

SKZ – Das Kunststoff-Zentrum (Herausgeber)

Schlussbericht

für das Verbundprojekt Hy-FiVE

„Hybride Fügetechnologie für Verbindungen im maritimen Einsatz“

Vorhaben im Verbundprojekt:

„Evaluierung und Optimierung von etablierten Fertigungsmethoden bezüglich deren spezieller Anwendung zur Herstellung hybrider Fügeverbindungen“

Förderkennzeichen: 03SX511 E

Die Autoren:

Bernhard Teichmann, Dr.-Ing. Jana Fiedler, Luis Wachter, Prof. Dr.-Ing. Martin Bastian,
Dr. Thomas Hochrein



Kurzfassung

Übergeordnetes Ziel dieses Entwicklungsprojektes war es, für verschiedene Anwendungen im Schiffbau geeignete klebstofffreie Füge-technologien für Hybridverbindungen zu identifizieren und Prozesse und Methoden für die speziellen Anforderungen des Schiffbaus zu entwickeln, zu evaluieren und zu demonstrieren. Durch den Einsatz solcher Verbindungen können der Einsatz von Leichtbaumaterialien im Schiffbau weiter vorangetrieben, die Prozesszeiten in der Werft verkürzt und gänzlich neue Designs und Konzepte ermöglicht werden. Durch die Integration klebstofffreier Verbindungen können erhebliche Zulassungshürden abgebaut und die Umsetzung von Leichtbaukonzepten im Schiffbau vereinfacht werden. Der vermehrte Einsatz von Leichtbaustrukturen im Schiffbau ist ein direkter Beitrag zum Klimaschutz im Sinne einer CO₂ - Einsparung und einer Ressourcenschonung durch effizienten Materialeinsatz.

Die individuellen Ziele des Projektes wurden durch die die Umsetzung von halbautomatischen Faserverbundtechnologien zur Herstellung und Verarbeitung von stoff- und formschlüssigen Hybridverbindungen zwischen Metall und Faserverbundkunststoffen erreicht. Dazu wurden fasergerichte Anschlussgeometrien entwickelt. Die Herstellung der Verbindungen wurden hinsichtlich der Verbindungseigenschaft (Faservolumengehalt, Bruchspannung) optimiert. Ein weiterer Schwerpunkt stellte die zerstörungsfreie Charakterisierung der innovativen Verbindungen für die spätere Qualitätskontrolle dar. Es konnte gezeigt werden, dass die erarbeiteten Anschlussgeometrien auf flächige Bauteilgeometrien übertragbar sind und somit für die Herstellung großflächiger Verbindungsstellen als Alternative zum Kleben zur Verfügung stehen. Im direkten Vergleich mit den geklebten Verbindungen konnte keine der untersuchten Verbindungsmethoden die Festigkeiten von Klebungen erreichen. Demgegenüber steht der enorme Vorteil der in-situ Herstellung von Faserverbundbauteilen und Verbindungsstellen in einem Herstellschritt ohne nachgelagerte, aufwändige bzw. kostenintensive Prozessschritte, welche der Klebtechnologie anhaften. Darüber hinaus kann durch Anpassungen der Gestalt der hybriden Übergangsbereiche ein Festigkeitsniveau erreicht werden und so die geringeren Festigkeiten kompensiert werden.

