

Daniel Heidrich, Tobias Kloska, Xiangfan Fang

## **Abschlussbericht zum BMBF-Forschungsprojekt**

### **MultiForm**

**Entwicklung eines  
Hochleistungsfertigungsverfahrens  
zur simultanen Umformung von  
faserverstärkten Kunststoffen  
mit Metallblechen**

**Abschlussbericht zum  
BMBF-Forschungsprojekt**

**MultiForm**

**Entwicklung eines Hochleistungsfertigungsverfahrens  
zur simultanen Umformung von faserverstärkten  
Kunststoffen mit Metallblechen**

Daniel Heidrich, Tobias Kloska, Xiangfan Fang

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

Band 3

Abschlussbericht zum  
BMBF-Forschungsprojekt

# MultiForm

Entwicklung eines Hochleistungsfertigungsverfahrens  
zur simultanen Umformung von faserverstärkten  
Kunststoffen mit Metallblechen

Projektzeitraum: 01.08.2014 - 31.07.2018

**Autoren des Berichts:**

- M.Sc. Daniel Heidrich
- Dipl.-Ing. Tobias Kloska
- Prof. Dr.-Ing. Xiangfan Fang

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

Dieses Forschungs- und Entwicklungsprojekt wurde durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Programm „Innovationen für die Produktion, Dienstleistung und Arbeit von morgen“ (Förderkennzeichen: 02PN2080-2084) gefördert und vom Projektträger Karlsruhe (PTKA) betreut. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

## **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 2019: *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: 978-3-96182-041-2**

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



**Beteiligte Projektpartner:**

- Lehrstuhl für Fahrzeugleichtbau (FLB), Universität Siegen
- SimpaTec Simulation & Technology Consulting GmbH, Aachen
- Sprick Technologies GmbH, Paderborn
- voestalpine Automotive Components Schwäbisch Gmünd GmbH, Schwäbisch Gmünd
- Weber Fibertech GmbH, Markdorf (Konsortialführer)

**Unterstützt von:**

- Altair Engineering GmbH, Böblingen
- Bond Laminates GmbH, Brilon
- Evonik Resource Efficiency GmbH, Marl
- Volkswagen AG, Wolfsburg

**Danksagung:**

Die Autoren danken dem gesamten Konsortium, im Besonderen Rüdiger Heinritz und Florian Gerstner (beide voestalpine Automotive Components), Björn Sonnenstädt und Norbert Stötzner (beide Weber Fibertech), Marc Kurz (SimpaTec), Andreas Sprick und Michael Bunse (Sprick Technologies) für Ihre Beiträge zum Erfolg des Projekts und dem vorliegenden Abschlussbericht. Darüber hinaus gebührt unser Dank den Verantwortlichen des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) für die finanzielle Förderung des Vorhabens sowie des Projektträgers Karlsruhe und unserer dortigen Projektbetreuerin Frau Dr. Christine Ernst für die allzeit gute Beratung und Ermöglichung einer Projektverlängerung. Auch bei den oben genannten assoziierten Projektpartnern, die durch Eigenmittel wichtige Teile zum Erfolg des Gesamtprojekts beigetragen haben, möchten wir uns recht herzlich bedanken. Ohne diese Unterstützung wäre das Erreichen der gesetzten Projektziele nicht möglich gewesen.



---

## Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Projektziele .....	1
1.1	Ziele des Projekts.....	1
1.2	Projektkonsortium .....	2
2	Ausgangssituation und Stand der Technik .....	3
2.1	Verarbeitungsverfahren für Langfaserverstärkte Thermoplaste .....	3
2.2	Metallumformung + Spritzgießen.....	4
2.3	Innenhochdruckumformung + Spritzgießen .....	5
2.4	Tiefziehen + Fließpressen .....	5
2.5	FVK in Fahrwerkbauteilen .....	6
3	Neues Fertigungsverfahren Hybridpressen .....	7
3.1	Prozessbeschreibung.....	7
3.2	Werkstoffe .....	8
3.2.1	Metallwerkstoffe .....	8
3.2.2	LFT .....	9
3.2.3	Haftvermittler zur stoffschlüssigen Verbindung von Metall und LFT.....	9
3.3	Anlagentechnik.....	9
3.3.1	Hydraulische Pressen .....	9
3.3.2	Werkzeugtechnologie.....	10
3.3.3	Infrarot-Strahler.....	10
4	Hybridpressen: Verfahrens- und Dichtkonzeptentwicklung.....	12
4.1	Verfahrenserprobung mit Versuchsgeometrien .....	12
4.1.1	Geschlossenes Wannprofil.....	13
4.1.2	Offenes U-Profil.....	16
4.1.3	Offenes U-Profil mit Reservoir.....	19
4.1.4	Offenes Profil mit partieller Abkantung .....	21
4.2	Abbildung des Verfahrens Hybridpressen durch gekoppelte Simulation.....	22
4.2.1	Rheologische Charakterisierung des Weber Fibertech Compounds PA6 LFT40 .....	23
4.2.2	Validierung der LFT-Fließpress-Simulation mithilfe von $\mu$ CT-Untersuchungen....	24
4.2.3	Kopplung von Fließpress-Simulation und Tiefzieh-Simulation .....	27
5	Auslegungsmethodik für Stahl-LFT-Hybridbauteile.....	30
5.1	Material- und Bauteiltests als Basis für die FEM-Simulation .....	30
5.1.1	Materialcharakterisierung des Langfaser-Compounds PA6 LFT40.....	30
5.1.2	Materialcharakterisierung des Haftvermittlers Vestamelt Hylink .....	33

---

5.1.3	Mechanische Prüfung mittels Hybridpressen hergestellter Stahl-LFT-Hybridquerträger.....	37
5.1.4	Schwingfestigkeitsuntersuchung an hybriden Stahl-LFT-Strukturen.....	38
5.2	Auslegung der hybriden Demonstrator-Bauteile.....	43
5.2.1	Linear-statische Optimierung der hybriden Stahl-LFT Fahrwerkslenker.....	43
5.2.2	Nichtlinear-statische FEM-Berechnung zur Absicherung der statischen Auslegung am Beispiel eines Längslenkers.....	50
6	Herstellung der Demonstrator-Bauteile im Hybridpress-Verfahren.....	55
6.1	Konzeptionierung und Auslegung Werkzeuge.....	55
6.1.1	Umsetzung eines Dichtkonzepts für die Demonstrator-Bauteile.....	55
6.1.2	Gestaltung der Tiefzieh-Anlage zur Blechumformung.....	57
6.2	Fertigung des Längslenkers bei Weber Fibertech.....	58
6.2.1	Prozessaufbau- und Vorbereitung.....	58
6.2.2	Ermittlung von prozessrelevanten Parametern und Prozessoptimierung.....	60
6.2.3	Bewertung der Umformung.....	63
6.3	Fertigung des Querlenkers bei voestalpine Automotive Components.....	64
6.3.1	Prozessaufbau und Vorbereitung.....	64
6.3.2	Ermittlung optimaler Prozessparameter.....	65
6.3.3	Bewertung der Umformung.....	66
6.4	Beschnittversuche an hybriden Stahl-LFT-Lenkern.....	68
6.5	Herstellung und Heißeinpressen von Metall-Hülsen in LFT-Kragen.....	68
6.6	Taktzeiten und Wirtschaftlichkeit des Verfahrens Hybridpressen.....	70
7	Zusammenfassung und Ausblick.....	71
7.1	Zusammenfassung.....	71
7.2	Ausblick.....	72
8	Literaturverzeichnis.....	73

---

## 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>
IR	Infrarot-Strahlung
KTL	Kathodische Tauchlackierung
LFT	Langfaserverstärkter Thermoplast
PA	Polyamid
PIF	<i>Polymer Injection Forming</i> (Blechumformung durch Polymerinjektion)
PMA	<i>Post-Molding Assembly</i>
pvt	Druck / spezifisches Volumen / Temperatur (-Diagramm)
PP	Polypropylen
RT	Raumtemperatur
TRL	<i>Technology Readyness Level</i> (Technologie-Reifegrad)
UD	unidirektional verstärkt
UT	unterer Totpunkt (Punkt der maximalen Werkzeugschließung)



## 1 Einleitung und Projektziele

Seit mehreren Jahren erfährt der Leichtbau in der Automobilindustrie eine stetig wachsende Bedeutung, die sowohl durch strengere gesetzliche Limitierungen für den Schadstoffausstoß von Neufahrzeugen, die fortschreitende Elektrifizierung der Mobilität und der damit verbundenen Reichweitenthematik sowie einer allgemeinen Diskussion zum Schadstoffausstoß in Städten und speziell durch Dieselfahrzeuge weiter gefördert wird. Durch konsequenten Leichtbau und die Ausnutzung von weiteren Sekundäreffekten kann das Gesamtgewicht eines Fahrzeugs gesenkt und im Falle von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor der Kraftstoffverbrauch reduziert oder bei Fahrzeugen mit Elektromotor die Reichweite gesteigert werden. Das Verbundprojekt MultiForm adressiert dabei zwei Bereiche des automobilen Leichtbaus – einerseits den werkstofflichen Leichtbau durch Einsatz von langfaserverstärkten Thermoplasten (LFT) und andererseits den Leichtbau durch neue Fertigungsverfahren. Neben dem Leichtmetall Aluminium haben sich vor allem faserverstärkte Kunststoff (FVK) im Automobilbau bewährt, die aufgrund ihrer guten gewichtsspezifischen Werkstoffeigenschaften ein hohes Leichtbaupotenzial und im Falle von thermoplastischen Matrixwerkstoffen gute Verarbeitungseigenschaften aufweisen. Für sicherheitsrelevante Bauteile kann jedoch nach wie vor nicht auf den Einsatz von höchstfesten Stählen verzichtet werden – vor allem in Fahrwerksanwendungen findet man selten FVK als Monowerkstoff vor. Neben dem allgemeinen Kredo des Leichtbaus, „das richtige Material an der richtigen Stelle und zum richtigen Preis“ einzusetzen, gilt es bei Verwendung unterschiedlicher Werkstoffe in einer sogenannten Multi-Material-Bauweise bis auf Bauteilebene, geeignete Fertigungsverfahren zu etablieren, die möglichst viele Prozessschritte der Herstellung kombinieren.

Im Stand der Technik werden bereits einige Prozesse vorgestellt, die in Kombination für die Herstellung von Hybridbauteilen auf Forschungsebene angewendet werden. Häufig wird dabei eine Kombination der Blechumformung mit dem Spritzgießen als Kunststoffprozess angestrebt, doch auch das Fließpressen von Thermoplasten bietet Vorteile, z.B. hinsichtlich der Erzielung großer Faserlängen in einem Bauteil. Die Kunststoffschmelze kann dabei in Analogie zu hydromechanischen Umformprozessen als Wirkmedium eingesetzt werden. Das Ziel dieser kombinierten Fertigungsverfahren ist es dabei, möglichst viele Einzelschritte und Fügeoperationen einzusparen sowie geeignete Verbundprozesse und -werkzeuge zu entwickeln.

### 1.1 Ziele des Projekts

Um ein neues Fertigungsverfahren zu entwickeln und die Funktionsfähigkeit anhand eines realen Bauteils aus dem Fahrzeugumfeld zu demonstrieren, muss der neue Prozess zunächst an einfacheren Probengeometrien mit den entsprechenden Werkzeugkonzepten reproduzierbar verifiziert werden. Dazu sind entsprechende Werkzeugkonzepte für die gemeinsame Umformung von Metall und LFT zu erarbeiten sowie passende Dichtkonzepte zu entwickeln. Neben der praktischen Prozessentwicklung mit einer Optimierung der Prozessparameter müssen heutzutage jedoch auch Berechnungsmethoden vorhanden sein, die einerseits im frühen Stadium einer Bauteilauslegung eingesetzt werden und andererseits das reale Bauteilverhalten zuverlässig vorhersagen können. Auch die Simulation des eigentlichen Prozesses mithilfe der Finite-Elemente-Methode (FEM) ist mittlerweile für Um- und Urformprozesse etabliert und sollte daher bei neuartigen Prozessen nach Möglichkeit von Beginn an mitentwickelt werden, um die Akzeptanz des Verfahrens zu fördern und eine zeitnahe Anwendung in der Industrie nicht zu verzögern. Gleiches gilt für eine erste konservative Bewertung der Wirtschaftlichkeit durch Abschätzung der späteren Bauteilkosten nach verschiedenen Stückzahlenszenarien. Alle zuvor genannten Ziele werden im Projekt MultiForm mit der Entwicklung des Verfahrens Hybridpressen verfolgt.

Nachfolgend sind die wesentlichen Projektziele in chronologischer Reihenfolge aufgelistet:

- Vorauswahl der eingesetzten Werkstoffe (Metall, Kunststoff und Haftvermittler) und Versuchsgeometrien
- Entwicklung einer Auslegungs- und Optimierungsmethode für Hybridbauteile, die durch das Verfahren Hybridpressen hergestellt werden
- Erstellung von Materialmodellen zur Abbildung der Werkstoffverbindung Kunststoff-Haftvermittler-Metall
- Entwicklung einer Prozesssimulation für das Hybridpressen durch Kombination der Einzelsimulationen von Blechumformung und Kunststoff-Fließpressen
- Entwicklung von Werkzeug- und Dichtkonzepten für die kombinierte Umformung von Metall und Kunststoff mit Nutzung der Kunststoffschmelze als Wirkmedium
- Entwicklung des Fertigungsprozesses inkl. Identifizierung und Optimierung der relevanten Prozessparameter
- Analyse und Optimierung der Verbindungseigenschaften
- Analyse des Werkstoffverbundverhaltens unter statischen und dynamischen Lasten sowie Entwicklung der entsprechenden Berechnungsmodelle
- Auslegung und Fertigung von zwei Projektdemonstratoren aus dem Fahrwerksbereich inkl. der erforderlichen Werkzeugtechnik und nachfolgenden Beschnittoperationen
- Bewertung der Wirtschaftlichkeit anhand eines Projektdemonstrators

## **1.2 Projektkonsortium**

Die am Verbundvorhaben beteiligten Unternehmen decken die gesamte Prozesskette eines Bauteils, welches durch das neue Verfahren Hybridpressen hergestellt werden kann, ab. Beginnend bei der Stahlverarbeitung (voestalpine Automotive Components), Kunststoff-Compoundierung und Bauteilherstellung (Weber Fibertech), über den Werkzeugbau (Sprick) und die begleitende Prozesssimulation (SimpaTec) wird die gesamte Prozesskette der Bauteilentwicklung abgebildet. Der Lehrstuhl für Fahrzeugleichtbau (Universität Siegen) fungiert als wissenschaftlicher Projektpartner für Versuche und Entwicklungen in Bezug auf das Thema FE-Modellierung / Methodenentwicklung und gewährleistet zudem die öffentliche Wahrnehmung des Projekts durch Veröffentlichungen und Vorträge auf Fachkonferenzen. Gleichzeitig vervollständigen die assoziierten Partner die Bereiche Werkstoffe (Evonik, Bond-Laminates), Simulation (Altair) und finale Bauteilanwendung im Automobil (Volkswagen). Somit wird sichergestellt, dass die benötigte Kompetenz zu allen relevanten Fragen im Projekt vertreten ist und zudem der Fokus auf die Tauglichkeit des Prozesses für eine spätere Serienanwendung aufrechterhalten wird.

## 2 Ausgangssituation und Stand der Technik

Die konsequente Anwendung des Multi-Material-Designs erfordert neben geeigneten Füge-techniken zwischen Kunststoffen und Metallen auch möglichst wirtschaftliche Herstellungsprozesse. Zunächst werden die derzeit dominierenden Fertigungsverfahren für Kunststoff-Metall-Hybridbauteile in getrennten Prozessketten vorgestellt. Erste Beispiele aus dem aktuellen Stand der Forschung zu innovativeren Fertigungsverfahren, welche eine kombinierte Herstellung von Kunststoff-Metall-Hybridbauteilen adressieren, werden nachfolgend dargestellt.

Abschließend werden einige Forschungsstudien vorgestellt, die FVK-Werkstoffe in radführenden fahrsicherheitsrelevanten Fahrwerkbauteilen einsetzen, um somit das im Rahmen dieses Forschungsvorhabens adressierte Anwendungsfeld für Kunststoff-Metall-Hybridbauteile zu bewerten.

### 2.1 Verarbeitungsverfahren für Langfaserverstärkte Thermoplaste

Das am weitesten verbreitete Verarbeitungsverfahren für thermoplastische Kunststoffe stellt zweifelsohne das Spritzgießen dar. Kurze Zykluszeiten, hohe Stückzahlen, die Designfreiheit des Kunststoffs sowie eine kompakte Anlagentechnik vom Rohstoff (Granulat) bis zum fertigen Produkt sind nur einige Beispiele dafür. Ein Nachteil gegenüber dem Fließpressen stellt jedoch die limitierte Faserlänge dar, die im Bauteil erzielt werden kann, da spätestens bei Erreichen der Einspritzdüsen unter hohem Druck ein Großteil der Fasern zerstört bzw. gekürzt wird. Aus diesem Grund ist auch die Definition einer „langen“ Faser an das jeweilige Verarbeitungsverfahren gebunden. Während beim Spritzgießen eine Faserlänge schon bei weniger als 1 mm als lang bezeichnet werden kann, ist diese für ein Fließpress-Verfahren vergleichsweise kurz. SCHÜRSMANN verwendet folgende Bezeichnungen unabhängig vom Verarbeitungsverfahren [1]:

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

Die Länge einer Faser hat direkten Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften eines Bauteils, was in Abbildung 2-1 verdeutlicht wird. Während die Steifigkeit des FVKs ab einer Faserlänge von etwa 1 mm keine signifikanten Zuwächse mehr erfährt, steigen Festigkeit (bis ca. 6 mm) und Schlagzähigkeit bis  $>20$  mm noch deutlich an:

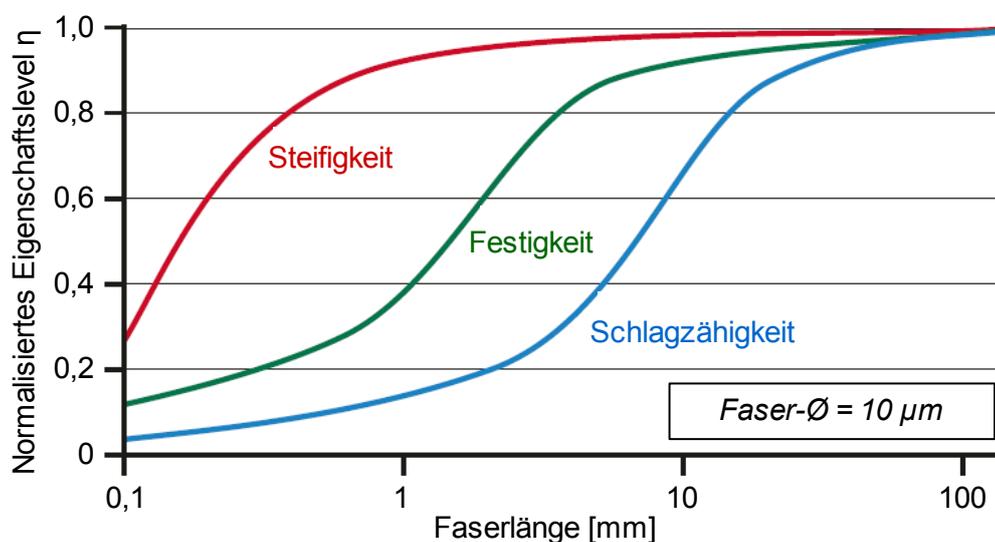


Abbildung 2-1: Einfluss der Faserlänge auf die mechanischen Eigenschaften nach [2]

Dieser Vorteil von LFT kann vor allem durch das Fließpressen genutzt werden, da hierbei die Fasern erst zu einem späten Zeitpunkt der Aufbereitung in die bereits plastifizierte Kunststoffmasse eingefügt und dann als Extrudat in ein geöffnetes Werkzeug eingelegt werden. Zwar gibt es während der Vermischung und in den Fließwegen im Werkzeug eine gewisse Degradation, diese kann jedoch durch geeignete Schnecken-geometrien und optimierte Einlegepositionen reduziert werden. Zudem wird die Kunststoffschmelze im Gegensatz zum Spritzgießen nicht durch enge Heißkanalgeometrien gedrückt, wobei zusätzliche Faserbrüche bzw. Faserschädigung in der Schmelze auftreten.

## 2.2 Metallumformung + Spritzgießen

Grundsätzlich wird bei der Herstellung von Kunststoff-Metall-Hybridbauteilen zwischen einem Fügen nach der werkstofflich getrennten Herstellung (PMA = *Post-Molding Assembly*) und einem prozessintegrierten Fügen (IMA = *In-Mold Assembly*) unterschieden [3]. In den 1990er Jahren wurden erstmals vorgeformte Metalleinleger mit Thermoplasten umspritzt, um großflächige Bauteile mit hoher Funktionsintegration und Steifigkeit zu erhalten – als Beispiel sei der hochintegrative Modulträger des Ford Focus C170 Frontends genannt [4], welcher in Abbildung 2-2 dargestellt ist.



Abbildung 2-2: Anfänge der Hybridbauweise im Fahrzeugbau am Beispiel des Hybrid-Frontends des Ford Focus C170 aus dem Jahr 1999 [4]

Die Aktualität des Verfahrens wird auch durch ein Forschungsprojekt namens HYLIGHT (2014) deutlich, bei dem ein hybrides Frontend hergestellt wurde, indem im Anschluss an die Blechumformung und nach dem Auftragen eines Haftvermittlers lokale Kunststoffrippen an den Metallgrundkörper angespritzt werden [5] [6].

Die Verwendung des Schmelzedrucks zur Umformung eines Blechs ist erstmals im Jahr 2001 durch YANG und PARNG dokumentiert [7]. Weitere Grundlagenuntersuchungen zur Einbringung von Sicken in Metallbleche mit Hilfe eines Thermoplastdrucks bestehen von AL-SHEYYAB [8] und RAUSCHER [9]. HUSSAIN ET AL. haben erstmals auch die Kompressibilität von Thermoplasten analysiert und festgestellt, dass bei höheren Spritzdrücken ein größeres Schmelzevolumen zur Ausformung der identischen Geometrie benötigt wird [10].

Die zuvor genannten Arbeiten haben lediglich eine Blechumformung durch Ausdünnung realisiert. Wehmeyer integriert erstmals den Blecheinzug durch Schließen des Werkzeugs in einer

Spritzgießmaschine [11]. Während dazu eine Teflon-Folie zur Verringerung der Reibung eingesetzt wird, schafft SCHILD Abhilfe durch einen zusätzliche Hydraulikkreislauf in der Spritzgießmaschine und kann somit einen Niederhalter simulieren [12]. Beide Arbeiten nutzen eine einfache Napfgeometrie und Blechdicken von 1,0 mm und teilweise werden Haftvermittler eingesetzt. Ein ähnliches Konzept wird auch von ZORN ET AL. verwendet, wobei das Werkzeug vertikal in einer Presse angeordnet und mit einem Spritzgießaggregat verbunden ist. Beim Schließen des Werkzeugs erfolgt der Blecheinzug. Durch das Einspritzen der Kunststoffschmelze wird sowohl eine Rippenstruktur zur Verstärkung als auch ein Hinterschnitt zur formschlüssigen Verbindung von Metall und Kunststoff geschaffen wird [14].

### **2.3 Innenhochdruckumformung + Spritzgießen**

Eine wirkmedienbasierte Umformung in Kombination mit dem Spritzgießen wurde auch von der Daimler AG entwickelt und bei der Firma ElringKlinger in Serienanwendungen etabliert [15]. Bei dem als Hydroform-Hybridtechnologie (HFH-Technologie) Verfahren wird zunächst ein rohrförmiges Halbzeug aus z.B. Aluminium in einer Innenhochdruckumformung geformt und anschließend im gleichen Werkzeug und unter Aufrechterhaltung des Innendrucks mit Funktions- und Verstärkungselementen umspritzt. Die Verbindung kann sowohl über eine außenliegende Haftvermittlerbeschichtung als auch über strukturierte Oberflächen erfolgen. Das Verfahren wird aktuell bei Cockpitquerträgern (CQT) und Frontend-Modulen erfolgreich in der A- und B-Klasse (CQT) sowie der C- und E-Klasse (Frontend) eingesetzt [16]. Obwohl die Ausformung des Metalls nicht durch einen Kunststoffdruck erfolgt, handelt es sich um ein kombiniertes Verfahren mit einem gemeinsamen Werkzeug. LANDGREBE ET AL. haben zudem verschiedene Oberflächenstrukturierungen untersucht und dabei festgestellt, dass durch Einsatz eines Haftvermittlers die geringste Anzahl an Prozessfehlern registriert werden kann [17].

### **2.4 Tiefziehen + Fließpressen**

KELLNER beschreibt in seiner Dissertation ein Verfahren namens 3D-Hybrid, bei dem die Prozesse Tiefziehen und Fließpressen nacheinander ausgeführt werden und welches vornehmlich an biegebelastete Bauteile adressiert ist [18]. Durch die Entkopplung der Einzelprozesse ist es zudem möglich, höchstfeste Metallwerkstoffe zunächst durch eine Warmumformung umzuformen und nach dem Abkühlen im Werkzeug mit einer innenliegenden LFT-Struktur zu verstärken. Dabei kommen ebenfalls Haftvermittler zum Einsatz und zusätzliche Verstärkungen können z.B. durch Organobleche realisiert werden. Am Beispiel einer B-Säule kann somit eine Gewichtsreduktion von 13 % bei einer gleichzeitig um 25 % gestiegenen Energieaufnahme erzielt werden [19]. Neben dem Leichtbaugedanken hinter diesem Verfahren kann zusätzlich die Anzahl der erforderlichen Bauteile reduziert werden, da eine belastungsgerechte Auslegung mit Hilfe der LFT-Rippenstruktur möglich wird, die ohne Verstärkungsbleche auskommt.

## 2.5 FVK in Fahrwerkbauteilen

Außerhalb des Motorsports gibt es nur wenige Anwendungen, bei denen faserverstärkte Kunststoffe im Fahrwerksbereich eingesetzt werden. Neben den zumeist höheren Herstellungskosten im Vergleich zu metallischen Bauteilen ist vor allem das fehlende Fail-Safe-Verhalten, welches eine breitere Anwendung verhindert. Während metallische Bauteile vor dem Versagen sichtbar verformen oder eine Schädigung durch Risse erkennbar wird, versagen FVK-Bauteile in der Regel abrupt und ohne Vorankündigung. Dies widerspricht den Anforderungen der Fahrzeughersteller und kann z.B. durch eine Werkstoffkombination von Metall und Kunststoff verhindert werden. Die Kombination von Metall und FVK zur Herstellung ausfallsicherer Fahrzeugbauteile wie z.B. Lenker wird im Patent Hybridpressen [20] beschrieben. Bei den nachfolgend vorgestellten Beispielen für Fahrwerkbauteile handelt es sich um Ergebnisse von Forschungsprojekten, die bisher nicht in einem Realfahrzeug eingesetzt bzw. getestet wurden.

SPANCKEN ET AL. haben einen hybriden Querlenker aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff (CFK) und Aluminium entwickelt, bei dem alle Lageranbindungen aus massivem Aluminium gefertigt wurden [21]. Der finale Demonstrator wurde im Handlaminier-Verfahren hergestellt und weist eine Gewichtsreduktion gegenüber einer Stahl-Referenz von 35 % auf. Es darf jedoch bezweifelt werden, dass dieser Querlenker auch nur annähernd wirtschaftlich in größerer Stückzahl herstellbar ist und zudem aufgrund der reinen CFK-Lagen die Anforderung an ein gutmütiges Versagensverhalten erfüllt.

In der von DREBENSTEDT ET AL. beschriebenen Entwicklung eines hybriden Querlenkers aus Aluminiumschaum und faserverstärktem PA 6 wird das Versagensverhalten hingegen berücksichtigt. Der Kern aus Aluminiumschaum wird dabei durch eine hybride Decklage aus Aluminium und FVK abgedeckt und zusätzlich mit Hilfe einer Silan-Beschichtung angebunden. Dadurch sollen eine hohe Versagenstoleranz sowie ein Fail-Safe-Verhalten gewährleistet werden. Die Anbindung der Lager erfolgt in diesem Fall formschlüssig durch in den Schaum integrierte Metallbleche [22].

Ein generischer Längslenker für eine Hinterachse wurde im Rahmen eines Forschungsprojekts durch KURTENBACH ET AL. im Spritzgießverfahren entwickelt. Durch verschiedene Maßnahmen, sowohl auf der Rohstoff- als auch auf der Anlagenseite, wurde das Ziel verfolgt, die Faserlänge eines PA 6.6 Werkstoffs gegenüber einem Kurzfasergarnulat im Bauteil signifikant zu steigern. Am Projektende wurde eine durchschnittliche Faserlänge von 0,75 mm erzielt, die immerhin um 60 % über dem Startwert liegt [23]. Gleichzeitig konnte eine Gewichtsersparnis gegenüber einem Stahl-Längslenker um etwa 30 % reduziert werden.

### 3 Neues Fertigungsverfahren Hybridpressen

Nachfolgend werden die Prozessschritte des Hybridpressens, die im Projekt eingesetzten Werkstoffe sowie die erforderliche Anlagentechnik zur Durchführung des Verfahrens näher erläutert. Ein besonderes Augenmerk liegt dabei auf einer breiten Anwendbarkeit des Verfahrens bei gleichzeitig möglichst geringen Investitionen.

#### 3.1 Prozessbeschreibung

Die Grundidee des Verfahrens ist es, ein Umformverfahren für Blechwerkstoffe (Tiefziehen) mit einem Urformverfahren für faserverstärkte Kunststoffe (Fließpressen) in einem gemeinsamen Werkzeug und Prozessschritt zeitgleich zu kombinieren [20]. Der thermoplastische Kunststoff verhält sich dabei wie ein Wirkmedium und sorgt für die finale Ausformung des Blechs. Durch Einsatz eines Haftvermittlers als Vorbeschichtung auf dem Metallblech kann somit am Prozessende ein fertiges Hybridbauteil aus dem Umformwerkzeug entnommen werden. Im Gegensatz zu bekannten Folienprägeverfahren durch Hinterspritzen sollen durch das Hybridpressen auch Blechwerkstoffe mit einer Blechstärke von deutlich über 1 mm umgeformt werden können. Das nachfolgende Schaubild zeigt die vier relevanten Prozessschritte des Verfahrens:

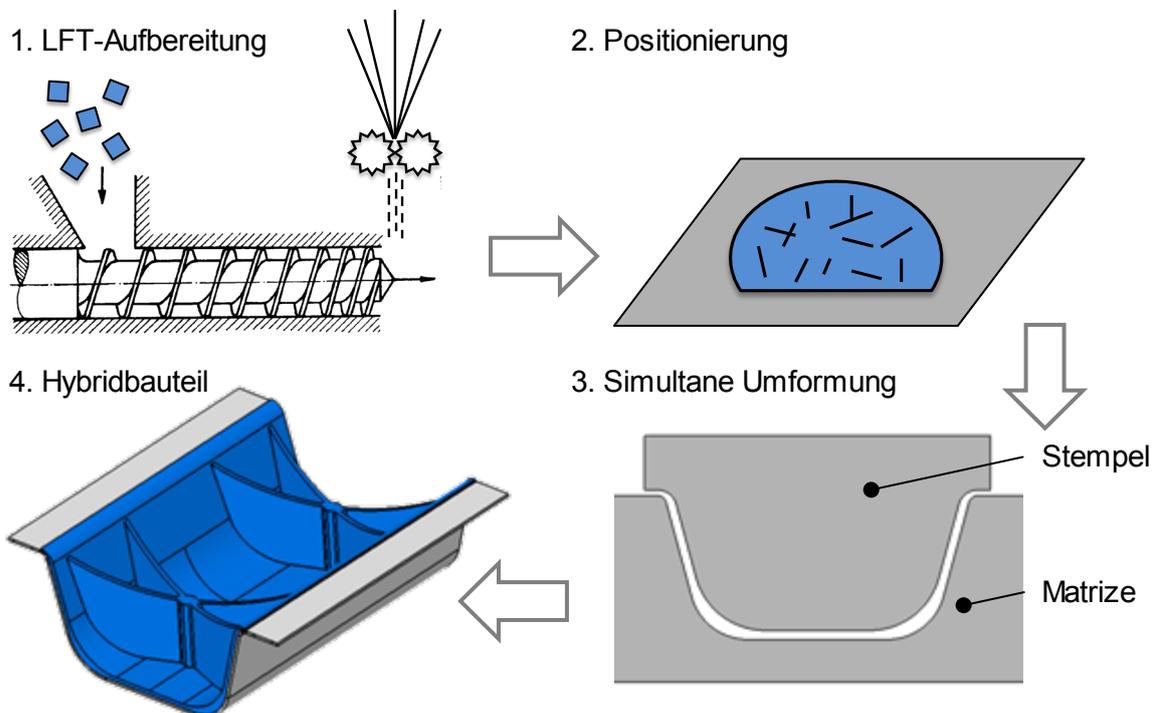


Abbildung 3-1: Ablauf des Verfahrens Hybridpressen [25]

Zunächst erfolgt die Aufbereitung des LFT-Extrudats in einem Compounder (1.), in dem die Langfasern (i.d.R. Glasfasern) erst nach der Plastifizierung des Thermoplasts in die Schmelze eingebracht und einer kurzen, zweiten Schneckenstufe zusammen homogenisiert werden. Anschließend kann dieses Extrudat entweder direkt verarbeitet oder durch eine nachträgliche Erwärmung für den weiteren Prozess vorbereitet werden. Das mit Haftvermittler beschichtete Blech wird vorgewärmt und zusammen mit dem LFT-Extrudat in das Umformwerkzeug eingelegt (2.). Dabei entscheidet das jeweilige Werkzeugkonzept über die Anordnung beider Werkstoffe, hierzu sei jedoch auf das Kapitel 4.1 verwiesen. Der eigentliche Kern des Hybridpressens erfolgt im dritten Schritt mit der simultanen Umformung von Metallblech und Thermoplast. Wie in Abbildung 3-1 zu erkennen, unterscheiden sich die Konturen von Stempel und Matrize nicht

allein durch eine konstante Blechdicke, sondern durch einen zusätzlichen Freiraum im Bereich der Radien. Dieser Freiraum wird im Prozess durch den LFT ausgefüllt und veranschaulicht, dass die Blechumformung am Prozessende nicht durch Stempelkontakt erfolgt. Nach der Werkzeugöffnung kann direkt ein verbundenes Hybridbauteil entnommen werden, welches am Beispiel eines U-Profils (4.) dargestellt ist. Neben zwei Kreuzrippen zur Verstärkung des Profils weist dieses auch eine vollflächige LFT-Schicht und eine erhöhte Schichtdicke in den Radien auf. Hiermit sollen zwei weitere Vorteile des Verfahrens veranschaulicht werden: einerseits können die Rippen durch die vollflächige LFT-Schicht sicher mit dem Metallblech auch bei nur geringer Verbindungsfestigkeit stoffschlüssig angebunden werden und andererseits ermöglicht eine variable LFT-Schichtdicke eine Anpassung an die jeweilige Bauteilbelastung.

Zusammenfassend ergeben sich folgende Vorteile:

- Gewichtsreduktion von Stahlbauteilen durch Blechdickenreduktion und gleichzeitige Verstärkung durch eine innenliegende LFT-Struktur
- Belastungsgerechte Bauteilauslegung durch die Designfreiheit des LFTs
- Vorhersagbares Versagensverhalten und gleichzeitig ein Fail-Safe-Verhalten
- Herstellung eines Metall-LFT-Werkstoffverbunds mit Hilfe eines Haftvermittlers in einem gemeinsamen Prozessschritt → Umformen, Urformen und Fügen in einem Schritt
- Einsatz von Langfasern zur Erzielung maximaler Werkstoffeigenschaften

### 3.2 Werkstoffe

Für das Hybridpressen werden grundsätzlich ein LFT und ein Metallblech benötigt, die über einen Haftvermittler stofflich miteinander verbunden werden. Zu Projektbeginn wurde entschieden, Stahl als Metallwerkstoff auszuwählen, da Aluminium aufgrund der deutlich geringeren Festigkeiten nicht für die späteren Demonstratoren aus dem Fahrwerksbereich eingesetzt werden kann.

#### 3.2.1 Metallwerkstoffe

Die nachfolgende Tabelle 3-1 gibt einen Überblick über die in Projekt verwendeten Blechwerkstoffe. Neben einem weichen Tiefziehstahl und höherfesten Mehrphasenstählen werden auch höchstfeste Stähle bis zu einer Festigkeit im Bereich von 800 MPa eingesetzt.

	$R_{p0,2}$ [MPa]	$R_m$ [MPa]	$A_{80,min}$ [%]
<b>DC 04 (1.0338)</b>	140-210	270-350	38
<b>HC 340LA (1.0548)</b>	340-420	410-510	21
<b>22MnB5</b>	380-480	>480	18
<b>HR 330 Y580T-DP (DP600)</b>	330-470	580-670	24
<b>HCT 780X (DP800)</b>	450-560	> 780	14
<b>SZBS 800</b>	> 680	800-980	10

Tabelle 3-1: Im Projekt eingesetzte Stahlgüten

Im Stand der Technik (siehe Kapitel 2.2 bis 2.4). wurden bereits Verfahren vorgestellt, die weiche Tiefzieh-Stahlbleche bis zu einer Blechdicke von 1,0 mm durch einen Kunststoffdruck umformen. Die in diesem Projekt umzuformenden Blechdicken und Festigkeiten deutlich höher, um den Einsatz der Hybridbauteile in tragenden Bauteilen zu ermöglichen.

In diesem Projekt beträgt die höchste Blechdicke 2,4 mm für den Querlenker-Demonstrator bei einer Werkstofffestigkeit von mindestens 480 MPa bzw. 2,0 mm für den Längslenker-Demonstrator bei einer Festigkeit von mehr als 800 MPa.

