

# **Ultraschallfertigung von faserverstärkten Kunststoffen**

## **Ultrasonic Fabrication of Fibre Reinforced Plastics**

Von der Fakultät für Maschinenwesen der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Ingenieurwissenschaften genehmigte Dissertation

vorgelegt von

**Andreas Gomer**

Berichter:    Universitätsprofessor Dr. rer. nat. Werner Karl Schomburg  
                  Privatdozent Dr.-Ing. Matthias Worgull

Tag der mündlichen Prüfung:    8. April 2019

Diese Dissertation ist auf den Internetseiten der Universitätsbibliothek online verfügbar.

## Kurzfassung

Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe (CFK) finden aufgrund ihrer hohen mechanischen Belastbarkeit bei gleichzeitig geringem Gewicht zunehmend Verwendung im Fahr- und Flugzeugbau, wo sie zur Reduktion von Energieverbrauch und Schadstoffemission beitragen. Nachteilig sind jedoch ihre hohen Werkstoffkosten. Hierzu trägt neben den Kosten für Rohmaterialien die Fertigung von CFK bei, die durch hohe Investitionskosten für Anlagen sowie lange Prozesszykluszeiten gekennzeichnet ist.

Bei der Ultraschallfertigung hingegen betragen die Investitionskosten für die Maschinen wenige Zehntausend Euro. Ferner kann eine Vielzahl thermoplastischer Polymere verarbeitet werden und die Prozesszykluszeiten betragen nur wenige Sekunden. Daher war es das Ziel der vorliegenden Arbeit, die Ultraschallfertigung als ein neues, mögliches Verfahren zur Herstellung von CFK zu untersuchen.

Hierfür wurde zunächst ein standardisiertes Vorgehen zur Herstellung der Proben und Durchführung von Zugversuchen zur Bestimmung der mechanischen Belastbarkeit definiert. Diese Standards trugen dazu bei, die Reproduzierbarkeit und Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu erhöhen. Anschließend erfolgte der Entwicklung des Prozesses der Ultraschallfertigung von CFK, bei dem trockene und unbehandelte Kohlenstofffasern zwischen festen, als Matrix dienenden, Polymerfolien positioniert und mithilfe von Ultraschall zu ein- und mehrlagigen CFK verarbeitet wurden.

Durch eine geeignete Auswahl von Prozessparametern und Dicke der Polymerfolien wurden CFK-Proben hergestellt, bei denen die Fasern vollständig in die Matrix eingebettet wurden und homogen über den Probenquerschnitt verteilt vorlagen. Die Anzahl der verwendeten Faser- und Folienlagen wurde sukzessive erhöht und CFK mit bis zu 20 Faserlagen sowie einer Gesamtdicke von 2,5 mm hergestellt. Bei einem Faserfüllgrad von 31,6 Vol.-% betrug die maximale Zugfestigkeit 1,24 GPa.

Es wurde gezeigt, dass bei der Ultraschallfertigung gängige Thermoplaste wie PP, PE, PC, PA6 und PEEK verwendet werden können. Neben unidirektionalen CFK wurden durch die Verwendung von Geweben multidirektionale CFK-Platten mit einer Abmessung von 116 mm x 64 mm x 1,2 mm gefertigt. Darüber hinaus konnten bei gleichbleibendem Versuchsaufbau mittels der Ultraschallfertigung neben Kohlenstoff- auch Glasfasern zu glasfaserverstärkten Kunststoffen (GFK) verarbeitet werden.

Durch den Einsatz von rotierenden Rundsonotroden wurde die kontinuierliche Ultraschallfertigung von CFK demonstriert. Hierbei konnten ca. 30 cm lange CFK-Proben mit bis zu drei Faserlagen und einer Matrix aus PP, PE oder PA6 hergestellt werden. Bei einem Faserfüllgrad von 21 Vol.-% betrug die Zugfestigkeit dieser CFK 847 MPa. Des Weiteren war es durch eine Erweiterung des Versuchsaufbaus möglich, mithilfe der Ultraschallfertigung dreidimensionale Bauteile herzustellen.

Außer der Herstellung von CFK wurde in der vorliegenden Arbeit zudem das Fügen zweier konventionell gefertigter CFK mittels Ultraschallschweißen untersucht. Neben thermoplastischen CFK konnten erstmals zwei an ihren Fügeflächen vorbehandelte duroplastische CFK verbunden werden. Die Scherfestigkeit betrug ca. 19,4 MPa.

## Abstract

Due to their high mechanical resilience and low weight, Carbon Fibre Reinforced Plastics (CFRP) are used increasingly in the field of aviation or automotive, where they help to reduce energy consumption or pollutant emissions. However, the major drawback of CFRP is their high material costs. Besides the costs for raw materials, the fabrication of CFRP itself requiring high investment costs for machinery and long overall processing times result in the high material costs of CFRP.

On the other hand, required investment costs for ultrasonic welding machines are in the order of some ten thousand Euros. Furthermore, various thermoplastic polymer materials can be processed within some seconds. Therefore, it was the goal of this work to examine ultrasonic processing for the fabrication of CFRP.

In the beginning of the work, a standardized process was defined for manufacturing of the samples and performing of mechanical tensile tests. Those standards were applied in the following and helped increasing the reproducibility of fabrication as well as the comparability of the results of tensile tests. Afterwards, the ultrasonic fabrication process of CFRP was developed systematically. Dry and untreated carbon fibres between solid polymer foils serving as a matrix were ultrasonically processed to single-layered and multi-layered CFRP.

By choosing suitable process parameters and the thickness of the polymer material, CFRP samples were ultrasonically fabricated. In this process, all carbon fibres were embedded completely into the matrix and homogeneously distributed over the cross section of the CFRP. The number of carbon fibre layers was increased successively up to 20 layers and CFRP with a total thickness of up to 2.5 mm were manufactured. Furthermore, a fibre volume content of the CFRP of 31.6 % and a tensile strength of 1.24 GPa were achieved.

The experiments showed that common thermoplastic polymer materials such as PP, PE, PC, PA6 and PEEK can be processed ultrasonically. Besides unidirectional CFRP made from carbon fibre roving, multidirectional CFRP plates with dimensions of 116 mm × 64 mm × 1.2 mm were fabricated by employing carbon fibre canvas. Furthermore, ultrasonic processing also allowed to process glass fibres to Glass Fibre Reinforced Plastics (GFRP).

Additionally, the continuous ultrasonic fabrication of CFRP was demonstrated by using a disk-shaped rotating sonotrode. That way, CFRP samples with a length of approximately 30 cm and a matrix from PP, PE and PA6 were fabricated. A fibre volume content of 21 % and a tensile strength of 847 MPa were achieved.

Besides the ultrasonic fabrication of CFRP this work also examined the bonding of two conventionally fabricated CFRP by using ultrasonic welding. Besides bonding of two thermoplastic CFRP, it was demonstrated that thermoset CFRP can be bonded ultrasonically as well. The achieved lap shear strength of the bonding was 19.4 MPa.

## Danksagung

Zur Entstehung der vorliegenden Arbeit haben zahlreiche Personen beigetragen, die ich an dieser Stelle erwähnen möchte. Herrn Prof. Dr. Schomburg bin ich größtmöglichen Dank schuldig. Er bot mir im Jahr 2015 die Gelegenheit an seinem Lehrstuhl als wissenschaftlicher Mitarbeiter eine Promotion zu beginnen. In den nächsten drei Jahren unterstützte er mich mit wertvollen Vorschlägen und Tipps zur Planung, Durchführung und Auswertung meiner Forschungsarbeiten. Insbesondere die Freiheiten, die er mir dabei bot, habe ich immer dankend zu schätzen gewusst. Ohne ihn würde diese Dissertation nicht entstanden sein.

Für die inhaltliche Unterstützung sowie die vielen kostbaren Beiträge zu dieser Dissertation möchte ich meinen Studenten den Damen Shi und Zhou sowie den Herrn Cottmann, Grigat, Kappe, Kölker und Zou danken. Erst Euer Mitwirken hat diese Arbeit ermöglicht. Für Euren Beitrag danke ich Euch zutiefst.

Für moralische Unterstützung sowie interessante Gespräche möchte ich herzlich meinen Bürokollegen Herrn Dr. Maurer, Herrn Beckmann und Herrn Zou danken. Ich hatte eine sehr schöne Zeit mit Euch und werde unsere angenehme, freundschaftliche Büroatmosphäre vermissen. Herrn Hoehr möchte ich meinen besonderen Dank für die zahlreichen morgendlichen, kraftspendenden Kaffeerunden sowie fachliche und fachfremde Diskussionen aussprechen.

Weiterhin möchte ich für ihre Betreuung sowie die eingebrachten Ideen meinen Dank an die Oberingenieure Herrn Dr. Gerhardy und Herrn Dr. Sackmann aussprechen. Für ihre praktische oder theoretische Unterstützung bei meiner Arbeit möchte ich den Damen Schleiden, Bavendiek und Kosloh sowie Herrn Janhsens danken.

Besonderer Dank gebührt zudem meiner Familie, die mich während meiner schulischen und universitären Ausbildung unterstützte und mich zur Promotion motivierte. Meiner Partnerin Valerie danke ich von ganzem Herzen für ihr Verständnis sowie ihre Rücksichtnahme, die ich insbesondere während der zeitintensiven Arbeit an dieser Dissertationsschrift zu schätzen gewusst habe.

Ich danke Euch allen für Eure Liebe, den Glauben sowie die Unterstützung.

Euer Andreas

# Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung.....	1
2.	Stand der Technik .....	3
2.1	Faserverbundkunststoffe .....	3
2.1.1	Definitionen und technische Grundlagen .....	3
2.1.2	Matrixmaterialien.....	6
2.1.3	Fasermaterialien .....	9
2.2	Herstellungsverfahren von CFK.....	12
2.2.1	Verarbeitung von Prepregs .....	13
2.2.2	Pultrusion- und Wickelverfahren .....	16
2.2.3	Nasslaminier- und Infusionsverfahren.....	19
2.2.4	Press- und Injektionsverfahren .....	20
2.2.5	Sonstige Verfahren .....	21
2.3	Ultraschallfertigung.....	22
2.3.1	Definitionen und technische Grundlagen .....	22
2.3.2	Ultraschallschweißen .....	23
2.4	CFK-Fertigung im Bereich der Forschung .....	25
2.4.1	Ultraschallfertigung von CFK-Preforms.....	25
2.4.2	Ultraschallgestütztes Tapelegeverfahren.....	27
2.4.3	Ultraschallfertigung von GFK.....	27
3.	Grundlagen der Ultraschallfertigung von CFK .....	29
3.1	Motivation und Vorstellung des Verfahrens .....	29
3.1.1	Technisches Funktionsprinzip.....	30
3.1.2	Potenziale des Verfahrens.....	31
3.2	Experimentelle Voruntersuchungen.....	32
3.2.1	Ultraschallfertigung einlagiger CFK.....	33
3.2.2	Ultraschallfertigung mehrlagiger CFK .....	34
3.2.3	Untersuchung ultraschallbedingter Faserbrüche.....	36
4.	Entwicklungsprozess der Ultraschallfertigung von CFK .....	40
4.1	Standardisierung der Herstellung und Zugprüfung .....	40
4.1.1	Herstellungsprozess .....	41
4.1.2	Zugprüfung.....	47
4.1.3	Berechnung des Faserfüllgrades .....	51
4.2	Weiterentwicklung des Herstellungsprozesses .....	52

4.2.1	Identifikation der Versagensursache .....	52
4.2.2	Steigerung der Randschichthaftung .....	54
4.2.3	Homogenisierung des Probenquerschnittes .....	58
4.3	Steigerung der Folien- und Faserlagenanzahl.....	61
4.3.1	Einmalige Verschweißung.....	62
4.3.2	Verschweißung vorgefertigter CFK.....	68
4.3.3	Untersuchung der Zugfestigkeiten .....	70
4.4	Variation verwendeter Matrixwerkstoffe.....	72
4.4.1	Herstellung der Proben .....	73
4.4.2	Durchführung von Zugversuchen.....	75
4.5	Ultraschallfertigung multidirektionaler CFK.....	77
4.5.1	Variation der Orientierung unidirektionaler Fasern.....	77
4.5.2	Verschweißung von multidirektionalen Geweben .....	83
4.6	Ultraschallfertigung von GFK.....	86
5.	Anwendungsbeispiele der Ultraschallfertigung von CFK .....	89
5.1	Kontinuierliche Fertigung mittels Rundsonotrode .....	89
5.2	Herstellung dreidimensionaler Bauteile .....	97
6.	Fügen von thermo- und duroplastischen CFK mithilfe von Ultraschall .....	103
6.1	Ultraschallverschweißen von thermoplastischen CFK.....	103
6.2	Ultraschallverschweißen von duroplastischen CFK.....	108
6.2.1	Verschweißung ohne Fügeflächenvorbehandlung .....	110
6.2.2	Variation der Fügeflächenvorbehandlung .....	111
7.	Fazit und Ausblick .....	118
	Literaturverzeichnis .....	I
	Anhang .....	IX
	A.1: Datenblätter .....	IX
	A.2: Prozessparameter .....	XVIII
	A.3: Sonstiges.....	XLVI

# Abkürzungen und Formelzeichen

<b>Abkürzung</b>	<b>Beschreibung</b>
ATL	Automatisiertes Tapelegen (engl. Automated Tape Laying)
bspw.	beispielsweise
bzw.	beziehungsweise
C	Kohlenstoff
ca.	circa
CFK	Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff
CFRP	Carbon Fibre Reinforced Plastic
ED	Energiedirektor
E-Modul	Elastizitätsmodul
FVK	Faserverbundkunststoff
FVW	Faserverbundwerkstoff
gem.	gemäß
Gew.	Gewicht
GFK	Glasfaserverstärkter Kunststoff
GFRP	Glass Fibre Reinforced Plastic
GPa	Gigapascal
HDT	Wärmeformbeständigkeitstemperatur (engl. Heat Deflection Temperature)
HM	Hoher Elastizitätsmodul (engl. High Modulus)
HT	Hohe Festigkeit (engl. High Tenacity)
IS	Induktionsschweißen
Hz	Hertz
KMU	kleine- und mittlere Unternehmen
Mio.	Million
MPa	Megapascal

<b>Abkürzung</b>	<b>Beschreibung</b>
RTM	Harzinjektion (engl. Resin Transfer Moulding)
PA	Polyamid
PC	Polycarbonat
PE	Polyethylen
PEEK	Polyetheretherketon
PEI	Polyetherimid
PET	Polyethylenterephthalat
PMMA	Polymethylmethacrylat
PP	Polypropylen
PPS	Polyphenylensulfid
PS	Polystyrol
PSU	Polysulfon
PTFE	Polytetrafluorethylen
PVB	Polyvinylbutyral
PVC	Polyvinylchlorid
PVDF	Polyvinylidenfluorid
sog.	sogenannt
Tsd.	Tausend
UHM	Sehr hoher Elastizitätsmodul (engl. Ultra High Modulus)
UHMW	Ultrahochmolekular (engl. Ultra High Molecular Weight)
US	Ultraschall
UV	Ultraviolett
Vol.	Volumen
VW	Verbundwerkstoff (engl. Composite)
WS	Widerstandsschweißen

<b>Formelzeichen</b>	<b>Einheit</b>	<b>Beschreibung</b>
A	$\mu m$	Amplitude
c	$m/s$	Schallgeschwindigkeit
E	$N/mm^2$	Elastizitätsmodul
f	$1/s$	Frequenz
J	$W/m^2$	Energieintensität
L	$mm$	Länge
m	$kg$	Masse
V	$m^3$	Volumen
$\varepsilon$	%	Dehnung
$\rho$	$kg/m^3$	Dichte
$\sigma$	$N/mm^2$	Spannung
$\varphi$	%	Volumenanteil

## 1. Einleitung

Aktuelle Entwicklungen wie die begrenzte Verfügbarkeit von fossilen Ressourcen, gesetzliche Auflagen zur Minderung von Schadstoffemissionen oder der zunehmende Kundenwunsch nach ökologisch-nachhaltigen und energieeffizienten Produkten führen zu einer branchenübergreifenden Verbreitung des Leichtbaus. Der Oberbegriff Leichtbau umfasst hierbei sämtliche Aktivitäten zur Gewichtsreduktion von Produkten oder Bauteilen wie etwa eine belastungsgerechte Konstruktion oder eine geeignete Auswahl der verwendeten Werkstoffe.

Insbesondere im Bereich der Mobilität wie etwa dem Flug- und Fahrzeugbau zielen aktuelle Bestrebungen darauf ab, das Bauteilgewicht und somit den Energieverbrauch zu reduzieren. Hierfür wird zunehmend kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff (CFK) als Leichtbauwerkstoff eingesetzt. CFK zeichnet sich durch eine hohe mechanische und thermische Belastbarkeit bei gleichzeitig geringem Gewicht aus. So ist beispielsweise bei CFK das Verhältnis von Festigkeit zu Gewicht etwa fünf Mal so hoch wie bei Stahl [1,2]. Daher kann durch die Verwendung von belastungsgerecht konstruierten CFK-Bauteilen bei gleichbleibender mechanischer Lastanforderung das Bauteilgewicht gegenüber vergleichbaren Stahlkonstruktionen um bis zu 70 % reduziert werden [1].

Die Werkstoffkosten von CFK variieren mit den jeweiligen Branchenanforderungen und betragen derzeit ca. 75 €/ kg im Fahrzeug- bis hin zu ca. 275 €/ kg im Flugzeugbau [3,4]. Somit sind Bauteile aus CFK in etwa um den Faktor sechs bzw. vier teurer als vergleichbare Stahl- oder Aluminiumkonstruktionen [4]. Aus diesem Grund wird CFK derzeit vorwiegend in Hochleistungs- oder Sonderanwendungen eingesetzt, bei denen sich die höheren Bauteilkosten aufgrund der über den gesamten Lebenszyklus erzielten Treibstoff- bzw. Energiekosteneinsparungen amortisieren [5]. In der Elektromobilität wie beispielsweise dem BMW i3 wird durch die Verwendung von CFK das Fahrzeuggewicht gesenkt und so die Reichweite pro Akkuladung erhöht. In der Luftfahrt wird CFK für die Herstellung von Rumpf- und Tragflächenstrukturen genutzt. In aktuellen Flugzeugmodellen wie dem Airbus A350 oder dem Boeing 787 beträgt der Anteil verwendeter CFK-Werkstoffe jeweils ca. 50 Gew.-% [3,6].

In diesen beiden beispielhaft vorgestellten Anwendungen rechtfertigt die erzielte Gewichts- und Treibstoffeinsparung den Einsatz von hochpreisigen CFK. Um jedoch CFK zukünftig als industriellen Massenwerkstoff wirtschaftlich nutzen zu können, müssen laut aktuellen Berechnungen die Kosten von CFK um mehr als 66 % gesenkt werden [3].

Neben den Rohstoffkosten für das Faser- und Matrixmaterial, tragen die derzeitigen Produktionsprozesse maßgeblich zu den hohen Preisen von CFK bei. Während die industrielle Herstellung von Stahl oder Aluminium weitestgehend ausgereift ist, weist die Fertigung von CFK weiterhin Entwicklungs- und Verbesserungspotenzial auf [7]. Zu den bedeutendsten Herstellungsverfahren von CFK zählt die Verarbeitung von Prepregs, also vorimprägnierten und formbaren Halbzeugen, sowie das Pultrusionsverfahren [1,3]. Die Verarbeitung von Prepregs ist ein semi-automatisierter Prozess

und ermöglicht flexibel einstellbarere mechanische Eigenschaften, geometrische Formen oder Abmessungen der produzierten Bauteile. Für die Umformung und Aushärtung der Prepregs wird jedoch ein Autoklav benötigt. Als nachteilig gilt zudem, dass CFK-Prepregs je nach Matrix bei bis zu ca.  $-20\text{ °C}$  gelagert und innerhalb von drei Monaten verarbeitet werden müssen, da sie sonst aushärten. Die Pultrusion ist hingegen ein kontinuierliches Verfahren zur automatisierten Fertigung von CFK. Ein Nachteil dieses Verfahrens sind jedoch die hohen Investitionskosten, die je nach Anlagengröße von mehreren hundert Tausend bis hin zu mehreren Millionen Euro reichen. Darüber hinaus sind bei diesem Verfahren Änderungen hinsichtlich mechanischer Eigenschaften oder Geometrien der zu fertigenden Bauteile mit Zusatzkosten für die Anpassung der Anlage verbunden. Um die Investitionskosten zu amortisieren, wird die Pultrusion daher für die Serienfertigung von CFK-Bauteilen ab einer Stückzahl im Bereich von einigen Tausend eingesetzt.

Den beschriebenen charakteristischen Merkmalen konventioneller CFK-Fertigung stehen die der Ultraschallfertigung gegenüber. Die Ultraschallfertigung ist der Oberbegriff für eine Reihe von umformenden und fügenden Fertigungsverfahren, wie dem Ultraschallschweißen, -heißprägen oder -thermoformen, bei denen der Energieeintrag mittels Ultraschall zum Erhitzen und lokalen Aufschmelzen des Materials verwendet wird [8]. Die Ultraschallfertigung zeichnet sich durch kurze Prozesszykluszeiten von wenigen Sekunden sowie einer Vielzahl an verschweißbaren Werkstoffen aus [9]. Die Investitionskosten für Ultraschallschweißmaschinen betragen nur wenige Zehntausend Euro [10]. Die Maschinen können sowohl manuell als auch automatisiert betrieben werden und eignen sich daher sowohl für die Einzelteil- als auch für die Serienfertigung.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, die Ultraschallfertigung als einen alternativen Prozess für die Herstellung von CFK zu erforschen. Hierfür wurden zuerst experimentelle Voruntersuchungen durchgeführt, bei denen Kohlenstofffasern und Polymerfolien mithilfe von Ultraschall zu ein- oder mehrlagigen CFK-Proben verschweißt wurden. Die prinzipielle Herstellbarkeit von CFK mittels Ultraschallschweißen konnte bei diesen Voruntersuchungen gezeigt werden, daher erfolgte anschließend die systematische Weiterentwicklung des Verfahrens. Hierfür wurden zunächst standardisierte Abläufe für die Herstellung sowie mechanische Untersuchungen definiert, um somit eine Vergleichbarkeit erzielter Ergebnisse zu ermöglichen. Anschließend wurden mithilfe von Ultraschall CFK-Proben hergestellt, bei denen sowohl der Faserfüllgrad, also der Volumenanteil des Fasermaterials im CFK, als auch die Orientierung der verwendeten Fasern variiert wurden. In weiterführenden Versuchsreihen wurden zudem verschiedene thermoplastische Kunststoffe als Matrixmaterial erprobt. Neben unidirektionalen Fasern wurden darüber hinaus Gewebe aus Kohlenstofffasern sowie Glasfasern als Faserfüllstoff untersucht. Weiterhin wurde das entwickelte Verfahren der Ultraschallfertigung von CFK zur Herstellung eines dreidimensionalen Bauteils verwendet. Die Arbeit schließt mit einem Fazit sowie einem Ausblick zu weiterführendem Forschungsbedarf ab. Ferner sind im Anhang eingestellte Prozessparameter sowie Datenblätter verwendeter Materialien erfasst, um eine Reproduktion der vorgestellten Ergebnisse zu ermöglichen.

## 2. Stand der Technik

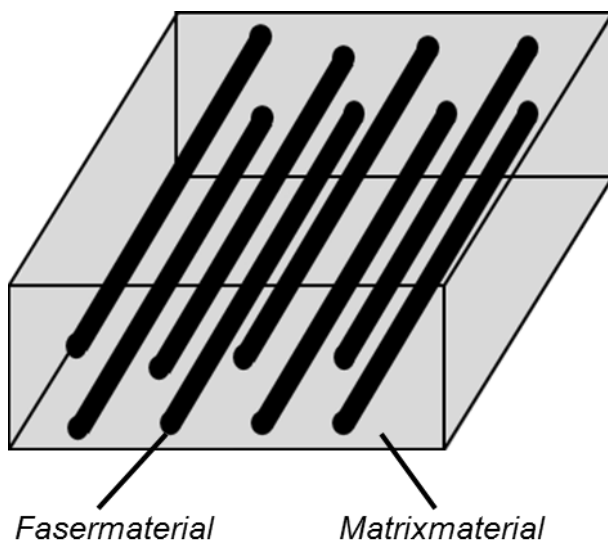
Um ein Verständnis der vorliegenden Arbeit zu ermöglichen, werden in diesem einleitenden Kapitel technische Grundlagen des Forschungsthemas vermittelt. Eingangs werden Faserverbundkunststoffe vorgestellt, deren Eigenschaften hervorgehoben und Anwendungsbeispiele genannt. Anschließend werden derzeitige industrielle Fertigungsverfahren von Faserverbundkunststoffen thematisiert und hinsichtlich gängiger Kriterien wie etwa Investitionskosten, Produktstückzahlen sowie Prozesszykluszeiten kategorisiert. Das Kapitel schließt mit einer Vorstellung der Ultraschallfertigung ab. Hierfür wird das zugrundeliegende technische Funktionsprinzip erläutert sowie eine Auswahl mittels Ultraschall verschweißbarer Materialien gegeben.

### 2.1 Faserverbundkunststoffe

Dieser Abschnitt beinhaltet Grundwissen zu Faserverbundkunststoffen. Es werden Definitionen erläutert, gängige Matrix- und Fasermaterialien vorgestellt sowie deren mechanische und chemische Eigenschaften beleuchtet. Der Fokus liegt hierbei auf kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen.

#### 2.1.1 Definitionen und technische Grundlagen

Der Oberbegriff Verbundwerkstoff (VW, engl. Composite) bezeichnet im Allgemeinen einen festen Werkstoff, der aus mindestens zwei verschiedenen Komponenten besteht [11]. Bei Verbundwerkstoffen wird prinzipiell zwischen dem Verstärkungs- bzw. Füllstoff als auch der Matrix bzw. dem Matrixwerkstoff unterschieden. Der Verstärkungsstoff ist in der Matrix eingebettet und dient zur Verbesserung der mechanischen oder elektrischen Eigenschaften des Verbundes [1,11]. Die Matrix hingegen sorgt für die plastische Formgebung des VW und schützt zudem den Füllstoff vor äußeren Umgebungseinflüssen wie etwa Temperatureinwirkungen, Strahlung, mechanischem Abrieb oder chemischer Belastung [12]. Branchenübergreifende Beispiele für VW sind Stahlbeton, Sperrholz oder Bimetall.



**Abbildung 2.1:** Schematische Darstellung eines Faserverbundwerkstoffes [13].

Liegt in einem VW der Verstärkungsstoff faserförmig vor, wird dieser als Faserverbundwerkstoff (FVW) bezeichnet [12]. Als faserförmig oder faserig gelten Stoffe, deren Aspektverhältnis, also das Verhältnis von Länge zu Durchmesser, größer ist als 100 [1]. Die Abbildung 2.1 zeigt eine schematische Darstellung eines FVW. Ein typisches Beispiel dieser Werkstoffgruppe stellt der bereits zuvor aufgezählte Stahlbeton dar: Der als Matrix dienende Beton wird mit langen, dünnen Stahleinlagen verstärkt, um so die Bruchdehnung und -spannung des FVW zu erhöhen.

Als Matrixwerkstoffe können prinzipiell Kunststoffe, Metalle oder keramische Werkstoffe verwendet werden. Aufgrund ihrer einfachen Verarbeitbarkeit haben Kunststoffe jedoch die größte Verbreitung [14]. FVW, bei denen die Fasermaterialien in einer Kunststoffmatrix eingebettet sind, werden als Faserverbundkunststoffe (FVK) oder faserverstärkte Kunststoffe bezeichnet [11]. Als Matrix können bei FVK thermoplastische oder duroplastische Kunststoffe verwendet werden, siehe Abschnitt 2.1.2.

Zu den Vorteilen von FVK zählen ihre mechanischen Eigenschaften wie eine hohe spezifische Steifigkeit und Festigkeit sowie eine geringe Dichte [14]. Sie verfügen über eine ausgeprägte Dauerfestigkeit [2] und eine hohe dynamische Belastbarkeit [12]. FVK eignen sich für einen ermüdungsfreien Langzeiteinsatz und gelten bei entsprechender Matrixauswahl als temperatur-, oxidations- und korrosionsbeständig [14]. Der thermische Ausdehnungskoeffizient vieler FVK ist sehr gering bis hin zu negativ [12], daher behalten FVK über einen weiten Temperaturbereich ihre geometrische Formstabilität. Die quantitativen Ausprägungen der mechanischen oder thermischen Eigenschaften von FVK variieren stark in Abhängigkeit der vorliegenden Faser-Matrix-Kombination und werden an einigen Beispielen im Abschnitt 2.1.3 detailliert vorgestellt.

Grundsätzlich weisen FVK ein anisotropes Verhalten auf. Ihre mechanischen Eigenschaften ändern sich folglich mit der Belastungsrichtung [1]. Höchstmögliche Ausprägungen für die Festigkeits- und Steifigkeitswerte werden stets in Faserrichtung erreicht [1]. Diese Richtungsabhängigkeit bietet gegenüber unverstärkten Materialien einen zusätzlichen Freiheitsgrad und kann bei der Konstruktion von Bauteilen gezielt genutzt werden [2]. Dies führt jedoch gegenüber der Verwendung von isotropen Werkstoffen zu einem erhöhten Aufwand bei der Konstruktion und der Auslegung von FVK-Bauteilen [12]. Weiterhin gilt bei FVK als nachteilig, dass bei Überbelastung ein sogenanntes katastrophales Versagensverhalten auftritt [12], der Bruch also plötzlich eintritt und nicht zuvor über ein Fließen des Werkstoffes angekündigt wird. Einen weiteren Nachteil stellt aus ökologischer Sicht die eingeschränkte Wiederverwendbarkeit insbesondere von duroplastischen FVK dar.

Entscheidenden Einfluss auf die Eigenschaften eines Verbundes haben die Auswahl von Faser- und Matrixmaterial, die Faserlänge, die Faserorientierung sowie der Gewichts- oder Volumenanteil der Fasern im FVK [13]. Nachfolgend werden die Einflussfaktoren detailliert vorgestellt.

Bei der Auswahl von Faser- und Matrixmaterial gilt es grundsätzlich folgende drei Bedingungen zu erfüllen, um einen Verstärkungseffekt zu erreichen [1,12]. Im Index steht f für Faser, m für Matrix und B für Bruch.

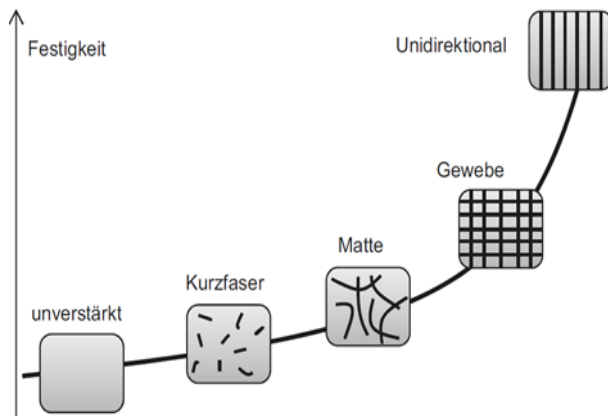
$$\text{Festigkeit: } \sigma_{fB} > \sigma_{mB} \quad (2.1)$$

$$\text{Steifigkeit: } E_f > E_m \quad (2.2)$$

$$\text{Dehnung: } \varepsilon_{mB} > \varepsilon_{fB} \quad (2.3)$$

Da die auf einen Verbundwerkstoff wirkenden Belastungen vorwiegend von den Fasern aufgenommen werden, müssen nach (2.1) und (2.2) sowohl Festigkeit als auch Steifigkeit der Fasern höher sein als die der Matrix. Die Matrix hingegen darf nach (2.3) nicht vor den Fasern brechen, sodass ihre Bruchdehnung größer sein muss. Die ersten beiden Bedingungen können leicht erfüllt werden, da die Werte für Festigkeit und Steifigkeit der Fasermaterialien in der Regel um mehrere Größenordnungen über denen der Matrix liegen, siehe Abschnitt 2.1.3. Die dritte Bedingung schließt jedoch einige Kombinationen aus, da beispielsweise die Bruchdehnung von Glasfasern größer sein kann als die Dehnung einer duroplastischen Matrix, siehe Abschnitt 2.1.2.

Die Fasern eines FVK werden gemäß ihrer Länge kategorisiert. Als Kurzfasern gelten Fasern mit einer Länge  $L < 1$  mm. Beträgt die Faserlänge  $L$  zwischen 1 und 50 mm, werden diese als Langfasern bezeichnet. Als Endlosfasern werden Fasern mit einer Länge  $L > 50$  mm definiert [1]. Es gilt im Allgemeinen, dass je größer die Länge ist und je kleiner der Durchmesser der verwendeten Verstärkungsfasern ist, desto größer ist die erzielte Festigkeit des Verbundwerkstoffes [14].



**Abbildung 2.2:** Einfluss der Verstärkungsart auf die Festigkeit eines FVK [1].

Der Faserorientierungszustand in einem FVK bestimmt die Ausprägung seiner mechanischen Eigenschaften und hat zudem einen Einfluss auf deren Richtungsabhängigkeit. In der Abbildung 2.2 wird dieser Zusammenhang am Beispiel der Festigkeit schematisch dargestellt. Prinzipiell wird zwischen einer ungeordneten, kreuzweisen, multidirektionalen oder unidirektionalen Anordnung unterschieden [14]. Die ungeordnete Anordnung wird vorwiegend bei Kurzfasern eingesetzt. Hierbei werden Kurzfasern

zufällig in der Matrix verteilt. Gegenüber unverstärkten Werkstoffen lassen sich durch diese Art der Verstärkung jedoch nur geringe Festigkeitssteigerungen erzielen. Bei der Verstärkung mit Langfasern werden üblicherweise Matten verwendet. In diesen liegen die Langfasern kreuzweise orientiert vor, wobei sich einzelne Fasern kreuzen und verschlaufen. Die durch diese Verknüpfungen erzielten Festigkeiten sind höher als bei ungeordneten Fasern. Endlosfasern können in multidirektionaler Anordnung orientiert und zu Geweben verarbeitet werden. Hierbei werden die Fasern beispielsweise in  $0^\circ$ ,  $\pm 45^\circ$  oder  $90^\circ$ -Richtung ausgerichtet und geflochten. Durch diese Art der Verstärkung wird die Anisotropie der mechanischen Eigenschaften eingegrenzt und es werden sogenannte quasi-isotrope FVK hergestellt. Endlosfasern können darüber hinaus auch in unidirektionaler Anordnung als Verstärkungsmaterial eingesetzt werden. Alle Fasern liegen hierbei in nur eine Richtung ausgerichtet vor. Die mechanischen Eigenschaften sind bei dieser Verstärkung zwar anisotrop, jedoch lassen sich auf diese Weise die höchsten Ausprägungen für Festigkeit und Steifigkeit in Faserrichtung erreichen.

Als Faserfüllgrad, oder einfach nur Füllgrad, wird der Anteil des Fasermaterials in einem Faserverbundwerkstoff bezeichnet [13]. Der Faserfüllgrad wird in Gewichts- oder Volumenprozent angegeben und mithilfe der Formeln (2.4) und (2.5) berechnet.

$$\text{Faserfüllgrad [Gew. -\%]} = \frac{\text{Gewicht Fasermaterial}}{\text{Gesamtgewicht Faserverbundwerkstoff}} \quad (2.4)$$

$$\text{Faserfüllgrad [Vol. -\%]} = \frac{\text{Volumen Fasermaterial}}{\text{Gesamtvolumen Faserverbundwerkstoff}} \quad (2.5)$$

Grundsätzlich nimmt mit steigendem Faserfüllgrad die Ausprägung der mechanischen Eigenschaften wie etwa Festigkeit oder Steifigkeit eines FVK zu. Gleichzeitig steigen jedoch auch Aufwand und Verarbeitungsanforderungen während der Fertigung an, wodurch der Herstellungsprozess erschwert wird. Bei FVK für technisch anspruchsvolle Bereiche wie etwa dem Einsatz von CFK für den Flugzeugbau, kann derzeit der Faserfüllgrad der verwendeten Materialien, den sogenannten unidirektional verstärkten Prepregs, bis zu 60 Vol.-% betragen [2], siehe Abschnitt 2.2.

### 2.1.2 Matrixmaterialien

Die Matrix übernimmt in einem FVK drei wesentliche Aufgaben, nämlich die plastische Formgebung, den Schutz der Fasern sowie die Kraftübertragung von Faser zu Faser [12,13]. Diese Aufgaben werden nachfolgend genauer beleuchtet und anschließend ausgewählte Beispiele für Matrixmaterialien vorgestellt.

Bei der Herstellung von Produkten aus FVK werden, je nach Verfahren, die Fasern in das flüssige Matrixmaterial eingetaucht oder formbare FVK-Halbzeuge verwendet, bei denen die Fasern bereits in der Matrix eingebettet vorliegen, vgl. Abschnitt 2.2. Danach erfolgt die plastische Aushärtung der Matrix [14]. Die Matrix erstarrt und sorgt somit für die geometrische Form des Verbundwerkstoffes. Um Formänderungen während der Nutzung des hergestellten FVK zu vermeiden, hängt dessen Temperatureinsatzbereich von der Temperaturbeständigkeit des verwendeten Matrixmaterials ab [14]. Bei der Auswahl des Matrixmaterials gilt es daher die auftretenden Temperaturen während der Nutzung des FVK-Bauteils zu berücksichtigen.



**Abbildung 2.3:** Molekülkettenstruktur von Polymeren: Verschlaufte Thermoplast (links), vernetzter Duroplast (rechts) [13].

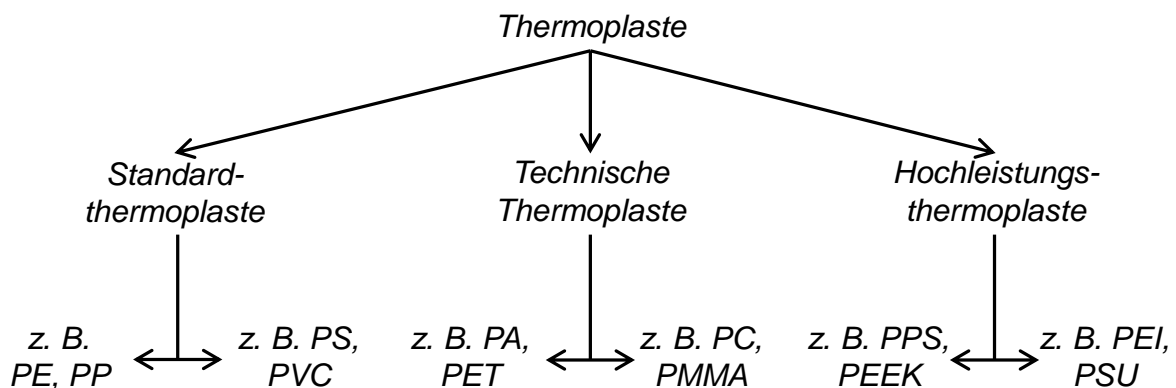
Als Matrixmaterial können sowohl thermoplastische als auch duroplastische Kunststoffe verwendet werden. Grundsätzlich bestehen alle Kunststoffe aus sich wiederholenden chemischen Bausteinen, die sich zu Molekülketten zusammensetzen. Sie werden daher auch als Polymere bezeichnet. Bei Thermoplasten kommt es zu Verschlaufungen zwischen den einzelnen Molekülketten, wodurch eine Bindung zum Feststoff entsteht [1], vgl. Abbildung 2.3. Da die Bindungsenergie verhältnismäßig gering ist,

entsteht [1], vgl. Abbildung 2.3. Da die Bindungsenergie verhältnismäßig gering ist,

kann die Verbindung durch Erwärmung wieder gelöst und der Thermoplast somit geschmolzen werden. Bei Duroplasten hingegen sind die Molekülketten nicht durch Verschlaufungen, sondern durch irreversible chemische Reaktionen fest miteinander verbunden [2]. Diese Reaktion wird als Vernetzung bezeichnet. Die Vernetzungsreaktion setzt infolge von Wärme, Strahlung oder chemischen Katalysatoren ein und wird insbesondere durch hohe Temperaturen begünstigt [13]. Aufgrund der Vernetzung weisen Duroplaste gegenüber Thermoplasten eine höhere Wärmeform- und Chemiebeständigkeit sowie eine geringere Kriechneigung auf [2]. Duroplaste können nach ihrer Aushärtung nicht mehr eingeschmolzen oder umgeformt werden. Daraus ergeben sich stark eingeschränkte Reparatur- oder Recyclingmöglichkeiten von duroplastischen FVK. Aus produktionstechnischer Sicht ist jedoch vorteilhaft, dass duroplastische Matrixwerkstoffe bei der Verarbeitung im schmelzflüssigen Zustand niedrigviskos sind, sodass eine flächendeckende Benetzung der Fasern sowie eine gute Faser-Matrix-Haftung erreicht werden können [13].

Mit Rohstoffkosten in der Größenordnung von etwa 2 bis 5 € / kg sowie den genannten Eigenschaften weisen duroplastische Matrixmaterialien ein vorteilhaftes PreisLeistungsverhältnis auf. Daher wird derzeit bei rund 70 % aller FVK eine duroplastische Matrix verwendet [2,4]. Als nachteilig gelten neben der erwähnten Recyclingunfähigkeit insbesondere die verhältnismäßig langen Aushärtezeiten während des Produktionsprozesses von duroplastischen FVK, die im Bereich von einigen Stunden liegen [15], vgl. Abschnitt 2.2.

Thermoplastische Kunststoffe werden gemäß der Abbildung 2.4 in die Kategorien Standardthermoplaste, technische Thermoplaste sowie Hochleistungsthermoplaste unterteilt [11].



**Abbildung 2.4:** Übersicht verschiedener Kategorien von Thermoplasten. PE, PP, PA, PET, PPS und PEEK: teilkristalline Struktur. PS, PVC, PC, PMMA, PEI und PSU: amorphe Struktur [nach 11].

Grundsätzlich nehmen sowohl Leistungsmerkmale wie die mechanische Belastbarkeit oder die Temperaturbeständigkeit als auch die Kosten ausgehend von Standard- bis hin zu Hochleistungsthermoplasten zu [2]. Hinsichtlich der Anordnung ihrer Molekülketten wird zwischen amorphen und teilkristallinen Thermoplasten unterschieden. Bei amorphen Thermoplasten liegen die Molekülketten räumlich ungeordnet vor, während bei teilkristallinen Thermoplasten eine dreidimensional angeordnete, periodische Struktur der Anordnung existiert [16]. Teilkristalline Thermoplaste weisen ge-

genüber amorphen Thermoplasten in der Regel eine höhere Steifigkeit und Festigkeit auf [16].

Thermoplaste finden zunehmend eine größere Verbreitung als Matrixmaterial. So stieg der mengenmäßige Anteil der FVK mit thermoplastischer Matrix in den letzten fünf Jahren von knapp 20 % auf mehr als 26 % an [2,4]. Die Gründe hierfür sind vielfältig: So gewinnt der ökologische Aspekt und die Forderung nach stofflicher Wiederverwertbarkeit an Bedeutung [14]. Weil Thermoplaste erhitzt und über die Schmelze rezykliert werden können [2], liegt hier ein Vorteil gegenüber Duroplasten. Da keine Vernetzungsreaktion und die damit verbundene Aushärtung notwendig sind, zeichnen sich thermoplastische Matrixmaterialien zudem bei der FVK-Herstellung über deutlich kürzere Prozesszeiten aus, die im Bereich von Minuten liegen [2,15]. Thermoplaste können durch Erwärmung erneut umgeformt werden [1], wodurch die Änderung oder Reparatur von FVK-Bauteilen begünstigt wird. Bei vergleichbarer Festigkeit weisen Thermoplaste gegenüber Duroplasten eine um eine Größenordnung höhere Bruchdehnung auf und ermöglichen somit eine höhere Energieabsorption des FVK [13]. Darüber hinaus ist es möglich, Rohstoffe für sogenannte biobasierte Thermoplaste aus nachwachsenden Quellen zu gewinnen [2].

Als nachteilig gilt eine geringere Temperaturbeständigkeit sowie höhere Kriechneigung von Thermoplasten gegenüber Duroplasten [2]. Zudem ist ihre Schmelzviskosität um den Faktor 10 bis 100 höher, wodurch während der FVK-Herstellung eine vollständige Benetzung der Fasern erschwert wird [13]. Die Tabelle 2.1 stellt die mechanischen Eigenschaften sowie die Wärmeformbeständigkeitstemperatur HDT (engl. Heat Deflection Temperature) der gängigsten thermoplastischen Matrixwertstoffe zusammen.

**Tabelle 2.1:** Mechanische Eigenschaften der gängigsten thermoplastischen Matrixmaterialien von FVK [nach 2].

Matrix	Zug			Biegung		Dichte [g/cm <sup>3</sup> ]	T <sub>max</sub> HDT-A [°C]
	E-Modul [GPa]	Festigkeit [MPa]	Bruchdehnung [%]	E-Modul [GPa]	Festigkeit [MPa]		
PP	1,3-1,8	30-40	> 50	1,1-1,6	~ 30	0,9-0,91	55-70
PA66	3,0-3,5	75-100	> 20	~ 2,8	~ 110	1,13-1,2	75-100
PET	2,8-3,5	55-80	> 20	~ 2,3	~ 90	1,38-1,4	65-75
PPS	3,3-3,5	70-110	1,5	3,5-3,8	100-140	1,3-1,35	135
PEEK	3,5-3,8	90-105	> 50	~ 3,6	~ 150	1,32	140-155

Neben dem Matrixmaterial haben jedoch auch die verwendeten Fasern einen maßgeblichen Einfluss auf den Anwendungsbereich sowie die mechanischen Eigenschaften

ten der FVK. Aus diesem Grund thematisiert der nachfolgende Abschnitt die gebräuchlichsten Fasermaterialien von FVK.

### 2.1.3 Fasermaterialien

In einem FVK ist es die primäre Aufgabe der eingebetteten Fasern, angreifende Kräfte aufzunehmen. Aus diesem Grund zielt die sogenannte technische Verstärkung von Kunststoffen mithilfe von Fasern darauf ab, die mechanischen Eigenschaften des Verbundwerkstoffes zu erhöhen. Daher sind in diesem Fall die Festigkeit und der E-Modul des ausgewählten Fasermaterials in der Regel um den Faktor 10 bis 1000 größer als die der Matrix [2]. Bei der nicht technischen Verstärkung mit beispielsweise Naturfasern sind hingegen ökologische sowie brandhemmende oder akustische Aspekte des hergestellten FVK entscheidend.



**Abbildung 2.5:** Roving mit Endlosfasern aus Kohlenstoff [17].

Je nach Anwendungsfall sind Fasermaterialien in verschiedenen Formen erhältlich. Sie können als Einzelfasern, Gewebe, Matten oder Vliese geliefert werden [14]. In der industriellen Verarbeitung sind Rovings, oder auch Spulen genannt, sehr weit verbreitet, vgl. Abbildung 2.5. Bei Rovings handelt es sich um 1.000 bis zu 24.000 Einzelfasern, die mit einem jeweiligen Durchmesser

von 5 bis 50  $\mu\text{m}$  zu Bündeln verarbeitet und auf Spulen gewickelt werden [13]. Aufgrund ihrer Länge von bis zu mehreren Kilometern eignen sie sich daher insbesondere für kontinuierliche Herstellungsprozesse von FVK, siehe Abschnitt 2.2.

Die gebräuchlichsten Verstärkungsfasern sind in abnehmender Reihenfolge: Glas-, Kohlenstoff-, Aramid-, Polyethylen-, Stahl- sowie Naturfasern [2]. Tabelle 2.2 fasst die mechanischen Eigenschaften dieser Fasermaterialien zusammen.



**Abbildung 2.6:** Rotorblätter einer Windkraftanlage aus GFK [18].

Mit einer europaweit produzierten Menge an glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK) von ca. 1,1 Mio. Tonnen im Jahr 2015 stellen Glasfasern derzeit die verbreitetste Verstärkungsart dar [3]. Bei etwa 95 % aller hergestellten FVK handelt es sich um GFK [3]. Je nach Anwendungsbereich werden Glasfasern in die Kategorien E-Glas für elektrischen Einsatz, C-Glas für chemische Beständigkeit oder S-Glas für hohe Steifigkeit

und mechanische Belastbarkeit unterteilt [2]. Glasfasern weisen eine Festigkeit von ca. 3,5 bis 4,5 GPa sowie eine Dichte von ca. 2,5  $\text{g/cm}^3$  auf und sind bis zu 350  $^{\circ}\text{C}$  temperaturbeständig. Mit Preisen von ca. 2  $\text{€}/\text{kg}$  sind Glasfasern verhältnismäßig günstig [19], woraus das vorteilhafte PreisLeistungsverhältnis von GFK resultiert. Ty-

pische Anwendungsgebiete von GFK sind Rotorblätter von Windkraftanlagen, Pfeiler im Brückenbau sowie Fahrräder und Boote im Sportbereich, vgl. Abbildung 2.6.

Neben Glasfasern werden für die technische Verstärkung von Kunststoffen auch zunehmend Kohlenstofffasern eingesetzt. Kohlenstofffasern werden in aufwendigen und kostenintensiven Prozessen in einem Temperaturbereich von 1.000 bis 2.000 °C hergestellt und weisen einen Gehalt an Kohlenstoff (C) von 92 bis zu 99,9 Gew.-% auf. Kohlenstofffasern lassen sich in die Kategorien HT (engl. high tenacity, hohe Festigkeit, ca. 92 bis 96 Gew.-%-C), HM (engl. high modulus, hoher E-Modul, ca. 99 Gew.-%-C) sowie UHM (engl. ultra high modulus, sehr hoher E-Modul, ca. 99,9 Gew.-%-C) unterteilen [2].

**Tabelle 2.2:** Mechanische Eigenschaften der gebräuchlichsten Fasermaterialien für FVK [nach 2].

Faser	Zug			Druck	Dichte	T <sub>max</sub>
	E-Modul [GPa]	Festigkeit [GPa]	Dehnung [%]	Festigkeit [GPa]	[g/cm <sup>3</sup> ]	[°C]
S-Glas	90	4,5	5,7	1,1	2,46	250-300
E-Glas	80	3,5	4,0	-	2,54	300-350
Kohlenstoff	240-800	1,85-3,75	0,4-1,6	0,7-2,9	1,8-2,2	500-600
Aramid	135-185	3,4-3,5	2,0-2,8	0,46-0,48	1,4-1,5	250-300
UHMW-PE	172	3,3	4,0	0,17	0,97	100
Textil PET	16	1,2	15	0,09	1,39	150
Stahl	200	2,8	4,8	-	7,8	1000
Hanf	70	0,6	1,6	-	1,45	200
Flachs	30	0,75	2,0	-	1,48	200

Zu den vorteilhaften Eigenschaften von Kohlenstofffasern zählt ihre hohe Festigkeit von bis zu 3,75 GPa, eine Temperaturbeständigkeit von bis zu 600 °C sowie ein E-Modul von bis zu 800 GPa. Der thermische Ausdehnungskoeffizient ist zudem mit Werten von  $-0,6$  bis  $-1,0 \times 10^{-6} \text{ 1 / K}$  sehr gering, sodass Kohlenstofffasern über weite Temperaturbereiche ihre geometrische Form behalten [2]. Darüber hinaus sind sie sowohl elektrisch als auch thermisch leitend [2]. Da die Dichte von Kohlenstofffasern mit 1,8 bis 2,2 g / cm<sup>3</sup> verhältnismäßig gering ist, ergibt sich in Faserrichtung eine sehr hohe spezifische mechanische Belastbarkeit, die etwa um den Faktor vier bis sechs höher ist als die von Stahl. Aus diesem Grund werden Kohlenstofffasern zu CFK verarbeitet und in Bereichen des Leichtbaus verwendet, in denen hohe mechanische oder thermische Belastungen auftreten, wie etwa dem Bau von Flug- und Fahrzeugen. Als nachteilig gelten jedoch die hohen Kosten der Kohlenstofffasern, die

in der Größenordnung von ca. 30 € / kg liegen und somit in etwa um den Faktor 15 höher sind als die der Glasfasern [4]. Insgesamt belief sich im Jahr 2017 der Bedarf nach Kohlenstofffasern weltweit auf ca. 63,5 Tsd. Tonnen, wobei davon ausgegangen werden kann, dass nahezu die gesamte Produktion der Fasern zu CFK weiterverarbeitet wird [4]. Derzeit wird weiterhin eine anhaltende Zunahme der Produktion von etwa 10 bis 13 % pro Jahr prognostiziert, sodass der weltweite Bedarf nach Kohlenstofffasern im Jahr 2022 in etwa 117 Tsd. Tonnen betragen wird [4].

In der nachfolgenden Tabelle 2.3 werden Zahlenwerte für die spezifische Steifigkeit und spezifische Festigkeit der verbreitetsten FVK, nämlich GFK und CFK mit duroplastischer Matrix, zusammengefasst. Am Beispiel von Aluminium- und Titanlegierungen werden ergänzend vergleichbare Eigenschaften gängiger konventioneller Leichtbauwerkstoffe aufgelistet.

**Tabelle 2.3:** Typische spezifische Steifigkeit ( $E$ -Modul/Dichte) und spezifische Festigkeit (Spannung/Dichte) ausgewählter Leichtbauwerkstoffe [1].

Material	Spezifische Steifigkeit [GPa / (g/cm <sup>-3</sup> )]	Spezifische Festigkeit [MPa / (g/cm <sup>-3</sup> )]
Glasfaserverstärktes Epoxid (unidirektional)	20-25	600-800
Glasfaserverstärktes Epoxid (quasi-isotrop)	10-12	200-250
Kohlenstofffaserverstärktes Epoxid (unidirektional)	70-100	1.200-1.800
Kohlenstofffaserverstärktes Epoxid (quasi-isotrop)	30-50	250-300
Aluminiumlegierung	20-30	150-200
Titanlegierung	20-25	300-400

Die Angaben in der Tabelle 2.3 verdeutlichen das bereits erwähnte Leichtbaupotenzial von GFK und CFK. So weist beispielsweise unidirektional verstärkter CFK gegenüber einer Aluminiumlegierung mit etwa 70 bis 100 GPa / (g/cm<sup>-3</sup>) eine um den Faktor drei höhere spezifische Steifigkeit und mit etwa 1.200 bis 1.800 MPa / (g/cm<sup>-3</sup>) eine um den Faktor acht höhere spezifische Festigkeit auf. Bei entsprechender Konstruktion kann daher durch den Einsatz von CFK das Bauteilgewicht bei sonst gleichbleibenden Lastanforderungen gesenkt werden.

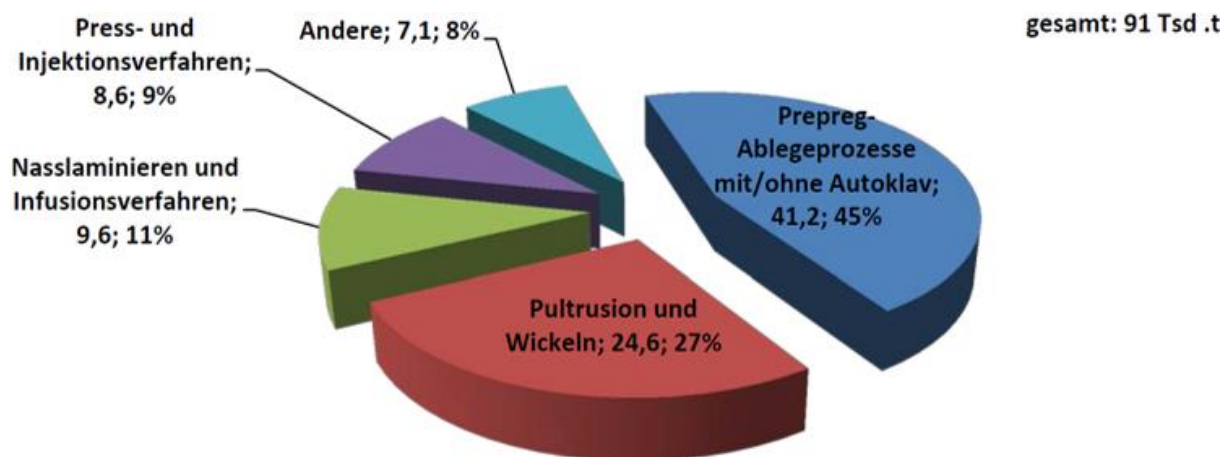
Als hinderlich für eine stärkere Verbreitung von CFK im Bereich des Leichtbaus gilt der derzeit hohe Preis, der je nach Branche sowie geforderter mechanischer und thermischer Belastbarkeit ca. 75 € / kg im Fahrzeug- sowie ca. 275 € / kg im Flugzeugbau und sogar bis hin zu 1.000 € / kg in Sonderanwendungen wie dem Rennsport oder der Raumfahrt betragen kann [2 - 4]. Gründe für die hohen Preise sind neben den Rohstoffkosten die Produktionsprozesse von CFK, vgl. Abschnitt 2.2.

## 2.2 Herstellungsverfahren von CFK

Im vorherigen Abschnitt wurden gängige Faser- und Matrixmaterialien sowie die daraus gefertigten CFK und ihre Eigenschaften vorgestellt. Die Rohstoffkosten für Matrixmaterialien betragen in etwa 0,5 bis 5 €/ kg, vgl. Abschnitt 2.1.2, während die Kosten für Kohlenstofffasern in der Größenordnung von etwa 30 €/ kg liegen, vgl. Abschnitt 2.1.3. Die Preise von CFK für industrielle Anwendungen hingegen betragen ca. 75 €/ kg und mehr, vgl. Abschnitt 2.1.3. Anhand des Vergleiches der Zahlenwerte wird deutlich, dass die Verarbeitungsprozesse von Faser- und Matrixmaterialien zu CFK kostenintensiv sind. Sie tragen somit maßgeblich zu den, verglichen mit anderen Werkstoffen, hohen Werkstoffkosten von CFK bei. In diesem Abschnitt werden daher die industriellen Herstellungsverfahren thematisiert, mit denen derzeit CFK gefertigt werden.

Zu beachten ist jedoch, dass die angegebenen Kosten nur Durchschnittswerte von Standardwerkstoffen darstellen und für Sonderanwendungen oder im Hochleistungsbereich preisliche Aufschläge um eine bis zwei Größenordnungen möglich sind.

Die im Jahr 2015 weltweit produzierte Menge an CFK betrug in etwa 91.000 Tonnen [3]. Abbildung 2.7 stellt die Kategorien der hierzu verwendeten Produktionsprozesse sowie deren mengenmäßigen Anteil an der Gesamtproduktion dar.



**Abbildung 2.7:** Gesamtmenge und Anteil verschiedener Fertigungsverfahren an der weltweiten CFK-Produktion im Jahr 2015 [3].

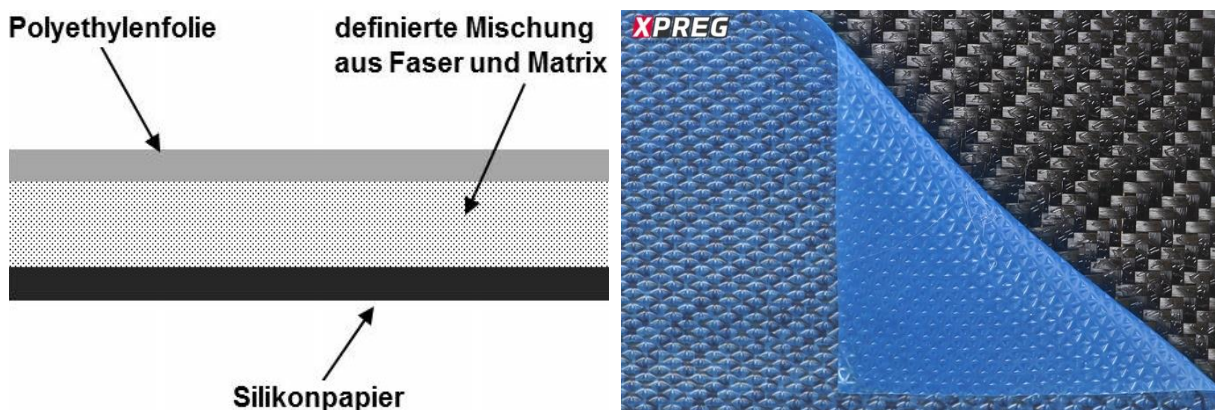
Mit einem Anteil an der Gesamtproduktion von ca. 45 % bzw. etwa 41.200 Tonnen gefertigter CFK zählt die Verarbeitung von Prepregs zu den bedeutendsten Fertigungsprozessen. Die zweitgrößte Gruppe bilden mit einem Anteil von ca. 27 % bzw. 24.600 Tonnen die Pultrusions- und Wickelverfahren. An dritter Stelle stehen mit 9.600 Tonnen bzw. einem Anteil von 11 % die Nasslaminier- und Infusionsverfahren, die aufgrund geringer Investitionskosten vor allem in der Klein- und Kleinstserienfertigung in kleinen- und mittleren Unternehmen (KMU) eingesetzt werden [3]. Abschließend folgen Press- und Injektionsverfahren sowie sonstige Verfahren.

Um die gängigen Verfahren gegeneinander abzugrenzen, werden nachfolgend für jede Kategorie beispielhaft ausgewählte Herstellungsprozesse vorgestellt sowie deren typische Charakteristika beleuchtet.

### 2.2.1 Verarbeitung von Prepregs

Als Prepregs (engl. pre-impregnated fibres) werden FVK-Halbzeuge bezeichnet, bei denen Fasern eines Verstärkungsmaterials in einer Matrix eingebettet sind, die Matrix hierbei jedoch nicht ausgehärtet und somit formbar ist [1]. Prepregs wurden in den 1960er Jahren von dem US-amerikanischen Flugzeughersteller BOEING zur Fertigung von Strukturbauteilen in der Luftfahrt entwickelt [2]. Zunächst beschränkten sich die Prepregs auf duroplastische Matrixmaterialien, doch seit den 1980er Jahren werden auch thermoplastische Matrixmaterialien verwendet [2]. Als Verstärkungsmaterial werden endlos lange Glas-, Kohlenstoff- oder Aramidfasern verwendet [20]. Die Fasern können hierbei unidirektional oder in Form von Geweben, Matten oder Vliesen multidirektional ausgerichtet sein [1].

Im linken Teil der Abbildung 2.8 ist der schematische Aufbau eines Prepregs dargestellt. Bei Prepregs liegt ein definiertes Verhältnis von Faser- und Matrixmaterial vor. Da die Matrix im flüssigen Zustand vorliegt, wird das Prepreg an dessen Ober- und Unterseite mit Schutzfolien, beispielsweise aus PE oder Silikonpapier versehen um somit ein unkontrolliertes Verkleben der einzelnen Lagen des Prepregs zu vermeiden. Der rechte Teil der Abbildung 2.8 zeigt eine Aufnahme eines mit einer Schutzfolie abgeklebten Prepregs, bei dem in die Matrix ein Kohlenstofffasergewebe eingebettet wurde.



**Abbildung 2.8:** Links: Schematische Darstellung des Aufbaus von Prepregs. Rechts: Mit einer Schutzfolie versehener Prepreg, bei dem ein Kohlenstofffasergewebe in eine Matrix eingebettet wurde [1,21].

Für die industrielle Verarbeitung werden Prepregs zu sogenannten Prepreg-Tapes, oder lediglich Tapes genannt, auf Rollen gewickelt und können in verschiedenen Längen, Breiten und Dicken sowie unterschiedlichen Ausrichtungen der Fasern bezogen werden [1]. Je nach Anwendungsfall kann der Faserfüllgrad etwa 60 Vol.-% betragen [1]. Aufgrund enger gewichts- oder volumenbezogener Toleranzgrenzen für den Faserfüllgrad von bis zu  $\pm 1$  Vol.-% bei der Herstellung von Prepregs, zeichnen sich diese durch eine hohe Reproduzierbarkeit ihres Faserfüllgrades und der damit verbundenen mechanischen Eigenschaften aus [1]. Die Herstellung von Prepregs ist aufgrund der Automatisierung und einer hohen Produktivität der Anlage verhältnismäßig kostengünstig [11]. Die Weiterverarbeitung zum Produkt erfolgt anschließend dezentral und geometrisch flexibel beim Bauteilhersteller.

Als nachteilig gilt, dass bei Prepregs Transport und Lagerung in Abhängigkeit des Matrixmaterials bei etwa  $-18\text{ °C}$  gekühlt erfolgen müssen [20], wodurch die Transport- und Lagerkosten steigen. Duroplastische Prepregs müssen darüber hinaus innerhalb von sechs bis zwölf Monaten verarbeitet werden [20], da sie sonst unkontrolliert aushärten. Thermoplastische Prepregs unterliegen keiner Alterung und können unbegrenzt gekühlt gelagert werden [1]. Ein weiterer Nachteil ist, dass für die Aushärtung zum Bauteil ein Autoklav notwendig ist, was jedoch mit hohen Anlagenkosten verbunden ist.

Trotz der aufgezählten Nachteile bilden Verfahren zur Verarbeitung von Prepregs aufgrund der reproduzierbaren Faserfüllgrade und mechanischen Eigenschaften bei gleichzeitig geringen Kosten den größten Anteil in der industriellen Fertigung von FVK. So existieren zahlreiche verschiedene Möglichkeiten zur Prepregverarbeitung. Eine Gemeinsamkeit dieser Verfahren ist die Verwendung von formbaren Prepreg-Halbzeugen, das Ablegen der Prepregs zur geometrischen Kontur des Bauteils und die abschließende Aushärtung im Autoklav [20]. Da eine detaillierte Vorstellung der Verfahren den Rahmen der vorliegenden Arbeit sprengen würde, werden im Folgenden stellvertretend für die Verfahrensgruppe der Verarbeitung von Prepregs das sogenannte manuelle und automatisierte Ablegeverfahren beschrieben.



**Abbildung 2.9:** Handlaminieren eines CFK-Prepregs [22].

Das manuelle Ablegen von Prepregs wird als Handlaminieren oder Hand-Layup bezeichnet [1]. Hierbei werden die Schutzfolien der zuvor zurechtgeschnittenen Prepregs entfernt und anschließend einzelne Lagen sukzessive auf einer Negativkontur des Bauteils geschichtet, vgl. nebenstehende Abbildung 2.9. Abschließend erfolgt unter Temperatur- und Druckeinfluss die Aushärtung des Bauteiles in einem Autoklav, die bis zu 15 Stunden dauert

[20]. Das Handlaminieren wird bei der Herstellung von Bauteilen mit einer geometrisch komplexen Bauteilgeometrie sowie geringen Stückzahlen von weniger als 100 Stück angewendet, wo also eine automatisierte Fertigung wirtschaftlich nicht sinnvoll ist [1]. Neben Prepregs können beim Handlaminieren auch trockene Fasern verwendet werden, die beim Laminierprozess zusätzlich mit der Matrix imprägniert werden. Dies wird im Abschnitt 2.2.3 aufgegriffen und detailliert thematisiert.

Das automatisierte Tapelegen (engl. Automated Tape Laying, ATL) ist ein diskontinuierliches Verarbeitungsverfahren von Prepreg-Tapes. Es wird vorwiegend zur Herstellung von Bauteilen mit großen Geometrieabmessungen oder hohen mechanischen Lastanforderungen beispielsweise im Bereich der Luft- und Raumfahrt eingesetzt [2]. Typische Beispiele für mithilfe von Tapelegen hergestellte Bauteile sind Seitenleitwerkpanels, Flügelstrukturen oder Rippen von Flugzeugen, siehe nachfolgende Abbildung 2.10.



**Abbildung 2.10:** Kleinflugzeug Hawker 400XP des US-amerikanischen Herstellers HAWKER BEECHCRAFT (links) sowie dessen mithilfe von Tapelegen hergestellte CFK-Struktur (rechts) [23,24].

Im linken Teil der Abbildung 2.11 ist eine schematische Darstellung des Tapelegeprozesses zu sehen, während im rechten Teil der Kopf einer Tapelegeanlage abgebildet ist. Bestandteile einer Tapelegeanlage sind Materialtransporteinheit, Materialpuffer, Aufheizvorrichtung, Kompaktierungseinheit, Schneidevorrichtung sowie die Abzugsvorrichtung für die Schutzfolien [11].



**Abbildung 2.11:** Links: Schematische Darstellung des Tapelegevorganges. Rechts: Ein an einem Portalkran befestigter Kopf einer Tapelegeanlage [1].

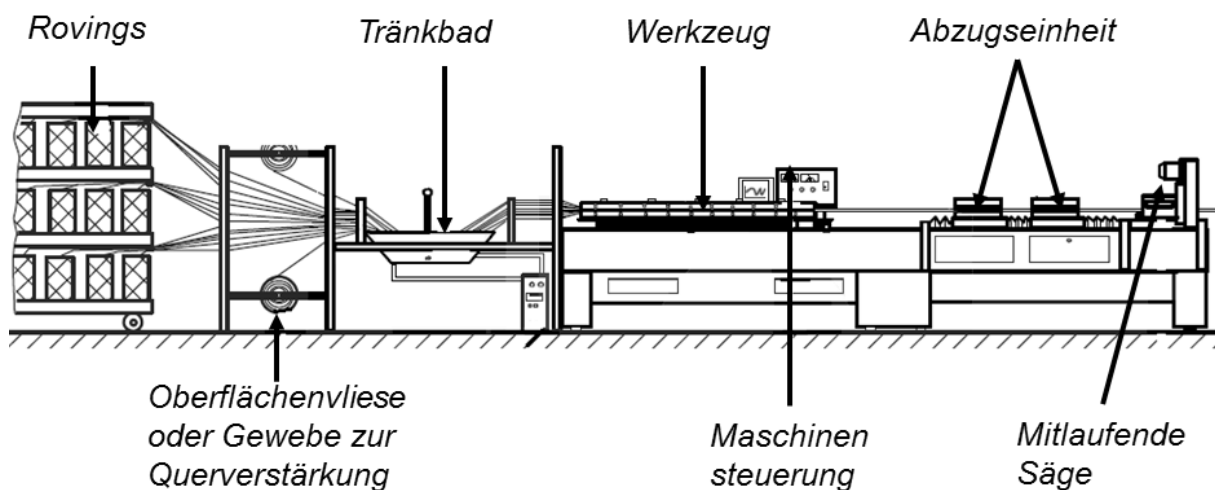
Beim Tapelegeprozess werden Prepreg-Tapes mit einer Breite von 75 bis 300 mm in der Materialtransporteinheit von der Spule abgewickelt. Sie durchlaufen den Materialpuffer und werden anschließend in der Aufheizvorrichtung erwärmt. Dieser Schritt wird als Aktivierung bezeichnet und bewirkt eine erhöhte Haftung den einzelnen Lagen des Tapematerials [1]. Als Heizquellen werden Heißluft, Infrarotstrahler oder Laser eingesetzt [11]. Auf die Aktivierung folgt unmittelbar der Ablegeprozess, bei dem zunächst das Tape auf der unteren Laminatschicht abgelegt und anschließend mithilfe einer in der Kompaktierungseinheit verbauten Gummirolle verdichtet wird. Sobald eine definierte Länge des Tapes abgelegt wurde, erfolgt mithilfe der Schneideeinheit der Zuschnitt. Eine Abzugseinheit zieht zugleich die Schutzfolie des Tapes ab. In Abhängigkeit der Bauteilgröße und -komplexität können Tapelegeanlagen in Form eines Krans bzw. Portalsystemen oder mehrachsigen Robotern ausgeführt sein [11].

In der industriellen Produktion dominieren derzeit duroplastische Tapelegeprozesse. Diese haben jedoch den Nachteil, dass im Anschluss an den Ablegeprozess eine Aushärtung des Bauteils im Autoklav notwendig ist. Thermoplastische Tapelegeprozesse ermöglichen zwar prinzipiell eine in-situ Aushärtung, also unmittelbar nach dem Ablegeprozess, sind jedoch nicht abschließend erforscht und daher in der Industrie wenig verbreitet [2,11].

Als vorteilhaft gilt bei den Tapelegeverfahren neben dem hohen Automatisierungsgrad die Flexibilität bzgl. der verarbeitbaren Faser- und Matrixmaterialien [2]. Es können Bauteildicken von mehreren cm sowie Flächen von mehreren m<sup>2</sup> bei gleichzeitig hoher Positioniergenauigkeit und Reproduzierbarkeit des Ablegeprozesses erreicht werden [2]. Nachteilig sind hingegen die hohen Anlagekosten sowie die vergleichsweise langen Zykluszeiten infolge der nachgelagerten Aushärteprozesse [2].

### 2.2.2 Pultrusion- und Wickelverfahren

Die Pultrusion, oder auch Strangziehen genannt, ist ein automatisiertes und kontinuierliches Verfahren zur Herstellung von CFK-Profilen [13]. Die nachfolgende Abbildung 2.12 beinhaltet eine schematische Darstellung des Prozesses.

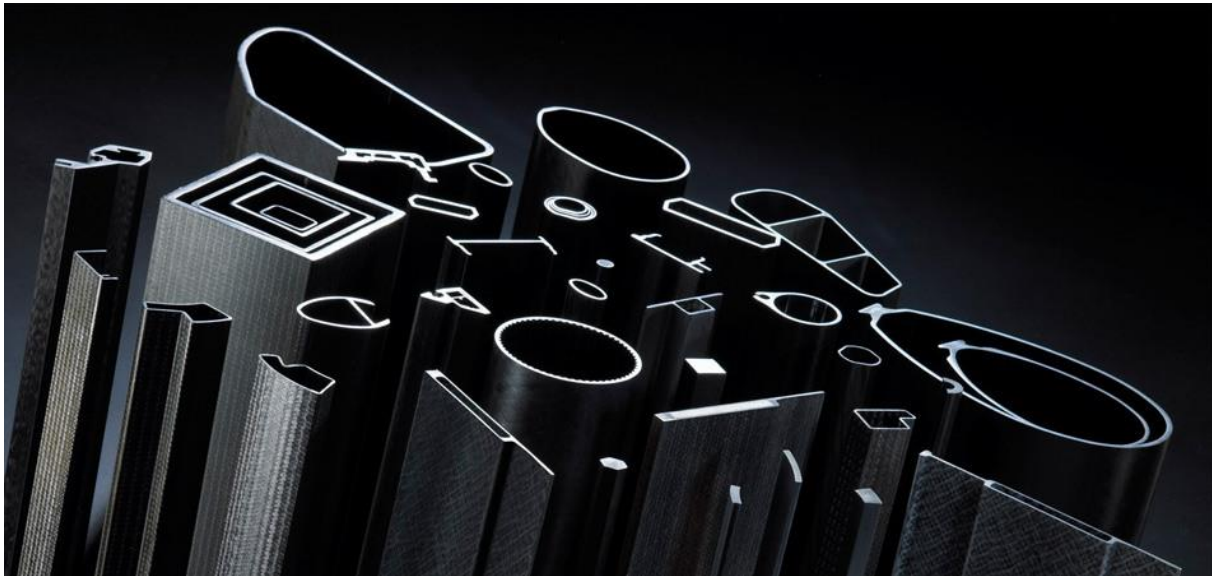


**Abbildung 2.12:** Schematische Darstellung der Komponenten einer Pultrusionsanlage zur Herstellung von CFK [5].

In der Zuführeinheit einer Pultrusionsanlage werden die von Rovings abgewickelten Endlosfasern durch ein Spulengatter gezogen und dort je nach Bedarf uni- oder multidirektional ausgerichtet [20]. Zusätzlich können weitere Verstärkungsmaterialien wie Vliese oder Gewebe in die Fasern eingearbeitet werden. In dem nachgelagerten Prozessschritt erfolgt die Imprägnierung der Fasern. Dies findet in einem Tränkbad oder unter Druckeinwirkung in einer Injektionsbox statt. Bei der Verwendung einer Injektionseinheit lassen sich infolge höherer Drücke beim Einfüllen der Matrix grundsätzlich höhere Faserfüllgrade der hergestellten CFK als durch Tränkung erreichen [1]. Anschließend werden die imprägnierten Fasern durch die Formgebungseinheit der Anlage gezogen, wo sie in einem temperierten Werkzeug aushärten [20]. Um die Oberflächenqualität des hergestellten CFK zu verbessern und Reibung zu minimieren, werden möglichst kurze Werkzeuge mit einer Länge von 0,75 bis 1,5 m verwendet, deren Innenformen häufig poliert, verchromt oder mit einem Trennmittel verse-

hen werden [1,2,11,13]. Die nachgelagerte Abzugseinheit zieht die ausgehärteten CFK-Profile ab und befördert sie in die mitlaufende Säge, wo sie abgeschnitten werden, vgl. Abbildung 2.12.

