

Abschlussbericht zum  
BMBF-Forschungsprojekt

# MultiPro

– Optimierung der Eigenschaften eines durch  
Hybridpressen hergestellten Stahl-LFT  
Materialverbunds –

Projektzeitraum: 01.08.2021 – 31.01.2025

**Autoren des Berichts:**

- M.Sc. Sharath Christy Anand
- M.Sc. Amir Hajdarevic
- Prof. Dr.-Ing. Xiangfan Fang



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: 00XP0375E) gefördert und vom Projektträger Karlsruhe (PTKA) betreut. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.



**Beteiligte Projektpartner:**

- Lehrstuhl für Fahrzeugleichtbau (FLB), Universität Siegen
- NetCo GmbH, Blankenburg
- Schmidt Modellbau GmbH, Friedrichshafen
- voestalpine Automotive Components Schwäbisch Gmünd GmbH, Schwäbisch Gmünd
- Weber Fibertech GmbH, Markdorf (Konsortialführer)

**Unterstützt von:**

- Evonik Industries AG, Marl
- Volkswagen AG, Wolfsburg

## Table of Contents

1. Einleitung .....	6
1.1. Ziel des Projekts.....	7
2. Ausgangssituation und Stand der Technik .....	7
2.1. Spritzgießen mit Metal Inserts .....	9
2.2. FVK im Automobile.....	9
3. Hybrid Forming – Fertigungsverfahren für MultiPro .....	10
3.1. Prozessbeschreibung:.....	10
3.2. Werkstoffe .....	11
3.2.1. Metall .....	11
3.2.2. LFT .....	12
3.2.3. Vestamelt Haftvermittler .....	12
3.3. Anlagentechnik.....	12
3.3.1. Erwärmungstechnik.....	12
3.3.2. Hydraulische Presse .....	13
4. Hybridpressverfahren – Temperierungskonzept und Werkzeug Entwicklung.....	13
4.1. Generische Test Körper (Hybrid U-Profil) Bauteil Auslegung.....	16
4.2. Generische Test Körper – Variotherm Werkzeug .....	17
4.3. Hybrid Pressen von Generischen Testkörper – U Profil mit Variotherm Verfahren .	19
4.4. Hybridpress Werkzeug – Komplexe Geometrie .....	23
4.5. Hybridpress Werkzeug – Demonstrator Bauteil .....	26
5. Auslegungsmethodik Stahl-LFT Bauteile .....	28
5.1. Material Charakterisierung LFT – Zugversuch.....	28
5.2. Material Charakterisierung – Schwingversuche LFT.....	31
5.3. Material Charakterisierung – Vestamelt Haftvermittler .....	34
5.4. Quasi-Statische und Dynamische drei Punkt Biegung des generischen Testkörpers	35
5.5. Rheologische Charakterisierung des PA6LFT40 Material.....	37
6. Demonstrator Bauteil Entwicklung und FE-Modellierung Methodenentwicklung .....	38
6.1. Topologieoptimierung und CAD Konstruktion des Demonstrator Bauteils .....	39
6.2. Entwicklung einer Simulationsmethode – zur Darstellung von LFT Materialien in FE Simulationen.....	41
6.3. Prozess Simulation – von verschiedene Bauteilen .....	42
6.3.1. Prozess Simulation – PA6LFT40 Platte.....	42
6.3.2. Prozess Simulation Generische Test Körper – Pure LFT und Hybrid U-Profil..	44

6.3.3.	Prozess Simulation – Demonstrator Bauteil .....	46
6.4.	Mapping von Faserorientierung von Moldflow nach FE Netz .....	47
6.5.	Anisotrope FE Berechnung von verschiedenen Bauteilen .....	48
6.5.1.	Zugprobe Quasi-Statisch und schwingende drei Punkt Biegung .....	48
6.5.2.	Entwicklung des Haftvermittlers Materialmodel in LS-Dyna .....	50
6.5.3.	Hybrid U-Profil Quasi-Statisch Drei Punkt Biegung .....	52
6.5.4.	Hybrid Längslenker Struktur Simulation.....	53
7.	Herstellung der Demonstrator-Bauteile.....	55
8.	Upscaling und Automatisierung .....	58
9.	Zusammenfassung.....	61
	Literaturverzeichnis .....	63

## Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
DIN	Deutsche Industrienorm
FEM	Finite-Elemente-Methode
FVK	Faserverbundkunststoff
GMT	Glasmattenverstärkte Thermoplaste
IR	Infrarot-Strahlung
KTL	Kathodische Tauchlackierung
LFT	Langfaserverstärkter Thermoplast
PA	Polyamid
pvt	Druck / spezifisches Volumen / Temperatur (-Diagramm)
PP	Polypropylen
RT	Raumtemperatur
TRL	<i>Technology Readyness Level</i> (Technologie-Reifegrad)

## 1. Einleitung

In den letzten Jahren hat das Thema Leichtbau in der Automobilbranche zunehmend an Relevanz gewonnen. Diese Entwicklung wird durch mehrere Faktoren angetrieben: strengere gesetzliche Vorgaben zur Emissionsreduzierung bei Neufahrzeugen, die zunehmende Verbreitung von Elektrofahrzeugen mit ihrem Fokus auf Reichweitenoptimierung sowie die öffentliche Debatte über Luftqualität in urbanen Räumen – insbesondere im Zusammenhang mit Dieselmotoren. Der gezielte Einsatz von Leichtbaumaßnahmen und das Ausschöpfen begleitender Vorteile ermöglichen eine Reduktion des Fahrzeuggesamtgewichts. Dies führt bei konventionellen Antrieben zu einem geringeren Kraftstoffverbrauch und bei Elektroantrieben zu einer verbesserten Reichweite. Durch das Forschungsprojekt „MultiPro“ soll die Weiterentwicklung und Optimierung eines neuartigen Stahl-FKV-Materialverbunds vorangetrieben werden, der mittels Hybridumformung hergestellt wird. Dabei soll der bereits erreichte TRL 4 weiter auf TRL 6 erhöht werden. Durch das Forschungsprojekt „MultiPro“ soll die Weiterentwicklung und Optimierung eines neuartigen Stahl-FKV-Materialverbunds vorangetrieben werden, der mittels Hybridpressverfahren hergestellt wird. Dabei soll der bereits erreichte TRL 4 weiter auf TRL 6 erhöht werden.

In der aktuellen Forschung werden bereits verschiedene Verfahren untersucht, die sich für die Herstellung hybrider Bauteile eignen und miteinander kombiniert werden können. Besonders verbreitet ist dabei die Verbindung klassischer Blechumformtechniken mit kunststoffverarbeitenden Methoden wie dem Spritzgießen. Alternativ zeigt auch das Fließpressen von Thermoplasten vielversprechende Ansätze, insbesondere wenn es darum geht, lange Faseranteile im Bauteil zu realisieren. Hierbei dient die Kunststoffschmelze ähnlich wie ein Wirkmedium in hydromechanischen Umformverfahren. Das zentrale Anliegen solcher integrierten Fertigungsprozesse besteht darin, die Anzahl einzelner Fertigungsschritte und Fügevorgänge zu minimieren und gleichzeitig neue, effiziente Verfahren und Werkzeuge für die Herstellung belastbarer Verbundstrukturen zu entwickeln.

## 1.1. Ziel des Projekts

Die im Rahmen dieses Projekts durchgeführten Arbeiten verfolgen das Ziel, sowohl die Eigenschaften des Materialverbunds als auch dessen Herstellungsprozess gezielt weiterzuentwickeln. Dazu werden fünf zentrale Maßnahmen umgesetzt:

1. **Anpassung der Prozessführung durch Materialverhalten:** Die temperatur-, druck- und geschwindigkeitsabhängigen Eigenschaften des Kunststoffes werden gezielt genutzt, um die Prozessparameter optimal einzustellen. Dadurch lässt sich eine gleichmäßige LFT-Verteilung im Bauteil erzielen, eine zuverlässige Abdichtung des Werkzeugs gewährleisten und die Haftung zwischen LFT und Stahl verbessern. Zusätzlich wird durch eine asymmetrische Temperatursteuerung für Stahl und LFT das Entstehen thermischer Spannungen im Bauteil reduziert, was sich positiv auf die Verbindungsqualität und Prozessstabilität auswirkt.
2. **Funktionsgerechter Aufbau des Verbundbauteils:** Über den bisherigen LFT-Stahl-Verbund hinaus werden unidirektionale Faserlagen (UD) gezielt in lasttragende Bereiche wie Rippenstrukturen integriert. Dies führt zu verbesserten mechanischen Eigenschaften hinsichtlich Steifigkeit, Festigkeit, Energieaufnahme bei Crashbelastung sowie einem zuverlässigen Versagensverhalten im Sinne eines "Fail-Safe"-Konzepts.
3. **Entwicklung eines standardisierbaren Prüfkörpers:** Für die Bewertung des Verbunds wird ein normfähiger Testkörper konzipiert, aus dem sowohl Proben für Materialtests als auch ganze Komponenten für mechanische Versuche entnommen werden können.
4. **Erweiterung der Prozessgrenzen und Digitalisierung:** Neue, generische Werkzeugkonzepte und digitale Methoden zur Produkt- und Prozessentwicklung ermöglichen eine Weiterentwicklung der Fertigungstechnologie. Die Prozesse werden virtuell automatisiert, um ein skalierbares Produktionssystem zu schaffen.
5. **Zerstörungsfreie Qualitätskontrolle:** Es wird ein Verfahren zur zerstörungsfreien Prüfung entwickelt, das es ermöglicht, Fehlstellen in komplex geformten, dreidimensionalen Bauteilen mit vielen LFT-Rippen zuverlässig zu identifizieren – insbesondere an den Schnittstellen zwischen Stahl und LFT.

Zum Abschluss des Projekts wird die technologische Machbarkeit durch einen funktionsfähigen Demonstrator belegt. Für den Fahrwerksbereich soll das Bauteilgewicht bei Berücksichtigung von neun Lastfällen um rund 20 % gegenüber einer konventionellen Stahlkonstruktion gesenkt werden. In der Karosseriestruktur sind sogar Reduktionen von bis zu 40 % bei Biege- und Crashbelastungen möglich. Zudem wird der Fertigungsprozess durch eine simulierte Automatisierung auf eine Zykluszeit von unter 40 Sekunden verkürzt, was einer Zeitersparnis von über 30 % gegenüber der getrennten Herstellung und späteren Montage entspricht (Abb. 1b). Mit dem Erreichen der Technologiereife TRL 6 wird der Weg für die industrielle Vorentwicklung bei Partnerunternehmen und OEMs geebnet. Die gewonnenen Erkenntnisse sind nicht nur für die Automobilindustrie von Bedeutung, sondern lassen sich auch in der Luftfahrt und im Maschinenbau einsetzen – überall dort, wo hohe Anforderungen an Gewicht und Bauraum bestehen.

## 2. Ausgangssituation und Stand der Technik

Der zuverlässige Einsatz von Multi-Material-Design erfordert nicht nur geeignete Fügeverfahren für Kunststoffe und Metalle, sondern auch die wirtschaftlichsten verfügbaren Herstellungsprozesse. Zunächst werden die gängigen Fertigungsmethoden für Kunststoff-Metall-Hybridbauteile in klar voneinander getrennten Prozessschritten dargestellt. Im Folgenden werden erste Beispiele aus der aktuellen Forschung vorgestellt, die innovative Herstellungsverfahren für die gemeinsame Fertigung von Kunststoff-Metall-Hybridkomponenten untersuchen. Abschließend werden zahlreiche Forschungsarbeiten

aufgeführt, in denen Faserverbundwerkstoffe (FVK) in radführenden, fahrdynamisch relevanten Fahrwerkskomponenten eingesetzt werden, um das Anwendungspotenzial der im vorliegenden Forschungsvorhaben untersuchten Kunststoff-Metall-Hybridbauteile zu bewerten.

Die in der Industrie mit Abstand am häufigsten eingesetzte Kunststoffverarbeitungstechnik ist das Spritzgießen. Sie zeichnet sich durch kurze Zykluszeiten, hohe Stückzahlen und einen großen Gestaltungsspielraum aus. Ein wesentlicher Nachteil gegenüber dem Fließpressverfahren liegt jedoch in der erreichbaren Faserlänge. Dieser Unterschied resultiert aus der Art und Weise, wie die Fasern in die Werkzeugkavität eingebracht werden. Beim Spritzgießen wird der Kunststoff über einen Extruder in das Werkzeug eingespritzt, was eine hohe Scherbelastung auf die Fasern erzeugt und somit zu Faserbruch führt. Beim Pressformen hingegen wird das Kunststoffextrudat direkt in die Werkzeugkavität eingelegt und anschließend in die Form gepresst – ohne signifikante Scherkräfte, die die Fasern beschädigen könnten. Diese Eigenschaft des Pressformens ermöglicht zudem den Einsatz von Kunststoffen mit sehr langen Faseranteilen. Die Vorteile längerer Faserlängen im Endbauteil wurden von Schürmann[1] untersucht und veröffentlicht. Seine Studien zeigten, dass die Faserlänge einen direkten Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften des fertigen Bauteils hat.

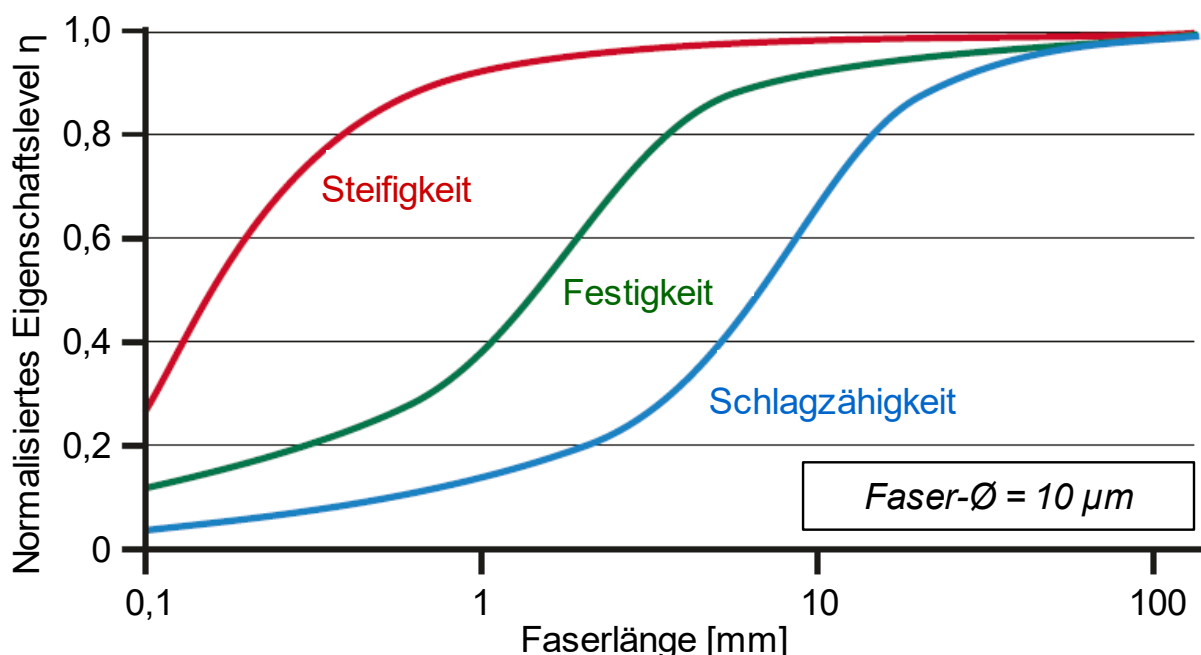


Abbildung 1: Einfluss der Faserlänge auf die mechanischen Eigenschaften nach [1]

Der Vorteil von Langfaserthermoplasten (LFT) kann besonders effektiv im Fließpressverfahren ausgeschöpft werden. Bei diesem Verfahren werden die Fasern erst in einem späten Stadium der Materialaufbereitung in die bereits aufgeschmolzene Kunststoffmasse eingebracht und anschließend als Extrudat in ein offenes Werkzeug überführt. Zwar kann es während des Mischprozesses und beim Fließen im Werkzeug zu einer gewissen Schädigung der Fasern kommen, jedoch lässt sich diese durch den Einsatz geeigneter Schneckenformen und eine optimierte Platzierung des Extrudats deutlich minimieren. Ein weiterer Vorteil gegenüber dem Spritzgießen besteht darin, dass die Schmelze nicht durch enge Heißkanäle gepresst werden

muss – ein Umstand, der beim Spritzgießen häufig zu zusätzlichem Faserbruch und Schädigung innerhalb der Schmelze führt.

### 2.1. Spritzgießen mit Metal Inserts

Grundsätzlich werden im Spritzgießverfahren reine Kunststoffbauteile hergestellt. In weiteren Entwicklungen werden Metalleinleger in das Spritzgießwerkzeug integriert, um Hybridbauteile zu fertigen. Ziel dieser Komponenten ist es, die Festigkeit an Stellen mit besonders hoher mechanischer Belastung weiter zu erhöhen. Die Integration der Metalleinleger erfolgt auf verschiedene Weise, beispielsweise durch nachträgliche Montage (Post-Mould Assembly) oder direkt im Werkzeug während des Spritzgießprozesses (In-Mould Assembly)[2].

Beim Post-Mold-Assembly-Verfahren erfolgt die Fertigung der Einzelkomponenten in getrennten Prozessschritten. Zunächst wird das Metallblech durch ein Umformverfahren wie Tiefziehen oder Crashforming in die gewünschte Geometrie gebracht. In einem nachfolgenden Schritt wird die Kunststoffkomponente mittels Spritzgießen hergestellt. Die Verbindung der beiden Bauteile erfolgt anschließend in einem separaten Montageschritt außerhalb des Werkzeugs. Dieses Verfahren bietet Flexibilität in der Wahl der Materialien und Prozesse, erfordert jedoch zusätzliche Fügeprozesse wie Kleben, Nieten oder Schrauben[3].

Im Gegensatz dazu wird beim In-Mold-Assembly das metallische Einlegeteil bereits während des Spritzgießprozesses in das Werkzeug eingelegt und mit dem Kunststoff form- oder stoffschlüssig verbunden. Dieses Verfahren ermöglicht eine höhere Prozessintegration, reduziert Montageaufwand und Zykluszeiten und verbessert häufig die mechanische Verbindung zwischen den Materialien durch direkte Umspritzung[4].

### 2.2. FVK im Automobile

Faserverstärkte Kunststoffe (FVK), insbesondere glasfaserverstärkte Kunststoffe (GFK) und kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe (CFK), haben sich in der modernen Automobilentwicklung als Schlüsselmaterialien etabliert – aufgrund ihrer hohen spezifischen Festigkeit, ihres geringen Gewichts und ihrer Korrosionsbeständigkeit. Im Vergleich zu traditionellen Metallen wie Stahl (Dichte ca.  $7,8 \text{ g/cm}^3$ ) weisen FVKs deutlich geringere Dichten (ca.  $1,5\text{--}2,0 \text{ g/cm}^3$ ) auf, was zu erheblichen Gewichtseinsparungen und einer verbesserten Kraftstoffeffizienz führt [5]. Dieser Materialvorteil entspricht dem Bestreben der Industrie, Treibhausgasemissionen zu senken und strengere Umweltvorgaben zu erfüllen.

FVKs werden in einer Vielzahl von Automobilanwendungen eingesetzt – von nichttragenden Bauteilen bis hin zu strukturell belasteten Komponenten. GFK wird häufig für äußere Verkleidungsteile wie Stoßfänger, Kotflügel und Dachmodule verwendet, da es kostengünstig ist und zufriedenstellende mechanische Eigenschaften bietet. CFK hingegen wird aufgrund seiner hohen Steifigkeit bei geringem Gewicht bevorzugt in Hochleistungsfahrzeugen für Bauteile wie Karosserieteile, Antriebswellen und Monocoques eingesetzt [6]. So verwendet beispielsweise die Chevrolet Corvette eine einteilige Blattfeder aus FVK anstelle einer herkömmlichen Stahlfeder, was sowohl eine Gewichtsreduktion als auch eine verbesserte Platzausnutzung ermöglicht[7].

Über Karosserie- und Fahrwerkssysteme hinaus kommen FVKs zunehmend auch in strukturellen Bauteilen zum Einsatz. Hybride Strukturen aus Metall und FVK ermöglichen es, gezielt Bereiche mit hohen mechanischen Belastungen zu verstärken und gleichzeitig das Gesamtgewicht zu minimieren. Solche Hybridlösungen nutzen häufig Verfahren wie Insert-Moulding oder Overmoulding, um eine feste mechanische Verbindung zwischen unterschiedlichen Materialien herzustellen [8]. Fortschritte in der Harzinjektion (RTM), im Sheet Moulding Compound (SMC) sowie in der Prepreg-Technologie haben zudem eine

effizientere Serienfertigung von FVK-Komponenten mit präziser Steuerung der Faserorientierung und Porosität ermöglicht.

Trotz dieser Vorteile ist der Einsatz von FVK im Automobilbau nicht frei von Herausforderungen. Die Herstellung von FVK-Komponenten ist kostenintensiv – bedingt durch teure Rohmaterialien, längere Zykluszeiten und komplexe Qualitätssicherungsmaßnahmen. Darüber hinaus ist die Wiederverwertbarkeit von duroplastischen FVKs bislang begrenzt, wenngleich Forschung an thermoplastischen Verbundstoffen und depolymerisierbaren Matrices im Gange ist [8]. Zur Bewältigung dieser Herausforderungen werden vermehrt automatisierte Fertigungsprozesse, biobasierte Harze und Methoden zur Faser-Rückgewinnung untersucht.

Mit Blick auf die Zukunft wird ein signifikanter Anstieg der Nachfrage nach FVKs im Automobilssektor erwartet – insbesondere getrieben durch den Aufschwung der Elektromobilität, bei der jede Gewichtseinsparung direkt zu einer höheren Reichweite beiträgt. Da Leichtbau, Nachhaltigkeit und Sicherheit weiterhin oberste Priorität für Automobilhersteller haben, sind FVKs in der Lage, eine zentrale Rolle in zukünftigen Mobilitätslösungen einzunehmen.

### 3. Hybrid Forming – Fertigungsverfahren für MultiPro

Im Folgenden werden die Verfahrensschritte des Hybridpressverfahrens, die im Projekt verwendeten Materialien sowie die notwendige Anlagentechnik zur Umsetzung detailliert beschrieben.

#### 3.1. Prozessbeschreibung:

Die Grundidee des Hybridformens besteht darin, dass es sich um einen simultanen einstufigen Prozess handelt, bei dem sowohl das Stahlblech geformt als auch das erhitzte FVK-Material in Rippenstrukturen gepresst wird. In diesem Verfahren dient das geschmolzene FVK-Material während des Pressvorgangs nicht nur zur Ausbildung der Kunststoffrippenstruktur, sondern wirkt gleichzeitig als Wirkmedium und unterstützt die Umformung des Stahlblechs. Die Formgebung des Kunststoffs bestimmt dabei die finale Struktur des Blechbauteils[9]

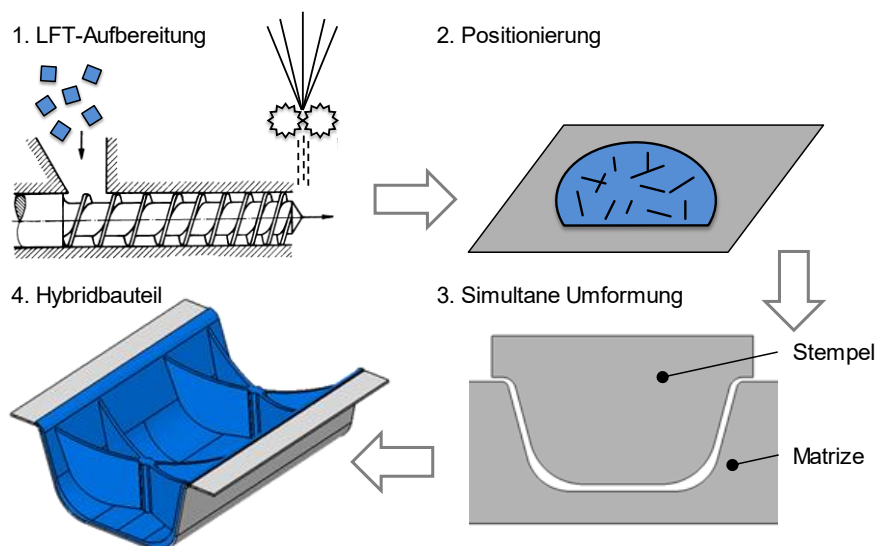


Figure 2: Hybrid Forming Prozess[9]

Figure 2 zeigt eine schematische Darstellung des Hybrid Forming Prozess. Zunächst wird das LFT-Extrudat in einem Compounder aufbereitet (1.). Dabei erfolgt die Einarbeitung der

Langfasern – in der Regel Glasfasern – erst nach der Plastifizierung des Thermoplasts. Anschließend wird die Schmelze in einer kurzen zweiten Schneckenstufe homogenisiert. Das so erzeugte Extrudat kann entweder direkt weiterverarbeitet oder für den nachfolgenden Prozessschritt erneut erwärmt werden. Parallel dazu wird das mit einem Haftvermittler beschichtete Metallblech vorgewärmt und gemeinsam mit dem LFT-Extrudat in das Umformwerkzeug eingelegt (2.).

Der zentrale Prozessschritt des Hybridpressens erfolgt in (3): die gleichzeitige Umformung von Metallblech und Thermoplast. Stempel- und Matrizenkonturen unterscheiden sich nicht nur durch eine konstante Blechdicke, sondern auch durch zusätzliche Freiräume im Bereich der Radien. Diese werden im Umformprozess durch das LFT-Material ausgefüllt, sodass das Stahlblech nicht durch direkten Stempelkontakt, sondern durch den Druck des Thermoplasts in Form gebracht wird.

Nach dem Öffnen des Werkzeugs kann das fertige Hybridbauteil entnommen werden. Am Beispiel eines U-Profiles (4.) wird gezeigt, dass das Bauteil neben zwei Kreuzrippen zur Profilverstärkung eine vollflächige LFT-Beschichtung sowie eine erhöhte LFT-Schichtdicke in den Radien aufweist. Dies verdeutlicht zwei wesentliche Vorteile des Verfahrens: Erstens können die Rippen durch die flächige Verbindung des LFTs auch bei geringer Verbindungsfestigkeit sicher mit dem Metallblech verbunden werden. Zweitens ermöglicht die gezielte Variation der LFT-Schichtdicke eine anforderungsgerechte Verstärkung je nach Bauteilbelastung. Eine ausführliche Erklärung des hybriden Umformens wurde in – beschrieben[9]

Zusammenfassend bietet das Hybridformverfahren eine Vielzahl an Vorteilen, die es besonders attraktiv für den Leichtbau im automobilen Bereich machen. Durch die Reduktion der Blechdicke in Kombination mit einer innenliegenden Verstärkung aus langfaserverstärktem Thermoplast (LFT) kann das Bauteilgewicht signifikant verringert werden, ohne dabei an struktureller Integrität zu verlieren. Gleichzeitig ermöglicht das Verfahren eine belastungsgerechte Auslegung, da das Thermoplastmaterial große gestalterische Freiheiten bietet und lokal verstärkende Strukturen wie Rippen gezielt eingebracht werden können. Ein weiterer Vorteil liegt im vorhersagbaren und sicheren Versagensverhalten der resultierenden Bauteile. Durch die gezielte Kombination von Metall und LFT entsteht ein sogenanntes „Fail-Safe“-Verhalten, bei dem die Bauteilsicherheit auch im Fehlerfall erhalten bleibt. Besonders effizient zeigt sich das Verfahren durch die Integration mehrerer Prozessschritte in einem: Umformen, Urformen und Fügen erfolgen simultan in einem einzigen Arbeitsschritt mithilfe eines Haftvermittlers. Dies reduziert sowohl die Prozesszeit als auch den Investitionsaufwand in separate Anlagen. Der Einsatz von Langfasern trägt zusätzlich zur Erzielung hervorragender mechanischer Eigenschaften bei und macht das Verfahren zu einer leistungsfähigen Lösung für strukturelle Leichtbauanwendungen.

## 3.2. Werkstoffe

Für das Hybridpressen werden im Wesentlichen drei Materialien benötigt: ein Metallblech, langfaserverstärktes Thermoplastmaterial (LFT) und ein Haftvermittler.

### 3.2.1. Metall

In diesem Projekt wurde Stahl als Blechmaterial verwendet. Um das Festigkeitsspektrum abzudecken, kamen sowohl Tiefziehstahl DC04 als auch hochfester Stahl DP800 zum Einsatz. Zusätzlich wurde auch ein Stahl mit mittlerer Festigkeit, DP600, verwendet. Parallel dazu spielt die Blechdicke eine entscheidende Rolle für die Umformbarkeit des Metalls. In diesem Projekt werden Blechdicken im Bereich von 1 bis 2 mm eingesetzt, wobei eine Dicke von 2 mm für die Entwicklung des Demonstratorbauteils verwendet wird.