Abstract

The overall aim of this development project was to identify suitable adhesive-free hybrid joining technologies for different applications in shipbuilding and to develop, evaluate and demonstrate processes and methods for the special requirements of shipbuilding. The future use of such joints can further advance the use of lightweight materials in shipbuilding, shorten process times in the shipyard and enable completely new designs and concepts. The strategic integration of adhesive-free joints means that enormous approval hurdles are eliminated and the implementation of lightweight construction concepts in shipbuilding is simplified. The increased use of lightweight structures in shipbuilding is a direct contribution to climate protection in terms of CO₂ savings and resource conservation through the efficient use of materials. The individual objectives of the project were achieved through the implementation of semi-automatic fiber composite technologies for the production and processing of material and form-fit connections between metal and fiber composites. For this purpose, fiber-compatible connection geometries were developed in the first part of the project. The production of the joints was optimized as part of the project with regard to the properties of the joints. Another focus was on non-destructive characterization for subsequent quality control. It was shown that the connection geometries developed can be successfully transferred to flat component geometries and are therefore available for use in the production of large-area joints as an alternative to bonding. In a direct comparison with bonded joints, no joining method was able to achieve the strength of the bonded joints. However, by adapting the shape of the hybrid transition areas, a level can be achieved that compensates for the lower strengths. On the other hand, the in-situ production of the fiber composite component and connection point in one manufacturing step without downstream, complex process steps, which are inherent to adhesive bonding technology.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abkürzungsverzeichnis	III
1 Einleitung.....	4
1.1 Anlass für Forschungsvorhaben.....	4
1.2 Problemstellung	4
1.3 Zielsetzung.....	5
2 Stand der Technik.....	6
2.1 Faserverbundkunststoffe im maritimen Bereich.....	6
2.2 Herstellverfahren von Faserverbundkunststoffen.....	6
2.3 Zerstörungsfreie Prüfverfahren (ZfP)	7
3 Lösungsweg zur Erreichung des Forschungsziels	9
4 Durchgeführte Arbeiten	11
4.1 Anforderungen und Evaluierung Verbindungstechnologie	11
4.1.1 Definition der maritimen Anwendungen und Erstellung eines Anforderungskataloges	11
4.1.2 Evaluierung Verbindungen und Anforderungen	14
4.2 Versuchsmethodik und Verfahren	16
4.2.1 Entfernung haftungsmindernder Schichten	18
4.2.2 Bewertung der Oberflächenvorbehandlungen mittels Kontaktwinkelmessung.....	20
4.2.3 Bewertung der Oberflächenvorbehandlungen durch Haftabzugstests	22
4.2.4 Verarbeitung der Fügevarianten.....	23
4.2.5 Vergleich der Fügevarianten unter Zugbeanspruchung	28
4.2.6 Verarbeitungsverfahren RTM – Resin Transfer Moulding.....	30
4.2.7 Verarbeitungsverfahren Light-RTM	31
4.2.8 Herstellung der hybriden Verbindung durch Nasspressen	32
4.2.9 Biegeversuche in 3-Punkt sowie 4-Punkt Belastung.....	34
4.2.10 Dehnungsunterschiede an ausgewählten Prüfkörpern.....	35

4.2.11	Alterung einer Serie durch Salzsprühnebel-Test	37
4.2.12	Betriebsfestigkeit	38
4.3	Zerstörungsfreie Prüfung.....	39
4.3.1	Herstellung der fehlerbehafteten Bauteile für die ZfP	39
4.3.2	Thermografie.....	41
4.3.3	Luftultraschall-Messungen	44
4.3.4	Luftultraschallmessungen an vorbelasteten Zugprüfkörpern.....	47
4.3.5	Handlungsempfehlungen	51
4.4	Optimierung der Verbindergeometrie - Hinterschneidung	52
4.5	Optimierung der Verbindung – B-FAUSST I- IV und kurze Stufung.....	53
4.6	Vergleich der hybriden Verbindung mit Klebungen.....	55
5	Zusammenfassung.....	57
6	Literaturverzeichnis.....	60
7	Abbildungsverzeichnis	63

Abkürzungsverzeichnis

RTM	Resin Transfer Moulding
VARI	Vacuum Assisted Resin Infusion
FVK	Faserverbundkunststoff
ZfP	Zerstörungsfreie Prüfung
CFK	Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff
OF	Oberfläche
SFE	Surface Free Energy
CMT	Cold Metal Transfer
AS	Arbeitsschritt
UD	Unidirektional
CNC	Computerized Numerical Control
EDX	Energy disperse X-ray spectroscopy
AD	Atmosphärendruckplasma
EP	Epoxidharz
DIC	Digitale Bildkorrelation