Typische mithilfe der Pultrusion hergestellte Produkte weisen zylindrische Hohl- oder Vollprofile sowie L-, U- oder T-Querschnitte auf und sind über die gesamte Profillänge konstant in ihrer Geometrie und Durchmesser. Es lassen sich Profildicken von 1 bis 30 mm [13] und Durchmesser der Hohlprofile von bis zu 100 mm erreichen [20]. Abbildung 2.22 stellt eine Auswahl mittels Pultrusion gefertigter Profile dar.



**Abbildung 2.13:** Auswahl mithilfe von Pultrusion hergestellter CFK-Profile [25].

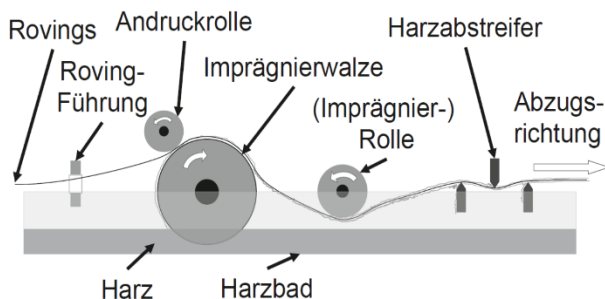
Grundsätzlich kann das Pultrusionsverfahren zur Herstellung sowohl von thermoplastischen als auch duroplastischen CFK eingesetzt werden. Die hierbei erreichten Prozessgeschwindigkeiten hängen von dem Matrixsystem, der Werkzeuglänge sowie der Profilgeometrie ab. Thermoplastische Pultrusionsverfahren erreichen Prozessgeschwindigkeiten von bis zu 20 m / min während für duroplastische Pultrusionsverfahren aufgrund der längeren Aushärtezeiten der Matrix Geschwindigkeiten von maximal 3 m / min erreicht werden [11]. Darüber hinaus können auch glasfaserverstärkte Produkte mittels Pultrusion hergestellt werden [20].

Gegenüber der klassischen Pultrusion abgewandelte Verfahren erlauben es zudem, den Prozessschritt der Imprägnierung auszusparen, indem anstatt von Faserrovings vorimprägnierte Fasermaterialien verwendet werden [1]. Zusätzlich ist es bei der Prozessvariante des sogenannten Pullwinding, also die um einen Wickelvorgang erweiterte Pultrusion, möglich, multidirektional verstärkte, runde FVK herzustellen [20].

Ausgehend von den als Rohmaterial dienenden Faserrovings erfolgen beim Pultrusionsverfahren die Imprägnierung, Formgebung und Aushärtung in einem kontinuierlichen Prozess [20]. Der Faservolumengehalt der hergestellten CFK kann bis zu 65 Vol.-% betragen, sodass gute mechanische Eigenschaften wie beispielsweise eine hohe Zugfestigkeit erzielt werden können [1]. Aufgrund des hohen Automatisierungsgrades sowie des kontinuierlichen Fertigungsprozessablaufs wird eine hohe Produktivität erzielt. Die Pultrusion gilt als ein kostengünstiges Verfahren für die Her-

stellung von CFK-Profilen für die Serien- und Großserienfertigung. Als nachteilig gelten jedoch die eingeschränkte Formgebungsfreiheit der Profile sowie die hohen Investitionskosten für die Anlage und das Werkzeug, die im Bereich von bis zu mehreren Millionen Euro liegen können.

Ein anderes, im grundsätzlichen Aufbau mit der Pultrusion vergleichbares Verfahren, ist das Faserwickeln. Das Faserwickeln, auch als Nasswickeln oder nur Wickeln bezeichnet, ist ein vollautomatisiertes und kontinuierliches Verfahren zur Herstellung von rotationssymmetrischen Körpern [2], wie etwa Zylindern, Kegeln, Ellipsoiden oder auch Zylindern mit gewölbten Böden [11]. Mithilfe des Faserwickelns werden beispielsweise Pipelines, Masten für Segelboote, Druckbehälter oder Antriebswellen für die Automobilindustrie hergestellt [11,20]. Als Rohmaterialien dienen endlos lange Glas- oder Kohlenstofffaserrovings [11], die in einer thermo- oder duroplastischen Matrix eingebettet werden [2].

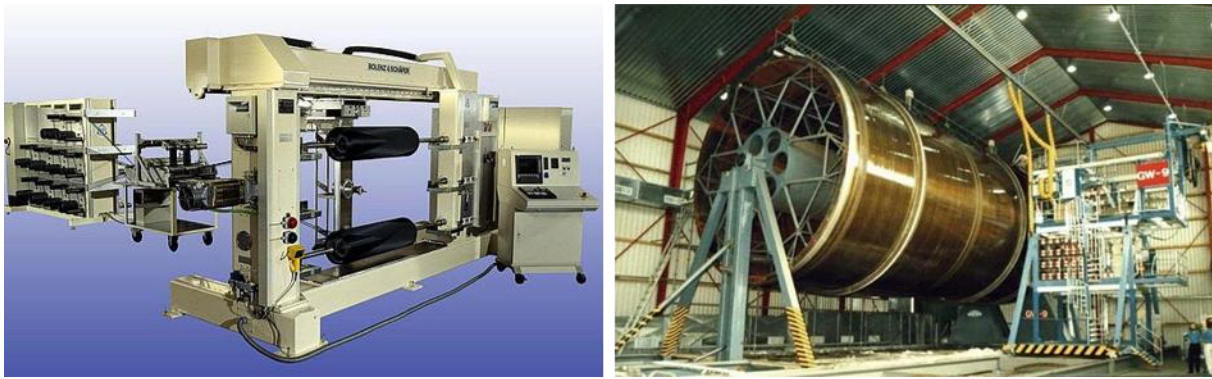


**Abbildung 2.14:** Schematische Darstellung des Wickelprozesses am Beispiel einer duroplastischen Matrix [2].

Abbildung 2.14 verdeutlicht am Beispiel einer duroplastischen Matrix das Prinzip des Faserwickelverfahrens, wobei Anlagen zur Verarbeitung von thermoplastischen Matrixmaterialien vergleichbar aufgebaut sind. Zunächst werden die in einem Gestell positionierten Rovings abgewickelt und durchlaufen eine Führung, wo die Fasern parallel ausgerichtet werden. Es folgt die Imprägnierung der Fasern, die als Tauchbad oder als

Walzenränkbad ausgeführt sein kann [20]. Die Fasern werden durch das Bad gezogen bzw. mithilfe von Andruckrollen über die Imprägnierwalze geführt, sodass die Fasern in die Matrix eingebettet werden. Anschließend wird überschüssiges Matrixmaterial abgestreift und die getränkten Fasern gelangen in die Wickeleinheit, wo sie um den rotierenden Kern gewickelt werden. Je nach Komplexität der Anlage und des zu wickelnden Bauteils rotieren bei dem Wickelvorgang bis zu sechs Achsen [20]. Über die gezielte Einstellung der Vorschub- und Rotationsgeschwindigkeiten können die Wickelwinkel sowie die Länge der Überlappungen der einzelnen Lagen eingestellt und damit gezielt die mechanischen Eigenschaften des Bauteils variiert werden. Abschließend erfolgt die kontinuierliche Aushärtung zum Bauteil, die bei Temperaturen von über 150 °C etwa in einem Ofen oder unter Einsatz von Infrarot-, Gas- oder Laserheizquellen stattfindet und mehrere Stunden dauert [2, 20].

Im linken Teil der Abbildung 2.15 ist eine Wickelanlage zur Herstellung von Druckbehältern dargestellt. Mithilfe vergleichbarer Anlagen können pro Jahr bis zu 300.000 Behälter vollautomatisiert gefertigt werden [11]. Die Wandstärken können hierbei von 0,5 bis zu 50 mm [20] und die Durchmesser zwischen 0,3 und 5 m betragen [11]. Mit sonderangefertigten Wickelanlagen ist es zudem möglich, Pipelinesegmente mit einem Durchmesser von 9 m und einer Länge von 16 m herzustellen, vgl. rechter Teil der Abbildung 2.15.



**Abbildung 2.15:** Links: Faserwickelanlage zur Herstellung von Druckbehältern aus CFK. Rechts: Segment einer mittels Faserwickeln hergestellten Pipeline aus GFK mit einem Durchmesser von 9 m und einer Länge von 16 m [26,27].

Neben dem beschriebenen klassischen Wickelverfahren, bei dem die Fasern durch eine schmelzflüssige Matrix gezogen werden, erlauben Abwandlungen des Verfahrens beispielsweise das trockene Wickeln von Fasern zu Bauteilen und ein anschließendes Imprägnieren dieser mit dem Matrixmaterial [20]. Des Weiteren ist es möglich, bereits vorimprägnierte Tapes zu verarbeiten und damit deutlich höhere Wickelgeschwindigkeiten zu erreichen [20]. Hierbei liegt ein fließender Übergang zu anderen Fertigungsverfahren wie der Verarbeitung von Prepregs vor, vgl. Abschnitt 2.2.1.

### 2.2.3 Nasslaminier- und Infusionsverfahren

Das Handlaminieren zählt zu den sogenannten Nasslaminierverfahren, also Produktionsverfahren bei denen trockene, also nicht zuvor mit einer Matrix imprägnierte, Fasern mit der flüssigen Matrix benetzt und zu FVK verarbeitet werden. Es ist das älteste und zugleich einfachste Fertigungsverfahren für FVK-Bauteile [12,20]. Mithilfe des Handlaminierens können endloslange Glas-, Aramid- sowie Kohlenstofffasern verarbeitet und in einer duroplastischen Matrix eingebettet werden.



**Abbildung 2.16:** Herstellung von GFK-Bauteilen mittels Handlaminieren [28].

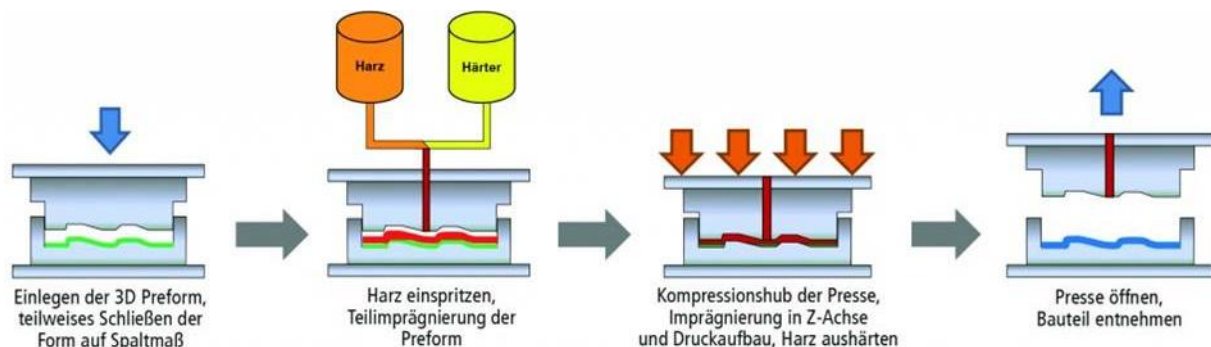
Beim Handlaminieren wird zunächst auf die Oberfläche des Werkzeuges, das eine Negativkontur des späteren Bauteils ist, eine ca. 0,3 bis 0,6 mm dicke Schicht Trennmittel, das sogenannte Gelcoat, aufgetragen [12]. Das Gelcoat bildet die Oberfläche des späteren Bauteils und sorgt dafür, dass das Bauteil nach der Herstellung leichter aus dem Werkzeug entformt werden kann. Auf das Gelcoat werden einzelne Schichten des Fasermaterials in Form von Vliesen oder Geweben gelegt und die Matrix mithilfe eines Pinsels aufgebracht, vgl. Abbildung 2.16. Anschließend werden die einzelnen Faser- und Matrixlagen

mithilfe einer Handrolle verdichtet und somit die zwischen den Lagen eingeschlossene Luft verdrängt. Nachdem sukzessive weitere Lagen Faser- und Matrixmaterial geschichtet wurden, wird abschließend eine schützende Oberflächenschicht, das sogenannte Topcoat, auf die Innenseite des späteren Bauteils aufgetragen [11]. Es folgt zunächst eine Anhärtung bei Raumtemperatur, die bis zu 24 Stunden dauert sowie eine anschließende Aushärtung im Autoklav [14] mit einem definierten Temperaturzyklus, der zusätzlich vier bis 15 Stunden dauern kann [25].

Beim Handlaminieren erfolgen die Prozessschritte überwiegend manuell. Somit ist das Verfahren lohnintensiv und mit langen Fertigungszeiten verbunden [11]. Die Bauteilqualität hängt direkt mit den Fähigkeiten und der Erfahrung des Werkers zusammen und ist somit wenig reproduzierbar [12]. Die Investitionskosten für das Werkzeug sind jedoch verhältnismäßig gering [20]. Aus diesem Grund wird das Handlaminieren vorwiegend im Prototypenbau sowie der Kleinserienfertigung, also Stückzahlen von weniger als 100 Stück, eingesetzt [11]. Des Weiteren können geometrisch komplexe oder große Bauteile wie etwa Rümpfe für Boote und Segelflugzeuge oder Rotorblätter für Windkraftanlagen mithilfe des Handlaminierens hergestellt werden [13]. Die erreichbaren Faservolumenanteile der hergestellten Bauteile betragen zwischen 30 und 45 Vol.-% [20].

#### 2.2.4 Press- und Injektionsverfahren

Die Harzinjektion, oder auch RTM (engl. Resin Transfer Moulding), zählt zu der Kategorie der Press- und Injektionsverfahren. Bei diesem Verfahren können trockene Lang- und Endlosfasern aus Glas, Kohlenstoff und Aramid zu FVK verarbeitet werden [11]. Als Matrix dienen überwiegend duroplastische Materialien, wobei Abwandlungen des Verfahrens auch die Verarbeitung von Thermoplasten ermöglichen [20]. Abbildung 2.17 zeigt eine Darstellung des Prozessablaufes.



**Abbildung 2.17:** Prozessablauf beim Harzinjektionsverfahren [29].

Bei der Harzinjektion werden die als Rohmaterial dienenden Fasern in Form von Vliesen, Matten oder Geweben zunächst zu einem dreidimensionalen Vorformling, dem sogenannten Preform, umgeformt und anschließend in das beheizte Werkzeug der Injektionsanlage gelegt [20]. Das Werkzeug wird geschlossen und ein Gemisch aus Harz und Härter injiziert, wodurch die Fasern mit der Matrix getränkt und in diese eingebettet werden. Anschließend wird durch das Werkzeug ein Druck aufgebaut und das Faser-Matrix-Gemisch dadurch komprimiert. Zusätzlich kann hierbei ein Vakuum im Werkzeug aufgebaut werden um Lufteinschlüsse zu vermeiden und eine

vollständige Durchtränkung der Fasern mit der Matrix zu erzielen [12]. Nach der Aushärtung der Matrix wird das Werkzeug geöffnet und das hergestellte Bauteil entnommen. Bei duroplastischen Matrixmaterialien beträgt die Prozesszykluszeit zwischen 5 und 25 Minuten und steigt mit zunehmender Dicke und Größe des Bauteils weiter an [2], wobei die Aushärtung generell jeweils ca. 50 % der Zeit ausmacht [11].

Mithilfe der Harzinjektion können dreidimensionale, hochbelastbare FVK-Bauteile mit Faserfüllgraden von bis zu 60 Vol.-% hergestellt werden [11]. Die Anlagenkosten liegen in der Größenordnung von einigen 100.000 Euro. Aufgrund des hohen Automatisierungsgrades [11] können mit einer Anlage pro Jahr ca. 50.000 Stück Bauteile [2] relativ kostengünstig hergestellt werden. Typische Beispiele mittels Harzinjektion hergestellter Bauteile sind etwa Dächer oder Stoßfängerträger im Automobil- sowie Seitenleitwerke im Flugzeugbau [20].

### 2.2.5 Sonstige Verfahren

Das Stempelumformverfahren, auch als Thermoformen bezeichnet, ist ein Beispiel für die Kategorie der sonstigen Verfahren zur Herstellung von CFK. Es wird eingesetzt um flächige Bauteile in einer Stückzahl von einigen Tausend herzustellen. Typische Beispiele sind Gehäuseteile für Laptops und Smartphones, Versteifungsprofile für Flugzeuge sowie Helme für den Fahrrad- und Skisport [30].



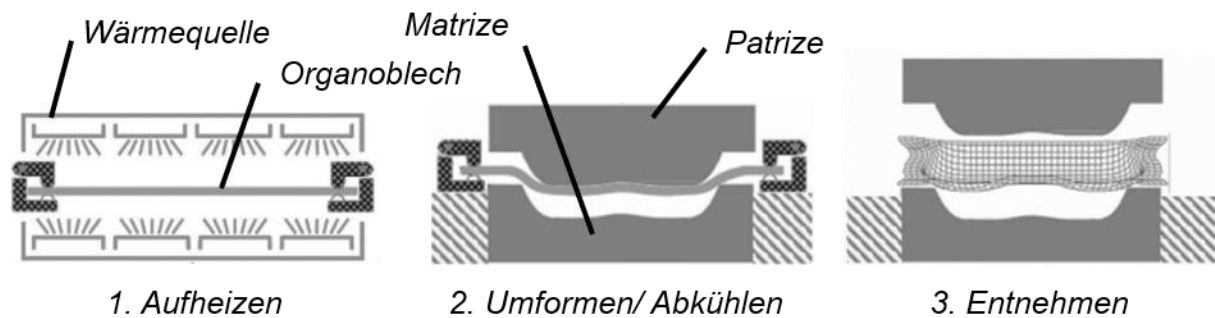
**Abbildung 2.18:** CFK-Organobleche [31].

Als Rohmaterial dienen bei dem Stempelumformverfahren sogenannte Organobleche, also zu ausgehärteten Platten verarbeitete thermoplastischen Prepregs mit eingebetteten Geweben aus Glas- oder Kohlenstofffasern in verschiedenen Dicken und Größen [11,30], vgl. nebenstehende Abbildung 2.18. Im ersten Schritt werden die Organobleche beispielsweise mithilfe von Infrarotstrahlern auf eine Temperatur von 20 bis 40 °C oberhalb der Schmelztemperatur der thermoplastischen Matrix erwärmt [30].

Infolge der Erwärmung erweicht die Matrix und die Organobleche können umgeformt werden. Dies geschieht in der zweiseitigen Werkzeugkontur einer Umformeinheit, in welche die erwärmten Organobleche geführt werden. Anschließend werden Ober- und Unterseite des Werkzeuges, also die sogenannte Matrize und Patrize [13], geschlossen und das Organoblech umgeformt. In der nachfolgenden Abkühlphase kühlt das Material im Werkzeug unter die Schmelztemperatur der Matrix ab und erstarrt. Abschließend werden Matrize und Patrize geöffnet und das hergestellte FVK-Bauteil entformt. Eine schematische Darstellung der Verfahrensschritte ist in Abbildung 2.19 dargestellt.

Als vorteilhaft gelten bei dem Stempelumformverfahren der hohe Automatisierungsgrad des Prozesses sowie dessen kurze Zykluszeit. Während der Umformprozess an sich nur wenige Sekunden dauert [2], beträgt die Zykluszeit für den gesamten Pro-

zess inklusive der Aufheiz- und Abkühlphasen wenige Minuten [11]. Mithilfe des Verfahrens können zudem Hochleistungsthermoplaste verarbeitet und somit mechanisch belastbare FVK-Bauteile mit hohen Faserfüllgraden hergestellt werden [11].



**Abbildung 2.19:** Schematische Darstellung der Prozessschritte beim Stempelumformverfahren [13].

Ein Nachteil sind jedoch die Kosten für die Werkzeughälften, die aufgrund einer hohen Maßgenauigkeit der Bauteile exakt an die Materialdicke im ungeformten Zustand abgestimmt werden müssen [11], um eine ungleichmäßige Druckausübung und damit Deformationen der FVK-Produkte zu vermeiden [13].

## 2.3 Ultraschallfertigung

Dieser Abschnitt thematisiert die Ultraschallfertigung. Es werden eingangs Definitionen und technische Grundlagen vermittelt sowie Charakteristika des Verfahrens vorgestellt. Anschließend wird das Ultraschallschweißen als ein Verfahren der Ultraschallfertigung im Detail betrachtet und dessen Funktionsweise erläutert.

### 2.3.1 Definitionen und technische Grundlagen

Unter dem Begriff Ultraschallfertigung werden umformende oder fügende Fertigungsverfahren wie etwa Ultraschallschweißen, -heißprägen oder -thermoformen zusammengefasst [8]. Bei diesen Verfahren wird mithilfe von hochfrequenten Ultraschallschwingungen einerseits eine Molekularreibung entlang der Polymerketten innerhalb des Werkstoffes und andererseits eine Grenzflächenreibung an den Oberflächen der Werkstoffe erzeugt [32]. Hierbei überwiegt der Anteil der Grenzflächenreibung gegenüber der Molekularreibung. Infolge der Reibung werden die Werkstoffe lokal über ihren Schmelzpunkt erwärmt und im schmelzflüssigen Zustand verarbeitet. In der Abkühlphase sinkt die Temperatur des Werkstoffes unter seine Schmelztemperatur, sodass dieser erstarrt und plastisch eine neue geometrische Form annimmt.

Zu den typischen Merkmalen der Ultraschallfertigung zählen die kurzen Prozesszykluszeiten von der Erwärmung bis hin zur Erstarrung von nur einigen Sekunden [10]. Die erwärmte Fläche beträgt nur wenige cm<sup>2</sup>, daher gilt die Ultraschallfertigung infolge der lokalen Erwärmung als ein energieeffizientes Verfahren zur Herstellung und Verarbeitung von Produkten [10]. Mithilfe der Ultraschallfertigung lassen sich eine Vielzahl thermoplastischer Kunststoffe verarbeiten. Aufgrund der geringen Investitionskosten im Bereich von wenigen Zehntausend Euro für Ultraschallschweißmaschinen [9], gilt die Ultraschallfertigung zudem als ein besonders kostengünstiges Verfahren für die Fertigung von Kleinserien bis hin zu 50.000 Stück [33].



**Abbildung 2.20:** Ultraschallschweißmaschine HIQ DIALOG 6200 des Herstellers Herrmann Ultraschall.

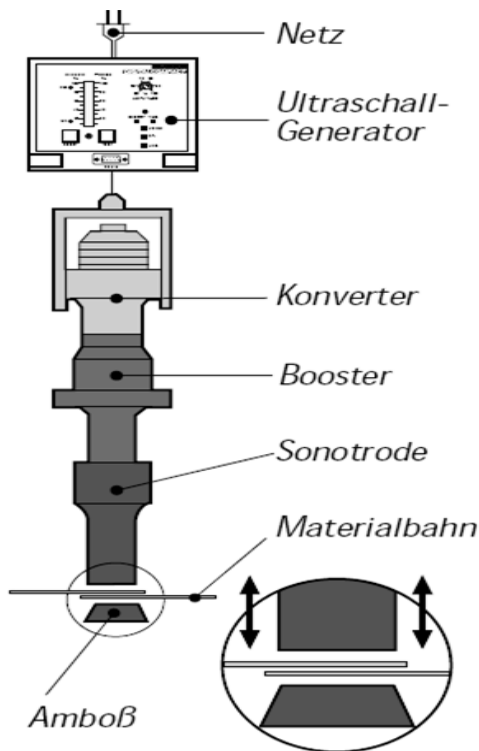
Abbildung 2.20 stellt exemplarisch eine in der vorliegenden Arbeit verwendete Ultraschallschweißmaschine dar. In der Industrie werden solche Ultraschallschweißmaschinen zum Versiegeln von Kunststoffverpackungen von beispielsweise Käse- und Fleischwaren oder zur Herstellung von Kunststoffbauteilen wie etwa Dichtungen oder Verschlüssen eingesetzt. Zudem beinhalten erste experimentelle Untersuchungen die Ultraschallfertigung zur Verarbeitung und Herstellung von FVK. Diese werden im Abschnitt 2.4 näher thematisiert. Da Ultraschallschweißmaschinen sowohl manuell bedient als auch automatisiert betrieben werden können, eignet sich die Ultraschallfertigung für die kostengünstige und kontinuierliche Serienfertigung. Hierbei wird insbesondere auf die voll-automatisierbare, sogenannte Fertigung von Rolle zu Rolle zurückgegriffen [34].

Bei dieser Fertigung liegen die Rohmaterialien zu Beginn auf Rollen gewickelt vor. Sie werden anschließend in einem kontinuierlichen Prozess mittels der Verfahren der Ultraschallfertigung verarbeitet. Die Prozessprodukte werden wiederum erneut auf Rollen gewickelt.

### 2.3.2 Ultraschallschweißen

Die in der vorliegenden Arbeit vorgestellte Ultraschallfertigung von FVK basiert auf dem Ultraschallschweißen. Aus diesem Grund wird nachfolgend sowohl der Aufbau einer Ultraschallschweißmaschine als auch der Prozessablauf detailliert vorgestellt und eine Übersicht mittels Ultraschall verschweißbarer Materialien gegeben.

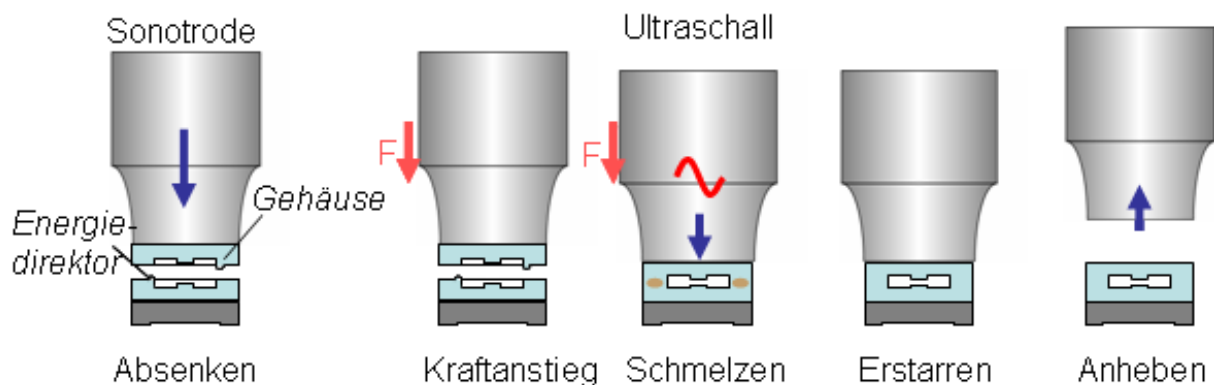
Die wesentlichen Bestandteile einer Ultraschallschweißmaschine sind Netzteil, Ultraschallgenerator, Konverter, Booster sowie die Sonotrode [33,35,36]. Zunächst wird im Generator die anliegende Netzfrequenz von 50 Hz in eine Ausgangsfrequenz von 20 bis 70 kHz umgewandelt [35]. Anschließend wird im Ultraschallwandler, der auch Konverter genannt wird, die vom Generator erzeugte elektrische Schwingung unter Ausnutzung des piezoelektrischen Effektes oder der Magnetostriktion, also einer sich wiederholenden elastischen Längenänderung der verbauten Elemente, in eine mechanische Schwingung konvertiert [36]. Im nachgeschalteten Transformationsstück, auch Booster genannt, wird die Amplitude der mechanischen Schwingung auf eine Ausgangsamplitude von etwa 5 bis 100  $\mu\text{m}$  verstärkt [34]. Die Schwingung wird in die Sonotrode weitergeleitet und dort abschließend ins Werkstück übertragen, vgl. nachfolgende Abbildung 2.21.



**Abbildung 2.21:** Schematische Darstellung der wesentlichen Bestandteile einer Ultraschallschweißmaschine [37].

Das Werkstück aufgeschmolzen. Dieser Prozessschritt dauert ca. 1 bis 5 s. Anschließend wird der Ultraschall abgestellt und das Werkstück kühlt unter Einwirkung der Anpresskraft aus. Nach einer Abkühlphase, der sogenannten Haltezeit von ebenfalls etwa 1 bis 5 s, wird die Anpresskraft abgebaut und die Sonotrode hochgefahren. Das Werkstück wird anschließend entnommen.

Der Ultraschallschweißprozess besteht aus den fünf Teilschritten Absenken, Kraftanstieg, Schmelzen, Erstarren und Anheben, vgl. Abbildung 2.22. Zunächst werden die zu verschweißenden Werkstücke unterhalb der Sonotrode auf dem Amboß einer Ultraschallschweißmaschine platziert und befestigt [35]. Anschließend wird die Sonotrode herabgefahren. Sobald die Sonotrode die Oberfläche des Werkstückes erreicht hat, beginnt der Aufbau einer Anpresskraft, die je nach Material und Geometrie von 100 bis 3000 N variiert [8] und ein Verrutschen des Werkstückes infolge der Ultraschallschwingungen verhindert. Während des Schweißprozesses steigt die Anpresskraft bis zu einem zuvor definierten Wert an. Sobald diese sogenannte Trigger-Kraft erreicht wurde, wird der Ultraschall ausgelöst und



**Abbildung 2.22:** Schematische Darstellung der Prozessschritte beim Ultraschallschweißen. Absenken der Sonotrode, Aufbau der Anpresskraft, Aufschmelzen des Werkstoffes, Abkühlen und Erstarren sowie Abheben der Sonotrode [nach 32].

Während des Schweißprozesses schwingen Konverter, Booster und Sonotrode in Resonanz. Hierbei stellt sich gem. Formel (2.6) am zu verschweißenden Bauteil eine Amplitude ein, deren Gesamtübersetzungsverhältnis aus den Amplitudenübersetzungsverhältnissen der Einzelkomponenten berechnet werden kann [6]. Ferner gibt die sogenannte akustische Intensität  $J$  an, wie viel Energie pro Fläche mithilfe des Ultraschalls in das Material eingeleitet wird [6]. Sie wird nach (2.7) mithilfe der Fre-

quenz  $f$  des Ultraschalls, der Schallgeschwindigkeit  $c$  im Material, der Dichte des Materials  $\rho$  sowie der anliegenden Amplitude  $A_{Gesamt}$  aus (2.6) berechnet.

$$A_{Gesamt} = A_{Konverter} A_{Booster} A_{Sonotrode} \quad (2.6)$$

$$J = \frac{1}{2} \rho c (2\pi f)^2 A_{Gesamt}^2 \left[ \frac{W}{m^2} \right] \quad (2.7)$$

Die wichtigsten Prozessparameter sind die Amplitude der Ultraschallschwingung sowie die Schweißzeit [36]. Darüber hinaus können Trigger-, Schweiß- und Haltekraft sowie die Haltezeit eingestellt werden. Sie beeinflussen das Schweißergebnis jedoch nur geringfügig. Die eingestellten Prozessparameter beeinflussen sich gegenseitig und können im Vorfeld nicht vorhergesagt, sondern müssen unter Berücksichtigung des verwendeten Werkstoffes, seinen Abmessungen und der Oberflächenrauheit abgeschätzt oder experimentell bestimmt werden [36].

Das Ultraschallschweißen wird überwiegend für die Verarbeitung von Kunststoffen eingesetzt. Grundsätzlich können alle thermoplastische Polymere verarbeitet werden. Der Vorteil von Thermoplasten liegt in ihrer reversiblen Schmelzbarkeit, sodass diese nach dem Aushärten erneut erwärmt und umgeformt werden können. Industriell verbreitet sind hierbei die Kunststoffe PA, PVC, PVDF, PP, PE, PET oder PC [10].

Neben der bereits etablierten Verschweißung von ungefüllten Kunststoffen thematisieren aktuelle Forschungsarbeiten derzeit die Ultraschallverschweißung von thermoplastischen FVK [38]. FVK mit einer duroplastischen Matrix können derzeit jedoch mittels Ultraschall nicht verschweißt werden. Für die Verschweißung von duroplastischen FVK wird in der Forschung auf andere Schweißverfahren wie etwa das Widerstandsschweißen zurückgegriffen und thermoplastische Schichten zwischen die duroplastischen Fügepartner eingebracht [39], vgl. Abschnitt 6.2.

## 2.4 CFK-Fertigung im Bereich der Forschung

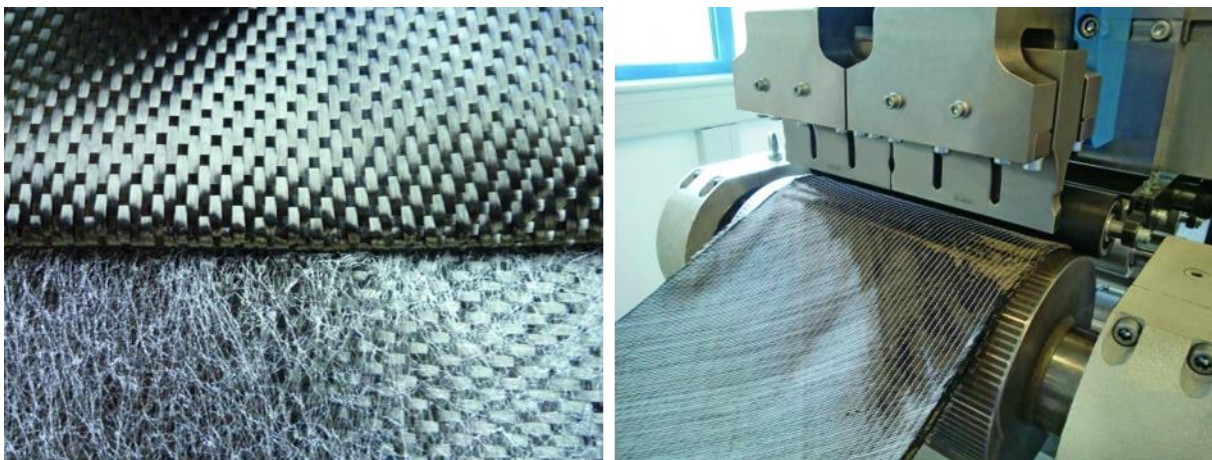
Nachdem im Abschnitt 2.2 konventionelle Fertigungsprozesse von CFK und im Abschnitt 2.3 die Ultraschallfertigung thematisiert wurden, behandelt dieser Abschnitt aktuelle Ansätze zur ultraschallgestützten Fertigung von CFK anhand ausgewählter Beispiele aus dem Bereich der Forschung und Entwicklung.

### 2.4.1 Ultraschallfertigung von CFK-Preforms

Der Begriff Preforming beschreibt einen Prozess, bei dem trockene Kohlenstofffasern, etwa in Form von Rovings, Geweben oder Faserhalbzeugen in mehreren Arbeitsschritten und unter Verwendung von Hilfsstoffen zur Kontur des späteren Bauteils umgeformt und vorstabilisiert werden [6,37]. In einem anschließenden Arbeitsschritt erfolgt die Konsolidierung zum Endbauteil mithilfe eines Infusionsverfahrens wie etwa der Harzinjektion [6]. Als Hilfsstoffe werden sogenannte Binder eingesetzt, die in Form von Vliesen, Pulvern oder Garnen den Fasern beigefügt werden [6]. Die Binder werden mithilfe einer Kombination aus einer Heizquelle und einer Vakuumkompression erwärmt, aufgeschmolzen und zu Preforms verarbeitet [6]. Als Heizquelle kann ein Ofen, Infrarotlicht oder ein Laser dienen. Obwohl sich konventionelle

Preforming-Prozesse bewährt haben, kontrollierbar sind und ausreichende Materialqualität erzeugen, sind sie zugleich energie- und zeitintensiv, lassen sich aufwendig automatisieren und sind aufgrund des Aushärteschrittes diskontinuierlich [6].

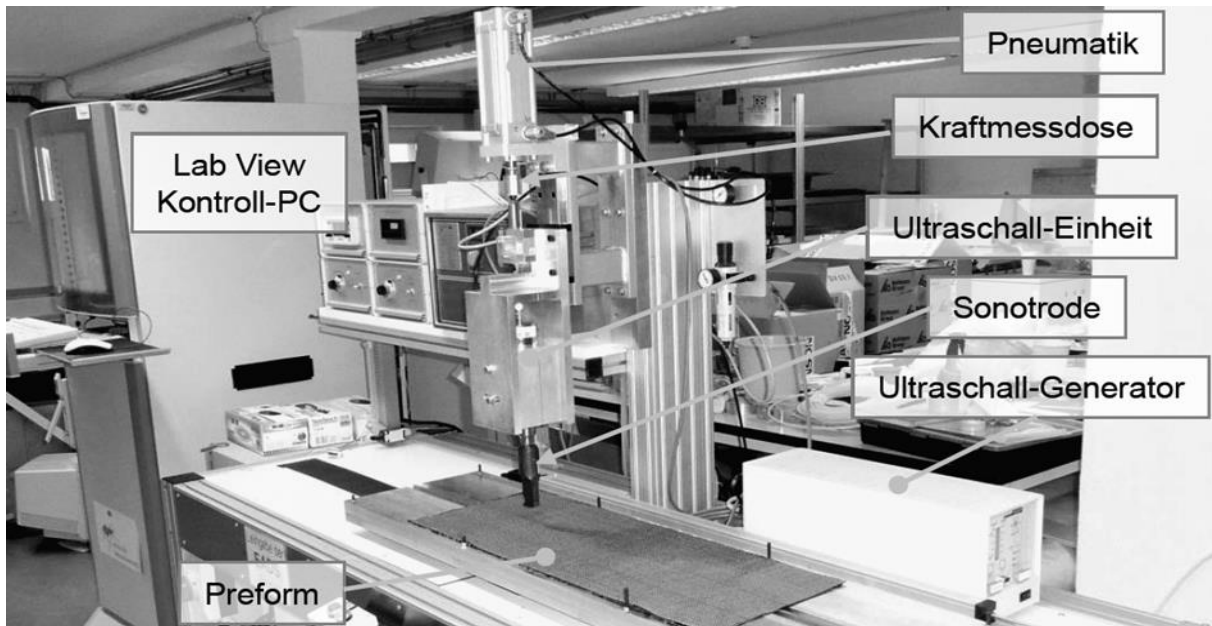
Daher beinhalten aktuelle Forschungsarbeiten den Einsatz von Ultraschall zur Herstellung von CFK-Preforms [6,37,40,41]. Hierbei werden thermoplastische Vliese zwischen Kohlenstofffasergewebe gelegt und zu mehreren Lagen geschichtet, vgl. linker Teil der Abbildung 2.23. Anschließend werden die Lagen unter der Sonotrode einer Ultraschallschweißmaschine geführt. Der Ultraschall wird hierbei als Energie- bzw. Heizquelle genutzt und schmilzt die thermoplastischen Vliese auf. Eine nachgeschaltete Konsolidierungsrolle übt einen Druck aus und komprimiert die Lagen aus Kohlenstofffasern und thermoplastischen Vliesen, sodass abschließend ein CFK-Preform entsteht, vgl. rechter Teil der Abbildung 2.23.



**Abbildung 2.23:** Links: Zwei Kohlenstofffasergewebe mit einem thermoplastischen Vlies als Zwischenschicht. Rechts: Kontinuierliche Herstellung eines Preforms aus Kohlenstofffasergeweben und thermoplastischen Vliesen mithilfe von Ultraschall [40].

Bisherige Untersuchungen zeigen, dass CFK-Preforms, bestehend aus bis zu 14 Lagen Kohlenstofffasergeweben und thermoplastischen Vliesen, mithilfe des Einsatzes von Ultraschall hergestellt werden können. Neben der beschriebenen kontinuierlichen Fertigung mithilfe von Rollen ist auch eine diskontinuierliche Fertigung mit rechteckigen Sonotroden möglich [37]. Hierbei übernimmt die Sonotrode in einer dem Schweißprozess nachgelagerten Haltephase die Funktion der Konsolidierungsrolle, siehe nachfolgende Abbildung 2.24.

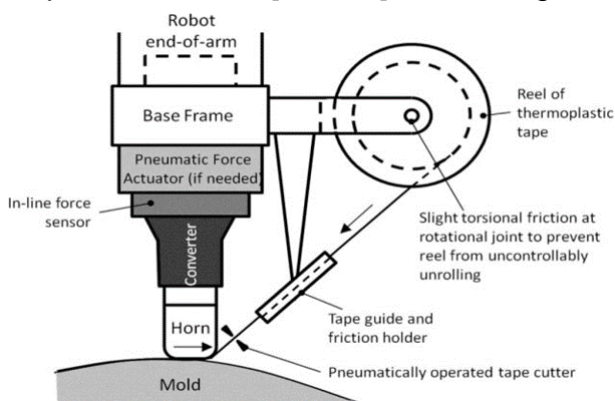
Vorteile der Ultraschallfertigung von CFK-Preforms gegenüber konventionellen Prozessen sind der geringe Energieverbrauch, lokale Energieeinwirkung, kurze Prozesszykluszeiten sowie die hohe Reproduzierbarkeit des Prozesses [40]. Des Weiteren zeigen die Untersuchungen, dass es infolge der Einwirkung des Ultraschalls und des Druckes zu einer Kompaktierung und Ausrichtung der Fasern kommt [6,41]. Hierbei richten sich die Fasern aufgrund der Schwingungen beim Ultraschallschweißprozess enger zueinander aus, wodurch der Freiraum zwischen den Faserlagen reduziert wird [41]. Infolge der Kompaktierung konnten gegenüber konventionellen Verfahren Faserfüllgrad, Zugfestigkeit, E-Modul und Längsscherfestigkeit gesteigert sowie eine homogenere Faserstruktur der CFK-Preforms erreicht werden [6].



**Abbildung 2.24:** Versuchsaufbau zur diskontinuierlichen Herstellung von Preforms aus CFK mithilfe von Ultraschall [37].

### 2.4.2 Ultraschallgestütztes Tapelegeverfahren

Im Abschnitt 2.2.1 wurde bereits das Tapelegen vorgestellt. In aktuellen Forschungsarbeiten wird zudem das ultraschallgestützte Tapelegeverfahren für thermoplastische Tapes untersucht [42 - 45]. Abbildung 2.25 zeigt eine schematische Darstellung des



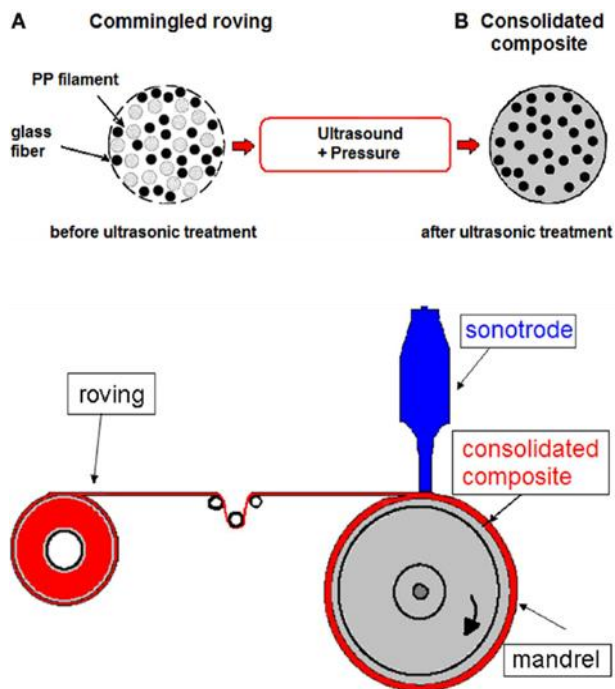
**Abbildung 2.25:** Darstellung des ultraschallgestützten Tapelegeprozesses [43].

Hierbei wird das Tape von einer Spule abgewickelt und unter die Sonotrode einer Ultraschallschweißmaschine geführt, wo es mithilfe von Ultraschallschwingungen erwärmt wird. Die schmelzflüssige Matrix des Tapes wird auf dem Substrat abgelegt, mit diesem verbunden und infolge des durch die Sonotrode aufgebrauchten Druckes konsolidiert. Neben dem geringeren Energieverbrauch ist gegenüber den anderen Tapelegeverfahren die höhere Vorschubgeschwindigkeit ein Vorteil des ultraschallgestützten Verfahrens. Des Weiteren entfällt die Aushärtung im Autoklav [43,44]. Darüber hinaus beinhalten aktuelle Forschungsarbeiten die Entwicklung von vollautomatisierten ultraschallgestützten Tapelegesystemen, mit denen Kosten der Fertigung reduziert werden können [45].

### 2.4.3 Ultraschallfertigung von GFK

Mit den zuvor in diesem Abschnitt vorgestellten ultraschallgestützten Verfahren lassen sich aus den Rohmaterialien, also den trockenen Fasern und der Matrix, entweder lediglich FVK-Halbzeuge herstellen, vgl. Abschnitt 2.4.1, oder aber bereits vorimprägnierte Halbzeuge zu FVK-Produkten weiterverarbeiten, vgl. Abschnitt 2.4.2. Die Verarbeitung von Rohmaterialien zu fertigen FVK-Produkten ist mit den vorgestellten

Prozessen nicht möglich. Dem gegenüber steht die Ultraschallfertigung von GFK, die derzeit erforscht wird.



**Abbildung 2.26:** Oben: Zu einem Roving verarbeitete Glas- und PP-Fasern. Unten: Schematische Darstellung der Ultraschallfertigung von GFK [34].

Als Rohmaterialien dienen hierbei ca. 17,5  $\mu\text{m}$  dicke Glasfasern, die mit etwa 30  $\mu\text{m}$  dicken PP-Filamenten zu einem Roving verflochten werden [46], siehe oberer Teil der Abbildung 2.26. Anschließend wird dieser Roving in einem Rolle-zu-Rolle-Verfahren unter der Sonotrode einer Ultraschallschweißmaschine geführt und mithilfe von Ultraschall erhitzt. Die thermoplastischen PP-Fasern schmelzen hierbei auf. Infolge des durch die Sonotrode aufgegebenen Druckes werden die Glasfasern in die schmelzflüssige PP-Matrix gedrückt und eingebettet. Anschließend erstarrt das PP und konsolidiert unter Druckeinwirkung zu einem GFK, vgl. unterer Teil der Abbildung 2.26. Das Verfahren zeichnet sich dadurch aus, dass die Faserrohmaterialien in nur einem einzigen, kontinuierlichen und automatisierten Prozess zu einem zylindrischen GFK-Bauteil verarbeitet werden können [34]. Als nachteilig ist jedoch der zusätzliche, vorbereitende Arbeitsschritt einzuordnen, bei dem die Glasfasern mit den PP-Fasern zu einem Faserstrang verflochten und zu einem Roving aufgewickelt werden.

Als Rohmaterialien dienen hierbei ca. 17,5  $\mu\text{m}$  dicke Glasfasern, die mit etwa 30  $\mu\text{m}$  dicken PP-Filamenten zu einem Roving verflochten werden [46], siehe oberer Teil der Abbildung 2.26. Anschließend wird dieser Roving in einem Rolle-zu-Rolle-Verfahren unter der Sonotrode einer Ultraschallschweißmaschine geführt und mithilfe von Ultraschall erhitzt. Die thermoplastischen PP-Fasern schmelzen hierbei auf. Infolge des durch die Sonotrode aufgegebenen Druckes werden die Glasfasern in die schmelzflüssige PP-Matrix gedrückt und eingebettet. Anschließend erstarrt das PP und konsolidiert unter Druckeinwirkung zu einem GFK, vgl. unterer Teil der Abbildung 2.26. Das Verfahren zeichnet sich dadurch aus, dass die Faserrohmaterialien in nur einem einzigen, kontinuierlichen und automatisierten Prozess zu einem zylindrischen GFK-Bauteil verarbeitet werden können [34]. Als nachteilig ist jedoch der zusätzliche, vorbereitende Arbeitsschritt einzuordnen, bei dem die Glasfasern mit den PP-Fasern zu einem Faserstrang verflochten und zu einem Roving aufgewickelt werden.

### 3. Grundlagen der Ultraschallfertigung von CFK

In diesem Kapitel werden die Grundlagen der Ultraschallfertigung von CFK behandelt. Im Abschnitt 3.1 wird zunächst die Motivation der vorliegenden Arbeit thematisiert. In diesem Kontext werden einige Punkte aus den vorherigen Abschnitten erneut aufgegriffen. Anschließend wird die zugrundeliegende Idee des Herstellungsverfahrens vorgestellt und das technische Funktionsprinzip im Detail erläutert. Zudem werden gegenüber der konventionellen CFK-Fertigung Vor- und Nachteile des ultraschallbasierten Verfahrens beleuchtet. Abschließend werden im Abschnitt 3.2 die in der vorliegenden Arbeit eingangs durchgeführten Voruntersuchungen thematisiert.

#### 3.1 Motivation und Vorstellung des Verfahrens

Gegenüber konventionellen Werkstoffen des Maschinenbaus wie Stahl oder Aluminium weisen faserverstärkte Kunststoffe wie etwa GFK oder CFK eine um bis zu zwei Zehnerpotenzen höhere spezifische Belastbarkeit auf, vgl. Abschnitt 2.1. Durch die Verwendung von CFK ist es daher möglich, das Bauteilgewicht bei sonst gleichbleibenden Lastanforderungen im Vergleich zu Stahlkonstruktionen um bis zu 70 % und im Vergleich zu Aluminiumkonstruktionen um bis zu 30 % zu reduzieren [1]. Diese Gewichtsreduktion wird insbesondere im Mobilitätssektor, also dem Flug- und Fahrzeugbau, angestrebt. Durch das Herabsetzen des Gewichtes von Flug- oder Fahrzeugen kann sowohl deren Schadstoffausstoß als auch Energieverbrauch gesenkt werden. Letzteres ist insbesondere für den aktuellen Trend der Elektromobilität von Bedeutung, da ein geringerer Energieverbrauch die Reichweite eines Elektrofahrzeuges steigert. So verwendet etwa der deutsche Automobilbauer BMW in seinem seit dem Jahr 2013 produzierten elektrischen Kleinwagen i3 eine Karosserie aus verschiedenen CFK, vgl. Abbildung 3.1. Diese Karosserie hat ein Gesamtgewicht von weniger als 150 kg, während Stahlkarosserien vergleichbarer Kleinwagen wie etwa dem VW Polo rund 50 bis 100 kg mehr wiegen [49,50].



**Abbildung 3.1:** Der elektrische Kleinwagen BMW i3 (oben) sowie seine Karosserie aus CFK (unten) [48,48].

Der zunehmende Einsatz von CFK als Konstruktionswerkstoff in der Industrie sowie für Spezialanwendungen wie beispielsweise im Hochleistungssport führt zu einem stetigen Anstieg der weltweiten Produktionsmengen von CFK. So betrug im Jahr 2010 der weltweite Bedarf nach CFK ca. 51.000 Tonnen und stieg im Jahr 2015 bereits um 78 % auf 91.000 Tonnen [3]. Aktuelle Prognosen sehen auch für die nächsten Jahre eine anhaltende und deutliche Zunahme der CFK-Produktion um 10 bis 13 % pro Jahr auf bis zu ca. 194.000 Tonnen im Jahr 2022 [4]. Hierbei wird die Fahr-

zeugindustrie die Luft- und Raumfahrtindustrie als derzeit größten Abnehmer von CFK ablösen [3,4]. Allerdings darf der aktuelle und zukünftige Anstieg der weltweiten Produktionsmengen nicht darüber hinwegtäuschen, dass CFK gegenwärtig nur einen Bruchteil der für den industriellen Einsatz hergestellten Werkstoffe bildet. So wurden etwa im Jahr 2015 weltweit ca. 1.620 Mio. Tonnen Stahl und ca. 58 Mio. Tonnen Aluminium produziert [51,52]. Ein Vergleich der Zahlenwerte macht deutlich, dass CFK gegenüber konventionellen Materialien zurzeit nur einen Werkstoff für Nischenanwendungen darstellt.

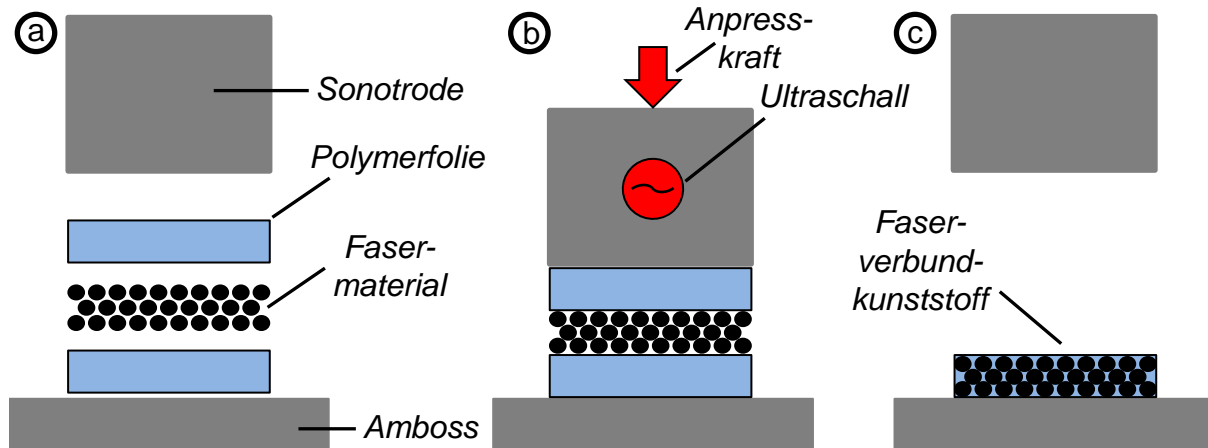
Ein Grund für die geringe Verbreitung von CFK-Produkten ist der derzeit hohe Preis für die Herstellung von CFK. So sind Bauteile aus CFK etwa um den Faktor sechs teurer als vergleichbare Stahl- und etwa um den Faktor vier teurer als Aluminiumkonstruktionen [1]. Neben der geringen Produktionsmenge sind aufwendige Herstellungs- und Verarbeitungsprozesse von CFK, die im Abschnitt 2.2 detailliert behandelt werden, die Ursachen für hohe Bauteilkosten. Gegenwärtig eingesetzte Fertigungsverfahren, wie etwa die Pultrusion oder die Verarbeitung von Prepregs, setzen Investitionskosten von mehreren Hunderttausend Euro voraus. Diese automatisierbaren Produktionsanlagen verwenden speziell an das zu fertigende Bauteil angepasste Werkzeugformen und sind somit wenig flexibel bei der Herstellung von Bauteilen mit einer veränderten Geometrie. Daher rentieren sich automatisierte Verfahren erst bei einer Produktion von Bauteilen mit Stückzahlen von mehreren Tausend Stück. Verformbare CFK-Halbzeuge, wie etwa Prepregs, ermöglichen zwar eine geometrisch flexiblere Bauteilherstellung, müssen jedoch aufwendig und daher kostenintensiv gelagert werden. Um ein frühzeitiges und unkontrolliertes Aushärten von Halbzeugen zu vermeiden, müssen diese bei ca. -20 °C aufbewahrt und innerhalb von drei Monaten verarbeitet werden.

Im Vergleich mit den CFK-Herstellungsverfahren zeichnet sich die in Abschnitt 2.3 näher thematisierte Ultraschallfertigung durch geringe Investitionskosten von wenigen Zehntausend Euro, kurzen Prozesszykluszeiten von etwa 3 bis 5 s sowie einer Vielzahl verwendbarer Polymere, wie PP, PE oder PA, aus. Die Lagerung der Polymere kann geschützt vor UV-Licht und bei Raumtemperatur über mehrere Jahre erfolgen. Zudem ist es prinzipiell möglich, mithilfe der Ultraschallfertigung Bauteile in verschiedenen Geometrien und Größen herzustellen. Konstruktion und Herstellung eines geometrisch angepassten Werkzeuges für die Ultraschallverschweißung erfolgen hierbei kostengünstig und innerhalb einiger Stunden beispielsweise mithilfe einer Fräse. Ultraschallschweißmaschinen können sowohl manuell bedient als auch automatisiert betrieben werden. Somit kann die Ultraschallfertigung einerseits für die Herstellung von Musterstücken für Test- und Erprobungszwecke und andererseits zur wirtschaftlichen Serienfertigung in der industriellen Produktion eingesetzt werden.

#### **3.1.1 Technisches Funktionsprinzip**

Aufgrund der vorteilhaften Charakteristika der zuvor beschriebenen Ultraschallfertigung ist es das Ziel der vorliegenden Arbeit, die Ultraschallfertigung als ein neues, mögliches Verfahren für die Herstellung von CFK zu untersuchen. Rohmaterialien sind hierbei trockene, unbehandelte Fasern sowie als Matrix dienende Polymerfolien.

Die nachfolgende Abbildung 3.2 stellt schematisch das zugrundeliegende technische Funktionsprinzip der Ultraschallfertigung von CFK dar. Zunächst werden von einem Faseroving abgewickelte Kohlenstofffasern zwischen zwei Polymerfolien gelegt und unterhalb der Sonotrode auf dem Amboss einer Ultraschallschweißmaschine fixiert, vgl. Schritt a in Abbildung 3.2. Im nächsten Schritt wird die Sonotrode heruntergefahren und eine Anpresskraft auf die Faser-Folien-Kombination aufgebaut. Sobald die Anpresskraft einen zuvor definierten Schwellenwert erreicht, löst die Schweißmaschine den Ultraschall aus. Infolge der Anpresskraft und des eingeleiteten Ultraschalls werden die Moleküle des Kunststoffes zu Schwingungen angeregt, wodurch es zunächst zu einer Erwärmung und einem anschließenden Aufschmelzen der Polymerfolien kommt. Die weiterhin wirkende Anpresskraft drückt das schmelzflüssige Polymer anschließend in die Zwischenräume der Fasern und bewirkt, dass sich das Polymer um die Fasern legt und somit die Matrixfunktion des hergestellten Verbundwerkstoffes übernimmt, vgl. Schritt b in Abbildung 3.2.



**Abbildung 3.2:** Schematische Darstellung der Prozessschritte bei der Ultraschallfertigung von CFK. a) Positionierung der Polymerfolien und des Fasermaterials b) Kraftaufbau und Ultraschallauslösung c) Kraftabbau und Entnahme des CFK [nach 53].

In der anschließenden Haltephase wird der Ultraschall ausgeschaltet und die Erwärmung des Polymers beendet. Unter Einwirkung der Anpresskraft kühlt die Polymermatrix ab und erstarrt. Abschließend wird die Anpresskraft abgebaut und die Sonotrode hochgefahren, sodass die hergestellte CFK-Probe entnommen werden kann, vgl. Schritt c in Abbildung 3.2.

#### 3.1.2 Potenziale des Verfahrens

Gegenüber konventionellen Herstellungsverfahren von CFK zeichnet sich die Ultraschallfertigung durch mehrere Kostenvorteile aus. Zum einen sind die Investitionskosten für Ultraschallschweißmaschinen mit einigen Zehntausend Euro relativ gering und zum anderen ist die Lagerung der Polymerfolien bei Raumtemperatur ebenfalls sehr kostengünstig. Infolge dieser Kostenvorteile rentiert sich die Anschaffung einer Ultraschallschweißmaschine, etwa im Vergleich zu Pultrusionsanlagen, bereits nach der Herstellung deutlich kleinerer Stückzahlen, sodass die Ultraschallfertigung von CFK sowohl für die Klein- als auch Großserienfertigung eingesetzt werden kann. Ein weiterer Kostenvorteil besteht in der Zykluszeit des Produktionsprozesses, die typi-

scherweise nur wenige Sekunden beträgt, sodass mit einer Ultraschallschweißanlage ein entsprechend großer Durchsatz erzielt werden kann. Zykluszeiten bei einer Fertigung mit dem Pultrusionsverfahren oder der Verarbeitung von Prepregs betragen hingegen einige Minuten bis hin zu Stunden, vgl. Abschnitt 2.2.

Darüber hinaus kommen bei der Ultraschallfertigung von CFK verschiedene Polymere als Matrixwerkstoffe in Betracht. So können sowohl kostengünstige Standardpolymere wie PP und PE als auch mechanisch belastbare technische Polymere wie PA als Kunststoffmatrix verwendet werden. Sofern das zu fertigende Bauteil beispielsweise gegenüber Chemikalien beständig sein soll, können zudem Hochleistungspolymere wie PEEK als Matrix eingesetzt werden, vgl. Abschnitt 2.1.

Gegenüber den im Abschnitt 2.2 vorgestellten Verfahren, bei denen FVK teilweise ebenfalls mithilfe von Ultraschall hergestellt werden, grenzt sich der in der vorliegenden Arbeit vorgestellte Ansatz durch die Wahl der im Prozess verarbeiteten Rohmaterialien ab. So verwenden die in [34,37-46] vorgestellten Herstellungsverfahren bereits vorgefertigte FVK-Halbzeuge als Prozessmaterialien. Diese Halbzeuge können etwa in Form von Prepregs oder Tapes vorliegen und haben alle die Gemeinsamkeit, dass sie in einem vorgelagerten Prozessschritt aus den Rohmaterialien, nämlich den trockenen Fasern und der Matrix, hergestellt wurden. Werden hingegen keine FVK-Halbzeuge sondern trockene Fasern als Rohmaterialien verwendet, so lassen sich mit den vorgestellten Prozessen keine FVK-Bauteile oder Produkte, sondern lediglich FVK-Halbzeuge wie beispielsweise CFK-Preforms herstellen. Diese wiederum müssen in einem weiteren Prozess zu CFK-Produkten verarbeitet werden. Dadurch handelt es sich bei diesen Verfahren um diskontinuierliche Verfahren, da es bei der Verarbeitung der trockenen Fasern zum fertigen FVK-Produkt zu einer Unterbrechung sowie zum Prozesswechsel kommt.

Bei dem in der vorliegenden Arbeit vorgestellten Verfahren werden hingegen trockene, von einem Roving abgewickelte, Fasern sowie thermoplastische Folien, die in verschiedenen Abmessungen als industrielle Standardware auf Rollen geliefert werden, als Rohmaterialien verwendet. Beide Prozessmaterialien haben einen deutlich geringeren Verarbeitungsgrad als die in den anderen Verfahren eingesetzten FVK-Halbzeuge und sind somit kostengünstiger. Des Weiteren werden bei der Ultraschallfertigung von CFK die Rohmaterialien in nur einem kontinuierlichen und zusammenhängenden Prozess zu CFK verarbeitet. Ferner ist eine Vorbehandlung der Fasern oder die Verwendung von Halbzeugen nicht notwendig.

Die schematische Darstellung in Abbildung 3.2 zeigt die Herstellung von CFK mit einer Lage Kohlenstofffasern und zwei Polymerfolien. Zudem ist es möglich, sowohl die Anzahl der Faser- als auch Folienschichten zu verändern, wodurch die Dicke und somit die mechanische Belastbarkeit des gesamten CFK-Probenkörpers erhöht wird.

## 3.2 Experimentelle Voruntersuchungen

Bei der in der vorliegenden Arbeit untersuchten Ultraschallfertigung von CFK handelte es sich um ein neuartiges Herstellungsverfahren. Daher wurden zunächst experimentelle Voruntersuchungen durchgeführt. Diese Voruntersuchungen sollten zum

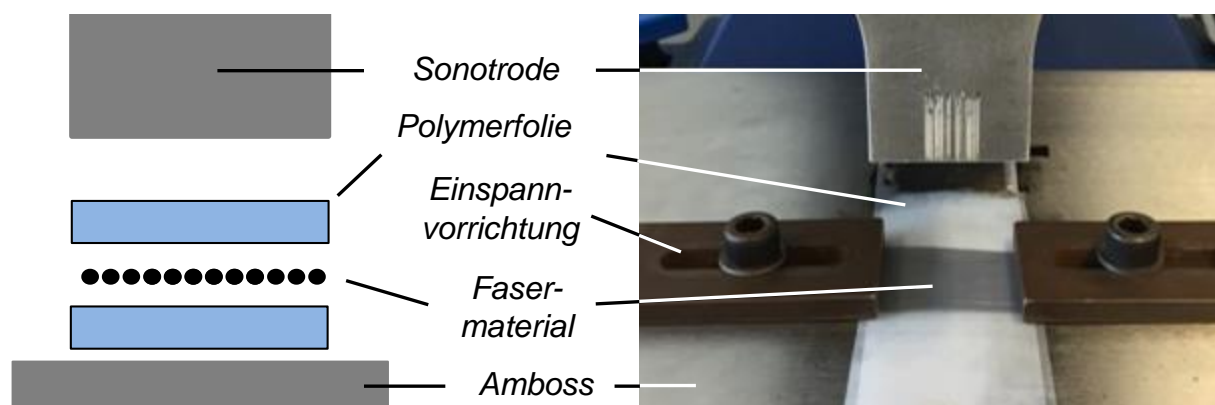
einen zeigen, dass es prinzipiell möglich war, mithilfe der Ultraschallfertigung CFK herzustellen, und zum anderen ein allgemeines Grundlagenwissen über das Herstellungsverfahren generieren. Die in dem Abschnitt 3.2.1 und Abschnitt 3.2.2 vorgestellten Versuche wurden in [5] durchgeführt, ausgewertet und näher beschrieben.

#### 3.2.1 Ultraschallfertigung einlagiger CFK

In einer einleitenden Untersuchung wurde ein einlagiger CFK mithilfe von Ultraschall hergestellt. Hierfür wurden zwei jeweils 200  $\mu\text{m}$  dicke PP-Folien als Matrixmaterial verwendet, siehe Datenblatt in Abbildung A.1 und Abbildung A.2 im Anhang. Als Füllstoff diente eine ca. 100  $\mu\text{m}$  dicke und ca. 8 mm breite Lage der Kohlenstofffasern HTS40 F13 12K 800tex der Firma Toho Tenax Europe, Heinsberg, die von einem Roving abgewickelt wurden, vgl. Datenblatt in der Tabelle A.2 im Anhang [54].

Eine Lage der Kohlenstofffasern wurde zwischen den beiden PP-Folien positioniert und mithilfe einer Einspannvorrichtung unterhalb der Sonotrode auf dem Amboss der Ultraschallschweißmaschine 2000 IW/IW+ Kompakt-Schweißsystem des Herstellers BRANSON Ultraschall, Dietzenbach, befestigt. Bei einer Nennfrequenz des Ultraschalls von 20 kHz beträgt die Leistung der Maschine 2200 W und die maximale Amplitude ist 32  $\mu\text{m}$  [55]. Einstellbare Prozessparameter sind Schweißzeit, Anpresskraft, Amplitude des Ultraschalls sowie die Haltezeit nach dem Schweißvorgang [55].

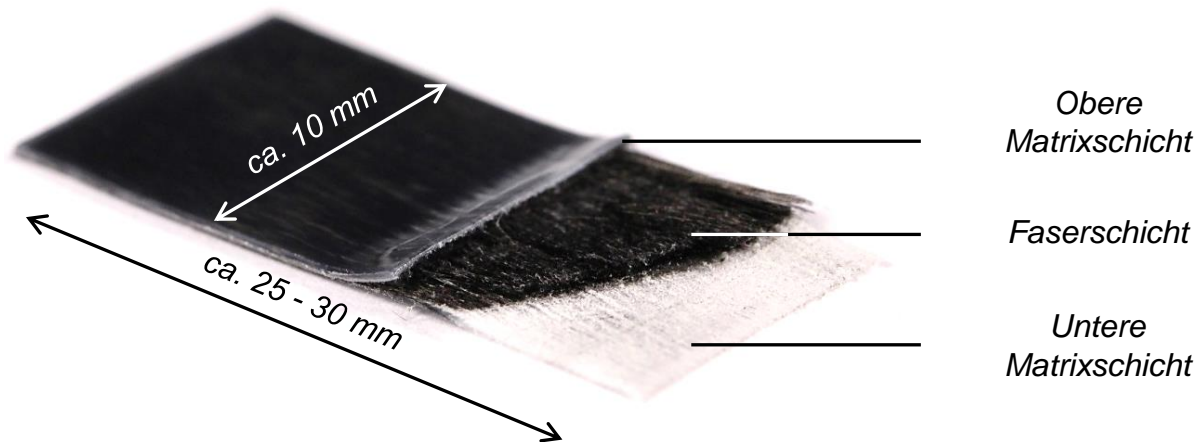
Nach der Positionierung der Folien und Kohlenstofffasern wurde der Schweißvorgang ausgelöst. Hierbei fuhr zunächst die Sonotrode herunter und baute eine Kraft von ca. 3.200 N auf den Probenkörper auf. Anschließend wurde für 1,5 s der Ultraschall ausgelöst und mit einer Amplitude von 32  $\mu\text{m}$  über die Sonotrode in den Kunststoff eingeleitet. Der Kunststoff erhitze und legte sich im schmelzflüssigen Zustand um die Kohlenstofffasern. Anschließend wurde der Ultraschall abgestellt und die Probe kühlte unter bestehender Krafteinwirkung 1,0 s lang ab. Die eingestellten Prozessparameter sind in der Tabelle A.3 des Anhanges zusammengefasst. Die nachfolgende Abbildung 3.3 zeigt eine schematische Darstellung sowie eine fotografische Aufnahme der Versuchsanordnung.



**Abbildung 3.3:** Schematische Darstellung (links) sowie Aufnahme (rechts) der Versuchsanordnung zur Herstellung von CFK mithilfe von Ultraschall [nach 5].

Die Abbildung 3.4 zeigt eine hergestellte CFK-Probe, bei der eine Lage Fasern zwischen zwei Polymerfolien eingeschweißt wurde. Durch das Abschaben der Fasern

am rechten Probenrand war deutlich zu sehen, dass die Fasern beim Herstellungsprozess in die Matrixschicht eingeschweißt wurden. Dies war daran zu erkennen, dass Abdrücke der Fasern im ausgehärteten Polymer sichtbar waren [5].

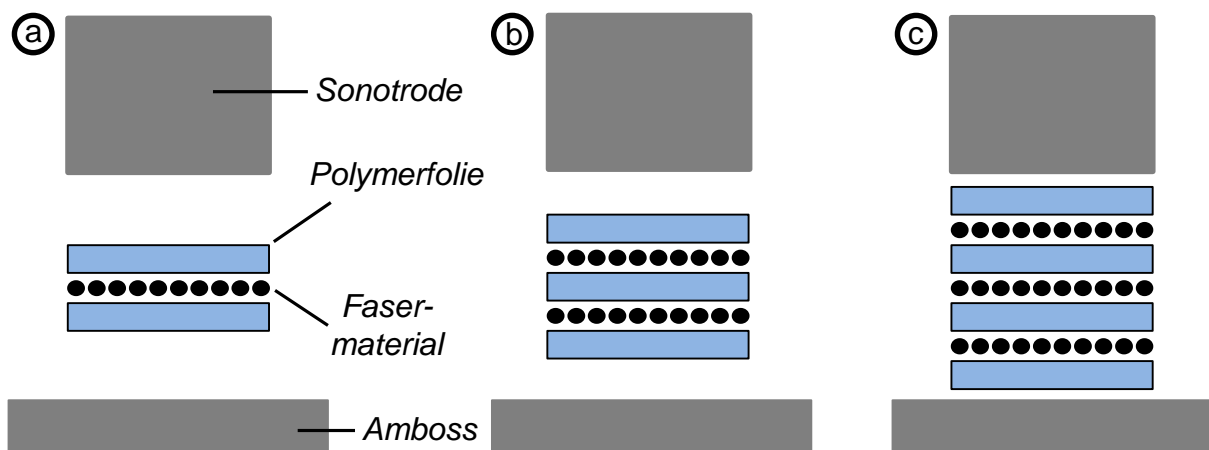


**Abbildung 3.4:** Mittels Ultraschall hergestellte CFK-Probe, bestehend aus einer Lage Kohlenstofffasern sowie zwei als Matrixmaterial dienenden PP-Folien [5].

Anhand der Ergebnisse der Untersuchung wurde geschlussfolgert, dass es prinzipiell möglich war, mittels Ultraschallfertigung einlagige CFK-Probekörper herzustellen.

### 3.2.2 Ultraschallfertigung mehrlagiger CFK

In einer weiterführenden Versuchsreihe wurde untersucht, ob es mithilfe der Ultraschallfertigung möglich war, mehrlagige CFK-Proben herzustellen. Ausgehend von den zuvor hergestellten einlagigen Proben wurden hierbei sukzessive weitere zusätzliche Faser- und Folienschichten hinzugefügt. Die nachfolgende Abbildung 3.5 stellt schematische Darstellungen der Versuchsanordnungen zur Herstellung von ein-, zwei- und dreilagigen CFK-Proben zusammen.



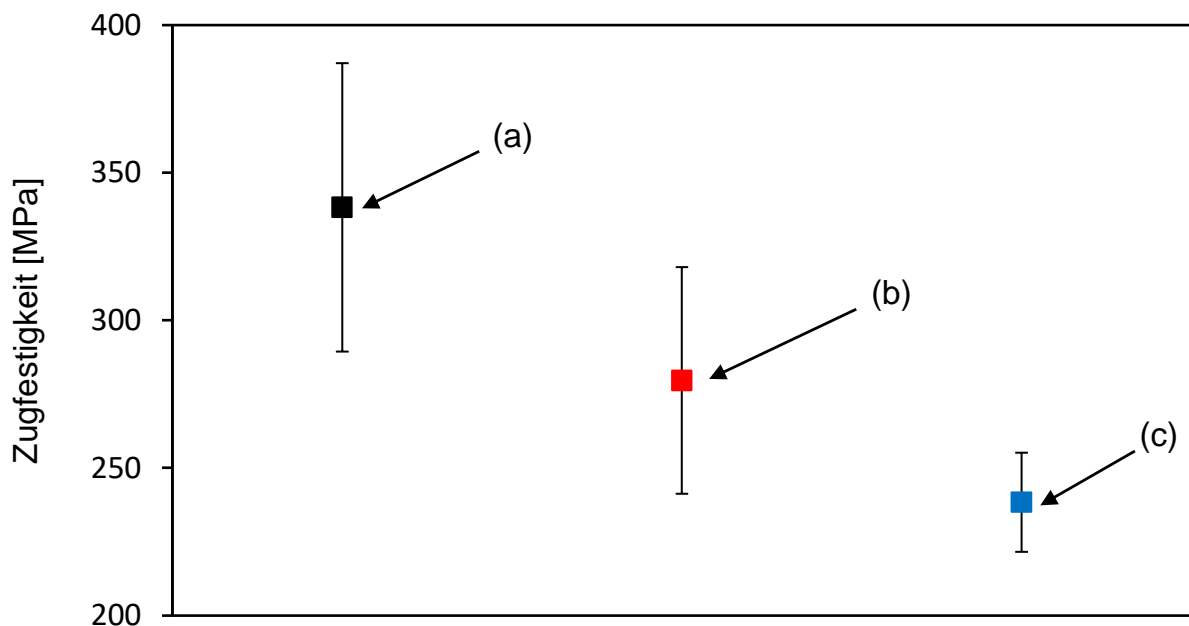
**Abbildung 3.5:** Schematische Darstellung verschiedener Versuchsanordnungen zur Herstellung von CFK-Proben mit einer (a), zwei (b) oder drei (c) Lagen Kohlenstofffasern [nach 5].