### 3.2.2 LFT

Bei dem eingesetzten LFT handelt es sich um ein eigenes Compound der Firma Weber Fibertech, welches aus einem Polyamid 6 als Grundwerkstoff besteht und vor Ort durch weitere Additive und die Beimischung von Langglasfasern (25 mm) zu einem LFT-Extrudat compoundingiert wird. Im Gegensatz zu Polypropylen weist PA einen höheren Schmelzpunkt und vor allem eine höhere Wärmeformbeständigkeit auf und eignet sich somit auch für Bauteile, die durch den Prozess einer Kathodischen Tauchlackierung (KTL) geführt werden. Eine rheologische Charakterisierung des Compounds zur Durchführung von Prozesssimulationen wird in Kapitel 4.2.1 dargestellt. Die mechanische Charakterisierung auf Basis von fließgepressten LFT-Platten ist in Kapitel 5.1.1 dargestellt.

Aus prozesstechnischer Sicht hat LFT wie alle Thermoplaste die besondere Eigenschaft, einerseits direkt aus dem Extruder oder andererseits durch nachträgliche Erwärmung verarbeitet werden zu können. Dies ermöglicht es auch Unternehmen ohne eigene Compoundierung, den Werkstoff als Halbzeug zu verarbeiten, wenn entsprechende Anlagen zur Erwärmung (z.B. Umluftofen, Paternoster-Ofen oder Infrarot-Strahler) vorhanden sind.

### 3.2.3 Haftvermittler zur stoffschlüssigen Verbindung von Metall und LFT

Zur Einsparung eines zusätzlichen Fügeschrittes und damit zur direkten Verbindung von LFT und Metall beim Hybridpressen wird ein Haftvermittler eingesetzt, der bereits als Beschichtung vor dem eigentlichen Umformprozess auf die Stahlbleche appliziert werden kann. Es handelt sich um den Haftvermittler Vestamelt® Hylink von Evonik, der auf einem Co-Polyamid basiert und somit nach Aktivierung bei ca. 200 °C eine stoffschlüssige Verbindung mit der Polyamid 6 Matrix des LFTs eingehen kann. Das Haftvermittlersystem kann als Tauchlackierung (*Coil-Coating*) und Pulverbeschichtung appliziert werden, wobei mit der Pulvervariante deutlich höhere Schichtdicken erzielt werden können, die sich aufgrund der Elastizität des Haftvermittlers positiv auf die Aufnahme von internen Spannungen durch unterschiedliche Wärmeausdehnungen von Stahl und PA 6 auswirken. Im Projekt wird eine Schichtdicke von 100 µm angestrebt, die durch eine manuelle Applikation des Haftvermittlers auf vorbehandelte Stahlbleche direkt bei Evonik erfolgt. Die Vorbehandlung umfasst unter anderem eine Phosphatierung sowie eine Nachpassivierung zur Gewährleistung einer guten Verbindung zwischen Metalloberfläche und Haftvermittler und wird ebenfalls extern durchgeführt. [30]

## 3.3 Anlagentechnik

Die Versuche zum Projekt werden parallel an der Universität Siegen sowie bei den Firmen voestalpine und Weber Fibertech durchgeführt. Die jeweils verwendete und generell benötigte Anlagentechnik wird daher nachfolgend kurz erläutert.

### 3.3.1 Hydraulische Pressen

Die eingesetzte Pressentechnik für die Projektdemonstratoren bei den Unternehmen Weber Fibertech und voestalpine wird im Serienbetrieb für das Fließpressen von LFT (Dieffenbacher 3.600 t, Weber Fibertech) sowie die Kalt- oder Warmumformung von Metallblechen (Müller-Weingarten 1.400 t, voestalpine) eingesetzt. In beiden Fällen handelt es sich um hydraulisch angetriebene Pressen, wobei die Presse von Weber Fibertech eine zusätzliche Funktion zur

aktiven Parallelhaltung und aufgrund des neueren Baujahres deutlich umfangreichere Einstellmöglichkeiten bei gleichzeitig höherer Genauigkeit besitzt. Alle Versuche zur Herstellung der Probegeometrien und Zugproben werden am Lehrstuhl für Fahrzeugleichtbau auf einer 225 t Presse der Firma Wickert durchgeführt.

Es zeigt sich, dass für den Prozess Hybridpressen keine besondere Pressentechnik erforderlich ist. Wünschenswert sind analog zum Fließpressen von LFT die Einstellbarkeit eines Geschwindigkeitsprofils für den Pressgang sowie eine zusätzliche Hydraulikfunktion zur Realisierung einer Ziehkissenfunktion.

### 3.3.2 Werkzeugtechnologie

Die eingesetzte Werkzeugtechnik orientiert sich sowohl an der Kunststoffurformung als auch an der Metallumformung und enthält Elemente von beidem. Einerseits muss z.B. die Geometrie der Rippen im Stempel als Negativform vorhanden sein und andererseits werden Stempel, Matrize und Niederhalter zur Steuerung der Blechumformung benötigt. In Kapitel 4.1 werden anhand der Probegeometrien explizit die entwickelten Dichtmechanismen vorgestellt und Einzelheiten der benötigten Werkzeugelemente erläutert.

In der Kunststofftechnik ist es üblich, dass alle Werkzeuge temperiert sind. Hierzu eignen sich sowohl die Flüssigtemperierung (mit Öl oder Wasser) als auch elektronische Heizelemente mit einer entsprechenden Regelung. Aufgrund der benötigten Werkzeugtemperatur von 75-90 °C ist im Projekt eine Temperierung mit Wasser ausreichend und wird überwiegend eingesetzt. Ein Vorteil gegenüber elektrischen Heizelementen stellt dabei die Möglichkeit dar, die durch den schmelzförmigen LFT eingebrachte Wärme aus dem Werkzeug abzuführen. Dies ist vor allem in der Serienfertigung wichtig.

### 3.3.3 Infrarot-Strahler

Für die Versuche am FLB und bei voestalpine wird der LFT vor der Verarbeitung zunächst in den schmelzeförmigen Zustand mit einer Verarbeitungstemperatur im Bereich von 270-280 °C versetzt. Dies geschieht mit einem mittelwelligen Infrarot-Strahler der Firma Krelus, da diese Strahlung im Vergleich zu Konvektion in einem Umluftofen zu einer deutlich schnelleren Aufheizung des LFTs führt. Versuche beim assoziierten Projektpartner Bond-Laminates haben gezeigt, dass LFT-Extrudate mit einer Dicke von 10 mm etwa 6 Minuten bis zur Erreichung der Verarbeitungstemperatur im Kern benötigen. Diese Aufheizzeit kann in den Versuchen und bei Verwendung von dünneren LFT-Extrudaten (ca. 7-8 mm) auf 4-5 Minuten reduziert werden. Eine vergleichbare Aufheizung im Ofen würde in etwa die vierfache Zeit benötigen. In der nachfolgenden Tabelle sind die technischen Daten des Infrarot-Strahlers aufgeführt:

<b>KRELUS IR G14-25-2.5 MINI 7.5 (insgesamt 8 Module)</b>	
Maximalleistung:	2x 10 kW
Abmessungen (2 Felder):	2x 500x500 mm
Temperaturmessung:	2x optische Pyrometer

Tabelle 3-2: Technische Daten des Infrarot-Heizfeldes

Um eine Verbrennung des LFTs zu verhindern, werden mit Hilfe von zwei optischen Pyrometern die Oberflächentemperaturen der Ober- und Unterseite des Extrudats während des Aufheizvorgangs kontinuierlich gemessen und die Leistung der Strahler bei Erreichen der vorgewählten

---

Maximaltemperatur automatisch reduziert. Die Erwärmung des Kerns erfolgt somit durch Wärmeleitung im Werkstoff selbst.

Insgesamt wird deutlich, dass für eine Anwendung des Hybridpressens keine außergewöhnliche Anlagentechnik erforderlich ist. Moderne hydraulische Pressen erfüllen i.d.R. die Anforderung an eine regelbare Geschwindigkeit, die Möglichkeit zur Ansteuerung eines zusätzlichen Hydraulikkreislaufes sowie die Aufzeichnung von Pressendaten wie Kraft und Weg.

## 4 Hybridpressen: Verfahrens- und Dichtkonzeptentwicklung

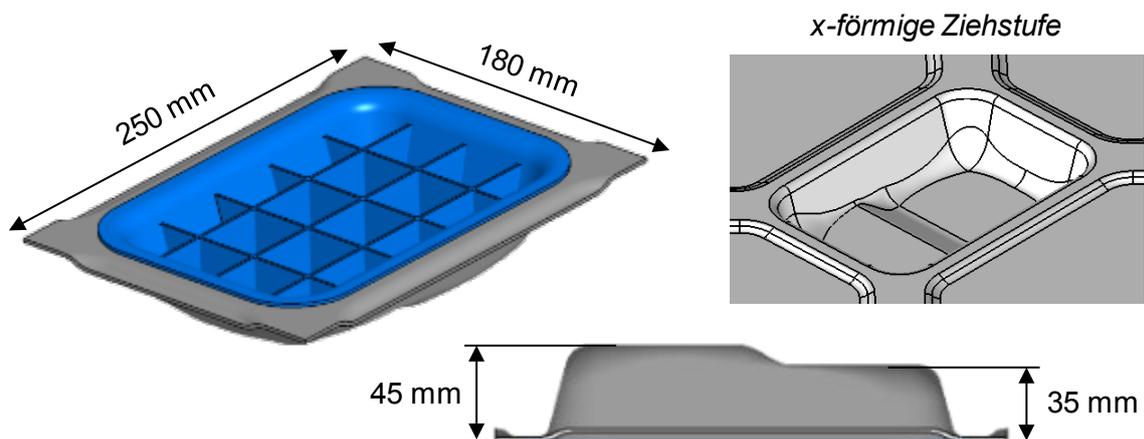
Zur Erforschung der Wirkzusammenhänge beim Hybridpressen wird von Projektbeginn an eine parallele Entwicklung des Verfahrens in Versuchen und Prozesssimulationen angestrebt. Im Versuch können Dichtkonzepte und Verfahrensgrenzen direkt untersucht werden. Um das Verfahren in der Simulation abbilden zu können, müssen Blechumformsimulation und LFT-Fließpresssimulation gekoppelt werden. In Kapitel 4.2 wird die o.g. Kopplung der beiden Simulationen untersucht. Zunächst wird jedoch die Verfahrensentwicklung mittels Laborversuchen in Kapitel 4.1 dargestellt.

### 4.1 Verfahrenserprobung mit Versuchsgeometrien

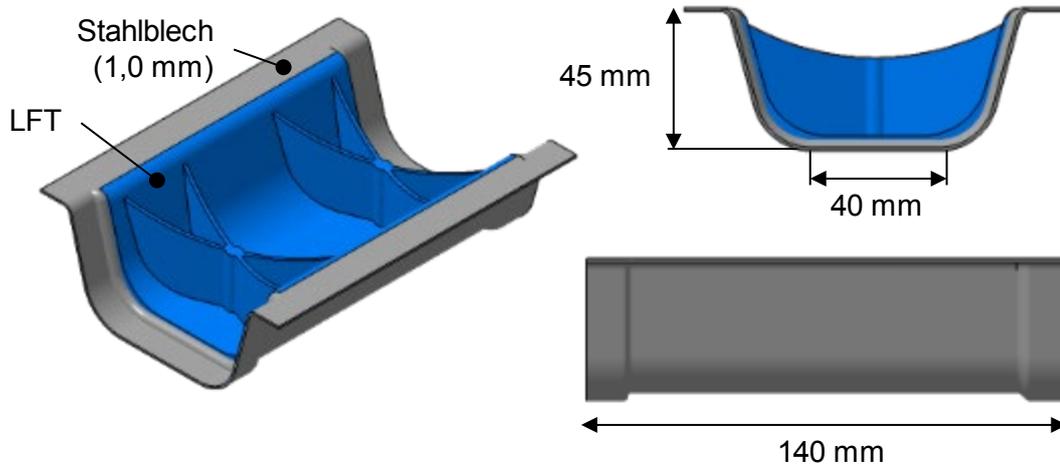
Im Rahmen des Projekts wurde zunächst mit zwei U-Profilen und einer Wannengeometrie insgesamt drei Probengeometrien geplant, um einerseits unterschiedliche Werkzeug- und Dichtkonzepte zu erproben und andererseits wichtige Erkenntnisse zur späteren Werkzeugauslegung für die Demonstratoren zu erlangen. Während die Wannengeometrie rundum geschlossen ist, sind die Profile zu beiden Profilenden geöffnet. Anhand dieser Geometrien lassen sich sehr viele Bauteile aus dem Bereich der Fahrzeugkarosserie abbilden, wie z.B. Träger, Säulen oder Verstärkungsbleche. Auch halboffene Profile können theoretisch zunächst durch eine geschlossene Geometrie hergestellt und anschließend durch eine Beschnittoperation wieder geöffnet werden. Neben der Vorstellung der Dichtkonzepte erfolgt in diesem Kapitel auch eine Bewertung der erzielten Blechumformung durch das Hybridpressen für die Wannengeometrie und kurze U-Profil. Alle nachfolgend beschriebenen Versuche wurden auf der Versuchspresse des FLBs durchgeführt.

Übersicht über die Versuchsgeometrien zur Prozessentwicklung [28]:

- Wannengeometrie:



- Kurzes U-Profil:



#### 4.1.1 Geschlossenes Wannengeprofil

Das Werkzeug- und Dichtkonzept für die Wannengeometrie stellt sich nahezu von selbst aus der reinen Blechumformung auf. Zur Vermeidung von Faltenbildung im Blecheinzug muss bei Wannengeometrien ein Niederhalter eingesetzt werden, der gleichzeitig zur Abdichtung gegenüber dem LFT genutzt werden kann. Zur hydraulischen Steuerung dieser Niederhalterfunktion wird bei Blechumformpressen üblicherweise ein im Pressentisch verbautes Ziehkissen eingesetzt, welches die nachfolgend abgebildete Anordnung des Werkzeugs in sogenannter Hutlage erfordert. Demnach ist der Stempel starr in der unteren Werkzeughälfte fixiert und die Matrize wird zusammen mit der oberen Werkzeughälfte bewegt.

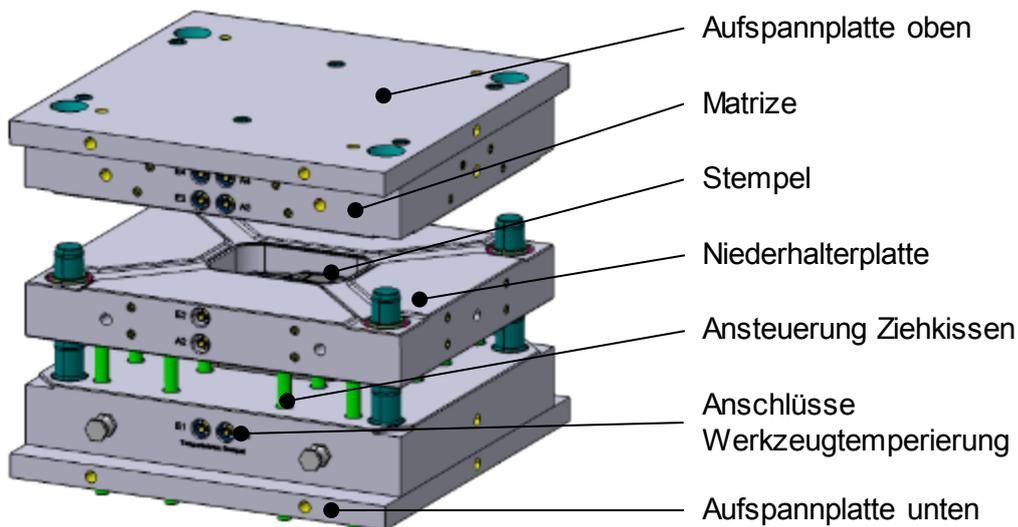


Abbildung 4-1: Aufbau des Wannengeräts [27]

Diese Anordnung bedingt, dass Blech und LFT nicht gemeinsam ins Werkzeug eingelegt werden können, sondern der LFT zunächst direkt auf dem beheizten Stempel und das Blech anschließend auf der Niederhalterplatte platziert wird. Aus diesem Grund ist die Niederhalterplatte deutlich massiver als bei reinen Blechumformungen ausgeführt und erschafft somit ein ausrei-

chend großes Volumen zur unkomprimierten Einlage des LFTs. Das Werkzeug ist für eine Blechdicke von 1-2 mm und geometrisch bis zur Stahlgüte DP600 für eine reine Blechumformung nach Umformsimulation und Optimierung der Geometrie ausgelegt. Im Vergleich zu einfachen Napfgeometrien ist die Wannengeometrie bereits von der reinen Blechumformung her anspruchsvoller, da es zwei Ebenen unterschiedlicher Tiefe gibt, um eine zusätzliche Variation für die spätere Analyse der Ausformung und verschiedene Radien-Übergänge zu generieren.

Bei einer Verfahrenskombination von Tiefziehen und Fließpressen muss der Zielkonflikt zwischen einem guten Blecheinzug bei gleichzeitig hoher Dichtigkeit gegenüber dem LFT gelöst werden. Für das Wannenzugwerkzeug wurde dies mit einer wegabhängigen Steuerung der Niederhalterkraft umgesetzt. Somit kann zu Beginn der Umformung eine geringe Kraft für einen ausreichenden Blecheinzug gewährleisten und diese bis zum Prozessende, wenn das Blech mit Hilfe des Kunststoffdrucks ausgeformt wird, stufenweise erhöht werden. Die jeweiligen Stufen und Höhen der Niederhalterkraft sind sowohl von der Geometrie als auch dem Werkstoff abhängig. Beispielhaft sind die Pressenparameter für das Hybridpressen von einem weichen DC04 Stahl und einem höherfesten DP600 Stahl mit einer Blechdicke von 2 mm genannt. Die Werte beziehen sich auf den Abstand zum unteren Totpunkt (UT) – der Punkt mit der maximalen Werkzeugschließung.

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 4-1: Schließprofil der Presse zur Fertigung der Wannengeometrie

Neben der Niederhalterkraft ist zudem die Steuerung der Pressgeschwindigkeit analog zum Fließpressen von besonderer Relevanz. Diese wird zu Beginn hoch und gegen Prozessende sehr gering gewählt. Es zeigt sich, dass bei zu hoher Pressgeschwindigkeit trotz ansteigender Niederhalterkraft Undichtigkeiten entstehen. Für finalen Geschwindigkeitsparameter zu den oben genannten Blechen in Abhängigkeit von UT lauten wie folgt:

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

Tabelle 4-2: Pressgeschwindigkeitsprofil für die Wannengeometrie

Aufgrund der fehlenden Prozesssimulation des Hybridpressens wurden Stufenversuche durchgeführt, um die Verteilung des LFTs, die Füllung der Rippen sowie die Ausformung des Blechs während der Umformung analysieren zu können. Nachfolgend sind die Ergebnisse dieser Stufenversuche abgebildet. Bereits zu Prozessbeginn (50 mm und 30 mm vor UT) ist zu erkennen, dass das Blech durch die hohe Viskosität des LFTs allein durch den Kunststoffdruck und nicht durch direkten Stempelkontakt geformt wird. Nichtsdestotrotz wird auch ein Großteil des LFTs in das freie und eingeschlossene Volumen zwischen Blech, Niederhalterplatte und Stempel verdrängt und erst gegen Prozessende zur finalen Ausformung des Blechs eingesetzt.

50 mm vor UT:



30 mm vor UT:



15 mm vor UT:



UT:



Abbildung 4-2: Stufenversuche der Wannengeometrie [28]

Mit Hilfe der Formänderungsanalysesoftware der Firma GOM kann die Ausformung des Blechs zusätzlich zur visuellen Analyse auch quantifiziert werden. Dazu werden die Blechplatinen vor der Umformung mit einem regelmäßigen Punktemuster markiert (geätzt), welches nach der Umformung automatisiert durch die Software und mit bis zu 100 Einzelbildern aus verschiedenen Perspektiven zu einer 3D-Oberfläche des Bauteils zusammengefügt wird. Somit ist neben einer Auswertung der Blechbeanspruchung (z.B. Dehnung) auch ein Abgleich mit der CAD-Geometrie der Matrize und somit eine Analyse der Ausformung möglich. Die nachfolgende Abbildung 4-3 verdeutlicht, dass die DC04-Platine nahezu vollständig ausgeformt ist und nur in den Bereichen der kleinsten Radien eine Abweichung von weniger als 1,0 mm aufweist. Im Ge-

gensatz dazu zeigt die Ausformung der DP600-Platine deutliche Defizite. Neben den identischen Bereichen der DC04-Platine sind es vor allem die vier Ecken des tiefen Bereichs, an denen eine fehlende Ausformung von bis zu 4 mm gegenüber der Matrizengeometrie festzustellen ist.

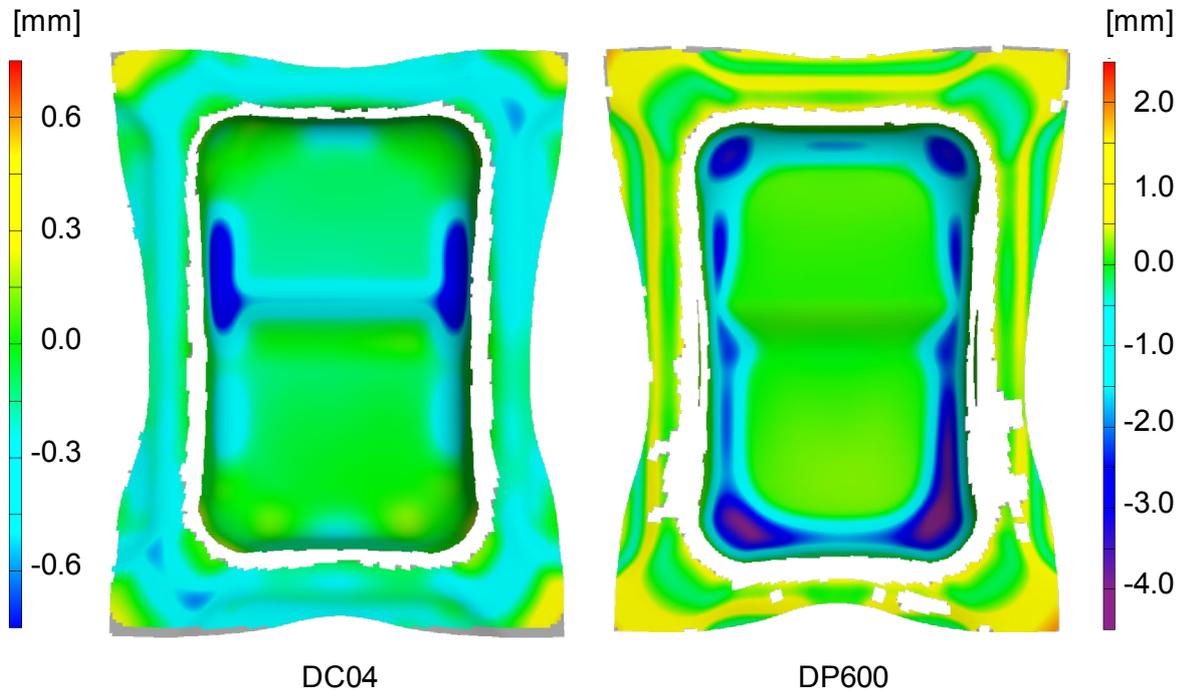


Abbildung 4-3: Umformanalyse der Wannengeometrie mit GOM Argus [28]

#### 4.1.2 Offenes U-Profil

Im Vergleich zur Wannengeometrie war die Herausforderungen zur Entwicklung eines Dichtkonzepts um ein Vielfaches größer. Neben der Tatsache, dass es zwei offene Profilenden gibt, die zu Prozessbeginn noch die Form einer flachen Platine aufweisen und im Prozess kontinuierlich umgeformt werden, kann zudem kein umlaufender Niederhalter eingesetzt werden. Insgesamt wurden zwei eigenständige Werkzeuge für das U-Profil entwickelt und in mehreren Optimierungsschleifen sowohl geometrisch als auch technisch optimiert. Im Kapitel 4.1.3 erfolgt ein genauerer Einblick in eine Werkzeugvariante mit Sonderfunktion (LFT-Reservoir im Stempel) während dieser Optimierungsphase. Aus diesem Grund wird an dieser Stelle lediglich das finale Werkzeugkonzept vorgestellt und die Funktionsweise anhand von Stufenversuchen demonstriert.

Der Aufbau des Werkzeugs entspricht dem eines klassischen Umformwerkzeugs mit einer Anordnung in Normallage – der Stempel befindet sich somit in der beweglichen oberen Werkzeughälfte und die Matrize in der fixierten unteren. Zur Steuerung des Blecheinzugs und der Vermeidung von Faltenbildung gibt es zusätzlich einen Niederhalter, deren Kraft anstelle eines Ziehkissens mit einer einstellbaren Anzahl an Gasdruckfedern aufgebracht wird. Die Besonderheit des Werkzeugkonzepts liegt jedoch nicht im allgemeinen Aufbau, sondern in der Kombination eines mehrteiligen Stempels mit vorauseilenden Dichtelementen an der Seite und den im Aufbau erkennbaren Gegenhaltern in der Matrize begründet, die das Blech während der Umformung klemmen. Diese sind ebenfalls auf Gasdruckfedern gelagert, so dass eine Einfederung gegen Prozessende möglich wird und der mittlere Teil des Stempels mit der Gegenkontur der

Rippen den erforderlichen Druck auf den LFT aufbringen kann. Die Gegenhalter sind unterhalb der Matrize auf einer gemeinsamen Platte fixiert, die von Schraubenfedern gestützt wird.

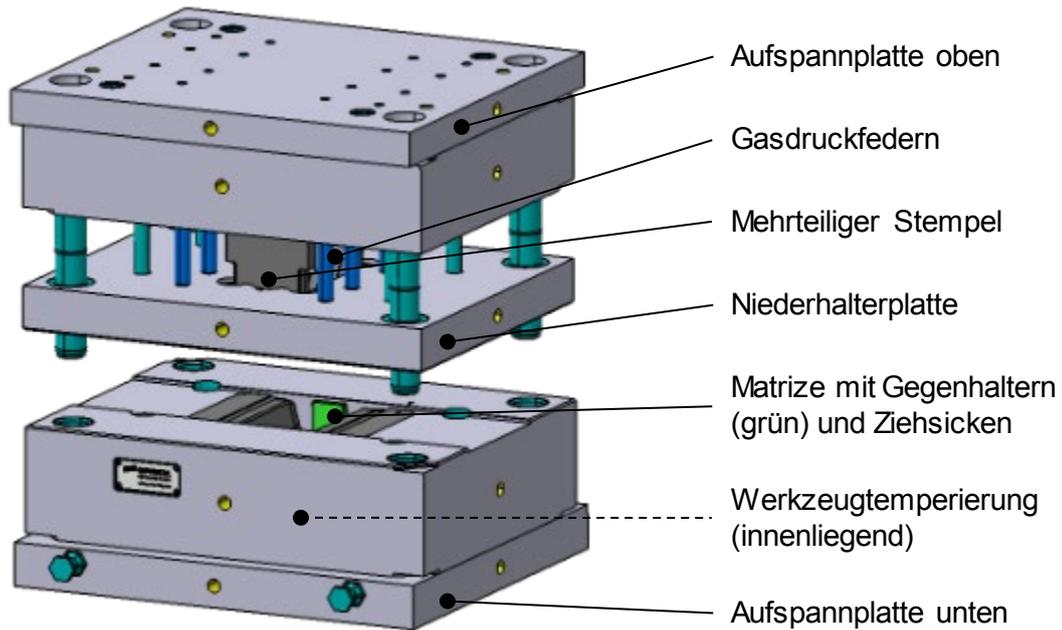


Abbildung 4-4: Aufbau des U-Profil-Werkzeugs [27]

Zusätzlich weist das U-Profil an den offenen Enden geometrische Ausformungen nach außen auf, die kunststofffrei bleiben (siehe Abbildung 4-7). Die vorausseilenden Dichtelemente formen somit das Blech bereits um, bevor der LFT im Inneren komprimiert und zu den Seiten gedrückt wird. Das Gesamtkonzept ist zum besseren Verständnis nachfolgend abgebildet:

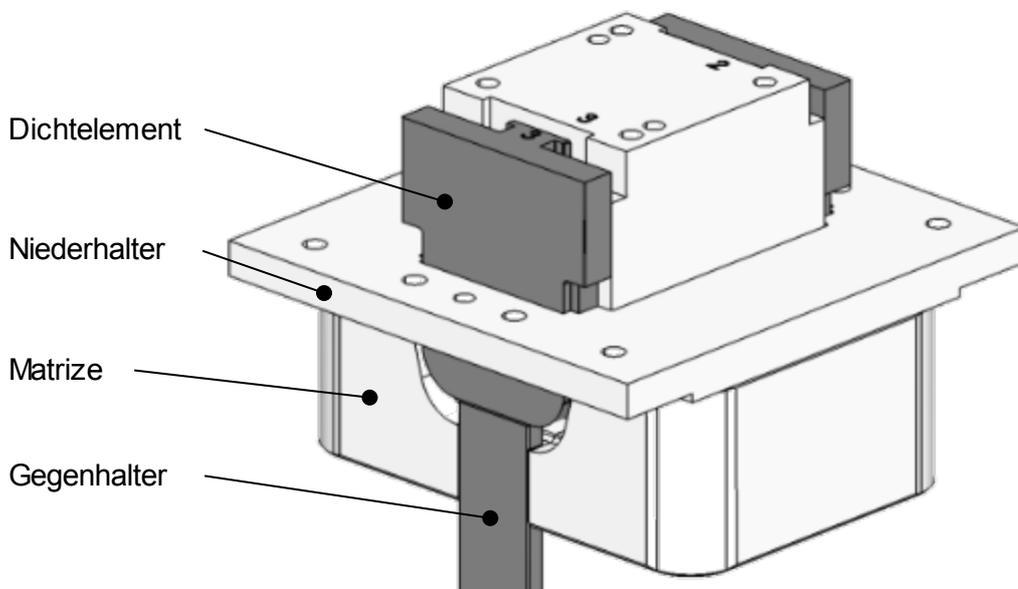


Abbildung 4-5: Gesamtanordnung von mehrteiligem Stempel mit Dichtelementen, Niederhalter, Matrize und Gegenhaltern [28]

Durch die geometrische Ausformung entsteht während des Umformprozesses und ca. 15 mm vor dem unteren Totpunkt eine seitliche Dichtigkeit, so dass ab diesem Zeitpunkt kein LFT mehr nach außen gelangen kann. Die Gegenhalter federn bis zum Erreichen von UT in die Matrize

ein und erreichen dort ihre Endlage. Somit wird erst gegen Prozessende, wenn der LFT langsam einen stetig steigenden Druck erfährt, eine räumliche Abdichtung geschaffen, die auch dem Pressdruck zur Ausformung der Blechplatte standhält.

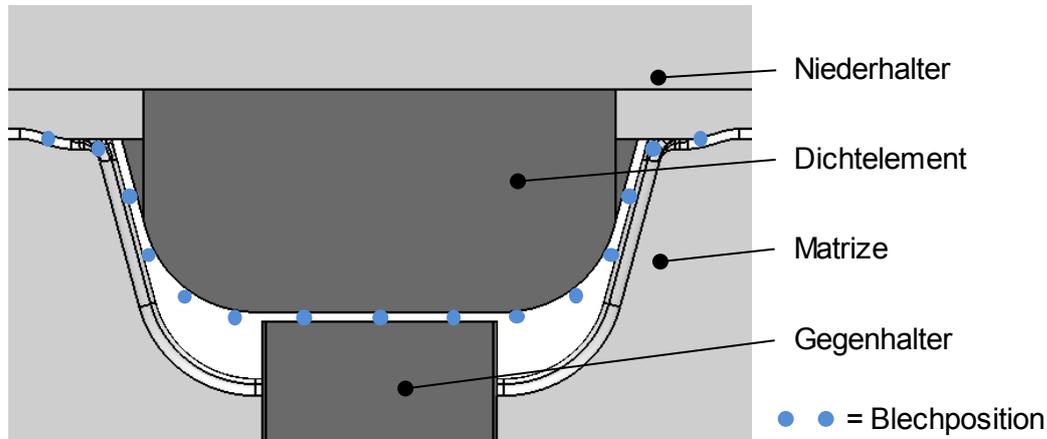


Abbildung 4-6: Werkzeugposition der vollständigen seitlichen Dichtigkeit (ca. 15 mm vor UT) [28]

Die nachfolgende Tabelle enthält die finalen Versuchsparameter für die Stufenversuche des U-Profiles. Dabei ist zu beachten, dass die Maximalkraft der rechten Spalte lediglich in der letzten Stufe benötigt wird und die Presse bis zum Erreichen dieses Werts steht geschwindigkeitsgesteuert verfährt.

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

Tabelle 4-3: Schließprofil der Presse zur Fertigung des U-Profiles

Ein mit den zuvor genannten Parametern hergestelltes U-Profil zeigt die folgende Abbildung 4-7. Wie zu erkennen ist, gibt es keinerlei Undichtigkeit – weder am Übergang zu den Flanschflächen noch an den seitlichen Profilenden. Auch die Ausformung ist nahezu vollständig erfolgt.



Abbildung 4-7: Durch Hybridpressen hergestelltes U-Profil [28]

Analog zur Wannengeometrie wurde die erzielte Ausformung des U-Profiles ebenfalls anhand von zwei unterschiedlichen Stahlwerkstoffen (DC04, HC340) untersucht und mit Hilfe des ARGUS-Systems von GOM quantifiziert. Das Punktraster musste in zwei Stufen aufgebracht werden, so dass in der Profilmitte jeweils ein nicht auswertbarer Bereich entsteht. Der nachfolgende Vergleich zum Abstand der umgeformten Bleche zur Matrizenengeometrie verdeutlicht, dass beide Bleche nahezu identisch weit ausgeformt sind und lediglich bei der HC340-Platine die Fehlstellen im Übergangsbereich von der geometrischen Ausformung zum konstanten Mittelteil etwas ausgeprägter sind als bei der DC04-Platine. Die nicht-symmetrische Ausformung liegt an unterschiedlichen Radienübergängen von den Dichtelementen zum Mittelteil, die aus Gründen der Variation verschieden stark ausgelegt sind. Der im Bild oben befindliche Übergang ist weich und tangential, so dass dieser für zukünftige Anwendungen favorisiert werden sollte.

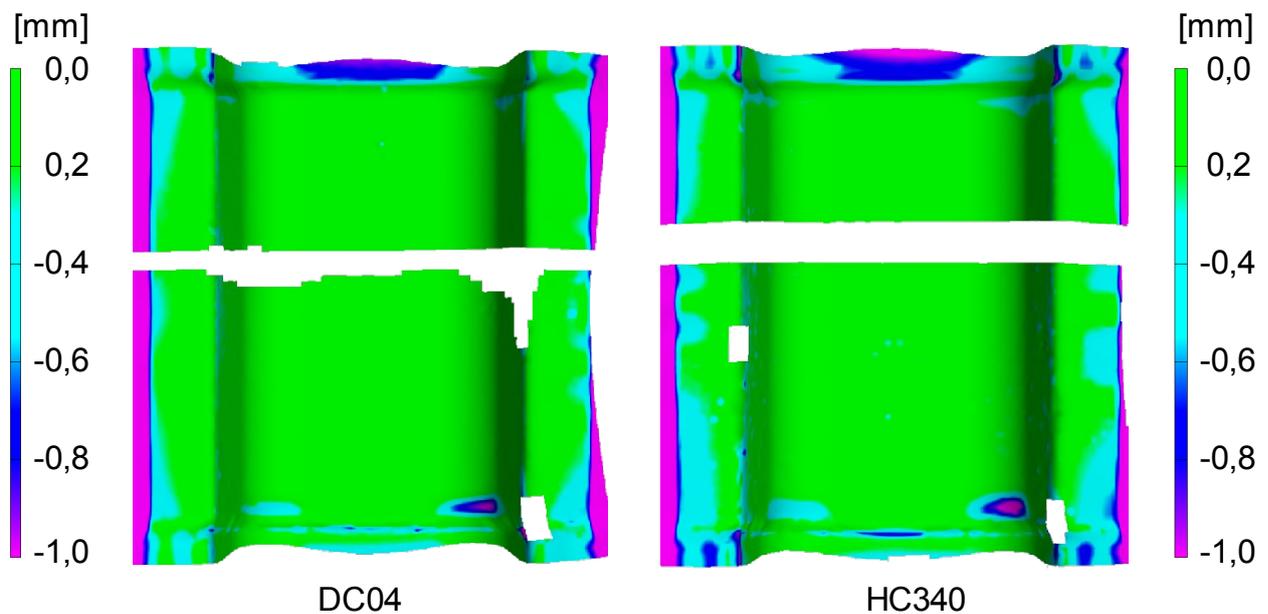


Abbildung 4-8: Vergleich der Ausformungen beim U-Profil [28]

#### 4.1.3 Offenes U-Profil mit Reservoir

In der Vorstufe zum oben vorgestellten U-Profil wurde auch ein mehrteiliger Stempel mit innenliegendem LFT-Reservoir erprobt. Die grundsätzliche Idee dazu war es, die Blechumformung durch Stempel- und Matrizenkontakt zunächst von der wirkmedienbasierten Umformung zu entkoppeln und somit die Gestaltung eines seitlichen Dichtkonzepts zu vereinfachen. Der LFT sollte bis zur vollständigen Blechumformung in einem mittig im Stempel befindlichen Reservoir vorgehalten werden und im Anschluss durch eine zweite Stempelbewegung herausgepresst werden und dabei das Blech final ausformen. Auch zu dieser Werkzeugvariante gab es mehrere Iterationsschritte, von denen nachfolgend zwei Varianten abgebildet sind – eine mit und eine ohne seitliche Begrenzung durch starre Dichtelemente. Wie zu erkennen, besteht bei der Version mit Dichtelementen bereits eine Ähnlichkeit zu dem finalen Dichtkonzept des U-Profiles ohne LFT-Reservoir (siehe oben), allerdings mit dem Unterschied, dass die Dichtelemente dort federnd gelagert sind.

