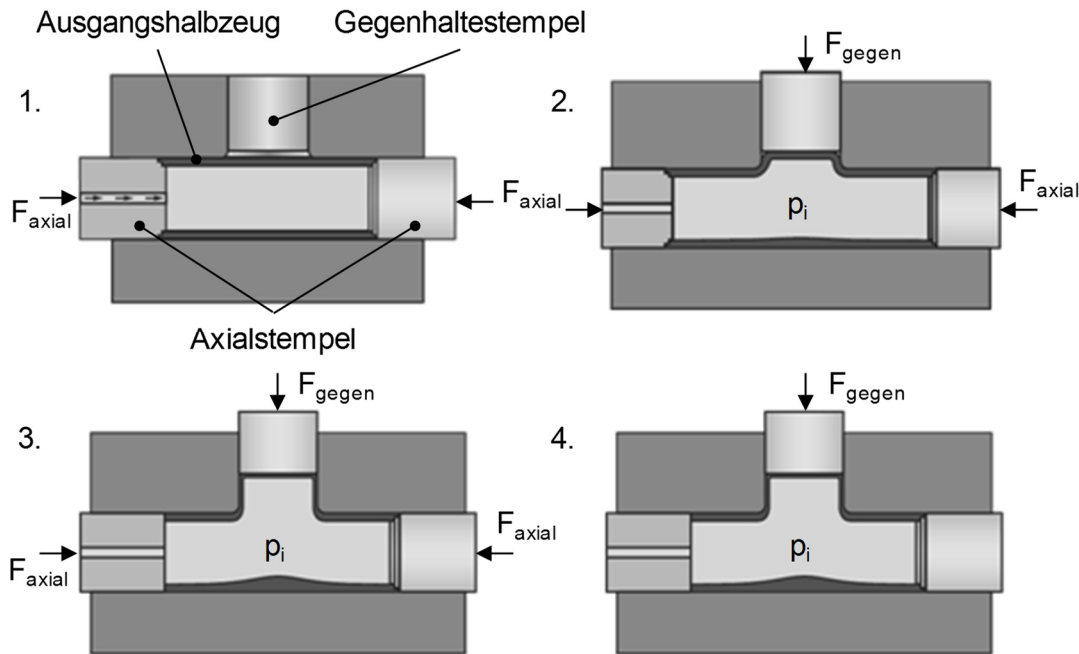


Abbildung 2-6: Prozessablauf des Innenhochdruckumformens [12]

Zusammenfassend weisen IHU-geformte Bauteile gegenüber anderen Fertigungsverfahren folgende positive Eigenschaften auf [15] [17] [19]:

- geringeres Gewicht durch hohe Kaltverfestigung und weniger Einzelteile
- Darstellung komplexer Geometrien und lokaler Wanddickenunterschiede
- verbesserte Struktursteifigkeit durch geschlossene und variable Querschnitte
- genauere Bauteiltoleranzen aufgrund reduzierter Rückfederung

Besondere Relevanz in allen hydromechanischen Umformprozessen hat der einzustellende Innendruck  $p_i$ , der maßgeblich für die vollständige Ausformung der Platinen verantwortlich ist. Dieser hängt von der eingesetzten Werkstoffgüte in Form der Fließspannung bzw. der Zugfestigkeit  $R_m$ , dem kleinsten zu formenden Radius  $r_{min}$  sowie der Blechdicke der Platine bzw. des rohrförmigen Halbzeugs ab. Da häufig großflächige Bauteile mit Hilfe der hydromechanischen Umformung geformt werden und durch die physikalische Beziehung Kraft = Druck x Fläche ein direkter Einfluss auf die erforderliche Schließkraft der verwendeten hydraulischen Presse besteht, sollte der Innendruck möglichst unter 1.000 bar liegen, wobei die wirtschaftliche Grenze laut NEUGEBAUER [12] etwa bei 2.500 bar anzusehen ist.

$$p_i = \frac{2 \cdot s_0 \cdot R_m}{\left(r_{min} - \frac{s_0}{2}\right)} \cdot 10 [\text{bar}]$$

Gleichung 2-2

- $p_i$ : Innendruck [bar]  
 $R_m$ : Zugfestigkeit [N/mm<sup>2</sup>]  
 $r_{min}$ : kleinster Innenradius des Bauteils [mm]  
 $s_0$ : Ausgangsblechdicke [mm]

Aus der Beziehung aller genannten Parameter in Gleichung 2-2 geht hervor, dass der kleinste Bauteilradius  $r_{min}$  im Nenner einen signifikanten Einfluss auf den erforderlichen Innendruck  $p_i$  hat und somit möglichst groß gewählt werden sollte. Nach NEUGEBAUER [12] beträgt die untere Grenze für den kleinsten Bauteilradius mindestens das 1,5-fache der Ausgangsblechdicke  $s_0$ .

Um jedoch die Gefahr einer unzureichenden Ausformung und einhergehend die Notwendigkeit einer zusätzlichen konventionellen Ziehstufe zu vermeiden, wird als Richtwert das 10-fache der Ausgangsblechdicke empfohlen:

$$r_{min} \geq 10 \cdot s_0 \quad \text{Gleichung 2-3}$$

Aus den zuvor genannten Vorteilen des Innenhochdruckumformens lassen sich auch die Anwendungsgebiete in der Automobilindustrie ableiten. Neben medienführenden Rohren, wie z.B. im Abgassystem, sind dies vor allem Strukturbauteile in der Karosserie (Längs- und Querträger), Leiterrahmen von SUVs und leichten LKWs sowie Fahrwerkanwendungen. Die nachfolgende Abbildung 2-7 zeigt einen aus mehreren IHU-geformten Bauteilen gefertigten Vorderachs-Hilfsrahmen der Firma Magna für das Chrysler-Modell C300:

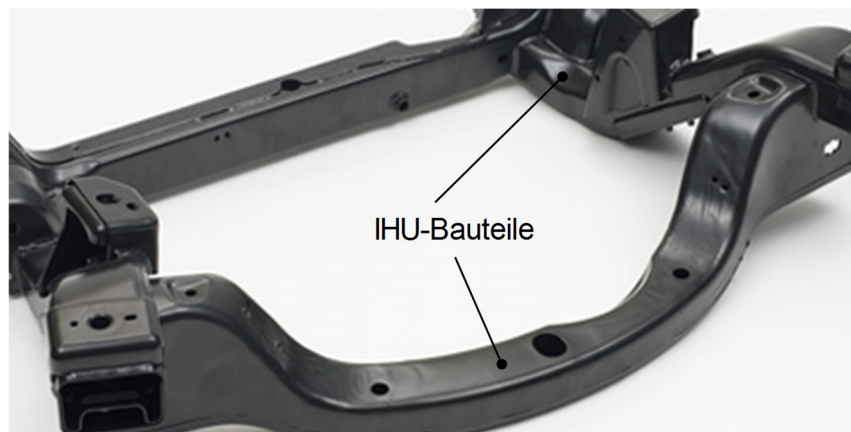


Abbildung 2-7: Mittels IHU hergestellter Vorderachs-Hilfsrahmen des Chrysler 300C [20]

### 2.1.3 Blechumformung mit Polymeren als Wirkmedium

Anstelle von Wasser und Öl können auch thermoplastische Kunststoffschmelzen zur Umformung von Metallblechen eingesetzt werden. Dieses Vorgehen wird erstmals im Jahr 2001 durch die Verwendung des Schmelzedrucks von Polystyrol (PS) zur Umformung von Zink-Aluminium-Blechen durch YANG und PARNG [21] beschrieben. Die dort verwendete Blechdicke von 0,1-0,3 mm ist jedoch eher den Metallfolien als reinen Strukturblechen zuzuordnen. AL-SHEYYAB und EHRENSTEIN [22] haben das Einbringen von Sicken in Aluminium- und Magnesiumbleche der Blechdicke 1,5 mm im Spritzgießprozess fortgeführt. Neben dem zur Verfügung stehenden Spritzgießdruck von „einigen Hundert Bar“ werden vorausschauend auch die positiven Eigenschaften der Werkstoffkombination hinsichtlich ähnlicher Wärmeausdehnungskoeffizienten von Aluminium und Standardthermoplasten (z.B. Polyamid 6 mit 30 % Glasfaserverstärkung, PA6-GF30) hervorgehoben. RAUSCHER [23] bezeichnet die Formgebung von Metallblechen durch Kunststoffschmelzen als *Polymer Injection Forming* (PIF) und hat die Einflüsse von Wirkmediendruck, Schmelztemperatur, Volumenstrom und Viskosität der Schmelze auf die Ausformung von sogenannten „Höckerblechen“ (DC04-Stahl 0,4 mm) untersucht. Weitere Grundlagenversuche zur Umformung von Blechen aus einem Kaltumformstahl (DC04) und Al99,5 (beide 1,0 mm) durch Einsatz einer Polypropylen-Schmelze (PP) bei 260 °C Schmelztemperatur werden von HUSSAIN ET AL. [24] beschrieben. Hierbei wird sowohl eine Napf- als auch eine Domgeometrie mit einem Durchmesser von jeweils 56 mm durch Einspritzen der PP-Schmelze in einem Spritzgießprozess geformt und die Ausformung im Anschluss anhand von Konturschnitten überprüft. Die eingesetzten Drücke betragen im Fall der freien Umformung (Domgeo-



metrie) beim Aluminiumblech 240 bar und beim DC04-Blech 550 bar. Für die Napfgeometrie wird der Druck sogar auf 1.220 und 1.550 bar erhöht, wobei gleichzeitig das Einspritzvolumen für die Umformung des Stahlblechs um ca. 16 % erhöht werden muss, um die Kompressibilität der PP-Schmelze auszugleichen [24].

Die nachfolgende Tabelle fasst die Probenformen (schematisch), Werkstoffe und Prozessparameter der zuvor genannten Arbeiten zusammen – fehlende Maßangaben sind in den Veröffentlichungen nicht explizit genannt:

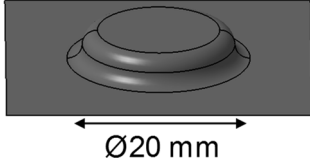
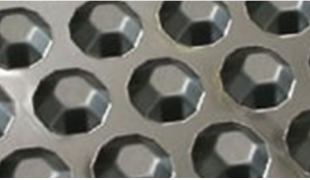
Autor/-en	Probenform	Kunststoff	Metall	Blechedicke	max. Druck
YANG & PARNG [21]	Sickenblech: 	PS	Zn-22% Al	0,1-0,3 mm	780 bar
AL-SHEYYAB & EHRENSTEIN [22]	Rundsicke: 	PA6-GF30	Al, Mg (AZ31)	1,5 mm	800 bar
RAUSCHER [23]	Höckerblech: 4x Ø17 mm 	PP	DC04	0,4 mm	700 bar
HUSSAIN ET AL. [24]	Napf-Geometrie: 	PP	DC04, Al99,5	1,0 mm	1.550 bar

Tabelle 2-1: Parameter-Übersicht Blechumformung mit Kunststoffen als Wirkmedien

Allen hier vorgestellten Verfahren ist gemein, dass die Umformung und zugleich plastische Dehnung des Blechs rein aus der Blechedicke ohne ein Nachfließen des Blechs erfolgt. Somit findet per Definition kein Tiefziehen, sondern ein Streckziehen statt, da die Bleche in allen Verfahren durch die Schließkraft der Spritzgießmaschinen vollständig eingespannt werden. Die Verfahrenskombinationen von wirkmedienbasierter Umformung mit Tiefzieh-Prozessen und einem Nachfließen des Metallblechs sind in Kapitel 2.3.2 näher beschrieben.

Nachfolgend werden mit der Kompressibilität, der Beschreibung des Fließverhaltens, der Wasseraufnahme von Polyamiden sowie der Verfestigung unter Druck und Scherung von amorphen Thermoplasten einige Eigenschaften von Kunststoffschmelzen näher beschrieben, die sich teilweise deutlich von anderen Wirkmedien (Wasser, Öl) unterscheiden und daher im weiteren Verlauf dieser Arbeit berücksichtigt werden müssen.

### Kompressibilität von Kunststoffschmelzen:

Im Gegensatz zu den nahezu inkompressiblen Wirkmedien Wasser und Öl können Polymere im plastifizierten Zustand unter hohem Druck komprimiert werden. Dieses Verhalten wird besonders bei der Betrachtung sogenannter pvT-Diagramme deutlich, die das spezifische Volumen eines Werkstoffs in Abhängigkeit von Temperatur und Druck darstellen. In Abbildung 2-8 sind die pvT-Diagramme von drei verschiedenen Polyamid-Werkstoffen (PA) abgebildet, wobei vor allem der reduzierte Einfluss des Drucks auf das spezifische Volumen zwischen PA 66 mit und ohne Glasfaserverstärkung (GF) zu beachten ist.

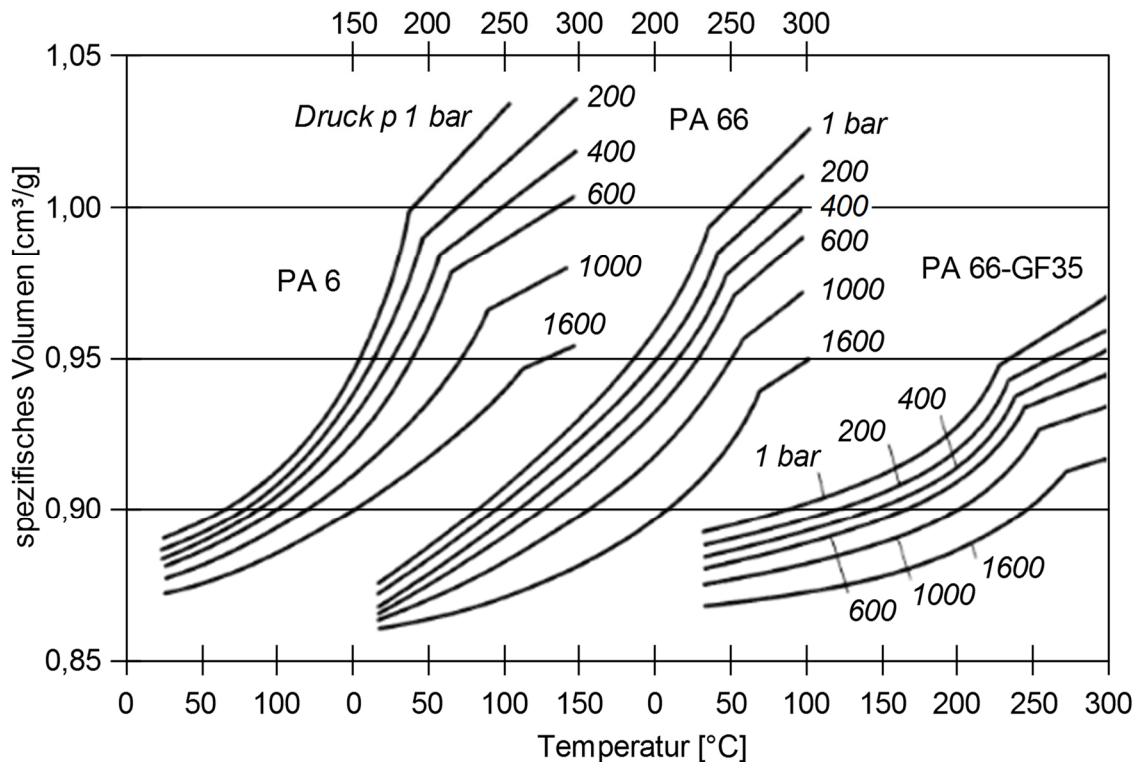


Abbildung 2-8: pvT-Diagramm von PA 6, PA 66 und PA66-GF35 [25]

Die charakteristischen Knicke in den Kurvenverläufen stellen typische Merkmale teilkristalliner Thermoplaste dar und sind auf die Bildung kristalliner Strukturen während der Abkühlung und Erstarrung aus der Schmelze zurückzuführen, die in einer dichteren Makromolekül-Packung resultieren [26].

### Fließverhalten von Kunststoffschmelzen:

Neben dem spezifischen Volumen gibt es einen weiteren Kennwert, der das unterschiedliche Verhalten von Kunststoffschmelzen gegenüber Flüssigkeiten wie Wasser oder Öl verdeutlicht und bei einem Einsatz als Wirkmedium von besonderer Relevanz ist: die Viskosität  $\eta$ . Der Unterschied liegt allein bereits darin begründet, dass es sich bei einer Kunststoffschmelze nicht um eine Flüssigkeit, sondern um den plastischen Verformungszustand eines Basispolymers handelt. Während die Viskosität von Wasser und Öl – beides sind sogenannte „newtonsche Fluide“ – den konstanten Proportionalitätsfaktor von Schubspannung und Schergeschwindigkeit darstellt, verhält sich die Viskosität von Kunststoffschmelzen bei höheren Schergeschwindigkeiten deutlich nicht-newtonsch. Es gilt der nachfolgende, formelmäßige Zusammenhang [26]:

newtonsch:

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma}$$

Gleichung 2-4

nicht-newtonsch:

$$\tau = \eta(\dot{\gamma}) \cdot \dot{\gamma}$$

Gleichung 2-5

Bei Kunststoffschmelzen besteht eine Abhängigkeit der Viskosität von der Schergeschwindigkeit – sie sinkt mit steigender Schergeschwindigkeit. Das Verhalten wird auch als strukturviskos bezeichnet und Kunststoffschmelzen entsprechend als „strukturviskose Fluide“. Lediglich bei sehr geringen Schergeschwindigkeiten kann eine annähernd konstante Viskosität beobachtet werden, die sogenannte „Nullviskosität“ (vgl. [Abbildung 2-9](#)). Das Fließverhalten kann nach [Gleichung 2-4](#) und [Gleichung 2-5](#) auch graphisch unter Verwendung von logarithmischen Achsen beschrieben werden, wobei ein newtonsches Fluid im nachfolgenden Diagramm die Winkelhalbierende (45°) dargestellt:

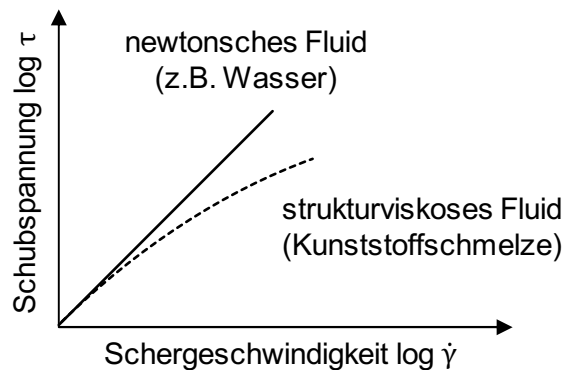


Abbildung 2-9: Prinzipieller Verlauf von Schubspannung und Schergeschwindigkeit nach [26]

Zur mathematischen Beschreibung des exakten Fließverhaltens existieren mehrere Ansätze, wobei an dieser Stelle lediglich auf weiterführende Literatur verwiesen werden soll [26]. Neben der Abhängigkeit der Viskosität von der Schergeschwindigkeit bestehen darüber hinaus Abhängigkeiten von Temperatur und hydrostatischem Druck, wovon die Druckabhängigkeit in der Praxis von untergeordneter Bedeutung ist [26]. Eine höhere Temperatur hingegen führt zu einer deutlich verringerten Viskosität und somit zu einem widerstandsärmeren Fließverhalten der Kunststoffschmelze.

#### Wasseraufnahme von Polyamiden:

Eine Gruppe von häufig verwendeten Thermoplasten mit vergleichsweise hohen mechanischen Eigenschaften und guter Beständigkeit gegen chemische Medien stellen die Polyamide dar. Gleichzeitig neigen diese Thermoplaste zur Aufnahme von Wasser aus der Luftfeuchtigkeit oder einer nassen Umgebung, so dass ggf. auftretende Eigenschaftsänderungen bei einer Verwendung als Wirkmedium und auch als Konstruktionswerkstoff berücksichtigt werden müssen.

Polyamide bestehen auf molekularer Ebene aus NHCO-Gruppen, die mit CH<sub>2</sub>-Gruppen verbunden sind und über benachbarte Polyamid-Moleküle zwischen den H- und O-Atomen der NHCO-Gruppen Wasserstoffbrücken bilden können. Da die NHCO-Gruppen zusätzlich eine hohe Affinität zu Wasser (H<sub>2</sub>O) besitzen, entscheidet das Verhältnis von CH<sub>2</sub>- zu NHCO-Gruppen über die maximale Wasseraufnahme eines Polyamids [25]. PA 6, welches für die Prozessentwicklung in dieser Arbeit eingesetzt wird, weist im Vergleich der häufig verwendeten Polyamide (PA 6.6, 6.10, 12 etc.) mit 5:1 das geringste Verhältnis auf und hat somit die höchste Affinität zur Wasseraufnahme.

Ein hoher Wasseranteil hat vor allem zwei bedeutende Einflüsse auf das Werkstoffverhalten. So verschiebt sich einerseits die Glasübergangstemperatur von PA 6 von 60 °C im trockenen Zustand über 5 °C bei einem Wasseranteil von 3,5 % bis hin zu -15 °C bei einem maximalen Wasseranteil

von 10 % [25]. Daraus folgt, dass die Glasstemperatur in allen drei Fällen zwischen den Auslegungsgrenzen für ein Kraftfahrzeug (-40 bis 80 °C) liegt und im Fahrbetrieb durchschritten werden kann. Somit muss die Erweichung nach Erreichen der Glasstemperatur bereits in der Bauteilauslegung berücksichtigt werden.

Der zweite Einfluss von Wasser im Polyamid betrifft die Verarbeitung: durch die Anwesenheit von Wasser besteht die Möglichkeit, Ketten mit den funktionellen NHCO-Gruppen durch Reaktion mit Wasser zu spalten und somit die Kondensationsreaktion zur Herstellung von PA 6 rückgängig zu machen (Hydrolyse), wodurch der eigentliche Werkstoff zerstört wird. Aus diesem Grund sollte Polyamid vor der Verarbeitung stets getrocknet werden.

Neben einer Werkstofftrocknung wird die Wasseraufnahme auch durch höhere Faseranteile begrenzt. In [27] wurde der Wassergehalt von PA 6 nach einer Konditionierung und anschließender Lagerung bei Normalklima (Dauer: 48 h) für verschiedene Glasfaseranteile analysiert. Der Wassergehalt sank dabei von 2,68 % bei einer Probe mit 15 % Fasergehalt auf 1,41 % bei 50 % Fasergehalt. In dieser Arbeit wird mit 40 % ebenfalls ein sehr hoher Fasergehalt im LFT eingesetzt (siehe Kap. 3.3.1).

#### Verfestigung unter Druck und Scherung:

Wie bereits zuvor erläutert, sinkt die Viskosität einer Kunststoffschmelze mit steigender Schergeschwindigkeit bzw. Scherbeanspruchung (strukturviskoses Verhalten). Das gegenteilige Verhalten, also eine Zunahme der Viskosität mit steigender Scherbeanspruchung, wird als „Scherverfestigung“ oder „Dilatanz“ bezeichnet. Obwohl Kunststoffschmelzen von Polyamiden eindeutig ein strukturviskoses Verhalten aufweisen, ist auch bekannt, dass hohe Verarbeitungsdrücke qualitativ betrachtet zu einer steigenden Viskosität führen [25]. Es kann daher nicht ausgeschlossen werden, dass beim Hybridpressen aufgrund einer möglicherweise hohen Scherbeanspruchung zwischen Blech und Stempel sowie dem gleichzeitigen Anliegen eines hohen Verarbeitungsdrucks zur Formung des Blechs Verfestigungseffekte auftreten.

Des Weiteren wurde von RUDOLPH [28] für amorphe Thermoplaste der Effekt einer sogenannten „Druckverfestigung“ beschrieben. Druckverfestigung beschreibt einen Druck-Temperatur-Verlauf, bei dem lediglich durch eine Erhöhung des Drucks der Glasübergang eines amorphen Thermoplasts und somit die Erstarrung erreicht wird. Obwohl Polyamide im Gegensatz zu den i.d.R. durchsichtigen amorphen Thermoplasten als teilkristallin gelten, entstehen dennoch amorphe Grenzschichten zwischen den Kristallen, die für die benötigte Elastizität verantwortlich sind. Bei der Herstellung von optischen Linsen beispielsweise kann die Druckverfestigung zur Erzielung einer homogenen und schnellen Verfestigung der Schmelze und somit zur Vermeidung von inneren Spannungszuständen auch bewusst eingesetzt werden [29]. Als Einflussparameter auf den Kristallisationsgrad können generell die Parameter Druck, Zeit und Temperatur (z.B. vom Werkzeug) genannt werden, wobei Polyamide insgesamt zu einer langsamen Keimbildung neigen, die deutlich länger als der Herstellungsprozess dauert [25].

Im Vordergrund dieser Arbeit steht die Entwicklung des Verfahrens Hybridpressen. Eine exakte Analyse des Kunststoffverhaltens in Bezug auf eine Verfestigung kann sowohl aufgrund von nicht vorhandener Anlagentechnik als auch fehlender Kenntnisse der exakten Erstarrungs- und Verfestigungsvorgänge sowie deren wissenschaftlicher Nachweise nicht erfolgen. Die Thematik sollte jedoch in der zukünftigen Weiterentwicklung des Hybridpressens nicht unberücksichtigt bleiben, wenn deutlich höhere Presskräfte bzw. Kunststoffdrücke eingesetzt werden.

## 2.2 Kunststoffurformung – Spritzgießen und Fließpressen

Thermoplastische Kunststoffe lassen sich grundsätzlich durch zwei verschiedene Verfahren urformen: Spritzgießen und Pressverfahren. Das Urformverfahren mit der weitesten Verbreitung stellt zweifelsohne das Spritzgießen dar. Als Gründe können unter anderem die hohe Automatisierbarkeit, kurze Zykluszeiten, keine oder nur geringe Nacharbeit sowie etablierte Verfahrensvarianten genannt werden [25]. Das Fließpressen von Kunststoffen als Pressverfahren ist vor allem für die Verarbeitung von glasmattenverstärkten Thermoplasten (GMT) bekannt, erfährt jedoch auch durch die Anwendung als LFT-Direktverfahren (D-LFT) ohne vorher benötigte Plattenhalbzeuge eine wachsende Popularität [30] [31].

Die Aufbereitung des zu verarbeitenden Polymers ist bei beiden Urformverfahren vergleichbar, weshalb sich auch die eingesetzte Anlagentechnik stark ähnelt. In einer Compoundier-Anlage mit integriertem Schneckenextruder werden dem Basispolymer, zumeist in Form eines Granulats, verschiedene Additive beigemischt, die z.B. die Fließeigenschaften, Wärmestabilität oder Wasseraufnahme des fertigen Compounds in gewünschter Art und Weise beeinflussen. Bezüglich der Einbringung von Verstärkungsfasern gibt es zwischen beiden Verfahren den Unterschied, dass diese beim Spritzgießen bereits im Kunststoffgranulat als Ausgangsbasis für das spätere Compound enthalten sind und beim Fließpressen erst nach dem Aufschmelzen in einer Zwischenstufe hinzugefügt werden. Die nachfolgende [Abbildung 2-10](#) zeigt exakt den Moment der LFT-Aufbereitung, in dem vorkonfektionierte Faserbündel mit definierter Faserlänge (z.B. 25 mm) in eine Art Schmelzevorhang aus plastifiziertem Thermoplast eingebracht werden. Anstelle von zugeschnittenen Fasern können auch Endlosfasern zugeführt werden.

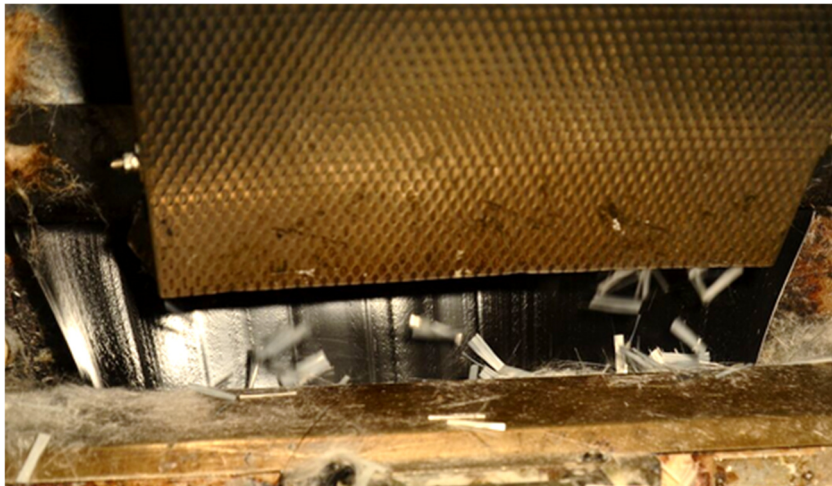


Abbildung 2-10: Zwischenstufe der LFT-Aufbereitung bei Weber Fibertech – Glasfaserbündel mit definierter Länge gelangen über eine Zuführung direkt in die plastifizierte Schmelze

Im Anschluss wird bei der LFT-Aufbereitung für das Fließpressen eine weitere, deutlich kürzere Schneckenphase benötigt, um einerseits eine gute Durchmischung von Fasern und Polymer zu erzielen und andererseits die unvermeidbare Zerstörung der Fasern im Extruder so gering wie möglich zu halten [32]. Hierzu wird eine gegenüber der Aufschmelzphase veränderte Schneckenengeometrie eingesetzt, die eine Degradation der Faserlängen durch reduzierte Scherkräfte und Reibung minimieren soll – beide Effekte sind Hauptgründe für reduzierte Faserlängen während der Aufbereitung [33] [34]. Während beim Spritzgießen der Extruder direkt mit dem Werkzeug verbunden ist und die Formfüllung über Einspritzdüsen erfolgt, wird bei der LFT-Aufbereitung ein Endlos-Extrudat erzeugt, nach Gewicht oder Form portioniert und auf einer

Heizstrecke zwischengelagert. Somit erfolgt die LFT-Aufbereitung für das Fließpressen kontinuierlich, während ein Spritzgießprozess immer diskontinuierlich abläuft.

In [35] und [36] sind die nachfolgend aufgelisteten Vorteile einer LFT-Direktverarbeitung bzw. der daraus resultierenden Bauteile genannt:

- kurze Zykluszeiten
- wirtschaftliche Herstellung von Wandstärken unter 1,8 mm / Reduktion von Wandstärken und somit Gewichts- und Kostenreduktion
- gleichmäßige Druckverteilung im Werkzeug
- kurze Fließwege und Vermeidung von Bindenähten
- verbesserte mechanische Eigenschaften durch längere Fasern

Die Bedeutung der Faserlänge in Bezug auf die Werkstoffeigenschaften wird im folgenden Kapitel thematisiert.

### 2.2.1 Einfluss der Faserlänge

Generell wird bei Verstärkungsfasern zwischen den drei Faserlängen Kurz-, Lang- und Endlosfaser unterschieden, wobei es zu beachten gilt, dass der Übergang zwischen Kurz- und Langfasern nicht eindeutig definiert ist und die Zuordnung somit auch von der Betrachtungsweise und dem eingesetzten Verfahren abhängt. Während Faserlängen von mehreren Millimetern Länge im Spritzgießverfahren bereits als relativ lang gelten, werden diese beim Fließpressen als relativ kurz angesehen [30]. Endlosfasern hingegen beschreiben Fasern, die erst durch die Bauteilmaße in ihrer Länge begrenzt werden, wie z.B. bei der Verwendung von flächigen Faser-Matrix-Halbzeugen mit gewebten Faserstrukturen, den sogenannten „Organoblechen“, oder unidirektional verstärkten Tapes (UD-Tapes). SCHÜRMAN [37] empfiehlt die folgende Unterteilung der Faserlängen:

- Kurzfaser:  $l \approx 0,1-1 \text{ mm}$
- Langfaser:  $l \approx 1-50 \text{ mm}$
- Endlosfaser:  $l > 50 \text{ mm}$

Neben einer Einteilung nach der absoluten Faserlänge kann auch ein mathematischer Ansatz zur Ermittlung der maximalen Spannung in einer Faser anhand der übertragbaren Schubspannung zwischen Faser und Matrix an einem infinitesimalen Faserelement gewählt werden. Durch Vernachlässigung der Faserenden aufgrund der deutlich kleineren Fläche im Vergleich zur Fasermantelfläche ergibt sich folgende Gleichung [38]:

$$\sigma_{f,max} = \int_0^{l/2} \frac{4}{d} \cdot \tau_i \, dx = 2 \cdot \frac{l}{d} \cdot \tau_i \quad \text{Gleichung 2-6}$$

Demnach ist die maximale Spannung in der Faser bei konstanter Schubspannung  $\tau_i$  lediglich vom Verhältnis der Faserlänge  $l$  zum Faserdurchmesser  $d$  abhängig – häufig als „Aspektverhältnis“ oder im Englischen als *aspect ratio* bezeichnet. Soll die Faser mindestens bis zur eigenen Bruchfestigkeit belastet werden, ohne sich aus der Matrix zu lösen, so wird die kritische Faserlänge  $l_c$ , die eine Faser in diesem Fall mindestens aufweisen muss, wie folgt definiert [38]:

$$l_c = \frac{d \cdot \sigma_{f,B}}{2 \cdot \tau_i} \quad \text{Gleichung 2-7}$$

$\sigma_{f,B}$ : Bruchspannung der Faser



Bei üblichen Glasfaserdurchmessern von circa 12-14  $\mu\text{m}$  beginnt nach SCHEMME [30] die Langfaser ab einer Länge von 2,0 mm bzw. einem äquivalenten Aspektverhältnis von ca. 150.

Neben dem Faservolumengehalt und der Faserorientierung ist es vor allem die Faserlänge, die einen signifikanten Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften des Werkstoffs und somit auch auf das spätere Bauteil hat. Während die zu erzielende Steifigkeitssteigerung bereits ab einer Faserlänge von 1 mm nahezu stagniert, können bei der Festigkeit und vor allem der Schlagzähigkeit signifikante Verbesserungen mit längeren Fasern erzielt werden. Die nachfolgende Grafik veranschaulicht die Einflüsse der Faserlänge auf die mechanischen Eigenschaften anhand einer logarithmischen Skala.

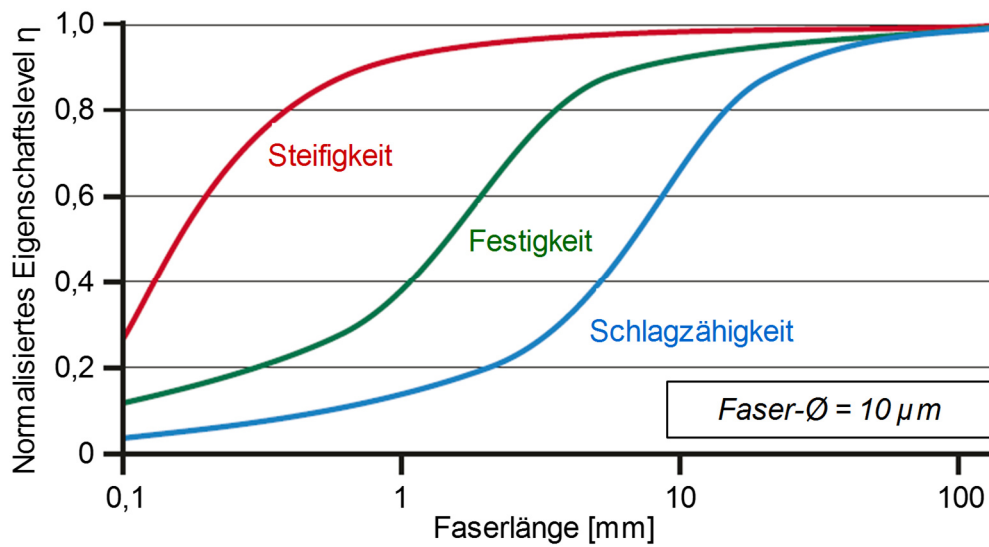


Abbildung 2-11: Einfluss der Faserlänge auf die mech. Werkstoffeigenschaften nach [39]

Während der plastifizierte Thermoplast beim Spritzgießen durch kleine Einspritzdüsen / Injektoren in das geschlossene Werkzeug gelangt und alle Fasern währenddessen eine hohe Beanspruchung erfahren, wird das Extrudat beim Fließpressen direkt in ein geöffnetes Werkzeug eingelegt. Somit ist gewährleistet, dass die zu erzielende Faserlänge im Bauteil im Vergleich zum Spritzgießen deutlich größer ist. METTEN und CREMER [34] haben die Einflüsse auf die Degradation der Faserlänge mit einem langfaserverstärkten PP-Granulat (10 mm) im Spritzgießprozess analysiert und in einem nicht näher spezifizierten Praxisbauteil eine volumengewichtete mittlere Faserlänge ( $L_{mv}$ ) von lediglich 1,2-2,4 mm nachgewiesen. Als Einflüsse wurden neben der Aufbereitung im Extruder auch die Anspritzgeometrie des Werkzeugs bzw. der Angusskanäle, Wanddickenverläufe und Übergänge im Bauteil sowie der Nachdruck identifiziert. Bereits nach der Plastifizierung weisen die Fasern lediglich 50-55 % ihrer Ausgangslänge auf. Mit einer auf das jeweilige Granulat angepassten Anlagentechnik und Werkzeuggeometrie konnte von SCHEMME [30] eine Degradation von einem Langfasergranulat mit 15 mm Ausgangs-Faserlänge auf gemittelte 2,85 mm in einem nicht näher beschriebenen Bauteil festgestellt werden.

Eine umfassende Analyse der Faserlängendegradation beim Fließpressen mit vorheriger Plastifizierung eines PP-GF30 Materials in einem Einschneckenextruder wird in der Dissertation von BRAST [31] beschrieben. Aus dem Fließbereich einer fließgepressten Platte mit den Abmaßen 250x400 mm und einer Dicke von 3,3 mm wurden Rundproben ( $\varnothing = 55 \text{ mm}$ ) entnommen und einer eigens entwickelten, rechnergestützten Auswertung zur Ermittlung der Faserlängenverteilung unterzogen. Als Ziel der Versuche sollten die Einflüsse der drei Parameter Staudruck, Schneckendrehzahl und Zylindertemperatur quantifiziert werden. In Abbildung 2-12 ist beispiel-

haft die Faserlängenverteilung bei Variation des Staudrucks dargestellt. Die Faserlängen sind dabei nach dem sogenannten dreimodalen Modell von BAILEY und KRAFT [40] aus dem Jahr 1987 in drei Bereiche unterteilt, die wie folgt beschrieben werden [31]:

- „Bereich I: Bruchstücke geringer Länge bilden eine Kurzfaserverteilung mit einem ausgeprägten Maximum ( $l_n < 3$  mm)
- Bereich II: Fasern und Filamente mittlerer Länge weisen eine meist gleichmäßige Belegung der Klassen [...] auf ( $3$  mm  $< l_n < 10$  mm)
- Bereich III: Unzerstörte oder nur geringfügig geschädigte Fasern und Filamente stellen den Langfaserbereich dar ( $l_n > 10$  mm)“

Die Ausgangsfaserlänge im Granulat betrug 13 mm.

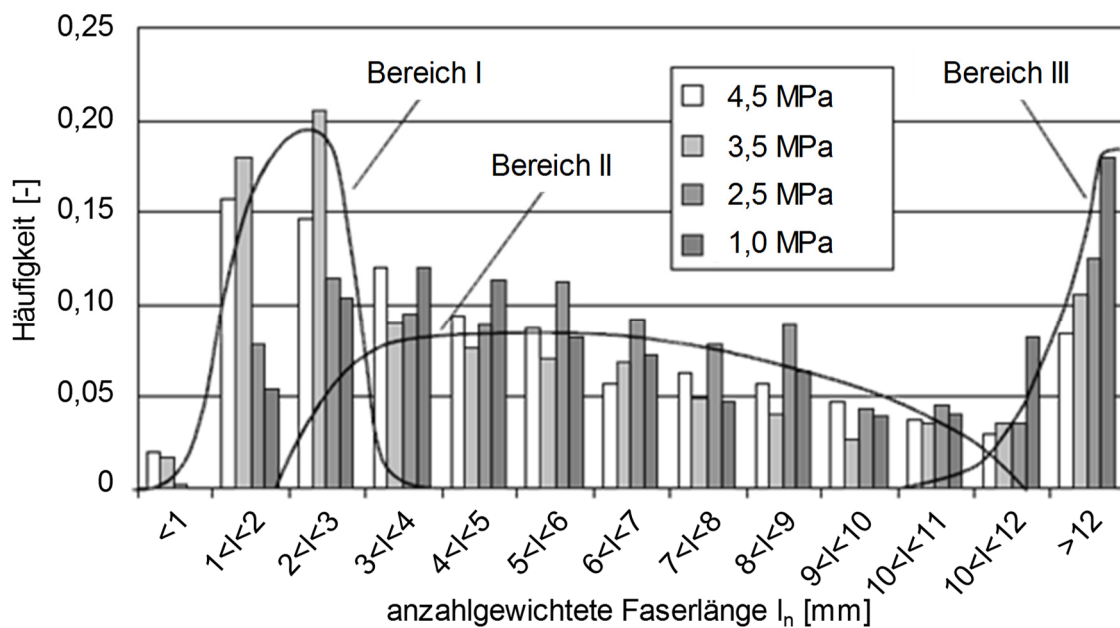


Abbildung 2-12: Faserlängenverteilung bei konstanter Schneckendrehzahl ( $46 \text{ min}^{-1}$ ) und Zylindertemperatur ( $185 \text{ °C}$ ) [31]

Neben dem Einfluss der Faserlänge auf die mechanischen Eigenschaften besteht auch ein signifikanter Einfluss auf das Schwindungs- und Verzugsverhalten eines Bauteiles während der Abkühlphase im Werkzeug. Sowohl aus Sicht der mechanischen Bauteileigenschaften als auch aufgrund des positiven Schwindungs- und Verzugsverhaltens weist das Fließpressen von langfaserverstärkten Thermoplasten demnach Vorteile gegenüber einer Verarbeitung im Spritzgießprozess auf. Nachteilig ist der zusätzlich erforderliche Schritt zum Handling des Extrudats und die damit verbundene Abkühlung bis zum Schließen des Werkzeugs anzusehen.

## 2.2.2 Werkzeug- und Anlagentechnik

Die Werkzeuge beider Fertigungsverfahren unterscheiden sich nicht zuletzt aufgrund der unterschiedlichen Formfüllung in mehreren Merkmalen. Neben den beim Fließpressen nicht benötigten Injektoren für das Einspritzen der Schmelze über ein Angussystem gibt es z.B. auch Unterschiede durch verschiedene Ansätze zur Abdichtung. Während beim Spritzgießen die Werkzeughälften bereits zu Prozessbeginn vollständig geschlossen (mit Ausnahme des Spritzprägens) und somit umlaufend abgedichtet sind, wird beim Fließpressen das Extrudat in eine geöffnete Werkzeugkavität eingelegt. Da die Formgebung über den Hub der zweiten Werkzeughälfte erfolgt, muss die Dichtigkeit z.B. mit Hilfe einer Tauchkante ([Abbildung 2-13](#)) bereits



zu dem Zeitpunkt gewährleistet werden, wenn das fließfähige Material durch die stattfindende Verdrängung beim Schließen des Werkzeugs nach außen gelangen kann.

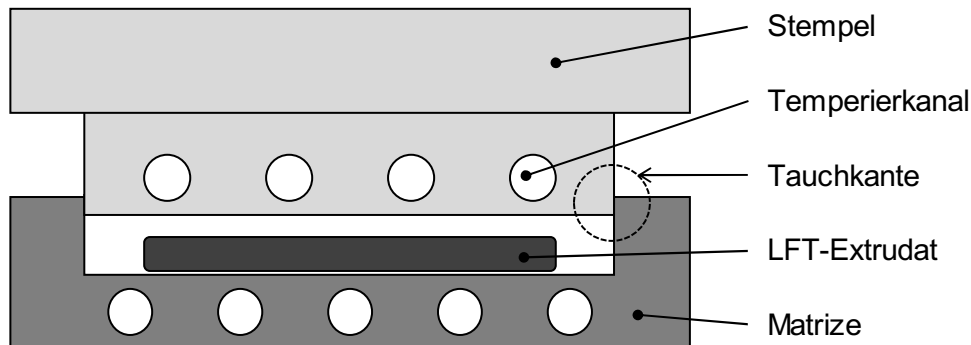


Abbildung 2-13: Prinzip eines Tauchkantenwerkzeugs beim Fließpressen von LFT

Die unterschiedliche Anordnung der Werkzeuge wird auch in der verwendeten Anlagentechnik deutlich. Während die Werkzeughälften beim Spritzgießen in der Regel vertikal angeordnet sind und eine Einheit mit dem Compounder / Extruder bilden, wird beim Fließpressen durch Verwendung von parallelgeregelten Pressen eine horizontale Werkzeugteilung bevorzugt. Diese Pressen sind zumeist hydraulisch angetrieben und kommen in vergleichbarer Bauart auch in der Metallumformung zum Einsatz. Die Einlage des Extrudats kann entweder manuell oder automatisiert durch einen Einsatz von Robotern mit entsprechenden Nadelgreifern erfolgen.

Nach der Formfüllung bzw. während der Abkühlung im Werkzeug unterliegen thermoplastische Kunststoffe einer volumetrischen Schwindung (vgl. [Abbildung 2-8](#)), die ohne aufgebrachten Nachdruck zu Bauteilverzug und ggf. sogar zu Fehlstellen führen kann. Der Nachdruck über die Einspritzdüsen beim Spritzguss kann nur solange lokal eine Wirkung erzielen, bis die entferntesten und dünnsten Bauteilbereiche erstarrt sind. Beim Fließpressen hingegen wirkt die gesamte Werkzeug- bzw. projizierte Stempelfläche auf das Bauteil, so dass zudem ein gleichmäßiger Druck im gesamten Bauteil vorliegt.

Vergleichbar ausgeführt sind bei beiden Fertigungsverfahren die Themen Werkzeugentlüftung und -temperierung. Eine ausreichende Entlüftung der Werkzeughälften sorgt für eine vollständige Formfüllung und kann entweder mit Hilfe eigener Entlüftungskanäle oder durch eingebrachte Auswerferstifte mit entsprechender Fertigungstoleranz erfolgen. Die Temperierung bzw. Kühlung der Werkzeuge stellt immer einen Kompromiss dar: einerseits soll eine zu schnelle Abkühlung und somit Erstarrung der Schmelze an der Werkzeugoberfläche durch die Temperierung verhindert werden und andererseits muss in einem Serienprozess mit kurzen Zykluszeiten die von der Schmelze eingebrachte Temperatur aus dem Werkzeug möglichst schnell abgeführt werden. Eine konturnahe und gleichmäßig verteilte Temperierung durch die Medien Wasser oder Öl wird somit angestrebt – ggf. müssen dazu mehrere unabhängige Kühlkreisläufe eingesetzt werden [41]. Neuere Entwicklungen zeigen am Beispiel des Fließpressens, dass durch eine variotherme Prozessführung mit getrennten Kühlkreisläufen (heiß und kalt) Verbesserungen hinsichtlich der Oberflächenqualität, eine Reduzierung der erforderlichen Presskraft und somit geringere Anlageninvestitionen erzielt sowie aufgrund der geringeren Viskosität bei höheren Temperaturen Thermoplaste mit Fasermassenanteilen bis zu 60 % verarbeitet werden können [42]. Die Kühlzeit nimmt insgesamt den größten Anteil der Gesamtzykluszeit in Anspruch. Aufgrund von dünneren Wanddicken und höheren Fasergehalten (Stabilität) kann diese beim Fließpressen im Vergleich zum Spritzgießen geringer sein. Eine Verallgemeinerung dieser These ist bedingt durch die vielen Einflussfaktoren jedoch nicht möglich.

### 2.3 Kombinierte Fertigungsverfahren für Kunststoff-Metall-Hybridbauteile

Aufgrund der in Gänze verschiedenen Urformverfahren für Metall und Kunststoffe ist es nicht möglich, diese geeignet zu kombinieren. Die Artfremdheit der Werkstoffe verbietet es des Weiteren, eine direkte stoffschlüssige Verbindung zwischen Metall und Kunststoff herzustellen. Daher ist es mittlerweile gängige Praxis, Kunststoffverstärkungen in Form von verrippten Strukturen oder als Patches nachträglich durch Klebeoperationen auf bereits umgeformte Metallbauteile aufzubringen [43] [44]. Ein weiteres Beispiel für die Anwendung von kohlenstoffaserverstärktem Kunststoff (CFK) zusammen mit Stahl in gemeinsamen und hochbelasteten Bauteilen der Karosseriestruktur stellt die als „Carbon Core“ bekannte Bauweise von BMW bei der aktuellen 7er Serie dar [45]. Dieses Vorgehen wird als *Post-Molding Assembly* (PMA) bezeichnet [46]. Die Vorteile der Kunststoffverarbeitung hinsichtlich Prozessvariabilität und Designfreiheit bieten jedoch verschiedene Möglichkeiten, um einerseits die Metallumformung und Kunststoffurformung zu kombinieren und andererseits zeitgleich einen Fügeprozess durch das sogenannte *In-Mold Assembly* (IMA) abzubilden [46]. Die Verbindung wird dabei entweder mit Hilfe eines Formschlusses oder stoffschlüssig durch z.B. den Einsatz von Haftvermittlern realisiert. Nachfolgend werden einige Verfahren vorgestellt, die aufeinanderfolgend oder simultan Um- und Urformprozesse kombinieren und diese in neuartigen Werkzeugkonzepten teilweise ohne Prozessunterbrechung abbilden können. Das vordergründige Ziel aller vorgestellten Verfahren ist es, zusätzliche Handling-Operationen, Fügeprozesse sowie eine Anschaffung von neuer Anlagentechnik zu vermeiden und möglichst viele einzelne Prozessschritte in einen kombinierten Gesamtprozess durch Schaffung einer „Kombinationstechnologie“ zu integrieren.

#### 2.3.1 Umspritzen von vorgeformten Metallblechen

Bereits zu Beginn der 1990er Jahre hat man erkannt, dass tiefgezogene und gelochte Metallbleche durch das Umspritzen mit thermoplastischen Kunststoffen zu stabilen, großflächigen und gleichzeitig leichten Hybridbauteilen führen. Die Werkstoffkombination ermöglicht es einerseits, Krafteinleitungsbereiche weiterhin durch den metallischen Fügepartner abzubilden und andererseits erhöhen die Kunststoffstrukturen die Steifigkeit und wirken zusätzlich der Beulneigung von dünnen Metallblechen entgegen. Durch das Vorlochen der Metallbleche entstehen während des Spritzgießens knopfartige Formschlüsse, die beide Werkstoffe dauerhaft und nicht zerstörungsfrei lösbar miteinander verbinden. Neben einer Pkw-Tür [47] sind es vor allem sogenannte „Frontends“ als Teil der vorderen Fahrzeugkarosserie, die eine besondere Aufmerksamkeit und Eignung für diese Hybridtechnik erfahren haben bzw. aufweisen [48] [49].



Abbildung 2-14: Hybrides Frontend des Ford Focus aus dem Jahr 1999 [48]

Die Aktualität des Fertigungsverfahrens wird auch am Beispiel eines Forschungsprojekts namens „Hylight“ deutlich, in dem erstmals auf gelochte Metallbleche verzichtet und stattdessen ein Haftvermittlersystem als Lack-Vorbeschichtung auf dem noch ungeformten Blech (*Coil*) eingesetzt wird [50]. Dadurch kann einerseits eine vollflächige Anbindung des Kunststoffs an das Metallblech gewährleistet werden und andererseits stellt der Haftvermittler eine Barriere gegen korrosive Medien dar, so dass die ansonsten obligatorische kathodische Tauchlackierung (KTL) entfällt. Als Demonstrator wurde der Frontendträger eines Ford C-Max ausgewählt, dessen Metallblech nach der Haftvermittlerbeschichtung in sechs Stufen umgeformt wurde [51].

### 2.3.2 Verfahrenskombination Tiefziehen + Spritzgießen

Der nächste logische Entwicklungsschritt nach dem Verstärken von bereits tiefgezogenen Metallblechen durch nachträgliches Um- oder Hinterspritzen ist es, die Metallumformung direkt in einen Spritzgießprozess zu integrieren. Als Herausforderung können dabei sowohl die unterschiedlichen Anlagen (hydraulische Presse ggü. Spritzgießmaschine) als auch die Werkzeugkonzepte für beide Fertigungsverfahren angesehen werden. Während bei der Tiefziehoperation Blechhalter und ggf. variable Blechhalterkräfte einen Einzug des Metallblechs kontrollieren, arbeiten Spritzgusswerkzeuge in der Regel mit Tauchkanten zur Abdichtung gegen ein Heraustreten der Kunststoffschmelze. Des Weiteren verfügen Spritzgießmaschinen üblicherweise nicht über zusätzlich ansteuerbare und gleichzeitig regelbare Hydrauliksysteme, um neben dem Schließen und Zuhalten des Werkzeugs sowie einer Auswerferfunktion weitere hydraulische Werkzeugfunktionen übernehmen zu können.

WEHMEYER [52] hat neben der integrierten Umformung von Metallfolien im Spritzgießprozess auch die Umformung von dickeren Metallblechen zum Einsatz als Strukturbauteile anhand einer Napfgeometrie durch den Schmelzedruck von Polypropylen untersucht. Als Ausgangsform dienten Metallronden aus einem weichen Tiefziehstahl (DC04) mit einer Blechdicke von 1,0 mm. Da das Ziel der Untersuchung lediglich die Analyse der Ausformung bei unterschiedlichen Prozessparametern war, wurden keine haftvermittelnden Substanzen bzw. Klebstoffe eingesetzt, um Stahl und Kunststoff im Prozess miteinander zu verbinden. Das Nachfließen des Blechs konnte in dem beschriebenen Prozess lediglich durch Einsatz einer PTFE-Folie zur Reduzierung der Reibkoeffizienten zwischen Werkzeug und Metallblech realisiert werden. Ein Konzept, welches den Schmelzedruck als Niederhalterkraft nutzt, lieferte keine reproduzierbaren Ergebnisse und grenzte das Prozessfenster zudem stark ein. Das Ziel der Verfahrensentwicklung war die Verbesserung der Wirtschaftlichkeit bei einer Fertigung von Kunststoff-Metall-Hybridbauteilen gegenüber der getrennten Fertigung bzw. dem Um- oder Hinterspritzen von umgeformten Metallblechen. Aufbauend auf dieser Arbeit wurde von SCHILD [53] für den identischen Probekörper eine erweiterte Werkzeugtechnik entwickelt, die mit Hilfe von vier hydraulischen Zylindern erstmals auch eine aus der Metallumformung bekannte Niederhalterfunktion realisieren konnte. Ein weiteres Augenmerk wurde auf die Verbindung von Thermoplast und Stahl durch den Einsatz verschiedener Haftvermittler gelegt (siehe auch Kap. 2.5.2). Konkret wurde untersucht, welchen Einfluss eine Umformung von vorbeschichteten Metallblechen und somit eine Vordehnung des Haftvermittlers auf die Verbindungseigenschaften hat. Neben dem oben genannten Tiefziehstahl DC04 (1,0 mm) wurden auch Versuche mit der härtesten Stahlgüte HC300LA (0,8 mm) durchgeführt und Nachdrücke im Werkzeug von bis zu 2.200 bar erreicht.

Im Rahmen des Exzellenzclusters „MERGE: Technologiefusion für multifunktionale Leichtbaustrukturen“ wurde ebenfalls ein kombinierter Tiefzieh- und Spritzgießprozess entwickelt, bei dem die Kunststoffschmelze als Wirkmedium fungiert. Im Gegensatz zu dem vorherigen Verfahren von WEHMEYER [52] und SCHILD [53] wurde das Werkzeug der hier entwickelten Napfgeo-

metrie in eine vertikale hydraulische Presse eingebaut und mit einem Einspritzaggregat gekoppelt [54]. Somit kann einerseits das vorhandene Ziehkissen der Presse zur Abbildung einer Blechhalterfunktion genutzt werden und andererseits wird das Einlegen der Blechplatte erleichtert. Auch in diesem Verfahren erfolgen die Vorformung und somit das Tiefziehen des Metallblechs bereits durch das Schließen des Werkzeugs. Im Anschluss wird die innenliegende Kunststoffverstärkung urgeformt und das Blech durch den anliegenden Kunststoffdruck gleichzeitig ausgeformt. Zusätzlich können in dem Prozess mit Hilfe des Kunststoffdrucks auch Nebenelemente, wie z.B. ein Hinterschnitt zur Erzielung einer formschlüssigen Verbindung zwischen Kunststoff und Metall, geschaffen werden (siehe Abbildung 2-15). Dies wäre bei einer werkstofflich getrennten Fertigung oder einem reinen Tiefziehprozess so nicht möglich. Als Metallwerkstoffe wurden sowohl ein weicher Tiefziehstahl (DC04) als auch Aluminium (EN AW-6016) eingesetzt und die Bleche teilweise einseitig mit einem Haftvermittler beschichtet, um neben der formschlüssigen auch eine stoffschlüssige Verbindung zu erzielen [54] [55].

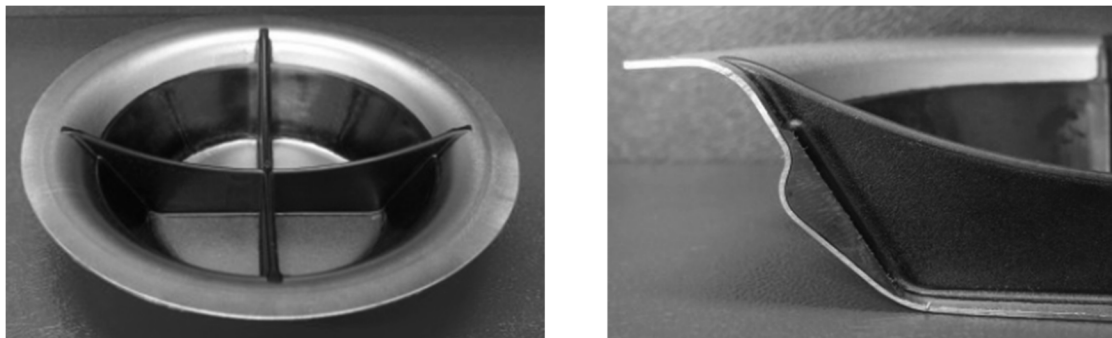


Abbildung 2-15: Hybride Napfgeometrie aus DC04-Stahl mit PA6-GF30 (li.) sowie mittels Schmelzedruck geformter Hinterschnitt / Formschluss (re.) [55]

### 2.3.3 Tiefziehen + Fließpressen als serielle Verfahren

Wie bereits im Kap. 2.2 ausführlich erläutert, bietet das Fließpressen als Urformverfahren für thermoplastische Kunststoffe gegenüber dem Spritzgießen Vorteile hinsichtlich der zu verarbeitenden Faserlänge und somit den erzielbaren Werkstoff- bzw. Bauteileigenschaften. Mit der Entwicklung der „3D-Hybrid“-Technologie, bei der zuerst Metallbleche (warm)umgeformt und dann unter Einsatz einer Haftvermittlerschicht mit einer innenliegenden LFT-Rippenstruktur und endlosfaserverstärkten Halbzeugen (Organoblechen) verstärkt werden, sollen vor allem biegebelastete Bauteilstrukturen adressiert werden [56]. In einem gemeinsamen Umform- und Fließpresswerkzeug werden gleichzeitig ein zuvor erwärmtes Organoblech umgeformt, die LFT-Rippenstruktur fließgepresst und sowohl eine stoffschlüssige Verbindung zwischen LFT und Organoblech als auch zwischen Metall und Organoblech über den Haftvermittler hergestellt. Die innenliegende Kunststoffstruktur kann demnach exakt an die jeweilige Bauteilanforderungen hinsichtlich Steifigkeit, Festigkeit und Energieaufnahme angepasst werden und ermöglicht somit, das Bauteil belastungsgerecht und leicht auszuliegen.

Im Gegensatz zu den vorgenannten Verfahrenskombinationen unter Einsatz des Spritzgießens fehlt bei der 3D-Hybrid-Technik eine Kopplung mit der Metallumformung – eine wirkmedienbasierte Umformung findet demnach nicht statt. Durch diese Trennung von Metallumformung und Kunststoffurformung ist es jedoch möglich, einerseits hohe metallische Werkstoffdicken und andererseits höchstfeste Stähle, die üblicherweise mittels Warmumformung bei Temperaturen über 900 °C umgeformt werden, einzusetzen. Das Potenzial des Verfahrens wird am Beispiel

einer B-Säule für ein Fahrzeug im Luxus-Sportwagensegment aufgezeigt. Durch die 3D-Hybrid-Technik kann gegenüber dem Referenzbauteil aus Stahl eine Gewichtsersparnis von 10 % bei gleichem Verhalten unter einer dynamischen 4-Punkt-Biegelastung innerhalb einer Messtoleranz von 2 % erzielt werden [57]. In [58] wird die Gewichtsersparnis der B-Säule mit 13 % bei einer um 25 % erhöhten Energieaufnahme angegeben. Die Gesamtzykluszeit in einem voll automatisierten Prozess beginnend mit einem bereits umgeformten Metallblech inklusive Haftvermittlerapplikation und Aufheizung des Organoblechs beträgt 180 Sekunden [57].

Neben einem Einsatz des Verfahrens in B-Säulen wird in [56] auch das Potenzial für A-Säulen und Dachquerträger veranschaulicht, die beide jeweils eine Hohlstruktur aufweisen. KELLNER vergleicht darin die Fertigung mittels 3D-Hybrid-Technik mit verschiedenen anderen Werkstoffkombinationen und Herstellungsverfahren (Stahl-Hohlprofil, Aluminiumguss und -profile, Stahl-Leichtmetall-Verbundguss, gefügte Stahl-FVK-Variante) und zeigt auf, dass neben dem Leichtbaupotenzial aufgrund der hohen Funktionsintegration vor allem die Anzahl der benötigten Einzelbauteile reduziert werden kann.

### 2.3.4 Verfahrenskombination Innenhochdruckumformung + Spritzgießen

Eine weitere Verfahrenskombination aus Metallumformung und Kunststoffurformung wurde von der Daimler AG erfunden [59] und durch die ElringKlinger AG inzwischen anhand mehrerer Serienanwendungen in der Automobilindustrie etabliert. Das Verfahren wird auch als „Hydroform-Hybridtechnologie“ (HFH-Technologie) bezeichnet und stellt eine Kombination aus dem Innenhochdruckumformen von stranggepressten Aluminiumrohren und einem anschließenden Umspritzen mit glasfaserverstärktem Polyamid 6 (PA6-GF60) dar. Der gesamte Prozess findet in einem gemeinsamen Werkzeug statt und kann mit den nachfolgenden Prozessschritten chronologisch beschrieben werden [60]:

1. Halbzeuge werden in Werkzeug eingelegt
2. Werkzeug wird geschlossen, IHU-Medium wird in ein metallisches Rohr gepresst
3. Innenhochdruck verformt das Rohr (bei ca. 600 bar)
4. Spritzgussprozess startet, Rohr wird umspritzt
5. Evakuierung des IHU-Mediums durch Druckluft
6. Werkzeug wird geöffnet, HFH-Bauteil kann entnommen werden

Neben einer formschlüssigen Verbindung durch das Umspritzen des Rohres kann dieses vorab zusätzlich mit einem Haftvermittler beschichtet werden, um eine stoffschlüssige Verbindung zu erzeugen. Die aus dem Prozess entstehenden Bauteile werden auch „Polymer-Metall-Hybride“ (PHM) genannt und zeichnen sich neben dem vorhandenen Leichtbaupotenzial vor allem durch eine hohe Struktursteifigkeit, die Integration von Funktionselementen sowie durch komplexe Geometrien aus. Diese Eigenschaften erweisen sich z.B. für Cockpitquerträger und Frontendträger (Abbildung 2-16) als ideal, da beide Bauteile als Träger für eine Vielzahl weiterer Komponenten dienen und der Cockpitquerträger als Verbindungselement der beiden A-Säulen zudem einen Anteil zur Torsionssteifigkeit der Karosserie beiträgt. Beide Strukturteile werden in den aktuellen Fahrzeugmodellen der C- und E-Klasse (Cockpitquerträger) sowie A- und B-Klasse (Frontendträger) von Mercedes Benz eingesetzt [60].

LANDGREBE ET AL. [61] haben die Robustheit des Prozesses anhand eines geraden Aluminiumrohres mit angespritzten Funktionselementen bei konstanten Prozessparametern überprüft. Variiert wurde stattdessen die Oberfläche des Aluminiumrohres. Neben dem Einsatz eines Haftvermittlers wurden eine laserstrukturierte und eine sandgestrahlte Oberfläche überprüft. Die Bewertung erfolgte anhand von sechs Defekt-Kriterien, wie z.B. der Oberflächenbeschaffenheit,

einer fehlerhaft geformten Metallgeometrie oder einem auftretenden „Überlaufen“ der kunststofffreien Bereiche durch Schmelze. Im Ergebnis wiesen die Probekörper mit Haftvermittlerbeschichtung die kleinste Anzahl an Fehlern auf.



Abbildung 2-16: Durch die HFH-Technologie hergestellter Frontendträger von ElringKlinger [62]

## 2.4 Faserverbundwerkstoffe in Fahrwerkslenkern

Das vorherrschende Ziel im automobilen Leichtbau, den richtigen Werkstoff an der richtigen Stelle zu vertretbaren Kosten einzusetzen, ist bereits in einer Vielzahl von Anwendungen sichtbar geworden [63]. Häufig führt dieser konsequente Leichtbau neben dem Einsatz von Leichtmetallen wie Aluminium und Magnesium oder den faserverstärkten Kunststoffen in einer Monobauweise zwangweise zu hybriden Bauteilen, die mindestens zwei verschiedene Werkstoffe in einem gemeinsamen Bauteil vereinen. Dabei werden oft Metalle und Kunststoffe kombiniert, um auf der einen Seite die hohe Steifig- und Festigkeit des metallischen Partners und auf der anderen Seite die Designfreiheit, Funktionsintegration und Möglichkeit zur Bauteilversteifung durch Rippenstrukturen des Kunststoffs bestmöglich zu nutzen.