Analog zu dem zuvor beschriebenen Versuch wurden mehrere Schichten der Kohlenstofffasern zwischen den PP-Folien positioniert, auf dem Amboss befestigt und anschließend die Ultraschallverschweißung durchgeführt. Die eingestellten Prozessparameter für die zwei- bzw. dreilagigen CFK-Proben sind in der Tabelle A.4 bzw.

Tabelle A.5 im Anhang dokumentiert. Für jede Versuchsanordnung wurden jeweils ca. 20 CFK-Proben hergestellt und anschließend auf eine Breite von ca. 10 mm und eine Länge von ca. 25 bis 30 mm zurechtgeschnitten. Mithilfe eines Mikroskops wurden zudem die exakten Werte für Dicke und Breite der Proben bestimmt und notiert. Für jede Probe konnte somit die Querschnittsfläche berechnet werden, die zur Bestimmung der Zugfestigkeit nach (3.1) benötigt wurde.

$$\text{Zugfestigkeit [MPa]} = \frac{\text{Maximale Zugkraft [N]}}{\text{Querschnittsflaeche der Probe [mm}^2\text{]}} \quad (3.1)$$

Es folgte eine Untersuchung der mechanischen Belastbarkeit der hergestellten CFK-Proben mithilfe von Zugversuchen. Hierfür wurde die Materialzugprüfmaschine Z5.0 der Firma Zwick GmbH & Co. KG, Ulm, verwendet [56]. Die zu prüfenden Proben wurden mit einer Länge von jeweils 5 mm zwischen beiden Klemmbacken der Maschine eingespannt und anschließend auf Zug belastet. Die auf die Probe wirkende Kraft wurde über eine Kraftmessdose erfasst. Abbildung 3.6 stellt die im Zugversuch erfasste mittlere Zugfestigkeit sowie die zugehörige Standardabweichung in Abhängigkeit der Anzahl von Folien- und Faserlagen im CFK zusammen.

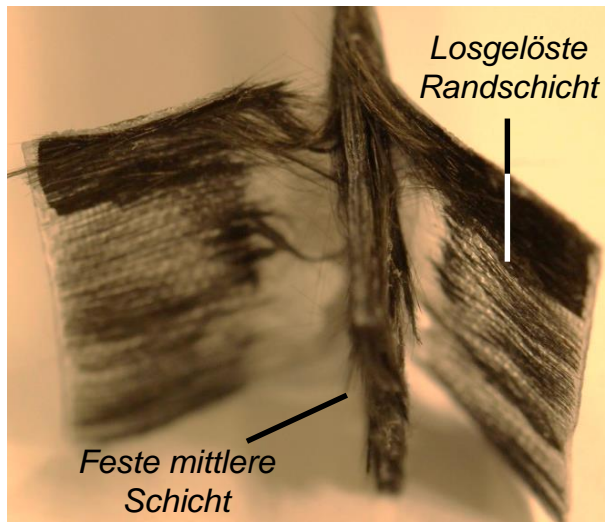


**Abbildung 3.6:** Mittlere Zugfestigkeiten und die zugehörigen Standardabweichungen für ultraschallgefertigte CFK-Proben mit einer (a), zwei (b) oder drei (c) Lagen Kohlenstofffasern. Pro Versuchsanordnung wurden ca. 20 Proben untersucht [nach 5].

Für die in Abbildung 3.5 dargestellte Anordnung (a), bestehend aus einer Lage Fasermaterial und zwei Lagen Folien betrug die Zugfestigkeit ca.  $338 \pm 22$  MPa entsprechend einer relativen Standardabweichung von ca. 26 %. Die Zugfestigkeiten der Anordnungen (b) und (c), die aus zwei bzw. drei Lagen Fasern und drei bzw. vier Lagen Folien bestanden, betragen  $279 \pm 38$  MPa bzw.  $238 \pm 17$  MPa entsprechend einer relativen Standardabweichung von etwa 14 % bzw. 7 % [5].

Die festgestellte Abnahme der Zugfestigkeit bei steigender Lagenanzahl war nicht zu erwarten. Eine Erklärung für dieses Versuchsergebnis lieferte die Formel (3.1) zur

Berechnung der Zugfestigkeit: Durch die Steigerung der Lagenanzahl nahm zwar einerseits die absolute Zugkraft, ausgehend von ca. 1440 N in (a) auf ca. 2150 N in (c) zu, andererseits wuchs durch das Hinzufügen mehrerer Faser-Folien-Schichten der Probenquerschnitt von 4,3 mm<sup>2</sup> auf 9,1 mm<sup>2</sup> an. Durch das sukzessive Hinzufügen von jeweils einer 200 µm dicken Polymer- und einer 100 µm dicken Faserschicht nahm die Querschnittsfläche folglich um einen größeren Faktor zu als die Zugkraft. Daher wurde der Quotient der Zugfestigkeit in Formel (3.1) insgesamt kleiner, sodass eine Abnahme der Zugfestigkeit bei steigendem Faserfüllgrad gemessen wurde.



**Abbildung 3.7:** CFK-Probe mit beidseitig ablösenden Randschichten [5].

Polymer eingeschmolzen werden und die Matrix der Randschicht konnte nicht mit der Kunststoffmatrix der mittleren Schicht verschmelzen und so eine durchgehende, stabile Verbindung generieren. Bei der Durchführung des Zugversuches löste sich daher die äußere Randschicht von der festen mittleren Schicht. Es kam zum Versagen der Probe obwohl der Großteil der Fasern nicht gebrochen war und somit noch belastbar blieb. Dies führte zu der oben beschriebenen Abnahme der Zugfestigkeit der mehrlagigen CFK-Probens. Weiterführende Untersuchungen zum frühen Versagen der CFK-Probens im Zugversuch werden im Abschnitt 4.2.1 durchgeführt und vorgestellt.

Eine Erklärung für das Versuchsergebnis lieferte eine optische Untersuchung der CFK-Probens am Mikroskop. So war nach dem Zugversuch bei den mehrlagigen Probens im Inneren der Probe eine feste mittlere Schicht sowie eine beidseitig losgelöste Randschicht zu erkennen, vgl. nebenstehende Abbildung 3.7. Eine erste, mögliche Erklärung hierfür war, dass im Probenrandbereich nicht genügend Schmelze generiert werden konnte um die Fasern vollständig von der schmelzflüssigen Kunststoffmatrix zu bedecken. Die Kohlenstofffasern konnten daher nicht tief genug in das

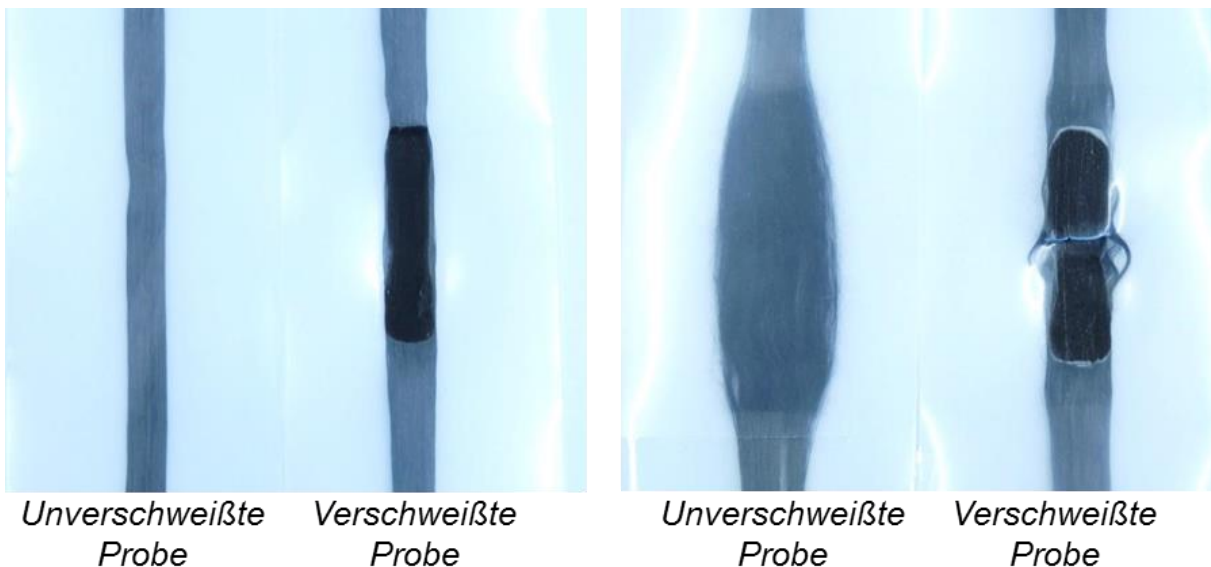
#### 3.2.3 Untersuchung ultraschallbedingter Faserbrüche

Kohlenstofffasern gelten als spröde und weisen mit Werten von 0,4 bis 1,6 % eine geringe Bruchdehnung auf, vgl. Tabelle 2.2. Während des Ultraschallschweißprozesses werden die Fasern jedoch aufgrund des Ultraschalls zu Schwingungen angeregt. Daher wurde untersucht, ob die ultraschallbedingten Schwingungen zum Bruch der Kohlenstofffasern führten und damit eine deutliche Abnahme ihrer mechanischen Belastbarkeit bewirkten.

Wie auch in den zuvor beschriebenen Untersuchungen, dienten hierbei als Rohmaterialien 200 µm dicke PP-Folien sowie Kohlenstofffasern mit einer Dicke von etwa 100 µm pro Lage. Eine Lage der Kohlenstofffasern wurde jeweils zwischen zwei Folien gelegt. Anschließend wurde die Länge der Folien und Fasern auf ca. 80 mm zu-

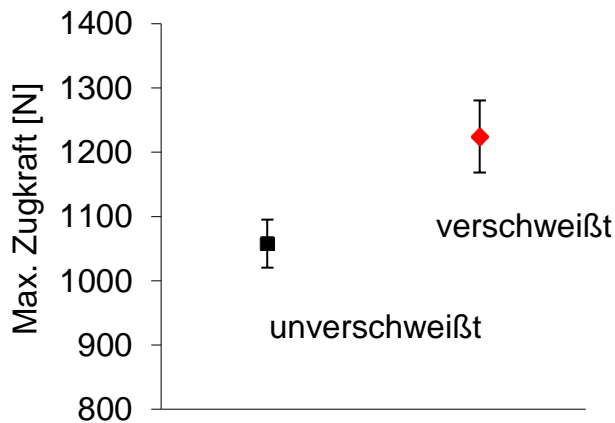
geschnitten. Die Folienbreite hingegen wurde nicht zurechtgeschnitten und betrug 50 mm. Um den Einfluss der Ultraschallschwingungen sowie mögliche Schädigungen der Fasern zu untersuchen, verblieb der Probensatz A im unverschweißten Zustand, während der Probensatz B mithilfe von Ultraschall verschweißt wurde. Der linke Teil der Abbildung 3.8 zeigt eine unverschweißte Probe A und eine verschweißte Probe B. Die Länge der Verschweißung betrug entsprechend der Breite der verwendeten Sonotrode 40 mm. In der Tabelle A.6 des Anhanges sind zusätzlich die gewählten Prozessparameter dokumentiert.

Anschließend erfolgte die Durchführung der Zugversuche zur Bestimmung der mechanischen Zugkraft. Hierfür wurden die Proben in die Klemmbanken einer Zugprüfmaschine mit einem Drehmoment von 18 N m eingespannt. Um eine Vergleichbarkeit der Messergebnisse zu ermöglichen und Verzerrungen etwa aufgrund der Rand-schichthaftung, vgl. Abschnitt 3.2.1, zu vermeiden, wurden alle Proben ausschließlich in ihrem unverschweißten Bereich in die Klemmbanken eingespannt. Der Abstand der Klemmbanken, also die freie Messlänge der Proben, betrug 55 mm und war somit größer als der verschweißte Bereich des Probensatzes B. Anschließend erfolgte die Zugprüfung. Der rechte Teil der Abbildung 3.8 stellt eine unverschweißte und eine verschweißte Probe nach dem Zugversuch dar. Während bei der verschweißten Probe der Riss in der Mitte des verschweißten Bereiches eintrat, zerfaserten bei der unverschweißten Probe die Kohlenstofffasern und weiteten sich auf.



**Abbildung 3.8:** Darstellung einer unverschweißten und verschweißten Probe vor (links) und nach (rechts) dem Zugversuch.

Abbildung 3.9 stellt die gemessenen Mittelwerte der Zugkraft beim Bruch der Probe sowie die zugehörigen Standardabweichungen dar. Der Probensatz A bestand aus insgesamt 22 nicht verschweißten Proben. Die Zugkraft betrug  $1058 \pm 37$  N. Der Probensatz B bestand aus insgesamt 28 verschweißten Proben. Hierbei betrug die Zugkraft  $1224 \pm 56$  N und war damit ca. 15 % höher als beim Probensatz A. Die Dehnung beim Bruch betrug bei den unverschweißten Proben  $1,18 \pm 0,28$  mm. Bei den verschweißten Proben betrug die sie hingegen  $2,15 \pm 0,81$  mm und war damit ca. 80 % höher als bei den unverschweißten Proben.

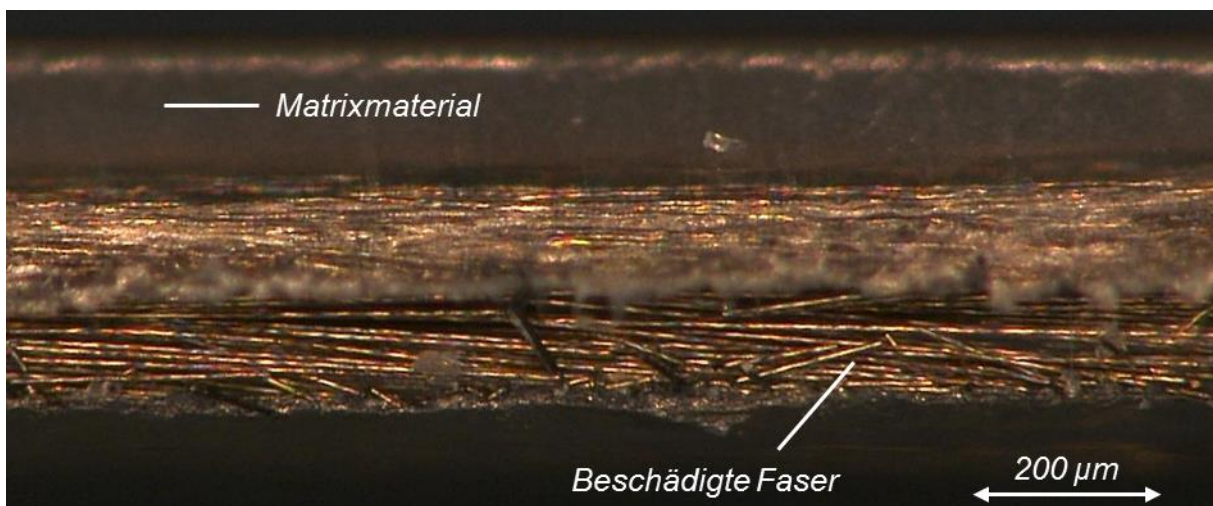


**Abbildung 3.9:** Mittelwerte der ermittelten maximalen Zugkraft sowie die zugehörigen Standardabweichungen der unverschweißten und verschweißten Proben. Es wurden insgesamt 22 unverschweißte und 28 verschweißte Proben untersucht.

Die Auswertung der Zugversuche zeigte, dass sowohl die maximale Zugkraft als auch Bruchdehnung der verschweißten Proben höher waren als Vergleichswerte der unverschweißten Proben. Eine mögliche Erklärung hierfür war, dass in einem Verbundwerkstoff gebrochene Fasern nur lokal und in der Nähe der Bruchstelle für die Aufnahme angreifender mechanischer Kräfte ausfallen, vgl. Abschnitt 2.1. Angreifende Kräfte werden über die Matrix auf die benachbarten Fasern verteilt, entlang der Faserlängsrichtung geleitet und anschließend in einem intakten Bereich auf die ursprüngliche Faser zurückgeführt. Bei den unverschweißten Proben

fiel die Faser jedoch für ihre gesamte Länge aus, sobald lokal ein Bruch eingetreten war. Dadurch konnte erklärt werden, dass die Zugkraft des verschweißten Verbundes größer war als die der unverschweißten Einzelfasern.

Abbildung 3.10 stellt einen Schnitt in Faserlängsrichtung durch den verschweißten Bereich einer Probe aus dem Probensatz B dar. Es ist zu erkennen, dass der Großteil der Fasern nicht beschädigt wurde und intakt in ihrer Längsrichtung von links nach rechts verläuft. Einzelne Fasern sind jedoch beschädigt und wurden teilweise abgebrochen. Des Weiteren ist aufgrund einer leichten Schrägstellung der CFK-Probe das Matrixmaterial am oberen Probenende zu sehen.



**Abbildung 3.10:** Mikroskopaufnahme eines Schnittes in Faserlängsrichtung durch eine mittels Ultraschall hergestellte CFK-Probe bestehend aus einer ca. 100 µm dicken Lage Fasern und zwei jeweils ca. 200 µm dicken PP-Folien.

Abschließend ließ sich daher festhalten, dass die bei der Ultraschallverschweißung auftretenden Schwingungen die Kohlenstofffasern zwar schädigten, diese Schädigung

gungen jedoch geringfügig waren. Es wurde somit davon ausgegangen, dass die Abnahme der mechanischen Zugkraft infolge des ultraschallbedingten Faserbruches ebenfalls nur geringfügig und somit nicht hinderlich für die Weiterentwicklung der Ultraschallfertigung von CFK war.

#### **Zusammenfassung**

Die durchgeführten Voruntersuchungen zeigten zum einen, dass es prinzipiell möglich war, mithilfe von Ultraschall ein- und mehrlagige CFK-Proben herzustellen. Sie bestätigten, dass die Ultraschallfertigung ein mögliches neues Verfahren zur Herstellung von CFK darstellte. Zum anderen wurde belegt, dass die mechanische Belastbarkeit der gefertigten CFK-Proben größer war als die der jeweiligen Fasern und Folien im unverschweißten Zustand. Gleichzeitig verdeutlichten die Voruntersuchungen aber auch den weiterführenden Forschungsbedarf, um beispielsweise die beschriebene Randschichthaftung zu verbessern und so die Zugfestigkeit der CFK-Proben zu steigern. Zusammenfassend konnten die Ergebnisse der Voruntersuchungen als positiv eingestuft werden und motivierten zu weiterführenden Arbeiten. Daher thematisiert das nachfolgende Kapitel 4 die durchgeführten Untersuchungen zur systematischen Weiterentwicklung des Verfahrens der Ultraschallfertigung von CFK.

## 4. Entwicklungsprozess der Ultraschallfertigung von CFK

Die im Kapitel 3 beschriebenen Voruntersuchungen zeigten, dass die Ultraschallfertigung grundsätzlich für die Herstellung von CFK eingesetzt werden konnte. Da jedoch weiterführende Arbeiten notwendig waren, um beispielsweise die Festigkeit oder Dicke der hergestellten Proben zu erhöhen, thematisiert dieses Kapitel den systematischen Entwicklungsprozess der Ultraschallfertigung von CFK. Hierfür behandelt der Abschnitt 4.1 zunächst eine Standardisierung des Vorgehens bei der Herstellung der Proben sowie der Durchführung von Zugversuchen. Diese war notwendig, um einheitliche Rahmenbedingungen sowohl für die Fertigung als auch die Untersuchung ultraschallgefertigter CFK zu schaffen und somit eine Vergleichbarkeit der Proben zu ermöglichen. In den folgenden Abschnitten 4.2 bis 4.5 wird die sukzessive Weiterentwicklung des Ultraschallfertigungsverfahrens beschrieben. Ausgehend von den Ergebnissen der Voruntersuchungen wurden Ursachen für die im Vergleich zu konventionell gefertigten CFK geringeren Festigkeiten der ultraschallgefertigten Proben untersucht sowie anschließend Verbesserungsmöglichkeiten zur Steigerung ebendieser abgeleitet. Weiterhin wurde die maximale Dicke der hergestellten Proben erforscht und untersucht, welche thermoplastischen Polymere als Matrixmaterialien eingesetzt werden konnten. Zudem wurden im Abschnitt 4.5.2 Untersuchungen durchgeführt, bei denen Gewebematten für die Herstellung von CFK-Platten verwendet wurden. Im Abschnitt 4.6 wurde untersucht, ob mittels Ultraschall neben Kohlenstoff- auch Glasfasern verarbeitet und somit GFK hergestellt werden können.

### 4.1 Standardisierung der Herstellung und Zugprüfung

Eine Besonderheit von faserverstärkten Kunststoffen im Allgemeinen ist es, dass die Zugfestigkeit mit zunehmender Einspannlänge der Proben abnimmt [12]. Bei gleicher Einspannlänge hingegen zeigen Probenkörper, bei denen dünnere Fasern verwendet werden, eine höhere Festigkeit als Probenkörper mit dickeren Fasern [1]. Beides erklärt sich dadurch, dass mit abnehmendem Durchmesser und Länge der Fasern das statistische Auftreten von lokalen Fehlstellen innerhalb der Faser reduziert wird und dadurch die maximale Faserfestigkeit besser ausgenutzt werden kann [12]. Tritt bei einer eingespannten Faser an einer Stelle ein lokaler Defekt auf, bricht diese Faser und fällt für die Aufnahme von mechanischen Kräften aus. Zwar können diese Kräfte über das Matrixmaterial von einer Faser auf andere Fasern übertragen werden, jedoch ist aufgrund einer eingeschränkten Grenzflächenhaftung zwischen Fasern und Matrix eine vollständige Übertragung nicht möglich. Mit zunehmender Einspannlänge der Probe oder dem Durchmesser der Faser steigt daher die Wahrscheinlichkeit von vorliegenden Fehlstellen, sodass die Lastaufnahme und somit die Festigkeit des Probenkörpers als Ganzes abnehmen. Deshalb sind die der Praxis gemessenen Festigkeiten von FVK stets geringer als die theoretisch berechneten [12].

Dieses Beispiel verdeutlicht, dass zusätzlich zu der Dokumentation von Parametern und der Versuchsanordnung ein standardisiertes Vorgehen bei der Probenfertigung und der Durchführung der Zugversuche notwendig ist, um eine reproduzierbare Herstellung und Vergleichbarkeit der quantitativen Festigkeitswerte zu ermöglichen.

Aus diesem Grund wurden zu Beginn des systematischen Entwicklungsprozesses der Ultraschallfertigung von CFK Vorgaben für den Herstellungsprozess der Proben sowie die Durchführung der Zugprüfung definiert und dokumentiert. Das Ziel war es, allgemeingültige und von den jeweiligen Prozessparametern unabhängige Richtlinien zu erstellen. Diese Standardisierungen wurden daraufhin im gesamten weiteren Verlauf der vorliegenden Arbeit angewendet. Die in diesem Abschnitt vorgestellten Untersuchungen wurden in [7] und [57] durchgeführt und ausgewertet.

### **4.1.1 Herstellungsprozess**

Um mithilfe von Ultraschall hergestellte CFK-Proben miteinander vergleichen und Rückschlüsse über Änderungen an den Prozessparametern, der Versuchsanordnung oder den verwendeten Materialien machen zu können, ist eine reproduzierbare Herstellung der Proben notwendig. Um die Reproduzierbarkeit zu erhöhen, wurden daher Richtlinien entwickelt, die ein standardisiertes Vorgehen bei der Fertigung der Proben ermöglichten. Um prozessparameterunabhängige Einflüsse zu identifizieren, wurden zunächst unter unterschiedlichen Bedingungen einlagige Proben, bestehend aus einer ca. 100  $\mu\text{m}$  dicken Lage Kohlenstofffasern, die zwischen zwei jeweils 200  $\mu\text{m}$  dicken PP-Folien gelegt wurde, hergestellt und untersucht. Es zeigte sich hier, dass im Wesentlichen drei Faktoren einen Einfluss auf die Qualität der ultraschallgefertigten Probe hatten: Einspannung von Folien und Fasern, Positionierung der Fasern und Folien auf dem Amboss, Parallelität und Sauberkeit von Amboss und Sonotrode. Im Folgenden wird auf diese Punkte detailliert eingegangen.

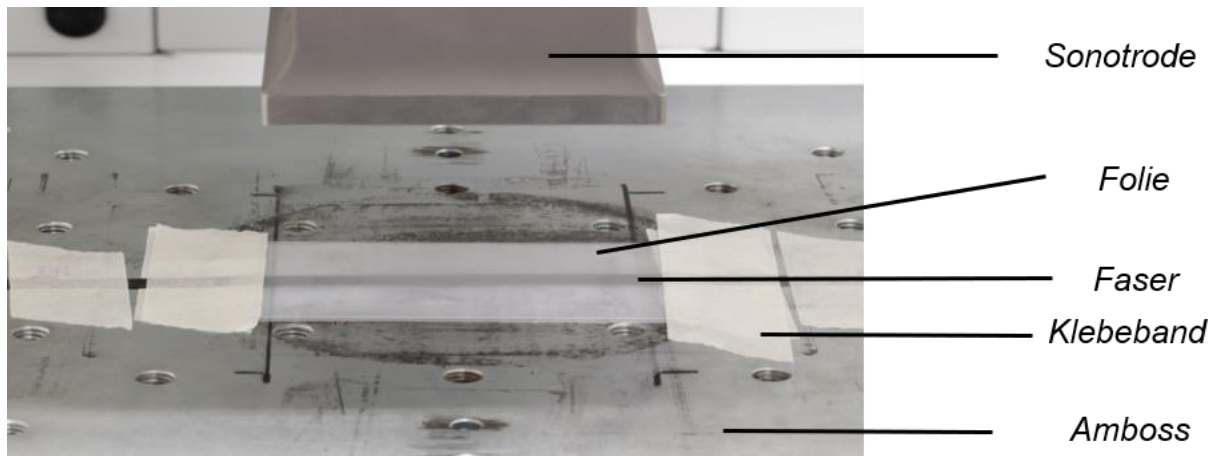
### **Befestigung von Folien und Fasern**

Während des Schweißprozesses kam es aufgrund von Ultraschallschwingungen zu Bewegungen der Fasern, sodass sich diese quer zur Faserrichtung verschoben. Dies führte zu einer Aufweitung des eingeschweißten Faserstranges, einer inhomogenen Verteilung der Fasern über die gesamte CFK-Probenbreite sowie einer nicht unidirektionalen Faserausrichtung, was die mechanische Belastbarkeit der Probe einschränkte. Daher wurden in einer Versuchsreihe die Auswirkungen der Einspannung von Fasern und Folien auf die Aufweitung des Faserbündels sowie die mechanische Belastbarkeit der hergestellten CFK-Probe untersucht.

In dem durchgeführten Versuch wurde die Einspannung der Folien und Fasern auf dem Amboss variiert. Die verwendeten Materialien, die Anordnung von Fasern und Folien sowie die eingestellten Prozessparameter wurden hierbei nicht verändert. Als Matrixmaterial wurden zwei jeweils 200  $\mu\text{m}$  dicke PP-Folien verwendet. Als Fasermaterial diente eine Lage der Kohlenstofffasern, die vor der Verschweißung eine Dicke von ca. 100  $\mu\text{m}$  sowie eine Breite von ca. 8 mm hatte, vgl. Datenblätter im Anhang. Die Kohlenstofffasern wurden zwischen die beiden Polymerfolien gelegt und auf dem Amboss der HiQ DIALOG 6200 Ultraschallschweißmaschine des Herstellers Herrmann Ultraschalltechnik, Karlsbad, positioniert [58]. Die eingestellten Prozessparameter sind in Tabelle A.7 des Anhanges zusammengefasst.

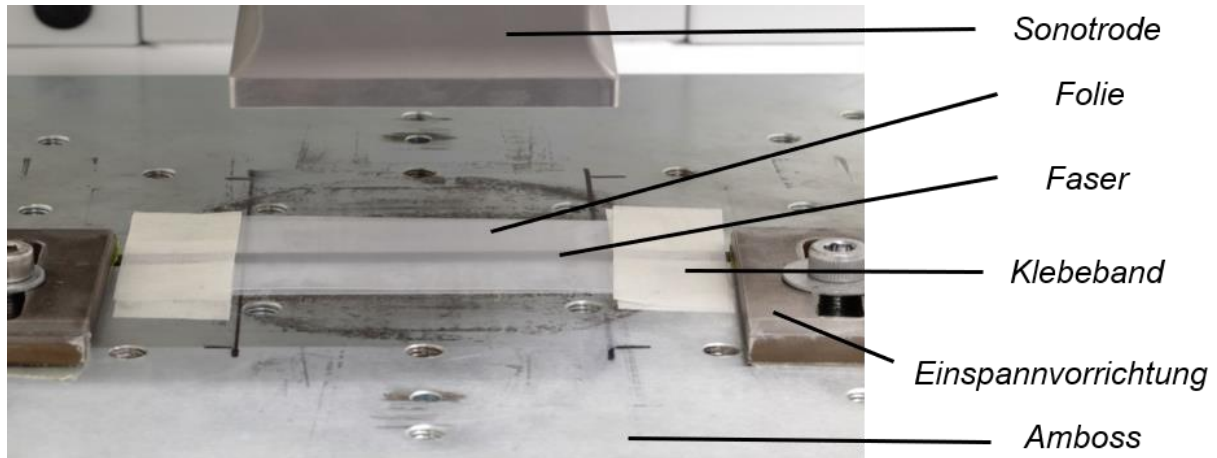
Abbildung 4.1 zeigt den Versuchsaufbau zur sogenannten losen Einspannung, bei der die Fasern mit einer Kraft von ca. 5 N in Längsrichtung vorgespannt und mithilfe

von Klebeband auf dem Amboss befestigt wurden. Die Vorspannkraft wurde hierbei mit dem Kraftmessgerät PCE-DFG N 500 gemessen [59].



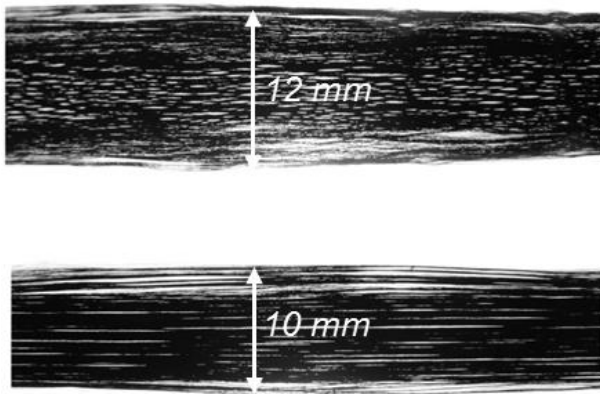
**Abbildung 4.1:** Versuchsaufbau zur Fixierung und Einspannung der Fasern und Folien mithilfe von Klebeband. Die Vorspannkraft betrug in etwa 5 N [nach 57].

Bei dem in der Abbildung 4.2 gezeigten Versuchsaufbau zur Ultraschallfertigung von CFK mit sogenannter fester Einspannung wurden die Fasern und Folien zunächst mit Klebeband in ihrer Position auf dem Amboss fixiert. Anschließend wurde ein Ende der Fasern in die linke Einspannvorrichtung geklemmt, während am anderen Ende durch Ziehen mit dem Messgerät eine Kraft von ca. 100 N in Faserlängsrichtung aufgebaut und abschließend in der rechten Einspanneinrichtung geklemmt wurde.



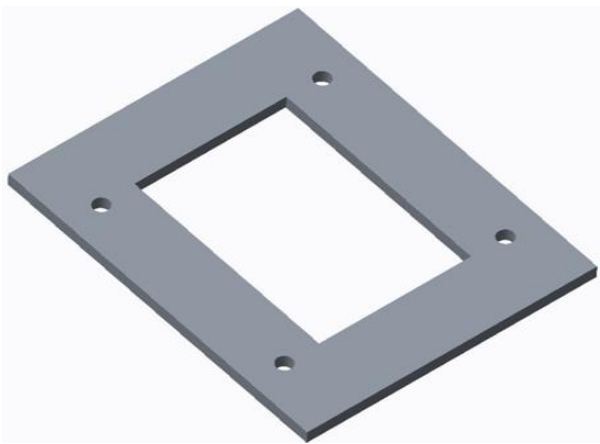
**Abbildung 4.2:** Versuchsaufbau zur Fixierung und Einspannung der Fasern und Folien mithilfe von Klebeband sowie einer Einspannvorrichtung. Die aufgebrachte Vorspannkraft betrug in etwa 100 N [nach 57].

Während der Durchführung der Untersuchung wurde festgestellt, dass sich der zeitliche Aufwand für die Einspannung der Fasern und Folien stark unterschied. Während die Befestigung mithilfe von Klebestreifen innerhalb von wenigen Sekunden erfolgte, betrug bei der Verwendung der Einspannvorrichtung die benötigte Zeit für die Befestigung einige Minuten. Dieser zeitliche Aufwand stieg zudem noch weiter an, wenn sich die Anzahl der Lagen von Fasern und Folien erhöhte. Insgesamt konnte abgeschätzt werden, dass bei einer vergleichbaren Lagenanzahl die feste Einspannung um den Faktor fünf mehr Zeit in Anspruch nahm als die lose Einspannung [57].



**Abbildung 4.3:** Mithilfe einer Vorspannkraft von 5 N (oben) sowie 100 N (unten) hergestellte CFK-Proben [nach 57].

Da davon auszugehen war, dass eine Aufweitung des Faserstranges sowie die nicht-unidirektionale Ausrichtung der Fasern die mechanische Belastbarkeit der CFK-Proben beeinflussten, wurde anschließend in Zugversuchen die mechanische Zugfestigkeit bestimmt. Hierfür wurden mit beiden Versuchsanordnungen jeweils zwölf CFK-Proben hergestellt und untersucht. Die mittlere Zugfestigkeit der mit einer Vorspannkraft von 5 N hergestellten Proben betrug  $335 \pm 23$  MPa und bei einer Vorspannkraft von 100 N  $365 \pm 24$  MPa.



**Abbildung 4.4:** Schematisches CAD-Modell des Einspannrahmens [57].

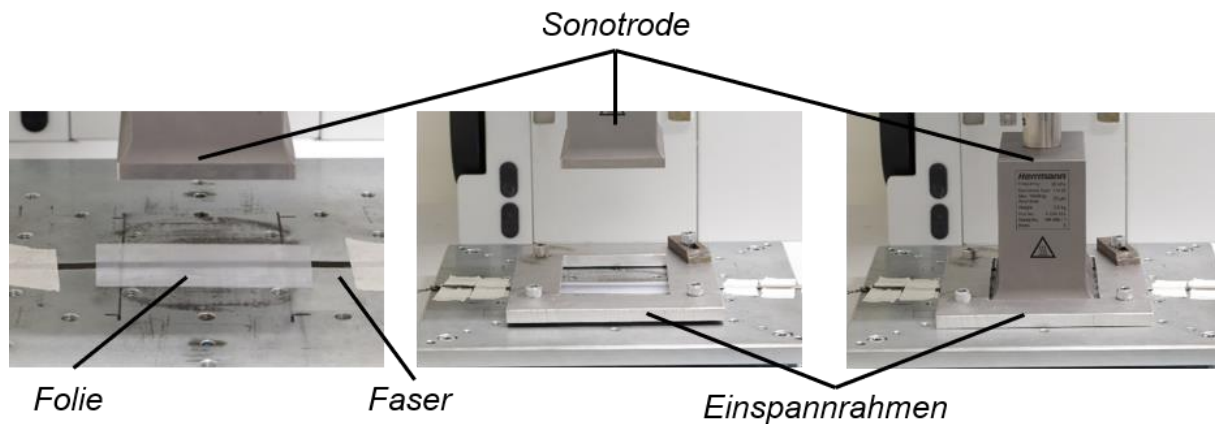
konnte auf dem Amboss verschraubt werden. Die Abmessungen der Aussparung betragen 126 mm x 86 mm und waren so gewählt, dass die verwendete Sonotrode mit einem seitlichen Sicherheitsabstand von jeweils 3 mm in diese hineinpasste. Der Rahmen wurde aus 10 mm dickem Aluminium gefertigt um ein Durchbiegen des Rahmens während der Befestigung zu verhindern.

Abbildung 4.5 stellt die einzelnen Schritte zur Befestigung der Folien und Fasern mithilfe des Einspannrahmens dar. Zunächst wurden die Fasern zwischen die Folien gelegt und unter der Sonotrode auf dem Amboss der Ultraschallschweißmaschine positioniert. Um ein Verrutschen der einzelnen Fasern oder Folien zu verhindern, wurden diese mit Klebeband fixiert. Anschließend wurde der Spannrahmen so auf den Stapel aus Folien und Fasern gelegt, dass die Sonotrode genau in die Ausspa-

Es folgte die Verschweißung der Folien und Fasern zu CFK-Proben, siehe Abbildung 4.3. Bei der Verwendung einer Vorspannkraft von 5 N weitete sich der Faserstrang von ursprünglich 8 mm auf etwa 12 mm auf. Wurde hingegen eine Vorspannkraft von ca. 100 N eingestellt, weitete sich der Faserstrang lediglich auf etwa 10 mm auf. Des Weiteren war zu erkennen, dass bei der festen Einspannung die Fasern des CFK insgesamt unidirektionaler ausgerichtet waren als bei der Probe mit loser Einspannung.

Zusammenfassend zeigte die Untersuchung, dass mithilfe einer Einspannkraft von etwa 100 N die Aufweitung der Fasern reduziert und die Zugfestigkeit vergleichbarer Proben um ca. 9 % gesteigert werden konnte. Da der zeitliche Aufwand hierfür jedoch um den Faktor fünf zunahm, erwies sich eine solche Art der Einspannung als nicht sinnvoll. Um den Einspannvorgang zu verkürzen, wurde daher ein Einspannrahmen konstruiert, siehe Abbildung 4.4. Dieser wurde mit Bohrlochern versehen und

ung passte. Die Schrauben wurden jedoch noch nicht festgezogen. Nachdem im nächsten Schritt die Sonotrode, ohne den Ultraschall auszulösen, herunterfuhr und eine Kraft aufbaute, wurden die Schrauben des Einspannrahmens mit einem Drehmoment von 25 N m festgezogen. Abschließend fuhr die Sonotrode erneut hoch.



**Abbildung 4.5:** Darstellung des Einspannvorganges von Fasern und Folien mithilfe des Spannrahmens. Positionieren der Folien auf dem Amboss und fixieren der Position mittels Klebeband (links), montieren des Spannrahmens (Mitte), herablassen der Sonotrode und festziehen der Schrauben des Spannrahmens (rechts) [57].

Mithilfe des Einspannrahmens konnte die zur Befestigung der Fasern und Folien benötigte Zeit deutlich reduziert werden. Selbst für mehrlagige Proben lag diese im Bereich einer Minute und war somit in etwa doppelt so groß, wie die der Befestigung mithilfe von Klebebändern. Des Weiteren zeigten hergestellte Proben eine Aufweitung der Fasern auf eine Breite von ca. 10,3 mm und lieferten somit vergleichbare Ergebnisse, wie sie mit der Einspannung von 100 N erzielt wurden [57].

Zusammenfassend wurde daher gefolgert, dass durch die Verwendung des Spannrahmens der Einspannvorgang während der Ultraschallfertigung von CFK deutlich beschleunigt wurde. Des Weiteren konnte der Spannrahmen sowohl für die Herstellung von ein- und mehrlagigen CFK-Proben als auch später zur Verschweißung von Geweben verwendet werden, siehe Abschnitt 4.5.

#### Positionierung der Fasern und Folien auf dem Amboss

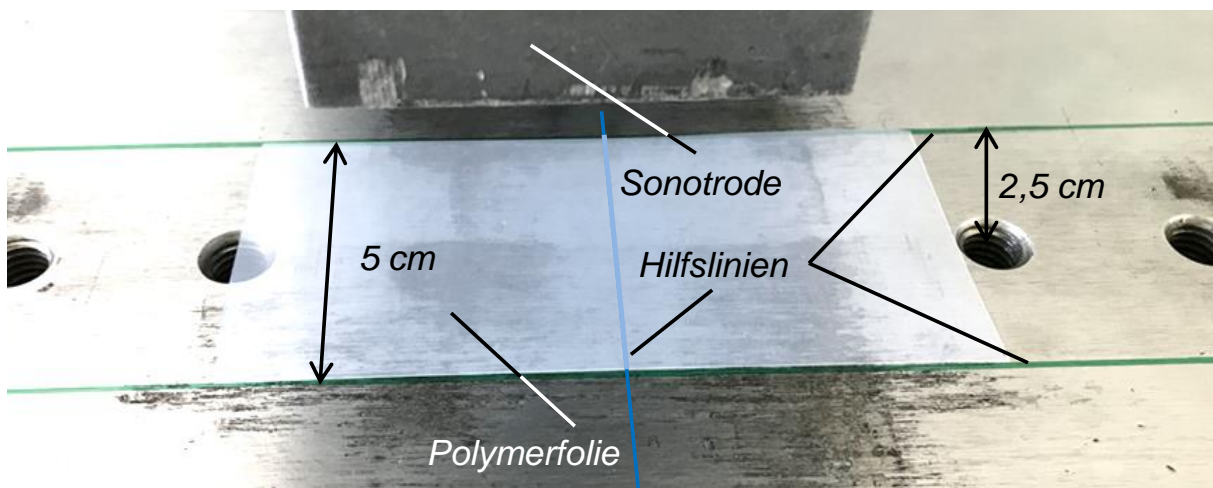
Bei der Ultraschallfertigung von CFK wurde festgestellt, dass die Energieabgabe der Ultraschallschweißmaschine ungleichmäßig über die geometrischen Abmessungen der Sonotrode verteilt war. So war bei den Untersuchungen zu erkennen, dass die Energiekonzentration sowohl in Längs- als auch Querrichtung entlang der Mittellinie der jeweils verwendeten Sonotrode hoch war und zu den Randbereichen hin abnahm. Dies wird anhand der Abbildung 4.6 deutlich, wo zusätzlich zur Probe die Länge der verwendeten Sonotrode, die die Abmessungen von 60 mm x 40 mm hatte, eingezeichnet ist. Es war zu erkennen, dass sich in Längsrichtung der Fasern an den Rändern der Sonotrode Bereiche mit unvollständiger Verschweißung bildeten. In der Mitte hingegen war die Probe vollständig verschweißt. Zudem wurde festgestellt, dass die Verschweißung auch quer zu Faserrichtung, also entlang der Breite der Sonotrode ungleichmäßig verlief und zu den Randbereichen hin abnahm. Da die Breite

der Sonotrode 40 mm betrug und die Breite der Faser ca. 8 mm, fiel dieser Effekt jedoch nicht so deutlich in Erscheinung, wie in Längsrichtung.



**Abbildung 4.6:** Darstellung einer ultraschallverschweißten CFK-Probe sowie eingezeichnete Länge der zur Herstellung verwendeten Sonotrode mit den Abmessungen von 60 mm x 40 mm [7].

Aufgrund der ungleichmäßigen Energieabgabe der Sonotrode mussten für die reproduzierbare Herstellung der Proben sowohl Fasern als auch Folien immer an der gleichen Stelle unterhalb der Sonotrode auf dem Amboss der jeweils eingesetzten Ultraschallschweißmaschine positioniert werden. Hierfür wurden Hilfslinien verwendet, die die Positionierung erleichterten, vgl. Abbildung 4.7.



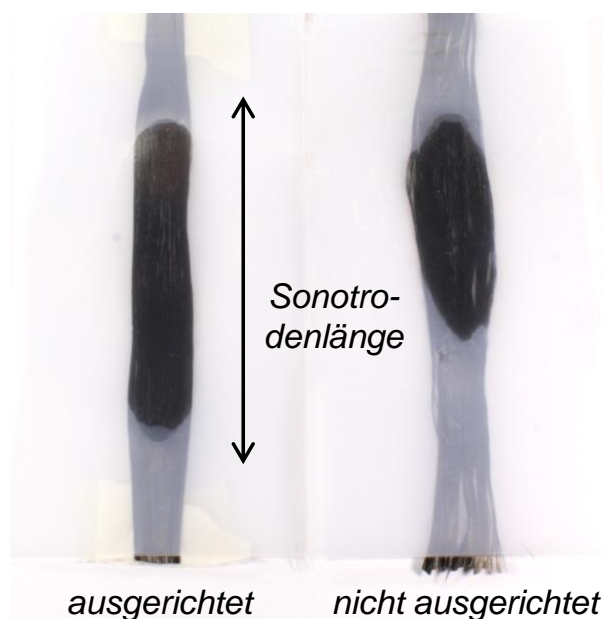
**Abbildung 4.7:** Auf dem Amboss einer Ultraschallschweißmaschine eingezeichnete Hilfslinien zur reproduzierbaren und mittigen Positionierung der Polymerfolien und Fasern während der Herstellung von CFK-Proben [Nach 7].

Sowohl bei der Ultraschallschweißmaschine des Herstellers Branson als auch derjenigen des Herstellers Herrmann dienten Bohrungslöcher in der Ambossplatte als Orientierungshilfe. So wurden etwa bei der Schweißmaschine des Herstellers Branson, siehe Abbildung 4.7, ausgehend von dem Mittelpunkt der Bohrungen, die in Längsrichtung auf dem Amboss verliefen, grüne, horizontal verlaufende, parallele Hilfslinien eingezeichnet, die mit einem Abstand von 5 cm genau so weit auseinander waren wie die verwendeten PP-Folien. Zusätzlich wurde eine blaue vertikale Linie eingezeichnet, die den Mittelpunkt der Sonotrode in Längsrichtung markierte. Anschließend konnte die Folie entlang der grünen Linien positioniert werden. Als nächstes wurden die Fasern so platziert, dass sie entlang der Mittelpunkte der Bohrungen und

somit durch den Mittelpunkt der Sonotrode verliefen. Durch das Ausrichten der Fasern entlang der eingezeichneten Hilfslinien konnten die Fasern und Folien an beiden Maschinen jeweils in der Mitte der Längs- und Querrichtung der Sonotrode positioniert und verschweißt werden.

#### **Parallelität und Sauberkeit von Ambossplatte und Sonotrode**

Neben der Positionierung und Einspannung von Folien und Fasern hatte zusätzlich die Ausrichtung von Ambossplatte und Sonotrode einen Einfluss auf das Schweißergebnis. So musste vor der Benutzung der Ultraschallschweißmaschine die Ambossplatte so ausgerichtet werden, dass die Oberflächen von Sonotrode und Amboss parallel zueinander verliefen. Hierfür waren in der Ambossplatte Stellschrauben eingebracht, mit denen die horizontale und vertikale Position eingestellt werden konnten.



**Abbildung 4.8:** Ultraschallgefertigte CFK-Proben mit (links) und ohne (rechts) Ausrichtung der Ambossplatte [7].

anderer Bereiche hingegen gar nicht. Anhand der Darstellung in Abbildung 4.8 ist zu erkennen, dass die rechte Probe nur im oberen Bereich verschweißt wurde.

Bei der Herstellung der Proben wurde festgestellt, dass insbesondere Schweißkräfte von über 1.000 N ein Verschieben der Ambossplatte begünstigten. Somit war neben der erstmaligen Ausrichtung der Platte zusätzlich nach jeweils zehn Schweißzyklen eine wiederholende Prüfung der Parallelität und eine Nachjustierung notwendig.

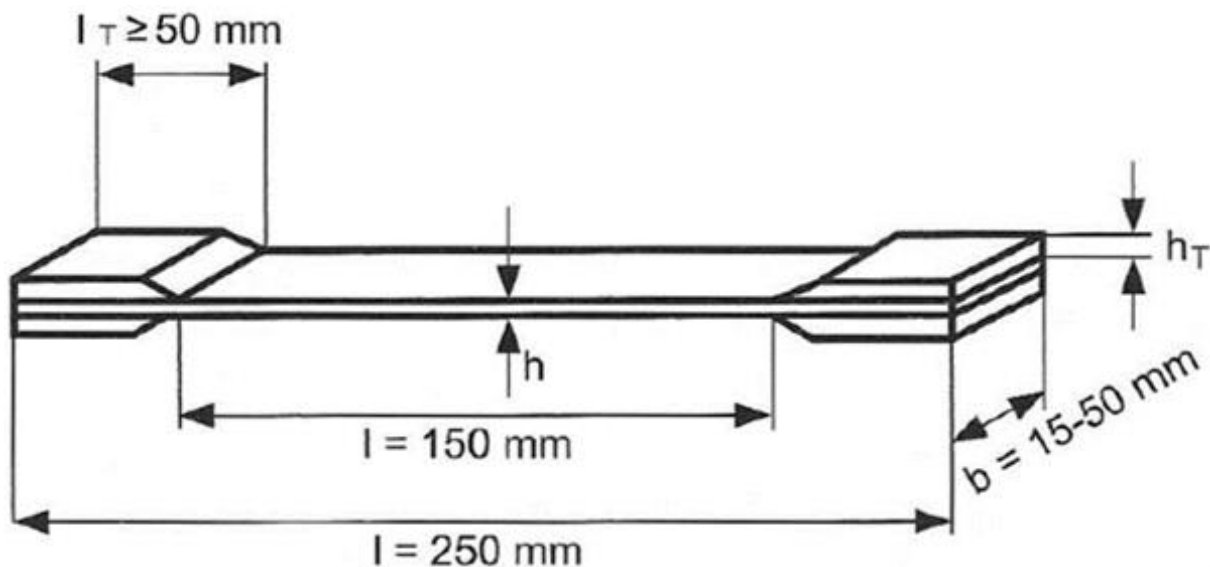
Des Weiteren hatte die Sauberkeit von Sonotrode und Amboss einen Einfluss auf das Schweißergebnis. So bildeten sich während des Schweißprozesses regelmäßig Polymerreste, die sich auf dem Amboss und Sonotrode absetzen und diese verschmutzen. Bei einer anschließenden Verschweißung wurden diese Schmutzreste aufgeschmolzen und zum CFK verarbeitet. Um dies zu vermeiden, wurden etwa alle fünf Schweißvorgänge die Ambossplatte und die Sonotrode mittels Papiertüchern und Alkohol gereinigt und eventuelle Polymerreste entfernt.

### 4.1.2 Zugprüfung

Mithilfe der Zugprüfung werden mechanische Eigenschaften von CFK-Proben quantitativ bestimmt. Die Zugprüfung eignet sich somit, um Auswirkungen der Variationen am Herstellungsprozess, wie etwa Veränderungen der Prozessparameter oder die Verwendung unterschiedlicher Materialien und Anordnungen zu bewerten sowie Rückschlüsse für weiteren Entwicklungs- und Optimierungsbedarf zu geben. Um jedoch verlässliche und aussagekräftige Ergebnisse zu erzielen, muss die Zugprüfung stets unter gleichbleibenden Rahmenbedingungen stattfinden. Es wurden daher zunächst Faktoren identifiziert, die einen Einfluss auf die ermittelte Zugfestigkeit haben. Anschließend wurden Richtlinien ausgearbeitet, die es ermöglichen, die Einflussfaktoren bewusst zu kontrollieren. Die identifizierten Einflussfaktoren waren die Probengeometrie, die Probenvorbehandlung sowie die Prüfparameter während der Zugprüfung. Im Folgenden werden diese Punkte detailliert thematisiert.

#### Probengeometrie

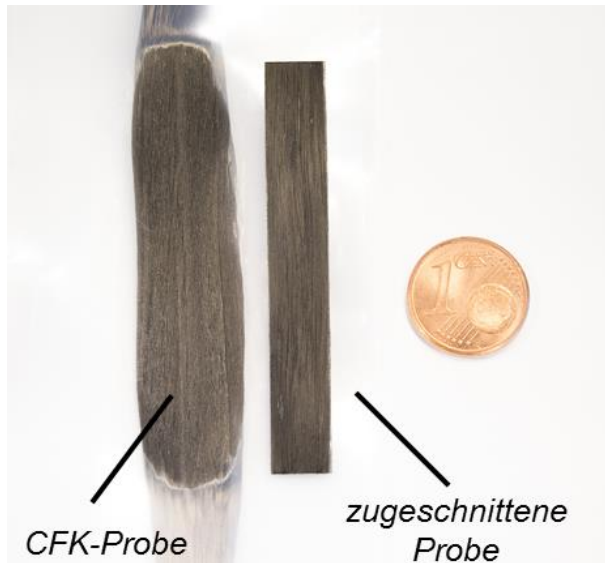
Es ist eine Besonderheit von FVK, dass ihre Festigkeit vom Durchmesser der verwendeten Fasern und Länge der Probe abhängt [12]. Somit hat die in den Spannbacken der Zugprüfmaschine eingespannte Probenlänge einen Einfluss auf die Zugfestigkeit [12]. Um in der vorliegenden Arbeit verschiedene CFK-Proben miteinander vergleichen zu können, musste zunächst eine einheitliche Probengeometrie definiert werden. Die DIN EN ISO 527 empfiehlt für unidirektionale, isotrop oder anisotrop faserverstärkte Kunststoffe die in der Abbildung 4.9 dargestellte Probengeometrie.



**Abbildung 4.9:** Probekörper für den Zugversuch nach DIN EN ISO 527 [Nach 7].

Gemäß der Norm soll die gesamte Länge der Probe 250 mm und ihre Breite 15 bis 50 mm betragen. An den Enden, also den in die Spannbacken der Zugprüfmaschine eingespannten Bereichen, sollen die Probekörper zudem mit sich verjüngenden Aufleimern versehen werden, die eine Länge von mindestens 50 mm haben. Die sogenannte freie Probenlänge, also die Länge der Probe, die während der Zugprüfung nicht in den Spannbacken der Zugprüfmaschine eingespannt wird und sich demnach bei einem Zugkraftanstieg dehnt, soll 150 mm betragen.

Allerdings konnte die Norm in der vorliegenden Arbeit aus mehreren Gründen nicht ohne Abänderungen übernommen werden: Für die Herstellung der Proben wurde unter anderem eine Sonotrode mit den Abmessungen von 60 mm x 40 mm verwendet, was die Länge der gefertigten CFK-Proben auf maximal 60 mm beschränkte. Daher wurden die Proben nach der Herstellung einheitlich auf eine Länge von 55 mm zurechtgeschnitten. Des Weiteren konnte die in der DIN EN ISO 527 vorgeschlagene Breite von 15 bis 50 mm nicht eingehalten werden, da das verwendete Faserrohmaterial nur eine Breite von ca. 8 mm hatte. Da es nach der Verschweißung zu einer Aufweitung der Fasern in Querrichtung kam, wurden die CFK-Proben auf eine Breite von 8 mm zurechtgeschnitten. Die nebenstehende Abbildung 4.10 zeigt zwei mithilfe von Ultraschall gefertigte CFK-Proben. Während die linke Probe nach dem Herstellungsprozess nicht nachbehandelt wurde und unvollständig verschweißte Bereiche am Rand der Sonotrode aufwies, wurde die rechte Probe auf die für den Zugversuch benötigten Abmessungen von 55 mm x 8 mm zurechtgeschnitten. Diese Abmessungen wurden einheitlich in den folgenden Zugprüfungen für alle Proben verwendet. Die Dicke variierte hierbei jeweils in Abhängigkeit der verwendeten Materialien sowie der Anzahl der Lagen von Fasern und Folien.



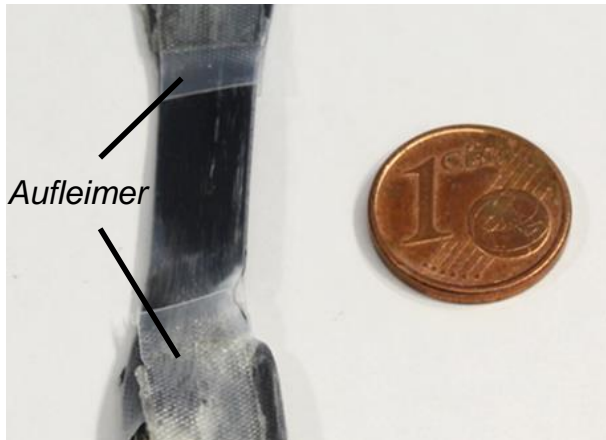
**Abbildung 4.10:** CFK-Probe nach der Ultraschallfertigung sowie für den Zugversuch zugeschnittener CFK-Probenkörper.

#### Probenvorbehandlung

Die von der Zugprüfmaschine während der Zugprüfung aufgebrachten Zugkräfte werden über Schubspannungen in die Probenkörper eingeleitet. Um die Proben daher in ihren Einspannstellen vor Beschädigungen zu schützen und die Konzentration von Schubspannungen zu verringern, wird in den Normen die Verwendung von Aufleimern empfohlen. Um Messfehler zu vermeiden, sollten diese in etwa den gleichen Elastizitätsmodul haben wie der Probenkörper und jeweils zur nicht eingespannten Probenstrecke hin abgewinkelt sein, siehe Abbildung 4.9.

Entsprechend dem Matrixmaterial der CFK-Proben wurden 200 µm dicke PP-Folien als Aufleimer verwendet und untersucht. Zunächst wurden sie mithilfe von Ultraschall in einem nachgelagerten Prozessschritt auf die gefertigten CFK-Proben verschweißt, doch wurden diese hierbei infolge des erneuten Aufschmelzens an ihren Rändern beschädigt. Daher wurden im Folgenden die Aufleimer mithilfe von doppelseitigem Klebeband auf die Proben geklebt. Anschließend wurden die präparierten Proben in einer Zugprüfung untersucht. Es zeigte sich, dass während vergleichbare CFK-Proben bei einer Zugkraft von ca. 1.000 N brachen, die Proben mit Aufleimern bereits bei ca. 600 N versagten. Zudem stieg die Bruchdehnung infolge der Verwendung von Aufleimern von unter 5 % auf über 15 % an. Beide Ergebnisse führten somit zu dem

Schluss, dass die Verbindung zwischen Aufleimer und Probenkörper eine Schwachstelle darstellte, siehe Abbildung 4.11. Während des Zugversuches kam es zu einem Durchrutschen der Probe, was durch einen deutlichen Anstieg der Bruchdehnung



**Abbildung 4.11:** Mit Aufleimern versehene CFK-Probe für den Zugversuch [7].

bei gleichzeitigem Abfallen der maximalen Zugkraft führte. Da auch eine Steigerung des Einspanndrehmoments in den Spannbacken der Zugprüfmaschine auf Maximalwerte von bis zu 30 N m zu keiner Änderung führte, wurde gefolgert, dass die Verwendung von Aufleimern bei der Bestimmung der Zugfestigkeit zu Messfehlern führte und somit für die ultraschallgefertigten CFK-Proben nicht sinnvoll war. Im Weiteren wurden daher keine Aufleimer verwendet.

#### Prüfparameter der Zugprüfung

Für die korrekte Bestimmung der mechanischen Eigenschaften von FVK ist eine exakte Positionierung der Prüfkörper in einer Prüfmaschine notwendig [1]. Damit zur Zugbelastung nicht zusätzliche Torsionsmomente entstehen und somit das Messergebnis verfälschen, sollten die Fasern möglichst exakt in Belastungsrichtung ausgerichtet werden [1]. Zudem sollten sowohl die Prüfgeschwindigkeit, mit der die Proben gestreckt werden, sowie das Einspanndrehmoment, mit dem die Proben zwischen den Spannbacken gespannt werden, für alle Messreihen unverändert bleiben.

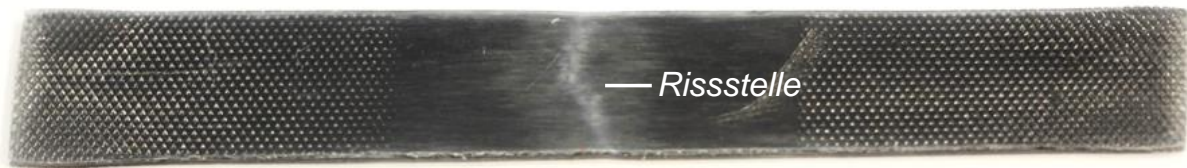
In Anlehnung an die DIN 65469 wurde in den durchgeführten Untersuchungen die Prüfgeschwindigkeit auf 1 mm / min festgelegt. Das Drehmoment bei der Einspannung der Proben betrug 14 N m und wurde mithilfe eines Drehmomentschlüssels eingestellt. Bei diesem Wert konnte ein Herausrutschen der Probe verhindert werden, ohne diese jedoch infolge zu hoher Einspannkräfte zu beschädigen. Bei der anschließenden Durchführung der Zugversuche wurden zwei typische Rissverläufe festgestellt, die in Abbildung 4.12 dargestellt werden.

Demnach befand sich die Rissstelle entweder in der Mitte des nicht eingespannten Bereiches oder aber versetzt am Rand der Einspannung. Eine Untersuchung der Proben zeigte hierbei, dass ein nicht mittiger Riss dann auftrat, wenn die Probe mit ungleichen Längen in den Spannbacken der Zugprüfmaschine befestigt wurde. In diesem Fall befand sich die Rissstelle an der kürzer eingespannten Seite.

Eine Erklärung für dieses Ergebnis war, dass bei einer ungleichmäßigen Einspannung der Probe, die über die Spannbacken der Zugprüfmaschine aufgebrauchte Kraft auf eine kleinere Probenfläche wirkte. Dadurch bildete sich gegenüber der gleichmäßigen Einspannung ein höherer Druck auf die CFK-Probe und beschädigte die Fasern an der Einspannung. Während der Zugprüfung versagte die Probe anschließend an der Stelle der Vorbeschädigung. Um Messfehler zu vermeiden, wurde somit

gefolgt, dass die Probe mit jeweils der gleichen Länge in beide Spannbacken eingespannt werden musste.

*gleichmäßige Einspannung*

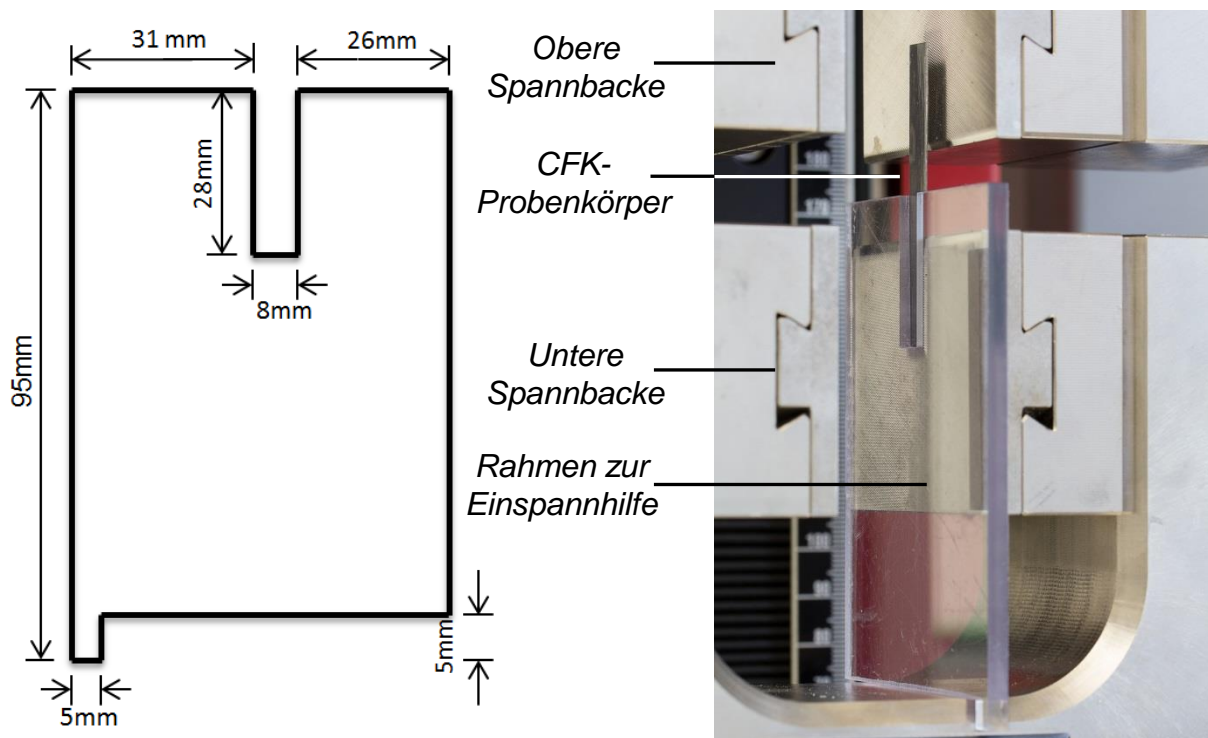


*ungleichmäßige Einspannung*



**Abbildung 4.12:** CFK-Proben nach dem Zugversuch mit Darstellung der Rissstelle bei gleichmäßiger (oben) und ungleichmäßiger Einspannung (unten) [7].

Da eine präzise Positionierung der Probe in der Zugprüfmaschine für die Reproduzierbarkeit des Ergebnisses einerseits sehr wichtig, andererseits aber aufgrund der relativ kleinen Probenabmessungen von 55 mm x 8 mm sehr aufwendig war, wurde im Weiteren ein Rahmen zur Einspannhilfe konstruiert, siehe Abbildung 4.13.



**Abbildung 4.13:** Links: Konstruktionszeichnung des Rahmens zur Einspannhilfe. Rechts: Aus PMMA gefräster Rahmen mit CFK-Probe zwischen den Spannbacken einer Zugprüfmaschine [Nach 7].

Die Abmessungen des Rahmens waren an die Maße der Spannbacken der verwendeten Zugprüfmaschine angepasst. Am Kopf verfügte der Rahmen über eine mittige Nut, die exakt die Breite der für den Zugversuch zugeschnittenen CFK-Probe von

8 mm hatte. Die Tiefe der Nut war dabei so gewählt, dass die 55 mm lange Probe darin eingetaucht und anschließend mit jeweils gleicher Länge in beide Spannbacken eingespannt werden konnte. Während der Zugprüfung betrug die freie Probenlänge 15 mm. Am Fuß des Rahmens befand sich ein 5 mm breiter Steg, der als Anschlag diente und es ermöglichte, die Probe horizontal genau in der Mitte der Spannbacken zu positionieren. So wurden die zuvor erwähnten ungleichmäßigen Rissverläufe vermieden. Der rechte Teil der Abbildung 4.13 zeigt eine CFK-Probe, die mithilfe des Spannrahmens angeschlagen und in der Zugprüfmaschine positioniert wurde.

Durch die Verwendung des Rahmens wurde der Einspannvorgang der Proben deutlich verkürzt und betrug nur wenige Sekunden. Zudem entfiel die aufwendige und zeitintensive händische Ausrichtung und Positionierung der Probe mit Rücksicht auf die Faser- und Belastungsrichtung. Der Rahmen trug somit dazu bei, den Einspannvorgang zu vereinfachen und die Reproduzierbarkeit der Zugprüfung zu steigern.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die in diesem Abschnitt beschriebenen Maßnahmen die reproduzierbare Fertigung der CFK-Proben begünstigten und eine quantitative Vergleichbarkeit ihrer mechanischen Kennwerte ermöglichten. Da die weitere Entwicklung der Ultraschallfertigung von CFK unter Einhaltung dieser Standards erfolgte, wird in den folgenden Abschnitten die Beschreibung des Vorgehens zur Herstellung der Proben oder Durchführung der Zugversuche nur auf eventuelle Abweichungen zum beschriebenen Standardvorgehen beschränkt.

### 4.1.3 Berechnung des Faserfüllgrades

Der Faserfüllgrad gibt den volumen- oder massenbezogenen Anteil des Fasermaterials in einem CFK an und kann grundsätzlich mithilfe der Formeln (2.4) und (2.5) berechnet werden. Um den Faserfüllgrad anhand experimentell messbarer Größen bestimmen zu können, wurde in der vorliegenden Arbeit die Formel (4.6) genutzt, deren Herleitung mithilfe der Formeln (4.1 - 4.5) dokumentiert wird. Der Index f steht hierbei für Faser, m für Matrix, i für eine unbestimmte Variable sowie CFK für den hergestellten Faserverbundwerkstoff.

$$\text{Massenerhaltung: } m_{CFK} = m_f + m_m \quad (4.1)$$

$$\text{Dichte: } \rho_i = \frac{m_i}{V_i} \quad (4.2)$$

$$\text{Volumenanteil [Vol. -\%]: } \varphi_i = \frac{V_i}{V_{CFK}} \quad (4.3)$$

$$(4.2) \text{ und } (4.3) \text{ in } (4.1): \rho_{CFK} = \rho_f \varphi_f + \rho_m \varphi_m \quad (4.4)$$

$$\text{Mit: } 1 = \varphi_f + \varphi_m \quad (4.5)$$

$$(4.5) \text{ in } (4.4): \varphi_f = \frac{\rho_{CFK} - \rho_m}{\rho_f - \rho_m} \quad (4.6)$$

Um die Formel (4.6) anwenden zu können, mussten für jede Probe zunächst die geometrischen Abmessungen bestimmt und daraus ihr Volumen berechnet werden. Zusätzlich wurde das Gewicht der Probe erfasst, sodass anschließend mittels (4.2) die Dichte der Probe berechnet werden konnte. Mit den in den Datenblättern angegebenen Dichten für das Faser- und Matrixmaterial konnten die Werte abschließend in (4.6) eingesetzt und somit der volumenbezogene Faserfüllgrad der ultraschallgefertigten CFK-Proben berechnet werden.

### **4.2 Weiterentwicklung des Herstellungsprozesses**

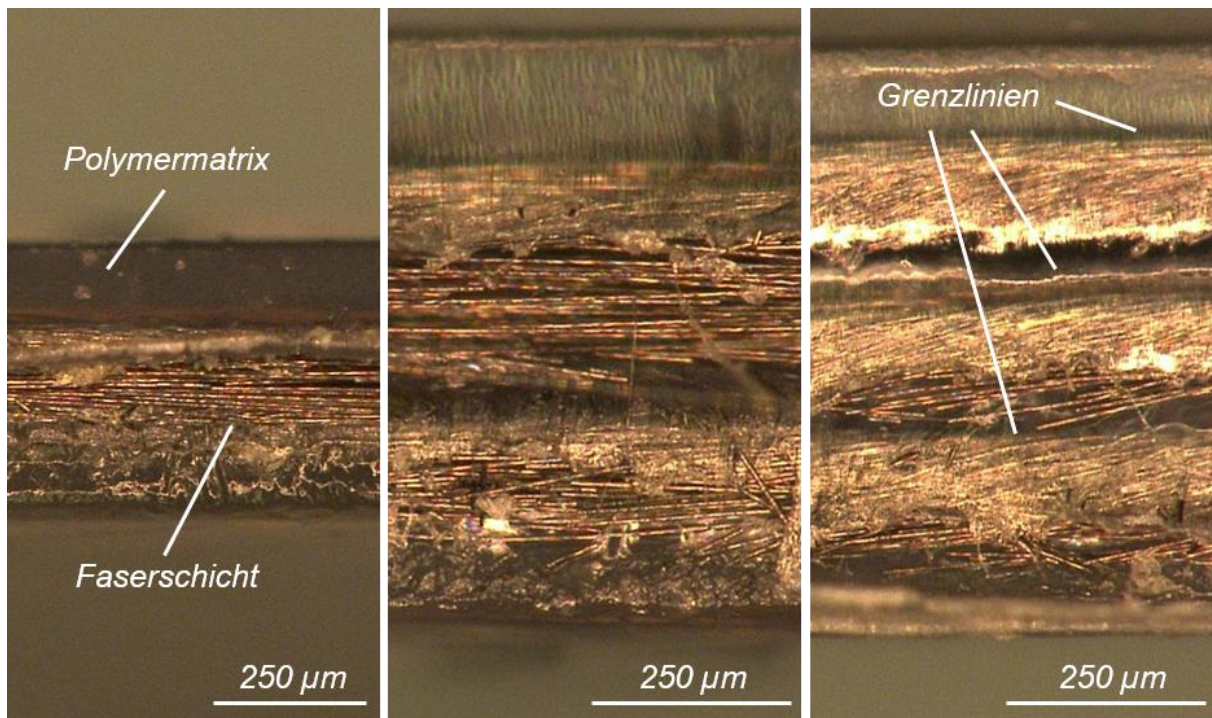
In einleitenden Voruntersuchungen wird im Abschnitt 3.2.2 die Ultraschallfertigung von mehrlagigen CFK-Proben thematisiert. Hierbei wurde festgestellt, dass die Zugfestigkeit bei steigender Anzahl der Folien- und Faserschichten abnahm, vgl. Abbildung 3.6. Im Zugversuch wurden jeweils 20 Proben untersucht und eine mittlere Zugfestigkeit von ca. 238 MPa sowie eine Bruchdehnung von etwa 18 % gemessen [5]. Eine erste Untersuchung der möglichen Ursachen ergab, dass eine unzureichende Randschichthaftung, also die Haftung zwischen der äußeren Matrixschicht sowie der darunterliegenden Faserschicht, zu einem frühzeitigen Versagen der Probe im Zugversuch führen konnte, vgl. Abbildung 3.7. Daher war es das Ziel der weiteren Untersuchungen, die Ursache für die geringe Randschichthaftung zu identifizieren sowie anschließend Maßnahmen abzuleiten, mit denen der Herstellungsprozess optimiert und somit die Zugfestigkeit der ultraschallgefertigten CFK gesteigert werden konnte. Dieser Abschnitt beschreibt die durchgeführten Schritte und stellt anhand von Zugversuchen ermittelte Festigkeiten von CFK-Proben des optimierten Herstellungsprozesses vor. Die Untersuchungen wurden in [5,7,57] durchgeführt und ausgewertet.

#### **4.2.1 Identifikation der Versagensursache**

Zur weiterführenden Identifikation möglicher Ursachen für das frühe Versagen der Proben im Zugversuch wurden Schnitte durch Proben mit einer, zwei und drei Lagen Fasern erstellt und mithilfe eines Mikroskops untersucht, siehe Abbildung 4.14. Als Matrixmaterial wurden 200 µm dicke PP-Folien verwendet [5]. Die Gesamtdicke der ein-, zwei- und dreilagigen Proben betrug 460 µm, 760 µm sowie 980 µm [5].