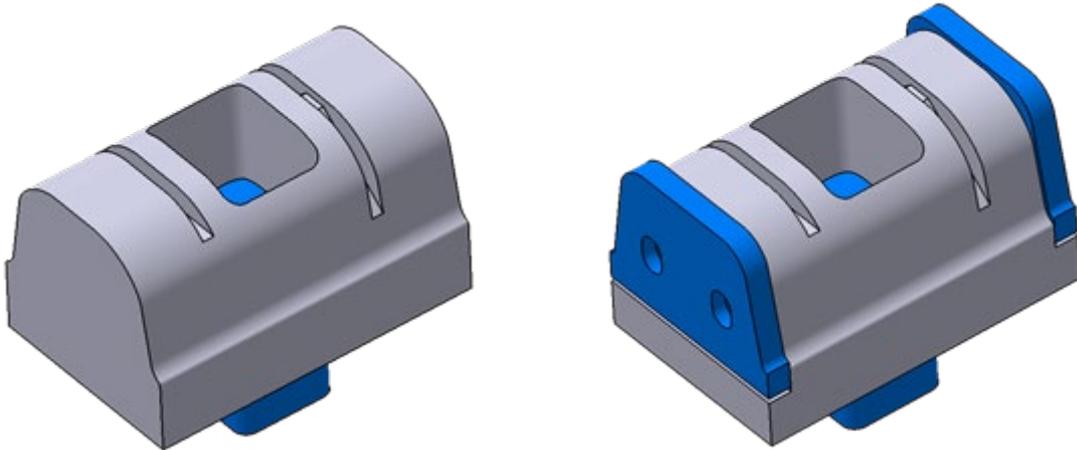


Abbildung 4-9: Werkzeugkonzepte offenes U-Profil mit LFT-Reservoir mit im Werkzeug integriertem Flachzylinder (li.) und starrem Stempel und vorauseilenden Dichtelementen (re.) [28]

Zunächst besteht bei beiden Konzepten die Herausforderung, eine zweite hydraulisch gesteuerte Bewegung zu realisieren. Während bei der ersten Variante ein separater Hydraulikzylinder den Pressdruck über den Stempel aufbaut, basiert die zweite Variante auf einem umgedrehten Werkzeugkonzept („Hutlage“), bei dem der Reservoir-Stempel automatisch beim Schließen des Werkzeugs und nach Erreichen der Endlage des Hauptstempels verfährt.

Zusammenfassend konnte mit beiden Varianten keine ausreichende Ausformung des Blechs und Verteilung des LFTs erreicht werden. Wie nachfolgend dargestellt, verbleibt bei der Variante mit separatem Hydraulikzylinder ein Pressrest im Reservoir. Beim umgedrehten Werkzeug wird zwar die gesamte LFT-Masse aus dem Reservoir verpresst, es besteht jedoch keine seitliche Dichtigkeit und zusätzlich kann eine signifikante Schollenbildung beobachtet werden. Diese entsteht, wenn die LFT-Schmelze während des Fließvorgangs partiell erstarrt und diese erstarrten Bereiche von nachfließendem LFT mehrfach überpresst werden. Eine mögliche Ursache ist, dass das Blech vor der Aktivierung des Reservoirs vollständig am Stempel anliegt und somit kein freier Fließspalt für den LFT besteht. Dieser entsteht erst durch weitere Ausformung des Blechs und erfordert lokal sehr hohen Pressdruck in der Schmelze.



Abbildung 4-10: Geformte U-Profile mit LFT-Reservoir [28]

Obwohl mit keiner Werkzeugvariante des LFT-Reservoirs ein zufriedenstellendes Ergebnis erzielt werden konnte, werden dennoch wichtige Erkenntnisse für die Entwicklung des zuvor vorgestellten Dichtkonzeptes für das U-Profil erlangt. Letztlich wurde das Verfahren auch aufgrund

der starken Abweichung von der eigentlichen Projektidee des Hybridpressens und einer simultanen Umformung nicht weiterverfolgt.

#### 4.1.4 Offenes Profil mit partieller Abkantung

Bei den zuvor dargestellten drei Werkzeugkonzepten steht die Untersuchung der Umformung sowie Werkzeugabdichtung und somit der Prozess im Fokus. Jedoch bietet aufgrund der reduzierten Größe keine der bisher gefertigten Proben die Möglichkeit, mechanische Bauteilprüfungen zur Untersuchung der Festigkeit der Stahl-LFT-Bauweise durchzuführen. Daher wird basierend auf den Erkenntnissen der bisherigen Versuchsgeometrien eine längere Probe zur Durchführung von Torsions- und Biegeprüfungen entwickelt.

Die zuvor dargestellten Werkzeugdichtkonzepte weisen entweder einen komplexen mehrteiligen Stempelaufbau auf („U-Profil“ und „Reservoir“) oder führen zu erhöhtem Verschnitt („Wannenprofil“), sofern eine offene Trägergeometrie benötigt wird. Daher wird für die Entwicklung der längeren Probe ein weiteres Dichtkonzept aufgebaut, welches die beiden Konzepte „U-Profil“ und „Wanne“ kombiniert: Wie beim U-Profil wird an den beiden offenen Enden des Trägers eine Dichtkante erzeugt, indem das Blech partiell umgeformt wird. Dies wird jedoch wie beim Wannenkonzept mit einem einfachen einteiligen Stempel erreicht. An den offenen Bauteilenden liegt zwischen Stempel und Kavität ein Ziehspalt vor, der genau der Blechdicke des umzuformenden Metallblechs entspricht. Dadurch kann das Blech nachfließen, jedoch kein Kunststoff entweichen. Die Schärfe der Stufe ist dabei so zu konzipieren, dass bei der Umformung lokal keine Risse auftreten können. Das neue Dichtkonzept ist in Abbildung 4-11 dargestellt.

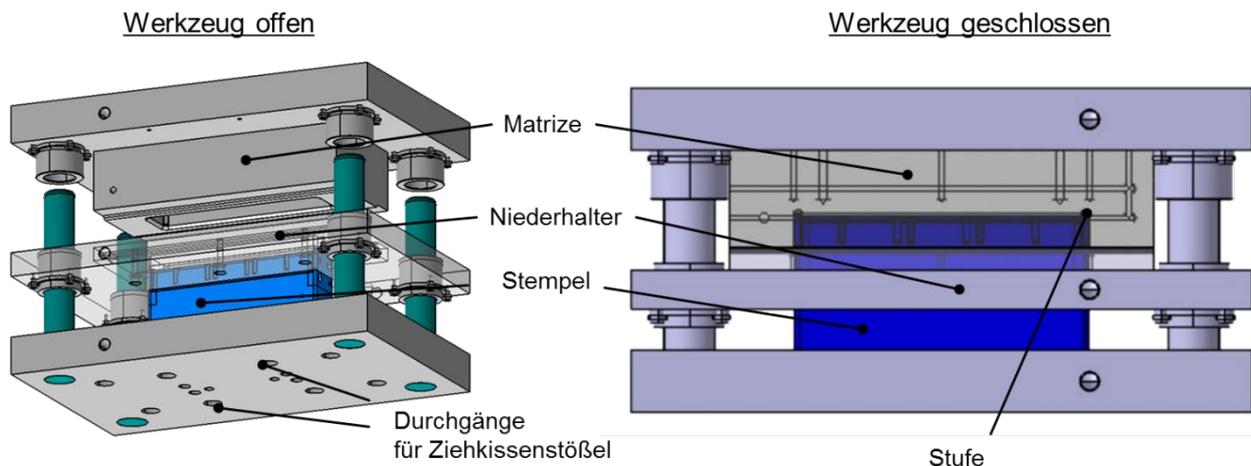
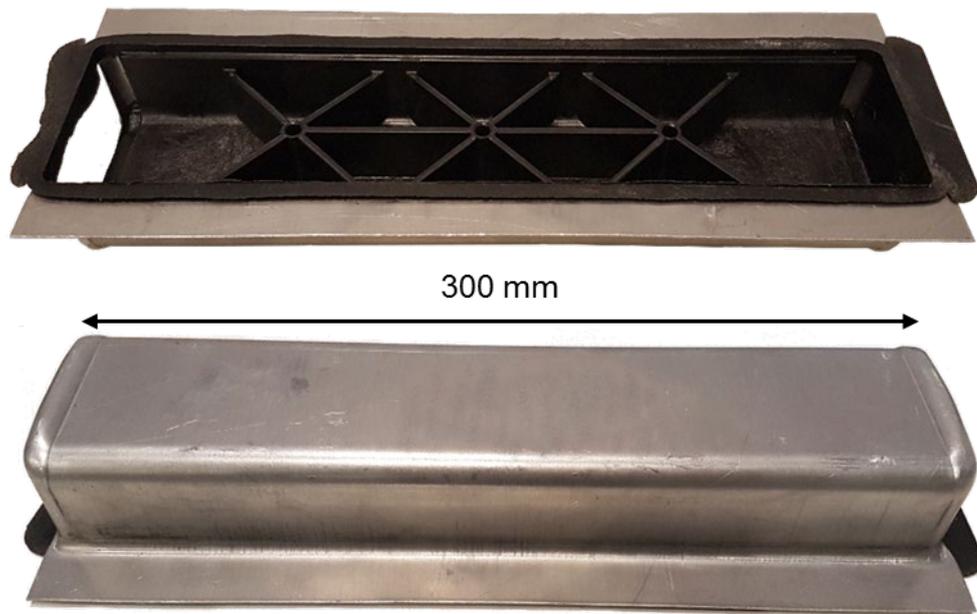


Abbildung 4-11: Werkzeugkonzept zur Fertigung offener Querträger, Abdichtung mittels partieller Blechabkantung über kopfseitige Stufen und Ziehspalt = Blechdicke [27]

Für den Träger wird eine generische Rippengeometrie konzipiert, welche hohe Steifigkeit gegen Biege- und Torsionsbelastung aufweisen soll. Die Geometrie des generischen Trägers und die bei der Fertigung optimierten Prozessparameter sind in Abbildung 4-12 dargestellt. Die 3 mm dicken Kreuzrippen erhöhen die Torsionssteifigkeit und die mittlere Längsrippe erhöht die Biegesteifigkeit der Hybridstruktur. Zudem wird an den langen Seiten des Bauteils ein Fügeflansch vorgesehen, über den ein Schließblech gefügt werden kann.



#### Optimierte Prozessparameter

- Presskraft: 1200 kN
- Blechhalterkraft : 50 kN
- Blechtemperatur: 220 °C
- Pressgeschwindigkeit kurz vor UT: 3 mm/s
- Werkzeugtemperatur: 80 °C

Abbildung 4-12: Generische Querträgergeometrie aus 1 mm Stahlblech und PA6 LFT40 zur Prüfung der mech. Eigenschaften mittels Hybridpressen hergestellter Stahl-LFT-Strukturen

Durch die lokale Blechumformung an den offenen Enden mit einer Stufe, wird eine gute Abdichtung bei gleichzeitig vollständiger Ausformung des Profils erreicht. Eine kleine Leckage entsteht aufgrund des umformungsbedingten Radius am unteren Ende des Profils. Jedoch bildet die Kunststoffschmelze hier einen so dünnen Film, dass sich die Schmelze durch frühzeitiges Erstarren selbst abdichtet, sodass der für die Blechumformung notwendige Druck aufgebaut werden kann.

Nachfolgend werden generische Querträger aus 1 mm HC340 Stahlblech und PA6 LFT40 zur Prüfung der statischen und dynamischen Festigkeit der Stahl-LFT-Hybridbauweise gefertigt. Das LFT-Extrudat wird in Bauteillängsrichtung eingelegt, sodass die Fasern im Einlegebereich in der Kunststoffschicht überwiegend in Längsrichtung orientiert sind.

#### **4.2 Abbildung des Verfahrens Hybridpressen durch gekoppelte Simulation**

Im Allgemeinen wird die Simulation eines neuen Prozesses nach dessen grundsätzlicher Entwicklung erforscht. Im Rahmen dieses Projekts sollte die Simulation des Verfahrens Hybridpressen jedoch zum einen zum grundlegenden Prozessverständnis beitragen und bei der Entwicklung von Dichtkonzepten die Anzahl von Prototypenwerkzeugen verringern. Zum anderen bestimmt die Prozessführung maßgeblich die Eigenschaften eines Hybridbauteils, da sich beim Hybridpressen aufgrund eines vom reinen LFT-Fließpressen abweichenden rheologischen Verhaltens der Kunststoffschmelze andere lokale Faserorientierungen in der LFT-Komponente einstellen. Bei einer konventionellen LFT-Fließpresssimulation wird ein starres Werkzeug verwendet, während beim ein Hybridpressen zwar der Stempel als starr anzunehmen ist, die Form der

Kavität jedoch variiert, da das umzuformende Blech die Kavität darstellt. Gleichmaßen wird bei der Blechumformung von einem ideal starren Werkzeug ausgegangen, während beim Hybridpressen kavitätsseitig ein starres Werkzeug vorliegt, jedoch stempelseitig ein variierender Umformdruck durch eine sich ändernde Kunststoffschmelze ergibt.

Das Ziel in diesem von der Fa. Simpatec geführten Teilprojekt war daher, in Zusammenarbeit mit dem assoziierten Projektpartner Altair Engineering, eine bidirektionale Schnittstelle zur Kopplung einer Blechumformsimulation mit der Simulation eines LFT-Fließpressvorgangs zu entwickeln. Die Simulation soll mit kommerziell verfügbarer Software durchführbar sein. Da für die reine LFT-Simulation des im Projekt verwendeten Compounds keine rheologische Charakterisierung aus der Datenbank entnommen werden kann, wird zunächst eine rheologische Charakterisierung des Compounds von der Fa. Simpatec in Auftrag gegeben.

#### **4.2.1 Rheologische Charakterisierung des Weber Fibertech Compounds PA6 LFT40**

Die rheologischen Eigenschaften der Kunststoffschmelze bestimmen das Formfüllverhalten, die maximale benötigte Presskraft, den Presskraftverlauf und die Faserorientierungen. Die rheologischen Untersuchungen zeigen, dass die Matrixviskosität, die Vororientierung der Faser im LFT-Extrudat und der Faservolumengehalt für die Beschreibung des Pressfließvermögens von Thermoplasten elementar sind. Werden Halbzeuge bei gleichen Prozessparametern im LFT-Fließpressen verarbeitet, so führt ein höherer Faservolumengehalt zu einer höheren Presskraft. Die Fasern orientieren sich während der Plastifizierung hauptsächlich in der Strömungsrichtung des thermoplastischen Compounds. Hierbei spielt die Anfangsorientierung der Fasern eine wichtige Rolle zur Endorientierung im gepressten Bauteil. Zur Abbildung von realen rheologischen Effekten werden in Moldex3D mit verschiedenen Modellen zur Berechnung von Materialzuständen, Viskosität, Viskoelastizität, Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit verwendet, welche nachfolgend kurz aufgelistet werden:

##### PvT Modell: Modified Tait-Modell

Das modifizierte 2-Domänen-Tait-pvT-Modell wird verwendet, um die Dichte des Materials als eine Funktion von Temperatur und Druck zu bestimmen. Diese Variation hat Auswirkungen auf viele Aspekte der Strömungssimulation.

##### Viskositätsmodell: Modified Cross-WLF

Das Cross-WLF-Viskositätsmodell beschreibt die Temperatur-, Schergeschwindigkeits- und Druckabhängigkeit der Viskosität für thermoplastische Materialien.

##### Viskoelastizitätsmodell: White-Metzner

Das Modell beschreibt Polymere mit nichtlinearer Viskoelastizität, Viskosität und Elastizität.

##### Faserorientierungsmodell: iARD

Ein verbessertes anisotropes Rotationsdiffusionsmodell in Kombination mit einem verzögerten Haupttratenmodell wurde in Moldex3D R11 implementiert, um die Faserorientierung in faserverstärkten Thermoplasten vorherzusagen.

Abbildung 4-13 zeigt die rheologische Charakterisierung des PA6 LFT40, welche als Eingangsgrößen für die Fließpress-Simulation mit Moldex3D genutzt werden und für die weiteren LFT-Fließpress-Simulationen im Projekt genutzt werden.

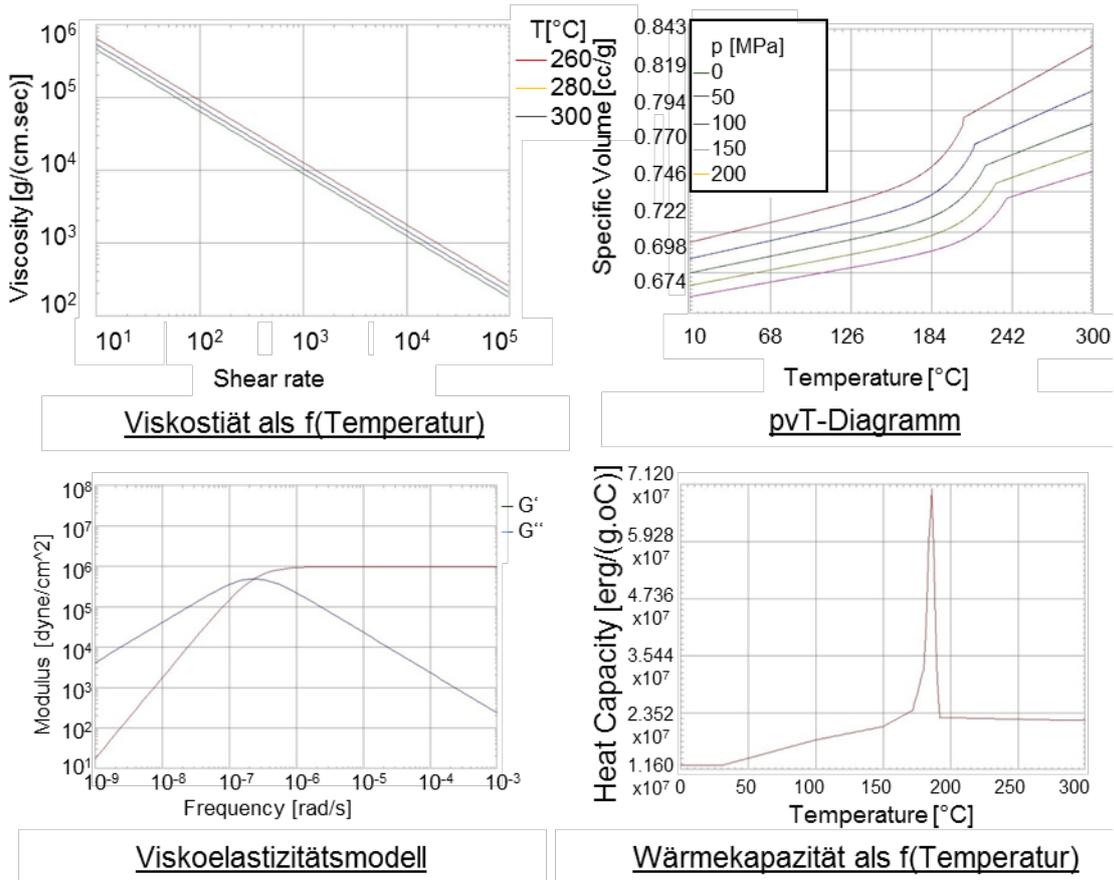
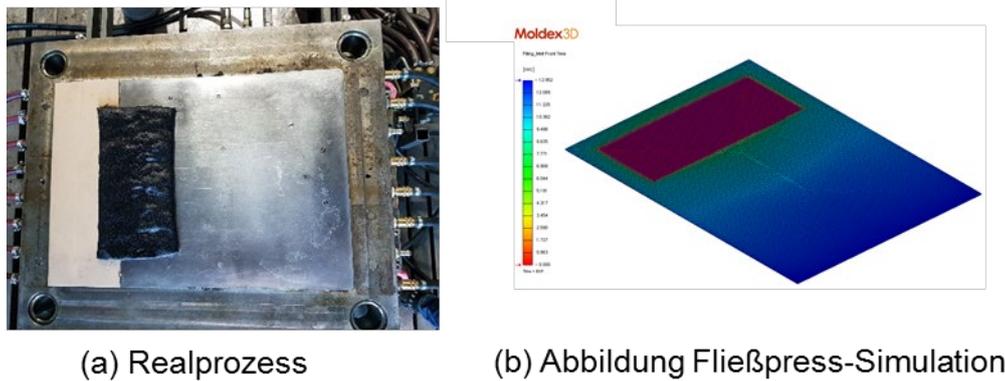


Abbildung 4-13: Rheologische Charakterisierung des Compounds PA6 LFT40

#### 4.2.2 Validierung der LFT-Fließpress-Simulation mithilfe von $\mu\text{CT}$ -Untersuchungen

Zunächst werden unter Verwendung der in Kapitel 4.2.1 beschriebenen rheologischen Modelle Fließpress-Simulationen an einer ebenen  $500 \times 700 \text{ mm}^2$  Rechteckplatte mit 3,25 mm LFT-Schichtdicke durchgeführt. Als Randbedingungen werden eine Werkzeugtemperatur von  $T = 80^\circ\text{C}$ , als Schmelztemperatur von  $T = 280^\circ\text{C}$  und eine Extrudat-Vororientierung in Extrusionsrichtung und somit quer zur Fließrichtung angenommen. Das Extrudat wird quer zur Fließrichtung eingelegt, um Bindenähte während des Pressprozesses zu vermeiden. In Abbildung 4-14 ist der reale Fließpressprozess (a) und Modellierung in der Fließpress-Simulation (b) gegenübergestellt.



(a) Realprozess

(b) Abbildung Fließpress-Simulation

Abbildung 4-14: Abbildung des realen Fließpressprozesses im Plattenwerkzeug in der LFT-Fließpress-Simulation

Abbildung 4-15 zeigt die Faserorientierungen über die Dicke der LFT-Platte im Fließpress-Prozess nach ca. 200 mm Fließweg. In der Plattenmitte orientieren sich die Fasern in Fließrichtung (=X-Richtung). In den werkzeugwandnahen Bereichen liegt vornehmlich eine Querorientierung der Fasern (=Y-Richtung) vor.

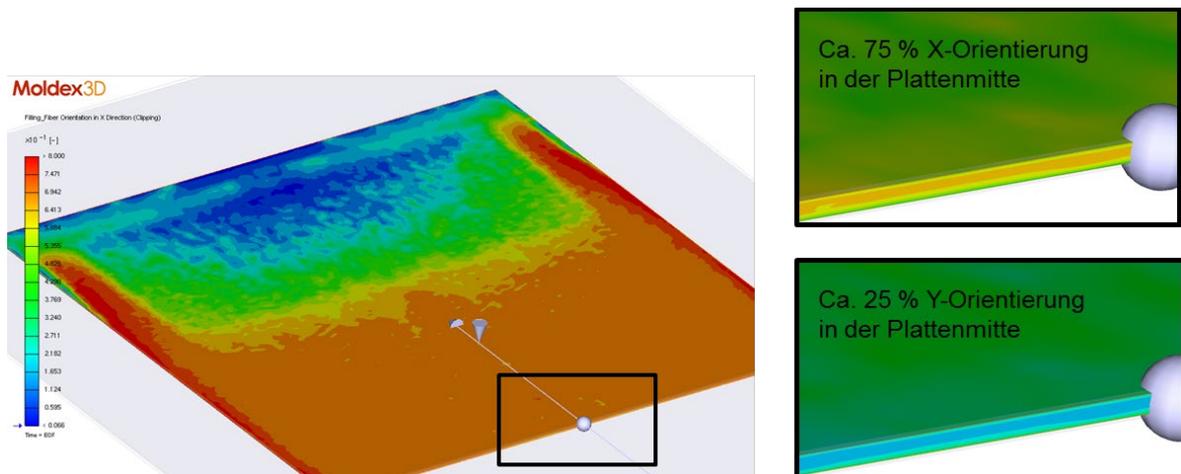


Abbildung 4-15: LFT-Fließpress-Simulation im Horizontalschnitt bei  $Z=1,5$  mm (Plattendicke 3 mm) mit Vororientierung der Fasern im Extrudat quer zur Fließrichtung (Rot:  $>80\%$  X-Orientierung, Blau:  $0\%$  X-Orientierung, X=Fließrichtung)

Zur Validierung der simulierten Faserorientierungen werden  $\mu$ CT-Versuche durchgeführt und im FLB der Uni Siegen mit einer Software digital ausgewertet. Es werden zur Ermittlung der Faserorientierungen in der LFT-Platte punktuell mittig im Fließbereich Proben entnommen (siehe Abbildung 4-16) und zur Vorbereitung für  $\mu$ CT-Messungen auf eine Größe von  $8 \times 8$  mm<sup>2</sup> geschnitten, womit im  $\mu$ CT eine Auflösung von  $7-9$   $\mu$ m erreicht werden kann.

In Abbildung 4-17 ist beispielhaft die graphische digitale Auswertung eines  $\mu$ CT-Scans mit dem Faserverbund der Software VG Studio Max dargestellt. Es zeigt sich ein dreischichtiger Aufbau über die Dicke der LFT-Platte.

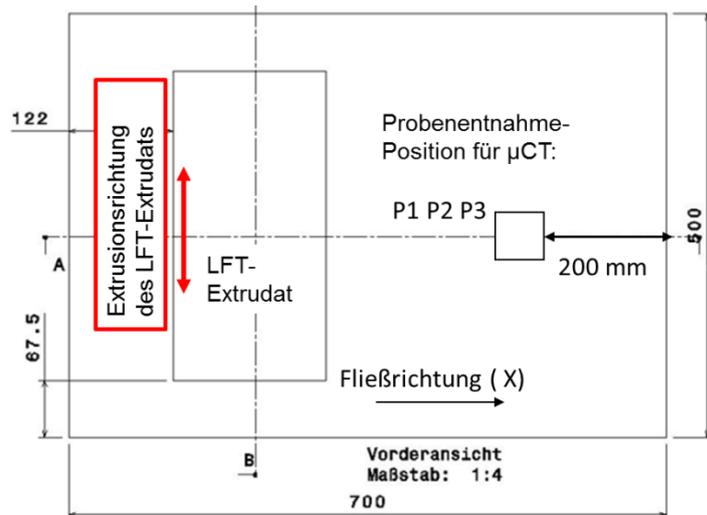


Abbildung 4-16: Probenentnahmestelle in ebener LFT-Platte für  $\mu$ CT-Untersuchung

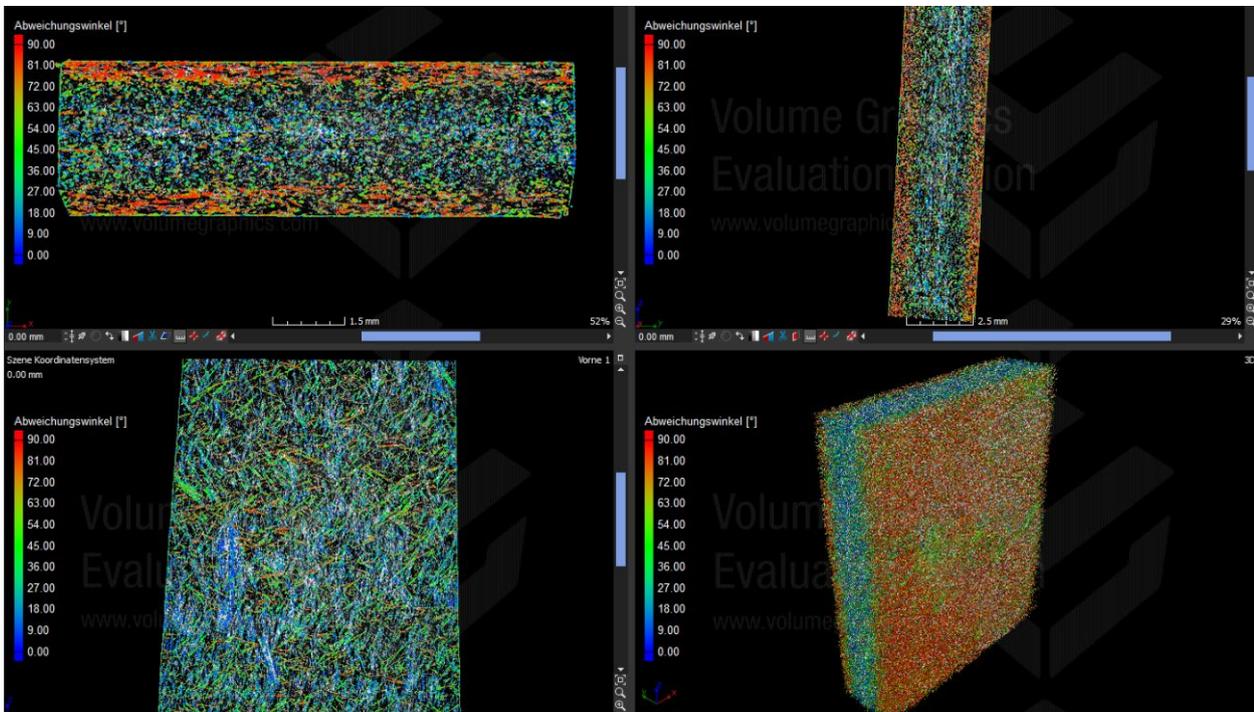
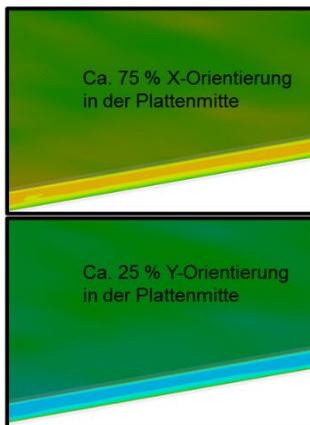
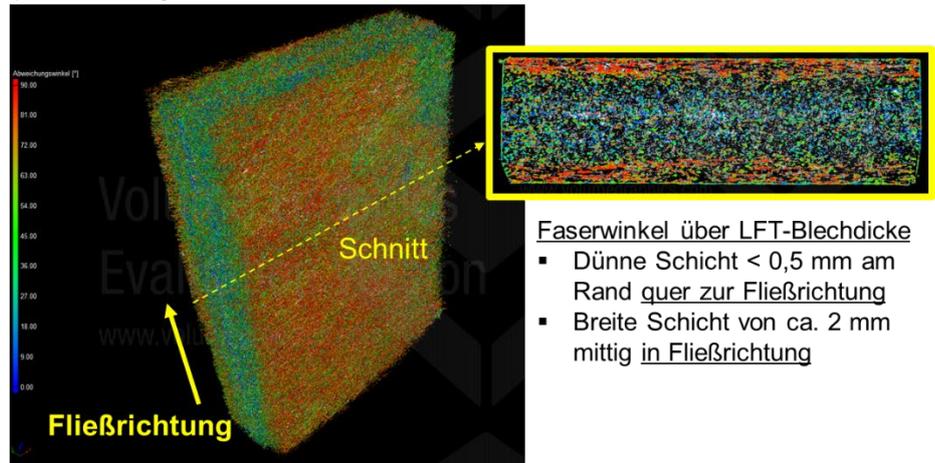


Abbildung 4-17: Auswertung der  $\mu$ CT-Versuche an einem Ausschnitt ( $8 \times 8 \times 3 \text{ mm}^3$ ) aus der ebenen LFT-Platte, Farbskala: Blau = Faserorientierung in Fließrichtung Rot = Faserorientierung quer zur Fließrichtung

Der Vergleich zwischen  $\mu$ CT-Untersuchung und LFT-Fließpress-Simulation ist in Abbildung 4-18 dargestellt: Sowohl in der Simulation als auch im  $\mu$ CT-Aufnahme liegt die Faserorientierung mittig in X-Richtung (=Fließrichtung) vor und in den werkzeugwandnahen Bereichen ist die Faserorientierung vorwiegend quer zur Fließrichtung (als in Y-Richtung) orientiert.

## LFT-Fließpress-Simulation

 $\mu$ CT-Messung

## Faserwinkel über LFT-Blechdicke

- Dünne Schicht < 0,5 mm am Rand quer zur Fließrichtung
- Breite Schicht von ca. 2 mm mittig in Fließrichtung

Abbildung 4-18: Qualitativer Vergleich  $\mu$ CT vs. LFT-Fließsimulation

### 4.2.3 Kopplung von Fließpress-Simulation und Tiefzieh-Simulation

Die Simulation des LFT-Fließpressens und der Blechumformung bzw. des Tiefziehens von Stahlblechen werden nach aktuellem Stand der Technik in zwei unterschiedlichen Software-Lösungen durchgeführt. Im Rahmen des Projektes soll eine bidirektionale Schnittstelle zwischen den beiden Programmen *Radioss* zur Simulation der Blechumformung und *Moldex3D* zur Simulation des LFT-Fließpressens erstellt werden, die es ermöglicht, die simultane Umformung von Metall und Urformung des LFT-Plastifikats abzubilden.

Dabei wird eine Kopplung der Zeitschritte zwischen den beiden Softwareprogrammen durchgeführt: Im Ausgangszustand ist das umzuformende Metallblech flach. Somit ist das Werkzeug zum Pressen des LFT-Plastifikats ebenfalls flach. Das Werkzeug zum Umformen des Metallblechs hingegen weist die eigentliche Werkzeuggeometrie auf. Mit fortschreitender Zeit wird das Metallblech durch das starre Werkzeug verformt. Das so verformte Blech dient nun seinerseits bei der Umformung des LFT als Werkzeug. Das LFT-Plastifikat wiederum beeinflusst die Formgebung des Metallblechs, ähnlich wie beim so genannten hydromechanischen Blechumformen.

Zur zeitlichen Kopplung zwischen den beiden Simulationen wurde bei der Fa. SimpaTec eine fortranbasierte Routine implementiert, um den Datenaustausch zwischen *Moldex3D* und *Radioss* zeitlich zu takten und die Verschiebungsfelder aus der Blechumformung als Eingangsgröße für die mit *Moldex3D* durchgeführte LFT-Simulation weiterzugeben. In Abbildung 4-19 ist die Prozesskette zur zeitlichen Kopplung der beiden Simulationen dargestellt.

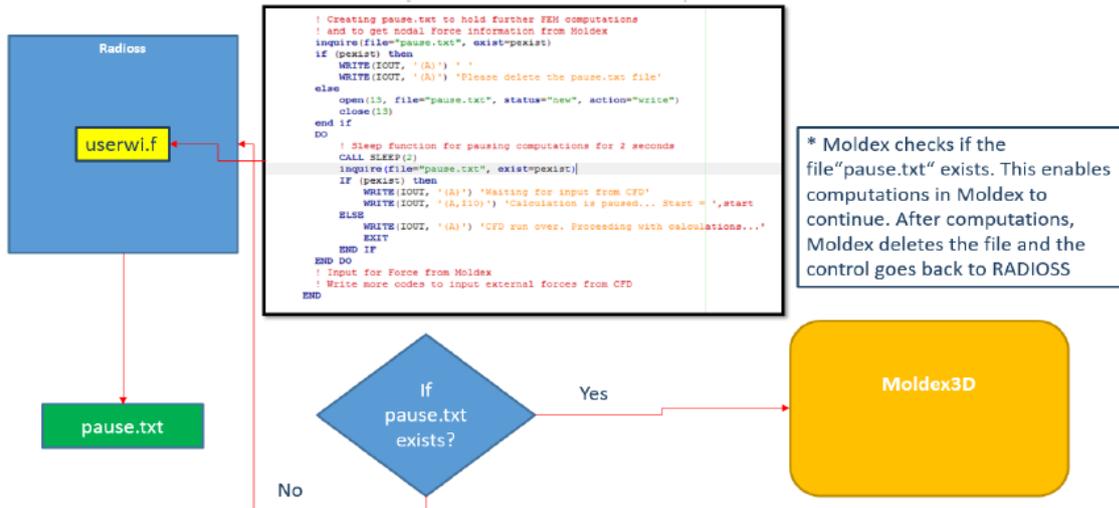


Abbildung 4-19: Bidirektionale Prozesskontrolle bei der Simulation des Hybridpressens

Die Knotenverschiebungen, welche in Blechumformsimulation mit Radioss berechnet werden, werden als Eingangswerte an den Moldex3D-Solver übergeben. Das umgeformte Blech bildet zusammen mit dem starren Werkzeugstempel das Werkzeug in der LFT-Fließpress-Simulation. Abbildung 4-20 zeigt schematisch den Austausch von Knotenverschiebungen aus Radioss zu Moldex3D.

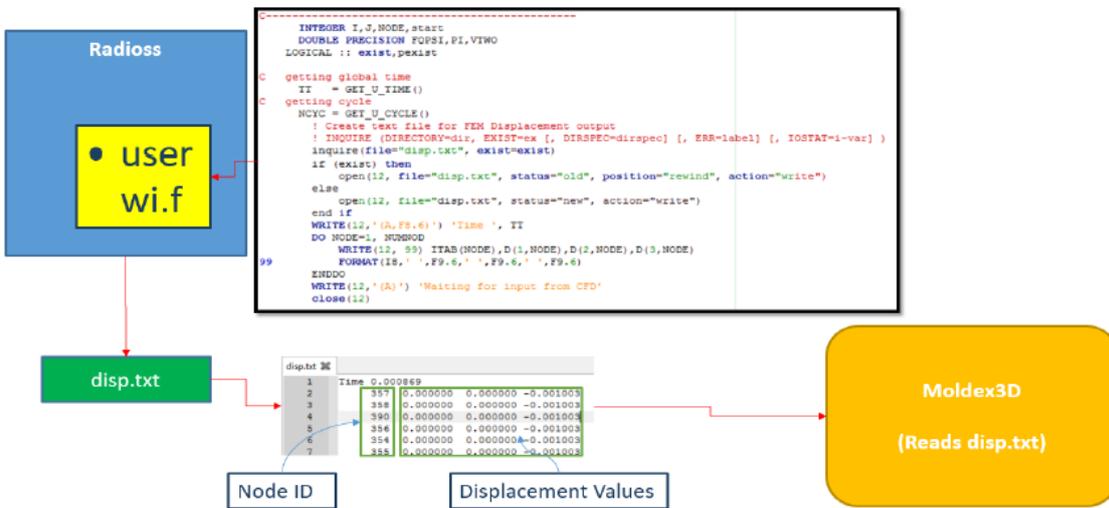


Abbildung 4-20: Austausch der Knotenverschiebungen von Radioss zu Moldex3D

In Moldex3D wiederum wird das Druckfeld, welches die Kunststoffschmelze zur Blechumformung aufbringen muss, berechnet und für den nächsten Zeitschritt der Blechumformung mithilfe einer Fortran-Routine als Eingangsgröße an Radioss zurückgeführt (siehe Abbildung 4-21) und der in Abbildung 4-20 dargestellte Prozess wird erneut durchlaufen.