### 2.4.1 Auslegung von Fahrwerkslenkern

Die generelle Auslegung von Fahrwerkslenkern beginnt mit der Definition von Kinematikpunkten als sogenannte *Hardpoints*, der Art des Lenkers, den angreifenden Kräften und Momenten sowie den erforderlichen Steifigkeiten. Mit Hilfe des zur Verfügung stehenden Bauwerks wird unter Berücksichtigung der maximalen Bauteilspannung oder Spannungsverteilung, des gewünschten Werkstoffs und des dazugehörigen Fertigungsverfahrens schrittweise eine geeignete Geometrie ermittelt bzw. durch Anwendung von Optimierungsmethoden optimiert. Die gesamte Auslegung einschließlich einer Bewertung der Lebensdauer erfolgt bei metallischen Werkstoffen komplett computerbasiert, so dass in kurzer Zeit viele Varianten unterschiedlicher Geometrien und Werkstoffe miteinander verglichen werden können.

Während es für den Bereich Karosserie und Anbauteile bereits viele Beispiele für eine Hybridbauweise gibt, sind diese im Fahrwerk bisher noch begrenzt. Dies liegt unter anderem an den besonderen Bauteilanforderungen für das Verhalten unter sogenannten *Misuse*-Bedingungen, wie beispielsweise dem Anprall an eine Bordsteinkante. Hierbei soll das Bauteil zwar eine ge-

zielte Schädigung erhalten, dessen Funktionsweise und somit die Fahrtüchtigkeit des Fahrzeugs muss jedoch für eine Fahrt bis zur nächstgelegenen Werkstatt gewährleistet bleiben. Diese Anforderung kann nicht von reinen FVK-Bauteilen erfüllt werden, da sich ein Versagen im Vergleich zu Metallen nicht durch plastische Verformung oder Risse visuell andeutet, sondern durch spröde Faser- und Matrixbrüche im Inneren beginnt und sich dann abrupt und katastrophal auf das Gesamtbauteil ausbreitet. Nicht zuletzt müssen Bauteile im Fahrwerk auch eine Betriebsfestigkeit unter schwingender Belastung über die gesamte Lebensdauer eines Fahrzeugs aufweisen. Diesbezüglich sind es vor allem die noch fehlenden Erfahrungswerte und Berechnungsmöglichkeiten für eine Auslegung und das Versagen von FVK-Werkstoffen, die eine verbreitete Anwendung verhindern [64]. Bei allen nachfolgenden Beispielen von Multi-Material-Lösungen für u.a. radführende Fahrwerkslenker (Kap. 2.4.3) handelt es sich um Forschungsergebnisse oder Patentanmeldungen, die bisher nicht in Serienanwendungen umgesetzt wurden.

#### 2.4.2 Optimierungsmethoden mit Hilfe der FEM

In der Bauteilentwicklung werden neben verschiedenen Berechnungsmethoden längst auch computergestützte Optimierungsmethoden eingesetzt. Nachfolgend werden daher die beiden in dieser Arbeit verwendeten Methoden des Optimierungssolvers OptiStruct aus dem Softwarepaket Hyperworks (v14) von Altair kurz vorgestellt. Eine Beschreibung der exakten Anwendungsfälle erfolgt in den Kapiteln 7.3 und 7.4.

Grundsätzlich besteht eine Optimierungsaufgabe aus den folgenden vier Elementen:

- Optimierungsantwort (*response*): welche physikalischen Größen (Masse, Volumen, Steifigkeit, Eigenfrequenz, Spannungen etc.) sollen in der Optimierung erfasst werden?
- Optimierungsziel (*objective*): z.B. Minimierung, Maximierung oder Begrenzung einer Optimierungsantwort (Bauteilmasse, Bauteilsteifigkeit, Eigenfrequenz, Spannungen etc.)
- Randbedingungen (*constraints*): z.B. Bauteilspannungen, Massen- oder Volumenverhältnisse zu Beginn und Ende der Optimierung, Verformungen etc.
- Designvariable (Optimierungstyp): in welcher Form darf das Design durch den Optimierungssolver verändert werden, um das Optimierungsziel zu erreichen?

Zur Erstellung einer lösbaren Optimierungsaufgabe muss diese zunächst eindeutig und physikalisch sinnvoll definiert werden. Es gilt, ein Optimierungsziel zu definieren, welches durch Änderung der Designvariable und unter Berücksichtigung aller Randbedingungen gegen ein nach Möglichkeit globales Optimum läuft. In der Regel wird die Minimierung (z.B. Gesamtmasse) oder Maximierung (z.B. Bauteilsteifigkeit) einer Optimierungsantwort angestrebt.

##### Free-Size-Optimierung:

Die Free-Size-Optimierung wird verwendet, um lokal (je FE-Element) unterschiedliche Blech- bzw. Werkstoffdicken einer 2D-Schalenmodellierung zu ermöglichen. Damit ist es beispielsweise möglich, Lastpfade innerhalb einer Struktur zu ermitteln und gezielt zu verstärken. Am Beispiel von FVK-Laminaten können die unterschiedlichen Dicken der Einzellagen mit Vorzugsfaserorientierung optimiert und somit ein bestmöglicher Lagenaufbau ermittelt werden. In dieser Arbeit wird die lokale Dicke der vollflächigen LFT-Schicht zur Anbindung der LFT-Rippen optimiert (Kap. 7.3).

##### Topologie-Optimierung:

Das Ziel der Topologie-Optimierung ist es, eine belastungsgerechte Bauteilstruktur zu ermitteln, die in einem zuvor definierten und begrenzten Designraum beliebige Formen annehmen kann. Häufig wird diese Art der Optimierung in der frühen Phase der Bauteilentwicklung zur Identifizie-



rung von Lastpfaden oder für die Erstellung von Rippenstrukturen in Kunststoffbauteilen eingesetzt. Zusätzlich können fertigungsbedingte Randbedingungen in Form einer Entformungsrichtung oder Symmetrien vorgegeben werden (siehe Kap. 7.4).

### 2.4.3 Beispielanwendungen

Ein Leichtbauquerlenker im Multi-Material-Design unter Einsatz von kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff (CFK) wurde z.B. von SPANCKEN ET AL. [65] entwickelt, wobei der Fokus neben dem Leichtbaugedanken auf einer belastungs- und fasergerechten Auslegung lag. Dazu sind die Verformungen unter mehreren linear-statischen Lastfällen (Bremsen, Kurvenfahrt) analysiert und die Geometrie des Lenkers zu hoher Steifigkeit hin optimiert worden. Neben bis zu 22 CFK-Schichten (quasiisotrop) wurden auch bis zu 14 UD-Stränge integriert, die über einen Schlaufenanschluss um Bolzen mit den Lasteinleitungselementen aus Aluminium verbunden sind (siehe [Abbildung 2-17](#)). Obwohl während der Auslegung die Anwendbarkeit von serientauglichen Fertigungsverfahren (Hinterspritzen von Organoblechen, RTM-Verfahren) berücksichtigt wurde, erfolgte die Herstellung des Demonstrators durch Handlaminieren mit duroplastischem Epoxidharz. Im Vergleich zu einem nicht näher spezifizierten Serienbauteil aus Stahl konnte eine Gewichtsreduktion von 35 % erzielt werden. Vergleichswerte zur Verformung des Referenzbauteils sind nicht genannt. In der weiteren Entwicklung des Bauteils wurde zusätzlich das Verhalten des Hybridlenkers unter schwingender Beanspruchung analysiert und zur Bauteilüberwachung ein sogenanntes „*Structural-Health-Monitoring-System*“ (SHM-System) integriert. Durch Auswahl von sechs Messstellen, die vornehmlich in der Nähe der Lageranbindungen liegen, ist es möglich, kritische Bauteilbelastungen durch Messung der Dehnungen zu erkennen und den Nutzer so vor einem Versagen zu warnen oder alternativ belastungsabhängige Wartungsintervalle zu definieren [66].

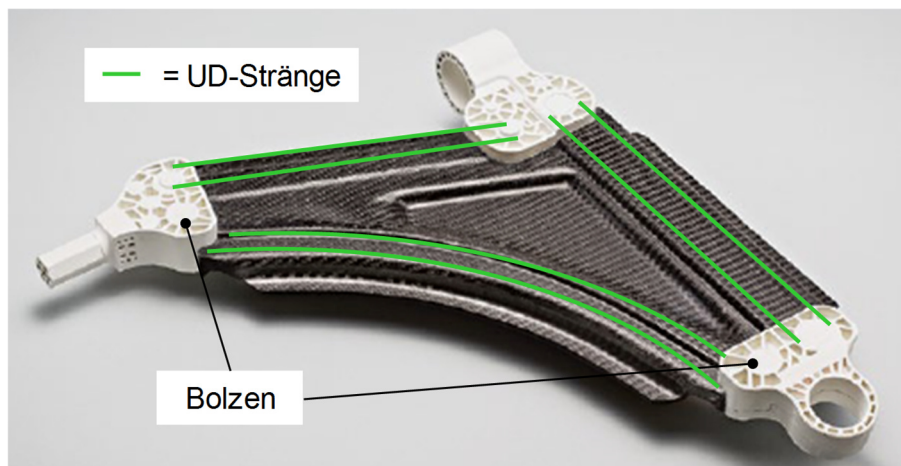


Abbildung 2-17: Querlenker aus CFK mit Lagern aus Aluminium nach [66]

Ein gänzlich anderer Ansatz wurde in der Entwicklung eines generischen Hybridlenkers in Sandwichbauweise verfolgt ([Abbildung 2-18](#)), dessen Hohlstruktur im Inneren mit einem Aluminiumschaumkern ausgefüllt ist und als äußere Decklage ein Hybridlaminat aufweist [67]. Das Hybridlaminat besteht sowohl aus glas- und kohlenstofffaserverstärktem Polyamid 6 als auch aus einer dünnen Aluminiumschicht als äußere Lage und hat somit den folgenden Lagenaufbau: Al / PA6-GF / PA6-CF / PA6-GF. Dabei erfüllen die Glasfaserlagen lediglich eine Isolationsfunktion gegen galvanische Kontaktkorrosion zwischen den Kohlenstofffasern und dem Aluminium der äußeren Decklage und des Schaumkerns. Durch die Verwendung von Aluminiumschaum soll einerseits eine hohe Versagenstoleranz und andererseits ein gutmütiges Versa-



gensverhalten gewährleistet werden. Während des Schäumens werden gleichzeitig die Lageranbindungen in Form von Stahlflanschen formschlüssig an den Kern angebunden, die vorab zusammen mit dem schäumbaren Aluminium in einem Graphitwerkzeug positioniert wurden. Die Verbindung von Schaumkern und dem Hybridlaminat erfolgt mittels Heißpressen (keine Angabe der Prozesstemperatur), wobei die äußerste Aluminiumschicht zur verbesserten Haftung mechanisch angeraut und entweder vorgeformt oder direkt im Prozess auf den Schaumkern geformt wird. Der Schaumkern kann vor dem Verpressen zusätzlich mit einer Silan-Beschichtung versehen werden [67].



Abbildung 2-18: Sandwich-Querlenker mit Schaumkern aus Aluminium und Hybridlaminat [67]

In einem weiteren Forschungsprojekt wurde von KURTENBACH ET AL. [68] ein generischer Längslenker einer Mehrlenker-Hinterachse (MLA) im Spritzgießprozess mit dem Ziel entwickelt, möglichst lange Fasern im Bauteil zu realisieren. Durch verschiedene Maßnahmen, sowohl auf Seiten der Anlagentechnik als auch in der Zusammensetzung des Compounds und der Lieferform der Fasern, konnte die Faserlänge eines glasfaserverstärkten PA 6.6 (50 % Glasfaseranteil) im Bauteil auf 0,75 mm und somit um 60 % gegenüber einem Standard-Kurzfaserverstärkterthermoplast gesteigert werden. Durch die Verarbeitung von Rovings (Endlosfasern) direkt im Compounder konnte eine weitere Steigerung auf 2 mm Faserlänge erzielt werden, diese führte jedoch zu Faseransammlungen ohne Matrixmaterial und somit zu schlechteren mechanischen Eigenschaften. Für die Auslegung des Bauteils wurden einerseits zwei dynamische Lastfälle (Bremsen und Beschleunigen) und andererseits drei sogenannte *Misuse*-Lastfälle (z.B. Bordsteinanfahrt) berücksichtigt. Als Zielwerte für die auftretenden Maximalspannungen und -dehnungen wurden die kritischen Spannungen und Dehnung in Faser- bzw. Fließrichtung (50 MPa / 0,6 %) sowie quer dazu (18 MPa / 0,2 %) im gesättigten Zustand des oben genannten Werkstoffs bei einer Temperatur von 80 °C definiert. Das Gewicht des Längslenkers konnte durch die reine Kunststoffkonstruktion um etwa 30 % im Vergleich zu einer nicht näher spezifizierten Referenz aus Stahl reduziert werden. Ein direkter Vergleich der Steifigkeiten oder maximalen Verformungen ist in [68] nicht aufgeführt. Weitere Verbesserungspotenziale für den Herstellprozess werden in der Möglichkeit des 2-Komponenten-Spritzguss gesehen, um dadurch z.B. eine direkte Anbindung von Lenker und Elastomerlager ohne eine nachträgliche Verklebung herzustellen.

PULINA und LIETAER [69] beschreiben die Entwicklung eines hybriden Querlenkers aus kurzfaserverstärktem Polyamid für ein Fahrzeug im B-SUV Segment, der ebenfalls durch Spritzgießen hergestellt wird und an den Lageranbindungen Metallhülsen aufweist (siehe [Abbildung 2-19](#)). Diese werden als metallische Einleger im Spritzgussprozess durch Umspritzen formschlüssig an die Lenkerstruktur angebunden. Im Besonderen wurde in der Entwicklung ein Fokus auf die Auslegung und Berechnung des Versagensverhaltens gelegt, um gleichzeitig Rückschlüsse auf die Parameter des Spritzgießprozesses zu erhalten. Als Ziel wurde die Erfüllung eines definierten Lastniveaus für einen statischen Kollaps-Lastfall ausgegeben. Während die Wahl eines iso-

tropen Materialmodells keine Übereinstimmung mit Ort und Lastniveau beim Versagen des real geprüften Bauteils aufweist, konnte durch Berechnungen der Faserorientierungen mit einer Spritzgießsimulation (Moldex3D) und Übertragung der Orientierungen (Digimat-RP) in die FEM-Simulation das Versagensverhalten der Realversuche bestätigt werden. Durch Variation der Anspritzpunkte wurde Einfluss auf die gewünschten Faserorientierungen im Bauteil genommen und eine Gewichtsreduktion von 35 % gegenüber dem Originalbauteil aus Stahl (2,6 → 1,7 kg) realisiert.



Abbildung 2-19: Hybrider Querlenker von PULINA und LIETAER [69] auf der JEC-Messe 2019

Zwei weitere Beispiele für Hybridlenker finden sich in erteilten Patenten der ZF Friedrichshafen AG [70] [71]. Die dort gezeigten 2- und 3-Punkt-Lenker ([Abbildung 2-20](#)) weisen jeweils eine äußere Metallstruktur auf, die innenliegend mit Kunststoffrippen versteift wurde. Im Fall des 3-Punkt-Lenkens sind die beiden nicht-radseitigen Lageranbindungen je nach Variante nur partiell durch ein Metallblech und zusätzlich mit Endlosfasern verstärkt.

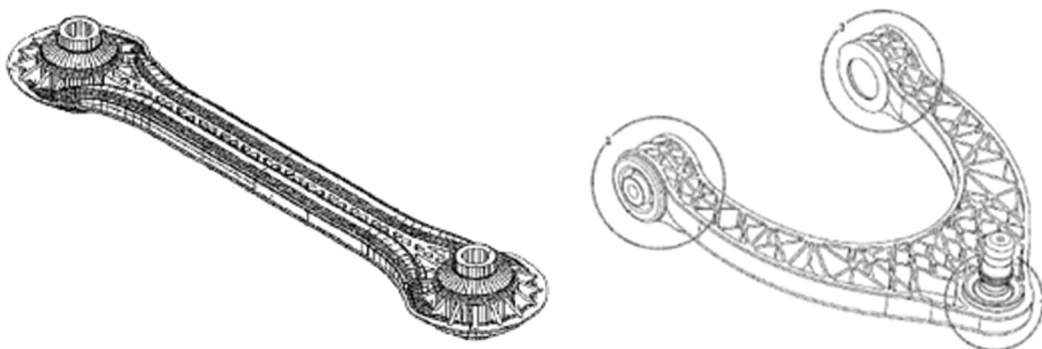


Abbildung 2-20: Hybrider 2-Punkt-Lenker (li.) und 3-Punkt-Lenker (re.) [70] [71]

Insgesamt bestehen laut ERSOY und GIES [72] jedoch Zweifel, ob sich reine Kunststofflenker bis zu einer Serienanwendung durchsetzen können. Vor allem die niedrige Dehngrenze (2-4 %) der aktuell verfügbaren Kunststoffe sowie die stark temperaturabhängigen Eigenschaften seien nur

durch Metallwerkstoffe in Hybridbauweisen auszugleichen. Nach wie vor seien jedoch Lenkerbauteile in der Ausführung als einschalige Stahlbauteile die wirtschaftlichste Lösung.

## 2.5 Verbindungstechnik Hybridbauteile

Durch die Artfremdheit von Kunststoffen und Metallen ist kein direkter Stoffschluss zwischen den Werkstoffen herstellbar. Als Varianten der Hybrid-Verbindungstechnik bleiben daher Formschluss, Kraft- bzw. Reibschluss und der Stoffschluss mit Hilfe von Klebstoffen oder Haftvermittlern zur Auswahl. Während ein Formschluss durch Hinterschnitte oder Umspritzen im Spritzgießprozess möglich ist [73], entfällt diese Option für das in dieser Arbeit zu entwickelnde Verfahren Hybridpressen. Da auch Kraft- oder Reibschluss nur durch einen Einsatz zusätzlicher Verbindungselemente (Niete oder Schrauben) möglich ist, liegt der Fokus im Folgenden auf stoffschlüssigen Anbindungen zwischen Metall und Kunststoff durch Adhäsion.

Die Verbindungsmechanismen der Adhäsion sind komplex und werden mit verschiedenen Adhäsionstheorien beschrieben, wobei eine exakte Differenzierung der Einflüsse auf die Gesamtadhäsion nicht möglich ist. HABENICHT [74] unterscheidet im Allgemeinen zwischen mechanischer und spezifischer Adhäsion sowie Autoadhäsion. Unter mechanischer Adhäsion wird das Eindringen des Haftvermittlers oder Kunststoffs in Poren oder Unebenheiten der Oberfläche verstanden, wobei der Begriff „Mikroformschluss“ häufig verwendet wird. Die spezifische Adhäsion umfasst Verbindungen, die auf Gesetzmäßigkeiten der Chemie, Physik oder Thermodynamik beruhen. Autoadhäsion beschreibt die Verbindung von Makromolekülen gleichartiger Kunststoffe und ist somit ohne Relevanz für Kunststoff-Metall-Verbindungen. GARBASSI ET AL. [75] unterteilen die Effekte der Adhäsion in mechanische Verbindung, Interdiffusion, elektrostatische Anziehung und chemische Wechselwirkungen, wobei Letzteren die größte Relevanz zur Erhöhung der Adhäsion mit Polymer-Oberflächen beigemessen wird. Nach FRIEDRICH [76] können alle Effekte der Adhäsion bei Polymeren der mechanischen Adhäsion sowie physikalischen und chemischen Wechselwirkungen zugeordnet werden. Zur Ausbildung von kovalenten Bindungen zwischen Metallen und Haftvermittlern sind neben gereinigten Oberflächen auch Modifikationen der Oberflächen (z.B. durch Phosphatierung) möglich. Bei Verbindungen zwischen Polymer und Metall muss der dafür eingesetzte Haftvermittler funktionale Gruppen zu beiden Werkstoffen aufweisen – häufig werden daher z.B. Copolymere eingesetzt [76] [77].

In Bezug auf die erforderliche Verbundfestigkeit zwischen Metall und Kunststoff haben GRUJIC ET AL. [78] simulativ den Einfluss der Festigkeit (im Bereich 2-20 MPa) von „Polymer-Metall-Hybriden“ (PMH) auf das zu erzielende Leichtbaupotenzial für einen Einsatz von hybriden Trägerbauteilen in Karosseriestrukturen ermittelt. Demnach steigt das Leichtbaupotenzial bei PMH im Vergleich zu einem Referenzbauteil aus Stahl bis zu einer Verbindungsfestigkeit von 10 MPa stark an, darüber hinaus sind jedoch keine signifikanten Gewichtsreduktionen erzielbar. Nachfolgend werden daher die erzielten Scherzugfestigkeiten einiger Arbeiten vorgestellt, die sich entweder mit verschiedenen Vorbehandlungen der Metalloberfläche oder dem Einsatz von Haftvermittlern befassen.

### 2.5.1 Direktverbindungen ohne Haftvermittler

Das Ziel einer mechanischen Vorbehandlung des metallischen Fügepartners besteht einerseits darin, die wirkende Oberfläche zu vergrößern und andererseits eine möglichst hohe Oberflächenrauheit zur Erzielung von Mikroformschlüssen zu schaffen. Chemische Vorbehandlungen in Form von Plasmabehandlungen, durch Reinigen der Oberfläche oder mit Hilfe elektrolytischer Beschichtungen verfolgten zumeist das Ziel, die metallischen Oberflächen zu aktivieren. MITSCHANG ET AL. [79] haben den Einfluss verschiedener Vorbehandlungen von AlMg3-Blech-

streifen zur Verbindung mit einem kohlenstofffaserverstärkten PA 6.6 mittels induktiver Erwärmung untersucht. Dabei zeigte sich, dass die mechanische Vorbehandlung mittels Korund-Sandstrahlen (11 MPa) einer Plasmavorbehandlung (8 MPa) und der Reinigung mit Aceton (7,2 MPa) deutlich überlegen ist. Die Festigkeit konnte durch Einsatz einer 100 µm PA 6.6-Folie ohne Faserverstärkung als Zwischenschicht zudem auf bis zu 14 MPa gesteigert werden. Der Einfluss des Sandstrahlens mit Korund wurde ebenfalls von PAUL [80] für die Werkstoffkombination Stahl / PA6.6-GF40 im Spritzguss mit ähnlichem Ergebnis untersucht, wobei die Blecheinleger nicht vorgewärmt und zudem beidseitig von einem LFT umschlossen wurden. Die erzielten Festigkeiten liegen mit 7-8 MPa um einen Faktor 6 über den Werten ohne Vorbehandlung. FLOCK [81] hat eine Vielzahl an Vorbehandlungen für das Wärmeleitfügen von Stahl und PA6.6-GF30 untersucht und für das Sandstrahlen mit Korund im Mittel eine maximale Festigkeit von 9,9 MPa bei 270 °C Fügetemperatur ermittelt. Die höchste Scherzugfestigkeit von über 30 MPa konnte durch eine grobe Laserstrukturierung der Stahloberfläche erzielt werden. Das Verfahren ist jedoch sehr zeitaufwändig und somit aktuell nicht für eine Anwendung bei großflächigen Verbindungen auf Bauteilebene geeignet.

Neben künstlich aufgerauten oder mit Hilfe von Plasma aktivierten Oberflächen kann auch eine Zinkbeschichtung einen positiven Einfluss auf die Verbindungsfestigkeit zwischen Stahl und Kunststoff haben. Von ZHAO [82] wurde diesbezüglich eine Verbindungsfestigkeit von 12 MPa für eine Kombination aus verzinktem Stahl und spritzgegossenem PA6-GF30 ermittelt, wobei das Stahlblech zuvor auf 240 °C erwärmt wurde.

Die nachfolgende Tabelle fasst die genannten Arbeiten noch einmal zusammen:

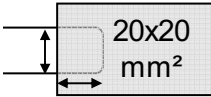
Autor/-en	Vorbehandlung	Probenform	Werkstoffpaarung	Festigkeit
MITSCHANG ET AL. [79]	Sandstrahlen	DIN EN 1465 (25x12,5 mm <sup>2</sup> )	AlMg3 / PA6.6-CF	11 MPa
	Plasmastrahlen			8 MPa
	Aceton-Reinigung			7,2 MPa
PAUL [80]	Sandstrahlen		Stahl / PA6.6-GF40	7-8 MPa
FLOCK [81]	Sandstrahlen	DVS 2203-6 (20x20 mm <sup>2</sup> )	Stahl / PA6.6-GF30	9,9 MPa
	Laserstrukturieren			>30 MPa
ZHAO [82]	Zink, elektrolytisch	Sonderform, k.A.	Stahl / PA6-GF30	12 MPa

Tabelle 2-2: Erzielbare Festigkeiten durch Direktverbindungen von Metall und Kunststoff

Generell muss bei einem Vergleich von Festigkeiten, die im Scherzugversuch ermittelt wurden, berücksichtigt werden, dass eine Abhängigkeit von der Probenform und insbesondere von der Überlappungsform und -fläche besteht, da die vorherrschenden Spannungen vor allem am Rand der Überlappungsfläche unterschiedlich hohe Spitzen ausbilden können.

## 2.5.2 Verbindungen mit polymeren Haftvermittlern

Haftvermittler sind ebenfalls Klebstoffe (z.B. Schmelzklebstoffe), meistens wird der Begriff im Vergleich zu Strukturklebstoffen jedoch für sehr dünne und zudem vollflächige Beschichtungen verwendet. Während Klebstoffe in der Regel erst unmittelbar vor dem Fügeprozess appliziert werden, können Haftvermittler als Lacke oder Beschichtungen bereits im Voraus auf den metallischen Fügepartner aufgebracht und trocken gelagert werden. Aus diesem Grund besteht eine

besondere Eignung für Prozesse, in denen der Kunststofffügepartner eines Hybridbauteils urgeformt wird (vgl. Kap. 2.3) oder andere Fügearten prozessbedingt ausgeschlossen werden (z.B. Formschluss durch Umspritzen). Durch die Integration des Fügeprozesses in den Fertigungsprozess kann somit ein zusätzlicher Prozessschritt entfallen, der die Wirtschaftlichkeit und Akzeptanz eines neuen Verfahrens verbessern kann.

#### Erzielbare Festigkeiten:

In Kap. 2.3 wurden bereits einige Arbeiten genannt, die den Einsatz von verschiedenen Haftvermittlersystemen dokumentieren. Während zumeist die Scherzugfestigkeit als Kennwert für die Verbindungsfestigkeit eingesetzt wird, werden für Anwendungen in crash-relevanten Bauteilen Schäl-Prüfungen (*peel tests*) bevorzugt [57]. Die Art der eingesetzten Haftvermittler ist dabei vielfältig. So wurden von ZHAO [82] mit der Auswahl eines Epoxidharzlack-Systems Scherzugfestigkeiten von 13 MPa erzielt. Durch WEHMEYER [52] wurde der Einfluss einer Vortemperierung von beschichteten Stahlblechen auf die Verbindungsfestigkeit mit PA6-GF30 untersucht und dabei sowohl ein Haftvermittler auf Basis von Phenolharz (22,5 MPa) als auch ein flüssiger Lack auf Basis von Copolyamiden (20 MPa) eingesetzt. Das identische Copolyamid-Haftvermittlersystem konnte in Untersuchungen von VITTINGHOFF und DRUMMER [73] trotz einer Optimierung der Verfahrensparameter und unter Verwendung des gleichen Kunststofftyps lediglich eine maximale Scherzugfestigkeit von 12,4 MPa erreichen, wobei jedoch ein anderer Probekörper mit deutlich größerer Überlappungsfläche (Tabelle 2-3) eingesetzt wurde. Ein Pulverlack auf Basis von Copolyamid erzielte bei SCHILD [53] mit dem ebenfalls identischen Kunststofftyp eine maximale Scherzugfestigkeit von 14 MPa gegenüber einem Nasslack als Mehrkomponentensystem mit lediglich 9,8 MPa. Bei allen vier genannten Arbeiten wurden die Probekörper durch Einlegen von beschichteten Stahlblechen in ein Spritzgießwerkzeug und anschließendes Anspritzen hergestellt.

Neben Copolymeren können auch reine Polymere als Haftvermittlerschichten eingesetzt werden. FLOCK ET AL. [83] erzielten mit einer PA 11-Schicht als Verbindungsschicht zwischen einem Edelstahlblech und PA 66 eine Scherzugfestigkeit von 8 MPa, wobei die Verbindung der beiden Kunststoffe mit Hilfe des Ultraschallschweißens hergestellt wurde.

Die nachfolgende Tabelle stellt eine Übersicht der zuvor genannten Arbeiten dar:

<b>Autor/-en</b>	<b>Haftvermittlertyp</b>	<b>Probenform</b>	<b>Werkstoffpaarung</b>	<b>Festigkeit</b>
ZHAO [82]	Epoxidharzlack, -	<i>Sonderform, k.A.</i>	Stahl / PA6-GF30	13 MPa
WEHMEYER [52]	Phenolharz, 60 µm	<i>Überlappprobe</i> (25x10 mm <sup>2</sup> )	Stahl / PA6-GF30	22,5 MPa
	Copolyamid, 70 µm			20 MPa
VITTINGHOFF & DRUMMER [73]	Copolyamid, 28,6 µm	<i>Überlappprobe</i> (20x20 mm <sup>2</sup> )	Stahl / PA6-GF30	12,4 MPa
SCHILD [53]	Copolyamid, 100 µm	<i>Überlappprobe</i> (25x12,5 mm <sup>2</sup> )	Stahl / PA6-GF30	14 MPa
	Nasslack*, 40 µm			9,8 MPa
FLOCK ET AL. [83]	PA 11, 250-500 µm	<i>Überlappprobe, k.A.</i>	Edelstahl / PA 66	8 MPa

\* = Mehrkomponentensystem aus Primer Typ 219575-20 und Decklack Typ 319225-70

Tabelle 2-3: Erzielbare Festigkeiten durch Haftvermittler in FVK-Metall-Verbindungen

### Applikation und Anforderungen:

Haftvermittlersysteme unterscheiden sich nicht nur in der Art der Zusammensetzung, sondern auch durch die Art der Applikation. In den vorgestellten Verfahren der Kapitel 2.3.2 bis 2.3.4 werden jeweils Haftvermittler unterschiedlicher Lieferform eingesetzt. Während in [57] ein Haftvermittler als Folie in der Stärke von 0,3 mm auf das bereits umgeformte Stahlblech appliziert wird, kann der Haftvermittlerlack aus [50] in Form einer Tauchlackierung (*Coil-Coating*) aufgetragen werden. Eine weitere Möglichkeit zur Applikation des eingesetzten Haftvermittlers stellt die elektrostatische Pulverbeschichtung dar [53] [60]. Auch das Auftragen einer haftvermittelnden PA 11-Schicht mittels Flammsspritzen ist bereits dokumentiert [83]. Im Gegensatz zu einem flüssigen Lack können durch Folien oder mittels Pulverbeschichtung deutlich höhere Schichtdicken eingestellt werden, die je nach Elastizität des Haftvermittlers auch eine Umformung des Blechs und somit eine Dehnung tolerieren. Von SCHILD [53] wurde zusätzlich der Einfluss des Umformgrads bzw. der Vordehnung von mit Haftvermittler beschichteten Blechen im kalten Zustand für drei verschiedene Haftvermittlersysteme auf die Verbindungsfestigkeiten im Scherzugversuch mit dem Ergebnis untersucht, dass eine Ausdünnung der Haftvermittlerschicht auch die zu erzielende Scherfestigkeit reduziert.

Haftvermittlersysteme für Metall-Kunststoff-Verbindungen müssen des Weiteren in der Lage sein, die unterschiedlichen Wärmeausdehnungen der Werkstoffe sowohl während des Fertigungsprozesses und dem Abkühlen im Werkzeug als auch im späteren Einsatzbereich des Bauteils auszugleichen. Häufig wird in diesem Zusammenhang der Begriff „Delta-Alpha-Problematik“ verwendet – die Differenz der Wärmeausdehnungskoeffizienten. Untersuchungen von FRANTZ [84] zeigen, dass bei Einsatz eines elastischen Haftvermittlers die Durchbiegung einer ebenen Kunststoff-Metall-Verbindung in Folge der Abkühl-Schwindung beim Pressen von CFK-*Prepregs* (englische Kurzform von *preimpregnated fibers* = vorimprägnierte Fasern) auf Stahl um bis zu 91 % reduziert werden kann. Ursächlich hierfür sind reduzierte Eigenspannungen, die zusätzlich in einer Erhöhung der ermittelten Scherzugfestigkeiten von 67 % resultieren. Eine weitere Möglichkeit zur Reduktion von Eigenspannungen zwischen Metall und Kunststoff besteht darin, eine elastische Zwischenschicht einzusetzen. BRÄUER ET AL. [85] beschreiben die Entwicklung einer Adhäsionsschicht aus einem Uretion-Pulverlack, der als Blechbeschichtung über ein weiches thermoplastisches Polyurethan (TPU) als elastische Zwischenschicht zum Spannungsausgleich beispielsweise an eine Funktionsschicht aus Polyamid angebunden werden kann. KÜHNERT ET AL. [86] heben dabei besonders die Formstabilität des applizierten Lacksystems bei komplexen 3D-Umformungen des Metallblechs hervor.

### **2.5.3 Lasteinleitungselemente für Metall-FVK-Hybridbauteile**

In Kapitel 2.4.3 wurden bereits verschiedene Möglichkeiten zur Realisierung der Lasteinleitung für hybride Fahrwerksbauteile vorgestellt. Es fällt auf, dass es sich dabei grundsätzlich nicht um Standardverbindungselemente handelt, sondern um Eigenentwicklungen für den jeweiligen Anwendungsfall. Während in [66] eine Bolzenverbindung über unidirektionale Faserstränge hergestellt wird und in [67] vorgelochte Stahlelemente formschlüssig in einen Aluminiumschaum integriert werden, sind die Lageranbindungen des Fahrwerkslenkers aus [69] durch umspritzte Metallhülsen abgebildet. Häufige Herausforderungen bei der Applikation von bekannten, metallischen Fügetechniken auf hybride Verbindungen von Metallen und Kunststoffen stellen einerseits die Vermeidung von Faserschädigungen und andererseits die begrenzte mechanische Belastbarkeit und Kriechneigung vor allem der thermoplastischen Kunststoffe dar. Zusätzlich müssen aufgrund der niedrigen Schmelztemperaturen im Vergleich zu Duroplasten hohe Wärmeeinträge durch z.B. lokale Schweißnähte vermieden werden.

Eine weit verbreitete Füge­technik zur Verbindung von Metall- und Kunststoffbauteilen stellen metallische Gewinde­einsätze (*Inserts*) dar, die entweder bereits für den Urformprozess des Kunststoffs im Werkzeug eingelegt sind und dort umspritzt oder alternativ erst nachträglich eingebracht werden. Beim nachträglichen Einbringen wird zwischen mechanischen und thermischen Verfahren unterschieden, zu denen auch Ultraschallverfahren zählen. In der nachfolgenden Abbildung 2-21 sind verschiedene Gewinde­einsätze für Kunststoffe abgebildet, die entweder nachträglich eingepresst, -geschraubt oder direkt umspritzt werden. Durch die Rändelungen auf den Außenseiten entsteht ein Formschluss mit dem Kunststoff – die Innengewinde müssen stets kunststofffrei bleiben. Zusätzlich besteht bei vielen Elementen in Verbindung mit thermoplastischen Kunststoffen die Möglichkeit einer thermischen Einbettung. Hierbei wird das Fügeelement zunächst erhitzt, um während der Einbringung den Kunststoff lokal zu plastizieren und gleichzeitig zu verdrängen. Nach der Erstarrung bildet sich dann ebenfalls ein Formschluss um die Rändelung des Fügeelements aus.

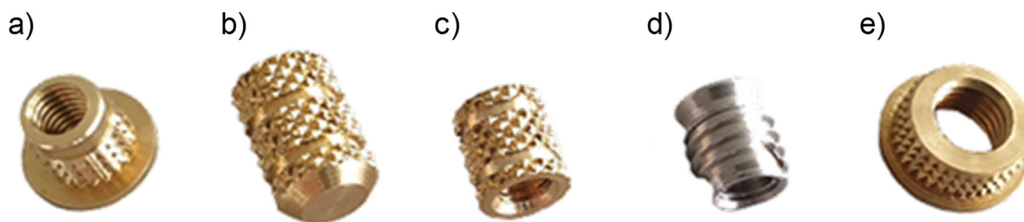


Abbildung 2-21: Gewinde­einsätze zum Einpressen oder Einfügen mittels Ultraschall (a, c, e), Umspritzen oder Warmeinbetten (b) und Gewindeschneiden (d) der Firma Tappex

Für die zu übertragenden Lasten von Fahrwerkslenkern sind diese Füge­elemente zwar alle deutlich zu klein dimensioniert, das Grundprinzip der Warmeinbettung eines Metallelements in einen Thermoplast soll jedoch auch bei der Lageranbindung des Fahrwerk-Demonstrators (siehe Kap. 8.6) zum Tragen kommen.

## 2.6 Zusammenfassung und Erkenntnisse aus dem Stand der Technik

Der vorgestellte Stand der Technik zeigt auf, dass neben der Blechumformung mithilfe von Wasser-Öl-Emulsionen vermehrt thermoplastische Kunststoffe im plastifizierten Zustand zur Umformung von metallischen Werkstoffen eingesetzt und bereits Verfahren zur Kombination von Kunststoffurformung und Metallumformung entwickelt werden. Das Ziel aller in Kap. 2.3 vorgestellten Verfahren ist die Reduktion von Einzelprozessen und Fügeoperationen, wodurch auch der Aufwand für Anlagen- und Werkzeugtechnik begrenzt und letztlich die Fertigung von Hybridbauteilen wirtschaftlicher gestaltet werden kann. Als Fertigungsverfahren für Kunststoffe eignen sich dabei sowohl das Spritzgießen als auch das Fließpressen, wobei Letzteres vor allem hinsichtlich der zu erzielenden Faserlänge im Bauteil und den daraus resultierenden, höheren mechanischen Eigenschaften Vorteile aufweist. Des Weiteren kann das Fließpressen von LFT durch ein erneutes Aufschmelzen des Werkstoffs auch von Unternehmen angewendet werden, die über keine eigene Aufbereitungsanlage (Compounder) verfügen und bislang keinen Kunststoff verarbeitet haben – ein entsprechendes Wissen zur Kunststoffverarbeitung und der dazugehörigen Werkzeugtechnik vorausgesetzt.

Zusammenfassend weisen die im Stand der Technik genannten Verfahrensentwicklungen folgende relevante Vor- und Nachteile sowie noch ungenutzte Potenziale auf.

Vorteile:

- Kombination von bisher werkstofflich getrennten Fertigungsverfahren und dadurch Einsparung von Einzelschritten
- Herstellung einer stoffschlüssigen Verbindung zwischen Kunststoff und Metall während der Fertigung bzw. Metallumformung durch Einsatz von Haftvermittlern

Nachteile:

- Die Demonstration der Verfahrensfähigkeiten erfolgte teilweise an einfachen Probengeometrien ohne realen Bauteilbezug
- Aufwendige Adaption von Anlagentechnik (z.B. Niederhalterfunktion in einer Spritzgießmaschine) und Werkzeugen (z.B. Kombination von IHU und Spritzgießen) erforderlich

Potenziale:

- Steigerung der mechanischen Eigenschaften durch Erzielung höherer Faserlängen im Grundwerkstoff (Compound) und späteren Bauteil
- Auslegungsmethoden für Hybridbauteile im Allgemeinen
- Steigerung von Blechdicke und Festigkeit der verwendeten Stahlwerkstoffe

Aus den genannten Potenzialen und zusammen mit den in Kap. 2.2.1 beschriebenen Vorteilen des Fließpressens gegenüber dem Spritzgießen sowie der Vermutung, dass auch eine Kombination mit der Blechumformung möglich sein muss, ist die Idee für das als Hybridpressen bezeichnete Verfahren entstanden [7]. Im Rahmen dieser Arbeit wird der grundsätzliche Prozess entwickelt, verschiedene Werkzeug- und Dichtkonzepte erarbeitet sowie eine Auslegungsmethode für neue Hybridbauteile auf Basis der Finite-Elemente-Methode implementiert, die bisher aus Stahl gefertigt werden. Die generelle Machbarkeit des Verfahrens wird anhand verschiedener Probekörper demonstriert und mit der Auslegung und Fertigung eines realen Fahrzeugbauteils final belegt. Durch die Reduktion der Blechdicke bei gleichzeitiger Verstärkung mittels LFT sollen die so entstehenden Bauteile gegenüber den Ursprungsbauteilen aus Stahl zudem deutlich leichter werden und nur einen einzigen Umformschritt zur Herstellung benötigen.

Ein besonderes Ziel der Verfahrensentwicklung neben der Betrachtung der Wirtschaftlichkeit durch Reduktion von Prozessschritten im Vergleich zu einer werkstofflich getrennten Fertigung ist es, aufzuzeigen, dass mit Hilfe des Kunststoffdrucks auch Blechdicken von über 1,0 mm und zudem höher- bis hochfeste Stahlwerkstoffe (hier:  $R_m < 700$  MPa) umgeformt werden können, was deutlich über den aktuellen Stand der Technik hinausführt.





### 3 Verfahren Hybridpressen

Der Name Hybridpressen beschreibt ein Pressverfahren, bei dem mindestens zwei verschiedene Werkstoffe (ein Metallblech + LFT) in einem gemeinsamen Werkzeug simultan umgeformt werden. Durch das zu Beginn der Arbeit erwähnte Forschungsprojekt namens „MultiForm“, in dessen Rahmen große Teile dieser Arbeit entstanden sind, ist auch die Benennung „MultiForm-Verfahren“ bekannt, wobei MultiForm eine Abkürzung für den englischen Begriff *Multi-Material-Forming* darstellt – ein kombiniertes Umformverfahren für unterschiedliche Werkstoffe in einem gemeinsamen Werkzeug.

#### 3.1 Grundidee und Prozessbeschreibung

Grundsätzlich werden beim Hybridpressen mit den Verfahren Tiefziehen und Fließpressen eine Metallkaltumformung und eine Kunststoffurformung kombiniert. Durch Verwendung des plastifizierten LFTs als Druckmedium handelt es sich per Definition nach DIN 8584-3 (siehe Kap 2.1) somit um einen Tiefziehprozess mit Wirkmedien, da die vollständige Ausformung des Metallblechs lediglich über den Kunststoffdruck erfolgen soll. Das nachfolgende Prozessschema (Abbildung 3-1) veranschaulicht den prinzipiellen Ablauf des Verfahrens:

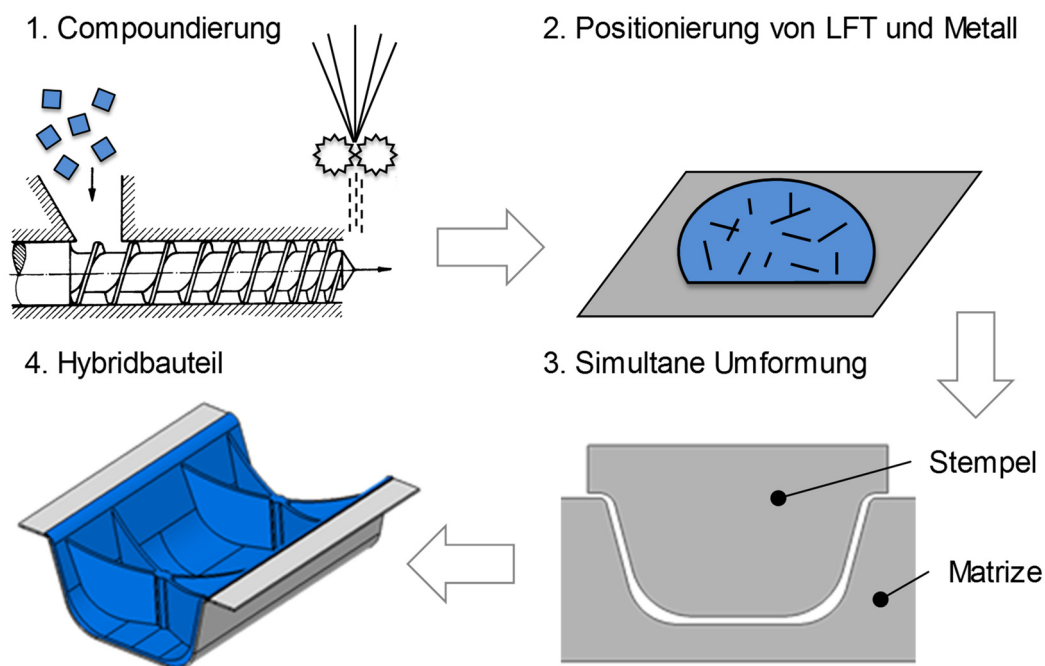


Abbildung 3-1: Prozessschaubild des Hybridpressens

Ein mit einem auf den verwendeten Thermoplast abgestimmten Haftvermittlersystem beschichtetes Metallblech und ein LFT-Extrudat stellen die Ausgangsbasis für den Prozess dar. Die Aufbereitung des LFTs erfolgt, wie in Kap. 2.2 beschrieben, durch einen 2-stufigen Compounder (1.) und kann entweder direkt verarbeitet oder alternativ durch nachträgliches Erwärmen in einem Umluftofen oder mittels Infrarotstrahlung (IR) direkt vor dem Prozess plastifiziert werden. Das beschichtete Metallblech wird zur Aktivierung des Haftvermittlers und zur Vermeidung einer zu schnellen Abkühlung des LFTs bei direktem Kontakt vorgewärmt. Je nach Anordnung des Werkzeugs wird das plastifizierte LFT entweder zusammen mit dem Metallblech (Normallage) in das kombinierte Um- und Urformwerkzeug eingelegt (2.) oder direkt auf dem Stempel (Hutlage) platziert (Erläuterung Werkzeugtechnik: siehe Kap. 3.2.2). Im letzteren Fall würde das Blech anschließend mit der Haftvermittlerseite nach unten auf dem Niederhalter des Werkzeugs posi-

tioniert. Durch Schließen des Werkzeugs und Aufbringen des Pressdrucks werden nun die drei folgenden Einzelprozesse zeitgleich miteinander kombiniert (3.):

- 1) Umformung des LFTs zu einer vollflächigen Schicht und einer optimierten Rippenstruktur
- 2) Umformung des Metallblechs und Ausformung mit Hilfe des Kunststoffdrucks
- 3) Herstellung einer vollflächigen, stoffschlüssigen Verbindung zwischen LFT und Haftvermittler und somit auch indirekt zwischen Metall und LFT

Wie in Abbildung 3-1 zu erkennen ist, variieren die Konturen von Stempel und Matrize nicht nur durch einen Offset der Blechdicke und der konstanten LFT-Schichtdicke, sondern im Bereich der unteren Radien zusätzlich um einen Abstand der lokal dickeren LFT-Schicht. In diesem Bereich wird deutlich, dass die Ausformung des Blechs allein durch den Druck des LFTs und nicht durch Stempelkontakt erfolgt. Nach dem Öffnen des Werkzeugs kann somit ein fertig ausgeformtes und stoffschlüssig verbundenes Metall-FVK-Hybridbauteil entnommen werden (4.). Nicht abgebildet ist ein optionaler, nachträglicher Beschnitt des Bauteils, der jedoch obligatorisch in der Kalt- und Warmumformung von Metallblechen ist. Mit dem Wasserstrahlschneiden wird in Kap. 8.5 eine mögliche Variante des Beschnitts näher beschrieben.

Zusammenfassend ergeben sich folgende Vorteile des Hybridpressens:

- Leichtbaupotenzial durch belastungsgerechte Auslegung und reduzierte Blechdicken im Vergleich zu reinen Metallbauteilen
- Designfreiheit bei der Auslegung der innenliegenden LFT-Verstärkungsstruktur ähnlich dem Spritzgießen, jedoch mit deutlich höherer Faserlänge im Bauteil
- Ein-Schritt-Prozess → erhöhte Wirtschaftlichkeit (Zykluszeit <60 s / Kosten) gegenüber einer werkstofflich getrennten Fertigung mit anschließendem Fügeprozess
- Werkstoffkombination mit vorhersagbarem und gutmütigem Versagensverhalten → Fail-Safe-Verhalten (vgl. Kap. 2.4.1)

## 3.2 Verwendete Anlagentechnik

Die nachfolgenden Abschnitte geben einen Überblick über die erforderliche Pressen- und Werkzeugtechnologie für das neu entwickelte Verfahren Hybridpressen sowie die Verwendung von Infrarotstrahlung zum erneuten Plastifizieren des LFTs vor der Verarbeitung.

### 3.2.1 Pressentechnologie

Ein Hauptvorteil des Verfahrens Hybridpressen besteht darin, dass sowohl für das Tiefziehen als auch für das Fließpressen bereits hydraulische Pressen eingesetzt werden. Prinzipiell sind die Umformgeschwindigkeiten in der Metallumformung höher als beim Fließpressen und es gibt zur Steuerung des Blecheinzugs über den Niederhalter häufig eine zweite hydraulische Ansteuerung, ein sogenanntes Ziehkissen, welches in der Regel im Pressentisch angeordnet ist. Beim Fließpressen muss zudem das Schließprofil (Geschwindigkeit des Stempels) der Presse in Abhängigkeit vom Stempelweg steuerbar sein. Aufgrund von auftretenden Scher- und Seitenkräften während der Umformung sowohl beim Fließ- als auch beim Hybridpressen sollte die Presse zudem über eine Säulenführung und optional über eine aktive Parallelhaltung verfügen. Die Pressenanforderungen für das Hybridpressen lassen sich demnach wie folgt zusammenfassen:

- Ausreichend hohe Presskraft zur Erzielung der benötigten Umformdrücke im LFT
- Integriertes Ziehkissen oder einen zweiten, auf Verdrängung steuerbaren Hydraulikkreislauf zur Realisierung einer Ziehkissen-Funktion
- Steuerbarkeit von Stempelgeschwindigkeit und Presskraft über den Verfahrensweg

- Optional: Steuerbarkeit der Ziehkissenkraft über den Verfahrensweg

Im Rahmen dieser Arbeit werden die grundlegenden Versuche zur Prozess- und Werkzeugentwicklung auf einer 225 t-Pressen (Wickert WKP 2000 S, Leistungsdaten und Spezifikationen siehe Anhang 12.1) mit bis zu 500 kN Niederhalterkraft durch ein hydraulisches Ziehkissen im Pressentisch am Lehrstuhl für Fahrzeugleichtbau durchgeführt. Die Fertigung der Demonstratoren erfolgt sowohl auf einer hydraulischen 1.600 t-Pressen (Müller-Weingarten BZE 1600) für die Metallumformung bei voestalpine als auch auf einer großen 3.600 t-Pressen (Dieffenbacher Compress Plus) für das Fließpressen mit geregelter Parallelhaltung bei Weber Fibertech. Es gilt jedoch zu beachten, dass bei Pressen mit hoher Presskraft und entsprechend großem Pressentisch je nach Werkzeuggröße die Maximalleistung nicht vollständig abgerufen werden darf, da ansonsten eine unzulässige Durchbiegung der Druckplatte oder des Pressentischs auftreten oder alternativ das Werkzeug beschädigt werden kann.

### 3.2.2 Werkzeugtechnologie

Die eingesetzte Werkzeugtechnologie orientiert sich durch Verwendung von Stempel, Matrize und Niederhalter grundsätzlich an der Metallumformung, muss jedoch auch zusätzliche Elemente der Kunststoffurformung in Form eines Dichtkonzepts aufweisen. Die Verwendung von Tauchkantenwerkzeugen vom Fließpressen (siehe [Abbildung 2-13](#)) ist aufgrund des erforderlichen Blecheinzugs nicht möglich. Auf die Besonderheiten zur Abdichtung wird in den Kapiteln 4.2.4 und 4.3.3 näher eingegangen. Des Weiteren muss die einzubringende Form der LFT-Verstärkungsstruktur (Rippen) bereits als Gegenkontur im Stempel vorhanden sein. Die Verwendung einer Werkzeugtemperierung bzw. -kühlung zählt in beiden Fertigungsverfahren zum Stand der Technik und kann z.B. mit Hilfe von externen Temperiergeräten mit den Medien Wasser oder Öl erfolgen. Der Vorteil gegenüber elektrischen Heizpatronen liegt in der Möglichkeit, die eingebrachte Wärme des plastifizierten LFTs bei hohen Stückzahlen und kurzen Zyklen aus dem Werkzeug abzuführen.

In Bezug auf die Anordnung können die Werkzeuge sowohl in Hutlage (Stempel unten, fixiert) als auch in Normallage (Matrize unten, fixiert) ausgelegt sein. Der Vorteil von Werkzeugen in Normallage liegt in der direkten Positionierung von LFT und Metallblech aufeinander, während der LFT in Hutlage auf dem Stempel eingelegt werden muss. Wenn ein Ziehkissen zur Realisierung der Niederhalterkraft zur Verfügung steht, ist eine Anordnung in Hutlage angezeigt, da Ziehkissen in der Regel im Pressentisch unter dem Werkzeug positioniert sind. In Normallage können Niederhalterkräfte z.B. über Schrauben- oder Gasdruckfedern realisiert werden, wobei hier die fehlende Einstellmöglichkeit über den Verfahrensweg als nachteilig anzusehen ist.

### 3.2.3 Infrarotstrahlung

Neben der Direktverarbeitung aus einem Extruder kann LFT auch durch nachträgliches Aufheizen in den schmelzeförmigen Zustand versetzt werden. Bei der Umformung von endlosfaserverstärkten Thermoplast-Halbzeugen (z.B. Organobleche) im Spritzgießprozess ist der Einsatz von Infrarotstrahlung (IR) zur Vorwärmung bereits etabliert [87]. Die Vorteile liegen vor allem in der kontaktlosen Erwärmung, einem schnellen Ansprechverhalten der Strahler und daraus resultierend einer guten Regelbarkeit sowie einem zielgerichteten und zeitlich begrenzten Wärmeeintrag [88]. Bei der Verwendung von Polyamid wird eine mittelwellige Strahlung favorisiert, da die vom Strahler emittierte Wellenlänge im Bereich von 2-4  $\mu\text{m}$  die höchste Bestrahlungsstärke aufweist und zudem exakt den Absorptionsbereich von Polyamid trifft. Die Erwärmung erfolgt demnach durch Absorption der Infrarotstrahlung im „Inneren“ des Werkstoffs.

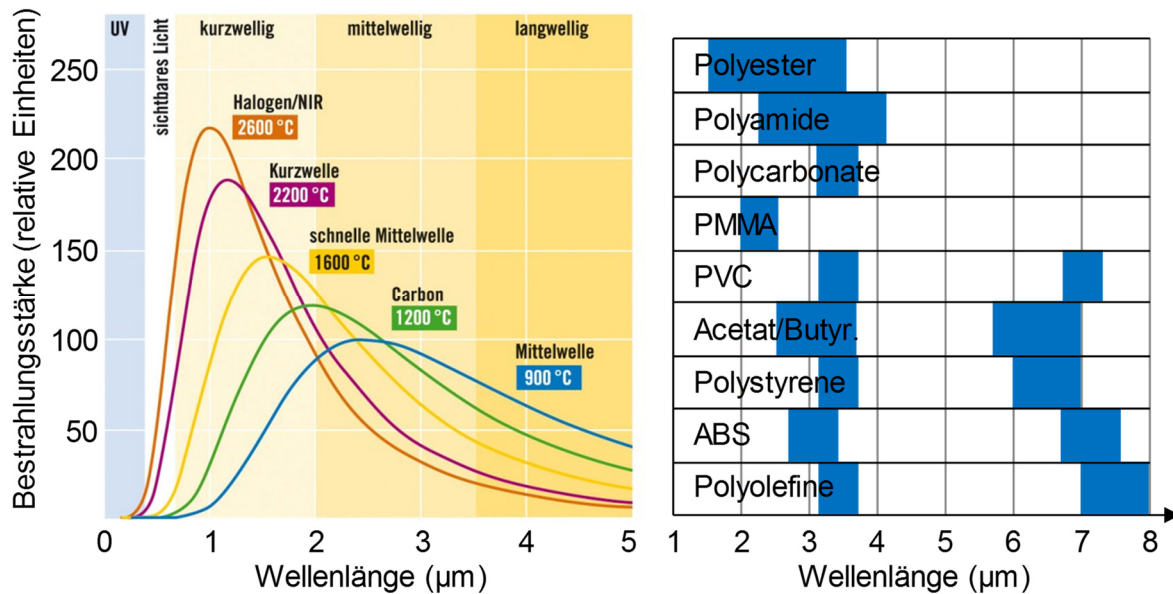


Abbildung 3-2: Bestrahlungsstärke verschiedener IR-Strahler nach Wellenlänge (li.) [89] und Absorptionsbereiche verschiedener Thermoplaste (re.) nach [90]

Bei dem in dieser Arbeit verwendeten IR-Strahler handelt es sich um einen gegenüberliegenden Aufbau mit je 4 Strahlern und den folgenden Leistungsdaten:

<b>KRELUS IR G14-25-2.5 MINI 7.5 (insgesamt 8 Module)</b>	
Maximalleistung:	2x 10 kW
Wellenlängenbereich = f(T):	2,6-9,6 µm
Temperatur Strahler, max.	800 °C (2,6 µm)
Abmessungen (2 Felder):	2x 500x500 mm
Temperaturmessung:	2x optische Pyrometer

Tabelle 3-1: Leistungsdaten des verwendeten Infrarot-Strahlers

Im Automatikbetrieb kann die maximale Oberflächentemperatur des LFT-Extrudats vorgewählt werden, so dass die Steuerung automatisch kurz vor Erreichen der Grenztemperatur die Leistung der Strahler verringert. Die Temperaturerfassung auf der Ober- und Unterseite des LFTs erfolgt durch zwei optische Pyrometer des Typs Raytek MI320LTH. Die vollständige Erwärmung eines 8 mm dicken Extrudats bis zu einer Kerntemperatur von 270 °C dauert etwa 4 min. Bei einer Erwärmung in einem Glüh- und Härteofen ohne Umluftfunktion verlängert sich die Aufheizzeit nach Versuchen um einen Faktor von 3-4 aufgrund der geringen Wärmeleitfähigkeit des Mediums Luft. Eine noch schnellere Aufheizmethode für Thermoplaste wäre nur durch den Einsatz von Kontaktheizungen möglich [91], erscheint jedoch für die Erwärmung von ungleichmäßigen LFT-Extrudaten und im Rahmen von Forschung nicht sinnvoll.

### 3.3 Werkstoffeigenschaften

Nachfolgend werden die in dieser Arbeit eingesetzten Werkstoffe für den Langfaser-Thermoplast, Stahl und Haftvermittler vorgestellt sowie deren Auswahlkriterien erläutert. Neben der Beschreibung des LFT-Compounds wird zusätzlich auf einige Besonderheiten des Basispolymers für die Verarbeitung eingegangen.

### 3.3.1 LFT

Durch das Fließpressen werden hauptsächlich die beiden Thermoplaste Polypropylen (PP) und Polyamid 6 (PA 6) verarbeitet. Da ein überwiegender Teil der Bauteile im Automobilbau nach dem Zusammenbau durch die kathodische Tauchlackierung (KTL) einen Korrosionsschutzlack erhält, der anschließend bei ca. 180 °C für 20 min in einem Ofen trocknet, wird aufgrund der deutlich höheren Schmelztemperatur von ca. 220 °C PA 6 (gegenüber 160 °C bei PP) als Thermoplast ausgewählt: PA6-LGF40 – ein Polyamid 6 mit 40 % Langglasfasern (Massenanteil) und einer Ausgangsfaserlänge von 25 mm. Der Werkstoff basiert auf dem kurzfaserverstärkten Basispolymer Durethan BKV30H2.0 von Lanxess, das zudem bereits wärmestabilisiert ist – ein Einfluss des Faseranteils auf die Schmelztemperatur besteht nicht. Bei Weber Fibertech wird durch Beimischung von Additiven zur Verbesserung der Fließeigenschaften und den Langglasfasern mit einem Faserdurchmesser von 15 µm zur Erhöhung der mechanischen Eigenschaften sowie der Formstabilität im plastifizierten Zustand ein eigenes Compound erzeugt.

Anhand von Zugproben (Schulterkopfprobe Typ A2 nach DIN EN ISO 20753 [92], [Abbildung 3-3](#)), die aus einer fließgepressten LFT-Platte durch mechanische Bearbeitung entnommen werden, können die mechanischen Eigenschaften des Werkstoffs im luftfeuchten Zustand (ohne vorherige Trocknung) und bei Raumtemperatur ermittelt werden. Durch die einseitige Einlage des LFT-Extrudats entsteht bei der Plattenfertigung im Fließbereich des Werkzeugs eine Vorzugsorientierung der Fasern, so dass je nach Entnahmerichtung der Proben überwiegend eine Faserorientierung von 0° in Probenlängsrichtung oder 90° quer dazu entsteht (siehe [Abbildung 3-4](#)). In Faserrichtung erzielt der Werkstoff eine Zugfestigkeit von ca. 170 MPa bei einem E-Modul von 13.000 MPa. Bei einer reinen Beanspruchung quer zur Faserrichtung sinkt die Zugfestigkeit auf ca. 70 MPa bei einem E-Modul von 5.000 MPa (siehe [Abbildung 3-5](#)).

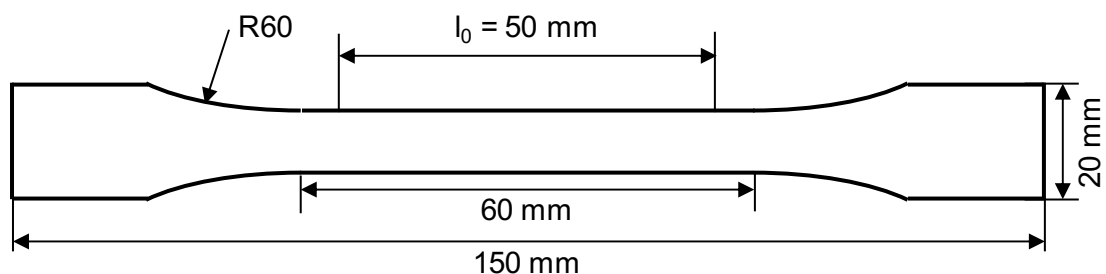


Abbildung 3-3: Abmessungen der Schulterkopfprobe nach DIN EN ISO 20783 Typ A2

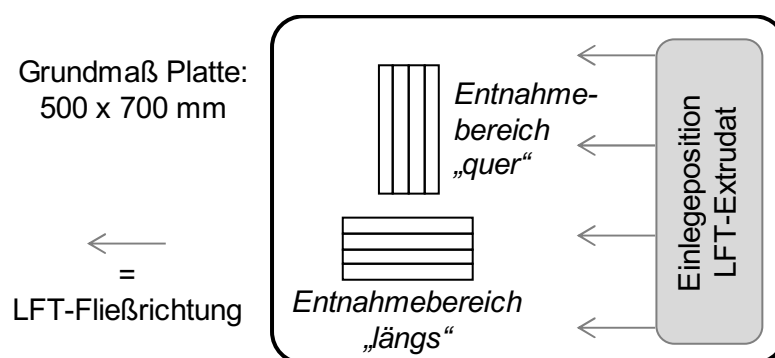


Abbildung 3-4: Probenentnahme mit Vorzugsorientierung aus einer fließgepressten LFT-Platte

Für eine computerbasierte Simulation des Fließverhaltens sind neben den Festig- und Steifigkeitswerten zudem umfassende Messungen der Viskosität, des spezifischen Volumens unter Druck- und Temperatureinfluss (pvT-Diagramm), der Wärmekapazität, der Wärmeleitfähigkeit sowie der Wärmeausdehnung erforderlich. Diese Prüfungen wurden extern im Labor der Herstellerfirma der Software Moldex3D (CoreTech Systems) durchgeführt. Nachfolgend ist das ermittelte pvT-Diagramm bis zu einem Druck von 1.200 bar dargestellt, weitere Ergebnisse der Werkstoffanalyse befinden sich im Anhang (Kap. 12.3).