### 3.2.2. LFT

Das in diesem Projekt eingesetzte LFT ist eine firmeneigene Rezeptur von Weber Fibertech. Es basiert auf einer Polyamid-6-(PA6)-Matrix und wird im eigenen Haus mit 25 mm langen Glasfasern sowie speziellen Additiven compounding, um ein leistungsfähiges LFT-Extrudat herzustellen. Im Vergleich zu Polypropylen verfügt PA6 über eine deutlich höhere Schmelztemperatur und eine verbesserte Wärmebeständigkeit, wodurch es sich besonders für Bauteile eignet, die kathodische Tauchlackierung (KTL) durchlaufen müssen. Aus prozesstechnischer Sicht bietet LFT – wie andere Thermoplaste auch – den Vorteil, dass es sowohl direkt im Anschluss an die Extrusion als auch nach einer späteren Aufwärmung verarbeitet werden kann. Dadurch ist der Werkstoff nicht nur für Betriebe mit eigener Compoundieranlage nutzbar, sondern kann auch als Halbzeug eingesetzt werden. Voraussetzung hierfür ist lediglich das Vorhandensein geeigneter Erwärmungstechnologien wie beispielsweise Umluftöfen, Paternosteröfen oder Infrarotstrahler. Dies eröffnet eine hohe Flexibilität in der Fertigung und ermöglicht eine breite industrielle Anwendung.

### 3.2.3. Vestamelt Haftvermittler

Da es sich beim Hybridpressen um einen einstufigen Prozess handelt und das fertige Funktionsbauteil am Ende direkt aus dem Umformwerkzeug entnommen wird, muss eine geeignete Methode zur Verbindung des LFT-Materials mit dem umgeformten Stahlblech sichergestellt werden. In diesem Projekt erfolgt diese Verbindung mittels eines Haftvermittlers. Zum Einsatz kommt dabei das Produkt Vestamelt Hylink der Firma Evonik, das auf einem Co-Polyamid basiert und nach Aktivierung bei etwa 200 °C eine stoffschlüssige Verbindung mit der Polyamid-6-Matrix des LFTs eingehen kann. Das Haftvermittlersystem kann entweder als Tauchlackierung (Coil-Coating) oder als Pulverbeschichtung appliziert werden, wobei mit der Pulverbeschichtung deutlich höhere Schichtdicken erzielt werden können. Diese wirken sich aufgrund der Elastizität des Haftvermittlers positiv auf die Aufnahme innerer Spannungen aus, die durch die unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten von Stahl und PA6 entstehen. Im Rahmen der Projektphase wurden die Stahlbleche für die Hybridformversuche zugeschnitten und zur Beschichtung mit Vestamelt an Evonik übermittelt.

## 3.3. Anlagentechnik

Die im Rahmen des Projekts durchgeführten Versuche finden parallel an der Universität Siegen sowie bei den Unternehmen voestalpine und Weber Fibertech statt. Im Folgenden wird daher die jeweils eingesetzte und grundsätzlich erforderliche Anlagentechnik kurz beschrieben.

### 3.3.1. Erwärmungstechnik

Bei den Versuchen am FLB und bei voestalpine wird das LFT-Material vor der Weiterverarbeitung zunächst auf eine schmelzeförmige Konsistenz gebracht, wobei eine Verarbeitungstemperatur von 270–280 °C erreicht wird. Dies erfolgt mithilfe eines mittelwelligen Infrarotstrahlers der Firma Krelus. Das von der Firma Weber Fibertech gelieferte PA6-LFT40-Extrudat weist eine Dicke von etwa 10–15 mm auf. Die Extrudate werden massenmäßig zugeschnitten, in der Regel auf etwa 350 g für ein generisches U-Profil-Bauteil. Anschließend werden sie in den Infrarot-Strahler eingelegt und auf eine Temperatur zwischen 280–290 °C erhitzt.

### 3.3.2. Hydraulische Presse

Die bei dem Unternehmen Weber Fibertech eingesetzte Pressentechnik für die Herstellung der Projektdemonstratoren entspricht den Anlagen, die im Serienbetrieb verwendet werden: Bei Weber Fibertech kommt eine 3.600 t Fließpresse von Dieffenbacher für die Verarbeitung von LFT zum Einsatz. Die Presse arbeitet hydraulisch. Die Presse verfügt zusätzlich über eine aktive Parallelhaltefunktion sowie – aufgrund ihres neueren Baujahrs – über deutlich erweiterte Einstellmöglichkeiten bei gleichzeitig höherer Präzision.

Alle Versuche zur Herstellung der Probegeometrien und Zugproben werden am Lehrstuhl für Fahrzeugleichtbau auf einer 225 t Wickert-Presse durchgeführt. Die bisherigen Untersuchungen zeigen, dass für den Hybridpressprozess keine spezielle Pressentechnik erforderlich ist. Wie beim Fließpressen von LFT ist jedoch eine einstellbare Pressgeschwindigkeitskurve sowie eine zusätzliche hydraulische Funktion zur Umsetzung einer Ziehkissenfunktion wünschenswert.

## 4. Hybridpressverfahren – Temperierungskonzept und Werkzeug

### Entwicklung

Wie der Name „Hybridformen“ bereits andeutet, werden zwei Materialien mit unterschiedlichen werkstofftechnischen Eigenschaften verwendet. Diese unterscheiden sich unter anderem in ihrer Wärmeleitfähigkeit. Nach dem Einlegen in das Werkzeug und dem Umformen zum finalen Bauteil entstehen innerhalb der Materialien unterschiedliche Temperaturverteilungen, die zu Bauteilverzug führen können. Gemäß Ziel 1 aus Kapitel 1.1 muss dieser Temperaturunterschied gezielt ausgeglichen werden. Dazu ist es notwendig, beide Materialien gleichzeitig und gleichmäßig auf eine einheitliche Temperatur abzukühlen, um temperaturbedingte Eigenspannungen zu vermeiden, die später zu Verzug führen könnten.

Zu Beginn des Projekts wurden verschiedene Temperierungskonzepte recherchiert, um eine asymmetrische Abkühlung der Hybridbauteile sicherzustellen. Das Temperierungskonzept soll ein schnelles Aufheizen und schnelles Abkühlen des Presswerkzeugs ermöglichen. Das Hybrid-Pressverfahren ist die Kombination von zwei verschiedenen Werkstoffen mit unterschiedlichen Verhalten und Verarbeitungsbedingungen zur Herstellung eines Bauteils. Dabei wird auf einerseits Stahl auf 200°C (um den Haftvermittler zu aktivieren) und andererseits Kunststoff PA6LFTGF40 auf 280-290°C erhitzt, anschließend in das Presswerkzeug eingelegt und zu einer vordefinierten Form gepresst und geformt.

Aufgrund des unterschiedlichen Materialverhaltens weisen diese Materialien eigene innere Spannungszustände auf. Um die Eigenspannungen im Kunststoff und im Stahl zu reduzieren, müssen die Temperaturen beider Materialien getrennt kontrolliert werden.

Als erstes wurde die Temperierung durch HLP (Hochleistungsheizpatrone) untersucht. Ein Vorversuch mit den bereits verfügbaren HLP wurde am FLB durchgeführt. Hier wurden 4 HLP von 10mm Durchmesser, 450mm Länge mit einer Leistung von 1,7KW verwendet, um eine Stahlplatte von 70kg zu erwärmen und mit Hilfe von Thermoelementen die Temperaturänderung zu messen.

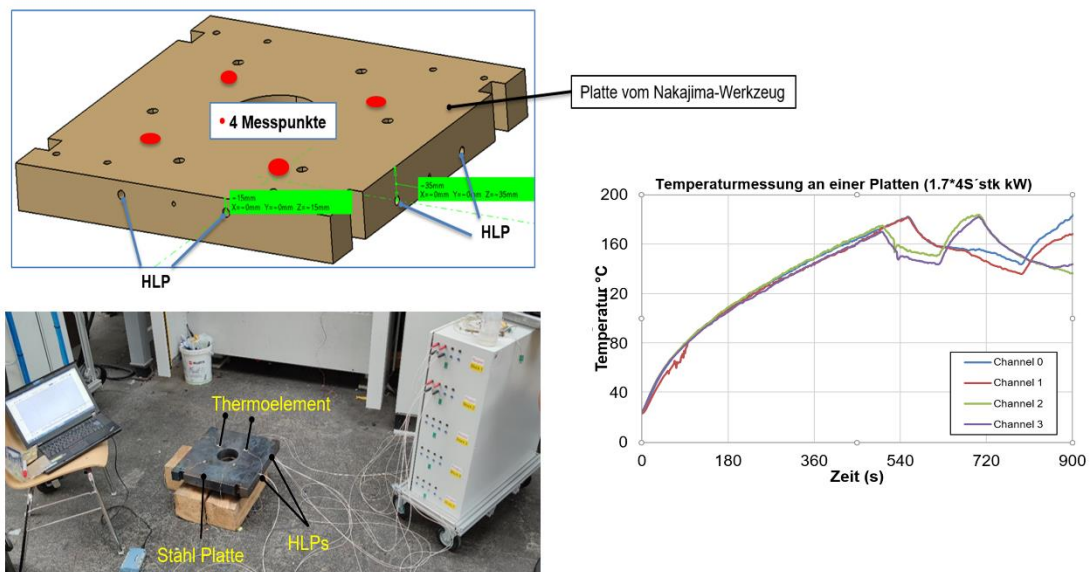


Figure 3: Leistungskapazität Untersuchung mit HLP und Stahl Platte

Das Diagramm in Figure 3 zeigt die Zeit, die die 4 HLPs benötigen, um eine 70 kg schwere Stahlplatte von Raumtemperatur auf 180 °C zu erhitzen. Es dauert etwa 400 Sekunden, um die erforderliche Temperatur zu erreichen. Ein wichtiges Ziel von MultiPro ist es, die Taktzeit auf weniger als 40 Sekunden zu reduzieren. Um dieses Ziel mit HLPs zu erreichen, benötigt man zu viele HLPs, sowie ein Temperiergerät zur Steuerung.

Als nächste Option wurde die Erwärmung durch Induktion in Betracht gezogen. Dies beinhaltet ein komplexes Design für die Induktionsspulen Figure 4. Für die Induktionserwärmung muss eine separate Vorrichtung konstruiert werden, damit die Induktionsspulen während der Pressenbewegung nicht mit dem Presswerkzeug in Kontakt kommen. Die Effizienz der induktiven Erwärmung kann durch den Einsatz von Isolationskonzepten verbessert werden. In der Abbildung unten, vom IKFF Stuttgart, wurden Luftlöcher und eine Kupferbeschichtung berücksichtigt, um den Fluss der induktiven Wärme zu steuern. Aus den Simulationsergebnissen und dem Diagramm ist ersichtlich, dass die Wärme ohne Kupferbeschichtung im Vergleich zu den Ergebnissen des kupferbeschichteten Werkzeugs nicht effektiv in den gewünschten Bereich (Kavität) geleitet wird.

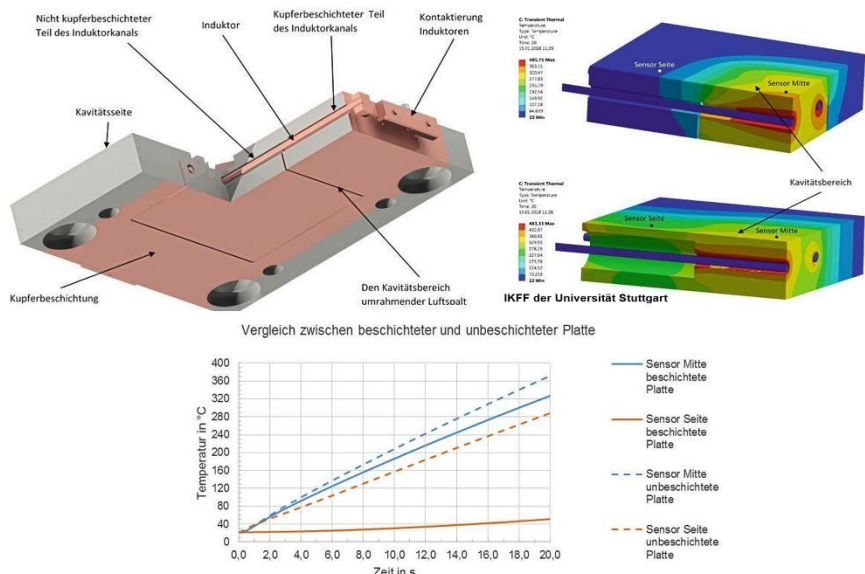


Figure 4: Induktiv Erwärmung und Einfluss von Kupfer Beschichtung

Die induktive Erwärmung hatte jedoch folgende Nachteile: Da es zwei Presswerkzeughälften gibt, müssen zwei Induktionsanlage angeschafft werden, die sehr teuer sind und zusätzlich müssen zwei Kühlgeräte zur individuellen Abkühlung der beiden Presswerkzeughälften gekauft werden.

Variothermie Verfahren und Ausgewählte Variotherm Gerät:

Das Variotherm Gerät verwendet Wasser als Temperiermedium, um sowohl die Erwärmung als auch die Abkühlung durchzuführen. Das Gerät ist mit leistungsstarken Pumpen ausgestattet, die Hochtemperaturwasser von 180°C bei einem hohen Druck von 15 Bar liefern kann. Sobald die Presse schließt, schaltet das Variotherm Werkzeug zu einem bestimmten Zeitpunkt von heißem auf kaltes Wasser um, um das Presswerkzeug intensiv zu kühlen und damit die Zykluszeit zu verkürzen. Das Heiß-/Kaltwasser wird durch speziell gebohrte Kanäle in das Presswerkzeug geleitet. Ein typischer Temperaturverlauf am Werkzeug wird in Figure 5 angezeigt

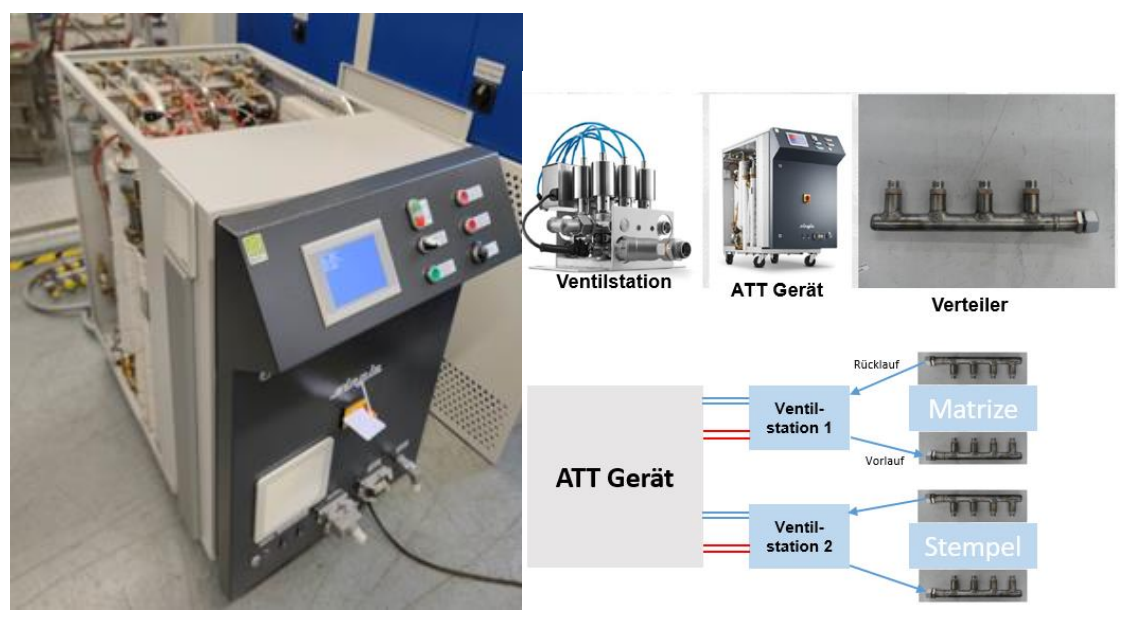


Figure 5: Variotherm Gerät mit Zubehör

#### 4.1. Generische Test Körper (Hybrid U-Profil) Bauteil Auslegung

Das Hauptziel des in Ap1a entwickelten generischen Testkörper ist es, die klassischen Lastfälle Torsion, Biegung und Axial-Crash durchzuführen. Dadurch werden die eigenschaften des Bauteils überprüft. Darüber hinaus hat der AP1-Generische Testkörper die Anforderung, dass die Rippenstrukturen so konstruiert sein soll, dass DIN EN ISO Norm-Proben aus verschiedenen Bereichen des Bauteils entnommen werden kann. Hierzu wurden mehrere Rippengeometrien ausgelegt und drei verschiedene Lastfälle simuliert. Die drei Lastfällen waren Torsion, Biegung und Axial Crash.

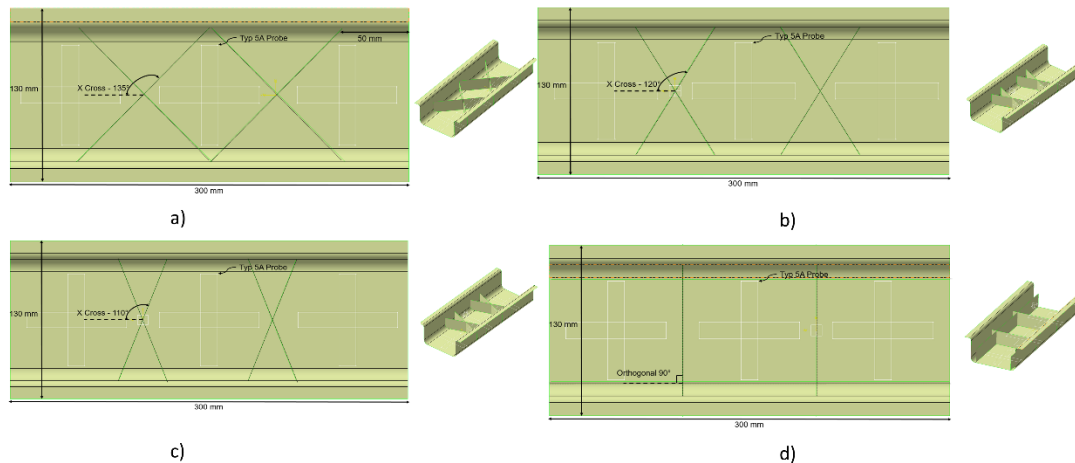


Figure 6: Bauteil Geometrie Varianten für AP1 Gen. Testkörper a) X-Cross 135° b) X-Cross 120° c) X-Cross 110° d) Orthogonal

Figure 6 zeigt die unterschiedlichen konstruierten Rippenstrukturen, die so ausgelegt wurden, dass zwischen den einzelnen Rippen Zugproben nach DIN ISO 527-2 Typ 1BA ausgeschnitten werden können. In LS-Dyna wurde eine Hybridsimulation durchgeführt, bei der der Stahl und das PA6-LFT mit dem Materialmodell MAT\_24 abgebildet wurden. Dieses Modell beschreibt ein isotrop elastisch-plastisches Materialverhalten. Der Haftvermittler wurde hingegen durch ein separates Materialmodell dargestellt, das im Rahmen dieses Projekts entwickelt wurde in Abschnitt 6.5.2. Bei Betrachtung der Ergebnisse der 3 Lastfälle zeigt sich, dass der X-Cross 135° die beste Eigenschaften bei 3-Punkt-Biegung und Torsion aufweist wie im Figure 7 gezeigt. Beim Axialcrash hingegen lieferte die orthogonale Rippenstruktur erwartungsgemäß die besten Ergebnisse von allen Varianten. Bei der Axial-Crash-Geometrie ist auch zu sehen dass X-Cross 135° ca. 60% der Energieabsorption von dem Orthogonal aufweist. Nach diesem Vergleich wurde X-Cross 135° als beste Probengeometrie für den generischen Testkörper aus AP1a festgelegt und ausgelegt wie im Figure 8.

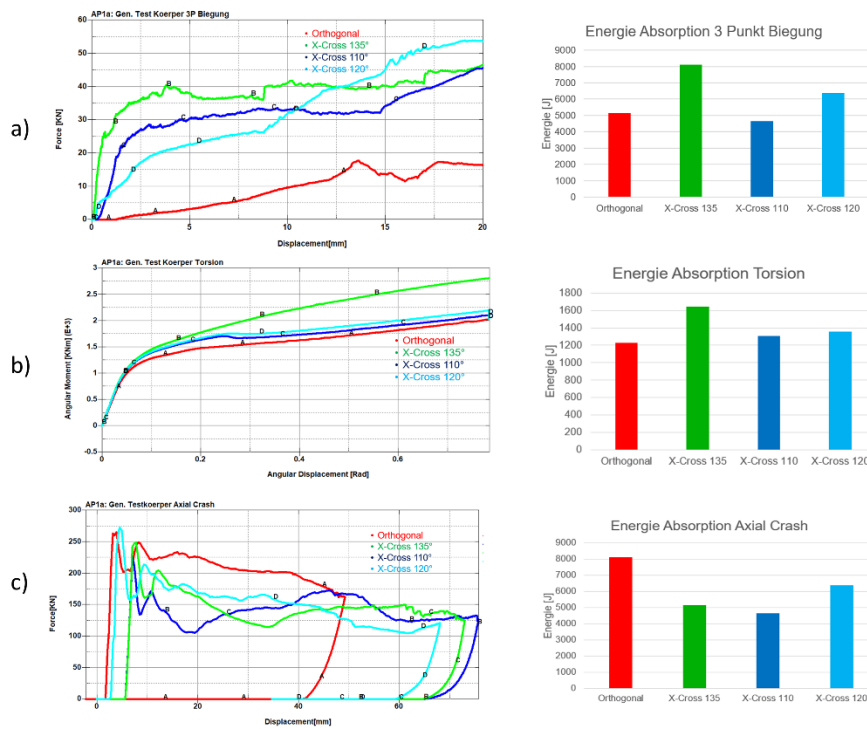


Figure 7: Berechnungskurveverlauf von alle Rippen VArIanten mit Energieabsorption a) drei punkt Biegung b) Torsion c) Axial Crash

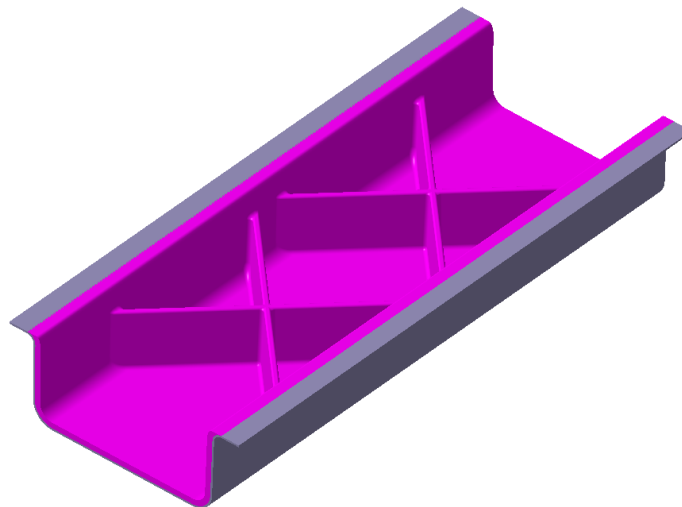


Figure 8: AP1 Gen. Testkörper (Hybrid U-Profil) CAD Konstruktion

#### 4.2. Generische Test Körper – Variotherm Werkzeug

Neben der Entwicklung des Temperierungskonzeptes auch die Auslegung des Presswerkzeuges für den in generischen Testkörper entwickelt. Um die bestmögliche Effizienz der Single-Temp-Variothermiegeräte zu gewährleisten, wurde ein geeignetes Presswerkzeugkonzept entwickelt. Auf Basis des generischen Testkörpers (dessen Entwicklung in Kapitel 4.1 ist) erfolgte die Ausgestaltung der Konturen von Matrize und Stempel.

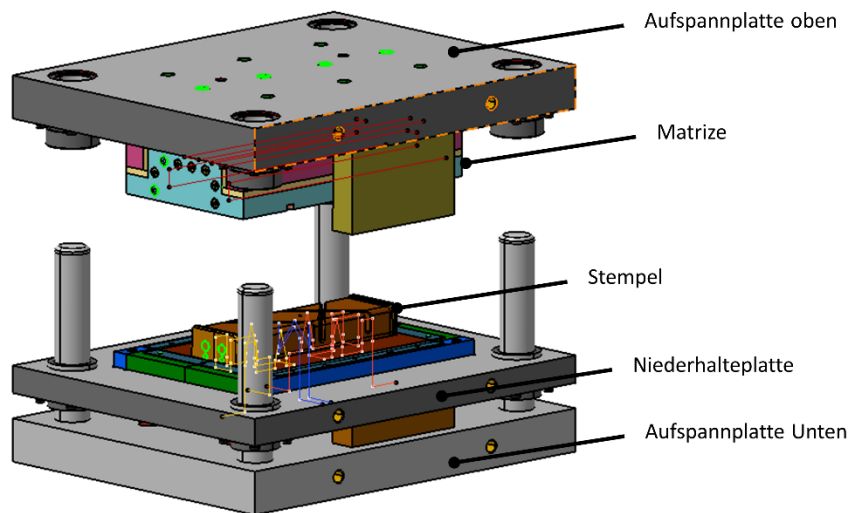


Figure 9: Generischen Testkörper Hybrid Pressen Werkzeug

Figure 9 zeigt eine schematische Darstellung des generischen Testkörper-Werkzeugs. Es besteht aus zwei Hauptkomponenten: dem Oberteil und dem Unterteil. Das Oberteil umfasst die obere Aufspannplatte, an der die Matrize befestigt ist. Das Unterteil setzt sich aus der Niederhalteplatte zusammen, auf der das Stahlblech positioniert wird. Zusätzlich gehören zur Unterseite die untere Spannplatte sowie der Stempel, der mit der Rippenstruktur versehen ist.

Der Stempel und die Matrize werden mit Kühlkanälen ausgestattet, wie in Abb. 19 gezeigt wird. Die Kühlkanäle sind so konzipiert, dass die Kanäle konturnah sind. Aufgrund der vorhandenen Rippenstruktur werden die Kühlkanäle im Stempel (in Grün dargestellt) so gestaltet, dass sie konturnah zu allen Rippen verlaufen, was zu einer effizienten und gleichmäßigen Temperierung führt. Auf der Matrizen-Seite sind die Kühlkanäle (in Blau dargestellt) jedoch gerade, da es keine spezifische Kontur zu erfassen gibt. Figure 10 zeigt die Kühlkanäle in der Matrize werden mit Einlass und Auslass dargestellt. Die Kühlkanäle sind so nah wie möglich an der Bauteilkontur positioniert.

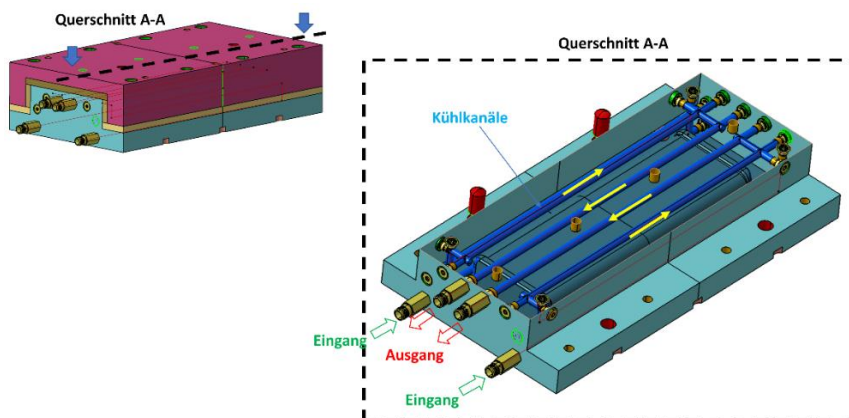


Figure 10: Kühlkanäle in Matrize

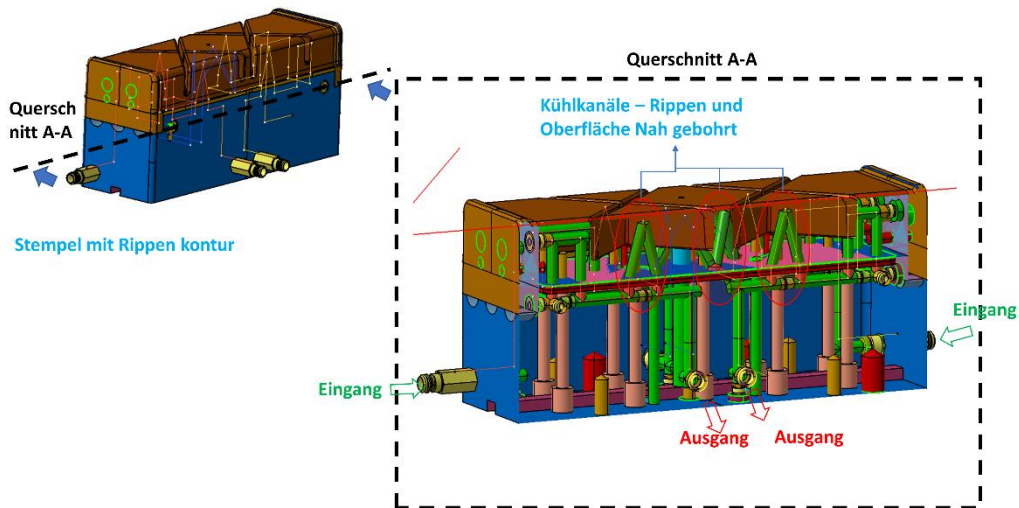


Figure 11: Kühlkanäle im Stempel

Ähnlich wie in der Matrice sind auch im Stempel Kühlkanäle gebohrt. Wie in der Figure 11 gezeigt, sind drei Kühlkanäle schräg gebohrt und strategisch so nah wie möglich an der Oberfläche positioniert.