Anhand des dargestellten Probenquerschnittes in Abbildung 4.14 war zunächst der inhomogene Aufbau der CFK-Proben zu erkennen. So konnten einzelne Faser- und Matrixschichten unterschieden und voneinander abgegrenzt werden. Dies wurde insbesondere anhand der dreilagigen Probe im rechten Teil der Abbildung 4.14 deutlich, in welcher zusätzlich sogenannte Grenzlinien eingezeichnet waren, die sich zwischen den Faser- zu Matrixschichten bildeten. Diese Grenzlinien waren dunkle, in Faserlängsrichtung verlaufende Bereiche und konnten optisch von der trübhellen Matrix unterschieden werden. Eine mögliche Erklärung der Grenzlinien bestand darin, dass im Übergangsbereich zwischen den Faser- und Matrixlagen einzelne Fasern aus der äußeren Randschicht des Faserstranges in die benachbarte Matrix eingebettet wurden und somit als dunkle Linie in der hellen Matrix erschienen. Je großflächiger und dunkler die Grenzlinien waren, desto höher war der Anteil der Fasern einer Faserschicht, die in die Matrix eingebettet wurden. Die Ausprägung der Grenzlinien hin-

sichtlich Größe und Farbe nahm in der CFK-Probe von innen nach außen ab. Dies deutete darauf hin, dass im Inneren der Probe mehr Matrixmaterial aufgeschmolzen und mehr Fasern in die Matrix eingebettet wurden, vgl. Abbildung 4.14 rechts.



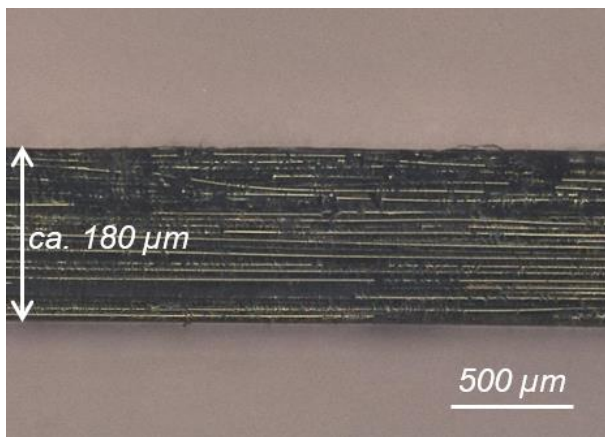
**Abbildung 4.14:** Mikroskopaufnahmen von Schnitten in Faserlängsrichtung durch CFK-Proben, bestehend aus einer (links), zwei (Mitte) oder drei (rechts) Lagen Kohlenstofffasern sowie als Matrix dienenden PP-Folien mit einer Dicke von jeweils 200 µm. Der obere Bereich zeigt die der Sonotrode zugewandte Probenseite [5].

Neben dem inhomogenen Aufbau der CFK-Probe zeigte die Schnittdarstellung zudem, dass die Randschichten, also die während der Ultraschallfertigung der Sonotrode oder dem Amboss zugewandten Matrixschichten, nur im jeweils inneren Randbereich mit Kohlenstofffasern gefüllt waren. So hatte beispielsweise bei der dreilagigen Probe, vgl. rechter Teil der Abbildung 4.14, die der Sonotrode zugewandte ungefüllte Matrixschicht am oberen Probenrand eine Dicke von ca. 150 µm und die dem Amboss zugewandte Seite am unteren Probenrand eine Dicke von ca. 90 µm. Somit wurde die angrenzende Faserschicht jeweils nur 50 µm bzw. 110 µm tief in die Matrix eingebettet.

Dies ist eine mögliche Erklärung für das frühe Versagen der Probe im Zugversuch sowie dem Lösen der Randschicht: Da insbesondere die äußeren Faserschichten unvollständig in die benachbarten Matrixschichten eingebettet wurden, bildete sich ein inhomogener CFK, bestehend aus Bereichen mit teilweise ungefülltem Matrixmaterial sowie trockenen und nicht mit der Matrix benetzten Fasern. Dadurch entstand vor allem in den Randschichten der CFK-Proben nur eine geringe Verbundhaftung. Die im Zugversuch über die äußeren Matrixschichten in das CFK eingeleiteten Zugkräfte führten zu einer Scherspannung in der Probe und bewirkten ein Ablösen der Randschicht. Somit kam es zu einem Durchrutschen der in den Spannbacken der Zugprüfmaschine eingespannten Probe. Dies wurde durch eine gemessene Bruch-

dehnung von über 18 % belegt [5], die deutlich höher war als die Bruchdehnung konventioneller CFK von weniger als 5 %.

Aufgrund der unterschiedlichen Dicken der äußeren Matrixschichten sowie der unterschiedlich tiefen Einbettung der Fasern wurde gefolgert, dass es während der Ultraschallfertigung von CFK zu einer unterschiedlichen Erwärmung der äußeren Matrixschichten kam. Dies wurde zusätzlich in [5] und [7] beobachtet. Eine mögliche Erklärung hierfür war, dass bei den innenliegenden Schichten während der Ultraschallverschweißung aufgrund einer höheren Grenzflächenreibung mehr Wärme generiert und somit mehr Schmelze erzeugt werden konnte [5,7].



**Abbildung 4.15:** Schnitt in Faserlängsrichtung durch ein CFK-Tape [60].

Zur besseren Einordnung und Bewertung der Schnittdarstellungen der ultraschallgefertigten CFK-Proben stellt Abbildung 4.15 einen Schnitt in Faserlängsrichtung durch ein CFK-Tape mit unidirektionaler Faserausrichtung aus konventioneller Fertigung dar [60]. Zu erkennen ist der homogene Aufbau des CFK, sodass die Faser- und Matrixschichten nicht abgegrenzt oder voneinander unterschieden werden können. Die Fasern sind zudem überall vollständig in die Matrix eingebettet.

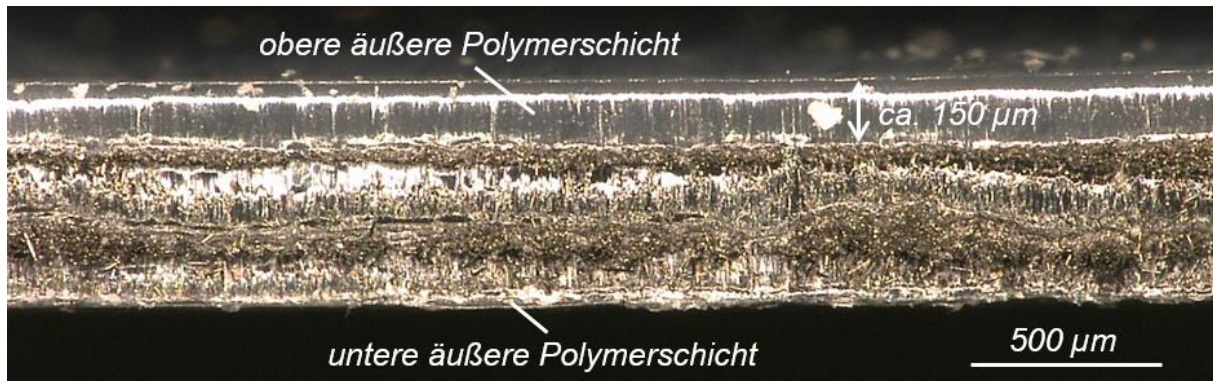
Um eine vollständige und gleichmäßige Einbettung der Fasern in das Matrixmaterial zu erreichen, wurden in weiterführenden Untersuchungen Optimierungen am Ultraschallfertigungsprozess durchgeführt. Dadurch sollte die Randschichthaftung erhöht sowie eine Homogenisierung des Probenquerschnittes erzielt werden.

### 4.2.2 Steigerung der Randschichthaftung

Die äußeren Matrixschichten stellten aufgrund von geringer Haftung eine Ursache für das Versagen der CFK-Proben im Zugversuch dar. Daher wurden Möglichkeiten erarbeitet, in diesen Schichten während des Fertigungsprozesses mehr Matrixschmelze zu generieren und die Fasern tiefer in die schmelzflüssige Matrix einzubetten.

Im Abschnitt 4.2.1 wurde am Beispiel einer CFK-Probe, die aus drei Lagen Fasern und vier Lagen PP-Folien mit einer Dicke von jeweils 200 µm hergestellt wurde, bereits beschrieben, dass die äußeren Matrixschichten unterschiedlich stark aufgeschmolzen und die Fasern unterschiedlich tief in die Matrix eingebettet wurden. Daher wurde zunächst untersucht, ob eine beidseitige Verschweißung der Probe zu einer gleichmäßigen und tieferen Einbettung der Fasern führte. Hierfür wurden ebenfalls drei Lagen Kohlenstofffasern und vier Lagen jeweils 200 µm dicker PP-Folien auf dem Amboss einer Ultraschallschweißmaschine positioniert und mit den in der Tabelle A.8 des Anhanges zusammengefassten Prozessparametern verschweißt. Nach der ersten Ultraschallverschweißung wurde die CFK-Probe gewendet und erneut mit den gleichen Prozessparametern verschweißt.

Die nachfolgende Abbildung 4.16 zeigt einen Schnitt orthogonal zur Faserlängsrichtung durch die Probe. Die obere Seite war bei der ersten Verschweißung der Sonotrode und die untere Seite dem Amboss zugewandt. Eine Messung der ungefüllten äußeren Matrixschicht ergab eine Dicke von ca. 150  $\mu\text{m}$ . Somit wurden die Fasern ähnlich wie bei der zuvor mit einmaliger Verschweißung gefertigten Probe ca. 50  $\mu\text{m}$  tief in die Matrixschicht eingebettet, vgl. Abbildung 4.16.



**Abbildung 4.16:** Mikroskopaufnahme eines Schnittes orthogonal zur Faserlängsrichtung einer ultraschallgefertigten CFK-Probe bestehend aus drei Lagen Kohlenstofffasern sowie vier Lagen PP-Folien mit einer Dicke von jeweils 200  $\mu\text{m}$ . Die Probe wurde durch Wenden und erneutes Schweißen hergestellt [7].

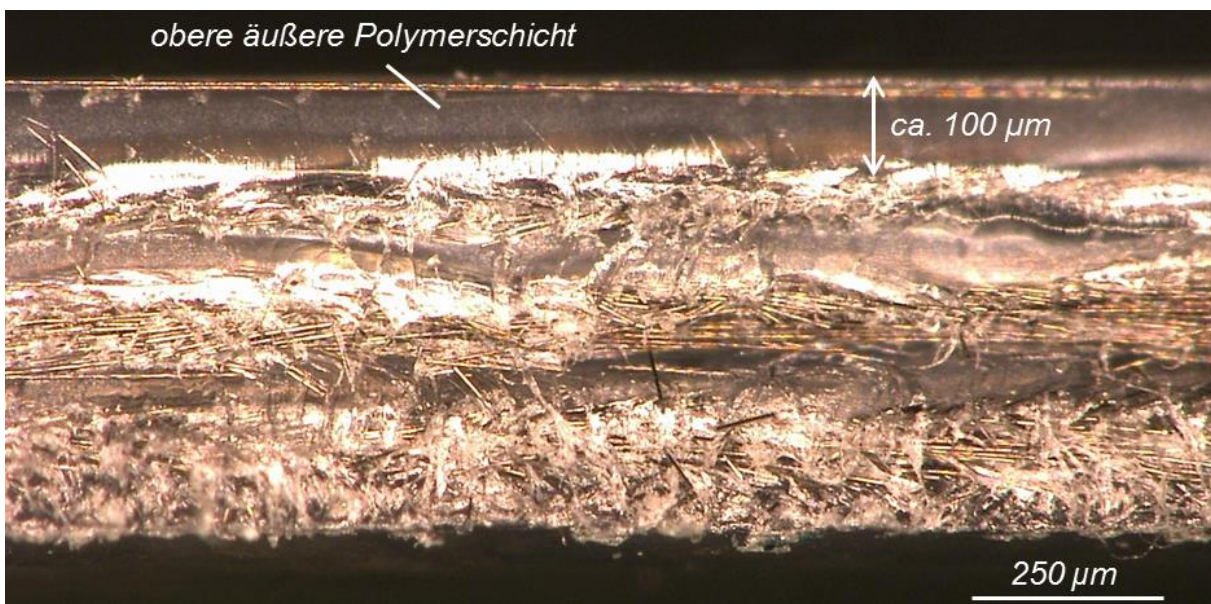
Zusätzlich zur optischen Untersuchung des Probenquerschnittes wurden Zugversuche durchgeführt. Auch hierbei lösten sich jedoch die Randschichten und die Probe versagte frühzeitig [7]. Es konnte somit gefolgert werden, dass eine mehrmalige Verschweißung der CFK-Proben nicht zu einer Steigerung der Randschichthaftung führte. Eine mögliche Erklärung hierfür war, dass nach der erstmaligen Verschweißung der einzelnen Faser- und Matrixschichten sich ein fester Verbundwerkstoff bildete. Bei der zweiten Verschweißung trat somit keine Grenzflächenreibung zwischen den einzelnen Faser- und Matrixschichten auf, wodurch nicht genug Wärme erzeugt werden konnte um die äußeren Matrixschichten erneut aufzuschmelzen. Im Weiteren wurde daher von der mehrmaligen Verschweißung abgesehen.

In einem weiteren Ansatz wurden für die Ultraschallfertigung der CFK-Proben als äußere Matrixschichten zwei jeweils 150  $\mu\text{m}$  dicke PP-Folien verwendet, während die inneren PP-Folien jeweils 200  $\mu\text{m}$  dick waren [7]. Durch die Verwendung von dünneren Folien sollte der Anteil der ungefüllten Matrix in der Randschicht reduziert und mögliche Auswirkungen auf die Randschichthaftung sowie die Zugfestigkeit untersucht werden.

Für die Herstellung der CFK-Proben wurden die Folien- und Faserschichten auf dem Amboss befestigt und mittels Ultraschall mit den in der Tabelle A.8 des Anhangs zusammengefassten Parametern verschweißt. Nach der Verschweißung wurden Schnitte durch die CFK-Proben erstellt und untersucht. Abbildung 4.17 stellt eine Mikroskopaufnahme eines Schnittes längs zur Faserrichtung der gefertigten Probe dar. Die Gesamtdicke der Probe betrug ca. 610  $\mu\text{m}$ . Die Dicke der ungefüllten Matrixschicht am oberen Probenrand betrug ca. 100  $\mu\text{m}$ , woraus sich ergab, dass die Fasern erneut ca. 50  $\mu\text{m}$  tief in die Matrix eingebettet wurden. Bei der anschließenden

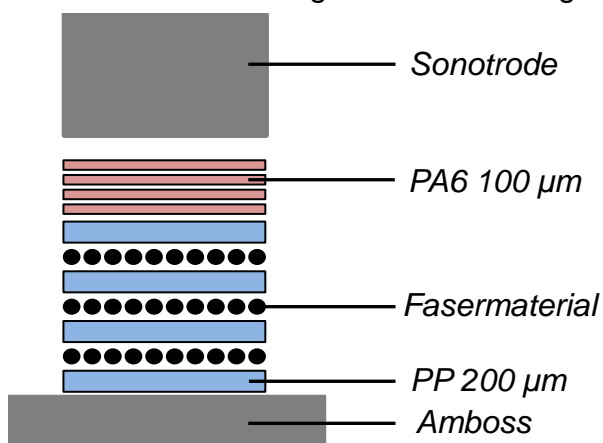
Durchführung der Zugversuche wurde zudem erneut beobachtet, dass sich die äußeren Matrixschichten der CFK-Proben lösten [7]. Eine Zunahme der Randschichthftung oder der Zugkraft konnte nicht festgestellt werden.

Es wurde daher gefolgert, dass die Verwendung von dünneren äußeren Matrixschichten nicht zu einer Erhöhung der Zugkraft führte. Allerdings zeigte die Untersuchung, dass durch eine geeignete Wahl der Dicke der äußeren Folien der Anteil der ungefüllten äußeren Matrixschicht reduziert werden konnte. Hierdurch stieg die Homogenität des CFK. Zusätzlich verringerte sich die Querschnittsfläche der Probe, wodurch bei gleichbleibender maximaler Zugkraft die Zugfestigkeit des CFK gesteigert werden konnte.



**Abbildung 4.17:** Mikroskopaufnahme eines Schnittes in Faserlängsrichtung durch eine ultraschallgefertigte CFK-Probe. Die zwei äußeren PP-Folien hatten eine Dicke von jeweils  $150\ \mu\text{m}$  und die zwei inneren Folien eine Dicke von jeweils  $200\ \mu\text{m}$ . Es wurden drei Lagen Kohlenstofffasern verwendet. Die obere Probenseite war während der Fertigung der Sonotrode zugewandt [7].

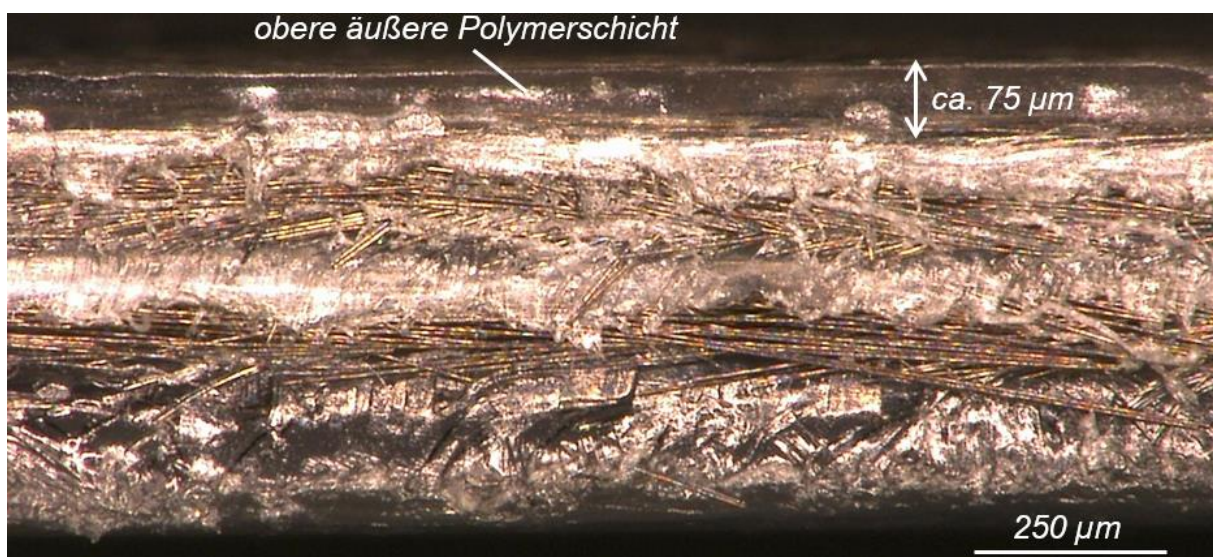
Sowohl die mehrmalige Verschweißung als auch die Verwendung von dünneren Folien führten nicht zu einer tieferen Einbettung der Fasern in die Matrix oder einer Erhöhung der Randschichthftung. Daher wurde in einer weiterführenden Versuchsreihe die Möglichkeit untersucht, die Grenzflächenreibung in den äußeren Matrixschichten zu erhöhen. Hierfür wurde zunächst anhand einer Übersichtsmatrix in Abbildung A.8 des Anhangs ein Polymer ausgewählt, welches sich nicht mit dem Matrixmaterial der CFK-Proben verschweißen ließ.



**Abbildung 4.18:** Anordnung bei der Herstellung der CFK-Probe.

Aufgrund der Verfügbarkeit in verschie-

denen Dicken wurde hierfür PA6 gewählt. Anschließend wurden auf die zuvor beschriebene Anordnung, wie in Abbildung 4.18 dargestellt, oberhalb der äußeren Matrixschicht zusätzlich vier PA6-Folien mit einer Dicke von jeweils 100  $\mu\text{m}$  positioniert. Bei der nachfolgenden Durchführung der Ultraschallverschweißung mit den in Tabelle A.8 zusammengefassten Prozessparametern erzeugten die PA6-Folien eine zusätzliche Grenzflächenreibung an der oberen äußeren, also der Sonotrode zugewandten, PP-Folie. Dadurch wurde in der oberen Randschicht der CFK-Probe mehr Schmelze erzeugt und die Fasern konnten tiefer eingebettet werden. Da es des Weiteren nicht zu einer Verbindung von PP mit PA6 kam, konnten die PA6-Folien nach der Ultraschallverschweißung entfernt werden [7]. Abbildung 4.19 zeigt eine Mikroskopaufnahme eines in Faserlängsrichtung verlaufenden Schnittes durch die hergestellte CFK-Probe.



**Abbildung 4.19:** Mikroskopaufnahme eines Schnittes in Faserlängsrichtung durch eine CFK-Probe bestehend aus drei Faser- und vier jeweils 200  $\mu\text{m}$  dicken PP-Folienlagen. Zur Erhöhung der Grenzflächenreibung wurden oberhalb der äußeren Matrixschicht zusätzliche PA6-Folien positioniert [7].

Die hergestellte CFK-Probe hatte eine Gesamtdicke von ca. 590  $\mu\text{m}$ . Die obere äußere Matrixschicht hatte hierbei einen ungefüllten Bereich mit einer Dicke von ca. 75  $\mu\text{m}$ . Infolge der Verwendung von PA6-Folien sowie zusätzlicher Grenzflächenreibung konnten die Fasern etwa 125  $\mu\text{m}$  tief in die Matrix eingeschweißt werden. Gleichzeitig nahm jedoch die Dicke der ungefüllten äußeren Matrixschicht am unteren Probenrand, also der dem Amboss zugewandten Seite, von ca. 90  $\mu\text{m}$ , vgl. Abbildung 4.14 auf etwa 150  $\mu\text{m}$  zu, vgl. Abbildung 4.19.

Daraus wurde gefolgert, dass durch die Verwendung von zusätzlichen PA6-Folien die gesamte für die Verschweißung zur Verfügung stehende Energie, die in Form von Ultraschallschwingungen in die Folien- und Faserschichten eingebracht wurde, nicht gesteigert, sondern lediglich gelenkt und umverteilt wurde. So wurde durch die PA6-Folien mehr Grenzflächenreibung und damit mehr Wärmeenergie am oberen Probenrand erzeugt, da jedoch die von der Maschine eingebrachte Energiemenge infolge unveränderter Prozessparameter konstant blieb, verringerte sich die am unteren Pro-

benrand zur Verfügung stehende Energie, sodass in diesem Bereich weniger Matrixschmelze erzeugt wurde. Darüber hinaus zeigten die Untersuchungen, dass die Tiefe, bis zu welcher die Fasern in die obere äußere Matrixschicht eingebettet wurden, mit der Anzahl der zusätzlich verwendeten PA6-Folien zunahm und bei vier Folien das in Abbildung 4.19 gezeigte Maximum erreichte [7].

Im Anschluss an die optische Untersuchung des Probenquerschnittes wurden zur Bestimmung der mechanischen Eigenschaften Zugversuche durchgeführt. Hierbei zeigte sich, dass sowohl die Randschichthaftung erhöht als auch die Zugfestigkeit der hergestellten CFK-Proben von ca. 238 MPa auf etwa 308 MPa gesteigert worden war [5,7]. Allerdings rechtfertigte die erzielte Steigerung nicht den höheren Materialeinsatz sowie den längeren zeitlichen Aufwand zur Vorbereitung der Verschweißung. Daher wurde im Weiteren von der Verwendung von zusätzlichen Polymerfolien zur Erhöhung der Grenzflächenreibung abgesehen.

Abschließend lässt sich zusammenfassen, dass durch die in diesem Abschnitt vorgestellten Möglichkeiten die Randschichthaftung nicht erhöht werden konnte. Durch die Verwendung von dünneren Folien als äußere Matrixschicht wurde allerdings bei etwa gleichbleibender Zugkraft die Zugfestigkeit gesteigert, indem der Anteil der ungefüllten äußeren Matrix reduziert wurde. Im Vergleich zu unidirektionalen CFK aus konventioneller Fertigung, siehe Abbildung 4.15, fällt der inhomogene Aufbau des Probenquerschnittes der ultraschallgefertigten CFK deutlich auf. Die Inhomogenität des CFK konnte eine weitere mögliche Ursache für die geringe Verbundhaftung sein und somit zum frühen Versagen der Probe im Zugversuch beitragen. Aus diesem Grund erfolgte in weiteren Untersuchungen die Homogenisierung des Probenquerschnittes, also die gleichmäßige Verteilung von Fasern und Matrix im CFK.

### **4.2.3 Homogenisierung des Probenquerschnittes**

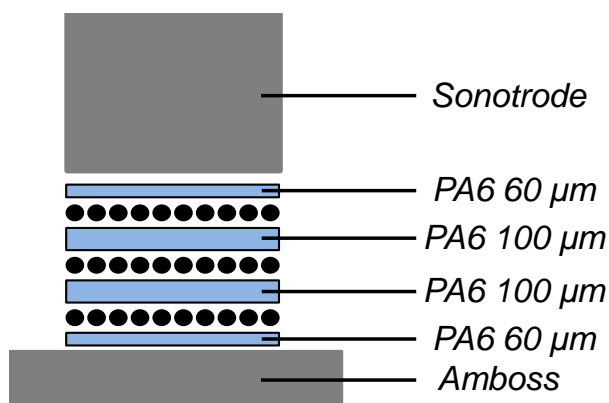
Um eine gleichmäßige und vollständige Einbettung aller Faserschichten in der Matrix zu erreichen und damit sowohl die Verbundhaftung als auch die Zugfestigkeit der CFK-Proben zu steigern, wurden in weiterführenden Untersuchungen Erkenntnisse aus dem vorherigen Abschnitt 4.2.2 angewendet und weiterentwickelt.

Zum einen zeigte die Schnittdarstellung in Abbildung 4.14, dass die Faserschichten nicht vollständig in die verwendeten 200 µm dicken PP-Folien eingeschweißt werden konnten. Selbst im Inneren der Probe, wo aufgrund der Grenzflächenreibung mehr Matrixmaterial aufgeschmolzen wurde als in den äußeren Schichten, bildeten sich Bereiche mit ungefüllter Matrix. Daraus folgte, dass insgesamt mehr Matrixmaterial zur Verfügung stand, als für die Einbettung der Fasern benötigt wurde. Daher sollten in weiteren Untersuchungen dünnere Polymerfolien verwendet werden. PP-Folien standen allerdings nur in den Dicken 150 µm sowie 200 µm zur Auswahl. Aufgrund der höheren Verfügbarkeit sowie einer breiteren Auswahl an Materialdicken, wurden für weitere Untersuchungen PA6-Folien verwendet, die in den Dicken 40, 60, 80, 100, 150 und 200 µm vorlagen.

Des Weiteren zeigten die bisherigen Untersuchungen, dass aufgrund ungefüllter Bereiche in der oberen und unteren äußeren Matrixschicht dünnere Folien verwendet

werden konnten, um die Dicke dieser ungefüllten Bereiche zu reduzieren. Somit konnte die Querschnittsfläche der Probe reduziert und die Zugfestigkeit gesteigert werden. Aus diesem Grund wurden für die in diesem Abschnitt durchgeführten Untersuchungen dünnere Folien als äußere Matrixschicht verwendet.

Darüber hinaus wurde für die weiteren Untersuchungen die HiQ DIALOG 6200 Ultraschallschweißmaschine verwendet. Diese hat gegenüber der zuvor verwendeten Ultraschallschweißmaschine eine höhere Leistung, wodurch während des Schweißprozesses mehr Energie abgegeben und somit mehr Matrixmaterial aufgeschmolzen werden kann. Zudem erlaubt die HiQ DIALOG 6200 Ultraschallschweißmaschine bei der Wahl der Prozessparameter die Einstellung eines sogenannten Kraftanstieges. Bei einem Kraftanstieg wird ausgehend von einer anfänglichen Schweißkraft  $F_1$  während des Schweißprozesses nach einer definierten Zeit eine andere Schweißkraft  $F_2$  eingestellt. Ist  $F_2$  größer als  $F_1$  erscheint es somit möglich, die festen Polymerfolien zunächst mit einer geringen Kraft  $F_1$  aufzuschmelzen und anschließend mit einer höheren Kraft  $F_2$  im schmelzflüssigen Zustand tiefer in die Faserschichten hineinzudrücken. Somit war es denkbar, eine vollständige Einbettung der Fasern in die Matrix zu erreichen.



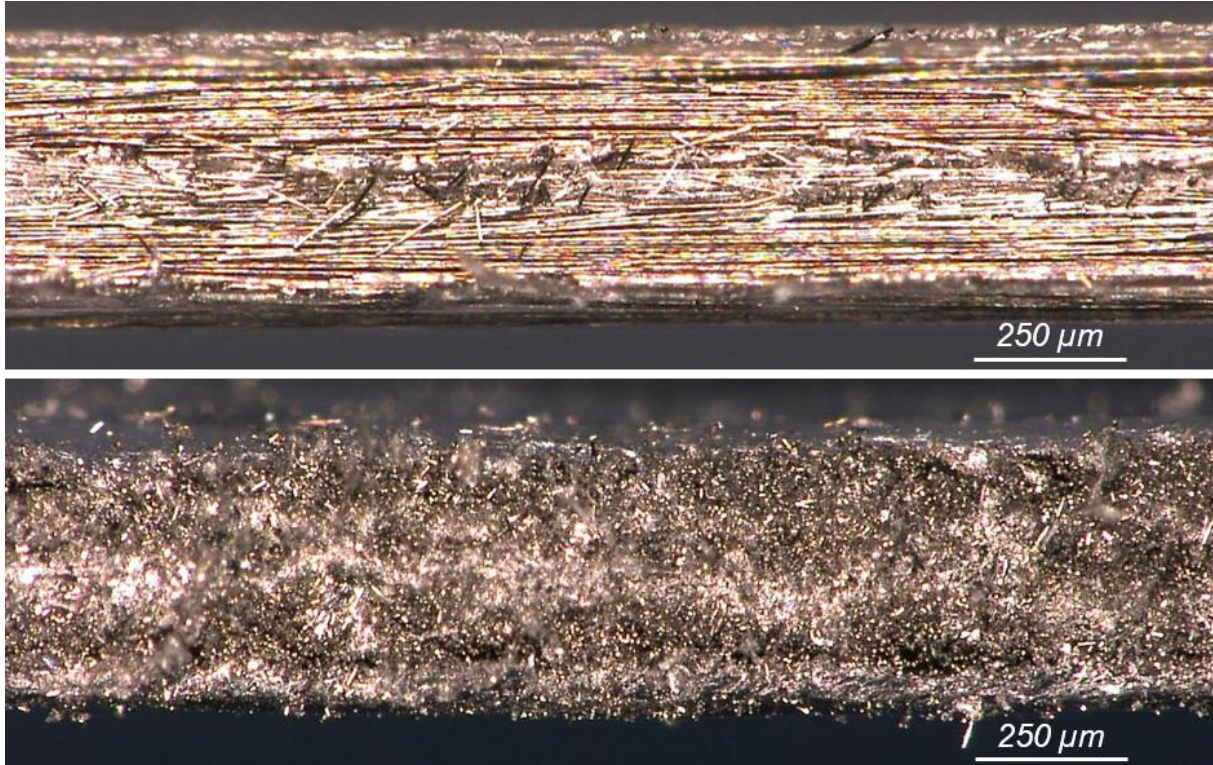
**Abbildung 4.20:** Anordnung und Dicken der Folien- und Faserschichten.

Abbildung 4.20 zeigt die in diesem Abschnitt verwendete Anordnung zur Ultraschallfertigung von dreilagigen CFK-Proben. Als Matrixmaterial diente PA6. Die inneren Folien hatten eine Dicke von jeweils 100  $\mu\text{m}$ , während die äußeren Folien jeweils 60  $\mu\text{m}$  dick waren. Die Anordnung aus Faser- und Folien-schichten wurde unterhalb der Sonotrode auf dem Amboss der Ultraschallschweißmaschine befestigt und mit den in der Tabelle A.9 des Anhangs zu-

sammengefassten Parametern verschweißt. Die anfängliche Schweißkraft  $F_1$  betrug 500 N. Nach 1,5 s war die Matrix aufgeschmolzen und es erfolgte der Kraftanstieg auf 1200 N. Mit dieser Schweißkraft  $F_2$  wurde weitere 5,5 s geschweißt. In dieser Phase wurde die schmelzflüssige Matrix in die Zwischenräume der jeweiligen Faserschichten gedrückt und bettete die Fasern somit ein. Überschüssiges Matrixmaterial wurde hierbei seitlich aus der Probe herausgedrückt. Abschließend kühlte die Probe während einer Dauer von 5 s und einer Kraft von ebenfalls 1200 N aus und erstarrte.

Nach der Herstellung der CFK-Proben wurden Mikroskopaufnahmen der Probenquerschnitte erstellt. Die nachfolgende Abbildung 4.21 stellt die Schnitte in Faserlängsrichtung sowie orthogonal zur Faserlängsrichtung dar. Die Gesamtdicke der dargestellten Probe betrug ca. 460  $\mu\text{m}$ . Anhand Abbildung 4.21 war zu erkennen, dass alle Faserlagen durchgehend in das Matrixmaterial eingebettet wurden. Weiterhin war zu erkennen, dass gegenüber den zuvor hergestellten CFK-Proben der Probenquerschnitt über einen deutlich homogenen Aufbau verfügte. So konnten ein-

zelne Faser- oder Matrixschichten nicht unterschieden und voneinander abgegrenzt werden. Grenzlinien am Übergang vom Faser- zum Matrixmaterial, wie zuvor in Abbildung 4.14 dargestellt, existierten nicht mehr. Des Weiteren waren aufgrund der Verwendung von 60  $\mu\text{m}$  dicken PA6-Folien keine ungefüllten Bereiche in den äußeren Matrixschichten zu erkennen.



**Abbildung 4.21:** Mikroskopaufnahmen eines Schnittes durch eine dreilagige CFK-Probe in (oben) und orthogonal zur (unten) Faserlängsrichtung. Als Matrixmaterial dienten zwei jeweils 60  $\mu\text{m}$  und zwei jeweils 100  $\mu\text{m}$  dicke PA6-Folien.

Nach der optischen Untersuchung des Probenquerschnittes erfolgte der Zuschnitt der Proben sowie die Durchführung der Zugversuche zur Bestimmung der mechanischen Eigenschaften. Hierbei wurden insgesamt fünf Proben untersucht. Bei allen untersuchten Proben setzte der Bruch in der Probenmitte ein. Des Weiteren löste sich in keinem Fall die Randschicht vom Innenteil der Probe. Im linken Teil der Abbildung 4.22 ist eine gebrochene Probe nach dem Zugversuch dargestellt.

Im rechten Teil der Abbildung 4.22 sind die Ergebnisse der Zugversuche für die Proben vor und nach der in diesem Abschnitt vorgestellten Weiterentwicklungen am Herstellungsprozess dargestellt. Während vorher die Zugfestigkeit  $238 \pm 16$  MPa, entsprechend einer relativen Standardabweichung von 7 % betrug [5], wurde diese infolge der Optimierungen am Herstellungsprozess auf  $752 \pm 110$  MPa, entsprechend einer relativen Standardabweichung von 14,6 %, gesteigert. Der Anstieg der relativen Standardabweichung konnte auf den geringen Probenumfang von insgesamt fünf Proben zurückgeführt werden, sodass ein Ausreißer im Probensatz zur deutlichen Erhöhung der Standardabweichung führte. Die Bruchdehnung der CFK-Proben betrug etwa 3 % und war somit deutlich geringer als vor den in diesem Abschnitt durch-

geführten Untersuchungen. Sie lag somit in der Größenordnung der Bruchdehnungen konventionell gefertigter CFK.



**Abbildung 4.22:** Links: Mittels Ultraschall hergestellte CFK-Probe nach dem Zugversuch. Rechts: Im Zugversuch gemessene mittlere Zugfestigkeiten sowie die zugehörigen Standardabweichungen vor und nach der Optimierung des Herstellungsprozesses. Es wurden 20 („vorher“) sowie 5 („nachher“) CFK-Proben untersucht.

Diese Zahlenwerte verdeutlichen, dass infolge der Optimierungen sowohl die Randschichthaftung gesteigert als auch die Zugfestigkeit erhöht wurden. Zu erwähnen ist, dass im Abschnitt 3.2.2 PP und in diesem Abschnitt PA6 als Matrixmaterial eingesetzt wurde. Da die Zugfestigkeit sowohl des verwendeten PP als auch des verwendeten PA6 in etwa 80 MPa betragen, siehe Datenblätter in Abbildung A.1 und Abbildung A.4 des Anhangs, konnte der Einfluss der Zugfestigkeit des Matrixmaterials auf die Zugfestigkeit des CFK vernachlässigt werden. Einen größeren Einfluss hatte demnach die vollständige Einbettung der Fasern. Eine weiterführende Untersuchung und Variation des Matrixmaterials während der Ultraschallfertigung von CFK wird im Abschnitt 4.4 durchgeführt. In diesem Zusammenhang werden erneut 200 µm dicke PP-Folien als Matrixmaterial eingesetzt, mit dem optimierten Verfahren zu CFK verarbeitet und mit anderen Matrixmaterialien verglichen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass durch die Verwendung von dünneren PA6-Folien sowie dem Einsatz eines Kraftanstieges während des Ultraschallfertigungsprozesses sowohl die Homogenität als auch die Zugfestigkeit der hergestellten CFK erhöht wurden. Die Bruchdehnung wurde zudem von über 18 % deutlich auf etwa 3 % gesenkt. Aus diesem Grund werden im Weiteren die in diesem Abschnitt vorgestellten Möglichkeiten für die Ultraschallfertigung der CFK-Proben genutzt.

### 4.3 Steigerung der Folien- und Faserlagenanzahl

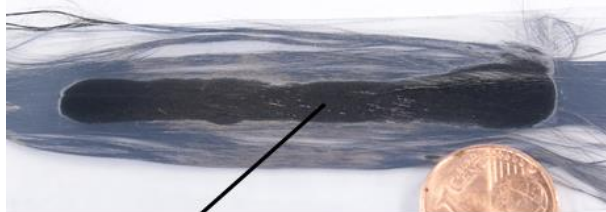
Die in dem Abschnitt 4.2 durchgeführte Weiterentwicklung der Ultraschallfertigung von CFK wurde in anschließenden Untersuchungen genutzt, um die Anzahl der Folien- und Faserlagen zu steigern und somit mehrlagige CFK herzustellen. Ziel der Untersuchungen war es herauszufinden, wieviel die maximale Anzahl der Faser- und Folienlagen der CFK betragen konnte, die mit der zur Verfügung stehenden Ultraschallschweißmaschine hergestellt wurden. Hierbei wurden zwei Möglichkeiten erforscht: Zum einen wurde untersucht, wie viele Lagen Fasern und Folien in nur einer

Schweißung zu CFK verarbeitet werden können. Zum anderen wurde aber auch untersucht, ob vorgefertigte, mehrlagige CFK verwendet werden können, um diese zu stapeln und anschließend zu CFK mit einer größeren Gesamtdicke zu verarbeiten. Zusätzlich wurden Mikroskopaufnahmen der Probenquerschnitte erstellt, anhand ausgewählter Proben der Faserfüllgrad der ultraschallgefertigten CFK berechnet sowie die mechanischen Eigenschaften mithilfe von Zugversuchen bestimmt. Die in diesem Abschnitt vorgestellten Arbeiten wurden in [57] durchgeführt und vorgestellt. Es ist zu ergänzen, dass das Ziel der Untersuchung die Maximierung der Lagenanzahl und nicht die Parameterstudie war. Es ist also weiterhin denkbar, dass vergleichbare CFK mit einem anderen Parametersatz ebenfalls hergestellt oder die mechanischen Eigenschaften der Proben gesteigert werden können.

Aufbauend auf den Ergebnissen aus Abschnitt 4.2 wurde für die folgenden Untersuchungen die leistungsfähigere HiQ DIALOG 6200 Ultraschallschweißmaschine verwendet. Während des Herstellungsprozesses wurde ein Kraftanstieg genutzt, da er dazu beitragen konnte, eine homogene Verteilung des Faser- und Matrixmaterials über den gesamten Probenquerschnitt zu erreichen. Als Matrixmaterial dienten 100 µm dicke PA6-Folien. Um den Aufwand für die Vorbereitung der Fertigung zu reduzieren, wurde in diesem Abschnitt jedoch darauf verzichtet, dünnere Folien als äußere Matrixschicht zu verwenden. Die Möglichkeit, homogene CFK-Proben mithilfe von Ultraschall herzustellen, wurde bereits im Abschnitt 4.2.3 gezeigt. Eventuelle Inhomogenitäten in den Randbereichen wurden daher in Kauf genommen, da sie dem Ziel der Untersuchung der Maximierung der Lagenanzahl nicht entgegenstanden.

### 4.3.1 Einmalige Verschweißung

In einem einleitenden Versuch wurde eine Lage Fasern zwischen zwei PA6-Folien positioniert und unterhalb der Sonotrode auf dem Amboss der Ultraschallschweißmaschine befestigt. Anschließend wurde der Ultraschall ausgelöst und die Verschweißung durchgeführt. Hierbei zeigte sich jedoch, dass die Polymermatrix nicht aufgeschmolzen und die Fasern nicht eingebettet werden konnten, siehe oberer Teil der Abbildung 4.23. Um den Energieeintrag zu steigern, wurden Schweißzeit sowie Amplitude erhöht.



*Verschweißter Bereich*

*Zersetzung des Polymers*

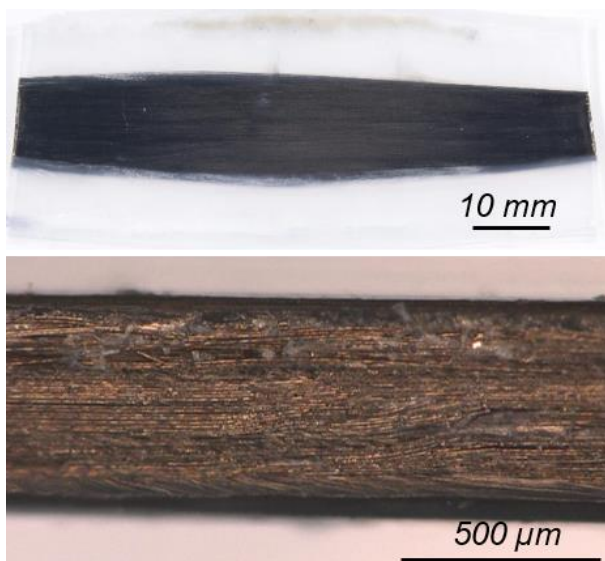


**Abbildung 4.23:** Ultraschallgefertigte einlagige CFK-Probe ohne (oben) und mit (unten) Verwendung von zusätzlichen Pufferfolien aus PEEK [nach 57].

Erneut konnte jedoch keine vollständige Aufschmelzung der Matrix erreicht werden. Weiterhin traten Maschinenfehler ein, sodass reproduzierbare Ergebnisse nicht möglich waren. Daher wurden, wie im Abschnitt 4.2 bereits vorgestellt, zusätzliche Pufferfolien eingesetzt, die die Grenzflächenreibung erhöhten. Hierfür wurde gemäß der Darstellung in Abbildung A.8 Polyetheretherketon (PEEK) als Material gewählt, da es sich nicht

mit PA6 verbindet. PEEK lag in Form von 100 µm dicken Folien vor, vgl. Datenblatt in Abbildung A.5 des Anhanges. Es wurde jeweils eine PEEK-Folie über der oberen und unterhalb der unteren PA6-Folie positioniert. Anschließend erfolgte die Verschweißung mit den in Tabelle A.10 zusammengefassten Parametern. Das Ergebnis der Verschweißung ist im unteren Teil der Abbildung 4.23 zu sehen. Es zeigte sich hierbei, dass durch die Verwendung der PEEK-Folien die vollständige Verschweißung der PA6-Folien und Fasern ermöglicht wurde. Maschinenfehler traten nicht mehr auf. Des Weiteren waren am rechten oberen Rand der hergestellten CFK-Probe Zersetzungen des Polymers zu erkennen. Dies deutete auf einen zu hohen Energieeintrag infolge zu langer Schweißzeit hin. Somit war davon auszugehen, dass bei der Verwendung von PEEK-Folien eine vollständige Verschweißung der PA6-Folien auch mit einer geringeren Schweißzeit erreicht werden konnte.

Zwar ermöglichte die Verwendung von zusätzlichen PEEK-Folien grundsätzlich die Verschweißung von zwei PA6-Folien und einer Lage Kohlenstofffasern, jedoch führte dies zu einem erhöhten Materialbedarf und Abfall, da die PEEK-Folien infolge der Ultraschallschwingungen nach der Verschweißung eine raue Oberfläche hatten und nicht für eine erneute Schweißung eingesetzt werden konnten.



**Abbildung 4.24:** Oben: CFK-Probe mit fünf Faserlagen nach der Herstellung [57]. Unten: Mikroskopaufnahme eines Schnittes in Faserlängsrichtung durch die Probe.

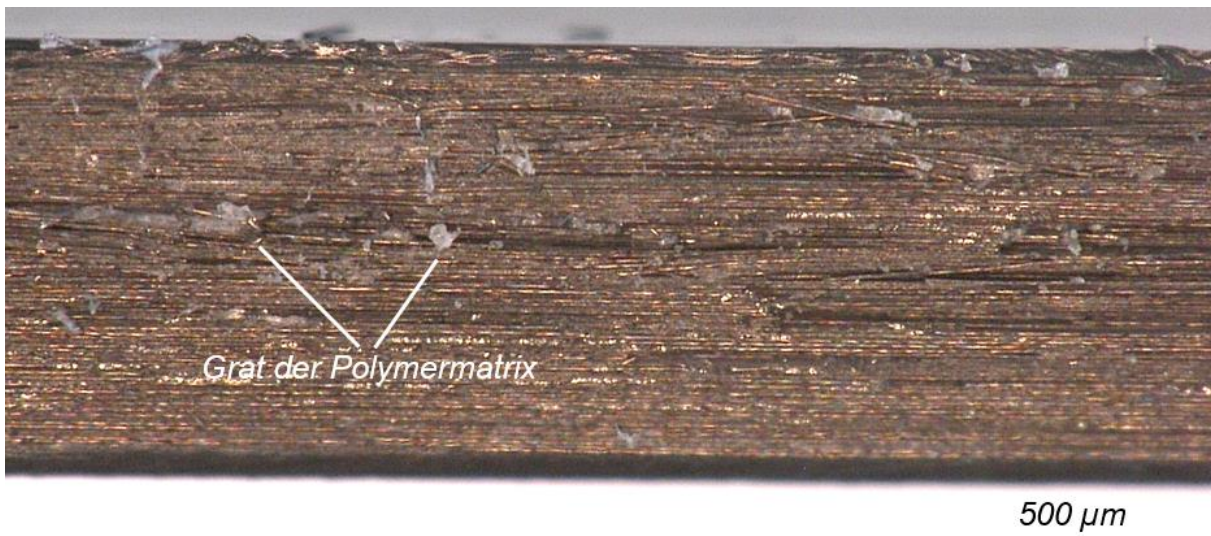
In einer weiteren Untersuchung wurde die Anzahl von Folien- und Faserlagen erhöht und hierfür eine zusätzliche Lage Polymerfolie sowie eine Lage Kohlenstofffasern unterhalb der Sonotrode auf dem Amboss positioniert. Der Stapel aus insgesamt zwei Faser- und drei Folienlagen wurde anschließend mit den in Tabelle A.10 zusammengefassten Parametern mittels Ultraschall verschweißt. Hierbei gelang eine vollständige Aufschmelzung der Polymermatrix und Einbettung der Fasern. Eine zusätzliche Verwendung von PEEK-Folien war nicht mehr notwendig. In weiteren Versuchen wurden zum Versuchsaufbau sukzessive weitere Folien- und Faserlagen hinzugefügt und mit gleich-

bleibenden Parametern zu CFK-Proben verschweißt. Mit den in Tabelle A.10 angegebenen Prozessparametern konnten in dieser Versuchsreihe CFK mit einer, zwei, drei, vier und fünf Faserlagen hergestellt werden.

Im oberen Teil der nebenstehenden Abbildung 4.24 ist eine CFK-Probe nach der Herstellung dargestellt. Zu erkennen ist, dass sich das Faserbündel auf eine Breite von bis zu etwa 14 mm aufweitete. Diese Aufweitung entstand infolge der durch die hochfrequenten Schwingungen hervorgerufenen Bewegungen der Fasern während des Ultraschallschweißprozesses und konnte während der Fertigung durch eine hö-

here Vorspannkraft in Faserlängsrichtung reduziert oder vermieden werden, vgl. Abschnitt 4.1.1. Im unteren Teil der Abbildung 4.24 ist eine Mikroskopaufnahme eines in Faserlängsrichtung verlaufenden Schnittes durch die CFK-Probe dargestellt. Die Fasern sind vollständig in die Matrix eingebettet und homogen über den gesamten Probenquerschnitt verteilt. Die Gesamtdicke der Probe betrug in etwa 580  $\mu\text{m}$ .

Nach der Herstellung der fünflagigen CFK-Probe wurde dem Versuchsaufbau erneut eine Lage Faser- und Folienmaterial hinzugefügt. Bei der Verschweißung zeigte sich jedoch, dass die von der Ultraschallschweißmaschine abgegebene Energie nicht zum Aufschmelzen aller Polymerfolien ausreichte. Daher wurde für die weiteren Untersuchungen sowohl die Schweißzeit von 3,5 s auf 9,0 s sowie die Amplitude von 25  $\mu\text{m}$  auf 30  $\mu\text{m}$  erhöht, siehe Tabelle A.11 im Anhang. Mithilfe dieser Prozessparameter konnten in der Versuchsreihe CFK-Proben mit sechs, sieben, acht und neun Lagen Fasern hergestellt werden. Alle Polymerfolien wurden aufgeschmolzen und die Fasern konnten vollständig in die schmelzflüssige Matrix eingebettet werden. Zur weiterführenden Untersuchung wurden Schnitte durch die CFK-Proben erstellt. Abbildung 4.25 zeigt eine Mikroskopaufnahme eines in Faserlängsrichtung verlaufenden Schnittes durch eine CFK-Probe, die aus neun Lagen Kohlenstofffasern und zehn Lagen jeweils 100  $\mu\text{m}$  dicker PA6-Folien bestand.

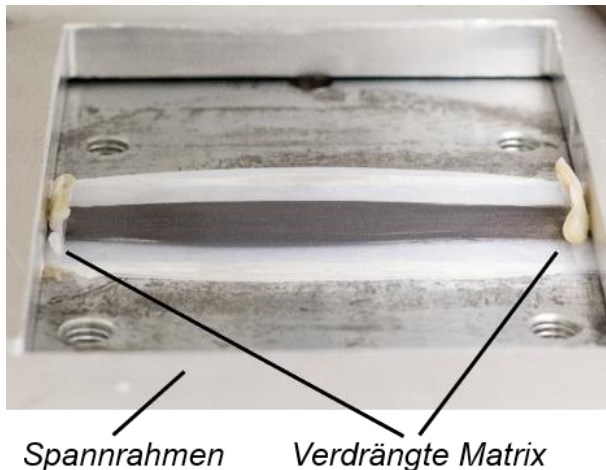


**Abbildung 4.25:** Schnitt in Faserlängsrichtung durch eine CFK-Probe bestehend aus neun Lagen Fasern und zehn Lagen PA6-Folien. Die Gesamtdicke betrug 760  $\mu\text{m}$ .

Anhand der Mikroskopaufnahme war zu erkennen, dass alle Faserlagen vollständig in die Matrix eingebettet und homogen über den Probenquerschnitt verteilt wurden. Randbereiche mit ungefüllter Matrix lagen nicht vor. Die Gesamtdicke der Probe betrug ca. 760  $\mu\text{m}$ .

Des Weiteren war anhand Abbildung 4.25 ein Grat aus Polymermatrix zu erkennen, der sich beim Zuschnitt der Probe bildete. Ferner handelte es sich bei dem dunklen Bereich am unteren Probenrand nicht um eine Inhomogenität des CFK, sondern vielmehr um das Resultat einer schiefen Einspannung des Probenkörpers und damit einer nicht orthogonalen Ausrichtung von Probe und Optik des Mikroskops.

Bei der Durchführung der Untersuchung zur maximalen Anzahl der Faser- und Folienlagen zeigte sich, dass während der Ultraschallfertigung von CFK Matrixmaterial im schmelzflüssigen Zustand seitlich aus der Probe gedrückt wurde. Der Anteil der seitlich herausgedrückten Matrix nahm sowohl mit zunehmender Anzahl der verwendeten Polymerfolien als auch deren Dicke zu. So zeigt die Abbildung 4.26 beispielhaft eine CFK-Probe nach der Ultraschallverschweißung. Die Probe war mithilfe eines Spannrahmens auf dem Amboss einer Ultraschallschweißmaschine befestigt. Als Matrixmaterial wurden 200 µm dicke PA6-Folien verwendet.

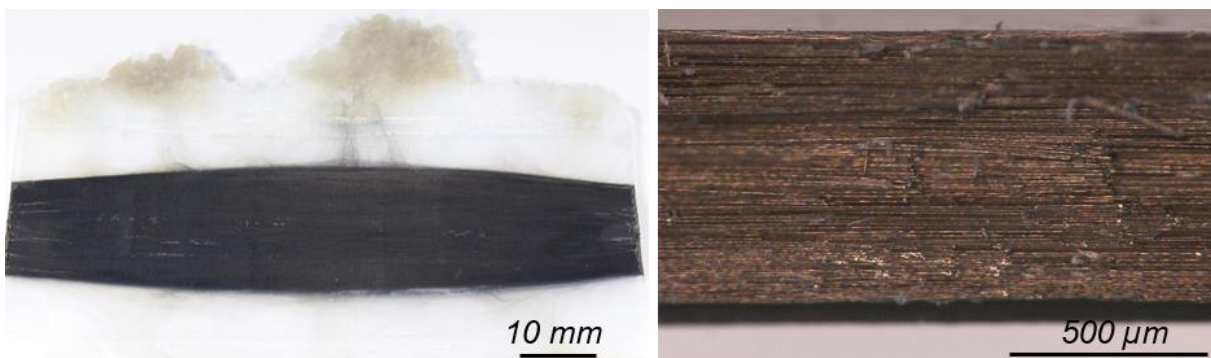


**Abbildung 4.26:** Während der Ultraschallfertigung von CFK verdrängte Matrix [57].

Anhand Abbildung 4.26 ist zu erkennen, dass das Matrixmaterial in Faserlängsrichtung verdrängt wurde und durch den Spalt, der sich während des Schweißprozesses zwischen Spannrahmen und Sonotrode bildete, herausgedrückt wurde. Zusätzlich wurde das Matrixmaterial auch orthogonal zur Faserlängsrichtung verdrängt. Hierbei konnte es jedoch aufgrund fehlender Widerstände ungehindert fließen. Für die anschließenden Zugversuche wurden beide Bereiche der Probe zurechtgeschnitten. Des Weiteren war zu erkennen, dass die Matrix eine trüb-gelbe Farbe hatte. Dies deutete darauf hin, dass das Polymer lokal überhitzt wurde und sich zersetzte. Die Matrixverdrängung trat in unterschiedlich starker Ausprägung bei allen CFK-Proben auf, die mithilfe des Kraftanstieges gefertigt wurden. Dies deutete darauf hin, dass während der Fertigung aufgrund des Kraftanstieges der Anteil der schmelzflüssigen Matrix, der nicht für die vollständige Einbettung der Fasern benötigt wurde, aus der Probe gedrückt wurde. Bei der Verwendung dünnerer Polymerfolien als Matrixmaterial nahm der Anteil der verdrängten Matrix ab, was dadurch erklärt werden konnte, dass bei dünneren Polymerfolien insgesamt weniger überschüssiges Matrixmaterial vorlag. Dies ließ den Schluss zu, dass durch eine geeignete Paarung aus der Auswahl der Dicke der verwendeten Polymerfolien und den eingestellten Prozessparametern, der Anteil der verdrängten Matrix weiter reduziert oder komplett vermieden werden konnte. Es ist somit denkbar, mithilfe der Ultraschallfertigung CFK herzustellen, bei denen die Polymerfolien im aufgeschmolzenen Zustand vollständig für die Einbettung der Fasern aufgebraucht werden und dadurch den während des Herstellungsprozesses auftretenden Abfall vermeiden.

Für eine weitere Steigerung der Anzahl der Faser- und Folienlagen musste die von der Ultraschallschweißmaschine abgegebene Energie erhöht werden. Hierfür wurde die Schweißzeit von 9,0 s auf 11,0 s gesteigert. Des Weiteren wurde die Schweißkraft F1 von 500 N auf 1200 N erhöht. Alle weiteren an der Ultraschallschweißmaschine einstellbaren Prozessparameter blieben unverändert und sind in der Tabelle A.12 des Anhangs zusammengefasst.

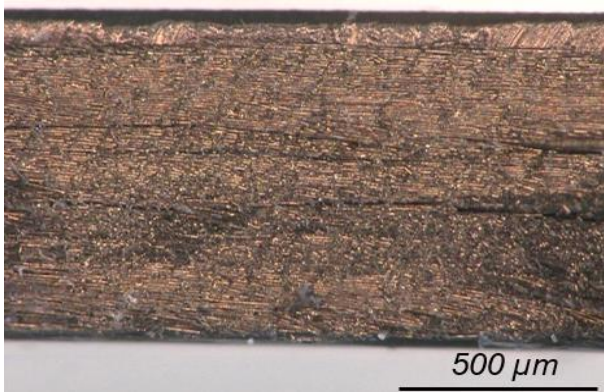
Mit diesen Parametern wurde in weiteren Versuchen die Lagenanzahl gesteigert und Proben mit zehn, elf, zwölf und 13 Faserlagen hergestellt. Im linken Teil der Abbildung 4.27 ist eine CFK-Probe mit 13 Lagen Fasern und 14 Lagen jeweils 100  $\mu\text{m}$  dicker PA6-Folien dargestellt. Die Gesamtdicke der Probe betrug etwa 900  $\mu\text{m}$ . Sie war damit geringer als die Summe der Dicken der verwendeten Faser- und Folienlagen. Dies konnte damit erklärt werden, dass es während der Verschweißung der Materialien zum CFK zu einer Aufweitung der Faserbündel und einer Verdrängung der Matrix kam, wodurch die Dicke des CFK abnahm. Beide Effekte nahmen mit steigender Anzahl der Faser- und Folienlagen zu. Der linke Teil der Abbildung 4.27 verdeutlicht zum einen die Aufweitung der Fasern als auch die orthogonal zur Faserlängsrichtung verlaufende Verdrängung der Matrix. Die Matrixverdrängung in Faserlängsrichtung ist nicht dargestellt, da die entsprechenden Bereiche abgeschnitten wurden.



**Abbildung 4.27:** Links: Nicht zurechtgeschnittene CFK-Probe mit 13 Lagen Fasern [nach 57]. Rechts: Mikroskopaufnahme eines in Faserlängsrichtung verlaufenden Schnittes durch die Probe.

Im rechten Teil der Abbildung 4.27 ist eine Mikroskopaufnahme eines in Faserlängsrichtung verlaufenden Schnittes durch die hergestellte Probe zu sehen. Erneut ist zu erkennen, dass alle Fasern vollständig in die Matrix eingebettet und über den gesamten Probenbereich homogen verteilt wurden.

Um die Anzahl der verwendeten Faser- und Folienlagen weiter zu steigern, erfolgte eine Erhöhung der Schweißzeit auf 16 s, siehe Tabelle A.13. Dies entsprach der maximalen Schweißzeit, die an der Maschine eingestellt werden konnte. Da auch die Amplitude des Ultraschalls mit 30  $\mu\text{m}$  nahezu dem Grenzwert der Maschine mit 30,6  $\mu\text{m}$  entsprach, konnte davon ausgegangen werden, dass bei den verwendeten Prozessparametern die maximale Maschinenleistung abgerufen wurde. Mithilfe dieser Prozessparameter wurde die Lagenanzahl erhöht und in einer Schweißung CFK-Proben mit 14, 15, 16 und 17 Lagen Fasern hergestellt. Bei allen Proben gelang die



**Abbildung 4.28:** Schnitt in Faserlängsrichtung durch eine ca. 1 mm dicke CFK-Probe mit 17 Lagen Fasern.

Um die Anzahl der verwendeten Faser- und Folienlagen weiter zu steigern, erfolgte eine Erhöhung der Schweißzeit auf 16 s, siehe Tabelle A.13. Dies entsprach der maximalen Schweißzeit, die an der Maschine eingestellt werden konnte. Da auch die Amplitude des Ultraschalls mit 30  $\mu\text{m}$  nahezu dem Grenzwert der Maschine mit 30,6  $\mu\text{m}$  entsprach, konnte davon ausgegangen werden, dass bei den verwendeten Prozessparametern die maximale Maschinenleistung abgerufen wurde. Mithilfe dieser Prozessparameter wurde die Lagenanzahl erhöht und in einer Schweißung CFK-Proben mit 14, 15, 16 und 17 Lagen Fasern hergestellt. Bei allen Proben gelang die

Aufschmelzung der Polymerfolien und die vollständige Einbettung der Fasern in die schmelzflüssige Matrix. Die Abbildung 4.28 zeigt einen in Faserlängsrichtung verlaufenden Schnitt durch eine CFK-Probe aus insgesamt 17 Lagen Kohlenstofffasern und 18 Lagen PA6-Folien. Die Gesamtdicke der Probe betrug in etwa 1 mm. Anhand des dargestellten Probenquerschnittes ist zu erkennen, dass die Fasern vollständig in die Matrix eingebettet wurden und homogen über den Probenquerschnitt verteilt vorlagen. Die untere Seite der CFK-Probe war bei der Herstellung dem Amboss und die obere Seite der Sonotrode zugewandt. Die Dicke der nicht mit Fasern gefüllten Bereiche in den beiden äußeren Randschichten betrug jeweils etwa 30  $\mu\text{m}$ .

Eine weitere Erhöhung der Faser- und Folienlagenanzahl war mit dem verwendeten Versuchsaufbau aus mehreren Gründen nicht möglich. Zum einen entstand bei der Ultraschallfertigung von CFK-Proben mit mehr als 13 Faserlagen zunehmend Rauch infolge der Erwärmung des Polymers. Die Rauchentwicklung stieg mit der Anzahl der Faser- und Folienlagen an, sodass insbesondere die Fertigung von CFK mit 16 und 17 Faserlagen nur nach mehrminütiger Lüftung des Versuchsraums möglich war. Um gesundheitliche Schäden zu vermeiden, war die Verwendung einer Absaugereinheit notwendig. Diese stand jedoch im Rahmen der Untersuchung nicht zur Verfügung, sodass eine weitere Steigerung der Faserlagenanzahl nicht möglich war.

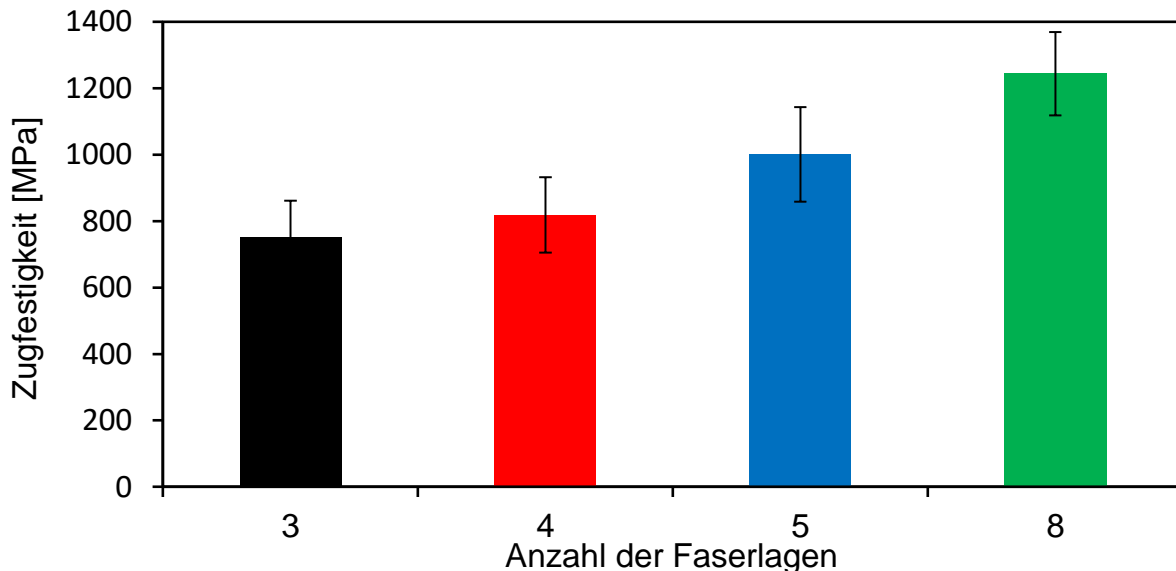
Des Weiteren wurde bereits erwähnt, dass die für die Herstellung der CFK-Probe mit 17 Faserlagen verwendeten Prozessparameter die maximale Energieabgabe der Ultraschallschweißmaschine ausgereizt haben. Um die Lagenanzahl weiter zu steigern, müsste daher eine leistungsfähigere Maschine verwendet werden, die im Rahmen der Untersuchung jedoch nicht zur Verfügung stand.

Da die beiden genannten Gründe eine weitere Erhöhung der Faser- und Folienanzahl nicht möglich machten, wurde die durchgeführte Untersuchung als erfolgreich abgeschlossen gewertet. Es wurde festgestellt, dass mit den zur Verfügung stehenden Mitteln CFK mit einer Dicke von ca. 1 mm, bestehend aus 17 Lagen jeweils 100  $\mu\text{m}$  dicker Kohlenstofffasern und 18 Lagen jeweils 100  $\mu\text{m}$  dicker PA6-Folien gefertigt werden konnten [61].

Ergänzend zu der Untersuchung der maximalen Lagenanzahl erfolgte eine Bestimmung der mechanischen Eigenschaften mithilfe von Zugversuchen. Diese erfolgte anhand ausgewählter CFK-Proben, um den zeitlichen Aufwand für die Herstellung der Proben zu beschränken. Hierfür wurden zunächst vier, fünf und achtlagige Proben hergestellt und auf die für den Zugversuch benötigten Abmessungen zurechtgeschnitten, vgl. Abschnitt 4.1.2. Zusätzlich erfolgten bereits im Abschnitt 4.2.3 Zugversuche mit ultraschallgefertigten dreilagigen CFK-Proben, deren Ergebnisse in diesem Abschnitt aufgegriffen werden. Da ein Zuschnitt von CFK mit mehr als acht Faserlagen aufgrund ihrer hohen Dicke mithilfe einer Wasserstrahlschneide erfolgen musste, beschränkte sich die Untersuchung auf die oben ausgewählten Proben.

Die in den Zugversuchen bestimmten Werte für die mittlere Zugfestigkeit sowie die zugehörigen Standardabweichungen sind in Abhängigkeit der Anzahl der Faserlagen der jeweiligen CFK-Proben in Abbildung 4.29 zusammengefasst. Ausgehend von einer Zugfestigkeit von  $752 \pm 110$  MPa bei dreilagigen Proben, nahm diese bei einer

Erhöhung der Faserlagenanzahl auf  $819 \pm 113$  MPa bei den vierlagigen sowie auf  $1001 \pm 143$  MPa bei den fünf- und achtlagigen Proben zu. Die größte Zugfestigkeit konnte bei den achtlagigen CFK-Proben gemessen werden und betrug  $1244 \pm 126$  MPa. Die Spanne der relativen Standardabweichungen reichte von ca. 10 bis 15 % [57,61]. Es wurden insgesamt 50 Proben untersucht.



**Abbildung 4.29:** In Abhängigkeit der Anzahl der Faserlagen gemessenen mittleren Zugfestigkeiten sowie die zugehörigen Standardabweichungen ultraschallgefertigter CFK-Proben. Bei den dreilagigen CFK wurden fünf Proben untersucht, den vierlagigen 17 sowie bei den fünf- und achtlagigen jeweils 14 Proben [nach 57 und 61].

Abschließend wurde für die fünf- und achtlagigen CFK-Proben gemäß dem im Abschnitt 4.1.3 beschriebenen Vorgehen der Faserfüllgrad bestimmt. Dieser betrug bei den fünf- und achtlagigen CFK-Proben etwa 19,2 Vol.-% und bei den achtlagigen Proben ca. 31,6 Vol.-% [57,61].

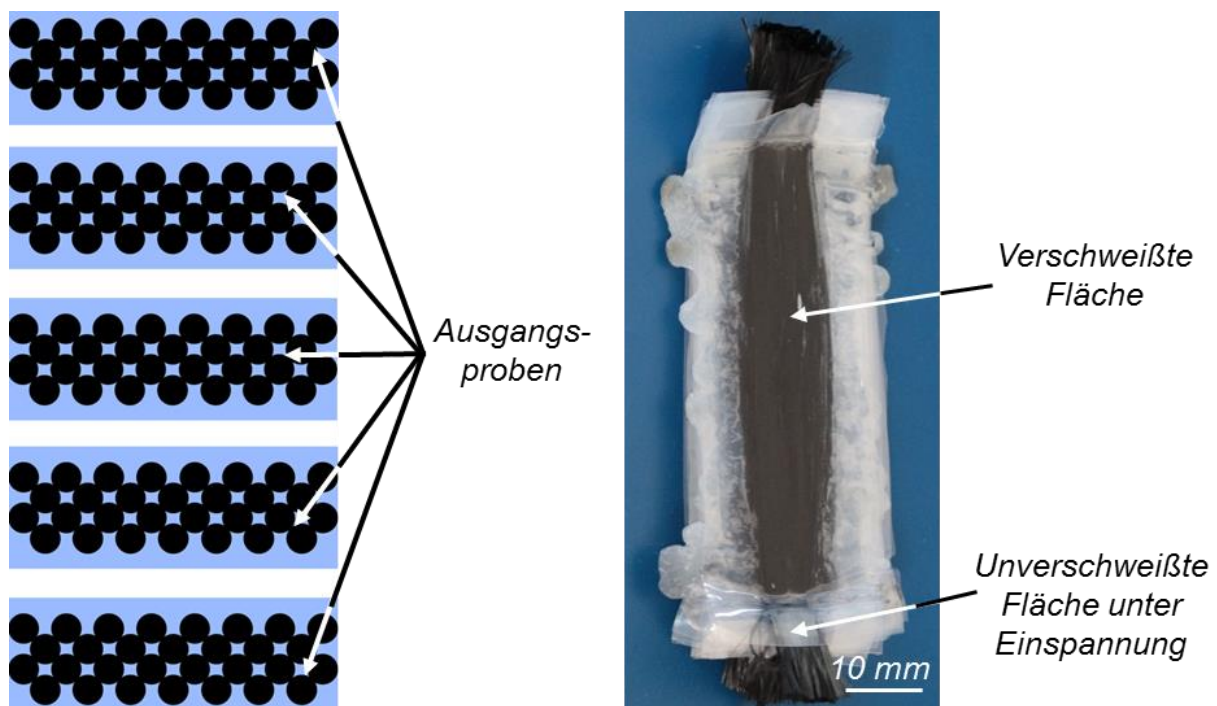
Konventionell gefertigte CFK mit einer PA6-Matrix erreichen bei einem Faserfüllgrad von 48,5 Vol.-% eine Zugfestigkeit von ca. 1,91 GPa [60], während bei ultraschallgefertigten CFK bei einem Faserfüllgrad von 31,6 Vol.-% eine Zugfestigkeit von ca. 1,24 GPa gemessen wurde. Somit ergab sich für konventionell gefertigte CFK ein Verhältnis von Zugfestigkeit zu Faserfüllgrad von ca. 39,3 MPa / Vol.-%, während dieser Wert für ultraschallgefertigte CFK ca. 39,2 MPa / Vol.-% betrug. Ein Vergleich der Zahlenwerte macht deutlich, dass die auf den Faserfüllgrad bezogene Zugfestigkeit ultraschallgefertigter CFK mit denen der konventionellen Fertigung vergleichbar war. Durch eine weitere Steigerung des Faserfüllgrades kann voraussichtlich eine Zunahme der Zugfestigkeit erreicht werden. Dies könnte durch die Verwendung dünnerer Folien oder einer leistungsfähigeren Ultraschallschweißmaschine erreicht werden. Bei einer weiteren Steigerung des Faserfüllgrades ist jedoch eine Zunahme der auftretenden Verarbeitungsschwierigkeiten zu erwarten, vgl. Abschnitt 2.2.

#### 4.3.2 Verschweißung vorgefertigter CFK

Neben dem beschriebenen Vorgehen zur Fertigung von mehrlagigen CFK durch eine einmalige Verschweißung, wurde die Herstellung von CFK durch die Verwendung

von vorgefertigten CFK-Ausgangsprouben untersucht, die übereinander gestapelt und in einer anschließenden Verschweißung zu mehrlagigen CFK verarbeitet wurden. Durch den Einsatz von vorgefertigten Ausgangsprouben sollte zum einen die maximale Lagenanzahl der CFK weiter gesteigert werden. Zum anderen sollte die Rauchentwicklung, die sich insbesondere bei CFK-Prouben mit mehr als 13 Faserlagen bildete, reduziert werden. Darüber hinaus galt es zu untersuchen, ob die Verwendung von vorgefertigten CFK zur Herstellung mehrlagiger Prouben den Einsatz von Ultraschallschweißmaschinen mit einer geringeren maximalen Leistungsabgabe erlaubte, als zur Herstellung vergleichbarer CFK in nur einer Schweißung benötigt wurden.

Als vorgefertigte Ausgangsprouben dienten CFK-Prouben aus vier Lagen Fasern und fünf Lagen jeweils 100 µm dicker PA6-Folien, die gemäß der Beschreibung in Abschnitt 4.3.1 hergestellt wurden. In Untersuchungen wurden mehrere solcher vorgefertigter Ausgangsprouben übereinander gestapelt, unter der Sonotrode auf dem Amboss einer Ultraschallschweißmaschine positioniert und verschweißt. Die Anzahl der verwendeten Ausgangsprouben wurde sukzessive erhöht. Es wurden bis zu fünf Ausgangsprouben, vgl. linker Teil der Abbildung 4.30, übereinander angeordnet und mit den in Tabelle A.15 zusammengefassten Prozessparametern zu einer CFK-Proube verschweißt. Der rechte Teil der Abbildung 4.30 zeigt eine nicht zurechtgeschnittene CFK-Proube, die aus fünf Ausgangsprouben hergestellt wurde und aus insgesamt 20 Lagen Kohlenstofffasern und 25 Lagen PA6-Folien bestand. Die Gesamtdicke der 20-lagigen CFK-Proube betrug ca. 2,5 mm.



**Abbildung 4.30:** Links: Schematische Darstellung der Versuchsanordnung zur Herstellung eines 20-lagigen CFK. Rechts: Nicht zugeschnittene CFK-Proube mit 20 Faserlagen, hergestellt durch die Verschweißung von fünf Ausgangsprouben [57].