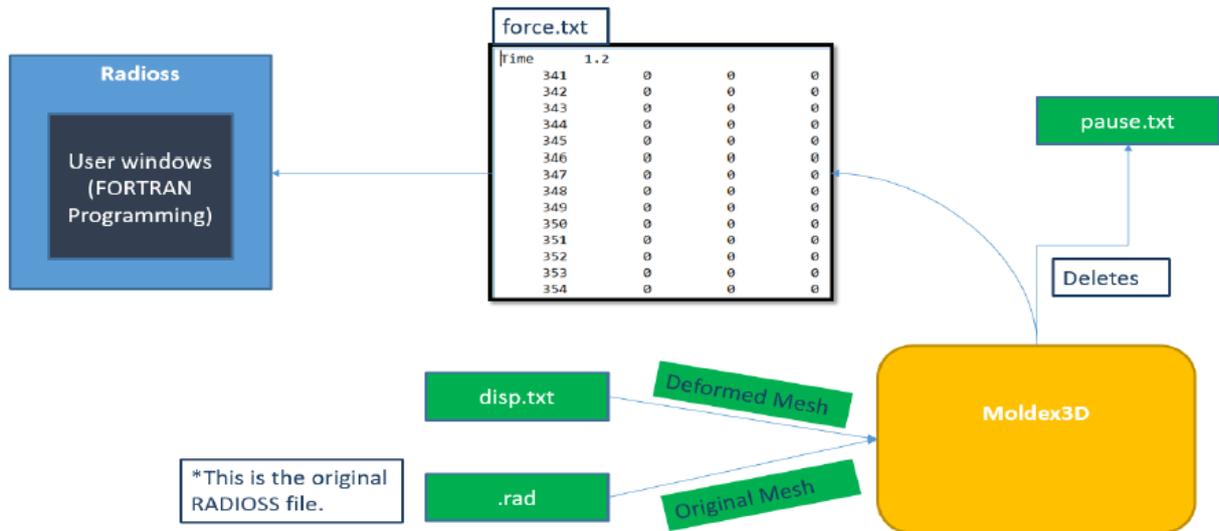


Abbildung 4-21: Rückführung des Druckfeldes von Moldex3D zu Radioss

Während mit geringen Verformungen noch eine Kopplung zwischen den beiden Simulationen möglich ist (Abbildung 4-22), führen die bei der Blechumformung üblichen großen Verformungen zu hohen Netzverzerrungen bei der LFT-Simulation und somit zum Abbruch der gekoppelten Simulation.

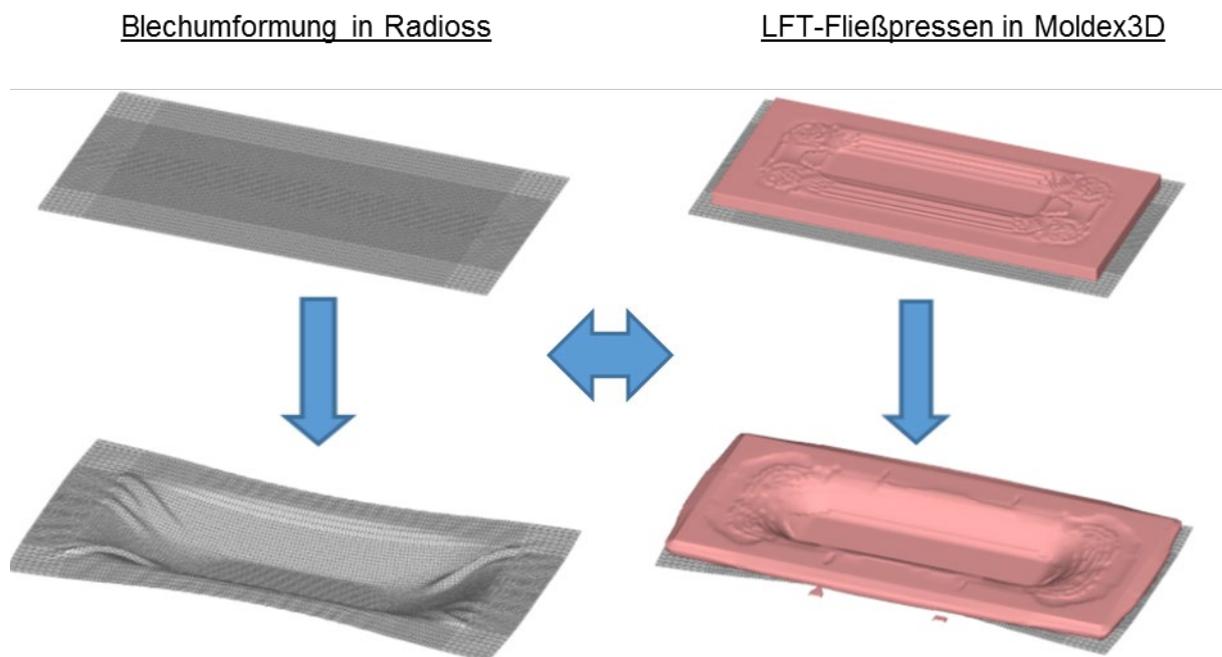


Abbildung 4-22: Gekoppelte Blechumform-Simulation und LFT-Fließpress-Simulation an einfacher Wannengeometrie

Somit ist die direkte Nutzung einer bidirektionalen Schnittstelle im Projekt zur Werkzeuggestaltung und Entwicklung der Prozessführung nicht möglich.

## 5 Auslegungsmethodik für Stahl-LFT-Hybridbauteile

Um das Leichtbaupotential von Stahl-LFT-Hybridbauteilen ausschöpfen zu können, müssen bereits in der Konzeptphase hinreichend genaue Berechnungsmodelle von allen Werkstoffen des Hybridbauteils vorliegen. Daher werden zunächst umfassende Materialcharakterisierungen der verwendeten Werkstoffe mit Fokus auf den Haftvermittler und den LFT-Compound PA6 LFT40 der Fa. Weber Fibertech durchgeführt. Die dabei ermittelten mechanischen Eigenschaften werden wiederum als Eingangsparameter für linear-statische FEM-Simulationen zur Bauteiloptimierung und nichtlineare Validierungsrechnungen genutzt.

Grundsätzlich wird der Ansatz verfolgt, zunächst über isotrope linear-statische FEM-Berechnungen eine optimale Bauteilgeometrie zu konstruieren und erst im zweiten Schritt eine detaillierte FEM-Berechnung unter Berücksichtigung der Verbindungsfestigkeit des Haftvermittlers und dem nichtlinearen Materialverhalten des LFTs als Absicherung der linear-statischen Berechnungen durchzuführen. Zur Validierung dieser Auslegungsmethodik werden experimentelle Festigkeitsuntersuchungen am generischen Stahl-LFT-Hybridquerträger herangezogen. Anschließend werden die topologischen Optimierungen der Demonstrator-Bauteile sowie im zweiten Schritt die nicht-linearen Absicherungsrechnungen (Kapitel 5.2.2) durchgeführt.

Eine in der Auslegung von reinen kurzfaserverstärkten Kunststoffbauteilen weit verbreitete integrative Simulationskette bestehend aus Kunststoffprozess-Simulation, Mapping von Faserorientierungen und anschließender anisotroper FEM-Festigkeitsberechnung kann hier nicht angewendet werden, da die gekoppelte Prozess-Simulation aus Blechumformung und LFT-Fließpressen (siehe 4.2) noch nicht für reale Bauteile und große Deformationen entwickelt werden konnte und somit lokale Faserorientierungen im Bauteil nicht vorherzusagen sind.

### 5.1 Material- und Bauteiltests als Basis für die FEM-Simulation

Die Materialdaten für die im Projekt verwendeten Stähle DC04, 22MnB5, HC340, DP600, DP800 und SZBS800 sind in der allgemeinen Literatur bereits verfügbar. Tabelle 5-1 zeigt für die Auslegung relevante Kennwerte der im Projekt verwendeten Stahlgüten.

	$R_{p0,2}$ [MPa]	$R_m$ [MPa]	$A_{80,min}$ [%]
<b>DC 04 (1.0338)</b>	140-210	270-350	38
<b>HC 340LA (1.0548)</b>	340-420	410-510	21
<b>22MnB5</b>	380-480	>480	18
<b>HR 330 Y580T-DP (DP600)</b>	330-470	580-670	24
<b>HCT 780X (DP800)</b>	450-560	> 780	14
<b>SZBS 800</b>	> 680	800-980	10

Tabelle 5-1: Mechanische Eigenschaften der im Projekt verwendeten Stahlgüten

Der Fokus der Materialcharakterisierung liegt auf dem im Projekt verwendeten Compound PA6 LFT40, wofür vor dem Projekt noch keine Daten verfügbar sind, sowie auf der durch den Haftvermittler realisierten großflächigen Verbindung zwischen fließgepresstem LFT und Stahl.

#### 5.1.1 Materialcharakterisierung des Langfaser-Compounds PA6 LFT40

Im Folgenden werden die mechanischen Eigenschaften des in Kapitel 3.2.2 vorgestellten LFT-Compounds PA6 LFT40 der Fa. Weber Fibertech geprüft.

Nach der Compoundierung des LFTs im Doppelschneckenextruder und Austragen des LFT-Extrudats, wird dieses ins Presswerkzeug transferiert und zu einer LFT-Platte gepresst (Abbildung 5-1). Aus dieser Platte werden Schulterzugproben gemäß DIN EN ISO 527-2 Typ 1B mittels Fräsen entnommen. Dabei wird angenommen, dass im hinteren Drittel Platte nach einem Fließweg von ca. 100-200 mm über der Plattenbreite eine relativ homogene Materialverteilung und Faserorientierung vorliegt, was in den Simulationen in Kapitel 4.2.2 bestätigt werden konnte. Dennoch können vereinzelte Fasernester zu Inhomogenitäten in der Platten führen, sodass nebeneinanderliegende parallel entnommene Schulterzugproben zu streuenden Festigkeiten führen können.

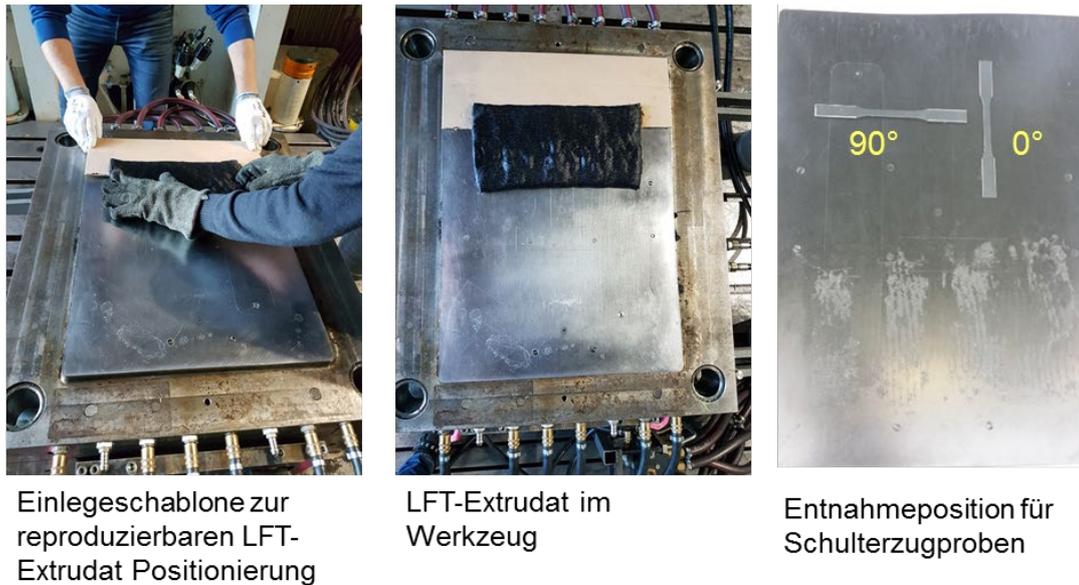


Abbildung 5-1: Herstellung von LFT-Platten im D-LFT-Prozess und anschließende Entnahme von Schulterzugproben

Zur Ermittlung von wahrer Spannung und Dehnung im Zugversuch wird das optische Dehnungsmess-System Aramis der Fa. GOM zur genutzt. Zur Bewertung des Einflusses der Umgebungstemperatur auf die mechanischen Eigenschaften wird die Probe in einer Thermokammer eingehaust. Die Proben werden vor dem Zugversuch für ca. 1 Woche in einem Raum mit konstanter Feuchte und Temperatur ausgelagert.

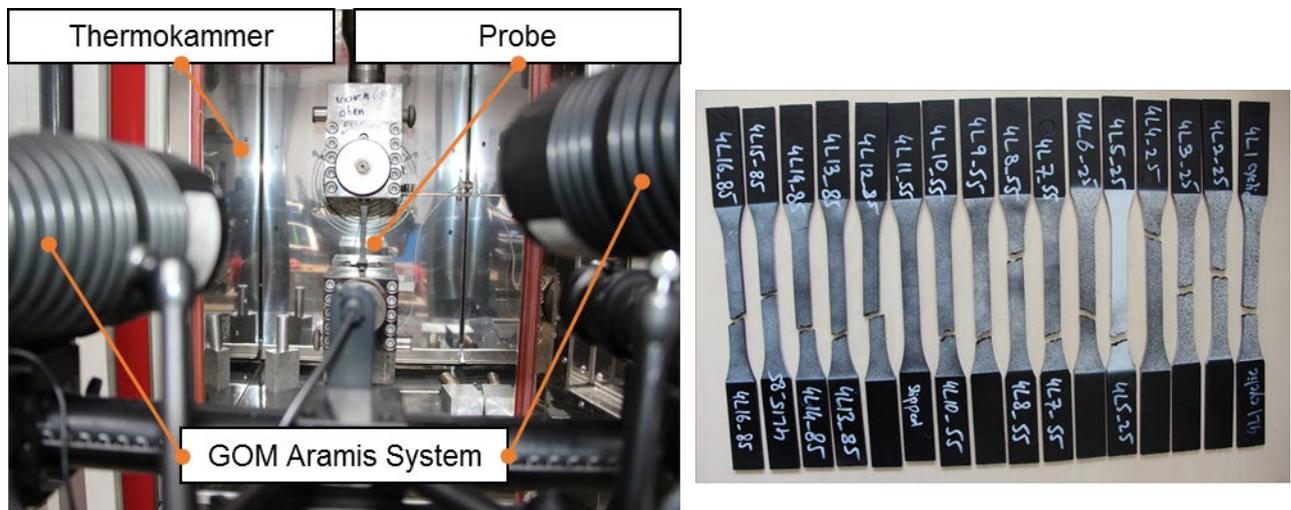


Abbildung 5-2: Versuchsaufbau für die Zugprüfungen in einer Thermokammer

Abbildung 5-3 zeigt das wahre Spannungs-Dehnungsdiagramm für den PA6 LFT40 Compound unter verschiedenen Temperaturen, relativen Luftfeuchten und Umgebungstemperaturen. Nachfolgend werden die Haupteinflussfaktoren auf die mechanischen Eigenschaften kurz erläutert:

#### Einfluss der Faserorientierung auf die mechanischen Eigenschaften:

Die Faserorientierung im LFT hat üblicherweise einen sehr starken Einfluss auf Steifigkeit, Festigkeit und Bruchdehnung. Es zeigt sich, dass die in Fließrichtung aus der LFT-Platte entnommen Proben bei Raumtemperatur (RT) und 30% rel. Feuchte (Prüfung im Winter) eine mittlere Festigkeit von 170 MPa aufweisen, während die quer zur Fließrichtung entnommenen Proben nur eine Festigkeit von 70 MPa bei einer erhöhten Bruchdehnung aufweisen.

#### Einfluss der Temperatur auf die mechanischen Eigenschaften:

Es wurden Zugversuche bei RT (23 °C), im Bereich der Glasübergangstemperatur des Matrixwerkstoffes PA6 (ca. 55 °C) und bei erhöhter Temperatur von ca. 85 °C, welche im Fahrwerk z.B. in der Nähe von Wärmequellen wie Brems- oder Abgasanlage auftreten können. Die Festigkeit sinkt im Bereich der Glasübergangstemperatur auf ca. 115 MPa ab, während die Bruchdehnung deutlich zunimmt. Bei weiterer Temperaturzunahme auf 85 °C zeigt sich ein degressiver Festigkeitsabfall.

#### Einfluss von Feuchte auf die mechanischen Eigenschaften:

Die reduzierten Festigkeiten bei Polyamiden bei Wasseraufnahme durch Luftfeuchtigkeit sind allgemein bekannt. Dabei wird die Glasübergangstemperatur gesenkt und es ergibt sich hier ein signifikanter Abfall der Festigkeit, welcher bei höheren Glasfasergehalten geringer ausfällt. [1] In Abbildung 5-3 werden Zugproben bei 0° Faserorientierung und Raumtemperaturen mit unterschiedlichen Feuchtigkeiten von 30 % und 50 % verglichen, wobei eine Festigkeitsreduktion von ca. 18 % der bei hoher Luftfeuchte (Sommer) gegenüber den in trockener Umgebung geprüften Proben (Winter) festgestellt werden kann. Da jedoch die Proben hier jedoch auch aus unterschiedlichen LFT-Blechen entnommen wurden, ist eine quantitative Aussage nicht zulässig, jedoch zeigt sich eine klare Tendenz, dass Steifigkeit und Festigkeit infolge der Wasseraufnahme verringert werden und die Bruchdehnung steigt.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass bei der Auslegung der LFT-Komponente des Hybridbauteils neben lokalen Faserorientierungen auch weitere Umgebungseinflüsse einen großen Einfluss auf die Festigkeit haben. Somit müsste auch bei genauer Kenntnis der lokalen Faserorientierung Abminderungsfaktoren in die Eingangsdaten der Simulation einfließen.

Für die nachfolgenden FEM-Simulationen werden ausschließlich isotrope Materialmodelle mit einer aus den Zugversuchen in Abbildung 5-3 gemittelten Fließkurve.

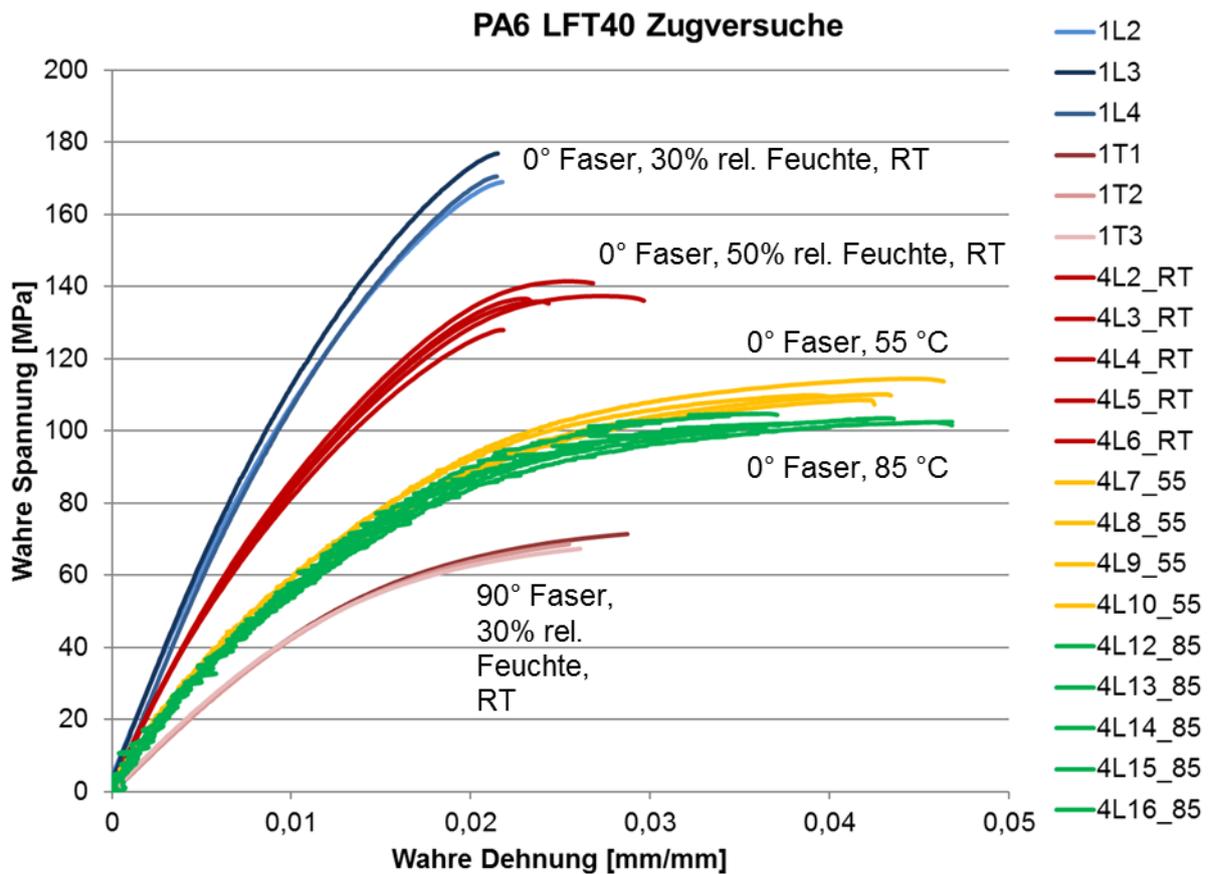


Abbildung 5-3: Wahre Spannung-Dehnungskurven aus Zugversuche mit Schulterzugproben (DIN EN ISO 527-2) bei unterschiedlichen Temperaturen, Faserorientierungen und Feuchten

### 5.1.2 Materialcharakterisierung des Haftvermittlers Vestamelt Hylink

Als Haftvermittler wird das Copolyamid *Vestamelt Hylink* der Fa. Evonik eingesetzt, welcher im Rahmen dieses Forschungsprojekts mittels Pulverlackbeschichtung auf die Stahlbleche aufgebracht wird [33]. In der Literatur sind für die Verbindung PA6 und Stahl im Spritzgussverfahren bereits zahlreiche Vergleichswerte zwischen 10-20 MPa für die Zugscherfestigkeit zu finden [13]. Für die Verbundfestigkeit von PA6 und Stahl im LFT-Fließpressen gab es bei Projektstart noch keine Referenzwerte.

Zur Herstellung eines Zugscher-Probekörpers im LFT-Fließpressverfahren wird das von der Fa. Sprick Technologies konzipierte Presswerkzeug verwendet, welches in Abbildung 5-4 dargestellt ist. Ein vorgewärmter mit Haftvermittler beschichteter Stahleinleger wird eingelegt und über einen federgelagerten Niederhalter geklemmt, bevor das Blech an der kurzen Seite von der LFT-Schmelze angeströmt wird.

Die Überlappung der mittels LFT-Fließpressen hergestellten Zugscherprobe von 12,5 mm entspricht dem in DIN 1645 genormten Zugscherprobekörper, sodass eine Vergleichbarkeit zu Festigkeitswerten aus der Literatur besteht. Die Breite des neu konzipierten Probekörpers ist im Vergleich zum Normprobekörper von 25 mm auf 50 mm erhöht, um eine ausreichende Einlegelfläche für das LFT-Extrudat zu gewährleisten (siehe Abbildung 5-5, rechts).

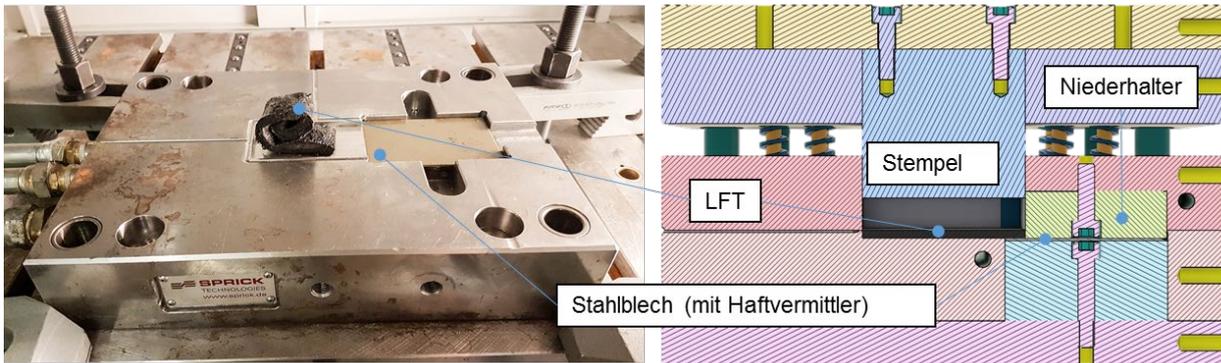


Abbildung 5-4: Presswerkzeug zur Herstellung von Zugscherproben

Über einen wechselbaren Werkzeugeinsatz können mit dem Presswerkzeug auch Kopfzugproben hergestellt werden (siehe Abbildung 5-5, links). Im Wechseleinsatz für die Kopfzugprobe, welcher in die untere Werkzeughälfte geschraubt wird, ist ein senkrechter 1,5 mm x 60 mm breiter Slot, welcher passgenau für das Einsetzen des mit Haftvermittler beschichteten Metallblechs ist. Das im Slot stehende Metallblech wird beim Schließen des Werkzeugs seitlich von der LFT-Schmelze angeströmt.

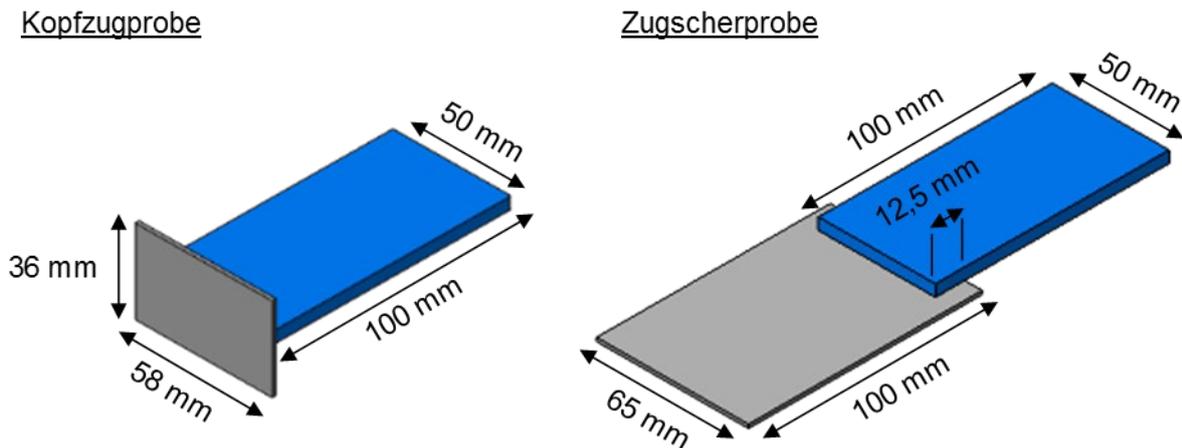


Abbildung 5-5: Proben zur Bewertung der Verbindungsfestigkeit [28]

Nachfolgend sind in Abbildung 5-6 drei verschiedene Lastfälle zur Prüfung der Verbindungsfestigkeit bei verschiedenen Spannungszuständen dargestellt. Der Zugscherversuch dient dazu, eine Vergleichbarkeit mit Literaturwerten herstellen zu können, da dies ein weit verbreiteter Lastfall zur Bewertung von Verbindungsfestigkeiten darstellt. Jedoch eignet sich der Zugscherversuch nicht zum Kalibrieren von rechnerischen Versagensmodellen, da diese Modelle meistens reine Spannungszustände wie Schub- oder Kopfzug erfordern. Beim Zugscherversuch liegt in der Klebfuge jedoch ein Mischbelastung aus Kopfzug und Schub vor.

Dementsprechend werden in zwei weiteren Lastfällen die Kopfzugfestigkeit und die Schubfestigkeit untersucht. Beim Schublastfall wird eine Abstützung des Zugscherprüfkörpers vorgenommen, um den beim Zugscherversuch charakteristischen „S-Schlag“ zu unterbinden (siehe Abbildung 5-6, mittig und rechts).

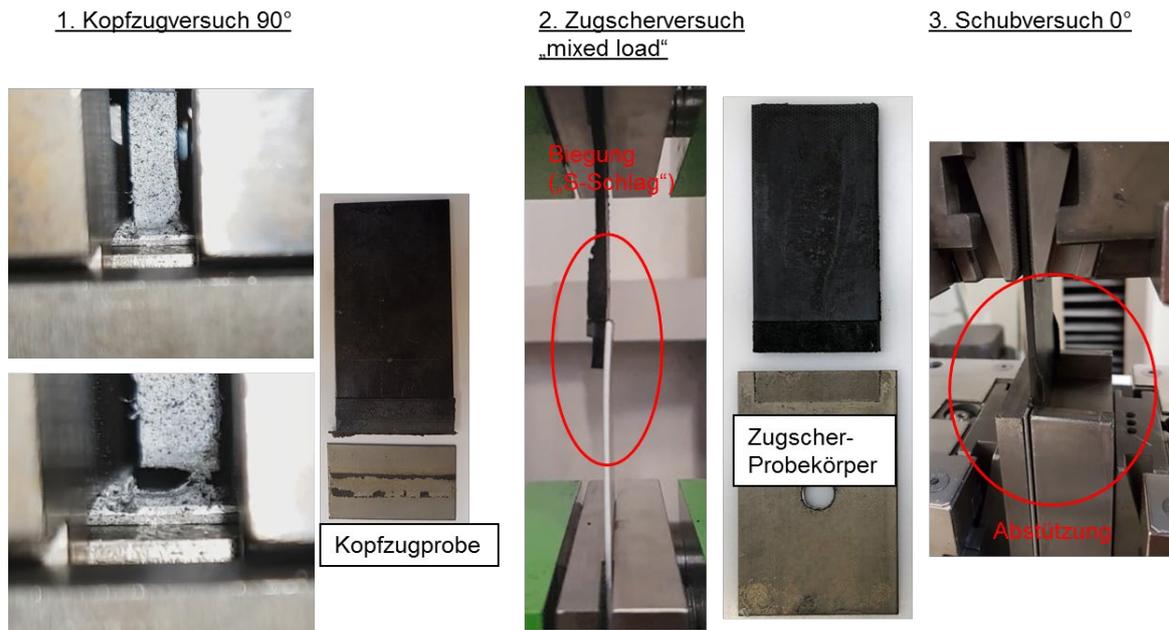


Abbildung 5-6: Drei Lastfälle zur Prüfung der Verbindungsfestigkeit des Haftvermittlers [29]

Im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse werden zunächst alle prozesstechnischen Einflussgrößen auf die Verbindungsfestigkeit untersucht, welche nachfolgend mit dem jeweiligen Untersuchungsbereich auflistet sind:

- |   |             |
|---|-------------|
| ▪ Pressdruck  | 400-800 bar |
| ▪ Temperatur Stahleinleger                            | kalt-220 °C |
| ▪ LFT-Schichtdicke (gesteuert durch LFT-Einlegemasse) | 3-5 mm      |
| ▪ Nachtempern   | 90-180°C    |
| ▪ Vortrocknung LFT                                    | ja/nein     |

Das Ergebnis der Sensitivitätsanalyse ist in Abbildung 5-7 dargestellt. Eine gute Verbindungsfestigkeit ist auch bei geringen Pressdrücken möglich. Um eine gute Verbindungsfestigkeit zwischen LFT und Haftvermittler zu erreichen, wird vom Hersteller ein Temperaturfenster von ca. 150-225 °C angegeben zum Erzeugen des Stoffschlusses angegeben [30]. Die Schmelztemperatur ohne Vorwärmen der Stahleinleger ist bei dieser Proben- und Werkzeuggeometrie nicht ausreichend, um eine ausreichend hohe Verbindungsfestigkeit zu erreichen. Die höchsten Zugfestigkeiten werden bei einer Vorwärmung der Stahleinleger auf 220 °C gemessen. Eine geringe LFT-Schichtdicke („dünnwandig“) hat sich ebenfalls als vorteilhaft erweisen.

Möglichweise ergeben sich Schrumpfungseffekte beim hohen LFT-Dicken, die zu Eigenspannungen oder Ablösungen und somit zu frühzeitigem Versagen führen. Nachtempern bei ca. 90 °C erhöhte die Verbindungsfestigkeit, da es zum einen im Haftvermittler und zum anderen im LFT selbst zu einer Nachkristallisation kommt.

Ein Vortrocknen der LFT-Extrudate führt ebenfalls zu besseren Ergebnissen. Dieser Schritt würde jedoch in einem industriellen D-LFT-Prozess wegfallen, da die Granulate hier i.d.R. vortrocknet sind und das Extrudat direkt verarbeitet wird. Die ausgewählten Prozessparameter sind in Abbildung 5-7 (oben rechts) zusammengefasst.

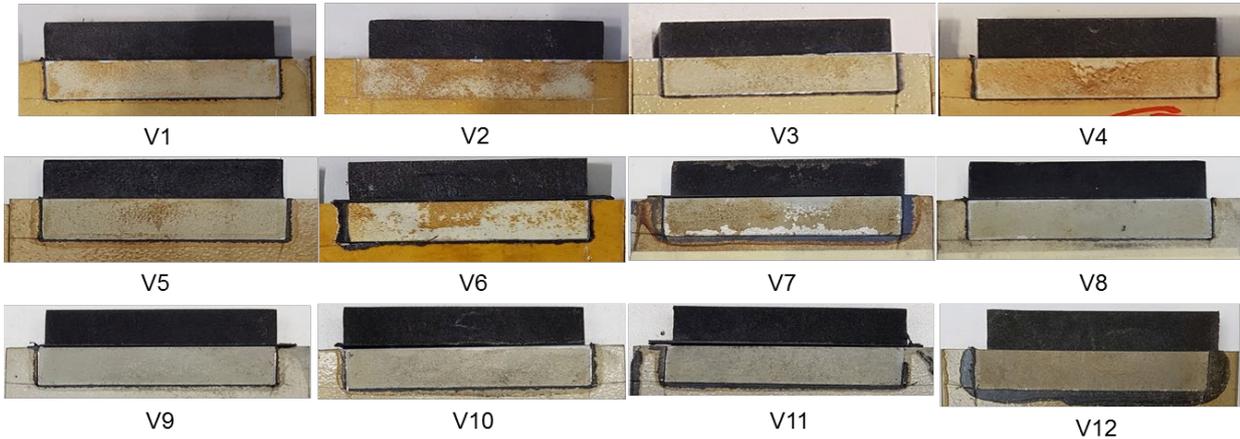
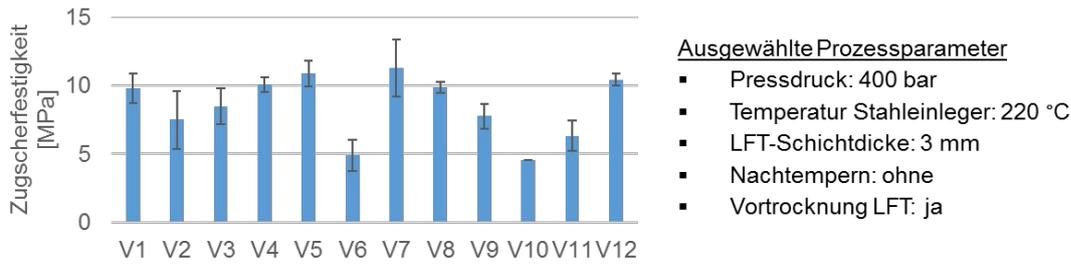


Abbildung 5-7: Sensitivitätsanalyse mittels Zugscherversuch zur Ermittlung der optimalen Prozessparameter zur Verbindung von LFT und Stahl im LFT-Fließpressen

Auf Basis der ermittelten optimierten Prozessparameter werden alle weiteren Probekörper zur Bewertung der Verbindungsfestigkeit herangezogen. Abbildung 5-8 zeigt das Ergebnis vergleichend die mittleren Verbindungsfestigkeiten unter Schub-, Kopfzug-, und Zugscherbelastung. Aufgrund der Spannungsüberhöhung in den Randbereichen der Verbindung der Überlappung ist die Verbindungsfestigkeit im Zugscherversuch geringer. Eine direkte Vergleichbarkeit zwischen Schubfestigkeit und Kopfzugfestigkeit ist nicht gegeben, da die Kopfzugproben mit 250 mm<sup>2</sup> Klebfläche eine deutlich geringere Verbindungsfläche und eine homogenere Spannungsverteilung aufweisen als die Schub- und Zugscherproben mit 625 mm<sup>2</sup>.

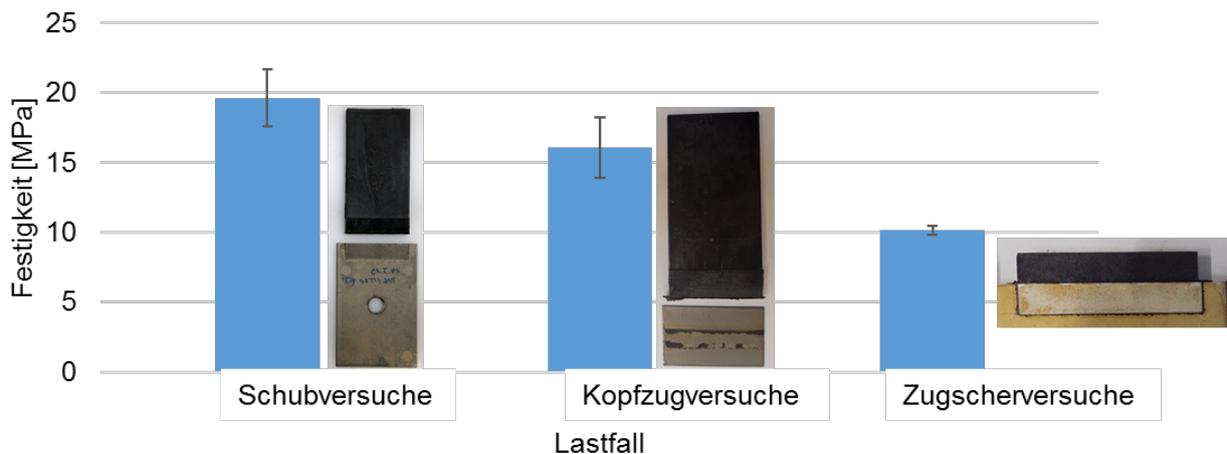


Abbildung 5-8: Mittlere Verbindungsfestigkeiten von Stahl-LFT-Vestamelt Probekörpern in Abhängigkeit der Belastungsrichtung

### 5.1.3 Mechanische Prüfung mittels Hybridpressen hergestellter Stahl-LFT-Hybridquerträger

Zur Prüfung der Verbindungsfestigkeit in einem realen Bauteil bzw. generell zur mechanischen Eigenschaften mittels Hybridpressen hergestellter Bauteile wurde noch vor Herstellung der Fahrwerk-Demonstrator-Bauteile eine generische Querträgerform konzipiert (siehe Kapitel 4.1.4).