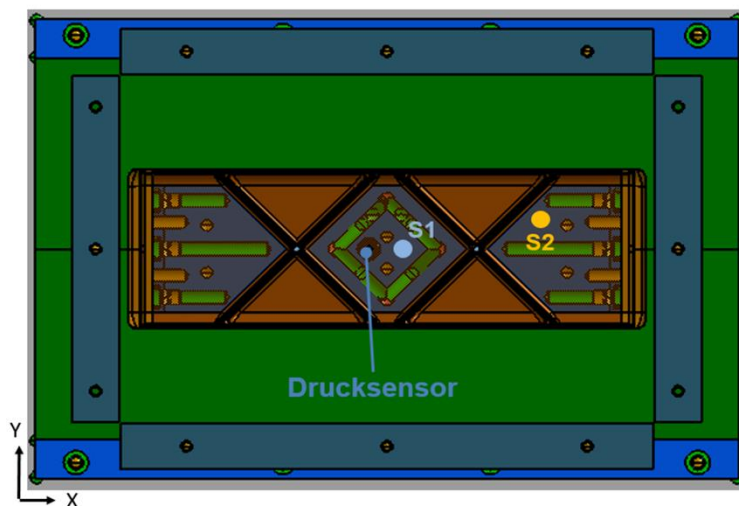


Figure 12: Position der verschiedenen Sensoren im Stempels

Sensoren zur Überwachung prozessrelevanter Parameter im Presswerkzeug vorgesehen Figure 12. Diese Sensoren werden im Stempel platziert werden. In der Mitte befindet sich ein Drucksensor und an der Position S2, wie in Abb. 20 markiert, wird ein kombinierter Druck- und Temperatursensor platziert. Diese 2 Sensoren ermöglichen, den Druck und die Temperatur der Kunststoffschmelze während des gesamten Herstellungszyklus eines Bauteils zu überprüfen. Zusätzlich wird an Position S1 ein Thermofühler angebracht, der mit dem Variotherm Gerät gekoppelt wird. Die Signale des Thermofühlers steuern das Variotherm Gerät, um während des Pressvorgangs zwischen Heiß- und Kaltwasserzufuhr umzuschalten.

#### 4.3. Hybrid Pressen von Generischen Testkörper – U Profil mit Variotherm Verfahren

Das ATT-System arbeitet in zwei Betriebszuständen. Im ersten Zustand befindet sich das Werkzeug im Heißbetrieb, wobei der Kühlkreis in den Bypass-Modus geschaltet ist. Im zweiten Zustand läuft das Werkzeug im Kaltbetrieb und der Heizkreis wird in den Bypass versetzt. Dadurch lässt sich die Temperatur im Werkzeug gezielt und flexibel steuern.

Für die Anwendung im Projekt wurde eine Gerätekonfiguration mit zwei Ventilstationen gewählt wie in Figure 13 und Figure 14. Das ATT-Gerät verfügt über eine Heizleistung von 36 kW, eine Kühlleistung von 150 kW und kann Temperaturen bis zu 200 °C bereitstellen. Ventilstation 1 ist für das Werkzeug-Oberteil (Matrize) vorgesehen, während Ventilstation 2 das Werkzeug-Unterteil (Stempel) temperiert. Ein Werkzeugverteiler ermöglicht die Aufteilung der Vor- und Rückläufe zwischen den Heiß- und Kaltkreisen auf die beiden Ventilstationen.

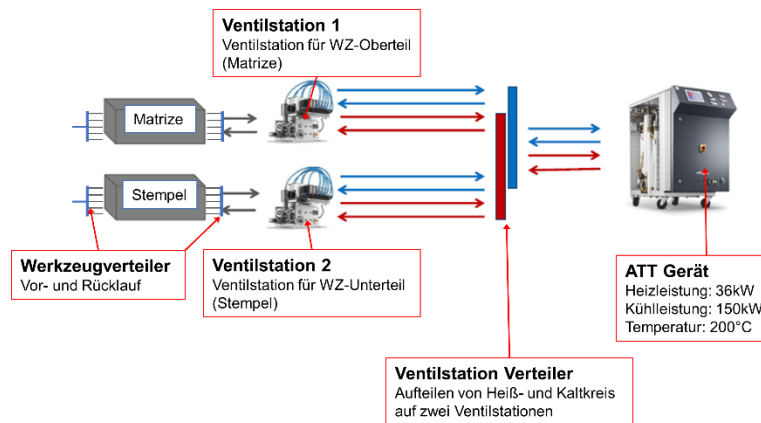


Figure 13: Ventilstation Kreislauf mit Werkzeug

Die Inbetriebnahme des generischen Testkörperwerkzeugs und des ATT-Geräts sieht drei Steuerungsoptionen vor: eine manuelle Umschaltung im Handbetrieb, eine automatische Steuerung über externe Signale (z. B. Lichtschranken) sowie eine vollständige Steuerung über die Presse selbst. Damit kann flexibel zwischen Heiß- und Kaltbetrieb umgeschaltet werden.



Figure 14: Anschluss von Ventilstationen mit Werkzeug

Zur Optimierung der Zykluszeit wurde eine Sonderfunktion zur Temperaturbegrenzung eingesetzt wie im Figure 15. Dabei werden die Vorlauftemperaturen im Heißkreis auf 160 °C und im Kaltkreis auf 80 °C begrenzt. Sobald die Sensoren diese Werte im Werkzeug erfassen, sperrt die Ventilstation den Durchfluss und regelt auf die definierte Temperatur. Dadurch kann die thermische Belastung des Werkzeugs besser kontrolliert und die Zykluszeit optimiert werden.

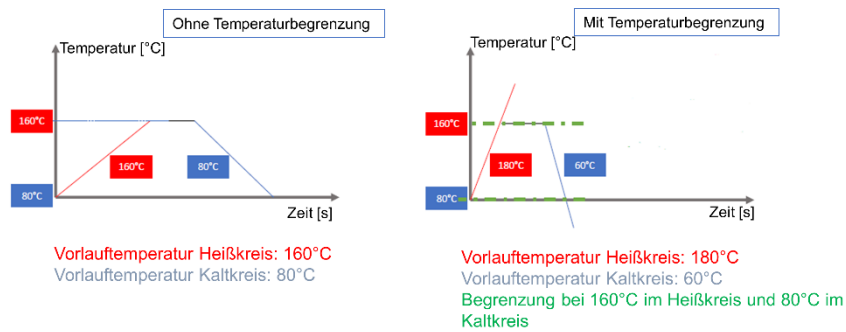


Figure 15: Konzept von Temperaturbegrenzung

Ein Vergleich der Oberflächenqualität zeigt, dass bei konstantem Temperieren mit 80 °C eine andere Bauteilqualität erzielt wird als bei variothermie Temperierung zwischen 160 °C und 80 °C. Die gezielte Temperatursteuerung wirkt sich somit direkt auf das Formteil aus. Die Effizienz des variothermen Prozesses am U-Profil-Werkzeug wurde mithilfe eines FLIR-Kamerasystems getestet und dargestellt in Figure 16. Dabei ist zu erkennen, dass sich Stempel und Matrize innerhalb von 12 Sekunden von 140 °C auf 80 °C abkühlen.

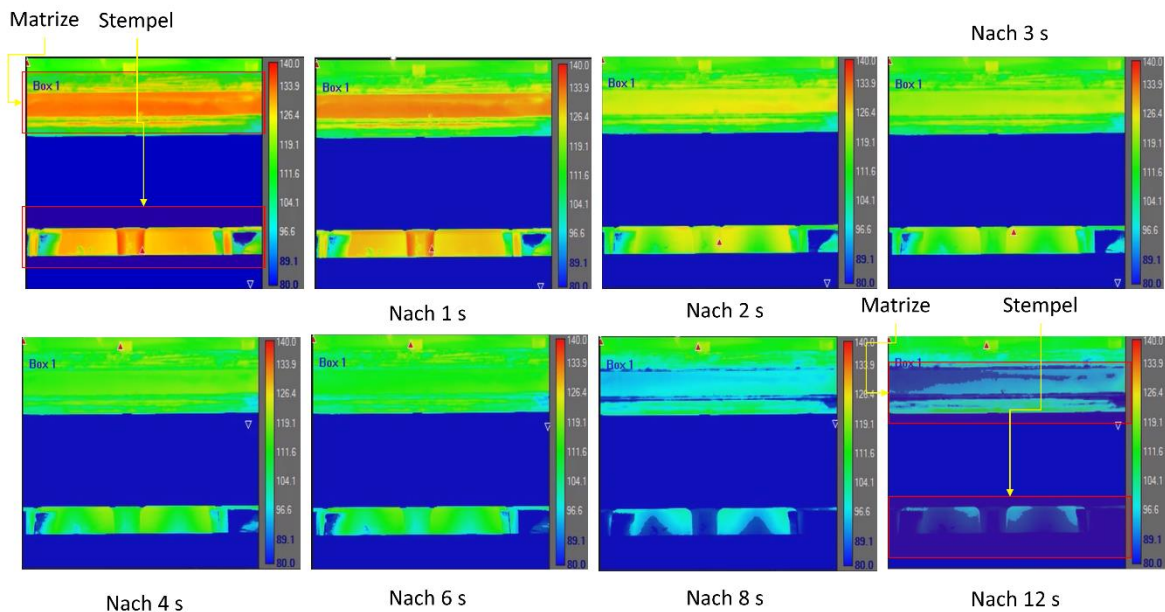


Figure 16: FLIR Infrarot Kamera Untersuchung der Effizienz der Variothermie

Der Hybridpressprozess mit variothermer Prozessführung gliedert sich in mehrere Phasen: Aufheizen des Werkzeugs, Zufahren der Presse, Um- und Umformung, Abkühlung unter Druck und schließlich die Entnahme des Bauteils. Die Umschaltung auf den Kaltbetrieb erfolgt, sobald die Umformtemperatur erreicht ist. Im Temperaturverlauf lassen sich Unterschiede in der Werkzeugwand-, Blech- und LFT-Temperatur erkennen, die den Ablauf und das Ergebnis des Prozesses beeinflussen. Zur Validierung des Prozesses wurden Bauteile unter isothermen und variothermen Bedingungen hergestellt und anschließend 3D-vermessen. Die isotherme Referenz lag bei einer konstanten Werkzeugtemperatur von 80 °C. Variotherme Versuche wurden mit Abkühlung von 80 °C auf 20 °C bzw. 140 °C auf 20 °C durchgeführt. Die 3D-

Vermessungen erfolgten direkt nach der Entnahme, nach vier Tagen Lagerung sowie nach einer thermischen Belastung (180 °C für 30 Minuten).

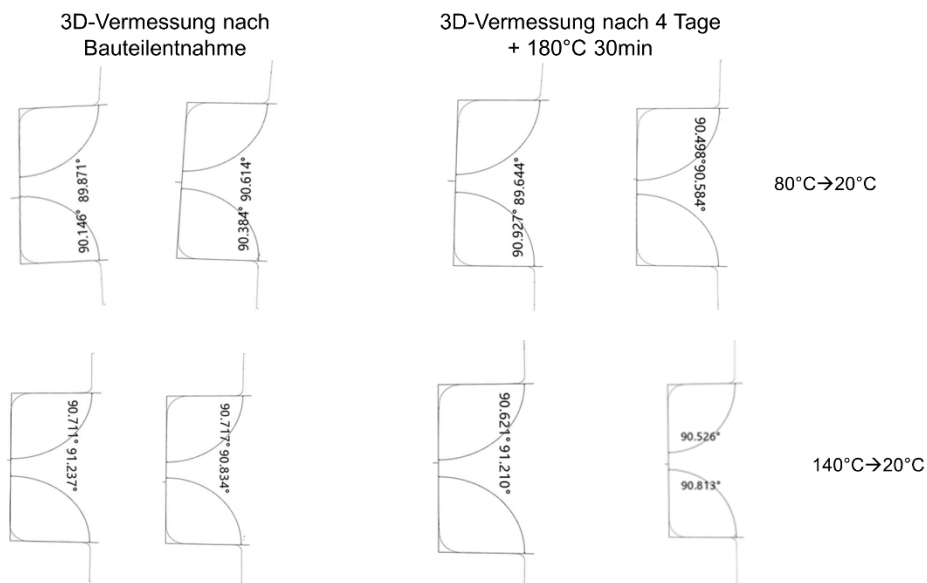


Figure 17: Variotherm hergestellte Bauteile Vermessung nach verschiedenen Zeitpunkten

Die Ergebnisse von 3D-Winkelmessungen an generischen Testkörpern, die unter Verwendung zweier unterschiedlicher variothermer Werkzeugtemperaturprofile gefertigt wurden: 80 °C → 20 °C und 140 °C → 20 °C. Die Messungen erfolgten unmittelbar nach der Entformung sowie erneut nach vier Tagen, gefolgt von einer thermischen Belastung bei 180 °C für 30 Minuten, um die Maßstabilität und geometrischen Veränderungen der geformten Bauteile zu bewerten.

Beim Temperaturprofil 80 °C → 20 °C lagen die gemessenen Winkel direkt nach der Entformung in der Mitte bei 90,146° und 89,871°, an der Seite bei 90,384° und 90,614°. Nach vier Tagen und anschließender thermischer Belastung veränderten sich diese Werte leicht auf 90,927° und 89,644° in der Mitte sowie auf 90,689° und 90,548° an der Seite. Diese moderaten Veränderungen deuten auf eine geringe thermisch bedingte Verformung im Zeitverlauf hin.

Zum Vergleich: Beim Temperaturprofil 140 °C → 20 °C wurden direkt nach der Entformung Winkel von 90,774° und 91,237° in der Mitte sowie 90,774° und 90,834° an der Seite gemessen. Nach der thermischen Alterung änderten sich die Winkel auf 90,621° und 91,270° in der Mitte sowie auf 90,526° und 90,813° an der Seite. Obwohl die Veränderungen insgesamt gering sind, weisen sie auf eine leicht erhöhte Winkeldifferenz infolge der höheren Umformtemperatur und der nachfolgenden Wärmebehandlung hin.

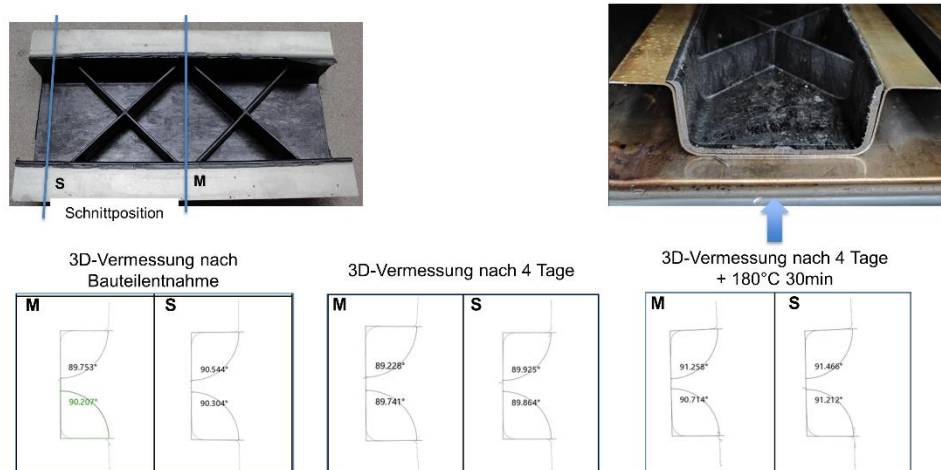


Figure 18: Bauteilverzugs-messung mit Faro-Arm-Scans zu verschiedenen Zeitpunkten – Isotherm WZ Temperatur 80°C

Um den Einfluss der Zeit auf ein Hybridbauteil zu untersuchen, wurde ein U-Profil bei konstanter Werkzeugtemperatur von 80 °C gefertigt. Der Verzug im Bauteil wurde anschließend zu drei verschiedenen Zeitpunkten gemessen, wie in der Figure 18 dargestellt. Es wurden drei Sätze von 3D-Winkelmessungen durchgeführt: unmittelbar nach der Entnahme des Bauteils, nach vier Tagen Alterung bei Raumtemperatur sowie nach vier Tagen und anschließender thermischer Belastung bei 180 °C für 30 Minuten. Unmittelbar nach dem Entformen lagen die gemessenen Winkel bei 89,75° und 90,28° in der Mitte sowie bei 90,54° und 90,30° an der Seite. Nach vier Tagen zeigten sich leichte Winkeländerungen: In der Mitte wurden 89,22° und 89,74° gemessen, an der Seite 89,93° und 90,28°. Diese Ergebnisse deuten auf geringfügige geometrische Veränderungen im Laufe der Zeit hin. Nach der thermischen Belastung (180 °C für 30 Minuten) wurden deutlichere Abweichungen festgestellt. Die Winkel in der Mitte stiegen auf 91,25° und 90,71°, an der Seite auf 91,46° und 91,21°. Diese Ergebnisse zeigen, dass die thermische Alterung einen spürbaren Einfluss auf die Geometrie des hybridgeformten Bauteils hat – insbesondere hinsichtlich einer Vergrößerung der Eckwinkel – und lassen auf Relaxations- oder Verformungseffekte des Materials infolge der erhöhten Temperatureinwirkung schließen.

#### 4.4. Hybridpress Werkzeug – Komplexe Geometrie

Ausgehend von den eigenen Vorarbeiten sollen die bisherigen Werkzeugabdichtungskonzepte (einfaches U-Profil mit homogener Ziehtiefe) auf komplexere Geometrien für reale Bauteile erweitert werden, damit das Hybridpressen in der Industrie angenommen wird. Hierzu wird eine Versuchsgeometrie mit zu beiden Seiten offenen Enden (aber unterschiedlicher Breite) und ungleichmäßiger Ziehtiefe mit im Raum gekrümmten Verlauf entworfen

Das Ziel dieses Arbeitspakets ist die Entwicklung eines Presswerkzeugabdichtungskonzepts unter Verwendung der Erkenntnisse aus den bisherigen Werkzeugen für ein reales Bauteil mit komplexer Geometrie. Dazu muss das Bauteil offene Enden mit unterschiedlicher Breite haben Figure 19. Dieses Bauteil muss außerdem so gestaltet sein, dass es ungleichmäßige Ziehtiefen aufweist.

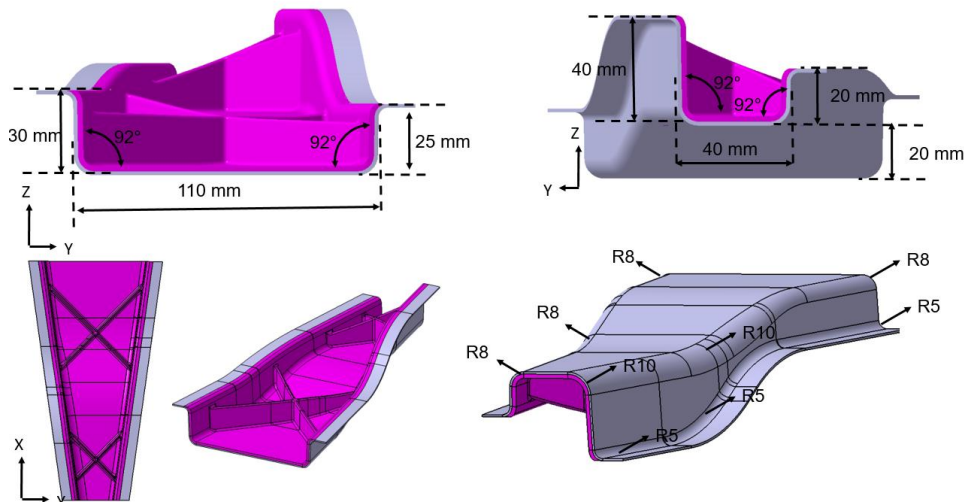


Figure 19: CAD Auslegung Komplexe Geometrie

Dieses Bauteil wurde an Voestalpine (VA) übergeben, um eine Umformsimulation nur am Stahlteil durchzuführen und die Herstellbarkeit zu prüfen. Bei dieser Umformsimulation wurde festgestellt, dass der Radius von 5 mm im Flanschbereich zu einem Versagen führen könnte. Zusätzlich führt ein Entformungswinkel von  $2^\circ$  zu einer Rückfederung von mehr als 1 mm. Es wurde ein Entformungswinkel von  $5^\circ$  vorgeschlagen. Unter Verwendung aller oben genannten Eingaben hat FLB die komplexe Geometrie neu entworfen wie in Figure 20

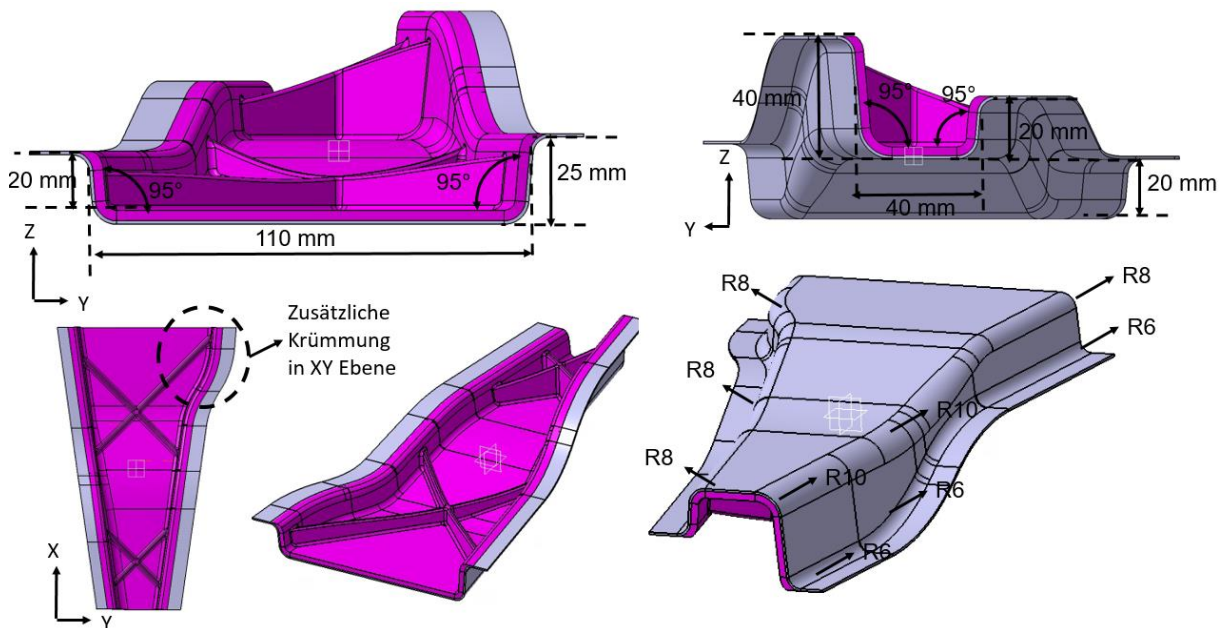


Figure 20: CAD Auslegung Komplexe Geometrie Variant 2

Die neue Variante wurde nochmal an VA übergeben, um die Umformsimulation und Herstellbarkeitsprüfung durchzuführen. Die Ergebnisse der Umformsimulation zeigen, dass die Rückfederung minimal ist und bei 0,5 mm liegt und dass der endgültige Entwurf wie in Figure 20 herstellbar ist.

Nach Abschluss der Umformsimulation durch voestalpine wurde die Wirkfläche von voestalpine erstellt. Auf Basis dieser Wirkfläche konstruierte und fertigte die Firma Schmidt Modellbau das vollständige Umformwerkzeug Figure 21. Aufgrund der komplexen Geometrie war ein Konzept mit rippennahen Kühlkanälen nicht realisierbar. Stattdessen wurden

Kühlkanäle entlang der Bauteillänge in Stempel und Matrize gebohrt. Mit diesem Werkzeug wurde ein Bauteil mit komplexer Geometrie hergestellt, das beidseitig offene Enden aufweist, jedoch unterschiedliche Breiten und eine ungleichmäßige Ziehtiefe besitzt und zudem einen im Raum gekrümmten Verlauf aufweist.

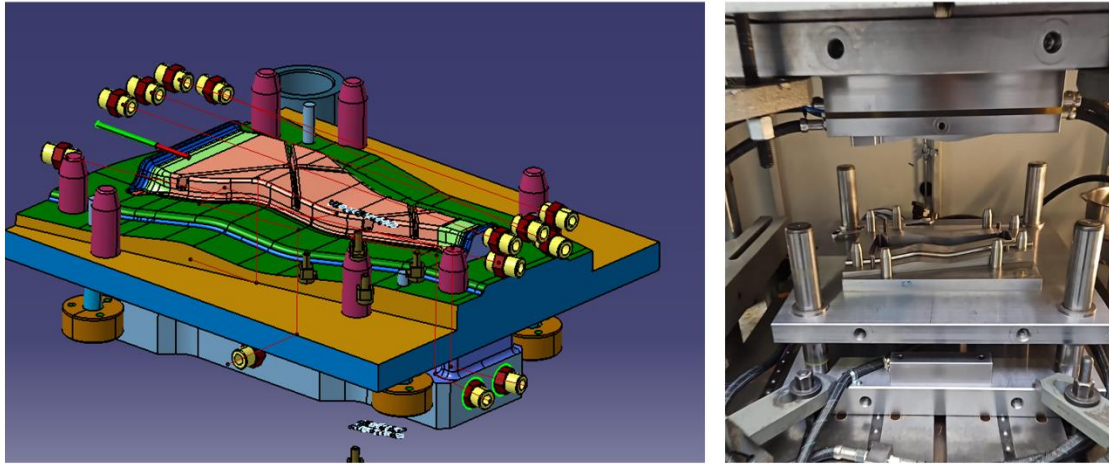


Figure 21: Komplexe Geometrie Werkzeug

Für die Herstellung des Bauteils wurden zwei Stahlsorten verwendet: ein tiefziehfähiger Stahl (DC04) sowie ein hochfester Stahl (DP800). Zur quantitativen Bewertung der Ausformung der hybridgeformten Bauteile kam die Formänderungsanalysesoftware ARGUS der Firma GOM zum Einsatz. Wie in Abbildung 6 dargestellt, konnte das DC04-Blech nahezu vollständig ausgeformt werden, wobei die Abweichung zur CAD-Geometrie weniger als 0,2 mm betrug. Im Gegensatz dazu zeigte das DP800-Blech aufgrund seiner höheren Festigkeit deutlich größere Abweichungen von bis zu 4 mm, insbesondere im Bereich der Bauteilradien.

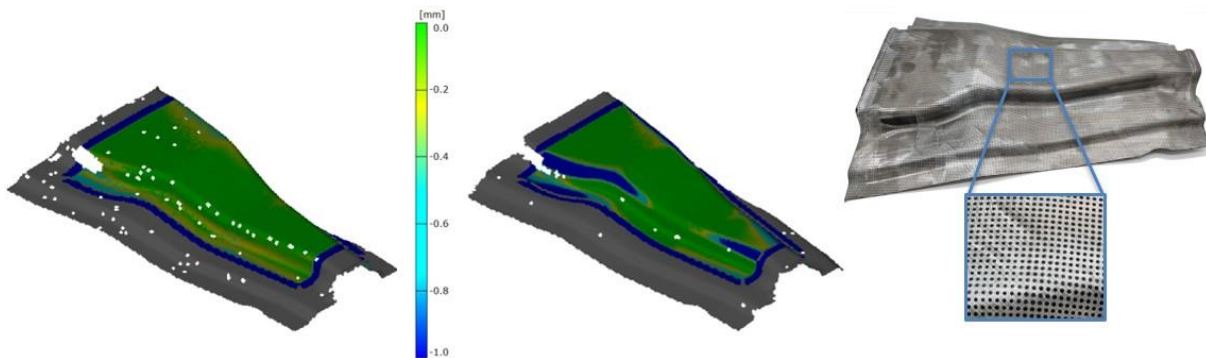


Figure 22: Formänderungsanalyse der Komplexe Geometrie Bauteil mithilfe GOM Argus system

Ähnlich wie bei den Untersuchungen mit dem generischen Testkörper wurde auch die komplexe Bauteilgeometrie mithilfe eines Faro-Arm-Scanners analysiert. Dazu erfolgten 3D-Vermessungen an verschiedenen Positionen des Bauteils und zu zwei definierten Zeitpunkten: zum einen unmittelbar nach der Entnahme aus dem Umformwerkzeug und zum anderen nach der Exposition in einer simulierten KTL-Umgebung. Ziel war es, mögliche geometrische Veränderungen infolge thermischer Belastung im Beschichtungsprozess zu erfassen und auszuwerten. Es ist erkennbar, dass in allen untersuchten Schnittbereichen ein Winkelanstieg

von mindestens 2° vorliegt, was auf eine Ablösung und den Abbau von Eigenspannungen hinweist.