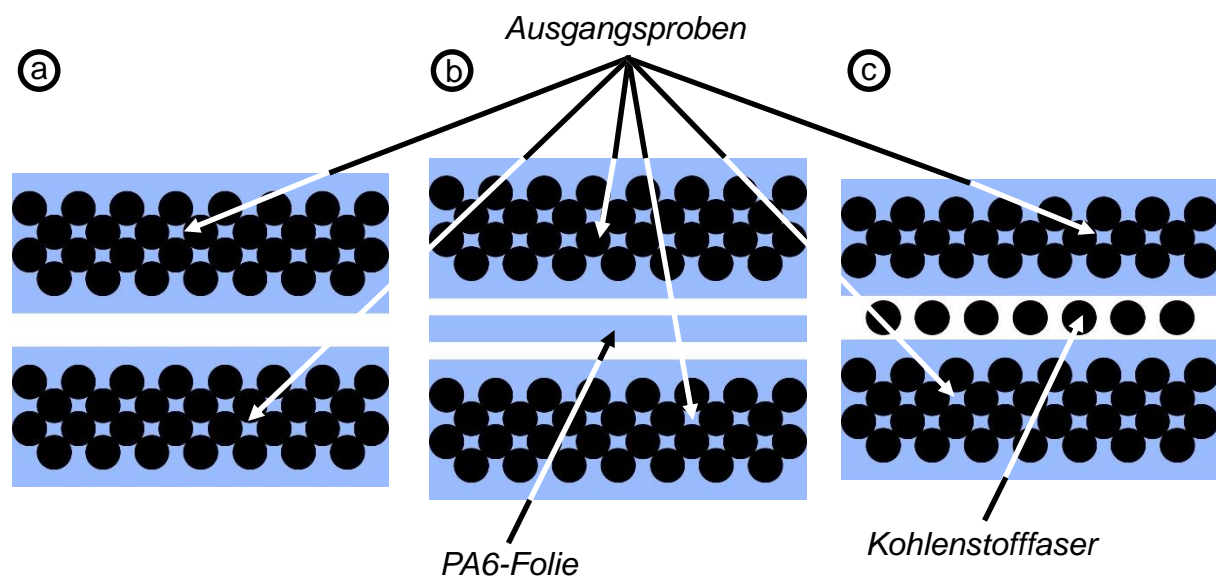
Diese Untersuchung zeigte, dass zum einen durch die Verwendung von vorgefertigten Ausgangsprouben die maximale Lagenanzahl der hergestellten CFK gesteigert werden kann. Zum anderen konnte die für die Verschweißung benötigte Energie re-

duziert werden. So wurden bei der Verschweißung der vorgefertigten Ausgangsproben eine Schweißzeit von 6,0 s und eine Amplitude von 20  $\mu\text{m}$  eingestellt, vgl. Tabelle A.15. Für die Herstellung der 17-lagigen CFK-Probe durch einmalige Verschweißung in Abschnitt 4.3.1 wurde hingegen eine Schweißzeit von 16,0 s sowie eine Amplitude des Ultraschalls von 30,0  $\mu\text{m}$  verwendet, was den maximal an der Ultraschallschweißmaschine einstellbaren Parametern entsprach. Ein Vergleich der Zahlenwerte macht deutlich, dass zur Herstellung der 20-lagigen CFK-Probe die maximale Energieabgabe der Ultraschallschweißmaschine nicht ausgeschöpft wurde. Daraus wurde gefolgert, dass durch die Verwendung von vorgefertigten CFK die Anforderungen an die verwendete Ultraschallschweißmaschine reduziert werden, wodurch sich Kostenvorteile für die Produktion ergeben, da günstigere Ultraschallschweißmaschinen mit einer geringeren Leistung verwendet werden können.

### 4.3.3 Untersuchung der Zugfestigkeiten

In einer weiterführenden Untersuchung wurde die mechanische Belastbarkeit der im Abschnitt 4.3.2 durch Verschweißung von Ausgangsproben hergestellten CFK bestimmt und mit der Belastbarkeit der Proben aus Abschnitt 4.3.1, die mit nur einer Schweißung gefertigt wurden, verglichen. Da CFK mit mehr als acht Faserlagen nicht mit den am Institut zur Verfügung stehenden Mitteln für die Zugprüfung zurechtgeschnitten werden konnten, fokussierte die Untersuchung auf achtlagige CFK-Proben.

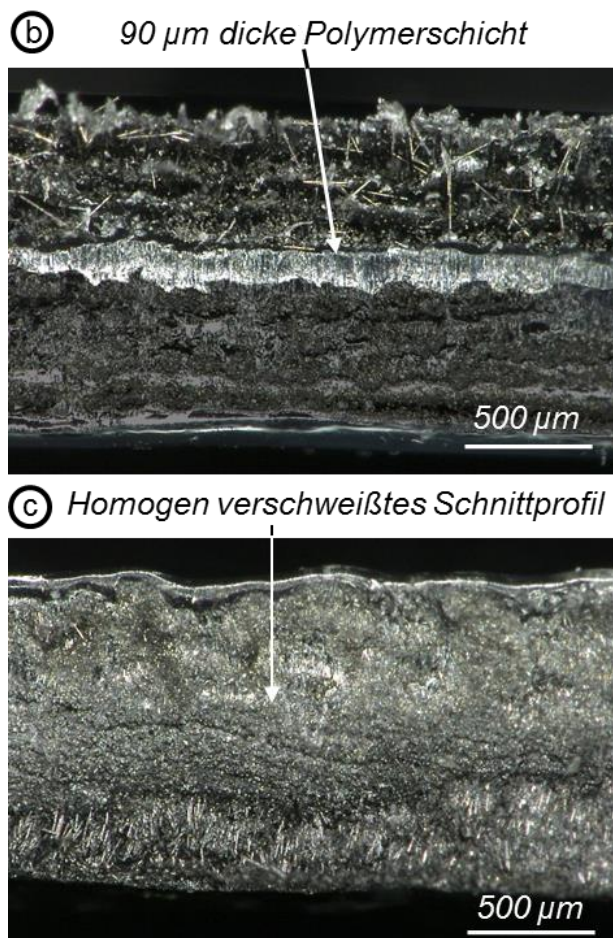
Zunächst wurden CFK-Proben hergestellt, bei denen drei verschiedene Möglichkeiten zur Anordnung der vorgefertigten Ausgangsproben untersucht wurden, die in Abbildung 4.31 dargestellt sind.



**Abbildung 4.31:** Schematische Darstellungen verschiedener Versuchsanordnungen zur Herstellung von achtlagigen CFK [57].

In der Anordnung a wurden zwei vorgefertigte Ausgangsproben übereinander gestapelt und auf dem Amboss unterhalb der Sonotrode einer Ultraschallschweißmaschine befestigt. Bei der Anordnung b wurde zusätzlich zwischen beide Ausgangsproben eine 100  $\mu\text{m}$  dicke PA6-Folie gelegt. Dadurch sollte zusätzliche Grenzflächenreibung generiert und eine bessere Verschweißung beider Ausgangsproben erzielt werden.

In Anordnung c wurde hingegen auf eine Ausgangsprobe mit vier Faserlagen eine Lage trockener Fasern und anschließend eine weitere vorgefertigte CFK-Probe, bestehend aus drei Faserlagen und vier Lagen jeweils 100 µm dicker PA6-Folien positioniert, vgl. Abbildung 4.31. Ziel der Anordnung c war es, gegenüber Anordnung a eine Lage PA6-Folie einzusparen und so den Probenquerschnitt des hergestellten CFK zu reduzieren, was zu einer Steigerung der Zugfestigkeit führte. Die für die Verschweißung verwendeten Prozessparameter sind in Tabelle A.14 zusammengefasst.



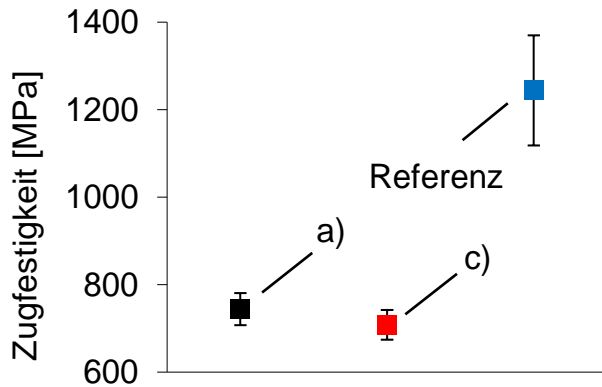
Die Abbildung 4.32 stellt Mikroskopaufnahmen von orthogonal zur Faserlängsrichtung verlaufenden Schnitten durch die hergestellten Proben dar. Die Dicke der mit Anordnung a und c hergestellten Proben betrug ca. 1,1 mm und die Dicke der mit Anordnung b hergestellten Proben betrug etwa 1,2 mm. Während die Schnittprofile der Anordnungen a und c vergleichbar waren und über den gesamten Probenquerschnitt homogen verteilte, vollständig in die Matrix eingebettete Fasern aufwiesen, war bei der mit der Anordnung b hergestellten CFK-Probe in der Probenmitte ein inhomogener Bereich zu erkennen. Die Dicke des inhomogenen Bereiches betrug ca. 90 µm. Hierbei handelte es sich um die PA6-Folie, die zuvor während der Ultraschallfertigung zwischen den beiden Ausgangsproben positioniert und verschweißt wurde. Die zusätzlich verwendete PA6-Folie trug dazu bei, dass sich innerhalb der CFK-Probe zwei mit Fasern gefüllte Bereiche bildeten, die jedoch voneinander getrennt waren. Da

**Abbildung 4.32:** Mikroskopaufnahmen von Schnitten durch achtlagige CFK-Proben der Anordnung b und c [57].

hierbei kein durchgehender Verbundwerkstoff entstand, wurde die Verwendung einer Zwischenfolie gemäß der Anordnung b als nachteilig eingestuft. Derart hergestellte Proben wurden im Weiteren nicht berücksichtigt.

Für die Bestimmung der Zugfestigkeit wurden zunächst CFK-Proben mit den Anordnungen a und c hergestellt. Anschließend wurden die Proben auf die für den Zugversuch benötigten geometrischen Abmessungen zurechtgeschnitten. Es folgte die Durchführung der Zugversuche. Die ermittelten Mittelwerte der Zugfestigkeiten sowie die zugehörigen Standardabweichungen sind in Abbildung 4.33 in Abhängigkeit der zugrundeliegenden Anordnung bei der Probenherstellung aufgetragen. Zusätzlich ist als Referenz die Zugfestigkeit der achtlagigen CFK-Probe dargestellt, die in Abschnitt 4.3.1 durch eine einmalige Verschweißung hergestellt wurde. Im Zugversuch

wurden jeweils drei Proben untersucht, die mit Anordnung a und c hergestellt wurden sowie 17 Referenzproben.



**Abbildung 4.33:** Mittlere Zugfestigkeiten der achtlagigen CFK-Proben [nach 57].

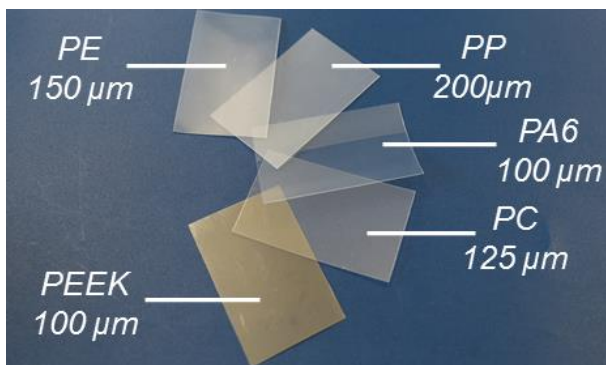
Die mittleren Zugfestigkeiten für die in Anordnung a und c hergestellten CFK-Proben betragen  $744 \pm 36$  MPa bzw.  $708 \pm 34$  MPa, während die der Referenzproben  $1244 \pm 126$  MPa betragen. Die Mittelwerte der maximalen Zugkraft der durch der Anordnung a und c gefertigten Proben betragen hingegen  $3440$  N bzw.  $3120$  N und bei den Referenzproben etwa  $3720$  N. Die Zugkraft der Referenzproben war somit um 8 % bzw. 19 % höher als die Vergleichswerte

der durch Verschweißung der vorgefertigten CFK hergestellten Proben. Die Zugfestigkeit der Referenzprobe war hingegen um 67 % bzw. 75 % höher. Dies konnte dadurch erklärt werden, dass bei der Herstellung der Referenzprobe durch die einmalige Verschweißung aufgrund einer höheren Grenzflächenreibung mehr Polymermaterial aufgeschmolzen und durch die Krafteinwirkung im flüssigen Zustand verdrängt wurde. Insgesamt führte dies dazu, dass die Dicke der Referenzprobe mit ca.  $740 \mu\text{m}$  deutlich geringer war, als die Dicke der in Anordnung a und c hergestellten Proben, die etwa  $1,1$  und  $1,2$  mm betragen. Zusammen mit der geringeren maximalen Zugkraft führte dies zur deutlichen Abnahme der Zugfestigkeit.

Aus diesem Ergebnis wurde daher gefolgert, dass durch die Verschweißung vorgefertigter Ausgangsproben mehrlagige CFK hergestellt werden können. Die benötigte Maschinenleistung war hierbei geringer als bei der einmaligen Verschweißung. Allerdings nehmen die Zugkraft und damit auch die Zugfestigkeit der Proben ab.

#### 4.4 Variation verwendeter Matrixwerkstoffe

In den vorherigen Abschnitten wurde die Ultraschallfertigung von CFK beschrieben, bei der sowohl die Anzahl der verwendeten Faser- und Matrixlagen als auch der Faserfüllgrad der hergestellten CFK durch die Verwendung von dünneren Polymerfolien variiert wurden.



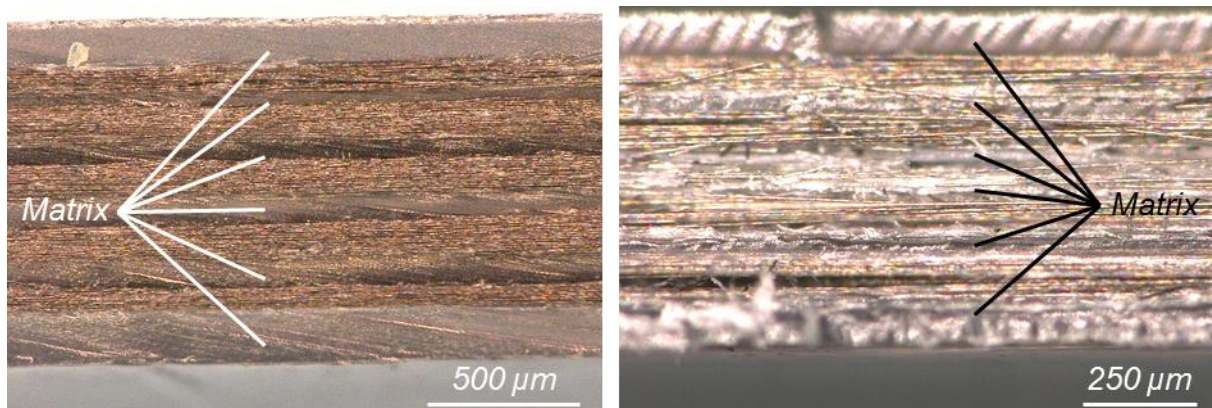
**Abbildung 4.34:** Zusammenstellung untersuchter Matrixmaterialien.

Als Matrix wurde hierfür überwiegend PA6 gewählt. Ziel weiterführender Untersuchungen war es daher, das verwendete Matrixmaterial zu variieren und neben PA6 weitere thermoplastische Folien zur Herstellung von CFK einzusetzen. Gemäß der Unterteilung im Abschnitt 2.1.2 sollten Vertreter der drei Kategorien von Thermoplasten, nämlich den Standardthermoplasten, den technischen Thermoplasten sowie

den Hochleistungsthermoplasten, verwendet werden. Abbildung 4.34 stellt die in diesem Abschnitt untersuchten Materialien zusammen. Alle Materialien lagen als Folien vor und wurden gemäß der Verfügbarkeit am Institut ausgewählt. Für die Gruppe der Standardthermoplaste wurden 200  $\mu\text{m}$  dicke PP-Folien und 150  $\mu\text{m}$  dicke PE-Folien ausgewählt. Als technische Thermoplaste wurden 125  $\mu\text{m}$  dicke PC-Folien und 100  $\mu\text{m}$  dicke PA6-Folien eingesetzt. Als Vertreter der Hochleistungsthermoplaste wurde PEEK mit einer Dicke von 100  $\mu\text{m}$  verwendet. Die Datenblätter der untersuchten Materialien sind in Abbildung A.1 bis Abbildung A.7 des Anhanges zu finden.

### 4.4.1 Herstellung der Proben

Für die Herstellung der Proben wurden jeweils fünf Lagen Kohlenstofffasern zwischen sechs Folien positioniert und unter der Sonotrode auf dem Amboss einer Ultraschallschweißmaschine befestigt. Als erstes wurden 200  $\mu\text{m}$  dicke PP-Folien als Matrixmaterial eingesetzt. Die eingestellten Prozessparameter sind in Tabelle A.16 zusammengefasst. Analog erfolgte anschließend die Ultraschallfertigung von CFK mit einer Matrix aus 150  $\mu\text{m}$  dicken PE-Folien mit den in Tabelle A.17 genannten Prozessparametern. Entsprechend den Ergebnissen der Untersuchungen aus Abschnitt 4.2 wurde während der Fertigung ein Kraftanstieg eingestellt, um eine vollständige Einbettung der Fasern zu erreichen und überschüssiges Matrixmaterial im schmelzflüssigen Zustand seitlich aus der Probe herauszudrücken. Zur Untersuchung des Probenquerschnittes wurden Mikroskopaufnahmen von in Faserlängsrichtung verlaufenden Schnitten durch die gefertigten CFK-Proben erstellt, siehe Abbildung 4.35.



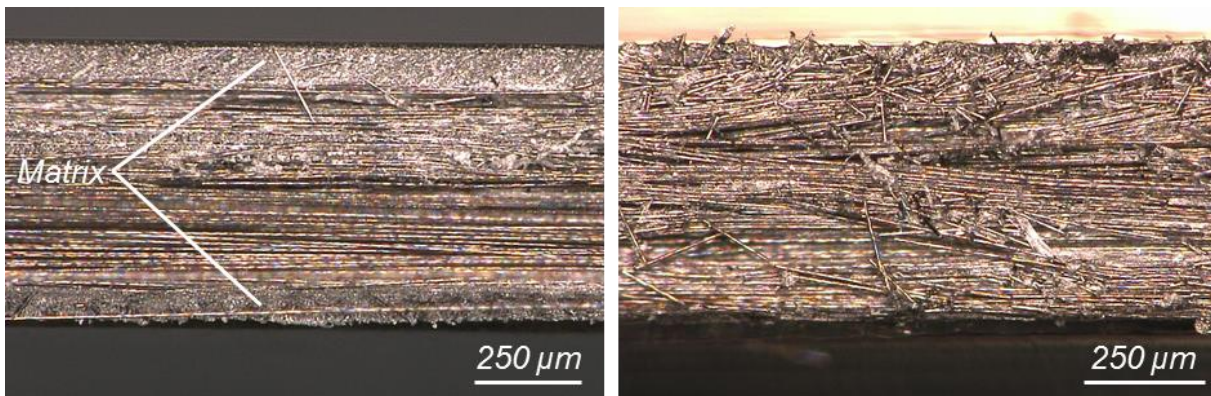
**Abbildung 4.35:** Mikroskopaufnahmen von Schnitten in Faserlängsrichtung durch CFK-Proben mit fünf Faserlagen und sechs jeweils 200  $\mu\text{m}$  dicken PP-Folien (links) oder jeweils 150  $\mu\text{m}$  dicken PE-Folien (rechts).

Die Gesamtdicke der CFK-Probe mit PP-Matrix betrug ca. 1170  $\mu\text{m}$ . Wie bereits in den Untersuchungen des Abschnittes 4.2, stellte sich bei diesen Proben ein inhomogener Aufbau ein, bei dem die einzelnen Faser- und Matrixlagen voneinander unterschieden werden konnten, vgl. linker Teil der Abbildung 4.35. Zwar wurde die Inhomogenität durch die Verwendung des Kraftanstieges reduziert, konnte jedoch nicht vollständig vermieden werden. Die Fasern wurden vollständig in die Matrix einbettet, da jedoch weiterhin Bereiche mit ungefüllter Matrix zu erkennen waren, konnte gefolgert werden, dass insgesamt mehr Matrixmaterial zur Verfügung stand, als für die

Einbettung benötigt wurde. Es wurde daher davon ausgegangen, dass durch die Verwendung von dünneren PP-Folien, homogene CFK hergestellt werden können.

Im rechten Teil der Abbildung 4.35 ist der Querschnitt der CFK-Probe mit PE-Matrix dargestellt. Die Dicke der Probe betrug ca. 750  $\mu\text{m}$ . Die verwendeten PE-Folien waren mit einer Dicke von 150  $\mu\text{m}$  um 50  $\mu\text{m}$  dünner als die PP-Folien. Daher zeichnete sich der Probenquerschnitt durch einen homogenen Aufbau aus. Jedoch waren auch hierbei äußere Randschichten mit ungefülltem Matrixmaterial deutlich zu erkennen. Diese konnten beispielsweise durch die Verwendung von dünneren PE-Folien vermieden werden, wie es zuvor bereits im Abschnitt 4.2 gezeigt wurde.

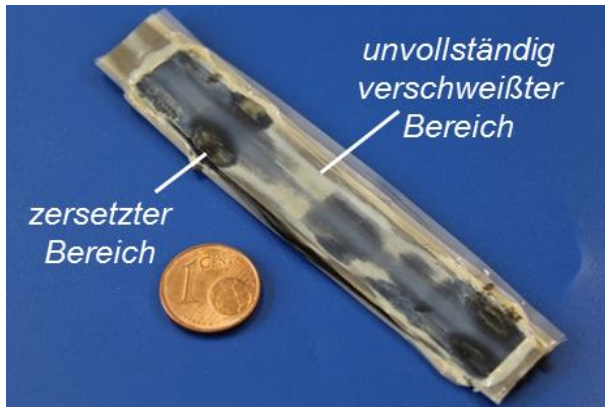
In der nächsten Versuchsreihe wurden technische Thermoplaste zur Ultraschallfertigung von CFK eingesetzt. Analog zu den Standardthermoplasten PP und PE, wurden fünf Faserlagen mit jeweils sechs Folien verschweißt. Bei der Verwendung von 125  $\mu\text{m}$  dicken PC-Folien wurden die in Tabelle A.18 genannten Parameter eingestellt. Für die Fertigung der CFK-Proben mit einer Matrix aus 100  $\mu\text{m}$  dicken PA6-Folien erfolgte die Verschweißung mit den Parametern aus Tabelle A.19. Nach der Herstellung der Proben wurden in Faserlängsrichtung verlaufende Schnittdarstellungen der Probenquerschnitte erstellt, siehe Abbildung 4.36.



**Abbildung 4.36:** Mikroskopaufnahmen von Schnitten in Faserlängsrichtung durch CFK-Proben mit fünf Faserlagen und sechs jeweils 125  $\mu\text{m}$  dicken PC-Folien (links) oder jeweils 100  $\mu\text{m}$  dicken PA6-Folien (rechts).

Die Gesamtdicke der CFK-Probe mit einer PC-Matrix betrug ca. 650  $\mu\text{m}$ . Anhand des Schnittes in Faserlängsrichtung im linken Teil der Abbildung 4.36 war eine homogene Verteilung der Fasern über den Probenquerschnitt zu erkennen. Lediglich in den äußeren Randschichten waren Bereiche mit ungefüllter Matrix zu erkennen. Im rechten Teil der Abbildung 4.36 ist der Probenquerschnitt eines CFK mit PA6-Matrix zu sehen. Die Dicke der Probe betrug etwa 580  $\mu\text{m}$ . Auch hierbei wurden die Fasern vollständig in die Matrix eingebettet. Inhomogene Bereiche mit ungefüllter Matrix sind hingegen nicht zu erkennen.

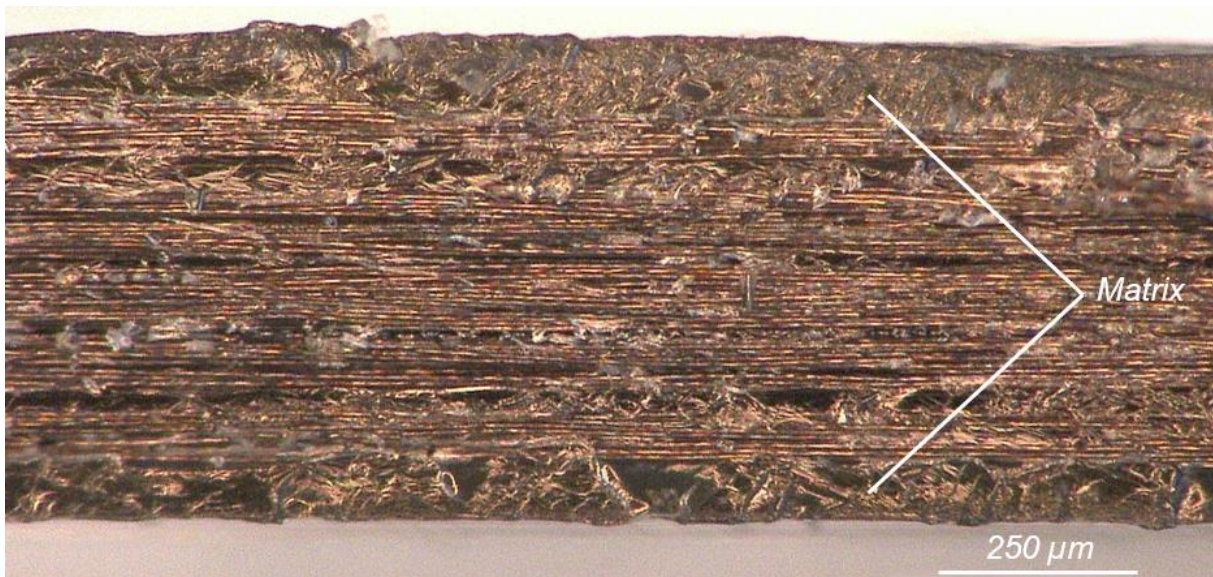
Nach der Verarbeitung von technischen Thermoplasten wurde in anschließenden Versuchen als Vertreter der Hochleistungsthermoplaste PEEK als Matrixmaterial eingesetzt. PEEK stand in Form von 100  $\mu\text{m}$  dicken Folien zur Verfügung. Fünf Faserlagen wurden zwischen sechs Folien positioniert und mit den in der Tabelle A.20 des Anhangs zusammengefassten Parametern zu CFK verschweißt.



**Abbildung 4.37:** Nicht zurechtgeschnittene ultraschallgefertigte CFK-Probe mit PEEK-Matrix mit teilweise unvollständig verschweißten und zersetzten Bereichen.

Die Ergebnisse der Verschweißung waren wenig reproduzierbar, sodass etwa 50 % der hergestellten Proben den beschriebenen Fehler aufwiesen, während die restlichen Proben vollständig verschweißt waren und lediglich im Bereich der Einspannung leichte Zersetzungen zeigten. Diese Stellen wurden für den späteren Zugversuch zurechtgeschnitten. Nach der Probenherstellung wurden anschließend Mikroskopaufnahmen von in Faserlängsrichtung verlaufenden Schnitten erstellt, siehe Abbildung 4.38.

Abbildung 4.37 zeigt eine nach der Fertigung nicht zurechtgeschnittene CFK-Probe mit einer PEEK-Matrix. Während die Verarbeitung von PP, PE, PC und PA6 ohne Zersetzungen des Polymers erfolgte und zu reproduzierbaren, vollständig verschweißten Proben führte, traten bei der Verwendung von Folien aus PEEK Ungleichmäßigkeiten auf. So wiesen die CFK-Proben an einigen Bereichen lokale Zersetzungen der Matrix auf, während in anderen Bereichen die Matrix unvollständig aufgeschmolzen wurde.



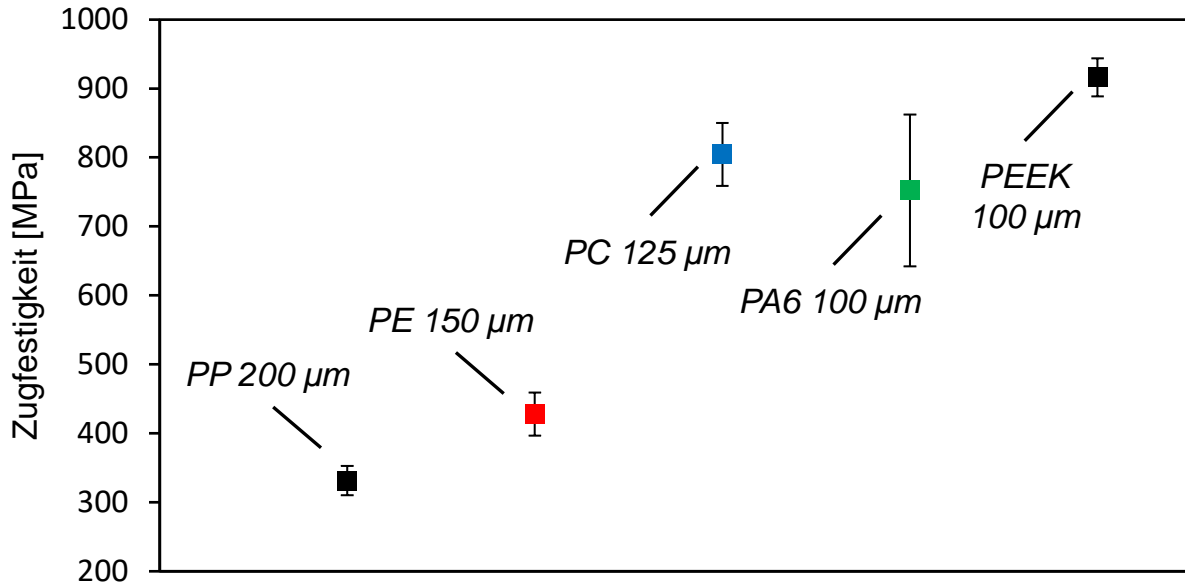
**Abbildung 4.38:** Mikroskopaufnahme eines Schnittes in Faserlängsrichtung durch eine CFK-Probe mit fünf Faserlagen und sechs jeweils 100 µm dicken PEEK-Folien.

Die Gesamtdicke der CFK-Probe mit einer Matrix aus PEEK betrug ca. 600 µm. Anhand der Darstellung in Abbildung 4.38 war einerseits die weitestgehend homogene und vollständige Einbettung der Fasern in die Matrix zu erkennen. Andererseits waren am oberen und unteren Probenrand Bereiche mit ungefüllter Matrix zu sehen.

#### 4.4.2 Durchführung von Zugversuchen

Im Anschluss an die Herstellung der Proben erfolgten Zugversuche zur Bestimmung der mechanischen Belastbarkeit der CFK in Abhängigkeit der jeweils verwendeten

Matrix. Hierfür wurden je Matrix fünf Proben auf die für den Zugversuch benötigten Abmessungen zurechtgeschnitten, vgl. Abschnitt 4.1.2, und anschließend untersucht. Die Abbildung 4.39 stellt die mittleren Zugfestigkeiten sowie die zugehörigen Standardabweichungen in Abhängigkeit der verwendeten Matrix zusammen. Alle untersuchten CFK-Proben bestanden jeweils aus fünf Faserlagen und sechs Folien.



**Abbildung 4.39:** Zusammenfassung mittlerer Zugfestigkeiten sowie der zugehörigen Standardabweichungen von CFK-Proben mit einer Matrix aus PP, PE, PC, PA6 und PEEK. Es wurden jeweils fünf Proben hergestellt und untersucht.

Die geringsten Zugfestigkeiten wurden bei CFK mit einer Matrix aus PP und PE gemessen. Diese betragen  $331 \pm 21$  MPa bzw.  $428 \pm 31$  MPa. Bei der Verwendung von PC und PA6 als Matrixmaterial stiegen die Zugfestigkeiten der CFK auf  $804 \pm 46$  MPa und  $752 \pm 110$  MPa. Die höchste Zugfestigkeit konnte bei CFK mit einer PEEK-Matrix festgestellt werden und betrug  $916 \pm 28$  MPa. Die relativen Standardabweichungen wiesen eine Spanne von 3 % bei PEEK, 5 bis 7 % bei PP, PE und PC bis zu ca. 15 % bei PA6 auf.

Ein Vergleich der Zahlenwerte macht deutlich, dass bei vergleichbarem Aufbau die Ausprägung der mechanischen Eigenschaften der mittels Ultraschall gefertigten CFK von Standardthermoplasten bis hin zu Hochleistungsthermoplasten zunimmt. Dieses Ergebnis bestätigte die im Abschnitt 2.1 für konventionell gefertigte CFK geltenden Angaben. Demnach werden beispielsweise CFK mit einer Matrix aus PEEK aufgrund der hohen mechanischen Belastbarkeit vor allem in anspruchsvollen Einsatzbereichen wie der Luft- und Raumfahrt eingesetzt, während CFK mit einer Matrix aus PA6 ein gutes PreisLeistungsverhältnis aufweisen und daher in Bereichen mit mittleren Ansprüchen, wie etwa dem Fahrzeugbau, eingesetzt werden [4].

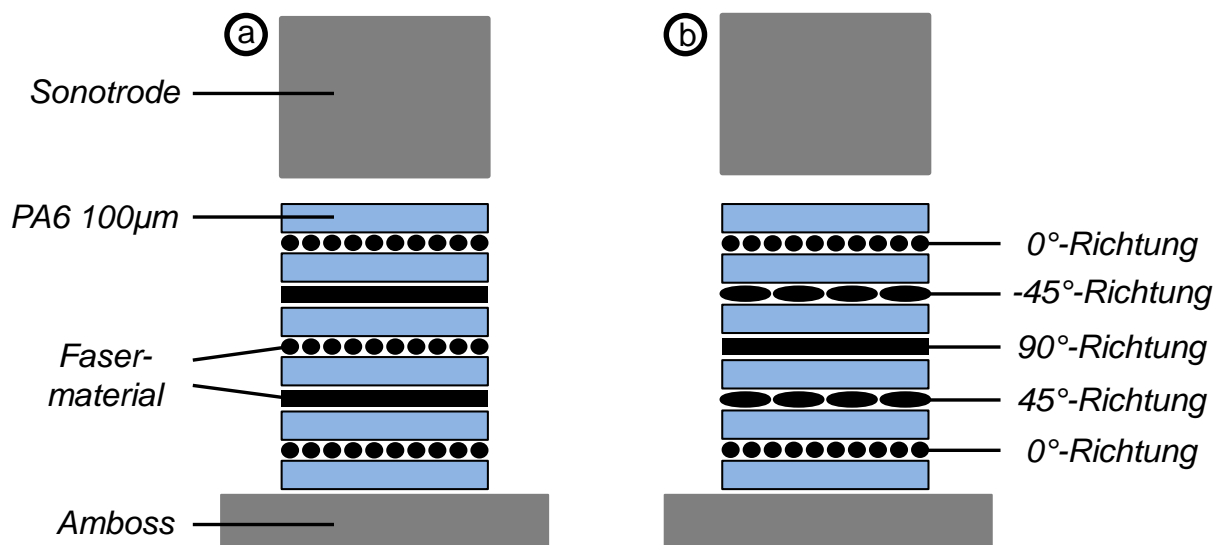
Gleichzeitig wurde deutlich, dass die Verarbeitung von PEEK aufwendiger war als die der übrigen untersuchten Thermoplaste. Hier besteht weiterführender Forschungsbedarf um etwa durch die Verwendung einer Vortemperierung eine einheitliche und reproduzierbare Verschweißung ohne lokale Zersetzungen der CFK zu erreichen.

## 4.5 Ultraschallfertigung multidirektionaler CFK

In den vorherigen Abschnitten der vorliegenden Arbeit wurde die Ultraschallfertigung von CFK zur Herstellung von ein- und mehrlagigen Proben eingesetzt. Hierbei waren die Fasern jedoch stets unidirektional, also über alle Faserlagen in eine Richtung, orientiert. In diesem Abschnitt wird hingegen die Ultraschallfertigung zur Herstellung von multidirektionalen CFK eingesetzt. Dies geschieht auf zwei unterschiedliche Arten: Im Abschnitt 4.5.1 werden unidirektionale Fasern eingesetzt und durch eine gezielte Anordnung der Faserlagen zu multidirektionalen CFK verarbeitet. Im Abschnitt 4.5.2 werden hingegen vorgefertigte Kohlenstofffasergewebe genutzt, bei denen die Fasern bereits in  $0^\circ$  und  $90^\circ$ -Richtung gekreuzt vorliegen, und zur Herstellung von CFK-Platten, den sogenannten Organoblechen, verwendet wurden. Neben der Herstellung der Proben wird in diesem Abschnitt zusätzlich die Durchführung der Zugversuche beschrieben.

### 4.5.1 Variation der Orientierung unidirektionaler Fasern

Eine untersuchte Möglichkeit aus unidirektionalen Fasern, die von einem Roving abgewickelt wurden, multidirektionale CFK-Proben herzustellen, war es, die einzelnen Faserlagen während der Ultraschallfertigung auf dem Amboss zu stapeln und in jeweils unterschiedliche Richtungen anzuordnen. Die nachfolgende Abbildung 4.40 zeigt eine schematische Darstellung des Aufbaus.



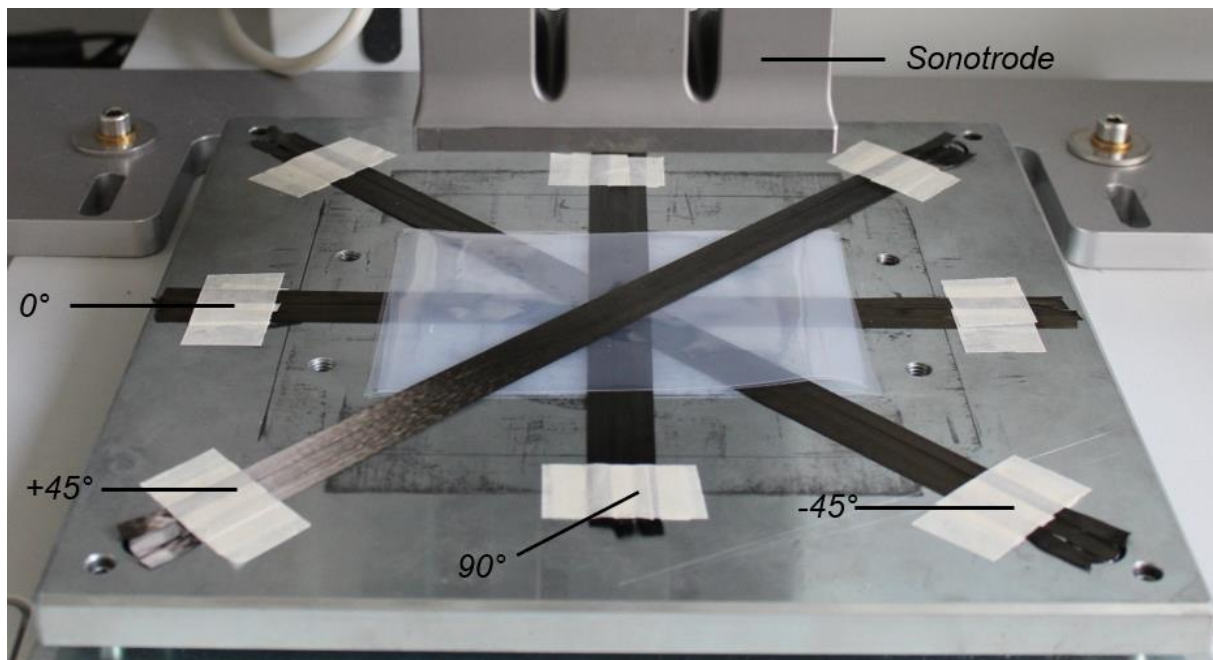
**Abbildung 4.40:** Schematische Darstellung der Faseranordnung bei der Ultraschallfertigung fünflagiger multidirektionaler CFK-Proben. Als Matrix dienen sechs jeweils  $100\ \mu\text{m}$  dicke PA6-Folien. Links: Ausrichtung in  $0^\circ / 90^\circ / 0^\circ / 90^\circ / 0^\circ$ -Richtung, rechts: Ausrichtung in  $0^\circ / 45^\circ / 90^\circ / -45^\circ / 0^\circ$ -Richtung, jeweils von unten nach oben.

Am Beispiel der Herstellung einer fünflagigen CFK-Probe wurde die erste, also dem Amboss nächstplatzierte, Lage der Fasern in  $0^\circ$ -Richtung auf der als Matrix dienenden Polymerfolie positioniert und auf dem Amboss mithilfe von Klebeband vorfixiert, vgl. linker Teil der Abbildung 4.40. Anschließend wurde auf dieser Faserlage eine Lage Polymerfolie und eine weitere Faserlage positioniert und fixiert. Diese Faserlage war jedoch gegenüber der Faserlängsrichtung der ersten Lage um  $90^\circ$  verdreht.

#### 4. Entwicklungsprozess der Ultraschallfertigung von CFK

Im Weiteren wurde die jeweils hinzukommende Faserlage um  $90^\circ$  gegenüber der darunter liegenden Faserlage verdreht auf dem Folien-Faser-Stapel angeordnet und in der Position fixiert. Somit ergab sich eine Orientierung der Faserlagen in  $0^\circ / 90^\circ / 0^\circ / 90^\circ / 0^\circ$ -Richtung, jeweils bezogen auf die erste, also dem Amboss nächstplatzierte Faserlage. Somit verliefen die Fasern insgesamt in zwei Richtungen, also drei Faserlage in  $0^\circ$ -Richtung und zwei Faserlagen in  $90^\circ$ -Richtung. Des Weiteren wurde in einem zusätzlichen Versuch eine Anordnung erprobt, bei der die Fasern in insgesamt vier Richtungen verliefen. Hierfür wurden die Fasern nicht um  $90^\circ$ , sondern um  $\pm 45^\circ$  gegenüber der untersten Faserlage orientiert, sodass eine Anordnung in  $0^\circ / 45^\circ / 90^\circ / -45^\circ / 0^\circ$ -Richtung entstand, vgl. rechter Teil der Abbildung 4.40. Als Matrix dienten jeweils  $100\ \mu\text{m}$  dicke PA6-Folien.

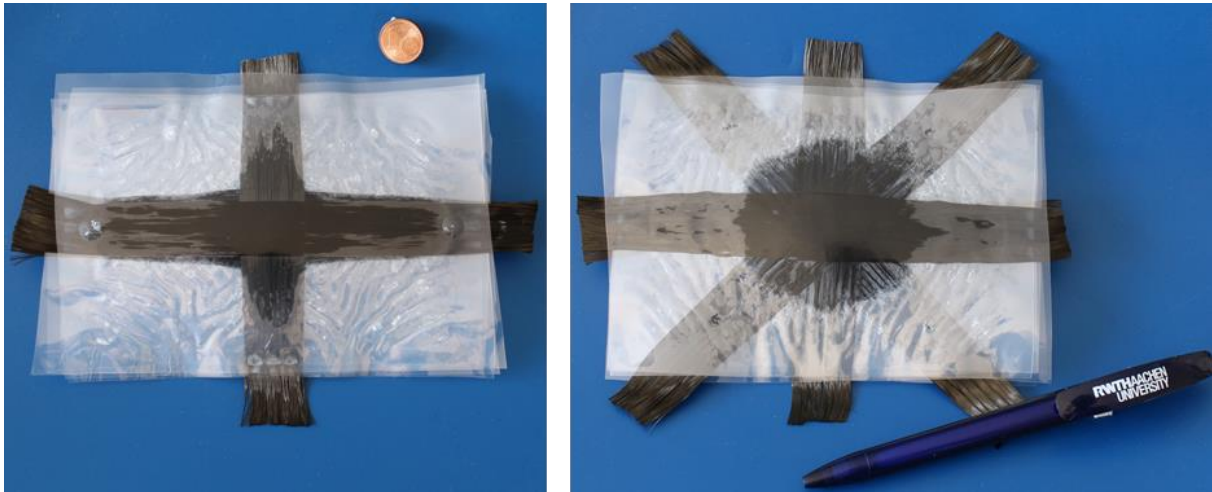
Die nachfolgende Abbildung 4.41 zeigt den Aufbau bei der Ultraschallfertigung der CFK-Probe mit insgesamt vier unterschiedlichen Richtungen der Faserorientierungen. Zur besseren Darstellung wurde die oberste, also in  $0^\circ$ -Richtung verlaufende, Faserlage sowie die äußere PA6-Folie nicht abgebildet.



**Abbildung 4.41:** Anordnung der Folien- und Faserlagen. Die Fasern sind von unten nach oben in  $0^\circ / 45^\circ / 90^\circ / -45^\circ$ -Richtung ausgerichtet. Die oberste, in  $0^\circ$ -Richtung ausgerichtete, Faserlage sowie die äußere Polymerfolie sind für eine bessere Darstellung des Aufbaus nicht abgebildet.

Für die Anordnung und Ausrichtung der Faserlagen wurden auf dem Amboss einer Ultraschallschweißmaschine zunächst Markierungen gesetzt, die geometrischen Verläufe der Faserlagen verdeutlichten. Anhand dieser Markierungen wurden die jeweiligen Faserlagen orientiert. Da die vom Roving abgewickelten Fasern eine Breite von ca. 8 mm hatten, wurden pro Lage drei Faserbündel nebeneinander positioniert und befestigt, um somit eine bereitere CFK-Probe herzustellen. Die Kombination aus Folien- und Faserlagen wurde in ihrer Position zunächst mithilfe von Klebeband vorfixiert. Sobald alle Lagen angeordnet waren, wurde zur endgültigen Befestigung ein Spannrahmen verwendet, wie er bereits im Abschnitt 4.1.1 eingesetzt wurde. An-

schließlich erfolgte die Ultraschallverschweißung der Folien- und Faserlagen. Beide in der Abbildung 4.40 dargestellten Anordnungen wurden hierbei mit den in Tabelle A.21 des Anhanges zusammengefassten Prozessparametern verschweißt. Abbildung 4.42 zeigt CFK-Proben, die mit beiden Anordnungen hergestellt wurden. Die linke Probe hatte eine Faserorientierung in  $0^\circ / 90^\circ / 0^\circ / 90^\circ / 0^\circ$ -Richtung, während die Fasern der rechten Probe in  $0^\circ / 45^\circ / 90^\circ / -45^\circ / 0^\circ$ -Richtung ausgerichtet waren. Als Matrix wurden jeweils sechs 100  $\mu\text{m}$  dicke PA6-Folien verwendet. Die Proben hatten im nicht zurechtgeschnittenen Zustand eine Abmessung in etwa von 60 mm x 120 mm.



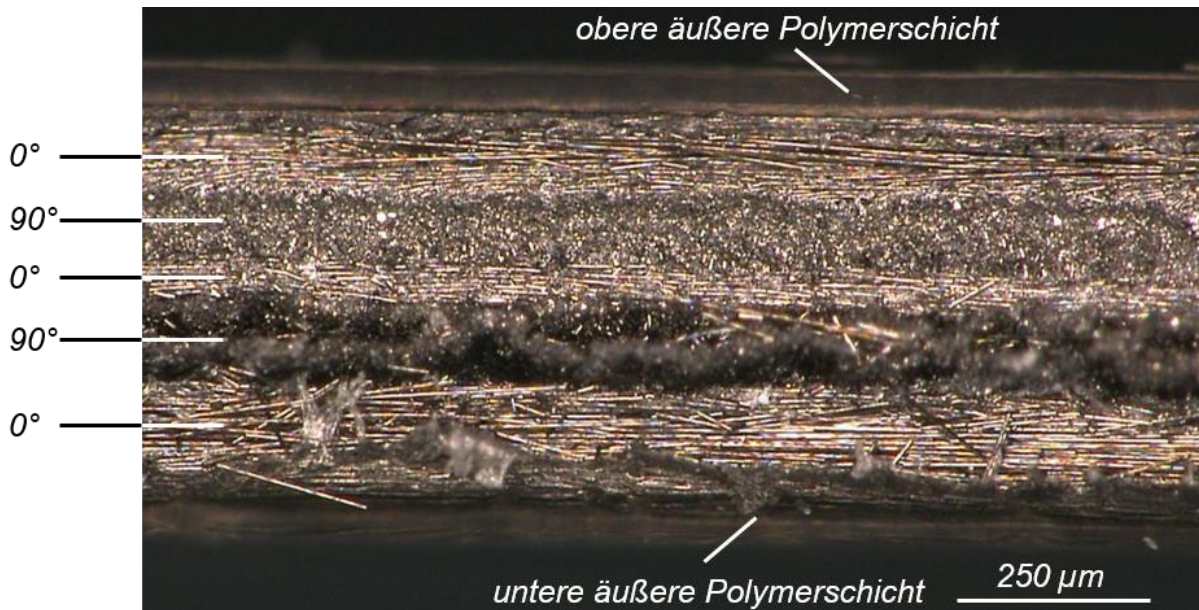
**Abbildung 4.42:** Mithilfe von Ultraschall hergestellte und nicht zurechtgeschnittene CFK-Proben mit multidirektionaler Faserorientierung. Als Matrixmaterial wurden sechs Lagen jeweils 100  $\mu\text{m}$  dicker PA6-Folie verwendet. Links: von unten nach oben in  $0^\circ / 90^\circ / 0^\circ / 90^\circ / 0^\circ$ -Richtung angeordnete Faserlagen, rechts: in  $0^\circ / 45^\circ / 90^\circ / -45^\circ / 0^\circ$ -Richtung angeordnete Faserlagen.

Anhand von Abbildung 4.42 war zu erkennen, dass sich jeweils in der Probenmitte ein Bereich bildete, in dem die meiste Schmelze generiert wurde. Dies konnte zum einen durch die inhomogene Energieabgabe der Sonotrode über die gesamte Geometrie erklärt werden, vgl. Abschnitt 4.1.1. Zum anderen kreuzten sich im Mittelpunkt der Proben alle Faserlagen, sodass in diesem Bereich der Anteil der Grenzflächenreibung während des Ultraschallschweißprozesses besonders hoch war und somit die Bildung der Matrixschmelze begünstigt wurde.

Nach der Herstellung der mehrlagigen CFK-Proben mit unterschiedlicher Faserorientierung wurden in mehrere Richtungen verlaufende Schnitte durch die CFK erstellt. Die Abbildung 4.43 zeigt beispielhaft eine Mikroskopaufnahme eines Schnittes durch eine CFK-Probe mit in  $0^\circ / 90^\circ / 0^\circ / 90^\circ / 0^\circ$ -Richtung orientierten Faserlagen. Der Schnitt verlief in Faserlängsrichtung der in  $0^\circ$ -Richtung orientierten Faserlage. Zu erkennen war zunächst die homogene Verteilung der Fasern über den gesamten Probenquerschnitt. Infolge der im Abschnitt 4.2 durchgeführten Verbesserungen am Ultraschallfertigungsprozess entstanden innerhalb der Probe keine Bereiche mit ungefülltem Matrixmaterial. Zu ergänzen war jedoch, dass um den Aufwand während der Fertigung zu reduzieren, die Dicken der äußeren und inneren Polymerfolien identisch waren und sich somit in den äußeren Matrixschichten Bereiche mit ungefüllter

Matrix bildeten. Diese konnten jedoch durch die Verwendung von dünneren Folien vermieden und der Probenquerschnitt reduziert werden, wodurch die Zugfestigkeit gesteigert wurde, vgl. Abschnitt 4.2.2. Dies erschien jedoch für den Zweck der Untersuchung nicht notwendig und wurde daher nicht durchgeführt.

Des Weiteren konnten anhand der Abbildung 4.43 die Ausrichtungen der jeweiligen Faserorientierungen voneinander unterschieden werden. So wurden, von unten nach oben gezählt, die erste, dritte und fünfte Faserlage in Faserlängsrichtung, die zweite und vierte Schicht orthogonal zur Faserlängsrichtung geschnitten.

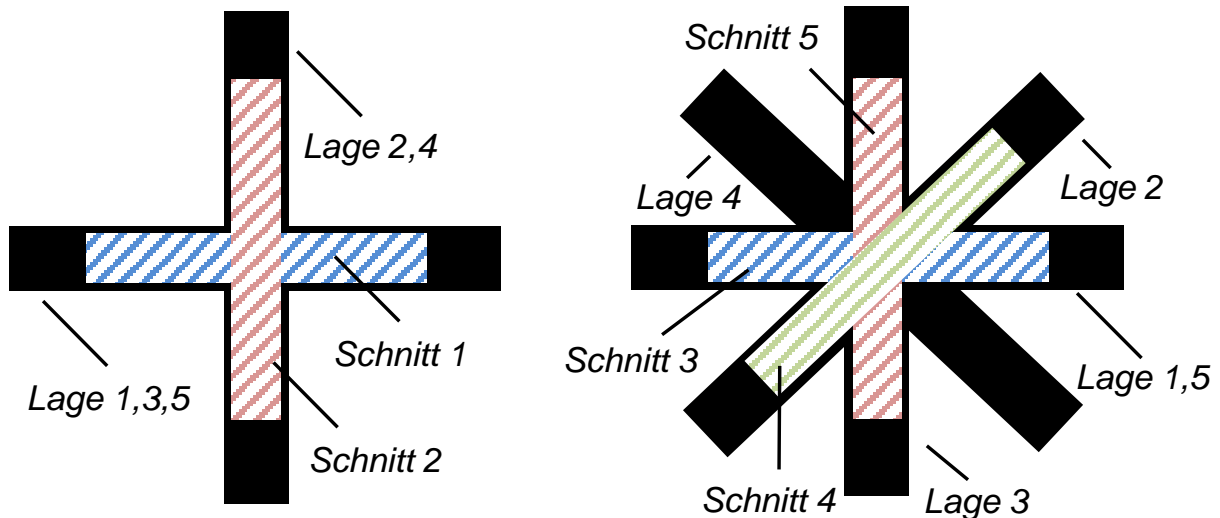


**Abbildung 4.43:** Mikroskopaufnahme eines Schnittes durch eine mittels Ultraschall gefertigte CFK-Probe mit in  $0^\circ / 90^\circ / 0^\circ / 90^\circ / 0^\circ$ -Richtung orientierten Faserlagen.

Zusätzlich zur optischen Untersuchung des Probenquerschnittes wurden Zugversuche zur Bestimmung der mechanischen Eigenschaften durchgeführt. Hierfür wurden die Proben zunächst gemäß dem im Abschnitt 4.1.2 beschriebenen Vorgehen zugeschnitten. Da es sich bei den untersuchten Proben um multidirektionale CFK handelte, die verwendete Zugprüfmaschine jedoch lediglich die Bestimmung der Zugkräfte in Faserlängsrichtung erlaubte, erfolgten die Schnitte in unterschiedlichen Orientierungen, um die Proben anschließend in Faserlängsrichtung einzuspannen und durch Durchführung mehrerer Zugversuche die Zugfestigkeit in unterschiedliche Belastungsrichtungen zu erfassen. Die Anordnung der Probenzuschnitte sowie die Position der zugehörigen Faserlagen sind schematisch in Abbildung 4.44 dargestellt. Lage 1 bezeichnet hierbei beispielsweise die bei dem Fertigungsprozess dem Amboss nächstplatzierte Faserlage, Lage 2 die Faserlage darüber und so weiter. Bei der CFK-Probe mit in  $0^\circ / 90^\circ / 0^\circ / 90^\circ / 0^\circ$ -Richtung orientierten Fasern verlief der Schnitt 1 in  $0^\circ$ -Richtung und Schnitt 2 in  $90^\circ$ -Richtung. Bei der CFK-Probe mit in  $0^\circ / 45^\circ / 90^\circ / -45^\circ / 0^\circ$ -Richtung orientierten Fasern verlief der Schnitt 3 in  $0^\circ$ -Richtung, Schnitt 4 in  $45^\circ$ -Richtung und Schnitt 5 in  $90^\circ$ -Richtung.

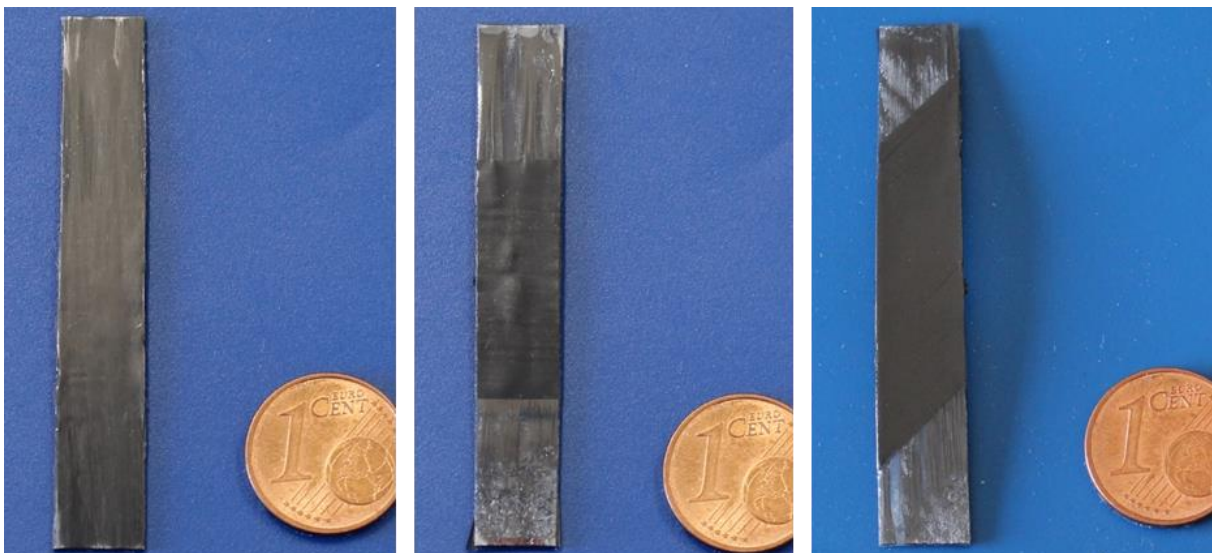
Abbildung 4.45 zeigt beispielhaft drei für den Zugversuch zurechtgeschnittene CFK-Probenscheiben. Im linken Teil der Abbildung 4.45 ist eine Probe des Schnittes 1, in der Mitte

eine Probe des Schnittes 2 und im rechten Teil eine Probe des Schnittes 4 dargestellt. Bei der mittleren und rechten Probe waren die horizontal bzw. diagonal verlaufende äußeren Faserschichten zu erkennen. Bei der linken Probe war dies nicht der Fall, da die äußere, sichtbare Faserschicht in die gleiche Richtung orientiert war wie der Schnitt.



**Abbildung 4.44:** Anordnung der für den Zugversuch durchgeführten Zuschnitte multidirektionaler CFK-Proben. Links: Ausrichtung in  $0^\circ / 90^\circ / 0^\circ / 90^\circ / 0^\circ$ -Richtung, rechts: Ausrichtung in  $0^\circ / 45^\circ / 90^\circ / -45^\circ / 0^\circ$ -Richtung, jeweils von unten nach oben.

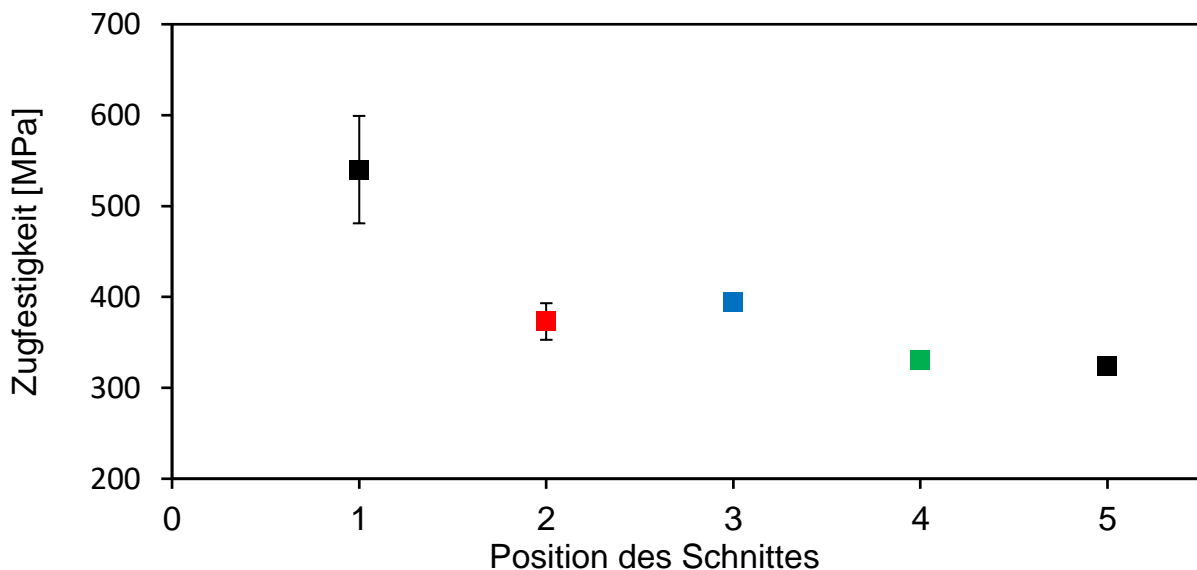
Nach dem Zuschnitt der Proben erfolgte die Durchführung der Zugversuche gemäß dem im Abschnitt 4.1.2 vorgestellten standardisierten Vorgehen. Für die Schnitte 1 und 2 wurden jeweils drei CFK-Proben, für die Schnitte 3 bis 5 jeweils eine CFK-Probe untersucht.



**Abbildung 4.45:** Für den Zugversuch zurechtgeschnittene CFK-Proben mit multidirektional ausgerichteten Faserlagen. Die Schnitte verliefen in  $0^\circ$ -Richtung (links, Schnitt 1),  $90^\circ$ -Richtung (Mitte, Schnitt 2) und  $45^\circ$ -Richtung (rechts, Schnitt 4).

Die nachfolgende Abbildung 4.46 stellt für die mithilfe der Ultraschallfertigung hergestellten multidirektionalen CFK-Proben die im Zugversuch bestimmten mittleren Zug-

festigkeiten sowie die zugehörigen Standardabweichungen in Abhängigkeit der jeweiligen Positionen der Schnitte dar. Die Schnitte 1 und 2 beziehen sich auf die fünf-lagigen CFK-Proben mit den in  $0^\circ$  und  $90^\circ$ -Richtung orientierten Faserlagen. In  $0^\circ$ -Richtung, also dem Schnitt 1, betrug die mittlere Zugfestigkeit  $540 \pm 59$  MPa, entsprechend einer relativen Standardabweichung von ca. 11 %. In  $90^\circ$ -Richtung, also dem Schnitt 2, betrug die Zugfestigkeit hingegen  $373 \pm 20$  MPa, entsprechend einer relativen Standardabweichung von ca. 5 %. Bei den CFK-Proben, bei denen die Faserlagen in  $0^\circ / 45^\circ / 90^\circ / -45^\circ / 0^\circ$ -Richtung orientierten waren, betrugen die Zugfestigkeiten in  $0^\circ$ -Richtung, also dem Schnitt 3, ca. 394 MPa, in  $45^\circ$ -Richtung, also dem Schnitt 4, ca. 330 MPa, und in  $90^\circ$ -Richtung, also dem Schnitt 5, etwa 324 MPa.



**Abbildung 4.46:** In Abhängigkeit der Schnittposition erzielte mittlere Zugfestigkeiten sowie die zugehörigen Standardabweichungen multidirektionaler CFK-Proben mit fünf Faserlagen und sechs als Matrixmaterial dienenden PA6-Folien. Für die Schnitte 1 und 2 wurden jeweils drei Proben untersucht, für die Schnitte 3 bis 5 jeweils eine Probe.

Die Ergebnisse der Zugversuche zeigten, dass die maximale Zugfestigkeit bei dem Schnitt 1 erreicht wurde. Dies war naheliegend, da bei diesem Schnitt von den untersuchten CFK-Proben insgesamt drei Faserlagen mit ihrer Faserlängsrichtung in die Belastungsrichtung orientiert waren und somit die angreifenden mechanischen Kräfte aufnehmen konnten, vgl. Abbildung 4.44. Bei den Schnitten 2 und 3 waren jeweils zwei Faserlagen in Belastungsrichtung orientiert, sodass für diese beiden Fälle eine vergleichbare Zugfestigkeit gemessen wurde. Da bei den Schnitten 4 und 5 jeweils nur eine Faserlage in Belastungsrichtung orientiert war, war die ermittelte Zugfestigkeit zu den anderen relativ gering ausgeprägt.

Zusammenfassend ließ sich sagen, dass die durchgeführten Untersuchungen bestätigt haben, dass mithilfe der Ultraschallfertigung durch unterschiedlich orientierte unidirektionale Faserlagen multidirektionale CFK gefertigt werden konnten. Die Zugfestigkeit der CFK-Proben war hierbei anisotrop und variierte jeweils mit der Belastungsrichtung.

### 4.5.2 Verschweißung von multidirektionalen Geweben

Um die Richtungsabhängigkeit der mechanischen Eigenschaften zu reduzieren und somit quasi-isotrope CFK herzustellen, wurden neben den zuvor beschriebenen unterschiedlich orientierten Lagen unidirektionaler Fasern auch Gewebe verwendet. Bei solchen Geweben handelte es sich ebenfalls um unidirektionale Fasern, die sich jedoch in regelmäßiger Anordnung orthogonal kreuzten und somit miteinander verwoben waren. Bei den meisten Geweben kreuzen sich die Faserstränge in 0°- und 90°-Richtung und haben eine Breite von etwa 1 bis 5 mm. Das verwendete Faser-



**Abbildung 4.47:** Detailaufnahme eines Kohlenstofffasergewebes. Die Breite der sich in 0°- und 90°-Richtung kreuzenden Faserbündel beträgt typischerweise zwischen 1 und 5 mm [62].

material kann hierbei beispielsweise aus Kohlenstoff, Glas oder Aramid hergestellt werden. Gängige Dicken der Gewebe reichen von ca. 200 µm bis zu etwa 1 mm. Die Gewebe werden auf Rollen mit mehreren Metern Breite und beliebiger Länge hergestellt. Sie werden daher vor allem für die Herstellung großflächiger Bauteile wie etwa Motorhauben oder Kofferraumabdeckungen verwendet. Die Wahl des Fasermaterials, die Kreuzungsart sowie die Gewebedicke richten sich nach dem technischen Anwendungsfall. Abbildung 4.47 zeigt eine Detailaufnahme eines beispielhaften Gewebes aus Kohlenstofffasern, bei dem die Fasern in 0°- und 90°-Richtung gewoben sind.

Die Gewebe können entweder in nur einem Prozess direkt zum fertigen CFK-Bauteil oder zunächst zu vorgefertigten Halbzeugen verarbeitet werden. Bei der Herstellung von Halbzeugen aus Kohlenstofffasergewebe werden mehrere Gewebelagen in eine thermoplastische Kunststoffmatrix eingebettet und etwa zu CFK-Platten, den sogenannten Organoblechen, verarbeitet. Diese CFK-Platten haben unterschiedliche Dicken und können im nachgelagerten Prozess erwärmt und zur finalen Bauteilgeometrie umgeformt werden.

Um zu erforschen, ob mithilfe des Verfahrens der Ultraschallfertigung von CFK neben unidirektionalen Fasern auch Kohlenstofffasergewebe eingesetzt und zu ein- oder mehrlagigen CFK-Platten verarbeitet werden konnten, wurde eine Untersuchung durchgeführt. Als Rohmaterial dienten hierbei Gewebe aus sich in 0°- und 90°-Richtung kreuzenden Kohlenstofffasern mit einer Gesamtdicke des Gewebes von ca. 300 µm [63] sowie PA6-Folien mit unterschiedlichen Dicken.

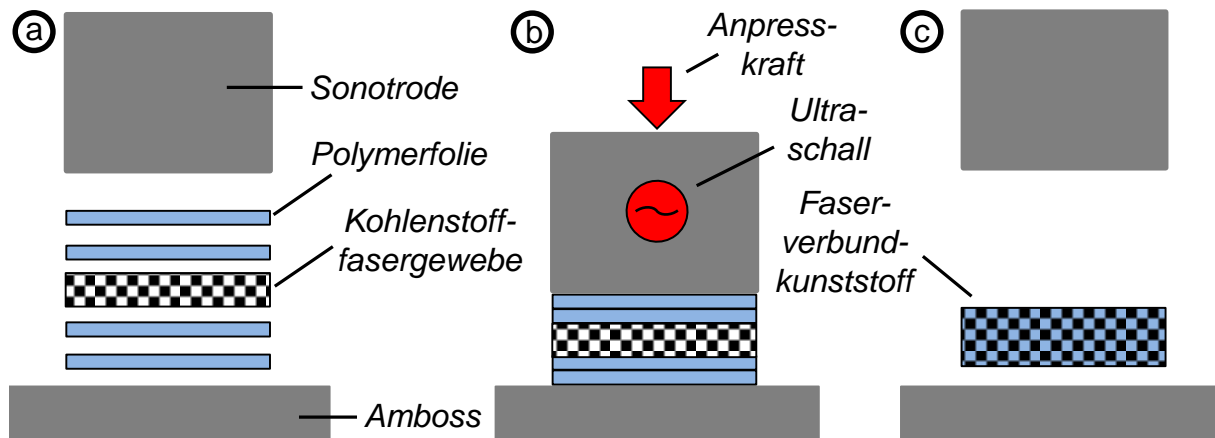
Das Kohlenstofffasergewebe wurde auf einer Rolle mit einer Breite von ca. 1,5 m sowie einer Länge von ca. 3 m geliefert. Zunächst wurde es mit einer Schere so zu- rechtgeschnitten, dass es größer war als die verwendete Sonotrode, die eine Größe von ca. 80 mm × 120 mm hatte. Um ein Verrutschen des Gewebes auf dem Amboss



**Abbildung 4.48:** Zurechtgeschnittenes Gewebe aus Kohlenstofffasern [57].

der Ultraschallschweißmaschine zu vermeiden, wurde der im Abschnitt 4.1 konstruierte und gefertigte Spannrahmen verwendet. Damit dieser Spannrahmen auf der Ambossplatte festgeschraubt werden konnte, mussten in das Gewebe Aussparungen hineingeschnitten werden. Die nebenstehende Abbildung 4.48 stellt das verwendete Kohlenstofffasergewebe nach dem Zugschnitt dar. Die gelbe Markierung verdeutlicht den von der Sonotrode abgedeckten und zu verschweißenden Bereich. Seitlich davon war überschüssiges Gewebematerial, welches von dem Spannrahmen abgedeckt wurde und als Fläche für die Einspannung diente.

Abbildung 4.49 zeigt den schematischen Prozessablauf bei der Herstellung von CFK-Platten mittels Ultraschall. Analog zu dem im Abschnitt 3.1 vorgestellten Verfahren zur Verarbeitung von Fasern, wurde zunächst eine Lage des Gewebes zwischen mehrere als Matrix dienende Polymerfolien aus PA6 gelegt. Um den Anteil der Grenzflächenreibung zu erhöhen, wurden hierbei vier 100 µm dicke Folien anstatt zwei 200 µm dicke Folien verwendet. Die Kombination aus Folien und Geweben wurde unterhalb der Sonotrode auf dem Amboss einer Ultraschallschweißmaschine positioniert und mit dem Spannrahmen befestigt, siehe Schritt a in Abbildung 4.49.

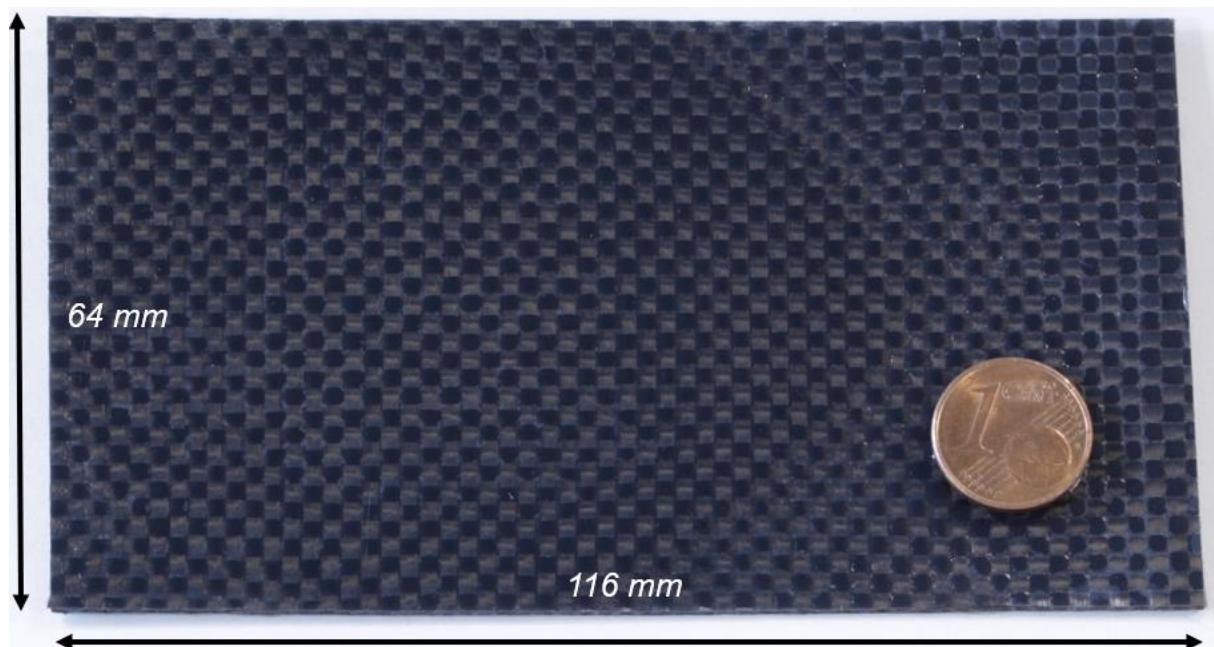


**Abbildung 4.49:** Schematische Darstellung des Prozessablaufes zur Ultraschallfertigung von CFK-Platten aus einem Kohlenstofffasergewebe und Polymerfolien. Positionierung der Folien und des Gewebes auf dem Amboss unterhalb der Sonotrode (a), Kraftaufbau und Auslösen des Ultraschalls (b), Abkühlung und Entnahme des hergestellten CFK.

Anschließend wurde die Sonotrode heruntergefahren und baute eine Kraft von 500 N auf. Sobald diese Kraft erreicht wurde, wurde der Ultraschall mit einer Amplitude von ca. 30,6 µm ausgelöst, siehe Schritt b. Nach 0,5 s wurde die Schweißkraft von 500 N

auf 2000 N erhöht. Nach einer definierten Schweißzeit von 16 s wurde der Ultraschall abgestellt, die Matrix kühlte unter einer Kraft von 2000 N für 5 s aus und erstarrte. Abschließend wurde die Sonotrode hochgefahren und die ultraschallgefertigte CFK-Platte konnte entnommen werden, siehe Schritt c in Abbildung 4.49.

Mithilfe dieses Verfahrens wurden zunächst CFK-Platten mit einer Lage Kohlenstofffasergewebe hergestellt. Anschließend wurde untersucht, ob die Anzahl der Lagen von Gewebe und Folien erhöht und somit dickere CFK-Platten gefertigt werden konnten. Daher wurden zusätzlichen Lagen des 300  $\mu\text{m}$  dicken Gewebes sowie der 100  $\mu\text{m}$  dicken PA6-Folien auf dem Amboss gestapelt und mittels Ultraschall verschweißt. Hierbei zeigte sich, dass es möglich war, bis zu drei Lagen Gewebe sowie acht Lagen PA6-Folien zu verschweißen. Abbildung 4.50 stellt eine nach der Ultraschallfertigung zurechtgeschnittene CFK-Platte, bestehend aus drei Gewebelagen, mit einer Gesamtfläche von 116 mm x 64 mm sowie einer Dicke von 1,2 mm dar. Die verwendeten Parameter sind in Tabelle A.22 des Anhangs zusammengefasst.