1 Einleitung

1.1 Anlass für Forschungsvorhaben

Der Einsatz von Leichtbaumaterialien im Schiffbau, hier vorwiegend Faserverbundkunststoffe (FVK) mit duroplastischer Matrix, schreitet voran und ist bereits heute unverzichtbar. Durch neue Entwicklungen, insbesondere in der Produktionstechnik, aber auch im Brandschutz, rücken Leichtbaustrukturen vermehrt in den Bereich der breiten Anwendung. Große Teile der Schiffskonstruktionen sind jedoch nach wie vor aus Metall. Füge Technologien für Hybridverbindungen zwischen Faserverbundwerkstoffen und Metall sind daher ein wichtiger Schlüssel für die erfolgreiche Umsetzung des Leichtbaus im Schiffbau. Kleben als Füge Technologie ist jedoch für den Schiffbau in der breiten Anwendung für Bauteile und Strukturen aufgrund großer Hürden bei der Abnahme durch Prüfgesellschaften, wie bspw. DNV GL, nicht geeignet. Durch die Komplexität des Prozesses in Vorbereitung und Durchführung, aber besonders in der mangelnden Möglichkeit der zerstörungsfreien Prüfung, werden Klebeverbindungen oft nicht oder nur nach langwierigen Evaluationen im Schiffbau zugelassen. Auch in der Auslegung und Berechnung von Klebeverbindungen ist keine einheitliche Methode oder Berechnungsvorschrift vorhanden. Diese Komplexität entsteht durch das Einbringen des zusätzlichen Werkstoffes Klebstoff. Eine Alternative sind stoff- und formschlüssige Verbindungen, die ohne das Einbringen eines Zusatzwerkstoffes Metall- und Faserverbundstrukturen verbinden. Diese minimieren sowohl den Fertigungsaufwand als auch den Zeitrahmen für Zertifizierung, Zulassung und Berechnung. Allerdings wurden diese Methoden bisher nur an kleineren Bauteilen angewendet worden und sind im Schiffbau bisher nicht im Einsatz. Für eine Anwendung müssen die Auswirkungen in allen Lebenszyklen des Schiffbaus für das direkte Zusammenbringen von gänzlich unterschiedlichen Werkstoffen untersucht werden.

1.2 Problemstellung

Die Klebung als stoffschlüssiges Fügeverfahren gilt als werkstoffgerechte Verbindungstechnik und führt unter Werkstattbedingungen mit Maschinenteknik zu qualitativ hochwertigen Ergebnissen. Die Belastbarkeit und Haltbarkeit von ausgeführten Klebungen unter suboptimalen Umgebungsbedingungen wie Temperatur (sehr hohe bzw. sehr niedrige Temperatur) und Feuchte (Kondensation) kann jedoch stark reduziert sein. Daher sind insbesondere Fertigungslinien mit wechselnden klimatischen Bedingungen hinsichtlich der Qualität und Reproduzierbarkeit der Klebung als kritisch einzustufen. Ein weiteres Hindernis für mehr Klebanwendungen ist das Fehlen von Spezifikationen bzw. von Kenntnissen über die sichere Dimensionierung von Klebeverbindungen. Übergeordnetes Ziel dieses Entwicklungsprojektes war es, für verschiedene Anwen-

dungen im Schiffbau geeignete klebstofffreie Fügetechnologien für Hybridverbindungen zu identifizieren und Prozesse und Methoden für die speziellen Anforderungen des Schiffbaus zu entwickeln, zu evaluieren und zu demonstrieren. Durch den Einsatz solcher Verbindungen können der Einsatz von Leichtbaumaterialien im Schiffbau weiter vorangetrieben, die Prozesszeiten in der Werft verkürzt und gänzlich neue Designs und Konzepte ermöglicht werden. Durch die Integration klebstofffreier Verbindungen können erhebliche Zulassungshürden abgebaut und die Umsetzung von Leichtbaukonzepten im Schiffbau vereinfacht werden. Der vermehrte Einsatz von Leichtbaustrukturen im Schiffbau ist ein direkter Beitrag zum Klimaschutz im Sinne einer CO₂ - Einsparung und einer Ressourcenschonung durch effizienten Materialeinsatz.

1.3 Zielsetzung

Das übergeordnete Ziel des SKZ im Rahmen des Vorhabens war die Umsetzung von halbautomatischen Faserverbundtechnologien zur Herstellung und Verarbeitung von stoff- und form-schlüssigen Hybridverbindungen zwischen Metall und Faserverbundkunststoffen. Die in Frage kommenden Verbindungselemente (Einbringen von mechanischen Barrieren auf Makro- und Mikroebene, Vernähen von sich überlappenden Metall-FVK Schichten, Verwirken von Metalldrähten mit FVK-Verstärkungsfasern) sind im Leit Antrag beschrieben. Dafür wurden im ersten Teil des Vorhabens fasergerechte Anschlussgeometrien entwickelt. Die Herstellung der Verbindungen wurde im Rahmen des Projektes hinsichtlich der Eigenschaften der Verbindungen optimiert. Ein weiterer Schwerpunkt stellte die zerstörungsfreie Charakterisierung für die spätere Qualitätskontrolle dar.