Zunächst werden die generischen Querträger in einer Dreipunkt-Biegeprüfung bis zum Versagen belastet. Abbildung 5-9 zeigt den Aufbau der Dreipunkt-Biegeprüfung. Die Prüfgeschwindigkeit beträgt 5 mm/min. Geprüft wird bis zum Versagen des Bauteils oder bis eine Durchbiegung von 30 mm erreicht wird. Der Abstand zwischen den Auflagern beträgt 200 mm.

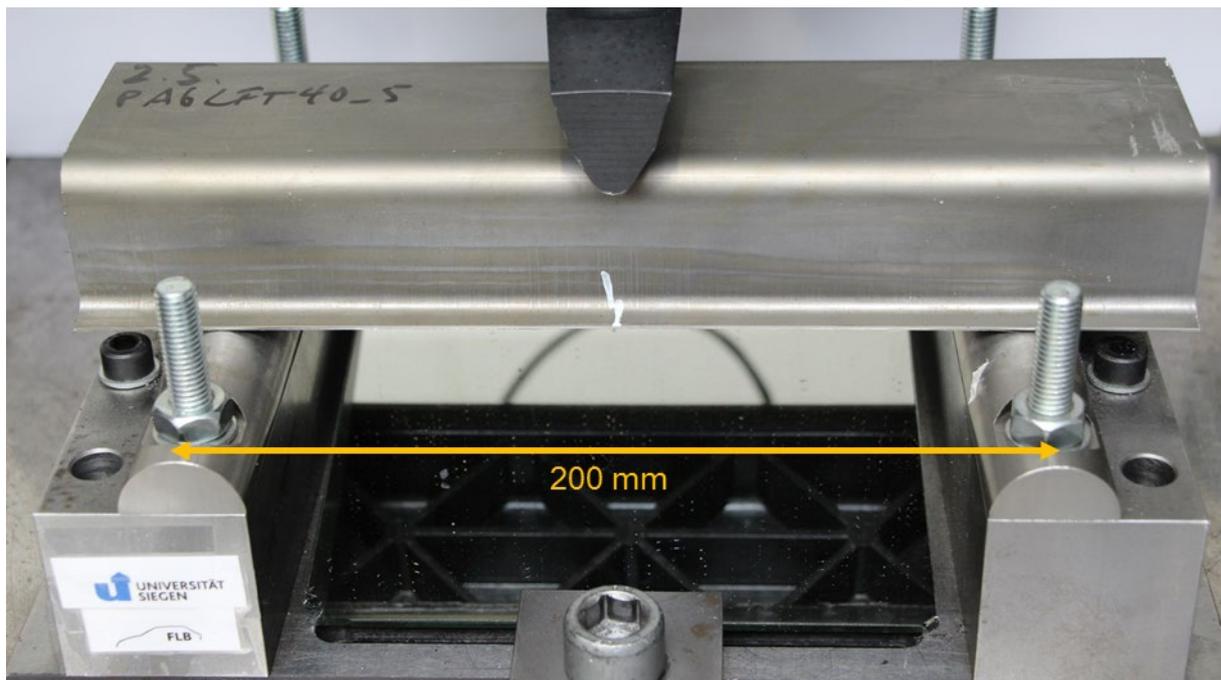


Abbildung 5-9: Aufbau Dreipunkt-Biegeprüfung

Um einen Vergleich der mechanischen Eigenschaften eines Hybridträgers mit reinen Kunststoffbauteilen und einer konventionellen Stahlprofil-Schließblech-Bauweise zu ermöglichen werden auch reine Stahl- und Kunststoffträger mit gleichen Außenmaßen hergestellt und geprüft. Beim reinen Stahlträger aus 1,5 mm HC340 wird das Schließblech mittels Punktschweißen gefügt. Zur Verbindung des hybriden Stahl-LFT-Trägers mit einem Schließblech wird hier Halbhohlstanznieten als Füge-technik eingesetzt, da Punktschweißen am FLB aufgrund der isolierenden Wirkung des Haftvermittlers nicht ohne weiteres möglich ist.

Abbildung 5-10 zeigt das resultierende Kraft-Weg-Diagramm der Dreipunkt-Biegeprüfung der vier verschiedenen Trägerbauweisen. Der rippenverstärkte LFT-Querträger zeigt ein sehr sprödes Bruchverhalten und somit die geringste Energieaufnahme auf. Die gewichtsspezifische Festigkeit ist jedoch deutlich höher als beim reinen Stahlquerträger. Der Stahlquerträger weist ein duktileres Versagensverhalten auf und hält auch nach Erreichen des Abbruchkriteriums von 30 mm Durchbiegung ein stabiles hohes Kraftniveau von ca. 10 kN. Beim rippenverstärkten Hybridquerträger ohne Schließblech ist die Stahlblechdicke von 1,5 mm auf 1,0 mm reduziert, wodurch der Träger ca. 30 % leichter ist. Dennoch sind sowohl das maximale Kraftniveau als auch das Energieabsorptionsvermögen höher als beim reinen Stahlträger mit Schließblech. In

den seitlichen Flanken versagt der Haftvermittler zwischen Stahl und LFT und der Träger biegt sich auf. Durch ein zusätzliches Schließblech kann dieser Effekt verhindert, sodass die letzten Variante, Hybridquerträger mit 1 mm Schließblech, die größte Energieabsorption und ein doppelt so hohes Kraftniveau bei 10 % weniger Gewicht im Vergleich zum reinen Stahlträger aufweist.

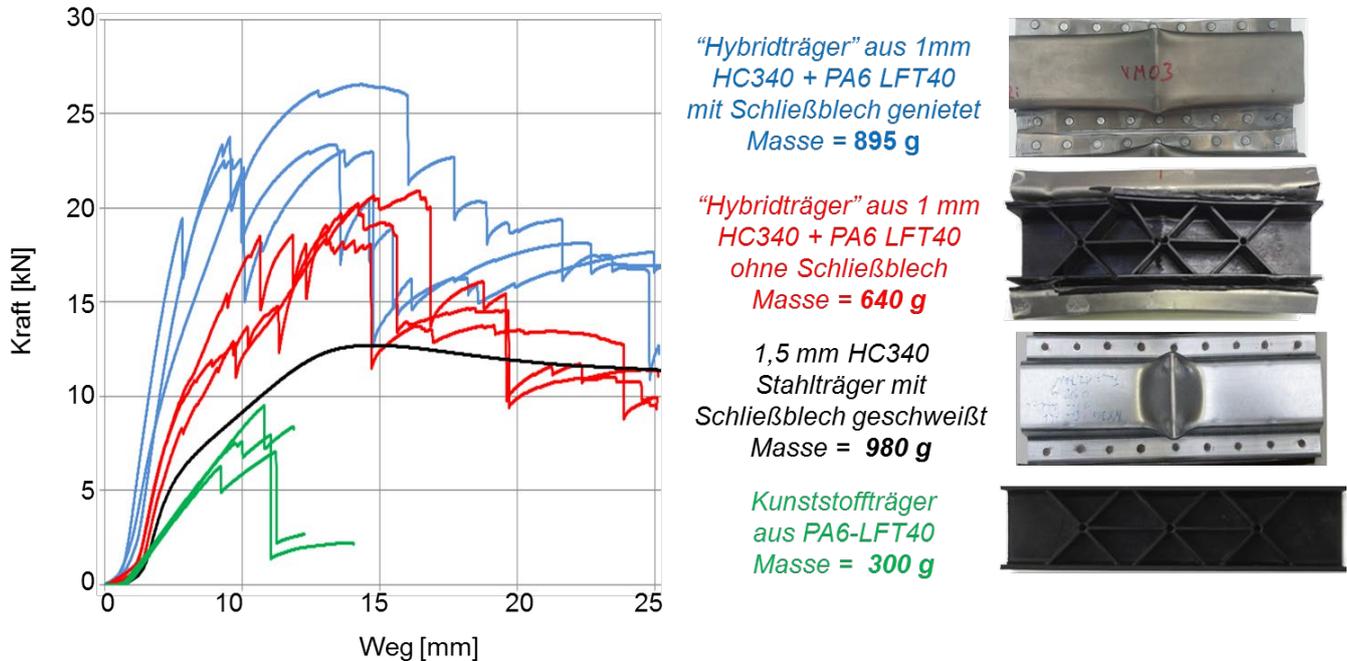


Abbildung 5-10: Dreipunkt-Biegeprüfung von LFT-, Stahl- und Stahl-LFT-Hybridträgern, welche im Hybridpress-Verfahren hergestellt werden [31]

Zusammenfassend zeigt die Versuchsreihe das hohe Leichtbaupotential der Stahl-LFT-Hybridbauweise. Das duktile Bruchverhalten, welches bei den Dreipunkt-Biegeprüfungen der generischen Hybridquerträger zu beobachten ist, lässt auf ein gutes Fail-Safe-Verhalten für reale Bauteile schließen, was gerade für radführende Fahrwerkslenker unabdingbar ist.

#### 5.1.4 Schwingfestigkeitsuntersuchung an hybriden Stahl-LFT-Strukturen

In vorherigen Kapitel 5.1.3 wurde bereits das gute Fail-Safe-Verhalten von hybriden Stahl-LFT-Strukturen aufgezeigt, welches bei Überlastszenarien für Fahrwerksbauteile, wie z.B. Knicken von Lenkern durch Miss-Use oder im Crashfall, von großer Bedeutung ist. Darüber hinaus ist gerade für Fahrwerksbauteile auch die Schwingfestigkeit ein wichtiger Bestandteil für die betriebsfeste Bauteilauslegung. Im Rahmen der Schwingfestigkeitsuntersuchung des Forschungsprojekts liegt der Fokus zunächst auf der Untersuchung der Schwingfestigkeit des LFT-Compounds.

##### Methodik zur Schwingprüfung Langfaserverstärkten Thermoplasten

Es werden spannungskontrollierte Wöhlerlinien für zugschwellende ( $R=0$ ) und wechselnde Belastung ( $R = -1$ ) für den im Projekt eingesetzten LFT-Compound PA6 LFT40 aufgenommen. Die Versuche werden mit servohydraulischen Prüfzylindern der Fa. Instron mit einer 25 kN Kraftmessdose und induktiver Wegmessung durchgeführt. Bei den zugschwellenden Schwingversuchen wird die gleiche Probenform wie bei den statischen Zugversuchen (siehe Kapitel 5.1.1) verwendet. Bei Wechselbelastung wird eine verkürzte und breitere Probe eingesetzt, um ein

Ausknicken der Probe unter Druckbelastung zu verhindern. Gleichzeitig wird die Probe lateral abgestützt (siehe Abbildung 5-11):

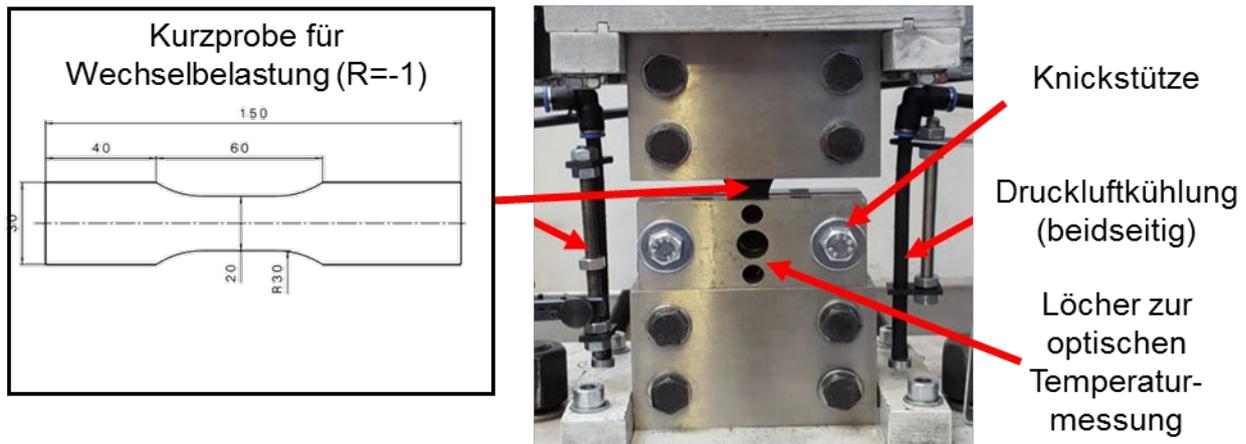


Abbildung 5-11: Prüfaufbau Schwingprüfung von PA6 LFT40 unter wechselnder Belastung [32]

Um eine effiziente zeitraffende Werkstoffprüfung zu gewährleisten, werden die Versuche bei höheren Prüffrequenzen durchgeführt. Da Kunststoffe sich unter zyklischer Belastung auch bei geringen Prüffrequenzen von 5 Hz aufgrund ihres hohen Dämpfungsvermögens stark erwärmen, werden die Schwingprüfungen mit Thermokamera überwacht. Dadurch soll ausgeschlossen werden, dass die Probe thermisch versagt statt durch mechanische Zerrüttung. Um dennoch ein zeiteffiziente Schwingprüfung von Kunststoffproben durchführen zu können, wird die nachfolgend kurz beschriebene Methodik angewandt:

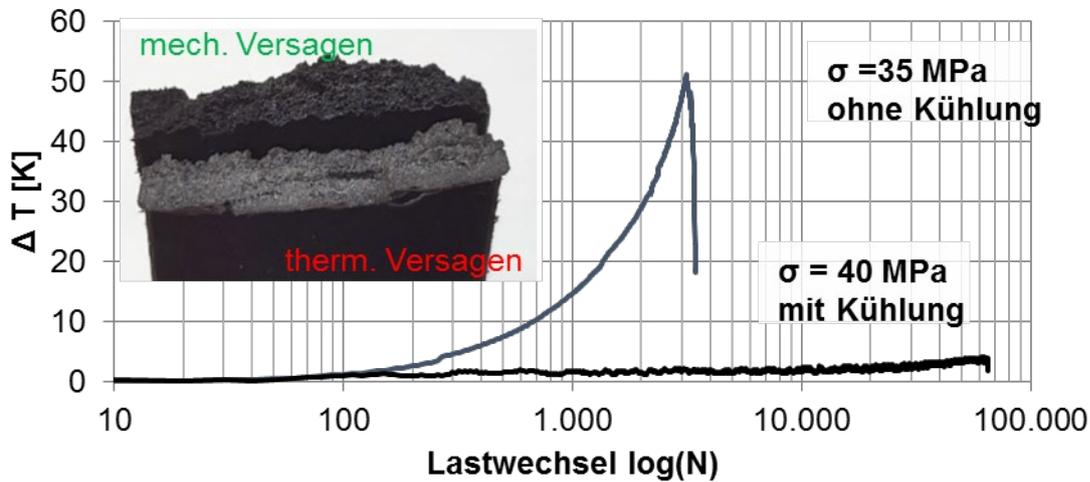
Gleichung 5-1 zeigt den Zusammenhang zwischen Prüffrequenz  $f$ , Spannungsamplitude  $\sigma_a$ , Dämpfung  $d$ , E-Modul  $E$ , Probendicke  $s$  und Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha$  und der Temperaturerhöhung  $\Delta T$  im Schwingversuch. Da Probendicke, E-Modul und Dämpfung feststehende Materialparameter sind und die Prüffrequenz möglichst hoch und konstant sein soll, muss bei entsprechend hoher Spannungsamplitude  $\sigma_a$  die eine ausreichend hoher Wärmeübergangskoeffizient vorliegen, um den Temperaturanstieg im Kunststoff zu begrenzen. Dies wird durch eine aktive Druckluftkühlung der Probe (siehe Abbildung 5-11, rechts) über die gesamte Prüfdauer erreicht.

$$\Delta T = \frac{\sigma_a^2}{E(T)} \cdot d(T) \cdot \pi \cdot f \cdot \frac{s}{\alpha} \quad \text{Gleichung 5-1}$$

Abbildung 5-12 zeigt den Vergleich der Schwingprüfung von PA6 LFT40 Schulterzugproben mit 0° Faserorientierung jeweils mit und ohne Druckluftkühlung. Ohne Kühlung versagt die Probe bei einer Spannungsamplitude von 35 MPa (R=0) bereits frühzeitig nach 3.200 Lastwechseln aufgrund von der hohen thermischen Belastung. Beim Versagen liegt eine Temperaturzunahme von über 50 K vor. Mit Kühlung wird trotz höherer Spannungsamplitude von 40 MPa (R=0) ein Versagen durch mechanische Zerrüttung bei 65.000 Lastwechseln erreicht. Die Temperaturzunahme kann mittels Kühlung auf unter 5 K beschränkt werden. Die optische Analyse der Bruchbilder (Abbildung 5-12 oben) zeigt deutlich abweichendes Bruchbild, wenn das Versagen durch thermische Last hervorgerufen wird.

Die Methodik der beschleunigten Schwingprüfung durch aktive Druckluftkühlung wird bei allen weiteren Schwingprüfungen im Projekt eingesetzt. Es sei nochmal darauf hingewiesen, dass die

Überlagerung von hohen Prüffrequenzen mit hohen Kraftamplituden eine Laborsituation darstellt. Die dadurch notwendige aktive Kühlung wird bei realen schwingbelasteten Kunststoffbauteilen nicht benötigt, da die Spannungsamplituden hier deutlich geringer und nur punktuell auftreten.



Ohne Kühlung → therm. Versagen

Mit Kühlung → mech. Versagen

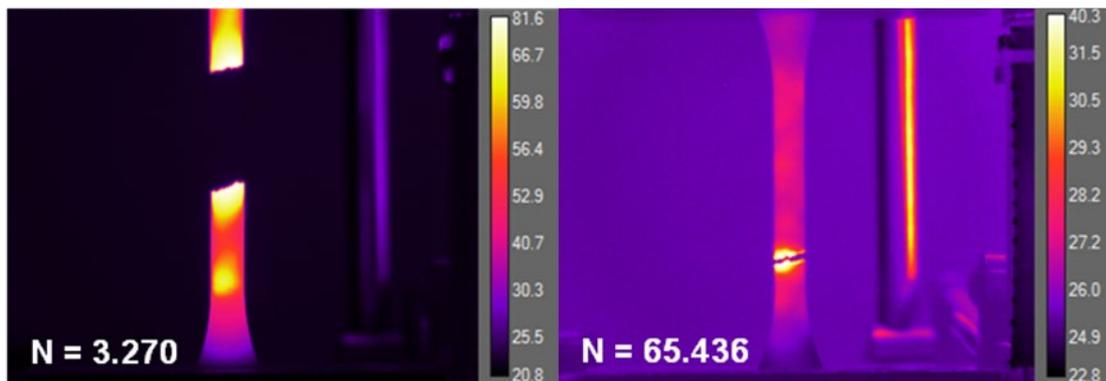


Abbildung 5-12: Vergleich der Wärmeentwicklung im Schwingversuch unter Zugschwellbelastung ohne (li.) und mit (re.) aktiver Luftstromkühlung [27]

Die Schwingversuche der PA6 LFT40 Proben werden auf drei verschiedenen Lastniveaus im Zeitfestigkeitsbereich zwischen 10.000 und 2 Mio. Lastwechseln durchgeführt. Die statistische Auswertung der Schwingversuche wird unter Annahme einer logarithmischen Normalverteilung mithilfe der Maximum-Likelihood Methode durchgeführt. Die Ergebnisse der Schwingversuche sind in Form von Wöhlerkurven in Abbildung 5-13 dargestellt.

Bei einer charakteristischen Schwingspielzahl von 1 Mio. Lastwechseln werden bei zugeschwellender Belastung eine Oberspannung von ca. 80 MPa und bei wechselnder Last von ca. 55 MPa erreicht. Die Wöhlerlinienneigungen von 13,65 im Zugschwellbereich bzw. 17,18 im Wechsellastbereich liegen in der Größenordnung von metallischen Werkstoffen (ca. 15). Diese Spannungswerte dienen bei der Konstruktion und FEM-Auslegung zunächst als Richtwerte, welche nicht überschritten werden sollten. Die Wöhlerkurven bei  $R=0$  und  $R=-1$  sind zudem notwendige Eingangsgrößen für eine detaillierte FEM-Ermüdungsfestigkeitssimulation.

Die relativ großen Streuspannen in beiden Wöhlerkurven sind durch die Inhomogenitäten in den LFT-Platten (siehe Abbildung 4-15) zu erklären, aus denen jeweils 20 Proben pro Platte im

Fließbereich entnommen wurden. Dadurch ist eine gleichförmige homogene  $0^\circ$ -Faserorientierung in allen Proben nicht gegeben.

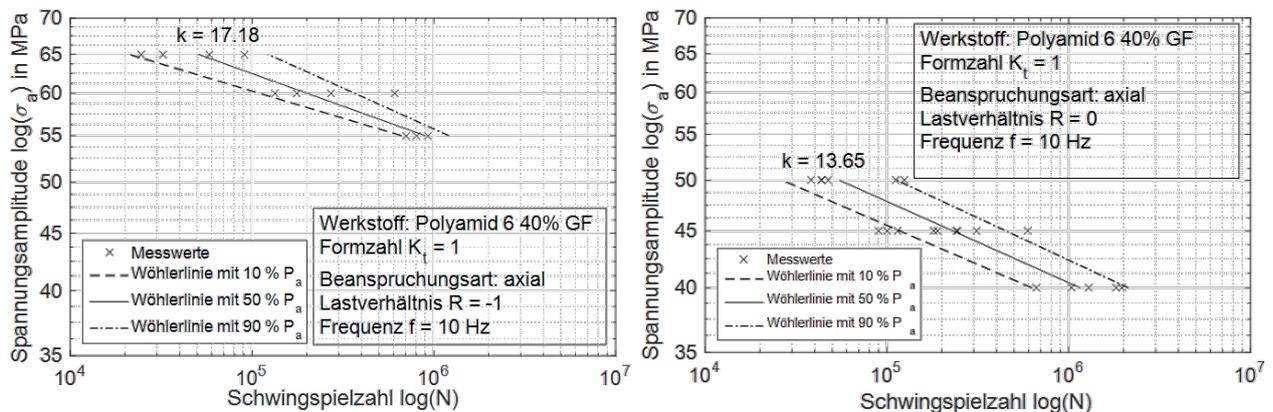


Abbildung 5-13: Wöhlerkurven von PA6 LFT40 mit  $0^\circ$  Faserorientierung unter wechselnder (li.) zugschwellender (re.) Schwingbelastung [32]

### Wechseltorsionsprüfung von hybrid Stahl-LFT-Querträgern

Aufbauend auf der zuvor beschriebenen Methodik zur Schwingprüfung von LFT-Proben werden nachfolgend Schwingversuche in Form einer Wechseltorsionsprüfung an den hybriden Stahl-LFT-Querträgern, welche zuvor (Kapitel 5.1.3) bereits statisch geprüft wurden, durchgeführt.

Wie bei den Schwingfestigkeitsprüfungen mit reinen Kunststoffproben wird auch bei den hybriden Stahl-LFT-Querträgern eine Druckluftkühlung implementiert, um thermisches Versagen im Kunststoff auszuschließen. Die Prüffrequenz beträgt  $f = 3$  Hz. Die Last wird durch einen servohydraulischen Prüfzylinder mit 25 kN Kraftmessdose aufgebracht und über ein Umlenkgetriebe, welches die translatorische Zylinderbewegung in eine Rotation übersetzt, in die Probe eingeleitet (siehe Abbildung 5-14, li.). Mittels Thermografie wurde über den gesamten Versuchszeitraum von bis zu 1 Mio. Lastwechsel wurde max. Temperaturzunahmen von  $<10^\circ\text{C}$  gemessen, sodass von einem Versagen durch mechanische Zerrüttung ausgegangen werden kann.

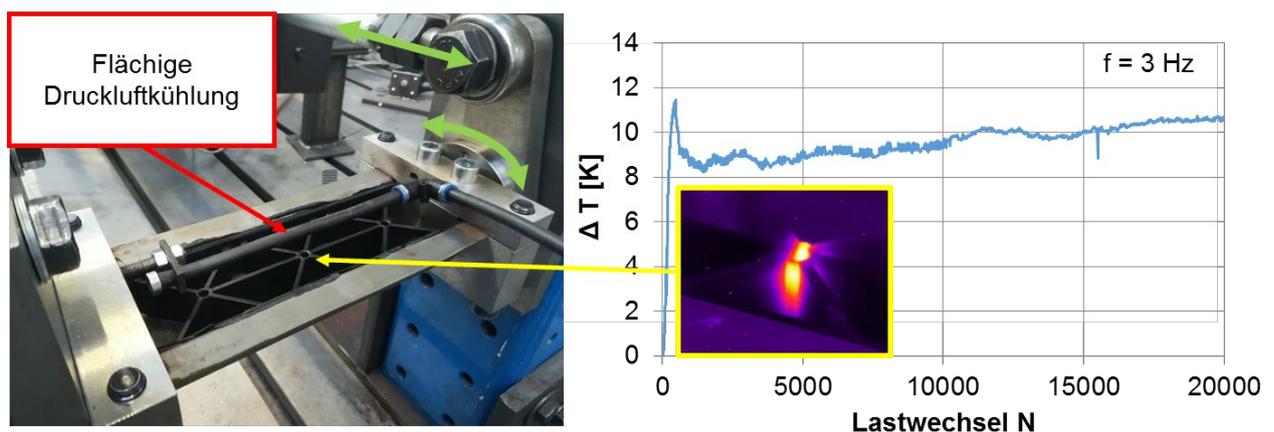


Abbildung 5-14: Aufbau Wechseltorsionsprüfstand (li.), Temperaturentwicklung in mittleren Kunststoffrippenkreuz des Querträgers unter zyklischer Last [32]

Im Schwingversuch stellt sich im hybriden Trägerbauteil infolge der zyklischen Wechselbelastung ein fortschreitender Steifigkeitsverlust ein, da sich Risse zunächst in der LFT-Komponente Bauteils und mit fortschreitender Prüfdauer in der Probeneinspannung im Metallblech bilden.

Daher wird ein Ausfallkriterium definiert, welches die Proben ab 20 % Steifigkeitsverlust bezogen auf die Anfangssteifigkeit als Ausfall deklariert. Auch nach Erreichen des definierten Ausfallkriteriums weisen die Proben noch eine hohe Lebensdauerreserve auf, jedoch bei dementsprechend größeren Dehnungsamplituden. Abbildung 5-15 zeigt den Rissfortschritt in der hybriden Probe und den damit einhergehenden Steifigkeitsverlust.

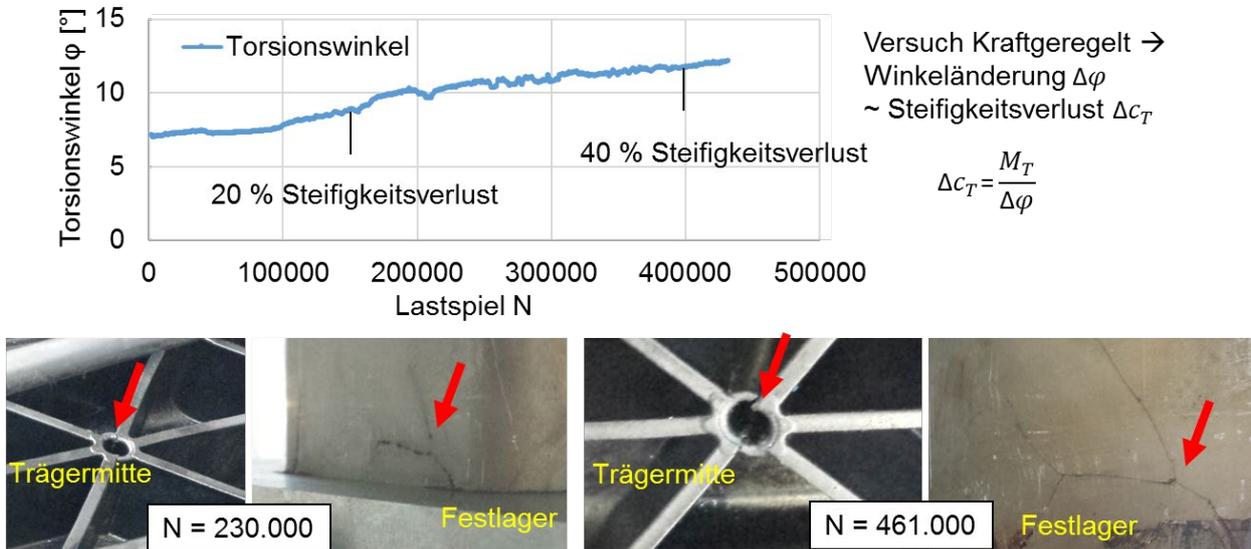


Abbildung 5-15: Definition eines steifigkeitsbasierten Abbruchkriteriums für die Schwingfestigkeitsprüfung der hybriden Querträger [32]

Es werden insgesamt sieben hybride Stahl-LFT-Querträger auf drei verschiedenen Lasthorizonten geprüft (siehe Abbildung 5-16). Um eine statistische Aussagekraft zu erhalten, müssen in Zukunft größere Stichprobenumfänge geprüft werden.

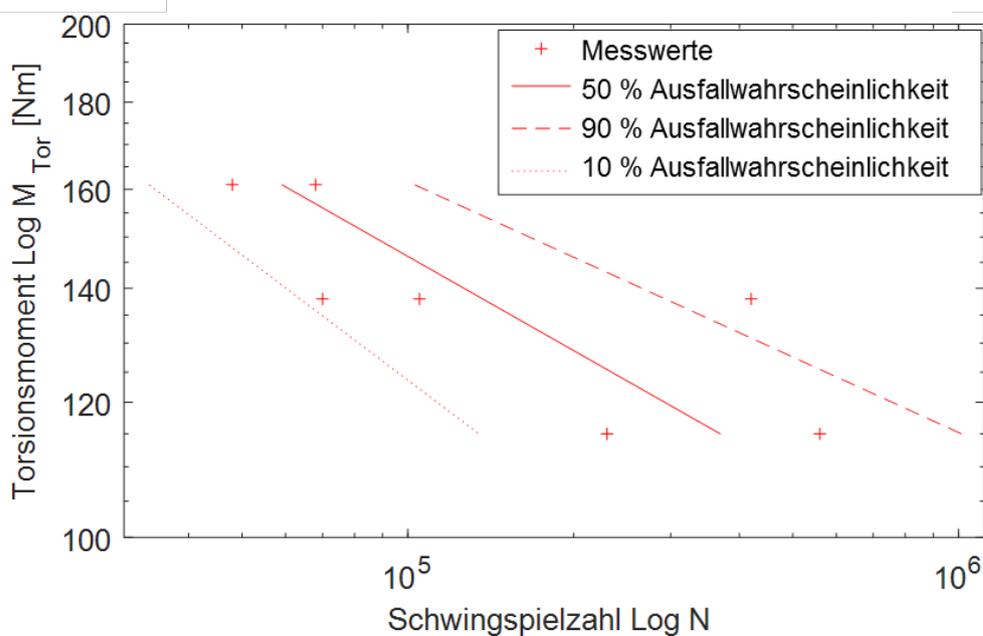


Abbildung 5-16: Bauteil-Wöhlerkurve für hybride Stahl-LFT-Querträger bei Wechseltorsionsprüfung [32]

Zusammenfassend zeigen die Schwingversuche, dass kein abruptes Bauteilversagen auftritt, sondern ein langsam fortschreitender Steifigkeitsverlust. Das bereits bei den statischen Dreipunkt-Biegeprüfungen zu beobachtenden positive Fail-Safe-Verhalten kann auch unter schwingenden Lasten festgestellt werden. Ein Versagen der Verbindung ist beim Wechseltorsionslastfall an keiner Stelle auszumachen, wobei die großflächige Haftvermittlerverbindung auch nicht in den Höchstbelasteten Zonen liegt [32].

## 5.2 Auslegung der hybriden Demonstrator-Bauteile

Wie in Kapitel 5 einleitend beschrieben wird grundsätzlich der Ansatz verfolgt, zunächst über isotrope linear-statische FEM-Berechnungen eine optimale Bauteilgeometrie zu konstruieren und anschließend eine detaillierte FEM-Berechnung unter Berücksichtigung der Verbindungsfestigkeit des Haftvermittlers und dem nichtlinearen Materialverhalten des LFTs als Absicherung der linear-statischen Berechnungen durchzuführen. Die umfassenden Material- und Bauteiltests, welche im vorherigen Kapitel 5.1 dargestellt sind, dienen zur Kalibrierung der Materialmodell und zur Validierung der Methodik.

### 5.2.1 Linear-statische Optimierung der hybriden Stahl-LFT Fahrwerkslenker

Als Demonstrator-Bauteile werden im Projekt jeweils ein radführender Lenker aus Vorder- und Hinterachse eines VW Golf 7 ausgewählt (siehe Abbildung 5-17). Für beide Bauteile ist aufgrund ihrer radführenden Funktion ein gutes Fail-Safe-Verhalten unabdingbar. Dennoch ist Leichtbau bei Lenkern für die Fahrdynamik und Fahrsicherheit von hoher Bedeutung, da radführende Lenker als Teil der ungefederten Massen im Fahrwerk idealerweise möglichst leicht sind. Ziel bei der Auslegung ist es, die Masse durch Blechdickenreduktion zu minimieren und die dadurch reduzierte Steifigkeit und Festigkeit durch lokale Kunststoffrippen zu kompensieren. Als ein wichtiges Auslegungskriterium gilt zudem wie bei der Stahl-Referenz, dass die Fließgrenze im Stahl bei allen Lastfällen nicht überschritten werden darf.

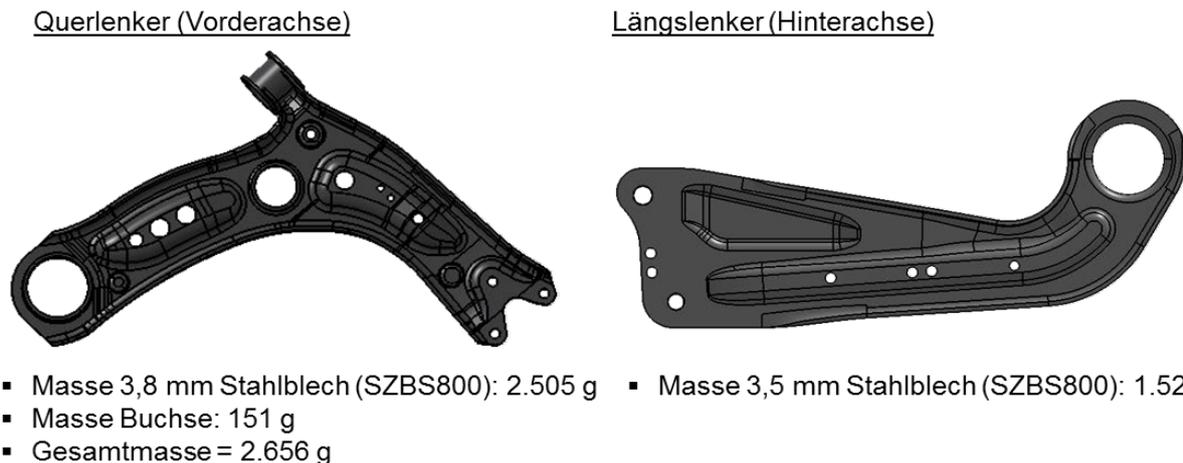


Abbildung 5-17: CAD-Modelle, Massen und Blechdicken der Referenz-Lenker [27]

Ziel ist es daher 20 % Gewicht einzusparen, bei mindestens gleichen mechanischen Eigenschaften bezogen auf die Auslegungslastfälle.

Die Optimierungsmethodik wird für beide Bauteile nachfolgend schrittweise vorgestellt und ist im Flussdiagramm in Abbildung 5-18 skizziert. Für die Topologie-Optimierung wird der Solver OptiStruct von Altair eingesetzt.

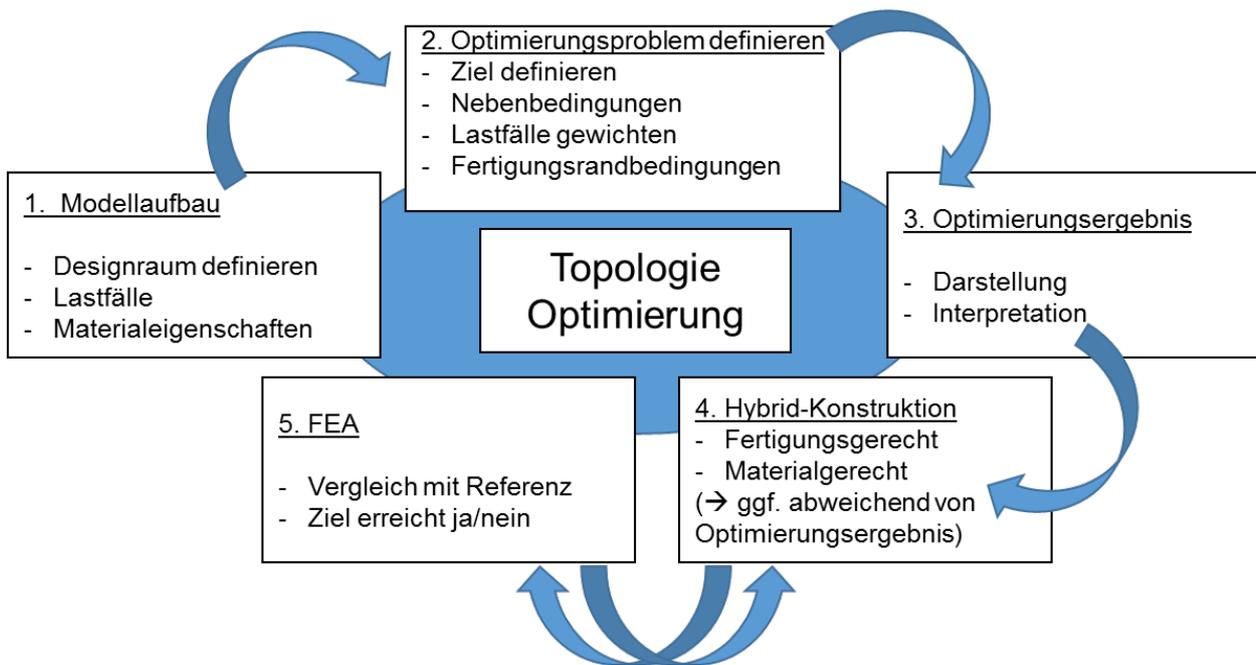


Abbildung 5-18: Flussdiagramm Bauteiloptimierung für Hybrid-Bauteile

### 1. Modellaufbau

Der Bauraum ist in PKW-Fahrwerken der Kompaktklasse generell sehr stark eingeschränkt. Die Außenflächen bzw. die Ziehtiefe der Stahl-Referenzlenker sind gleichzeitig die Bauraumbeschränkung für die Rippenhöhe der Stahl-LFT-Hybridlenker. Grundsätzlich benötigt eine kunststoffgerechte Bauweise möglichst viel Bauraum, um den im Vergleich zu Stahl um über Faktor 10 kleineren E-Modul mit einer besseren Konstruktion ausgleichen zu können.