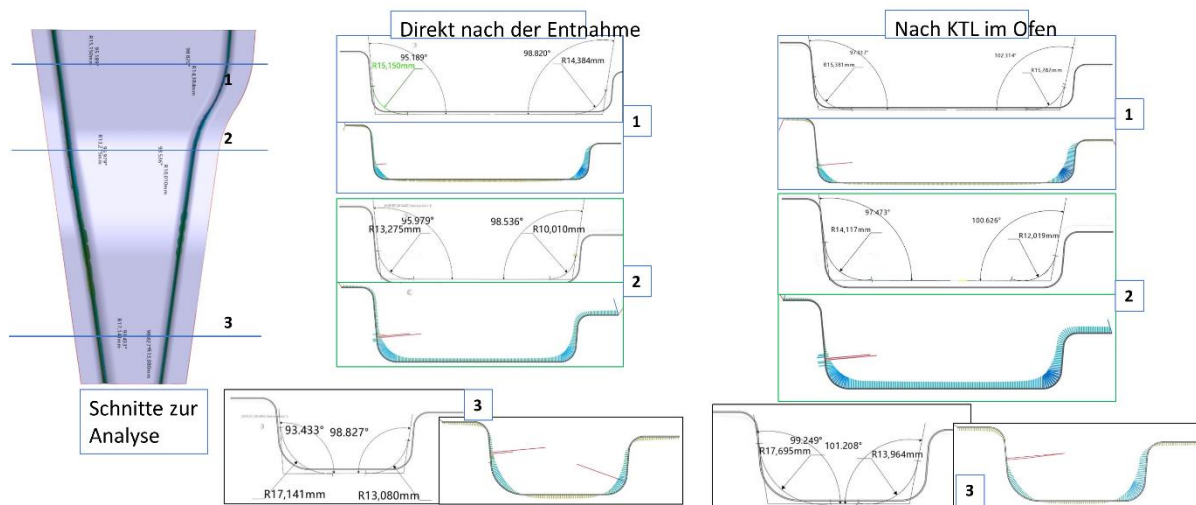


Figure 23: Schnittanalyse mit Faro Arm Messung - Vor und Nach simulierter KTL

#### 4.5. Hybridpress Werkzeug – Demonstrator Bauteil

Das finale Werkzeug in diesem Projekt ist das Hybridpresswerkzeug zur Herstellung des Demonstratorbauteils. Bei dem Demonstratorbauteil handelt es sich um einen Fahrwerkslängslenker von VW. Eine ausführliche Darstellung zur Entwicklung des hybriden Längslenkers ist in Kapitel ... beschrieben. Nachdem das endgültige Design des hybriden Längslenkers festgelegt war, wurde – analog zur Entwicklung des komplexe Geometrie Bauteil – eine Reihe von Umformsimulationen durchgeführt, um die Umformbarkeit zu überprüfen und schließlich die Wirkflächen Figure 24 für das Werkzeug abzuleiten. Die Umformsimulationen wurden von voestalpine durchgeführt.

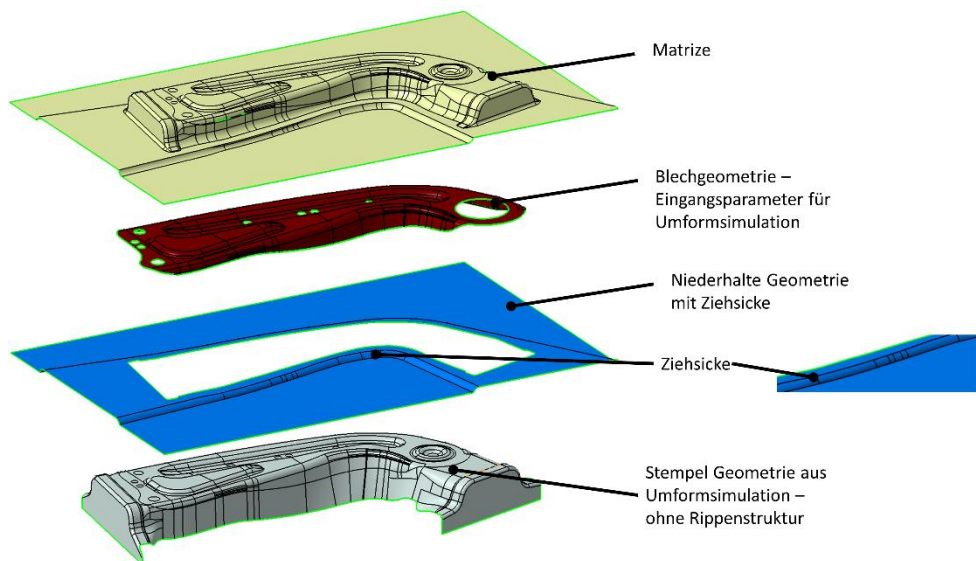


Figure 24: Wirkflächen CAD nach der Umformsimulation

Nachdem die Wirkflächen von voestalpine und das finale CAD-Modell der Rippenstruktur vom FLB bereitgestellt wurden, wurde das finale Presswerkzeug – mit im Stempel integrierter Rippenstruktur sowie Kühlkanälen in Matrice und Stempel – von der Firma Schmidt Modellbau

(SMB) konstruiert, wie in Figure 25 zu sehen ist und die Firma Grunewald wurde beauftragt, das Werkzeug zu fertigen.

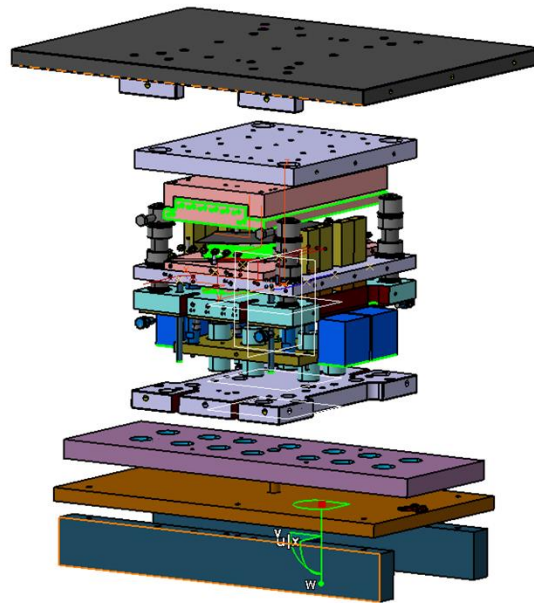


Figure 25: CAD Darstellung Demonstrator Bauteil Werkzeug

Die Darstellung Figure 26a zeigt eine Detailansicht der wichtigsten Komponenten des Werkzeugs. Die Matrize und die Niederhalteplatte sind Erweiterungen der Wirkflächen, die aus der Umformsimulation abgeleitet wurden. Der Stempel folgt ebenfalls der Kontur der gelieferten Wirkflächen, enthält jedoch zusätzlich die Rippenstrukturen, wie sie im optimierten CAD-Modell des Längslenkers vorgesehen sind. Figure 26b zeigt die in Stempel und Matrize eingebrachten Kühlkanäle zur Temperierung mit Wasser.

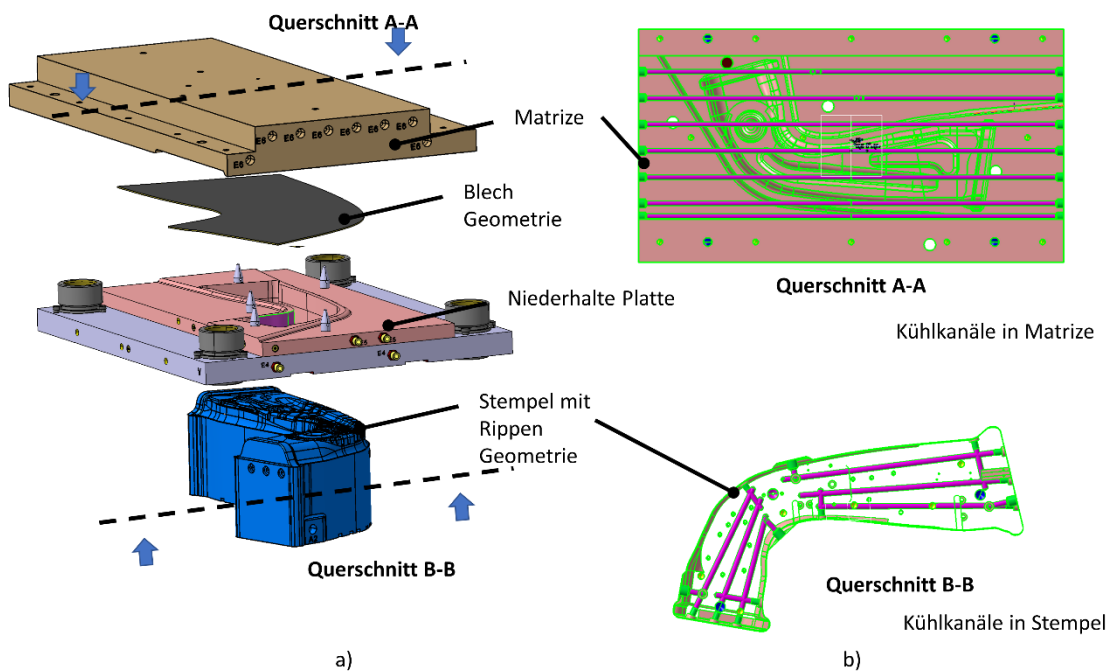


Figure 26:a) Detail Ansicht von Matrize, Niederhalte, Stempel b) Kühlkanäle in Stempel und Matrize

Mit diesem Werkzeug wurde der Längslenker hergestellt. Die Einzelheiten zur Fertigung werden in Kapitel ... erläutert.

## 5. Auslegungsmethodik Stahl-LFT Bauteile

Um das Leichtbaupotenzial von Stahl-LFT-Hybridbauteilen voll ausschöpfen zu können, ist es erforderlich, bereits in der frühen Konzeptphase über ausreichend präzise Berechnungsmodelle für sämtliche im Hybridbauteil verwendeten Werkstoffe zu verfügen. Aus diesem Grund werden zunächst umfassende Materialcharakterisierungen durchgeführt – mit besonderem Fokus auf den Haftvermittler sowie den PA6 LFT40-Compound der Firma Weber Fibertech. Die dabei gewonnenen mechanischen Kennwerte dienen anschließend als Eingabedaten für FEM-Simulationen, sowohl zur linearen, statischen Optimierung der Bauteilgeometrie als auch für nichtlineare Validierungsrechnungen.

Der methodische Ansatz sieht vor, zunächst mittels isotroper, linear-statischer FEM-Berechnungen eine geeignete und lastgerechte Geometrie des Bauteils zu entwerfen. In einem zweiten Schritt erfolgt dann die detaillierte Betrachtung durch nichtlineare FEM-Analysen, bei denen insbesondere die Festigkeit der Verbindung über den Haftvermittler sowie das nichtlineare Materialverhalten des LFT berücksichtigt werden. Die Gültigkeit dieses zweistufigen Auslegungskonzepts wird durch experimentelle Festigkeitsuntersuchungen an einem generischen Stahl-LFT-Hybridquerträger überprüft.

Im Anschluss werden die topologischen Optimierungen für die Demonstratorbauteile durchgeführt. In der Regel werden FEM-Simulationen auf einem vereinfachten Niveau durchgeführt, wobei Kunststoffkomponenten häufig durch isotrope Materialmodelle dargestellt werden. Diese Vorgehensweise ist jedoch ungenau und kann zu erheblichen Abweichungen in den Ergebnissen von Leistungssimulationen führen.

Aus diesem Grund wurde im Rahmen dieses Projekts eine Simulationskette entwickelt, die es ermöglicht, Prozesssimulationen systematisch durchzuführen und anschließend mit Hilfe von CT-Scans zu validieren. Ziel ist es, die vorhergesagte und validierte Faseranisotropie in die FEM-Simulationen zu integrieren, um realitätsnähere und belastbare Aussagen zum Bauteilverhalten treffen zu können.

### 5.1. Material Charakterisierung LFT – Zugversuch

Zur Charakterisierung des LFT wurden PA6LFT40 Platten gepresst. Die Platte wurde laut EATC Norm hergestellt Figure 27a. Von diesen Platten wurden nach DIN EN ISO 527-2 Typ 1A und 1BA Proben in verschiedenen Richtungen mittels Wasserstrahlschneiden gefertigt. Die Proben werden so weit wie möglich von der Stelle entfernt platziert, an der das Extrudat in das Presswerkzeug eingelegt wird. Dadurch wurde sichergestellt, dass die Faserbewegung im Probenbereich stabil ist.

Die Proben wurden in einer Universalprüfmaschine (Ibertest TestCom-50) unter Verwendung eines Clip-on-Extensometers getestet, um die lokalen Dehnungen zu erfassen Figure 27b. Ibertest Testcom verfügt außerdem über eine Temperierkammer, die mit einer Temperatureinheit verbunden ist, mit der Prüfungen bei verschiedenen Temperaturen durchgeführt werden können. In diesem Fall wurden die Prüfungen bei Raumtemperatur, -40 °C und +80 °C durchgeführt.

Wie in Figure 27a zu erkennen ist, wurden 1 cm × 1 cm große Proben aus dem Plattenbereich entnommen, der weit entfernt vom Einlegebereich des Extrudats liegt. Diese Proben dienen der Durchführung von CT-Scan-Untersuchungen. Die gewonnenen CT-Daten werden anschließend verwendet, um die Simulation des Fließpressprozesses hinsichtlich der Faserorientierung zu validieren. Dadurch kann überprüft werden, inwieweit die Simulation den realen Faserverlauf im Bauteil korrekt abbildet.

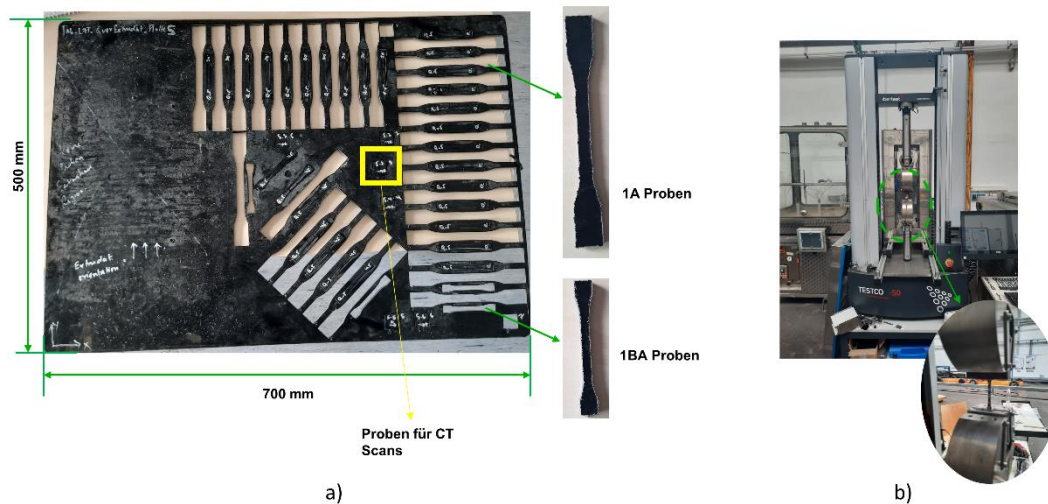


Figure 27:a) EATC Norm PA6LFT40 Platte mit Proben geschnitten b) Ibertest Testcom Setup

### Einfluss der Faserausrichtung

Die drei Diagramme zeigen das mechanische Verhalten von faserverstärkten thermoplastischen Proben bei unterschiedlichen Orientierungen der Fasern zur Fließrichtung: 0°, 45° und 90° Figure 28. Es wird deutlich, dass die Faserausrichtung einen entscheidenden Einfluss auf Festigkeit und Steifigkeit hat.

Bei 0° zur Fließrichtung (Figure 28a) – also parallel zur Hauptorientierung der Fasern – erreichen die Proben die höchsten Spannungswerte, da die Fasern die Last optimal aufnehmen können. Bei 45° zur Fließrichtung (Figure 28b) verringert sich dieser Effekt: Die Verstärkungswirkung der Fasern nimmt ab, was sich in einer reduzierten Festigkeit, aber einer höheren Dehnbarkeit zeigt. Bei 90° zur Fließrichtung (Figure 28c) – also senkrecht zur Faserausrichtung – ist die Verstärkungswirkung am geringsten, und die mechanische Leistungsfähigkeit ist entsprechend stark reduziert. Die Spannungswerte in dieser Richtung sind über alle Temperaturbereiche hinweg die niedrigsten.

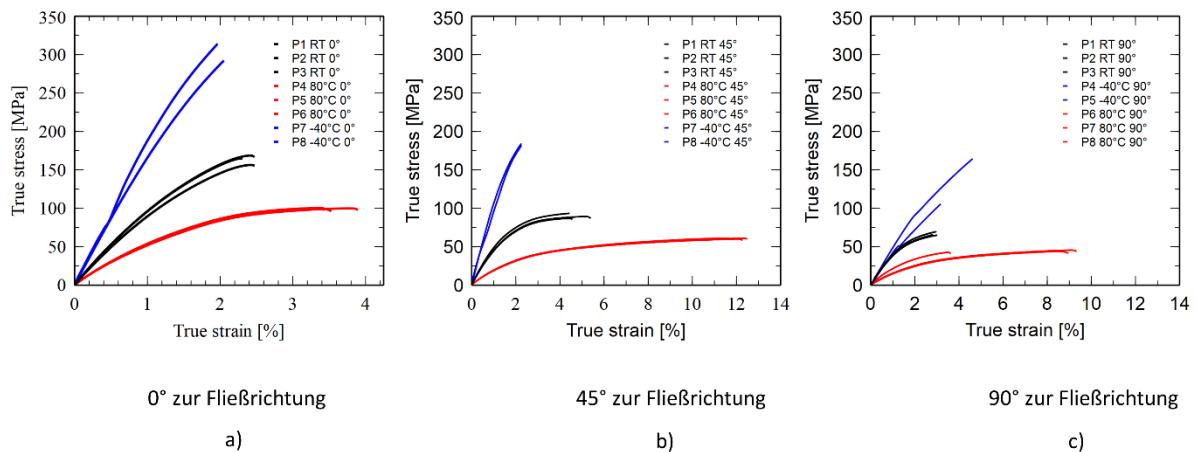


Figure 28: Zugversuche von LFT Typ 1-A Proben bei verschiedenen Temperaturen a) 0° b) 45° c) 90°

### Einfluss der Temperatur

Zusätzlich zur Orientierung wirkt sich auch die Temperatur stark auf das Materialverhalten aus. Unabhängig von der Faserrichtung zeigt sich, dass niedrigere Temperaturen zu einer höheren Festigkeit und Steifigkeit führen, während hohe Temperaturen das Material deutlich weicher und weniger tragfähig machen. Bei  $-40\text{ °C}$  (blaue Kurven) treten in allen Orientierungen deutlich höhere Spannungsniveaus auf. Dies ist auf ein spröderes, aber steiferes Verhalten zurückzuführen. Die Raumtemperatur (schwarze Kurven) stellt ein mittleres Niveau dar. Bei  $80\text{ °C}$  (rote Kurven) sinken die Spannungswerte in allen Fällen deutlich, was auf die thermisch bedingte Erweichung des Kunststoffmatrixmaterials zurückzuführen ist.

Ähnlich wie die Typ-1A-Proben wurden auch Typ-1BA-Proben getestet. Die Ergebnisse dieser Versuche zeigten ein vergleichbares Verhalten zu den Typ-1A-Proben in allen Faserrichtungen und wiesen ebenfalls eine ähnliche Reaktion auf Temperaturänderungen auf wie im Figure 29.

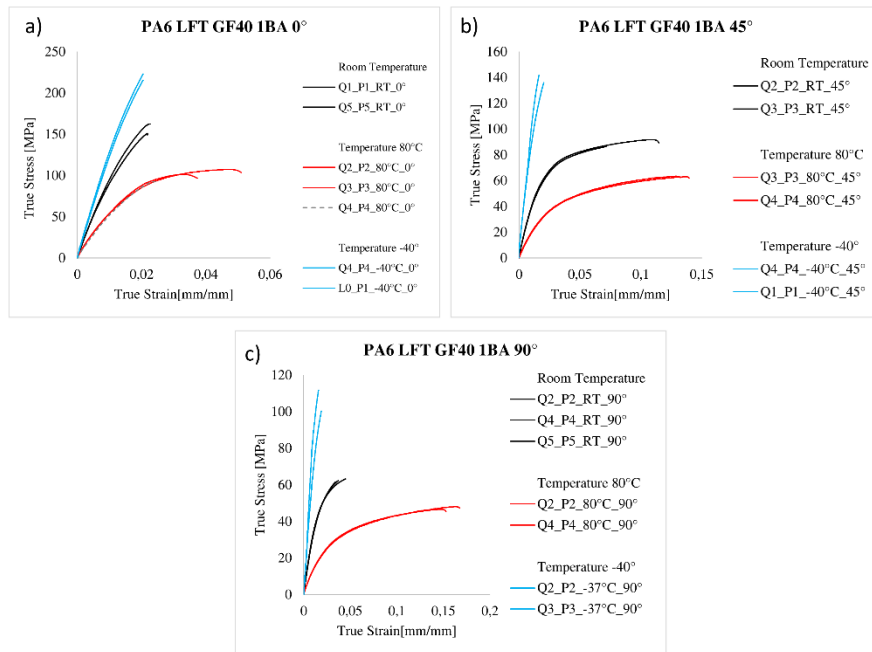


Figure 29: Zugversuche von LFT Typ 1BA Proben bei verschiedenen Temperaturen a) 0° b) 45° c) 90°

## 5.2. Material Charakterisierung – Schwingversuche LFT

Zur Beurteilung der Betriebsfestigkeit von PA6GF40 wurden Dauerschwingversuche der Spannungsverhältnisse  $R = 10$ ;  $R = -1$ ;  $R = 0$  und  $R = 0,5$  an 0° und 90° zur Fliesrichtung entnommenen Proben durchgeführt. Die Ergebnisse werden in Wohler Diagrammen sowie im Zeitfestigkeitsschaubild dargestellt. Für die Versuche im reinen Zugbereich  $R = 0$  und  $R = 0,5$  werden Schulterproben der Form DIN 527-2 Typ 1B verwendet. Für Versuche mit Druckanteil  $R = -1$  und  $R = 10$  werden Rechteckproben der Abmessungen 115 mm x 10 mm verwendet. Um ein Knicken der Proben unter Druckkraft zu vermeiden, werden die Proben mit einem Abstand der Spannbacken von 30 mm eingespannt. Die Zugfestigkeit der Probe liegt etwa um den Faktor drei unterhalb der Knickkraft. Auch wenn die im Druckversuch relevante Druckfestigkeit des Werkstoffes höher als die Zugfestigkeit ist (z.B. um den Faktor 1,5), kann damit ein Ausknicken der Proben und damit ein vorzeitiges Versagen im Druckversuch ausgeschlossen werden.

Die zu prüfenden Spannungsamplituden müssen für jede Versuchsreihe individuell gewählt werden. Diese werden dabei möglichst so gewählt, dass die höchste gewählte Spannungsamplitude zu einem Versagen bei einer Schwingspielzahl zwischen  $10^3$  und  $10^4$  eintritt und die niedrigste gewählte Spannungsamplitude zum Versagen im Bereich von  $10^5$  und  $10^6$  Schwingspielen eintritt. Die restlichen Lastniveaus werden möglichst gleichmäßig dazwischen verteilt. Pro Spannungsamplitude werden zwei Proben geprüft, nach Möglichkeit aus zwei verschiedenen Platten.

Die Druckversuche werden auf einer servopneumatischen Prüfmaschine vom Typ DynaMess TP 10 LCF durchgeführt. Dieser Prüfstand erlaubt dynamische Zugdruckversuche bis zu maximal 10 kN bei einer Prüffrequenz von maximal 10 Hz. Die Kühlung der Proben erfolgt durch Anströmung mit Druckluft bei Raumtemperatur durch zwei Düsen mit Durchmesser 5 mm, welche sich in einem Abstand von 50 mm von der Probe entfernt befinden. Der Volumenstrom beträgt insgesamt ca. 200 l/min.

Erwartungsgemäß ist die Zeitfestigkeit entlang der Fliessrichtung deutlich höher als quer zur Fliessrichtung. Weiterhin zeigt sich im zugschwellenden Bereich ( $R = 0$ ) sowohl für  $0^\circ$  als auch für  $90^\circ$  eine geringe Streuung. Bei wechselnder Beanspruchung ( $R = -1$ ) nimmt die Streubreite unter  $0^\circ$  geringfügig zu; unter  $90^\circ$  sehr deutlich.

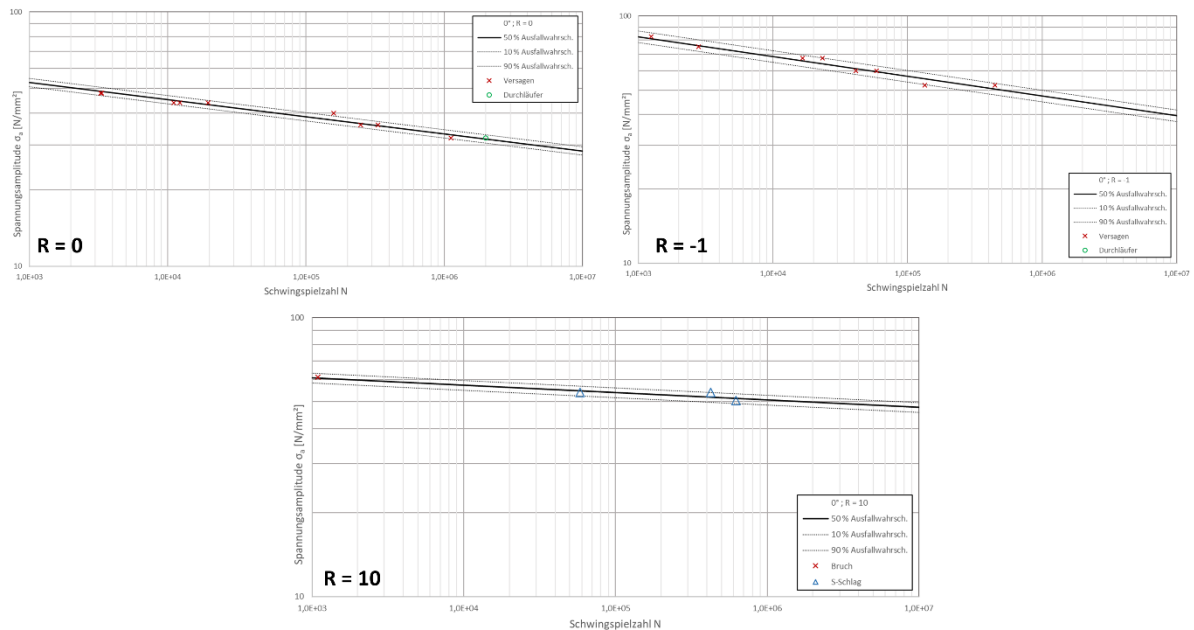


Figure 30: Wöhler-Diagramm. Entnahmewinkel  $0^\circ$ . Spannungsverhältnis  $R = 0, -1, 10$

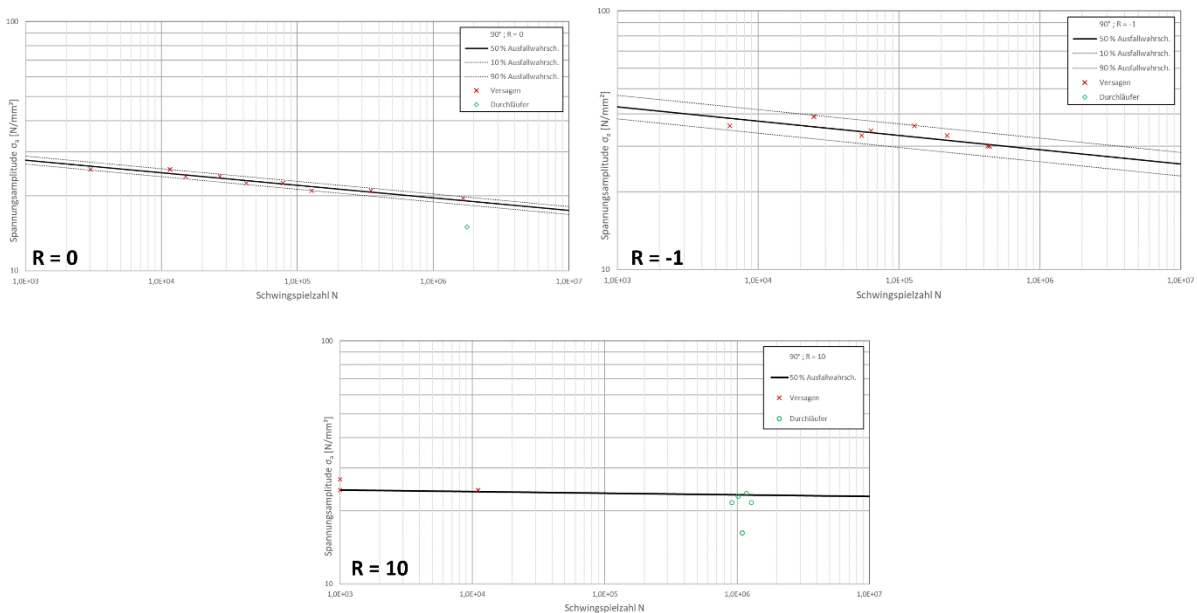


Figure 31: Wöhler-Diagramm. Entnahmewinkel  $90^\circ$ . Spannungsverhältnis  $R = 0, -1, 10$ .

Die Versuchsreihe für  $0^\circ$ ,  $R = 10$  lieferte im Gegensatz zu allen anderen Versuchsreihen neben einem Bruch der Probe als Versagensmodus auch die Ausbildung eines S-Schlages, welcher zum Versuchsabbruch führt. Proben, welche durch S-Schlag ausgefallen sind, weisen kein erkennbares Materialversagen durch Rissbildung auf. Es ist davon auszugehen, dass diese Proben bei geeignetem Prüfaufbau deutlich höhere Schwingspielzahlen bis zum Versagen

ertragen wurden. Die dargestellte Kurve kann daher als leichte Unterschätzung des Werkstoffes, besonders bei hohen Schwingenspielzahlen, betrachtet werden.