**Abbildung 4.50:** Mithilfe von Ultraschall hergestellte und zurechtgeschnittene CFK-Platte. Als Rohmaterial dienten drei Lagen Kohlenstofffasergewebe mit einer Dicke von jeweils 300  $\mu\text{m}$  sowie acht Lagen PA6-Folien mit einer Dicke von jeweils 100  $\mu\text{m}$ . Die Abmessungen der gefertigten Platte waren 116 mm x 64 mm x 1,2 mm [57].

Die durchgeführten Untersuchungen zeigten, dass eine weitere Erhöhung der Lagenanzahl des Gewebematerials nicht möglich war, da aufgrund der eingestellten Prozessparameter sowie der relativ großen Schweißfläche die maximale Leistungsabgabe der verwendeten Ultraschallschweißmaschine bereits ausgereizt war. So reichte die von der Maschine abgegebene Energie nicht mehr aus, um das Matrixmaterial vollständig und homogen über die Schweißfläche verteilt aufzuschmelzen und die Gewebe einzubetten. Um die Anzahl der Gewebelagen sowie die Dicke der CFK-Platten zu erhöhen, wäre daher die Verwendung von leistungsstärkeren Ultraschallschweißmaschinen notwendig. Dies konnte jedoch im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht untersucht werden.

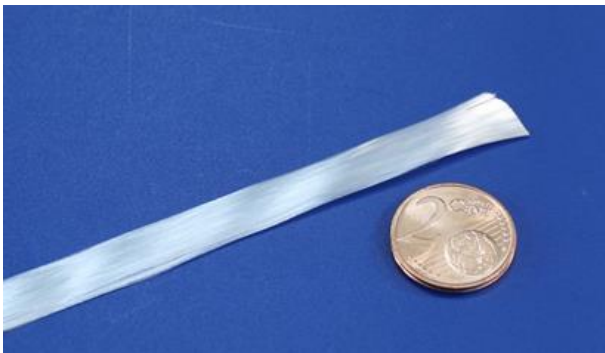


**Abbildung 4.51:** CFK-Platten aus konventioneller Fertigung (links) sowie der Ultraschallfertigung (rechts).

Zusammenfassend ließ sich festhalten, dass es mithilfe der Ultraschallfertigung möglich ist, ein- und mehrlagige CFK-Platten herzustellen. Das Matrixmaterial wurde hierbei vollständig aufgeschmolzen und die Gewebelagen in dieses eingebettet. Abbildung 4.51 zeigt vergleichend zwei CFK-Platten aus konventioneller Herstellung sowie der Ultraschallfertigung. Es konnten Platten mit einer Dicke von bis zu 1,2 mm hergestellt werden. Eine Erhöhung der Dicke wurde jedoch durch die Leistungsgrenze der Maschine beschränkt.

### 4.6 Ultraschallfertigung von GFK

In den vorherigen Abschnitten der vorliegenden Arbeit wurde bereits gezeigt, dass sich ein- und mehrlagige CFK mithilfe von Ultraschall herstellen lassen. In einer abschließenden Versuchsreihe wurde darüber hinaus untersucht, ob sich mit dem gleichen Verfahren neben Kohlenstofffasern auch Glasfasern zu glasfaserverstärkten Kunststoffen (GFK) verarbeiten lassen.



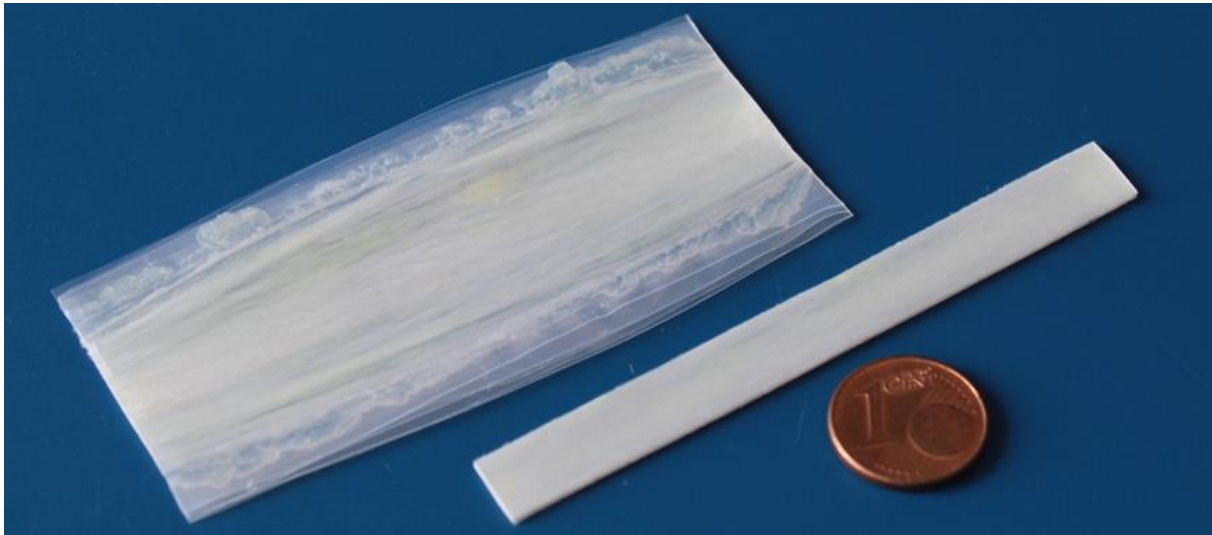
**Abbildung 4.52:** Aufnahme der verwendeten Glasfaser mit einer Breite von ca. 7 mm und einer Dicke von ca. 200 µm.

Als Rohmaterial wurden von einem Roving abgewickelte Glasfasern verwendet. Die Breite eines Faserbündels betrug ca. 7 mm und die Dicke ca. 200 µm [64]. Bei den verwendeten E-CR-1200 Glasfasern, siehe nebenstehende Abbildung 4.52, des Herstellers Mühlmeier GmbH & Co. KG, Bärnau, handelte es sich um sogenannte E-Glasfasern, also Glasfasern für den elektrischen Einsatz. Der Durchmesser eines Faserfilaments betrug in etwa 16 µm [64].

Vergleichbar mit dem im Abschnitt 3.1 beschriebenen Vorgehen zur Herstellung von CFK aus unidirektionalen Kohlenstofffasern, wurde eine Lage Glasfasern zwischen zwei jeweils 100 µm dicken PA6-Folien positioniert, auf dem Amboss befestigt und mit den in der Tabelle A.23 des Anhanges zusammengefassten Prozessparametern verschweißt. Hierbei zeigte sich, dass sowohl die Wahl der Prozessparameter wie Amplitude, Schweißzeit oder Schweißkraft als auch das Schweißergebnis mit dem der CFK-Fertigung vergleichbar waren. So wurde das Polymer vollständig aufgeschmolzen und die Glasfasern konnten in dieses eingebettet werden.

Nach der erfolgreichen Herstellung einer GFK-Probe aus einer Lage Glasfasern und zwei Lagen Polymerfolie wurde anschließend sukzessive die Anzahl der verwend-

ten Lagen von Faser- und Polymermaterial erhöht. Hierbei zeigte sich, dass es möglich war, fünf Lagen Glasfasern und sechs Lagen PA6-Folien mithilfe von Ultraschall zu einer GFK-Probe mit einer Gesamtdicke von ca. 900  $\mu\text{m}$  zu verschweißen. Abbildung 4.53 zeigt die gefertigte Probe. Die verwendeten Parameter sind in der Tabelle A.23 des Anhanges zusammengefasst. Da die maximale Leistungsabgabe der Ultraschallschweißmaschine hierbei nicht ausgereizt wurde, ist davon auszugehen, dass eine weitere Erhöhung der Lagenanzahl möglich ist. Dies wurde jedoch nicht untersucht, da es den Rahmen der vorliegenden Arbeit sprengen würde.



**Abbildung 4.53:** Mit Ultraschall hergestellte GFK-Probe bestehend aus fünf Lagen Glasfasern und sechs Lagen PA6-Folie, vor (links) und nach (rechts) dem Zuschnitt für den Zugversuch.

Um die mechanischen Eigenschaften der hergestellten fünflagigen GFK-Proben zu untersuchen, wurden diese zunächst auf die für die Zugprüfung definierten Abmessungen zurechtgeschnitten, siehe Abbildung 4.53. Anschließend erfolgte die Durchführung der Zugversuche, bei denen insgesamt 16 Proben untersucht wurden. Die mittlere Zugfestigkeit der geprüften GFK-Proben betrug  $314 \pm 27 \text{ MPa}$ , entsprechend einer relativen Standardabweichung von etwa 9 % [57].

Aus dem technischen Datenblatt der verwendeten Glasfasern geht deren Dichte nicht hervor. Um diese jedoch abzuschätzen, wurden Literaturangaben für gängige Fasermaterialien aus E-Glas genutzt, siehe Tabelle 2.2. Mithilfe dieser Angabe wurde die Dichte der Glasfasern zu etwa  $2,54 \text{ g/cm}^3$  geschätzt [2] und anschließend der Faserfüllgrad der hergestellten GFK-Proben zu ca. 48 Vol.-% berechnet. Zu beachten galt hierbei, dass diese Angaben mit Fehlern behaftet waren, da eine genaue Angabe der Dichte der Glasfasern nicht möglich war.

Die Zugfestigkeiten gängiger GFK aus konventioneller Fertigung reichen von etwa 200 MPa in Standardanwendungen bis hin zu ca. 400 MPa in Hochleistungsanwendungen [65]. In diesem Zusammenhang konnte die Zugfestigkeit von ca. 314 MPa der ultraschallgefertigten Proben als relativ hoch angesehen werden. Es konnte daher gefolgert werden, dass mithilfe der Ultraschallfertigung neben CFK auch mechanisch belastbare GFK hergestellt werden können.

### **Zusammenfassung**

In diesem Kapitel wurde zunächst das standardisierte Vorgehen bei der Herstellung der Proben und der Durchführung der Zugversuche beschrieben. Anschließend erfolgten Weiterentwicklungen am Ultraschallfertigungsprozess, die dazu beitrugen, im Inneren der Proben eine homogene Verteilung von Faser- und Matrixmaterial zu erzielen sowie ihre mechanischen Zugfestigkeiten zu steigern. Bei CFK-Proben, die aus acht Faserlagen und neun jeweils 100 µm dicken PA6-Folien bestanden, betrug der Faserfüllgrad 31,6 Vol.-% und die Zugfestigkeit ca. 1,24 GPa.

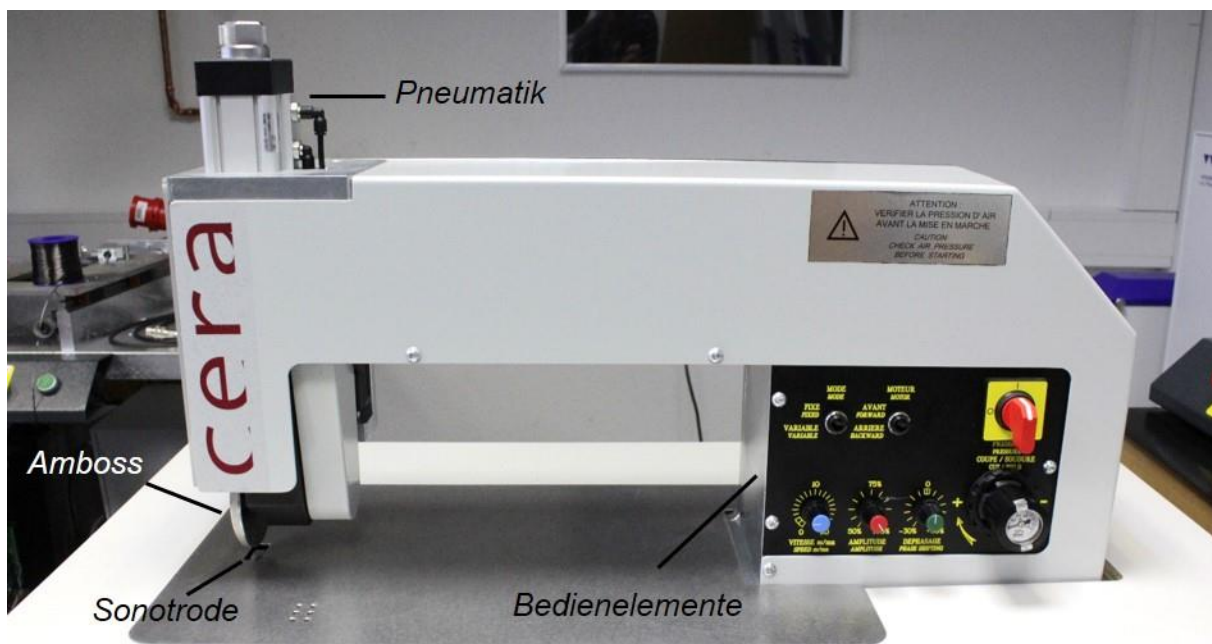
In weiteren Untersuchungen wurde die Anzahl der Faserlagen der ultraschallgefertigten CFK ausgehend von einer Lage sukzessive auf bis zu 20 Lagen erhöht und dadurch CFK mit einer Gesamtdicke von etwa 2,5 mm hergestellt. Darüber hinaus wurde gezeigt, dass für die Ultraschallfertigung von CFK zahlreiche Polymere wie etwa PP, PE, PC, PA6 oder PEEK verwendet werden konnten. Neben unidirektionalen CFK wurden außerdem multidirektionale CFK hergestellt. Abschließend wurde gezeigt, dass mithilfe der Ultraschallfertigung neben Kohlenstoff- auch Glasfasern verarbeitet und GFK hergestellt werden konnten. Dabei wurden ein Faserfüllgrad von ca. 48 Vol.-% und eine Zugfestigkeit von etwa 314 MPa erreicht.

## 5. Anwendungsbeispiele der Ultraschallfertigung von CFK

Während in den vorherigen Kapiteln der systematische Entwicklungsprozess thematisiert wurde, beinhaltet dieses Kapitel ausgewählte Anwendungsbeispiele der Ultraschallfertigung von CFK. In den bisherigen Untersuchungen wurde ein sequenzieller Fertigungsprozess zur Herstellung zweidimensionaler Proben eingesetzt. Als weiterführende Anwendung wird im Abschnitt 5.1 ergänzend die kontinuierliche Ultraschallfertigung von CFK mittels rollender Sonotroden demonstriert. Der Abschnitt 5.2 behandelt hingegen den Einsatz der Ultraschallfertigung zur Herstellung eines dreidimensionalen CFK-Bauteils.

### 5.1 Kontinuierliche Fertigung mittels Rundsonotrode

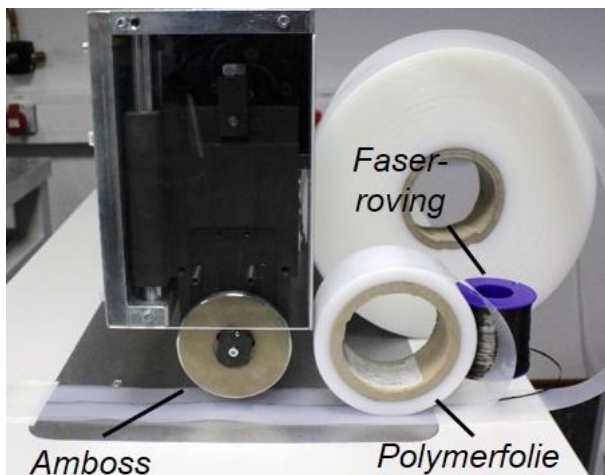
Die in den Kapiteln 3 und 4 beschriebenen Untersuchungen wurden an Ultraschallschweißmaschinen durchgeführt, die sequenziell, oder auch getaktet genannt, arbeiten. Für die industrielle Serienfertigung von Halbzeugen oder Produkten aus CFK werden jedoch insbesondere kontinuierliche Fertigungsprozesse wie etwa das Pultrusionsverfahren eingesetzt, vgl. Abschnitt 2.2. Um zusätzlich die kontinuierliche Ultraschallfertigung von CFK zu erforschen, wurden daher in Zusammenarbeit mit der Firma Weber Ultrasonics, Karlsbad, Untersuchungen durchgeführt. Hierfür wurde die in der Abbildung 5.1 dargestellte Ultraschallschweißmaschine mit einer sogenannten Rundsonotrode verwendet, deren Funktionsprinzip nachfolgend erläutert wird.



**Abbildung 5.1:** Frontansicht einer Ultraschallschweißmaschine mit Rundsonotrode des Herstellers Cera Ultrasonic, Villars, Frankreich.

Analog zum getakteten Prozess werden die zu verschweißenden Proben zunächst zwischen Amboss und Sonotrode positioniert, die allerdings beide in scheibenförmiger Ausführung vorliegen. Mithilfe einer Pneumatik wird der Amboss heruntergefahren und baut einen Druck auf die Probe auf. Anschließend werden in einem Generator Ultraschallschwingungen erzeugt. Diese Schwingungen werden über die Sono-

trode in die zu verschweißende Probe geleitet, erwärmen und schmelzen diese auf. Zusätzlich rotieren während des Ultraschallschweißprozesses sowohl Sonotrode als auch Amboss, sodass eine Vorschubbewegung der verschweißten Probe entsteht.



**Abbildung 5.2:** Seitenansicht der verwendeten Ultraschallschweißmaschine.

Aufgrund der Vorschubbewegung werden Ultraschallschweißmaschinen mit Rundsonotroden vornehmlich für kontinuierliche Verschweißungen eingesetzt. Die miteinander zu fügenden Materialien werden hierbei dem Prozess auf Rollen zugeführt, siehe Abbildung 5.2. Nach der Verschweißung kann das Produkt auf Rollen gewickelt oder zu rechtgeschnitten werden. Mithilfe solcher kontinuierlichen Prozesse von Rolle zu Rolle können Verschweißungen mit einer Länge von mehreren Kilometern hergestellt werden.

An der verwendeten Maschine einstellbare Prozessparameter sind die Amplitude des Ultraschalls, der Druck zwischen Sonotrode und Amboss sowie die Vorschubgeschwindigkeit. Die Frequenz des Ultraschalls beträgt 35 kHz und die Amplitude der Schwingung bis zu 20  $\mu\text{m}$ . Der Amboss hat eine Breite von 8 mm [66]. Somit ist die Schweißbreite ebenfalls auf 8 mm begrenzt.



**Abbildung 5.3:** Aus 3.000 bis 24.000 Einzelfasern bestehende Kohlenstofffasern.

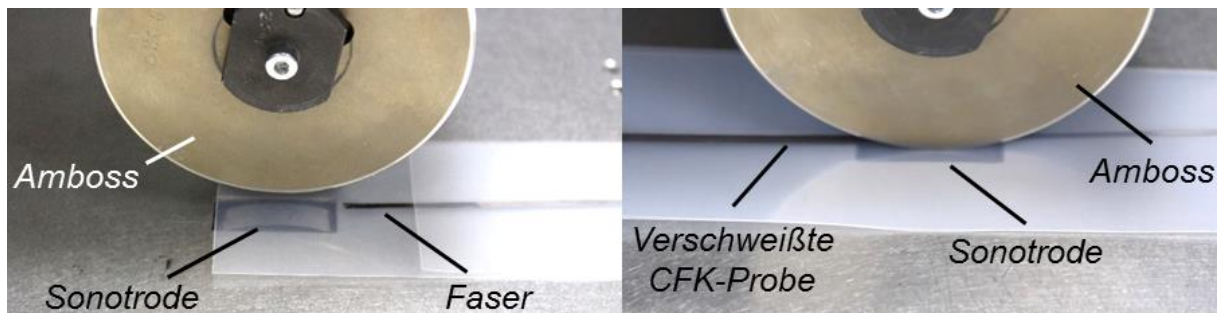
Untersuchungen die in der Abbildung 5.3 dargestellten Kohlenstofffasern verwendet. Es handelte sich hierbei um Fasern aus dem gleichen Grundmaterial, die zu verschiedenen Faserbündeln mit 3.000, 6.000, 12.000 oder 24.000 Einzelfilamenten verarbeitet wurden. Die Fasern wurden gemäß ihrer Anzahl der Einzelfilamente vereinfacht mit 3 K, 6 K, 12 K oder 24 K bezeichnet. Die Breite des Faserbündels betrug in Abhängigkeit der Anzahl der Einzelfilamente etwa 1,5 mm, 2,5 mm, 4 mm und 5 mm. Die Dicke der Faserschichten betrug ca. 50  $\mu\text{m}$ , 100  $\mu\text{m}$ , 150  $\mu\text{m}$  und 300  $\mu\text{m}$ . Bei einer Dichte von 1,77 g/cm<sup>3</sup> betrug die Zugfestigkeit aller Fasern 3,95 GPa, der

Bei der Durchführung der Untersuchungen wurden die bereits zuvor verwendeten Kohlenstofffasern des Herstellers Toho Tenax Europe, Heinsberg, eingesetzt. Da diese jedoch eine Breite von etwa 8 mm hatten und somit genauso breit waren wie der montierte Amboss, konnten die Fasern nicht vollständig verschweißt werden. Es bildeten sich an den Randbereichen des Faserstranges nicht mit der Matrix verschweißte Filamente, die sich lösten und ausfranseten. Daher wurden für die folgenden

Elastizitätsmodul 238 GPa und die Bruchdehnung 1,5 %. Die Einzelfilamente hatten einen Durchmesser von ca. 7  $\mu\text{m}$  [67-70].

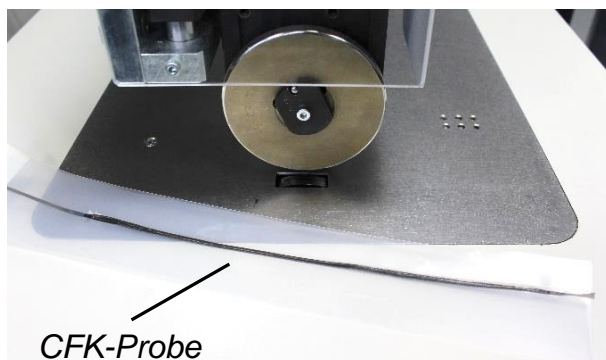
### Herstellung der Proben

In der ersten Versuchsreihe wurden 150  $\mu\text{m}$  dicke PE-Folien als Matrixmaterial verwendet. Diese waren auf eine Breite von 5 cm zurechtgeschnitten und auf Rollen gewickelt. Als Fasermaterial diente die 3 K Faser mit einer Dicke von ca. 50  $\mu\text{m}$  pro Lage und einer Breite von ca. 1,5 mm [67]. In der Versuchsanordnung 1 wurde zunächst eine Lage des Fasermaterials zwischen zwei PE-Folien gelegt und unterhalb des Ambosses positioniert, siehe linken Teil der Abbildung 5.4.



**Abbildung 5.4:** Kontinuierliche Ultraschallfertigung von CFK mit einer Rundsonotrode. Links: Positionierung von 150  $\mu\text{m}$  dicken PE-Folien sowie einer ca. 50  $\mu\text{m}$  dicken Lage des Fasermaterials auf der Sonotrode unterhalb des Ambosses. Rechts: Herabsenken des Ambosses und Durchführung der Ultraschallverschweißung.

Anschließend wurde der Amboss heruntergefahren, ein zuvor am pneumatischen Zylinder eingestellter Druck zwischen Amboss und Probe von ca. 0,3 MPa aufgebaut und der Ultraschall mit einer maximalen Amplitude von bis zu 20  $\mu\text{m}$  ausgelöst. Zeitgleich mit der Auslösung des Ultraschalls setzte die Rotationsbewegung von Amboss und Sonotrode ein, sodass die Faser-Folien-Kombination mit einer ebenfalls zuvor eingestellten Vorschubgeschwindigkeit von 4 m / min gezogen und verschweißt wurde, siehe rechter Teil der Abbildung 5.4. Die eingestellten Parameter und verwendeten Versuchsanordnungen aller beschriebenen Untersuchungen sind in der Tabelle A.24 des Anhangs zusammengefasst.

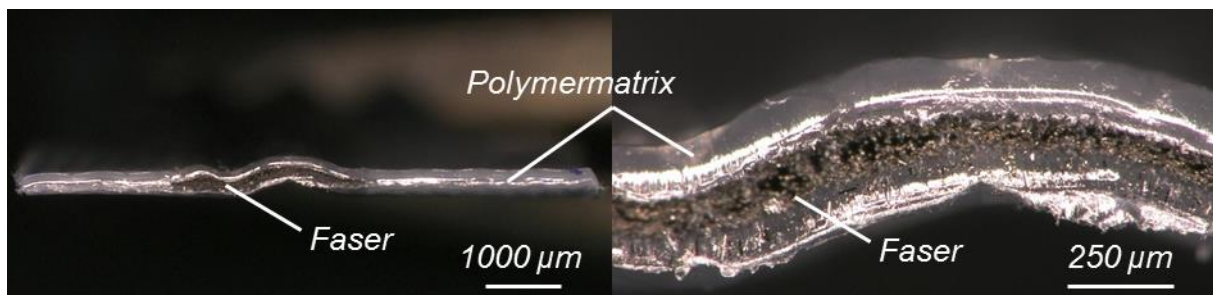


**Abbildung 5.5:** Ultraschallgefertigte CFK-Probe der Versuchsanordnung 1 mit einer Länge von ca. 30 cm.

Abbildung 5.5 zeigt die mit einer Rundsonotrode hergestellte CFK-Probe der Versuchsanordnung 1. Die Länge der Probe betrug etwa 30 cm und die Dicke ca. 330  $\mu\text{m}$ . In den durchgeführten Untersuchungen wurde kein Aufbau für die Verschweißung von Rolle zu Rolle verwendet. Daher war es während des Schweißprozesses notwendig, die Faser-Folien-Kombination händisch in Fasersrichtung vorzuspannen und unter der Sonotrode zu führen. Durch eine Erwei-

terung des Aufbaus ist es allerdings denkbar, dass die CFK-Fertigung in einem industriellen Prozess kontinuierlich und automatisiert von Rolle zu Rolle erfolgen kann.

Die nachfolgende Abbildung 5.6 zeigt eine mikroskopische Aufnahme eines senkrecht zur Faserlängsrichtung orientierten Schnittes durch die in Versuchsanordnung 1 hergestellte CFK-Probe. Im linken Teil der Abbildung ist eine Gesamtansicht der Probe dargestellt. Es ist zu erkennen, dass sich im Bereich der Probenmitte eine Wölbung bildete. Diese Wölbung resultierte aus einer leichten Schiefstellung von Amboss und Sonotrode an der verwendeten Ultraschallschweißmaschine. Aufgrund eines hohen zeitlichen Aufwandes zur Einstellung der Parallelität, konnte diese Schiefstellung während der durchgeführten Untersuchungen nicht korrigiert werden. Es war jedoch davon auszugehen, dass eine parallele Ausrichtung von Amboss und Sonotrode erreicht und somit ebene Proben hergestellt werden könnten.



**Abbildung 5.6:** Quer zur Faserlängsrichtung verlaufender Schnitt durch eine in der Versuchsanordnung 1 hergestellte CFK-Probe aus zwei 150 µm dicken PE-Folien und einer 50 µm dicken Lage der 3 K Faser. Die Dicke der Probe betrug ca. 330 µm.

Der rechte Teil der Abbildung 5.6 zeigt einen vergrößerten Ausschnitt des Bereiches der verschweißten Faser. Zu erkennen ist, dass trotz nicht paralleler Ausrichtung von Amboss und Sonotrode die Faser vollständig verschweißt und in die Polymermatrix eingebettet wurde. Jedoch war der hergestellte CFK inhomogen, da sowohl die Faser- als auch die Matrixlagen erkennbar waren und voneinander unterschieden werden konnten. Demnach lag hierbei kein homogener Verbundwerkstoff vor, wie er beispielsweise in Abschnitt 4.2.3 hergestellt wurde. Nach der vollständigen Verschweißung einer 50 µm dicken Faserschicht war überschüssiges und nicht mit Fasern gefülltes Matrixmaterial vorhanden. Dies ließ darauf schließen, dass für die vollständige Verschweißung auch weniger Matrixmaterial genügen würde. Somit könnte der Faserfüllgrad ultraschallgefertigter CFK-Proben etwa durch die Verwendung von dünneren PE-Folien weiter gesteigert werden.

Nach der Fertigung der CFK-Probe der Versuchsanordnung 1 fokussierten weiterführende Untersuchungen auf die Erhöhung der Anzahl von Folien-Faser-Schichten der CFK-Proben. Gemäß dem zuvor beschriebenen Vorgehen wurde hierfür in der Versuchsanordnung 2 eine zusätzliche PE-Folie sowie eine weitere Faserlage unter dem Amboss positioniert und mit den in Tabelle A.24 angegebenen Prozessparametern verschweißt. Die Dicke der hergestellten Probe betrug ca. 510 µm. Da auch bei dieser Anordnung die Fasern in das Matrixmaterial vollständig eingebettet wurden, wurde abschließend in der Versuchsanordnung 3 eine CFK-Probe aus vier PE-Folien sowie drei Lagen Fasern hergestellt. Der linke Teil der Abbildung 5.7 zeigt eine Auf-

nahme der hergestellten Probe. Es ist zu erkennen, dass die Fasern über die gesamte Breite des Ambosses von 8 mm verschweißt wurden. Die Gesamtlänge der Probe betrug in etwa 30 cm.



**Abbildung 5.7:** In der Versuchsanordnung 3 hergestellte CFK-Probe aus vier Lagen PE-Folien mit einer Dicke von jeweils  $150\ \mu\text{m}$  sowie drei Lagen 3 K Fasern mit einer Dicke von jeweils ca.  $50\ \mu\text{m}$ . Die Gesamtdicke der Probe betrug ca.  $690\ \mu\text{m}$ . Links ist die Draufsicht und rechts ein Schnitt quer zur Faserlängsrichtung zu sehen.

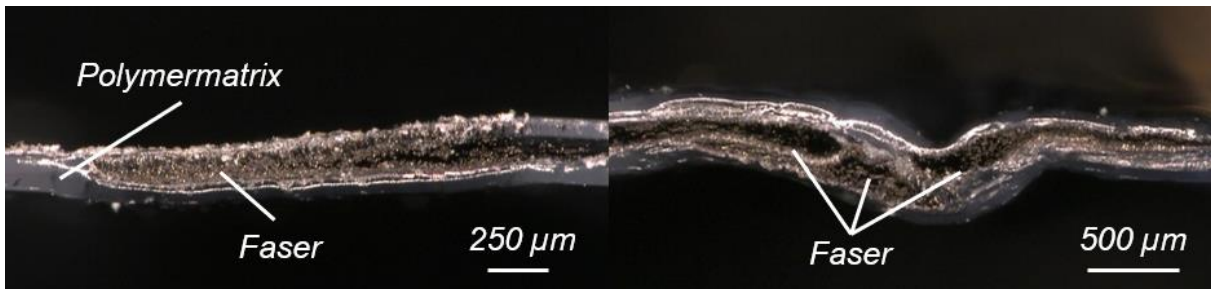
Anhand der Mikroskopaufnahme des Probenquerschnittes im rechten Teil der Abbildung 5.7 war zu erkennen, dass sich die drei Faserlagen nicht genau übereinander befanden, sondern jeweils leicht seitlich verschoben waren. Dies konnte auf die händische Vorspannung zurückgeführt werden, bei der die aufgebrachte Vorspannkraft nicht für eine konstante und genaue Positionierung der Fasern gereicht hatte. Die Verschiebung der Faserlagen wurde zusätzlich durch die Schiefstellung von Amboss und Sonotrode begünstigt.

In der zweiten Versuchsreihe wurde untersucht, ob in der kontinuierlichen Ultraschallfertigung von CFK neben PE auch andere Polymere als Matrixmaterial verarbeitet werden konnten. Hierfür wurden in den weiteren Untersuchungen  $100\ \mu\text{m}$  dicke PA6-Folien als Matrix verwendet. Als Fasermaterial diente weiterhin die 3 K Faser. Analog zu dem vorherigen Versuch, wurde zunächst in Versuchsanordnung 4 eine Lage der Fasern zwischen zwei PA6-Folien positioniert und verschweißt. Die hergestellte Probe hatte eine Dicke von ca.  $230\ \mu\text{m}$  und eine Länge von ca. 30 cm. Alle Fasern wurden hierbei vollständig verschweißt. Darauf aufbauend wurden in Versuchsanordnung 5 und 6 jeweils eine PA6-Folie sowie eine Faserlage hinzugefügt und somit die Gesamtdicke der Faser-Folien-Kombination erhöht. Die Länge der Proben betrug erneut in etwa 30 cm und die Dicke in der Versuchsanordnung 5 ca.  $370\ \mu\text{m}$  bzw. etwa  $490\ \mu\text{m}$  in der Versuchsanordnung 6. Auch bei diesen Anordnungen wurden die Faserlagen jeweils vollständig verschweißt und das Matrixmaterial eingebettet.

Die nachfolgende Abbildung 5.8 stellt mikroskopische Aufnahmen von Schnitten durch die in der Versuchsanordnung 4 und 6 hergestellten Proben dar. Der linke Teil der Abbildung zeigt einen aus zwei  $100\ \mu\text{m}$  dicken PA6-Folien sowie einer Lage der 3 K Faser bestehenden CFK. Die Faserlage konnte vollständig verschweißt und in der Matrix eingebettet werden. Im Bereich der Verschweißung ist weiterhin zu erkennen, dass die Inhomogenität gegenüber den zuvor hergestellten Proben abgenommen hatte, vgl. Abbildung 5.5. Dies konnte darauf zurückgeführt werden, dass beispielsweise gegenüber der Versuchsanordnung 1, bei der zwei jeweils  $150\ \mu\text{m}$  dicke

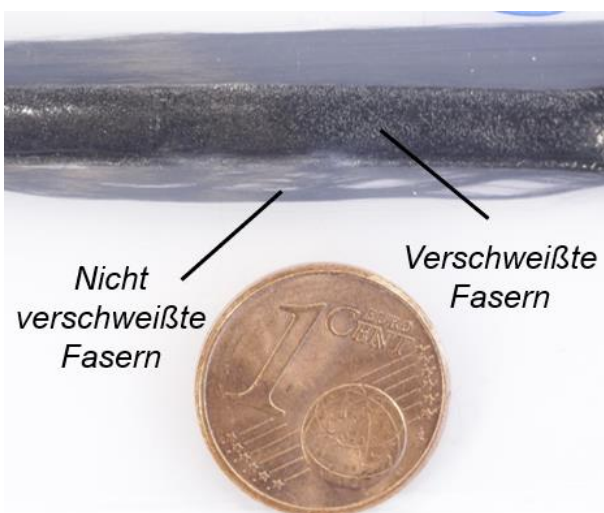
PE-Folien verwendet wurden, weniger Matrixmaterial zur Fertigung des CFK verwendet wurde. Somit entstand nach der Verschweißung insgesamt weniger überschüssige Matrix, was zu einer gleichmäßigen Einbettung der Fasern und letztlich zu einer homogenen Verteilung von Faser- und Matrixmaterial im CFK führte.

Im rechten Teil der Abbildung 5.8 ist eine CFK-Probe der Versuchsanordnung 6 dargestellt, bestehend aus drei Lagen 3 K Fasern sowie vier Lagen PA6-Folie. Analog zu der vergleichbaren Probe mit PE-Matrix, konnte auch hierbei eine Verschiebung der einzelnen Faserlagen festgestellt werden. Zusätzlich trat infolge einer nicht parallelen Ausrichtung von Amboss und Sonotrode eine Wölbung der Probe auf.



**Abbildung 5.8:** Schnitte quer zur Faserlängsrichtung. Links: In der Versuchsanordnung 4 hergestellte CFK-Probe aus zwei jeweils 100 µm dicken PA6-Folien sowie einer Lage 3 K Faser. Die Dicke der Probe betrug 230 µm. Rechts: Eine aus vier 100 µm dicken Lagen PA6-Folie sowie drei jeweils ca. 50 µm dicken Lagen 3 K Fasern gefertigte Probe der Versuchsanordnung 6 mit einer Dicke von ca. 490 µm.

In der dritten Versuchsreihe wurde neben dem Matrixmaterial zusätzlich das verwendete Fasermaterial variiert. Als Matrix dienten 200 µm dicke PP-Folien. Bei allen Versuchsanordnungen wurde jeweils eine Lage der Fasern zwischen zwei Folien positioniert und verschweißt.



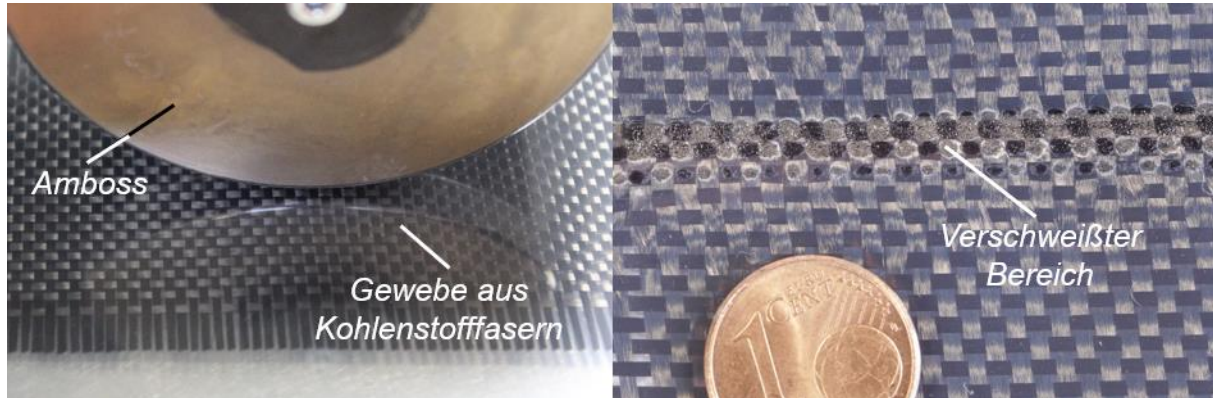
**Abbildung 5.9:** Draufsicht auf eine in der Versuchsanordnung 10 hergestellte CFK-Probe. Zu erkennen ist der verschweißte Bereich mit einer Breite von 8 mm sowie beidseitig davon unverschweißte Fasern.

In den Versuchsanordnungen 7 bis 9 wurden die 3 K, 6 K und 12 K Fasern verwendet. Sie ließen sich vollständig zu jeweils etwa 30 cm langen CFK-Proben mit einer Dicke von ca. 410 µm, 450 µm und 500 µm verschweißen. In der Versuchsanordnung 10 wurde die 24 K Faser verwendet. Eine Faserlage hatte eine Breite von ca. 5 mm und eine Dicke von ca. 300 µm. Infolge des bei der Verschweißung wirkenden Druckes zwischen Amboss und Fasern, wurde die Faserlage zusammengedrückt und dehnte sich beidseitig in ihrer Breite aus, vgl. nebenstehende Abbildung 5.9. Bei der Durchführung der Verschweißung zeigte sich, dass die Fasern nicht vollständig in die Matrix eingebettet

werden konnten. Der verschweißte und in die Matrix eingebettete Bereich betrug wie die Breite des Ambosses ca. 8 mm. Darüber hinaus befanden sich an beiden Rändern des verschweißten Bereiches nicht verschweißte Fasern, die sich lösten und ausfransten. Insgesamt verteilte sich die Faser nach der Verschweißung auf einer Breite von ca. 12 mm. Die Gesamtdicke der hergestellten Probe betrug ca. 650  $\mu\text{m}$ .

Abschließend fokussierte die vierte Versuchsreihe auf die Verschweißung von Kohlenstofffasergeweben. Bei dem verwendeten Gewebe handelte es sich um ca. 50  $\mu\text{m}$  dicke Faserbündel, die in einer 0° und 90° Anordnung gewoben und zu einem einlagigen Gewebe verarbeitet wurde. Das Gewebe hatte eine Dicke von etwa 100  $\mu\text{m}$ . Als Matrixmaterial dienten zwei jeweils 200  $\mu\text{m}$  dicke PA6-Folien.

Das Gewebe wurde zunächst auf eine Größe von 5 cm x 10 cm zurechtgeschnitten und zwischen zwei PA6-Folien gelegt. Dann wurde die Folien-Gewebe-Kombination unter dem Amboss der Ultraschallschweißmaschine positioniert, vgl. Abbildung 5.10. Der Amboss wurde heruntergelassen und ein Druck von 0,3 MPa aufgebaut. Anschließend wurde der Ultraschall ausgelöst und das Gewebe mit der Matrix verschweißt. Die Länge des verschweißten Bereiches entsprach der Gewebelänge von 10 cm und die Breite der des Ambosses von ca. 8 mm. Der rechte Teil der Abbildung 5.10 zeigt den verschweißten Bereich. Infolge der Schiefstellung von Amboss und Sonotrode ist eine ungleichmäßige Verschweißung über die Breite des Ambosses zu erkennen. So ist etwa der obere Rand des verschweißten Bereiches stärker aufgeschmolzen als der untere.

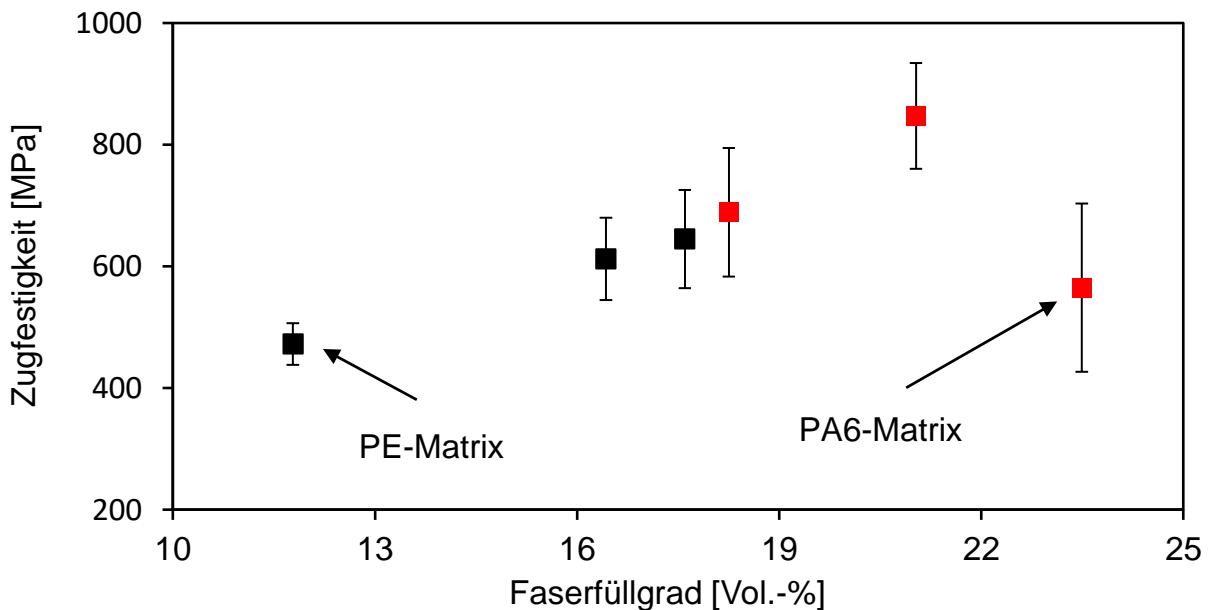


**Abbildung 5.10:** Ein mithilfe einer Rundsonotrode verschweißtes Kohlenstofffasergewebe mit einer Dicke von ca. 100  $\mu\text{m}$ . Als Matrixmaterial dienten zwei PA6-Folien mit einer Dicke von jeweils 200  $\mu\text{m}$ . Im rechten Teil der Abbildung ist der ungleichmäßige Verlauf der Schweißnaht infolge einer nicht parallelen Ausrichtung von Amboss und Sonotrode zu erkennen.

### Untersuchung der mechanischen Eigenschaften

Im Anschluss an die Herstellung wurden zur Bestimmung ihrer mechanischen Eigenschaften die ultraschallgefertigten Proben zunächst auf eine Länge von 55 mm sowie eine der verwendeten Faser entsprechende Breite zurechtgeschnitten. Für jede Probe wurden Breite und Dicke gemessen und daraus die Probenquerschnittsfläche bestimmt. Des Weiteren wurden alle Proben mithilfe einer Mikrowaage gewogen und ihr Faserfüllgrad berechnet. Anschließend erfolgte die Durchführung der Zugversuche.

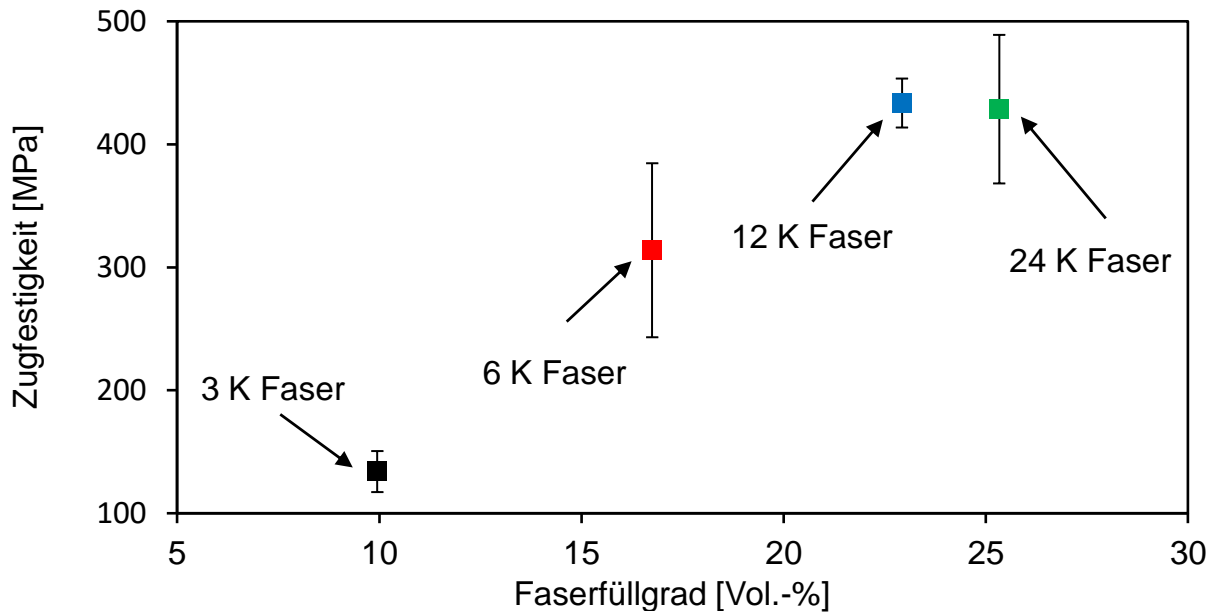
Abbildung 5.11 stellt die mittleren Zugfestigkeiten und Standardabweichungen der hergestellten CFK-Proben für die Versuchsanordnungen 1 bis 6 dar. Die schwarzen Messpunkte beziehen sich auf die PE-Matrix und die roten auf die PA6-Matrix. Pro Messpunkt wurden fünf Proben hergestellt und untersucht.



**Abbildung 5.11:** Mittlere Zugfestigkeiten sowie die zugehörigen absoluten Standardabweichungen der in den Versuchsanordnungen 1 bis 6 hergestellten CFK. Pro Messpunkt wurden fünf Proben hergestellt und vermessen.

Bei der Verwendung der 3 K-Fasern und den 150 µm dicken PE-Folien wurden bei den hergestellten CFK-Proben, in Abhängigkeit der Faser- und Folienlagenanzahl, Faserfüllgrade von etwa 12 bis 18 Vol.-% erzielt. Die ermittelten Zugfestigkeiten stiegen von  $472 \pm 34$  MPa bis auf  $612 \pm 68$  MPa an. Wurden hingegen jeweils 100 µm dicke PA6-Folien als Matrix eingesetzt, wurden Faserfüllgrade von etwa ca. 18 bis zu 24 Vol.-% sowie zugehörige Zugfestigkeiten von bis zu  $847 \pm 87$  MPa erreicht. Die relativen Standardabweichungen der Messpunkte betragen etwa 7 bis 15 %. Die Standardabweichung des letzten Messpunktes erschien mit ca. 24 % im Vergleich zu den anderen relativ stark ausgeprägt. Dies ließ sich jedoch mit der bereits beschriebenen Feststellung erklären, wonach bei mehrlagigen Proben sich die einzelnen Faserlagen infolge zu geringer Vorspannung bewegten und verrutschen. Das führte zu einer schlechteren Verschweißung der einzelnen Lagen, sodass diese während der Zugprüfung bereits unter einer vergleichsweise geringen mechanischen Last versagten. Da infolge der Zunahme von zusätzlichen Faser-Folien-Lagen zudem die Querschnittsfläche der Probe um einen größeren Faktor anstieg als die maximale Zugkraft beim Bruch, folgte daraus, dass die Zugfestigkeit trotz einer Zunahme der maximalen Zugkraft beim Bruch abnahm.

Anschließend wurden die Zugfestigkeiten der in den Versuchsanordnungen 7 bis 10 hergestellten Proben bestimmt und in Abbildung 5.12 zusammengefasst. Für CFK-Proben mit den 3 K und 6 K Fasern wurden pro Messpunkt fünf Proben hergestellt, für die Proben mit den 12 K und 24 K Fasern jeweils drei.



**Abbildung 5.12:** Mittlere Zugfestigkeiten sowie die zugehörigen Standardabweichungen ultraschallgefertigter CFK-Proben. Als Fasermaterial dienten 3 K, 6 K, 12 K und 24 K Fasern. Als Matrixmaterial zwei jeweils 200  $\mu\text{m}$  dicke PP-Folien.

Sowohl die Zugfestigkeit als auch der Faserfüllgrad stiegen mit der Dicke und Breite der verwendeten Fasern. Bei der Verwendung der 24 K Faser in der Versuchsanordnung betrug der Faserfüllgrad der hergestellten Proben ca. 25 Vol.-%. Allerdings fiel im Vergleich zu den anderen Proben die Zugfestigkeit auf  $429 \pm 60$  MPa ab. Ein Abfall der Zugfestigkeit bei Zunahme des Faserfüllgrades konnte damit erklärt werden, dass die nicht verschweißten Fasern, vgl. Abbildung 5.9, während der Zugprüfung bei einer Zugbelastung durchrutschten und somit nicht zur Lastaufnahme genutzt werden konnten.

Im Bereich der Luftfahrt eingesetzte CFK mit unidirektional orientierten Fasern aus konventioneller Fertigung weisen bei einem Faserfüllgrad von etwa 48,5 Vol.-% eine Zugfestigkeit von ca. 1,9 MPa auf [60]. Mittels der kontinuierlichen Ultraschallfertigung hergestellte CFK-Proben bestehend aus der 12 K Faser und PP als Matrixmaterial erreichten bei einem Faserfüllgrad von ca. 23 Vol.-% eine Zugfestigkeit von  $434 \pm 20$  MPa. Bei vergleichbarem Faserfüllgrad betrug somit die Zugfestigkeit der in der vorliegenden Arbeit gefertigten Proben in etwa 48 % der Maximalwerte von CFK aus konventioneller Fertigung. Aufgrund des bestehenden Weiterentwicklungspotenzials des Verfahrens der kontinuierlichen Ultraschallfertigung von CFK ist daher davon auszugehen, dass die Zugfestigkeiten der CFK durch Optimierungen am Prozess sowie der Steigerung des Faserfüllgrades erhöht werden können. So kann beispielsweise der Faserfüllgrad der hergestellten Proben durch das Verwenden dünnerer Folien weiter gesteigert werden, siehe ausführliche Beschreibung im Kapitel 4.

## 5.2 Herstellung dreidimensionaler Bauteile

Die in dem Kapitel 4 durchgeführten Untersuchungen zeigten, dass es mithilfe der Ultraschallfertigung möglich war, FVK bestehend aus Glas- oder Kohlenstofffasern, Geweben sowie verschiedenen Matrixmaterialien, Faserfüllgraden und Dicken her-

zustellen. Die bisherigen Versuche beschränkten sich jedoch auf die Fertigung von ebenen FVK. Daher sollte in einer weiterführenden Untersuchung die Herstellung dreidimensionaler Bauteile erprobt werden. Anhand einer mit institutsinternen Mitteln hergestellten, geometrisch einfach gestalteten Kontur sollten die Potenziale aber auch mögliche auftretende Probleme bei Ultraschallfertigung von dreidimensionalen faserverstärkten Bauteilen untersucht werden. Als Fasermaterial standen Kohlenstofffasergewebe und als Matrixmaterial PA6-Folein jeweils in verschiedenen Dicken zu Verfügung. Die in diesem Abschnitt vorgestellten Arbeiten wurden in [13] ausführlich beschrieben.

Zu Beginn der Untersuchung erfolgten Vorversuche, bei denen der Einfluss der einstellbaren Prozessparameter wie etwa Schweißzeit, Schweißkraft oder Amplitude des Ultraschalls erforscht wurden. Weiterhin war es das Ziel der Voruntersuchungen, eine geeignete Materialdicke für Fasern und Folien sowie eine entsprechende Anordnung der einzelnen Lagen zu finden, um mittels Ultraschall eine vollständig verschweißte CFK-Platte herzustellen. Auf Basis dieser Anordnung sollte weiterführend die Herstellung des dreidimensionalen Bauteils erfolgen. Um die Einspannung der Fasern und Folien zu vereinfachen, sollte nur eine Lage Kohlenstofffasern verwendet werden. Als Fasermaterial wurde daher ein Gewebe aus Kohlenstofffasern mit einer Dicke von ca. 450  $\mu\text{m}$  eingesetzt [71].

Die Voruntersuchungen zeigten, dass das Gewebe bei der Verwendung von insgesamt vier PA6-Folien vollständig und homogen verschweißt werden konnte. Bei der gewählten Versuchsanordnung wurde das Gewebe zwischen die vier PA6-Folien gelegt, wobei die beiden dem Gewebe zugewandten Folien eine Dicke von jeweils 160  $\mu\text{m}$  und die beiden äußeren Folien eine Dicke von 80  $\mu\text{m}$  hatten, vgl. Datenblatt in Abbildung A.4. Vor der Verschweißung betrug die Dicke der Folien-Gewebe-Kombination folglich 930  $\mu\text{m}$ . Nach der Verschweißung betrug die Dicke ca. 730  $\mu\text{m}$ , was damit erklärt werden konnte, dass das schmelzflüssige Polymer sich in die Zwischenräume des Gewebes gelegt hatte. Die verwendeten Prozessparameter sind in der Tabelle A.25 des Anhanges zusammengefasst.



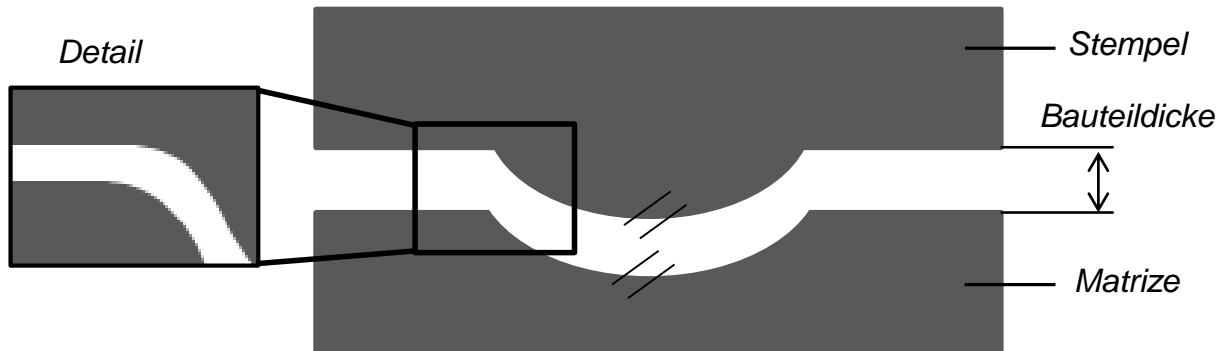
**Abbildung 5.13:** Modell des herzustellenden dreidimensionalen Bauteils [13].

CFK-Bauteils war von den verwendeten Gewebe- und Matrixmaterialien abhängig und betrug entsprechend den Ergebnissen der Voruntersuchungen 730  $\mu\text{m}$ . Das CAD-Modell des Bauteils ist in der nebenstehenden Abbildung 5.13 dargestellt.

Um mithilfe der Ultraschallfertigung die gewünschte Bauteilgeometrie herzustellen, wurde ein zweiteiliges Schweißwerkzeug konstruiert. Das Schweißwerkzeug bestand aus einem sogenannten Stempel, der die geometrischen Dimensionen des späteren

Für die Untersuchung der Ultraschallfertigung von dreidimensionalen Bauteilen wurde eine geometrisch einfache Kontur, bestehend aus einem Kugelsegment mit einer Höhe von 4 mm sowie einem Basiskreis mit einem Durchmesser von 30 mm, verwendet. Die Dicke des mit diesem Werkzeug gefertigten

Bauteiles hatte, sowie einer Matrize, die das Negativ bildete, siehe Abbildung 5.14. Während des Schweißvorganges wurden das Gewebe und die Folien zwischen Stempel und Matrize gelegt. Damit es bei der Verschweißung nicht zu einer Beschädigung der Folien oder des Gewebes kam, wurden bei der Konzeption des Schweißwerkzeuges scharfe Kanten vermieden und der Übergang vom Kugelsegment mit Radien versehen, vgl. Detailansicht in Abbildung 5.14. Des Weiteren wurden die Oberflächen von Stempel und Matrize parallel zueinander konstruiert. Das Schweißwerkzeug wurde mithilfe der CAD-Software PTC Creo Parametric 3.0 konzipiert und durch die Mikrofräsmaschine M7HP der Firma DRATON aus Aluminium gefertigt.

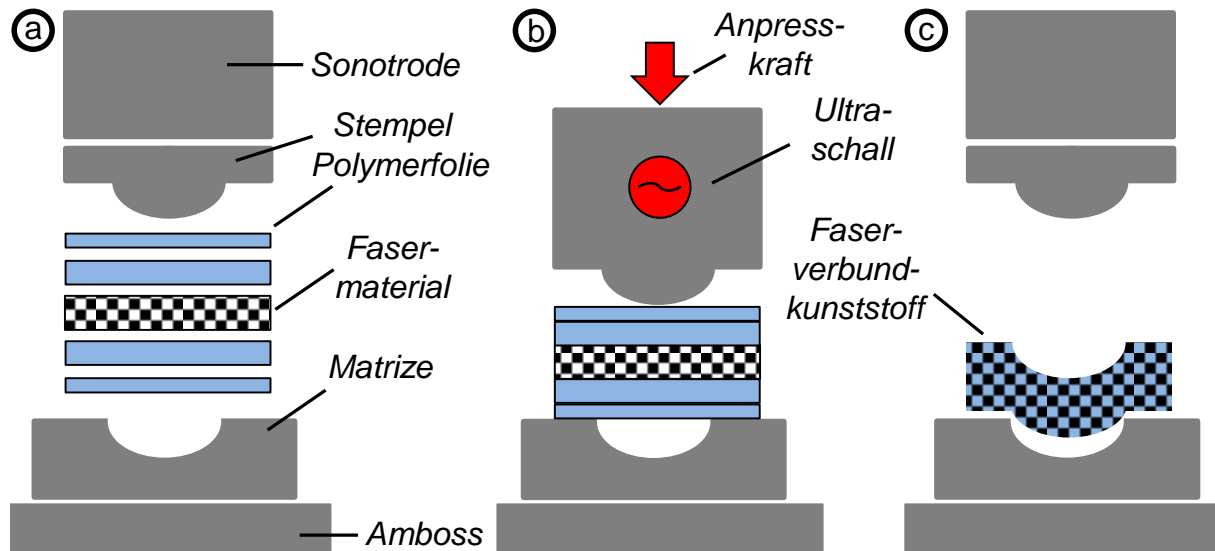


**Abbildung 5.14:** Schematische Darstellung des Schweißwerkzeuges bestehend aus Stempel und Matrize. Das Kugelsegment hat eine Höhe von 4 mm und einen Basiskreis mit einem Durchmesser von 30 mm [13].

Abbildung 5.15 zeigt den schematischen Prozessablauf zur Herstellung eines dreidimensionalen Bauteiles. Analog zu dem im Abschnitt 3.1.1 vorgestellten Verfahren wurde das Fasermaterial, in diesem Fall das 450 µm dicke Gewebe, zunächst zwischen den 80 bzw. 160 µm dicken Polymerfolien positioniert. Anschließend wurde die Gewebe-Folien-Kombination zwischen Stempel und Matrize in das Schweißwerkzeug gelegt und unterhalb der Sonotrode auf dem Amboss der Ultraschallschweißmaschine befestigt, vgl. Schritt a in Abbildung 5.15. Daraufhin wurde die Sonotrode heruntergefahren und baute über den Stempel eine Anpresskraft auf die Gewebe-Folien-Kombination auf. Nach dem Erreichen einer definierten Kraftschwelle wurde der Ultraschall ausgelöst, die Folien aufgeschmolzen und zum CFK verarbeitet, vgl. Schritt b in Abbildung 5.15. Im Anschluss an die nachgelagerte Haltezeit wurde die Sonotrode hochgefahren, das Werkzeug geöffnet und der gefertigte dreidimensionale CFK entnommen, siehe Schritt c in Abbildung 5.15.

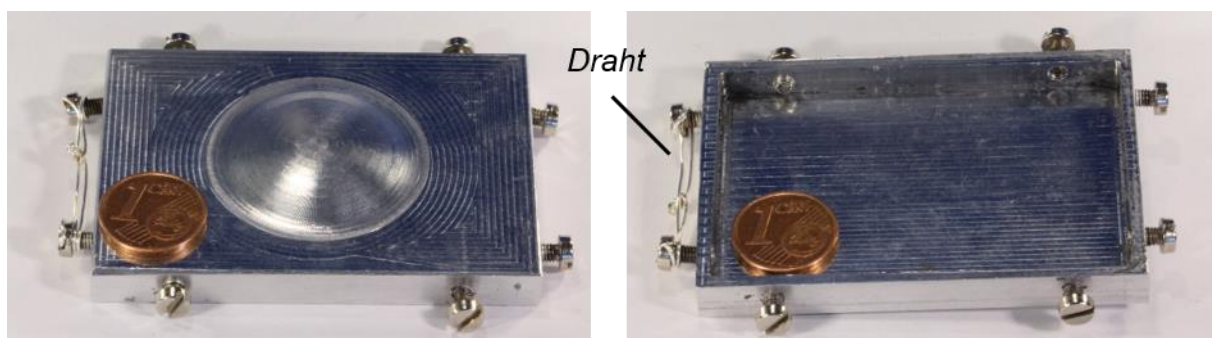
Bei den Untersuchungen zeigte sich, dass sich Stempel und Matrize beim Schweißprozess infolge der Ultraschallschwingungen verschoben. Es konnten somit keine reproduzierbaren Ergebnisse erzielt werden. Daher war es notwendig, beide Teile gegen Verrutschen zu sichern. Während die Matrize mithilfe von Schrauben am Amboss befestigt werden konnte, musste für den Stempel zunächst eine Möglichkeit zur Befestigung konstruiert werden. Daher erfolgte eine Weiterentwicklung des Stempels, bei welcher dieser um Schrauben ergänzt wurde, mit denen der Stempel an der Sonotrode befestigt werden konnte. Damit sich die Schrauben infolge der Ultraschallschwingungen beim Schweißprozess nicht lösten, wurden sie zusätzlich mithilfe eines Drahtes gesichert. Damit es weiterhin durch das Anbringen des Stempels

nicht zu einer Beschädigung der Sonotrode kam, wurde eine Folie aus Polytetrafluorethylen (PTFE) zwischen Sonotrode und Stempel gelegt. Da PTFE eine vergleichsweise hohe thermische Beständigkeit bei gleichzeitig geringer Reibungszahl hat, wird es beispielsweise als Beschichtungsmittel eingesetzt. Abbildung 5.16 stellt den Stempel dar, der mittels Schrauben an der Sonotrode befestigt werden konnte.



**Abbildung 5.15:** Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus zur Ultraschallfertigung eines dreidimensionalen Bauteils. Als Fasermaterial diente ein 450 µm dickes Kohlenstofffasergewebe. Als Matrixmaterial dienten zwei 80 µm dicke sowie zwei 160 µm dicke PA6-Folien [nach 13].

Des Weiteren zeigte die Untersuchung, dass eine Einspannung der Gewebe-Folien-Kombination notwendig war. Daher wurde der Versuchsaufbau um eine Einspannvorrichtung erweitert, die aus einem Spannrahmen bestand, wie er bereits in Kapitel 4 verwendet wurde. Diese Einspannvorrichtung wurde jedoch pneumatisch betrieben, konnte auf dem Amboss montiert werden und ermöglichte somit die Gewebe-Folien-Kombination während des Schweißvorganges in ihrer Position zu fixieren.



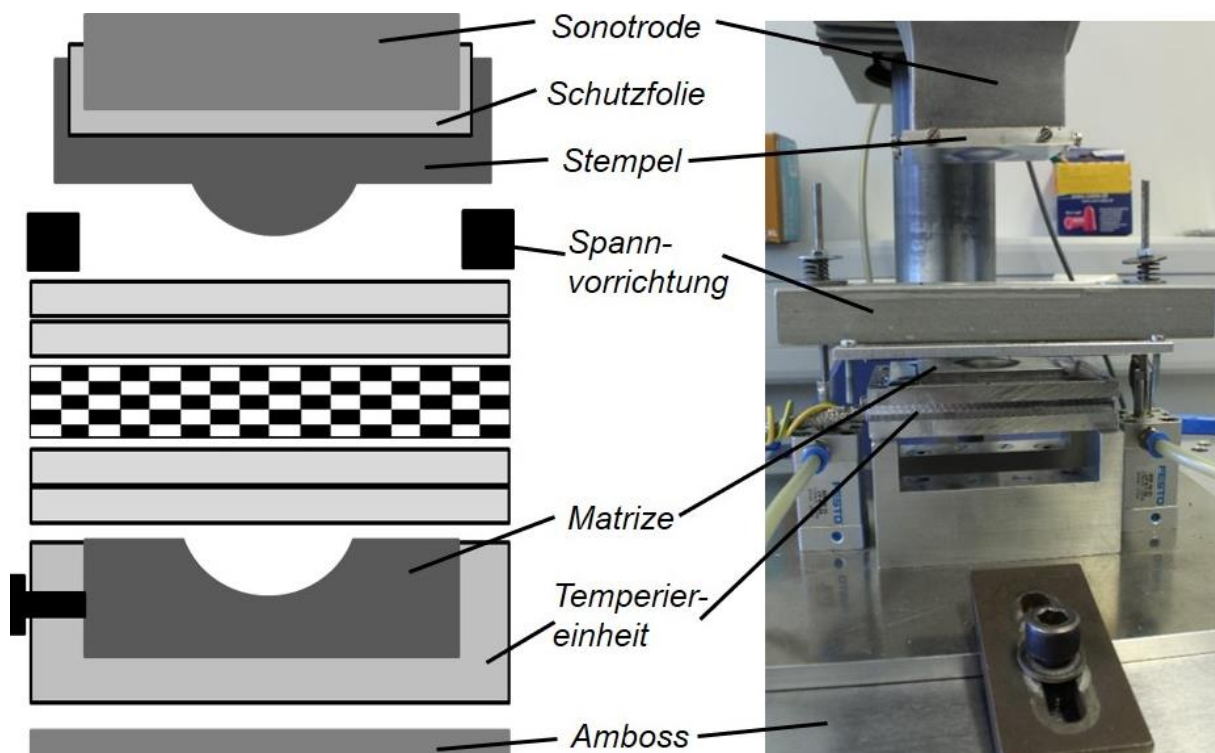
**Abbildung 5.16:** Der zur Befestigung an der Sonotrode weiterentwickelte Stempel mit Schrauben und Drahtsicherung sowie einer Aufnahme für die PTFE-Folie [13].

Mit dem erweiterten Aufbau wurden weiterführende Untersuchungen durchgeführt. Hierbei konnte allerdings auch nach einer Erhöhung der Schweißzeit keine vollständige Verschweißung des Gewebes erzielt werden. Selbst nach mehreren, direkt hintereinander durchgeführten Verschweißungen wurden die PA6-Folien nicht vollständig aufgeschmolzen und die Ergebnisse der Voruntersuchungen konnten somit nicht

reproduziert werden. Eine Erklärung hierfür war, dass infolge des um Stempel und Matrize erweiterten Versuchsaufbaus die von der Sonotrode in Form von Ultraschallschwingungen abgegebene Energie im System dissipierte. Dies konnte beispielsweise durch Bewegungen des Stempels oder der Matrize geschehen. Folglich stand für die Verschweißung nur eine geringere Energie zur Verfügung, die nicht zum vollständigen Aufschmelzen der Polymermatrix ausreichte.

Um ein vollständiges Aufschmelzen der Polymermatrix zu ermöglichen, wurde der Versuchsaufbau um eine sogenannte Temperiereinheit erweitert. Hierbei handelte es sich um eine beheizbare Platte, auf der die Matrize befestigt werden konnte. Die Temperatur der Temperiereinheit konnte eingestellt werden. Anschließend wurde die Matrize über Wärmeleitung von der Temperiereinheit auf ca. 100 °C vorgewärmt.

Der zur Ultraschallfertigung des dreidimensionalen Bauteils verwendete Versuchsaufbau ist in Abbildung 5.17 dargestellt. Mithilfe dieses Versuchsaufbaus konnten alle PA6-Folien aufgeschmolzen werden. Die eingestellten Prozessparameter sind in der Tabelle A.26 des Anhanges zusammengefasst. Weiterhin stellt Abbildung 5.18 das mit dem beschriebenen Versuchsaufbau gefertigte Bauteil dar. Die Probe ist nicht zurechtgeschnitten, sodass der nicht verschweißte Probenrand zu sehen ist. Es ist zu erkennen, dass das Gewebe vollständig in die Kunststoffmatrix eingebettet wurde. An einigen Stellen sowie am Rand der Probe kam es infolge lokaler Temperaturspitzen zu Zersetzungen der Matrix.



**Abbildung 5.17:** Finaler Versuchsaufbau zur Ultraschallfertigung eines dreidimensionalen Bauteiles aus CFK [13].

Die in diesem Abschnitt beschriebene Untersuchung belegt die grundsätzliche Möglichkeit mithilfe von Ultraschall dreidimensionale CFK-Bauteile herzustellen. Allerdings waren zur Herstellung umfangreiche Erweiterungen des Versuchsaufbaus not-

wendig, wie etwa durch die Konstruktion eines zweiteiligen Schweißwerkzeuges oder die Verwendung einer Vortemperierung.



**Abbildung 5.18:** Mithilfe der Ultraschallfertigung hergestelltes dreidimensionales Bauteil bestehend aus Kohlenstofffasergewebe mit einer Dicke von  $450\ \mu\text{m}$  sowie zwei  $80\ \mu\text{m}$  dicken und zwei  $160\ \mu\text{m}$  dicken PA6-Folien [13].

Des Weiteren wurde deutlich, dass infolge der Erweiterungen am Versuchsaufbau Schwingungsenergie dissipierte und somit die vollständige Aufschmelzung der Matrix beeinflusste. Es ist zu vermuten, dass durch die Verwendung einer individuell angepassten Sonotrode, die die Geometrie des herzustellenden Bauteils aufweist, auftretende Energieverluste vermieden werden können. Hierdurch könnte die Notwendigkeit einer Vortemperierung entfallen. Darüber hinaus ist es denkbar, mithilfe von angepassten Sonotroden weitere, geometrisch komplexere Bauteilgeometrien zu fertigen. Aufgrund der Kosten für die schwingungstechnische Auslegung und Herstellung individuell angepasster Sonotroden, die im Bereich einiger weniger Tausend Euro liegen, konnte dies jedoch nicht im Rahmen der vorliegenden Arbeit untersucht werden.

### Zusammenfassung

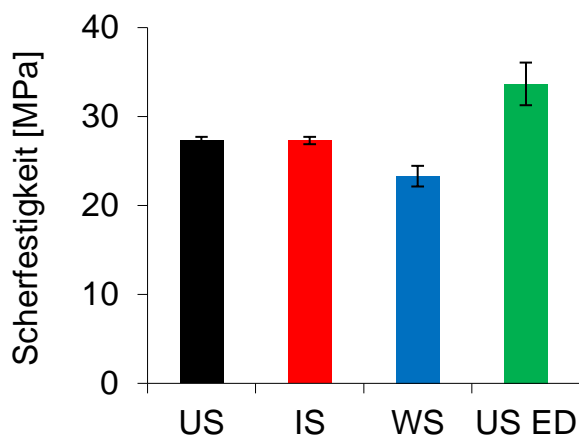
In diesem Abschnitt wurde mithilfe einer Rundsonotrode die kontinuierliche Ultraschallfertigung von CFK demonstriert. Es wurden drei verschiedene Matrix- und vier verschiedene Faserarten verwendet und ein- sowie mehrlagige CFK-Proben mit einer Länge von etwa 30 cm hergestellt werden. Des Weiteren wurde gezeigt, dass mithilfe einer Erweiterung des Versuchsaufbaus die Ultraschallfertigung zur Herstellung dreidimensionaler CFK-Bauteile genutzt werden konnte.

## 6. Fügen von thermo- und duroplastischen CFK mithilfe von Ultraschall

Die vorherigen Abschnitte der vorliegenden Arbeit thematisieren die Herstellung von CFK mithilfe von Ultraschall. Dieses Kapitel hingegen beinhaltet weiterführende Untersuchungen, in denen konventionell gefertigte CFK mittels Ultraschall verschweißt werden. Dies kann eingesetzt werden, um beispielsweise CFK-Bauteile miteinander zu fügen, beschädigte Komponenten komplett auszutauschen oder aber Schäden und Deformationen lokal zu reparieren. Hierfür wird zunächst im Abschnitt 6.1 die Ultraschallverschweißung von thermoplastischen CFK thematisiert und experimentell bestimmte Scherfestigkeiten der Fügeverbindungen mit Literaturangaben verglichen. Abschnitt 6.2 hingegen beinhaltet Untersuchungen, bei denen die Verschweißung von duroplastischen CFK mithilfe von Ultraschall ermöglicht wird.