Abbildung 5-19 zeigt die Unterteilung von Design- und Nondesignraum am Beispiel des Längslenkers. Um eine flächige Anbindung zwischen Kunststoff und Metall zu gewährleisten, wird ein unterer 2 mm dicker LFT-Nondesignraum modelliert.

Die Elementkantenlänge der Tetraeder mit denen der Designraum vernetzt wird, sollte möglichst klein sein, um dünnwandige Rippenstrukturen abbilden zu können. Gleichzeitig darf die Elementgröße aber wegen der begrenzten Rechenkapazitäten nicht zu klein sein. Als Kompromiss wurde eine Elementkantenlänge von 2 mm gewählt. Der Haftvermittler wird zunächst im Bereich der linear-statischen Lastfälle als ideal haftend angenommen und als TIE-Contact bzw. Knoten-Knoten-Verbindung zwischen Stahl und LFT modelliert.

Die für beide Bauteile notwendigen Lastfälle werden in Absprache mit dem assoziierten Projektpartner Volkswagen definiert. Für den Querlenker werden 6 Lastfälle definiert, die verschiedene Fahrsituation wie z.B. starkes Bremsen oder Kurvenfahrt abbilden. Beim Längslenker wird nur ein Lastfall modelliert, welcher eine Zugbelastung im Lenker infolge eines Bremsmanövers dargestellt. Die Lasteinleitung wird über ideale starre RBE2-Elemente auf mehrere Knoten an den Lagerstellen verteilt.

Als E-Modul für die Stahl-Komponente werden 210 GPa gewählt. Für den Designraum wird ein E-Modul von 9 GPa angenommen, was einer Mittelung aus 0°- und 90°-Faserorientierung des PA6 LFT40 entspricht.

Die Stahlblechdicke des Querlenkers wird von 3,8 mm auf 2,4 mm reduziert und beim Längslenker wird die Referenzblechdicke von 3,5 mm auf 2 mm reduziert, um so das angestrebte Leichtbauziel von 20 % Gewichtsreduktion zu erreichen. Bei weiterer Reduktion der Stahlblechdicke zeigen in der FEM-Simulation der Auslegungslastfälle unzulässig hohe Spannungen.

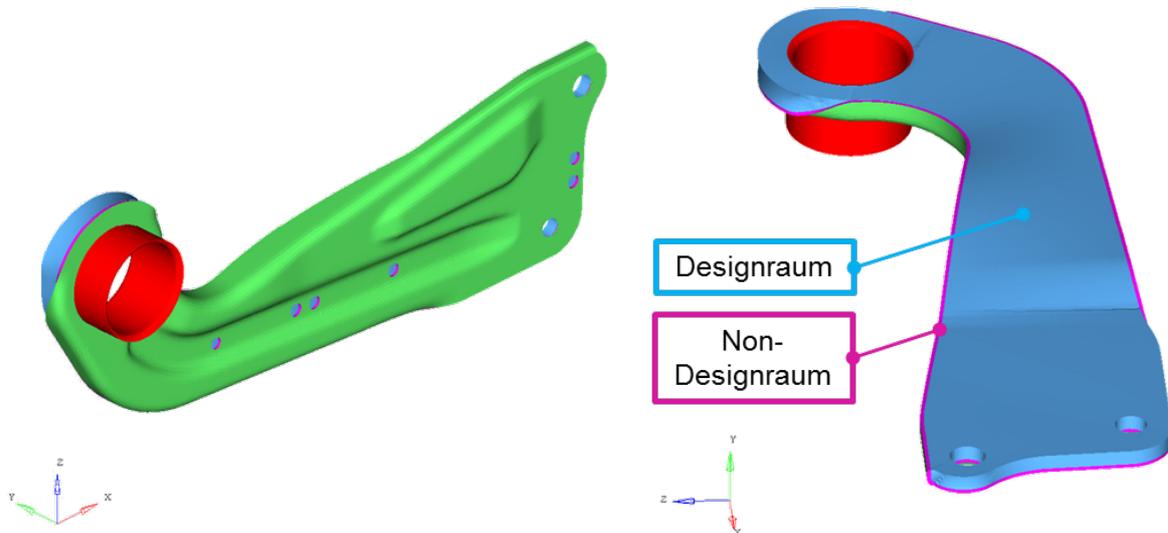


Abbildung 5-19: Designraum-/Packagedefinition des hybriden Längslenkers

## 2. Optimierungsproblem definieren

Das Optimierungsziel ist Maximierung der Struktursteifigkeit, welche durch Minimierung der globalen Verzerrungsenergie (Compliance) erreicht werden kann. Für den Querlenker werden dafür die 6 Lastfälle noch gleich gewichtet (Weighted Compliance). Es kann zusätzlich als Nebenbedingung eine Spannungsobergrenze (z.B. die Fließgrenze) im Designmaterial LFT oder im Stahl definiert werden, was jedoch den Raum für Optimierer weiter einschränkt und sich nicht als zielführend erwiesen hat. Als Nebenbedingung wird eingestellt, dass eine Reduzierung des Designraums auf 20 % der Ausgangsgröße einzuhalten ist. Zudem werden Fertigungsrandbedingungen definiert, die ein Entformen nur in Pressrichtung erlauben und maximale und minimale Designraumstrukturen festgelegt, um möglichst kunststoffgerechte Rippenstrukturen zu erzeugen.

## 3. Optimierungsergebnis

Das Ergebnis der beiden Optimierungen von Längs- und Querlenker ist in Abbildung 5-20 dargestellt. Beim Längslenker stellt sich infolge der Zugbelastung aufgrund der bauraumbedingt gekrümmten Struktur eine zusätzliche Biegebelastung im Bauteil ein. Dadurch entstehen zwei hochbelastete Bereiche: Zum einen an der Festlagereinspannung am Radträger und zum anderen im Bereich der Krümmung. An diesen Stellen kann durch lokale Rippenverstärkung das in der Blechdicke reduzierte Stahlblech abgestützt werden. Beim Querlenker sind die Hauptbelastungszonen um das Komfortlager und ebenfalls wie beim Längslenker im Bereich der beiden Krümmungen, da hier insbesondere der Lastfall „Bremsstoß“ zu einer Biegebelastung im Lenker führt.

Beide Optimierungsergebnisse zeigen jedoch eindeutig, dass viele Bereiche im Lenker wenig belastet sind und somit eine lokale Verstärkung mit Rippen generell sinnvoll ist.

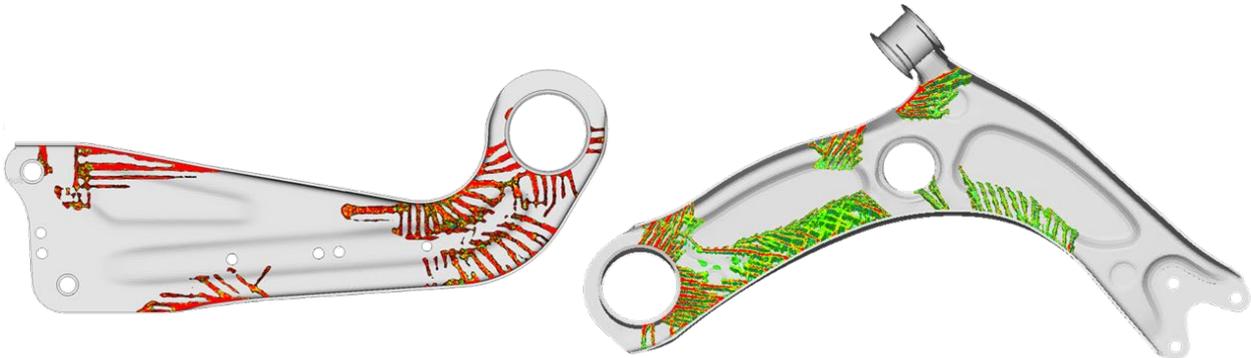


Abbildung 5-20: Finales Ergebnis der Topologie-Optimierung von Längs- und Querlenker

#### 4. Hybrid-Konstruktion

Die Ergebnisse der Topologie-Optimierungen werden in fertigungs- und materialgerechte Bauteil-Konstruktionen umgesetzt. Grundsätzlich gilt für beide Hybridkonstruktionen, dass der Fokus auf Umsetzung des Hybridpressverfahrens am Beispiel einer komplexen Bauteilgeometrien liegt. An Lagerstellen auftretende Schwierigkeiten wurden im Nachgang konstruktiv angepasst.

Die konstruktive Umsetzung des Optimierungsergebnisses für den Hybrid-Querlenker ist in Abbildung 5-21 dargestellt. Beim Hybrid-Querlenker kann die Anbindung des hybriden Stahl-LFT-Grundkörpers an die vordere Lagerbuchse nicht wie bei der Stahl-Referenz mit MAG-Schweißnähten umgesetzt werden. Zum einen sind die dafür notwendigen lokalen Ziehtiefen im Bereich der Buchse im einstufigen Hybridpressverfahren nicht rissfrei darstellbar. Zum anderen kann der lokale Wärmeeintrag beim Laserschweißen den Kunststoff schädigen. Die Einflüsse von Schweißwärme auf die mechanischen Eigenschaften des Kunststoffs wurden im Projekt nicht untersucht. Stattdessen wird der im Hybridpressverfahren gefertigte Grundkörper über eine „kalte“ Fügetechnik wie z.B. Fließlochformende Schrauben (FDS) an ein zusätzliches 3,8 mm dickes Blechbauteil zur Anbindung an die Buchse gefügt. Die veränderte Hybridkonstruktion erfüllt zwar weiterhin das geforderte Leichtbauziel von 20 % Gewichtseinsparung gegenüber der Stahlreferenz, büßt aber aufgrund des zusätzlichen Bauteils an Wirtschaftlichkeit ein. Um das Adapterbauteil einsparen zu können, müsste der Bauraum angepasst werden, um ein serientaugliches Hybridbauteildesign zu ermöglichen.

- Lenker (2,4 mm): 1.426 g
- Anbindung (3,8 mm): 205 g
- LFT: 314 g
- Buchse: 151 g
- Gesamtmasse = 2096 g (79,0 %)

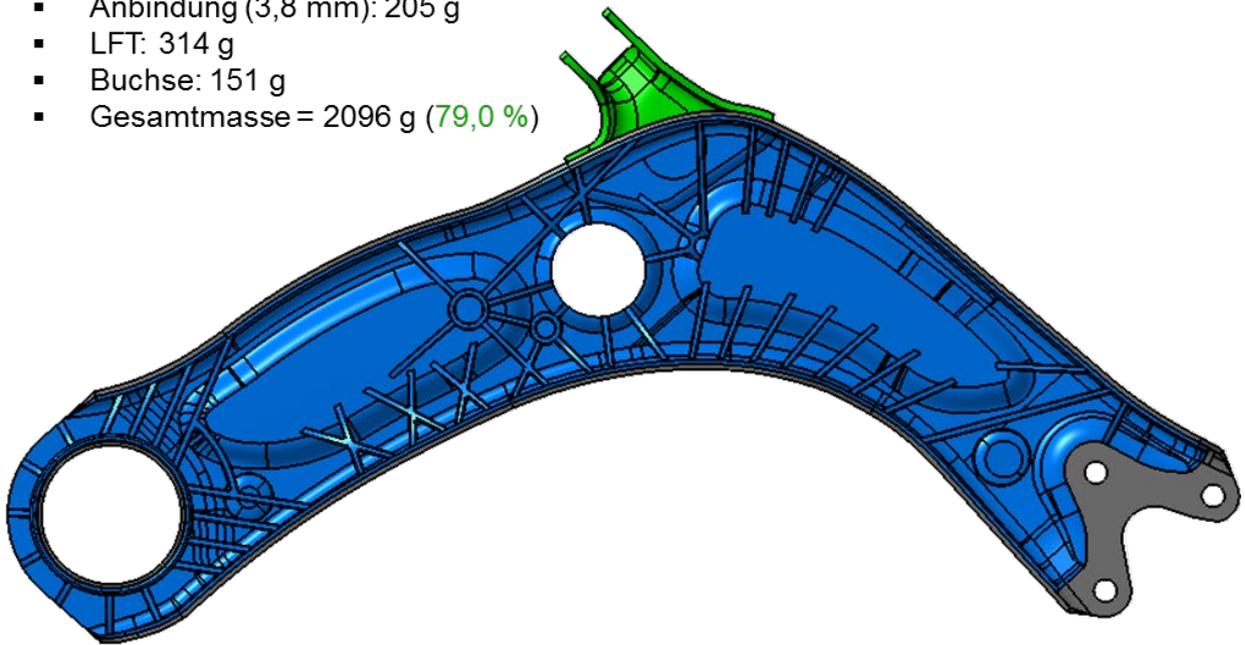


Abbildung 5-21: Finale Stahl-LFT-Hybridkonstruktion des Querlenkers [27]

Die konstruktive Umsetzung des Optimierungsergebnisses für den Hybrid-Längslenker ist in Abbildung 5-21/Abbildung 5-22 dargestellt. Zur Verbesserung des Formfüllverhaltens während des Hybridpressprozesses werden neben den strukturell notwendigen Rippen in den hochbelasteten Bereich flache Rippen als Fließhilfen vorgesehen.

Das angestrebte Leichtbauziel von 20 % Gewichtsreduktion konnte auch erreicht werden. Zur Integration des Gummilagers, welches den Längslenker mit der Karosserie verbindet, wird eine zusätzliche gerändelte Metallhülse vorgesehen. Diese Metallhülse wird in einem Heißpressverfahren in den Kunststoff eingepasst. Dadurch soll verhindert werden, dass die beim Einpressen von Lagern auftretenden Kräfte zu Eigenspannungen und damit verbundenen Kriechvorgängen im Kunststoff führen. Das Heizeinpressverfahren von Metall-Hülsen in LFT wird in Kapitel 6 detailliert erläutert.

- Lenker (2,0 mm): 940 g
- LFT: 250 g
- Metallhülse: 40 g
- Gesamtmasse = 1.230 g (80,9 %)

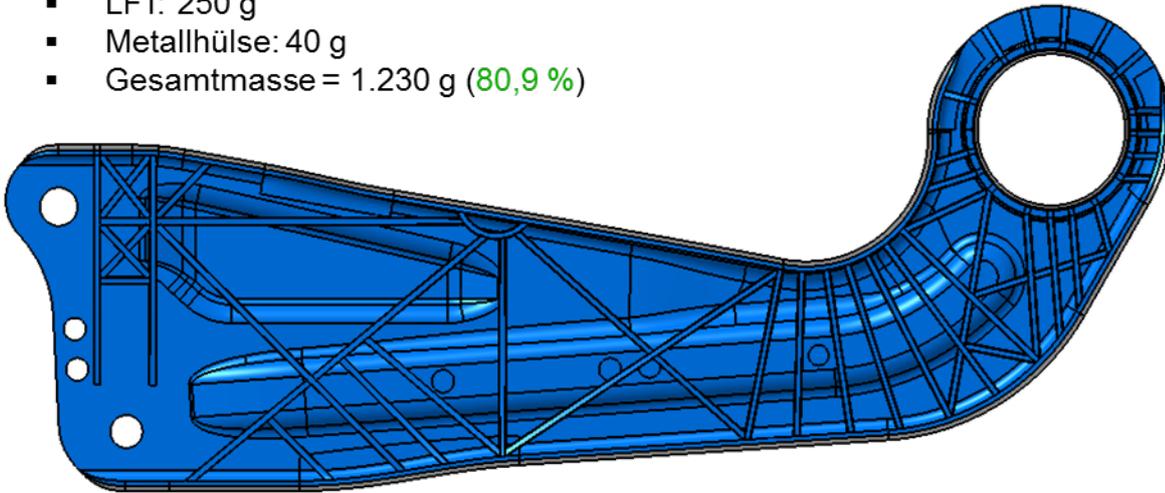


Abbildung 5-22: Finale Stahl-LFT-Hybridkonstruktion des Längslenkers [27]

#### 5. FEA-Vergleich der mech. Eigenschaften von Stahl-Referenz mit Hybridbauweise

Die Finite-Elemente-Analyse (FEA) für den Querlenker wird mit dem impliziten Solver OptiStruct durchgeführt. Der Längslenker muss in einem Hinterachs-Submodell modelliert werden, um die komplexe Kinematik unter Zugbelastung realistisch abbilden zu können. Im Hinterachs-Submodell wird ein Ersatzmodell des Radträgers sowie die weiteren Lenker der Mehrlenker-Hinterachse als Balken abgebildet werden. Die dafür notwendigen User-Defined-Elements sind nur in Abaqus verfügbar, weshalb die linear-statischen Berechnungen mit dem Solver Abaqus Implizit durchgeführt werden. Es werden die gleichen E-Moduli wie bei den Optimierungen verwendet.

Nachfolgend werden die Spannungsverteilungen beider Hybridlenker mit denen der Stahl-Referenzlenker verglichen. Abbildung 5-23 zeigt den Vergleich der Spannungen in der Stahl-Komponente des Hybrid-Querlenkers mit den Spannungen beim Stahl-Referenzlenker in den drei kritischsten Lastfällen. Die Spannungen werden normiert auf die höchste auftretende Spannung des Stahl-Referenzlenkers dargestellt. Neben den in allen Lastfällen geringeren Maximalspannungen weist der Hybrid-Querlenker zudem eine bessere Werkstoffausnutzung als die Stahlreferenz auf, da weniger unbelastete Bereiche im Bauteil vorliegen. Der grundsätzliche Leichtbaugedanke, Material nur an den Stellen einzusetzen, wo es notwendig ist, wird damit Rechnung getragen.

Stahl-Querlenker: 3,8 mm SZBS 800

Hybrid-Querlenker: 2,4 mm DP800 + PA6 LFT40

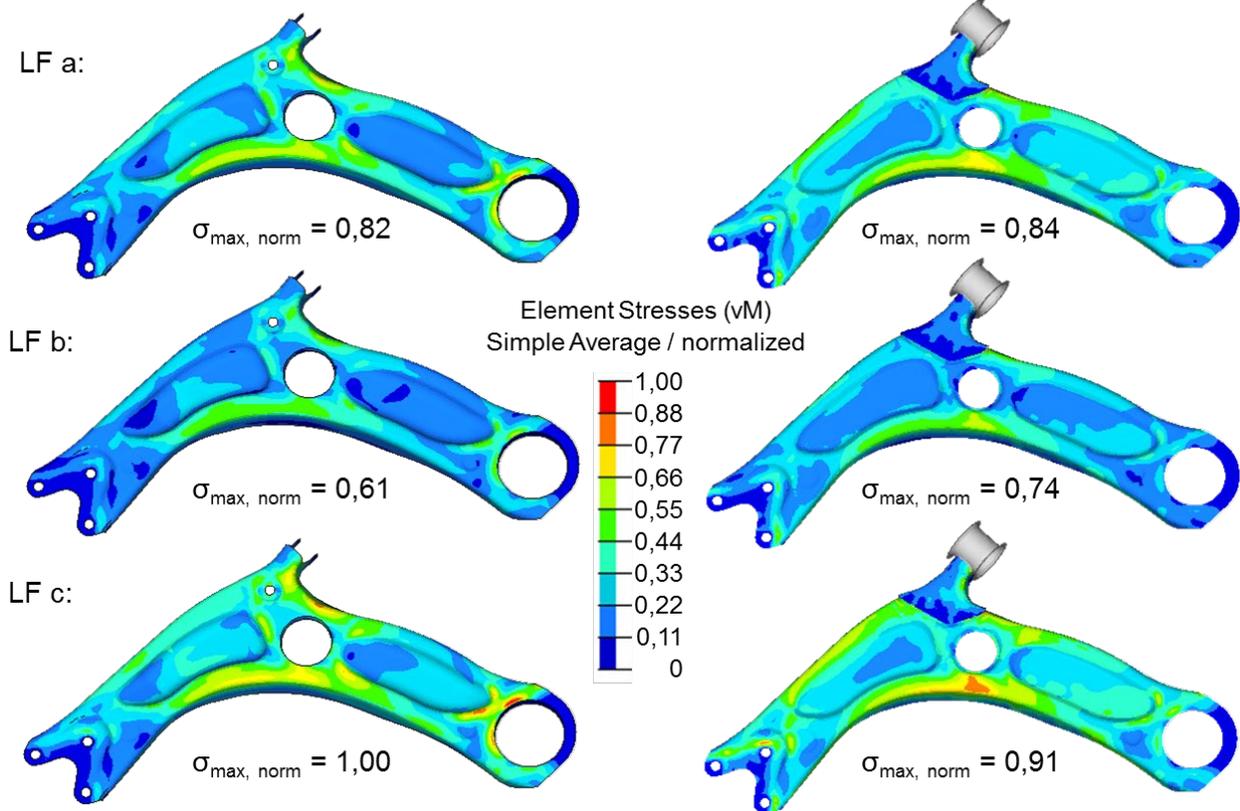


Abbildung 5-23: Vergleich der Spannungen im Stahlblech des Hybrid-Querlenkers und des Stahl-Referenz-Querlenkers nach FEA der kritischsten drei Lastfälle [27]

Abbildung 5-24 zeigt den Vergleich der Spannungen in der Stahl-Komponente des Hybrid-Längslenkers mit den Spannungen beim Stahl-Referenzlenker. Die maximal auftretende Spannung ist im Hybrid-Längslenker etwas geringer als bei der Stahlreferenz. Weiterhin liegt die kritischste Stelle im Bereich der oberen Verschraubung zum Radträger, da hier nur ein sehr begrenzter Designraum für Kunststoffrippen vorliegt.

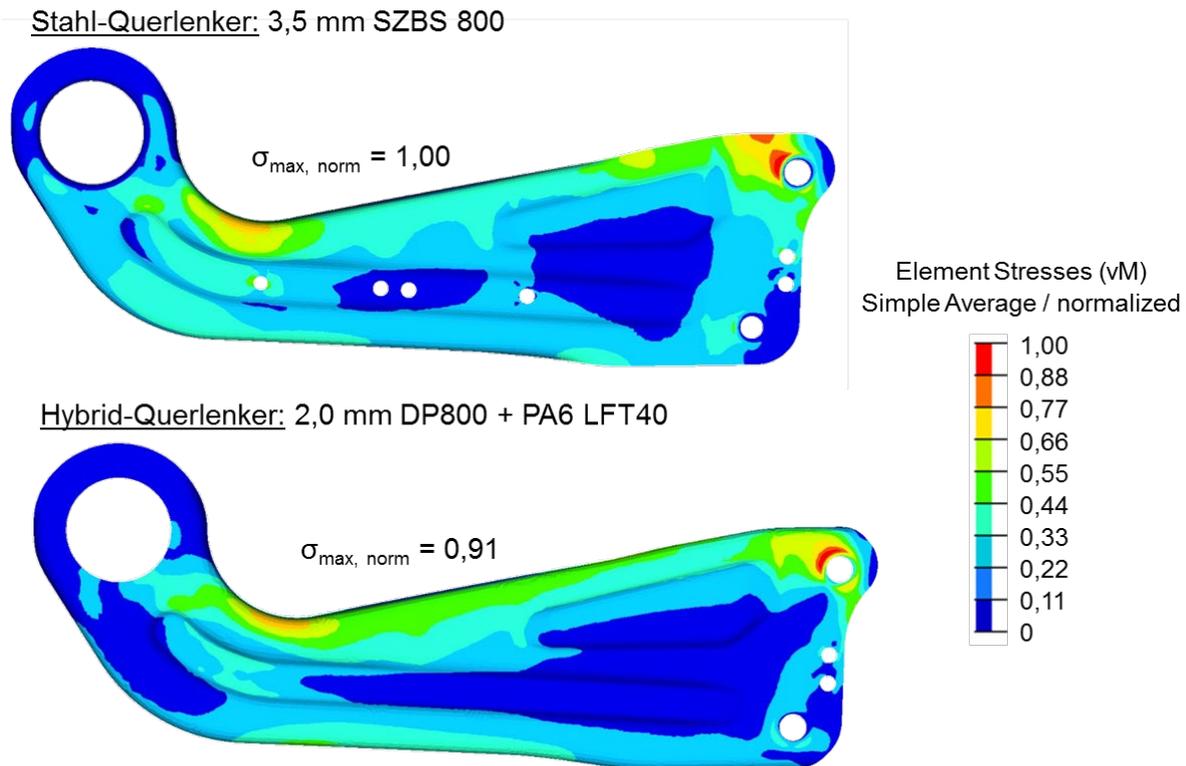


Abbildung 5-24: Vergleich der Spannungen im Stahlblech des Hybrid-Längslenkers und des Stahl-Referenz-Längslenkers nach FEA der kritischsten Lastfall [27]

Bei der Topologie-Optimierung und den linear-statischen Berechnungen stand bisher die Betrachtung der globalen Steifigkeit unter Berücksichtigung der Spannungsentwicklung im Stahlblech im Fokus. Eine Analyse der Spannungen und Dehnungen in Haftvermittler und LFT kann erst im zweiten Schritt (siehe Kapitel 5.2.2) sinnvoll durchgeführt werden. Da kurz- und langglasfaserverstärkte Kunststoffe im Vergleich zu Metallen keinen ausgeprägten linear-elastischen Bereich aufweisen, werden nachfolgend nichtlineare Berechnungen durchgeführt, mit denen Spannungen und Dehnungen in Haftvermittler und Kunststoff analysiert werden können. Dadurch kann die linear-statische Optimierungsmethode abgesichert werden.

### 5.2.2 Nichtlinear-statische FEM-Berechnung zur Absicherung der statischen Auslegung am Beispiel eines Längslenkers

Die nachfolgend dargestellten nichtlinearen isotropen Berechnungen von Stahl-Haftvermittler-LFT Hybridbauteilen werden mit dem expliziten Solver Radioss durchgeführt. Bei allen Modellen wird eine 3 mm Hexaeder-Vernetzung mit einer Knoten-Knoten-Verbindung zur Haftvermittlerschicht angestrebt. Nachfolgend werden die verwendeten Materialmodelle für die Metall-, Kunststoff- und Haftvermittler-Komponente der Hybridbauteile vorgestellt.

#### Materialmodellierung Stahl

Die hochfesten Stähle HC340 (generischer Querträger) und SZBS800 (Längs- und Querlenker) werden jeweils mit dem elasto-plastischen Materialmodell LAW36 abgebildet.

#### Materialmodellierung Langfaserverstärkter Thermoplast PA6 LFT40

Zur Abbildung des plastischen Verhaltens von PA6 LFT40 wird ebenfalls das elasto-plastische Materialmodell LAW36 verwendet. Auf Basis der in Abbildung 5-3 dargestellten Zugversuche

wird eine aus 0° und 90° gemittelte Fließkurve im Materialmodell implementiert. Abbildung 5-25 zeigt die Simulation des quasistatischen Zugversuchs. Mit dem isotropen Ansatz und den aus 0° und 90° gemittelten Eingangsdaten liegt die in Gelb dargestellte simulierte Spannungs-Dehnungskurve im Bereich der Zugversuche, welche an aus den LFT-Querträgern entnommenen Schulterzugproben durchgeführt wurden.

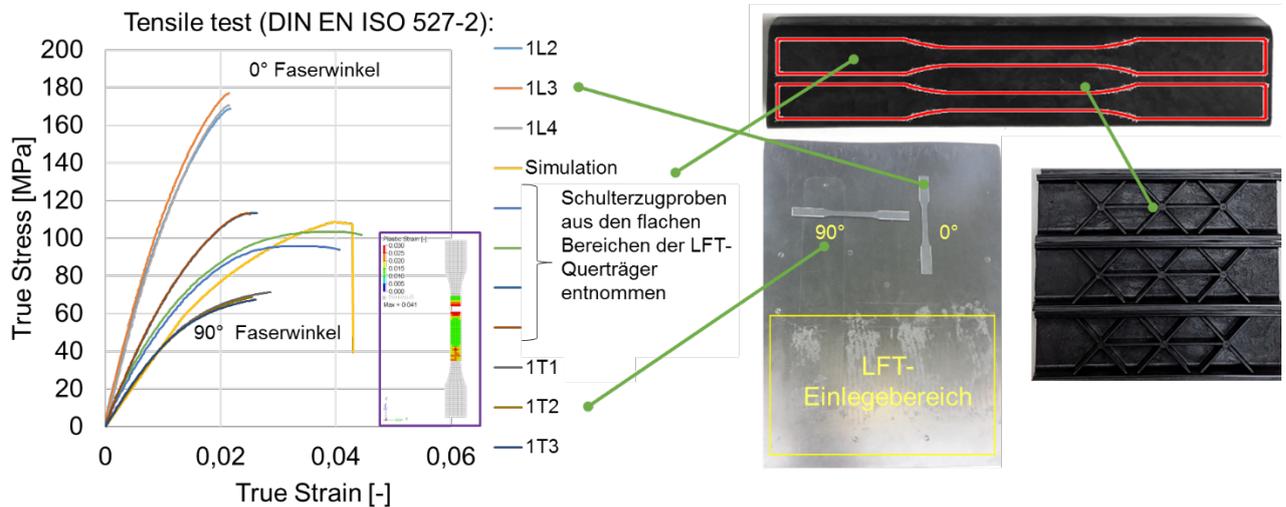


Abbildung 5-25: Kalibrierung des elasto-plastischen Materialmodells LAW36 für PA6 LFT40 anhand gemittelter Zugversuche [29]

Zur Abbildung des spröden Versagensverhalten des LFTs wird das elasto-plastische Materialmodell um ein Johnson-Cook-(JC)-Versagensmodell erweitert. Im allgemeinen JC-Versagensmodell ist eine Versagensdehnung in Abhängigkeit von der Spannungsmehrachsigkeit (Triaxialität), der Dehnrates und der Temperatur definiert (siehe Gleichung 5-2).

Unter der Annahme von isothermen Umgebungsbedingungen und quasi-statischer Last, kann die Versagensdehnung wie in Gleichung 5-3 nur als Funktion der Triaxialität dargestellt werden.

$$\varepsilon_f = [D_1 + D_2 \cdot e^{D_3 \sigma^*}] [1 + D_4 \cdot \ln(\dot{\varepsilon}^*)] [1 + D_5 \cdot T^*] \quad \text{Gleichung 5-2}$$

$$\text{mit } \sigma^* = \frac{\sigma_m}{\sigma_{vm}}$$

$$\varepsilon_f = D_1 + D_2 \cdot e^{D_3 \sigma^*} \quad \text{Gleichung 5-3}$$

Zur Berücksichtigung der Triaxialität werden die drei JC-Versagensparameter  $D_1$ ,  $D_2$  und  $D_3$ , nicht nur unter Verwendung von uniaxialen Zugversuchen kalibriert. Es wird zusätzlich bei der Kalibrierung der Versagensparameter mittels Reverse-Engineering ein Dreipunkt-Biegeversuch eines LFT-Querträgers mit Rippen herangezogen. Während des Dreipunkt-Biegeversuchs liegt in den Versagenszonen ein komplexer Spannungszustand vor, bei dem Zug, Druck und Schub überlagert auftreten (siehe Abbildung 5-26). Wie bei der Simulation des Zugversuchs wird auch hier von einer gemischten Faserorientierung in den Versagensbereichen ausgegangen.

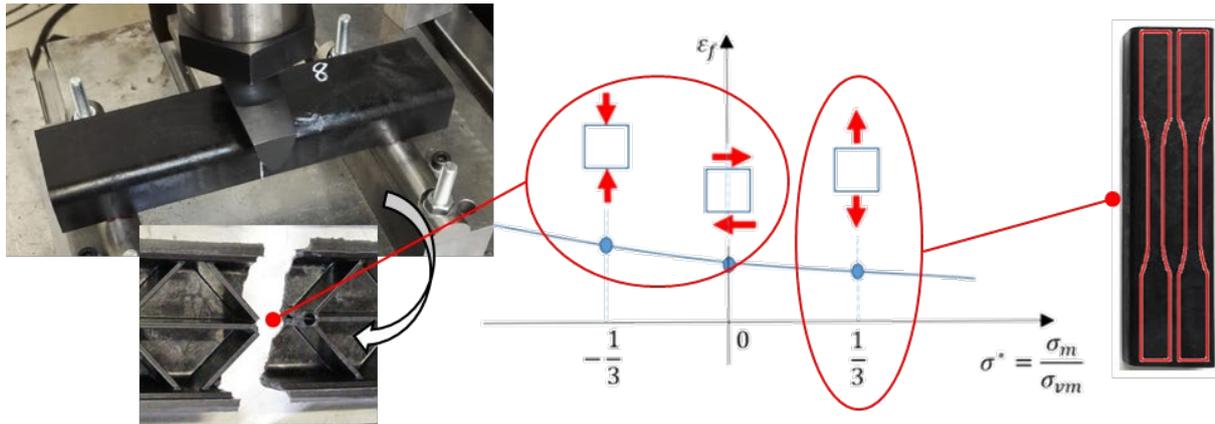


Abbildung 5-26: Kalibrierung der Versagensparameter des JC-Modells für PA6 LFT40 [29]

Der Vergleich zwischen Simulation und den experimentellen Ergebnissen der Dreipunkt-Biegeversuche ist in Abbildung 5-27 dargestellt. Mit dem isotropen Modellierungsansatz können die Dreipunkt-Biegeversuche hinreichend genau abgebildet werden.

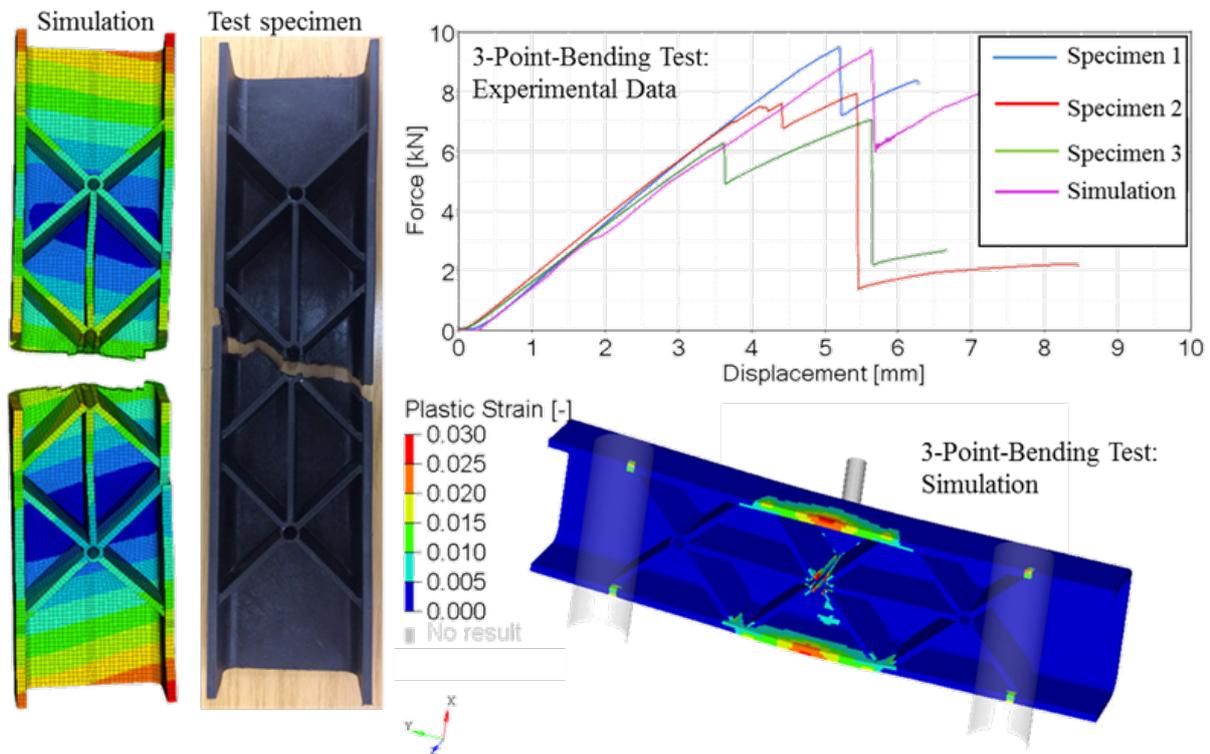


Abbildung 5-27: Simulation des Dreipunkt-Biegeversuchs an PA6 LFT40-Querträgern zur Kalibrierung der Versagensparameter des JC-Modells [29]

**Materialmodellierung Haftvermittler Vestamelt**

Die 0,1 mm dicke Haftvermittlerschicht wird dem Materialmodell für Verbindungstechnik LAW83 in Kombination mit dem phänomenologischen Schädigungs- und Versagensmodell SN-Connect abgebildet. Mit dem Materialmodell kann das Versagen des Haftvermittlers richtungsabhängig berechnet (Schub, Zug) werden. Es besteht zudem die Möglichkeit, temperatur- und dehnratenabhängiges Versagensverhalten zu berücksichtigen. Im Rahmen dieses Projekts wird die Kalibrierung des Materialmodells unter der Annahme von quasi-statischer Belastung unter isothermen Umgebungsbedingungen vorgenommen. Abbildung 5-6 zeigt die Simulation der rich-

tungsabhängigen Materialverhaltens in Kopfzug-, Schub, sowie einer Mischbelastung, welche im Zugscherversuch dargestellt wird.