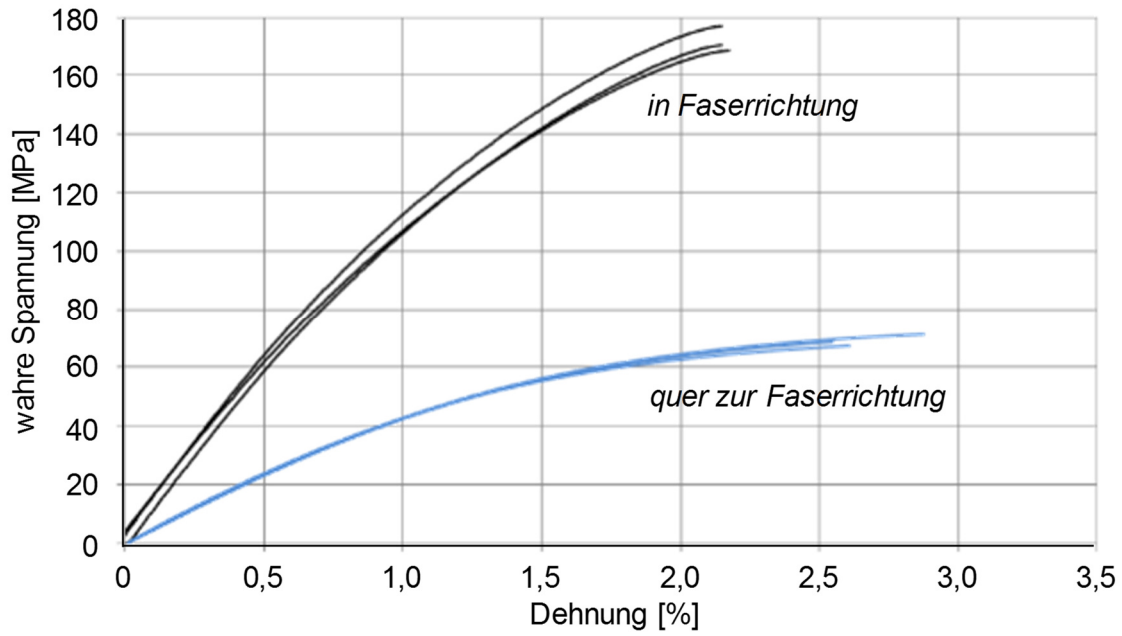


Abbildung 3-5: Ergebnisse der LFT-Zugprüfung in und quer zur Faserrichtung

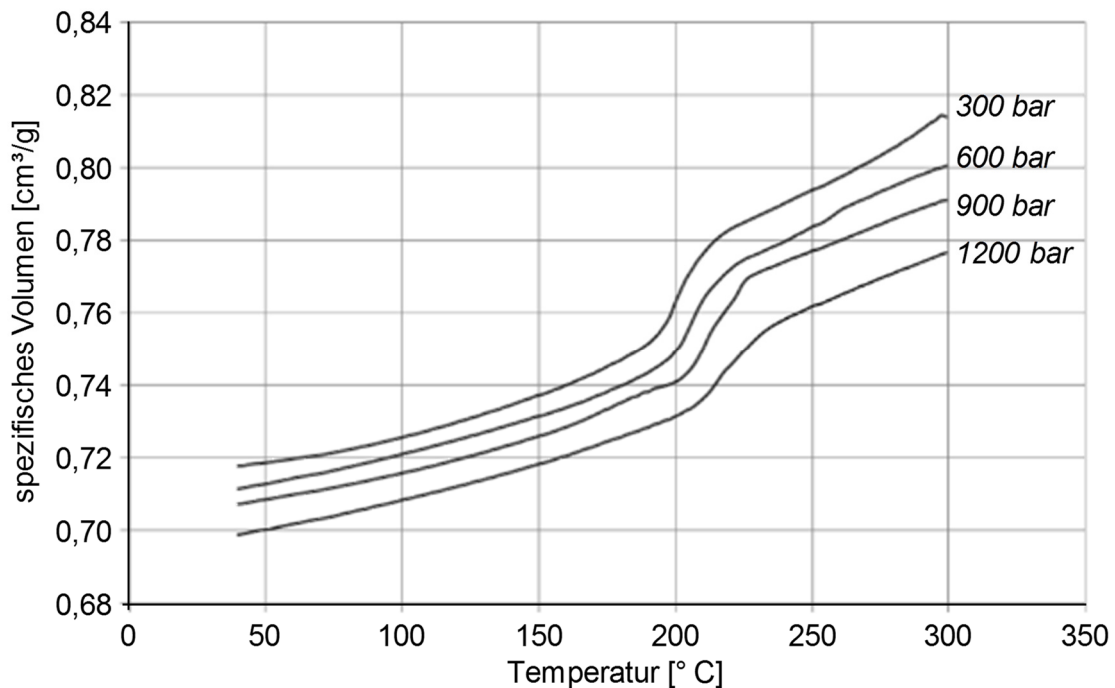


Abbildung 3-6: pvT-Diagramm des verwendeten LFTs (PA6-LGF40)

### 3.3.2 Stahlwerkstoffe

In dieser Arbeit werden insgesamt fünf Stahlwerkstoffe verschiedener Festigkeitsklassen eingesetzt, um die Eignung des Verfahrens Hybridpressen sowohl für einen weichen Tiefziehstahl (DC04) als auch für höher- und hochfeste Dualphasenstähle mit einer Festigkeit von bis zu 600 MPa zu erproben. Aktuelle Fahrwerkbauteile werden aus hochfesten Stählen mit einer Zugfestigkeit von bis zu 800 MPa gefertigt (siehe Kap. 8.1 – Demonstratorauswahl). Der Dualphasenstahl DP-K 30/50 mit einseitiger elektrolytischer Verzinkung (ZE) wird lediglich für die Fertigung der in Kap. 6.1 vorgestellten Kopf- und Scherzugproben eingesetzt und für diese Geometrieformen nicht umgeformt. Die verwendeten Blechdicken variieren insgesamt zwischen 1,0-2,4 mm und werden bei der Vorstellung der Probekörper jeweils explizit genannt.

	<b>R<sub>p0,2</sub> [MPa]</b>	<b>R<sub>m</sub> [MPa]</b>	<b>A<sub>80,min</sub> [%]</b>
<b>DC04 (1.0338)</b>	140-210	270-350	38
<b>HC340LA (1.0548)</b>	340-420	410-510	21
<b>DP-K 30/50 (1.0939)</b>	300-370	500	24
<b>CR330Y590T-DP (1.0941)</b>	330-430	590-700	20
<b>phs-ultraform 1500*</b>	380-480	480	18

\* = im ungehärteten Zustand / alle genannten Werte sind Herstellerangaben

Tabelle 3-2: Übersicht der verwendeten Stahl-Werkstoffe und deren Eigenschaften  
(Werkstoff-Nr. nach DIN EN 10027-2 [93])

### 3.3.3 Haftvermittlersystem

Für die Verfahrensentwicklung des Hybridpressens als kombinierte Umformung für Metallbleche und langfaserverstärkte Thermoplaste soll kein eigenes, prozessspezifisches Haftvermittlersystem entwickelt werden, da die Prozess- und Werkzeugentwicklung im Vordergrund steht. Aus diesem Grund werden auch nicht mehrere Haftvermittler erprobt, sondern vorab anhand der nachfolgenden Bewertungskriterien ein auf dem Markt verfügbares System ausgewählt.

- Verbindung: Durch die Auswahl von Polyamid 6 als Basispolymer des LFTs muss das Haftvermittlersystem in der Lage sein, eine stoffschlüssige Verbindung mit diesem einzugehen und eine Scherzugfestigkeit von mindestens 10 MPa erreichen. Gleichzeitig sollen die durch Wärmeausdehnung entstehenden Spannungen zwischen Stahl und PA 6 von der Elastizität des Haftvermittlers ausgeglichen werden können.
- Applikation / Lagerung: Die Applikation des Haftvermittlers auf unbeschichtete oder verzinkte Stahlbleche soll nach Möglichkeit bereits im Voraus zum Hybridpressen erfolgen. Zusätzlich sollen die beschichteten Metallbleche mindestens sechs Monate unter normalen, trockenen Lagerungsbedingungen gelagert werden können, ohne dass mit einem Verlust der Elastizität, der Anbindung zum Metallblech oder der Verbindungsaffinität zum PA 6 gerechnet werden muss.
- Handhabbarkeit / Reproduzierbarkeit: Die Entwicklung des Hybridpressens verfolgt unter anderem das Ziel, möglichst geringe Taktzeiten bei der Herstellung eines Metall-FVK-Hybridbauteils zu erreichen. Da zusätzlich das plastifizierte LFT zeitnah nach der Compoundierung oder der nachträglichen Erwärmung verarbeitet werden muss, kann keine zusätzliche Zeit für eine manuelle Applikation des Haftvermittlers z.B. durch Folien be-



anspruch werden. Auch eine erforderliche Vorbehandlung bzw. Reinigung der Metalloberflächen direkt vor der Verarbeitung soll vermieden werden. Der Einsatz von flüssigen Haftvermittlern wird aufgrund der mangelnden Reproduzierbarkeit des Prozesses und der schlechten Handhabbarkeit ausgeschlossen.

- Umformbarkeit: Da das Hybridpressen eine simultane Umformung des Metallblechs mit der Urformung des LFTs darstellt, kann der Haftvermittler im Vergleich zu anderen Verfahren [57] nicht nach der Umformung appliziert werden, sondern muss bereits vorab auf dem Metallblech vorhanden sein. Beim Tiefziehen erfahren Metallbleche durch die ungleiche Umformung Dehnungen und Ausdünnungen. Das Haftvermittlersystem muss daher eine ausreichende Elastizität aufweisen, damit die vollflächige LFT-Schicht des entstehenden Hybridbauteils in jedem Bereich gut angebunden ist.
- Verfügbarkeit: Das Haftvermittlersystem soll ein Serienprodukt sein, welches auch von interessierten Unternehmen außerhalb des genannten Projektkonsortiums erworben und appliziert werden kann. Dieses Kriterium soll dazu beitragen, die Anwendbarkeit des Verfahrens Hybridpressen in der Industrie zu ermöglichen und nicht durch Auswahl eines Entwicklungsprodukts auf ein Forschungsstadium zu begrenzen.
- Bekanntheit / Serieneinsatz: Nach Möglichkeit sollen zu dem Haftvermittler bereits umfangreiche Erkenntnisse zu möglichen Anwendungsgebieten sowie den zu erzielbaren Verbundfestigkeiten vorliegen. Ein aktueller Serieneinsatz würde zudem die Tauglichkeit für ein etabliertes Beschichtungsverfahren belegen.

Bei dem gewählten Haftvermittlersystem, welches alle oben genannten Kriterien erfüllt, handelt es sich um das Copolyamid Vestamelt® Hylink von Evonik. Dieser Haftvermittler wird bereits in der automobilen Großserie eingesetzt und steht sowohl als Tauchlackierung (*Coil-Coating*) als auch als Pulverbeschichtung zur Verfügung. Aufgrund der erforderlichen Umformbarkeit und der um einen Faktor 2 differierenden Wärmeausdehnungskoeffizienten von Stahl und PA 6 wird die thermoplastische Pulverbeschichtung eingesetzt, mit der eine Schichtdicke von 100 µm einstellbar ist und die somit die geforderte Elastizität erfüllt. Mit der flüssigen Variante sind lediglich Schichtdicken im Bereich von 30 µm möglich [73]. Im Kapitel 2.5.2 wurden bereits einige Quellen genannt, in denen Festigkeitswerte von bis zu 20 MPa mit diesem Haftvermittler erzielt werden konnten und somit die im Patent genannte Herstellerangabe von mehr als 8,8 MPa deutlich übertreffen [94].

Die Applikation des Haftvermittlers auf vorbehandelte Stahlbleche erfolgt direkt durch den Hersteller Evonik. Die Vorbehandlung umfasst neben der alkalischen Reinigung eine Phosphatierung unter Zugabe von Fluor sowie eine Nachpassivierung zur Gewährleistung eines guten Haftgrunds für die anschließende Pulverbeschichtung.

### 3.3.4 Schmiermittel

Gegenüber der Kaltumformung können die Metallbleche beim Hybridpressen aufgrund der Haftvermittlerbeschichtung nur einseitig und somit auf der Matrizenseite geschmiert werden. Gleichzeitig besteht die Herausforderung, dass das zu verwendende Schmiermittel zumindest kurzzeitig Temperaturen um 200 °C (Blechtemperatur zur Aktivierung des Haftvermittlers) ohne thermische Zersetzung oder Verlust der Schmiereigenschaften überstehen muss. In dieser Arbeit werden daher zwei verschiedene Arten von Schmierstoffen eingesetzt: für die Testgeometrien U-Profil und Wanne (Kap. 4) das mineralöhlhaltige Zieh- und Stanzöl mit dem Namen Multidraw KTL N 16 der Firma Zeller+Gmelin und einem Flammpunkt >200 °C sowie die wasser-mischbare und chlorfreie Paste Beruform STP 152 DL der Firma Bechem für die Umformung

des Querlenker-Demonstrators (Kap. 8). Bei allen genannten Bauteilen bzw. den dazugehörigen Werkzeugen werden jeweils die Niederhalterflächen und die Matrize geschmiert – eine direkte Schmierung der Bleche vor der Erwärmung im Ofen erfolgt nicht.

### 3.4 Verfahrensparameter

Vor Beginn der Prozessentwicklung und währenddessen werden die folgenden Prozessparameter als relevant für die Prozessentwicklung des Hybridpressens identifiziert:

- Presskraft: Die Presskraft bestimmt über die projizierte Stempelfläche den im LFT vorherrschenden Druck, der vergleichbar mit dem Innendruck der Innenhochdruckumformung von Rohren ist (Kap. 2.1.2) und somit ein Maß für die erreichbare Umformbarkeit verschiedener Stahlgüten, Blechdicken und Radien darstellt.
- Niederhalterkraft: Die Niederhalter- oder Blechhalterkraft soll zu Prozessbeginn einerseits den Blecheinzug ins Werkzeug steuern und gleichzeitig Faltenbildung verhindern sowie andererseits eine Abdichtung gegen ein Herauspressen des LFTs am Prozessende gewährleisten. Bei zu hoher Niederhalterkraft und einem behinderten Nachfließen des Blechs würden unvermeidlich Risse entstehen und somit den Prozess als Ganzes verhindern. Auf der anderen Seite könnte der LFT bei zu geringer Niederhalterkraft aus dem Werkzeug gepresst werden und somit das Blech nicht vollständig ausformen.
- Pressgeschwindigkeit: Beim Fließpressen von LFT wird in der Regel ein Geschwindigkeitsprofil vorgegeben, welches zu Beginn relativ hohe und gegen Prozessende in der Komprimierungsphase deutlich geringere Geschwindigkeiten aufweist. Hier gilt es, einen Kompromiss zwischen Taktzeit, Verarbeitungszeit des LFTs und Formfüllung zu finden. Des Weiteren kann die Pressgeschwindigkeit auch einen Einfluss auf die zu erzielende Dichtigkeit im Prozess haben.
- Werkzeugtemperatur: Die Werkzeugtemperatur erfüllt hauptsächlich zwei Aufgaben: Einerseits soll der Thermoplast nach der Formfüllung möglichst schnell abkühlen, um die Taktzeit des Prozesses gering zu halten. Andererseits muss gewährleistet sein, dass der Kunststoff vor der Erstarrung genug Zeit hat, die Form komplett auszufüllen und somit lange fließfähig bleibt. Hohe Werkzeugtemperaturen haben zudem den Nebeneffekt, sehr glatte Oberflächen zu erzeugen, was jedoch für Bauteile im Fahrwerk eher von untergeordnetem Interesse ist. Nachteilig wirkt sich eine hohe Temperaturdifferenz ( $\Delta T$ ) zwischen Werkzeug und Umgebung auch auf Schwindungs- und Verzugseffekte aus. Eine Orientierung an den Werkzeugtemperaturen des Spritzgießens bzw. Fließpressens im Bereich von 70-90 °C für PA 6 liegt somit nahe.
- Haltezeit: Die Haltezeit beschreibt den Zeitraum vom Erreichen und Halten der maximalen Presskraft bis zum Druckabbau und Öffnen des Werkzeugs, in dem keine weitere Umformung bzw. kein weiteres Fließen des LFTs stattfindet. Sie dient vor allem der Abkühlung und Erstarrung des LFTs sowie der Verhinderung von Verzug. Gleichzeitig dient die Haltezeit der Vernetzung von Haftvermittler und LFT. Sowohl beim Spritzgießen als auch beim Fließpressen nimmt die Haltezeit den größten Anteil der Gesamtzykluszeit in Anspruch (vgl. Kap. 2.2.2).
- Werkstofftemperaturen: Die Verarbeitungstemperaturen des LFTs sind durch die Wahl des Matrixwerkstoffs vorgegeben und liegen für PA 6 zwischen 260 und 280 °C. Die Vorwärmtemperatur des Blechs richtet sich nach den Anforderungen des Haftvermittlers und kann Einfluss auf die Verbindungseigenschaften haben (vgl. Kap. 6.2).

### 3.5 Prozesssimulation

Eine gekoppelte Simulation des Hybridpressens auf Basis der numerischen Strömungsmechanik (CFD, Fließpressen) und Finite-Elemente-Methode (FEM, Blechumformung) kann in dieser Arbeit aufgrund der artverschiedenen Simulationstechniken für die Blechumformung (Radioss) und das Fließpressen (Moldex3D) nicht abgebildet werden. Die bis zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Arbeit entwickelte Schnittstelle zur Simulation basiert auf einem Zeitschrittverfahren und übergibt die errechneten LFT-Drücke als Knotenkräfte der finiten Elemente an den FE-Solver Radioss, um damit die Verformung des Metallblechs innerhalb eines weiteren Zeitschritts zu berechnen. Diese Verformung wird im Anschluss zurück an die Software Moldex3D übertragen, da die geänderte Geometrie des Blechs gleichzeitig die Werkzeuggeometrie für den LFT darstellt und durch die fortschreitende Blechumformung jeweils ein zusätzliches Volumen entsteht. Aufgrund von verzerrten Netzen in der CFD-Simulation kann noch keine gekoppelte Simulation von Metallumformung und Fließpressen bis zum Prozessende durchgeführt werden. Aus diesem Grund muss die gesamte Prozessentwicklung einschließlich der Werkzeugkonzepte, Prozessparameter und zu verwendenden Stahlwerkstoffe sowie Blechdicken in dieser Arbeit ausschließlich über Versuche und durch Analyse der auftretenden Fehlerbilder erfolgen. Des Weiteren fehlen die wichtigen Ergebnisse zu den resultierenden Faserorientierungen und somit zu dem lokal unterschiedlichen mechanischen Werkstoffverhalten (Anisotropie) im LFT, die generell bereits durch Moldex3D ermittelt werden können [95]. Alle FEM-Berechnungen werden daher ausschließlich mit einem isotropen Materialmodell durchgeführt (siehe Kap. 7.3). Erkenntnisse zum Fließverhalten des LFTs werden anhand von Stufenversuchen erlangt und sind entsprechend dokumentiert.

### 3.6 Resultierende Anwendungsgebiete

Innenliegende Kunststoffverstärkungen von hohlförmigen Stahlstrukturen eignen sich generell als Leichtbaulösung für verschiedene Karosseriebereiche eines Fahrzeugs. Ebenso ist bekannt, dass Faserverbundwerkstoffe ein hohes Potenzial zur Energieabsorption aufweisen und somit in crash-relevanten Strukturen eingesetzt werden können (z.B. als B-Säule). Im Fahrwerk sind die Bauteilanforderungen im Vergleich zur Karosserie insgesamt deutlich anspruchsvoller. Einerseits sind Fahrwerkbauteile sicherheitsrelevant und dürften auch unter den sogenannten *Misuse*-Lastfällen (z.B. Bordsteinanfahrt, Schlaglochdurchfahrt) nicht versagen, andererseits erfahren diese Bauteile schwingende Belastungen und sind korrosiven Medien oder Steinschlägen ausgesetzt. Aus diesen Gründen sind auch die verwendeten Blechdicken im Vergleich zu Karosseriebauteilen deutlich höher. Des Weiteren bieten Fahrwerkbauteile die Möglichkeit, ein entwickeltes Hybridbauteil unter realen Betriebslasten und als Einzelbauteil anhand vorgegebener Prüfvorschriften umfangreich zu testen und die Erkenntnisse zum Schwing- und Versagensverhalten auf Bauteile mit weniger hohen Anforderungen in der Karosserie zu übertragen. Aufgrund der hohen Blechdicken besteht zudem ein großes Leichtbaupotenzial durch Anwendung des neuen Verfahrens Hybridpressen, in dem die Blechdicke reduziert und durch eine Verstärkung in Form einer optimierten LFT-Rippenstruktur substituiert wird. Dadurch können die mechanischen Eigenschaften hinsichtlich Steifig- und Festigkeit mindestens beibehalten und in Teilbereichen sogar verbessert werden.

Wenn die Entwicklung des Verfahrens Hybridpressen am Beispiel eines Fahrwerkbauteils erfolgreich verläuft, erscheint auch ein Einsatz in Karosseriestrukturen mit geringeren Blechdicken und reduzierten Anforderungen hinsichtlich Lebensdauer und Versagensverhalten nicht unrealistisch. Zudem können die Erkenntnisse der Bauteilprüfungen bei zukünftigen Bauteilauslegungen berücksichtigt werden.

## 4 Werkzeug- und Prozessauslegung

Werkzeug- und Prozessauslegung können in dieser Arbeit nicht unabhängig voneinander betrachtet werden. Durch die noch fehlende Prozesssimulation erfolgt die Werkzeugentwicklung zunächst konstruktiv analytisch und eine Validierung der Konzepte findet jeweils nach der Werkzeugfertigung im Versuch statt. Innerhalb dieser Arbeit werden sowohl Werkzeug- und Dichtkonzepte für offene als auch geschlossene Profile entwickelt, da ein Großteil der in der Fahrzeugstruktur eingesetzten Bauteilgeometrien, abgesehen von den großflächigen Blechbauteilen, aus diesen beiden Grundformen besteht.

### 4.1 Offenes U-Profil – Variante 1

Als offene Profile können längliche Bauteile bezeichnet werden, die einerseits eine Profilform aufweisen und andererseits an den Bauteilenden offen sind. Der Blecheinzug während der Umformung erfolgt demnach nur an den länglichen Bauteilseiten, der sogenannten Zarge. Zusätzlich können offene Profile auch aus einem geschlossenen Profil durch nachträgliches „Öffnen“ der Enden in einer Beschnitt-Operation entstehen. Hierbei gilt es jedoch zu beachten, dass ein erhöhter Verschnittanteil anfällt und somit die Wirtschaftlichkeit des gesamten Herstellungsprozesses sinkt.

Mit Hilfe der klassischen Blechumformung werden häufig U- oder W-Profile hergestellt und als Trägerbauteile (z.B. Längs- und Querträger) im Fahrzeugbau eingesetzt. Die erste Geometrie für die Verfahrensentwicklung Hybridpressen ist daher ein U-Profil (Abbildung 4-1) mit seitlichen Flanschen, die zum nachträglichen Fügen mit einem Schließblech oder einem Gegenprofil genutzt werden könnten. Die ersten Versuche erfolgten mit DC04-Stahl (siehe Tabelle 3-2).

#### 4.1.1 Geometrie

Anhand einer einfachen U-Profil-Geometrie mit gleichmäßigem Querschnitt über die gesamte Profillänge sollen erste Erkenntnisse zum Fließverhalten des LFTs im Prozess erarbeitet werden. Während eine Abdichtung im Flanschbereich mithilfe von Ziehsicken und entsprechender Niederhalterkraft vorgesehen ist, stellt die seitliche Abdichtung der offenen Profilenden gegenüber dem LFT offensichtlich die größere Herausforderung dar. Mit Hilfe dieser Variante 1 des U-Profils (Variante 2 siehe Kap. 4.2) werden sowohl verschiedene werkzeug- als auch prozesseitige Optionen auf einen Einsatz als Teile eines Dichtkonzept hin überprüft. Die nachfolgend in Abbildung 4-1 dargestellte Geometrie der LFT-Struktur weist bereits zwei geometrische Merkmale auf, die den Testcharakter dieses U-Profils belegen.

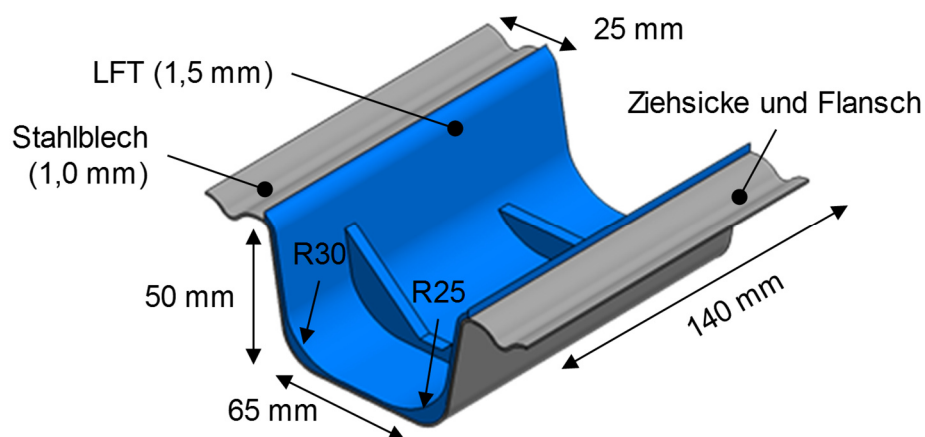


Abbildung 4-1: Geometrie des U-Profils (Variante 1)

Während das Stahlprofil symmetrisch zur Längs- und Querrichtung ausgeführt ist, unterscheidet sich die Dicke des LFTs in den beiden Profiltradien durch die gewählten Stempelradien von 25 und 30 mm. Mit dieser Maßnahme soll eine mögliche Abhängigkeit der Blechformung von dem zur Verfügung stehenden Fließspalt zwischen Stempel und Blech überprüft werden. Des Weiteren sind die LFT-Rippen im Vergleich zu Leichtbaukonstruktionen geometrisch untypisch und mit einer Materialstärke von 5 mm besonders dick ausgeführt. Da der plastifizierte LFT während des Hybridpressens zunächst vom Stempel verdrängt wird und sich durch die manuelle Einlage nicht gleichmäßig auf beide Seiten verteilt, soll überprüft werden, ob durch die Rippenkonturen im Stempel eine Art LFT-Ausgleich während der Umformung erfolgen kann. Insgesamt wird eine LFT-Menge von ca. 90 g zur Ausfüllung der Form benötigt.

#### 4.1.2 Stempelvarianten

Insgesamt werden vier Stempelvarianten der Variante 1 gefertigt und die Funktionsfähigkeit im Versuch überprüft, wobei mit keiner dieser Varianten eine vollständige seitliche Dichtigkeit erzielt werden kann. Da die Erkenntnisse jedoch maßgeblich die Geometrie und das Dichtkonzept der erfolgreichen Variante 2 beeinflusst haben, soll an dieser Stelle eine detaillierte Vorstellung der Varianten mit den jeweiligen zu Grunde liegenden Ideen erfolgen. Das Hauptwerkzeug, mit dem alle nachfolgend vorgestellten Stempelvarianten getestet werden, besteht aus den drei Grundbauteilen Matrize (seitlich geschlossen und wassertemperiert), Niederhalter und Stempel und ist in Normallage (Matrize unten) angeordnet. Alle Elemente sind durch eine 4-Säulen-Führung gegen auftretende Querkräfte gesichert und die Niederhalterkraft wird mit Hilfe von acht Gasdruckfedern ( $F_0=170$  DaN pro Feder,  $1$  DaN =  $10$  N) zwischen der oberen Spannplatte und dem Niederhalter übertragen. Die Maximalkraft bei voller Einfederung beträgt  $F_{\max} = 1,25 \times F_0 = 212,5$  DaN (Federkennlinie im Anhang, Kap. 12.2).

Die erste Stempelvariante V1-1 stellt ohne ein besonderes Dichtkonzept die Basis der drei weiteren Varianten dar und bildet exakt die Kontur der LFT-Verstärkung aus [Abbildung 4-1](#) ab. Um eine frühzeitige seitliche Abdichtung im Prozess und kunststofffreie Randbereiche zu ermöglichen, besitzt die Stempelvariante V1-2 dem Stempel vorausseilende Dichtelemente mit der Innenkontur des Metallblechs, die auf je einer Gasdruckfeder gelagert sind und relativ zum Stempel einfedern können. Dadurch soll eine Blocksituation am Ende des Umformprozesses vermieden und somit gewährleistet werden, dass über den Stempel ein Nachdruck auf den LFT aufgebracht werden kann. Dies ist im Hinblick auf die volumetrische Schwindung des LFTs während der Abkühlung im Werkzeug und zur Vermeidung von Verzug zwingend erforderlich.

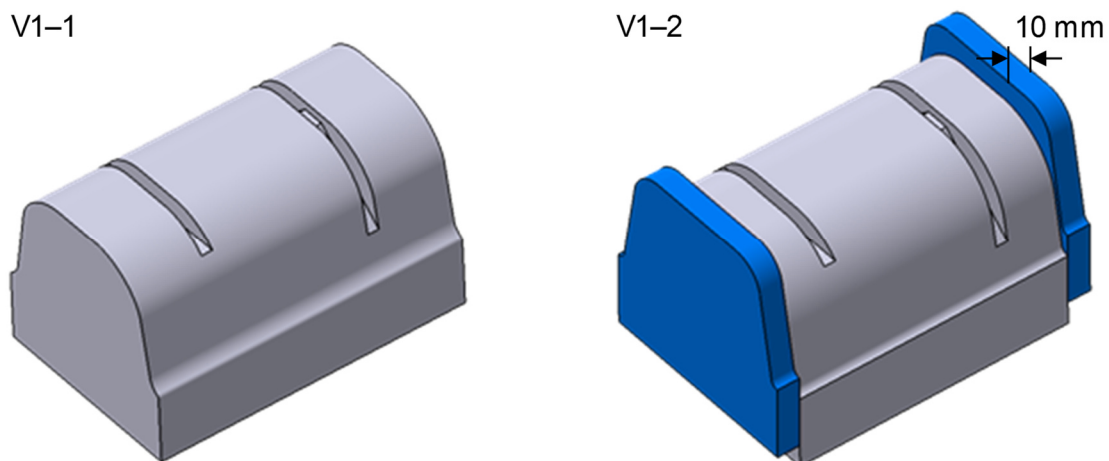


Abbildung 4-2: Geometrie der Stempelvarianten V1-1 und V1-2 mit seitlichen Dichtelementen

Neben der werkzeugseitigen Variation des Stempels durch seitliche Dichtelemente wird auch ein Konzept zum zeitversetzten Einpressen des LFTs in die Kavität durch Verwendung eines sogenannten „LFT-Reservoirs“ im Stempel überprüft (V1–3). Bei diesem Konzept kann der LFT zwar ebenfalls auf dem Blech positioniert werden, er wird jedoch beim Schließen des Werkzeugs nicht direkt durch den Stempel verdrängt, sondern zunächst in der Hohlstruktur des Reservoirs vorgehalten. Am Ende der Blechumformung wird der LFT über den zusätzlichen Reservoir-Stempel (siehe [Abbildung 4-3](#)) und durch eine zweite Hubbewegung in die Kavität gepresst. Die Stempelvariante V1–4 weist analog zur Variante V1–2 seitliche Dichtelemente auf, die im Vergleich zur Variante ohne LFT-Reservoir jedoch nicht beweglich sind. Die so entstehende Blocksituation beim Schließen des Werkzeugs wird toleriert, da der erforderliche Nachdruck über den Reservoir-Stempel aufgebracht werden kann. Obwohl der Einsatz eines LFT-Reservoirs eine Abweichung von der Verfahrensidee des Hybridpressens darstellt, können mit diesem Verfahren wichtige Erkenntnisse zum Fließverhalten des LFTs und zur Abdichtung des U-Profiles gewonnen werden.

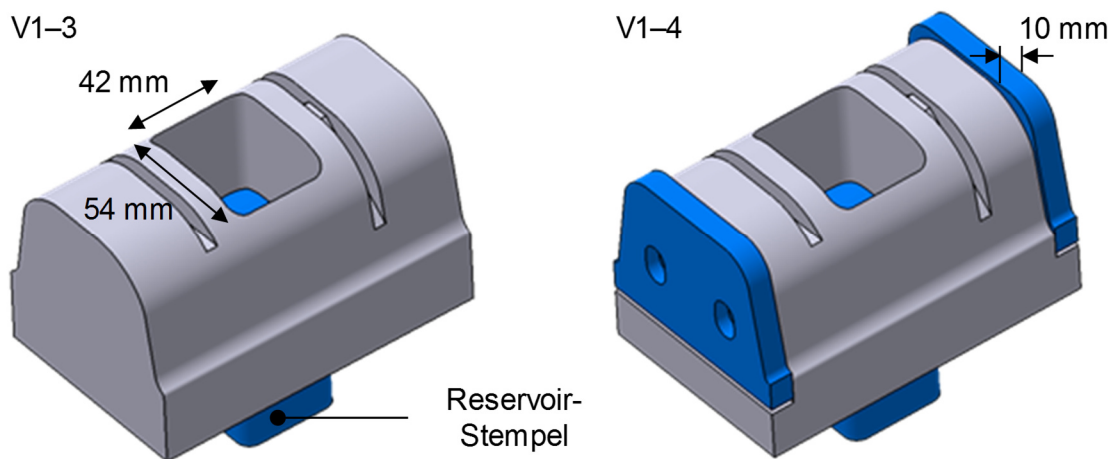


Abbildung 4-3: Geometrie der Stempelvarianten V1–3 und V1–4 mit LFT-Reservoir

Da die eingesetzte Presse am FLB über keine Vorrichtung zur Realisierung einer weiteren Hubbewegung verfügt, wird die Bewegung des Reservoir-Stempels über einen im Werkzeug verbauten Hydraulikzylinder und eine externe Hydraulikpumpe realisiert. Im weiteren Entwicklungsverlauf (V1–4) wird das Werkzeug zudem für eine Anordnung in Hutlage (Stempel unten) umkonstruiert, um die Schließbewegung und hohe Presskraft der Presse zum Verfahren des Reservoir-Stempels nutzen zu können.

### 4.1.3 Ergebnisse

Wie bereits vorweggenommen, kann mit keinem der vorgestellten Konzepte eine vollständige Dichtigkeit an den seitlichen Profilenden erzielt werden. Die Ergebnisse und Fehlerbilder der im Versuch hergestellten U-Profile zu jeder Stempelvariante werden nachfolgend dennoch vorgestellt und die jeweiligen Erkenntnisse aus den einzelnen Varianten erläutert.

#### V1–1:

Es zeigt sich ([Abbildung 4-4](#)), dass auch bei einer Verarbeitung von maßgenauen Blechplatten der LFT das Blech bereits weit vor Erreichen des unteren Totpunkts (UT) an den offenen Profilenden seitlich umfließt und somit nicht mehr zur Blechumformung zur Verfügung steht. Zusätzlich verhindert der LFT hinter dem Blech ein vollständiges Schließen des Werkzeugs und



die Ausbildung einer gleichmäßigen LFT-Dickenverteilung. Ein Verzicht auf jegliche Dichtelemente an den Profilenden führt erwartungsgemäß zu keinem verwendbaren Konzept.



Abbildung 4-4: U-Profil der Stempelvariante V1-1

#### V1-2:

Der Einsatz von vorauseilenden Dichtelementen in V1-2 führt zwar zu einer geringfügigen Reduzierung des blechumfließenden LFTs. Die Grundidee dieser Stempelvariante, kunststofffreie Bereiche an den Profilenden zu erzielen, scheitert jedoch an der zu schnellen Verteilung des LFTs im Werkzeug. Wie anhand der nachfolgend abgebildeten Versuche in Abbildung 4-5 mit schrittweise gesteigerter LFT-Einlegemasse (Zielmasse = 85 g) belegt wird, gelangt das LFT zu früh im Prozess in den Bereich zwischen den Dichtelementen und dem Metallblech. Bei einer Einlegemasse von 50 und 60 g ist noch eine seitliche Dichtigkeit gegeben, jedoch ist deutlich zu erkennen, dass diese Mengen nicht ausreichen, um die Form vollständig auszufüllen. Bei 70 g hat der LFT bereits die Dichtelemente unterlaufen, wodurch vor allem ein vollständiges Schließen des Werkzeugs verhindert wird. Ein Konzept mit seitlichen Dichtelementen muss demnach bereits zu einem früheren Zeitpunkt im Umformprozess wirken bzw. die schnelle Ausbreitung des LFTs durch geeignete Maßnahmen reduzieren.



Abbildung 4-5: U-Profile der Stempelvariante V1-2 mit steigender LFT-Einlegemasse

#### V1-3:

Bei dieser Variante mit LFT-Reservoir besteht zunächst kein Fließspalt für den LFT und somit auch keine Möglichkeit für eine Verteilung im Werkzeug, da das Blech vor der Aktivierung des Reservoirs während der gesamten Umformung am Stempel anliegt. Infolgedessen muss der LFT nach der ersten Blechumformung durch Schließen des Werkzeugs mit Hilfe des aufge-

brachten Reservoir-Stempeldrucks einen Spalt zwischen Blech und Stempel durch eine weitere Ausformung des Blechs erzeugen. Hierbei entsteht fortlaufend eine sogenannte „Schollenbildung“ (Abbildung 4-7), da der LFT in den nur sehr dünnen Bereichen aufgrund des abkühlenden Blechs und der im Vergleich zum LFT geringen Werkzeugtemperatur schnell erstarrt. Diese erstarrten Bereiche (Schollen) werden anschließend von noch fließfähigem LFT weitergeführt, wodurch viele Bindenähte im Bauteil entstehen. Eine vollständige Füllung der Kavität und somit eine Ausformung des Blechs kann nicht erzielt werden. Gut zu erkennen ist zudem der nicht mehr fließfähige und im Reservoir verbleibende LFT-Pressrest in Abbildung 4-6. Der Einsatz eines LFT-Reservoirs ohne zusätzliche Dichtelemente ist somit ebenfalls nicht zielführend, da weiterhin ein Hinterlaufen des Blechs ähnlich zu Variante V1-1 beobachtet werden kann.



Abbildung 4-6: U-Profil der Stempelvariante V1-3

#### V1-4:

Im Vergleich zur vorherigen Variante V1-3 ohne seitliche Dichtelemente kann die Verteilung des LFTs im Bauteil mit dieser Stempelvariante deutlich gesteigert werden (siehe Abbildung 4-7). Ursächlich dafür ist die Tatsache, dass das Blech während der ersten Umformung nicht mehr vollflächig am Stempel anliegt, sondern mithilfe der Dichtelemente ein voreingestellter Abstand als Fließspalt zur Verfügung steht.

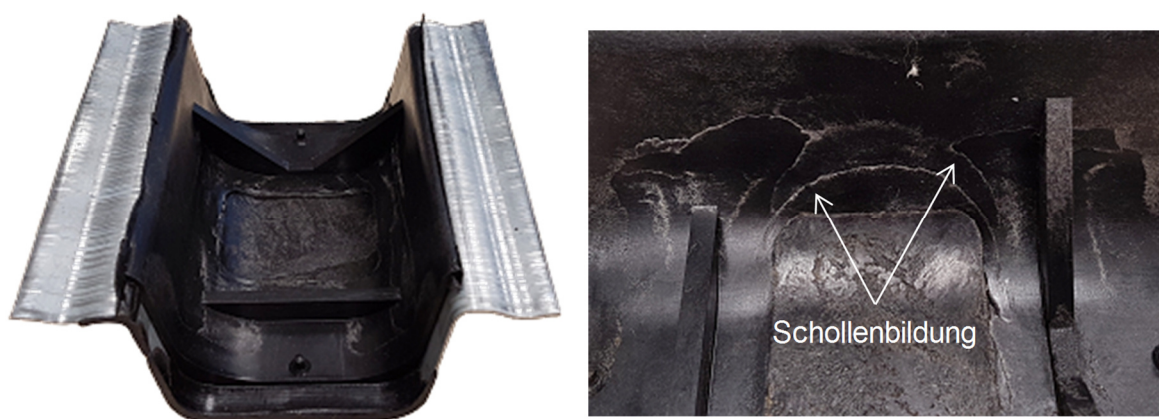


Abbildung 4-7: U-Profil der Stempelvariante V1-4 (li.) mit LFT-Schollenbildung (re.)

Durch das oben beschriebene Umdrehen des Werkzeugs in eine Hutmage und der damit höheren, zur Verfügung stehenden Presskraft kann das LFT-Reservoir zwar vollständig verpresst werden. Eine umfassende Dichtigkeit kann jedoch auch dieses Konzept nicht gewährleisten, da aufgrund der deutlich geringeren Fläche des Reservoir-Stempels gegenüber dem Werkzeug-



stempel ein Öffnen des Werkzeugs bzw. des Niederhalters selbst bei maximaler Ziehkissenkraft von 500 kN resultiert. Durch die gleichmäßige Druckverteilung im LFT wird der Stempel zusammen mit dem Niederhalter gegen das Ziehkissen verdrängt.

Im Vergleich der vier Stempelvarianten wird mit Variante V1–4 dennoch das beste Endergebnis erzielt. Der Einsatz eines LFT-Reservoirs wird jedoch aufgrund der signifikanten Abweichung von der eigentlichen Idee des Hybridpressens und den zusätzlichen Anforderungen an das Pressensystem in Form einer zweiten Hubbewegung nicht weiterverfolgt.

## 4.2 Offenes U-Profil – Variante 2

Neben den Erkenntnissen zur Dichtigkeit zeigen die Versuche zu Variante 1, dass die unterschiedlichen Stempelradien zu einem teilweise asymmetrischen Blecheinzug führen und ein LFT-Austausch zwischen beiden Seiten des Stempels durch die Rippen möglich ist. Beide Erkenntnisse finden somit in der zweiten Variante des U-Profils Berücksichtigung.

### 4.2.1 Geometrie

Die neu konstruierte Variante 2 der U-Profil-Geometrie soll eine geometrische Ähnlichkeit zu Variante 1 aufweisen und die folgenden Merkmale enthalten:

- geometrische Ausformung / Stufe an den offenen Profilenden nach außen
- spiegelsymmetrischer Aufbau (gleiche Radien) zur Profil-Längsachse
- vollflächige LFT-Schicht mit erhöhter Werkstoffdicke (3-4 mm) in den Radien, um einen größeren Fließspalt in den Bereichen zu erzeugen, wo ein Blech-Stempel-Kontakt während der Umformung erwartet wird
- zwei hohe LFT-Kreuzrippen zur Versteifung des Profils und zur Ermöglichung eines LFT-Ausgleichs zwischen beiden Seiten (Zargen)

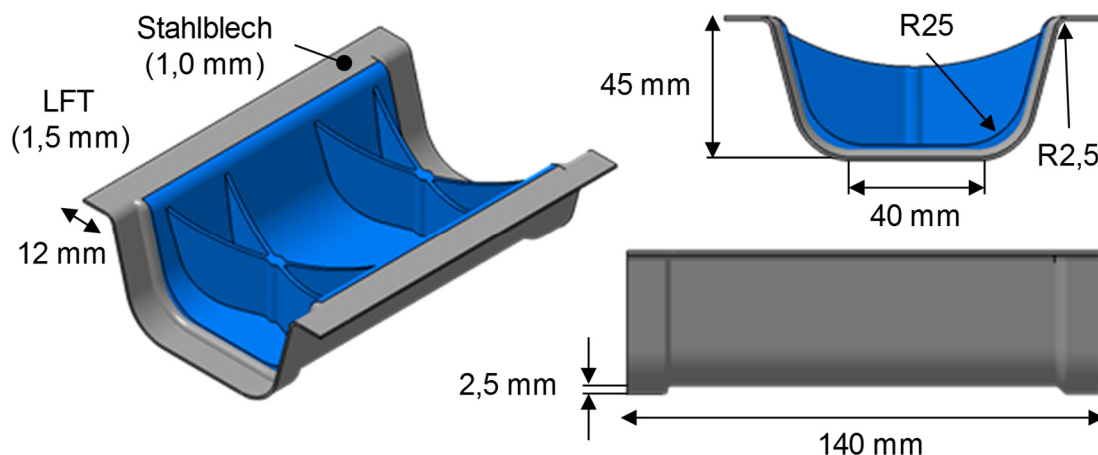


Abbildung 4-8: Geometrie des U-Profils mit seitlicher Ausformung (Variante 2)

Als Blechplatte wird eine Rechteckplatte mit den Maßen 140x170 mm und 1,0 mm Blechdicke eingesetzt, wobei die Stahlsorten DC04 und HC340LA verwendet werden (Tabelle 3-2). Die Übergänge zwischen dem Mittelteil und den geometrischen Ausformungen an den Profilenden sind zu Versuchszwecken unterschiedlich stark ausgeprägt (vgl. [Abbildung 4-10](#)), um ggf. einen zusätzlichen geometrischen Einfluss auf die zu erzielende Dichtigkeit oder die Grenzen der Blechumformung durch einen scharfen Übergang identifizieren zu können.

### 4.2.2 Werkzeug

Das U-Profil-Werkzeug ist in Normallage (Matrize unten) angeordnet und besteht aus zwei Aufspannplatten, Matrize und Niederhalterplatte sowie einem mehrteiligen Stempel. Ober- und Unterteil des Werkzeugs sind durch eine 4-Säulen-Führung gegen mögliche seitliche Verschiebungen infolge auftretender Querkräfte gesichert (Abbildung 4-9). Durch die Erkenntnisse aus den Versuchen mit dem ersten U-Profil (Variante 1, Kap. 4.1) sind bereits zwei wesentliche Merkmale im Werkzeug berücksichtigt:

- Einsatz von vorseilenden, seitlichen Dichtelementen am Stempel, die zur Vermeidung einer Blocksituation auf Gasdruckfedern gelagert sind und eine Relativbewegung zum mittigen Stempel ermöglichen
- Einsatz von federgelagerten Gegenhaltern, die das Stahlblech zusammen mit den Dichtelementen einklemmen und somit ein Anlegen an diese gewährleisten

Die Niederhalterkraft ist einstellbar und wird über eine variable Anzahl von mindestens 4 bis zu 16 Gasdruckfedern mit einer Anfangsfederkraft von  $F_0=360$  DaN abgebildet (Federkennlinien siehe Anhang, Kap. 12.2). Im Vergleich zu Schraubenfedern, die eine nahezu lineare Federkennlinie aufweisen, verläuft das Kraftniveau von Gasdruckfedern leicht progressiv, so dass die Federkraft bei maximalem Hub auf ca. 600 DaN ansteigt. Dieses Verhalten wird besonders beim Hybridpressen favorisiert, da zu Prozessbeginn ein Blecheinzug gewährleistet werden muss und am Ende eine hohe Flächenpressung für die Dichtigkeit gegenüber dem LFT sorgt. Zudem steht bereits mit Beginn der Einfederung eine hohe Federkraft zur Verfügung. Zur Vermeidung einer ungleichmäßigen Kraftverteilung auf den Niederhalter sollte zudem im Werkzeug auf beiden Seiten des Profils eine gerade Anzahl an Gasdruckfedern eingesetzt werden.

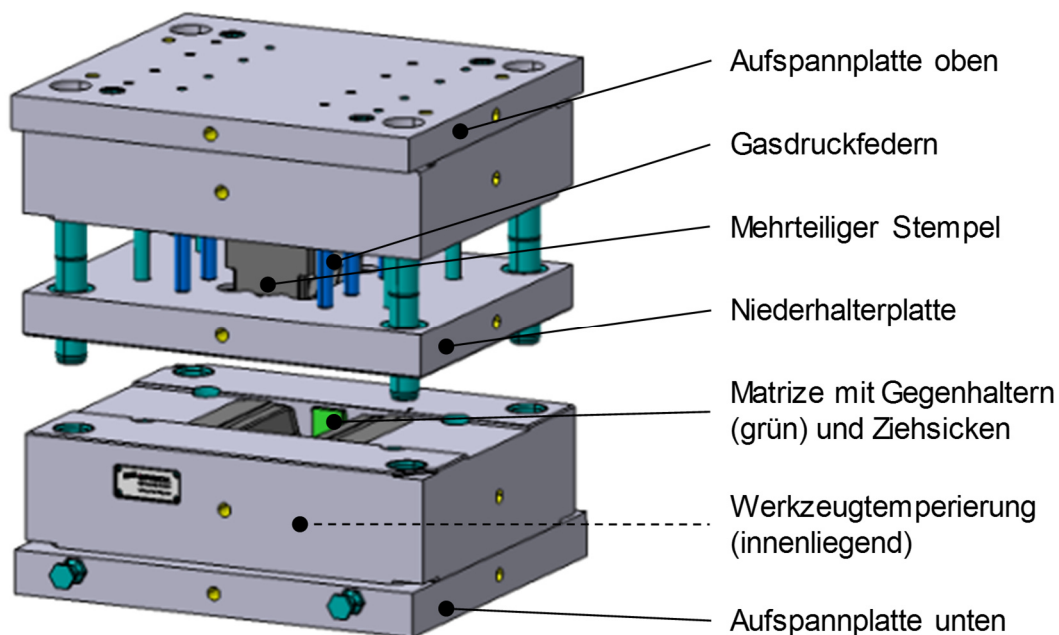


Abbildung 4-9: Grundaufbau des U-Profil-Werkzeugs

Die vorseilenden Dichtelemente am Stempel sind ebenfalls auf Gasdruckfedern (3 Federn pro Element) mit einer deutlich höheren Federkraft von  $F_0=980$  DaN gelagert, wodurch gewährleistet wird, dass die Elemente erst am Ende des Pressprozesses und nicht bereits zu Beginn der Blechumformung nachgeben. Durch den einstellbaren Absatz als Abstand zwischen Dichtelement und Stempel (siehe Abbildung 4-10) von 5-20 mm wird dem LFT ein freies Volumen

während der Umformung vorgehalten, so dass das eigentliche Dichtkonzept erst zu einem späteren Zeitpunkt wirken muss. Die bewegliche Anordnung von Dichtelementen und Stempel wird auch in Abbildung 4-15 deutlich.

Die bereits oben genannten Gegenhalter zum Klemmen des Blechs sind über eine Platte unter der Matrize auf vier Schraubenfedern mit einer maximalen Federkraft von je 871 N gelagert. Die resultierende Klemmkraft zwischen Gegenhalter und vorseilendem Dichtelement beträgt somit 6,22 MPa  $[(4 \times 871 \text{ N}) / (2 \times 8 \times 35 \text{ mm}^2)]$ . Eine Erhöhung der Klemmkraft ist durch den Austausch gegen stärkere Schraubenfedern oder durch Variation der Federanzahl leicht realisierbar.

Die Temperierung der Matrize erfolgt konturnah über innenliegende Kühlkanäle mit den entsprechenden Anschlüssen auf der Rückseite des Werkzeugs. Auf eine Temperierung des Stempels wird aufgrund der Komplexität des Werkzeugs und der vorhandenen Variabilität (einstellbare Absatzhöhe) zunächst verzichtet. Nach erfolgreicher Umsetzung des finalen Dichtkonzepts (V2–3, Abbildung 4-12) werden nachträglich zwei Heizpatronen in den Stempel integriert, um ein besseres Fließverhalten des LFTs und eine höhere Oberflächenqualität zu erhalten.

### 4.2.3 Dichtkonzept

Es erscheint offensichtlich, dass die Abdichtung zu den offenen Enden bei dieser Geometrie die größte Herausforderung darstellt, da das zunächst flache Blech während des Hybridpressens kontinuierlich umgeformt wird und das Dichtkonzept zu jedem Zeitpunkt ein Herauspressen des LFTs verhindern muss. Durch den oben beschriebenen Absatz infolge der vorseilenden Dichtelemente entsteht auf den ersten zwei Dritteln des Pressenhubes ein freies Volumen, in dem sich der LFT ohne äußere Krafteinwirkung bis zum Verpressen nahezu in Ruhelage befindet. Die Abdichtung zu den Längsseiten des Profils erfolgt über die Flanschflächen mit integrierten Ziehsicken in Niederhalter und Matrize, die standardmäßig in der Blechumformung zur Kontrolle des Blechflusses eingesetzt werden. Die nachfolgende Abbildung 4-10 verdeutlicht sowohl das freie Volumen für den LFT durch den Absatz zwischen Dichtelementen und Stempel als auch die zuvor genannten Übergänge der Dichtelemente in unterschiedlicher Ausführung.

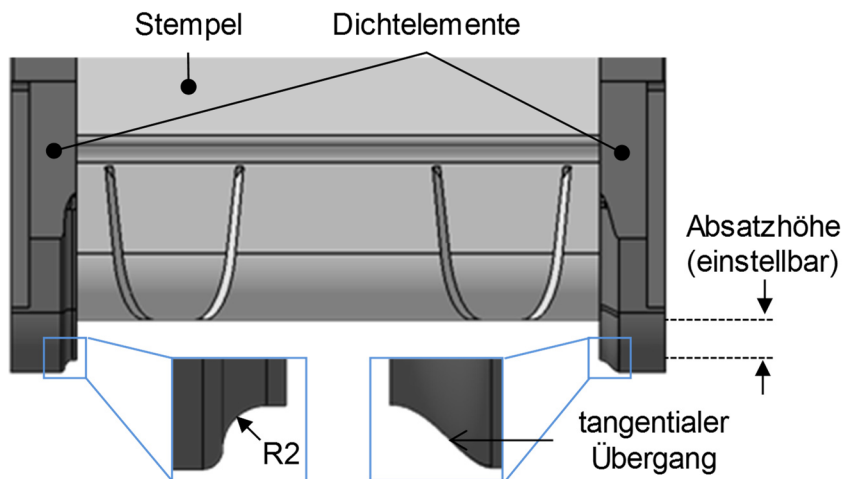


Abbildung 4-10: Seitenansicht des mehrteiligen Stempels mit seitlichen Dichtelementen

Die ersten Versuchsproben mit dem neuen U-Profil-Werkzeug zeigen eine Undichtigkeit am Übergang vom Flanschbereich zur Zarge des U-Profils an den offenen Enden (Pfeilpositionen in

Abbildung 4-11). Infolgedessen gelangt der LFT ungehindert nach außen und unter die Dichtelemente, da diese nicht mehr vollständig schließen können.



Abbildung 4-11: U-Profil der Stempelvariante V2-1 (li.) und LFT-Teil der Variante V2-2 (re.)

Durch die Komprimierung des LFTs während der Umformung kann sich dieser zunächst in der gesamten Kavität ausbreiten und somit auch in die genannten Bereiche unterhalb der Dichtelemente gelangen. Für die weitere Entwicklung des Dichtkonzepts wird der geometrische Übergang von Niederhalter und Dichtelement als Schlüsselstelle identifiziert und in mehreren Iterationen optimiert. Diese schrittweisen Veränderungen können anhand von [Abbildung 4-12](#) nachverfolgt werden. In der ersten Variante des Werkzeugs (V2-1) endet die geometrische Ausformung des Profilquerschnitts am Übergang zum Flansch (vgl. auch [Abbildung 4-8](#)). Die Verlängerung der Ausformung bis zur Ziehsecke (V2-2, Änderungen in grün) erzielt ebenfalls keine vollständige Dichtigkeit, sondern zeigt ein vergleichbares Fehlerbild zur ersten Version. Der LFT gelangt zu früh im Prozess in die Randbereiche und unter das Dichtelement und verhindert somit ein vollständiges Schließen des Werkzeugs sowie die Ausformung des Blechs. Eine Lösung für das Dichtkonzept wird erst mit der dritten und gleichzeitig finalen Variante V2-3 erzielt. Durch eine analytische Bewertung des geometrischen Übergangs zwischen Niederhalter (waagrecht) und Zarge (fast senkrecht) wird deutlich, dass die Dichtelemente keine horizontalen Umformanteile enthalten dürfen. Diese werden daher vollständig auf den Niederhalter übertragen. Der nun rechtwinklige Übergang zwischen Niederhalter und Dichtelement mit minimal größerem Abstand zur Matrizenkontur wird durch die Blechdicke und die geometrische Ausformung des U-Profiles in diesem Bereich überdeckt.

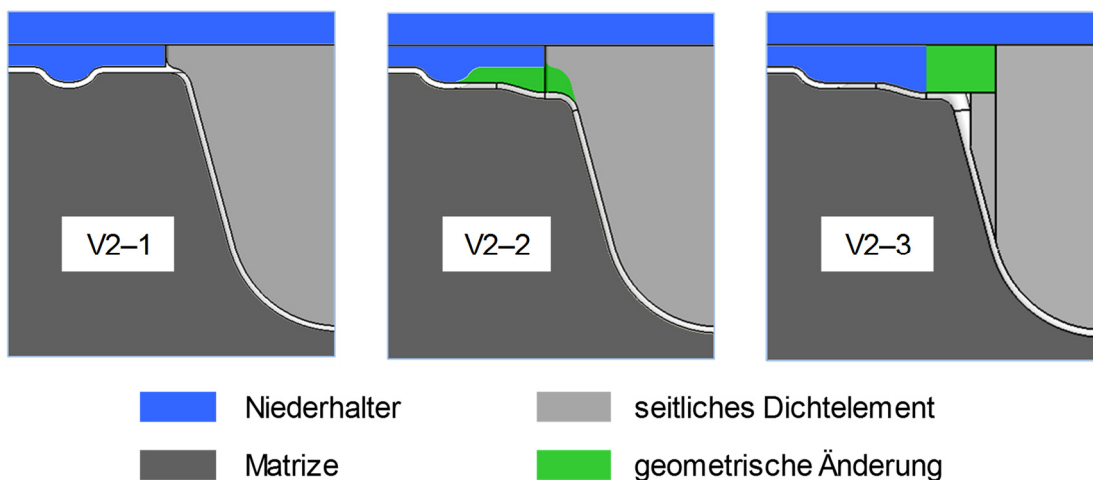
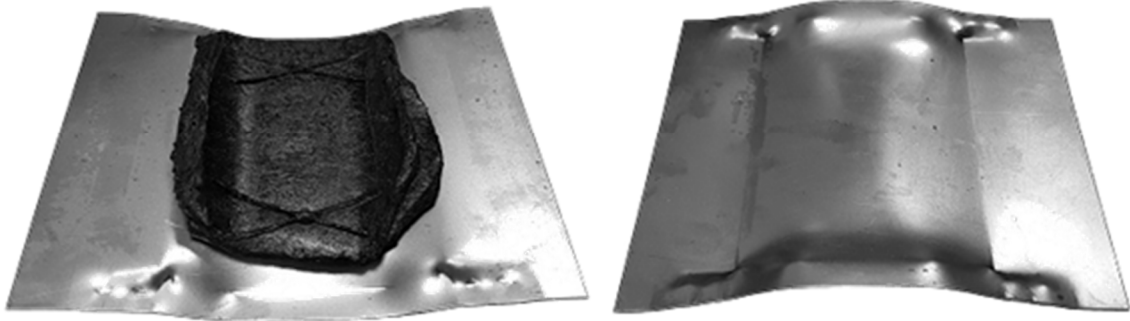


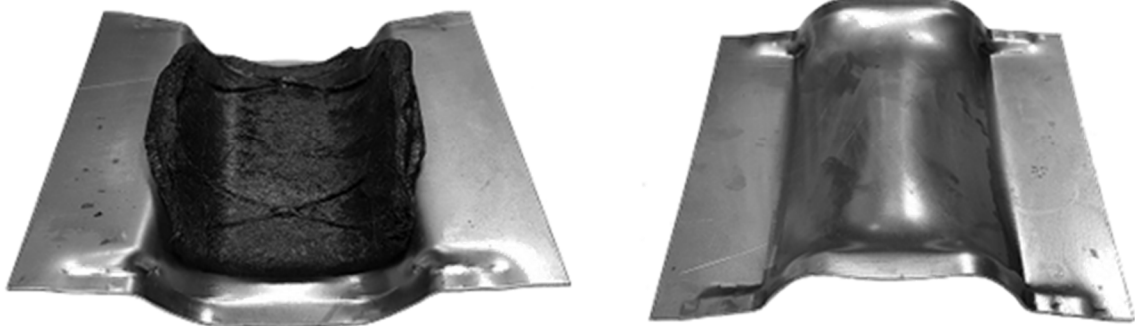
Abbildung 4-12: Geometrische Änderung des Übergangs vom Niederhalter zum Dichtelement

Nachfolgend sind in [Abbildung 4-13](#) Stufenversuche zum Hybridpressen des U-Profiles mit dem finalen Dichtkonzept des Werkzeugs abgebildet. Ein vollständig ausgeformtes U-Profil ist in [Abbildung 4-17](#) dargestellt. Deutlich zu erkennen ist die Verdrängung des LFTs in Richtung der Zargen während des Umformprozesses von 40 mm bis 10 mm vor UT und die vollständige Dichtigkeit an den seitlichen offenen Profilenden in allen Stufen. Da die Verdrängung am Anfang ohne hohen Druck auf den LFT erfolgt, ist eine rein geometrische Abdichtung zunächst ausreichend. Erst gegen Prozessende (10 mm vor UT bis UT), wenn ein hoher LFT-Druck zur Ausformung des Blechs wirkt, muss auch eine vollständige, kraftgebundene Abdichtung über die hohen Federkräfte der Dichtelemente gewährleistet sein. Der geringe Druck auf den LFT wird auch an der fehlenden Ausformung der Verstärkungsrippen sichtbar, die wegbezogen erst nach 10 mm vor UT geformt werden (siehe [Abbildung 4-17](#)).

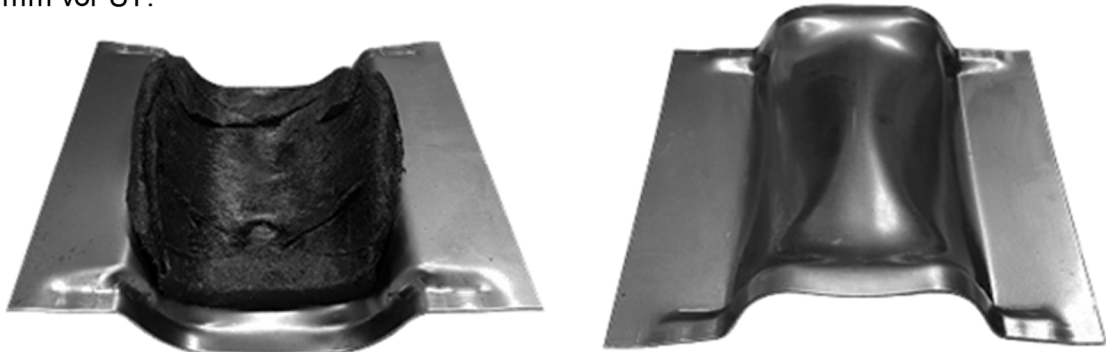
40 mm vor UT:



30 mm vor UT:



20 mm vor UT:



10 mm vor UT:

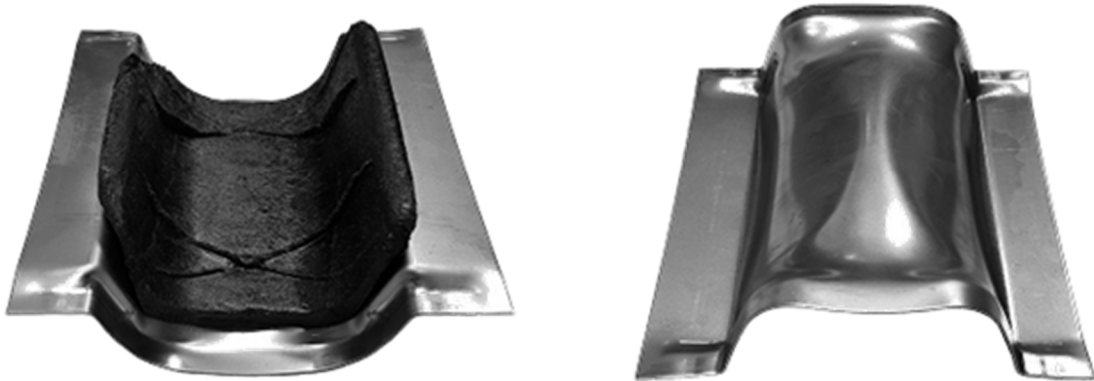


Abbildung 4-13: Stufenversuche des U-Profils nach Entfernung zu UT (DC04)

Während zu Beginn der Umformung eine geometrische Lücke über die offenen Profilenden nach außen besteht, ist in [Abbildung 4-14](#) die exakte Stempelposition in der Seitenansicht dargestellt, ab der das Blech durch die seitlichen Dichtelemente nach außen geformt wird und somit ein abgeschlossenes Volumen zwischen Matrize, Niederhalterplatte, Blech und den Dichtelementen entsteht. Für den restlichen Hub von etwa 15 mm vor UT bis zum vollständig geschlossenen Werkzeug besteht für den LFT kein zur Außenseite führender Spalt und folglich eine vollständige Dichtigkeit des Werkzeugs.

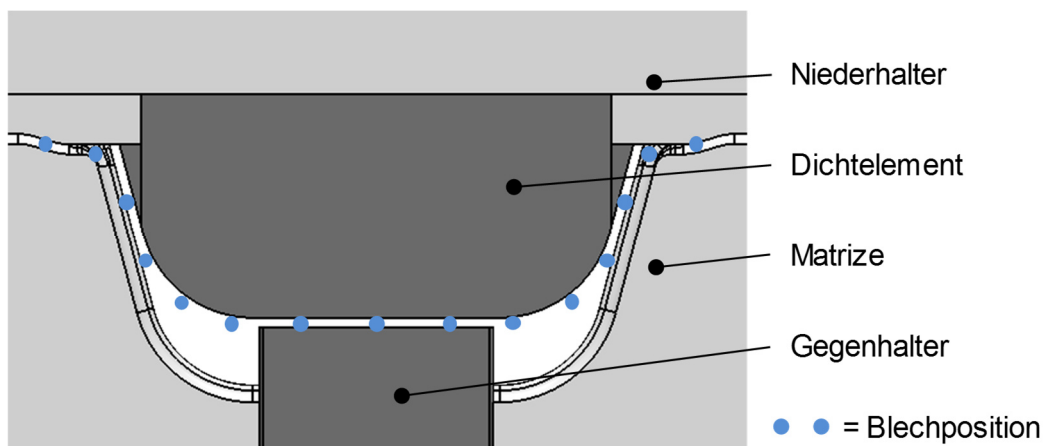


Abbildung 4-14: Stempelposition, ab der das seitliche Dichtkonzept wirkt (ca. 15 mm vor UT)

Die Gesamtanordnung aller relevanten Werkzeugelemente (meherteiliger Stempel mit Dichtelementen, Gegenhalter und Niederhalter) zeigt die nachfolgende [Abbildung 4-15](#). In dieser isometrischen Ansicht wird sichtbar, dass die seitlichen Dichtelemente durch eine Art Führungsschiene mit dem Stempel verbunden sind und die Anlageflächen zum Niederhalter eine zusätzliche Stufe aufweisen. Diese Stufe bildet ein weiteres geometrisches Hindernis für den LFT nach außen und ermöglicht eine stabile Führung des Dichtelements beim Schließen des Werkzeugs (siehe auch [Abbildung 4-16](#)).