Im Fall von  $90^\circ$ ,  $R = 10$  konnten nur Ausfälle bei sehr geringen Schwingenspielzahlen oder aber Durchläufer bei nur leicht reduzierter Spannung beobachtet werden. Es ist daher von einer annähernd horizontal verlaufenden Wöhlerlinie auszugehen wie z.B. im Bereich der „Dauerfestigkeit“ bei Stählen. Die Kurve liegt im Bereich geringer Schwingenspielzahlen unterhalb der verzeichneten Ausfälle und im Bereich von  $10^6$  Schwingspielen im Bereich der höheren verzeichneten Durchlaufzeiten. Sie stellt damit ebenfalls eine konservative Abschätzung des Werkstoffverhaltens dar.

Die Wöhler-Diagramme beider Entnahmerichtungen lassen sich jeweils zu einem gemeinsamen Zeitfestigkeitsschaubild zusammenfassen. Dabei wird vereinfachend angenommen, dass die Druckfestigkeit der Zugfestigkeit entspricht. Tatsächlich ist jedoch davon auszugehen, dass die Druckfestigkeit in der Regel höher ist als die Zugfestigkeit. Auf Grundlage der ermittelten Punkte aus den Wöhlerkurven kann anschließend ein Haigh-Diagramm erstellt werden, das die Abhängigkeit der Bauteillebensdauer von Mittel- und Spannungsamplitude veranschaulicht.

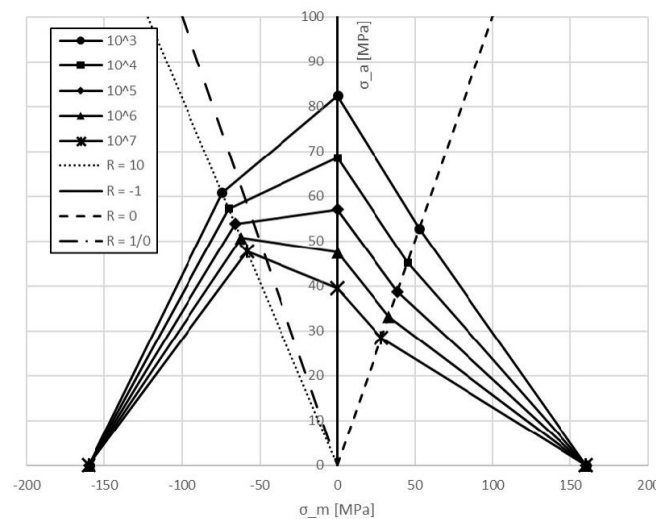


Figure 32: Haigh-Diagramm. PA6GF40  $0^\circ$  Entnahmerichtung

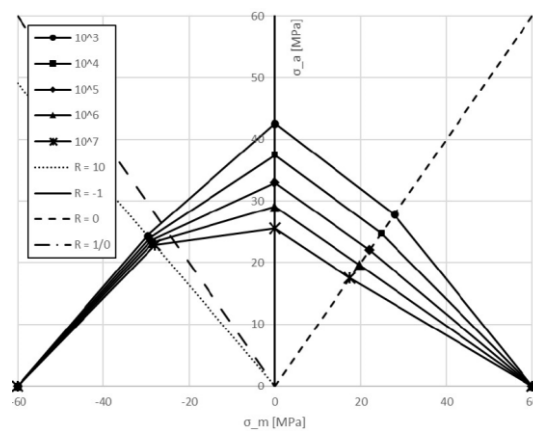


Figure 33: Haigh-Diagramm. PA6GF40.  $90^\circ$  Entnahmerichtung.

### 5.3. Material Charakterisierung – Vestamelt Haftvermittler

Als Haftvermittler kommt das Copolyamid Vestamelt Hylink der Firma Evonik zum Einsatz. Im Rahmen dieses Forschungsprojekts wird es in Form einer Pulverbeschichtung auf die Stahlbleche appliziert. Zur Charakterisierung des Haftvermittlers wurden Scherzug- und Kopfzugproben hergestellt mithilfe des Werkzeug am FLB vorhanden war. Die Probenabmessungen sind in Figure 34 dargestellt und basiert auf DIN EN ISO 1465.

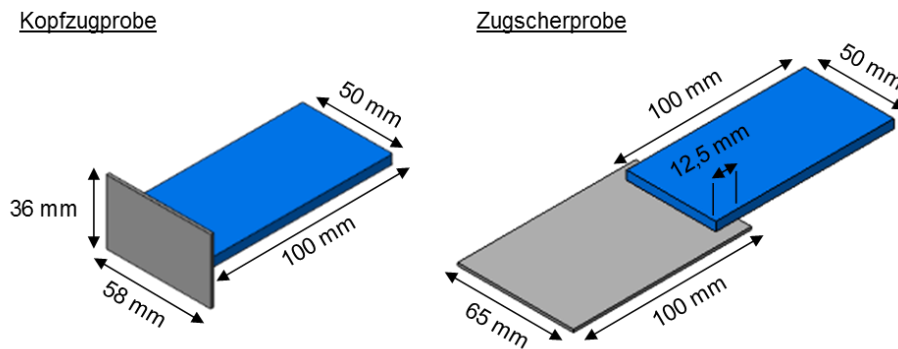


Figure 34: Probenform zur Charakterisierung der Verbundfestigkeit[10]

Zur Herstellung der Scherzug- und Kopfzugproben wurde das 1,5 mm dicke Aluminiumblech zunächst auf etwa 200 °C vorerwärmt, um die Aktivierungstemperatur des Haftvermittlers zu erreichen. Anschließend wurde das vorerwärmte Blech manuell in das Formwerkzeug eingelegt. Das zuvor abgewogene GMT-Material wurde in das Werkzeug eingebracht und unter einem Druck von 250 bar verpresst, sodass es über den Haftvermittler hinwegfließen und eine stoffschlüssige Verbindung mit dem Aluminium eingehen konnte.

Für beide Probenarten wurde das GMTex-Material auf eine Größe von  $50 \times 100 \times 4,5 \text{ mm}^3$  zugeschnitten. Die resultierende Klebefläche betrug  $625 \text{ mm}^2$  bei den Scherzugproben und  $225 \text{ mm}^2$  bei den Kopfzugproben. Die Scherzugversuche wurden mit einer Ibertest TESTCOM 50 Universalprüfmaschine durchgeführt. Zur Erfassung der Dehnung kam ein Clip-On-Extensometer mit einer Messlänge von 50 mm zum Einsatz Figure 35.



Figure 35: Scherzug Versuch im Ibertest

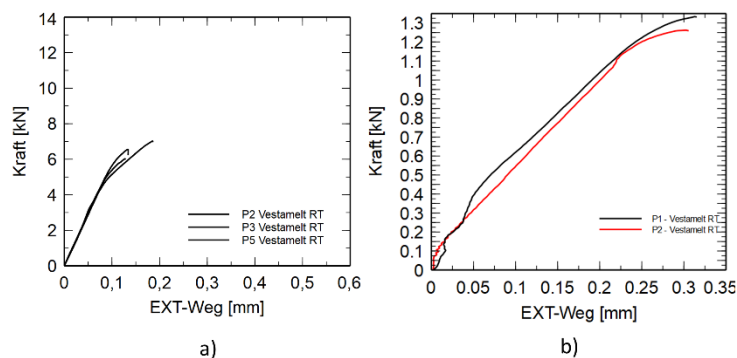


Figure 36: Vestamelt Haftvermittler Verbundeigenschaften a) Scherzug b) Kopfzug

Die Kraft-Weg Kurve der Scherzug- und Kopfzugversuche sind in Figure 36 dargestellt. Die Festigkeit des Haftvermittlers Vestamelt betrug im Scherzugversuch etwa 12 MPa und im Kopfzugversuch rund 9 MPa.

#### 5.4. Quasi-Statistische und Dynamische drei Punkt Biegung des generischen Testkörpers

Nachdem die Materialcharakterisierung abgeschlossen war, wurden sowohl hybride U-Profile als auch reine LFT-Profile hergestellt, um entsprechende Lastfalluntersuchungen durchzuführen. In diesem Kapitel wurden die U-Profile quasistatischen sowie dynamischen Drei-Punkt-Biegeversuchen unterzogen, um ihr strukturelles Verhalten unter unterschiedlichen Belastungsbedingungen zu analysieren.

Zunächst wurden quasistatische Drei-Punkt-Biegeversuche mithilfe einer Zwick-Universalprüfmaschine durchgeführt. Dabei kamen unterschiedliche Varianten der hergestellten U-Profile zum Einsatz: reine LFT-Profile, reine Stahlprofile mit angeschweißtem Schließblech sowie hybride Stahl-LFT-Profile mit ebenfalls angeschweißtem Stahlschließblech. Die Probekörper wurden auf zwei Auflagen mit einem Abstand von 300 mm

positioniert. Der Impaktor wirkte mit einer Vorschubgeschwindigkeit von 2 mm/min exakt in der Mitte des U-Profiles ein. Ziel der Versuche war es, das Biegeverhalten der unterschiedlichen Werkstoffkonzepte unter quasistatischer Belastung systematisch zu vergleichen.

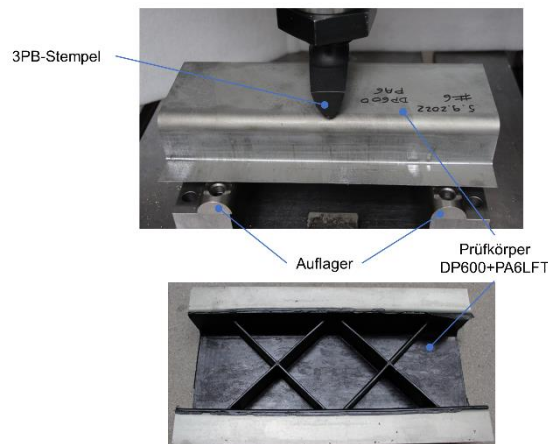


Figure 37: Quasi-Static three point Biegung Versuchsaufbau

Die quasistatischen Versuche wurden an allen vier U-Profil-Varianten durchgeführt, um die spezifische Energieaufnahme im Endzustand zu bewerten. Die untersuchten Varianten umfassten: reines LFT, reinen Stahl mit Schließblech, hybriden Stahl-LFT-Träger mit Schließblech sowie hybriden Stahl-LFT-Träger ohne Schließblech. Ziel der Tests war es, das strukturelle Verhalten und insbesondere die Energieabsorptionsfähigkeit der einzelnen Material- und Konstruktionskonzepte miteinander zu vergleichen und deren Eignung für tragende, energieabsorbierende Bauteile zu bewerten.

SEA bis 25mm Durchbiegung		
	Bauteilmasse [kg]	SEA [kJ/kg]
Kunststoffträger	0,3	0,174
Hybridträger ohne SB	0,861	0,379
Hybridträger mit SB	1,215	0,839
Stahlträger ohne SB	0,531	0,04
Stahlträger mit SB	0,9	0,181

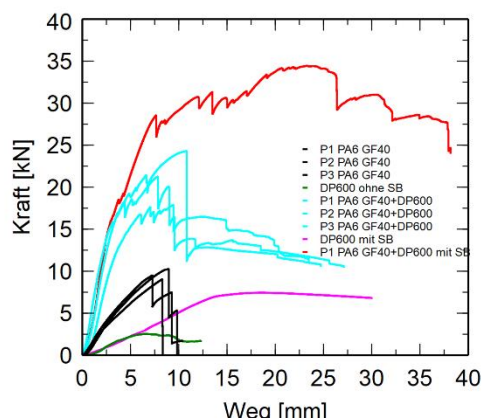


Figure 38: Kraft-Weg Kurve mit Spezifische Energie Absorption (SEA)

Figure 38 zeigt alle Kraft-Weg-Kurven der durchgeführten Versuche. Es ist zu erkennen, dass das reine Stahl-U-Profil mit Schließblech eine maximale Kraft von etwa 7 kN erreicht, während das reine LFT-U-Profil eine Spitzenkraft von rund 10 kN aufweist. Der hybride U-Profilträger ohne Schließblech zeigt hingegen bereits eine deutlich höhere maximale Kraft von etwa 25 kN

– also rund 10 kN mehr als die Summe der beiden Einzelkomponenten (Stahl und LFT) zusammen. Am höchsten liegt die maximale Kraft beim hybriden U-Profil mit Schließblech, das eine Spitzkraft von etwa 35 kN erreicht. Diese übertrifft die kombinierte Tragfähigkeit der Einzelsysteme deutlich und unterstreicht den strukturellen Synergieeffekt, der durch die Kombination von Stahl, LFT und Schließblech erzielt wird. Der gleiche Trend zeigt sich auch bei der Berechnung der spezifischen Energieaufnahme (SEA). Das hybride U-Profil weist eine deutlich höhere SEA auf als die einzelnen Komponenten für sich genommen. Dies verdeutlicht das hohe Energieabsorptionspotenzial der Hybridstruktur und bestätigt die Synergieeffekte, die durch die Kombination der Materialien erzielt werden.

### 5.5. Rheologische Charakterisierung des PA6LFT40 Material

Die rheologischen Eigenschaften der Kunststoffschmelze spielen eine entscheidende Rolle für das Formfüllverhalten beim Fließpressen, da sie direkten Einfluss auf den Verlauf und die Höhe der benötigten Presskraft sowie auf die Ausbildung der Faserorientierungen im Bauteil haben. Untersuchungen zeigen, dass insbesondere die Viskosität der Kunststoffmatrix, die Anfangsorientierung der Fasern im LFT-Extrudat sowie der Faservolumengehalt zentrale Einflussgrößen für das Fließverhalten sind. Ein höherer Faservolumengehalt führt – bei ansonsten konstanten Prozessparametern – zu einer deutlich höheren Presskraft. Während des Plastifizierungsprozesses orientieren sich die Fasern vorwiegend in Fließrichtung der Schmelze, wobei die Ausgangsorientierung der Fasern maßgeblich die spätere Endorientierung im Bauteil beeinflusst.

Zur möglichst realitätsnahen Abbildung dieser rheologischen Vorgänge wird in der Prozesssimulation mit Autodesk Moldflow eine Reihe spezialisierter Materialmodelle verwendet, um unterschiedliche physikalische Eigenschaften zu beschreiben:

**PvT-Modell (modifiziertes 2-Domänen-Tait-Modell):** Dieses Modell wird eingesetzt, um die Dichte des Materials in Abhängigkeit von Temperatur und Druck zu berechnen. Die resultierenden Dichteveränderungen wirken sich direkt auf die Strömungssimulation aus, etwa auf die Füllgeschwindigkeit und den Druckverlauf.

**Viskositätsmodell (Modified Cross-WLF):** Das Cross-WLF-Modell beschreibt die Viskosität thermoplastischer Materialien unter Berücksichtigung von Temperatur, Schergeschwindigkeit und Druck. Es liefert eine realitätsnahe Abbildung des Fließverhaltens unter prozessrelevanten Bedingungen.

**Viskoelastizitätsmodell (White-Metzner):** Dieses Modell ermöglicht die Simulation des nichtlinearen viskoelastischen Verhaltens von Polymeren und bildet sowohl die elastischen als auch viskosen Anteile des Werkstoffs ab.

**Faserorientierungsmodell (ARD-RSC):** Zur Vorhersage der Faserorientierungen wird ein erweitertes anisotropes Rotationsdiffusionsmodell (ARD-RSC) verwendet, das zusätzlich mit einem verzögerten Hauptstratenmodell kombiniert ist. Dieses Modell erlaubt eine präzise Berechnung der Faserverteilungen in faserverstärkten Thermoplasten.

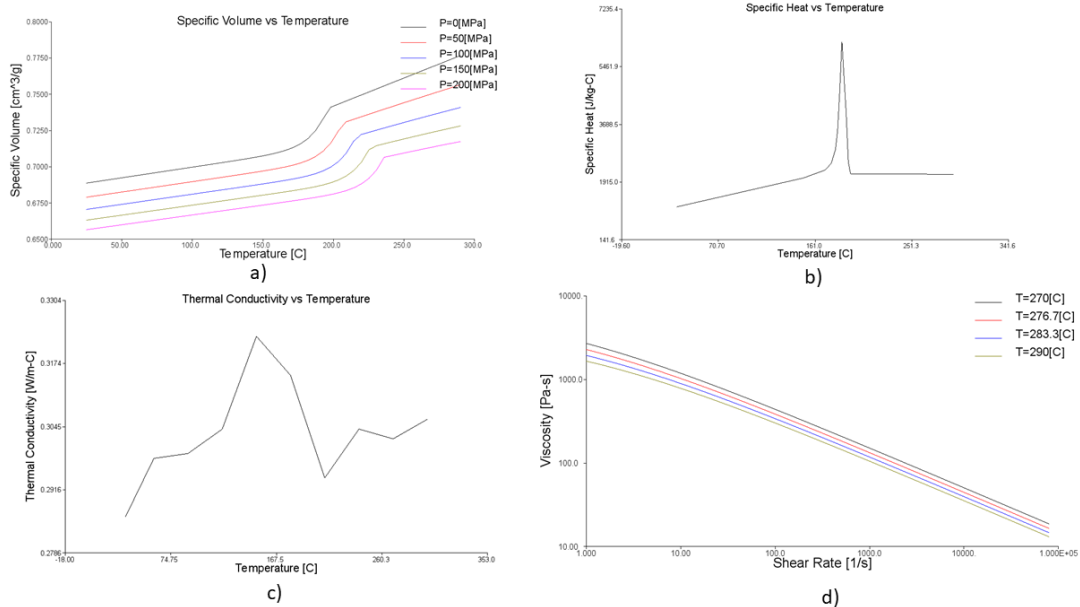


Figure 39: Rheologische Charakterisierung des Compounds PA6 LFT40 a) PVT Diagramm b) Wärmekapazität vs Temperatur c) Thermische Leitfähigkeit vs Temperatur d) viskosität vs Temperatur

Figure 39 zeigt die rheologische Charakterisierung des PA6 LFT40, welche als Eingangsgrößen für die Fließpress-Simulation mit Autodesk Moldflow genutzt werden und für die weiteren LFT-Fließpress-Simulationen im Projekt genutzt werden.

## 6. Demonstrator Bauteil Entwicklung und FE-Modellierung Methodenentwicklung

Die Figure 40 zeigt eine schematische Darstellung des virtuellen Entwicklungsprozesses hybrider Bauteile. Der Prozess beginnt mit der Materialcharakterisierung, bei der die mechanischen Eigenschaften der beteiligten Werkstoffe erfasst werden. Auf Basis dieser Daten erfolgt die Materialmodellierung sowie der Aufbau eines FE-Modells, welches das reale Werkstoffverhalten möglichst genau abbildet.

Anschließend wird das Modell zur Auslegung und Optimierung von Hybridproben verwendet, wobei Geometrie und Materialverteilung auf die Anforderungen abgestimmt werden. Nach erfolgreicher Optimierung erfolgt die Werkzeugentwicklung sowie die Definition des Herstellungsprozesses, um die Hybridproben in der Praxis fertigen zu können.

Im letzten Schritt wird der gesamte Entwicklungsansatz durch Validierung und Verifikation abgesichert. Die erzielten Simulationsergebnisse werden mit experimentellen Daten verglichen, um die Genauigkeit und Aussagekraft des virtuellen Entwicklungsprozesses sicherzustellen.

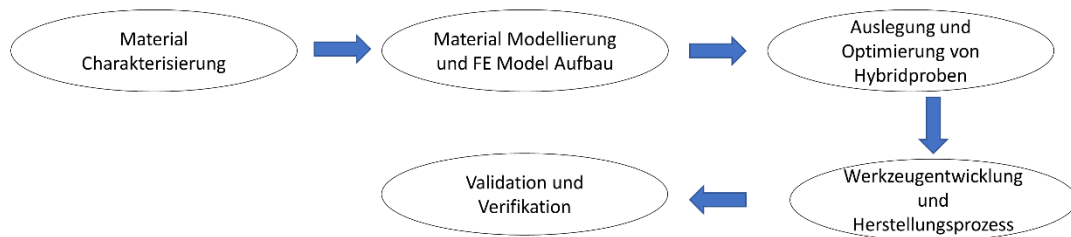


Figure 40: Prozessverlauf - Auslegung und Validierung von Hybridbauteilen

Im Rahmen dieses Projekts ist aufgrund des Einsatzes anisotroper Werkstoffe eine detaillierte Modellierung des LFT-Materials erforderlich, um das mechanische Verhalten der langfaserverstärkten Kunststoffe realitätsnah abzubilden.

### 6.1. Topologieoptimierung und CAD Konstruktion des Demonstrator Bauteils

Die oben beschriebene Methodik liefert zwar Einblicke in die FE-Modellierung; um jedoch ein lasttragendes Endbauteil zu entwickeln, das sämtliche vorgegebenen Lastfälle erfüllt, muss eine Topologieoptimierung durchgeführt werden. Dabei wird die Blechdicke des Demonstratorbauteils reduziert und ein Designraum für den Kunststoff definiert. Anschließend wird ein Volumenanteil festgelegt, der bestimmt, wie viel dieses Designraums zur Erfüllung der Zielvorgaben hinsichtlich Gewicht und Festigkeit beibehalten werden darf. Das Ergebnis ist eine lastpfadgerechte Rippenstruktur aus Kunststoff sowie eine vorher festgelegte Gewichtersparnis gegenüber dem ursprünglichen Bauteil. Das ursprünglich als Referenz herangezogene Demonstratorbauteil war der Längslenker des VW Tiguan. Ziel ist es daher 20 % Gewicht einzusparen, bei mindestens gleichen mechanischen Eigenschaften bezogen auf die Auslegungslastfälle.

#### Modell Aufbau

- Definition Kunststoff Design Raum
- Lastfall + Randbedingung
- Materialeigenschaften

#### Optimierungseinstellungen

- Volumanteil Definition – zur Gewichtreduzierung
- Fertigungsrandbedingungen
- Nachgiebigkeit Reduzierungsziel

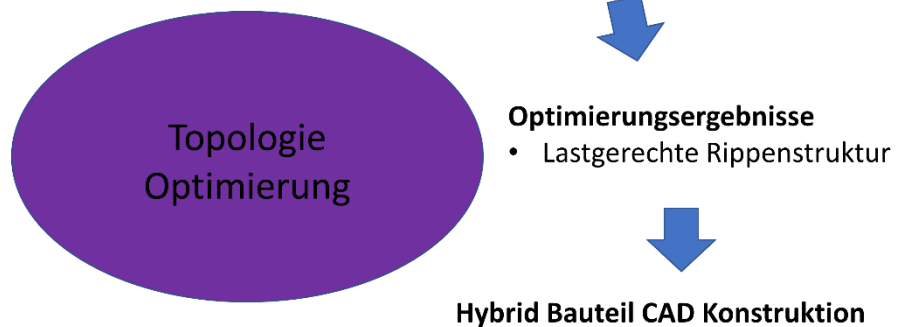


Figure 41: Topologie Optimierung Prozess

zeigt den Modellaufbau der Topologieoptimierung, wobei der Kunststoffbauraum in Lila dargestellt ist und mit den Materialeigenschaften von PA6-LFT40 definiert wurde. Der gelb dargestellte Stahlbereich besteht aus einem 2 mm dicken DP800-Blech. Das Kunststoff Bauraum wurde mit Tetraeder Elementen vernetzt und Stahlblech mit schalen Elementen. Zum Vergleich: Das Originalbauteil von VW hat eine Blechdicke von 3,5 mm und ein Gewicht von 1,62 kg.

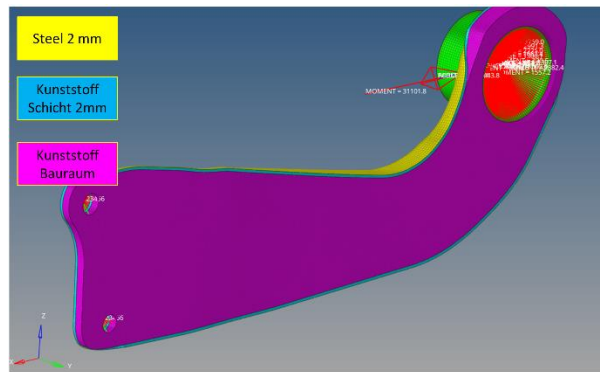


Figure 42: Topologie Optimierung Modell Aufbau

Die Elementkantenlänge der Tetraederelemente, mit denen der Designraum vernetzt wird, sollte möglichst klein gewählt werden, um auch dünnwandige Rippenstrukturen adäquat abbilden zu können. Gleichzeitig darf die Elementgröße aufgrund begrenzter Rechenressourcen nicht zu klein sein. Als sinnvoller Kompromiss wurde daher eine Elementkantenlänge von 2 mm festgelegt. Der Haftvermittler wird in den linear-statischen Lastfällen zunächst als ideal haftend angenommen und durch eine TIE-Contact- bzw. Knoten-zu-Knoten-Verbindung zwischen Stahl und LFT modelliert. 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.

Ziel der Optimierung ist die Steigerung der Struktursteifigkeit, welche durch die Reduktion der globalen Verzerrungsenergie (Compliance) erreicht wird. Im Rahmen der Zusammenarbeit mit dem assoziierten Partner VW wurde das Lastenheft für den Längslenker übergeben. Alle fünf auf das Bauteil wirkenden Lastfälle gingen mit gleicher Gewichtung in die Topologie Optimierung ein.

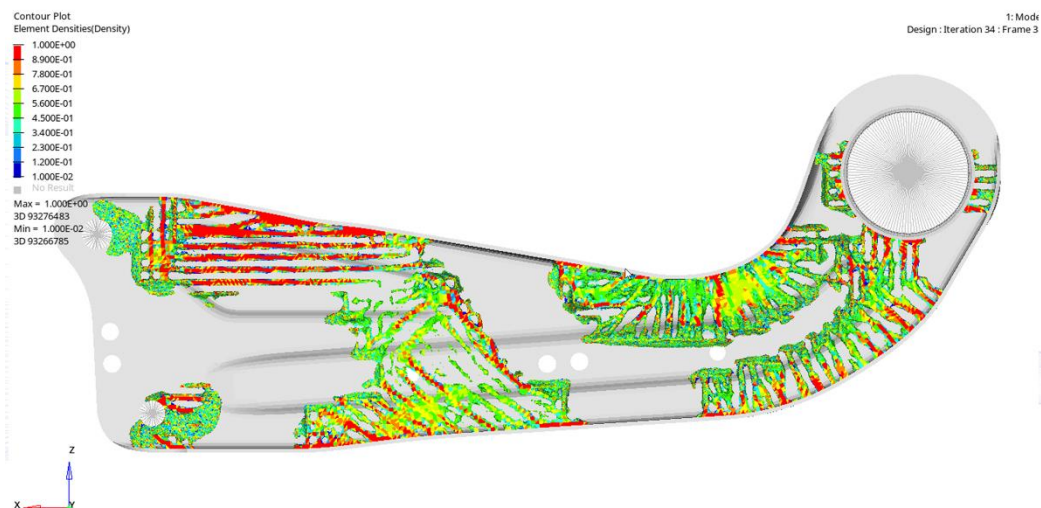


Figure 43: Finales Ergebnis der Topologie Optimierung von Längslenker

Das Ergebnis der Optimierung von Längslenker ist in Figure 43 dargestellt. Aufgrund der durch den Bauraum bedingten Krümmung der Struktur tritt beim Längslenker unter Zugbelastung zusätzlich eine Biegebelastung auf. Dadurch entstehen zwei hochbeanspruchte Bereiche:

einer an der Festlagereinspannung am Radträger und ein weiterer im Bereich der Krümmung. In diesen Zonen kann das in der Blechdicke reduzierte Stahlblech durch gezielte lokale Rippenverstärkungen effektiv abgestützt werden.

#### CAD Konstruktion des Hybriden Längslenkers:

Die konstruktive Umsetzung des Optimierungsergebnisses für den Hybrid-Längslenker wurde erfolgreich realisiert. Das angestrebte Leichtbauziel einer Gewichtsreduktion von 20 % konnte erreicht werden. Für die Anbindung des Gummilagers, das den Längslenker mit der Karosserie verbindet, ist eine zusätzliche gerändelte Metallhülse vorgesehen. Das Endgewicht des hybriden Längslenkers wurde mit 1,29 kg berechnet, was einer Gewichtsreduktion von 20,3 % im Vergleich zum originalen VW-Längslenker mit einem Gewicht von 1,62 kg entspricht.



Figure 44: Topologie Optimierungsergebnis in CAD Konstruktion umgesetzt

#### 6.2. Entwicklung einer Simulationsmethode – zur Darstellung von LFT Materialien in FE Simulationen

Um das anisotrope Verhalten von langfaserverstärkten Thermoplasten (LFT) korrekt vorhersagen zu können, wurde eine systematische Methodik entwickelt. Diese basiert auf der Kombination von CT-Scans, Prozesssimulationen sowie Mapping-Software zur Übertragung der Faserorientierungen in mechanische Berechnungsmodelle. Die Methodik wurde so weit ausgearbeitet, dass damit auch die Ermüdungslebensdauer von LFT-Materialien zuverlässig prognostiziert werden kann. Die Ergebnisse dieser Arbeit wurden in einer wissenschaftlichen Fachzeitschrift veröffentlicht und sind unter folgendem DOI abrufbar: <https://doi.org/10.1007/s10443-025-10328-2>.