### 6.1 Ultraschallverschweißen von thermoplastischen CFK

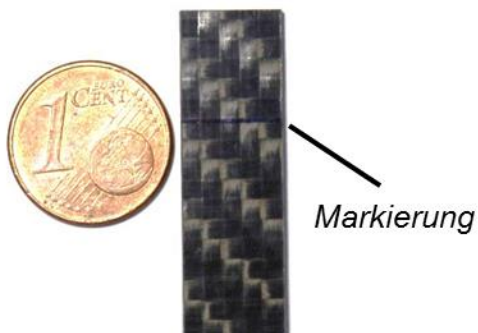
In aktuellen Forschungsarbeiten anderer Hochschulen und Wissenschaftler werden verschiedene Ansätze zur Verschweißung von thermoplastischen CFK vorgestellt, siehe etwa [38,72,73]. So wurden beispielsweise Proben aus 2 mm dicken CFK-Platten mit einer thermoplastischen Matrix aus Polyphenylensulfid (PPS) und einem Faseranteil von ca. 45 Vol.-% mithilfe von Ultraschall- (US), Induktions- (IS) und Widerstandsschweißen (WS) miteinander überlappend verschweißt und anschließend in Zugversuchen die Scherfestigkeit der Verbindung bestimmt, siehe Abbildung 6.1 [38]. Für das Ultraschall- und Induktionsschweißen betrug die mittlere Scherfestigkeit  $27,3 \pm 0,4$  MPa, entsprechend einer relativen Standardabweichung von ca. 1,5 % [38]. Beim Widerstandsschweißen sank die Scherfestigkeit auf  $23,3 \pm 1,2$  MPa, entsprechend einer relativen Standardabweichung von etwa 5 % [38]. Pro Verschweißart wurden 15 Proben untersucht [38]. In [73] wurde in der Fügestelle zusätzlich ein



**Abbildung 6.1:** Zusammenfassung in der Literatur erzielter Scherfestigkeiten verschweißter CFK-Proben. Als Verfahren wurden Ultraschall-, Induktions-, Widerstandsschweißen sowie das Ultraschallschweißen mit Energiedirektor untersucht [nach 38,72,73].

ca. 200  $\mu$ m dickes Gitter, welches wie das verwendete Matrixmaterial ebenfalls aus thermoplastischem PPS bestand, zwischen die zu verschweißenden CFK-Proben positioniert. Während des Ultraschallschweißprozesses diente das Gitter als sogenannter Energiedirektor (ED), schmolz somit infolge des Ultraschalls gezielt auf und sorgte dadurch für eine Verschweißung in der Fügestelle. Durch Verwendung solcher Energiedirektoren konnte die Scherfestigkeit ultraschallverschweißter CFK mit einer Matrix aus PPS um ca. 23 % auf  $33,7 \pm 2,4$  MPa, entsprechend einer relativen Standardabweichung von etwa 7 %, gesteigert werden [73].

Um die erzielten Ergebnisse anderer Forschungsarbeiten zu reproduzieren, wurden in der vorliegenden Arbeit experimentelle Untersuchungen durchgeführt bei denen ebenfalls thermoplastische CFK-Probenkörper verschweißt wurden. Da CFK mit einer Matrix aus PPS nicht zur Verfügung standen, dienten als Rohmaterial 2 mm dicke CFK-Platten mit einer Matrix aus PA66 des Herstellers Bond Laminates GmbH, Brilon. Der Anteil der Kohlenstofffasern betrug in etwa 50 Vol.-%. Die Zugfestigkeit und Dichte von PA66 sind mit ca. 85 MPa bzw. 1,15 g/cm<sup>3</sup> in etwa um 15 % geringer als Vergleichswerte von PPS [74,75]. Daher war eine entsprechende Abnahme der Scherfestigkeit verschweißter CFK-Proben aus PA66 gegenüber CFK-Proben aus PPS zu erwarten, was es beim Vergleich der Ergebnisse zu berücksichtigen galt.



**Abbildung 6.2:** Zurechtgeschnittene CFK-Probe mit PA66-Matrix und einem Faserfüllgrad von ca. 50 Vol.-%.

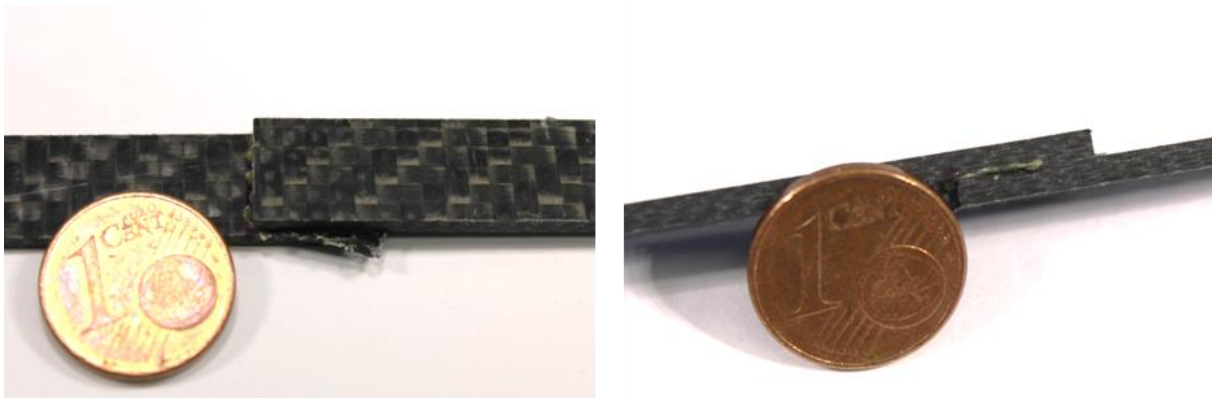
Aus diesen CFK-Platten wurden mithilfe einer Wasserstrahlschneide Probenkörper mit einer Abmessung von 10 mm x 100 mm zurechtgeschnitten. Die Abbildung 6.2 stellt eine für die Verschweißung zugeschnittene CFK-Probe dar. Zudem ist die Markierung eingezeichnet bis zu welcher sich beide Proben während der Befestigung auf dem Amboss überlappen mussten. Die Position der Markierung wurde so gewählt, dass die verschweißte Fläche 100 mm<sup>2</sup> betrug.

Für die Verschweißung wurden zwei CFK-Proben unterhalb der Sonotrode auf dem Amboss einer Ultraschallschweißmaschine positioniert und mithilfe von Einspannbanken befestigt. Als Schweißmaschine wurde die HiQ DIALOG 1200 Ultraschallschweißmaschine des Herstellers Herrmann Ultraschall, Karlsbad, verwendet. Die Frequenz des Ultraschalls betrug 35 kHz und die maximale Leistungsabgabe der Maschine 1,2 kW [58]. Für den Schweißprozess wurden eine Amplitude des Ultraschalls von 25  $\mu$ m sowie eine Schweißzeit von 0,9 s eingestellt. Die Haltezeit wurde zu 1,0 s gewählt. Die Schweißkraft und Haltekraft betragen 500 N. Die eingestellten Parameter sind zusätzlich in Tabelle A.27 des Anhanges zusammengefasst. Abbildung 6.3 zeigt zwei miteinander verschweißte Proben.

Anhand des Schweißergebnisses in Abbildung 6.3 ist zu erkennen, dass beide Proben unlöslich miteinander verbunden waren. Seitlich der Fügefläche war überschüssiges Matrixmaterial zu erkennen, dass während des Schweißprozesses infolge der Krafteinwirkung im schmelzflüssigen Zustand verdrängt wurde.

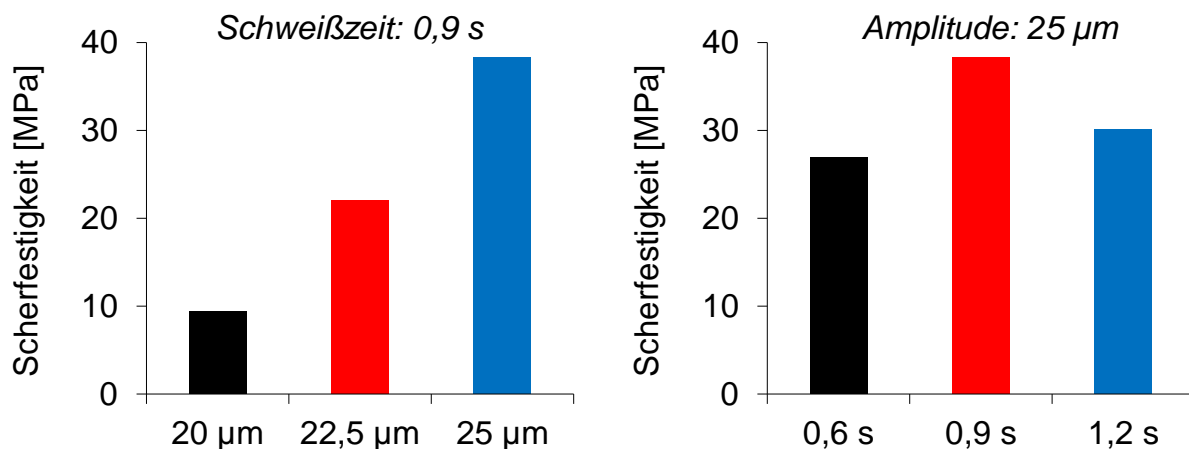
Nach der Ultraschallverschweißung zweier thermoplastischer CFK wurden in einer weiterführenden Untersuchung die eingestellten Prozessparameter variiert. Ziel der Untersuchung war es, die Auswirkung der Prozessparameter auf die Scherfestigkeit der Verbindung zu erforschen. Da im Allgemeinen die Prozessparameter Schweißzeit und Amplitude des Ultraschalls den größten Einfluss auf die Ultraschallverschweißung haben, wurden in einem ersten Versuch bei konstanter Schweißzeit die Amplitude sowie in einem weiteren Versuch bei konstanter Amplitude die Schweiß-

zeit variiert. Die übrigen Prozessparameter wurden nicht verändert und können der Tabelle A.27 entnommen werden.



**Abbildung 6.3:** Mittels Ultraschall verschweißte CFK-Proben mit einer PA66-Matrix und einem Faserfüllgrad von ca. 50 Vol.-%. Die Fügefläche betrug 100 mm<sup>2</sup>.

Anschließend wurde die Scherfestigkeit der verschweißten Proben mithilfe von Zugversuchen untersucht. Aufgrund der begrenzten Verfügbarkeit der CFK-Platten sowie des aufwendigen Probenzuschnittes mittels einer Wasserstrahlschneide wurde pro Parametersatz nur eine Verschweißung hergestellt. Dies genügte jedoch, um generelle Aussagen über die Auswirkungen der Prozessparameter zu treffen. Die nachfolgende Abbildung 6.4 stellt die ermittelten Scherfestigkeiten in Abhängigkeit der eingestellten Prozessparameter dar.

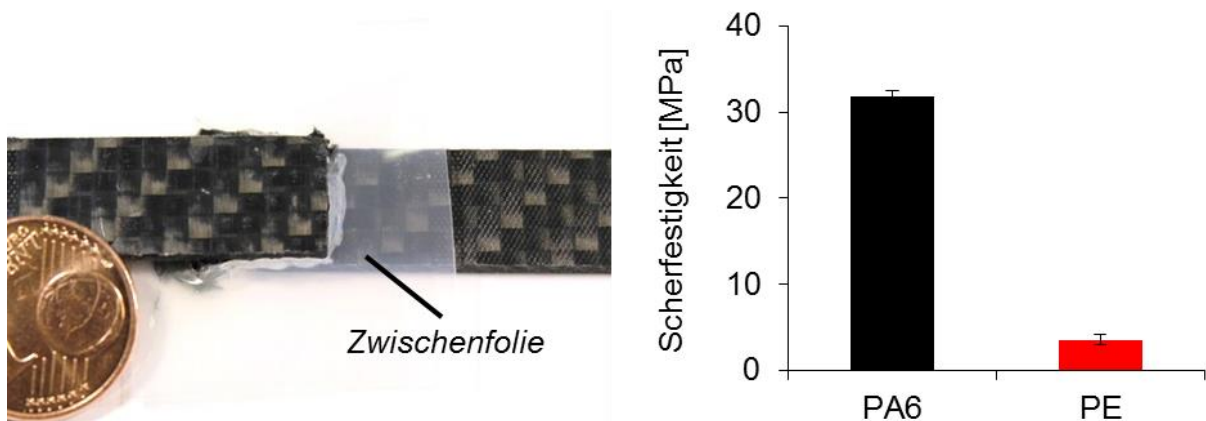


**Abbildung 6.4:** Zusammenfassung der Scherfestigkeiten mithilfe von Ultraschall verschweißter thermoplastischer CFK-Proben mit einer PA66-Matrix. Links: Variation der Amplitude, rechts: Variation der Schweißzeit.

Im linken Teil der Abbildung 6.4 ist zu erkennen, dass die Scherfestigkeit der Verschweißung mit zunehmender Amplitude des Ultraschalls anstieg. So betrug die Scherfestigkeit bei einer Amplitude von 25  $\mu\text{m}$  und einer Schweißzeit von 0,9 s ca. 38 MPa. Sie war damit höher als die in der Literatur erzielten Scherfestigkeiten. Bei einer weiteren Steigerung der Amplitude auf 27,5  $\mu\text{m}$  oder 30  $\mu\text{m}$  gab die verwendete Schweißmaschine jedoch eine Fehlermeldung aus, wonach die minimale Frequenz des Ultraschalls unterschritten wurde, sodass keine Verschweißung möglich war. Der rechte Teil der Abbildung 6.4 stellt hingegen die ermittelten Scherfestigkeiten in Abhängigkeit der Schweißzeit dar. Hierbei zeigte sich, dass die höchste Scherfestigkeit

von 38,4 MPa bei einer Schweißzeit von 0,9 s erzielt wurde. Bei einer Schweißzeit hingegen von 1,2 s kam es zu chemischen Zersetzungen der Proben, die sich durch eine Raumentwicklung äußerten, während bei einer Schweißzeit von 0,6 s die Matrix unvollständig aufgeschmolzen wurde und die Verschweißung nicht erfolgreich war.

In den beschriebenen Untersuchungen wurde kein Material zwischen die zu fügenden CFK-Proben positioniert. Um zu untersuchen, ob die ermittelten Scherfestigkeiten durch das Verwenden von thermoplastischen Zwischenfolien als Fügehilfe weiter gesteigert werden konnten, wurden in einer weiteren Untersuchung 200 µm dicke Folien aus PE sowie PA6 zwischen den Fügeflächen der CFK-Proben positioniert und mit den in Tabelle A.27 angegebenen Parametern verschweißt. Im linken Teil der Abbildung 6.5 ist eine Probe dargestellt, bei der in der Fügefläche zwischen zwei CFK-Proben eine Zwischenfolie aus PE positioniert und verschweißt wurde. Im rechten Teil der Abbildung 6.5 sind die mittleren Scherfestigkeiten sowie die zugehörigen Standardabweichungen der verschweißten Proben in Abhängigkeit des verwendeten Zwischenfolienmaterials dargestellt.

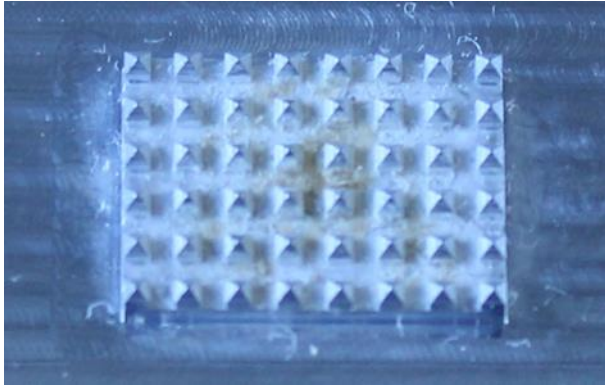


**Abbildung 6.5:** Zwei CFK-Proben mit einer Matrix aus PA66 verschweißt mit einer thermoplastischen Zwischenfolie. Rechts: Scherfestigkeiten der Verschweißung bei der Verwendung von Folien aus PA6 oder PE. Pro Anordnung wurden zwei Proben untersucht.

Die Auswertung zeigte, dass die Verwendung von thermoplastischen Zwischenfolien sich negativ auf die Scherfestigkeiten auswirkte. So betrug die Scherfestigkeit der verschweißten Proben bei der Verwendung von PA6-Folien ca. 31,9 MPa und bei PE-Folien nur ca. 3,6 MPa. Die Untersuchung zeigte jedoch auch, dass durch die Wahl des Materials der Zwischenfolie die Scherfestigkeit der Verschweißung beeinflusst wurde. Ergebnisse der vorherigen Untersuchungen wurden allerdings nicht übertroffen. Des Weiteren standen Folien aus PA66, also dem Matrixmaterial der verwendeten CFK-Proben, nicht zur Verfügung und konnten daher nicht untersucht werden. Es war jedoch zu erwarten, dass die Verwendung einer PA66-Zwischenfolie zur weiteren Steigerung der Scherfestigkeit führt, da sich die Zwischenfolie und die Matrix besser verbinden, wenn diese aus dem gleichen Material sind.

Weiterhin wurde erforscht, ob eine Vorbehandlung der Fügefläche einen Einfluss auf die Scherfestigkeit der Verschweißung hatte. Hierfür wurde ein Werkzeug verwendet, das aus einer pyramidenförmigen Struktur und einer Gesamtfläche von 11 mm x

15 mm bestand. Die Pyramiden waren jeweils 1 mm breit, lang und hoch und standen jeweils 1 mm weit auseinander, siehe nachfolgende Abbildung 6.6. Im ersten Schritt wurde das Pyramidenwerkzeug unterhalb der Sonotrode auf dem Amboss der Ultraschallschweißmaschine befestigt. Anschließend wurde die CFK-Probe auf das Pyramidenwerkzeug gelegt und mithilfe von Einspannbacken befestigt.



**Abbildung 6.6:** Pyramidenwerkzeug zur Vorbehandlung der Fügeflächen.

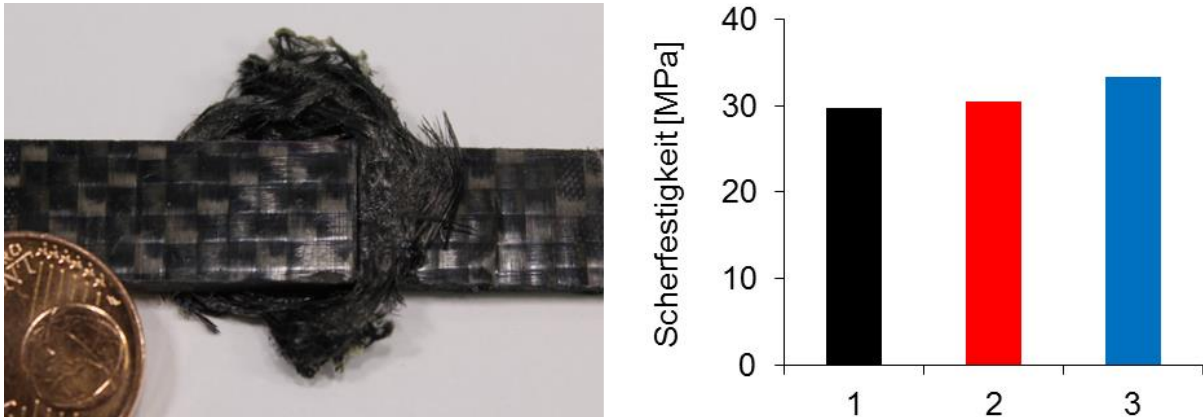
Es wurden die in der Tabelle A.28 aufgelisteten Prozessparameter eingestellt und anschließend mithilfe von Ultraschall die Oberfläche der CFK-Probe strukturiert. Hierbei fuhr die Sonotrode runter und baute eine Kraft auf die Probe auf. Nachdem eine definierte Kraft erreicht wurde, wurde der Ultraschall ausgelöst und die thermoplastische Matrix geschmolzen. Infolge der weiterhin bestehenden Krafteinwirkung wurde das CFK in die Pyramidenstruktur gedrückt und dadurch dessen Geometrie in die Oberfläche des CFK abgeformt. Abschließend wurde der Ultraschall abgestellt, sodass die Matrix abkühlte und erstarrte.

Im zweiten Schritt wurden die auf diese Weise vorstrukturierten CFK-Proben mit den in Tabelle A.27 zusammengefassten Parametern verschweißt. In insgesamt drei Verschweißungen wurde hierbei variiert, ob lediglich eine der beiden Fügeflächen, beide Fügeflächen vorbehandelt wurden oder ob beide Fügeflächen sowohl vorbehandelt wurden als auch zusätzlich eine 200 µm dicke PA6-Folie als Zwischenfolie verwendet wurde.

Der linke Teil der Abbildung 6.7 zeigt zwei mithilfe von Ultraschall miteinander verschweißte CFK-Proben mit vorstrukturierter Fügefläche. Es war zu erkennen, dass sowohl Faser- als auch Matrixmaterial seitlich aus der Fügefläche herausgedrückt wurden. Dies war bei bisherigen Verschweißungen nicht aufgetreten, siehe Abbildung 6.3 und Abbildung 6.5. Bei Betrachtung des Schweißergebnisses wurde festgestellt, dass bei der Vorstrukturierung der Fügeflächen die Pyramidenstruktur in die in 0°- und 90°-Richtung angeordneten Fasern eingedrückt wurde und es dadurch zu einer Verschiebung der Faserstruktur sowie zum Lösen der Verbundhaftung kam. Daraus wurde gefolgert, dass das Vorbehandeln der Fügefläche mithilfe einer Pyramidenstruktur zur Beschädigung des CFK führte.

Eine Auswertung der Scherfestigkeiten der vorstrukturierten Proben ist im rechten Teil der Abbildung 6.7 dargestellt. In der Anordnung 1 wurde nur eine der beiden Fügeflächen mit einer Pyramidenstruktur vorbehandelt, in Anordnung 2 beide und in Anordnung 3 wurden sowohl beide Fügeflächen vorbehandelt als auch eine Zwischenfolie aus 200 µm dickem PA6 verwendet. Für die Anordnungen 1 und 2 betragen die Scherfestigkeiten ca. 29,7 MPa bzw. 30,5 MPa. Wurde zusätzlich eine Zwischenfolie verschweißt, stieg die Scherfestigkeit auf 33,4 MPa. Somit wurde gefolgert, dass ein Vorstrukturieren der Fügeflächen mittels einer Pyramidenstruktur nicht

vorteilhaft war, da sowohl Matrix- und Fasermaterial verdrängt wurden als auch die Scherfestigkeit der verschweißten CFK-Proben abnahm.



**Abbildung 6.7:** Links: Mittels Pyramidenstruktur vorbehandelte CFK-Probenkörper. Rechts: Erzielte Scherfestigkeiten, wenn nur eine (1), beide (2) oder beide Proben vorbehandelt und zusätzlich eine Zwischenfolie aus PA6 verwendet wurde (3).

Insgesamt zeigten die Untersuchungen jedoch, dass durch die geeignete Wahl der Prozessparameter eine Verschweißung von thermoplastischen CFK mittels Ultraschall möglich war. Zudem konnten Scherfestigkeiten der Fügeverbindung von CFK-Proben mit einer Matrix aus PA66 von bis zu 38,4 MPa erreicht werden. Des Weiteren wurde gezeigt, dass die in der Literatur genannten Scherfestigkeiten von thermoplastischen CFK-Proben mit einer Matrix aus PPS, die mittels Ultraschall-, Induktions- und Widerstandsschweißen miteinander verschweißt wurden, bei einer geeigneten Wahl der Prozessparameter übertroffen werden können. Jedoch sind weiterführende Untersuchungen notwendig, um beispielsweise durch eine Steigerung der Stichprobenumfanges die statistische Aussagekraft erzielter Werte für die Scherfestigkeiten der Fügeverbindungen zu erhöhen.

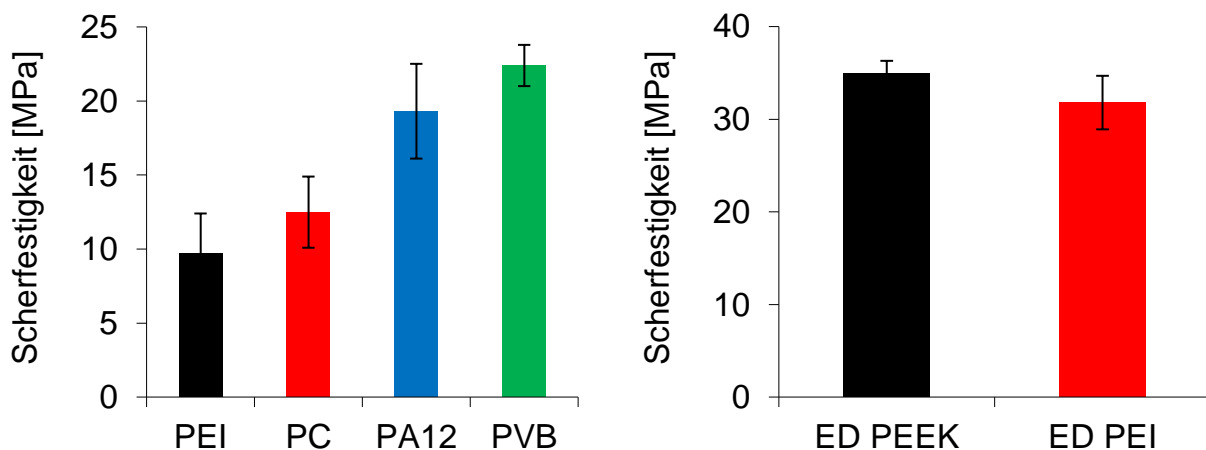
### 6.2 Ultraschallverschweißen von duroplastischen CFK

Die bei der Ultraschallverschweißung von thermoplastischen CFK erzielten Ergebnisse, bei denen die Scherfestigkeiten anderer Literaturangaben übertroffen wurden, dienten als Motivation, um in weiterführenden Untersuchungen zusätzlich die Ultraschallverschweißung von duroplastischen CFK zu erproben.

Duroplaste gelten im Allgemeinen als nicht verschweißbar, da sie nach der erstmaligen Aushärtung nicht erneut aufgeschmolzen werden können, siehe Abschnitt 2.1.2. In aktuellen Forschungsarbeiten Dritter wie beispielsweise [39,76,77] werden daher thermoplastische Zwischenschichten verwendet, die zunächst auf die Oberflächen der Duroplaste aufgetragen werden. Anschließend können die Duroplaste an ihren thermoplastischen Oberflächen miteinander verschweißt werden. So dienen etwa in [39] CFK-Proben, bestehend aus einer duroplastischen Epoxidmatrix mit einem Faserfüllgrad von ca. 58 Vol.-%, als Rohmaterial. Im ersten Prozessschritt werden die Fügeflächen der duroplastischen CFK-Proben mit thermoplastischen Folien aus PC, Polyetherimide (PEI), PA oder Polyvinylbutyral (PVB) beschichtet. Dies geschieht in einem Autoklaven bei einer Temperatur von ca. 180 °C, einem Druck von etwa

0,2 MPa und dauert ca. eine Stunde [39]. Anschließend werden die Proben mittels Induktionsschweißen verbunden und in Zugversuchen die Scherfestigkeit der Verschweißung untersucht. Das Ergebnis ist in Abbildung 6.8 dargestellt. Zu erkennen ist, dass die Scherfestigkeit ausgehend von  $9,7 \pm 2,7$  MPa bei der Verwendung von PEI auf bis zu  $22,4 \pm 1,4$  MPa bei der Verwendung von PVB ansteigt. Anhand der erzielten Ergebnisse kann daher gefolgert werden, dass infolge einer Beschichtung der Oberflächen mit einem thermoplastischen Material die Verschweißung von duroplastischen CFK mittels Induktion prinzipiell ermöglicht wird.

In [76] wird hingegen die Verschweißung von duroplastischen CFK mittels Ultraschall untersucht. Als duroplastische Ausgangsmaterialien werden hierbei ebenfalls CFK-Proben mit einer Epoxidmatrix verwendet, deren Fügeflächen im ersten Schritt in einem Autoklaven bei einer Temperatur von ca.  $180\text{ °C}$ , einem Druck von  $0,7\text{ MPa}$  und einer Dauer von etwa 2 Stunden mit einer ca.  $25\text{ }\mu\text{m}$  dicken Schicht PEI beschichtet werden [76]. Als Fügepartner dienen thermoplastische CFK mit einer Matrix aus PEEK. Zusätzlich werden zwischen die Fügeflächen beider Schweißpartner als Energiedirektoren dienende thermoplastische Zwischenfolien aus PEEK oder PEI positioniert. Die Kombination aus beschichtetem Duroplast, thermoplastischer Zwischenfolie sowie dem thermoplastischen CFK mit einer Matrix aus PEEK wird mithilfe von Ultraschall miteinander verschweißt. Das Ergebnis der in Abhängigkeit der verwendeten Zwischenfolie erzielten Scherfestigkeiten der Fügeverbindung ist in Abbildung 6.8 dargestellt. Pro Anordnung wurden fünf Proben untersucht. Bei der Verwendung einer Zwischenfolie aus PEEK beträgt die mittlere Scherfestigkeit  $34,9 \pm 1,4$  MPa und bei der Verwendung einer Folie aus PEI  $31,8 \pm 2,9$  MPa.



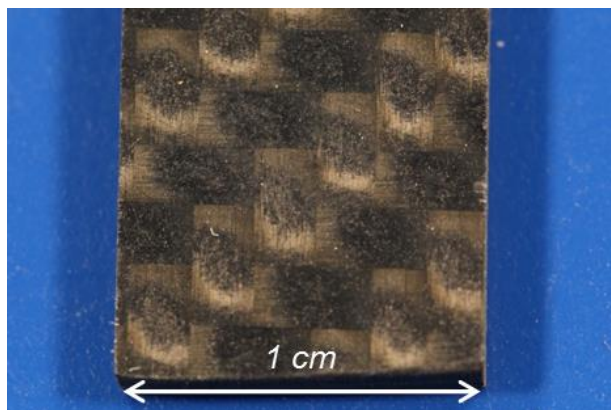
**Abbildung 6.8:** Links: Scherfestigkeiten mittels Induktionsschweißen verschweißter duroplastischer CFK-Proben in Abhängigkeit der als Fügehilfe dienenden thermoplastischen Zwischenfolie. Die Anzahl der untersuchten Proben ist nicht genannt [nach 39]. Rechts: Scherfestigkeiten duroplastischer CFK, die mit PEI beschichtet und anschließend mithilfe einer Zwischenfolie aus PEEK oder PEI mittels Ultraschall mit einem thermoplastischen CFK mit einer Matrix aus PEEK verschweißt wurden. Pro Anordnung wurden fünf Proben untersucht [nach 76].

Die vorgestellten Ergebnisse aktueller Forschungsarbeiten zeigen, dass durch thermoplastische Zwischenschichten duroplastische CFK beispielsweise mittels Induktions- oder Ultraschallschweißen miteinander gefügt werden können [39,76,77]. Als

nachteilig gilt jedoch die aufwendige und zeitintensive Vorbehandlung der Fügeflächen im Autoklaven. Daher wurden in der vorliegenden Arbeit Untersuchungen durchgeführt, bei denen die Verschweißbarkeit duroplastischer CFK mittels Ultraschall erforscht wurde. Hierbei war es das Ziel, geeignete Prozessparameter zu bestimmen und anschließend zwei duroplastische CFK-Proben mithilfe unterschiedlicher Arten der Fügeflächenvorbehandlung zu verschweißen. Die Fügeflächenvorbehandlung sollte gegenüber den in der Literatur vorgestellten Ansätzen in einer kürzeren Dauer sowie mit geringerem apparativem Aufwand erfolgen. Zudem sollte die Scherfestigkeit der Verschweißung quantitativ erfasst und in Abhängigkeit der Art der Fügeflächenvorbehandlung dargestellt werden.

### 6.2.1 Verschweißung ohne Fügeflächenvorbehandlung

In den durchgeführten Untersuchungen dienten als Rohmaterial 2 mm dicke CFK-Platten mit einer duroplastischen Matrix aus Epoxidharz [78]. Diese Platten wurden mithilfe einer Wasserstrahlschneide zu Probenkörpern mit einer Breite von 10 mm und einer Länge von 100 mm zurechtgeschnitten. In einem Abstand von 10 mm von der kürzeren Seite wurde eine Markierung gesetzt, bis zu welcher sich beide Proben bei der Verschweißung überlappen mussten, damit die Fügefläche 100 mm<sup>2</sup> betrug. Da davon auszugehen war, dass die Rauheit der Oberflächen in den Fügestellen der zu verschweißenden CFK einen Einfluss auf die Haftung der thermoplastischen Zwischenfolie hatte, wurden zusätzlich mithilfe eines taktilen Profilometers die Oberflächen der CFK-Proben in der Fügefläche vermessen und der sogenannte arithmetische Mittenrauwert  $R_a$  aus drei an unterschiedlichen Stellen durchgeführten Messungen berechnet. Für CFK-Proben, bei denen keine Fügeflächenvorbehandlung erfolgte, betrug der Mittenrauwert  $R_a$  0,9  $\mu\text{m}$ . Die

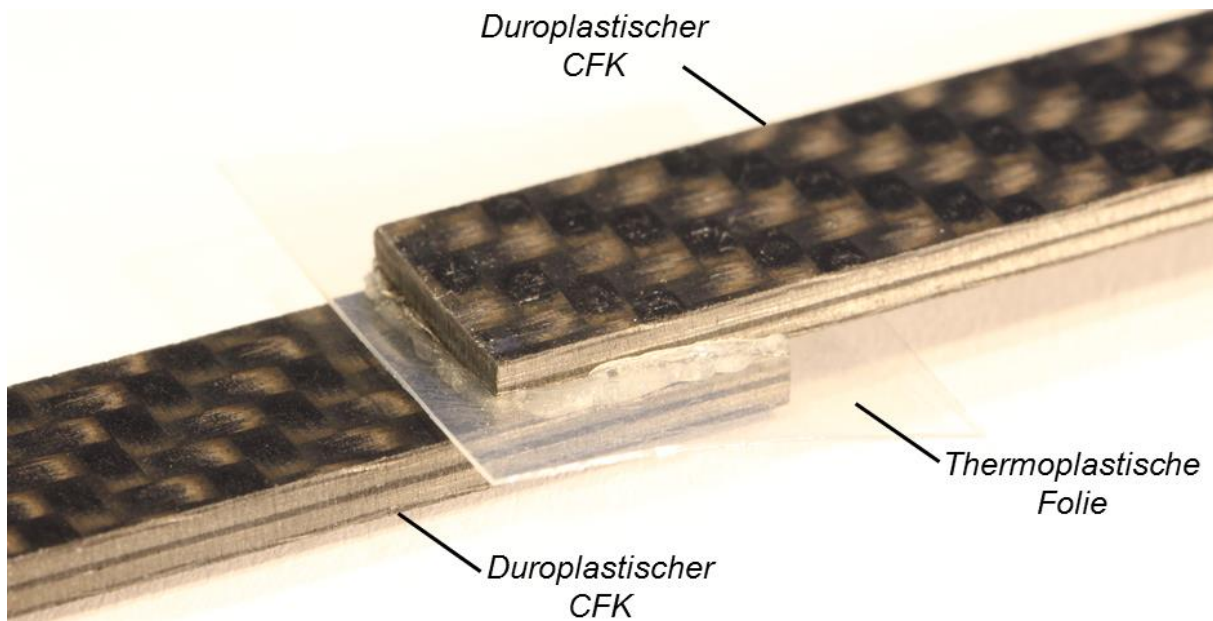


**Abbildung 6.9:** Zurechtgeschnittene duroplastische CFK-Probe ohne Vorbehandlung der Fügefläche.

nebenstehende Abbildung 6.9 zeigt eine zurechtgeschnittene CFK-Probe ohne Vorbehandlung der Fügeflächen.

In einer einleitenden Untersuchung wurden zwei duroplastische CFK-Probenkörper unterhalb der Sonotrode der HiQ DIALOG 1200 Ultraschallschweißmaschine des Herstellers Herrmann Ultraschall, Karlsbad, überlappend positioniert und mithilfe von Einspannbacken auf dem Amboss befestigt. Anschließend wurde der Ultraschall ausgelöst. Zusätzlich wurden in mehreren Versuchen Prozessparameter wie Amplitude oder Schweißzeit variiert. Erwartungsgemäß gelang es in keinem der Versuche die duroplastische Matrix aufzuschmelzen und die CFK-Proben miteinander zu verschweißen. Hieraus wurde gefolgert, dass die Verwendung von thermoplastischen Zwischenfolien als Fügehilfe zwingend notwendig war. Daher wurde im Weiteren zusätzlich eine ca. 150  $\mu\text{m}$  dicke Folie aus PA6 zwischen die Fügeflächen positioniert, siehe Datenblatt in Abbildung A.4 des Anhanges.

Die duroplastischen CFK-Proben konnten durch die Verwendung der thermoplastischen Zwischenfolie miteinander verschweißt werden. Eine Vorbehandlung der Fügeflächen war hierbei nicht notwendig. Die nachfolgende Abbildung 6.10 zeigt zwei zurechtgeschnittene duroplastische CFK-Probenkörper, die mittels Ultraschall sowie einer thermoplastischen Zwischenfolie aus PA6 verschweißt wurden. Die eingestellte Schweißzeit betrug 0,5 s, die Amplitude 30  $\mu\text{m}$  sowie die Schweiß- und Haltekraft jeweils 650 N. Zusätzlich sind die Parameter in der Tabelle A.29 des Anhanges zusammengefasst.



**Abbildung 6.10:** Zwei duroplastische CFK-Proben, die mithilfe einer thermoplastischen Folie aus PA6 miteinander verschweißt wurden. Die Abmessung des verschweißten Bereiches betrug 10 mm x 10 mm.

Mithilfe der genannten Parameter wurden anschließend weitere Verschweißungen durchgeführt und insgesamt 15 Proben hergestellt. Diese Proben wurden in Zugversuchen untersucht und die Scherfestigkeit der Verschweißung bestimmt. So betrug die mittlere Scherfestigkeit der ultraschallverschweißten duroplastischen CFK-Proben bei der Verwendung einer 150  $\mu\text{m}$  dicken PA6-Folie und ohne Vorbehandlung der Fügeflächen bei einer mittleren Oberflächenrauheit von 0,9  $\mu\text{m}$  ca.  $2,5 \pm 0,7$  MPa, entsprechend einer relativen Standardabweichung von etwa 28 %.

### 6.2.2 Variation der Fügeflächenvorbehandlung

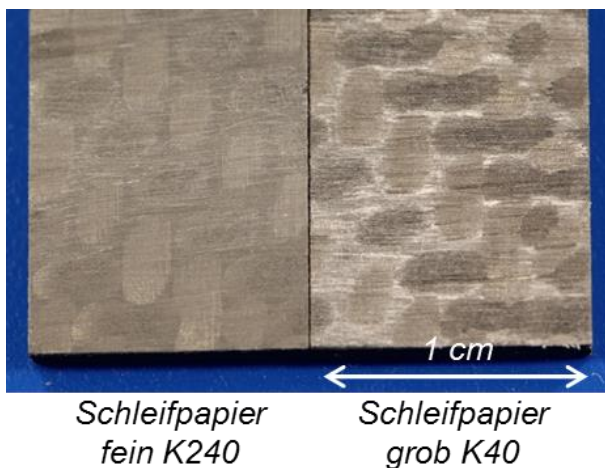
Nach der erstmaligen Verschweißung der duroplastischen CFK unter Zuhilfenahme einer thermoplastischen Zwischenfolie wurde angenommen, dass sich während des Ultraschallschweißprozesses die Zwischenfolie erwärmt und anschließend im schmelzflüssigen Zustand an den mikroskopisch kleinen Erhöhungen und Vertiefungen in der Oberfläche an den Fügeflächen der Duroplasten anhaftet, wodurch eine feste Verbindung beider Probenkörper entsteht [79].

In den folgenden Versuchsreihen wurden weitere Möglichkeiten untersucht, die Fügeflächen der zu verschweißenden CFK vorzubehandeln und somit eine Verschweißung zu ermöglichen. Als Rohmaterial dienten weiterhin die im Abschnitt 6.2.1 vor-

gestellten duroplastischen CFK-Probekörper sowie thermoplastische PA6-Folien mit einer Dicke von 150  $\mu\text{m}$ .

### Anrauen mit Schleifpapier

Als erste Art der Vorbehandlung der Fügeflächen wurde das Anrauen untersucht. Hierfür wurde Schleifpapier sowohl mit feiner als auch grober Körnung verwendet. Grundsätzlich gilt bei Schleifpapier, dass mit steigender Bezeichnung der Durchmesser der verwendeten Schleifkörner abnimmt und dieses somit feiner wird. Bei dem Schleifpapier mit feiner Körnung handelte es sich um sogenanntes K240 Schleifpapier und bei dem grobkörnigen um K40 Schleifpapier.



**Abbildung 6.11:** Mittels feinem und grobem Schleifpapier vorbehandelte duroplastische CFK-Probekörper.

Zunächst wurden die Fügeflächen der zurechtgeschnittenen CFK-Probekörper entweder mit dem feinen oder mit dem groben Schleifpapier angeraut, vgl. Abbildung 6.11. Anschließend erfolgte im Profilometer die Bestimmung der Oberflächenrauheit in der Fügefläche. Die arithmetischen Mittenrauwerte betragen bei der Vorbehandlung mit dem feinen Schleifpapier ca. 5,7  $\mu\text{m}$  und bei der Verwendung von grobem Schleifpapier etwa 13,8  $\mu\text{m}$ . Im nächsten Schritt wurden unter Zuhilfenahme der 150  $\mu\text{m}$  dicken PA6-Folie jeweils zwei mit feinem bzw. grobem Schleifpapier vorbe-

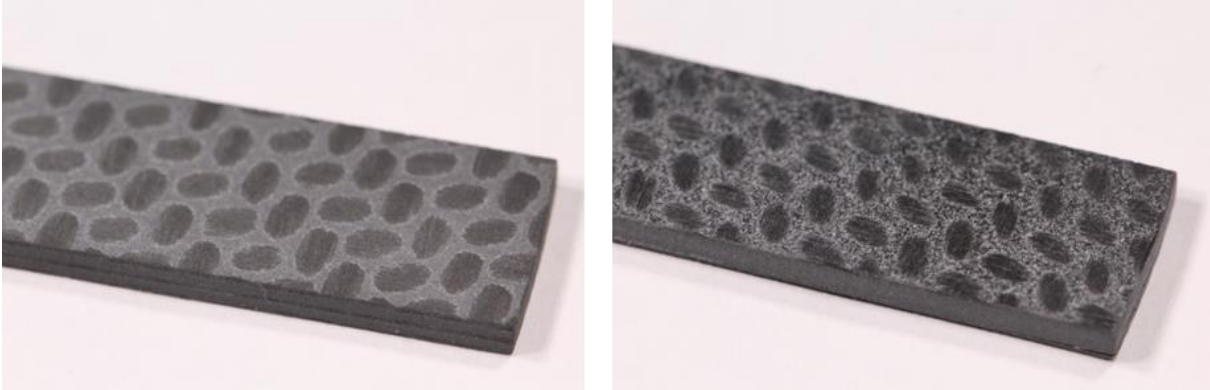
handelte CFK-Probekörper mittels Ultraschall verschweißt. Die verwendeten Parameter sind in der Tabelle A.29 des Anhangs zusammengefasst. Es wurden jeweils 15 verschweißte Proben hergestellt. Abschließend wurde in Zugversuchen die Scherfestigkeit der Verschweißung bestimmt. Bei einer mittleren Oberflächenrauheit von 5,7  $\mu\text{m}$ , also der Vorbehandlung mit feinem Schleifpapier, betrug die Scherfestigkeit  $10,6 \pm 1,4$  MPa. Bei einer Oberflächenrauheit von 13,8  $\mu\text{m}$  betrug die Scherfestigkeit hingegen ca.  $11,9 \pm 1,7$  MPa.

### Anrauen mittels Sandstrahlen

Zusätzlich zu dem Anrauen mit Sandpapier wurde in einer weiteren Untersuchung eine Sandstrahlanlage zum Anrauen der Oberflächen der duroplastischen CFK-Probekörper verwendet. Beim sogenannten Sandstrahlen werden Metallkugeln mit einem Durchmesser von wenigen hundert Mikrometern mithilfe eines pneumatischen Druckes beschleunigt und auf die anzurauende Oberfläche geleitet. Beim Aufprall der Metallkugeln auf die Oberfläche werden Teile aus dieser herausgeschlagen und dadurch ein Anrauen der Oberfläche erzielt.

Das Sandstrahlen wurde eingesetzt, um die Oberflächen der CFK-Probekörper in ihren Fügeflächen vorzubehandeln. Hierbei wurden in der Sandstrahlanlage zwei verschiedene pneumatische Drücke eingestellt, mit denen die Metallkugeln beschleunigt wur-

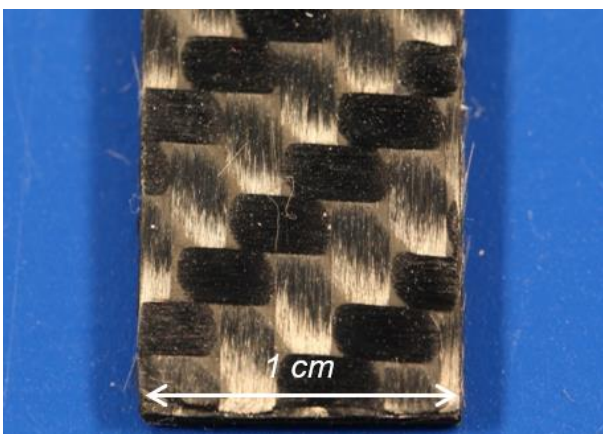
den, nämlich 0,25 MPa und 0,4 MPa. Anschließend wurden die arithmetischen Mittenrauwerte der Oberflächen bestimmt. Bei einem Druck von 0,25 MPa betrug der Mittenrauwert ca.  $1,9 \mu\text{m}$  und bei einem Druck von 0,4 MPa etwa  $2,9 \mu\text{m}$ . Abbildung 6.12 zeigt die Fügeflächen zweier zurechtgeschnittener CFK-Probekörper, die mithilfe von Sandstrahlen vorbehandelt wurden.



**Abbildung 6.12:** Mithilfe einer Sandstrahlanlage vorbehandelte Fügeflächen von duroplastischen CFK-Probekörpern. Der eingestellte Druck betrug 0,25 MPa (links) sowie 0,4 MPa (rechts). Das Muster auf der Oberfläche ist auf die im Material enthaltenen, gewebten Kohlenstofffasern zurückzuführen.

Anschließend wurden jeweils zwei mit einem Druck von 0,25 MPa bzw. 0,4 MPa vorbehandelte Oberflächen unter Zuhilfenahme einer  $150 \mu\text{m}$  dicken Zwischenfolie aus PA6 mithilfe von Ultraschall verschweißt. Die verwendeten Parameter sind in Tabelle A.30 des Anhangs zusammengefasst. Es wurden jeweils 20 verschweißte Proben hergestellt und anschließend im Zugversuch untersucht. Bei einer mittleren Oberflächenrauheit von ca.  $1,9 \mu\text{m}$ , also der Vorbehandlung mit einem Druck von 0,25 MPa, betrug die Scherfestigkeit etwa  $14,9 \pm 1,6 \text{ MPa}$ . Bei einer Oberflächenrauheit von etwa  $2,9 \mu\text{m}$  betrug die Scherfestigkeit hingegen ca.  $19,6 \pm 1,6 \text{ MPa}$ .

### Chemisches Ätzen



**Abbildung 6.13:** Mithilfe von chemischem Ätzen vorbehandelte Fügefläche eines duroplastischen CFK-Probekörpers.

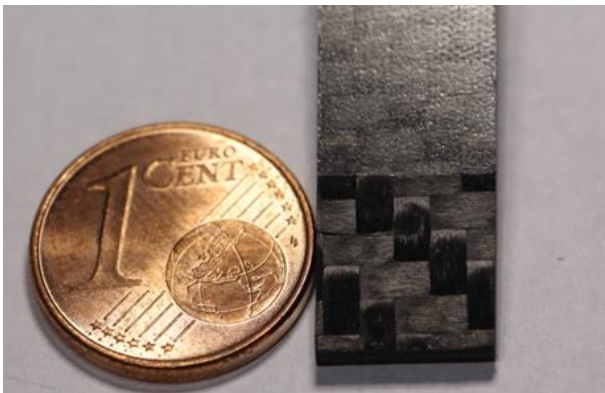
Neben dem mechanischen Anrauen der Fügeflächen wurde in einer weiteren Versuchsreihe die Vorbehandlung der duroplastischen CFK-Probekörper mittels chemischem Ätzen untersucht. Hierbei wurden die CFK-Probekörper zunächst für 20 Minuten in eine Lösung getaucht, die aus einer 95-prozentigen Schwefelsäure bestand [79]. Die Schwefelsäure zersetzte die Epoxidmatrix der CFK-Probekörper und legte dadurch die Kohlenstofffasern frei, an deren Zwischenräumen anschließend die thermoplastische Zwischenfolie im schmelzflüssigen Zu-

stand anhaften konnte. Abbildung 6.13 zeigt eine mittels chemischem Ätzen vorbehandelte CFK-Probe mit freigelegten Kohlenstofffasern.

Nach der chemischen Vorbehandlung erfolgte die Bestimmung der Oberflächenrauheit mittels eines taktilen Profilometers. Der arithmetische Mittenrauwert  $R_a$  betrug in der Fügefläche ca.  $9,5 \mu\text{m}$ .

Anschließend wurden jeweils zwei vorbehandelte Proben sowie eine  $150 \mu\text{m}$  dicke PA6-Folie mit den in Tabelle A.29 des Anhangs zusammengefassten Parametern mithilfe von Ultraschall verschweißt. Es wurden insgesamt 15 verschweißte Proben hergestellt und in Zugersuchen die Scherfestigkeit der Verschweißung bestimmt. Diese betrug ca.  $6,6 \pm 1,5 \text{ MPa}$ .

### Bestrahlung mittels Laserstrahlung



**Abbildung 6.14:** Durch Laserbestrahlung vorbehandelte Fügefläche einer duroplastischen CFK-Probe.

In einer weiteren Untersuchung erfolgte die Vorbehandlung der Fügefläche der duroplastischen CFK-Proben durch Bestrahlung mittels energiereicher Laserstrahlung. Durch die Laserbestrahlung wurde die duroplastische Matrix entfernt und somit die Kohlenstofffasern in der Fügefläche freigelegt. Abbildung 6.14 zeigt eine duroplastische CFK-Probe nach der Bestrahlung. Eine Bestimmung der Oberflächenrauheit wurde nicht durchgeführt. Insgesamt standen nur zwei CFK-Proben mit dieser Vor-

behandlung zur Verfügung und wurden anschließend zusammen mit einer thermoplastischen Zwischenfolie aus PA6 mit den in Tabelle A.29 genannten Parametern verschweißt. Die hergestellte Probe wurde abschließend im Zugversuch untersucht und die Scherfestigkeit der Fügeverbindung zu  $13,5 \text{ MPa}$  bestimmt.

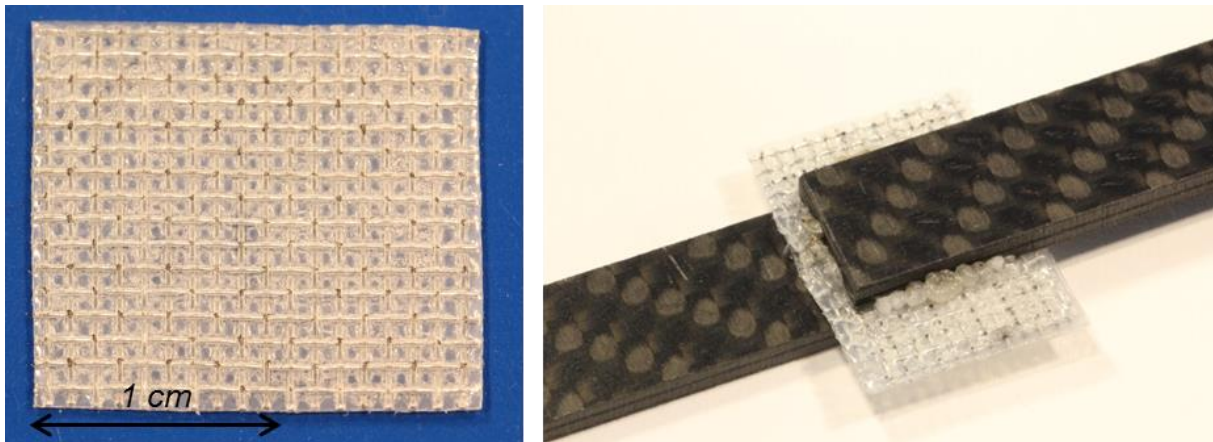
### Eisengitter-Folien-Kombination

Neben der Vorbehandlung der Fügeflächen wurde zudem untersucht, ob durch die Verwendung vorgefertigter und präparierter thermoplastischer Zwischenfolien eine Verschweißung von duroplastischen CFK-Proben ermöglicht wurde.

Zunächst wurden hierfür Eisengitter, die einen Drahtdurchmesser von  $250 \mu\text{m}$ , einen Drahtabstand von  $800 \mu\text{m}$  sowie eine Gesamtdicke von  $500 \mu\text{m}$  hatten, zwischen vier jeweils  $100 \mu\text{m}$  dicken PA6-Folien positioniert. Hierbei lagen jeweils zwei Folien unter- und oberhalb des Eisengitters. Anschließend wurde die Kombination aus Eisengittern und Folien unterhalb der Sonotrode auf dem Amboss einer Ultraschallschweißmaschine befestigt und mit den in Tabelle A.31 zusammengefassten Parametern verschweißt. Im linken Teil der Abbildung 6.15 ist die Eisengitter-Folien-Kombination nach der Ultraschallverschweißung dargestellt.

Im nächsten Schritt wurde die Eisengitter-Folien-Kombination zwischen die Fügeflächen zweier duroplastischer CFK-Proben gelegt und mit den in Tabelle A.29 zusam-

mengefassten Parametern verschweißt. Eine Vorbehandlung der Fügeflächen erfolgte hierbei nicht. Im rechten Teil der Abbildung 6.15 sind zwei duroplastische CFK-Proben dargestellt, die mithilfe der als thermoplastische Zwischenfolie dienenden Eisengitter-Folien-Kombination mittels Ultraschall miteinander verschweißt wurden.



**Abbildung 6.15:** Ein Eisengitter, das zwischen vier jeweils 100 µm dicken PA6-Folien verschweißt wurde (links). Duroplastische CFK-Proben, die mit einer als Zwischenfolie dienenden Eisengitter-Folien-Kombination ohne Fügeflächenvorbehandlung verschweißt wurden (rechts) [nach 79].

Während des Schweißprozesses erfüllte die Eisengitter-Folien-Kombination zwei Aufgaben: Zum einen rieb das Eisengitter infolge der Ultraschallschwingungen an den Oberflächen der Duroplasten und raute diese somit an. Zum anderen schmolz das PA6 auf und erstarrte anschließend an den rauen Oberflächen, wodurch beide CFK-Proben miteinander verbunden wurden.

Insgesamt wurden 15 miteinander verschweißte Proben hergestellt und anschließend in Zugversuchen untersucht. Die ermittelte Scherfestigkeit der Fügeverbindung betrug ca.  $5,0 \pm 0,4$  MPa.

### Versuche ohne Oberflächenbehandlung

In vorherigen Untersuchungen wurden 150 µm dicke Folien aus PA6 als Zwischenfolien verwendet. In einem abschließenden Versuch erfolgte zudem eine Variation der verwendeten thermoplastischen Zwischenfolien hinsichtlich Foliendicke oder Folienmaterial. Eine Vorbehandlung der Fügeflächen erfolgte nicht und somit wurden die Oberflächen nicht mit einem taktilen Profilometer vermessen.

Um den Einfluss des verwendeten thermoplastischen Materials der Zwischenfolie bei gleichbleibender Dicke zu untersuchen, wurde zunächst eine Folie aus 150 µm dickem PE als Fügehilfe zwischen die beiden Fügeflächen der Duroplasten positioniert und anschließend mit den in Tabelle A.29 genannten Parametern verschweißt. Hierbei wurde eine Probe hergestellt und die Scherfestigkeit der Verbindung bestimmt. Diese betrug ca. 1,7 MPa.

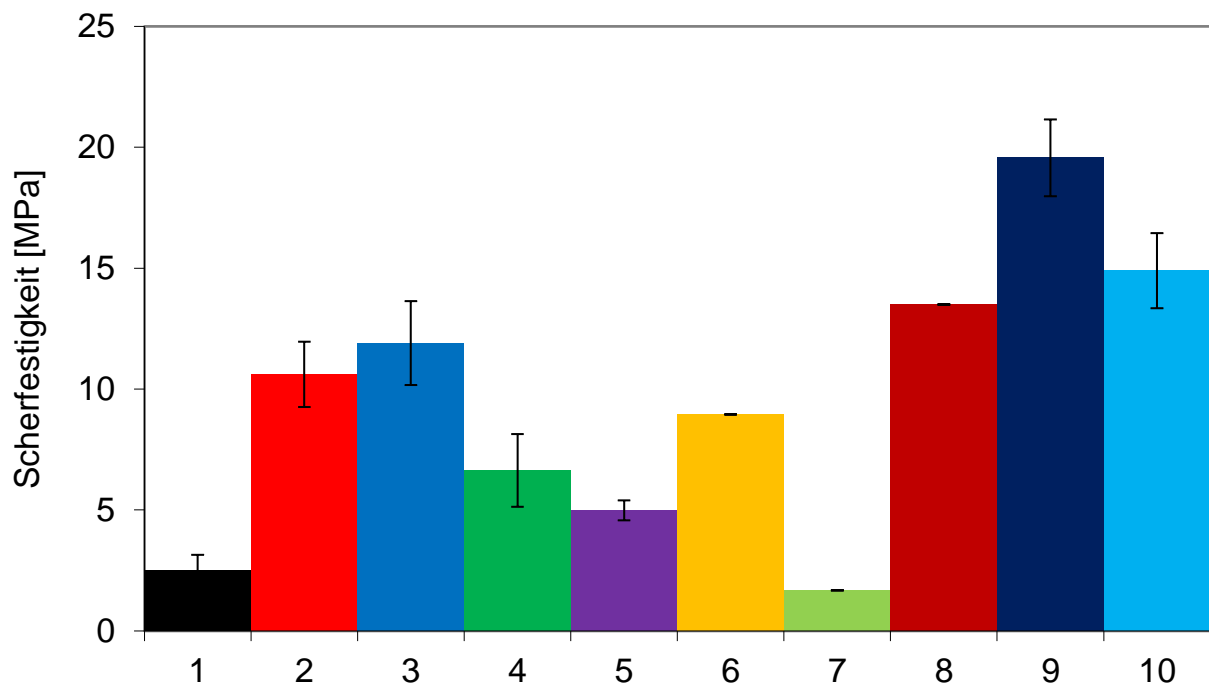
Um weiterhin den Einfluss der Dicke der verwendeten Zwischenfolie bei gleichbleibendem Material zu untersuchen, wurde eine Folie aus 250 µm dickem PA6 als Fügehilfe zwischen die beiden Fügeflächen der Duroplasten positioniert und anschlie-

ßend mit den in Tabelle A.29 genannten Parametern verschweißt. Hierbei wurde ebenfalls nur eine Probe hergestellt und die Scherfestigkeit der Verbindung bestimmt. Diese betrug in diesem Fall ca. 9,0 MPa.

Da bei diesen Versuchen nur sehr geringe Scherfestigkeiten ermittelt wurden, wurde auf weitergehende Untersuchungen ohne Vorbehandlung der Oberflächen verzichtet.

### Zusammenfassung

Die Untersuchungen zeigten, dass es möglich ist, zwei duroplastische CFK-Proben durch Zuhilfenahme einer thermoplastischen Zwischenfolie mittels Ultraschall miteinander zu verschweißen. Der zeitliche und apparative Aufwand für die Vorbehandlung der Fügeflächen konnte zudem gegenüber den in der Literatur vorgestellten Ansätzen deutlich verkürzt werden. Die nachfolgende Abbildung 6.16 stellt die erzielten Scherfestigkeiten der Verschweißung in Abhängigkeit der Art der Fügeflächenvorbehandlung dar.



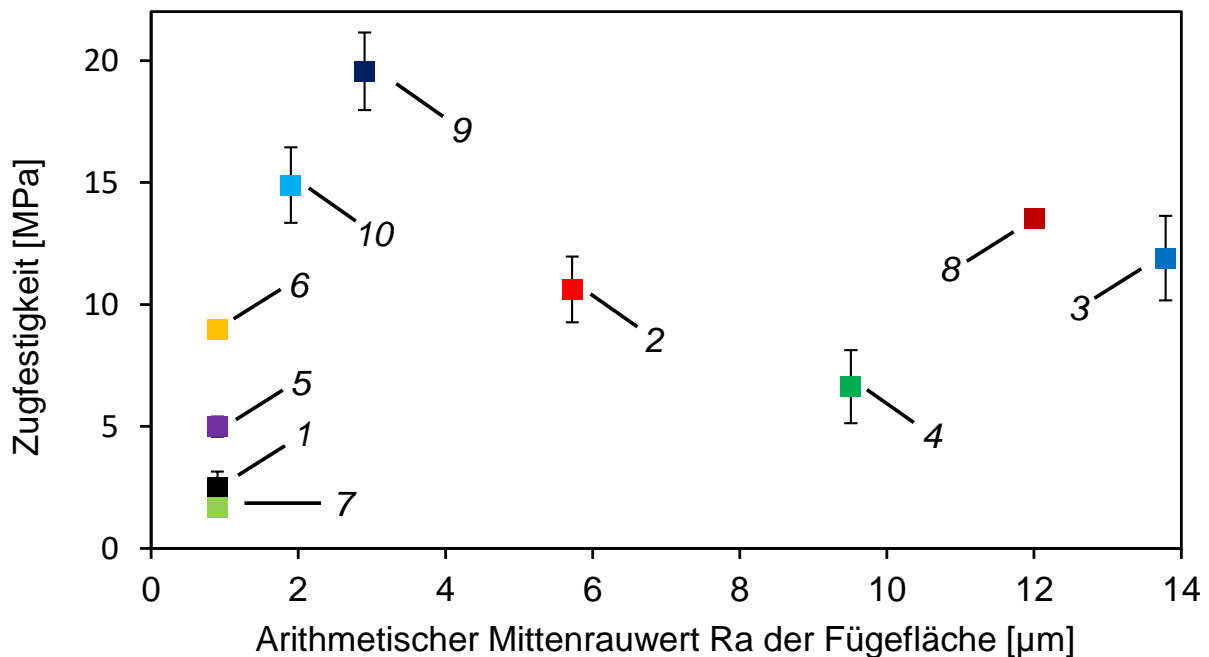
**Abbildung 6.16:** Zusammenstellung der in Abhängigkeit der Fügeflächenvorbehandlung erzielten Scherfestigkeiten der Fügeverbindung. 1: Ohne Vorbehandlung, 2: Anrauen mit feinem Schleifpapier, 3: Anrauen mit grobem Schleifpapier, 4: Chemisches Ätzen, 5: Eisengitter-Folien-Kombination, 6: Zwischenfolie aus 250 µm dickem PA6, 7: Zwischenfolie aus 150 µm dickem PE, 8: Vorbehandlung durch Laserbestrahlung, 9: Sandstrahlen mit 0,25 MPa, 10: Sandstrahlen mit 0,4 MPa.

Es zeigte sich, dass insbesondere die Vorbehandlung der Fügeflächen mittels Sandstrahlen, Laserbestrahlung sowie dem Schleifpapier zu einer relativ hohen Scherfestigkeit der Verbindung führte. Die bei der Vorbehandlung mittels Ätzen erzielten Scherfestigkeiten liegen mit etwa 10 MPa im mittleren Bereich der maximalen Werte. Die Verwendung der Eisengitter-Folien-Kombination führte mit etwa 5 MPa zwar zu relativ geringen Scherfestigkeiten, zeichnete sich aber durch eine Zeitersparnis infolge der entfallenden Vorbehandlung der Fügeflächen aus. Zudem ist es denkbar, die

Eisengitter-Folien-Kombinationen in einem automatisierten Prozess von Rolle zu Rolle kostengünstig herzustellen.

Aus der Variation hinsichtlich der Dicke und des Materials der verwendeten thermoplastischen Zwischenfolien wurde gefolgert, dass sie die Scherfestigkeit der Fügeverbindung beeinflussten. Darüber hinaus erscheint es möglich, weitere Steigerungen der Scherfestigkeiten durch eine geeignete Wahl der Prozessparameter zu erzielen, die im Rahmen der vorliegenden Arbeit jedoch nicht durchgeführt werden konnten.

Abschließend stellt Abbildung 6.17 die erzielten Scherfestigkeiten in Abhängigkeit der Mittenrauwerte  $R_a$  der Oberflächen nach der Vorbehandlung dar.



**Abbildung 6.17:** Zusammenstellung der in Abhängigkeit der Mittenrauwerte der Fügeflächen erzielten Scherfestigkeiten der Fügeverbindung. 1: Ohne Vorbehandlung, 2: Anrauen mit feinem Schleifpapier, 3: Anrauen mit grobem Schleifpapier, 4: Chemisches Ätzen, 5: Eigengitter-Folien-Kombination, 6: Zwischenfolie aus 250  $\mu\text{m}$  dickem PA6, 7: Zwischenfolie aus 150  $\mu\text{m}$  dickem PE, 8: Vorbehandlung durch Laserbestrahlung (Mittenrauwert wurde geschätzt, da keine Angabe vorhanden war), 9: Sandstrahlen mit 0,25 MPa, 10: Sandstrahlen mit 0,4 MPa.

Anhand der Abbildung 6.17 wird deutlich, dass eine Steigerung der Mittenrauheit der Oberfläche allein nicht zu einer Zunahme der Scherfestigkeit führt. So können beispielsweise bei einer Rauheit von ca. 3  $\mu\text{m}$  Scherfestigkeiten von etwa 20 MPa erreicht werden, während bei einer Rauheit von ca. 14  $\mu\text{m}$  die Scherfestigkeiten in etwa 14 MPa betragen. Dies lässt die Schlussfolgerung zu, dass neben der Oberflächenrauheit die Art der Fügeflächenvorbehandlung, Dicke und Material der Zwischenfolie sowie die eingestellten Prozessparameter die Scherfestigkeit beeinflussen.

## 7. Fazit und Ausblick

Die vorliegende Arbeit thematisiert die Ultraschallfertigung von CFK. Hierbei erfolgte innerhalb weniger Sekunden die Verarbeitung von trockenen, unbehandelten Kohlenstofffasern sowie festen, als Matrix dienenden, thermoplastischen Polymerfolien zu ein- und mehrlagigen CFK. Entgegen anderen, teilweise ebenfalls ultraschallbasierten Fertigungsverfahren, war bei der Ultraschallfertigung von CFK die Verwendung von vorgefertigten CFK-Halbzeugen nicht notwendig. Des Weiteren waren die Investitionskosten für die verwendeten Ultraschallschweißmaschinen mit wenigen Zehntausend Euro deutlich geringer als die Kosten für konventionelle Produktionsanlagen von CFK, die mehrere Hunderttausend Euro kosten.

Während des systematischen Entwicklungsprozesses der Ultraschallfertigung von CFK wurde durch eine geeignete Auswahl aus Prozessparametern und Dicke der Polymerfolien eine vollständige und über die gesamte Probendicke gleichmäßige Einbettung der Fasern in die Matrix erreicht. Anhand von Schnittdarstellungen war zu erkennen, dass der Aufbau im Inneren der ultraschallgefertigten CFK mit dem der konventionell gefertigten vergleichbar war.

Die Dicke der mittels Ultraschall gefertigten CFK-Proben mit einer PA6-Matrix betrug bis zu 2,5 mm und ihre Zugfestigkeit bei einem Faserfüllgrad von ca. 31,6 Vol.-% etwa 1,24 GPa. Damit wiesen die in der vorliegenden Arbeit hergestellten CFK ein vergleichbares Verhältnis von Zugfestigkeit zu Faserfüllgrad auf, wie entsprechende CFK mit einer PA6-Matrix aus konventioneller Fertigung.

In weiterführenden Arbeiten gilt es den Faserfüllgrad der ultraschallgefertigten CFK zu erhöhen und Werte von ca. 60 Vol.-% anzustreben, wie sie derzeit mittels konventioneller Pultrusion oder dem Faserwickeln erreicht werden. Der Faserfüllgrad kann bei der Ultraschallfertigung von CFK etwa durch Verwendung von dünneren Polymerfolien oder dem Einsatz von leistungsfähigeren Ultraschallschweißmaschinen gesteigert werden. Zudem ist es denkbar, die Faser-Matrix-Haftung durch die Zugabe von sogenannten Haftvermittlern zu erhöhen und damit die Zugfestigkeit der CFK zu steigern.

Die gängigen Thermoplaste PP, PE, PC, PA6 und PEEK konnten in der vorliegenden Arbeit als Matrixmaterial eingesetzt werden. Bei CFK-Proben mit einer PEEK-Matrix traten einerseits infolge von Überhitzungen chemische Zersetzungen sowie andererseits unvollständig verschweißte Bereiche auf. PEEK wird insbesondere für Anwendungen in mechanisch und thermisch hoch belasteten Bereichen wie der Luft- und Raumfahrt eingesetzt und ist somit als Matrixmaterial für sogenannte High-End-CFK sehr weit verbreitet. Daher gilt es in weiterführenden Arbeiten die Verarbeitung von PEEK mithilfe von Ultraschall weiterzuentwickeln, indem beispielsweise über eine Erweiterung des Versuchsaufbaus eine Vortemperierung der verwendeten PEEK-Folien erfolgt und dadurch eine gleichmäßige Aufschmelzung erreicht wird.

Ebenso gilt es den Einfluss der Matrixviskosität auf die mechanischen Eigenschaften der hergestellten CFK zu untersuchen. So ist es etwa denkbar, dass durch den Einsatz von fließfähigen Matrixmaterialien eine höhere Benetzung der Fasern im Inneren

der Probe und damit eine stärkere Verbundhaftung erreicht werden können, wenn die mikroskopisch kleinen Faserzwischenräume vollständig mit Matrix gefüllt werden. Bei der Ultraschallfertigung von CFK wird die Matrix im schmelzflüssigen Zustand mit einer Kraft von bis zu 2.000 N in die Faserzwischenräume gedrückt. Daher erscheint es zudem möglich, dass durch die Verwendung einer fließfähigen Matrix die für die Einbettung der Fasern benötigten mechanischen Kräfte reduziert werden können.

In der vorliegenden Arbeit wurden Kohlenstofffasergewebe zu CFK-Platten mit einer Abmessung von 116 mm x 64 mm x 1,2 mm verarbeitet. Die Größe der Platten war jedoch durch die Abmessung der verwendeten Sonotrode beschränkt, daher sollten in weiterführenden Untersuchungen die Abmessungen der CFK-Platten gesteigert werden. Hierfür können entweder größere Sonotroden verwendet oder mehrere Schweißungen nebeneinander durchgeführt werden. Darüber hinaus wurde gezeigt, dass die Gewebe zu dreidimensionalen CFK-Bauteilen verarbeitet werden können. Um weitere, geometrisch komplexere CFK-Bauteile herzustellen, waren jedoch individuell angefertigte Sonotroden notwendig, deren Geometrie an die der zu fertigenden Bauteile angepasst war. Da dies im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich war, gilt es entsprechende Untersuchungen in weiterführenden Arbeiten durchzuführen.

Neben der sequenziellen Ultraschallfertigung wurde zudem durch die Verwendung von rotierenden Rundsonotroden die kontinuierliche Ultraschallfertigung von CFK demonstriert. Es konnten hierbei bis zu 30 cm lange Proben mit einem Faserfüllgrad von 21 Vol.-% und einer Zugfestigkeit von 847 MPa hergestellt werden. In weiteren Untersuchungen gilt es, die Serienfertigung sowohl für die sequenzielle als auch kontinuierliche Ultraschallfertigung von CFK zu demonstrieren. Hierfür ist es denkbar in einem Rolle-zu-Rolle-Prozess die Rohmaterialien von Rollen abzuwickeln, mittels Ultraschall kontinuierlich zu CFK-Tapes zu verarbeiten und anschließend erneut auf Rollen aufzuwickeln. Diese CFK-Tapes können in einem anschließenden Prozess, wie beispielsweise dem Tapelegen oder -wickeln, zu Bauteilen aus CFK verarbeitet werden. Ebenso erscheint es als möglich, dass bei der kontinuierlichen Ultraschallfertigung von CFK die Rohmaterialien in-situ zu CFK-Bauteilen verarbeitet werden, indem die Sonotrode, ähnlich wie beim Tapelegen, während des Ultraschallschweißprozesses die Kontur des zu fertigenden Bauteils abfährt.

Abschließend demonstrierten Untersuchungen, dass mithilfe von Ultraschall konventionell gefertigte CFK miteinander gefügt werden können. Hierbei wurden neben thermoplastischen CFK auch CFK mit einer duroplastischen Matrix miteinander verschweißt. Hierzu mussten die Duroplaste an ihren Fügeflächen beispielsweise durch mechanisches Anrauen vorbehandelt und eine thermoplastische Zwischenfolie als Fügehilfe verwendet werden. Es zeigte sich hierbei, dass die Art der Vorbehandlung der Fügefläche sowie die Auswahl der Zwischenfolie einen Einfluss auf die Scherfestigkeit der Verbindung hatten. Die maximal erzielte Scherfestigkeit betrug 19,4 MPa. Es ist jedoch davon auszugehen, dass durch weiterführende Untersuchungen sowohl zusätzliche Möglichkeiten der Fügeflächenvorbehandlung erforscht als auch eine geeignete Auswahl aus Material und Dicke der Zwischenfolie sowie den eingestellten Prozessparametern getroffen werden kann, was dazu beiträgt, die Scherfestigkeit der Verbindung zu steigern.