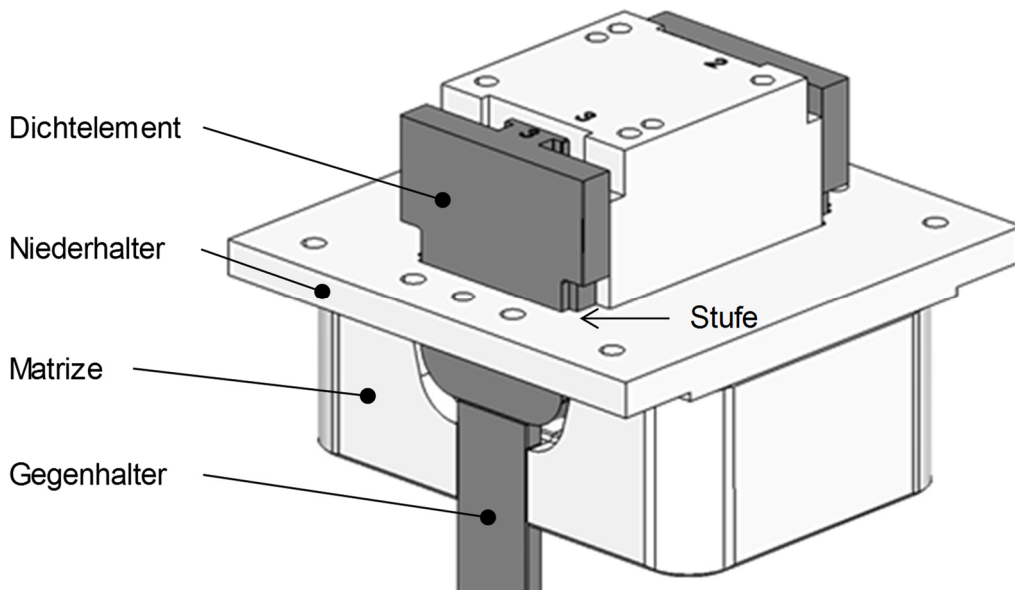


Abbildung 4-15: Gesamtanordnung der Werkzeuelemente des U-Profiles zum Zeitpunkt der vollständigen LFT-Dichtigkeit

Generell kann das entwickelte Dichtkonzept auf alle trägerähnlichen Profile übertragen werden. Weiteres Potenzial für Verbesserungen bieten die teilweise scharfen Kanten am Übergang des Niederhalters zu den Dichtelementen (Abbildung 4-16) sowie ein weicherer Übergang vom Profilquerschnitt zur geometrischen Ausformung. Zwar erfüllen beide Übergänge aus Abbildung 4-10 die Dichtigkeitsanforderung, der weichere Übergang sollte für eine gute Blechumformung und geringere Umformkräfte durch die Dichtelemente jedoch zukünftig bevorzugt werden. Bei deutlich längeren Bauteilen muss zusätzlich überprüft werden, ob die seitliche Klemmung des Blechs über den gesamten Umformprozess gewährleistet werden kann. Die optimale Absatzhöhe zwischen Stempel und Dichtelementen hängt von der Einlegemenge des LFTs ab und muss jeweils im Versuch ermittelt werden.

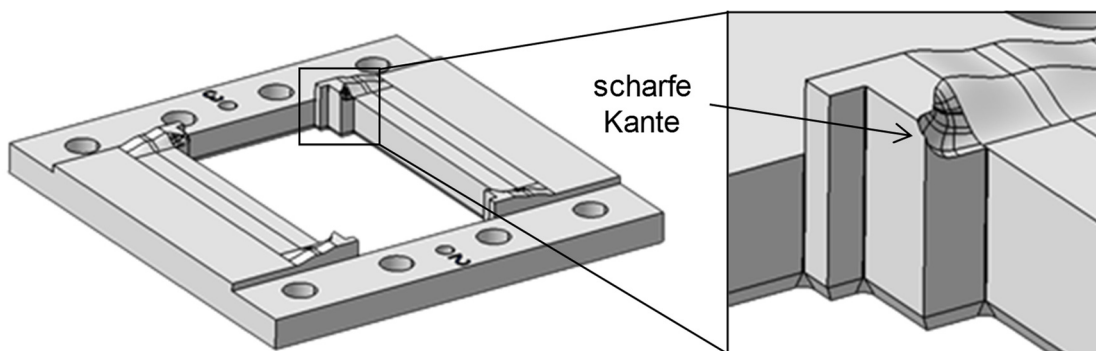


Abbildung 4-16: Detailansicht des finalen Niederhalters (U-Profil Variante 2)

#### 4.2.4 Prozessführung

Die Prozessentwicklung besteht beim U-Profil neben der Auswahl allgemeiner Prozessparameter wie maximaler Presskraft, Geschwindigkeitsprofil und Haltezeit vor allem aus der Anzahl der eingesetzten Gasdruckfedern zur Applikation der Niederhalterkraft sowie der Wahl einer geeigneten Absatzhöhe der Dichtelemente gegenüber dem Stempel (5-20 mm). Thermoplastische Halbzeuge wie LFT-Extrudate, glasmattenverstärkte Thermoplaste (GMT) oder auch

Organobleche neigen während der Erwärmung vor der Verarbeitung zum sogenannten „Loften“ – einer starken Ausdehnung in Dickenrichtung, die aus Entspannungsvorgängen im Werkstoffverbund resultiert [96]. Aus diesem Grund kann die erforderliche Absatzhöhe nicht allein aus der Einlegemasse und Dichte des LFTs bestimmt werden, sondern muss im Versuch überprüft werden. Eine zu geringe Absatzhöhe führt zu einer frühzeitigen Kompression und Ausbreitung des LFTs im Werkzeug, so dass das Dichtkonzept nicht rechtzeitig wirken kann. Auf der anderen Seite fördert eine zu groß gewählte Absatzhöhe die Durchbiegung des Blechs in Profillängsrichtung, da dieses nur über die seitlichen Dichtelemente geführt und in der Mitte keine Abstützung über den LFT oder Stempel erfährt. Somit wird zunächst mehr Stahlblech eingezogen, als für die Ausformung des U-Profiles benötigt wird. Dieser überschüssige Werkstoff wird im Prozess von der Mitte her zu den offenen Profildenden hin verdrängt und bleibt bei unzureichender Presskraft in Form von nicht ausgeformten Falten (siehe Markierungen in [Abbildung 4-17](#)) als Fehlstellen sichtbar. Im Versuch wird für das U-Profil (Variante 2) eine Absatzhöhe von 10 mm als Optimum bei einer Einlegemenge von 80 g LFT bestimmt.

Die Wahl des Schließprofils der Presse orientiert sich an Schließprofilen des reinen LFT-Fließpressens mit einer stufenweise reduzierten Pressgeschwindigkeit gegen Prozessende. In der letzten Phase des Prozesses wird der LFT komprimiert, wodurch einerseits Ausgleichsvorgänge innerhalb der Kavität stattfinden können und andererseits ein schneller Anstieg des Innendrucks beobachtet wird. Beide Phänomene können bei der Wahl einer zu hohen Pressgeschwindigkeit zu lokalen Undichtigkeiten und somit einem Prozessversagen führen. Die maximale Presskraft wird somit erst am Prozessende für die Kompression des LFTs und den daraus resultierenden Druckanstieg benötigt. In diesem Moment findet die finale Ausformung des Blechs durch eine Art Streckziehen statt, wodurch Ausdünnung im Blech entsteht, da ein weiterer Blecheinzug zu diesem Zeitpunkt nicht mehr möglich ist. Die Wegangaben der Umschaltpunkte des Profils in [Tabelle 4-1](#) beziehen sich immer auf den Abstand zum unteren Totpunkt (UT), der bei 0 mm den Nullpunkt des geschlossenen Werkzeugs kennzeichnet. Die Höhe der Presskraft am Ende des Prozesses, welche ausschlaggebend für die Ausformung des Blechs ist, wird entsprechend im letzten Wegpunkt vorgegeben. Für die ersten drei Stufen ist die Angabe der Presskraft von untergeordneter Bedeutung, da die hydraulische Presse geschwindigkeitsgesteuert verfährt und der Wert für die Presskraft nur eine interne Betriebsgrenze darstellt. Wenn die maximale Presskraft bereits vor Erreichen der Soll-Geschwindigkeit erreicht wird, verfährt die Presse mit reduzierter Geschwindigkeit im Rahmen der gewählten Presskraft, ansonsten ist die Geschwindigkeit maßgebend. Dies muss vor allem bei Werkzeugen mit sehr hohen Prozesskräften zu Beginn der Umformung (z.B. Niederhalterkräfte durch Gasdruckfedern oder Ziehkissen) berücksichtigt werden. Je höher die maximalen Presskräfte in den ersten drei Stufen gewählt werden, desto ungenauer ist die Geschwindigkeitsregelung, da die zur Verfügung gestellte motorseitige Leistung durch ein Nicht-Erreichen der Presskraft nicht vollständig abgerufen wird und stattdessen in einer höheren Verfahrensgeschwindigkeit resultiert. In der nachfolgenden Tabelle sind die im Versuch ermittelten und optimierten Prozessparameter für das U-Profil aufgeführt:

Weg [mm]	Geschwindigkeit [mm/s]	max. Presskraft [kN]
100	25	400
60	25	400
25	15	400
10	5	1.000

Tabelle 4-1: Prozessparameter (Geschwindigkeitsprofil und Presskraft) für das U-Profil



In der letzten Entwicklungsstufe des U-Profil-Werkzeugs (V2–3) werden zudem die Ziehsicken aus dem Niederhalter entfernt, um die erforderliche Niederhalterkraft zu minimieren und den maximalen Blecheinzug zu ermöglichen. Mit der kleinstmöglichen Anzahl der oben genannten Gasdruckfedern (je 2 pro Seite  $\rightarrow F_0=14,4$  kN) wird dennoch eine vollständige Abdichtung im Flanschbereich erzielt. Zudem können mit einer Erhöhung der Presskraft auf 1.500 kN die oben genannten Fehlstellen nahezu vollständig ausgeformt werden (siehe [Abbildung 4-17](#)). Der aus der projizierten Stempelfläche resultierende LFT-Druck beträgt unter Berücksichtigung der zu überwindenden Gasdruckfederkraft ca. 1.430 bar, dem das entwickelte Dichtkonzept trotz eines Auftretens minimaler LFT-Häute standhält.



Abbildung 4-17: Vollständig geformtes U-Profil mit hoher Presskraft

Zusammenfassend können als Erkenntnisse aus dem U-Profil folgende Abhängigkeiten zwischen Prozessführung und Dichtigkeit hergestellt werden:

- Durch die Wahl der Absatzhöhe zwischen Dichtelementen und Stempel kann die Verteilung des LFTs in der Kavität zeitlich beeinflusst werden
- Eine geringe Pressgeschwindigkeit am Prozessende führt zu einer höheren Dichtigkeit
- Eine geringe Niederhalterkraft ermöglicht einen verbesserten Blecheinzug und führt zu geringerer Ausdünnung mit reduzierter Neigung zu Rissbildung am Prozessende
- Eine höhere Presskraft ermöglicht einerseits eine verbesserte Ausformung des Blechs, gleichzeitig steigen jedoch die Anforderungen an das Dichtkonzept

### 4.3 Geschlossenes Profil (Wannengeometrie)

Zur Bewertung von metallischen Umformprozessen im Allgemeinen und wirkmedienbasierter Umformung mit Kunststoffschmelzen im Speziellen werden häufig Geometrien in Napf- oder Wannenform eingesetzt [53] [55]. Um die geometrischen Grenzen für das Verfahren Hybridpressen zu ermitteln, wird eine längliche Wannengeometrie mit zwei Tiefenebenen konstruiert.

#### 4.3.1 Geometrie

Die Geometrie der Wanne wurde vor der Werkzeugfertigung durch den Projektpartner vostalpine im Rahmen der Werkzeugauslegung für eine reine Metallumformung bis zu einer DP600-Stahlgüte und 2,0 mm Blechdicke mit Hilfe von Umformsimulationen (Software PAM-STAMP) optimiert. Dazu wurden vor allem die Zieh- und Eckradien größer dimensioniert sowie eine x-förmige Ziehstufe in die Eckbereiche des Niederhalters integriert. Diese hat die Aufgabe, einer entstehenden Faltenbildung in den Ecken vorzubeugen. Neben einer vollflächigen LFT-

Schicht mit 3 mm Schichtdicke verfügt das Wannengeometrie über eine gleichmäßige Rippenstruktur mit Rippenhöhen von bis zu 35 mm im tieferen Bauteilbereich sowie einer minimalen Rippenstärke von 1,5 mm an den dünnsten Stellen ( $1^\circ$  Entformungsschräge).

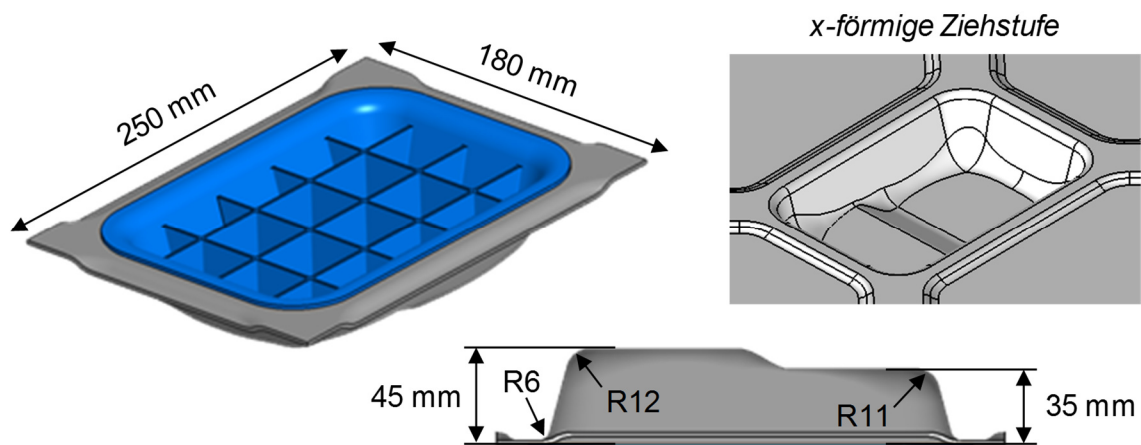


Abbildung 4-18: Abmessungen der Wannengeometrie und Ziehstufe im Werkzeug

Wie in Abbildung 4-18 zu erkennen ist, variieren die Radien der Wannengeometrie umlaufend, so dass die Maßangaben außer dem Ziehradius R6 nur in der Bauteilmitte (Symmetrieebene) Gültigkeit besitzen. Der Übergang zwischen flachem und tiefem Bauteilbereich ist zudem tangential gestaltet.

#### 4.3.2 Werkzeug

Das Werkzeug für die Wannengeometrie ist in Hutlage (Stempel unten, Abbildung 4-19) angeordnet, da aufgrund der Bauteilgröße und höheren Blechdicke im Vergleich zum U-Profil mit einer deutlich höheren Niederhalterkraft zu rechnen ist, die mit Hilfe des hydraulischen Ziehkissens der eingesetzten Presse auf die Niederhalterplatte übertragen werden kann. Des Weiteren ist es durch Einsatz des Ziehkissens möglich, die Niederhalterkraft wegabhängig (nach Stempelposition) in einem Bereich von 50-500 kN variabel einzustellen. Dadurch kann die Niederhalterkraft sehr genau auf den erforderlichen Blechfluss angepasst werden, was mit einem Einsatz von Gasdruckfedern in dieser Form nicht möglich wäre. Die Anordnung des Werkzeugs bedingt zudem, dass der erwärmte LFT nicht auf dem Stahlblech positioniert ins Werkzeug eingelegt werden kann, sondern direkt auf dem temperierten Stempel platziert werden muss. Die Einlegeposition für das Blech befindet sich folglich mittig auf der Niederhalterplatte. Im Vergleich zu reinen Kaltumformwerkzeugen ist die Niederhalterplatte des Wannengeräts deutlich massiver / höher ausgeführt, um einerseits genügend freies Volumen zur Einlage des LFTs und andererseits von Prozessbeginn an ein abgeschlossenes Volumen zwischen Niederhalterplatte, Stempel und Blech zu erhalten. Die Entlüftung der Kavität erfolgt sowohl über die Passungswahl zwischen Stempel und Niederhalterplatte als auch über Luftspalte von Auswerferstiften im Stempel, die jedoch ohne Funktion ausgeführt sind. Dadurch wird eine vollständige Formfüllung der Kavität und insbesondere der Rippen ohne Luft einschüsse gewährleistet.

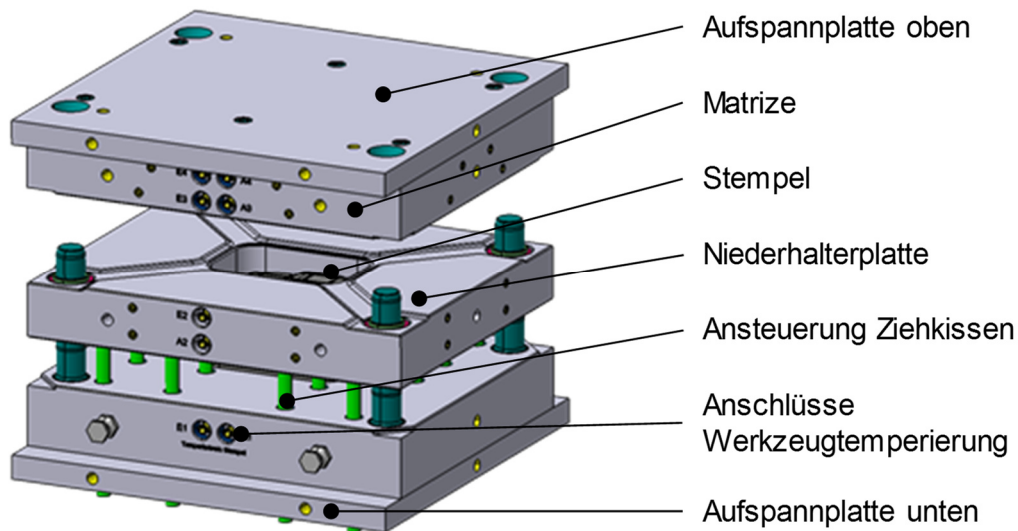


Abbildung 4-19: Grundaufbau des Wannenwerkzeugs

### 4.3.3 Dichtkonzept und Prozessführung

Im Gegensatz zum U-Profil-Werkzeug mit den offenen Enden kann die Abdichtung der Wannenengeometrie umlaufend über die Anpresskraft des Niederhalters gesteuert werden. Es gilt, einen Kompromiss zwischen geringer Niederhalterkraft zur Ermöglichung eines Blecheinzugs einerseits und einer ausreichend hohen Niederhalterkraft zur Vermeidung von Faltenbildung und somit einer Undichtigkeit gegenüber dem LFT andererseits zu finden. Folglich hängt die Dichtigkeit allein von der Prozessführung und somit der wegabhängigen Steuerung der Niederhalterkraft ab.

Die eingesetzte Presse am FLB verfügt über eine Funktion zur Aufzeichnung der Ist-Werte von Zeit, Stempelweg, Pressgeschwindigkeit und Presskraft. Anhand dieser Daten ist eine Analyse des Prozesses und ein Abgleich mit den auftretenden Fehlerbildern möglich. Die beiden nachfolgend beschriebenen Fehlerbilder treten dabei am häufigsten auf (siehe [Abbildung 4-20](#)):

1. Risse im Blech: Risse treten auf, wenn das Blech eine zu starke Ausdünnung erfährt oder der verwendete Werkstoff seine Dehngrenze erreicht bzw. überschritten hat. Ursächlich ist neben der Wahl eines Werkstoffs mit einer zu geringen Bruchdehnung vor allem eine zu hohe Niederhalterkraft und daraus folgend ein zu geringer Blecheinzug in die Kavität. Treten Risse im Blech auf, kann der LFT aufgrund der geringen Viskosität ungehindert hindurchfließen und somit das Blech nicht mehr ausformen.
2. Undichtigkeit am oberen Bauteilrand: Undichtigkeiten können auf zwei Arten am oberen Rand des Bauteils auftreten: Einerseits vollflächig und umlaufend, wenn die gewählte Niederhalterkraft deutlich zu gering ist oder andererseits, wenn in den Eckbereichen des Blecheinzugs eine starke Faltenbildung entsteht und dazu führt, dass sich der Niederhalter vom Blech löst und somit einen Fließspalt für den LFT freigibt.

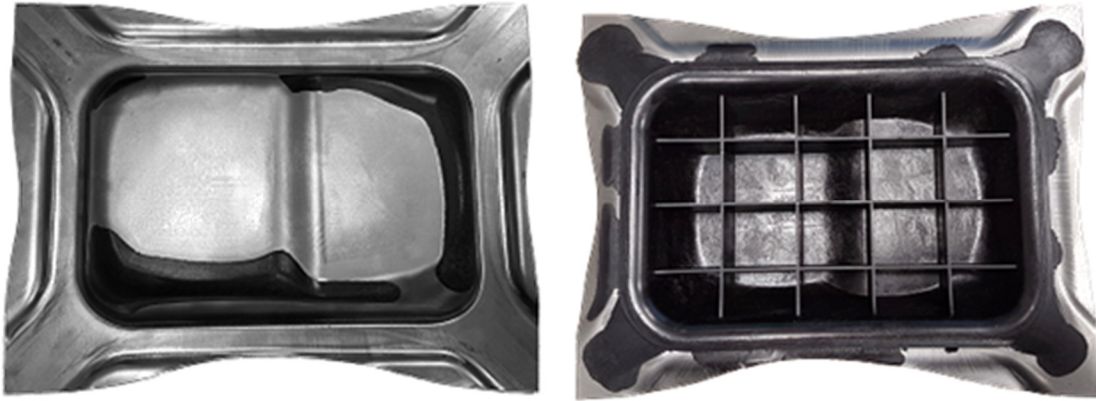
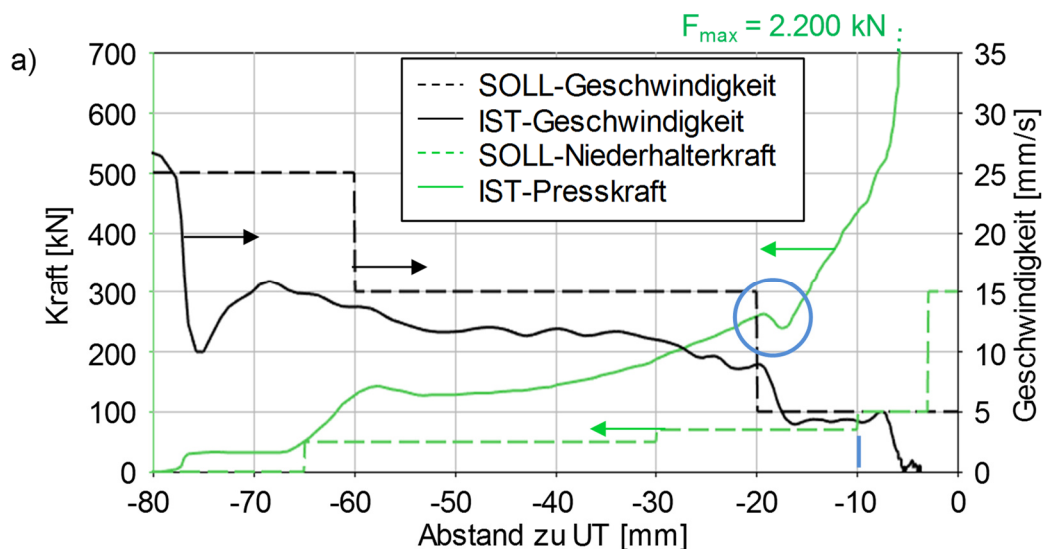


Abbildung 4-20: Rissbildung (li.) und Undichtigkeit am Niederhalter (re.)

Neben der Höhe der Niederhalterkraft haben vor allem die jeweiligen Wegpositionen der vorgegebenen Stufenfunktion einen signifikanten Einfluss auf die Dichtigkeit ohne Auftreten von Rissen im Blech. Die zur Verfügung stehenden vier Stufen können weggesteuert und auf die Position des Stempels über den Prozessfortschritt angepasst vorgegeben werden. Durch die Analyse des Presskraftverlaufs bei einer Wannprobe mit auftretender Undichtigkeit infolge von Faltenbildung in den Eckbereichen der Platine kann ein Zusammenhang mit einem Abfall des Presskraftverlaufs hergestellt werden (blauer Kreis, [Abbildung 4-21a](#)). Der LFT wird zu Prozessbeginn zunächst vom Stempel in das freie Volumen zwischen Blech und Niederhalter verdrängt (siehe auch Stufenversuche in [Abbildung 4-23](#)). Ab einem bestimmten Zeitpunkt während der Umformung ist dieses Volumen erschöpft und die Blechumformung und Komprimierung des LFTs führen zu einem stetigen Anstieg der erforderlichen Presskraft ([Abbildung 4-21](#)). Ein Abfall der Presskraft deutet demnach auf eine eintretende Undichtigkeit zwischen Blech und Niederhalter hin, infolge derer der LFT-Druck entweichen kann. Die nachfolgenden Diagramme zeigen den Presskraft- und Pressgeschwindigkeitsverlauf einer undichten Probe sowie einer dichten Probe, bei der die dritte Stufe der Niederhalterkraft an den Punkt des Presskraftabfalls der undichten Probe vorgezogen wurde (blauer Pfeil). Die Abweichungen der Pressgeschwindigkeit zwischen Ist- und Soll-Wert resultieren aus der fehlenden Regelung der eingesetzten Presse. Die Kurvenverläufe von Ist-Geschwindigkeit und Presskraft enden ca. 3 mm vor UT, was der finalen Werkstoffdicke des LFTs entspricht. Die grünen und schwarzen Pfeile an den Kurven bzw. Stufenfunktionen zeigen auf die dazugehörige vertikale Achse.



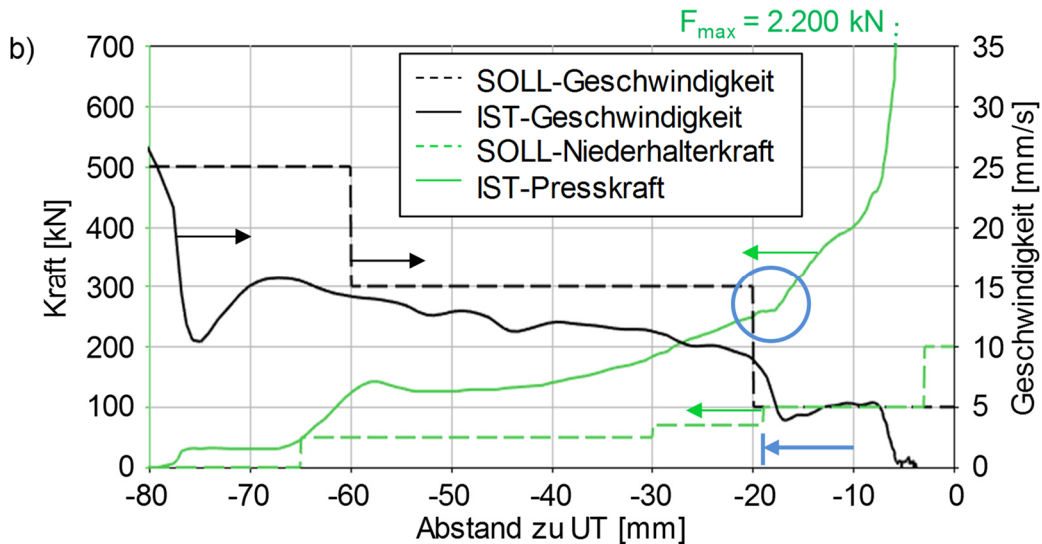


Abbildung 4-21: Pressenparameter während der Umformung einer DC04-Wannenprobe ohne (a) und mit Dichtigkeit (b) durch Verschiebung der dritten Niederhalterstufe (blauer Pfeil)

Die Reduktion der maximalen Niederhalterkraft in der letzten Pressstufe von 300 auf 200 kN hat dabei keinen negativen Einfluss auf die Dichtigkeit am Prozessende, sondern liegt in der Optimierung der Prozesskräfte zu möglichst niedrigen Gesamtkräften begründet. Gleichzeitig steht dadurch bei identischer maximaler Presskraft mehr Kraft zur Um- bzw. Ausformung zur Verfügung.

Die nachfolgende [Abbildung 4-22](#) zeigt die dazugehörigen Wannenproben:

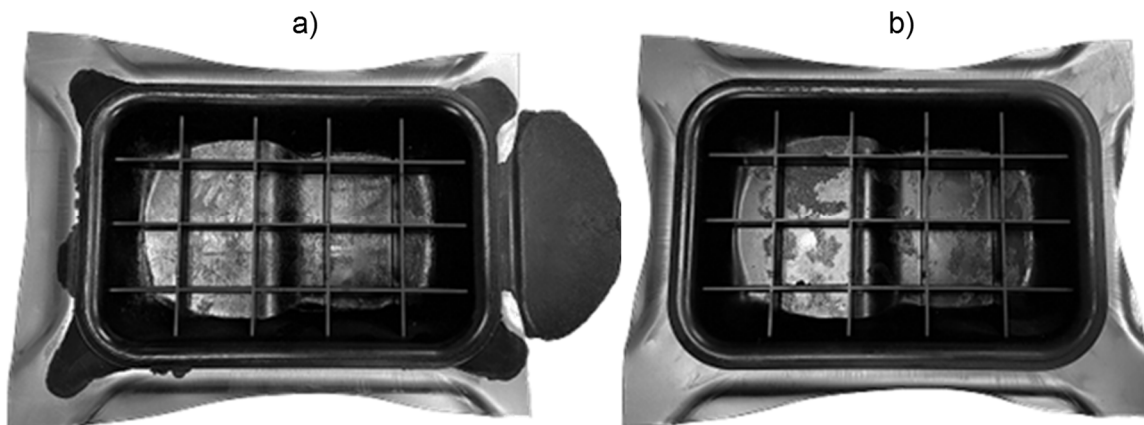
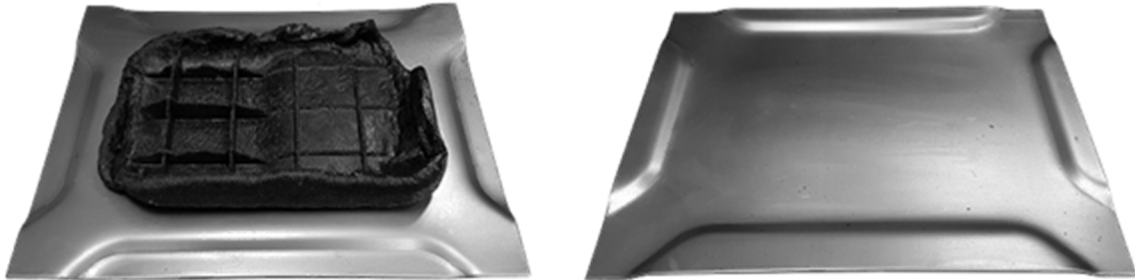


Abbildung 4-22: Wannenbauteil mit (a) und ohne Undichtigkeit (b) am Niederhalter

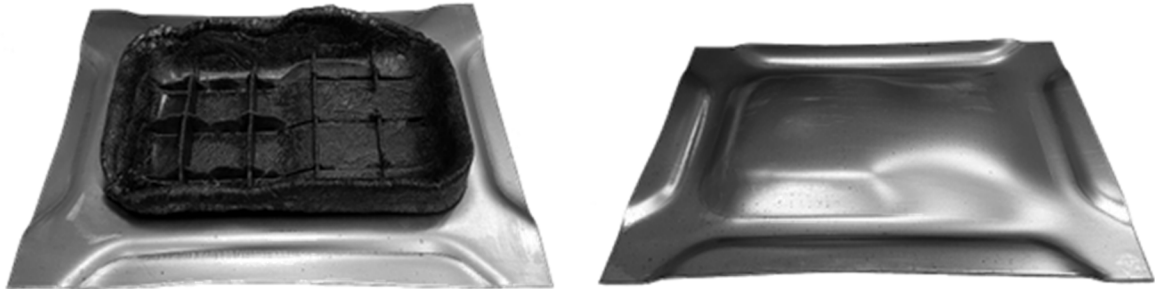
Mit Hilfe von Stufenversuchen ([Abbildung 4-23](#)) kann analog zum U-Profil per Nachverfolgung der Entfernung zum unteren Totpunkt die stattfindende Verdrängung des LFTs zu Prozessbeginn sowie die vollständige, umlaufende Dichtigkeit bis zur maximalen Ausformung des Blechs sichtbar gemacht werden. Durch die hohe Viskosität des schmelzeförmigen LFTs findet bereits zu Prozessbeginn (50 mm vor UT) eine wirkmedienbasierte Blechumformung statt. Anhand der Darstellung zum Zeitpunkt „30 mm vor UT“ wird deutlich, dass auf die Ecken des tiefen Wannen-niveaus die höchste Flächenpressung zwischen Blech und Stempel wirkt.



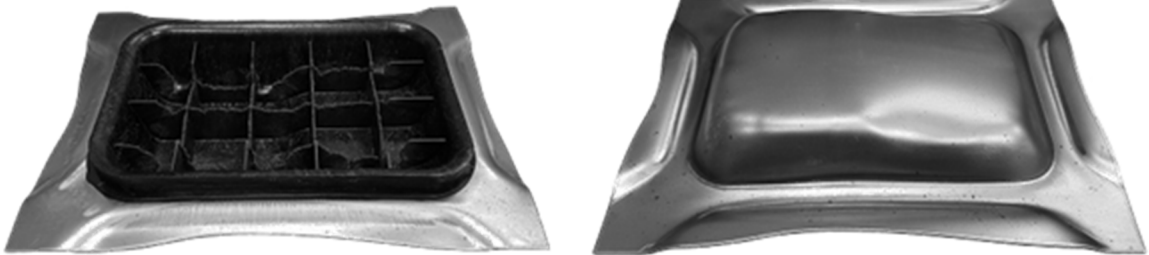
50 mm vor UT:



30 mm vor UT:



15 mm vor UT:



UT:

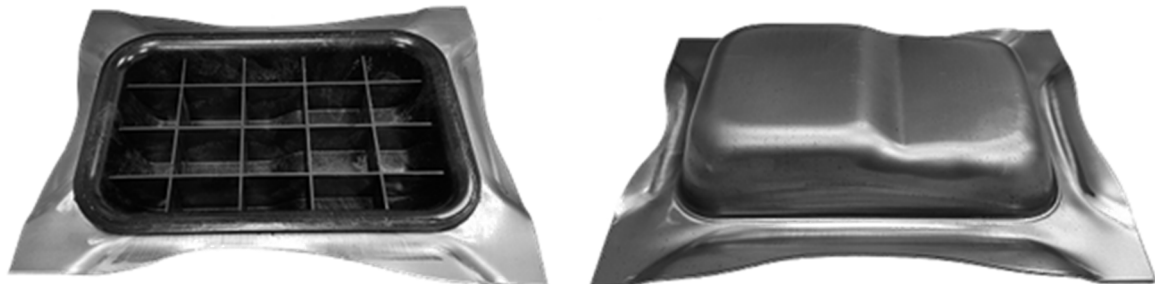


Abbildung 4-23: Stufenversuche der Wannengeometrie nach Entfernung zu UT

Das vorgestellte Dichtkonzept der Wannengeometrie eignet sich generell für alle geschlossenen Bauteilgeometrien. Auch halboffene Profile können zunächst durch eine Wannengeometrie geometrisch geschlossen und durch einen nachträglichen Beschnitt wieder geöffnet werden, wie im Kapitel 8 am Beispiel des Fahrwerkdemostrators aufgezeigt wird. Die Werte der benötigten Niederhalterkräfte müssen ohne vorhandene Prozesssimulation im Versuch ermittelt werden, wobei die Wegpunkte der verwendeten Stufen anhand der Prozesskraftverläufe überprüft werden können. Während die Wegpunkte geometrieabhängig sind, wird die Höhe der benötigten Kraft durch den jeweiligen Werkstoff bestimmt. Generell sollte die Niederhalterkraft so gering wie möglich gewählt werden, um den Blecheinzug nicht zu behindern.



## 5 Bewertung der Blechumformung

Qualitativ kann der Grad der Blechumformung bereits durch eine visuelle Betrachtung der Blechoberfläche bewertet werden. Eine unzureichende Ausformung ist z.B. durch Dellen oder Übergänge in der Oberfläche zu erkennen, die in der CAD-Geometrie des jeweiligen Bauteils nicht vorhanden sind. Des Weiteren können Risse oder eine beginnende Rissbildung durch starke lokale Ausdünnungen des Blechs visuell erkannt werden. Eine quantitative Bewertung wird im Folgenden mit Hilfe der Formänderungsanalysesoftware ARGUS der Firma GOM durchgeführt. Das System analysiert die optische Formänderung eines elektrolytisch geätzten Punktrasters, welches auf die unumformte Platine aufgebracht wird, um automatisiert die lokalen Dehnungen auf der Bauteiloberfläche nach der Umformung zu berechnen. Neben der Formänderung in Haupt- und Nebenrichtung kann u.a. die lokale Abnahme der Blechdicke, eine Einordnung jedes Messpunktes in das Grenzformänderungsdiagramm (FLD, *Forming Limit Diagram*) sowie die Abweichung der umgeformten Bauteilgeometrie zu den CAD-Daten der Werkzeugmatrize analysiert werden. Das FLD beschreibt die Umformgrenze eines Werkstoffs in Abhängigkeit des vorherrschenden Dehnungszustands. Somit ist auch eine Bewertung der Werkstoffbeanspruchung und der jeweiligen Umformreserven möglich. Die nachfolgende Abbildung 5-1 zeigt die Blechseite eines umgeformten Wannenbauteils mit geätztem Punktraster (Punktdurchmesser 0,4 mm, Punktabstand 1,5 mm vor der Umformung).

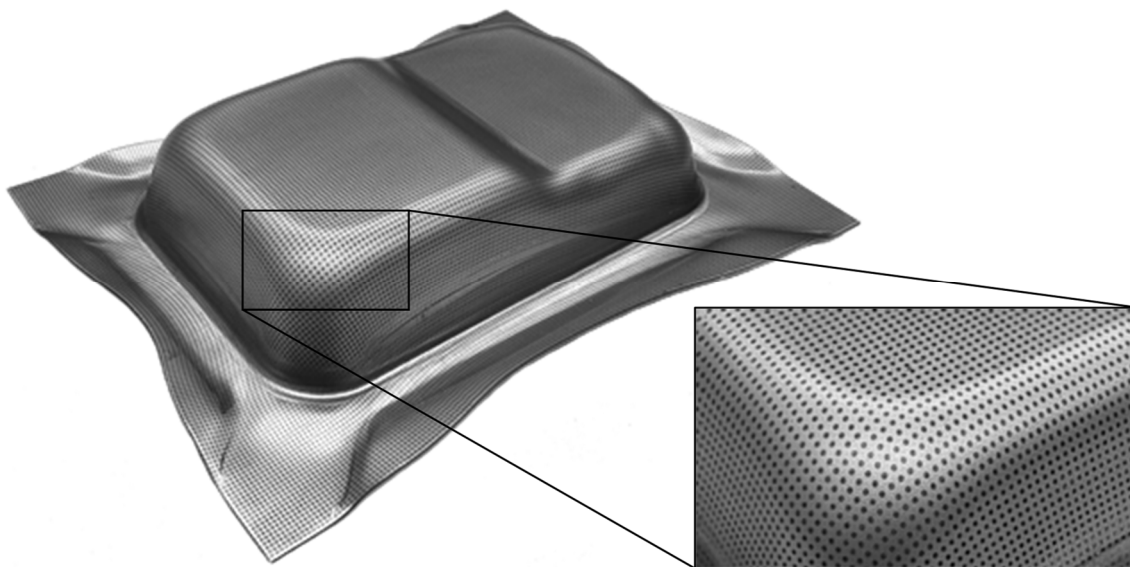


Abbildung 5-1: Elektrolytisch geätztes Punktraster auf dem Wannenbauteil

Die nachfolgende Tabelle 5-1 benennt das verwendete Markiersystem und die Parametereinstellungen zur Applikation des Punktrasters:

<b>Elektrolytisches Markiergerät:</b>	Östling EU Classic 300
<b>Elektrolyt für Stahlwerkstoffe:</b>	701/9 (Östling)
<b>Markierparameter:</b>	Wechselstrom, Markierleistung = 10, Markierzeit = 2

Tabelle 5-1: Anlagentechnik und Parameter für die Blechmarkierung mittels Ätzen

Die Ätzung mittels Markiergerät ist ein händisch ausgeführter Prozess, bei dem bis zu 10 Wiederholungen pro Stelle erforderlich sind, um ein deutlich sichtbares Punktraster zu erhalten.



## 5.1 U-Profil

Die U-Profile werden mit dem weichen Tiefziehstahl DC04 und einem mikrolegierten HC340LA Stahl (Tabelle 3-2), nachfolgend als HC340 bezeichnet, in der Blechdicke 1,0 mm hergestellt. Von der Prozessseite her werden für beide Werkstoffe die identischen Pressenparameter mit dem nachfolgenden Schließprofil und der gleichen Niederhalterkraft durch dieselbe Anzahl Gasdruckfedern ( $4 \times F_0 = 360 \text{ DaN}$ ) verwendet. Wie bereits im Kap. 4.2.4 erläutert, stellt die Angabe der Maximalkraft nur für die letzte Pressstufe den zu erreichenden Wert dar, da die Presse vorher nur nach Pressgeschwindigkeit gesteuert wird.

Entfernung zu UT [mm]	Pressgeschwindigkeit [mm/s]	Max. Presskraft [kN]
100	25	400
25	15	400
15	4	1000

Tabelle 5-2: Pressparameter für das U-Profil

Die gewählte Maximalkraft von 1.000 kN führt aufgrund der projizierten Fläche des Stempels von ca. 10.300 mm<sup>2</sup> zu einem äquivalenten LFT-Druck von 950 bar, anhand dessen nachfolgend die Ausformung der Bleche sowie deren werkstoffliche Beanspruchung analysiert werden.

### 5.1.1 Geometrische Ausformung

Die Bewertung der Ausformung für beide hybridgeformten U-Profile kann am einfachsten mit Hilfe eines Vergleichs der Bauteiloberfläche mit dem CAD-Datensatz der Werkzeugmatrize erfolgen, der vom ARGUS-System automatisiert unterstützt wird. Aufgrund der im Verhältnis zur Rasterschablone kleinen Platinengröße muss das Punktraster zweiteilig aufgebracht werden, wodurch ein nicht auswertbarer Streifen ohne Rasterpunkte in der Probenmitte entsteht. Die Auswertung des Abstands der Bauteiloberfläche vom CAD-Modell der Matrize ist für beide eingesetzten Werkstoffe nachfolgend dargestellt (Abbildung 5-2) und wird mit Hilfe einer sogenannten globalen „Best-Fit-Ausrichtung“ – im Gegensatz zu einer Ausrichtung mittels definiertem Referenz-Punkt-System (RPS) – realisiert. Negative Zahlenwerte stehen dabei für eine fehlende Ausformung, da eine Ausformung über die Matrizengeometrie hinaus nicht möglich ist.

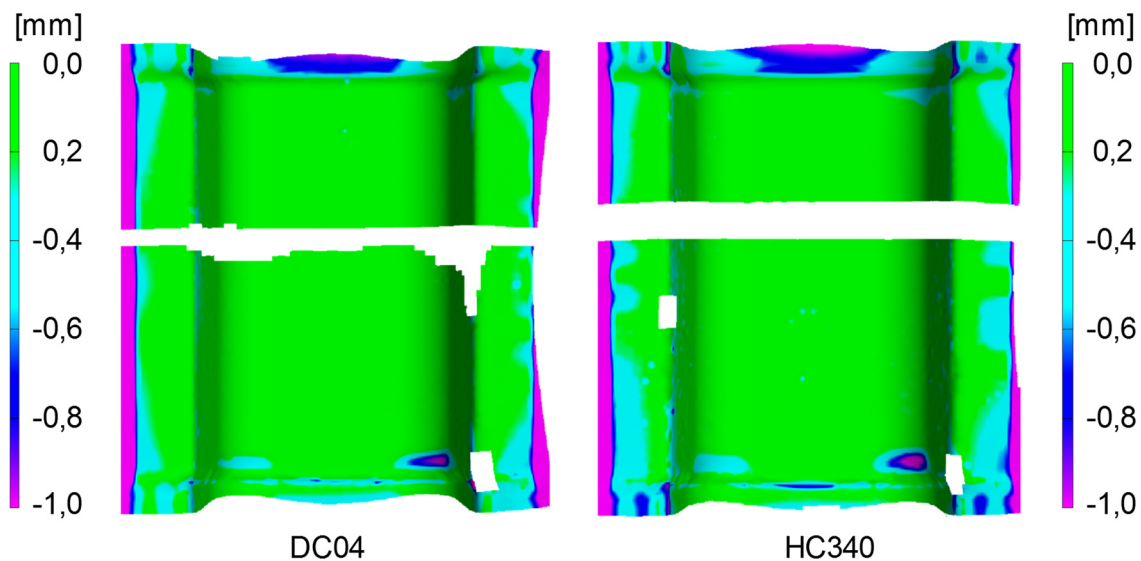


Abbildung 5-2: Abstand der U-Profil-Oberflächen zum CAD-Modell

Es fällt auf, dass beide Werkstoffe trotz unterschiedlicher Festigkeit eine vergleichbare und nahezu vollständige Ausformung beim U-Profil erzielen. Lediglich im unteren Bildbereich kurz hinter dem Übergang von dem nach außen geformtem Querschnitt (Dichtbereich) zum gleichmäßigen Querschnitt des U-Profils sind jeweils zwei Dellen mit einer Tiefe von bis zu 1,0 mm fehlender Ausformung erkennbar. Es handelt sich in beiden Fällen um den radialen Übergang zu den Dichtelementen (vgl. [Abbildung 4-10](#)), der zusätzlich auch einen sichtbar stärkeren Blecheinzug zur Folge hat und somit die Bildung von Dellen durch überschüssiges Blechmaterial fördert. Für die weitere Entwicklung des Verfahrens sollte daher der tangentielle Übergang favorisiert werden. Die weiteren Abweichungen im seitlichen Flanschbereich der U-Profile sind durch die letzte Werkzeugänderung begründet, in der die Ziehsicken aus dem Niederhalter entfernt wurden, jedoch in der Matrize und somit auch in den CAD-Daten erhalten geblieben sind. Die Abweichungen im oberen Bildrand an der Ausformung durch das Dichtelement mit dem sanften Übergang resultieren aus der Funktion der eingesetzten Gegenhalter. Nach dem Öffnen des Werkzeugs drücken diese mit der gesamten Schraubenfederkraft des eingefederten Zustands gegen das Bauteil und können die kunststofffreien Blechbereiche daher leicht verformen. Gleichzeitig fungieren die Gegenhalter auch als Auswerfer im Werkzeug.

### 5.1.2 Werkstoffliche Beanspruchung

Die werkstoffliche Beanspruchung eines Bauteils wird anhand des Grenzformänderungsschaubilds beurteilt bzw. des Abstands eines jeden Messpunkts von der Grenzformänderungskurve (FLC) des verwendeten Werkstoffs. Diese beschreibt die maximale Umformbarkeit in Abhängigkeit des Dehnungszustands und stellt somit die werkstoffliche Umformgrenze dar. Üblich ist des Weiteren die Angabe der reduzierten FLC-Kurven mit 10 und 20 % Sicherheitsabstand, wie in [Abbildung 5-3](#) dargestellt. Die Punktwolke des U-Profils aus DC04-Stahl zeigt einen deutlichen Abstand von der 20 %-FLC, so dass der Werkstoff noch ausreichend Reserven für weitere Umformungen besitzt. Die höchstbelasteten Stellen sind dabei in den vier Radiusbereichen des U-Profils kurz nach den Dichtelementen sowie in den vertikalen Bereichen direkt im Übergang vom Profilquerschnitt zu den seitlichen Ausformungen zu finden. Die zuletzt genannten Bereiche werden anhand der berechneten Ausdünnung in [Abbildung 5-5](#) thematisiert.

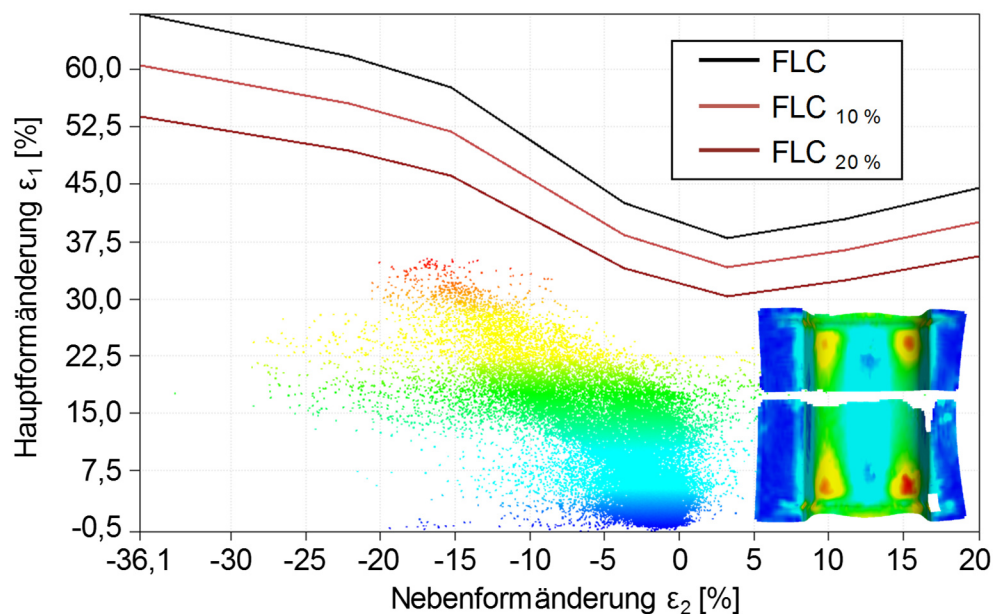


Abbildung 5-3: Grenzformänderungsschaubild für das U-Profil aus DC04-Stahl

Im Vergleich der beiden Werkstoffe ist die werkstoffliche Beanspruchung des HC340-Stahls etwas höher, was auch bei Betrachtung des Schaubilds in [Abbildung 5-4](#) deutlich wird. Obwohl ein Großteil der Punktwolke deutlich unterhalb der 20 %-FLC liegt, gibt es einzelne Punkte darüber und der Abstand ist insgesamt deutlich kleiner als beim DC04-Stahl. Somit wird das HC340-Blech aufgrund der höheren Festigkeit und gleichzeitig reduzierten Umformbarkeit erwartungsgemäß stärker beansprucht. Dennoch bestehen auch in diesem Fall noch Umformreserven, die ein Auftreten von Rissen verhindern. Des Weiteren gilt es zu beachten, dass alle dargestellten FLCs bei Raumtemperatur ermittelt wurden und somit als Näherung zum realen Werkstoffverhalten während des Hybridpressens bewertet werden müssen.

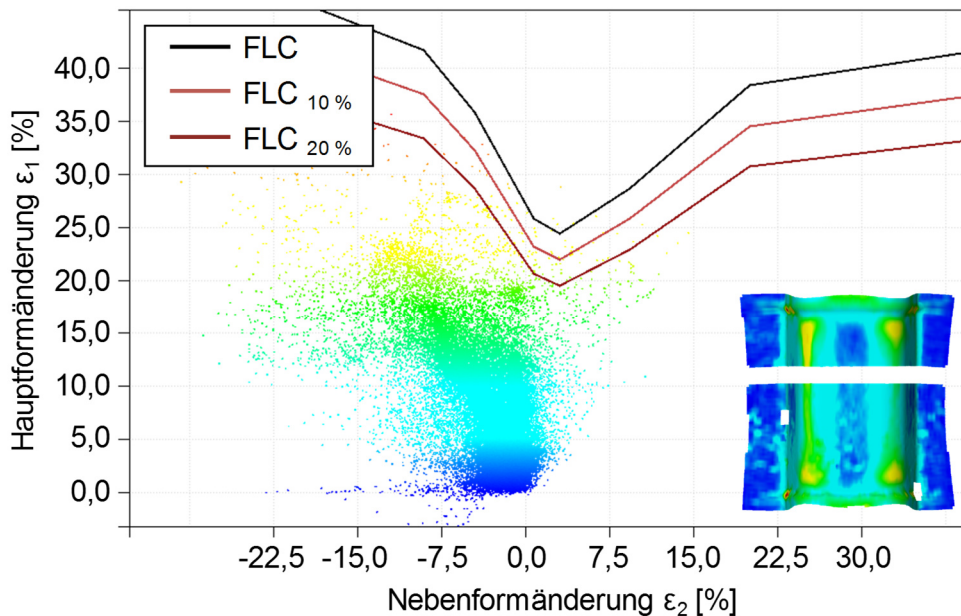


Abbildung 5-4: Grenzformänderungsschaubild für das U-Profil aus HC340-Stahl

Neben der Beurteilung des Grenzformänderungsschaubilds stellt die Ausdünnung eines Werkstoffs ein weiteres relevantes Bewertungskriterium für die Werkstoffbeanspruchung dar. Die höchste Ausdünnung erfahren beide U-Profile an den Punkten, die zuerst durch den Niederhalter vorgeformt und im Anschluss durch die vorseilenden Dichtelemente weiter umgeformt werden (Kreise in [Abbildung 5-5](#)). Es zeigt sich, dass an diesen Stellen zudem die geometrische Auslegung des Werkzeugs am Übergang vom Niederhalter zum Dichtelement einen signifikanten Einfluss auf die Beanspruchung des Metallblechs hat (vgl. auch [Abbildung 4-16](#)).

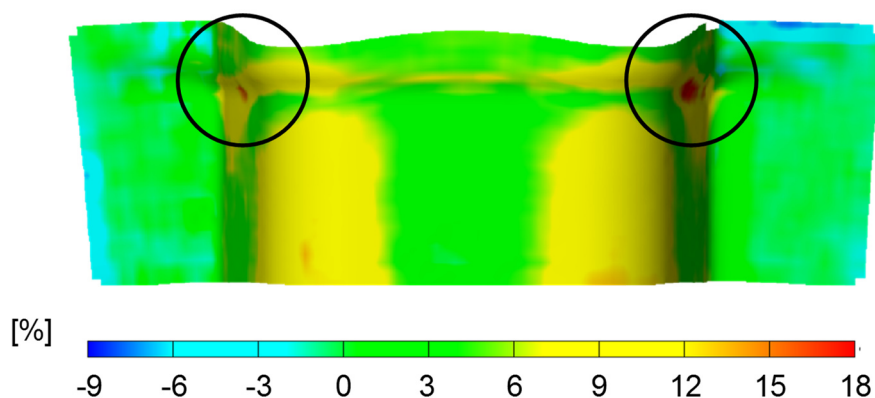


Abbildung 5-5: Ausdünnung des U-Profiles aus DC04-Stahl

Das Ziel zukünftiger Werkzeugkonzepte muss es daher sein, neben der Dichtfunktion durch die seitlichen Elemente möglichst sanfte Übergänge durch eine Berücksichtigung von Radien vorzusehen. Gleichzeitig sollte für den Bereich der geometrischen Ausformung ein tangentialer Übergang gegenüber einem radialen mit deutlicher Stufe bevorzugt werden.

## 5.2 Wannengeometrie

Die Wannengeometrie wird mit den Werkstoffen DC04 und CR330Y590T (Dualphasenstahl), nachfolgend aus Gründen des Bekanntheitsgrads als DP600 bezeichnet, in der Blechdicke 2,0 mm umgeformt (Tabelle 3-2). Der Stahl DP600 stellt in dieser Blechdicke gleichzeitig die Auslegungsgrenze für die Wannengeometrie dar. Entsprechend der oben genannten Prozessentwicklung werden jeweils unterschiedliche Pressprofile für beide Werkstoffe eingesetzt, die nachfolgend aufgeführt sind. Als Presskraft im letzten Pressschritt wird die maximal zur Verfügung stehende Kraft der Presse (2.200 kN) eingesetzt, woraus abzüglich der zu überwindenden Niederhalterkraft durch das hydraulische Ziehkissen in Höhe von 250 kN in der letzten Pressstufe ein LFT-Druck von ca. 690 bar resultiert (projizierte Fläche = 28.300 mm<sup>2</sup>).

Abstand UT [mm]	DC04		DP600	
	Ziehkissen [kN]	Presskraft [kN]	Ziehkissen [kN]	Presskraft [kN]
65	50	250	50	250
30	100	600	125	600
18	150	750	220	800
3	250	2.200	250	2.200

Tabelle 5-3: Pressenparameter für Press- und Ziehkissenkraft für die Wannengeometrie

Das Geschwindigkeitsprofil des Pressgangs ist für beide Werkstoffe identisch:

<b>Abstand UT [mm]</b>	80	40	20	12
<b>Geschwindigkeit [mm/s]</b>	25	15	5	5

Tabelle 5-4: Geschwindigkeitsprofil für die Wannengeometrie

### 5.2.1 Geometrische Ausformung

Bereits ohne die softwaregestützte Auswertung durch das ARGUS-System wird bei visueller Betrachtung der Bauteile deutlich, dass die Ausformung des höherfesten DP600-Stahls im Gegensatz zum DC04-Stahl unvollständig ist. Durch die nachfolgend abgebildete Analyse der Geometrieabweichung zwischen umgeformter Wannengeometrie und der dazugehörigen Soll-Geometrie aus dem CAD-Datensatz (Abbildung 5-6) wird diese Erkenntnis quantifiziert. Die farblosen Teilbereiche ohne Wertangabe zwischen Umform- und Ziehbereich resultieren aus einem durch Reibung beim Blecheinzug zerstörten Punktraster während der Umformung, wodurch an diesen Stellen keine Auswertung möglich ist. Es wird deutlich, dass das DC04-Blech nahezu vollständig ausgeformt ist und lediglich an den Radien des Übergangs vom flachen zum tiefen Bauteilniveau eine Abweichung von <1,0 mm zur CAD-Geometrie vorliegt. Diese Radien stellen mit einer Größe von 3 mm die kleinsten Radien des Bauteils dar, für deren Ausformung nach Gleichung 2-2 bei einer reinen Innenhochdruckumformung ein deutlich höherer Wirkmediendruck von mehr als 5.000 bar erforderlich wäre. Die Verfahren sind jedoch nicht

direkt vergleichbar, da beim Hybridpressen ein Nachfließen des Blechs erfolgen kann und somit ein deutlich geringerer Druck zur vollständigen Ausformung ausreichen sollte. Aufgrund der maximalen Presskraft der eingesetzten Presse von 2.200 kN kann dieser jedoch nicht weiter gesteigert werden.

Im Gegensatz dazu weist das DP600-Blech insgesamt deutlich größere Abweichungen von bis zu >4,0 mm auf, die vor allem in den Bauteilecken sichtbar werden ([Abbildung 5-6](#)). An diesen Stellen ist die Flächenpressung zwischen Stempel und Blech während des Hybridpressens besonders groß und der vorherrschende LFT-Druck reicht nicht aus, um das Blech weiter auszuformen. Die positiven Abweichungen laut Farbskala im Flanschbereich resultieren aus einer Rückfederung des Blechs ohne Verwendung eines Haftvermittlers und können bei der Bewertung der Ausformung vernachlässigt werden, da eine Ausformung über die Geometrie der Matrize hinaus grundsätzlich nicht möglich ist.

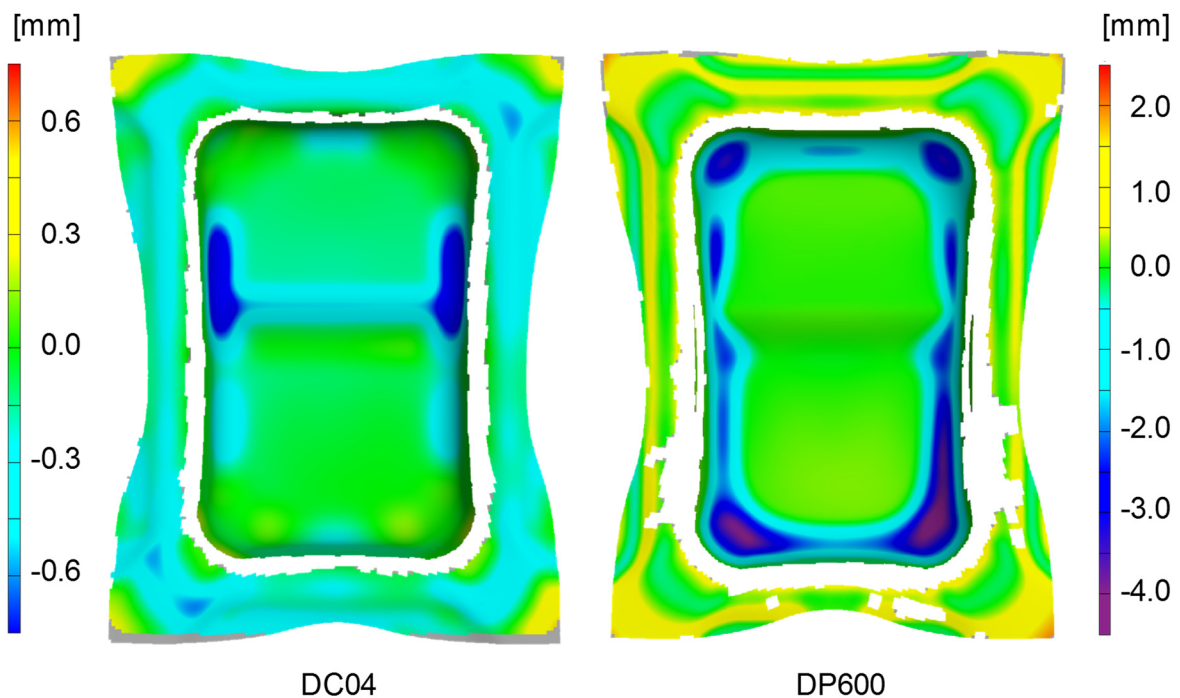


Abbildung 5-6: Vergleich der Geometrieabweichung zwischen den geformten Wannenbauteilen und der CAD-Geometrie der Werkzeugmatrize

Dass während der Umformung in den Bauteilecken zunächst nur eine sehr dünne LFT-Schicht vorhanden ist und die finale Ausformung des Blechs in diesen Bereichen erst gegen Prozessende erfolgt, wird auch bei Betrachtung der reinen LFT-Verstärkung nach dem Hybridpressen ohne Haftvermittler deutlich. Wie in [Abbildung 5-7](#) zu erkennen ist, haben sich um die Bauteilecken sichtbare Bindenähte im LFT gebildet. Bindenähte entstehen, wenn zwei Schmelzfronten zusammentreffen oder Teilbereiche einer Kavität erst zu einem späteren Zeitpunkt des Pressvorgangs mit schmelzeförmigem LFT vollständig gefüllt werden und der dort vorhandene Kunststoff bereits abgekühlt ist. Die Verdrängung des LFTs während der Umformung wird auch anhand der im Kapitel 4.3.3 aufgezeigten Stufenversuche sichtbar (vgl. [Abbildung 4-23](#)). Während der Umformung wird der LFT an allen vier Seiten zunächst nach oben verdrängt und muss folglich gegen Prozessende wieder nach unten gepresst werden. Zu diesem Zeitpunkt wird das Blech über die vier Ecken des Stempels gespannt, so dass diese Bereiche aufgrund der hohen Flächenpressung zwischen Blech und Stempel zuletzt gefüllt werden.



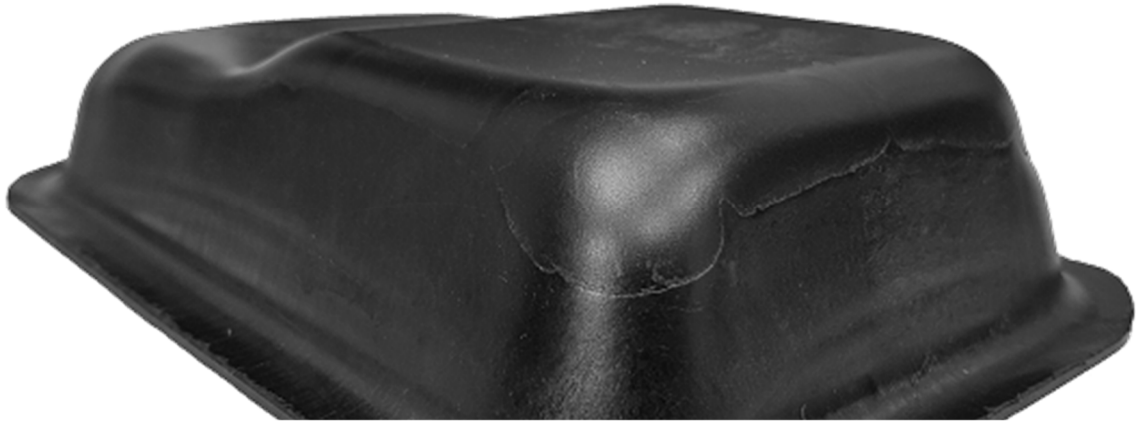


Abbildung 5-7: Binde-naht in der Wannengeometrie durch nachträgliche Ausformung

Neben einer softwaregestützten Analyse der Ausformung kann diese auch mit Hilfe der Kunststoffverteilung anhand von Bauteilschnitten bewertet werden. In [Abbildung 5-9](#) und [Abbildung 5-11](#) sind jeweils drei Schnittansichten durch eine Wannengeometrie mit DC04- und DP600-Stahl dargestellt. Die LFT-Schicht ist auf eine gleichmäßige Werkstoffdicke von 3 mm ausgelegt. Dementsprechend gibt es zwei Merkmale, die auf eine unzureichende Ausformung des Blechs hindeuten: 1. eine ungleichmäßige Dickenverteilung der LFT-Schicht sowie Bereiche mit einer Dicke nahe dem Wert Null und 2. eine in Teilbereichen gleichmäßige LFT-Schichtdicke, die jedoch deutlich über der Auslegungsdicke liegt und sich nur durch ein zu kleines freies Volumen durch fehlende Blechformung ableiten lässt. Bei den nachfolgend dargestellten Bauteilen wird eine LFT-Menge von 300 g eingesetzt, die etwa 10 % über der Auslegungsmenge von 270 g liegt und zu einer LFT-Schichtdicke von ca. 3,6-4 mm in den flachen Bodenbereichen der Wannengeometrie führt.