Wie in Figure 45 ein schrittweises numerisches Simulationsframework wurde entwickelt, um die Lebensdauer von langfaserverstärkten Thermoplast-Komponenten (LFT), insbesondere PA6-LFT40, unter Ermüdungsbelastung vorherzusagen. Der Prozess beginnt mit Mikro-CT-Scans von formgepressten Platten, um die lokale Faserorientierung an verschiedenen Positionen zu erfassen. Diese experimentell ermittelten Orientierungen dienen anschließend zur Kalibrierung von Prozesssimulationen in Autodesk Moldflow, wobei sichergestellt wird, dass die simulierten Faserorientierungsmuster mit den in den CT-Aufnahmen beobachteten realen Strukturen übereinstimmen.

Nach erfolgreicher Validierung werden die Faserorientierungsdaten aus Moldflow exportiert und mithilfe der Software Converse auf ein Finite-Elemente-Netz übertragen. In diesem Schritt wird die anisotrope Faserverteilung in ein Format überführt, das in der Strukturmechaniksimulation mit Abaqus oder LS-Dyna verwendet werden kann. Gleichzeitig werden auf Grundlage mechanischer Prüfungen (z. B. Zugversuche) richtungsabhängige Materialkennwerte generiert. Diese bilden die Grundlage für quasistatische Finite-Elemente-Simulationen.

Insgesamt kombiniert diese Methodik Prozesssimulation, experimentelle Validierung und strukturelle Leistungsbewertung, um das komplexe anisotrope Verhalten von LFT-Bauteilen unter Ermüdungsbeanspruchung realitätsnah abzubilden – und stellt somit ein leistungsfähiges Werkzeug für die virtuelle Produktentwicklung dar.

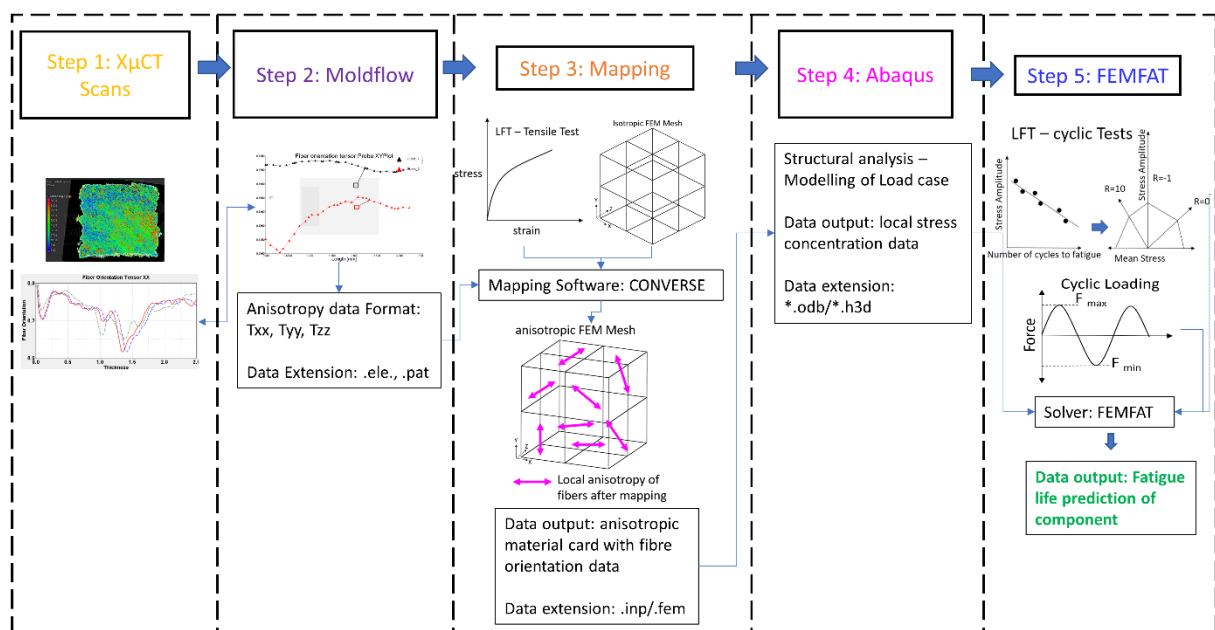


Figure 45: Prozessverlauf - Simulationsmethodologie zur anisotropen FE Modellierung des LFTs [11]

### 6.3. Prozess Simulation – von verschiedene Bauteilen

#### 6.3.1. Prozess Simulation – PA6LFT40 Platte

Zunächst mussten die in Abschnitt 5.1 hergestellten und geprüften LFT-Platten im Fließpressen mithilfe von Autodesk Moldflow simuliert werden. Ziel dieser Simulation war es, die Faserorientierungen während des Pressvorgangs abzubilden und mit den experimentell ermittelten Daten, z. B. aus CT-Scans, abzugleichen.

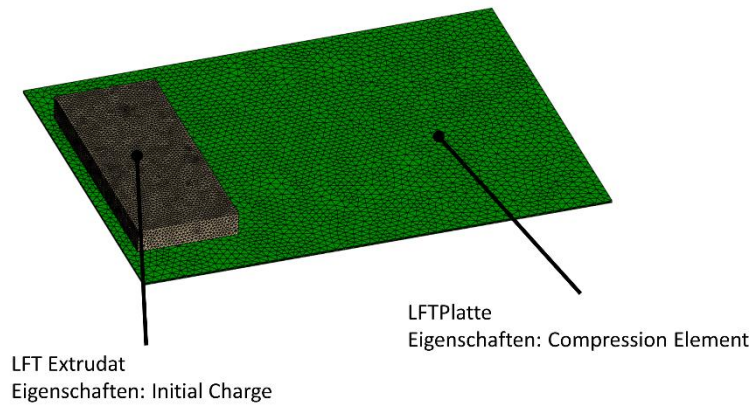


Figure 46: Prozess Simulation Modell - LFT Platte

Figure 46 zeigt den Modellaufbau der Prozesssimulation einer PA6-LFT40-Platte in Autodesk Moldflow. Dabei wird das Extrudat mit der Eigenschaft „Initial Charge“ definiert, während die Platte selbst als „Compression Element“ angelegt ist. Die Platte weist exakt die Abmessungen gemäß der EATC-Normplatten auf, wie in Figure 27 dargestellt. Die Platte wurde mit 7500kN Kraft gepresst. Diese Zuweisung bedeutet, dass das Extrudat zu Beginn der Simulation – analog zum realen Pressvorgang – durch die aufgebrachte Presskraft in die Plattenform einfließt und diese ausfüllt. Dadurch kann der Materialfluss realitätsnah abgebildet und die resultierende Faserorientierung simuliert werden. Für das Extrudat wurde eine Anfangsorientierung von 0,7 ; 0,2 ; 0,1 eingestellt. Diese Werte basieren auf den Ergebnissen der CT-Scan-Analyse des Extrudats. Für die Simulation von LFT-Materialien wird das ARD-RSC-Modell verwendet. Dieses Modell eignet sich besonders gut zur Abbildung des Verhaltens von langfaserverstärkten Thermoplasten, da die zugrunde liegenden Gleichungen einen Term für die anisotrope Rotationsdiffusion enthalten. Dieser erlaubt es, die Bewegung und Orientierung von langen Fasern realitätsnah zu erfassen. Das ARD-RSC-Modell basiert auf einer Reihe von Materialkonstanten  $b_i$  (mit  $i = 1$  bis 5), die das anisotrope Faserverhalten beschreiben.

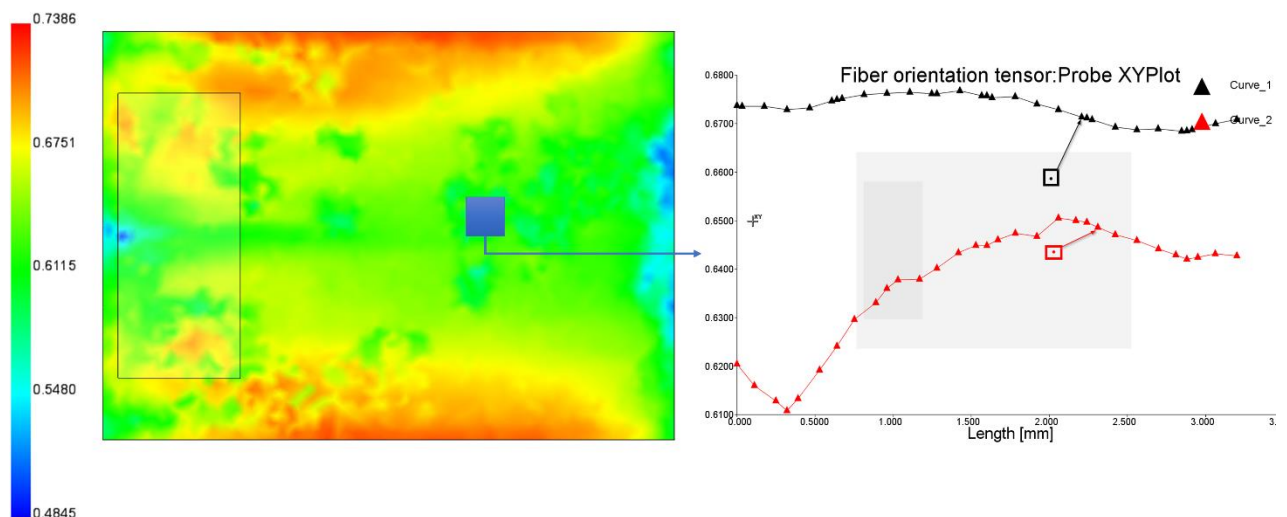


Figure 47: Faserorientierung(FO) in der Platte

Figure 47 zeigt eine qualitative Darstellung der Faserorientierung in der Platte. Es ist zu erkennen, dass im zentralen Bereich der Platte etwa 65 % der Fasern in Fließrichtung orientiert sind, während in den wandnahen Bereichen eine Faserorientierung von etwa 75 % vorliegt.

Um die Vorhersage der Faserorientierung quantitativ zu validieren, muss die vorhergesagte Faserorientierung über die Dicke der Platte hinweg mit den Ergebnissen der realen Platte verglichen werden, die mittels CT-Scans analysiert wurde. Nur durch diesen Abgleich lässt sich die Genauigkeit der Simulation bewerten und sicherstellen, dass die berechneten Orientierungen dem tatsächlichen Faserverlauf im Bauteil entsprechen.

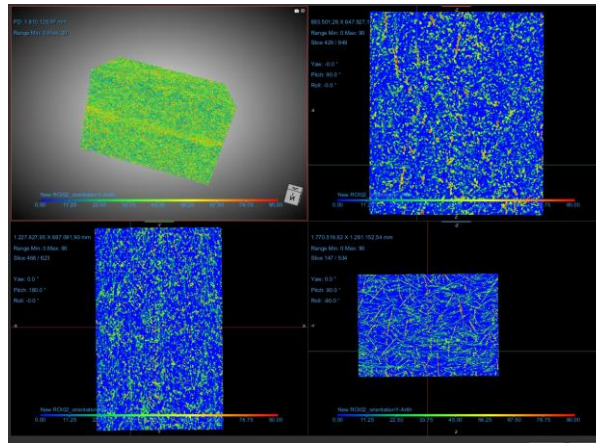


Figure 48: CT Scan Auswertung von Proben aus der Platte

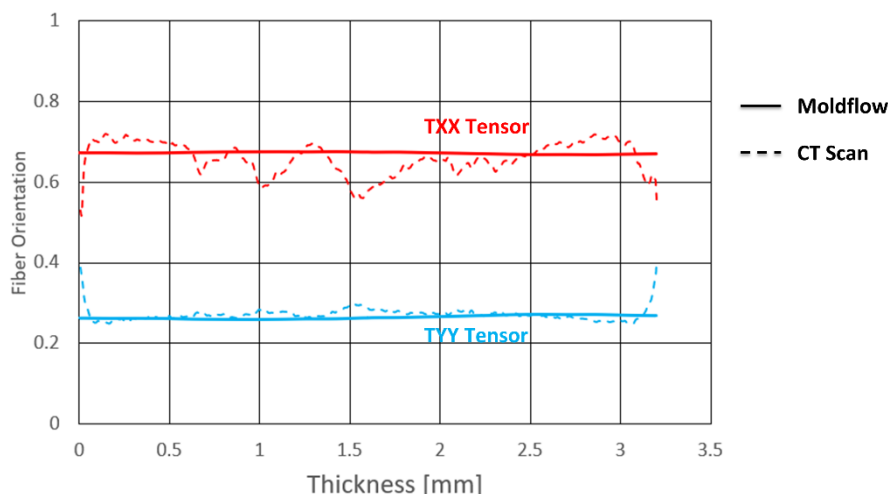


Figure 49: FO Vergleich zwischen CT Scan und Moldflow Ergebnis

Figure 49 zeigt einen Vergleich zwischen den Ergebnissen der CT-Scan-Untersuchung und den vorhergesagten Faserorientierungen aus der Moldflow-Simulation. Es ist erkennbar, dass die in Moldflow berechnete Faserorientierung eine gute Übereinstimmung mit den CT-Scan-Daten aufweist. Dieser Vergleich bestätigt die Aussagekraft der Moldflow-Simulation hinsichtlich der Faserorientierungsverteilung in der Platte und dient somit als Validierung der ARD-RSC Flow model parameters und Simulationsergebnisse. Die bi-Konstante, mit der eine möglichst genaue Vorhersage der Faserorientierung erzielt werden konnte, die mit den CT-Scan-Ergebnissen übereinstimmt, wurde mit  $b_1=0.0001924$ ;  $b_2=0.005839$ ;  $b_3=0.04$ ;  $b_4=0.00001168$ ;  $b_5=0$  ermittelt [11].

### 6.3.2. Prozess Simulation Generische Test Körper – Pure LFT und Hybrid U-Profil

Ähnlich wie bei der Plattensimulation bestand der nächste Schritt darin, den U-Profil-Träger zu simulieren. Dabei wurden zwei Varianten berücksichtigt: ein reines LFT-U-Profil und ein hybrides U-Profil. Für jede dieser Varianten wurde ein separates Simulationsmodell erstellt, wie in der Figure 50 dargestellt. Ziel war es, das unterschiedliche Strukturverhalten beider

Ausführungen realitätsnah abzubilden und deren mechanische Eigenschaften im Rahmen der FEM-Analyse zu untersuchen.

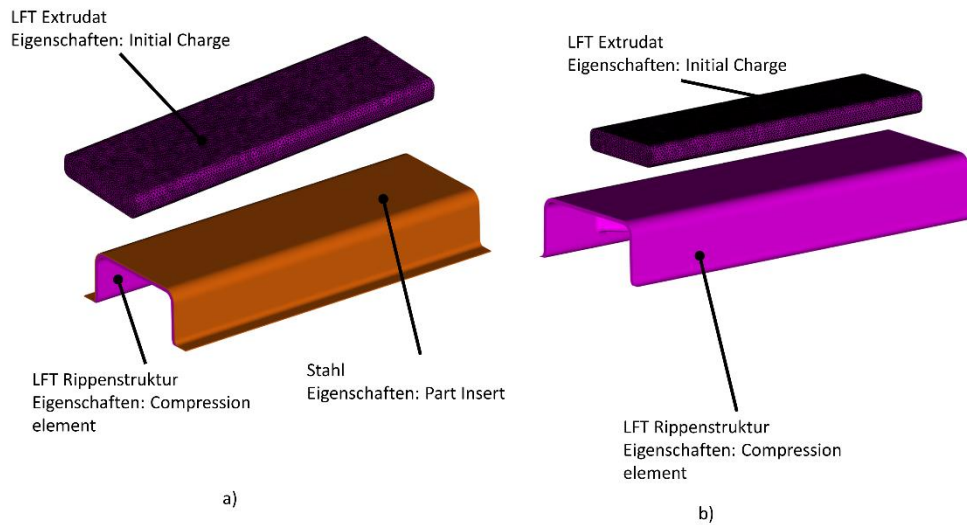


Figure 50: Prozesssimulation Model Aufbau a) Hybrid Stahl-LFT U Profil  
b) Pure LFT U Profil

Die berechnete Masse des Extrudats wird im Simulationsmodell als „Initial Charge“ definiert und mit einer Anfangsorientierung von 0,7 : 0,2 : 0,1 versehen. Im Fall des hybriden U-Profiles wird das Stahlbauteil als vorgeformte Struktur modelliert, die über eine Knoten-zu-Knoten-Kontaktfläche mit dem LFT verbunden ist. Es erhält die Eigenschaft „Part Insert“ und wird mit einer Anfangstemperatur von 200 °C versehen – entsprechend der realen Vorwärmtemperatur, bei der der Vestamelt-Haftvermittler aktiviert wird. Diese Definition ermöglicht eine realitätsnahe Abbildung der Prozessbedingungen in der Fließpresssimulation. Im Fall des hybriden U-Profiles fließt das plastifizierte Extrudat während des Fließpressvorgangs in die LFT-Rippenstruktur ein. Dabei wird in der Simulation auch der Temperatureinfluss des vorgewärmten Stahlbauteils berücksichtigt. Durch die definierte Anfangstemperatur des Stahleinsatzes wird der Wärmeübergang zwischen Stahl und LFT realitätsnah abgebildet, was wiederum Einfluss auf das Fließverhalten des Kunststoffes und die Ausbildung der Faserorientierung innerhalb der Rippenstruktur hat. Die Simulation eines reinen LFT-U-Profiles ist hingegen unkompliziert, ähnlich wie bei der Prozesssimulation einer LFT-Platte in 6.3.1. Für die Simulation ARD-RSC Flow model mit die Parameter in Abschnitt 6.3.1 wurde verwendet.

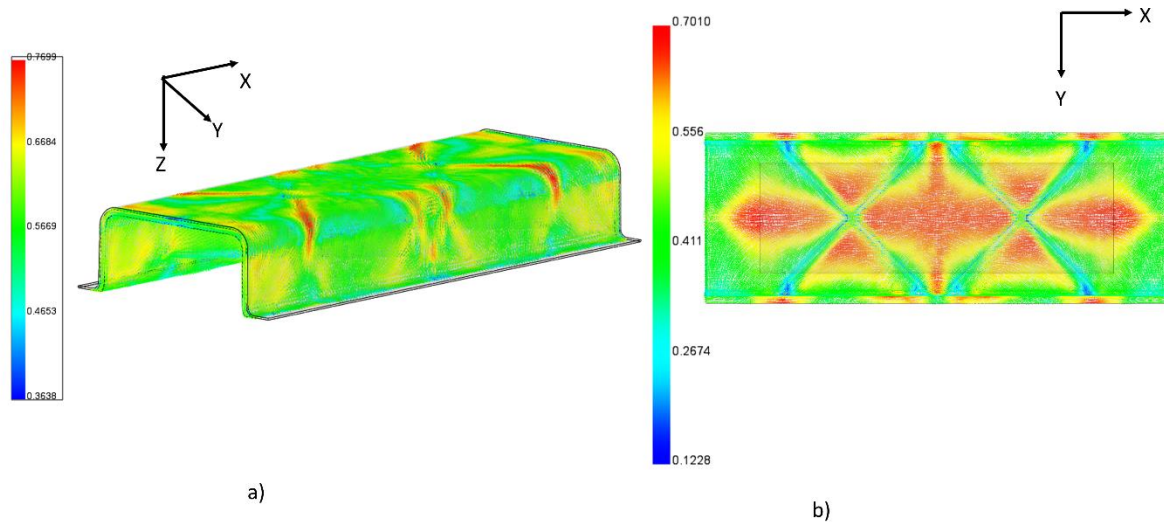


Figure 51: Faserorientierung a) hybrid b) Pure LFT U Profil

Figure 51a&b zeigt die vorhergesagte Faserorientierung des hybriden U-Profiles und des reinen LFT-U-Profiles. Diese Faserorientierungen werden in die Struktursimulation übernommen.

### 6.3.3. Prozess Simulation – Demonstrator Bauteil

Mit exakt demselben Aufbau des Prozesssimulationsmodells des hybriden U-Profiles wird auch das Demonstratorbauteil, ein hybrider Längslenker, aufgebaut. Das Demonstratorbauteil wurde mit 9000kN Kraft gepresst und pressgeschwindigkeit variiert zwischen 10-3 mm/s

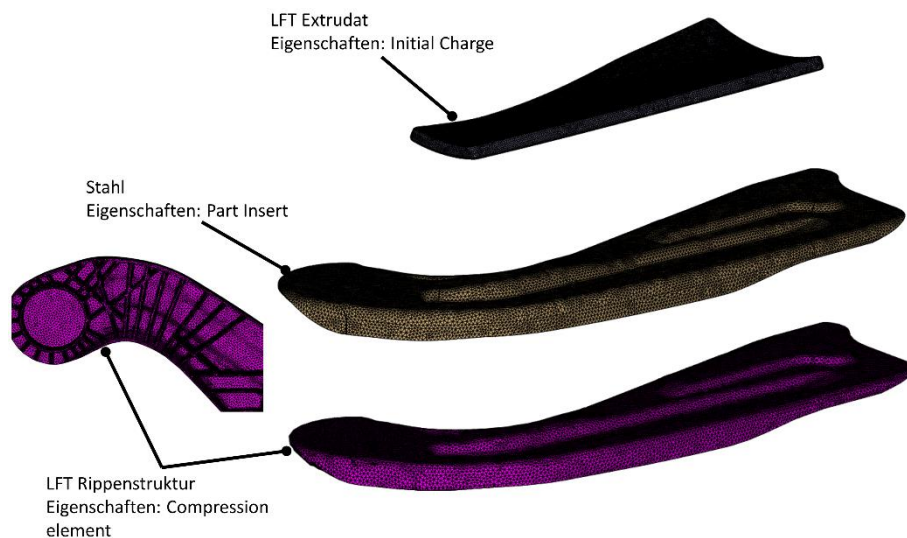


Figure 52: Prozess Simulation Modellaufbau - Demonstratorbauteil Längslenker

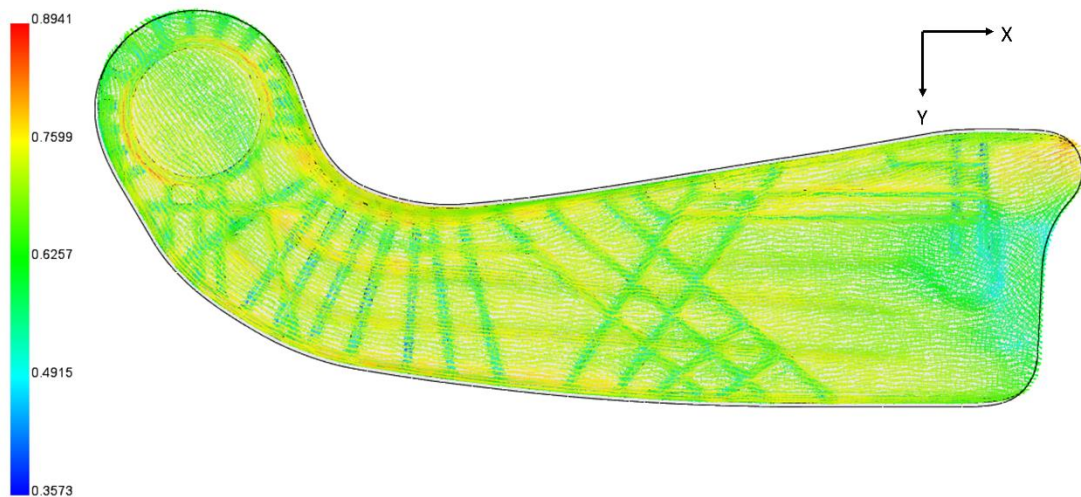


Figure 53: Faserorientierung in Längslenker

Figure 53 zeigt die Faserorientierungsverteilung in hybriden Längslenker. Es lässt sich erkennen, dass die Basisschicht des Längslenkers eine Faserorientierung von etwa 75–80 % in Fließrichtung aufweist, während die Rippen im Vergleich zur X-Achse eine Orientierung von rund 62 % zeigen.

#### 6.4. Mapping von Faserorientierung von Moldflow nach FE Netz

Wie in Figure 45 gezeigt, Schritt 3 in der Simulationskette in der Abbildung wird als Mapping-Prozess bezeichnet. Dabei handelt es sich um einen Vorgang, der die Homogenisierung beinhaltet, um Informationen aus der Prozesssimulation auf die FEM-Simulation zu übertragen. Aus ingenieurtechnischer Sicht ist das Netz aus der Prozesssimulation in der Regel zu fein und daher rechnerisch ineffizient, um damit Performance-Simulationen in etablierten Simulationsprogrammen wie LS-Dyna, Abaqus oder OptiStruct durchzuführen. Converse ist ein Werkzeug, das die Homogenisierung der Faserorientierungsdaten ermöglicht und diese effizient vom Prozesssimulationsmodell auf das FEM-Netz überträgt.

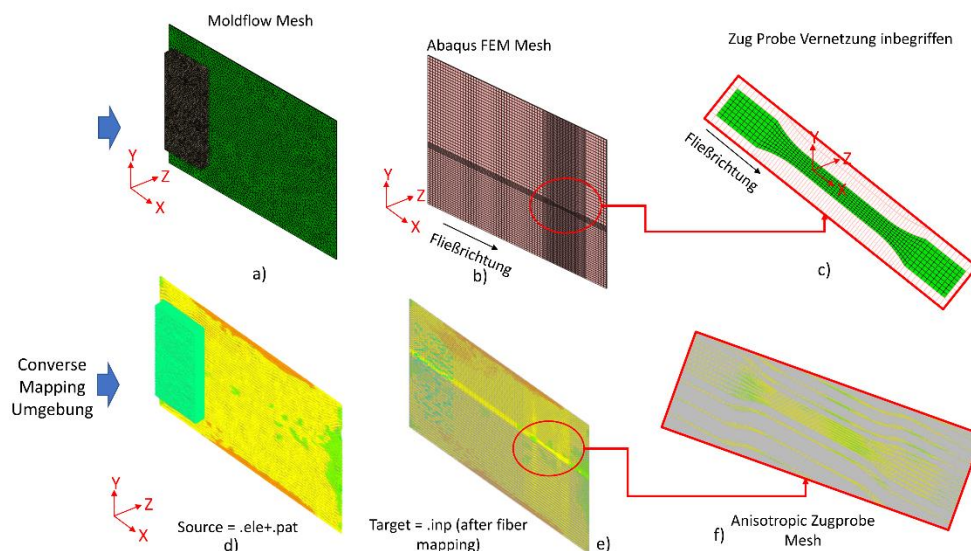


Figure 54: Converse Mapping[11]

Die Figure 54 zeigt den Mapping-Prozess der Faserorientierung von der Prozesssimulation auf das FEM-Netz. Figure 54a stellt das Netz der Prozesssimulation dar, während in Abbildung Figure 54b das strukturelle FEM-Netz für Abaqus zu sehen ist, in das eine einfache Zugprobe eingebettet ist. Diese einfache Sonde wird mit der lokalen Faserorientierung aus der

Prozesssimulation belegt und anschließend einer strukturellen Belastung unterzogen. In Abbildung Figure 54d wird in der Converse-Umgebung unter „Source“ die Dateien „.ele“ und „.pat“ aus Moldflow eingelesen, welche die Knotenpositionsdaten und Elementorientierungen der Prozesssimulation enthalten. In „Target“, dargestellt in Figure 54e, wird das strukturelle Netz mit den Ergebnissen der Prozesssimulation verknüpft. Figure 54f zeigt schließlich die resultierende Faserorientierung der Zugprobe. Die gleiche Methodik wird verwendet, um die Faserorientierungen des hybriden U-Profiles und des Demonstratorbauteils abzubilden, wie in Figure 55

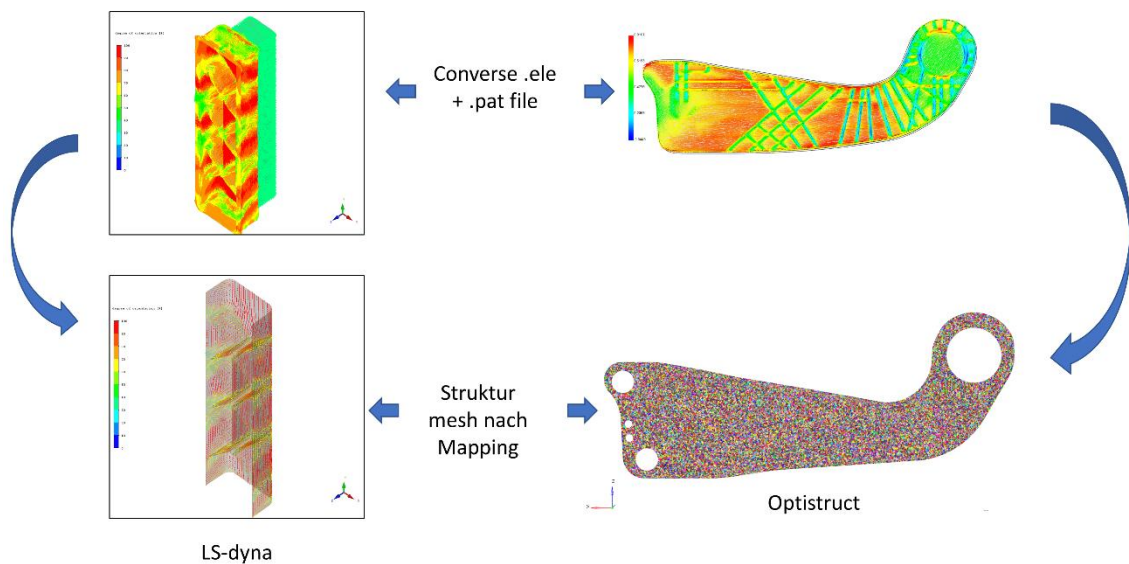


Figure 55: Faserorientierung Mapping von Hybrid U-Profil und Demonstrator Bauteil

Zusätzlich zur Abbildung der Faserorientierung erzeugt Converse auch anisotrope Materialkarten für den jeweiligen Solver. Auf Basis der 0°-Zugversuchskurve generiert Converse weitere Spannungs-Dehnungs-Kurven für verschiedene Faserorientierungen wie in Figure 56.