## Literaturverzeichnis

- [1] H. Lengsfeld, F. Wolff-Fabris, J. Krämer, J. Lacalle, V. Altstädt, „Faser-verbundwerkstoffe – Prepregs und ihre Verarbeitung“, Aufl. 1, Carl Hanser, München (2014), ISBN 978-3-446-43300-7
- [2] M. Neitzel, P. Mitschang, U. Breuer, „Handbuch Verbundwerkstoffe – Werkstoffe, Verarbeitung, Anwendung“, Aufl. 2, Carl Hanser, München (2014), ISBN 978-3-446-43696-1
- [3] T. Kraus, M. Kühnel, E. Witten, „Composites-Marktbericht 2016 - Marktentwicklungen, Trends, Ausblicke und Herausforderungen“, Augsburg, (2016)
- [4] M. Sauer, M. Kühnel, E. Witten, „Composites-Marktbericht 2017 - Marktentwicklungen, Trends, Ausblicke und Herausforderungen“, Augsburg, (2017)
- [5] N. Grigat, „Ultraschallfertigung faserverstärkter Kunststoffe“, Bachelor-Arbeit an der Fakultät für Maschinenwesen der RWTH-Aachen, Lehr- und Forschungsgebiet Konstruktion und Entwicklung von Mikrosystemen, KEmikro (2016)
- [6] U. Neumann, P. Mitschang, C. Weimer, A. Gessler, „Einfluss des Ultraschall-Preformens auf die mechanischen Eigenschaften von Kohlenstofffaserverbunden“, in *Zeitschrift Kunststofftechnik*. **13** (2017)
- [7] W. Zou, „Untersuchung und Optimierung eines ultraschallbasierten Produktionsprozesses zur Herstellung von faserverstärkten Kunststoffen“, Master-Arbeit an der Fakultät für Maschinenwesen der RWTH-Aachen, Lehr- und Forschungsgebiet Konstruktion und Entwicklung von Mikrosystemen, KEmikro (2017)
- [8] T. Nieradzik, „Ultraschallfertigung von Faser-Kunststoff-Verbunden am Beispiel eines CFK-Überlastsensors“, Dissertation an der Fakultät für Maschinenwesen der RWTH-Aachen, Lehr- und Forschungsgebiet Konstruktion und Entwicklung von Mikrosystemen, KEmikro (2015)
- [9] J. Kosloh, J. Sackmann, W. K. Schomburg, „Ultrasonic fabrication of micro fluidic channels from polyether ether ketone (PEEK)“, in *Microsystem Technologies*. **23** (2017) DOI: [10.1007/s00542-017-3284-1](https://doi.org/10.1007/s00542-017-3284-1)
- [10] J. Sackmann, K. Burlage, C. Gerhardy, B. Memering, S. Liao, W. K. Schomburg, „Review on ultrasonic fabrication of polymer micro devices“, in *Ultrasonics*. **56** (2015) DOI: [10.1016/j.ultras.2014.08.007](https://doi.org/10.1016/j.ultras.2014.08.007)
- [11] AVK – Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe, „Handbuch Faser-verbundkunststoffe/Composites“, Aufl. 4, Springer Vieweg, Wiesbaden (2014), ISBN 978-3-658-02754-4

- [12] G. W. Ehrenstein, „*Faserverbundkunststoffe – Werkstoffe – Verarbeitung – Eigenschaften*“, Aufl. 2, Carl Hanser, München (2006), ISBN 978-3-446-22716-3
- [13] K. Kappe, „*Herstellung eines kohlenstofffaserverstärkten Bauteils mittels Ultraschall*“, Bachelor-Arbeit an der Fakultät für Maschinenwesen der RWTH-Aachen, Lehr- und Forschungsgebiet Konstruktion und Entwicklung von Mikrosystemen, KEmikro (2017)
- [14] E. Roos, K. Maile, „*Werkstoffkunde für Ingenieure – Grundlagen, Anwendung, Prüfung*“, Aufl. 4, Springer, Berlin (2011), ISBN 978-3-642-17463-6
- [15] Produktion, „*CFK: 5 Wege, mit carbonfaserverstärktem Kunststoff in Serie zu gehen*“ (2016), unter: <https://www.produktion.de/trends-innovationen/cfk-5-wege-mit-carbonfaserverstaerkten-kunststoff-in-serie-zu-gehen-343.html> (abgerufen am 2.10.17)
- [16] M. Bonnet, „*Kunststoffe in der Ingenieur Anwendung - verstehen und zuverlässig auswählen*“, Aufl. 1, Vieweg + Teubner, Wiesbaden (2009), ISBN 978-3-8348-0349-8
- [17] Conrad Electronic International, *Abbildung* (2017), unter: [http://www.conrad.com/medias/global/ce/2000\\_2999/2300/2380/2380/238066\\_BB\\_02\\_FB.EPS\\_1000.jpg](http://www.conrad.com/medias/global/ce/2000_2999/2300/2380/2380/238066_BB_02_FB.EPS_1000.jpg) (abgerufen am 7.10.17)
- [18] FVK GmbH, *Abbildung* (2017), unter: [http://www.fvk-dessau.de/k145\\_img\\_web/head\\_wind\\_rotor1.jpg](http://www.fvk-dessau.de/k145_img_web/head_wind_rotor1.jpg) (abgerufen am 31.8.17)
- [19] European Commission, Joint Research Centre, Institute for the Protection and Security of the Citizen, „*Review of industrial manufacturing capacity for fibre-reinforced polymers as prospective structural components in Shipping*“, Publications Office of the European Union, Luxembourg (2013), ISBN 978-92-79-28120-4
- [20] F. Henning, E. Moeller, „*Handbuch Leichtbau – Methoden, Werkstoffe, Fertigung*“, Aufl. 2, Carl Hanser, München (2011), ISBN 978-3-446-42267-4
- [21] Easy Composites Ltd, *Abbildung* (2018), unter: <https://system.eu2.netsuite.com/core/media/media.nl?id=148718&c=3937524&h=f42d725bc1eb2ba52803> (abgerufen am 18.3.18)
- [22] Easy Composites Ltd, *Abbildung* (2018), unter: <http://www.easycomposites.asia/Images/Guides/beginner-pre-preg/Large/surfacing-ply-lay-4.jpg> (abgerufen am 11.4.18)
- [23] writingaboutcars.com, *Abbildung* (2018), unter: <http://writingaboutcars.com/wp-content/uploads/2015/12/hawker400xp.png> (abgerufen am 11.4.18)

- [24] Internetquelle, *Abbildung* (2018), unter: <https://d2n4wb9orp1vta.cloudfront.net/cms/Viper%20machine%20%202.jpg;width=560;quality=90> (abgerufen am 11.4.18)
- [25] Epsilon Composite, *Abbildung* (2018), unter: <http://www.epsilon-composite.com/img/pultrusion.jpg> (abgerufen am 11.4.18)
- [26] Multistation SAS, *Abbildung* (2018), unter: [https://www.multistation.com/voy\\_content/uploads/sites/4/2017/10/type1-1-540x342.jpg](https://www.multistation.com/voy_content/uploads/sites/4/2017/10/type1-1-540x342.jpg) (abgerufen am 11.4.18)
- [27] Hille Engineering GmbH & Co. KG, *Abbildung* (2018), unter: [http://www.hille-online.com/fileadmin/images/Transportable\\_large.jpg](http://www.hille-online.com/fileadmin/images/Transportable_large.jpg) (abgerufen am 11.4.18)
- [28] R&G Faserverbundwerkstoffe GmbH, *Abbildung* (2018), unter: [https://www.r-g.de/tl\\_files/Bilder/Handlaminat.png](https://www.r-g.de/tl_files/Bilder/Handlaminat.png) (abgerufen am 11.4.18)
- [29] Hühlig GmbH, *Abbildung* (2018), unter: <http://www.plastverarbeiter.de/wp-content/uploads/2015/09/1966-Dieffenbacher-Composites-HD-Compression-RTM-Prozessablauf-CMYK-300-dpi-20150916-1024x328.jpg> (abgerufen am 11.4.18)
- [30] C. Hopmann, W. Michaeli, „*Einführung in die Kunststoffverarbeitung*“, Aufl. 7, Carl Hanser, München (2015), ISBN 978-3-446-44627-4
- [31] Institut für Verbundwerkstoffe GmbH, *Abbildung* (2018), unter: [http://www.ivw.uni-kl.de/fileadmin/processed/csm\\_Airbus\\_Semi\\_finished\\_panel\\_material\\_01\\_97acf45bcc.jpg](http://www.ivw.uni-kl.de/fileadmin/processed/csm_Airbus_Semi_finished_panel_material_01_97acf45bcc.jpg) (abgerufen am 11.4.18)
- [32] A. Barth, „*Bistabile Mikroventile mit kurzer Schaltzeit und niedriger Ansteuerspannung*“, Dissertation an der Fakultät für Maschinenwesen der RWTH-Aachen, Lehr- und Forschungsgebiet Konstruktion und Entwicklung von Mikrosystemen, KEmikro (2014)
- [33] C. Bonten, „*Kunststofftechnik – Einführung und Grundlagen*“, Aufl. 1, Carl Hanser, München (2014), ISBN 978-3-446-44093-7
- [34] F. Lionetto, R. Dell’Anna, F. Montagna, A. Maffezzoli, „*Ultrasonic assisted consolidation of commingled thermoplastic/glass fiber rovings*“, in *Frontiers in Materials*. **2** (2015) DOI: [10.3389/fmats.2015.00032](https://doi.org/10.3389/fmats.2015.00032)
- [35] J. Sackmann, „*Ultraschallfertigung zur Herstellung mikrofluidischer Systeme*“, Dissertation an der Fakultät für Maschinenwesen der RWTH-Aachen, Lehr- und Forschungsgebiet Konstruktion und Entwicklung von Mikrosystemen, KEmikro (2015)
- [36] H. P. C. Daniels, „*Ultrasonic Welding*“, in *Ultrasonics*. **3** (1965)

- [37] F. Weiland, „*Ultraschall-Preformmontage zur Herstellung von CFK-Luftfahrtstrukturen*“, Dissertation an Universität Kaiserslautern im Fachbereich für Maschinenbau und Verfahrenstechnik (2013)
- [38] I. Fernandez Villegas, L. Moser, A. Yousefpour, P Mitschang, H. En Bersee, „*Process and performance evaluation of ultrasonic, induction and resistance welding of advanced thermoplastic composites*“, in *Journal of Thermoplastic Composite Material*. **26** (2012)  
DOI: [10.1177/0892705712456031](https://doi.org/10.1177/0892705712456031)
- [39] S. Pappada, A. Salomi, J. Montanaro, A. Passaro, F. Lionetto, A. Maffezzoli, „*Induction Welding for Assembly of Thermosetting Matrix Composites*“, präsentiert auf *SAMPE Europe Conference 15 Amiens, Amiens, France*. (2015)
- [40] M. Pasternak, „*Laminieren von Carbon-Preforms*“, in *Kunststoffe*. **10** (2012)
- [41] M. Pasternak, „*Ultraschall als Energiequelle zum Laminieren von CFK - Schallwellen richten Carbonfasern aus*“ (2013), unter: <http://www.plastverarbeiter.de/38200/schallwellen-richten-carbonfasern-aus/> (abgerufen am 18.03.18)
- [42] Y. Khaled, H. Mehdi, „*Precessing of thermoplastic matrix composites through automated fiber placement and tape laying methods*“, in *Journal of Thermoplastic Composite Material*. (2017)  
DOI: [10.1177/0892705717738305](https://doi.org/10.1177/0892705717738305)
- [43] R. Rizzolo, D. Walczyk, „*Ultrasonic consolidation of thermoplastic composite prepreg for automated fiber placement*“, in *Journal of Thermoplastic Composite Material*. **29** (2016)  
DOI: [10.1177/0892705714565705](https://doi.org/10.1177/0892705714565705)
- [44] Q. Chu, Y. Li, J. Xiao, D. Huan, X. Zhang, X. Chen, „*Processing and characterization of the thermoplastic composites manufactured by ultrasonic vibration-assisted automated fiber placement*“, in *Journal of Thermoplastic Composite Material*. **31** (2018)  
DOI: [10.1177/0892705717697781](https://doi.org/10.1177/0892705717697781)
- [45] Hüthig GmbH, „*CFK/GFK-Verstärkungen für LFT-Bauteile - Tapen verbessert die Leistung*“ (2015), unter: <http://www.plastverarbeiter.de/50050/tapen-verbessert-die-leistung/> (abgerufen am 18.03.18)
- [46] F. Lionetto, R. Dell’Anna, F. Montagna, A. Maffezzoli, „*Modeling of continuous ultrasonic impregnation and consolidation of thermoplastic matrix composites*“, in *Composites: Part A*. **82** (2016) DOI: [10.1016/j.compositesa.2015.12.004](https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2015.12.004)

- [47] E-Stations, *Abbildung* (2017), unter: [https://blog.e-stations.de/wp-content/uploads/sites/7/2013/07/P90129195\\_highRes.jpg](https://blog.e-stations.de/wp-content/uploads/sites/7/2013/07/P90129195_highRes.jpg)  
(abgerufen am 26.02.17)
- [48] SGL Group, *Abbildung* (2017), unter: [http://www.sglgroup.com/cms/\\_common/images/innovation/carbon-in-mobility/04\\_sgl\\_acf/gallery/Passenger-compartment-bwm-i3.jpg](http://www.sglgroup.com/cms/_common/images/innovation/carbon-in-mobility/04_sgl_acf/gallery/Passenger-compartment-bwm-i3.jpg)  
(abgerufen am 26.02.17)
- [49] Bauer Xcel Media Deutschland KG, *Zahlenwert Gewicht Karosserie BMW i3*, (2017), unter: <http://www.autozeitung.de/bmw-i3-2013-carbon-karosseriefertigung-cfk-karbon-technik-elektro-gn-401371-62184.html>  
(abgerufen am 26.02.17)
- [50] Zeit Online GmbH, *Zahlenwert Gewicht Karosserie VW Polo*, (2017), unter: <http://www.zeit.de/auto/2011-03/leichtbau-cfk-aluminium>  
(abgerufen am 26.02.17)
- [51] World Steel Association, „*Steel Statistical Yearbook 2016*“, Brüssel, (2016)
- [52] The International Aluminium Institute, *Zahlenwert Weltweite Aluminiumherstellung*, (2018), unter: <http://www.world-aluminium.org/statistics/primary-aluminium-production/#map> (abgerufen am 18.03.18)
- [53] A. Gomer, N. Grigat, J. Sackmann, W.K. Schomburg, „*Matrix aus Polymerfolien*“, in *Kunststoffe*. **2** (2017)
- [54] Toho Tenax Europe GmbH, „*Eigenschaften von Tenax Filamentgarn*“ (2017), unter: <http://www.tohotenax.com/de/produkte/tenax%c2%ae-kohlenstofffaser/tenax%c2%ae-filamentgarn/>  
(abgerufen am 18.05.2017)
- [55] Emerson Industrial Automation, „*Ultrasonic Assembly Systems. 2000 Series Integrated Ultrasonic Plastic Welders IW+ – 1100, 2200 & 3300 Watts*“, Technisches Datenblatt
- [56] Zwick GmbH & Co. KG, „*Produktinformation zwickiLine Material-Prüfmaschinen Z5.0*“, unter: [https://www.zwick.de/-/media/files/sharepoint/vertriebsdoku\\_pi/02\\_685\\_zwicki-5kn\\_pi\\_d.pdf](https://www.zwick.de/-/media/files/sharepoint/vertriebsdoku_pi/02_685_zwicki-5kn_pi_d.pdf)  
(abgerufen am 18.05.2018)
- [57] S. Kölker, B. Cottmann, „*Ultraschallfertigung mehrlagiger kohlenstofffaserverstärkter Kunststoffe*“, Projektarbeit an der Fakultät für Maschinenwesen der RWTH-Aachen, Lehr- und Forschungsgebiet Konstruktion und Entwicklung von Mikrosystemen, KEmikro (2018)
- [58] Herrmann Ultraschalltechnik GmbH & Co. KG, „*Ultraschall-Schweißgeräte der HiQ Serie*“, Technisches Datenblatt, unter: <https://www.herrmannultraschall.com/de/produkte/ultraschall->

[schweissmaschinen/schweissmaschinen-hiq-baureihe/](#) (abgerufen am 24.07.18)

- [59] PCE Deutschland GmbH, „*Kraftmessgerät PCE-DFG N 500*“, Technisches Datenblatt, unter: [https://www.pce-instruments.com/deutsch/messtechnik/messgeraete-fuer-alle-parameter/kraftmessgeraet-pce-instruments-kraftmessgeraet-pce-dfg-n-500-det\\_5854668.htm?list=kat&listpos=12](https://www.pce-instruments.com/deutsch/messtechnik/messgeraete-fuer-alle-parameter/kraftmessgeraet-pce-instruments-kraftmessgeraet-pce-dfg-n-500-det_5854668.htm?list=kat&listpos=12) (abgerufen am 24.07.18)
- [60] Celanese Corporation, „*CELSTRAN® CFR-TP PA6 CF60-03 | PA6*“, (2018), unter: <http://tools.celanese.com/standard/main/quicksearch/ds/0> (abgerufen am 23.8.18)
- [61] A. Gomer, W. Zou, N. Grigat, J. Sackmann, W.K. Schomburg, „*Fabrication of Fiber Reinforced Plastics by Ultrasonic Welding*“, in *Journal of Composite Science*. **56** (2018) DOI: [10.3390/jcs2030056](https://doi.org/10.3390/jcs2030056)
- [62] VirtualExpo SAS, *Abbildung* (2018), unter: [http://img.directindustry.de/images\\_di/photo-mg/37817-11907733.jpg](http://img.directindustry.de/images_di/photo-mg/37817-11907733.jpg) (abgerufen am 24.07.18)
- [63] Carbon-Werke Weißgerber GmbH, „*200 g/m<sup>2</sup> Carbon-Gewebe KDL-8003, Leinwand, 100 cm*“, (2018), unter: <https://www.carbon-vertrieb.com/carbon-fasern/carbon-gewebe/89/200g/m2-carbon-gewebe-kdl-8003/120-leinwand> (abgerufen am 24.7.18)
- [64] Mühlmeier GmbH & Co. KG, „*E-CR-Glas Direktroving*“, (2018), unter: <https://composite.muehlmeier.de/e-cr-glas-direktroving-300-9600-tex.html> (abgerufen am 24.7.18)
- [65] P.+H. Plüss AG, „*Unverbindliche Richtwerte für Standard-Profile Glasfaser-Polyester*“, (2018), unter: <http://www.pluessag.ch/de/technische-informationen/gfk-technische-daten.html> (abgerufen am 24.7.18)
- [66] Cera Engineering, „*Cera UltraSonic - Ultrasonic sewing*“, (2018), unter: <http://www.cera-groupecera.com/en/standards/machines-to-weld-and-or-cut-by-sonics/cera-ultrasonic-ultrasonic-sewing> (abgerufen am 20.1.18)
- [67] Carbon-Werke Weißgerber GmbH, „*3K Carbon-Roving NF-3, 200 tex*“, (2018), unter: <https://www.carbon-vertrieb.com/carbon-fasern/carbon-rovings/409/3k-carbon-roving-nf-3> (abgerufen am 20.1.18)
- [68] Carbon-Werke Weißgerber GmbH, „*6K Carbon-Roving NF-6, 400 tex*“, (2018), unter: <https://www.carbon-vertrieb.com/carbon-fasern/carbon-rovings/408/6k-carbon-roving-nf-6> (abgerufen am 20.1.18)

- [69] Carbon-Werke Weißgerber GmbH, „12K Carbon-Roving NF-12, 800 tex“, (2018), unter:  
<https://www.carbon-vertrieb.com/carbon-fasern/carbon-rovings/406/12k-carbon-roving-nf-12>  
(abgerufen am 20.1.18)
- [70] Carbon-Werke Weißgerber GmbH, „24K Carbon-Roving NF-24, 1.600 tex“, (2018), unter:  
<https://www.carbon-vertrieb.com/carbon-fasern/carbon-rovings/404/24k-carbon-roving-nf-24>  
(abgerufen am 20.1.18)
- [71] Carbon-Werke Weißgerber GmbH, „320 g/m<sup>2</sup> Carbon-Gewebe KDK-8051, Köper, 120 cm“, (2018), unter:  
<https://www.carbon-vertrieb.com/carbon-fasern/carbon-gewebe/20/320-g/m2-carbon-gewebe-kdl-8051-leinwand-120-cm?c=164>  
(abgerufen am 14.7.18)
- [72] C. Ageorges, L. Yea, M. Houb, „Advances in fusion bonding techniques for joining thermoplastic matrix composites: a review“, in *Composites: Part A*. **32** (2001) DOI: [10.1016/S1359-835X\(00\)00166-4](https://doi.org/10.1016/S1359-835X(00)00166-4)
- [73] B. Jongbloed, J. Teuwen, G. Palardy, I. F. Villegas, R. Benedictus, „Improving weld uniformity in continuous ultrasonic welding of thermoplastic composites“, präsentiert auf *ECCM18 - 18th European Conference on Composite Materials, Athens, Greece*. (2018)
- [74] Wilhelm Herm. Müller GmbH & Co. KG, „Werkstoffdatenblatt PA66 natur“, (2018), unter:  
[https://www.whm.net/sites/default/files/pa66\\_natur.pdf](https://www.whm.net/sites/default/files/pa66_natur.pdf) (abgerufen am 31.8.18)
- [75] Quadrant Engineering Plastic Products, „Techtron PPS“, (2011), unter:  
[https://media.quadrantplastics.com/fileadmin/quadrant/documents/QEP\\_P/EU/Product\\_Data\\_Sheets\\_PDF/AEP/Techtron\\_1000\\_PPS\\_PDS\\_D\\_2\\_7042011.pdf?\\_ga=2.8843249.550050280.1535697287-561972758.1535697287](https://media.quadrantplastics.com/fileadmin/quadrant/documents/QEP_P/EU/Product_Data_Sheets_PDF/AEP/Techtron_1000_PPS_PDS_D_2_7042011.pdf?_ga=2.8843249.550050280.1535697287-561972758.1535697287) (abgerufen am 31.8.18)
- [76] E. Tsiangou, S. Teixeira de Freitas, I. F. Villegas, R. Benedictus, „Ultrasonic welding of CF/Epoxy to CF/PEEK composites: Effect of the energy director material on the welding process“, präsentiert auf *ECCM18 - 18th European Conference on Composite Materials, Athens, Greece*. (2018)
- [77] Q. Voleppea, T. Pardoeb, C. Baillya, „Thermoset composite assembling method by welding of thermoplastic surface layers: microstructure and toughness of the resulting thermoplastic/epoxy resin interfaces“, präsentiert auf *ECCM16 - 16th European Conference on Composite Materials, Sevilla, Spain*. (2014)

- [78] Carbon-Werke Weißgerber GmbH, „*CFK-Platte Stärke 2 mm*“, (2018), unter: <https://www.carbon-vertrieb.com/carbon-technik/cfk-platten/423/cfk-platte-staerke-2-mm?c=147> (abgerufen am 31.8.18)
- [79] A. Gomer, J. Sackmann, W.K. Schomburg, „*Gefügte Kunststoffe*“, in *Kunststoffe*. **12** (2016)

# Anhang

## A.1: Datenblätter

In diesem Abschnitt des Anhanges werden relevante Datenblätter der verwendeten Maschinen und Materialien dokumentiert.

### Datenblätter der verwendeten Ultraschallschweißmaschinen:

In der vorliegenden Arbeit wurden drei verschiedene Ultraschallschweißmaschinen verwendet. Das technische Datenblatt für die Ultraschallschweißmaschine 2000 IW/IW+ Kompakt-Schweißsystem des Herstellers BRANSON Ultraschall kann unter [55] und die technischen Datenblätter für die HiQ DIALOG 6200 sowie HiQ DIALOG 1200 Ultraschallschweißmaschinen der Firma Herrmann Ultraschall können unter [58] eingesehen werden. Die nachfolgende Tabelle fasst die wichtigsten technischen Daten der Maschinen zusammen.

**Tabelle A.1:** Technische Daten der in der vorliegenden Arbeit verwendeten Ultraschallschweißmaschinen [55,58]

Parameter	2000 IW+	HiQ 1200	HiQ 6200
Leistung [W]	2.000	1.200	6.200
Amplitude [ $\mu\text{m}$ ]	32	31	30,6
Schweißkraft [N]	3.200	650	2490
Frequenz [kHz]	20	35	20
Abmessungen der Sonotrode [mm x mm]	40 x 60	40 x 60	80 x 120

## Datenblatt der verwendeten Kohlenstofffasern:

Um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu ermöglichen, wurde in der vorliegenden Arbeit durchgehend gleiches Fasermaterial verwendet. Einzige Ausnahme bildeten die im Abschnitt 5.1 beschriebenen Untersuchungen.

Bei den verwendeten Fasern handelte es sich um die Kohlenstofffasern HTS40 F13 12K 800tex der Firma Toho Tenax Europe. Die Fasern wurden von einem Roving abgewickelt. Der abgewickelte Faserstrang hatte eine Breite von ca. 8 mm und eine Dicke von ca. 100  $\mu\text{m}$ . Die nachfolgende Tabelle enthält die mechanischen Eigenschaften der verwendeten Fasern.

**Tabelle A.2:** Mechanische Eigenschaften der verwendeten Kohlenstofffasern [54]

Eigenschaft	Wert
Zugfestigkeit [MPa]	4400
E-Modul (Zug) [GPa]	240
Bruchdehnung [%]	1,8
Dichte [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]	1,77
Garnfeinheit [ $\text{g}/1000 \text{ m} = \text{tex}$ ]	800
Filamentdurchmesser [ $\mu\text{m}$ ]	7
Filamentanzahl	12000

## Datenblatt der verwendeten PP-Folien:

Bei dem verwendeten Polypropylen handelte es sich um 200 µm dicke Folien, die von dem Dr. Dietrich Müller, Ahlhorn, bezogen wurden.

Dr. Dietrich Müller GmbH, Zeppelinring 18, D-26197 Ahlhorn

### Tecfilm® PP TC 00170

**Allgemeine Beschreibung:** Tecfilm® PP TC 00170 ist ein halbkristallines, weißes, halbdurchsichtiges Gebrauchsthermoplast, das in einer Vielzahl von Güteklassen und Modifikationen hergestellt wird. Bei Polypropylen handelt es sich um ein lineares Polyolefin, das in vieler Hinsicht Hartpolyethylen gleicht und auf ähnliche Art hergestellt wird. Die eingesetzten Katalysatoren steuern die Stereospezifität des Polymers recht gut, sodass handelsübliche Polypropylene in der Regel isotaktisch sind.

**Anwendungsbereiche:** U.a. (für Homopolymere), Gerätegehäuse, Haushaltsgegenstände, Verpackungen, Kassettenthalterungen und Fasern, Einzelfäden und Folienbänder; (für Copolymere) Rohre, Behälter, Bootsrümpfe, Sitzschalen und Automobilteile, wie z.B. Batteriegehäuse und Stoßdämpfer. Letztere werden jedoch häufig aus stärker elastomermodifizierten Polypropylenen hergestellt.

Physikalische Eigenschaften		Mechanische Eigenschaften	
Brechungsindex	1,49	E-modul im Zugversuch	2,3-3,3 GPa
Dichte	0,9 g cm <sup>-3</sup>	Härte - Rockwell	M92-100
Entzündbarkeit	HB	Kerbschlagzähigkeit nach Izod	16-32 J m <sup>-1</sup>
Mindestsauerstoffgehalt	18%	Poisson - Verhältnis	0,35 - 0,4
Strahlungswiderstand	befriedigend	Reibungskoeffizient	2,5-4%
Wasserabsorption - über 24 Stunden	0,03%	Reißdehnung	100-150%
Widerstand gegen ultraviolettes Licht	schlecht	Zugfestigkeit	80 MPa

Stand November 2014

Zeppelinring 18 | D-26197 Ahlhorn | Tel.: +49 (0) 4435 97 10 10 | Fax: +49 (0) 4435 97 10 11  
Info@mueller-ahlhorn.com | www.mueller-ahlhorn.com | Sitz der Gesellschaft: Ahlhorn  
Geschäftsführer: Heinz-Jürgen Siebert | AG Oldenburg: HRB 209026 | Ust. ID-Nr.: DE 295969093  
St.-Nr.: 68/207/07677 | Zertifiziert nach DIN EN ISO 9001:2008 | UL anerkannter Repacker E341377

Dr. Dietrich Müller GmbH

- Elektroisierstoffe
- Dichtungen
- Wärmeleitprodukte
- Technische Folien

**Abbildung A.1:** Datenblatt der verwendeten PP-Folien mit einer Dicke von 200 µm.

## Fortsetzung: Datenblatt der verwendeten PP-Folien

Dr. Dietrich Müller GmbH, Zeppelinring 18, D-26197 Ahlhorn

### Tecfilm® PP TC 00170

Elektrische Eigenschaften		Chemische Eigenschaften	
Auflösungsfaktor bei 1 kHz	0,0003 – 0,0005	Alkohole	gut
Dielektrische Widerstandsfähigkeit	30-40 kV mm <sup>-1</sup>	Aromatische Kohlenwasserstoffe	befriedigend
Dielektrizitätszahl bei 1 MHz	2,2-2,6	Fette und Öle	gut-mittelmäßig
Spezifischer Oberflächenwiderstand	10 <sup>13</sup> Ohm/sq	Halogene	schlecht
Spezifischer Volumenwiderstand	10 <sup>16</sup> - 10 <sup>18</sup> Ohmcm	Halogenhydrocarbons	gut-schlecht
		Ketone	gut
		Laugen	gut
Thermische Eigenschaften		Säuren - konzentriert	gut-mittelmäßig
Hitzebiegungstemperatur - 0,45 MPa	100-105 °C	Säuren - verdünnt	gut-mittelmäßig
Hitzebiegungstemperatur - 1,8 MPa	60-65 °C		
Max. Dauergebrauchstemperatur	90-120 °C		
Min. Dauergebrauchstemperatur	-10 bis -60°C		
Spezifische Wärme	1700 - 1900 J K <sup>-1</sup> kg <sup>-1</sup>		
Wärmeleitfähigkeit bei 23°C	0,1-0,22 W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>		
Linearer Wärmeausdehnungskoeffizient	100-180 x10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup>		
Auflösungsfaktor bei 1 MHz			0,0003
Bruchdehnung		%	50-1000
Dielektrizitätsstärke bei 25 µm dick		kV mm <sup>-1</sup>	200
Durchlässigkeit für Kohlenstoffdioxid bei 25 °C		x10 <sup>-15</sup> cm <sup>3</sup> . cm cm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> Pa <sup>-1</sup>	6 bei 30°C
Durchlässigkeit für Sauerstoff bei 25 °C		x10 <sup>-15</sup> cm <sup>3</sup> . cm cm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> Pa <sup>-1</sup>	1,7 bei 30°C
Durchlässigkeit für Stickstoff bei 25 °C		x10 <sup>-15</sup> cm <sup>3</sup> . cm cm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> Pa <sup>-1</sup>	0,3
Durchlässigkeit für Wasser bei 25 °C		x10 <sup>-15</sup> cm <sup>3</sup> . cm cm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> Pa <sup>-1</sup>	16
Durchlässigkeit für Wasser bei 38 °C		x10 <sup>-15</sup> cm <sup>3</sup> . cm cm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> Pa <sup>-1</sup>	70
Durchlässigkeit für Wasserstoff bei 25 °C		x10 <sup>-15</sup> cm <sup>3</sup> . cm cm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> Pa <sup>-1</sup>	30
Hitzeversiegelungstemperatur		°C	140-205
Zerreißstärke - Anfang		g µm <sup>-1</sup>	18-27

Stand November 2014

Zeppelinring 18 | D-26197 Ahlhorn | Tel: +49 (0) 4435 97 10 10 | Fax: +49 (0) 4435 97 10 11  
 info@mueller-ahlhorn.com | www.mueller-ahlhorn.com | Sitz der Gesellschaft: Ahlhorn  
 Geschäftsführer: Heinz-Jürgen Siebert | AG Oldenburg: HRB 209026 | Ust. ID-Nr.: DE 295969093  
 St.-Nr.: 68/207/07677 | Zertifiziert nach DIN EN ISO 9001:2008 | UL anerkannter Repacker E341377

Dr. Dietrich Müller GmbH

- Elektroisolerstoffe
- Dichtungen
- Wärmeleitprodukte
- Technische Folien

Abbildung A.2: Datenblatt der verwendeten PP-Folien mit einer Dicke von 200 µm.

## Datenblatt der verwendeten PE-Folien:

Bei dem verwendeten Polyethylen handelte es sich um 150 µm dicke Folien, die von dem Hersteller Nowofol Kunststoffprodukte, Siegsdorf, bezogen wurden.



Postfach 1263 • 83310 Siegsdorf  
Breslauer Str. 15 • 83313 Siegsdorf  
Telefon +49 (0)8662 6602-0  
Telefax +49 (0)8662 6602-50  
E-Mail info@nowofol.de  
Internet www.nowofol.de

### Physikalische Eigenschaften *Physical Properties*

Folientype <i>Film Type</i>	<b>NOWOCAST</b> HD	Dicke <i>Thickness</i>	<b>150 µm</b>
Farbe <i>Colour</i>	natur <i>natural</i>	Datum <i>Date</i>	<b>11.06.2013</b>

Probenbreite 15 mm / Probenlänge 100 mm / Prüfgeschwindigkeit 200 mm/min  
*Sample width 15 mm / Sample length 100 mm / Test speed 200 mm/min*

Lfd.Nr. <i>Cons.no</i>	Merkmal <i>Property</i>	Einheit <i>Unit</i>	Mittelwerte <i>Mean value</i>	Prüfrichtung <i>Test direction</i>	Prüfmethode <i>Test method</i>
1	Flächengewicht <i>Mass per unit area</i>	g/m <sup>2</sup>	141,75		DIN EN ISO 536
2	Dichte <i>Density</i>	g/cm <sup>3</sup>	0,945		DIN EN ISO 1183
3	Streckspannung <i>Yield stress</i>	MPa	20	M.D.	DIN EN ISO 527
4	Streckspannung <i>Yield stress</i>	MPa	20	T.D.	DIN EN ISO 527
5	Streckdehnung <i>Yield strain</i>	%	12	M.D.	DIN EN ISO 527
6	Streckdehnung <i>Yield strain</i>	%	12	T.D.	DIN EN ISO 527
7	Bruchdehnung <i>Tensile strain at break</i>	%	600	M.D.	DIN EN ISO 527
8	Bruchdehnung <i>Tensile strain at break</i>	%	600	T.D.	DIN EN ISO 527

Alle Werte sind Mittelwerte, die in unserem Labor ermittelt wurden. Die ermittelten Werte sind keine Spezifikationswerte, sondern Richtwerte, für die es keine Garantien übernommen werden. Farbe, Vorbehandlung und Stärke können variiert werden. Hierzu ist eine Rücksprache notwendig.

*These values reflect current knowledge and state of the art. They are intended to provide information on our products and are not to be understood as a guarantee of any specific product characteristic or suitability of any product for a particular application purpose. Colour, treatment and thickness can be varied. For this purpose, please get in contact with our sales and marketing department.*

**Abbildung A.3:** Datenblatt der verwendeten PE-Folien mit einer Dicke von 150 µm.

## Datenblatt der verwendeten PA6-Folien:

Bei dem verwendeten Polyamid handelte es sich um unterschiedlich dicke Folien, die von dem Hersteller mf-folien GmbH, Kempten, bezogen wurden.

### DATA SHEET

07.11.2017

## Cast Nylon Film PA 6

### Technical Data

Properties	Unit	Test Method	Values			
			Thickness $\mu\text{m}$			
			50	100	150	200
Density	$\text{g/cm}^3$	ISO 536	1,14	1,14	1,14	1,14
Unit Weight	$\text{g/m}^2$	ISO 536	57	114	171	228
Melting point	$^{\circ}\text{C}$	...	219	219	219	219
Tensile stress at yield lengthwise/transverse	$\text{N/mm}^2$	DIN 53457	38/38	36/36	35/35	32/32
Ultimate strength lengthwise/transverse	$\text{N/mm}^2$	DIN 53455	83/77	79/77	76/76	72/74
Elongation at break lengthwise/transverse	%	DIN 53455	390/385	400/380	420/400	420/400
Haze	%	ASTM D 1003	18/20	30/32	38/40	48/50
Shrinkage (150°C, 30') lengthwise/transverse	%	...	0,5/0	0,5/0	0,5/0	0,5/0
CO <sub>2</sub> permeability	$\text{cm}^3/\text{m}^2\cdot\text{d}\cdot\text{bar}$	DIN 53380	140-160	40-45	10-25	8-15
Oxygen permeability (40% RH.;23°C)	$\text{cm}^3/\text{m}^2\cdot\text{d}\cdot\text{bar}$	DIN 53380	10-13	5-7	2-3	2-3
Water vapour permeability (85% > 0%;23°C)	$\text{g/m}^2\cdot\text{d}$	DIN 53122	26-28	13-14	9-10	7-8

### General Data

Reel width	mm	from 450 bis 3.050 mm
Tolerance (Width)	mm	+/- 1
Tolerance (Thickness)	%	+/- 5
Core diameter	mm	152
Corona treatment Outside	dyne/cm	>50

Processing: Our Cast Nylon Film can be processed on all customary printing- and laminating machines without any problems. High quality processing requires temperatures of 15 - 20°C and a relative humidity of ca. 50 - 60 %.

Storing: Store Cast Nylon Film dry in original packaging; up to temperatures of 20°C; protected against UV-light (daylight). Please keep Control-sheet with Order-No. and Reel-No. until the order is completely processed.

The information in this data sheet is based on our current knowledge and experience; without any obligations on our side.

**Abbildung A.4:** Datenblatt der verwendeten PA6-Folien in verschiedenen Dicken.

## Datenblatt der verwendeten PEEK-Folien:

Bei dem verwendeten Polyetheretherketon handelte es sich um 100 µm dicke Folien, die von dem Hersteller Victrex, Lancashire, Vereinigtes Königreich, bezogen wurden.

**aptiv.**  
VICTREX® PEEK FILM TECHNOLOGY

### APTIV® 2000 Series Films

#### Description

APTIV® 2000 series films are the unfilled amorphous films made from VICTREX® PEEK polymer. The film provides a material solution for engineers in ultra-high performance applications.

APTIV films are a comprehensive range of versatile, high-performance films, the use of which can facilitate reduced systems costs, improved performance and enhanced design freedom.

APTIV 2000 has a unique combination of properties providing high temperature performance, lightweight, mechanical strength, durability, excellent radiation, hydrolysis and chemical resistance, electrical insulation, wear and abrasion resistance, excellent barrier properties with high purity, good flammability without the use of flame retardants, low toxicity of combustion products, and low moisture absorption in a film format. Inherently halogen-free and ease of processing makes APTIV films a technology enabler for our customers and end users.

**Please note** – APTIV 2000 will crystallise if taken above the  $T_g$  [143°C (289°F)] in either secondary processes or end use application. The crystallisation is not reversible back to the amorphous phase without re-melting the material. Consideration of the temperature range during processing and end use application needs to be included if selecting APTIV 2000.

#### Availability

The films are available in thickness of 6 microns up to 300 microns.

#### Applications

- Aerospace insulation
- Electrical insulation
- Acoustic speaker diaphragms
- Thermoforming of thin wall parts
- Composites

#### Certification

APTIV film is FDA and EU approved for food contact and is RoHS and 3A Sanitary Standards compliant.

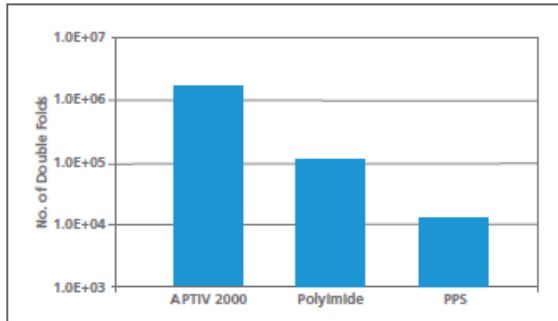
#### Features

- High heat resistance
- Excellent flexural fatigue properties
- Broad chemical resistance
- Low moisture absorption
- High strength and toughness
- Stable, excellent electrical insulation properties
- Good flammability performance without use of flame retardant additives
- Inherently halogen-free
- Radiation resistance
- Low smoke and toxic gas emission
- Excellent hydrolysis resistance
- Excellent barrier properties
- Excellent acoustic properties
- High purity
- Lightweight
- Recyclable
- Easy to process – can be laminated to other materials, thermoformed, metallised, coated, printed, stamped and die cut, welded and heat sealed and coated.

**Abbildung A.5:** Datenblatt der verwendeten PEEK-Folien mit einer Dicke von 100 µm.

## Fortsetzung: Datenblatt der verwendeten PEEK-Folien:

Figure 1: MIT Folding Endurance at 23°C (73°F) for APTIV 2000, 50 microns (MD)



### Standard Thicknesses and Widths

The standard width for film is 610mm (approx. 24in) – widths up to 1455mm (approx. 55in) available upon request.

Standard thicknesses available (in microns) — 6, 9, 12, 16, 18, 20, 25, 30, 38 and 100. Please enquire about other thicknesses up to 300 microns.

Standard thickness tolerance is better than +/-7% for all grades except under 10 microns which is better than +/-1.0 micron.

### Surface Finishes

Standard surface finish is matt/gloss, although gloss/gloss is available on request. Typical Ra values can be supplied on request.

### Custom Finishing (Slitting and Surface Treatment)

The slitter capability in the APTIV film facility allows custom lengths and widths down to 50mm (approx. 2in) to be produced. Widths below 50mm (approx. 2in) are available on request. Surface treatment by atmospheric plasma process of the film is also available by request taking the surface energy of the treated APTIV film surface to greater than 55 dynes/cm. [A minimum order quantity or value applies.]

### Mechanical Properties at Various Thicknesses

ISO 527 at 23°C (73°F)

Property	Test Method	Test Condition	Units	25µm		50µm		100µm	
				MD	TD	MD	TD	MD	TD
Tensile Modulus	ISO527	23°C (73°F)	GPa (kpsi)	1.8 (261)	1.8 (261)	1.8 (261)	1.8 (261)	1.6 (232)	1.6 (232)
Tensile Strength (at break)	ISO527	23°C (73°F)	MPa (kpsi)	130 (18.9)	130 (18.9)	120 (17.4)	120 (17.4)	120 (17.4)	120 (17.4)
Tensile Elongation (at break)	ISO527	23°C (73°F)	%	>200	>200	>200	>200	>200	>200

### Electrical Properties at Various Thicknesses

ATSM D149, 23°C (73°F), 6.25mm (0.25in) electrode

		25µm	50µm	100µm
Dielectric Strength	kV/mm (V/mil)	270 (6858)	190 (4826)	120 (3048)
Breakdown Voltage	kV	6.75	9.5	15

APTIV 2000 acts an excellent electrical insulator across a wide range of temperatures and electrical frequencies.

### Packaging and Storage

APTIV film is supplied in roll form on high quality, resin coated and polished fibre cores with an inner diameter of 76mm (approx. 3in) or 152mm (approx. 6in). These cores are a Class A standard core. APTIV film is very stable and will retain its properties for several years when stored in the original packaging in a frost free environment up to 50°C (122°F). APTIV film is unaffected by humidity and is unaffected by moisture. The rolls should be stored in a weathertight facility so that the packaging is not damaged.

### Disposal

APTIV film is classed as a non-hazardous material and can be disposed of by landfill.

### Labelling of Products

All products are packaged using robust and purpose designed packaging, and are fully labelled to comply with national and international standards. Labels indicating grade, unique batch number, roll length, roll width, product thickness, and net weight will be affixed to the outer packaging and the core.

### Units of Sale

Orders for APTIV film should be placed in kilograms or imperial pounds.

Abbildung A.6: Datenblatt der verwendeten PEEK-Folien mit einer Dicke von 100 µm.

## Fortsetzung: Datenblatt der verwendeten PEEK-Folien:

Property	Test Method	Test Condition	Units	2000-050	
				MD	TD
Tensile Modulus	ISO 527	23°C (73°F)	GPa (kpsi)	1.8 (261)	1.8 (261)
Tensile Strength (at break)	ISO 527	23°C (73°F)	MPa (kpsi)	120 (17.4)	120 (17.4)
Tensile Elongation (at break)	ISO 527	23°C (73°F)	%	>200	>200
Puncture Strength	Def Stan 81-75	23°C (73°F)	kJ/m <sup>2</sup> (cal/ft <sup>2</sup> )	40 (888)	
Tear Strength	ISO 6383-1	23°C (73°F)	N/mm (lb/in)	6 (34)	6 (34)
Shrinkage	TM-VX-84	200°C (392°F)	%	<10	<5
Water Absorption (50% RH)	ISO 62	23°C (73°F), 24h	%	0.21	
Specific Gravity	ISO 1183	23°C (73°F)		1.26	
Coefficient of Linear Thermal Expansion	ASTM D696	MD, below T <sub>g</sub>	ppm/°C	60	
Dielectric Strength	ASTM D149 6.35mm (0.25in) electrode	23°C (73°F)	kV/mm (V/mil)	190 (4826)	
Dielectric Constant	ASTM D150	23°C (73°F), 10 MHz		3.3	
Loss Tangent	ASTM D150	23°C (73°F), 10 MHz		0.003	
Volume Resistivity	ASTM D257	23°C (73°F), 100V	Ohm cm	2.00E +16	

### Compliances

APTIV 2000 film is approved for Food Contact Use:

- APTIV 2000 film is compliant with the compositional requirements of FDA 21 CFR 177.2415.
- APTIV 2000 film is compliant with the framework regulation (EC) No. 1935/2004/EC and commission directive 2002/72/EC and the amendments up to 2005/79/EC.
- APTIV 2000 film is fully compliant with the 3-A Sanitary Standards.

APTIV film 2000 complies with the requirements of RoHS European Directive 2002/95/EC and can be used to manufacture products compliant with the same directive.

APTIV 2000 film is inherently halogen-free in accordance with IEC61249-2-21.

### Secondary Processes

APTIV 2000 film can easily be subjected to a range of secondary process operations, which allow designers and engineers to obtain the benefits of APTIV film properties in a variety of forms.

- Surface treatment
- Adhesion
- Coatings
- Heat welding and heat sealing
- Metallisation
- Laser marking and machining
- Slitting
- Die cutting and stamping
- Thermal lamination
- Thermoforming
- Printing

**Abbildung A.7:** Datenblatt der verwendeten PEEK-Folien mit einer Dicke von 100 µm.

## A.2: Prozessparameter

In diesem Abschnitt des Anhanges der vorliegenden Arbeit werden die zur Herstellung und Untersuchung der Proben verwendeten Maschinen sowie die zugehörigen Prozessparameter dokumentiert.

### Prozessparameter zur Herstellung der ein- und mehrlagigen CFK-Proben im Abschnitt 3.2.1 und Abschnitt 3.2.2:

Für die Herstellung der einlagigen CFK-Proben, vgl. Abbildung 3.3, wurde die Ultraschallschweißmaschine 2000 IW/IW+ Kompakt-Schweißsystem des Herstellers BRANSON Ultraschall verwendet. Es wurden die in der nachfolgenden Tabelle zusammengefassten Parameter eingestellt.

**Tabelle A.3:** Prozessparameter zur Herstellung der einlagigen CFK-Proben. Als Matrixmaterial dienten zwei jeweils 200  $\mu\text{m}$  dicke PP-Folien und eine ca. 100  $\mu\text{m}$  dicke Lage Kohlenstofffasern [5].

Parameter	Wert
Schweißkraft [N]	3192
Schweißzeit [s]	1,5
Haltezeit [s]	1,0
Triggerkraft [N]	221
Amplitude [ $\mu\text{m}$ ]	32

Für die Herstellung der zweilagigen CFK-Proben, vgl. Abbildung 3.5, wurde die Ultraschallschweißmaschine 2000 IW/IW+ Kompakt-Schweißsystem des Herstellers BRANSON Ultraschall verwendet. Es wurden die in der nachfolgenden Tabelle zusammengefassten Parameter eingestellt. Nach der ersten Schweißung wurde unmittelbar im Anschluss eine zweite Schweißung durchgeführt, wobei die Schweißzeit reduziert wurde.

**Tabelle A.4:** Prozessparameter zur Herstellung der zweilagigen CFK-Proben. Als Matrixmaterial dienten drei jeweils 200 µm dicke PP-Folien und zwei ca. 100 µm dicke Lage Kohlenstofffasern [5].

Parameter	Wert
Schweißkraft [N]	2739
Schweißzeit [s]	1,5 + 0,5
Haltezeit [s]	1,0
Triggerkraft [N]	393
Amplitude [µm]	32

Für die Herstellung der dreilagigen CFK-Proben, vgl. Abbildung 3.5, wurde die Ultraschallschweißmaschine 2000 IW/IW+ Kompakt-Schweißsystem des Herstellers BRANSON Ultraschall verwendet. Es wurden die in der nachfolgenden Tabelle zusammengefassten Parameter eingestellt. Nach der ersten Schweißung wurde unmittelbar im Anschluss eine zweite Schweißung durchgeführt, wobei die Schweißzeit reduziert wurde.

**Tabelle A.5:** Prozessparameter zur Herstellung der dreilagigen CFK-Proben. Als Matrixmaterial dienten vier jeweils 200 µm dicke PP-Folien und drei ca. 100 µm dicke Lage Kohlenstofffasern [5].

Parameter	Wert
Schweißkraft [N]	2280
Schweißzeit [s]	1,2 + 0,5
Haltezeit [s]	1,0
Triggerkraft [N]	393
Amplitude [µm]	32

### Prozessparameter zur Herstellung der einlagigen CFK-Proben im Abschnitt 3.2.3:

Für die Herstellung der einlagigen CFK-Proben wurde die Ultraschallschweißmaschine 2000 IW/IW+ Kompakt-Schweißsystem der Firma BRANSON Ultraschall verwendet. Es wurden die in der nachfolgenden Tabelle zusammengefassten Parameter eingestellt.

**Tabelle A.6:** Prozessparameter zur Herstellung der einlagigen CFK-Proben. Als Matrixmaterial dienten zwei jeweils 200 µm dicke PP-Folien und eine ca. 100 µm dicke Lage Kohlenstofffasern [5].

Parameter	Wert
Schweißkraft [N]	3192
Schweißzeit [s]	1,5
Haltezeit [s]	1,0
Triggerkraft [N]	221
Amplitude [µm]	32

### Prozessparameter zur Untersuchung des Einflusses der Vorspannkraft auf die Aufweitung der Fasern der CFK-Proben im Abschnitt 4.1.1:

Für die Untersuchung des Einflusses der Vorspannkraft auf die Aufweitung der Fasern bei Herstellung der einlagigen CFK-Proben wurde die HiQ DIALOG 6200 Ultraschallschweißmaschine der Firma Herrmann Ultraschall verwendet. Es wurden die in der nachfolgenden Tabelle zusammengefassten Parameter eingestellt.

**Tabelle A.7:** Prozessparameter zur Herstellung der einlagigen CFK-Proben. Als Matrixmaterial dienten zwei jeweils 200  $\mu\text{m}$  dicker PP-Folien [57].

Parameter	Wert
Schweißkraft [N]	2000
Haltekraft [N]	2000
Schweißzeit [s]	2,5
Haltezeit [s]	3,0
Triggerkraft [N]	500
Amplitude [ $\mu\text{m}$ ]	20

## Prozessparameter zur Herstellung der mehrlagigen CFK-Proben im Abschnitt 4.2.2:

Für die Herstellung der mehrlagigen CFK-Proben wurde die Ultraschallschweißmaschine 2000 IW/IW+ Kompakt-Schweißsystem der Firma BRANSON Ultraschall verwendet. Es wurden die in der nachfolgenden Tabelle zusammengefassten Parameter eingestellt.

**Tabelle A.8:** Prozessparameter zur Herstellung der dreilagigen CFK-Proben. Als Matrixmaterial dienten vier jeweils 200  $\mu\text{m}$  dicke PP-Folien und drei ca. 100  $\mu\text{m}$  dicke Lage Kohlenstofffasern [7].

Parameter	Wert
Schweißkraft [N]	1824
Schweißzeit [s]	1,5
Haltezeit [s]	1,0
Haltekraft [N]	1824
Triggerkraft [N]	461
Amplitude [ $\mu\text{m}$ ]	32

### Prozessparameter zur Herstellung der mehrlagigen CFK-Proben im Abschnitt 4.2.3:

Für die Herstellung der CFK-Proben, bei denen drei Lagen Fasern und vier Lagen PA6 verarbeitet wurden, wurde die HiQ DIALOG 6200 Ultraschallschweißmaschine der Firma Herrmann Ultraschall verwendet. Es wurden die in der nachfolgenden Tabelle zusammengefassten Parameter eingestellt.

**Tabelle A.9:** Prozessparameter zur Herstellung der CFK-Proben mit drei Lagen Kohlenstofffasern. Als Matrixmaterial dienten zwei jeweils 100  $\mu\text{m}$  dicke sowie zwei jeweils 60  $\mu\text{m}$  dicke PA6-Folien.

Parameter	Wert
Schweißkraft F1 [N]	500
Zeit Wechsel F1 zu F2 [s]	1,5
Schweißkraft F2 [N]	1200
Haltekraft [N]	1200
Schweißzeit [s]	7,0
Haltezeit [s]	5,0
Triggerkraft [N]	500
Amplitude [ $\mu\text{m}$ ]	30

### Prozessparameter zur Herstellung der ein- bis fünfplagigen CFK-Proben im Abschnitt 4.3.1:

Für die Herstellung der CFK-Proben, bei denen eine bis fünf Lagen Fasern und zwei bis sechs Lagen PA6 verarbeitet wurden, wurde die HiQ DIALOG 6200 Ultraschallschweißmaschine der Firma Herrmann Ultraschall verwendet. Es wurden die in der nachfolgenden Tabelle zusammengefassten Parameter eingestellt.

**Tabelle A.10:** Prozessparameter zur Herstellung der CFK-Proben mit einer bis fünf Lagen Kohlenstofffasern. Als Matrixmaterial dienten zwei bis sechs jeweils 100 µm dicke PA6-Folien [nach 57].

Parameter	Wert
Schweißkraft F1 [N]	500
Zeit Wechsel F1 zu F2 [s]	0,5
Schweißkraft F2 [N]	2000
Haltekraft [N]	2000
Schweißzeit [s]	3,5
Haltezeit [s]	3,0
Triggerkraft [N]	500
Amplitude [µm]	25

### Prozessparameter zur Herstellung der sechs- bis neunlagigen CFK-Proben im Abschnitt 4.3.1:

Für die Herstellung der CFK-Proben, bei denen sechs bis neun Lagen Fasern und sieben bis zehn Lagen PA6 verarbeitet wurden, wurde die HiQ DIALOG 6200 Ultraschallschweißmaschine der Firma Herrmann Ultraschall verwendet. Es wurden die in der nachfolgenden Tabelle zusammengefassten Parameter eingestellt.

**Tabelle A.11:** Prozessparameter zur Herstellung der CFK-Proben mit sechs bis neun Lagen Kohlenstofffasern. Als Matrixmaterial dienten sieben bis zehn jeweils 100 µm dicke PA6-Folien [nach 57].

Parameter	Wert
Schweißkraft F1 [N]	500
Zeit Wechsel F1 zu F2 [s]	0,5
Schweißkraft F2 [N]	2000
Haltekraft [N]	2000
Schweißzeit [s]	9,0
Haltezeit [s]	5,0
Triggerkraft [N]	500
Amplitude [µm]	30

### Prozessparameter zur Herstellung der zehn bis dreizehnlagigen CFK-Proben im Abschnitt 4.3.1:

Für die Herstellung der CFK-Proben, bei denen zehn bis dreizehn Lagen Fasern und elf bis vierzehn Lagen PA6 verarbeitet wurden, wurde die HiQ DIALOG 6200 Ultraschallschweißmaschine der Firma Herrmann Ultraschall verwendet. Es wurden die in der nachfolgenden Tabelle zusammengefassten Parameter eingestellt.

**Tabelle A.12:** Prozessparameter zur Herstellung der CFK-Proben mit zehn bis dreizehn Lagen Kohlenstofffasern. Als Matrixmaterial dienten elf bis vierzehn jeweils 100 µm dicke PA6-Folien [nach 57].

Parameter	Wert
Schweißkraft F1 [N]	1200
Zeit Wechsel F1 zu F2 [s]	0,5
Schweißkraft F2 [N]	2000
Haltekraft [N]	2000
Schweißzeit [s]	11,0
Haltezeit [s]	5,0
Triggerkraft [N]	1200
Amplitude [µm]	30

### Prozessparameter zur Herstellung der 14 bis 17-lagigen CFK-Proben im Abschnitt 4.3.1:

Für die Herstellung der CFK-Proben, bei denen 14 bis 17 Lagen Fasern und 15 bis 18 Lagen PA6 verarbeitet wurden, wurde die HiQ DIALOG 6200 Ultraschallschweißmaschine der Firma Herrmann Ultraschall verwendet. Es wurden die in der nachfolgenden Tabelle zusammengefassten Parameter eingestellt.

**Tabelle A.13:** Prozessparameter zur Herstellung der CFK-Proben mit 14 bis 17 Lagen Kohlenstofffasern. Als Matrixmaterial dienten 15 bis 18 jeweils 100 µm dicke PA6-Folien [nach 57].

Parameter	Wert
Schweißkraft F1 [N]	1200
Zeit Wechsel F1 zu F2 [s]	0,5
Schweißkraft F2 [N]	2000
Haltekraft [N]	2000
Schweißzeit [s]	16,0
Haltezeit [s]	5,0
Triggerkraft [N]	1200
Amplitude [µm]	30

### Prozessparameter zur Herstellung der achtlagigen CFK-Proben durch zwei Verschweißungen im Abschnitt 4.3.2:

Für die Herstellung der CFK, bei denen durch zwei Verschweißungen vorgefertigte CFK-Proben zu dicken CFK mit insgesamt acht Lagen Fasern verarbeitet wurden, wurde die HiQ DIALOG 6200 Ultraschallschweißmaschine der Firma Herrmann Ultraschall verwendet. Es wurden die in der nachfolgenden Tabelle zusammengefassten Parameter eingestellt.

**Tabelle A.14:** Prozessparameter zur Herstellung der CFK-Proben durch zweimalige Verschweißung [nach 57].

Parameter	Erste Schweißung	Zweite Schweißung
Schweißkraft F1 [N]	500	500
Zeit Wechsel F1 zu F2 [s]	0,5	0,5
Schweißkraft F2 [N]	2000	2000
Haltekraft [N]	2000	2000
Schweißzeit [s]	3,5	3,0
Haltezeit [s]	3,0	5,0
Triggerkraft [N]	500	500
Amplitude [ $\mu\text{m}$ ]	25	22

**Prozessparameter zur Herstellung der 20-lagigen CFK-Proben durch Verschweißung von fünf vierlagigen Proben im Abschnitt 4.3.2:**

Für die Herstellung der 20-lagigen CFK-Proben durch die Verschweißung von insgesamt fünf jeweils vierlagigen, vorgefertigten CFK-Proben, wurde die HiQ DIALOG 6200 Ultraschallschweißmaschine der Firma Herrmann Ultraschall verwendet. Es wurden die in der nachfolgenden Tabelle zusammengefassten Parameter eingestellt.

***Tabelle A.15:*** Prozessparameter zur Herstellung der 20-lagigen CFK-Proben durch Verschweißung von fünf vierlagigen CFK-Proben [nach 57].

<b>Parameter</b>	<b>Erste Schweißung</b>	<b>Zweite Schweißung</b>
Schweißkraft F1 [N]	500	500
Zeit Wechsel F1 zu F2 [s]	0,5	0,5
Schweißkraft F2 [N]	2000	2000
Haltekraft [N]	2000	2000
Schweißzeit [s]	3,5	6,0
Haltezeit [s]	3,0	5,0
Triggerkraft [N]	500	500
Amplitude [ $\mu\text{m}$ ]	25	20

#### Prozessparameter zur Herstellung der CFK-Proben im Abschnitt 4.4:

Für die Herstellung der CFK-Proben, bei denen fünf Lagen Fasern und sechs Lagen 200 µm dicke PP-Folien verarbeitet wurden, wurde die HiQ DIALOG 6200 Ultraschallschweißmaschine der Firma Herrmann Ultraschall verwendet. Es wurden die in der nachfolgenden Tabelle zusammengefassten Parameter eingestellt.

**Tabelle A.16:** Prozessparameter zur Herstellung der CFK-Proben mit fünf Lagen Kohlenstofffasern. Als Matrixmaterial dienten sechs jeweils 200 µm dicke PP-Folien.

Parameter	Wert
Schweißkraft F1 [N]	500
Zeit Wechsel F1 zu F2 [s]	1,5
Schweißkraft F2 [N]	1200
Haltekraft [N]	1200
Schweißzeit [s]	2,4
Haltezeit [s]	5,0
Triggerkraft [N]	500
Amplitude [µm]	20,0

#### Prozessparameter zur Herstellung der CFK-Proben im Abschnitt 4.4:

Für die Herstellung der CFK-Proben, bei denen fünf Lagen Fasern und sechs Lagen 150 µm dicke PE-Folien verarbeitet wurden, wurde die HiQ DIALOG 6200 Ultraschallschweißmaschine der Firma Herrmann Ultraschall verwendet. Es wurden die in der nachfolgenden Tabelle zusammengefassten Parameter eingestellt.

**Tabelle A.17:** Prozessparameter zur Herstellung der CFK-Proben mit fünf Lagen Kohlenstofffasern. Als Matrixmaterial dienten sechs jeweils 150 µm dicke PE-Folien.

Parameter	Wert
Schweißkraft F1 [N]	500
Zeit Wechsel F1 zu F2 [s]	0,5
Schweißkraft F2 [N]	1200
Haltekraft [N]	1200
Schweißzeit [s]	2,4
Haltezeit [s]	5,0
Triggerkraft [N]	500
Amplitude [µm]	20,0

#### Prozessparameter zur Herstellung der CFK-Proben im Abschnitt 4.4:

Für die Herstellung der CFK-Proben, bei denen fünf Lagen Fasern und sechs Lagen 125 µm dicke PC-Folien verarbeitet wurden, wurde die HiQ DIALOG 6200 Ultraschallschweißmaschine der Firma Herrmann Ultraschall verwendet. Es wurden die in der nachfolgenden Tabelle zusammengefassten Parameter eingestellt.

**Tabelle A.18:** Prozessparameter zur Herstellung der CFK-Proben mit fünf Lagen Kohlenstofffasern. Als Matrixmaterial dienten sechs jeweils 125 µm dicke PC-Folien.

Parameter	Wert
Schweißkraft F1 [N]	500
Zeit Wechsel F1 zu F2 [s]	0,5
Schweißkraft F2 [N]	1200
Haltekraft [N]	1200
Schweißzeit [s]	4,5
Haltezeit [s]	5,0
Triggerkraft [N]	500
Amplitude [µm]	30,6

#### Prozessparameter zur Herstellung der CFK-Proben im Abschnitt 4.4:

Für die Herstellung der CFK-Proben, bei denen fünf Lagen Fasern und sechs Lagen 100 µm dicke PA6-Folien verarbeitet wurden, wurde die HiQ DIALOG 6200 Ultraschallschweißmaschine der Firma Herrmann Ultraschall verwendet. Es wurden die in der nachfolgenden Tabelle zusammengefassten Parameter eingestellt.

**Tabelle A.19:** Prozessparameter zur Herstellung der CFK-Proben mit fünf Lagen Kohlenstofffasern. Als Matrixmaterial dienten sechs jeweils 100 µm dicke PA6-Folien.

Parameter	Wert
Schweißkraft F1 [N]	500
Zeit Wechsel F1 zu F2 [s]	0,5
Schweißkraft F2 [N]	1200
Haltekraft [N]	1200
Schweißzeit [s]	7,0
Haltezeit [s]	5,0
Triggerkraft [N]	500
Amplitude [µm]	30,0

#### Prozessparameter zur Herstellung der CFK-Proben im Abschnitt 4.4:

Für die Herstellung der CFK-Proben, bei denen fünf Lagen Fasern und sechs Lagen 100 µm dicke PEEK-Folien verarbeitet wurden, wurde die HiQ DIALOG 6200 Ultraschallschweißmaschine der Firma Herrmann Ultraschall verwendet. Es wurden die in der nachfolgenden Tabelle zusammengefassten Parameter eingestellt.

**Tabelle A.20:** Prozessparameter zur Herstellung der CFK-Proben mit fünf Lagen Kohlenstofffasern. Als Matrixmaterial dienten sechs jeweils 100 µm dicke PEEK-Folien.

Parameter	Wert
Schweißkraft F1 [N]	500
Zeit Wechsel F1 zu F2 [s]	0,5
Schweißkraft F2 [N]	1200
Haltekraft [N]	1200
Schweißzeit [s]	9,0
Haltezeit [s]	5,0
Triggerkraft [N]	500
Amplitude [µm]	24,0

## Prozessparameter zur Herstellung der CFK-Proben mit mehrachsiger Faserorientierung im Abschnitt 4.5.1:

Für die Herstellung der CFK-Proben, bei denen mehrere Lagen unterschiedlich orientierter Fasern verarbeitet wurden, wurde die HiQ DIALOG 6200 Ultraschallschweißmaschine der Firma Herrmann Ultraschall verwendet. Es wurden die in der nachfolgenden Tabelle zusammengefassten Parameter eingestellt.

**Tabelle A.21:** Prozessparameter zur Herstellung mehrlagigen CFK-Proben. Als Matrixmaterial dienen sechs jeweils 100 µm dicker PA6-Folien. Die fünf Faserlagen wurden in 0° / 90° / 0° / 90° / 0° und 0° / 45° / 90° / -45° / 0° Richtung angeordnet.

Parameter	Wert
Schweißkraft F1 [N]	500
Zeit Wechsel F1 zu F2 [s]	0,5
Schweißkraft F2 [N]	1200
Haltekraft [N]	1200
Schweißzeit [s]	16,0
Haltezeit [s]	5,0
Triggerkraft [N]	500
Amplitude [µm]	20

## Prozessparameter zur Herstellung der CFK-Platten aus Kohlenstofffasergewebe im Abschnitt 4.5.2:

Für die Herstellung der ein- und mehrlagigen CFK-Platten aus Kohlenstofffasergewebe wurde die HiQ DIALOG 6200 Ultraschallschweißmaschine der Firma Herrmann Ultraschall verwendet. Es wurden die in der nachfolgenden Tabelle zusammengefassten Parameter eingestellt.

**Tabelle A.22:** Prozessparameter zur Herstellung der ein- und mehrlagigen CFK-Platten aus Kohlenstofffasergewebe. Als Matrixmaterial dienten vier, sechs bzw. acht Lagen jeweils 200  $\mu\text{m}$  dicker PA6-Folien und als Füllmaterial eine, zwei bzw. drei Lagen jeweils 300  $\mu\text{m}$  dicker Kohlenstofffasergewebe. [57].

Parameter	Wert
Schweißkraft F1 [N]	500
Schweißkraft F2 [N]	2000
Zeit von F1 nach F2 [s]	0,5
Haltekraft [N]	2000
Schweißzeit [s]	16
Haltezeit [s]	5,0
Triggerkraft [N]	500
Amplitude [ $\mu\text{m}$ ]	30,6

#### Prozessparameter zur Herstellung von GFK im Abschnitt 4.6:

Für die Herstellung GFK-Proben wurde die HiQ DIALOG 6200 Ultraschallschweißmaschine der Firma Herrmann Ultraschall verwendet. Es wurden die in der nachfolgenden Tabelle zusammengefassten Parameter eingestellt.

**Tabelle A.23:** Prozessparameter zur Herstellung der GFK-Proben. Als Matrixmaterial dienten sechs Lagen jeweils 100  $\mu\text{m}$  dicker PA6-Folien und als Füllmaterial fünf Lagen jeweils 200  $\mu\text{m}$  dicker Glasfasern [57].

Parameter	Wert
Schweißkraft F1 [N]	500
Schweißkraft F2 [N]	2000
Haltekraft [N]	2000
Schweißzeit [s]	4,5
Haltezeit [s]	5,0
Triggerkraft [N]	500
Amplitude [ $\mu\text{m}$ ]	30

**Prozessparameter zur kontinuierlichen Herstellung von ein- und mehrlagigen CFK-Proben mittels Rundsonotrode im Abschnitt 5.1:**

Für die kontinuierliche Herstellung der ein- und mehrlagigen CFK-Proben wurde die Ultraschallschweißmaschine CERA 100 des Herstellers Cera Ultrasonic, Villars, Frankreich verwendet. Es wurden die in der nachfolgenden Tabelle zusammengefassten Parameter eingestellt.

**Tabelle A.24:** Zusammenfassung der verwendeten Faser- und Matrixmaterialien sowie der eingestellten Prozessparameter für die kontinuierliche Ultraschallfertigung von CFK-Proben mit einer Rundsonotrode.

Ver-such	Matrixmaterial	Faser-material	Vorschub [m/min]	Amplitude [ $\mu\text{m}$ ]	Druck [MPa]
1	2 x PE 150 $\mu\text{m}$	1 x 3 K	4	15	0,3
2	3 x PE 150 $\mu\text{m}$	2 x 3 K	4	17,5	0,4
3	4 x PE 150 $\mu\text{m}$	3 x 3 K	4	20	0,5
4	2 x PA 6 100 $\mu\text{m}$	1 x 3 K	4	15	0,3
5	3 x PA 6 100 $\mu\text{m}$	2 x 3 K	4	17,5	0,4
6	4 x PA 6 100 $\mu\text{m}$	3 x 3 K	4	20	0,5
7	2 x PP 200 $\mu\text{m}$	1 x 3 K	4	20	0,3
8	2 x PP 200 $\mu\text{m}$	1 x 6 K	4	20	0,4
9	2 x PP 200 $\mu\text{m}$	1 x 12 K	4	20	0,4
10	2 x PP 200 $\mu\text{m}$	1 x 24 K	4	20	0,5
11	2 x PA 6 200 $\mu\text{m}$	Gewebe	4	17,5	0,3

## Prozessparameter der Vorversuche zur Herstellung des dreidimensionalen CFK-Bauteils im Abschnitt 5.2:

Für die Herstellung des dreidimensionalen CFK-Bauteils wurde die Ultraschallschweißmaschine 2000 IW/IW+ Kompakt-Schweißsystem der Firma BRANSON Ultraschall verwendet. Es wurden die in der nachfolgenden Tabelle zusammengefassten Parameter eingestellt.

**Tabelle A.25:** In den Vorversuchen verwendete Prozessparameter zur Herstellung des dreidimensionalen Bauteils aus CFK. Als Matrixmaterial dienten zwei jeweils 160  $\mu\text{m}$  dicke PA6-Folien, zwei jeweils 80  $\mu\text{m}$  dicke PA6-Folien und eine ca. 450  $\mu\text{m}$  dicke Lage Kohlenstofffasergewebe [13].

Parameter	Wert
Schweißkraft [N]	3190
Schweißzeit [s]	3,5 + 0,5
Haltezeit [s]	1,0
Triggerkraft [N]	753
Amplitude [ $\mu\text{m}$ ]	32

## Prozessparameter zur Herstellung des dreidimensionalen CFK-Bauteils im Abschnitt 5.2:

Für die Herstellung des dreidimensionalen CFK-Bauteils wurde die Ultraschallschweißmaschine 2000 IW/IW+ Kompakt-Schweißsystem der Firma BRANSON Ultraschall verwendet. Es wurden die in der nachfolgenden Tabelle zusammengefassten Parameter eingestellt.

**Tabelle A.26:** Prozessparameter zur Herstellung des dreidimensionalen Bauteils aus CFK. Als Matrixmaterial dienten zwei jeweils 160  $\mu\text{m}$  dicke PA6-Folien, zwei jeweils 80  $\mu\text{m}$  dicke PA6-Folien und eine ca. 450  $\mu\text{m}$  dicke Lage Kohlenstoffasergewebe [13].

Parameter	Wert
Schweißkraft [N]	910
Schweißzeit [s]	4,0 + 1,5 +1,5
Haltezeit [s]	2,0
Triggerkraft [N]	753
Amplitude [ $\mu\text{m}$ ]	32

## Prozessparameter zur Verschweißung thermoplastischer CFK-Sticks im Abschnitt 6.1:

Für die Untersuchung der Scherfestigkeit ultraschallverschweißter CFK-Sticks mit einer thermoplastischen Matrix wurde die HiQ DIALOG 1200 Ultraschallschweißmaschine der Firma Herrmann Ultraschall verwendet. Es wurden die in der nachfolgenden Tabelle zusammengefassten Parameter eingestellt.

**Tabelle A.27:** Prozessparameter zur Verschweißung von thermoplastischen CFK-Sticks.

Parameter	Wert
Schweißkraft [N]	500
Haltekraft [N]	500
Schweißzeit [s]	0,9
Haltezeit [s]	1,0
Triggerkraft [N]	300
Amplitude [ $\mu\text{m}$ ]	25

**Prozessparameter zur Vorbehandlung der thermoplastischen CFK-Sticks mit einer Pyramidenstruktur im Abschnitt 6.1:**

Für die Vorbehandlung der ultraschallverschweißter CFK-Sticks mit einer thermoplastischen Matrix wurde die HiQ DIALOG 1200 Ultraschallschweißmaschine der Firma Herrmann Ultraschall verwendet. Es wurden die in der nachfolgenden Tabelle zusammengefassten Parameter eingestellt.

***Tabelle A.28:*** Prozessparameter zur Vorbehandlung von thermoplastischen CFK-Sticks mit einer Pyramidenstruktur.

<b>Parameter</b>	<b>Wert</b>
Schweißkraft [N]	500
Haltekraft [N]	500
Schweißzeit [s]	0,5
Haltezeit [s]	1,0
Triggerkraft [N]	300
Amplitude [ $\mu\text{m}$ ]	25

## Prozessparameter zur Verschweißung der duroplastischen CFK-Sticks im Abschnitt 6.2:

Für die Verschweißung der duroplastischen CFK-Sticks wurde die HiQ DIALOG 1200 Ultraschallschweißmaschine der Firma Herrmann Ultraschall verwendet. Es wurden die in der nachfolgenden Tabelle zusammengefassten Parameter eingestellt.

**Tabelle A.29:** Prozessparameter zur Verschweißung von duroplastischen CFK-Sticks.

Parameter	Wert
Schweißkraft [N]	650
Haltekraft [N]	650
Schweißzeit [s]	0,5
Haltezeit [s]	1,5
Triggerkraft [N]	650
Amplitude [ $\mu\text{m}$ ]	30

## Prozessparameter zur Verschweißung der sandgestrahlten CFK-Sticks im Abschnitt 6.2:

Für die Verschweißung der sandgestrahlten duroplastischen CFK-Sticks wurde die Ultraschallschweißmaschine 2000 IW/IW+ Kompakt-Schweißsystem der Firma BRANSON Ultraschall verwendet. Es wurden die in der nachfolgenden Tabelle zusammengefassten Parameter eingestellt.

**Tabelle A.30:** Prozessparameter zur Verschweißung der mittels Sandstrahlen vorbehandelter duroplastischer CFK-Proben.

Parameter	Wert
Schweißkraft [N]	1820
Schweißzeit [s]	0,75
Haltezeit [s]	1,5
Triggerkraft [N]	890
Amplitude [ $\mu\text{m}$ ]	32

## Prozessparameter zur Verschweißung der Eigengitter-Folien-Kombination im Abschnitt 6.2:

Für die Verschweißung der Eigengitter-Folien-Kombination wurde die HiQ DIALOG 1200 Ultraschallschweißmaschine der Firma Herrmann Ultraschall verwendet. Es wurden die in der nachfolgenden Tabelle zusammengefassten Parameter eingestellt.

**Tabelle A.31:** Prozessparameter zur Verschweißung Eigengitter-Folien-Kombination.

Parameter	Wert
Schweißkraft [N]	600
Haltekraft [N]	600
Schweißzeit [s]	0,75
Haltezeit [s]	1,0
Triggerkraft [N]	600
Amplitude [ $\mu\text{m}$ ]	25

### A.3: Sonstiges

In diesem Abschnitt des Anhanges werden sonstige Dokumente zusammengefasst, die für das Verständnis der vorliegenden Arbeit relevant sind.

#### Matrixdarstellung möglicher Schweißkombinationen gängiger thermoplastischer Polymere:

Im Abschnitt 4.2.2 werden verschiedene Möglichkeiten vorgestellt, die Randschichthaftung der ultraschallgefertigten CFK-Proben zu erhöhen. Hierbei werden unter anderem gezielt Kombinationen thermoplastischer Polymer verwendet, die sich mittels Ultraschallschweißen nicht fügen lassen. Die nachfolgende Matrix stellt die Schweißneigung gängiger thermoplastischer Polymere dar [35].

Kanal ▶ Deckel ▼	PS	PP	PEEK amorph	PEEK teilkristallin	SAN	PE	PLA	PVDF	PA	PVC	PET
PS	+	-	-	-	+	-	+	-	-	-	-
PP	-	+	-	-	-	+	-	-	-	+	-
PEEK amorph	-	-	+	+	-	-	-	-	-	-	-
PEEK teilkristallin	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-
SAN	+	-	-	-	+	-	+	+	-	-	+
PE	-	+	-	-	-	+	-	-	-	-	-
PLA	+	-	-	-	+	-	+	+	-	+	-
PVDF	-	-	-	-	-	-	+	+	-	-	-
PA	-	-	-	-	-	-	-	+	+	-	-
PVC	+	-	-	-	-	-	+	-	+	+	+
PET	+	-	-	-	+	-	-	-	-	+	+
FEP	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PFA	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Grün	Polymere für beide Optionen verschweißbar (Kanal-Deckel, Deckel-Kanal).										
Grau	Verschweißen zweier identischer Polymere.										

**Abbildung A.8:** Darstellung hoher (+) und geringer (-) Schweißneigung gängiger thermoplastischer Polymere [35].