Die Ergebnisse der Schnittauswertung sind deckungsgleich mit den Ergebnissen der berechneten Geometrieabweichung aus [Abbildung 5-6](#). Während in nahezu allen Schnittverläufen eine gleichmäßige LFT-Dickenverteilung und somit eine vollständige Blechformung zu erkennen ist, beträgt die Schichtdicke in den Radien des Schnitts B-B lediglich 1,5 mm. Es fehlen ca. weitere 1,5 mm bis zur vollständigen Ausformung an dieser Stelle. Die berechnete Blechdicke der jeweiligen Schnitte A bis C über die Schnittlänge ist nachfolgend in [Abbildung 5-8](#) dargestellt:

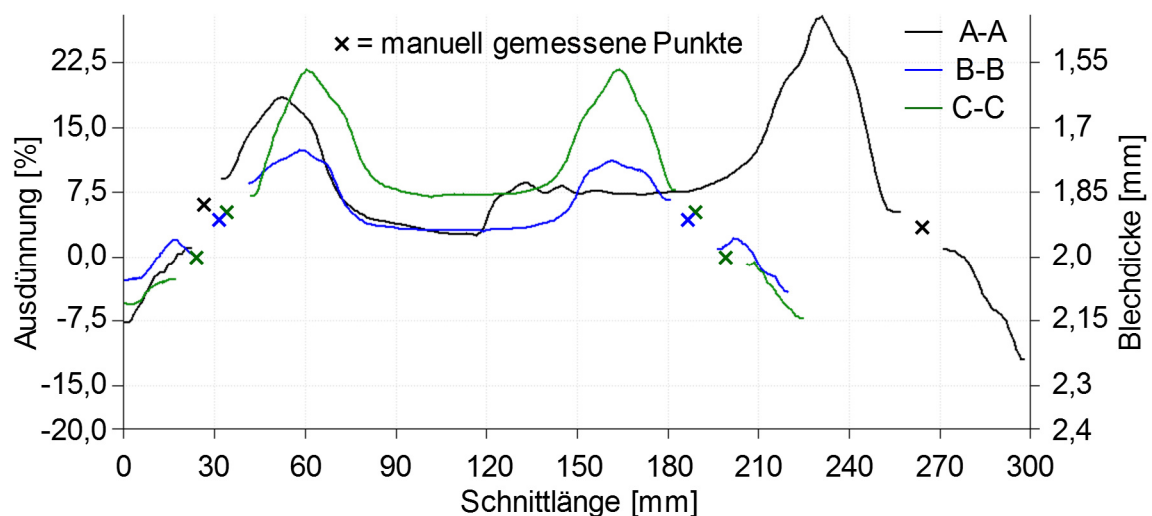


Abbildung 5-8: Berechnete Ausdünnung bzw. Blechdicke der Schnitte aus [Abbildung 5-9](#)

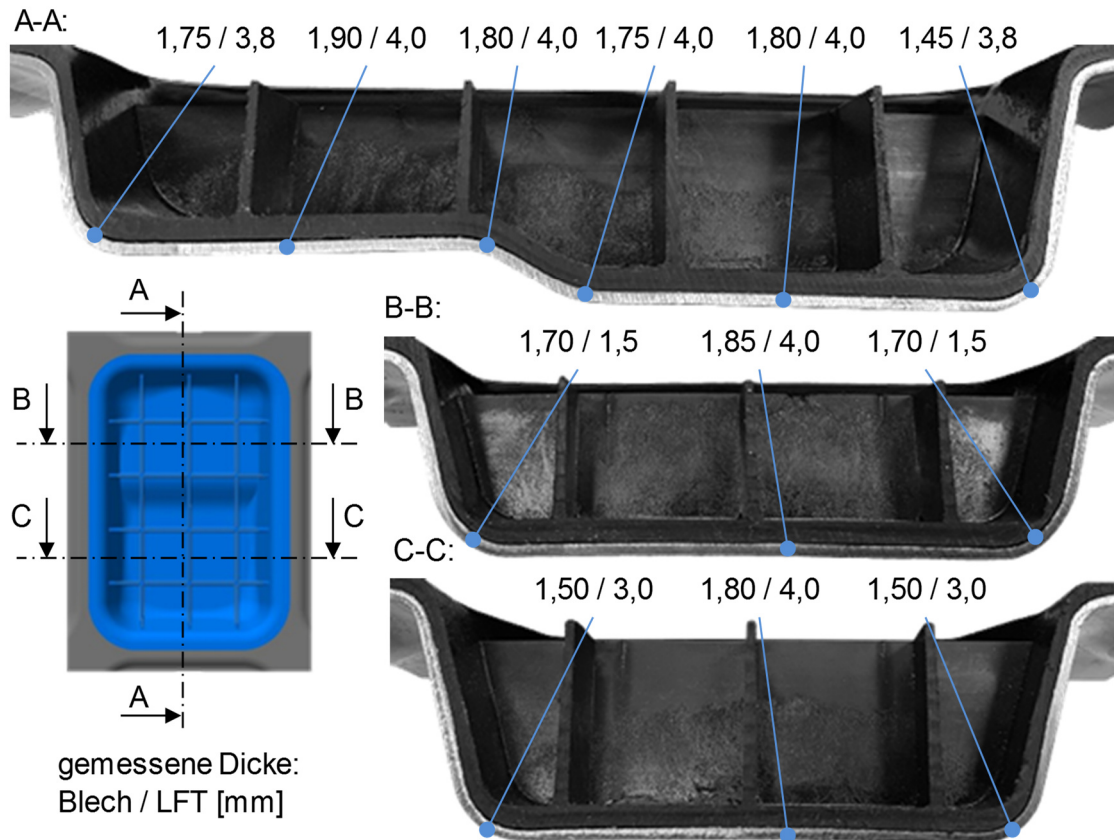


Abbildung 5-9: Schnittansichten der DC04-Wannengeometrie

Im Gegensatz zu den Schnittansichten der DC04-Wannengeometrie zeigen jene des DP600-Stahls in [Abbildung 5-11](#) signifikante Ungleichmäßigkeiten in der LFT-Dickenverteilung. Besonders in den Radien der Schnitte A-A und B-B (siehe blaue Kreise) fehlt LFT, so dass eine reduzierte Ausformung des Blechs an diesen Stellen vorliegt. Gleichzeitig liegt die gemessene LFT-Dicke in den ebenen Bereichen der Wannengeometrie mit 4,8 mm deutlich über der zu erwartenden Solldicke von 3,6-4 mm, da durch die fehlende Ausformung freies Volumen zur Ausbreitung des LFTs fehlt.

Auch dieses Ergebnis kann bereits von der berechneten Geometrieabweichung aus [Abbildung 5-6](#) abgeleitet werden. Ursächlich für die deutlich reduzierte Umformung gegenüber dem DC04-Stahl sind neben der höheren Festigkeit des Stahlwerkstoffs auch die um 25 kN und 70 kN erhöhte Niederhalterkraft in den Stufen 2 und 3 der Umformung (siehe [Tabelle 5-3](#)) und somit ein reduzierter Blecheinzug während der Umformung. Die höhere Niederhalterkraft ist zwar zur Vermeidung von Faltenbildung und einer daraus folgenden Undichtigkeit erforderlich, behindert jedoch das Nachfließen des Blechs in die Kavität und fördert somit dessen Ausdünnung. Die Berechnung der Ausdünnung bzw. Blechdicke in den Schnitten A bis C des DP600-Blechs zeigt das Diagramm in der nachfolgenden [Abbildung 5-11](#).

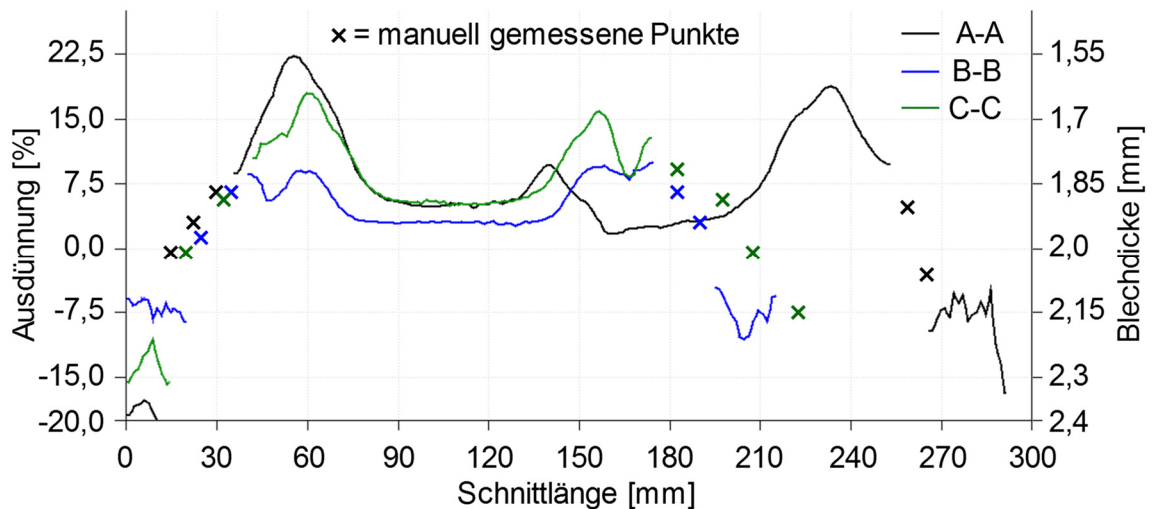


Abbildung 5-10: Berechnete Ausdünnung bzw. Blechdicke der Schnitte aus Abbildung 5-11

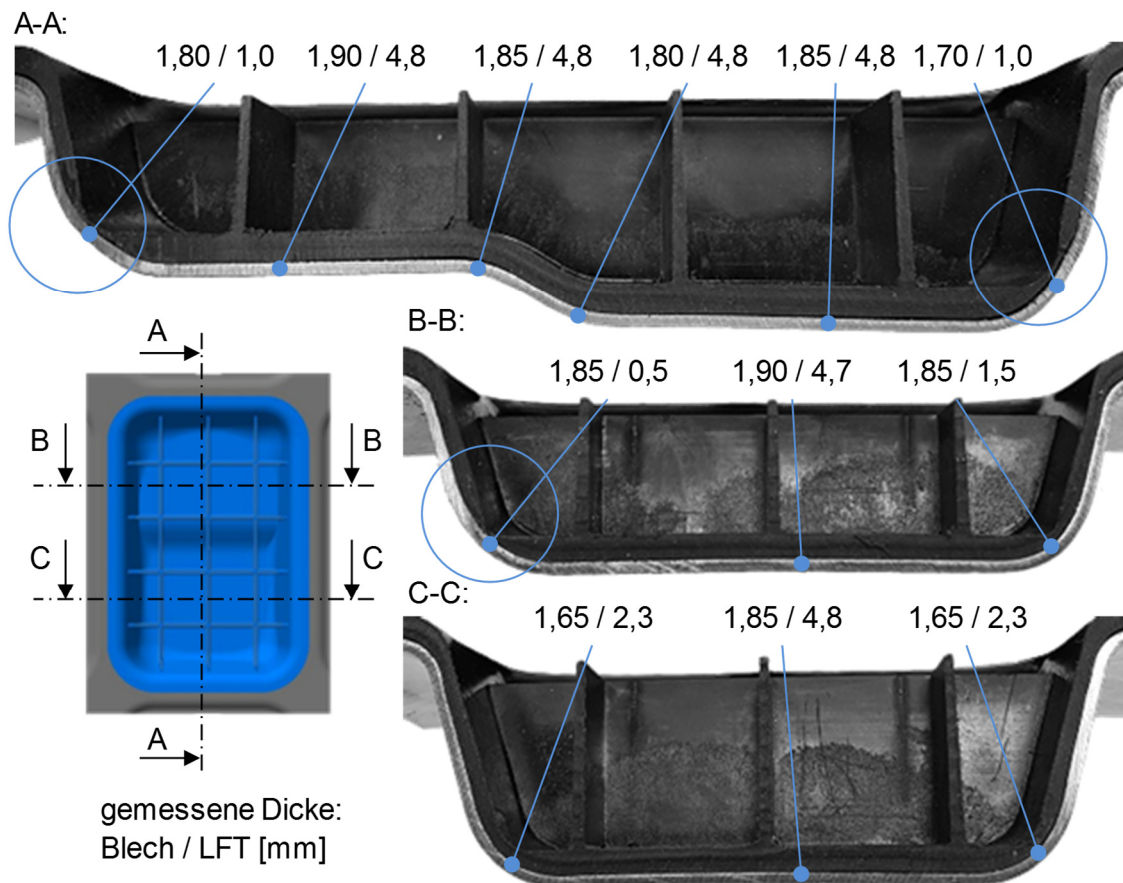


Abbildung 5-11: Schnittansichten der DP600-Wannengeometrie

Die gemessenen Wandstärken der Stahlbleche beider Wannengeometrien bestätigen zudem die nachfolgende und softwaregestützte Analyse der Ausdünnung (Abbildung 5-12). Während die maximale Ausdünnung beim DC04-Stahl in den tiefen Ecken bis zu 40 % beträgt, erreicht diese beim DP600-Stahl trotz fehlender Ausformung immerhin 20 %. Beide Werte befinden sich bereits sehr nah an den jeweiligen Bruchdehnungen der Werkstoffe (siehe Tabelle 3-2), so dass die entwickelte Wannengeometrie eine werkstoffliche Herausforderung für den Umformprozess



darstellt und die finale Ausformung der Eckbereiche durch den LFT-Druck vor allem aufgrund der hohen Streckziehanteile zulasten der Ausdünnung erfolgt.

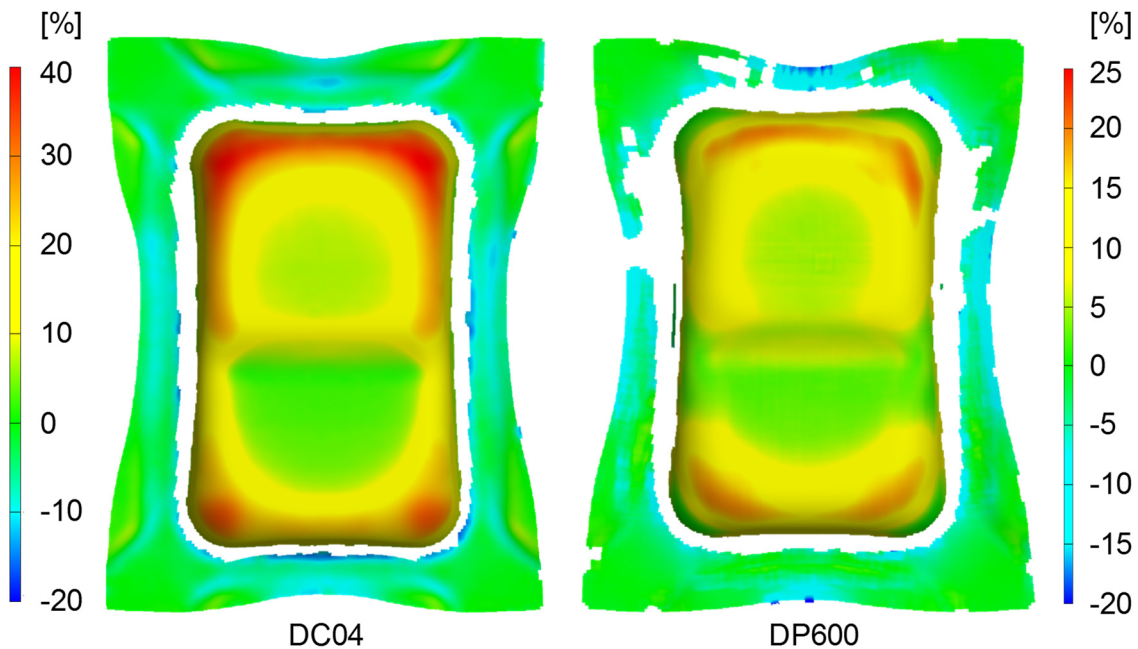


Abbildung 5-12: Vergleich der Ausdünnung von DC04- und DP600-Wannengeometrie

### 5.2.2 Werkstoffliche Beanspruchung

Analog zur Bewertung der U-Profile werden auch die Beanspruchungen der beiden Wannenwerkstoffe nach dem Hybridpressen mithilfe von Grenzformänderungsdiagrammen beurteilt.

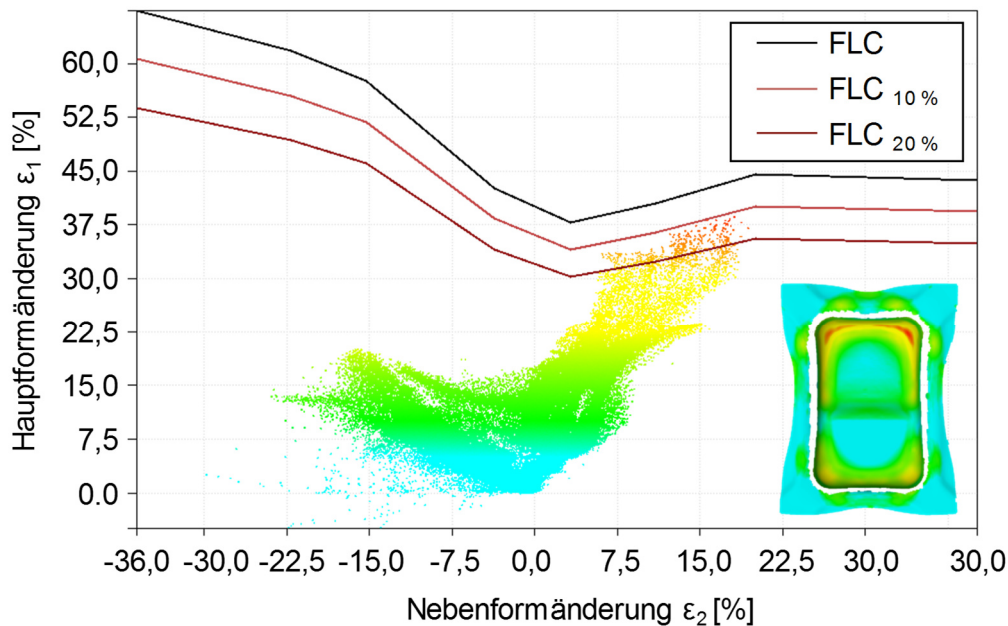


Abbildung 5-13: Grenzformänderungsschaubild für die Wannengeometrie aus DC04-Stahl

Im Gegensatz zur U-Profil-Geometrie, bei dem beide eingesetzten Werkstoffe eine nahezu vollständige Ausformung erzielt haben, kann bei der Wannengeometrie lediglich der DC04-Stahl im

vollständig umgeformten Zustand bewertet werden. Die Punktwolke im Grenzformänderungsdiagramm reicht dabei bis an die 10 %-FLC, wobei die maximal beanspruchten Bereiche in den Ecken des tiefen Wannensplateaus zu finden sind ([Abbildung 5-13](#)). Dies ist plausibel, da der Werkstoff in den Eckbereichen die größte Umformung und gleichzeitig einen hohen Streckziehanteil erfährt. Obwohl noch keine Risse im Bauteil auftreten, ist die Grenze der Werkstoffbelastung bei dieser hohen Ziehtiefe der Wannengeometrie dennoch fast erreicht. Eine leichte Veränderung (Erhöhung) der Niederhalterkraft und ein daraus folgender, verminderter Blecheinzug würde ein direktes Werkstoffversagen in den genannten Bereichen zur Folge haben. Die Eckbereiche des flacheren Plateaus liegen mit Hauptformänderungen um 25 % hingegen im unkritischen Bereich und zudem deutlich unter der 20 %-FLC. In den restlichen Bauteilbereichen besteht somit ein hohes Potenzial für weitere Blechumformungen. Es gilt jedoch auch weiterhin zu beachten, dass die dargestellten FLCs bei Raumtemperatur ermittelt wurden und für das Hybridpressen in ggf. leicht abweichende Kurvenniveaus resultieren können.

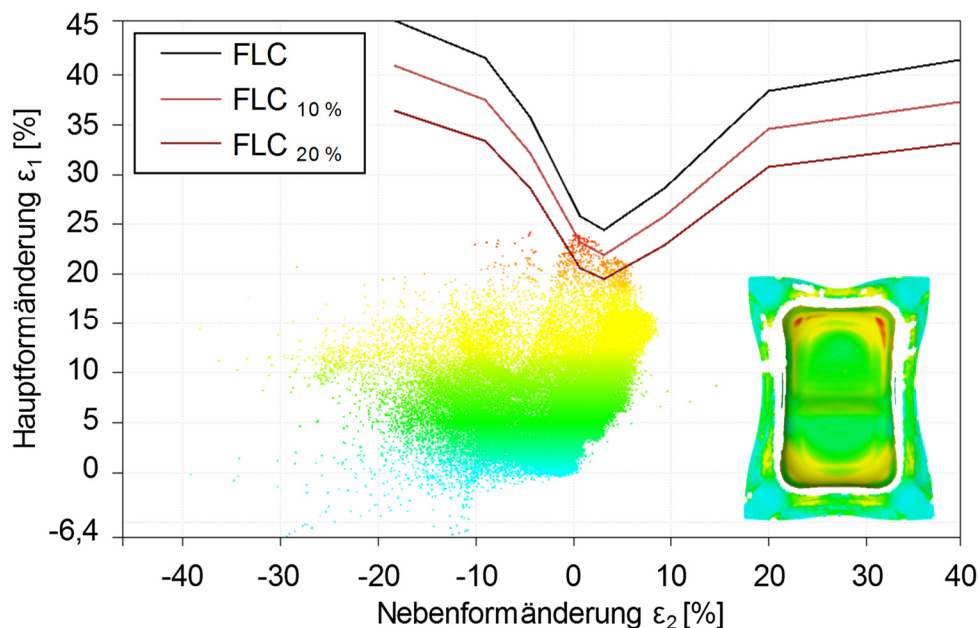


Abbildung 5-14: Grenzformänderungsschaubild für die Wannengeometrie aus DP600-Stahl

Die fehlende Ausformung der Wannengeometrie mit dem DP600-Stahl wurde bereits oben ausreichend thematisiert. Dementsprechend erfolgt an dieser Stelle nur eine Bewertung des resultierenden Umformungszustands. Im DP600-Stahl treten ebenfalls keine Risse auf, was auch anhand des in [Abbildung 5-14](#) dargestellten Grenzformänderungsdiagramms deutlich wird. Aufgrund einer Überschreitung der 10 %-FLC in den kritischen Eckbereichen erscheint es jedoch unwahrscheinlich, dass der Werkstoff bis zu einer vollständigen Umformung rissfrei erhalten bliebe. Obwohl die Wannengeometrie im Voraus für exakt diese Werkstoff-Blechdicken-Kombination (DP600-Stahl mit 2,0 mm Blechdicke) mit Hilfe einer Blechumformsimulation ausgelegt wurde, bestehen durch die kombinierte Umformung mit LFT gegenüber dem klassischen Tiefziehen folgende Einflüsse auf die Umformbarkeit:

1. **Niederhalterkraft:** gegenüber der reinen Blechumformung wird zur Erzielung einer Dichtigkeit gegenüber dem LFT eine deutlich höhere Kraft von bis zu 250 kN benötigt. Während bei reinen Blechumformungen eine Faltenbildung im Ziehbereich und ggf. auch im Beschnittbereich durchaus akzeptiert werden kann, führt diese beim Hybridpressen zwangsläufig zu einer Undichtigkeit und somit zu einem Prozessversagen.

2. Streckziehanteil: gegen Prozessende erfolgt beim Hybridpressen die finale Blechausformung durch ein Streckziehen, da zu diesem Zeitpunkt aufgrund der hohen Niederhalterkraft kein Nachfließen des Blechs in die Kavität mehr möglich ist. Die weitere Werkstoffdehnung kann daher nur aus der Blechdicke erfolgen und führt automatisch zu Ausdünnung.
3. Reibeffekte: gegenüber der reinen Blechumformung mit einem Stahl-Stahl-Kontakt zwischen Blech und Stempel liegen beim Hybridpressen geänderte Reibbedingungen vor, die einen zusätzlichen Einfluss auf die Umformung haben können. Während der gesamten Umformung existiert zumindest eine dünne LFT-Schicht zwischen Blech und Stempel. Nicht abschließend geklärt werden kann an dieser Stelle der Einfluss des schmelzförmigen LFTs bzw. dessen Fließverhalten auf die Blechumformung. Denkbar ist neben einem positiven Einfluss durch verminderte Reibung zwischen Stempel und Blech auch eine Behinderung des Blecheinzugs durch einen entgegengerichteten LFT-Fluss während der zu Prozessbeginn stattfindenden Verdrängung des LFTs (vgl. Abbildung 4-23). Auch eine Überlagerung und somit gegenseitige Auslöschung von beiden Effekten ist denkbar.

Aus den Punkten 1.-3. wird deutlich, dass eine Auslegung für den reinen Tiefziehprozess nicht ausreicht, um eine Geometrie für das Hybridpressen hinreichend genau zu bestimmen. Somit ist für zukünftige Weiterentwicklungen eine Prozesssimulation unabdingbar.

Dennoch wird anhand von U-Profil und Wannengeometrie aufgezeigt, dass die Grundidee des Verfahrens Hybridpressen, eine kombinierte Umformung von Metallblechen mit langfaserverstärkten Thermoplasten, sowohl für offene als auch geschlossene Profile funktioniert und sogar hochfeste Stahlbleche mit einer Blechdicke von 2,0 mm bei entsprechender Prozessführung und Werkzeugauslegung alleine durch den vorherrschenden Kunststoffdruck umgeformt werden können. Dabei werden LFT-Drücke von mehr als 1.000 bar erreicht und prozesssicher appliziert. Diese Erkenntnis geht deutlich über den bisherigen Stand der Technik hinaus und kann auch wegweisend für andere Verfahren mit wirkmedienbasierter Umformung sein.

## 6 Verbindungseigenschaften des Haftvermittlers

Bei der gemeinsamen Verwendung verschiedener Werkstoffe in einer Hybridbauweise bzw. einem Hybridbauteil muss die Fügetechnik den Anforderungen an eine dauerhafte Verbindung bei gleichzeitig hoher Versagensfestigkeit gerecht werden. Sowohl zur Berücksichtigung während der Bauteilauslegung als auch bei der Ermittlung der optimalen Prozessparameter des Verfahrens sind Kenntnisse über die maximal erzielbaren Festigkeiten erforderlich. Im Rahmen dieser Arbeit wird ein Haftvermittlersystem auf Copolyamid-Basis (siehe Kap. 3.3.3) als Pulverbeschichtung auf den Stahlblechen eingesetzt und dessen Verbindungseigenschaften nachfolgend untersucht. Dabei ist es das Ziel, die im Stand der Technik genannten Festigkeitswerte anderer Prozesse zu erreichen und optimale Prozessparameter zur Maximierung der Festigkeit zu ermitteln.

### 6.1 Zugversuche

Die Verbindung von LFT und Stahl mit Hilfe des eingesetzten Haftvermittlers wird anhand von zwei Probekörpern und drei Lastfällen bewertet. Aufgrund der Tatsache, dass die Verbindung zwischen LFT und dem Stahlblech beim Hybridpressen unter Einfluss der Schmelztemperatur, der Vorwärmung des Stahlblechs und des Prozessdrucks erfolgt, muss jede Probe in einem eigenen Werkzeug und durch einen realen LFT-Pressvorgang gefertigt werden. Da die verwendeten Probekörper nur ebene Bleche enthalten, findet bei der Probenherstellung keine Blechumformung und somit kein Hybridpressen im eigentlichen Sinn statt. Die Abdichtung des Werkzeugs erfolgt daher über eine auf Schraubenfedern abgestützte Zwischenplatte, die lediglich einen Ausschnitt für den Stempel aufweist. Durch Variation der LFT-Einlegemenge ist die LFT-Probendicke in einem Bereich von 3,5-5,0 mm einstellbar – 36 g PA6-LGF40 führen dabei zu einer LFT-Dicke von 4,8 mm.

Die Herstellungsparameter der nachfolgenden Probekörper entsprechen der Parametervariante P2 aus Tabelle 6-2. Die Durchführung der Zugprüfungen erfolgt frühestens 24 Stunden nach Herstellung und Lagerung unter Normalbedingungen, um ggf. vorhandene Einflüsse des „spritzfrischen Zustands“ auf die Verbundfestigkeit auszuschließen [52]. Eine separate Trocknung der Proben vor den Zugprüfungen erfolgt nicht.

#### 6.1.1 Scherzug-Versuch

Die verwendete Scherzugprobe (Abbildung 6-1) orientiert sich an der Probengeometrie nach DIN EN 1465 [97] für die Zugprüfung einseitig überlappter Klebeverbindungen. Die Breite der Probe wird jedoch auf 50 mm verdoppelt, um die eingesetzte LFT-Menge zu erhöhen und somit einer zu starken Abkühlung des Materials vor dem Verpressen entgegen zu wirken. Dadurch wächst die Überlappungsfläche gegenüber der Angabe in der oben genannten Norm ebenfalls um einen Faktor 2 auf 625 mm<sup>2</sup>. Gleichzeitig muss das Stahlblech als Fügepartner etwas breiter ausgeführt sein, um eine Dichtfläche zur Begrenzung des LFTs zu erhalten und somit ein Umlaufen des Blechs durch den LFT zu verhindern.

Für die Fertigung der Probekörper werden sowohl der LFT mittels Infrarotstrahlung auf 270 °C als auch das mit Haftvermittler beschichtete Metallblech mit Hilfe einer Kontaktheizplatte auf 220 °C erwärmt und manuell in das Presswerkzeug eingelegt. Dabei wird der LFT zunächst vom Blech entfernt positioniert, so dass während des Fließpressens heiße Schmelze aus dem Inneren des Extrudats in Kontakt mit dem Haftvermittler kommen kann und nicht jene Bereiche, die außen bereits durch Luft- und Werkzeugkontakt abgekühlt sind.

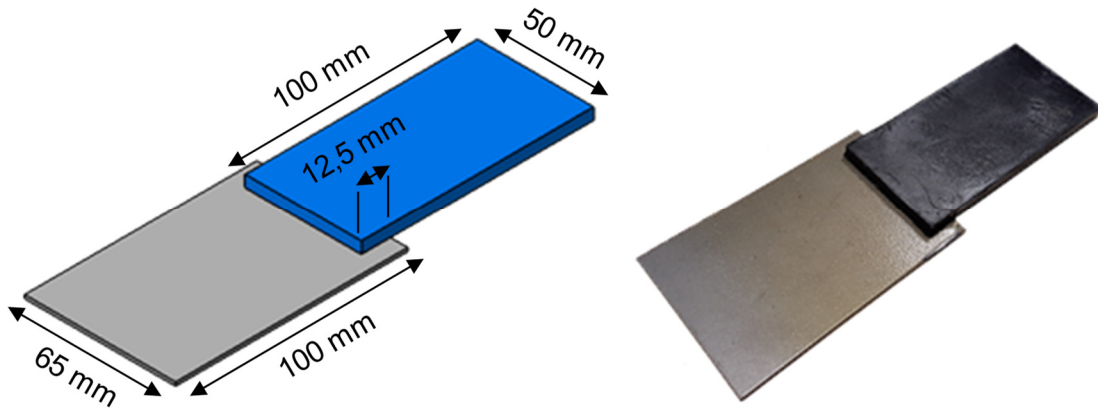


Abbildung 6-1: Abmessungen der Scherzugprobe und eine gepresste Probe

Die Durchführung der Zugversuche erfolgt quasi-statisch an einer Zugprüfmaschine des Typs Zwick Z100 mit einer Prüfgeschwindigkeit von 2 mm/min. Die Messung der Verschiebung erfolgt mit Hilfe des ARAMIS-Systems von GOM auf der Probenrückseite, da hier nur ein Versatz zwischen LFT und Stahlblech in Höhe der Blechdicke von 1,5 mm vorliegt. Das ARAMIS-System nutzt das Prinzip der digitalen Bildkorrelation (DIC) / Grauwertkorrelation anhand eines regellos aufgetragenen, schwarzen Punktmusters auf einer weißen Grundierung, um z.B. die Verschiebung von zwei beliebigen Punkten zueinander während der Zugprüfung zu ermitteln. In der nachfolgenden Tabelle 6-1 sind die dabei verwendeten GOM-Messparameter aufgelistet:

<b>Facettengröße:</b>	12 Pixel
<b>Punktabstand:</b>	6 Pixel
<b>Abtastrate:</b>	1 Hz
<b>Dehnungsreferenzlänge:</b>	0,3239 mm

Tabelle 6-1: GOM-Messparameter für die Scher- und Kopfzugprüfung

Abbildung 6-2 zeigt das Kraft-Weg-Diagramm der Scherzugprüfung anhand von fünf Proben:

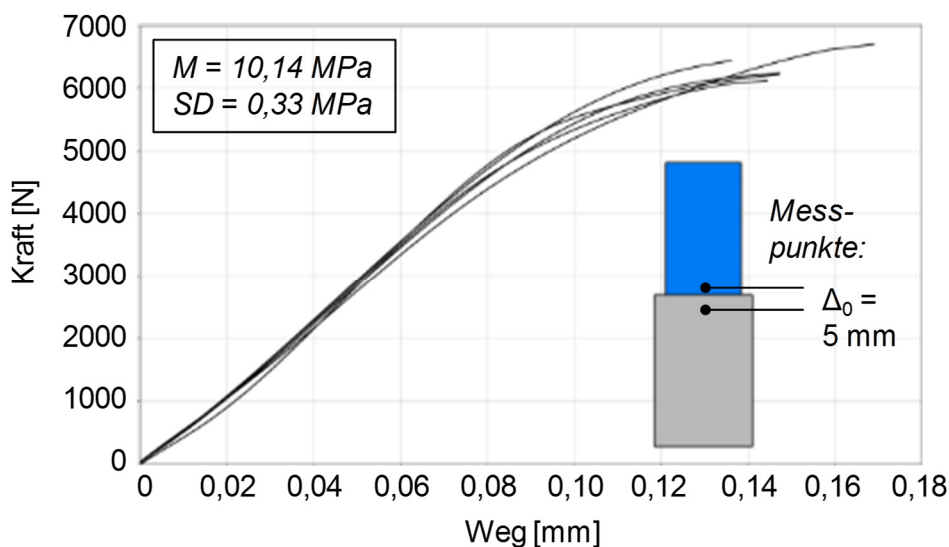


Abbildung 6-2: Kraft-Weg-Verläufe der Scherzugprüfung

Im Ergebnis erzielt die Verbindung eine mittlere Scherzugfestigkeit von 10,14 MPa bei einer nur geringen Standardabweichung von 0,33 MPa und somit hoher Reproduzierbarkeit. Aufgrund der asymmetrischen Probeneinspannung und dem daraus resultierenden Biegemoment um die Verbindungsfläche kann während der Prüfung ein für Scherzugprüfungen typischer „S-Schlag“ beobachtet werden. Somit liegen neben einer Scherbeanspruchung auch Normalspannungsanteile vor, die als erstes zu einem Versagen der Probe am Ende des LFTs führen.

### 6.1.2 Kopfzug-Versuch

Neben der Scherzugprüfung zur Ermittlung der Scherzugfestigkeit stellt die Kopfzugprüfung eine Möglichkeit zur Bewertung der senkrecht zur Blechebene gerichteten Belastungsrichtung (Normalrichtung) dar. Bei der Geometrie der Kopfzugprobe handelt es sich um eine Eigenentwicklung, die sich von der LFT-Geometrie her an der Scherzugprobe orientiert und zudem das gleiche Werkzeug nutzt. Zur vertikalen Fixierung des Blechs werden lediglich zwei unterschiedliche Werkzeugeinsätze benötigt. Eine Besonderheit stellen dabei umlaufende Fasen ( $2 \times 30^\circ$ ) in den Werkzeugeinsätze am Einlegespalt für das Blech dar, die zur vereinfachten Blecheinlage unabdingbar sind und somit auch an der gepressten Kopfzugprobe erhalten bleiben.

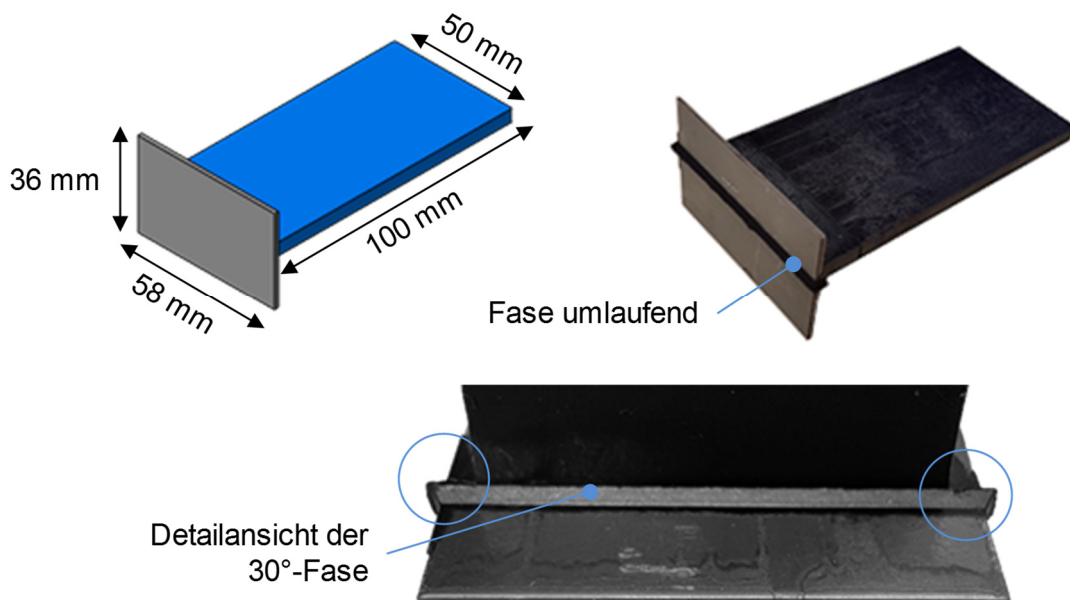


Abbildung 6-3: Abmessungen der Kopfzugprobe, hergestellte Probe und Fasen-Detail

Durch die Fasen erhöht sich die geometrische Kontaktfläche zwischen Stahlblech und LFT von ursprünglich 250 auf 450 mm<sup>2</sup>. Auf eine nachträgliche mechanische Entfernung der Fasen wird verzichtet, um die Verbindungszone und den Haftvermittler weder thermisch noch durch Vibrationen zu beeinflussen oder sogar zu schädigen. Lediglich die seitlichen Bereiche (blaue Kreise in [Abbildung 6-3](#)) neben dem LFT und außerhalb der Verbindungszone sowie auf der Probenrückseite werden mechanisch entfernt.

Das Ergebnis der Zugprüfung ([Abbildung 6-4](#)) zeigt anhand von fünf Proben eine mittlere Kopfzugfestigkeit von 11,08 MPa bei etwas höherer Streuung im Vergleich zur Scherzugprüfung (Standardabweichung 1,43 MPa) bezogen auf die Gesamtkontaktfläche von 450 mm<sup>2</sup>. Der flache Kurvenverlauf zu Beginn der Zugprüfung ist auf Setzeffekte innerhalb der Einspannung zurückzuführen.



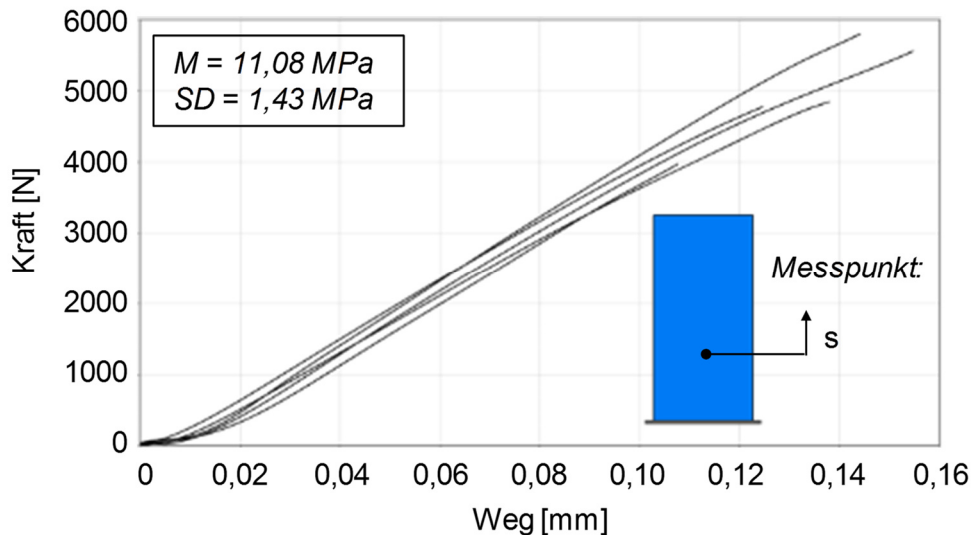


Abbildung 6-4: Kraft-Weg-Verläufe der Kopfzugprüfung

Durch den Einfluss der Fasen liegt auch bei dieser Prüfung kein homogener Spannungsverlauf vor, so dass die bereinigte Kopfzugfestigkeit deutlich höhere Werte aufweisen sollte. DRUMMER ET AL. [50] haben die Einflüsse von Fasen und Radien an Rippenfüßen auf die Verbundfestigkeiten an hybriden Prüfkörpern untersucht und kommen zu folgendem Ergebnis: bei Verwendung einer Fase oder eines Radius verringert sich die errechnete Versagensspannung auf 56 % im Vergleich zu einer stumpfen Anbindung. Besonders drastisch ist der Verlust der Versagensspannung bei ebenfalls stumpfer Anbindung aber doppelter Probendicke (33 % bei gleicher Fläche). Begründet wird diese Differenz mit dem Schwindungsverhalten des Kunststoffes und einer entstehenden thermischen Spannungsüberlagerung in der Fügefläche. Beide Ergebnisse lassen darauf schließen, dass bei Verwendung eines stumpfen Probenübergangs und dünneren Proben deutlich höhere Festigkeiten zu erzielen sind.

### 6.1.3 Schälzug-Versuch

Zur Bewertung der Festigkeit einer Verbindung zwischen reiner Scher- und Kopfzugbeanspruchung in 0°- und 90°-Richtung werden häufig auch die Zwischenwerte 30° und 60° überprüft. Bei der dazu standardmäßig eingesetzten Probenform handelt es sich zum Beispiel um eine sogenannte „KS2-Probe“, die jedoch nicht durch einen Fließpressprozess für die Verbindung von Stahlblech und LFT herzustellen ist. Daher wird die bereits vorhandene Scherzugprobe durch Konstruktion und Fertigung einer entsprechenden Prüfvorrichtung mit einer Schälbeanspruchung belastet. Dazu wird die Scherzugprobe auf der Blechseite beidseitig eingespannt und der LFT durch einen Bolzen, der über zwei Gewindestangen fest mit einer Ziehplatte verbunden ist, durch Verfahren der Zugprüfmaschine in der Theorie langsam nach oben abgeschält (siehe [Abbildung 6-5](#)).

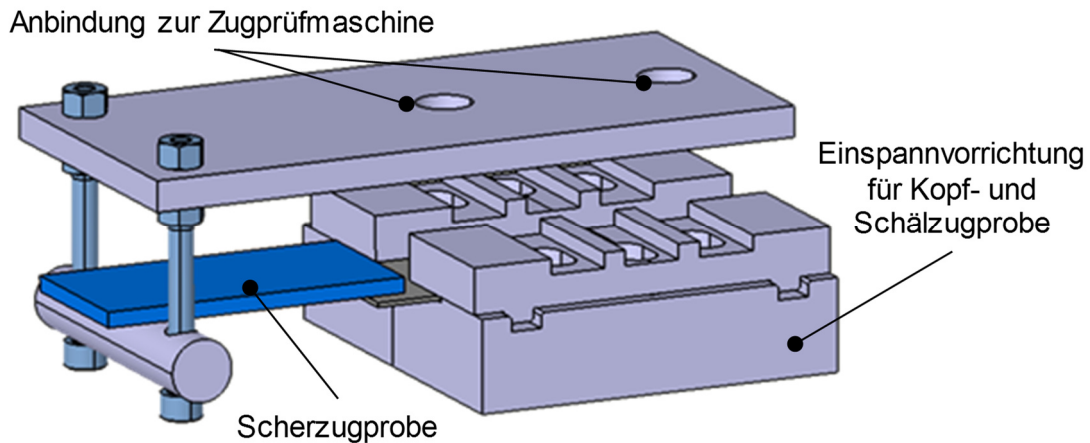


Abbildung 6-5: Prüfvorrichtung für die Schälzugprüfung mit der Scherzugprobe

Das erzielte Kraftniveau zeigt anhand von ebenfalls fünf gemessenen Proben eine vergleichsweise geringe Versagenskraft von 166,56 N als Mittelwert bei einer Standardabweichung von 8,89 N. Die Wegmessung erfolgt bei dieser Probenform über die Traverse der Zugprüfmaschine, da die Zugänglichkeit für ein optisches Messsystem infolge der Einspannung nicht ausreicht. Aufgrund des geringen Kraftniveaus können Messfehler in der Kraftmessung durch Aufbauelastizitäten nahezu ausgeschlossen werden. Die spitzförmigen Kraftabfälle in den dargestellten Kurvenverläufen ([Abbildung 6-6](#)) können mit einem Rutschen des Bolzens bei fortschreitender Biegung des LFTs begründet werden. Des Weiteren verdeutlichen die Kurvenverläufe auch, dass bei dieser Probenform kein langsames Abschälen, sondern lediglich ein abruptes Versagen vorliegt. Eine Aussage über die exakte Rissfortschrittskraft ist somit nicht möglich. Normalerweise werden Schälzugfestigkeiten in der Einheit Newton pro Millimeter Rissfortschritt angegeben. REINCKE ET AL. [98] haben als Vergleichswert mit dem identischen Haftvermittler bei der Applikation von kohlenstofffaserverstärkten PA6-Tapes auf Stahlblechen mit Hilfe eines Walzprozesses Schälzugfestigkeiten von bis zu 1,85 (+/- 0,3) N/mm erzielt.

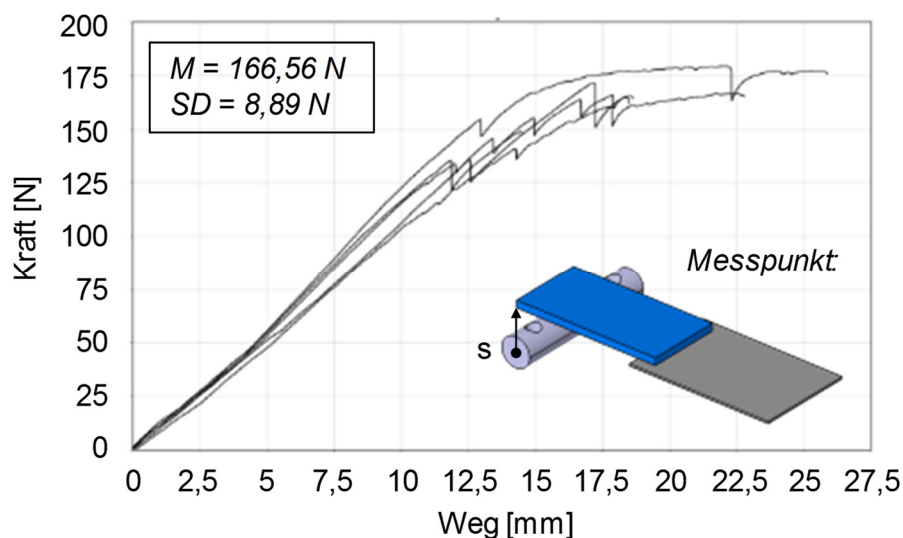


Abbildung 6-6: Kraft-Weg-Verläufe der Schälzugprüfung



## 6.2 Einflüsse auf die Verbindungseigenschaften

In umfangreichen Messungen werden verschiedene Einflüsse auf die Verbindungseigenschaften untersucht. Aus anderen Arbeiten sind bereits grundlegende Einflüsse von Vortemperatur, Nachdruck und Warmauslagerung bekannt [52] [73]. Da diese Untersuchungen jedoch auf Basis des Spritzgießens erfolgt sind, wird eine eigene Parameterstudie für das Hybridpressen anhand der Scherzugprobe durchgeführt. Bei den nachfolgend aufgeführten Parametern handelt es sich bereits um eine Auswahl aus einer Vielzahl von Versuchsparametern, die sich durch hohe Festigkeiten im Bereich des Zielwerts von >10 MPa auszeichnen.

Parameter	Presskraft [kN] / Druck [bar]	Menge LFT [g]	T <sub>Stahl, soll</sub> [°C]	Sonstiges
P1	250 / 500	33	220	-
P2	500 / 1.000	33	220	-
P3	500 / 1.000	26	220	Warmauslagerung bei 90 °C für 90 Minuten
P4	500 / 1.000	33	220	Warmauslagerung bei 90 °C für 90 Minuten
P5	500 / 1.000	33	180	Warmauslagerung bei 90 °C für 90 Minuten
P6	500 / 1.000	33	220	Vortrocknung des PA6 für 12 h bei 80 °C

Tabelle 6-2: Übersicht der untersuchten Pressparameter

Die Wahl der Parameter erfolgt teilweise nach den Empfehlungen im Hersteller-Patent [94]:

*„Das Metall mit der applizierten Haftvermittler-Zusammensetzung wird thermisch vernetzt bzw. getrocknet, wobei Temperaturen von 120 °C bis 240 °C, vorzugsweise 150 °C bis 225 °C, bevorzugt 175 °C bis 200 °C, für einen Zeitraum von 0,5 min bis 20 min, vorzugsweise von 1 min bis 10 min, bevorzugt 3 min bis 8 min, vorteilhaft sind.“*

*„Anschließend kann die Kombination aus Metall und Kunststoff für 2 min bis 90 min, vorzugsweise 5 min bis 60 min, bei 150 °C bis 230 °C zur Steigerung von Verbundhaftung und Vernetzungsgrad einer Wärmebehandlung unterzogen werden. Hierdurch wird ein stoffschlüssiger Verbund des Kunststoffs zum Metall erreicht.“*

Die Erwärmung der Stahlbleche mit Haftvermittler erfolgt auf einer Kontaktheizplatte (300 °C), wobei die aktuelle Temperatur parallel auf einem unbeschichteten Stahlblech per Kontakt-Thermometer gemessen wird. Die resultierenden Aufheizzeiten liegen im Bereich von ca. 3 Minuten. Nicht variiert werden die Werkzeugtemperatur von 75 °C durch Wassertemperatur und die Haltezeit bzw. Abkühldauer von 60 Sekunden unter Aufrechterhaltung des Pressdrucks im Werkzeug. Nach der Entnahme aus dem Werkzeug werden die Proben zur weiteren Abkühlung auf Raumtemperatur (RT) unter einem Quader aus Stahl (ca. 5 kg) gelagert, um einem Torsionsverzug des LFTs entgegenzuwirken. Dieser kann bei freier Abkühlung an Luft beobachtet werden und verhindert eine spannungsfreie Einspannung der Proben in der Zugmaschine. Aus diesem Grund wird auch die Warmauslagerung im Ofen auf eine Temperatur von 90 °C limitiert und ebenfalls unter Zuhilfenahme einer Beschwerung durchgeführt. Bei Warmauslagerungsversuchen mit 180 °C Ofentemperatur erfolgt bereits eine Ablösung von LFT und Blech im Ofen.

### 6.2.1 Verbindungsfestigkeit

Das nachfolgende Diagramm zeigt die Ergebnisse der erzielten Scherfestigkeiten nach den oben genannten Prozessparametern P1-P6:

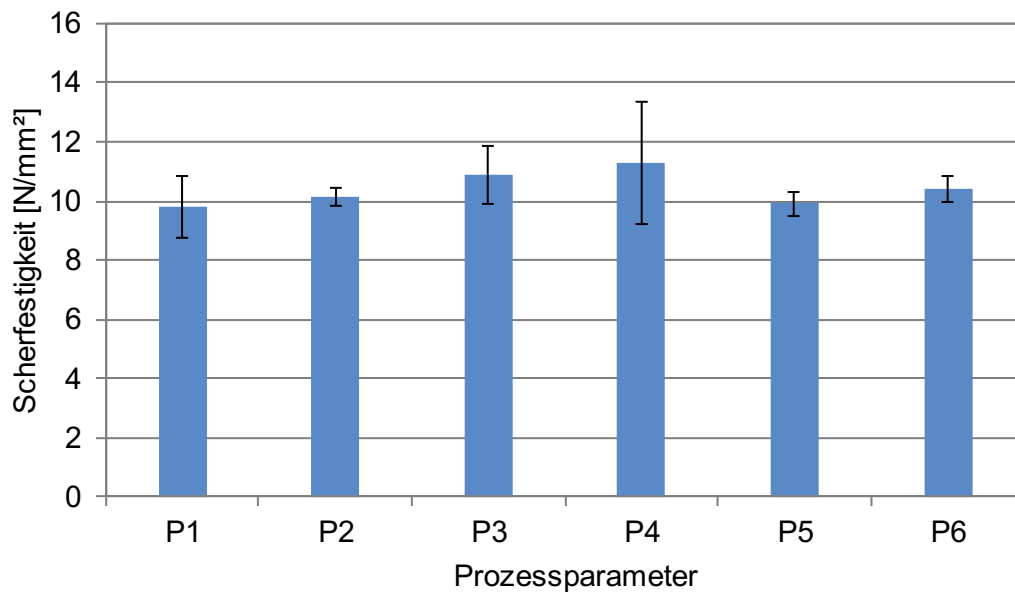


Abbildung 6-7: Übersicht über die ermittelten Scherzugfestigkeiten nach Prozessparametern

Insgesamt liegen die Mittelwerte aller Parameter zwischen 9,79 MPa (P1) und 11,29 MPa (P4) und somit nahezu vollständig über dem Zielwert für die zu erreichende Festigkeit. Die höchste Festigkeit (13,4 MPa) wird mit einer Scherzugprobe des Parameters P4 durch eine hohe Blechtemperatur und anschließende Warmauslagerung erzielt. Gleichzeitig ist hierbei jedoch auch die Standardabweichung mit einem Wert von 2,07 am höchsten. Der Einfluss der Presskraft (P1 vs. P2) ist nicht signifikant, hat jedoch eine Verkleinerung der Standardabweichung zur Folge und wird somit für alle nachfolgenden Parameter eingesetzt. Zur Erzielung einer stoffschlüssigen Verbindung ist laut den übermittelten Herstellerangaben lediglich ein Mindestdruck von ca. 200 bar erforderlich – dieser wird bereits mit einer Presskraft von 250 kN im LFT deutlich überschritten. Die Einflüsse einer reduzierten LFT-Einlegemenge und somit reduzierter Probendicke (P3) sowie einer extra langen Vortrocknung des Polyamids bei gleichzeitig hoher Blechtemperatur (P6) können als gering bewertet werden. Die Warmauslagerung bei 90 °C hat einen Anstieg der durchschnittlichen Scherfestigkeit von etwa 13 % zur Folge (P2 vs. P4).

### 6.2.2 Mikroskopie

In der mikroskopischen Analyse der Verbindungsfläche Stahl-Haftvermittler-LFT zeigt sich der Vorteil eines Haftvermittlers auf Copolyamid-Basis gegenüber anderen Klebstoffen: zwischen der Haftvermittlerschicht und dem LFT kann eine stoffschlüssige Verbindung über das Polymer entstehen. In der nachfolgenden [Abbildung 6-8](#) sind die durchtrennten Glasfasern in den Schliffebenen deutlich als schwarze Punkte zu erkennen, wodurch eine sichere Unterscheidung zur Haftvermittlerschicht möglich wird. Bei den Darstellungen handelt es sich um Schnittansichten durch den ebenen Zargenbereich (a) sowie den Radius (b) des U-Profiles aus Kap. 4.1. Während in der Verbindungszone der Zarge keinerlei Lufteinschlüsse oder Fehlstellen zu erkennen sind und die Dicke der Haftvermittlerschicht ca. 100 µm beträgt, wird im Bereich des Radius eine Ablösung des LFTs vom Haftvermittler sichtbar. Da diese Ablösung lediglich im

Bereich des Radius mit deutlich dickerer LFT-Schicht auftritt, wird die Schwindung des LFTs während der Abkühlung als Ursache identifiziert.

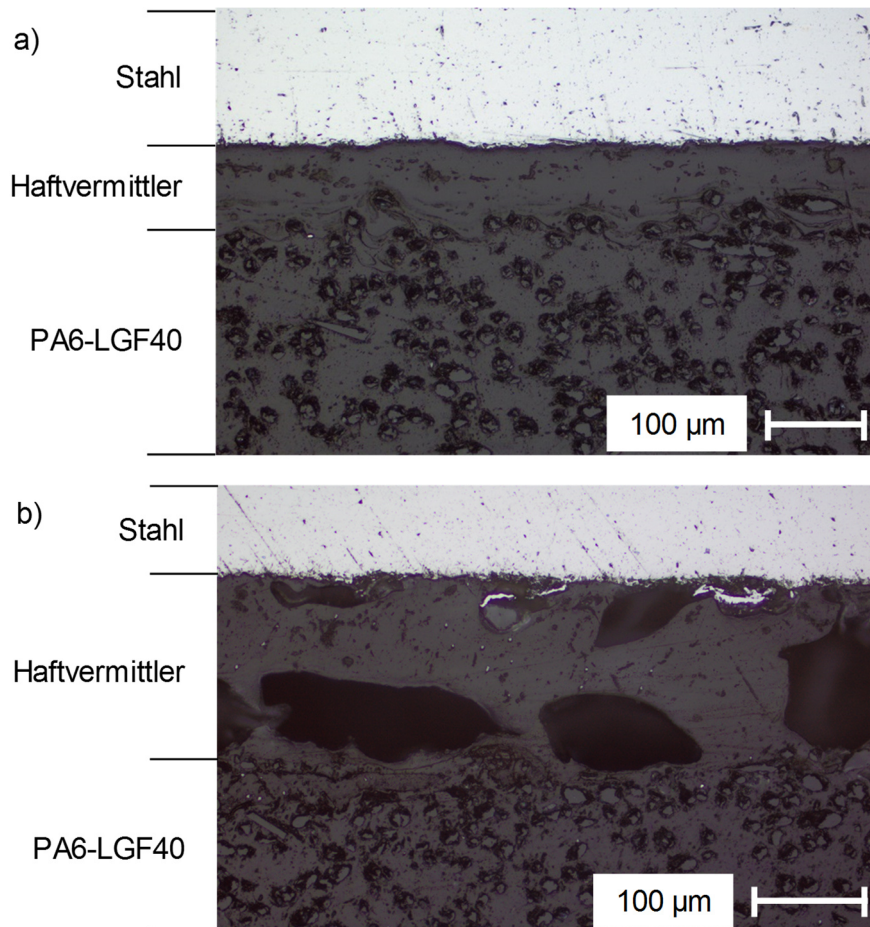


Abbildung 6-8: Mikroskopische Ansicht der Verbindungszone Stahl-Haftvermittler-LFT aus dem Zargenbereich (a) und Radius (b) des U-Profiles

Auch die nachfolgende Schnittansicht einer ungezogenen Scherzugprobe (Herstellparameter P6) zeigt eine deutliche Ablösung des LFTs vom Haftvermittler bzw. Luftschlüsse in der Verbindungszone, erreicht aber dennoch eine ausreichend hohe Scherfestigkeit von über 10 MPa.

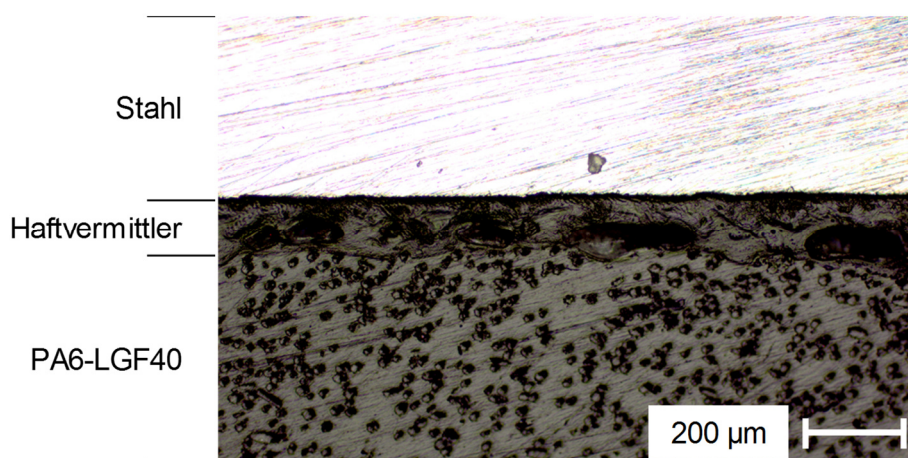


Abbildung 6-9: Mikroskopische Ansicht der Verbindungszone Stahl-Haftvermittler-LFT aus einer ungezogenen Scherzugprobe (Herstellparameter P6)

Die Ursache für die Lufteinschlüsse in der Scherzugprobe kann an dieser Stelle nicht abschließend geklärt werden. Da diese Art von Fehler jedoch nur in der Scherzugprobe mit vergleichsweise hoher LFT-Dicke (4,8 mm) sowie in den Ecken des U-Profils (Variante 1) mit erhöhter LFT-Dicke im Vergleich zu den ebenen Bereichen auftritt, liegt es nahe, dass es sich ebenfalls um einen Effekt der volumetrischen Schwindung des LFTs handelt. Des Weiteren liegt die gemessene Wärmeausdehnung des verwendeten LFTs im Temperaturbereich von 20-130 °C bei  $138,8 \times 10^{-6} \text{ 1/K}$  und somit um mehr als eine Zehnerpotenz über der Wärmeausdehnung von Stahl (ca.  $12 \times 10^{-6} \text{ 1/K}$ ). Ein ähnlicher Effekt wurde zudem bisher in keiner themenverwandten Literatur beschrieben, da diese hohen Kunststoffdicken z.B. im Spritzgießverfahren u.a. aufgrund von langen Kühlzeiten nicht zum Einsatz kommen.

Während der Erwärmung der beschichteten Bleche vor dem Hybridpressen wird mit einer leichten Braunfärbung des Haftvermittlers ab ca. 150 °C ein weiteres Phänomen beobachtet, welches Einfluss auf die Verbindungseigenschaften haben kann und dessen Auftreten auch bereits von REINCKE ET AL. [98] ausführlich beschrieben wurde. Mit zunehmender Braunfärbung entsteht zeitgleich eine Blasenbildung auf der Haftvermittleroberfläche, die eine weitere Erklärung für die ungleichmäßige Anbindung von Haftvermittler und LFT sowie für die Luft- oder Gaseinschlüsse darstellen kann. Da das Phänomen auch bei getrockneten Blechen mit Haftvermittlerbeschichtung auftritt, wird lediglich eine Phasenänderung von im Haftvermittler gebundenem Wasser als Ursache ausgeschlossen.

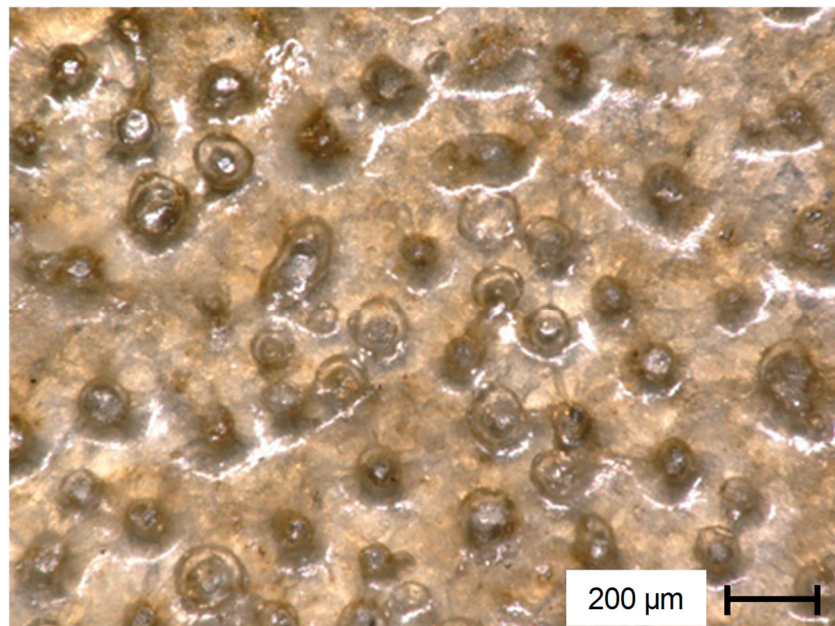


Abbildung 6-10: Zunehmende Braunfärbung und Blasenbildung auf der Oberfläche und in der Haftvermittlerschicht bei Erwärmung über 150 °C

Die sichtbaren Blasen haben einen Durchmesser von bis zu 0,2 mm und treten sehr regelmäßig verteilt und in augenscheinlich unterschiedlichen Schichten des Haftvermittlers auf. Einige befinden sich direkt an der Oberfläche und hinterlassen nach dem Aufplatzen kleine Krater, andere wiederum verbleiben im Inneren an der Anbindung zum Stahlblech (siehe [Abbildung 6-10](#)). Ein Einfluss der Blasenbildung auf die Verbindungseigenschaften kann daher nicht gänzlich ausgeschlossen werden.

Mit Hilfe der sogenannten „Relief-Ansicht“ eines Digital-Mikroskops ([Abbildung 6-11](#)) wird die Schichtdickenverteilung der Haftvermittlerschicht noch einmal verdeutlicht. Die Variabilität liegt



einerseits in der Blasenbildung begründet, andererseits aber auch im händischen Auftragen des Haftvermittlers während der Beschichtung. Bei dem gewählten Oberflächenausschnitt handelt es sich um die identische Stelle wie in [Abbildung 6-10](#), lediglich die Ansicht erfolgt aus einem nicht orthogonalen Blickwinkel.

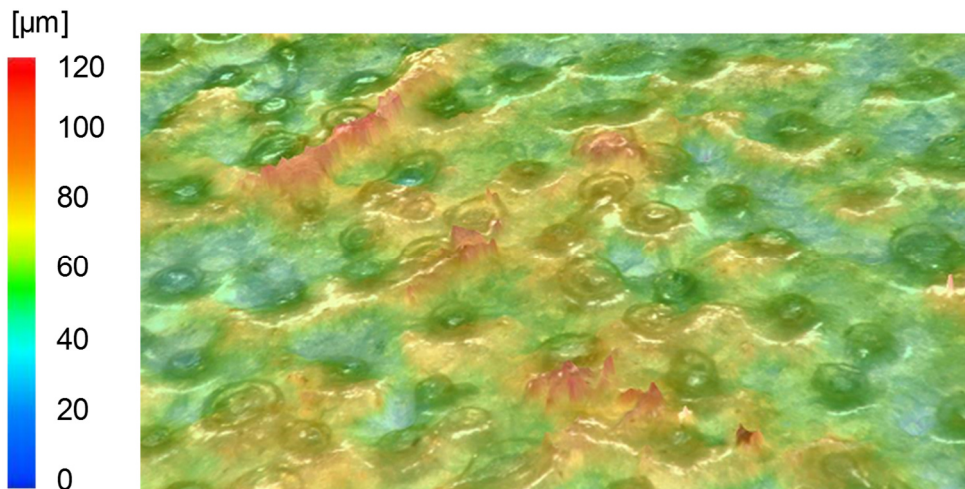


Abbildung 6-11: Relief-Ansicht der Haftvermittlerschicht mit Blasenbildung  
(150-fache Vergrößerung)

Zusammenfassend zeigen die ermittelten Verbindungseigenschaften, dass der gewählte Haftvermittler aufgrund seiner Eignung für den Umformprozess und der zu erzielenden Festigkeiten von über 10 MPa insgesamt eine gute Wahl für das Verfahren Hybridpressen darstellt. Die beschriebenen Fehlstellen treten nur an Stellen mit einer LFT-Werkstoffdicke  $>4$  mm auf, so dass bei der späteren Bauteilauslegung LFT-Anhäufungen in dieser Größenordnung (z.B. in Rippenfüßen) vermieden werden sollten. In allen ebenen Bauteilbereichen mit geringer LFT-Dicke gewährleistet die vollflächige Anbindung des LFTs eine zuverlässige Verbindung zwischen Stahlblech und LFT.