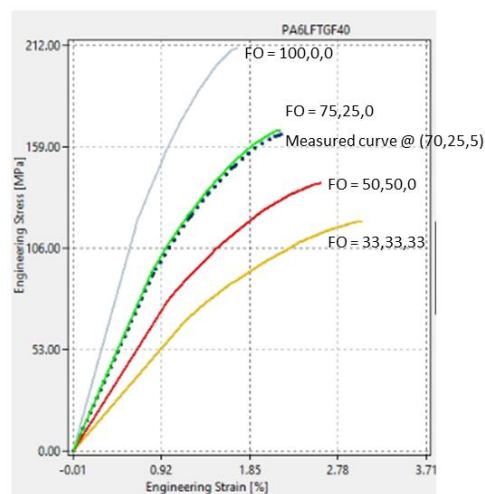


Figure 56: Fließkurve für unterschiedliche Faserorientierungsfälle n Converse

## 6.5. Anisotrope FE Berechnung von verschiedenen Bauteilen

### 6.5.1. Zugprobe Quasi-Statisch und schwingende drei Punkt Biegung

Zunächst wird eine aus der Platte entnommene 0° Zugprobe gemäß der in der Figure 27 dargestellten Anordnung einer Drei-Punkt-Biegeprüfung unterzogen. Der Versuch wird mit

einer Prüfgeschwindigkeit von 2 mm/min durchgeführt. Unter Verwendung der abgebildeten anisotropen Zugprobe wurde die Drei-Punkt-Biegesimulation in Abaqus eingerichtet.

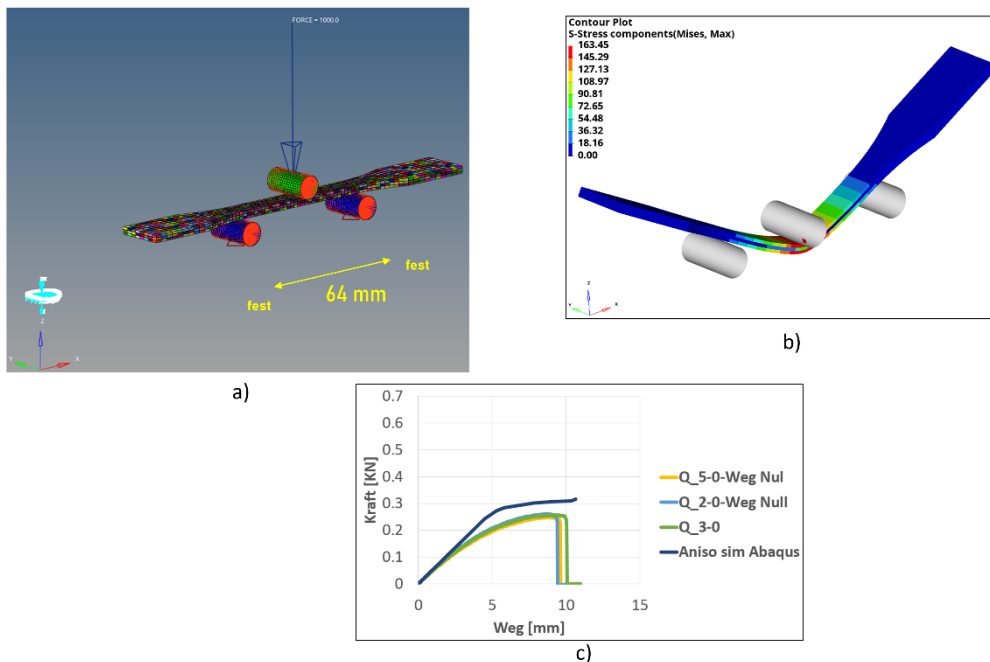


Figure 57: a) Zugprobe drei punkt Biegung FE Model Aufbau b) Spannungsverteilung c) Kraft-Weg Kurve Vergleich zwischen Versuch und Simulation

Figure 57a zeigt den Aufbau des Finite-Elemente-(FE)-Modells der quasi-statischen Drei-Punkt-Biegesimulation, bei dem die Zugprobe auf Auflagen mit einem Abstand von 64 mm positioniert ist. Ein Impaktor bewegt sich nach unten und übt eine Kraft von 1 kN auf die Probe aus. Zwischen der Probe und sowohl den Auflagen als auch dem Impaktor sind Reibkontakte definiert. Figure 57b zeigt die Spannungsverteilung in der Probe nach der Simulation, während Abbildung C einen Vergleich zwischen den experimentellen und den simulierten Kurven darstellt. Es ist zu erkennen, dass die Ergebnisse der anisotropen Simulation eine gute Übereinstimmung mit den Versuchsdaten aufweisen.

Nach Durchführung der quasistatischen Simulation erfolgte im nächsten Schritt die Ermüdungssimulation unter Verwendung der zuvor ermittelten Ergebnisse. Hierzu wurden die Spannungsverteilungen aus der quasistatischen FEM-Simulation in die Software FEMFAT überführt. Parallel dazu wurde auf Basis der experimentell gewonnenen Daten eine Materialkarte für PA6-LFT im FEMFAT-Umfeld aufgebaut, um das zyklische Werkstoffverhalten realitätsnah abzubilden. Zusätzlich wurde eine „.xml“-Datei eingelesen, die FEMFAT-lesbare Elementorientierungsdaten enthält und somit die Anisotropie des Materials im Ermüdungsnachweis berücksichtigt. Abschließend wurde eine sinusförmige Last mit einem Lastniveau entsprechend den im Versuch durchgeführten Belastungen als Eingangsgröße definiert.

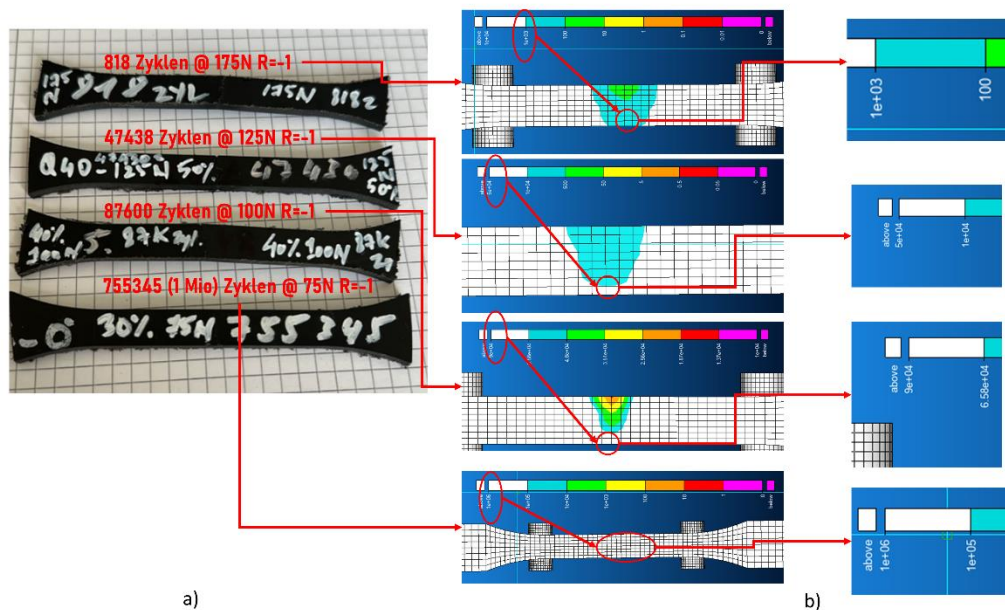


Figure 58: Vergleich - Versuch und FEMFAT Ergebnisse - 3-punkt Biegung R=-1  
Schwingversuch von PA6LFT40 proben a) Versuch b) Simulationsergebnisse

Der Ermüdungsversuch wurde auf einer Hydropuls-Schwingprüfmaschine unter Verwendung einer Prüfaufnahme gemäß ASTM D7774 durchgeführt. Die Tests erfolgten mit einem Spannungsverhältnis von  $R = -1$ , was einer vollständig umkehrenden Belastung entspricht. Die Belastungsniveaus, bei denen die Prüfungen durchgeführt wurden, wurden aus den Ergebnissen der quasistatischen Versuche abgeleitet. Insgesamt wurden vier Laststufen definiert: 75 N, 100 N, 125 N und 175 N. Die Versuchsergebnisse werden in Figure 58a gezeigt. Figure 58b die Ergebnisse aus der FEMFAT-Simulation dargestellt. Es ist erkennbar, dass eine gute Übereinstimmung zwischen den experimentellen Ergebnissen und den Simulationsergebnissen besteht.

#### 6.5.2. Entwicklung des Haftvermittlers Materialmodell in LS-Dyna

MAT 240 unterstützt die Modellierung von kohäsiven Zonen und beinhaltet ein trilineares Zutrennungsgesetz. Für Stahl und Kunststoff wurde das bewährte isotrope Materialmodell MAT 24 von LS Dyna verwendet. Die Materialkarte von MAT 240 sieht wie in Figure 59 dargestellt aus. Da der Haftvermittler durch zwei Lastfälle bzw. Kopfzug und Scherzug charakterisiert wurde, müssen beide Lastfälle für die Entwicklung der Material Karte 240 betrachtet werden. Aus beiden Lastfällen muss eine Materialkarte erzeugt werden die wir für zukünftige Bauteilentwicklungen verwenden können. Da die Parameter von MAT 240 nicht direkt aus den Versuchsergebnissen ermittelt werden können, muss eine Optimierung mittels Versuchskurve (von beiden Lastfällen) durchgeführt werden. Als Optimierungstool wird LS-OPT verwendet, wo wesentliche Parameter, mit oberen und unteren Grenzwerten eingesetzt werden. LS-OPT versucht die Berechnungskurve von beide Lastfällen, simultan an die Versuchskurve anzunähern. LS OPT variiert die Werte der Parameter in jeden Iterationsschritt um die eine optimalen Werte herauszufinden.

\*MAT\_COHESIVE\_MIXED\_MODE\_ELASTOPLASTIC\_RATE\_(TITLE) (240) (0)

---

TITLE

1	<u>MID</u>	<u>RO</u>	<u>ROFLG</u>	<u>INTFAIL</u>	<u>EMOD</u>	<u>GMOD</u>	<u>THICK</u>
	<input type="text"/>	<input type="text"/>	0	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
2	<u>G1C_0</u>	<u>G1C_INF</u>	<u>EDOT_G1</u>	<u>T0</u>	<u>T1</u>	<u>EDOT_T</u>	<u>FG1</u>
	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
3	<u>G2C_0</u>	<u>G2C_INF</u>	<u>EDOT_G2</u>	<u>S0</u>	<u>S1</u>	<u>EDOT_S</u>	<u>FG2</u>
	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>

Figure 59: MAT\_240 Haftvermittler Material Karte in LS-Dyna

Optimierungsablauf mittels LS-OPT:

In LS-OPT wird das parametrisierte FE-Modell für jeden Lastfall in „Stage“ Module hochgeladen. Dabei werden die Parameter innerhalb eines Wertebereichs während der Optimierungsschritte automatisch geändert. Darunter kann der Parameter Wertebereich für jeden Parameter eingesetzt werden und während der Optimierungsschritte, werden die Parameterwerte geändert. Unter „Composite“ werden die Kurven aus realen Versuchen eingeladen. Unter „Objective“ werden die Versuchskurven von Figure 36 als Optimierungsziel eingesetzt wie im Figure 60. Die Optimierung läuft bis beide Berechnungskurven die Optimierungskriterien erfüllen. Das Optimierungskriterium ist in diesem Fall die Verringerungen der Abweichung der Berechnungskurve gegenüber der Versuchskurve wie im Figure 61.

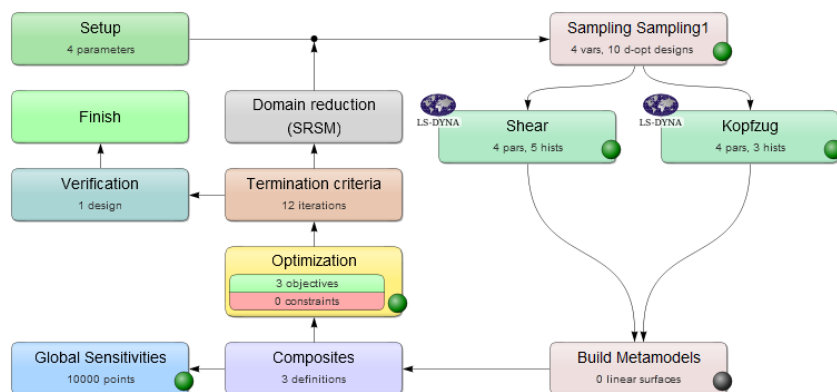


Figure 60: LS-Opt Optimierungsaufbau

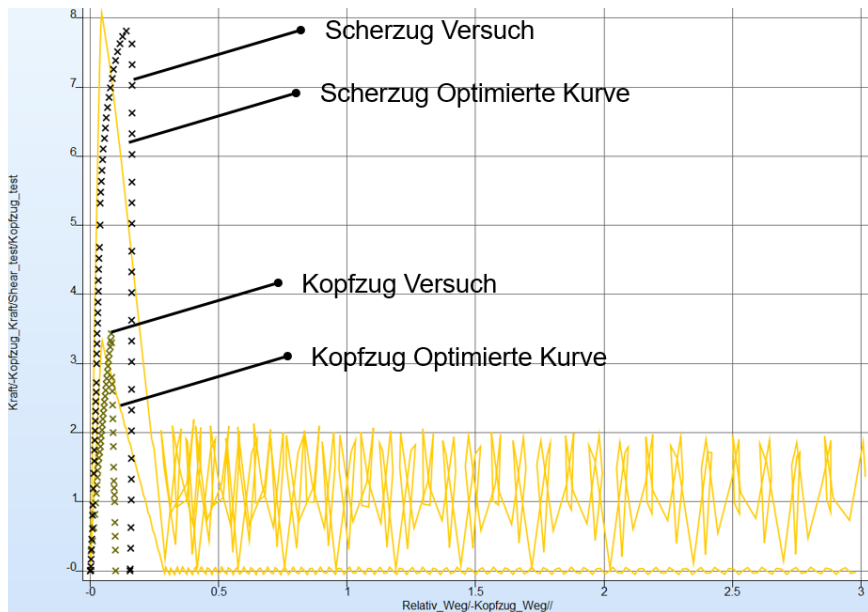


Figure 61: Optimierte Berechnungskurve gegenüber Versuchskurve

### 6.5.3. Hybrid U-Profil Quasi-Statisch Drei Punkt Biegung

In diesem Kapitel wird der anisotrope Simulationsprozess auf eine höhere Komplexitätsstufe gehoben, indem ein hybrides U-Profil unter einer quasistatischen Drei-Punkt-Biegebeanspruchung simuliert wird. Wie in Figure 55 dargestellt, wird das abgebildete hybride U-Profil zum Aufbau des FE-Modells in LS-DYNA verwendet. CONVERSE generiert die anisotrope Materialkarte für das LFT-Material. Die erstellte Karte entspricht MAT\_ORTHOTROPIC\_ELASTIC\_PLASTIC, auch bekannt als MAT\_108 in der LS-DYNA-Materialbibliothek. Zusätzlich werden die Elementorientierungen definiert, die zusammen mit der anisotropen Materialkarte die Materialanisotropie abbilden. Um das Versagen des LFT-Materials abzubilden, wird MAT\_ADD\_EROSION hinzugefügt. Das Haftvermittler wurde mit den optimierten Werten aus Abschnitt 6.5.2 in Zusammenhang mit Cohäsiv Zone Elementen. Figure 63 zeigt die Korrelation zwischen der Simulation und der Versuchskurve. Es ist zu erkennen, dass eine sehr gute Übereinstimmung besteht – vom anfänglichen Kraftmaximum bis hin zum Kraftniveau nach dem ersten Abfall.

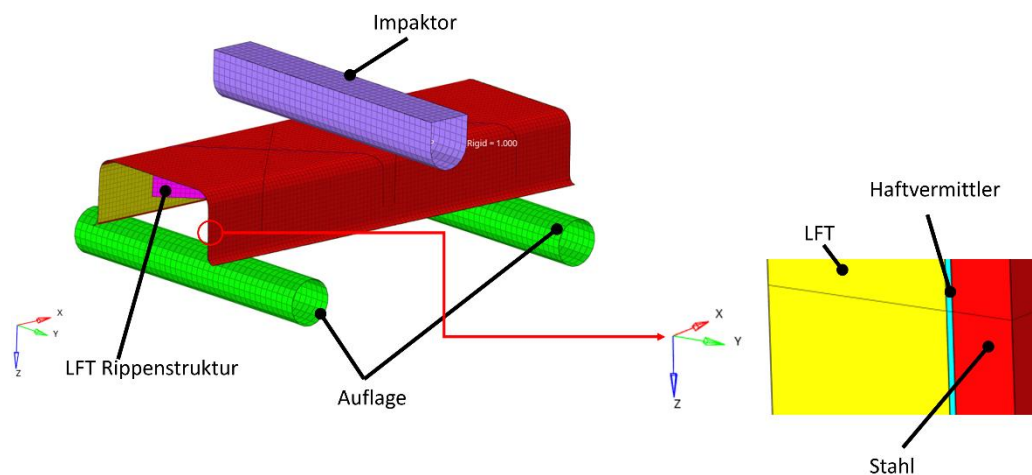


Figure 62: Hybrid U-Profil Quasi-Statisch drei punkt Biegung Aufbau

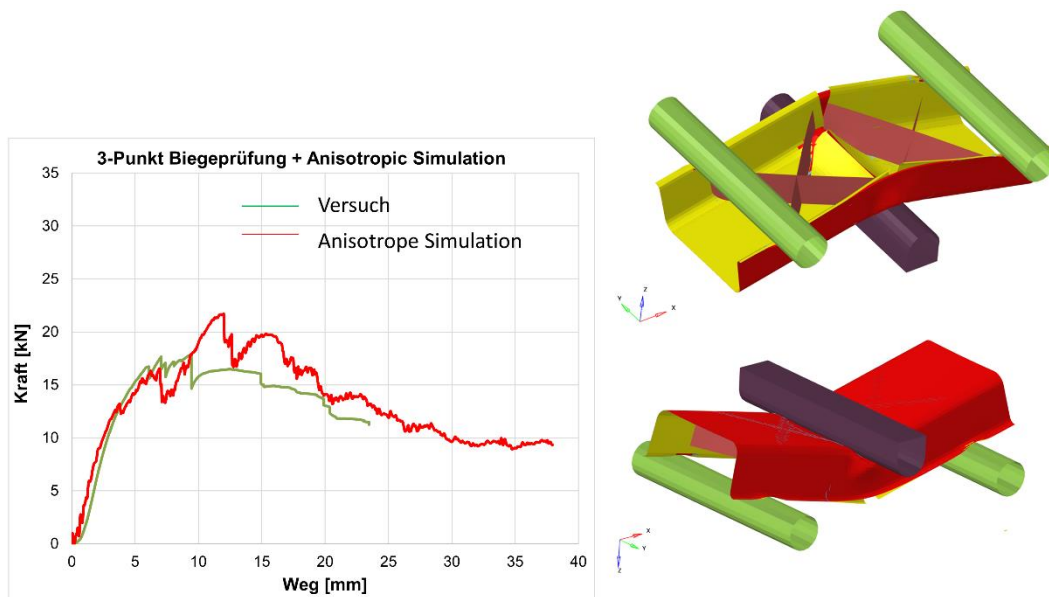


Figure 63: Kraft-Weg Vergleich, Quasi-Statisch Drei Punkt Biegung

#### 6.5.4. Hybrid Längslenker Struktur Simulation

Mit dem konstruierten Längslenker sollte die Leistungsfähigkeit im Vergleich zum originalen VW-Längslenker bewertet werden. Figure 64 zeigt das FE-Modell des hybriden Längslenkers. Wie bereits in der Topologieoptimierung erfolgt auch in diesem Modell die Vernetzung des Stahlbereichs mit Schalenelementen, während der LFT-Bereich mit Tetraederelementen vernetzt ist. Der Längslenker ist an den hinteren Verschraubungspunkten fest eingespannt. Die Belastung wird über RBE3-Rigidelemente eingebracht, die mit dem Lager verbunden sind und eine Knoten-zu-Knoten-Kopplung mit dem LFT-Bereich aufweisen. Zwischen LFT und Stahl besteht ebenfalls eine Knoten-zu-Knoten-Verbindung. Der Original-Längslenker von VW wurde nach exakt derselben FE-Modellierungsmethodik abgebildet. Dabei wurde der Stahlbereich mit der originalen Blechdicke von 3,5 mm definiert.

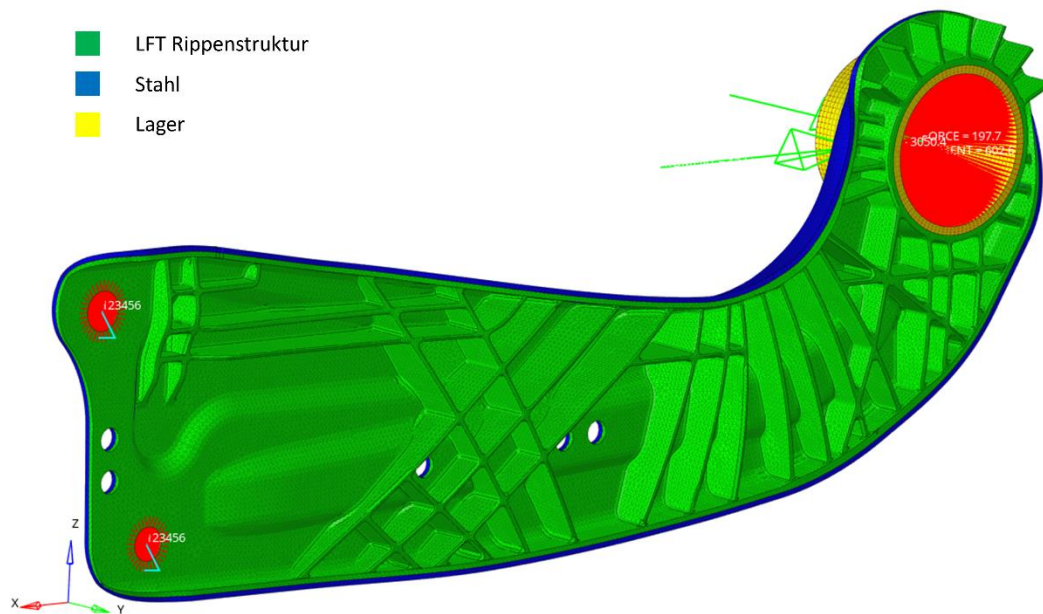


Figure 64: FE Modell Aufbau des Hybriden Längslenker

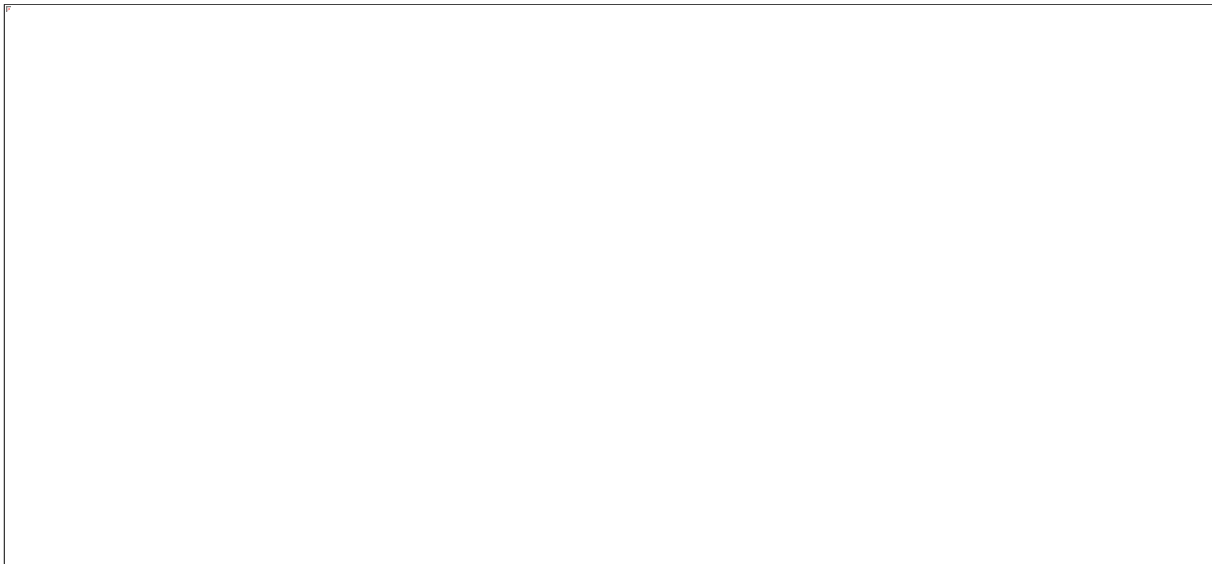


Figure 65: Spannungsbild von Stahl Blech in alle 8 Lastfälle

Insgesamt wurden acht Lastfälle simuliert. Figure 65 zeigt die Spannungsverteilung im Stahl für alle Lastfälle im Vergleich zwischen dem originalen Längslenker aus Vollstahl und der hybriden Längslenkervariante. Es ist erkennbar, dass die Spannungskonzentrationen – in Abhängigkeit vom jeweiligen Lastfall – hauptsächlich im Bereich der Krümmung auftreten. Die Analyse der Spannungen zeigt, dass die hybride Variante im Vergleich zur rein stahlbasierten Originalversion ein insgesamt geringeres Spannungsniveau aufweist.

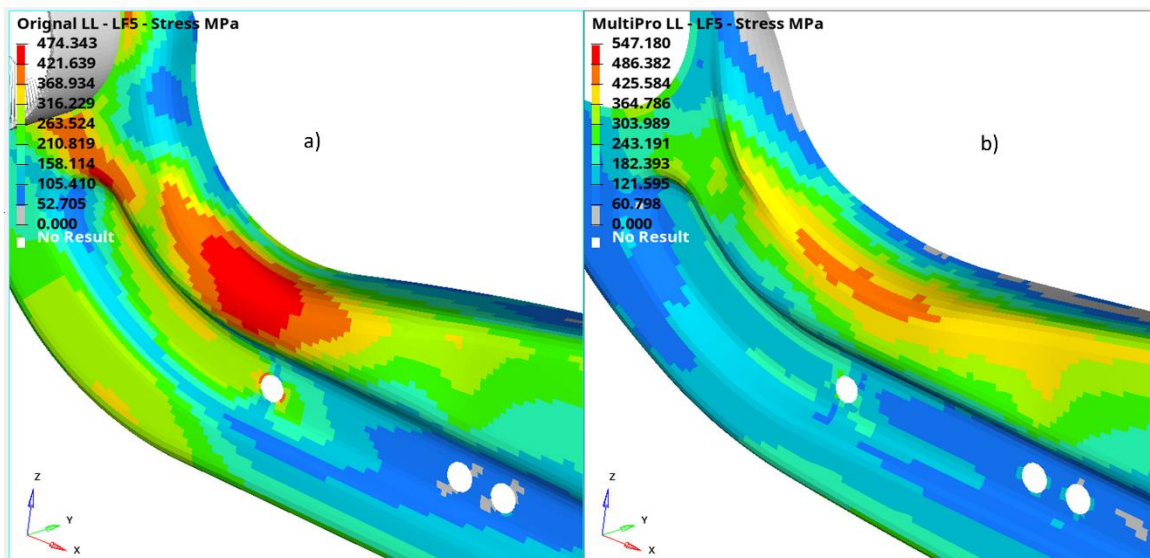


Figure 66: Spannungsverteilung in kritischen Bereich für Lastfall 5 a) Original b) Hybrid Längslenker

Bei näherer Betrachtung des kritischsten Lastfalls mit der höchsten Belastung – Lastfall 5 – Figure 66 zeigt sich, dass die Spannungsspitzen im originalen Längslenker deutlich höher ausfallen als in der hybriden Variante. Dies verdeutlicht, dass der hybride Längslenker der Belastung besser standhält und somit eine verbesserte strukturelle Leistungsfähigkeit aufweist.

## 7. Herstellung der Demonstrator-Bauteile

Wie in Kapitel 4.5 schon vorgestellt, nachdem die Komponente entwickelt und hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit simuliert wurde, wurde das finale CAD-Modell an Voestalpine übergeben. Daraufhin wurde die endgültige Wirkfläche mittels Umformsimulation erzeugt. Das finale Werkzeug wurde anschließend von der Firma SMB auf Basis dieser Wirkfläche konstruiert und bei Grunewald Werkzeugbau gefertigt. Ein wichtiger Aspekt des entwickelten Werkzeugs war seine Fähigkeit, in zwei unterschiedlichen hydraulischen Pressen eingesetzt und betrieben werden zu können. Die Werkzeuggrundplatte wurde so bearbeitet, dass sie sowohl in der 2000-kN-Pressen am FLB als auch in der 20.000-kN-Pressen bei Weber Fibertech verwendet werden kann.