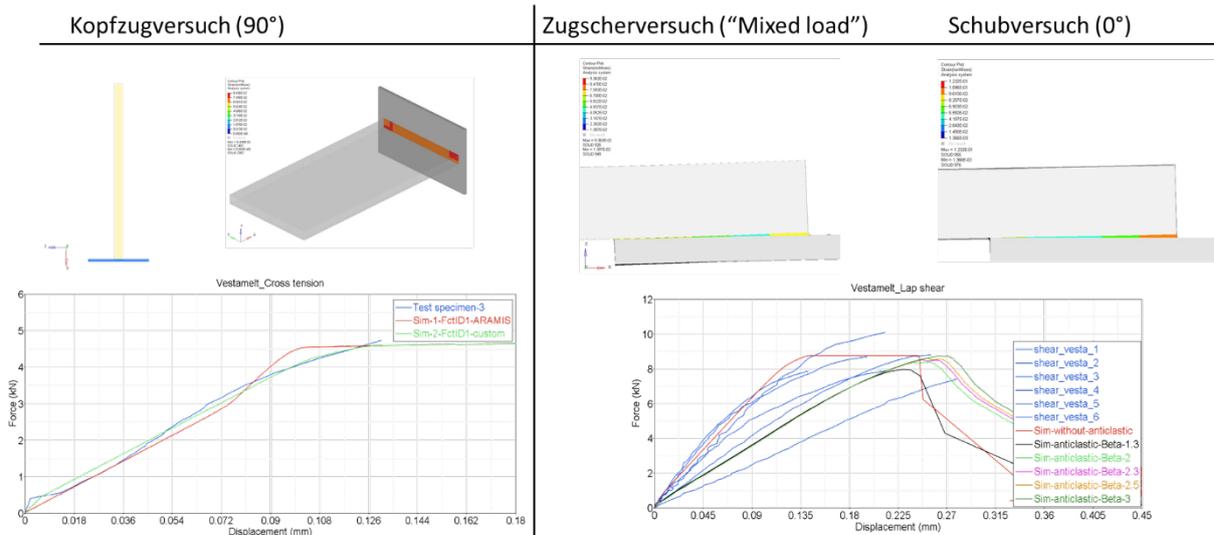


Abbildung 5-28: Kalibrierung Haftvermittler Material- und Versagensmodell mit 3 Lastfällen Schub-, Kopfzug- und Zugscherversuch [29]

Nach Kalibrierung aller Materialmodell wird die Validierung der Methodik zunächst am hybriden generischen Querträger mittels Simulation des Dreipunkt-Biegeversuchs (vgl. Kaptiel 5.1.3) vorgenommen. Abbildung 5-29: Validierung der nichtlinearen isotropen Simulationemethode mithilfe des Dreipunkt-Biegeversuchs von hybriden Stahl-Haftvermittler-LFT Querträgern. Abbildung 5-29 zeigt den Vergleich zwischen Simulation und Versuch. Kraft und Weg werden wie im Versuch auch am als ideal starr angenommen Impaktor gemessen.

Das globale Kraftniveau, Bruchverhalten der LFT-Rippen und sowie der Versagensort des Haftvermittlers stimmen in Versuch und Simulation gut überein.

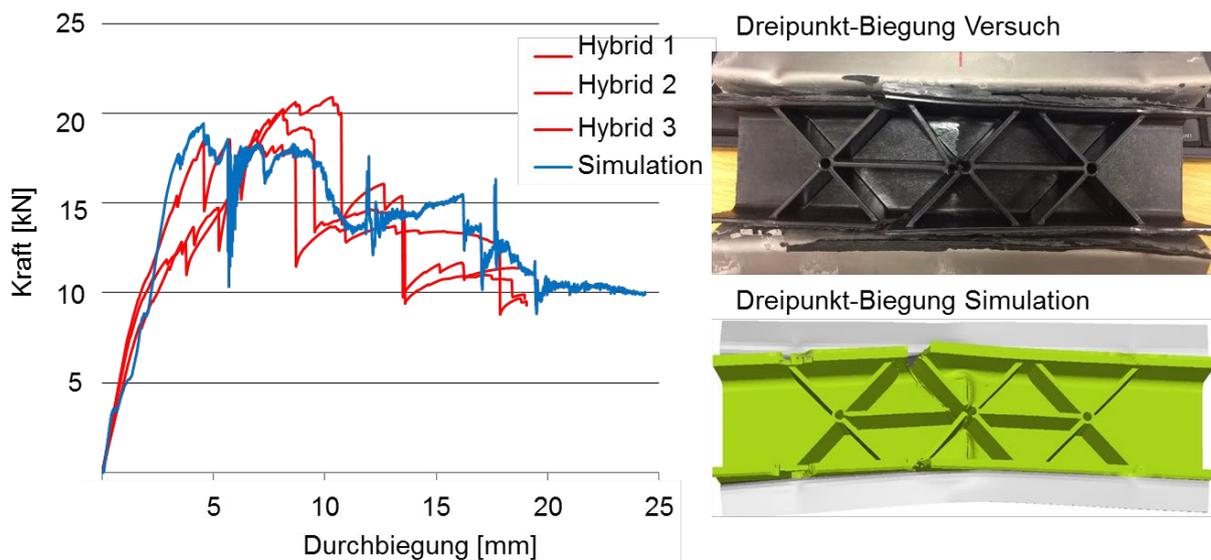


Abbildung 5-29: Validierung der nichtlinearen isotropen Simulationemethode mithilfe des Dreipunkt-Biegeversuchs von hybriden Stahl-Haftvermittler-LFT Querträgern [29]

Die nichtlineare Auslegungsmethodik, welche hier am Beispiel des Dreipunkt-Biegeversuchs validiert wurde, kann verwendet werden, um die vereinfachten linear-statischen Berechnungen mit idealisierter Fügechnik (Kapitel 5.2.1) abzusichern.

Nachfolgend wird am Beispiel des Längslenkers die Anwendung der zuvor vorgestellten und validierten Modellierungsmethode vorgestellt. Dieselbe Modellierung des quasi-statischen Dimensionierungslastfalls, welcher in Abaqus Implizit mit einem Hinterachs-Submodell implementiert wurde (siehe Abbildung 5-24), ist mit Radioss nicht möglich, da es für die dort verwendeten User-Defined-Elements keine Entsprechung in Radioss gibt. Zudem wäre auch die Umsetzung des Längslenker-Dimensionierungslastfalls als Submodell mit im Prüfstand nicht ohne weiteres möglich. Daher wird eine Ersatzlast definiert, welche ein axial auf den Längslenker in Fahrzeuglängsrichtung wirkt.

Abbildung 5-30 zeigt die Spannungen in den Stahl- und LFT-Komponenten des Hybrid-Längslenkers und die Dehnung im Haftvermittler unter uniaxialen Zugbelastung. Die maximale Spannung liegt in der Stahlkomponente unter der nominellen Mindestzugfestigkeit des SZBS800 (Zugfestigkeit 800-930 MPa). Die maximale Spannung im LFT liegt bei ca. 100 MPa und damit ebenfalls unter mittleren Mindestzugfestigkeit, welche mit 120 MPa angegeben wurde.

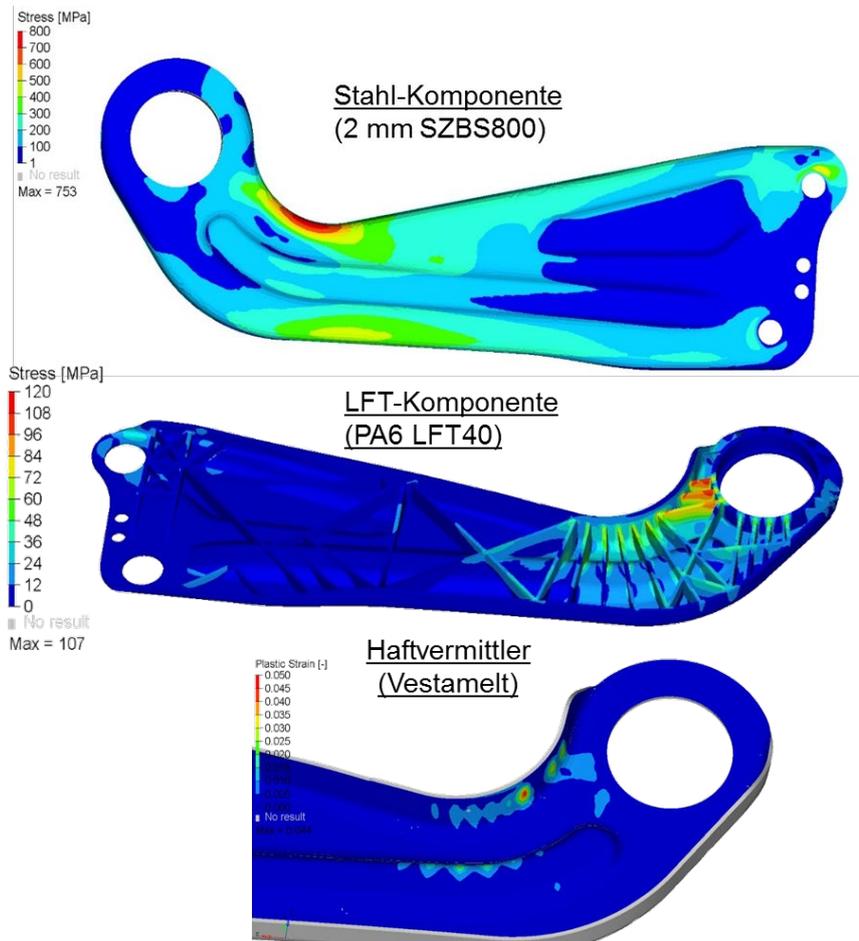


Abbildung 5-30: Nichtlineare Festigkeitsberechnung des hybriden Längslenker unter uniaxialer Ersatzlast

Die Auswertung der plastischen Dehnung zeigt, dass kein Versagen im Haftvermittler auftritt. Die nichtlinearen Berechnungen bestätigen damit prinzipiell die linear-statischen Berechnungen, welche bei der Optimierungsmethode verwendet werden.

## 6 Herstellung der Demonstrator-Bauteile im Hybridpress-Verfahren

Das Verfahren Hybridpressen schließt die Lücke zwischen reinen Kunststoffbauteilen, die bereits in semi-strukturellen flächigen Bauteilen eingesetzt werden, und rein metallischen Strukturbauteilen, die noch Leichtbaupotentiale aufweisen. Dementsprechend soll das Verfahren Hybridpressen grundsätzlich sowohl von Kunststoffbauteil-Hersteller als auch für Blechumformer entwickelt werden. Daher werden im Projekt bei jeweils einem Hersteller von Metall-Strukturbauteilen (voestalpine Automotive Components) und einem Kunststoffbauteil-Hersteller (Weber Fibertech) insgesamt zwei Demonstrator-Bauteile hergestellt, welche im vorherigen Kapitel bereits vorgestellt wurden (siehe Abbildung 5-17).

Beide Bauteile sind umformtechnisch anspruchsvolle Geometrien, welche als Stahlbauteil in mehrstufigen Umform- und Beschnittstufen gefertigt werden. Das Verfahren Hybridpressen ist ein einstufiges Verfahren. Dementsprechend werden die beiden Bauteile so konzipiert und umgestaltet, dass ein einstufiger Umformprozess ohne Zwischenbeschnitt möglich ist. Ein Kragenstellen, welches zum Einpressen von Lagern bei metallischen Lenker genutzt werden kann, muss beim hybriden Lenker anders konzipiert werden. Der Kragen wird ins LFT integriert und über ein Heißeinpressverfahren (siehe Kapitel 6.5) mit einer metallischen Hülse ausgestattet, welche die Lagerkräfte verteilen und einen Wechsel der Gummilager ermöglichen soll.

Der hybride Längslenker wird in der D-LFT Anlage der Fa. Weber Fibertech hergestellt, in der normalerweise reine langfaserverstärkte Kunststoff-Bauteile hergestellt werden. Die Presse ist dabei direkt an den D-LFT Compounder angegliedert.

Der hybride Querlenker wird in einer Serienpresse bei der Fa. voestalpine Automotive Components gefertigt, deren Produktportfolio warm- und kaltumgeformte Karosseriebauteile ohne Kunststoffe beinhaltet. Das für den Prozess notwendige LFT-Extrudat wird als Halbzeug von der Fa. Weber Fibertech bereitgestellt und vor Ort mittels IR-Strahler auf Verarbeitungstemperatur erwärmt, bevor es in die Umformpresse eingelegt wird.

### 6.1 Konzeptionierung und Auslegung Werkzeuge

Die entscheidenden Fragestellungen bei der Werkzeugkonzeption für das Hybridpressen sind die Umsetzung eines Dichtkonzepts und die Gestaltung der Tiefzieh-Anlage, um eine riss- und faltfreie Umformung gewährleisten zu können.

#### 6.1.1 Umsetzung eines Dichtkonzepts für die Demonstrator-Bauteile

Basierend auf den grundlegenden Forschungsergebnissen zur simultanen Blechumformung und Kunststoffumformung an verschiedenen Prinzipgeometrien (Kapitel 4.1) werden mögliche Dichtkonzepte für die Demonstratoren ausgewählt. Der grundsätzliche Werkzeugaufbau der Demonstrator-Werkzeuge bestehend aus Aufspannplatten, Matrize, Stempel und Niederhalter entspricht dem gleichen Aufbau der Werkzeuge für die Prinzipgeometrien. Abbildung 6-1 zeigt beispielhaft den Aufbau des Werkzeugs zur Fertigung des Demonstrator-Bauteils Hybrider Querlenker.

Die im Konsortium gemeinsam erarbeiteten Werkzeugkonzepte werden für das Längslenker-Werkzeug von der Fa. Sprick Technologies und beim Querlenker-Werkzeug im hauseigenen Werkzeugbau der Fa. voestalpine Automotive Components durchgeführt.

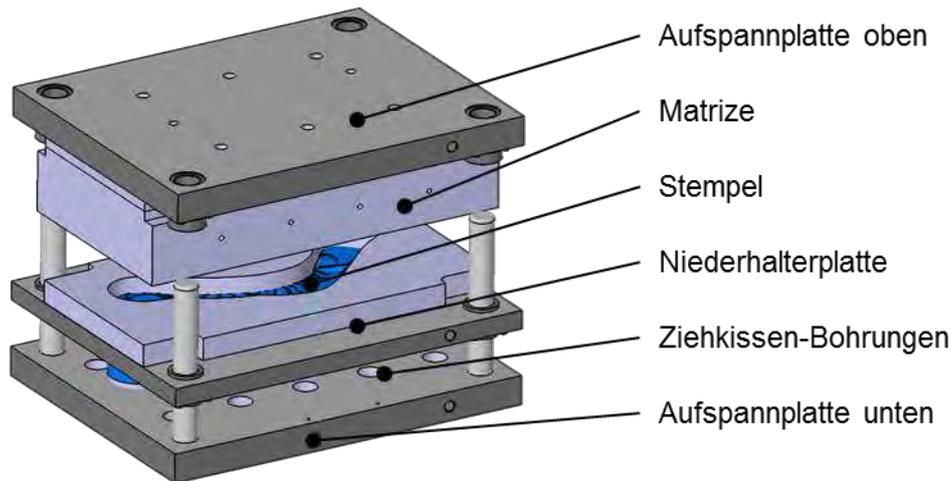


Abbildung 6-1: Aufbau des Querlenker Demonstrator-Werkzeug

Generell verfügen beide Lenker über zwei offene Enden. Bei den Dichtkonzepten für offene Profile wurden jeweils an den Stirnseiten hohe Anforderungen an die Umformbarkeit des Stahlblechs gestellt, sodass für höchstfeste Stähle mit Bruchdehnungen von ca. 10 % ein rissfreies Umformen sehr schwierig wäre. Das Wannenkonzert stellt mit der umlaufenden Dichtkante durch den Blechhalter mit einem einteiligen Stempel das Konzept mit der besten Dichtigkeit und gleichzeitig robustesten Werkzeug- und Umformtechnik. Zudem wurde ausschließlich mit dem Wannenkonzert die Umformbarkeit über den Druck einer Kunststoffschmelze von 2 mm dicken hochfesten Stahlblechen nachgewiesen. Die beiden offenen Enden an den Lenkern müssen dementsprechend zunächst geschlossen werden, was in Abbildung 6-2 dargestellt ist. Zudem wird aufgrund der hohen Blechdicke auf Ziehstücken verzichtet, da sonst hohe Niederhalterkräfte allein zum Formen der Sicken benötigt würden. Generell haben die Grundlagenversuche an den Prinzipgeometrien gezeigt, dass ein Nachfließen des Bleches in jedem Fall gegeben sein sollte.



Abbildung 6-2: Schließen der offenen Enden beim Längslenker- (li.) und Querlenker-Werkzeug (re.) um eine geschlossenen Wanne zu erzeugen

Es wird zudem vorgesehen, dass die Blechhalter, durch welche die Abdichtung gewährleistet wird, in beiden Werkzeugen mit einer über der Zeit variablen Krafteinstellung gesteuert werden können. Es werden getrennte Temperierkreisläufe in Stempel, Kavität und Blechhalter vorgesehen, um eine zusätzliche Stellgröße in der Prozessführung zu bekommen. Im einfachsten Fall werden die Temperierkanäle gekoppelt und isotherm mit 80 °C betrieben. Je nach Dichtigkeit kann beispielsweise der Stempel wärmer temperiert werden, um so durch die Ausdehnung die Spaltmaße zum Blechhalter zu reduzieren und die Dichtigkeit zu verbessern.

### 6.1.2 Gestaltung der Tiefzieh-Anlage zur Blechumformung

Grundsätzlich wird die umformtechnisch bereits optimierte äußere Geometrie der Stahl-Referenzlenker beibehalten. Da jedoch zum einen die Blechdicke reduziert wird und zum anderen das Umformverfahren vom Crash forming (ohne Niederhalter) zu einer niederhalterbasierten Blechumformung wechselt, werden Werkzeug- und Platinengeometrie mithilfe von Umformsimulationen bestimmt. Am Beispiel des Längslenkers wird dies im Folgenden genauer erläutert.

Die Blechumformsimulationen werden bei voestalpine Automotive Components mit der Software PAM-STAMP durchgeführt. Bei der Blechumformung wird von einer starren Umformung über Stempelkontakt ausgegangen. Einflüsse durch die für die Umformung maßgebliche Kunststoffschmelze werden hier nicht berücksichtigt. Zunächst wird die optimale Platinenform iterativ ermittelt (siehe Abbildung 6-3).

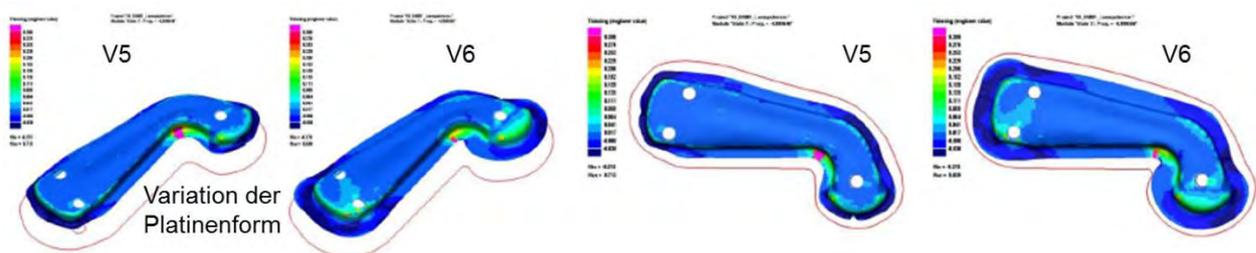


Abbildung 6-3: Bestimmung der Platinenform für den Längslenker mithilfe von Umformsimulationen in PAM-STAMP

Abbildung 6-4 zeigt die Blechumformsimulationen mit PAM-STAMP unter Verwendung der Stahlgüten DP600 und DP800 mit der optimierten Platinenform. Es zeigt sich bei beiden Materialien, dass weitere Variation der Platinenform die höchste Risswahrscheinlichkeit lediglich an eine andere Stelle verschiebt.

Aufgrund der guten Duktilität und der deutlich höheren Bruchdehnung sind die Ergebnisse unter Verwendung eines DP600 deutlich besser als beim hochfesteren DP800. Es wird jedoch davon ausgegangen, dass das Umformen über einen Fluidruck tendenziell blechschonender ist und, dass leichtes Entschärfen der Radien an Stempel und Niederhalter auch bei DP800 für ein rissfreies Umformen sorgen kann. Ein weiterer Einflussfaktor zur Verbesserung der Umformung ist die Optimierung der Reibverhältnisse durch Schmierung. Dementsprechend wird mit dieser Platinengeometrie die Versuchsreihe gestartet, obwohl durch die Blechumformsimulation für höchstfeste Bleche eine Rissbildung nicht ausgeschlossen werden kann.

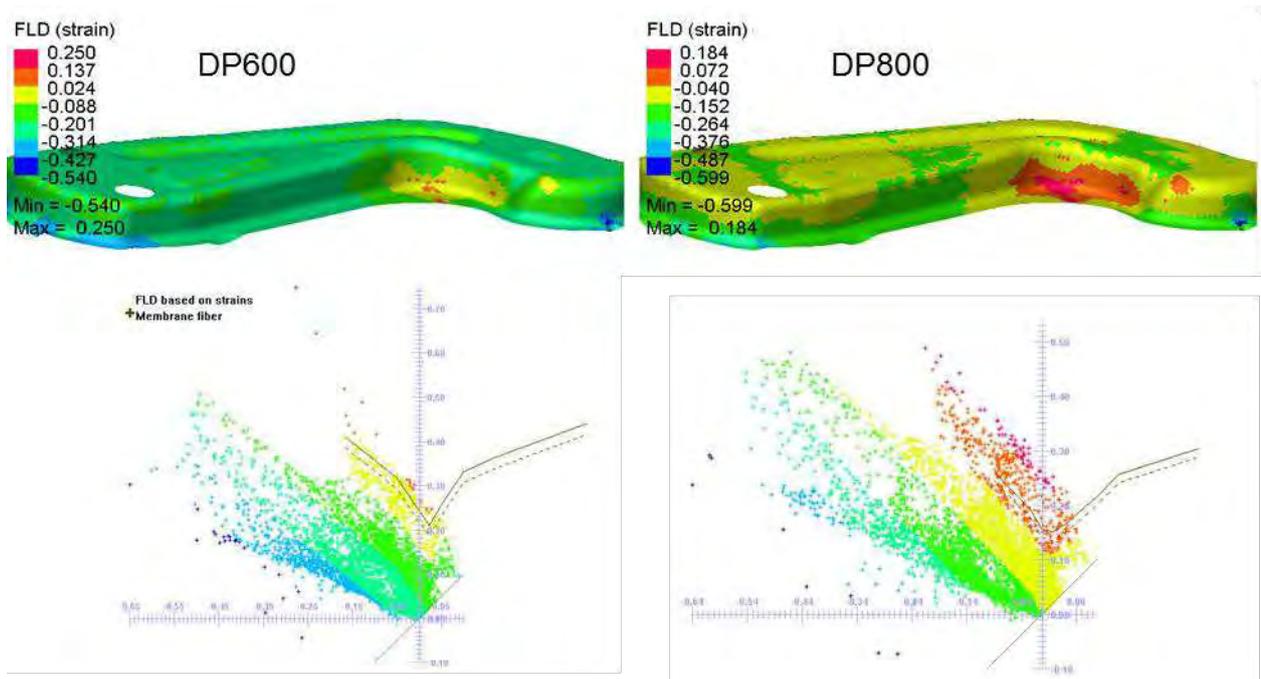


Abbildung 6-4: Umformsimulation mit optimierter Platine und verschiedenen Stahlgüten

## 6.2 Fertigung des Längslenkers bei Weber Fibertech

Die Entwicklung des Hybridpressverfahrens im industriellen Großserienmaßstab wird zunächst am Beispiel des Längslenkers in der Serienfertigungsanlage der Fa. Weber Fibertech demonstriert.

### 6.2.1 Prozessaufbau- und Vorbereitung

Abbildung 6-5 zeigt einen durch eine Flachdüse extrudierten LFT-Strang, welcher im LFT-Direktverfahren in einer Hitze ins Presswerkzeug transferiert wird. Die Pressversuche werden auf einer hydraulischen Oberkolbenpresse mit 36.000 kN maximaler Presskraft des Herstellers Diefenbacher durchgeführt.

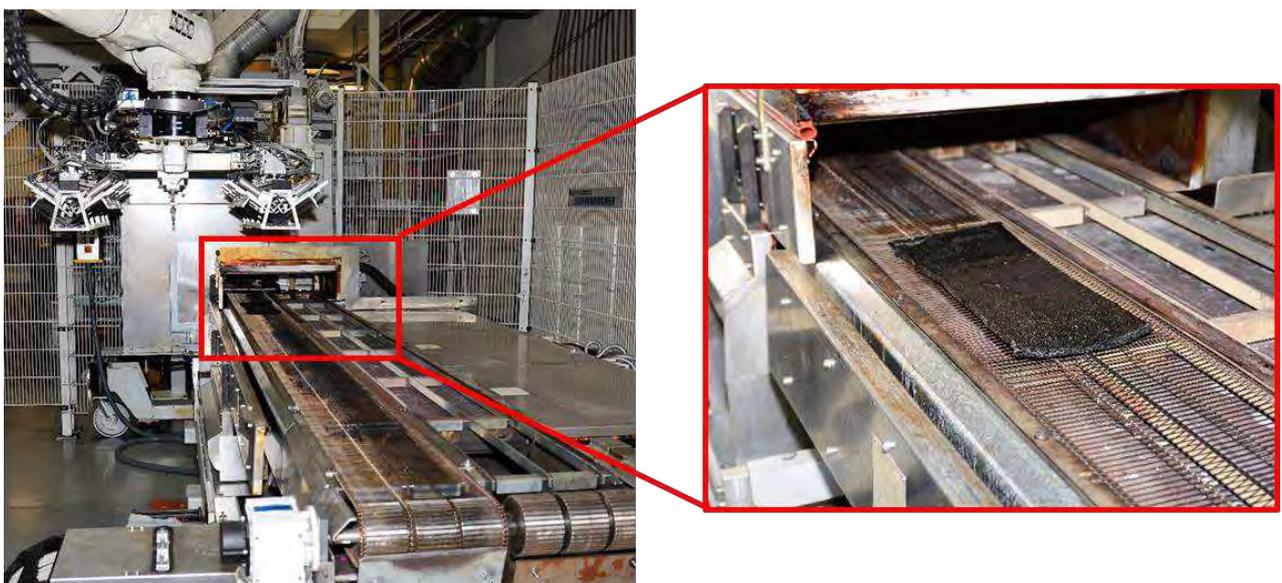
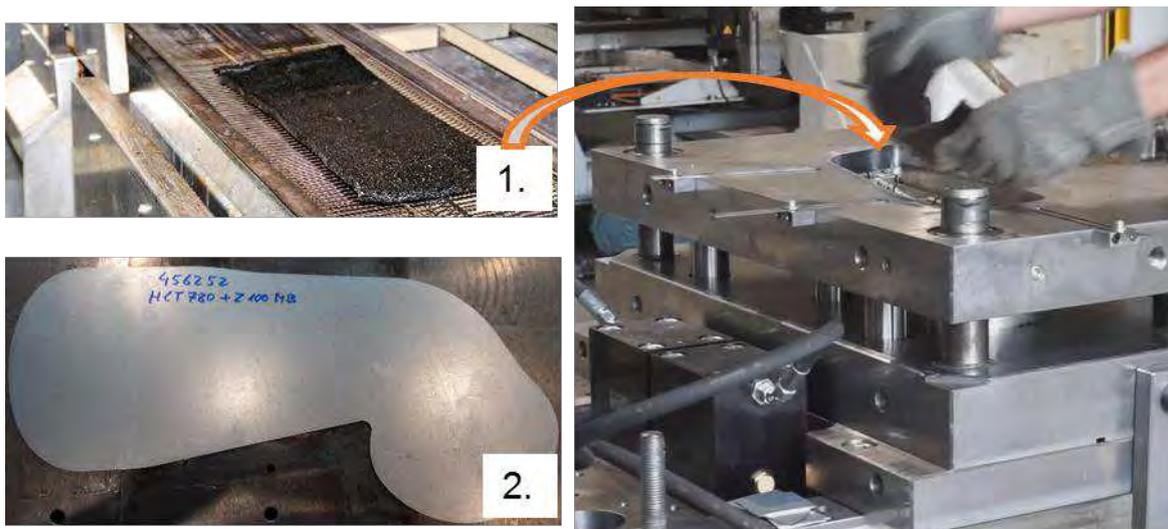


Abbildung 6-5: PA6 LFT40-Extrudat nach Herstellung im Doppelschneckenextruder im D-LFT-Verfahren bei Weber Fibertech

Die einzelnen Schritte beim Hybridpressen unter Verwendung der D-LFT Direktverarbeitung sind in Abbildung 6-6 zusammengefasst. Das LFT wird kontinuierlich vom Extruder bereitgestellt. Währenddessen wird die mit dem Haftvermittler Vestamelt vorbeschichtete Platine in einem Umluftofen so aufgeheizt, dass der Haftvermittler bei Schmelzkontakt im optimalen Prozessfenster zwischen 180°C - 220°C liegt. Der konvektive Wärmeverlust beim Transfer durch die Luft ist aufgrund der großen thermischen Masse der Platine gering. Sobald die Platine Werkzeugkontakt hat, wird der Platine jedoch konduktiv (Wärmeleitung) schneller Wärme entzogen. Daher werden die Platinen immer im oberen Bereich des Haftvermittlerprozessfensters erwärmt. Zuerst wird das LFT in die sich bildende Kavität zwischen Stempel und Niederhalter eingelegt. Die Einlegeposition des LFTs ist ein wichtiger Einflussfaktor bei der Blechumformung. Danach wird die erwärmte Platine gegen die Zentrieranschläge über das LFT eingelegt. Die Presse schließt, sodass der Niederhalter das Blech klemmt und ein umlaufende Dichtkante erzeugt, die ein Austreten des LFTs verhindert. Der Blechhalter wird über ein Hydraulikaggregat so gesteuert, dass variable Niederhalterkräfte eingestellt werden können.

Die Blechhaltekraft wird über eine lineare Rampe so gesteuert, dass Anfangs eine geringe Blechhaltekraft das Nachfließen des Blechs ermöglicht und bei Werkzeug-UT die maximale Blechhaltekraft zum Abdichten wirkt. Es folgt die Nachdruckphase von ca. 30 s, welche je nach gewünschter bzw. sich einstellender Kunststoffdicke auch kürzer ausfallen kann. Danach kann das Bauteil entformt werden.



#### Prozessschritte

- Extrudat PA6 LFT40 bereitstellen
- Extrudat einlegen (im Versuch händisch, industriell mit Nadelgreifern)
- Beschichtete (Haftvermittler Vestamelt) erwärmte Platine einlegen
- Kraftgesteuerter Niederhalter schließt
- Werkzeug schließt (→ „Hybridpressen“)
- Nachdruckphase
- Bauteil entformen

Abbildung 6-6: Einlegen von LFT (1) und Stahl (2) ins Presswerkzeug für den Längslenker, Zusammenfassung der Prozessschritte beim Hybridpressen in D-LFT-Anlage

Die ersten Hybridpressversuche mit dem Längslenkerwerkzeug werden mit unbeschichteten gut umformbaren Tiefziehstählen wie DC03, DC04 und DC05 durchgeführt. Erste Versuche mit hochfesten Platinen führen zu Rissen, welche in den bereits in der Simulation als kritische Bereichen

erkannten Stellen. Daher werden am Werkzeug iterativ geometrische Änderungen im Beschnittbereich des Bauteils durchgeführt, bis eine rissfreie Umformung auch mit höchstfesten Stählen möglich ist.

### **6.2.2 Ermittlung von prozessrelevanten Parametern und Prozessoptimierung**

Wesentliche Prozessparameter beim Hybridpressen wurden bereits in Kapitel 4.1 erläutert. Nachfolgend werden die Einflüsse der Prozessvariablen Presskraft, Niederhalterkraft, Pressgeschwindigkeit, Platine, Kunststoff, Einlegemasse, Schmierung und Haftvermittler analysiert. Feststehende Parameter sind die Werkzeugtemperatur und die Platinentemperatur. Die Werkzeugtemperatur in der Kunststoffverarbeitung ist ein Kompromiss aus Fließfähigkeit des LFTs auf der einen und guter Wärmeabfuhr auf der anderen Seite. Bei PA6 liegt der Erfahrungswert bei ca. 80 °C Werkzeugtemperatur. Es zeigt sich zwar eine klare Tendenz, dass eine möglichst heiße Platine die Umformung begünstigt, da das LFT länger fließfähig ist und somit das Blech formen kann. Die Platinentemperatur ist durch das Prozessfenster des Haftvermittlers jedoch auf maximal 220 °C begrenzt.

#### **Presskraft**

Aufgrund der bezogen auf die Pressengröße relativ geringen Werkzeuggröße ist die maximale Presskraft, um ein unzulässiges Durchbiegen des Pressentischs zu verhindern, auf 4.000 kN beschränkt. Erste Versuche mit unbeschichteten DC04-Blechen werden mit 2.000 kN durchgeführt. Aufgrund der nicht vollständigen Ausformung wird die Presskraft bis 4.000 kN gesteigert, was die Ausformung deutlich verbessert.

#### **Niederhalterkraft**

Die maximale Niederhalterkraft wird solange gesenkt, bis erste Undichtigkeiten auftreten und dann wieder erhöht. So konnte die ideale Rampe mit einem Startwert von 40 kN und einem Endwert bei Werkzeug-UT von 200 kN ermittelt werden.

#### **Pressgeschwindigkeit**

Die Pressgeschwindigkeit wird wie auch die Niederhalterkraft als Funktion über dem Weg eingestellt, wobei die Presse zur Minimierung der Taktzeit erst schnell zu fährt und kurz vor UT langsam bei einer Pressgeschwindigkeit von wenigen mm/s das Blech über den LFT-Druck umformt. Ein zu schnelles Pressen kurz vor UT führt zu Undichtigkeiten. Zu langsames Pressen führt zu frühzeitigem Aushärten des LFTs und zur vorzeitigen Beendigung der Blechumformung.

#### **Stahlgüte der Platine**

Die Ausformung mittels Hybridpressen wird an Platinen verschiedener Stahlgüten getestet. Die beste Ausformung haben die gut umformbaren weichen DC-Stahlgüten, welche jedoch nicht im automobilen Strukturbereich eingesetzt. Bei den höchstfesten Materialgüten kann bis zu DP800 zwar rissfrei umgeformt werden, jedoch kann eine vollständige Ausformung nicht erreicht werden. Da SZBS800 gegenüber DP800 eine nochmal leicht reduzierte Bruchdehnung und höhere Fließgrenze und somit schlechtere Umformbarkeit aufweist, konnten hier ausschließlich rissbehaftete Bauteile gepresst werden. Die Risse liegen jedoch im Beschnittbereich und dichten sich im Verlauf des Prozesses selbst ab, sodass zumindest ein analysierbares Ergebnis erzielt werden kann.

#### **Kunststoff bzw. Matrixwerkstoff**

Im Rahmen des Projekts wurden die Matrixwerkstoffe PP, PA6, P610 und PA12 jeweils mit Glasfasern kombiniert. Grundsätzlich hat die Viskosität der Schmelze einen Einfluss auf Dichtigkeit beim Hybridpressen und auf die Umformbarkeit. Bei niederviskosen Schmelzen, welche nicht nur

durch Materialwechsel, sondern ungewollt auch durch Überhitzen des Kunststoffes erreicht werden können, ist ein negativer Einfluss auf die Dichtigkeit erkennbar. Quantitativ konnte keine bessere Ausformung durch Einsetzen eines fließfähigeren Matrixwerkstoffs beobachtet werden. Mit einem höherwertigen Hochleistungsthermoplast wie PA12 konnten die gleichen guten Verarbeitungseigenschaften erzielt werden wie mit dem Standardmaterial auf PA6 Basis. Durch den Wechsel auf ein höherwertiges Polymer ergeben sich bessere Bauteileigenschaften insbesondere unter Temperatur und Feuchte.

### **LFT-Masse / LFT-Schichtdicke**

Es wird eine 2 mm dicke flächige LFT-Schicht angestrebt, welche unter Annahme eines dichten Werkzeug und einer homogenen vollständigen Ausformung mit einer fixen LFT-Einlegemasse zu erreichen wäre. Es zeigt sich, dass größere LFT-Extrudate zu besserer Ausformung führen, da die LFT-Schmelze erst später aushärtet und währenddessen weitere Fließwege erreichen kann.

### **Schmierung**

Zur Minimierung der Reibung und damit Verbesserung des Blechflusses, sowie zur Schonung der Werkzeugoberflächen wird auf der Außenseite des Bleches ein Schmierstoff eingesetzt. Wichtig ist, dass der Schmierstoff nicht mit dem Haftvermittler in Kontakt kommt, wodurch die Haftung behindert werden würde. Daher wird die wassermischbare Paste Beruform STP 152 der Fa. Bechem verwendet. Bei erhöhter Temperatur verdampft das Wasser und der Schmierstoff bleibt an Blech und Werkzeug haften.

### **Haftvermittler**

Bei den Blechen mit Haftvermittlerbeschichtung konnte ein positiver Einfluss auf das Umformverhalten festgestellt werden, da der Haftvermittler selbst als Schmierstoff zwischen Blechunterseite und Blechhalter fungiert. Das Blech fließt besser nach und die Rissneigung wird minimiert. Das konnte auch zuvor bereits bei der generischen Querträgergeometrie (siehe Kapitel 4.1.4) beobachtet werden.

In Abbildung 6-7 sind die optimierten Prozessparameter zusammengefasst. Die Zykluszeit wird basierend auf einem automatisierten Fertigungsprozess, unter der Berücksichtigung von Handlingzeiten für Stahl und LFT, abgeschätzt. Eine detaillierte Aufstellung der Dauer von einzelnen Prozessschritten ist im Kapitel 6.6 im Rahmen der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der Fertigungstechnik Hybridpressen dargestellt.