## 7 Methodenentwicklung zur BauteilAuslegung mittels FEM

Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte FEM-Optimierungsmethode nutzt den FE-Solver OptiStruct aus dem Softwarepaket HyperWorks (v14) von Altair und eignet sich für die „Metall-FVK-Hybridisierung“ eines bereits bestehenden Stahlbauteils durch Anwendung des Hybridpressens als Fertigungsverfahren. Damit kann die Blechdicke des Originalbauteils erheblich reduziert werden und die belastungsgerecht ausgelegte LFT-Rippenstruktur den entstehenden Steifigkeitsverlust mindestens ausgleichen oder sogar übertreffen, wodurch Gewichtsreduktionen von bis zu 20 % erreichbar sind [99]. Zur Auslegung der Rippenstruktur wird der im Inneren des Originalbauteils zur Verfügung stehende Hohlraum genutzt, so dass lediglich die Geometriedaten und Auslegungslastfälle als Ausgangsbasis für die Optimierungsmethode benötigt werden. Eine Erweiterung des Bauraums über die Bauteilgrenzen hinaus erfolgt nicht.

Die entwickelte Auslegungs- und Optimierungsmethode umfasst dabei folgende Einzelschritte (siehe Kap. 7.1-7.6):

1. Bewertung der Lastfälle gemäß Lastenheft
2. Analyse der minimal zu erreichenden Blechdicke im Hybriddesign
3. Optimierung der lokalen LFT-Dicke der vollflächigen LFT-Schicht
4. Optimierung der LFT-Rippenstruktur
5. Überführung des Ergebnisses aus Punkt 4 in eine reale Konstruktion
6. Simulative Bewertung des hybriden Designs anhand der Lastfälle aus Punkt 1

Bei dem ausgewählten Bauteil zur Veranschaulichung des Optimierungsprozesses handelt es sich um einen einschaligen, radführenden 3-Punkt-Querlenker aus dem Modularen Querbaukasten (MQB-A) der Volkswagen AG und konkret aus dem Fahrzeugmodell Golf VII. Die Radführung erfolgt über das Lager L2 und die verbleibenden Lager L1 und L3 (Abbildung 7-1) verbinden den Querlenker mit dem Hilfsrahmen (*subframe*). Der Original-Querlenker verfügt über eine Blechdicke von 3,8 mm und wird aus einem hochfesten Mehrphasenstahl mit der Bezeichnung SZBS800 (Salzgitter Flachstahl GmbH, Streckgrenze  $\geq 660$  MPa) hergestellt. Somit besteht für das Bauteil ein hohes Potenzial zur Blechdickenreduktion und damit einhergehend zur Gewichtsreduktion durch das Hybridpressen.



Abbildung 7-1: Original-Querlenker im Fahrzeug-Koordinatensystem (Fahrerseite)

Wie ebenfalls in Abbildung 7-1 zu erkennen ist, weist der Querlenker mehrere Löcher auf, wovon die meisten einen Leichtbaugedanken verfolgen oder der Anbindung von Sensorik dienen. Diese Löcher werden zur Optimierung des Bauteils für das Hybridpressen geschlossen („loch-

freie“ Variante). Lediglich zwei Löcher müssen erhalten bleiben: während das größte und mittlere Loch als Durchführung zur Realisierung einer Schraubverbindung im Achsbereich im Verlauf der Fahrzeugmontage dient, ist das kleinere Loch in der Nähe des L1-Lagers Teil des Referenzpunktsystems.

Aus Gründen einer Geheimhaltungsverpflichtung gegenüber der Volkswagen AG werden in den nachfolgenden Kapiteln zur FE-Simulation keine absoluten Spannungswerte zu den Berechnungsergebnissen genannt, sondern stets auf die Maximalspannung im kritischen Lastfall des Originalbauteils mit dem Wert 1 normierte Werte verwendet.

## 7.1 Auslegungslastfälle

Der Querlenker wird per Lastenheft des OEMs anhand von sechs linearen Lastfällen ausgelegt (Tabelle 7-1), wobei in keinem Lastfall die Streckgrenze  $R_{p0,2}$  des eingesetzten Werkstoffs überschritten werden darf. Bei den sechs Lastfällen handelt es sich um Fahrsituationen, die zu einer hohen Bauteilbelastung führen, beispielsweise während einer extremen Kurvenfahrt, einer Vollbremsung oder durch vertikale und in Längsrichtung wirkende Stöße. Die vorherrschenden Schnittkräfte pro Lastfall sind dabei vom Fahrzeughersteller vorgegeben. Die drei Elastomerlager des Bauteils verhalten sich in Realität deutlich nichtlinear und werden daher in der linearen Berechnung durch unendliche steife Elemente (RBE = *rigid body elements*) ersetzt. Von den sechs Lastfällen erfährt der Querlenker in den Lastfällen 3, 4 und 6 deutlich höhere Spannungen als in den Lastfällen 1, 2 und 5, wobei im Lastfall 6 (Längsstoß) die mit Abstand höchsten Spannungen im Bereich des Lagers L3 auftreten und dieser somit als kritischer Lastfall für die Auslegung identifiziert wird. Eine Darstellung aller Spannungsergebnisse der einzelnen Lastfälle befindet sich im Anhang (Kap. 12.4).

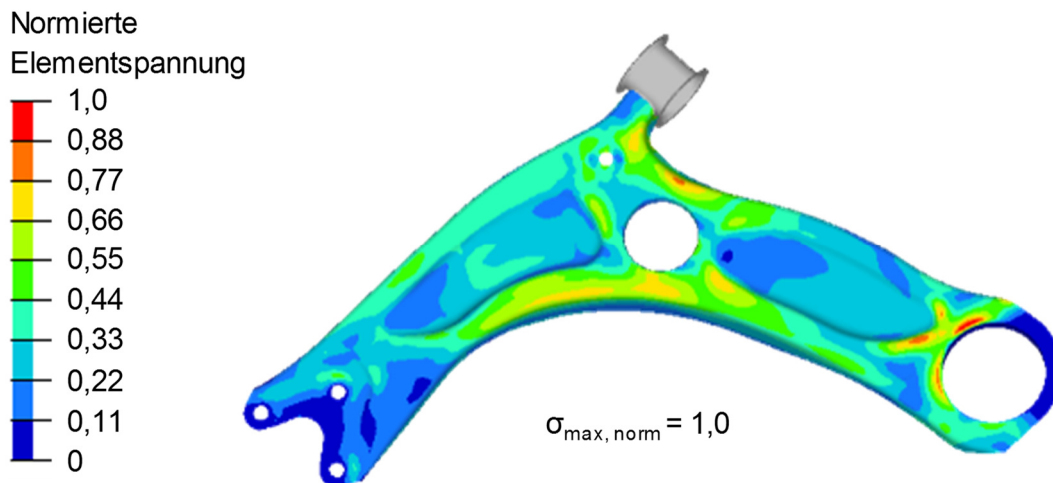


Abbildung 7-2: Spannungsverteilung im „lochfreien“ Original-Querlenker für den kritischen Lastfall 6

Zusätzlich wird während der Bauteilentwicklung anhand von drei nichtlinearen Lastfällen die Energieaufnahme und das Traglastverhalten des Querlenkers bewertet, wobei diese Lastfälle nicht in der Auslegung bzw. der FE-Optimierung berücksichtigt werden können, da kein nichtlineares Materialmodell für den LFT mit Betrachtung der Faserorientierung und -verteilung zur Verfügung steht. Des Weiteren geben die nichtlinearen Lastfälle Auskunft über das Knickverhalten des Querlenkers bzw. die Versagensrichtung und ermöglichen so einen Vergleich von verschiedenen Entwicklungsstufen.

<b>Lastfall 1:</b>	Extreme Kurvenfahrt	<b>Lastfall 2:</b>	Vertikalstoß
<b>Lastfall 3:</b>	Symmetrisches Bremsen	<b>Lastfall 4:</b>	Bremsen in der Kurve
<b>Lastfall 5:</b>	Antreiben rückwärts	<b>Lastfall 6:</b>	Längsstoß
<b>Lastfälle 7-9:</b>	Nichtlineare Traglastfälle (werden hier nicht berücksichtigt)		

Tabelle 7-1: Übersicht über die Lastfälle gemäß OEM-Lastenheft

## 7.2 Blechdickenauswahl

Zur Ausnutzung des maximal verfügbaren inneren Bauraums für die Rippenstruktur und gleichzeitig der maximalen Flächenträgheitsmomente der Bauteilquerschnitte wird trotz Blechdickenreduktion durch die Optimierung die Außenfläche des Original-Querlenkers als geometrische Grenze verwendet. Die Bestimmung der minimalen Blechdicke erfolgt anhand von Topologie-Optimierungen an einem vereinfachten FE-Modell unter der Randbedingung (*design constraint*), dass die auftretenden Maximalspannungen im Stahlblech in keinem Lastfall überschritten werden dürfen. Das vereinfachte Modell umfasst lediglich das Stahlblech als 2-dimensionale Schalenvernetzung sowie den mit Tetraeder-Elementen gefüllten LFT-Designraum.

In Absprache mit dem OEM können die begrenzenden Spannungswerte der fünf unkritischen Lastfälle 1-5 dennoch um teilweise bis zu 60 % erhöht werden. Lediglich beim kritischen Lastfall 6 ist die obere Grenze identisch mit der berechneten Maximalspannung des „lochfreien“ Original-Querlenkers (Abbildung 7-2). Da das FE-Element mit der höchsten Spannung direkt an das RBE-Element des Lagers L3 angrenzt, wird die höchste Spannung der zweiten Elementreihe verwendet ( $\sigma_{LF6, norm} = 0,95$ ). Als Optimierungsziel (*objective*) wird eine Minimierung der elastischen Nachgiebigkeit (*compliance*) vorgegeben, wobei nur 20 % des zur Verfügung stehenden Designraums durch Rippen gefüllt werden soll (*volume fraction* = 0,2). Eine ausführlichere Beschreibung zur Funktionsweise einer Topologie-Optimierung erfolgt im Kapitel 7.4 mit der Optimierung der Rippenstruktur.

Zum Modellaufbau wird der gesamte Innenraum des Lenkers, ausgenommen der Bereich über dem Montageloch, als Designraum definiert (siehe analog Abbildung 7-7), konstruiert und grob vernetzt (3 mm Tetraeder-Elemente). Auf eine LFT-Schicht zwischen Stahlblech und Designraum wird im vereinfachten Modell noch verzichtet – die Anbindung von LFT und Stahlblech erfolgt über einen sogenannten „Starrkontakt“ (*TIED contact*). Zudem wird der Metallkragen des Lagers L3 durch LFT ersetzt, da auch dieses Lagerloch beim Hybridpressen zunächst geschlossen sein muss. Mit dieser Anordnung können nun verschiedene Blechdicken simuliert und die resultierenden Spannungswerte für jeden Lastfall einzeln analysiert werden. Das eigentliche Strukturergebnis der Topologie-Optimierung (und somit der rückseitigen LFT-Rippen) ist an dieser Stelle noch nicht relevant, da aufgrund der fehlenden Netzfeinheit und der damit verbundenen Grobheit der vorgeschlagenen Rippenstruktur noch keine Fertigungskriterien berücksichtigt sind. Der Vorteil liegt jedoch in der deutlich verkürzten Rechenzeit. Als Startwert für die reduzierte Blechdicke können Werte zwischen 50 und 70 % der Original-Blechdicke gewählt werden, wobei die Verfügbarkeit bzw. Lieferbarkeit der jeweiligen Blechdicke berücksichtigt werden sollte. Nachfolgend sind in Abbildung 7-3 die Spannungsverteilungen im Stahlblech dargestellt, die sich für eine Blechdicke von 2 bis 2,4 mm im kritischen Lastfall 6 ergeben und direkt während der Topologie-Optimierung berechnet werden.



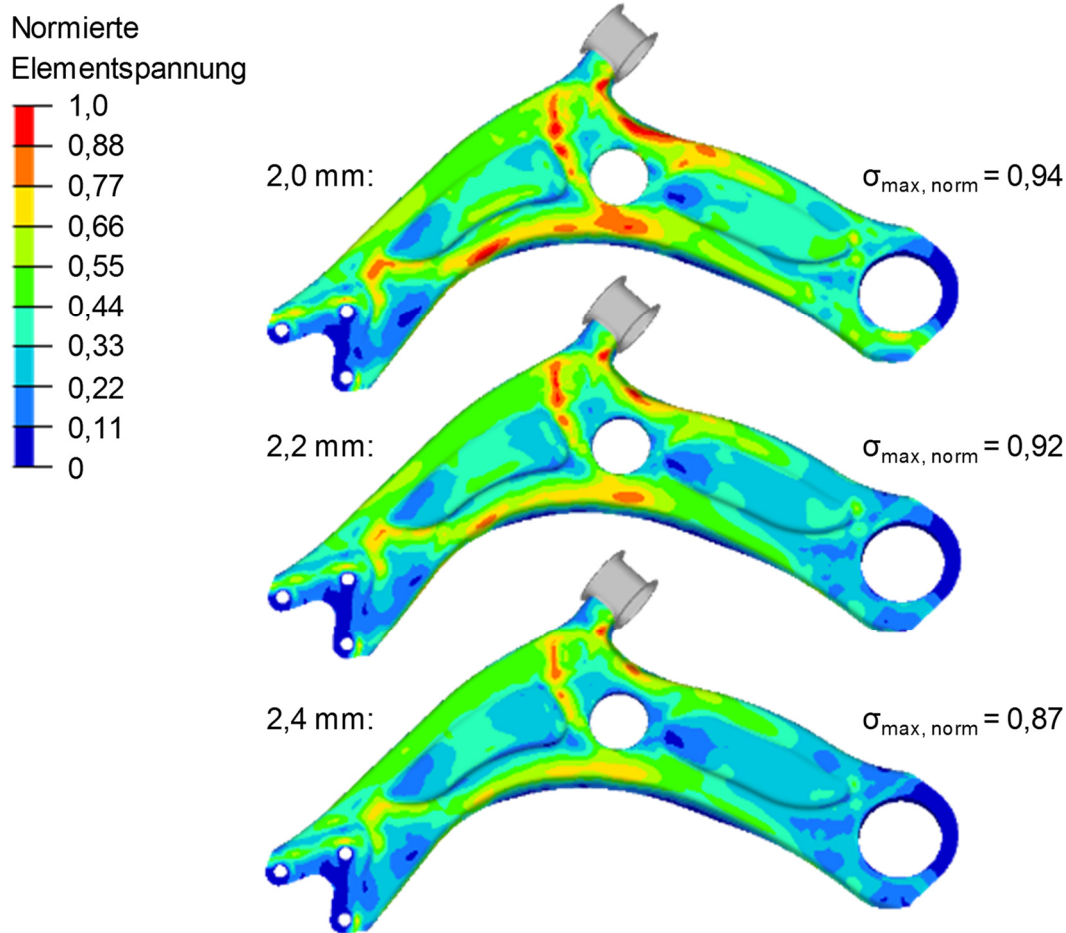


Abbildung 7-3: Vergleich der Spannungen im Stahlblech für verschiedene Blechdicken (Zustand mit innenliegender LFT-Rippenstruktur nach Topologie-Optimierung)

Es wird deutlich, dass die Spannungsverteilung der Blechdicke 2,4 mm am besten mit dem Ergebnis der Spannungsverteilung des Original-Querlenkers ([Abbildung 7-2](#)) übereinstimmt. Obwohl bei einer Blechdicke von 2,0 mm die Maximalspannung nach Optimierungsvorgabe nicht überschritten wird ( $\sigma_{\max, \text{norm}} < 1$ ), deutet die Häufigkeitsverteilung der hohen Spannungen auf eine signifikant höhere Bauteilbelastung hin. Da Fahrwerkbauteile auch im Hinblick auf die Lebensdauer eine besondere Relevanz besitzen, ist ein großflächiges Auftreten der maximal zulässigen Spannungen trotz Einhaltung der oberen Spannungsgrenzen im Vergleich zum Original-Querlenker als negativ zu bewerten. Der Ort der Maximalspannung verschiebt sich in allen Blechdicken-Varianten vom Lager L3 beim Original-Querlenker zum Lager L1 hin, da bei L3 besonders massive Rippenstrukturen durch den Optimierungssolver vorgesehen werden.

### 7.3 Dickenoptimierung der LFT-Schicht

Die Abbildung des Zweischichtverbunds aus Stahlblech und LFT-Schicht in der FEM erfolgt zunächst über 2D-Schalenelemente (*shell elements*). Um eine Überschneidung der jeweiligen Werkstoffdicken zu vermeiden, wird die *top/bottom*-Option des Solvers verwendet, wodurch die Schalenelemente nicht zwangsläufig die Mitte einer Schicht abbilden, sondern wahlweise die Ober- oder Unterseite. Somit können die Schalenelemente von Metall- und LFT-Schicht kongruent vernetzt sein, in der Simulation jedoch als zwei aufeinander liegende Schichten mit gemeinsamen Verbindungsknoten berechnet werden. Das Werkstoffverhalten wird über ein linear-elastisches, isotropes und temperaturunabhängiges Materialmodell (MAT1) mit einem E-Modul

von 9.000 MPa und einer Dichte von  $1,45 \text{ g/cm}^3$  abgebildet, wobei der Elastizitätsmodul eine konservative Wertannahme aufgrund des unbekanntem und unberücksichtigten Anisotropieverhaltens darstellt (vgl. Werkstoffkennwerte des LFTs in Kap. 12.1). Denkbar wäre zudem die Verwendung eines im Zugversuch ermittelten E-Moduls von LFT-Proben aus einem realen Bauteil mit regelloser Faserorientierung als eine Art Mittelwert [100].

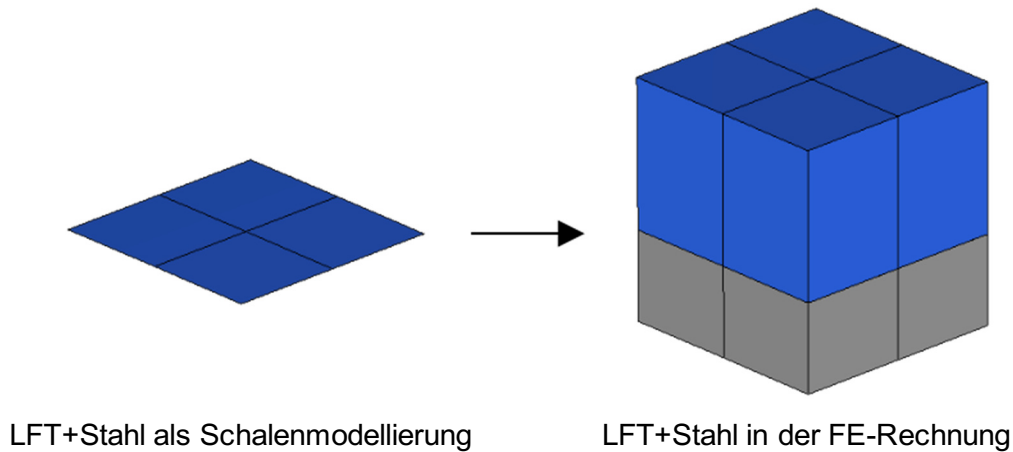


Abbildung 7-4: Abbildung von LFT (4,0 mm) und Stahl (2,4 mm) in der FEM

Zur Optimierung der LFT-Schicht wird die sogenannte Free-Size-Optimierung eingesetzt (siehe auch Kap. 2.4.2), mit der jedes Element der LFT-Schicht lokal eine beliebige Dicke innerhalb eines zuvor festgelegten Wertebereichs von 2-4 mm annehmen kann. Ursprünglich entwickelt wurde diese Optimierungsmethode zur Auslegung von unterschiedlichen Faserlagen in einem FVK-Laminat. Da eine Free-Size-Optimierung mit einer Reduzierung der Schichtdicke gegenüber einer Erhöhung die höhere Stabilität aufweist, wird die LFT-Schicht mit der oben genannten Maximaldicke von 4 mm modelliert. Als Optimierungsziel wird erneut die maximale Steifigkeit (Minimierung der Nachgiebigkeit) bei Ausnutzung von 20 % des Differenzvolumens zwischen vollflächiger 4 mm- und einer 2 mm-Schicht definiert. Die Berechnung erfolgt ohne eine Optimierung der Rippenstruktur, da diese einen viel größeren Einfluss auf die Bauteilsteifigkeit hätte und somit das Ergebnis der LFT-Schicht verfälschen würde. Das nachfolgend abgebildete Ergebnis der Optimierung zeigt insgesamt drei größere Bereiche mit der Maximaldicke: um das Lager L3, den inneren Radius des Querlenkers sowie in der Nähe des Lagers L1. Alle Bereiche liegen zudem in den geometrischen „Tälern“ des Querlenkers.

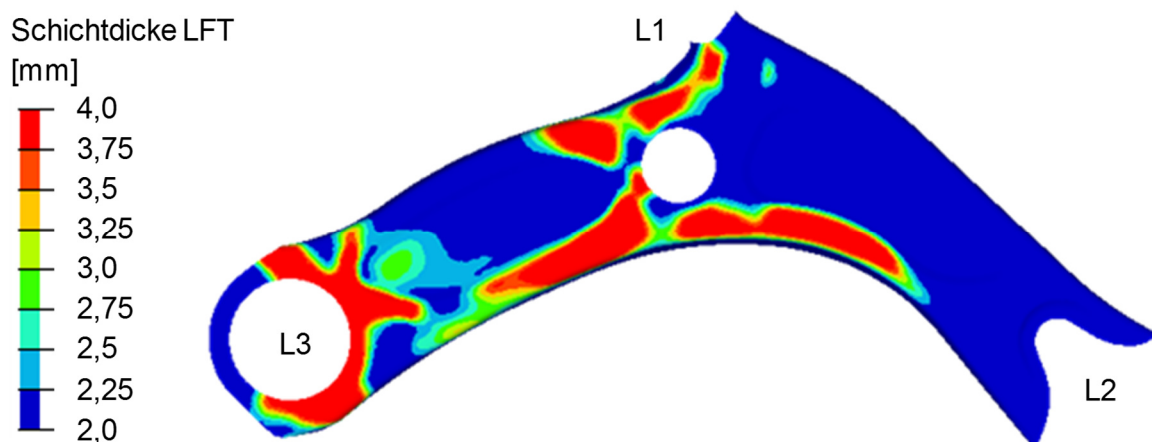


Abbildung 7-5: Ergebnis der Free-Size-Optimierung für eine variable LFT-Schicht (Darstellung ohne Stahlblech)

Nach der Berechnung kann mit Hilfe eines von Altair zur Verfügung gestellten Skripts das Optimierungsergebnis der LFT-Schicht in Volumenelemente umgewandelt und für eine neue Berechnung genutzt werden. Dies ist erforderlich, da im nachfolgenden Schritt die Optimierung der Rippenstruktur erfolgt, die ihrerseits als Designraum ebenfalls an die LFT-Schicht angebunden werden muss (Abbildung 7-6). Somit würde eine weitere Berechnung mit dann zwei Schalenelementen und den Solid-Elementen des Designraums bzw. der Rippenstruktur zwangsläufig zu Überschneidungen führen oder alternativ den Aufwand zur Erzeugung von Luftspalten im FE-Modell zwischen den Elementschichten unnötig erhöhen.

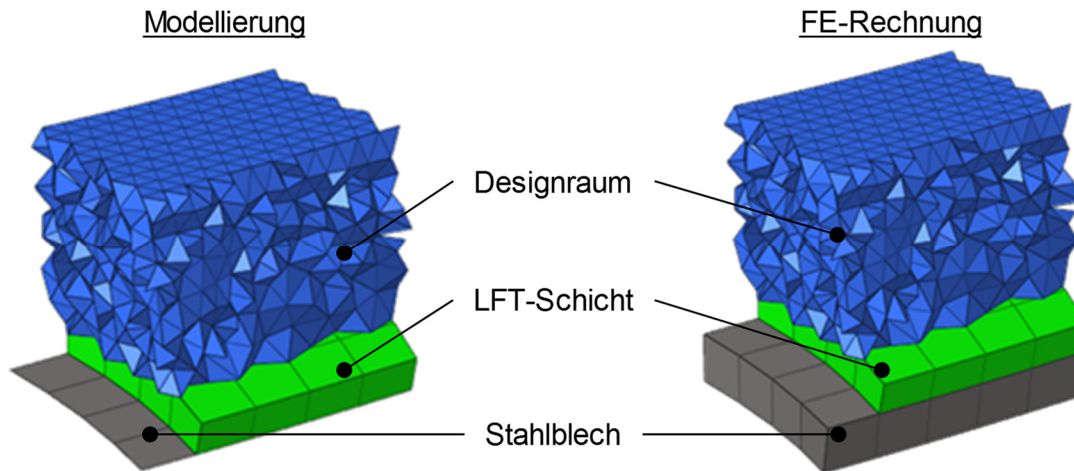


Abbildung 7-6: Modell des 3-Schicht-Systems aus Stahlblech, LFT-Schicht und Designraum

#### 7.4 Optimierung der Rippenstruktur

Die Optimierung der LFT-Rippenstruktur erfolgt mit Hilfe der bereits genannten Topologie-Optimierung. Der mathematische Algorithmus von OptiStruct kann entweder zur Optimierung einer geometrischen Form oder einer Materialverteilung, häufig einer Rippenstruktur, eingesetzt werden, wenn zuvor der zur Verfügung stehende Designraum definiert ist. Dazu nutzt OptiStruct mit der Methode der zulässigen Richtungen (MFD – *Method of Feasible Directions*) standardmäßig einen gradient-basierten Algorithmus. In einem iterativen Prozess kommt die sogenannte „SIMP-Methode“ (*Solid Isotropic Material with Penalization*) zum Einsatz, nach der jedem FE-Element eine Designvariable in Form einer Pseudo-Dichte zugewiesen wird. Diese Dichte kann Werte zwischen 0 und 1 annehmen, wobei 0 den *void state* und 1 den *solid state* repräsentiert [101]. Mithilfe dieser nicht-physikalischen Dichte wird die Steifigkeit der Elemente verändert, ohne dass dazu Elemente gelöscht werden müssen. Jene Elemente mit einem Dichtewert nahe 1 sind demnach lasttragend und müssen zwingend in der späteren Konstruktion erhalten bleiben.

Als Designraum wird der insgesamt zur Verfügung stehende Bauraum im FE Modell nachgebildet und mit einer durchschnittlichen Netzgröße von 1,0 mm vernetzt, was im Fall des Querlenkers einer Gesamtanzahl von 3,6 Mio. Tetra-Elementen entspricht (siehe Abbildung 7-7). Die feine Netzgröße ist deshalb erforderlich, da die Mindestwerte der Rippenparameter (MINDIM, MAXDIM) in Abhängigkeit zur Netzgröße stehen und für die kleinste bzw. größte Rippendicke durch den Solver wie folgt vorgegeben sind:

$$\text{MINDIM} = 3x \text{ Elementgröße } (\emptyset), \text{ MAXDIM} = 2x \text{ MINDIM}$$

Somit resultieren im Topologie-Ergebnis Rippendicken zwischen 3 und 6 mm, die in der anschließenden Konstruktion dennoch durch eine Erhöhung der Rippenanzahl dünner und somit fertigungsgerechter umgesetzt werden können. Eine weitere Reduzierung der Elementkantenlänge stünde in keinem rationalen Verhältnis von zusätzlichem Erkenntnisgewinn zu benötigter Rechendauer (Rechendauer auf einem Knoten mit 12 CPUs = ca. 56 Stunden).

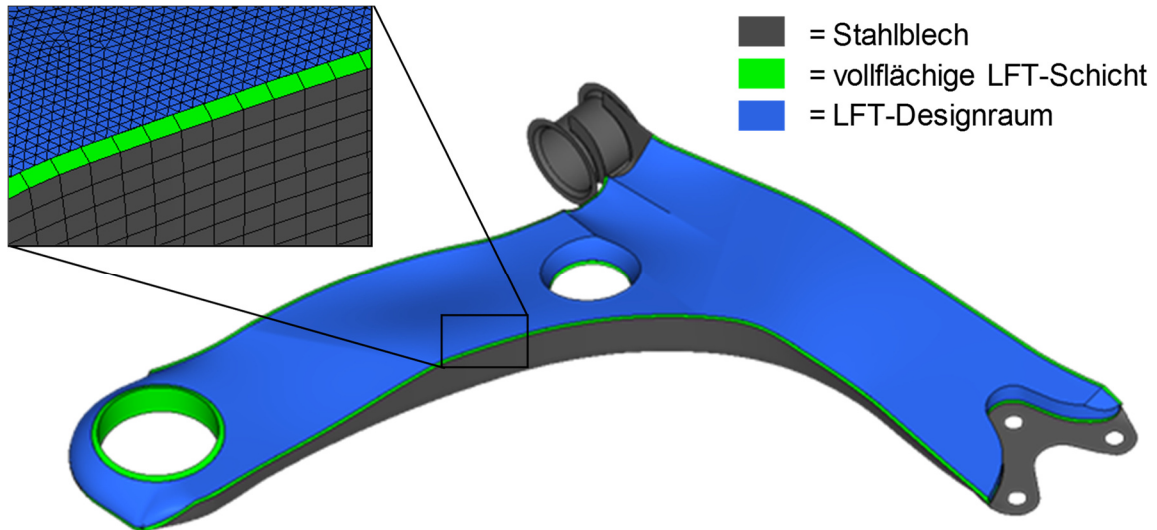


Abbildung 7-7: Konstruierter Designraum für die Topologie-Optimierung

Die Anbindung des Designraums an die variable LFT-Schicht erfolgt durch eine feste Kontaktdefinition (*TIED contact*), da aufgrund der unterschiedlichen Netzgröße keine gemeinsamen Knoten bestehen können (wie bei Stahlblech und LFT-Schicht, vgl. [Abbildung 7-6](#)) und in einer linearen FE-Rechnung kein nichtlineares Kontaktverhalten abgebildet werden kann.

Die Ziele der Rippen-Optimierung sind identisch mit jenen der Blechdickenauswahl in Kap. 7.2. Auch die Spannungen im Stahlbauteil dürfen die Werte des Original-Querlenkers nicht übersteigen, wobei erneut eine Anpassung der Obergrenzen um bis zu 60 % für die unkritischen Lastfälle 1-5 vorgenommen wird – diese werden jedoch von den errechneten Spannungen bei weitem nicht ausgeschöpft (vgl. Spannungsverteilungen in Kap. 12.4 und 12.5.). Zusätzlich wird erstmals eine Spannungsobergrenze für den LFT von 125 MPa definiert, da dieser Wert dem Mittelwert aus der Bruchspannung in Faserrichtung und quer dazu entspricht (vgl. [Abbildung 3-5](#)).

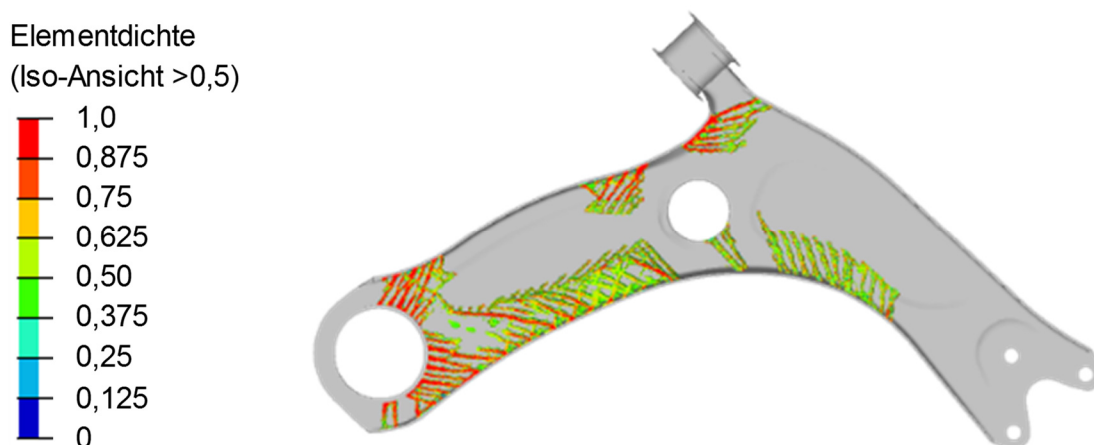


Abbildung 7-8: Ergebnis der Topologie-Optimierung mit feinem FE-Netz (1 mm)

In Abbildung 7-8 ist das Ergebnis der Topologie-Optimierung für einen Dichte-Wert von  $\geq 0,5$  in einer isometrischen Ansicht dargestellt. Alle Elemente mit einem Dichte-Wert  $< 0,5$  sind in dieser Ansicht ausgeblendet, so dass nur die lasttragende Rippenstruktur sichtbar bleibt. Das Ergebnis zeigt eine Analogie zur optimierten LFT-Schicht, da nun die identischen Bereiche mit Rippen ausgefüllt sind, welche auch bereits bei der variablen LFT-Schicht die Maximaldicke aufweisen (Abbildung 7-5). Es handelt sich also um die Bereiche mit dem größten Einfluss auf die Gesamtsteifigkeit des Querlenkers.

### 7.5 Konstruktion der Rippenstruktur (CAD)

Das Ergebnis der Topologie-Optimierung kann im Anschluss erneut in den Preprozessor von Altair (HyperMesh) importiert und von dort aus als Oberflächendatei (.stp) exportiert werden. Dadurch ist es möglich, das Topologie-Ergebnis in der Konstruktionssoftware (hier: Catia V5 R22) regelmäßig einzublenden und so ein möglichst exaktes Abbild des Topologie-Ergebnisses in Form von Rippen zu konstruieren. Die Gestaltungsfreiheit des Kunststoffs ermöglicht dabei eine Realisierung geometrisch komplexer und ungleicher Rippenstrukturen.

Dennoch sind bei der Konstruktion von Rippenstrukturen einige fertigungstechnische Besonderheiten zu berücksichtigen. Während bei reinen Kunststoffbauteilen zunächst eine Definition der Trennebene zwischen den beiden Werkzeughälften erfolgen muss, ergibt sich diese bei einem durch das Hybridpressen hergestellten Bauteil bereits aus der Ziehanlage des Stahlbauteils. Demnach muss die Rippenstruktur des LFT-Bauteils lediglich im Stempel vorgesehen werden. Hierbei sind fertigungstechnische Aspekte einerseits hinsichtlich der Einbringung der Negativform mittels mechanischer oder thermisch-abtragender Bearbeitung (z.B. Funkenerodieren) in den Stempel und andererseits in Bezug auf die Urformung des LFTs zu beachten. Grundsätzlich können ohne Schieber Elemente, deren Einsatz beim Hybridpressen grundsätzlich ausgeschlossen ist, keine Hinterschnitte im Bauteil erzeugt werden. Die Höhenrichtung aller Rippen wird zudem durch die Umform- und Auszugsrichtung des Blechs bereits vorgegeben. EYERER ET AL. [102] beschreiben „9 goldene Konstruktionsregeln für Kunststoffbauteile“, von denen die folgenden sechs ohne Einschränkung auch auf die Konstruktion eines Kunststoffbauteils in Metall-Kunststoff-Hybriden übertragen werden können:

- Wanddicke so dünn wie möglich
- Gleiche Wandstärke; Massenanhäufungen vermeiden
- Ecken und Kanten mit Radien versehen
- Rippen spritzgerecht (hier: pressgerecht) gestalten, z.B. durch Vermeidung von Materialanhäufungen in Kreuzungspunkten oder der Verwendung gleichmäßiger Wandstärken
- Ausreichende Konizitäten (Entformungsschrägen) vorsehen
- Möglichkeiten der Integration von Funktionen ausschöpfen

Die Wanddicke eines Bauteils hat u.a. direkten Einfluss auf Bauteilmasse, Zykluszeit, Fließweglänge und Faserorientierungen, während eine ungleiche Wanddicke die Bildung von Lunkern und Einfallstellen fördert. Bei Rippenkonstruktionen entstehen diese jedoch unweigerlich in den Rippenfüßen, so dass durch abgerundete Übergänge zumindest Spannungsspitzen durch eine verminderte Kerbwirkung in diesen Bereichen vermieden werden können. Der Begriff „spritz-“ bzw. „pressgerechte“ Gestaltung betrifft vor allem die Rippendicke und -höhe. Während eine Erhöhung der Rippendicke den größten Einfluss auf die Erhöhung der Bauteilsteifigkeit aufweist, steigt gleichzeitig die benötigte Zykluszeit infolge der Abkühldauer signifikant. Die Höhe der Rippen sollte nach EYERER ET AL. [102] zwischen dem 5 bis 10-fachen der Rippendicke betragen, um einen versteifenden Effekt zu erzielen. Aufgrund der volumetrischen Schwindung



eines Thermoplasts während der Abkühlung schwindet auch der LFT auf den Pressstempel. Zur nahezu kraftfreien Entformung des Bauteils werden daher Entformungsschrägen vorgesehen, für die bei einem PA-GF Werkstoff Werte von  $0,2-0,5^\circ$  bei flachen ( $<25\text{ mm}$ ) und  $0,5-1^\circ$  bei sehr hohen ( $>25\text{ mm}$ ) Rippen empfohlen werden.

Um den oben genannten Gestaltungsrichtlinien zu folgen, werden in der nachfolgenden Konstruktion der Rippenstruktur alle Rippen von einer Projektionsebene oberhalb der höchsten bzw. tiefsten Rippe ausgehend mit einer Entformungsschräge von  $0,5^\circ$  und einer Anfangsdicke von  $1,5\text{ mm}$  konstruiert. Dadurch wird gewährleistet, dass in den Rippenfüßen eine annähernd gleiche Dicke im Rippenfuß zur Vermeidung von unterschiedlicher Abkühlung, Schwindung und somit Ablösung vom Blech bzw. Haftvermittler vorliegt (siehe Skizze in [Abbildung 7-9](#)). Die maximale Rippendicke beträgt bei der höchsten Rippe ( $30\text{ mm}$ ) im Rippenfuß somit  $2,1\text{ mm}$ .

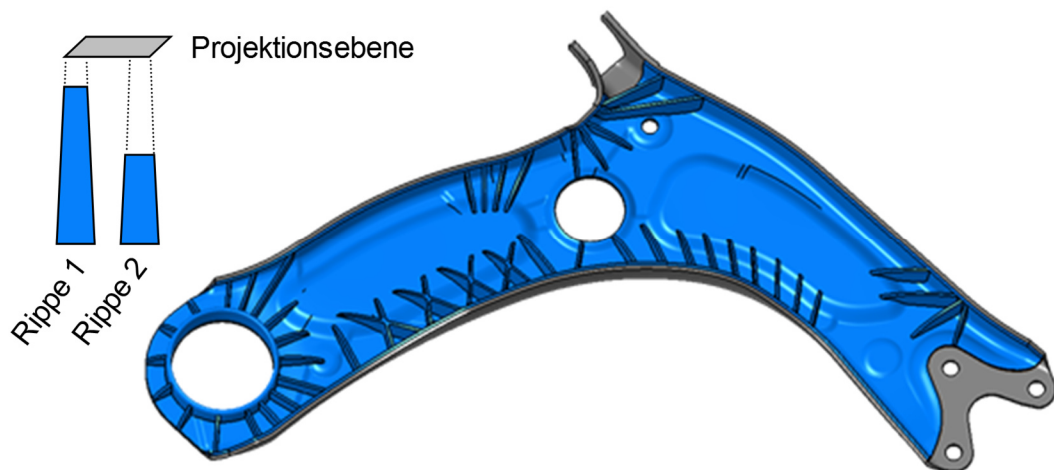


Abbildung 7-9: Konstruierte Rippenstruktur nach dem Ergebnis der Topologie-Optimierung

Neben den drei identifizierten Rippen-Bereichen aus der Topologie-Optimierung ([Abbildung 7-8](#)) gibt es einen vierten Bereich mit vier Einzelrippen neben dem L2-Lager. Diese Rippenanordnung berücksichtigt die zusätzlichen Belastungen der nichtlinearen Lastfälle, die eine Verschiebung des Lagers L2 in Richtung des L3-Lagers als Verformung beschreiben und in der statischen Berechnung bzw. Optimierung unberücksichtigt bleiben. Des Weiteren verlaufen zusätzliche Rippen um das Lager L3 mit der neu geschaffenen LFT-Hülse, um diese gleichmäßig und mit der größtmöglichen Steifigkeit an das Stahlblech anzubinden.

## 7.6 Bewertung des hybriden Designs

Im Anschluss an die Konstruktion der Rippenstruktur muss deren Eignung durch eine erneute FE-Berechnung der statischen Lastfälle bestätigt werden, da das Optimierungsergebnis nicht 1:1 in ein fertigungsgerechtes Rippendesign übertragen werden kann. Dadurch ergeben sich geringe Abweichungen zu der Spannungsberechnung aus der Topologie-Optimierung, die nachfolgend in [Abbildung 7-10](#) dargestellt sind. Im Vergleich aller sechs Lastfälle (siehe Anhang Kap. 12.5) zeigt die konstruierte Stahl-LFT-Hybridvariante gegenüber dem Original-Querlenker trotz einer geringeren Maximalspannung großflächige Bereiche mit hohem Spannungsniveau. Daraus folgt eine bessere Werkstoffausnutzung in den unkritischen Lastfällen und somit eine höhere Leichtbaugüte der Hybridvariante.

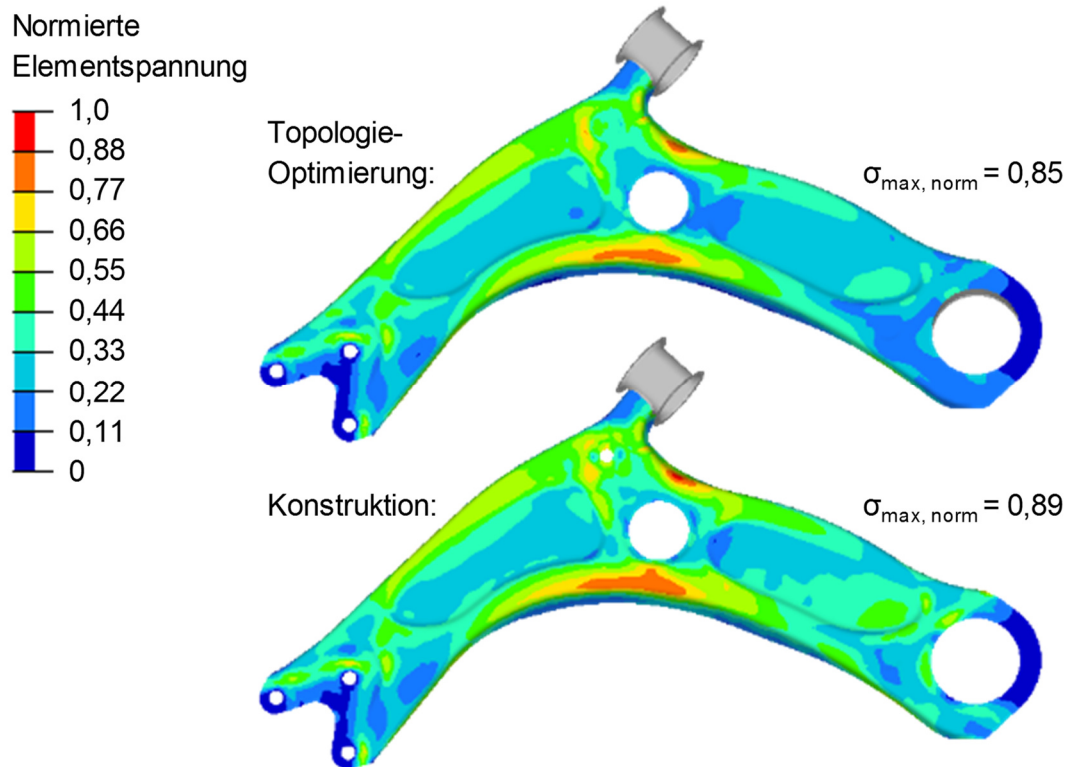


Abbildung 7-10: Vergleich der Spannungsverteilungen im Stahlblech zwischen dem Ergebnis der Topologie-Optimierung und der Konstruktion im kritischen Lastfall 6

Neben den Spannungen im Stahlblech können nun auch erstmals die Spannungen in der LFT-Rippenstruktur bewertet werden. Zwar wird während der Topologie-Optimierung auch bereits für den LFT eine Spannungsobergrenze definiert (125 MPa), jedoch hängen die resultierenden Werte in der fertigen Konstruktion stark vom finalen Design der Rippenstruktur ab. Die Maximalspannungen treten lokal sehr begrenzt und lediglich am Übergang zwischen der LFT-Hülse (Lager L3) und dem Stahlblech in zwei Verbindungsrippen auf (siehe [Abbildung 7-11](#)). Es kann davon ausgegangen werden, dass die berechneten Spannungen wertemäßig über den auftretenden Realspannungen im Bauteil liegen, da das Elastomerlager L3 in Realität eine signifikante Nachgiebigkeit besitzt, die im linear-statischen FE-Modell durch Starrelemente ersetzt wird. Eine Aussage über die tatsächlich auftretenden Spannungen bzw. die Belastbarkeit des LFTs kann aufgrund der fehlenden Faserorientierung und der vorherrschenden Anisotropie (variables Werkstoffverhalten je nach Faserrichtung) ohne ein entsprechendes Materialmodell nicht erfolgen. Eine Überprüfung im Realversuch wäre nach der Fertigung hingegen möglich.

Durch die Reduktion der Blechdicke des Querlenkers von 3,8 mm auf 2,4 mm und der zeitgleichen Verstärkung des Bauteils mit einer variablen, vollflächigen LFT-Schicht sowie einer LFT-Rippenstruktur kann das errechnete Gesamtgewicht ohne alle Lager von 2,404 kg („lochfreie“ Variante) bzw. 2,364 kg (Original-Querlenker) auf 1,779 kg reduziert werden. Die prozentuale Gewichtsreduktion beträgt somit -26 % gegenüber der „lochfreien“ Variante und -24,7 % gegenüber dem Original-Querlenker, wobei ca. 310 g der Gesamtmasse durch den LFT abgebildet werden. Nicht berücksichtigt ist in dieser Kalkulation die zusätzliche Masse der benötigten Stahlhülse zum Einpressen des L3-Lagers, so dass die reale prozentuale Gewichtsreduktion bei einer Fertigung minimal geringer ausfallen wird (vgl. Kap. 8.7). Dem gegenüber steht die Möglichkeit, beim Bauteilbeschnitt nachträglich Leichtbau-Löcher einzubringen, deren Lage und Größe allerdings zuvor simulativ bewertet werden müsste.

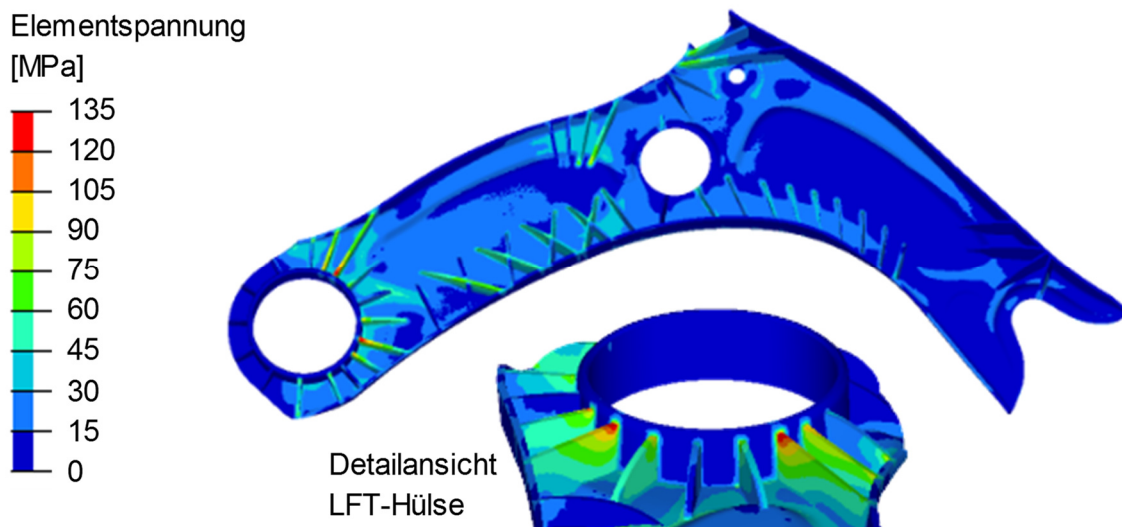


Abbildung 7-11: Spannungsverteilung im LFT für den kritischen Lastfall 6

### 7.7 Bewertung der Optimierungsmethode

Die entwickelte Optimierungsmethode nach dem vorgestellten Stand benötigt ein bereits existierendes Stahlbauteil als Startpunkt, wodurch die geometrischen Randbedingungen von Beginn an festgelegt sind. Durch diese geometrische Einschränkung für das Design des Hybridbauteils wird ein möglicherweise vorhandenes, zusätzliches Leichtbaupotenzial höchstwahrscheinlich nicht vollständig ausgenutzt. Zudem kann das Stahlbauteil, wie im Fall des Querlenkers, mit Hilfe einer mehrstufigen Umformung hergestellt worden sein, so dass zur Anwendung des Hybridpressens ggf. reduzierte Ziehtiefen, größere Radien oder konstruktive Änderungen von Teilbereichen erforderlich werden. Die Entwicklung eines Fahrwerkbauteils wird üblicherweise mit einem Bauraummodell begonnen und neben der Lage der Kräfteinleitungspunkte und den geforderten Festig- und Steifigkeiten wird auch das geplante Fertigungsverfahren bereits berücksichtigt (vgl. Kap. 2.4.1). Es ist also naheliegend, in Zukunft auch für das Hybridpressen vorab geeignete Design-Kriterien zu definieren. Im Vergleich zum Original-Querlenker aus Abbildung 7-1 könnte so z.B. auf zusätzliche Verprägungen in der Profilmitte zur Erhöhung der Steifigkeit verzichtet werden, um eine einstufige Umformung zu vereinfachen.

Des Weiteren erfordert die Optimierungsmethode mit insgesamt drei verschiedenen Optimierungen einen nicht unerheblichen Aufwand zur Implementierung und Auswertung, so dass einzelne Schritte in einer gemeinsamen Optimierung kombiniert werden könnten. Eine Verkürzung durch Kombination von z.B. Blechdicken- und Rippen-Optimierung ist mit dem eingesetzten Optimierungssolver jedoch nicht zielführend, da eine begonnene Topologie-Optimierung in Kombination mit weiteren Optimierungsarten (z.B. Size-Optimierung mit variierender Blechdicke) verständlicherweise kein optimales Ergebnis erzielen kann.

In der nachfolgenden Auslegung des Demonstrators wird aus fertigungstechnischen Gründen (z.B. ungleichmäßige Abkühlung des LFTs) auf eine Dicken-Variabilität der vollflächigen LFT-Schicht verzichtet und stattdessen eine konstante Schichtdicke verwendet. Somit entfällt im Vergleich zur vorgestellten Optimierungsmethode die Free-Size-Optimierung und gleichzeitig die 3D-Modellierung der LFT-Schicht durch Anwendung des oben beschriebenen Skripts.





## 8 Auslegung und Fertigung des Demonstrators

Als Beleg für die generelle Prozessfähigkeit des Hybridpressens und die dadurch erzielbare Gewichtsreduktion wird ein real existierendes Fahrwerkbauteil aus dem VW-Konzern ausgewählt. Es handelt sich um den bereits in Kap. 7.1 vorgestellten Querlenker einer Vorderachse, der mit Hilfe der im vorherigen Kapitel beschriebenen Vorgehensweise zunächst ausgelegt, mittels Hybridpressen hergestellt und abschließend beschnitten wird. Ein besonderes Augenmerk wird in diesem Kapitel zusätzlich auf die Auslegung und Fertigung des benötigten Umformwerkzeugs sowie auf die Herstellbarkeit des Lenkers selbst gelegt.

### 8.1 Bauteilauslegung und Optimierung

Der Original-Querlenker aus Stahl wird mit Hilfe des Verfahrens „*crash forming*“ umgeformt, während durch das Verfahren Hybridpressen eine einstufige Tiefziehumformung realisiert werden kann. Obwohl die Blechdicke von 3,8 auf 2,4 mm reduziert wird, kann der Bereich um das Lager L1 (siehe [Abbildung 8-1](#)) nicht einstufig umgeformt werden. Neben der geometrischen Herausforderung durch die schmale Profilbreite bei gleichzeitig hoher Ziehtiefe gibt es einen weiteren verfahrenstechnischen Unterschied zwischen der Umformung durch *crash forming* und dem Hybridpressen. Während bei dem für hohe Blechdicken geeigneten Verfahren *crash forming* in der Regel kein Niederhalter eingesetzt wird, ist beim Hybridpressen ein umlaufender Bauteilflansch erforderlich, der zwischen Matrize und Niederhalter die während des Prozesses zwingend benötigte Abdichtung gegen ein Herauspressen des LFTs gewährleistet.

Eine weitere Herausforderung stellt das Lager L1 selbst dar. Im Original-Querlenker wird eine Lagerhülse schweißtechnisch an den Lenker angebunden, in die nach der Lackierung das passende Elastomerlager eingepresst wird ([Abbildung 8-1](#)). Da beim Schweißen zumindest kurzzeitig hohe Temperaturen entstehen, muss ein zu definierender Mindestabstand zum LFT eingehalten werden. In der bisherigen Entwicklung von Dichtkonzepten für offene und geschlossene Profile (vgl. Kap. 4) ist die Anforderung, einen kunststofffreien Bereich im Bauteil zu erzeugen, nicht berücksichtigt. Das entwickelte Dichtkonzept für ein U-Profil scheint für diese Stelle aufgrund der vergleichsweise hohen Blechdicke im optimierten Querlenker ebenfalls ungeeignet.

Des Weiteren bestehen Zweifel, ob mit einer Blechdicke von 2,4 mm in diesem Bereich die Anforderungen an die Lebensdauer des Bauteils erfüllt werden können. Vor diesem Hintergrund wäre auch die reduzierte Schweißnahtdicke zur Lagerhülse als kritisch zu bewerten.



Abbildung 8-1: Bereich um das Lager L1 des Original-Querlenkers

Aus den genannten Gründen wird der hybride Stahl-LFT-Querlenker zweiteilig ausgeführt, auch wenn diese Lösung für eine Serienanwendung nicht favorisiert wird. Dazu werden ein kleineres Umformteil zur Lageranbindung in der ursprünglichen Blechdicke von 3,8 mm sowie ein Hybridbauteil mit der reduzierten Blechdicke von 2,4 mm ausgelegt. In der Realität existieren ebenfalls Lenkerbauteile, die mehrteilig ausgeführt und schweißtechnisch verbunden sind – Beispiel: Querlenker und Federlenker der Audi Q3 Hinterachse [103]. Im Gegensatz dazu können die beiden Bauteile des Hybridlenkers jedoch aufgrund des LFTs nicht verschweißt werden, so dass eine alternative Fügetechnik eingesetzt werden muss (siehe Kap. 8.1.3).

### 8.1.1 Optimierung der Rippenstruktur

Der hybride Teil des Querlenkers wird nach der bereits im Kap. 7 beschriebenen Optimierungsmethode ausgelegt, wobei aus Gründen der gleichmäßigen Abkühlung im Werkzeug anstelle der variablen LFT-Schicht eine konstante Schichtdicke von 2 mm verwendet wird. Die Parameter der Topologie-Optimierung sind identisch mit den zuvor genannten. Das Ziel ist unverändert eine Maximierung der Bauteilsteifigkeit für die sechs statischen Lastfälle bei Einhaltung der Maximalspannungen im Stahlbauteil und Verwendung von 20 % des zur Verfügung stehenden Designraums für Rippenstrukturen. Die nachfolgende Iso-Ansicht (Abbildung 8-2) als Ergebnis der Topologie-Optimierung zeigt eine Rippenstruktur, die in drei Einzelbereiche unterteilt werden kann: eine steife Anbindung des Lagers L3 mit der neu geformten LFT-Hülse, die Verstärkung des inneren Querlenker-Kragens sowie einzelne Rippen um die Verbindung des Hybridteils mit dem Bauteil zur Lageranbindung.

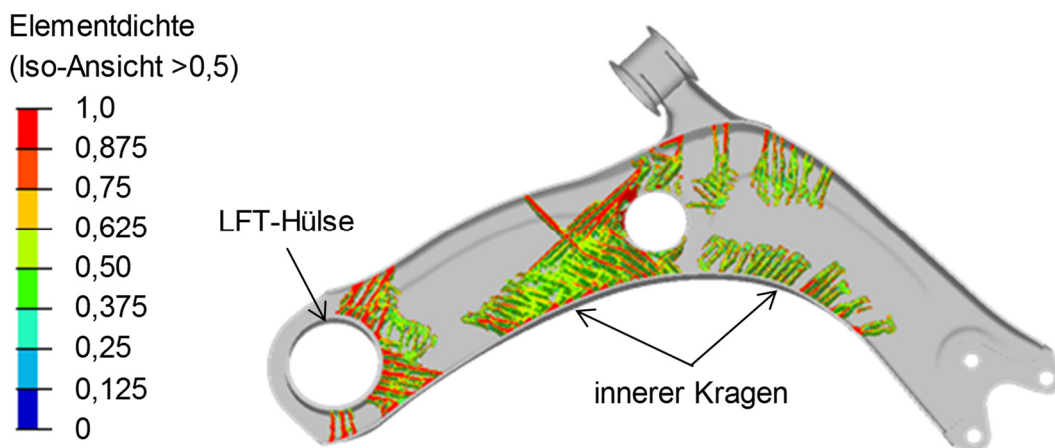


Abbildung 8-2: Ergebnis der Topologie-Optimierung des zweiteiligen Querlenkers

Bei der Überführung des Topologie-Ergebnisses in eine fertigungsgerechte Rippenkonstruktion werden alle Rippen erneut von einer gemeinsamen Projektionsebene oberhalb des Bauteils aus mit einer Entformungsschräge von  $1^\circ$  und einer Anfangsbreite von 2,0 mm extrudiert (vgl. Abbildung 7-9). Daraus folgend weisen die höchsten Rippen im Bauteil (vier Kreuzrippen in Abbildung 8-3) mit einer Maximalhöhe von 30 mm eine Rippenfußbreite von 3,2 mm auf. Gegenüber dem oben gezeigten Topologie-Ergebnis werden wiederum zusätzliche Rippen zur umlaufenden Anbindung der LFT-Hülse am Lager L3 sowie im Bereich des Lagers L2 zur Lastaufnahme für die nichtlinearen Lastfälle konstruiert.

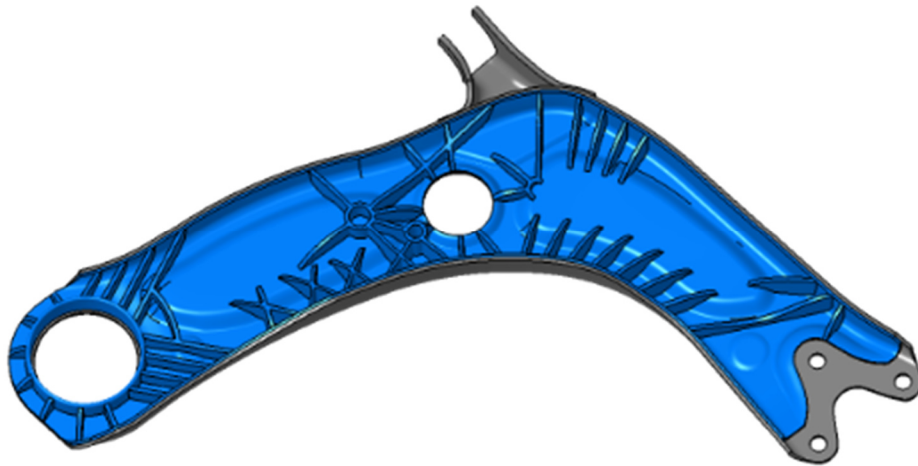


Abbildung 8-3: Konstruierte Rippenstruktur nach dem Ergebnis der Topologie-Optimierung

### 8.1.2 Spannungen und Gewichtsvergleich

Ein Vergleich der Spannungen im Metallblech ([Abbildung 8-4](#)) zeigt deutlich, dass durch die zweiteilige Variante des Querlenkers nach der Topologie-Optimierung gegenüber dem Originalbauteil eine um ca. 20 % geringere Maximalspannung im kritischen Lastfall vorliegt, dessen Wert nach der Konstruktion immerhin noch um 9 % geringer ist. Somit besteht zumindest theoretisch noch ein geringes Potenzial für eine weitere Blechdickenreduzierung. Neben der auftretenden Maximalspannung sollte jedoch auch die Spannungsverteilung im gesamten Bauteil mit dem Originalbauteil vergleichend berücksichtigt werden (vgl. [Abbildung 7-2](#)), da es sich beim Querlenker um ein schwingend belastetes Bauteil handelt, welches somit auch auf eine hohe Bauteil-Lebensdauer ausgelegt sein muss. Der optimierte Hybridlenker (nach Konstruktion) weist trotz geringerer Maximalspannung im Vergleich zum Original-Querlenker höhere Spannungen im mittleren Bauteilbereich auf. Einerseits spricht dies für eine bessere Werkstoffausnutzung und somit eine höhere Leichtbaugüte, andererseits kann dadurch die Lebensdauer reduziert sein, wenn die Spannungen einen Wert von >40-60% der Zugfestigkeit erreichen [104]. Aus diesem Grund wird keine weitere Blechdickenreduktion vorgenommen.

Neben den Spannungen im Stahlblech können analog zur vorgestellten Optimierungs- und Berechnungsmethodik aus Kap. 7 nach der Konstruktion und Vernetzung der LFT-Struktur auch die auftretenden Spannungshöhen im LFT abgeschätzt und die lokalen Stellen der höchsten Spannungen bewertet werden (siehe [Abbildung 8-5](#)).

Vergleichbar mit dem einteiligen Querlenker treten die höchsten LFT-Spannungen ebenfalls in den Verbindungsrippen des L3-Lagers zum Blech des Querlenkers auf, wobei die höchst belasteten Bereiche erneut direkt an der Anbindung zur LFT-Hülse zu finden sind. Die Ursache liegt abermals in der starren Abbildung des Lagers in der FE-Simulation begründet, während das Elastomerlager an dieser Stelle in der Realität deutlich mehr Eigenbewegung zulassen und somit die LFT-Struktur weniger stark beanspruchen würde. Durch das komplexe Materialverhalten aufgrund der unbekanntenen Faserorientierung und -verteilung des LFTs kann eine Bewertung der LFT-Struktur erst im Realversuch mit eingepressten Elastomerlagern erfolgen.

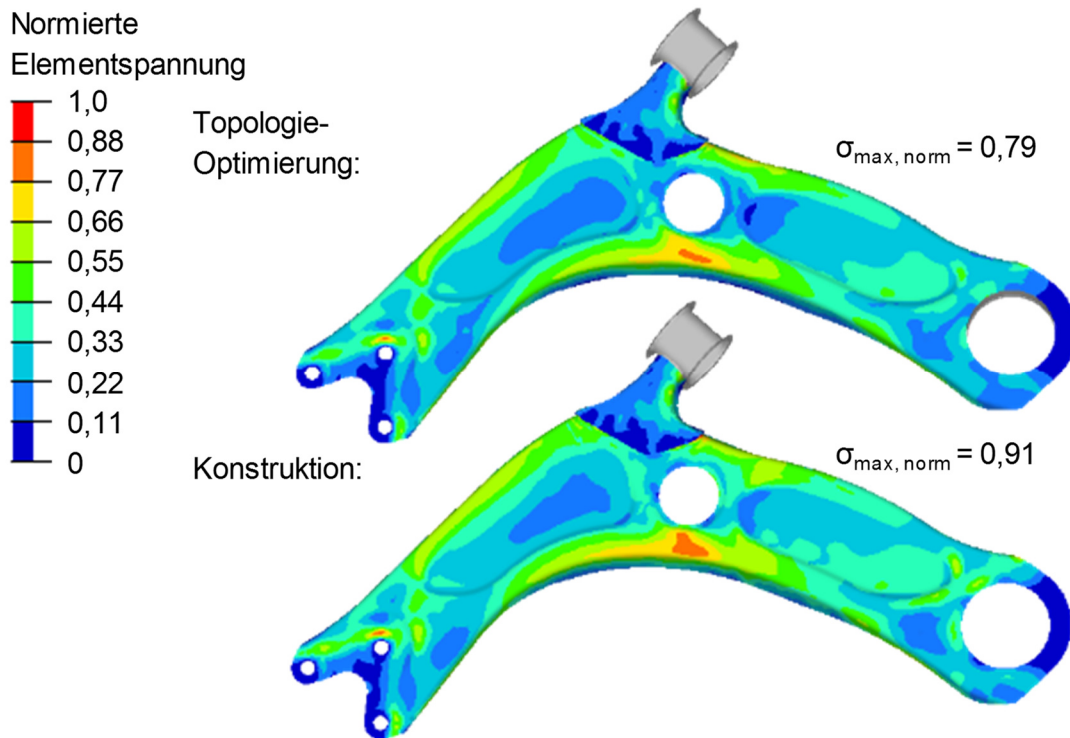


Abbildung 8-4: Vergleich der Spannungsverteilungen im Stahlblech nach Topologie-Optimierung und Konstruktion für den kritischen Lastfall 6 (2-teilige Variante)

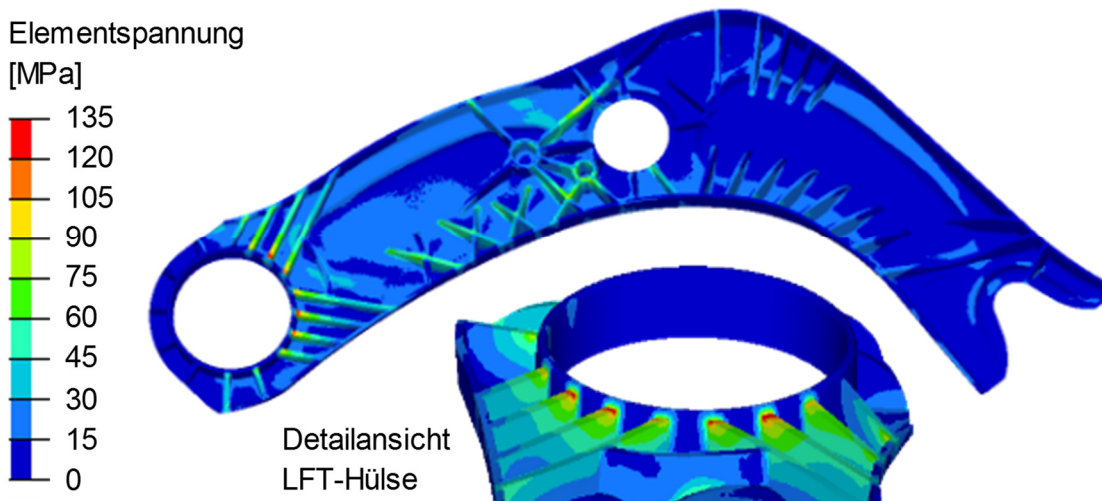


Abbildung 8-5: Simulierte LFT-Spannungen im 2-teiligen Querlenker im Lastfall 6

Durch die Auslegung und Konstruktion des hybriden Querlenkers als zweiteiliges Bauteil kann die erzielte Gewichtsreduktion des einteiligen Hybridlenkers nicht ganz erreicht werden. Die errechnete Gesamtmasse von beiden Stahlblechen (196 g und 1.378 g) inklusive der LFT-Verstärkung (320 g) beträgt 1,894 kg, was einer Gewichtsreduktion von -21,2 % („lochfreie“ Variante) bzw. -19,9 % (Original-Querlenker) entspricht. Die Berechnung der wahren Gewichtsreduktion kann erst nach der Fertigung und dem anschließenden Bauteilbeschnitt erfolgen und ist daher in Kap. 8.7 aufgeführt.