Ein wichtiger Aspekt des entwickelten Werkzeugs war seine Fähigkeit, in zwei unterschiedlichen hydraulischen Pressen eingesetzt und betrieben werden zu können. Die Werkzeuggrundplatte wurde so bearbeitet, dass sie sowohl in der 2000-kN-Pressen am FLB als auch in der 20.000-kN-Pressen bei Weber Fibertech verwendet werden kann. Die Inbetriebnahme des Werkzeugs an der Presse des FLB war notwendig, um die grundsätzliche Funktionalität zu überprüfen – insbesondere, ob die Kühlkanäle effizient arbeiten und ob während des Pressvorgangs keine Auffälligkeiten auftreten.

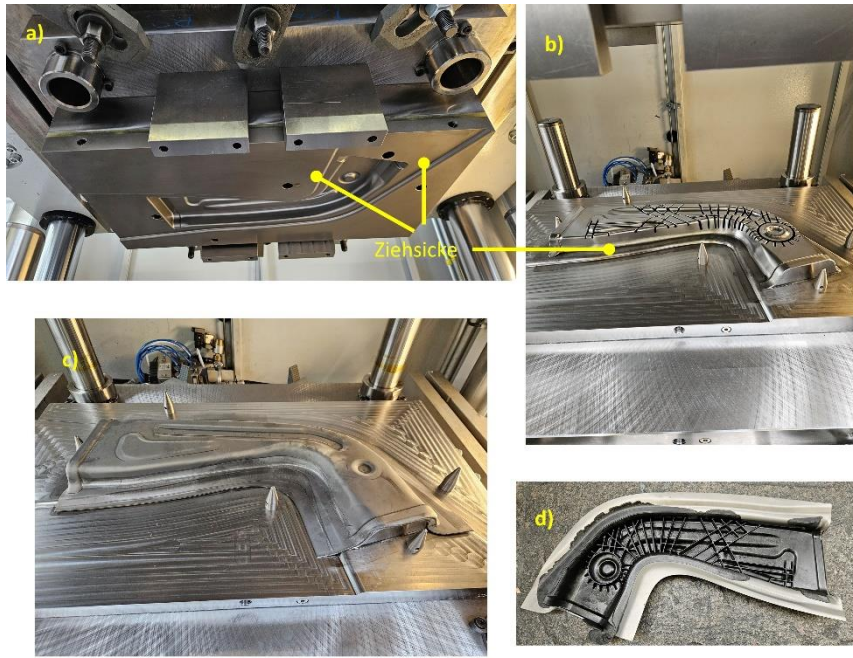


Figure 67: Demonstratorbauteil Werkzeug in der FLB Presse a) Matrize b) Stemple c) Rein Blech umgeformt d) Final Bauteil

Figure 67a&b zeigt das Werkzeug in Betrieb an der Presse des FLB. Da die Presse nicht über ausreichend Kraft verfügt, um Stahl und Kunststoff in einem Schritt umzuformen, wurde der Prozess in zwei Schritten durchgeführt. Im ersten Schritt wurde zunächst das reine Blech umgeformt. Figure 67c. Anschließend wurde das umgeformte Blech erwärmt, um den Haftvermittler zu aktivieren. Im zweiten Schritt wurde das abgewogene und aufgeheizte PALFT40 in die Kavität eingelegt, das zuvor umgeformte Blech erneut eingelegt und gemeinsam verpresst, um den Kunststoff zu formen.

Nachdem das Werkzeug an der Presse des FLB erfolgreich betrieben wurde, wurde es zu Grunewald überführt, um die Grundeinheit für den Einsatz in der Presse bei Weber Fibertech anzubringen. Im Mai 2024, wie im Figure 68 wurde das Werkzeug mit angebaute Grundeinheit auf der Presse von Weber Fibertech in Betrieb genommen. Das vorbeschichtete Stahlblech wurde zuvor mit Unterstützung der Firma Evonik, einem assoziierten Partner, aufbereitet. Zur Temperierung des Werkzeugs wurden die vorhandenen Temperiergeräte der Firma Weber Fibertech verwendet. Beim ersten Versuchslauf wurden wichtige Pressparameter wie die Presskraft, die Pressgeschwindigkeit und die Niederhalterkraft bestimmt.

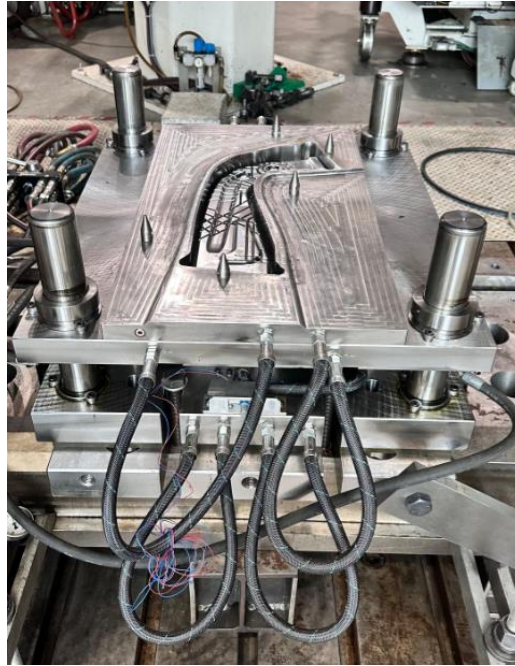


Figure 68: Werkzeug in der Presse von Weber Fibertech eingebaut

Nach der Variation der Parameter und der Durchführung meines Pressversuchs wurde festgestellt, dass die Ziehsicke zwar die Umformung des Blechs unterstützt, jedoch einen negativen Einfluss auf die Dichtigkeit hat. Beim Schließen der Matrize und dem Einklemmen des Blechs zwischen der positiven und negativen Form der Ziehsicke in Matrize und Niederhalter, biegt sich das Blech über die Sicke. Dabei entstehen Spalte, durch die die LFT-Schmelze aus der Kavität austreten kann Figure 69.

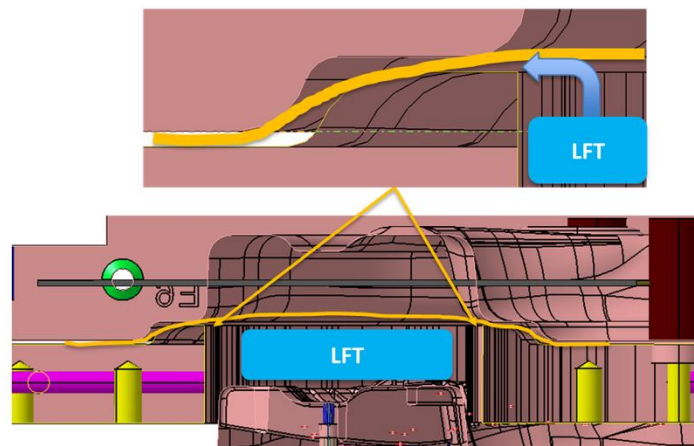


Figure 69: Schematische Darstellung der Blechumformung über die Ziehsicke

Als Maßnahmen wurden zunächst die Entfernung der oberen Ziehsicke umgesetzt. Darüber hinaus wurde auch die untere Ziehsicke entfernt, mit dem Ziel, eine größere Klemmfläche auf dem Stahlblech zu schaffen und die Niederhalterkraft gezielter einsetzen zu können. Durch diese Änderungen sollte die Abdichtung verbessert und das Austreten der LFT-Schmelze verhindert werden. Beim finalen Pressversuch wurden die Ziehsicken im oberen und unteren Teil vollständig ausgefräst. Anschließend wurde das Werkzeug in der Presse bei Weber Fibertech in Betrieb genommen. Trotz der Entfernung der Ziehstufe im unteren Teil des

Werkzeugs kam es erneut zu Undichtigkeiten, wodurch das Bauteil nicht vollständig gefüllt wurde. Die Undichtigkeit verhinderte eine saubere Ausformung des Blechs. Infolge der unzureichenden Abdichtung und der schlechten Umformung konnten nur Bauteile mit mangelhafter Qualität hergestellt werden.

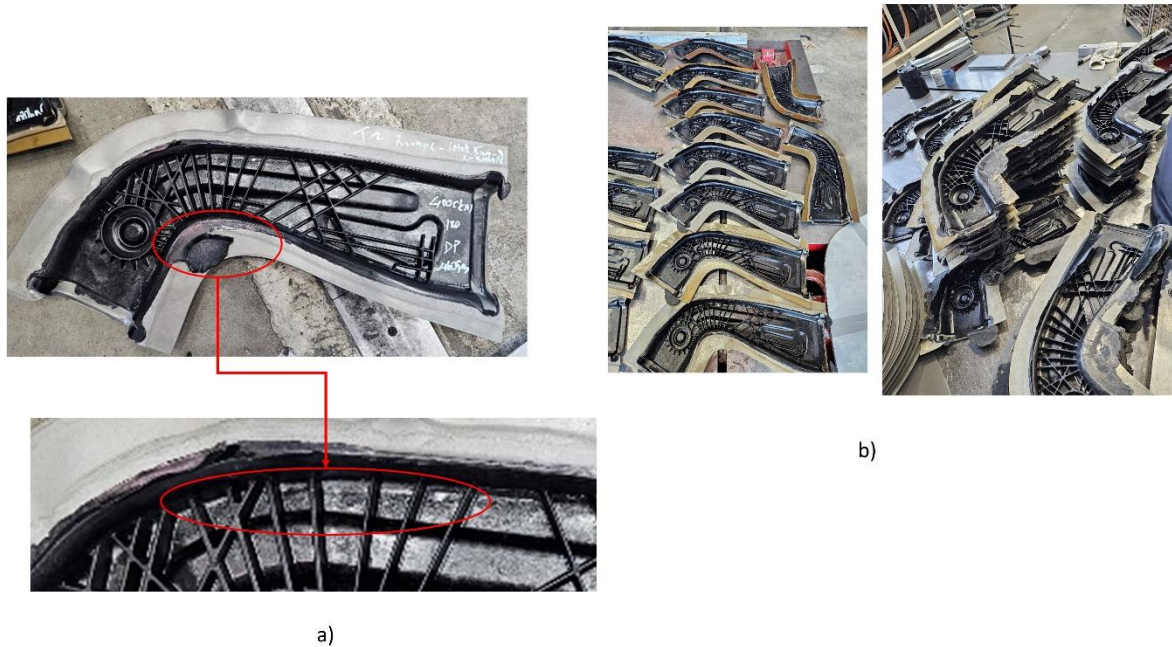


Figure 70: a) Undichtigkeitsstelle b) gepresste Hybrid Längslenkeren

Die Bauteilqualität wurde anschließend mit einem Faro-Arm vermessen. Wie dargestellt, zeigten sich bei dem Bauteil aus CP800 Abweichungen von mindestens 2 mm bis maximal 4 mm.

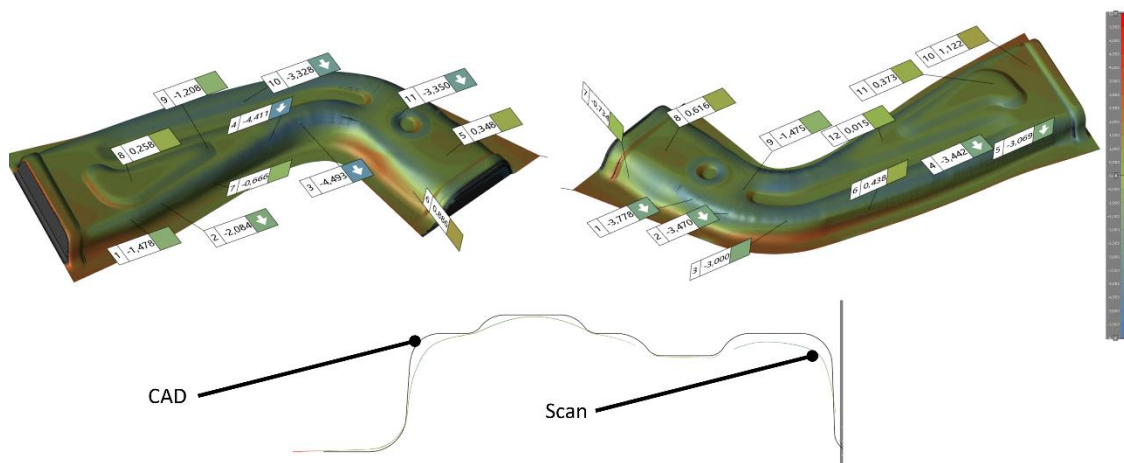


Figure 71: Hybridbauteil aus CP800 Stahl mit Faro-Arm gescannt

## 8. Upscaling und Automatisierung

Das übergeordnete Ziel des MultiPro-Projekts bestand darin, die Fertigung des hybriden Längslenkers zu automatisieren, um eine wirtschaftliche und serientaugliche Produktion zu ermöglichen und ein TRL 6 Niveau zu erreichen, dabei kann der entwickelte hybride

Längslenker in einer simulierten, automatisierten Produktionsumgebung hergestellt werden. Zur Erreichung dieses Ziels entwickelte die Firma Weber Fibertech einen automatisierten Herstellungsprozess, bei dem Robotertechnik zur automatischen Positionierung und Einlegung sowohl des Stahlbleches als auch des LFT-Extrudats in das Umformwerkzeug integriert wurde. Durch diesen Ansatz konnte der manuelle Aufwand deutlich reduziert und die Reproduzierbarkeit sowie Prozesssicherheit erhöht werden. Dazu hat die Firma Weber Fibertech ein Roboterprogramm entwickelt, das die automatisierte Positionierung des LFT-Extrudats und des Stahlblechs übernimmt. Der Roboter greift die Bauteile und legt sie präzise an den vorgesehenen Positionen im Werkzeug ab.

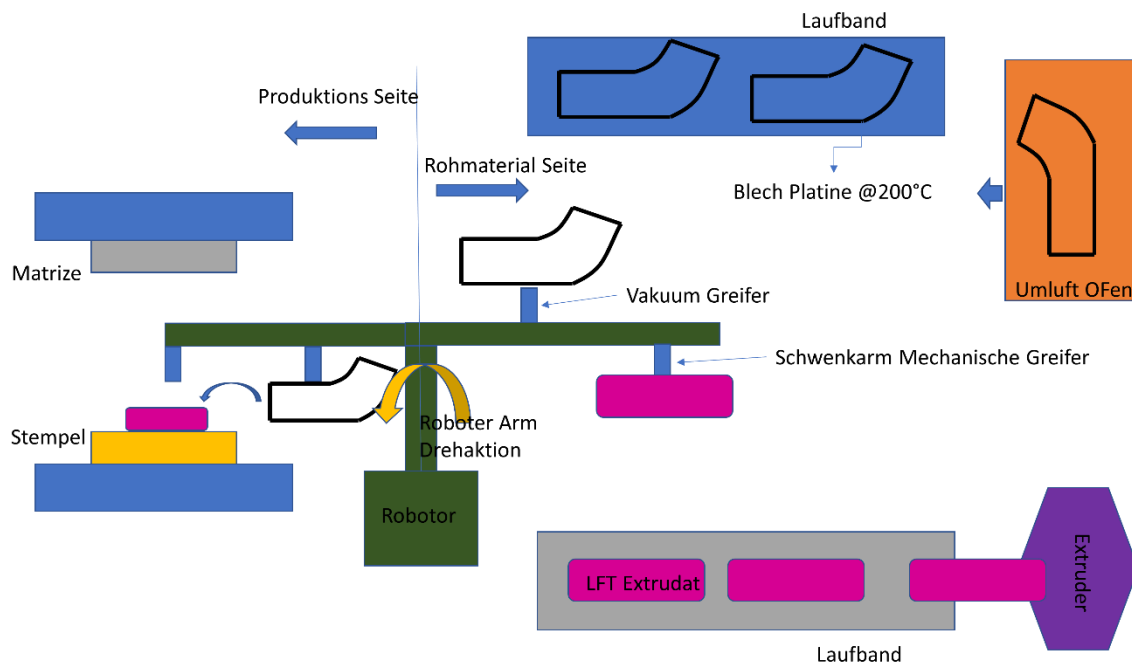


Figure 72: Schematische Darstellung der automatisierten Fertigung des hybriden Längslenkers

Figure 72: Schematische Darstellung der automatisierten Fertigung des hybriden Längslenkers zeigt eine schematische Darstellung der automatisierten Fertigungslinie, die von der Firma Weber Fibertech entwickelt und programmiert wurde. Auf der einen Seite befindet sich der Bereich der Materialverarbeitung, auf der anderen Seite die eigentliche Produktion des Längslenkers. Im Bereich der Materialverarbeitung werden Stahlblechplatten zunächst in einem Umluftofen auf die gewünschte Prozesstemperatur erhitzt und anschließend auf ein Transportband abgelegt. Parallel dazu befindet sich die Extrusionseinheit, in der das PA6-LFT40-Material verarbeitet und in zugeschnittenen Mengen ebenfalls auf einem separaten Laufband bereitgestellt wird. In der Mitte der Anlage ist ein Roboter positioniert, der mit zwei unterschiedlichen Greifersystemen ausgestattet ist. Zum einen verfügt er über einen konventionellen Vakuums Greifer, mit dem zunächst die erwärmte Stahlblechplatte vom Laufband aufgenommen wird. Anschließend fährt der Roboter zur Extrudatseite, wo mithilfe eines Schwenkarms und eines mechanischen Greifers eine vorab abgewogene und zugeschnittene Menge des LFT-Extrudats aufgenommen wird.

Sobald beide Materialien aufgenommen wurden, rotiert der Roboterarm und positioniert zunächst das Extrudat in der Kavität des Werkzeugs. Anschließend bewegt sich derselbe Arm weiter nach vorne und legt das Stahlblech präzise an der vorgesehenen Stelle im Werkzeug ab.

Da der Längslenker eine L-förmige Struktur aufweist, muss auch das Extrudat eine entsprechende L-Form besitzen, um eine gleichmäßige und flächendeckende Platzierung auf dem Stempel zu gewährleisten. Zu diesem Zweck entwickelte die Firma Weber Fibertech ein spezielles Schwenkarm-Greifersystem Figure 73: Winkeleinstellung durch . Dieses System nimmt zunächst das rechteckig zugeschnittene Extrudat vom Laufband auf und formt es während des Transfers zum Werkzeug in die gewünschte L-Form. Der Schwenkarm passt das Extrudat dabei exakt an die Kontur des Längslenkers an und positioniert es präzise in der Kavität.

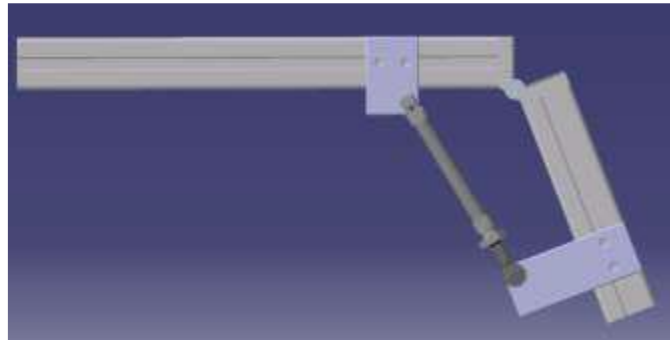
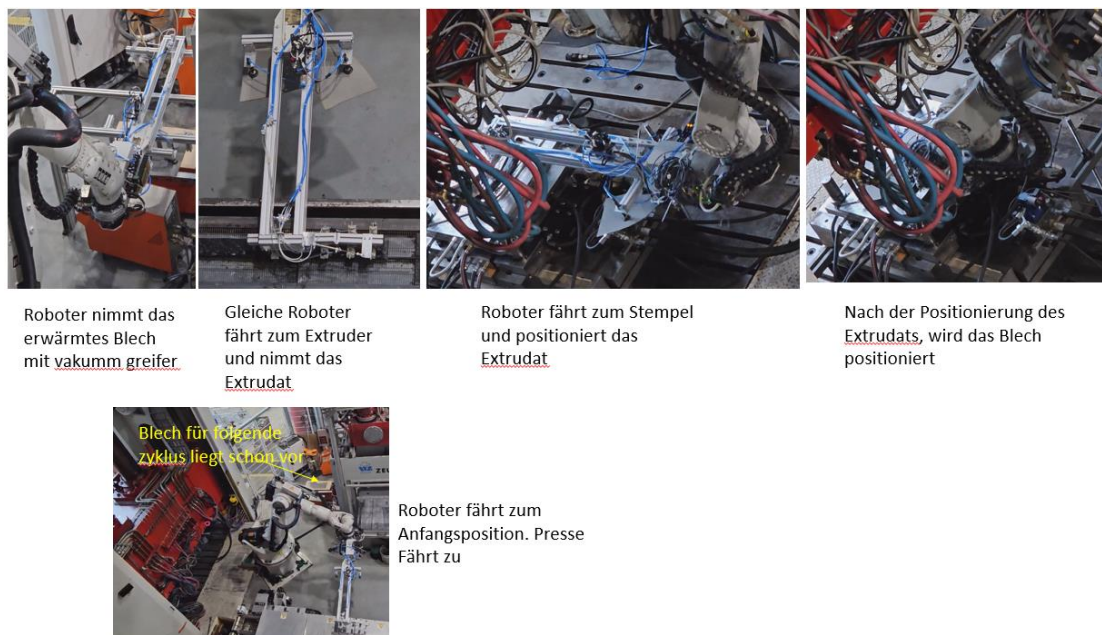


Figure 73: Winkeleinstellung durch Pneumatik Zylinder

Nach einem abgeschlossenen Produktionszyklus des hybriden Längslenkers wird das Bauteil manuell aus dem Werkzeug entnommen.



Roboter nimmt das erwärmtes Blech mit vakuum greifer

Gleiche Roboter fährt zum Extruder und nimmt das Extrudat

Roboter fährt zum Stempel und positioniert das Extrudat

Nach der Positionierung des Extrudats, wird das Blech positioniert



Roboter fährt zum Anfangsposition. Presse fährt zu

Figure 74: Automatisierung der Längslenker Pressversuche - Chronologisch dargestellt

Die Analyse der Taktzeit im automatisierten Fertigungsprozess des hybriden Längslenkers ergibt eine Gesamtzykluszeit von 71 Sekunden. Der Ablauf beginnt mit dem Transfer des Stahlblechs zum Schwenkarm, wobei dieser Vorgang bis zur Übergabe an den Roboter 11 Sekunden in Anspruch nimmt. Anschließend benötigt der Roboter 6 Sekunden, um das Blech zur LFT-Anlage zu bringen. Dort folgt eine Wartezeit von 10 Sekunden, bis das LFT-Extrudat aufgenommen wird. Der gemeinsame Transfer von Blech und LFT zum Werkzeug dauert

weitere 12 Sekunden. Danach schließt die Presse bis zur unteren Totpunktlage in 10 Sekunden. Es folgt eine definierte Zuhaltezeit von 18 Sekunden, bevor das fertige Bauteil in einem letzten Schritt innerhalb von 4 Sekunden entnommen wird.

## 9. Zusammenfassung

Der Leichtbau ist seit jeher ein zentrales Ziel in der Entwicklung von Automobilkomponenten. Oftmals wird Leichtbau durch den Einsatz von faserverstärkten Kunststoffen (FVK) realisiert. Allerdings reicht die alleinige Verwendung von FVK-Materialien bei strukturellen Bauteilen nicht aus, um die hohen mechanischen Anforderungen und Sicherheitsstandards der Automobilindustrie zu erfüllen. Aus diesem Grund wurde das Konzept von Hybridbauteilen, insbesondere der Mischbauweise aus Metall und FVK, entwickelt.

Im Rahmen des Forschungsprojekts MultiPro wurden die Eigenschaften von Stahl- und FVK-Materialien systematisch untersucht. Darüber hinaus wurde das sogenannte Hybridformverfahren eingesetzt, mit dem sich Metall- und Kunststoffkomponenten in einem gemeinsamen Prozessschritt zu strukturell belastbaren Leichtbauteilen kombinieren lassen. Der entwickelte Prozess konnte anschließend exemplarisch auf die Herstellung eines automobilen Strukturbauteils, ein Längslenker, angewendet werden. Dabei konnte eine automatisierte Serienfertigung demonstriert werden, die das Potenzial des Hybridformverfahrens für den industriellen Einsatz eindrucksvoll bestätigt. In diesem Projekt wurde ein neues Variothermie-Konzept eingeführt, um eine asymmetrische und schnelle Werkzeugkühlung zu ermöglichen. Ziel war es, sowohl die Taktzeit zu verkürzen als auch die Eigenspannungen im Bauteil zu reduzieren. In einem weiteren Projektschritt wurde ein Bauteil mit komplexer Geometrie und variierender Ziehtiefe entwickelt. Mit Unterstützung von Umformsimulationen konnte ein entsprechendes Werkzeug ausgelegt und gefertigt werden. Mit diesem Werkzeug wurde anschließend ein hybrides Bauteil hergestellt, wobei sowohl ein Tiefziehstahl als auch ein hochfester Stahl zum Einsatz kamen. Die Umformbarkeit beider Materialvarianten wurde im Prozess bewertet. Das Ergebnis stellt einen erfolgreichen Machbarkeitsnachweis dar, dass sich das Hybridformverfahren auch für die Herstellung komplexer Strukturbauteile eignet. Abschließend wurde ein Demonstratorbauteil in Form eines hybriden Längslenkers entwickelt. Die Gestaltung erfolgte auf Basis der Ergebnisse einer Topologie Optimierung, bei der alle vom OEM definierten Lastfälle berücksichtigt wurden. Dadurch konnte eine lastpfadgerechte, gewichtsoptimierte und funktionsintegrierte Bauteilstruktur konstruiert werden. Dazu wurde ein entsprechendes Werkzeug konzipiert und gefertigt, das anschließend bei der Firma Weber Fibertech in Betrieb genommen wurde. In der Folge wurden mehrere Pressversuche durchgeführt. Um eine seriennahe Fertigung zu simulieren, wurde ein automatisiertes Fertigungsverfahren entwickelt. Dabei erfolgte die Positionierung des Stahlblechs und des Extrudats mithilfe eines Roboters, der beide Komponenten präzise im Werkzeug platzierte. Dieser automatisierte Ablauf diente der Nachbildung industrieller Prozessbedingungen. 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.

Ergänzend dazu wurde in diesem Projekt eine systematische Simulationskette für die FEM-Simulation von LFT-Materialien entwickelt. Hierzu wurde zunächst eine Prozesssimulation des Fließpressvorgangs durchgeführt, um die Faserorientierung im Bauteil zu ermitteln. Die dabei berechneten Faserorientierungsdaten wurden anschließend auf das FEM-Netz übertragen.

Unter Berücksichtigung der Anisotropie des Materials konnten daraufhin realitätsnahe Performanzsimulationen durchgeführt werden, um das Strukturverhalten des Bauteils unter verschiedenen Belastungsbedingungen zu analysieren.

## Literaturverzeichnis

1. Schürmann, H.: Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg (2007). <https://doi.org/10.1007/978-3-540-72190-1>.
2. Vasconcelos, R.L., Oliveira, G.H.M., Amancio-Filho, S.T., Canto, L.B.: Injection overmolding of polymer-metal hybrid structures: A review. *Polymer Engineering & Sci.* 63, 691–722 (2023). <https://doi.org/10.1002/pen.26244>.
3. Mengel, M., Mahler, J., Schober, W.: Effect of Post-mold Curing on Package Reliability. *Journal of Reinforced Plastics and Composites.* 23, 1755–1765 (2004). <https://doi.org/10.1177/0731684404033965>.
4. Priyadarshi, A.K., Gupta, S.K., Gouker, R., Krebs, F., Shroeder, M., Warth, S.: Manufacturing multi-material articulated plastic products using in-mold assembly. *Int J Adv Manuf Technol.* 32, 350–365 (2007). <https://doi.org/10.1007/s00170-005-0343-z>.
5. Friedrich, K., Almajid, A.A.: Manufacturing Aspects of Advanced Polymer Composites for Automotive Applications. *Appl Compos Mater.* 20, 107–128 (2013). <https://doi.org/10.1007/s10443-012-9258-7>.
6. El-Hajjar, R., Tan, H., Pillai, K.M.: Advanced processing techniques for composite materials for structural applications. In: *Developments in Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Composites for Civil Engineering.* pp. 54–77e. Elsevier (2013). <https://doi.org/10.1533/9780857098955.1.54>.
7. Oliveux, G., Dandy, L.O., Leeke, G.A.: Current status of recycling of fibre reinforced polymers: Review of technologies, reuse and resulting properties. *Progress in Materials Science.* 72, 61–99 (2015). <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2015.01.004>.
8. Khan, F., Hossain, N., Mim, J.J., Rahman, S.M., Iqbal, Md.J., Billah, M., Chowdhury, M.A.: Advances of composite materials in automobile applications – A review. *Journal of Engineering Research.* S2307187724000440 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.jer.2024.02.017>.
9. Fang, X.F., Kloska, T.: Hybrid forming of sheet metals with long Fiber-reinforced thermoplastics (LFT) by a combined deep drawing and compression molding process. *Int J Mater Form.* 13, 561–575 (2020). <https://doi.org/10.1007/s12289-019-01493-4>.
10. Jayakumar, S., Hajdarevic, A., Anand, S., Fang, X.F.: Experimental and FE analyses of the crushing and bending behaviors of GMT and hybrid-formed Al-GMT structures. *Thin-Walled Structures.* 186, 110648 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.tws.2023.110648>.
11. Anand, S.C., Fang, X.F.: Numerical Methodology Development and Validation for Fatigue Life Prediction of PA-6 Long Fibre Thermoplastic Material Manufactured using Compression Moulding. *Applied Composite Materials.* <https://doi.org/10.1007/s10443-025-10328-2>.