#### Optimierte Prozessparameter

- |                                     |           |
|-------------------------------------|-----------|
| ▪ Presskraft:                       | 4000 kN   |
| ▪ Blechhalterkraft (als Rampe):     | 40-200 kN |
| ▪ Blechtemperatur:                  | 220 °C    |
| ▪ Pressgeschwindigkeit kurz vor UT: | 3 mm/s    |
| ▪ Werkzeugtemperatur:               | 80 °C     |
| ▪ Dauer Nachdruckphase:             | 22 s      |
| ▪ Zykluszeit:                       | 49 s      |

Abbildung 6-7: Hybride Längslenker aus 2 mm DP800 bzw. DC04 und PA6 LFT40 vor Beschnitt (oben), optimierte Prozessparameter (unten)

#### **6.2.3 Bewertung der Umformung**

Abbildung 6-8 zeigt den Vergleich zwischen der CAD-Geometrie (Sollgeometrie) des hybriden Längslenkers und den in Abbildung 6-7 oben dargestellten Längslenkerwannen vor Beschnitt (Ist-Geometrie). Bei den weichen Stahlgüten (DC05) zeigt sich eine sehr gute Ausformung (Abweichung Soll- zu Ist-Geometrie < 0,2 mm). Einzig im vorderen Bereich des Lenkers am großen äußeren Radius ist die Ausformung etwas schlechter. Mögliche Gründe für diese lokal schlechtere Ausformung sind die weiteren Fließwege des LFTs in den äußeren Bereichen und die in diesem Bereich notwendige Umformarbeit, welche größer ist als im relativ flachen hinteren Bereich des Lenkers.

Erwartungsgemäß ist die Ausformung des hochfesten DP800-Blechs schlechter als beim DC05-Blech, da mehr Umformarbeit zu leisten ist, um eine plastische Verformung zu erzielen. Alle Radienbereiche sind unzureichend ausgeformt. Geringe Presskräfte im Vergleich zu der bei dieser Werkzeuggröße zu erreichenden Maximalkraft von 4.000 kN führen zu schlechterer Ausformung. Dadurch ist jedoch anzunehmen, dass mit einer höheren Presskraft als 4.000 kN auch bei hochfesten Stahlblechgüten eine bessere Ausformung zu erzielen wäre.

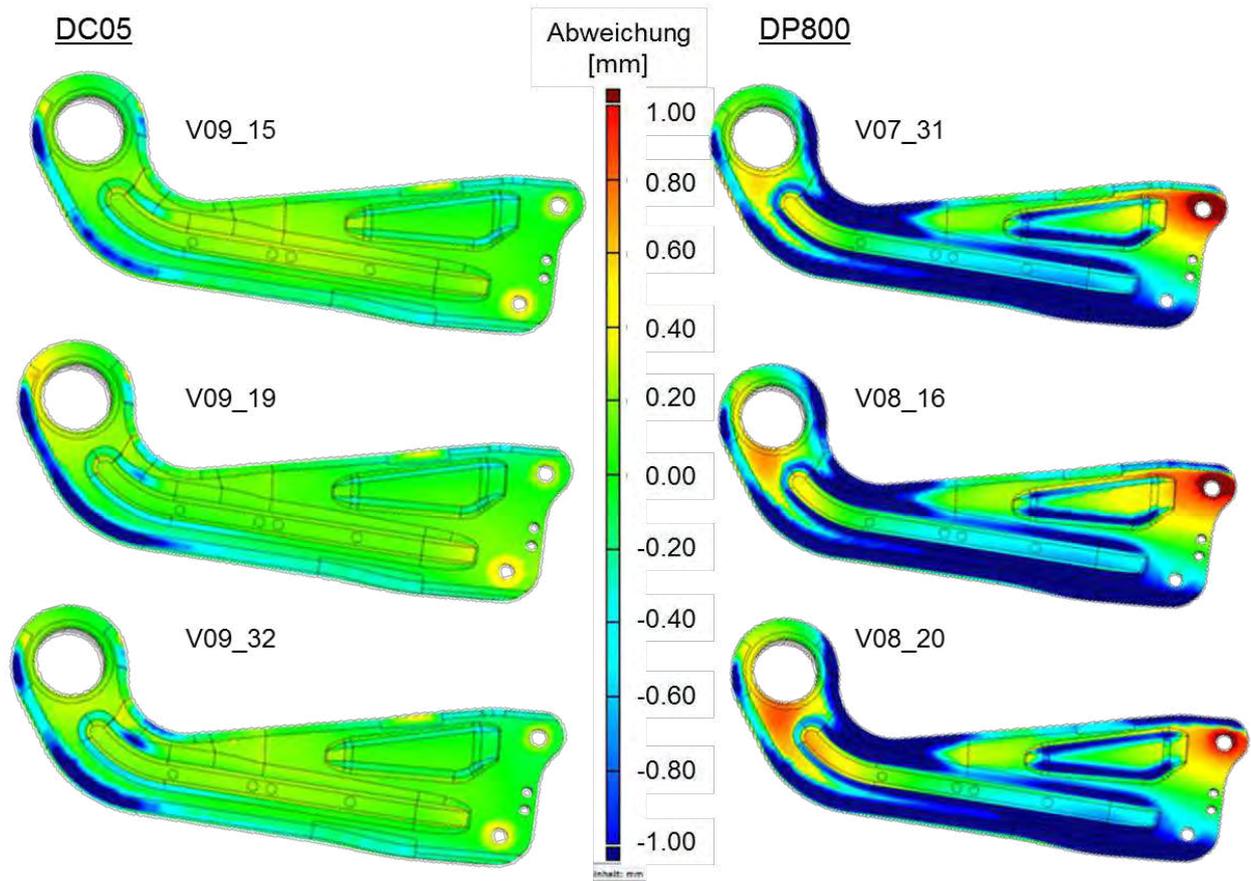


Abbildung 6-8: Vergleich der Längslenker-Sollgeometrie (CAD) und Ist-Geometrie nach dem Pressversuch vor Beschnitt mit den Stahlgüten DC05 und DP800

Die unzureichende Ausformung in den Radienbereichen resultiert aus der inhomogenen LFT-Schichtdicke im Bauteil, sodass nicht überall flächig der gleiche Druck zur Ausformung vorliegt. Ein „Wegschieben“ des Haftvermittlers durch die Wandschubspannungen der LFT-Schmelze ist nicht zu erkennen.



Abbildung 6-9: Schnitt durch einen hybriden Längslenker

### 6.3 Fertigung des Querlenkers bei voestalpine Automotive Components

Die Entwicklung des Hybridpressverfahrens ohne D-LFT-Anlage zur Aufbereitung von LFT wird am Beispiel des hybriden Querlenkers in einer Serienfertigungsanlage der Fa. voestalpine Automotive Components durchgeführt.

#### 6.3.1 Prozessaufbau und Vorbereitung

Abbildung 6-10 zeigt das Werkzeug zur Fertigung des hybriden Querlenker in einer Presse zur Serienfertigung von Metallbauteilen. Das Werkzeug-Konzept ist bereits in Kapitel 6.1 ausführlich beschrieben. Das Werkzeug ist größer als das Längslenkerwerkzeug, wodurch mit der Presse maximale Presskräfte von 10.000 kN aufgebracht werden können

Es wird ein halbzeugbasierter Prozess zur Bereitstellung des LFTs aufgebaut. Dabei werden 10 mm dünne flache LFT-Extrudate, welche von Weber Fibertech compoundiert wurden, mit einem Infrarotstrahler innerhalb weniger Minuten auf Verarbeitungstemperatur von 280 °C aufgeheizt. Die Werkzeugtemperatur wird über Heizpatronen auf 80 °C eingestellt. Die Blechhalterkraft wird über ein in der Presse integriertes Ziehkissen gesteuert. Die Platinen werden in einem nebenstehenden Glüh- und Härteofen über natürliche Konvektion vorgewärmt.



Abbildung 6-10: Werkzeug zur Fertigung des hybriden Querlenkers bei Inbetriebnahme

Wie bereits in Kapitel 6.2.2 erläutert wird auch hier nach der Inbetriebnahme und leichten Werkzeuganpassungen eine Prozessoptimierung durchgeführt.

#### 6.3.2 Ermittlung optimaler Prozessparameter

Aus den bisherigen umfassenden Versuchen ist bereits bekannt, dass der Umformgrad stark mit der Presskraft korreliert. Die benötigte Umformkraft ist aufgrund der Bauteilgröße und der nominellen Blechdicke von 2,4 mm größer als beim zuvor vorgestellten Längslenker. Im Rahmen der Pressversuche für den Querlenker werden die Stahlgüten DC04 und 22MnB5 aus dem Portfolio der Fa. voestalpine eingesetzt.



#### Optimierte Prozessparameter

▪ Presskraft:	10.000 kN
▪ Max. Blechhalterkraft:	250 kN
▪ Blechtemperatur:	220 °C
▪ Pressgeschwindigkeit kurz vor UT:	3 mm/s
▪ Werkzeugtemperatur:	80 °C

Abbildung 6-11: Hybrid Querlenker mit 2,4 mm 22MnB5 und PA6 LFT40 vor Beschnitt (oben), optimierte Prozessparameter (unten)

### 6.3.3 Bewertung der Umformung

Zur Bewertung der Dehnung und der Ausformung werden die Platinen vor der Umformung durch ein Ätzverfahren mit einem regelmäßigen Punktmuster versehen. Abbildung 6-12 zeigt die auf Basis des geätzten Punktmusters mit dem optischen Messsystem Argus der Fa. GOM ermittelte Geometrie der gepressten Querlenker im Vergleich zur CAD-Sollgeometrie.

Wie bei den Auswertungen der Umformungen beim Längslenker, wird auch beim Querlenker unter Verwendung der niederfesten Stähle (DC04) eine gute Ausformung in allen flächigen Bereichen des Bauteils erzielt. Auch hier zeigt sich, dass eine vollständige Ausformung bei längeren Fließwegen der Schmelze und bei höheren Umformgraden in den äußeren Radienbereichen nicht erreicht wird. Noch deutlicher wird dies bei der Betrachtung des härtesten 22MnB5-Querlenkers. In den Radienbereichen wird eine maximale Abweichung von Ist- zur Sollgeometrie von 2,5 mm gemessen.

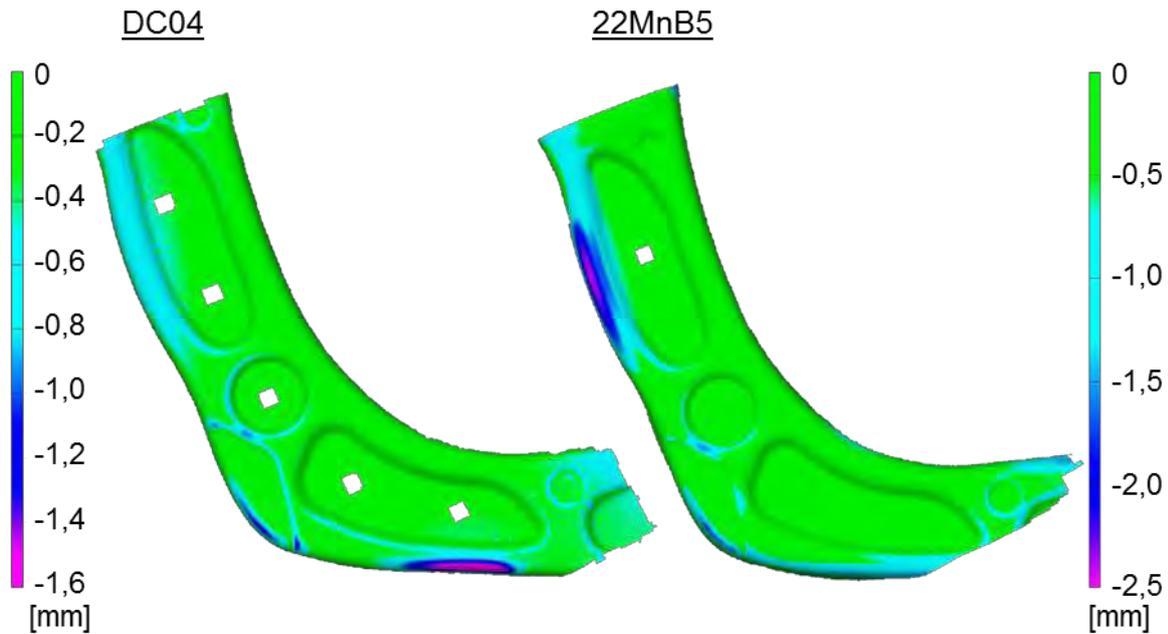


Abbildung 6-12: Vergleich der Querlenker-Sollgeometrie (CAD) und Ist-Geometrie nach dem Pressversuch vor Beschnitt mit den Stahlgüten DC04 und 22MnB5

Aus den Schnitten durch den hybriden Querlenker an drei verschiedenen Stellen wird die ungleichmäßige LFT-Schichtdicke ersichtlich (Abbildung 6-13). Im Radienbereich im Schnitt A-A (blauer Kreis) zeigt sich, dass lokal nur ein sehr dünner LFT-Film vorliegt und somit keine vollständige Ausformung erreicht werden kann. Wie bei der Analyse der Ausformung des Längslenkers (siehe Abbildung 6-8) zeigt sich auch beim Querlenker, dass nach längeren Fließwegen des LFTs die Ausformung schlechter ist. Die Positionierung des LFT-Plastifikats hat somit einen Einfluss auf das Umformergebnis. Eine möglichst großflächig eingelegtes endkonturnahes LFT-Plastifikat könnte die Ausformung verbessern.

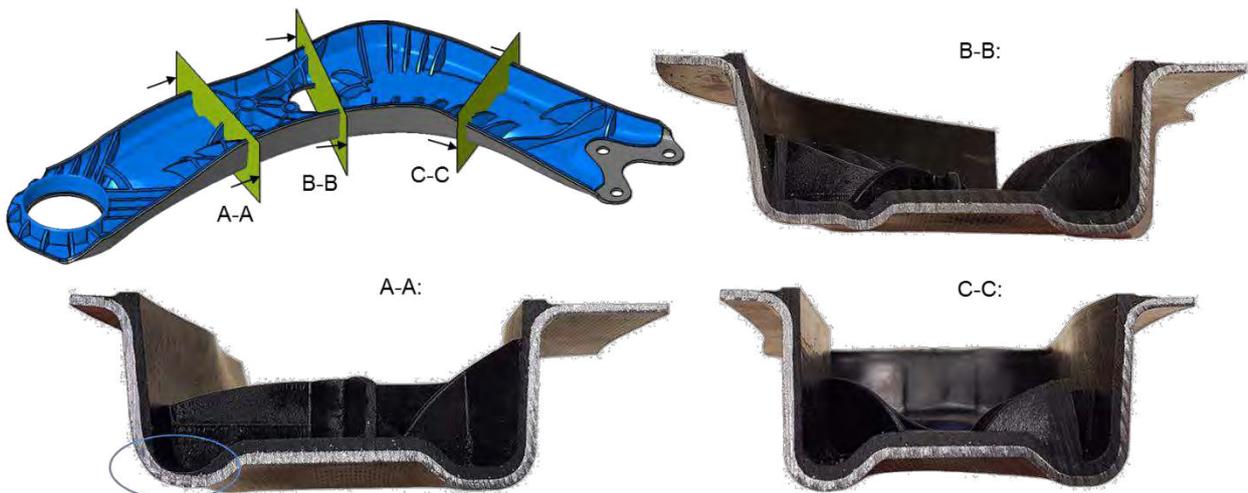


Abbildung 6-13: Analyse der Ausformung mittels Schnittdarstellung im hybriden Querlenker (PA6 LFT40 und 2,4 mm DC04)

#### 6.4 Beschnittversuche an hybriden Stahl-LFT-Lenkern

Bei der Fa. voestalpine durchgeführte Stanzversuche an hybriden Stahl-LFT-Werkstoffverbänden durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass der Werkstoffverbund trotz der Sprödigkeit des LFTs prinzipiell mit mechanischen Werkzeugen zu beschneiden ist.

Bei komplexen Bauteilgeometrien wie bei den vorliegenden Demonstrator-Bauteilen wäre ein mechanisches Schneidwerkzeug nur mit teuren Schiebern im Werkzeug realisierbar, da die Bauteile sowohl in Z-Richtung als auch in der XY-Ebene geschnitten werden müssen. Daher wird die Geometrie mittels CNC-gesteuertem 3D-Wasserstrahl beschnitten.

Die Wasserstrahl-Beschnittversuche werden in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer Institut für Produktionstechnik (IPT) in Aachen im Rahmen des zeitgleich laufenden öffentlichen Forschungsprojekts *HydroMill* durchgeführt. Neben den Beschnittversuchen an Verbundwerkstoffen mit komplexen Konturen wird auch das partielle Abrasivstrahlen untersucht, um lokal Kunststoffe von Metall abzutragen oder Oberflächen zu funktionalisieren. Dazu können Abrasivmedien wie z.B. Sand im Wasserstrahl eingesetzt werden. Mit dem Abrasivstrahl können beispielsweise die Sitze von Schraubenköpfen am Querlenker kunststofffrei gestrahlt werden, da somit ein mögliches Relaxieren des Kunststoffes unter der Schraubenvorspannkraft ausgeschlossen werden kann.

Im Projekt MultiForm liegt jedoch zunächst der Fokus auf dem Beschnitt der Hybridlenker, welcher in Abbildung 6-14 dargestellt ist. Es werden Vorschubgeschwindigkeiten von ca. 1 m/min mit einem Strahldurchmesser von 0,54 mm bei gleichzeitig sehr hoher Präzision erzielt.

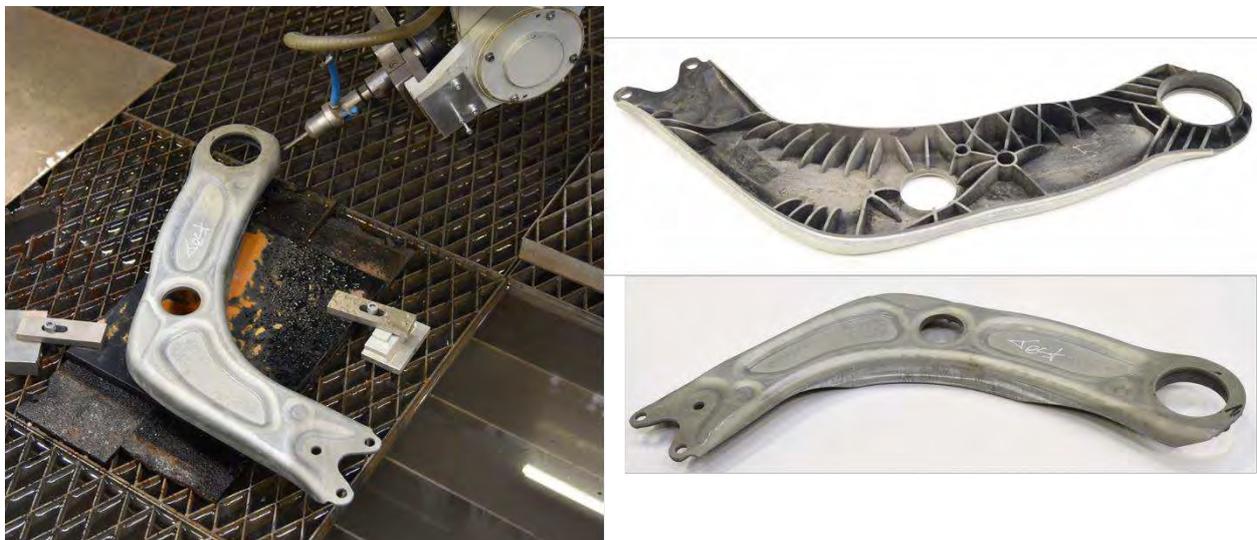


Abbildung 6-14: Beschnitt des hybriden Querlenkers (2,4 mm 22MnB5 und PA6 LFT40) mittels Wasserstrahl schneiden beim Fraunhofer IPT (Aachen)

#### 6.5 Herstellung und Heißeinpressen von Metall-Hülsen in LFT-Kragen

Nach Beschnitt der beiden Lenker werden im letzten Schritt Metallhülsen hergestellt und über ein Heißeinpressverfahren in den Kunststoffkragen der Lenker eingepresst. In die Metallhülsen wiederum werden Gummilager Quer- und Längslenker eingepresst. Ein direktes Einpressen der Gummilager könnten zum Relaxieren des Kunststoffes führen und sodass Kräfte und Momente ggf. nicht über die volle Lebensdauer des Bauteils übertragen werden könnten.

Die Metallhülsen werden zunächst mithilfe einer Drehbank konisch gedreht, damit die Hülsen beim Einpressen zentriert werden können. Nachfolgend wird ebenfalls drehtechnisch eine Kreuzrändelung und umlaufenden tangentialen Nuten auf die Außenseite der konischen Hülse eingebracht.

Zum Heißeinpressen der Hülsen in den Kunststoffkragen der Lenker wird die Hülse auf 350 °C erhitzt und über einen Stößel in den Kragen gedrückt. Infolge des Wärmeeintrags schmilzt der Thermoplast lokal auf und formt eine mikroformschlüssige Verbindung zur gerändelten Metallhülse.



Abbildung 6-15: Gerändelte Metallhülse (li.), Verbindung aus mikroformschlüssig gefügter Metallhülse und eingepresstem Gummilager

Die Mindestanforderung an die durch den Mikroformschluss erzielten Verbindungsfestigkeit zwischen Hülse und Kunststoffkragen wird durch die geforderten Mindestauspresskräfte der Gummilager definiert. Abbildung 6-16 zeigt die Auspresskräfte entgegen dem Konus (negative Z-Richtung), welches die kritische bzw. leichter auspressbare der beiden axialen Belastungsrichtungen darstellt.

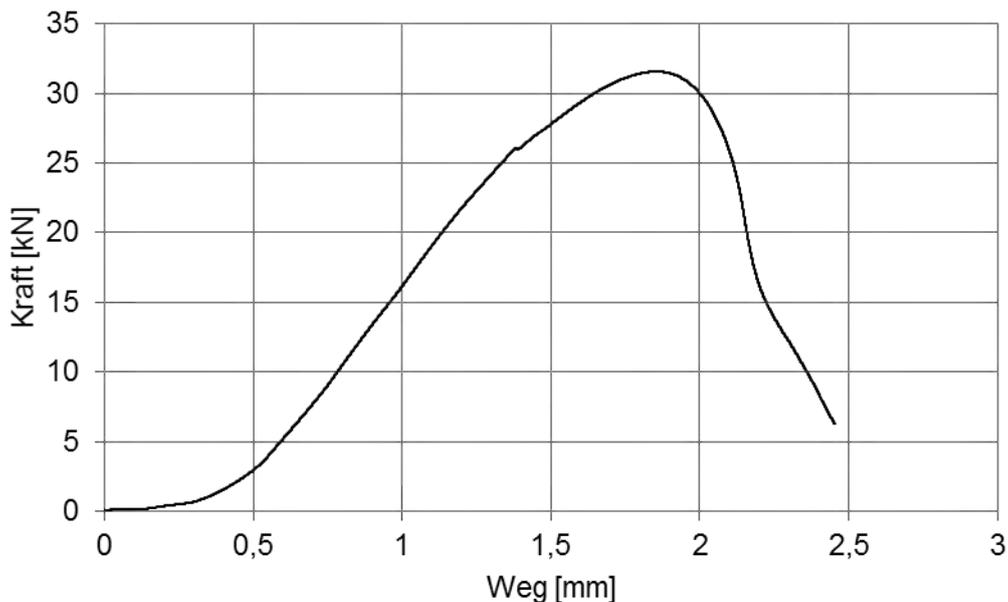


Abbildung 6-16: Prüfung der über Mikroformschluss erzielten Verbindungsfestigkeit zwischen gerändelter Hülse und Kunststoffkragen mittels Auspressversuch

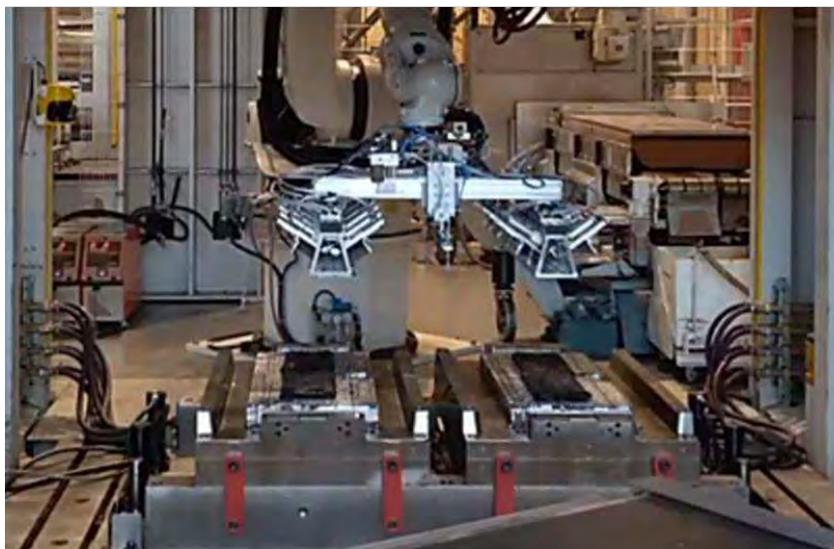
Es können Auspresskräfte von über 30 kN erzielt werden, was über eine Zehnerpotenz über der geforderten Mindestauspresskraft von Gummilagern in Lenkern gemäß OEM-Spezifikation entspricht. Zukünftig wäre es anzustreben, die Hülsen direkt in den Pressprozess zu integrieren, um somit diesen zusätzlichen Fertigungsschritt einsparen zu können.

## 6.6 Taktzeiten und Wirtschaftlichkeit des Verfahrens Hybridpressen

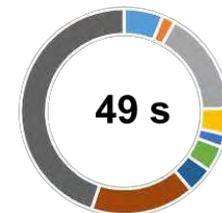
Zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit des Fertigungsverfahrens sind neben der Bilanzierung von Rohstoffpreisen insbesondere die mit dem Verfahren erzielbaren Taktzeiten von entscheidender Bedeutung.

Abbildung 6-17 zeigt eine Taktzeitabschätzung des Verfahrens Hybridpressen bei zweifachfallender Bauteilfertigung. Ein Takt zur Doppelteilmontage addiert sich dabei unter Berücksichtigung der Einzelaktionen *Presse öffnen, Bauteil auswerfen und entnehmen, Roboterbewegung, Beschicken, Presse schließen und Zuhalten* zu einer Gesamtzeit von 49 s. Ein Großteil der Taktzeit wird durch die Zuhaltezeit der Presse bestimmt. Die Prozesszeiten liegen in der Größenordnung eines konventionellen Fließpressprozesses ohne gleichzeitige Metallumformung. Es ergibt sich eine Taktzeit von ca. 25 s pro Bauteil, womit eine Großserienfertigung (>100.000 Bauteile/Jahr) realisierbar wäre.

Aufgrund der Pressengröße bei Weber Fibertech wäre auch für das Bauteil Längslenker auch eine vierfachfallende Fertigung denkbar. Ein großer prozesstechnischer Vorteil der mehrfach fallenden Fertigung für das Hybridpressen liegt in den größeren Erzielbaren Umformkräften, da die Presse bei entsprechender Werkzeuggröße mit maximaler Kraft fahren kann, sodass die notwendigen höheren Umformkräfte erreicht werden können.



Taktzeit Hybridpressen  
(zweifachfallende Fertigung)



- Presse öffnen 3s
- Bauteil auswerfen 1s
- Bauteil entnehmen 8s
- Beschickroboter einfahren 2s
- Beschicken 1 1s
- Beschicken 2 2s
- Beschickroboter ausfahren 2s
- Presse schließen 8s
- Zuhaltezeit 22s

Abbildung 6-17: Taktzeitabschätzung für das Hybridpressen unter Ausnutzung einer D-LFT Anlage und zweifachfallender Fertigung

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

### 7.1 Zusammenfassung

Lastgerecht ausgelegte Hybridbauteile aus Metallen und faserverstärkten Kunststoffen weisen ein hohes Leichtbaupotential auf und können einen wichtigen Beitrag zur Erhöhung der Ressourceneffizienz und somit zum Klimaschutz beitragen. Bisher stehen jedoch u.a. hohe Produktionskosten und ineffiziente Fertigungsprozesse einer breiten Anwendung von Hybridbauteilen im Fahrzeugbau im Wege. Daher wurde im Forschungsprojekt „MultiForm“ das neuartige Fertigungsverfahren Hybridpressen, welches einen kombinierten und simultanen Umformprozess für Stahlbleche und langfaserverstärkte Thermoplaste zur wirtschaftlichen Herstellung von Hybridbauteilen darstellt, erforscht. Verfahrensentwicklung und -grenzen konnten bereits im Labormaßstab mit einfachen Prinzipgeometrien am Lehrstuhl für Fahrzeugleichtbau der Universität Siegen aufgezeigt werden. Das Verfahren konnte danach am Beispiel von zwei Fahrwerksbauteilen auch in den Serienfertigungsanlagen der Firmen voestalpine Automotive Components und Weber Fibertech erfolgreich demonstriert werden, wobei Sprick Technologies bei Werkzeugbau und -konzeption einen entscheidenden Beitrag leistete.

Bei den Demonstratorbauteilen wurden hochfeste Stahlblechen (DP800) mit Blechdicken bis 2,4 mm über den Druck einer thermoplastischen langglasfaserverstärkten Kunststoffschmelze umgeformt. Der finale Bauteilbeschnitt wurde mittels 3D-Wasserstrahlschneiden durchgeführt. Beschnittversuche an Stahl-LFT-Strukturen zeigten auch Möglichkeiten des Beschnitts in mechanischen Werkzeugen auf, was jedoch bei Prototypen oder Kleinserien zu hohen Werkzeugkosten führen kann. Bei beiden Bauteilen konnten Gewichtsreduktionen von bis zu 20 % erreicht werden. Die dabei erzielten Taktzeiten zeigen, dass das Verfahren Hybridpressen grundsätzlich für eine automobiler Großserienfertigung einsetzbar ist.

Neben Prozessentwicklung wurde eine FEM-basierte Auslegungsmethodik für Metall-LFT-Hybridbauteile entwickelt. Dabei wurden zunächst unter Berücksichtigung des Bauraums eine topologische Optimierung des Hybridbauteils vorgenommen. Ziel der Optimierung ist es, eine Kunststoffverstärkungsstruktur zu berechnen, welche die Stahl-Komponente des Hybridbauteils versteift und somit die durch Blechdickenreduktion verminderte Steifigkeit und Festigkeit wieder kompensiert. Nachgeschaltete nichtlineare FEM-Berechnung unter Berücksichtigung des möglichen Versagens der Haftvermittlerschicht oder der Kunststoffverstärkungen können die linearstatischen Optimierungsrechnungen absichern.

Betriebsfestigkeitsnachweise wurden am Beispiel generischer Stahl-LFT-Trägerstrukturen durchgeführt. Dabei konnte im Rahmen von zerstörenden Dauerlaufprüfungen ein positives Fail-Safe-Verhalten des Hybridstruktur festgestellt werden.

Die Qualität der Umformung bzw. Ausformung der Hybridbauteile wurde über Scans der finalen Geometrie und Abgleich mit CAD oder über die optische Auswertung von Punktrastern zur Ermittlung lokaler Dehnungen überprüft. Es zeigt sich, dass gerade bei den hochfesten Stählen ein hoher Pressdruck zur Ausformung der Bauteile notwendig ist, während bei niederfesten Stählen (z.B. DC04) bereits eine sehr gute Ausformung erreicht werden konnte.

## 7.2 Ausblick

In gegenwärtig laufenden und zukünftigen Untersuchungen wird die Betriebsfestigkeit von Stahl-LFT-Hybridlenkern weiter untersucht. Ziel ist es, die Bauteilfestigkeit auch unter realistischen Betriebs- und Umweltbedingungen nachweisen zu können. In weiteren Versuchen werden auch Miss-Use Lastfälle betrachtet.

Insbesondere die durchgeführten Dreipunkt-Biegeversuche an einer generischen Stahl-LFT-Querträgerstruktur zeigen das hohe Potential mittels Hybridpressen hergestellter Strukturen für die Karosserie und im Besonderen für crashbelastete Bauteile. Die hohe Energieabsorption der Metall-LFT-Mischbauweise kann hier einen wichtigen Beitrag zur Erhöhung der passiven Sicherheit leisten. Im Zuge dessen wird in derzeit laufenden weiteren Forschungsprojekten die Umformbarkeit von Aluminiumlegierungen mit LFT untersucht.

Neben den Untersuchungen zur Umformung von alternativen Werkstoffen stehen in aktuellen Forschungsprojekten auch andere thermoplastische Kunststoffe zur Umformung von Metallblechen im Fokus.

## 8 Literaturverzeichnis

- [1] H. Schürmann: Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden, 2. Auflage, Springer-Verlag, Heidelberg 2007
- [2] E. Buerkle, M. Sieverding, J. Mitzler: „Spritzgießverarbeitung von langfaserverstärktem PP“, In: Kunststoffe 3/2003, S. 47-50, Carl Hanser Verlag, München 2003
- [3] G. Ehrenstein (Hrsg.): Handbuch Kunststoff-Verbindungstechnik, Carl Hanser Verlag, München 2004
- [4] B. Koch, G. Knözinger, T. Pleschke, H. J. Wolf: „Hybrid-Frontend als Strukturbauteil“, In: Kunststoffe 89/3, Carl Hanser Verlag, München 1999
- [5] C. Hopmann, J. v. Haag, J. Schild, P. Brandt: HYLIGHT – Entwicklung einer neuartigen Hybridleichtbautechnologie für die Automobilindustrie, Abschlussbericht, Förderkennzeichen 03X3030G, Aachen 2014
- [6] D. Drummer (Hrsg.): Handbuch Kunststoff-Metall-Hybridtechnik, Lehrstuhl für Kunststofftechnik, Erlangen 2015
- [7] S. Y. Yang, S. H. Parng: “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
- [8] A. Al-Sheyyab, G. W. Ehrenstein: „Leichtmetall-Kunststoff-Hybride umformen und verbinden“, In: Blech InForm, Band 05, S.119-122, Hanser Verlag, München 2006
- [9] B. Rauscher: Formschlüssig verbundene Metall-Kunststoff-Hybridbauteile durch Integration von Blechumformung und Spritzgießen, Dissertation, TU Dortmund, Shaker Verlag, Aachen 2011
- [10] 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
- [11] R. Wehmeyer: Herstellung von Kunststoff/Metall-Bauteilen mit integrierter Umformung im Spritzgießprozess, Dissertation, RWTH Aachen, Verlagsgruppe Mainz, Aachen 2012
- [12] J. Schild: Verfahrensentwicklung zur integrierten Herstellung von Kunststoff/Metall-Strukturbauteilen im Spritzgießverfahren, Dissertation, RWTH Aachen, Verlagsgruppe Mainz, Aachen 2017
- [13] J. Vittinghoff, D. Drummer: „Im Spritzguss stoffschlüssig verbunden“, In: Adhäsion Kleben & Dichten 7-8/2012, S. 41-46, Springer Vieweg, Wiesbaden 2012
- [14] 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
- [15] 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
- [16] 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

- 
- [17] 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
- [18] P. Kellner: Zur systematischen Bewertung integrativer Leichtbau-Strukturkonzepte für biegebelastete Crashträger, Dissertation, TU Dresden, Cuvillier Verlag, Göttingen 2013
- [19] 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
- [20] Universität Siegen: Hybridpressen, Erfinder: X. Fang, 09.10.2014, DE, Patentschrift DE102014004359A1
- [21] 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
- [22] C. Drebenstedt, C. Zopp, A. Hackert, L. Kroll: „Querlenker aus Hybrid-Aluminium-schaum-Sandwich“, In: *Lightweight.Design* 2/2018, S.44-48, Springer Fachmedien, Wiesbaden 2018
- [23] 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
- [24] N.N.: Die Zwillinge unter den Polyamiden – Eigenschaftsvergleich PA 6 und PA 66, Technische Information Semi-Crystalline Products, Lanxess Deutschland GmbH, 2009
- [25] X. Fang, T. Kloska: "Hybridforming – a Combined Deep Drawing and Compression Molding Process for Forming Metal Sheets with Thermoplastics (LFT) to Hybrid Parts", In: *Automotive Engineering Congress*, Nürnberg, 2017
- [26] X. 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
- [27] T. Kloska, D. Heidrich, X. Fang: „MultiForm: Ein innovatives Fertigungsverfahren für Hybridbauteile durch simultane Umformung von Langfaser-Thermoplasten (LFT) und Metallblechen“, *2. Siegener Leichtbau-Kolloquium*, 16.-17. Oktober 2018
- [28] T. Kloska: Leichtbaupotenziale im Fahrwerk – Multi-Material-Design durch simultane Umformung von Metallblechen und langfaserverstärkten Thermoplasten, Dissertation, Universität Siegen, UniverSi Verlag, Siegen, 2019
- [29] D. Heidrich, X. Fang: „Design of Automotive Structural Metal-GFRP Hybrid Parts using the novel Manufacturing Technique Hybrid forming“, *Conference Paper, NAFEMS World Congress*, Quebec City, 17.-20. Juni 2019
- [30] Evonik Industries AG: Verfahren zur Herstellung eines Metall-Kunststoff-Hybridbauteils, Erfinder: M. Gruhn, K. Kuhmann, M. Risthaus, 31.07.2014, DE, Patentschrift DE102013201388A1

- [31] T. Kloska, D. Heidrich, X. Fang: „Hybridforming – a novel and combined Deep Drawing and Compression Molding Process for Hybrid Parts“, WKM-Symposium, Darmstadt, 4.-5. Juli 2018
- [32] D. Heidrich, X. Fang: “Betriebsfestigkeit mittels Hybridpressen hergestellter Hybrid-Bauteile aus Metallblechen und Langfaser-Thermoplasten (LFT), Tagungsband 9. Landshuter Leichtbau-Colloquium, Landshut, 27.-28. Februar 2019
- [33] X. 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

**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**