### 8.1.3 Versuche zur Fügetechnik

Eine Möglichkeit zur Verbindung der beiden Einzelbauteile stellen beispielsweise fließlochformenden Schrauben, sogenannte „FDS®-Schrauben“ (*flow drill screws*) der Firma EJOT, dar. Diese wurden ursprünglich für eine Verbindung von Aluminiumprofilen mit Stahlblechen entwickelt und können bei Verwendung eines vorgelochten Klemnteils (in diesem Fall das Anbindebauteil) für höchstfeste Stähle bis zu einer Festigkeit von 1.000 MPa eingesetzt werden [105]. Die maximal prozessfähige Festigkeit des Einschraubmaterials sinkt dabei mit steigender Blechdicke [106].

Im Technikum der Firma EJOT wurden Scherzugproben mit bis zu 2,4 mm Einschraubblechdicke bei einer Werkstofffestigkeit von  $R_m > 590$  MPa (CR330Y590T von voestalpine) sowie einer Paarung 2,0 mm /  $R_m > 780$  MPa (HCT780X von voestalpine) mit einem M5-Fügeelement hergestellt. Der Fügeprozess ist dabei in vier Einzelschritte unterteilt, für die jeweils eigene Parameter für Drehzahl und eingesetzte Kraft bzw. das Moment im Endanzug definiert werden: 1) Finden, 2) Durchzug, 3) Gewinde formen und 4) Endanzug. Das Aufschmelzen des Durchzugs erfolgt z.B. mit 2.000 Umdrehungen pro Minute bei einer Anpresskraft von 3.000 N. Im Anschluss wird das Gewinde geformt und die Schraubverbindung mit dem gewählten Anzugsmoment fixiert. Die Blechdicke des Klemnteils ist bei Verwendung einer Vorbohrung von untergeordneter Bedeutung, daher wurde bei beiden Paarungen das 2,4 mm-Blech eingesetzt. Die Verbindung wird als prozesssicher angesehen, wenn sich beide Bleche nach Einbringung des Fügeelements nicht mehr von Hand zueinander verdrehen lassen. Mit den hergestellten Proben werden im Scherzugversuch Maximalkräfte von 10,2 kN (2,0 mm /  $R_m > 780$  MPa) und 12,7 kN (2,4 mm /  $R_m > 590$  MPa) erreicht, wobei alle Zugproben durch einen Scherbruch des FDS-Schraubkopfs versagen. Als Prüfgeschwindigkeit werden 2,0 mm/min gewählt und die Wegmessung erfolgt über die Traverse der Zugmaschine. Die Kraft-Weg-Verläufe für je drei Blechdickenpaarungen sind in [Abbildung 8-7](#) dargestellt.

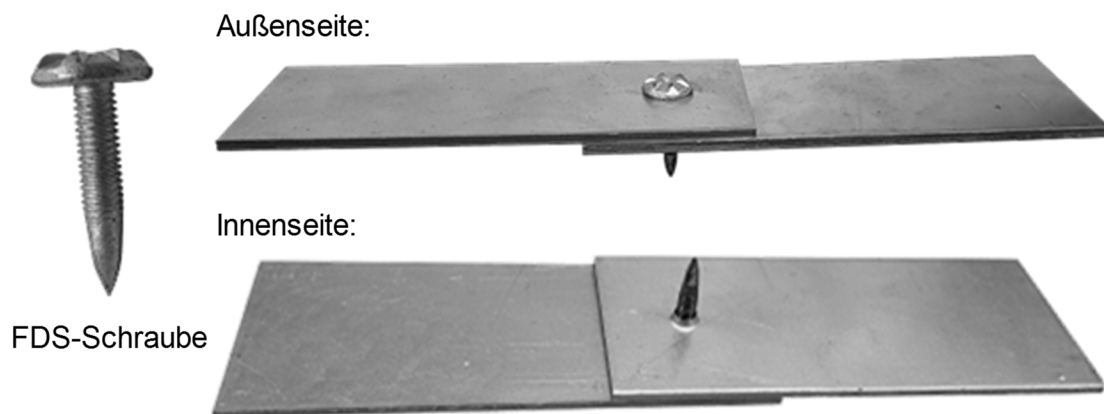


Abbildung 8-6: FDS-Schraubverbindung 2,4/2,4 mm Stahlblech ( $R_m > 590$  MPa)

Da die Entwicklung und Bewertung einer Fügetechnik nicht Ziel dieser Arbeit ist, wird für die Auslegung des hybriden Querlenkers mit Hilfe der FEM-Optimierungsmethode im Folgenden eine idealisierte Fügetechnik durch Einsatz von RBE-Elementen an insgesamt sechs Fügstellen verwendet.



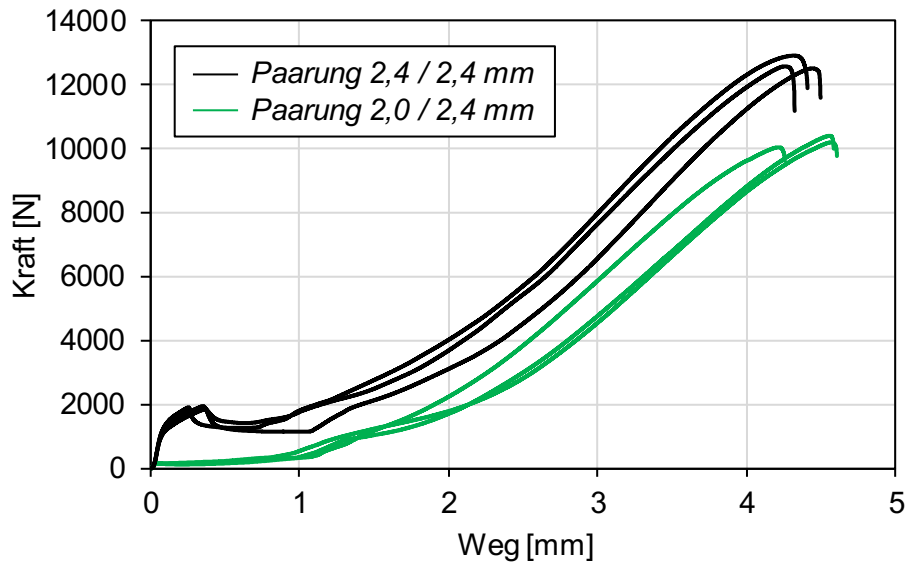


Abbildung 8-7: Kraft-Weg-Verläufe der FDS-Scherzugprüfung

## 8.2 Werkzeugauslegung und -optimierung

Vor der Auslegung und Konstruktion des kombinierten Um- und Urformwerkzeugs muss zunächst die Auswahl eines geeigneten Dichtkonzepts erfolgen. Der Original-Querlenker weist an allen drei Lagerstellen ein offenes Profil auf, wobei durch den Wechsel zu einer zweiteiligen Bauteil-Variante das Lager L1 im hybriden Bauteil und somit eine Abdichtungsstelle entfällt. Die verbleibenden beiden Lager werden zunächst zu einer geschlossenen Wannengeometrie geformt, so dass die Abdichtung vollständig über einen umlaufenden Flanschbereich zwischen Matrize und Niederhalter realisiert werden kann (siehe [Abbildung 8-8](#)). Daraus resultiert zwar ein höherer Verschnitt-Anteil durch das erforderliche nachträgliche Abtrennen dieser Bereiche, eine funktionierende Abdichtung auch bei hohen Pressdrücken ist jedoch essenziell für den Herstellungsprozess. Durch die umlaufende Ziehanlage um das Bauteil und den radialen Übergang (R6) erhöht sich gleichzeitig die maximale Ziehtiefe des Bauteils und es entsteht auch hierbei ein zusätzlicher Verschnitt. [Abbildung 8-9](#) zeigt das beschnittene Bauteil bzw. Blech in der erweiterten Werkzeugmatrize mit den geschlossenen Bauteilenden und dem Ziehradius.

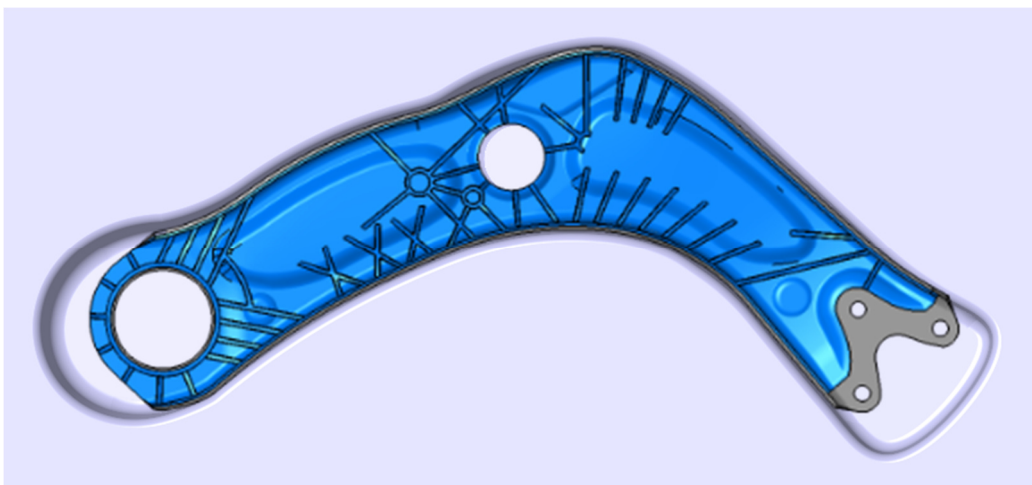


Abbildung 8-8: Erweiterung der Matrize um zwei geschlossene Enden

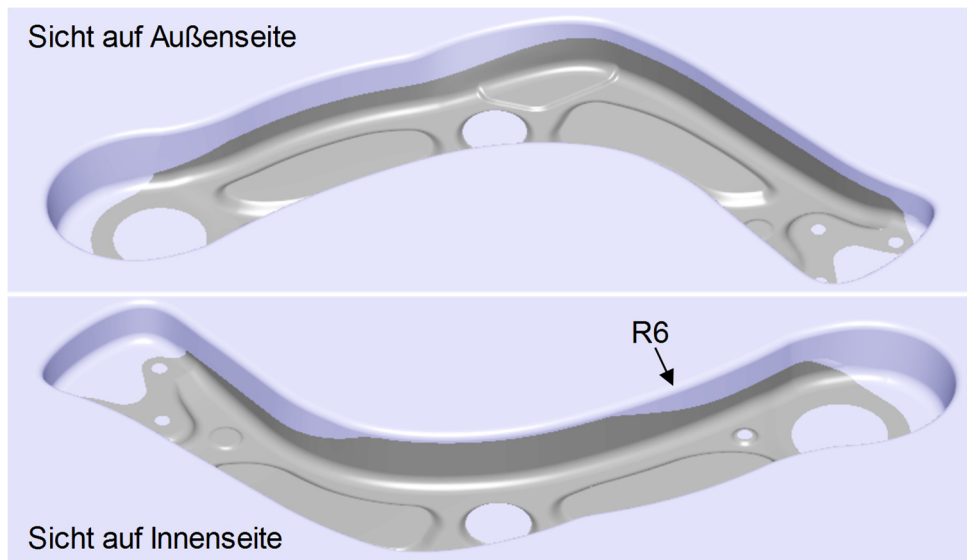


Abbildung 8-9: Ziehanlage des Querlenker-Werkzeugs mit umlaufend konstantem Radius

Erst im Versuch zeigt sich, ob die Radien am rechten Bauteilende (Erweiterung um das Lager L2) zu klein ausgelegt worden sind, da hier vor allem beim Einsatz hochfester Werkstoffgüten bereits zu einem frühen Zeitpunkt der Umformung Risse auftreten können. Durch eine manuelle Nacharbeit mit gleichzeitiger Vergrößerung der Radien in diesem Bereich kann das Einzugsverhalten des Stahlblechs im Bedarfsfall erheblich verbessert werden. Generell ist darauf zu achten, die Umformwerkzeuge für das Hybridpressen blechfreundlich auszulegen. Hierzu zählt neben einem gleichmäßigen Ziehspalt zwischen Matrize und Niederhalter vor allem auch eine glatte und nach Möglichkeit polierte Werkzeugoberfläche an jenen Stellen, über die das Blech gezogen wird. Für das Hybridpressen sind hierbei besonders die Einzugsradien der Matrize relevant. Einem ungleichmäßigen Blecheinzug kann durch Unterlegen von Hilfsblechen auf der Niederhalterplatte mit der identischen Blechdicke des umzuformenden Werkstoffs entgegengewirkt werden, um einen gleichmäßigen Druck zwischen Matrize und Niederhalterplatte aufrecht zu erhalten. Ansonsten ist der Werkzeugaufbau mit dem der Wannengeometrie vergleichbar. Das Werkzeug ist ebenfalls in Hutlage angeordnet und die Niederhalterkraft wird durch ein im Pressentisch befindliches hydraulisches Ziehkissen realisiert. Zur Temperierung von Stempel, Niederhalterplatte und Matrize sind elektrische Heizelemente im Werkzeug integriert.

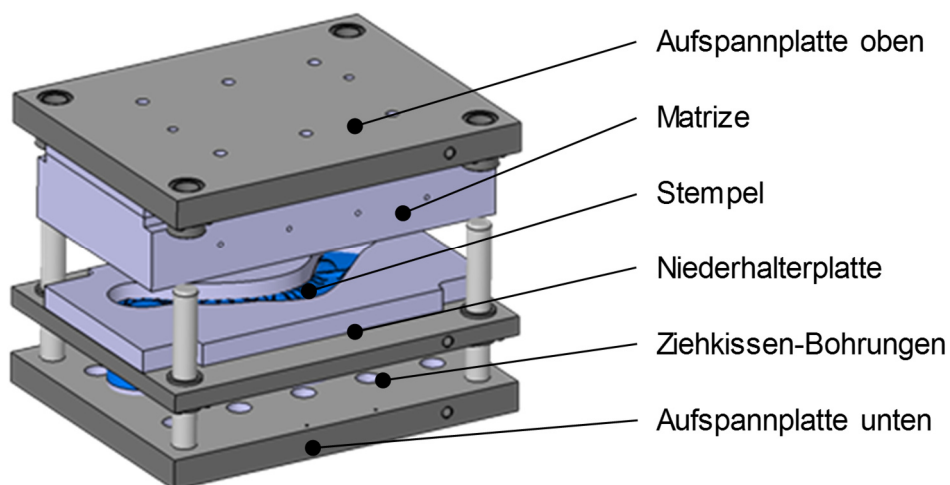


Abbildung 8-10: Werkzeuganordnung des Querlenker-Demonstrators



### 8.3 Prozessauslegung

Die Pressversuche zum Hybridpressen des Querlenkers erfolgen auf einer ehemaligen Serienpresse (1.400 t) einer Pressenstraße bei voestalpine Automotive Components in Schwäbisch Gmünd mit dem Baujahr 1977. Aufgrund des Alters der Steuerelektronik ist diese Presse in der Einstellbarkeit eines Geschwindigkeitsprofils und der Niederhalterkraft limitiert. Für die Niederhalterkraft kann nur ein konstanter Wert über den gesamten Pressenhub voreingestellt werden. Zur Reduzierung der Verfahrgeschwindigkeit im Pressgang wird ein sogenannter „Bremsgang“ über den gesamten Schließweg des Werkzeugs eingesetzt. Eine automatische Reduzierung der Pressgeschwindigkeit zum Prozessende hin erfolgt durch die Komprimierung des LFTs, da die gewählte Presskraft zu diesem Zeitpunkt noch nicht vollständig anliegt, sondern erst langsam (innerhalb von ca. 5 Sekunden) aufgebaut wird. Dieser langsame Presskraftaufbau ist ebenfalls dem Alter der Presse geschuldet und für den Prozess insgesamt eher negativ zu bewerten, da der LFT während der Phase des Presskraftaufbaus bereits abkühlen kann und somit an Fließfähigkeit einbüßt. Eine Aufzeichnungsfunktion der Ist-Werte existiert im Vergleich zur FLB-Presse (siehe Kap. 4.3.3) nicht.

Als Werkstoffe werden sowohl ein phs-Ultraform-1500 (2,35 mm), nachfolgend als UF-1500 bezeichnet, mit den mechanischen Eigenschaften nach Tabelle 3-2 sowie der weiche Kaltwalzstahl DC04 (2,4 mm) eingesetzt. Mit Hilfe dieser beiden Werkstoffe soll die Ausformung durch den Kunststoffdruck vergleichend bewertet werden. Dabei ist zu erwarten, dass der weichere DC04-Stahl eine exaktere Konturkonformität erzielen wird. Des Weiteren soll überprüft werden, ob auch ein hochfester Stahl mit zugleich hoher Blechdicke mithilfe eines LFT-Drucks um- bzw. ausgeformt werden kann und somit ein weites Anwendungsspektrum hinsichtlich der Stahlwerkstoffe für das Verfahren Hybridpressen ermöglicht. Gegenüber der berechneten LFT-Einlegemenge von 550 g werden im Versuch ca. 600 g (+10 %) eingesetzt, da hierdurch eine verbesserte Formfüllung erzielt wird. Somit erhöht sich die konstante LFT-Schichtdicke von 2,0 mm auf ca. 2,4 mm – ein Einfluss auf die Rippen besteht nicht. Der LFT wird durch beidseitige mittelwellige Infrarotstrahlung plastifiziert und anschließend in aufgerollter Form großflächig auf dem Werkzeugstempel verteilt (Abbildung 8-11). Im Anschluss kann das vortemperierte Blech mit der Haftvermittlerseite direkt auf dem Niederhalter platziert und durch Führungselemente exakt positioniert werden.



Abbildung 8-11: Einlegeposition von ca. 600 g LFT im Querlenker-Werkzeug

Als Presskraft wird eine Maximalkraft von 10.000 kN (ca. 1.000 t) auf den Stempel ausgeübt, woraus abzüglich der Niederhalterkraft von konstanten 250 kN und aus der projizierten Stempelfläche (78.215 mm<sup>2</sup>) ein LFT-Druck von etwa 1.250 bar resultiert. Aufgrund der im Vergleich zum Pressentisch kleinen Werkzeugfläche kann die Maximalkraft der Presse nicht vollständig

ausgenutzt werden. Angaben zum verwendeten Schmierstoff für die Niederhalterplatte befinden sich in Kap. 3.3.4.

## 8.4 Bewertung von Blechumformung und -beanspruchung

Die softwaregestützte Analyse der Blechumformung und -beanspruchung erfolgt analog zur bereits vorgestellten Methode in Kap. 5 mit Hilfe des ARGUS-Systems von GOM. Das Punktraster wird dabei erneut mittels elektrolytischer Ätzung auf die bereits mit Haftvermittler beschichteten Formplatinen aufgebracht. Durch die Phosphatierung und anschließende Passivierung der Metallbleche im Zuge der Vorbehandlung vor der Applikation des Haftvermittlers weisen die metallischen Oberflächen teilweise Ungleichmäßigkeiten auf, so dass auch das Punktraster an einigen Stellen weniger stark ausgeprägt ist und somit nicht vollständig von der Software erkannt wird. Des Weiteren übertrifft die Größe der Formplatine für den Querlenker die Größe der verwendeten Rasterschablone, so dass das Punktraster entweder in zwei Schritten aufgebracht werden muss oder die Randbereiche des Querlenkers in der Auswertung nicht berücksichtigt werden können. Für die Bewertung der maximalen Ausformung und der werkstofflichen Beanspruchung sind jedoch vor allem die tiefen Bereiche (Verprägungen) von besonderer Relevanz. In der Zarge und im Flanschbereich sind bei rissfreier Umformung keine kritischen Stellen oder unzureichende Ausformungen zu erwarten.

### 8.4.1 Bewertung der Ausformung

Vor der quantitativen Auswertung mit Hilfe des ARGUS-Systems kann die Bewertung der Ausformung zunächst rein visuell erfolgen. Dazu sind nachfolgend zwei hybridgepresste Querlenker aus dem weicheren Kaltumformstahl DC04 ([Abbildung 8-12](#)) sowie dem hochfesten UF-1500-Stahl ([Abbildung 8-13](#)) abgebildet. Beide Bauteile belegen, dass das umlaufende Dichtkonzept durch die Niederhalterplatte gut funktioniert und eine saubere Trennlinie zwischen LFT und Flanschbereich ermöglicht. Unterstützend wirkt sich dabei auch der aktivierte Haftvermittler aus, der nach Vorwärmung der Platinen als zusätzliche Barriere für den LFT fungiert. Im Vergleich der beiden Bauteile wird beim DC04-Stahl die verbesserte Ausformung gegenüber dem UF-1500 durch schärfere Geometrieübergänge sichtbar. Vor allem die Rundungen und kleinen Einprägungen zur späteren Bauteilpositionierung für den Zusammenbau sind beim DC04 ausgeprägter als beim UF-1500. Ein weiteres Merkmal stellt der durch Kontakt mit der Werkzeugmatrize entstehende Abdruck auf dem Blech dar. Beim UF-1500-Stahl ist um das mittige Montageloch des Lenkers erkennbar, dass die Übergänge zu den Bauteilvertiefungen (Verprägungen) ohne Matrizenkontakt geformt werden (siehe Kennzeichnung in [Abbildung 8-13](#)). Im Gegensatz dazu ist der flache Bereich mit Matrizenkontakt beim DC04-Stahl im gleichen Bereich etwas ausgeprägter.

Während auf den metallischen Außenseiten der Querlenker die Blechumformung beurteilt werden kann, erlauben die Innenseiten Rückschlüsse auf die Verteilung des LFTs. Alle LFT-Rippen sind in beiden Bauteilen vollständig gefüllt und die flächige LFT-Schicht bedeckt das Blech nahezu vollständig. Lediglich an den mit weißen Pfeilen markierten Stellen bleibt das Blech auch nach der Umformung noch sichtbar, so dass der Kunststoffdruck hier nicht ausreichend hoch war, um das Blech vom Stempel zu lösen und vollständig auszuformen. Erwartungsgemäß liegt dort während der Umformung die höchste Flächenpressung zwischen Blech und Stempel vor. Beide Stellen befinden sich jedoch im Beschnittbereich des Querlenkers und sind somit bei reproduzierbarer Herstellung zunächst als unkritisch zu bewerten.



Abbildung 8-12: Hybridgepresster Querlenker aus DC04-Stahl (weiße Pfeile = sichtbarer Stahl)

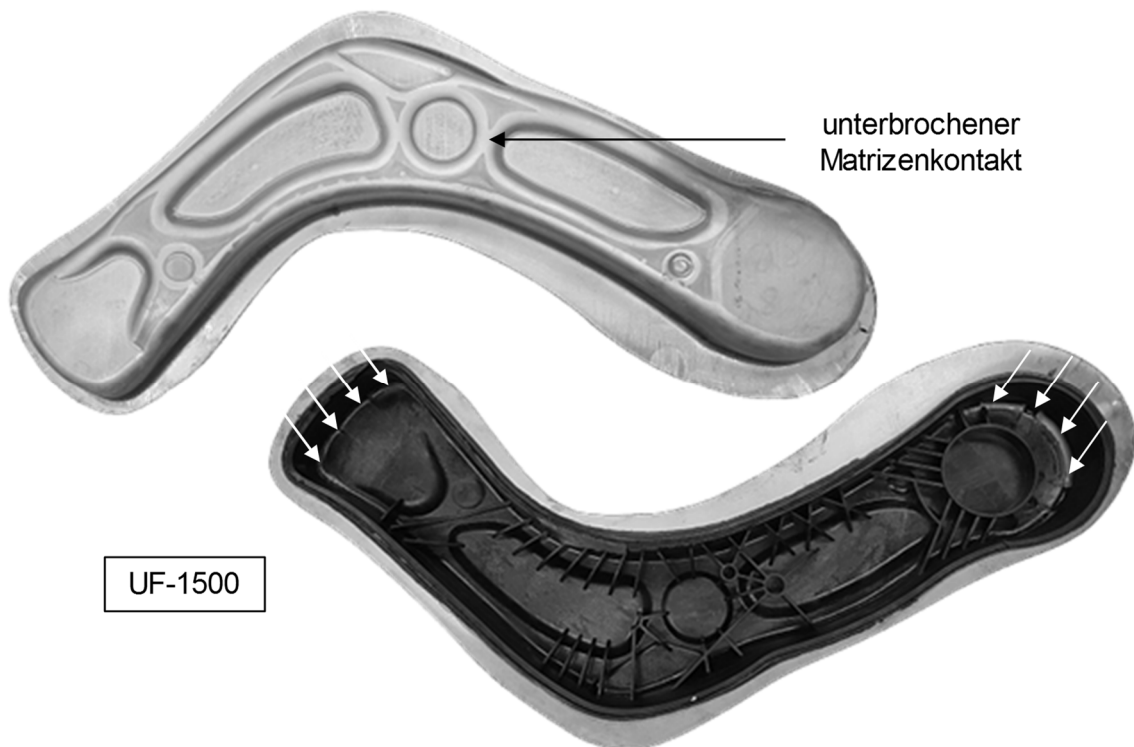


Abbildung 8-13: Hybridgepresster Querlenker aus phs-Ultraform-1500 (ungehärteter Zustand, weiße Pfeile = sichtbarer Stahl)

Erst durch die analytische Auswertung mittels GOM-ARGUS wird die fehlende Ausformung bei beiden Werkstoffen quantifizierbar. Aufgrund der unterschiedlich gewählten Skalierung zur Darstellung der maximalen Defizite wird deutlich, dass es jeweils einen dominierenden Bereich pro Bauteil mit unzureichender Ausformung gibt (lila). Während beim DC04-Stahl im Maximum etwa

1,5 mm an Ausformung fehlen, beträgt die Differenz zwischen Bauteil und CAD-Geometrie beim UF-1500 bereits bis zu 2,5 mm.

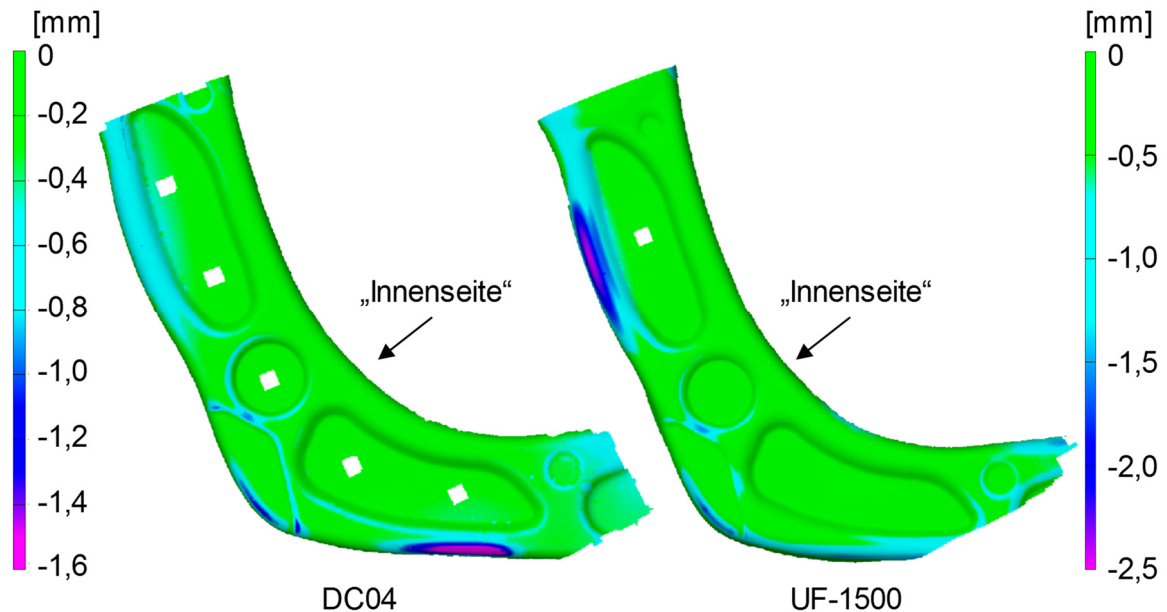


Abbildung 8-14: Vergleich der Ausformung von DC04 und UF-1500-Stahl gegenüber der CAD-Geometrie

Aufgrund der händischen Einlage des LFTs ist dessen Einlegeposition im Versuch nicht exakt reproduzierbar, so dass im Verlauf der Versuche die Bauteilstellen mit fehlender Ausformung variieren – zumeist sind jedoch die in [Abbildung 8-14](#) aufgezeigten Stellen neben den Bauteilverprägungen betroffen. Zudem fällt auf, dass bei jedem Bauteil an der Innenseite eine vollständige Formfüllung und Blechausformung gegeben ist, während fehlende Ausformungen nur auf der Außenseite der Bauteilkrümmung auftreten. Als Hauptursache wird hierfür die höhere Anpresskraft des Blechs auf die Stempelaußenseite während der Umformung identifiziert, die auch bereits für die unzureichende Ausformung in [Abbildung 8-12](#) und [Abbildung 8-13](#) an den geschlossenen Bauteilenden verantwortlich ist. An diesen Stellen ist die Flächenpressung zwischen Blech und Stempel im Werkzeug am größten, so dass Teilbereiche mit fehlender LFT-Schicht (Nulldicke) möglich sind. Innerhalb des Beschnittbereichs (Bauteilbereich) gibt es jedoch lediglich Bereiche mit fehlender Ausformung und folglich sehr dünner LFT-Schicht, aber keine LFT-freien Bereiche.

Nachfolgend sind zur Verdeutlichung der LFT-Verteilung im Querlenker drei Schnittbilder dargestellt, welche die vollständige Ausformung an den Bauteilinnenseiten gegenüber den Außenseiten im Schnitt A-A verdeutlichen (blauer Kreis). Es handelt sich um Schnitte durch einen DC04-Querlenker, wobei die generelle LFT-Verteilung und Ausformung beim UF-1500 Stahl nach [Abbildung 8-14](#) vergleichbar ist.

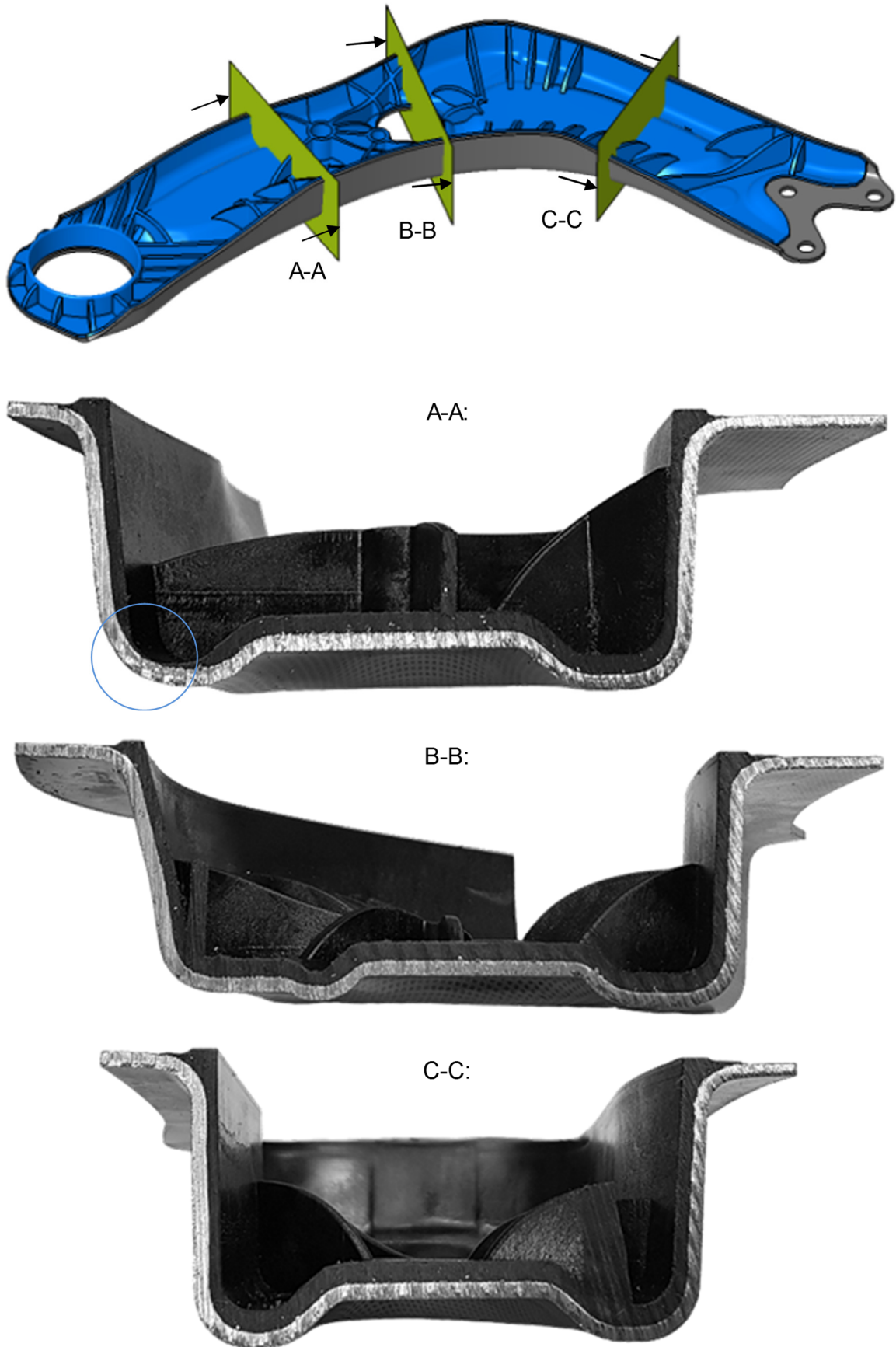


Abbildung 8-15: Schnittansichten zur LFT-Verteilung in einem DC04-Querlenker

Aus den Ansichten folgt, dass die fehlende Ausformung des Blechs nicht in erster Linie von den lokalen geometrischen Gegebenheiten (z.B. Radien) abhängt, sondern die Verteilung des LFTs während des Hybridpressens und eine vollflächige Einlage des LFTs im Werkzeug ebenfalls von großer Bedeutung sind. Beispielsweise ist der tiefe, äußere Radius im Schnitt C-C deutlich kleiner und somit umformtechnisch mit einem höheren Druck zu formen als jener im Schnitt A-A. Dennoch ist der Radius im Schnitt C-C wesentlich besser und zudem mit einer konstanten LFT-Schichtdicke ausgefüllt. Der kleinste Bauteilradius befindet sich im Schnitt B-B und ist ebenfalls durch Kunststoffdruck ausgeformt. Die Konturabweichung von der Stempelgeometrie deutet allerdings auf eine unvollständige Ausformung des Blechs an dieser Stelle hin.

In zukünftigen Entwicklungen ist es daher ratsam, die Einlage des LFTs zu optimieren und nach Möglichkeit auch zu automatisieren, um einerseits den Materialfluss im Prozess zu verbessern und andererseits reproduzierbare Bedingungen zu schaffen. Denkbar wäre zum Beispiel eine endkonturnahe Vorform des LFTs durch vorgeformte Extrudate.

### 8.4.2 Mechanische Werkstoffbeanspruchung

Weder der DC04-Stahl noch der UF-1500 zeigen nach dem Hybridpressen Risse oder Stellen extremer Ausdünnung, die im weiteren Verlauf zu Rissen im Bauteil führen können. Die Auswertung der Werkstoffbeanspruchung mit Hilfe der Grenzformänderungsdiagramme bestätigt diese erste Einschätzung. Die Punktwolke des DC04 liegt deutlich unter der 20 %-FLC, so dass der Werkstoff noch genügend Reserven für eine weitere Umformung / Formänderung aufweist. Die Stellen der maximalen Formänderung befinden sich am Außenradius des Querlenkers und in den beiden Ecken der beiden länglichen Bauteilverprägungen. Aufgrund der Entfernung zur Umformgrenze sind diese für den DC04-Stahl jedoch als unkritisch zu bewerten.

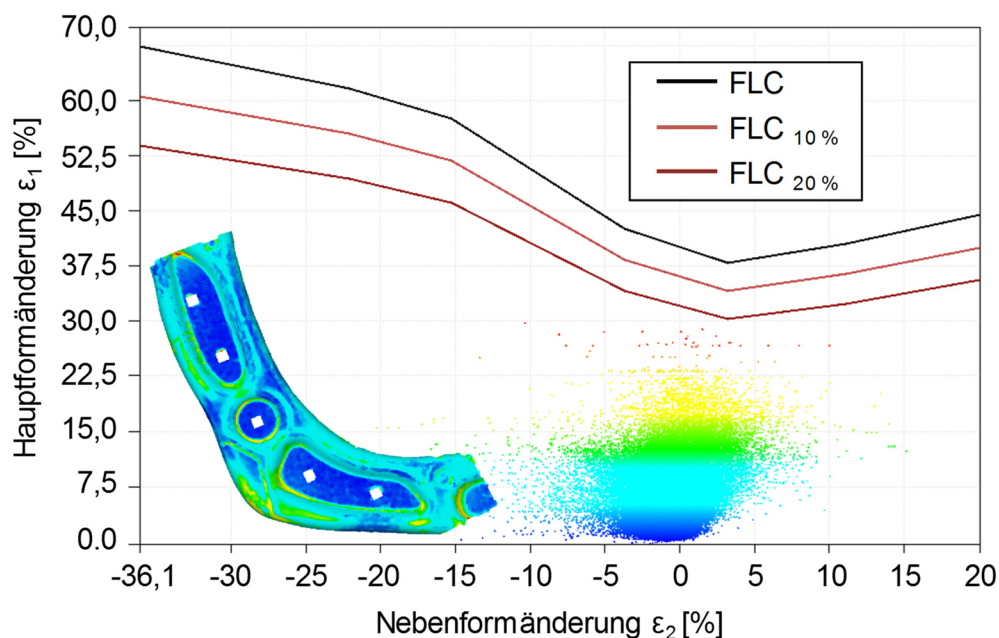


Abbildung 8-16: Grenzformänderungsdiagramm des DC04-Hybrid-Querlenkers

Anders stellt sich die Situation beim UF-1500-Stahl dar, der aufgrund seiner circa um einen Faktor 2 niedrigeren Bruchdehnung deutlich weniger Formänderung toleriert. Diese Eigenschaft spiegelt sich auch im Grenzformänderungsdiagramm wider, in dem einige Punkte der Punktwolke bereits die 20 und 10 %-FLC überschritten haben und somit nur noch ein geringes Po-



tenzial für weitere Umformungen aufweisen. Die höchstbelasteten Bereiche sind analog zum DC04-Querlenker in den Ecken der Bauteilverprägungen zu finden. Die Werkstoffbelastungen im äußeren Radius des Querlenkers sind hingegen etwas geringer als beim DC04-Querlenker.

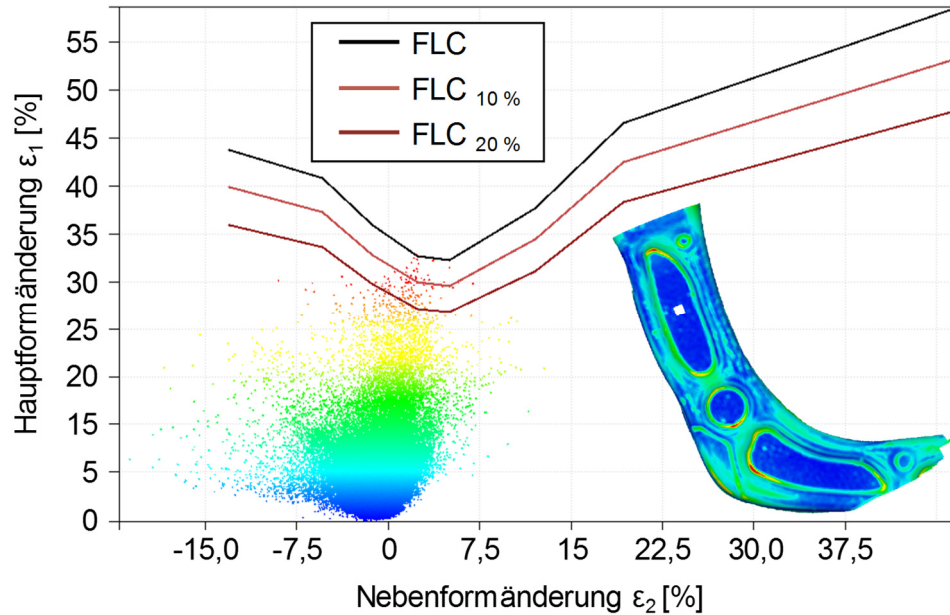


Abbildung 8-17: Grenzformänderungsdiagramm des UF-1500-Hybrid-Querlenkers

Entgegen der ersten Erwartung, die kritischen Bauteilbereiche befänden sich an den Stellen der größten Ziehtiefe und überwiegend am äußeren Bauteilradius, verdeutlichen die Grenzformänderungsdiagramme, dass auch die Bauteilverprägungen bei der geometrischen Auslegung des hybriden Querlenkers berücksichtigt werden müssen. Diese Tatsache wird zusätzlich durch die berechneten Ausdünnungen der beiden Blechwerkstoffe belegt (Abbildung 8-18). Die verwendeten Übergänge der Vertiefungen entstammen dem Original-Querlenker und könnten leicht in einer zusätzlichen Optimierungsschleife abgeschwächt werden.

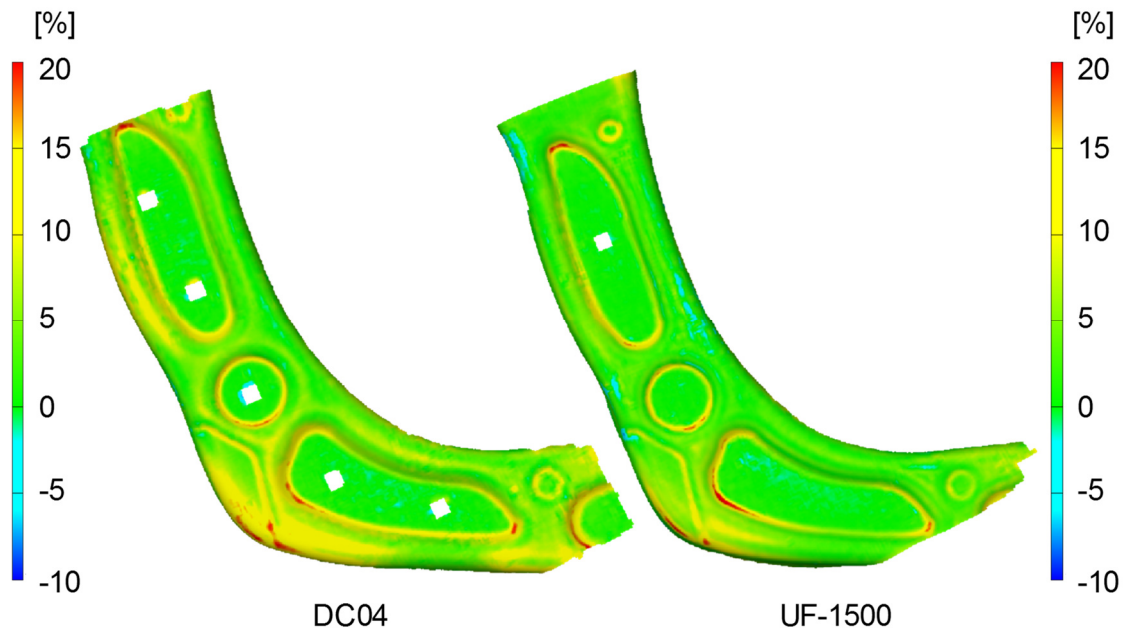


Abbildung 8-18: Vergleich der Ausdünnung zwischen DC04 und UF-1500



### 8.5 Beschnitt mittels 3D-Wasserstrahlschneiden

Der Bauteilbeschnitt erfolgt endkonturnah mit Hilfe des 3D-Wasserstrahlschneidens auf einer 5-Achs-Hochdruck-Anlage des Fraunhofer IPT in Aachen. Die Wasserstrahlbearbeitung eignet sich sehr gut zur mechanischen Bearbeitung von Faserverbundwerkstoffen, da es sich um einen kalten Trennprozess handelt, der keine Wärme in den Werkstoff einbringt und zudem mit Drücken von bis zu 6.000 bar sowie dem Einsatz verschiedener Abrasivmedien eine große Flexibilität besitzt. Nachteilig wirkt sich hingegen der Verschleiß der Wasserdüsen bei Verwendung von Abrasivmedien aus, obgleich dieser geringer ausfällt als z.B. bei einem Fräser [107]. Zusätzlich müssen die Bauteile nach dem Beschnitt schnell getrocknet werden, um vor allem bei unverzinkten Blechen (hier: DC04) eine sofortige Korrosion zu vermeiden.

Vorversuche beim Fraunhofer IPT haben zudem aufgezeigt, dass durch Einsatz von Abrasivmedien, z.B. Flusssand in verschiedenen Korngrößen, und einer gezielten Steuerung des Wasserdrucks sowohl eine gemeinsame Durchtrennung von Stahl und LFT als auch ein alleiniger Abtrag der innenseitigen LFT-Schicht möglich sind. Dies ist insbesondere im Bereich des Lagers L2 von Vorteil, da das dortige Kugelkopflager zur Verbindung mit dem Rad über eine Flanschplatte an den Querlenker angebunden wird und eine Verschraubung über die LFT-Schicht zur Aufrechterhaltung der Vorspannkraft vermieden werden muss.

Vor dem Beschnitt wird eine 3D-Beschnittlinie im CAD-Datensatz definiert und der benötigte Schnittwinkel ( $<90^\circ$ ) bestimmt, bei dem keine Zerstörung der hinter dem Blech liegenden Rippenstruktur durch den austretenden Wasserstrahl erfolgen kann. Zur Vermeidung von Transformationsfehlern durch die verschiedenen Koordinatensysteme von Bauteil und Wasserstrahlanlage wird des Weiteren eine Halterung benötigt, die das Bauteil im eigenen globalen Fahrzeugkoordinatensystem positioniert und zusätzlich zwei feste Achsen (x, y) zur Ausrichtung in der Wasserstrahlanlage aufweist. Nachfolgend ist die verwendete Halterung des Querlenkers abgebildet, die aus einer 20 mm-Stahlplatte mit insgesamt drei Auflagepunkten besteht, von denen die beiden rechten Auflageelemente die exakte 3D-Gegenkontur von Rippenzwischenräumen abbilden und somit eine kippfreie Einspannung des Querlenkers ermöglichen.

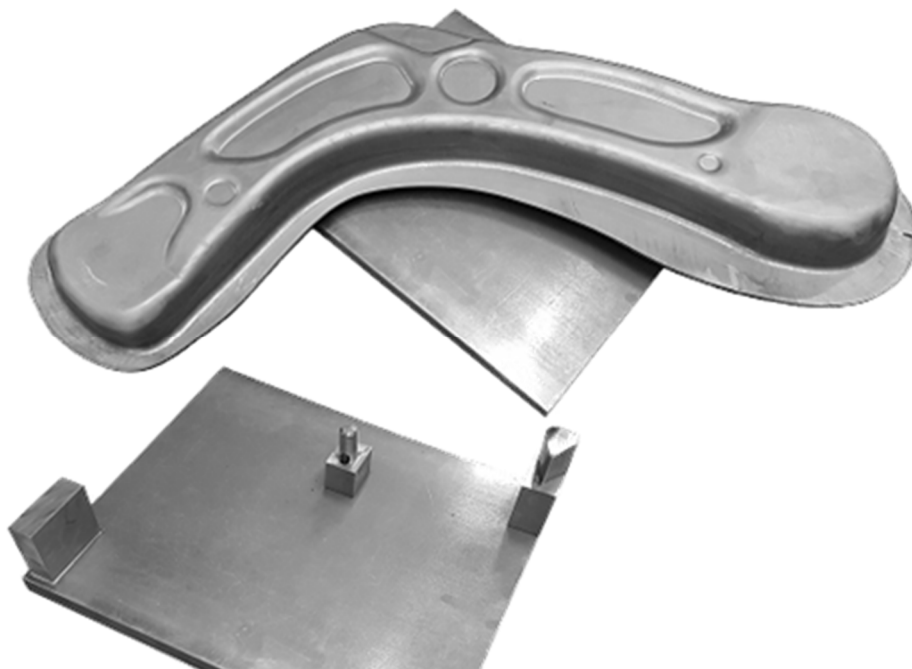


Abbildung 8-19: Aufs Spannplatte zur Fixierung des Querlenkers für den Wasserstrahlbeschnitt

Die nachfolgende Tabelle 8-1 fasst die verwendeten Maschinenparameter zum Beschnitt des Querlenkers mittels Wasserstrahlschneiden zusammen. In Bezug auf die Schnittgeschwindigkeit besteht ein anlagenseitiges Potenzial von bis zu 1.000 mm/min. Aus Gründen der Schnittüberwachung und da es sich nicht um einen Serien-Schneidprozess handelt, wird auf eine Optimierung hin zur maximalen Schnittgeschwindigkeit verzichtet.

<b>Wasserstrahldruck:</b>	3.000 bar
<b>Strahldurchmesser:</b>	0,54-0,8 mm
<b>Schnittgeschwindigkeit:</b>	90 mm/min
<b>Abrasivmedium:</b>	Granatsand 120 mesh (0,180-0,25 mm)
<b>Menge Abrasivmedium:</b>	300 g/min

Tabelle 8-1: Maschinenparameter 3D-Wasserstrahlschneiden

### 8.6 Lageranbindung mittels eingepresster Stahlhülse

Für das senkrecht angeordnete Lager L3 des Hybridlenkers, welches im Original-Querlenker in einen geformten Stahlkragen eingepresst wird, muss aufgrund der Kriechneigung von Kunststoffen eine alternative Lösung gefunden werden. Die Idee des Warmeinbettens einer Metallhülse in eine fließgepresste LFT-Hülse entstammt dem Einbetten von Gewindeeinsätzen in thermoplastische Kunststoffteile [108] (siehe auch Kap. 2.5.3). Hierbei handelt es sich um einen Prozess, der zeitlich nach der Entformung und Abkühlung des Bauteils erfolgt. Dazu wird der Gewindeeinsatz, respektive die Stahlhülse, mit einer groben äußeren Rändelung versehen und vor dem Einbetten auf eine Temperatur oberhalb der Schmelztemperatur des LFTs von ca. 350 °C erhitzt. Der Außendurchmesser der Stahlhülse ist mit einem Aufmaß (ca. 1 mm) gegenüber dem Innendurchmesser der Aussparung / LFT-Hülse im Kunststoffbauteil und einer zusätzlichen Konizität versehen, so dass der Thermoplast beim Einbetten plastifiziert und nach der Abkühlung einen Formschluss mit der Rändelung der Stahlhülse entsteht. Dieser Formschluss kann durch das Einbringen von radialen Nuten weiter erhöht werden, wie die nachfolgende Abbildung der einzubettenden Stahlhülse verdeutlicht:



Abbildung 8-20: Stahlhülse mit Rändelung und radialen Nuten zum Warmeinbetten in LFT

Ein häufig genutztes Kriterium zur Bewertung von Lagersitzen bei Fahrwerkslenkern stellt die Auspresskraft eines Lagers dar. Im Fall der eingebetteten Stahlhülse kann die Auspresskraft über die Wahl einer geeigneten Presspassung zur Lagerhülse des Elastomerlagers bestimmt werden. Dabei muss gewährleistet sein, dass die Auspresskraft der Stahlhülse aus dem LFT

einen deutlich höheren Wert aufweist als die Auspresskraft des späteren Elastomerlagers aus dieser. Zur Überprüfung dieser Anforderung wird ein quasi-statischer Auspressversuch mit einem eigens für diesen Versuch hergestellten Druckdorn durchgeführt und die benötigte Kraft über den Weg des Druckdorns aufgezeichnet (Abbildung 8-21). Die gemessene Maximalkraft liegt mit einem Wert von mehr als 31 kN deutlich über real am FLB gemessenen Auspresskräften von Elastomerlagern verschiedener Fahrwerkslenker und weit über der Mindestanforderung des OEMs. Die geforderte Auspresskraft des Elastomerlagers liegt für den Querlenker mehr als eine Zehnerpotenz unter der gemessenen Auspresskraft der Stahlhülse, so dass ein Versagen der Verbindung zwischen Stahlhülse und LFT folglich ausgeschlossen werden kann.

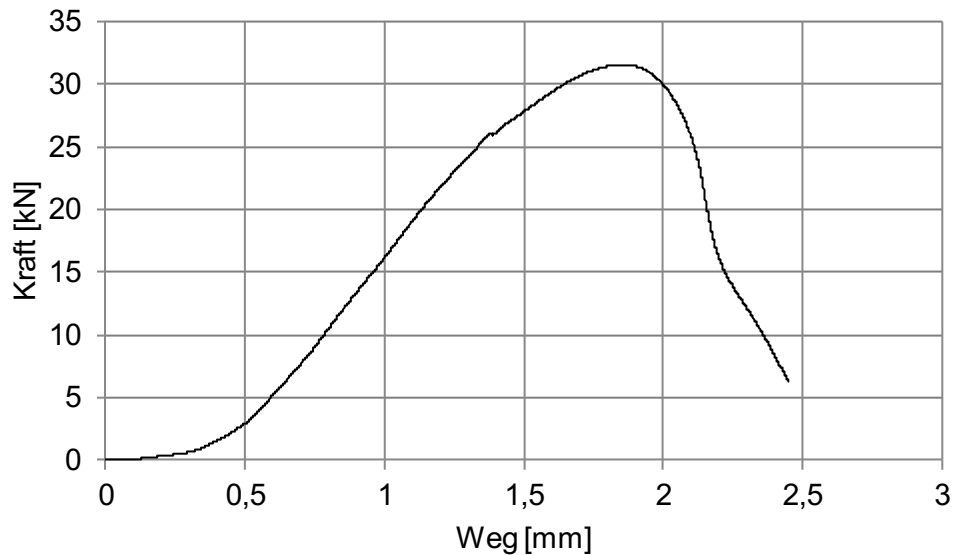


Abbildung 8-21: Kraft-Weg-Verlauf zum Auspressversuch der Stahlhülse aus dem LFT

Die geringe Kurvensteigung zu Beginn des Versuchs ist auf einen initialen Luftspalt zwischen Druckdorn und Hülse sowie auf Setzeffekte innerhalb der Einspannung zurückzuführen. Nach dem Überschreiten des Kraftmaximums wird an der Probe ein Ausbrechen des LFTs beobachtet und die Prüfung vor Erreichen des Kraft-Nullniveaus abgebrochen.

Die nachfolgende Abbildung 8-22 zeigt das Resultat einer warmeingebetteten Stahlhülse mit zusätzlich eingepresstem Elastomerlager des Original-Lenkers:



Abbildung 8-22: Eingepresstes Elastomerlager in warmeingebetteter Stahlhülse

### 8.7 Finales Ergebnis nach dem Beschnitt

Die Gesamtmasse der Querlenkers (Stahl + LFT) beträgt nach dem Beschnitt exakt 1.642 g und trifft damit sehr genau die Vorhersage der FE-Rechnung aus Kap. 8.1.2. Die geringfügige Erhöhung der LFT-Einlegemenge während der Fertigung wird somit durch die reale Blechdicke von 2,35 mm des UF-1500 Stahls kompensiert. Inklusive der zusätzlichen Metallhülse für das L3-Lager (42 g) und dem Anbauteil (196 g) beträgt die Gesamtmasse des hybriden Querlenkers somit 1,88 kg, woraus eine Gewichtsersparnis gegenüber dem Original-Querlenker von -21,2 % („lochfreie“ Variante) bzw. -20,5 % (offene Variante) resultiert. Alle genannten Zahlenwerte sind in der nachfolgenden Tabelle 8-2 noch einmal übersichtlich dargestellt, wobei die Aufteilung der LFT- und Blechmasse des hybriden Querlenkers nur geschätzt werden kann:

Bauteilbezeichnung	Hybrider Querlenker	Original-Querlenker (offen / „lochfrei“)
Stahlblech:	ca. 1.290 g	2365 g / 2404 g
Stahl-Anbauteil:	196 g	-
LFT:	ca. 352 g	-
Stahlhülse:	42 g	-
<b>Gesamtmasse:</b>	<b>1.880 g</b>	<b>2365 g / 2404 g</b>

Tabelle 8-2: Massenvergleich zwischen hybridem Querlenker und Originalbauteil

Nach dem Beschnitt des Querlenkers mittels Wasserstrahlschneiden sind noch Rückstände des Abrasivmediums zu erkennen – es fehlt der LFT-Abtrag an der Anbindung des L2-Lagers:



Abbildung 8-23: Querlenker nach dem 3D-Wasserstrahlschneiden

Das Anbauteil zur Anbindung des L1-Lagers und zur Vervollständigung des Querlenkers mit einer Blechdicke von 3,8 mm wurde im Rahmen dieser Arbeit nicht mehr gefertigt. Aufgrund der hohen Blechdicke dürften besondere Anstrengungen erforderlich sein, um dieses Bauteil umformtechnisch herzustellen.



## 9 Hybridpressen – industrielle Umsetzbarkeit und Relevanz

Ein neues Fertigungsverfahren kann nur dann Einzug in die automobilen Serienfertigung erhalten, wenn grundlegende produktionstechnische Rahmenbedingungen erfüllt werden. Dazu zählt neben der Wirtschaftlichkeit des Verfahrens vor allem die Reproduzierbarkeit und somit Stabilität des Prozesses. Innovative Produktionsverfahren werden nach einer von der NASA entwickelten Skala zu Beginn der Entwicklung häufig anhand ihres sogenannten „Technologie-Reifegrads“ (*Technology Readiness Level*, TRL, siehe Anhang 12.7) eingestuft [109]. Das Verfahren Hybridpressen wird mit dieser Arbeit erstmals über die grundlegende Idee hinaus bearbeitet und beginnt somit mit einem TRL von 1-2. Durch die Fertigung von verschiedenen Probekörpern und der parallelen Entwicklung der erforderlichen Werkzeugkonzepte und Prozesse werden die Level 2-4 durchlaufen und die generelle Machbarkeit des Verfahrens belegt. Anhand eines realen Fahrwerkbauteils als Demonstrator wird zudem ein erster Prototyp entwickelt. Dieser weist jedoch noch kleinere Fehlstellen auf und kann somit nicht direkt im Fahrzeug-Umfeld getestet werden, so dass die TRL-Stufe 6 noch nicht erreicht wird. Des Weiteren steht vor einem Einsatz im Realfahrzeug die Bewertung der mechanischen Bauteilprüfung aus, so dass der Prozess in Summe der TRL-Stufe 5 zuzuordnen ist.

### 9.1 Anlagentechnik

Die in dieser Arbeit beschriebene Fertigung eines Querlenker-Demonstrators wurde auf einer Serienpresse mit einem seriennahen Werkzeug und ohne jegliche Automatisierung durchgeführt. Die Verarbeitung des plastifizierten LFTs erfolgte bei einem weiteren Demonstrator direkt aus dem LFT-Compounder und bei dem in dieser Arbeit vorgestellten Querlenker durch nachträgliche Erwärmung mittels Infrarotstrahlung. Vor allem die Direktverarbeitung eignet sich für einen späteren Serienprozess, da keine zusätzliche Lagerung und Aufheizung benötigt wird und zudem die Geschwindigkeit des Compounders an die Taktzeit des Prozesses angepasst werden kann. Üblicherweise verfügen Compounder nach der Auslassdüse über eine kurze Warmhaltestrecke, in der Extrudate bis zur Weiterverarbeitung zwischengelagert werden können.

Als Pressentechnik wurden sowohl hydraulische Versuchspressen, eine hydraulische Serienpresse aus der Blechumformung als auch eine Serienpresse für das Fließpressen von LFT eingesetzt. Damit wird deutlich, dass keine explizit an den Prozess angepasste Pressentechnik und somit keine umfangreichen Investitionen zur Anwendung des Verfahrens Hybridpressen erforderlich sind. Neben einer ausreichend hohen Presskraft ist die Möglichkeit zur Vorwahl eines definierten Schließprofils (Pressgeschwindigkeit) zu empfehlen. Zur Realisierung einer Niederhalterkraft während der Umformung können sowohl ein in die Presse integriertes, hydraulisches Ziehkissen als auch externe Hydraulikaggregate mit unter dem Werkzeug positionierten Zylindern verwendet werden.

### 9.2 Werkzeugtechnik

Die verwendeten Werkzeuge weisen gegenüber den bekannten Merkmalen aus der Kaltumformung (Tiefziehen) von Stahlblechen und dem Fließpressen von LFT prozessbedingte Zusatzfunktionen auf. Die größten Unterschiede zur Blechumformung sind in den Dichtfunktionen und der Anforderung zu finden, während der Umformung eine stetige, konstante oder variable Niederhalterkraft zu applizieren. Eine besondere Relevanz besitzt demnach auch die erzielbare Genauigkeit in der Werkzeuggestaltung, um zwischen den beweglichen Werkzeugelementen keine Fließspalte für den LFT zu erhalten. Trotz der nur geringen Toleranzen darf das Werkzeug nach der Erwärmung nicht klemmen und es müssen Möglichkeiten zur Evakuierung der



eingeschlossenen Luft geschaffen werden, wie am Beispiel der Wannengeometrie durch Verwendung von Auswerferstiften demonstriert wurde. Die Temperierung des Umformwerkzeugs kann wahlweise medienbasiert durch Öl oder Wasser erfolgen oder alternativ mit Hilfe von elektrischen Heizelementen und einer entsprechenden Regelung. Bei Werkzeugtemperaturen von 75-80 °C sind keine signifikanten Energieverbrauchsvorteile einer Variante erkennbar. Der Vorteil von Flüssigtemperierungen liegt jedoch in der Möglichkeit, den entstehenden Wärmeeintrag durch den plastifizierten LFT in einem Serienprozess aus dem Werkzeug abzuführen.

### 9.3 Prozesszeiten

In Kunststoffprozessen wird das längste Zeitintervall von der Abkühlung im Werkzeug beansprucht, die von mehreren Faktoren abhängt. Diese sind z.B. die Verarbeitungstemperatur und somit Art des Thermoplasts, der Faservolumengehalt und die Faserlänge, die Werkzeugtemperatur und vor allem die maximale Werkstoffdicke im Bauteil. Um Einfallstellen im Bauteil durch die volumetrische Schwindung zu vermeiden, muss die Abkühlung im Werkzeug unter Aufrechterhaltung der Presskraft bzw. des Nachdrucks im Spritzgießprozess erfolgen. Durch den Einsatz von Langfaser-Thermoplasten ist grundsätzlich von einem verbesserten Schwindungs- und Verzugsverhalten gegenüber kurzfaserverstärkten Kunststoffen auszugehen. Aus diesem Grund beträgt die maximale Haltezeit für den hybriden Querlenker-Demonstrator mit der höchsten LFT-Werkstoffdicke von 3,2 mm etwa 30 Sekunden. Die Prozesszeiten der weiteren Einzelschritte sind im folgenden Schaubild konservativ für einen automatisierten Hybridpress-Prozess abgeschätzt. In Summe resultiert eine Gesamtzykluszeit von unter 60 Sekunden, wenn die vorgelagerten Prozesse zur Erwärmung des Blechs oder LFTs bei fehlender Direktverarbeitung aus dem Compounder unberücksichtigt bleiben. Gleiches gilt für den abschließenden Bauteilbeschnitt, da dieser statt mittels 3D-Wasserstrahlschneiden auch durch entsprechende Beschnitt-Werkzeuge realisiert werden könnte.

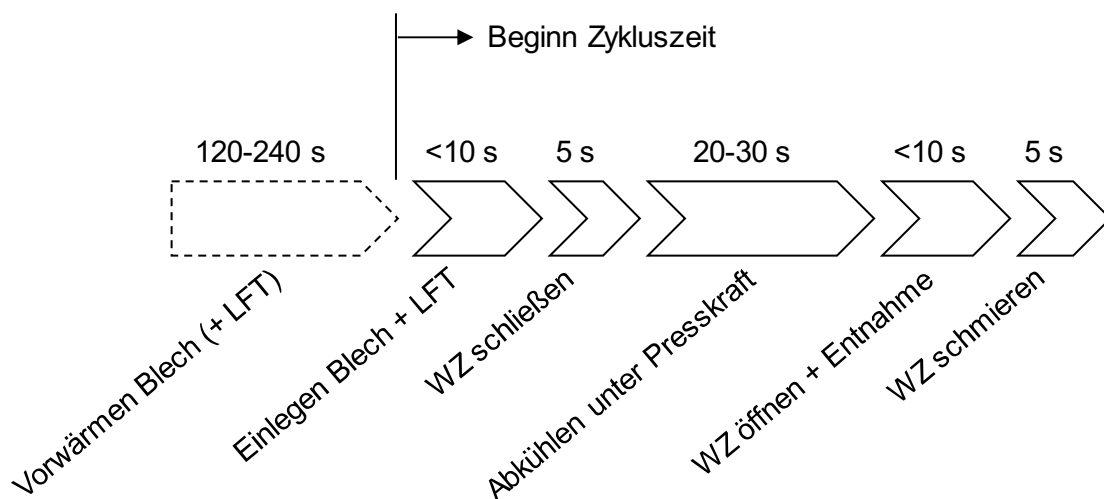


Abbildung 9-1: Abschätzung der Zykluszeit für ein automatisiertes Hybridpressen

Somit ist das Hybridpressen von der reinen Zykluszeit her zwar langsamer als eine ein- oder mehrstufige Blechumformung (Kaltumformung), insgesamt jedoch deutlich schneller als die werkstofflich getrennte Fertigung von Metallblech und Kunststoffverstärkung mit anschließendem Fügeprozess. Auch ein kombinierter Prozess zum Umspritzen von vorgeformten Metallblechen (Einlegern) wird aufgrund der benötigten Zwischenlagerung und dem Handling mehr Zeit beanspruchen.

#### 9.4 Einsatzgebiete

Obwohl der Fokus in dieser Arbeit auf Bauteilen aus dem Fahrwerkbereich liegt, ist die entwickelte Technologie nicht grundsätzlich auf diese Anwendung beschränkt. Vorbehaltlich der später noch zu erfolgenden Bauteilprüfung mit einer Bewertung des Versagensverhaltens und der Lebensdauer unter zyklischer Beanspruchung sowie dem Einfluss von korrosiven Umgebungen ist davon auszugehen, dass z.B. im Karosseriebereich mit deutlich geringeren Bauteilanforderungen weiteres Anwendungspotenzial besteht. So ist bekannt, dass sich faserverstärkte Kunststoffe nicht nur durch ihre gewichtsspezifischen, hohen mechanischen Werkstoffeigenschaften auszeichnen, sondern z.B. auch im Crashlastfall ein hohes Energieaufnahmevermögen alleine oder in Kombination mit Metallstrukturen durch ein Versagen mittels Zerstörung aufweisen [110]. Während der geometrischen Bauteilauslegung sind zudem stets die Umformigenschaften des zu verwendenden Stahlwerkstoffs zu berücksichtigen, da für die Blechumformung beim Hybridpressen nur ein einzelner Umformschritt zur Verfügung steht und des Weiteren gezeigt wurde, dass Bauteilradien in Geometrieübergängen zur vollständigen Ausformung möglichst groß gewählt werden sollten.

Hinsichtlich der einzusetzenden Werkstoffe ist das Verfahren auf der Metallseite nicht auf Stahl begrenzt, sondern auch eine Anwendung von Aluminium ist denkbar. Auf der einen Seite liegen die Wärmeausdehnungen von glasfaserverstärktem PA 6 bis zur Glasatemperatur und Aluminium in einem vergleichbaren Wertebereich (ca.  $22\text{-}23 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ), wodurch Vorteile während der Abkühlung hinsichtlich des geometrischen Verzugs und der Verbindung mit Hilfe eines Haftvermittlers zu erwarten sind. Auf der anderen Seite können die Verarbeitungstemperaturen der Thermoplaste einen Temperaturbereich von bis zu  $300 \text{ }^\circ\text{C}$  erreichen, der bereits der Halbwarmumformung von Aluminium zuzuordnen ist und somit zur Verbesserung der Umformbarkeit durch reduzierte Fließspannungen oder alternativ zur Werkstoffhärtung im Prozess genutzt werden kann. Laut OSTERMANN [111] wird die Umformung im Temperaturbereich zwischen  $150$  und  $300 \text{ }^\circ\text{C}$  als Halbwarmumformung bezeichnet, da hierbei keine Veränderung im Gefüge durch Rekristallisation erfolgt. Besondere Eignung für eine verbesserte Umformbarkeit in Form von höheren Grenzziehverhältnissen weisen dabei naturharte Legierungen, wie z.B. der Karosseriewerkstoff EN AW-5182, auf.

Von der Kunststoffseite her können weitere technische Thermoplaste mit verbesserter chemischer Beständigkeit oder höheren mechanischen Eigenschaften (z.B. PA 6.10, PA 12) eingesetzt werden, solange die Aufbereitung in einem LFT-Compounder und eine Verstärkung mit Langfasern gewährleistet werden können.

#### 9.5 Anwender des Verfahrens

Wie in [7] angedeutet und in dieser Arbeit aufgezeigt, kann die Verarbeitung des LFTs direkt aus einem Compounder oder alternativ durch nachträgliche Erwärmung erfolgen. Somit muss zur wirtschaftlichen Herstellung von kleinen bis zu mittleren Stückzahlen nicht zwingend ein Compounder und das Know-How zur Herstellung von LFT bei einem Anwender der Hybridpressen-Technologie vor Ort zur Verfügung stehen. Im Bereich der metallischen Blechumformung gibt es beispielsweise viele kleinere Unternehmen, die über hydraulische Pressen verfügen, welche ohne Modifikationen ebenfalls für das Hybridpressen eingesetzt werden können. Somit sind auch die erforderlichen Investitionen in eine Werkzeugtemperierung und einen Ofen zur Erwärmung von Metallblechen und LFT-Extrudaten begrenzt. Auf der anderen Seite können Unternehmen der kunststoffverarbeitenden Industrie (Fließpressen, nicht Spritzgießen) mit den vorhandenen Pressen ebenfalls Metallbleche umformen. Diese Unternehmen haben den Vor-

teil, bereits über das benötigte Know-How zu Werkzeugdichtkonzepten und dem Werkstoffverhalten von LFT im Allgemeinen zu verfügen. Somit würde lediglich ein Ofen zur Erwärmung der Metallbleche benötigt. In beiden Fällen wird verständlicherweise das jeweils fehlende Know-How zur Werkstoffverarbeitung des bisher nicht verarbeiteten Werkstoffs vorausgesetzt.

Die Beschichtung der Bleche mit Haftvermittlern stellt einen zusätzlichen Prozessschritt dar, der zwar durch die unkritischen Lagerbedingungen weit vor Prozessbeginn erfolgen kann, aber dennoch einen nicht unerheblichen Kostenpunkt durch die Beauftragung eines externen Beschichters inklusive chemischer Vorbehandlung einnimmt. Es ist daher zu prüfen, ob auch andere Maßnahmen in Form einer Oberflächenstrukturierung oder durch Erzeugung von (Mikro-)Formschlüssen durch Hinterschnitte eine ausreichend hohe Verbundfestigkeit erzielen können. In ersten Versuchen wurden am FLB mit sandgestrahlten und verzinkten Oberflächen ebenfalls hohe Scherfestigkeiten von über 10 MPa erreicht – eine Überprüfung auf Bauteilebene ist bis zum Abschluss dieser Arbeit nicht erfolgt.

## 10 Zusammenfassung und Ausblick

### 10.1 Zusammenfassung

Das Hauptziel dieser Arbeit war es, mit dem Hybridpressen einen kombinierten und simultanen Umformprozess für Stahlbleche und langfaserverstärkte Thermoplaste zur wirtschaftlichen Herstellung von Hybridbauteilen zu entwickeln. Neben dem werkstofflichen Leichtbau durch Substitution von z.B. Stahl durch Leichtmetalle oder faserverstärkte Kunststoffe, zielt das als Hybridpressen bezeichnete Verfahren auf den Leichtbau durch verbesserte bzw. kombinierte Produktionstechnologien und verbesserte Produkteigenschaften ab und ermöglicht so ein effizientes Multi-Material-Design bis hin zur Bauteilebene.

Zur Zielerreichung mussten zunächst Werkzeugkonzepte für eine simultane Umformung einerseits sowie die dazugehörigen Dichtkonzepte andererseits erarbeitet und beide in umfangreichen Versuchen erprobt werden. Dabei konnten sowohl ein Konzept für eine geschlossene Wannengeometrie als auch eines für ein an beiden Enden offenes U-Profil entwickelt und die Funktionsfähigkeit anhand der Versuchsgeometrien mit unterschiedlichen Stahlwerkstoffen und Blechdicken bestätigt werden. Die verwendete Werkzeugtechnik orientiert sich größtenteils an der klassischen Blechumformung mit den Kernelementen Stempel, Matrize und Niederhalter, sie weist jedoch auch zusätzliche Funktionselemente auf, die eine kontrollierte Dichtigkeit gegenüber dem schmelzeförmigen LFT gewährleisten. Weitere Relevanz besitzt neben den mechanischen Dichtelementen vor allem die Steuerung von Niederhalterkraft und Pressgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Verfahrensweg der Presse, wie am Beispiel der Wannengeometrie belegt.

Als Verbindungstechnik zwischen den beiden artfremden Werkstoffen Stahl und LFT wurde mit dem Haftvermittler Vestamelt® auf Basis eines Copolyamids ein Produkt identifiziert, welches als Beschichtung bereits weit im Voraus zum eigentlichen Hybridpressen auf die Stahlbleche appliziert werden kann und eine direkte stoffschlüssige Verbindung im Prozess ermöglicht. Die resultierenden Verbindungseigenschaften wurden mit Hilfe von Scher-, Kopf- und Schälzugversuchen und eigens entwickelter Probengeometrien ermittelt und durch Variation der Prozessparameter optimiert. Durch eine vollflächige Werkstoffanbindung der LFT-Rippenstruktur an das Stahlblech entsteht somit eine ausreichend feste, elastische und zuverlässige Verbindung.

Des Weiteren wurde eine Auslegungs- und Optimierungsmethode für den FEM-Solver OptiStruct entwickelt, die es ermöglicht, das Leichtbaupotenzial durch Blechdickenreduktion von bestehenden Stahlbauteilen zu ermitteln und gleichzeitig einen Designvorschlag für die LFT-Rippenstruktur durch eine Topologie-Optimierung zu erhalten. Dabei können sowohl eine beliebige Anzahl linear-statischer Lastfälle als auch verschiedene Optimierungsziele (z.B. Oberflächenspannungen, Steifigkeiten, Gewichtsreduktionen) berücksichtigt werden. Optional kann zudem die vollflächige LFT-Schicht zur Anbindung der Rippen eine variable und belastungsgerechte Werkstoffdicke aufweisen, wobei in diesem Fall fertigungstechnische Limitierungen und eine gleichmäßige Abkühlung im Werkzeug nicht unberücksichtigt bleiben dürfen.

Eine Bewertung von Blechbeanspruchung und Ausformung wurde mit Hilfe der optischen Formänderungsanalyse sowohl für U-Profil und Wannengeometrie als auch für den Querlenker-Demonstrator durchgeführt. Neben Rückschlüssen auf den Grad der Ausformung durch Abgleiche von realer Bauteilgeometrie zu den CAD-Daten konnte die jeweilige Beanspruchung des Stahlwerkstoffs anhand von FLCs und dem für eine Blechumformung kritischen Kennwert der Ausdünnung quantifiziert werden. Somit wurden sowohl unzureichend geformte Bauteilbereiche

identifiziert als auch eine Einschätzung zum weiteren, vorhandenen Umformpotenzial des jeweiligen Stahlwerkstoffs bzw. zur bereits erfolgten Überbeanspruchung ermöglicht.

Zur Bestätigung der Prozessfähigkeit des Verfahrens Hybridpressens und als Beleg für die zu erzielende Gewichtsreduktion gegenüber einem reinen Stahlbauteil wurde neben den beiden Versuchsgeometrien ein radführender Vorderachs-Querlenker aus einem aktuellen Serienfahrzeug des VW-Konzerns als Demonstrator ausgewählt und geometrisch als Hybridbauteil ausgelegt. Gegenüber dem hochfesten Originalwerkstoff mit einer Blechdicke von 3,8 mm konnte für die hybride Variante eine Blechdicke von 2,4 mm bei vergleichbarer Festigkeit ermittelt werden. Durch die Begrenzung des Hybridpressens auf einen Umformschritt durch Tiefziehen musste zudem der Umformgrad des im Original crash-geformten Bauteils geringfügig reduziert werden. In Summe konnte durch das hybride Design eine Gewichtsersparnis gegenüber dem Originalbauteil von über 20 % erzielt werden.

Da die Ausformung des Querlenker-Demonstrators nur in einzelnen Teilbereichen nicht vollständig war, konnte das Potenzial des Hybridpressens zur gemeinsamen Umformung von hochfesten Stahlwerkstoffen mit Blechdicken von  $>2$  mm durch einen thermoplastischen Kunststoffdruck insgesamt belegt werden. Es zeigte sich, dass neben einer großflächigen Einlage des LFTs eine hohe Presskraft bei gleichzeitig geringer Pressgeschwindigkeit und funktionierendem Dichtkonzept als Schlüssel für eine prozesssichere Umformung von entscheidender Bedeutung sind.

Weiteres Verbesserungspotenzial zur Erzielung einer vollständigen Ausformung besitzt vor allem die LFT-Einlegeposition im Umformwerkzeug und die damit verbundene Gewährleistung einer vollständigen Formfüllung. Eine Analyse des Fließverhaltens erfolgte in dieser Arbeit durch Auswertung von Stufenversuchen – für weiterführende Erkenntnisse ist die Entwicklung einer FE-basierten Prozesssimulation unabdingbar. Des Weiteren müssen die anhand von Versuchen erlangten Erkenntnisse zu Entstehung von Fehlstellen durch diese Simulationen validiert werden.

## 10.2 Ausblick

Die vorliegende Arbeit beschreibt den Beginn der Verfahrensentwicklung für eine kombinierte Umformung von Stahlblechen mit langfaserverstärkten Thermoplasten und kann als Ausgangsbasis für weitere Forschungsaktivitäten sowie zur Fortführung der Prozessentwicklung angesehen werden. Zur Steigerung der Verfahrensakzeptanz bei Anwendern und möglichen Endkunden muss vor allem eine Prozesssimulation entwickelt werden, deren Ergebnisse Rückschlüsse auf die Faserorientierungen und -verteilungen im Bauteil erlauben, so dass das anisotrope Werkstoffverhalten des LFTs bereits in der Bauteilauslegung und -optimierung sowie der nicht-linearen Berechnung berücksichtigt werden kann. Die statische, dynamische und zyklische Bauteilprüfung zur Validierung von Versagens- und Lebensdauermodellen ist zurzeit Gegenstand aktueller Entwicklungen am Lehrstuhl für Fahrzeugleichtbau der Universität Siegen [112]. Auf der Verfahrensseite ist eine Weiterentwicklung zur partiellen Bauteilverstärkung möglich, wenn entsprechende Werkzeugkonzepte erarbeitet werden.

Neben der vorgestellten Anwendung des Hybridpressens in radführenden Fahrwerkslenkern kann das Potenzial zur Gewichtsreduktion durch Metall-FVK-Hybridbauteile auch in anderen Fahrzeugbereichen genutzt werden. Aufgrund des hohen Energieaufnahmevermögens von faserverstärkten Kunststoffen durch Zerstörung ist beispielsweise ein Einsatz in crash-relevanten Fahrzeugstrukturen sowie in der Karosserie denkbar. In Bezug auf die eingesetzten Werkstoffe erscheint eine Kombination von LFT mit Aluminium vor allem aus Gründen der ähnlichen Wär-

---

meausdehnungen und einer verbesserten Umformbarkeit des Aluminiums unter dem Wärmeinfluss des schmelzeförmigen Kunststoffes vielversprechend. Zur Erzielung höherer mechanischer Bauteileigenschaften können beim Hybridpressen zudem auch höherwertige technische Thermoplaste (z.B. PA 6.10, PA 12) eingesetzt werden, wobei grundsätzlich zwischen den entstehenden Mehrkosten und dem resultierenden Nutzen abgewogen werden sollte und die Möglichkeit zur Aufbereitung in einem LFT-Compounder vorab überprüft werden muss. Des Weiteren ist zu prüfen, inwiefern die Aufbereitungsprozesse für Langfaser-Thermoplaste weiter optimiert werden können, um in Zukunft möglichst große Faserlängen im Extrudat und somit auch im späteren Bauteil zu erhalten. Diesbezüglich ist sogar ein Einsatz von alternativen Lieferformen (z.B. GMT) nicht ausgeschlossen.





## 11 Literaturverzeichnis

- [1] Internetquelle: Reducing CO<sub>2</sub> emissions from passenger cars, [https://ec.europa.eu/clima/policies/transport/vehicles/cars\\_de](https://ec.europa.eu/clima/policies/transport/vehicles/cars_de) (Abruf am 22.04.2019), Europäische Kommission
- [2] Internetquelle: Neue CO<sub>2</sub>-Emissionsgrenzwerte für Pkw und Transporter gefordert, Pressemitteilung des Europäischen Parlaments vom 27.03.2019: <http://www.europarl.europa.eu/news/de/press-room/20190321IPR32112/neue-co2-emissionsgrenzwerte-fur-pkw-und-transporter-gefordert> (Abruf am 22.04.2019)
- [3] K. Rohde-Brandenburger: „Was bringen 100 kg Gewichtsreduzierung im Verbrauch? – eine physikalische Betrachtung“, In: W. Siebenpfeiffer (Hrsg.): Leichtbau-Technologien im Automobilbau, Springer Vieweg, Wiesbaden 2014
- [4] O. Mende: „Entwicklung eines Fahrzeugunterbodens vor dem Hintergrund CO<sub>2</sub>-Effizienz“, In: G. Tecklenburg (Hrsg.): Karosseriebautage Hamburg 2016 – 14. ATZ-Fachtagung, Proceedings, S. 67-81, Springer Vieweg, Wiesbaden 2016
- [5] R. Heuss, N. Müller, W. v. Sintern, A. Starke & A. Tschiesner: Lightweight, heavy impact – How carbon fiber and other lightweight materials will develop across industries and specifically in automotive, McKinsey & Company, 2012
- [6] E. Bürkle & H. Wobbe: Kombinationstechnologien auf Basis des Spritzgießverfahrens, Carl Hanser Verlag, München 2016
- [7] Universität Siegen: Hybridpressen, Erfinder: X.F. Fang, 09.10.2014, DE, Patentschrift DE102014004359A1
- [8] G. Fruhmann, K. Stretz & C. Elbers: „Leichtbau im Fahrwerk“, In: ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift 06/2010, S. 394-399, Springer Vieweg, Wiesbaden 2010
- [9] P. Hofmann, C. Hacker, S. Krahn & I.L. Casanova: „Composite Leaf Spring Axle für Pkw“, In: lightweight.design 1/2015, S.14-19, Springer Fachmedien, Wiesbaden 2015
- [10] P. Feraboli, F. Gasco, B. Wade, S. Maier, R. Kwan, A. Masini, L. De Oto & M. Reggiani: „Lamborghini “Forged Composite®” Technology for the Suspension Arms of the Sesto Elemento“, 26<sup>th</sup> ASC Technical Conference, September 26-28<sup>th</sup>, Montréal 2011
- [11] DIN 8584-3:2003, Fertigungsverfahren Zugdruckumformen – Teil 3: Tiefziehen – Einordnung, Unterteilung, Begriffe
- [12] R. Neugebauer (Hrsg.): Hydro-Umformung, Springer-Verlag, Heidelberg 2007
- [13] S.H. Zhang & J. Danckert: “Development of hydro-mechanical deep drawing”, In: Journal of Materials Processing Technology, Vol. 83, S. 14-25, 1998
- [14] E. Buerk: “Hydro-mechanical deep drawing”, In: Sheet metal industries, Vol. 44, S. 182-188, 1967
- [15] E. Doege & B.-A. Behrens: Handbuch Umformtechnik – Grundlagen, Technologien, Maschinen, 2. Auflage, Springer-Verlag, Heidelberg 2010
- [16] K. Siegert (Hrsg.): Blechumformung – Verfahren, Werkzeuge und Maschinen, Springer Vieweg, Heidelberg 2015

- 
- [17] T. Altan & A.E. Tekkaya (Hrsg.): Sheet Metal Forming – Processes and Applications, ASM International, Ohio 2012
- [18] K. Siegert, M. Häussermann, B. Lösch & R. Rieger: “Recent developments in hydroforming technology”, In: Journal of Materials Processing Technology, Vol. 98, S. 251-258, 2000
- [19] A.H. Fritz (Hrsg.): Fertigungstechnik, 12. Auflage, Springer Vieweg, Berlin 2018
- [20] N.N.: Hydroforming, Internetquelle: <http://sitefinity.magna.com/capabilities/body-chassis-systems/innovation-technology/hydroforming>, (Abruf: 13.09.2018), Magna International Inc.
- [21] S.Y. Yang & S.H. Parn: “Injection Molding of Ripped Plastic Plates with a Superplastic Zn-22% Al Sheet”, In: Advances in Polymer Technology, Vol. 20/3, S. 216-225, 2001
- [22] A. Al-Sheyab & G.W. Ehrenstein: „Leichtmetall-Kunststoff-Hybride umformen und verbinden“, In: Blech InForm, Band 05, S.119-122, Hanser Verlag, München 2006
- [23] B. Rauscher: Formschlüssig verbundene Metall-Kunststoff-Hybridbauteile durch Integration von Blechumformung und Spritzgießen, Dissertation, TU Dortmund, Shaker Verlag, Aachen 2011
- [24] M.M. Hussain, B. Rauscher & A.E. Tekkaya: „Wirkmedienbasierte Herstellung hybrider Metall-Kunststoff-Verbundbauteile mit Kunststoffschmelzen als Druckmedium“, In: Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, Vol. 39/9, S. 627-632, 2008
- [25] P. Elsner, P. Eyerer & T. Hirth (Hrsg.): Kunststoffe – Eigenschaften und Anwendungen, 8. Auflage, Springer-Verlag, Heidelberg 2013
- [26] C. Hopmann & W. Michaeli: Einführung in die Kunststoffverarbeitung, 8. Auflage, Carl Hanser Verlag, München 2017
- [27] N.N.: Die Zwillinge unter den Polyamiden – Eigenschaftsvergleich PA 6 und PA 66, Technische Information Semi-Crystalline Products, Lanxess Deutschland GmbH, 2009
- [28] N. Rudolph: Druckverfestigung amorpher Thermoplaste, Dissertation, Universität Erlangen-Nürnberg, 2009
- [29] D. Drummer, A. Schmidt, A. Seefried, G.W. Ehrenstein & I. Kühnert: „Einfluss der Prozessführung auf die Bauteileigenschaften bei der Druckverfestigung amorpher Thermoplaste“, In: Zeitschrift Kunststofftechnik 8 (2012) 2, S. 139-179, Carl Hanser Verlag, München 2012
- [30] M. Schemme: “LFT – development status and perspectives”, In: Plastics, Additives & Compounding, Vol. 10/2, S. 38-43, 2008
- [31] K. Brast: Verarbeitung von langfaserverstärkten Thermoplasten im direkten Plastifizier-/Pressverfahren, Dissertation, RWTH Aachen, 2001
- [32] R. Tataara: “14 – Compression Molding”, In: Applied plastics engineering handbook, 2. Auflage, S. 291-320, Elsevier, Amsterdam 2017
- [33] M. Bastian, V. Kolupaev, A. Ujma, K. Kapfer & F. Mack: „Ernst zu nehmende Alternative – Beachtliche Bauteileigenschaften durch Variation der Prozessbedingungen beim S-LFT-Verfahren“, In: Kunststoffe 92/2, Carl Hanser Verlag, München 2002

- 
- [34] M. Metten & M. Cremer: „Langfaserverstärkte Thermoplaste spritzgießen – Verfahrensparmeter beeinflussen die Faserlänge“, In: Kunststoffe 90/1, Carl Hanser Verlag, München 2000
- [35] AVK – Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e.V. (Hrsg.): Handbuch Faserverbundkunststoffe / Composites, 4. Auflage, Springer Vieweg, Wiesbaden 2014
- [36] O. Geiger, F. Henning, P. Eyerer, R. Brüssel & H. Ernst: „LFT-D: materials tailored for new applications“, In: Reinforced Plastics, Vol.50/1, S. 30-35, Elsevier, 2006
- [37] H. Schürmann: Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden, 2. Auflage, Springer-Verlag, Heidelberg 2007
- [38] J. Rösler, H. Harders & M. Bäker: Mechanisches Verhalten der Werkstoffe, 5. Auflage, Springer Vieweg, Wiesbaden 2016
- [39] E. Buerkle, M. Sieverding & J. Mitzler: „Spritzgießverarbeitung von langfaserverstärktem PP“, In: Kunststoffe 3/2003, S. 47-50, Carl Hanser Verlag, München 2003
- [40] R. Bailey & H. Kraft: „A study of fibre attrition on the processing of long fibre reinforced thermoplastics“, In: International Polymer Processing, Band 2/2, S. 94-101, Carl Hanser Verlag, München 1987
- [41] M. Bonnet: Kunststofftechnik – Grundlagen, Verarbeitung, Werkstoffauswahl und Fallbeispiele, 2. Auflage, Springer Vieweg, Wiesbaden 2014
- [42] C. Hopmann, C. Beste, A. Boettcher & K. Fischer: „Compression moulding of LFT components with increased quality by variothermal mould technology“, In: AIP Conference Proceedings 1914, 180001 (2017), American Institute of Physics, 2017
- [43] C. Lauter, M. Frantz & T. Tröster: „Großserientaugliche Herstellung von Hybridwerkstoffen durch Prepregpressen“, In: lightweight.design 4/2011, S.48-54, Springer Fachmedien, Wiesbaden 2011
- [44] L.H. Ickert: FVK-Metall-Hybridbauweise für die automobiler Großserie, Dissertation, RWTH Aachen, 2014
- [45] M. Ahlers: „Carbon Core – die neue BMW 7er Karosserie“, In: G. Tecklenburg (Hrsg.): Karosseriebautage Hamburg 2016 – 14. ATZ-Fachtagung, Proceedings, S. 125-135, Springer Vieweg, Wiesbaden 2016
- [46] G.W. Ehrenstein (Hrsg.): Handbuch Kunststoff-Verbindungstechnik, Carl Hanser Verlag, München 2004
- [47] H. Goldbach & B. Koch: „Pkw-Tür aus Kunststoff-Stahlblech-Verbund“, In: Kunststoffe 81/7, S. 634-637, Carl Hanser Verlag, München 1991
- [48] B. Koch, G. Knözinger, T. Pleschke & H.J. Wolf: „Hybrid-Frontend als Strukturbauteil“, In: Kunststoffe 89/3, Carl Hanser Verlag, München 1999
- [49] T. Malek: „Leichter als Stahl“, In: Kunststoffe 3/2010, S. 81-84, Carl Hanser Verlag, München 2010
- [50] C. Hopmann, J. v. Haag, J. Schild & P. Brandt: HYLIGHT – Entwicklung einer neuartigen Hybridleichtbautechnologie für die Automobilindustrie, BMBF-Abschlussbericht, Förderkennzeichen 03X3030G, Aachen 2014

- 
- [51] D. Drummer (Hrsg.): Handbuch Kunststoff-Metall-Hybridtechnik, Lehrstuhl für Kunststofftechnik, Erlangen 2015
- [52] R. Wehmeyer: Herstellung von Kunststoff/Metall-Bauteilen mit integrierter Umformung im Spritzgießprozess, Dissertation, RWTH Aachen, Verlagsgruppe Mainz, Aachen 2012
- [53] J. Schild: Verfahrensentwicklung zur integrierten Herstellung von Kunststoff/Metall-Strukturbauteilen im Spritzgießverfahren, Dissertation, RWTH Aachen, Verlagsgruppe Mainz, Aachen 2017
- [54] W.-G. Drossel, A. Albert & W. Zorn: "active media based forming for the in situ manufacturing of metal and plastic composite structures", Euro Hybrid Materials and Structures 2014, Stade, 10.-11. April 2014
- [55] W. Zorn, A. Albert, W.-G. Drossel, D. Raithel & W. Nendel: „Fertigung von Metall/Kunststoff-Verbundbauteilen – Hybridbauteile unter Verwendung von wirkmedienbasiertem Umformen herstellen“, In: wt Werkstatttechnik online, Jahrgang 104 (2014) H. 10, Springer-VDI-Verlag, Düsseldorf 2014
- [56] P. Kellner: Zur systematischen Bewertung integrativer Leichtbau-Strukturkonzepte für biegebelastete Crashträger, Dissertation, TU Dresden, Cuvillier Verlag, Göttingen 2013
- [57] N. Modler, F. Adam, J. Maaß, P. Kellner, P. Knothe, M. Geuther & C. Irmiler: "Intrinsic lightweight steel-composite hybrids for structural components", In: Materials Science Forums Vols 825-826, S. 401-408, Trans Tech Publications, 2015
- [58] P. Kellner, M. Fröschle & K. Steinbach: „Die 3D-Hybrid Leichtbautechnologie: Eine neuartige Stahl-GFK-Hybridbauweise für höchstbelastete Karosseriestrukturen“, Innovative Leichtbaulösungen als Schlüssel zur Standortstärkung / 18. Internationales Dresdner Leichtbausymposium, Dresden, 26.-27. Juni 2014
- [59] Daimler AG: Metallisches Trägerbauteil mit Verbundhaftungsoberfläche, Hybridbauteil und Herstellungsverfahren, Erfinder: F. Eggers, I. Oldenburg, P. Pelke, A. Segeler, M. Siemers, 18.07.2013, DE, Patentschrift DE102012000658A1
- [60] R. Müller: „Das Beste aus zwei Welten – Hybridbauteile aus Kunststoff-Metall-Verbunden im Einsatz in der Fahrzeugkarosserie“, In: Kunststoffe 3/2016, S. 50-51, Carl Hanser Verlag, München 2016
- [61] D. Landgrebe, V. Kräusel, A. Rautenstrauch, B. Awiszus, J. Boll & L. Markov: "Energy-Efficiency and Robustness in a Hybrid Process of Hydroforming and Polymer Injection Molding", In: Procedia Manufacturing 8, S. 746-753, Elsevier, 2017
- [62] N.N.: „Leichtbauteile aus Kunststoff. Für Pkw und Nkw.“, Leichtbaubroschüre der Elring-Klinger AG, 2017, [https://www.elringklinger.de/sites/default/files/brochures/downloads/elringklinger\\_lightweight\\_plastic\\_components\\_de\\_201708\\_kopierschutz.pdf](https://www.elringklinger.de/sites/default/files/brochures/downloads/elringklinger_lightweight_plastic_components_de_201708_kopierschutz.pdf)
- [63] C. Haverkamp: „Multi Material Design im automobilen Leichtbau“, In: DVM-Bericht 679: Multimaterialsysteme, DVM-Tag 2012, 26.-27. April 2012, Berlin
- [64] H.E. Friedrich (Hrsg.): Leichtbau in der Fahrzeugtechnik, 2. Auflage, Springer Vieweg, Wiesbaden 2017
- [65] D. Spancken, P. Töws & A. Büter: „Konstruktion und Herstellung eines Leichtbauquerlenkers aus Kohlenstofffaser“, In: lightweight.design 1/2015, S. 20-25, Springer Fachmedien, Wiesbaden 2015

- 
- [66] D. Spancken, A. Büter, P. Töws & O. Schwarzhaupt: „Prüfung und Bewertung eines funktionsintegrierten Leichtbauquerlenkers“, In: *lightweight.design* 3/2017, S. 32-35, Springer Fachmedien, Wiesbaden 2017
- [67] C. Drebenstedt, C. Zopp, A. Hackert & L. Kroll: „Querlenker aus Hybrid-Aluminiumschaum-Sandwich“, In: *lightweight.design* 2/2018, S.44-48, Springer Fachmedien, Wiesbaden 2018
- [68] S. Kurtenbach, G. Schöntauf, A. Nevoigt & D. Butakov: “Capability of glass fiber reinforced plastics for lightweight design control arms in wheel suspension”, In: 9th International Munich Chassis Symposium 2018, Proceedings, S. 441-460, Springer Vieweg, Heidelberg 2019
- [69] F. Pulina & O. Lietaer: “Software helps to reduce time to market for fibre-reinforced plastic control arm”, In: *JEC Composites Magazine* No. 126, p. 25-27, 2019
- [70] ZF Friedrichshafen AG: Hybridlenker für ein Fahrzeug, Erfinder: F. Nachbar, M. Ersoy, 22.01.2009, DE, Patentschrift DE102007033763A1
- [71] ZF Friedrichshafen AG: Faserverbund-Hybridlenker, Erfinder: W. Meyer, P. Hofmann, I. L. Casanova, S. Winsel, 16.08.2012, DE, Patentschrift DE102011003971A1
- [72] M. Ersoy & S. Gies (Hrsg.): *Fahrwerkhandbuch – Grundlagen, Fahrdynamik, Fahrverhalten, Komponenten, Elektronische Systeme, Fahrerassistenz, Autonomes Fahren, Perspektiven*, 5. Auflage, Springer Vieweg, Wiesbaden 2017
- [73] J. Vittinghoff & D. Drummer: „Im Spritzguss stoffschlüssig verbunden“, In: *adhäsion Kleben & Dichten* 7-8/2012, S. 41-46, Springer Vieweg, Wiesbaden 2012
- [74] G. Habenicht: *Kleben – Grundlagen, Technologien, Anwendungen*, 6. Auflage, Springer Verlag, Heidelberg 2009
- [75] F. Garbassi, M. Morra & E. Occhiello: *Polymer Surfaces – From Physics to Technology*, John Wiley & Sons, Chichester 2002
- [76] J. Friedrich: *Metal-Polymer Systems – Interface Design and Chemical Bonding*, Wiley-VCH, Weinheim 2018
- [77] K. Burlon: *Blockcopolymere als Haftvermittler für Kunststoff-Metallverbünde*, Dissertation, TU Darmstadt, 2012
- [78] M. Grujicic, V. Sellappan, G. Arakere, N. Seyr & M. Erdmann: “Computational feasibility analysis of direct-adhesion polymer-to-metal hybrid technology for lead-bearing body-in-white structural components”, In: *Journal of Materials Processing Technology* 195 (2008), S. 282-298, Elsevier, 2008
- [79] P. Mitschang, R. Velthuis, S. Emrich & M. Kopnarski: “Induction Heated Joining of Aluminium and Carbon Fiber Reinforced Nylon 66”, In: *Journal of Thermoplastic Composite Materials* Vol. 22, S. 767-801, Sage Publications, 2009
- [80] H. Paul: *Bewertung von langfaserverstärkten Kunststoff-Metall-Hybridverbunden auf Basis des Verformungs- und Versagensverhaltens*, Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Fraunhofer Verlag, Stuttgart 2013
- [81] D. Flock: *Wärmeleitungsfügen hybrider Kunststoff-Metall-Verbindungen*, Dissertation, RWTH Aachen, 2011

- 
- [82] G. Zhao: Spritzgegossene, tragende Kunststoff-Metall-Hybridstrukturen, Dissertation Universität Erlangen-Nürnberg, 2002
- [83] D. Flock, E. Haberstroh, K. Bobzin, T. Schläfer, T. Warda & P. Kutschmann: "Ultrasonic welding of hybrid metal-plastic components with flame spraying of adhesion layer", In: Journal of Plastics Technology 7 (2011) 5, S.161-177, 2011
- [84] M. Frantz: Analyse und Optimierung der Delta-Alpha-Problematik im Fertigungsprozess von asymmetrischen hybriden Werkstoffen aus Metall und faserverstärkten Kunststoffen, Dissertation, Universität Paderborn, 2017
- [85] M. Bräuer, M. Edelmann, L. Häußler & I. Kühnert: Metall-Kunststoff-Verbund: „Untersuchungen zur Wirkungsweise einer Adhäsionsschicht aus Uretdionpulverlacksystemen“, In: Materialwissenschaft und Werkstofftechnik Vol. 43/6, S. 534-543, Wiley-VCH, 2012
- [86] I. Kühnert, M. Gedan-Smolka, M. Fischer, P. Scholz, D. Landgrebe & D. Garray: "Prefinished Metal Polymer Hybrid Parts", In: Technologies für Lightweight Structures 1(2), S. 89-97, 3rd International MERGE Technologies Conference (IMTC), Chemnitz, 21.-22. September 2017
- [87] L. Hoffmann, C. Linn, D. Drummer & C. Gröschel: „Hochleistungsfaserverbundbauteile – innovativer Verfahrensbaukasten“, In: emobility tec Sonderdruck 03/2014, Hüthig GmbH, Heidelberg 2014
- [88] L. Gaab: „Optimierung der Heizprozesse von CFK- und GFK-Strukturen mit Infrarot-Strahlung“, In: lightweight.design 2/2013, S.50-53, Springer Fachmedien, Wiesbaden 2013
- [89] N.N.: Infrarot-Strahler für industrielle Prozesse, Prospekt der Heraeus Noblelight GmbH, Kleinostheim, [https://apps.heraeus.com/IR\\_Products\\_DE/ir\\_products\\_de\\_epaper.html](https://apps.heraeus.com/IR_Products_DE/ir_products_de_epaper.html)
- [90] N.N.: Die schnellen mittelwelligen KRELUS Infrarot-Strahler, Prospekt der KRELUS AG, Oberentfelden, Schweiz
- [91] U. Breuer: Beitrag zur Umformtechnik gewebeverstärkter Thermoplaste, Dissertation, Universität Kaiserslautern, 1997
- [92] DIN EN ISO 20753:2014, Kunststoffe – Probekörper
- [93] DIN EN 10027-2:2013, Bezeichnungssysteme für Stähle – Teil 2: Nummernsystem
- [94] Evonik Industries AG: Verfahren zur Herstellung eines Metall-Kunststoff-Hybridbauteils, Erfinder: M. Gruhn, K. Kuhmann, M. Risthaus, 31.07.2014, DE, Patentschrift DE102013201388A1
- [95] H.-C. Tseng, R.-Y. Chang & C.-H. Hsu: "Numerical prediction of fiber orientation and mechanical performance for short/long glass and carbon fiber-reinforced composites", In: Composites Science and Technology 144 (2017), S. 51-56, 2017
- [96] A. Stock & P. Egger: „Organobleche verlassen das Hochpreissegment“, In: MM Composites World 02/2011, S.12-15, VOGEL Communications Group, Würzburg, 2011
- [97] DIN EN 1465:2009-07, Klebstoffe – Bestimmung der Zugscherfestigkeit von Überlappungsklebungen
- [98] T. Reincke, S. Hartwig & K. Dilger: "High-tensile joints of continuously fusion bonded hybrid structures", In: Composite Structures 202 (2018), S. 111-118, Elsevier, 2018

- 
- [99] X.F. Fang & T. Kloska: "Hybrid Forming – a Combined Deep Drawing and Compression Molding Process for Forming Metal Sheets with Thermoplastics (LFT) to Hybrid Parts", In: 3. Internationale Konferenz Hybrid Materials and Structures, Proceedings, Bremen, 18.-19. April 2018
- [100] D. Heidrich & X.F. Fang: "Design of Automotive Structural Metal-GFRP Hybrid Parts Using the Novel Manufacturing Technique "Hybrid forming"", NWC NAFEMS World Congress 2019, 17.-20. Juni 2019, Québec
- [101] N.N.: User Guide zur Software Altair HyperWorks 2017 – Design Optimization – Topology Optimization
- [102] P. Eyerer, T. Hirth & P. Elsner (Hrsg.): Polymer Engineering – Technologien und Praxis, Springer-Verlag, Heidelberg 2008
- [103] H.-J. Rudolph: Audi Q3 – Entwicklung und Technik, Springer Vieweg, Wiesbaden 2013
- [104] X.F. Fang: Kraftfahrzeugtechnik 4 – Fahrzeugintegration und passive Sicherheit, Vorlesungsumdruck im M.Sc.-Studiengang Fahrzeugbau der Universität Siegen, 2018
- [105] N.N.: EJOT® Fügetechnik im Misch- und Leichtbau – Flexible Verbindungslösungen für ungleiche Materialpaarungen, Prospekt der EJOT GmbH & Co. KG, Bad Berleburg 2018
- [106] J.K. Sonstabo, D. Morin & M. Langseth: "Testing and modelling of flow-drill screw connections under quasi-static loadings", In: Journal of Materials Processing Technology 255, S. 724-738, Elsevier, 2018
- [107] J.W. Stock: Remote-Laserstrahltrennen von kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff, Dissertation, Technische Universität München, 2017
- [108] N.N.: AMTEC® – Präzisions-Gewindeeinsätze für Kunststoffteile und Werkzeuge für die Verarbeitung, Prospekt der Böllhoff Verbindungstechnik GmbH, Bielefeld 2017
- [109] N.N.: Technology Readiness Level Definitions, Internetquelle: [https://www.nasa.gov/pdf/458490main\\_TRL\\_Definitions.pdf](https://www.nasa.gov/pdf/458490main_TRL_Definitions.pdf), Abruf am 10.03.2019
- [110] C. Mildner: Numerische und experimentelle Untersuchungen des Crashverhaltens von FVK-verstärkten Metallstrukturbauteilen, Dissertation, Technische Universität München, 2013
- [111] F. Ostermann: Anwendungstechnologie Aluminium, 3. Auflage, Springer Vieweg, Heidelberg 2014
- [112] X.F. Fang, D. Heidrich, T. Kloska, B. Sonnenstädt, A. Sprick, R. Heinritz & M. Gruhn: „Kunststoff formt Metall – einstufiges Hybridpress-Verfahren zur Herstellung hybrider Strukturen für Karosserie und Fahrwerk“, In: Kunststoffe 2/2019, S. 73-76, Carl Hanser Verlag, München 2019





## 12 Anhang

### 12.1 A1: Technische Daten WKP 2000 S (hydraulische Presse)

#### Presse:

Presskraft, max.	2.200 kN
Pressplattengröße	1.000 x 1.000 mm
Pressgeschwindigkeit, max. (ohne Speicher)	25 mm/s
Pressgeschwindigkeit, max. (mit Speicher)	50 mm/s
Pressweg unter Volllast, max. (mit Speicher)	60 mm
Schließgeschwindigkeit	150 mm/s
Öffnungsgeschwindigkeit	150 mm/s
Schließkraft Schließzylinder	150 kN
Kolbenhub	500 mm
Einbauhöhe	800 mm
Öffnungskraft	93 kN
Planparallelität unter Volllast	<0,2 mm/m
Leistung Hydraulik	55 kW

#### Ziehkissen:

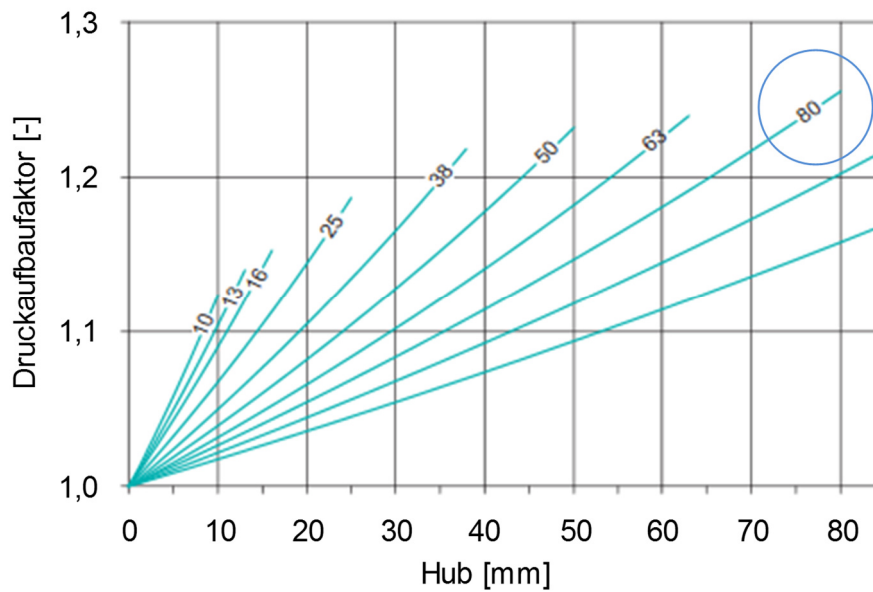
Ausfahrkraft / Verdrängkraft, max.	500 kN
Hub	200 mm
Anordnung	im Pressentisch (unten)

#### Sonstige Merkmale:

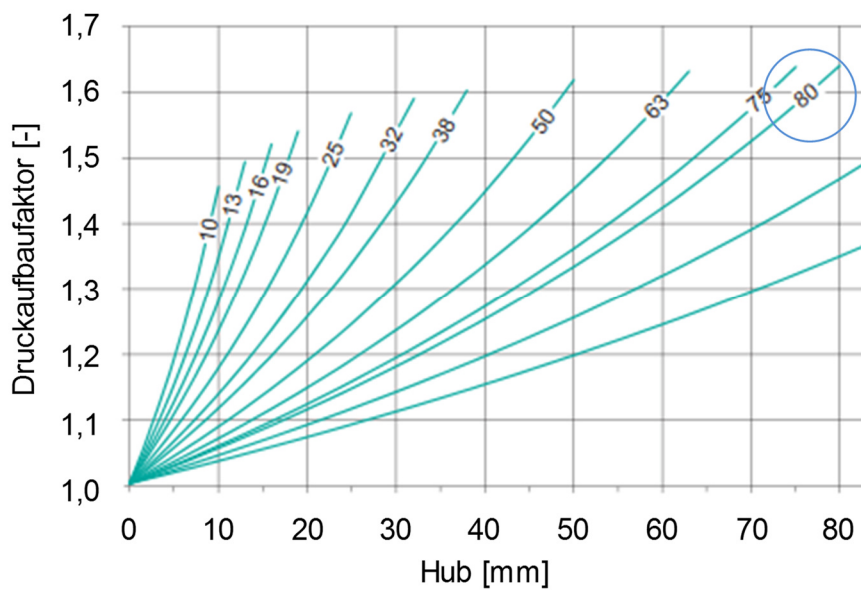
- Gestell-Typ: 4-Säulen-Führung
- Gasdruckspeicher zur Erhöhung der max. Pressgeschwindigkeit auf 50 mm/s
- Öffnen gegen Widerstand bei Verwendung von Gasdruckfedern im Werkzeug
- USB-Exportschnittstelle zur Aufzeichnung der Prozessparameter

## 12.2 A2: Federkennlinien Gasdruckfedern

Hubabhängiges Kraftaufbaudiagramm für die Gasdruckfeder aus Kap. 4.1 (Typ Meusburger E 6330D 170/32/80):



Hubabhängiges Kraftaufbaudiagramm für die Gasdruckfeder aus Kap. 4.2 (Typ Meusburger E 6350A 360/32/80):



**12.3 A3: Werkstoffdaten des verwendeten LFTs (PA6-LGF40)**Mechanische Eigenschaften nach ASTM D638: 2010

Lagerung: 40 h, 23 °C, 50% Luftfeuchtigkeit (konditionierter Zustand)

Angabe als Mittelwert von 5 Prüfungen

<b>E-Modul E<sub>1</sub></b> <b>(MPa)</b>	<b>E-Modul E<sub>2</sub></b> <b>(MPa)</b>	<b>Poissonzahl v<sub>12</sub></b>	<b>Poissonzahl v<sub>23</sub></b>	<b>Schubmodul G</b> <b>(MPa)</b>
13.041	5.896	0,396	0,417	2.080

Thermische Leitfähigkeit

Lagerung: 4 h, 80 °C (getrockneter Zustand)

Thermische Leitfähigkeit bei 30 °C (W/m K <sup>-1</sup> )	0,2999
---	--------

Thermische Ausdehnung nach ASTM E831:2012

Temperaturbereich: 20-130 °C

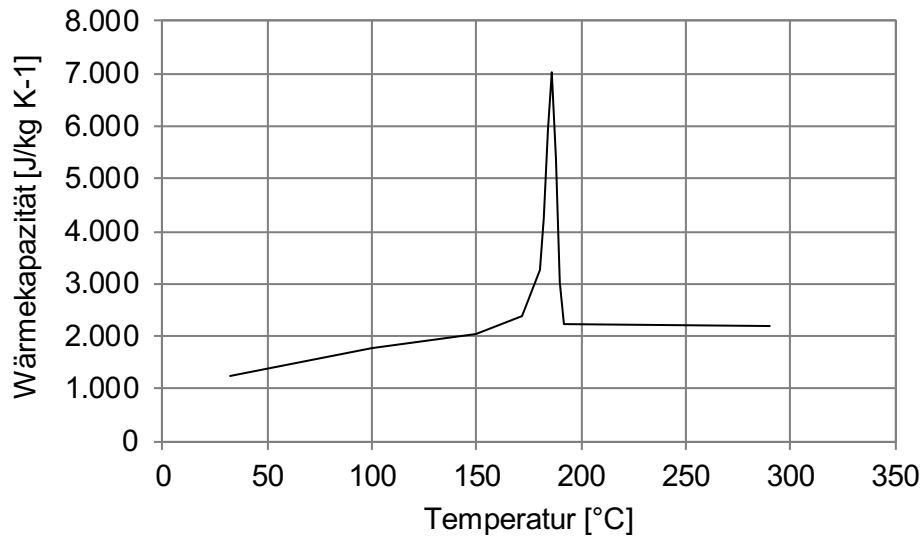
Angabe als Mittelwert von 3 Prüfungen

Thermischer Ausdehnungskoeffizient (1/K)	138,8 x 10 <sup>-6</sup>
--	--------------------------

Wärmekapazität nach ASTM E1269

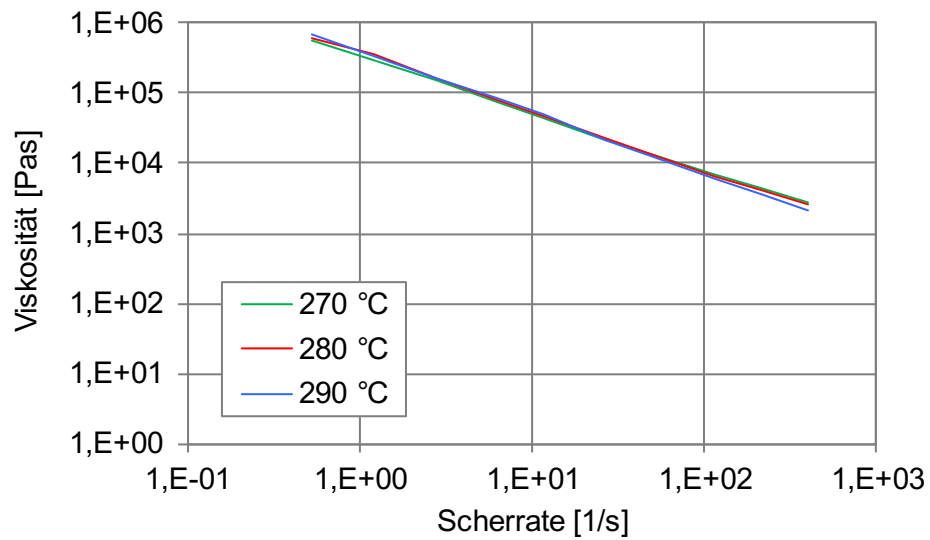
Lagerung: 4 h, 80 °C (getrockneter Zustand)

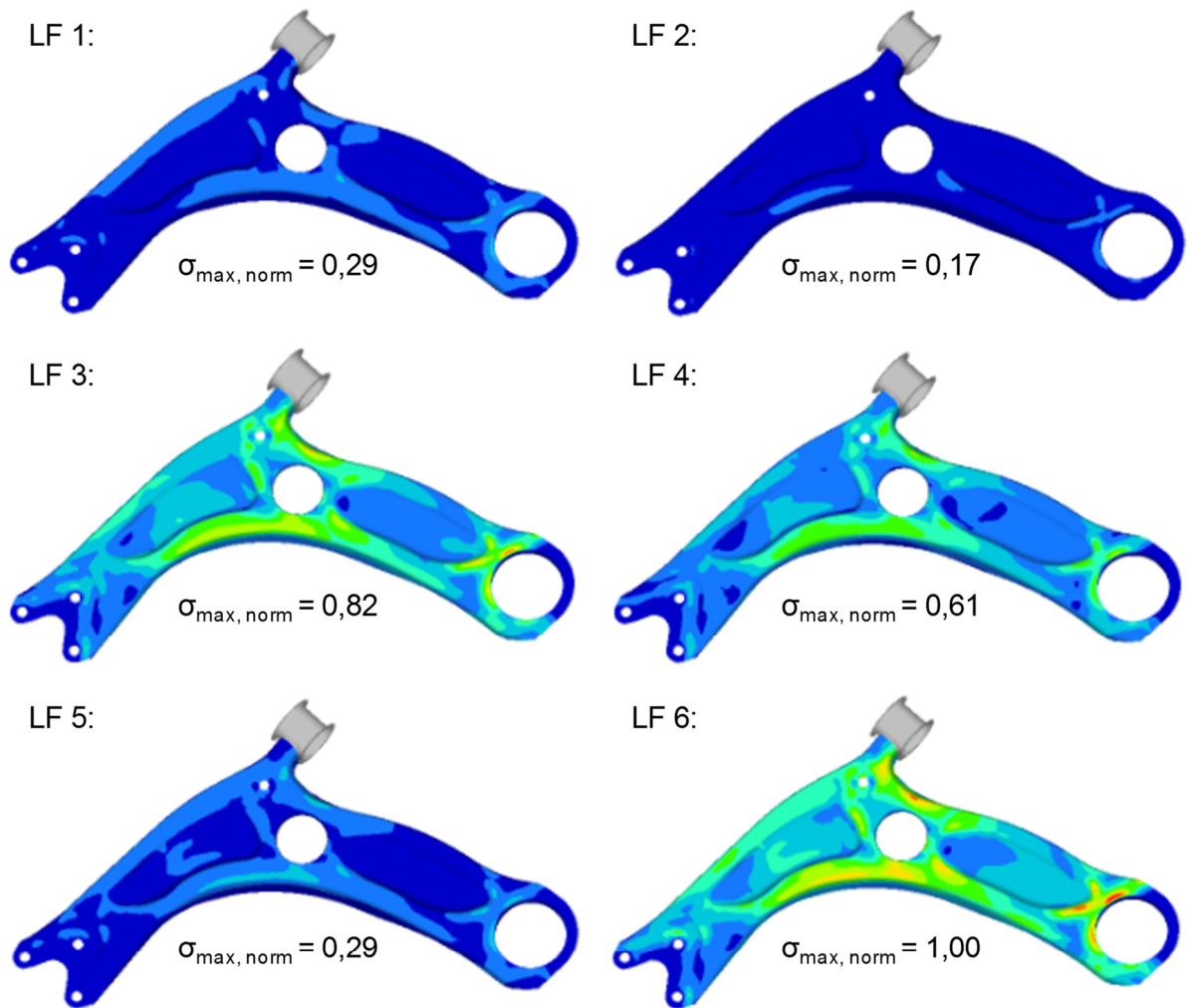
<b>Temperatur [°C]</b>	<b>Wärmekapazität (J/kg K<sup>-1</sup>)</b>
32	1.259
100	1.779
150	2.062
172	2.399
180	3.251
182	4.231
184	5.932
186	7.020
188	5.376
190	3.016
192	2.245
290	2.185



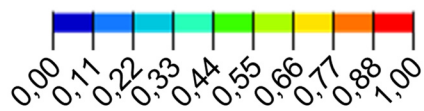
### Viskosität

Lagerung: 4 h, 80 °C (getrockneter Zustand)



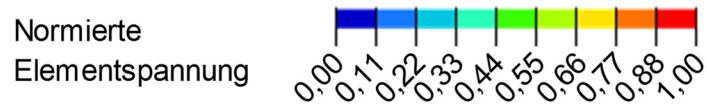
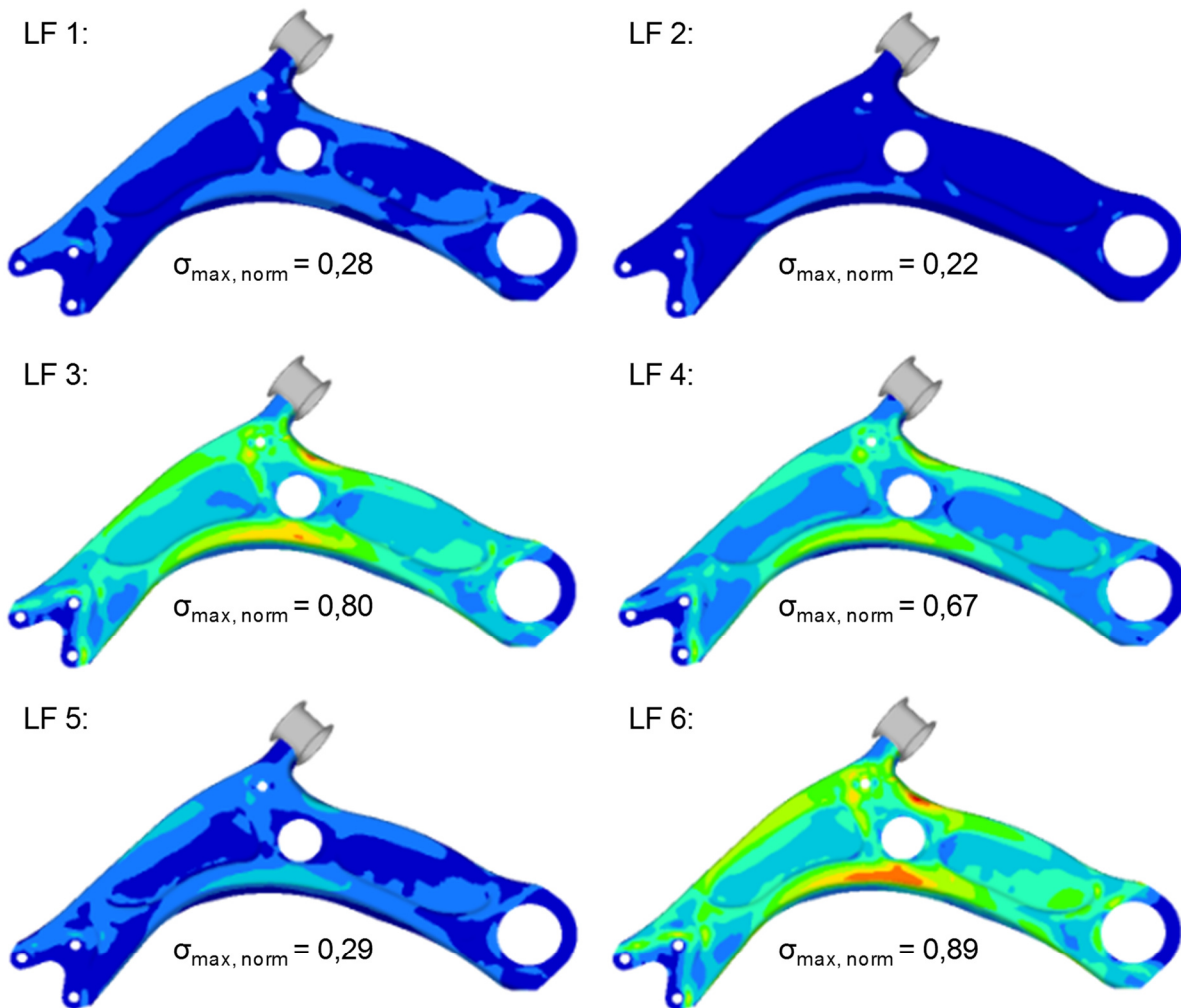
**12.4 A4: Spannungen im „lochfreien“ Original-Querlenker aus Kap. 7.1**Spannungen im Stahlblech:

Normierte  
Elementspannung

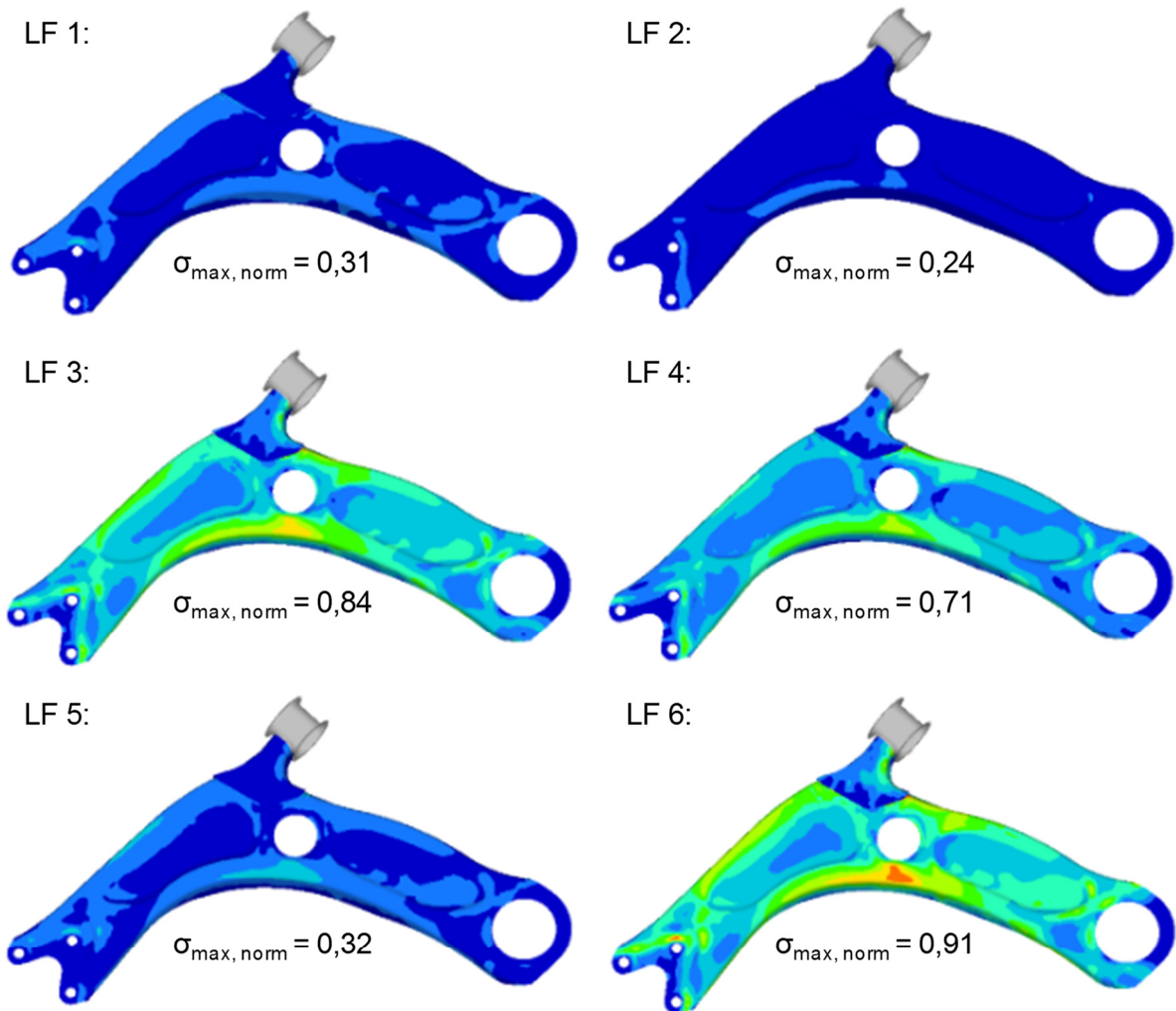


## 12.5 A5: Spannungen im optimierten Hybrid-Querlenker aus Kap. 7.6

### Spannungen im Stahlblech:





**12.6 A6: Spannungen im optimierten Hybrid-Querlenker aus Kap. 8.1**Spannungen im Stahlblech:

## 12.7 A7: Definition Technology Readiness Level (TRL) nach [109]

TRL	Definition	Freie Übersetzung*
1	Basic principles observed and reported	Basisprinzipien beobachtet und beschrieben
2	Technology concept and/or application formulated	Technologiekonzept und/oder Anwendung formuliert
3	Analytical and experimental critical function and/or characteristic proof of concept	Analytische und experimentelle Prüfung kritischer Funktionen und/oder Eigenschaften (Prüfung des Konzepts)
4	Component and/or breadboard validation in laboratory environment	Validierung anhand eines Bauteils oder Versuchsaufbaus in Laborumgebung
5	Component and/or breadboard validation in relevant environment	Validierung anhand eines Bauteils oder Versuchsaufbaus in relevanter Umgebung
6	System/sub-system model or prototype demonstration in an operational environment	Modell-/Teilmodellaufbau oder Prototyp-Demonstrator in einer realen (Fahrzeug-) Umgebung
7	System prototype demonstration in an operational environment	Demonstration des Gesamtsystems in einer realen (Fahrzeug-)Umgebung
8	Actual system completed and "flight qualified" through test and demonstration	Gesamtsystem fertiggestellt und anhand von Tests und Demonstrationen durch den OEM für Fahrzeugversuche freigegeben
9	Actual system flight proven through successful mission operations	Gesamtsystem durch erfolgreichen Einsatz (im Fahrzeug) freigegeben

\* = Anpassung des Luftfahrtintergrunds der NASA auf den Automobilbau berücksichtigt

**Die „Siegener Schriftenreihe Automobiltechnik“ präsentiert die Dissertationen des Lehrstuhls für Fahrzeugleichtbau (FLB) der Universität Siegen. Die Beiträge befassen sich mit der Entwicklung von Methoden und Prinzipien sowie neuen Leichtbautechnologien zur effizienten Gestaltung des Leichtbaus in Karosserie- und Fahrwerkstrukturen.**

**Die Reihe erscheint in unregelmäßigen Abständen.**

**Mit neuen Methoden zu  
leichten Lösungen**