2 Stand der Technik

2.1 Faserverbundkunststoffe im maritimen Bereich

Das gesteigerte Bewusstsein hinsichtlich einer effizienten Nutzung von endlichen Ressourcen steigert vor allem im Transportwesen den Einsatz von leichten und belastbaren Strukturen. In vielen Anwendungsgebieten werden daher Verbundwerkstoffe eingesetzt. Moderne Werkstoffverbunde, bestehend aus einer duromeren Matrix in Verbindung mit Glas- oder Kohlenstofffaserverstärkung, ermöglichen im besonderen Maße eine lastgerechte leichte Konstruktion. Sie bieten hohe Steifigkeiten und Festigkeiten bei Materialstärken von nur wenigen Millimetern, mit dem Vorteil einer drastischen Gewichtsreduktion und gesteigerter Formfreiheit. Jedoch ist die komplette Substitution von Metallen durch Faserverbundkunststoffe meistens nicht möglich. Stattdessen wird ein Materialmix aus FVK und Metall bevorzugt. So sind Deckaufbauten bei Passagierschiffen und bei kleineren Formaten ganze Schiffe aus diesen Materialien bekannt [1], um Treibstoffverbräuche zu reduzieren, Traglasten und Reisegeschwindigkeiten zu erhöhen. Daher steigt das Interesse, besonders im maritimen Bereich, Werkstoff- und lastgerechte Verbindungstechniken für Metalle und Faserverbundkunststoffe zu entwickeln.

Faserverstärkte Kunststoffe bringen besondere Anforderungen hinsichtlich der Fügeverfahren mit sich. So können beispielsweise thermische Fügeverfahren nicht auf duroplastische Faserverbundwerkstoffe angewendet werden, da diese nicht schmelzen. Bisherige Verbindungstechniken an Leichtbaustrukturen, wie z. B. das Nieten oder das Verschrauben, zeigen insbesondere unter Langzeitbelastung unbefriedigende Ergebnisse durch punktuelle Kraftübertragung und Schädigung der Faserstruktur. Dem gegenüber steht das Verbinden mittels Kleben. Die stoffschlüssige Verbindung verursacht weder eine Gefügeveränderung der metallischen Werkstoffe noch eine leistungsmindernde Durchtrennung von Faserlagen/ Delaminationen im Kunststoffbauteil. Anwendungsgebiete auf Schiffen sind zum Beispiel die Befestigung von großen Glasflächen, Sitzschienen auf Passagierfähren sowie die finale Verbindung von Rumpf und Oberdeck bei Schiffen aus FVK [2]. Im maritimen Bereich ist die Verklebung jedoch oft mit Herausforderungen verbunden (s. o.)

2.2 Herstellverfahren von Faserverbundkunststoffen

Für die Verbindung von Metall und Faserverbundkunststoffen wurden im Projekt verschiedene Faserverbundtechnologien angewendet, die im Folgenden kurz erläutert werden.

Bei der **Vakuuminfusionstechnik** (Vakuum Assisted Resin Infusion – VARI) wird Harz mittels eines angelegten Vakuums auf der Entlüftungsseite durch die Faserstruktur gesogen. Vorteile ergeben sich durch den Imprägniermechanismus des Harzinfusionsverfahrens, bei dem die Matrix

zunächst mit geringem Fließwiderstand durch hochporöse Verteilmedien flächig über das Fasermaterial verteilt wird und anschließend in Dickenrichtung in das Fasermaterial eindringt [3]. Das VARI-Verfahren benötigt nur auf einer Seite ein steifes Werkzeug, die Gegenseite der Kavität wird durch eine Folie gebildet. Die Werkzeugkosten sind im Vergleich zur RTM-Technik gering. Durch geschickte Angusstrategien sind der Bauteilgröße fast keine Grenzen gesetzt. Der VARI-Prozess ermöglicht keine kurzen Taktzeiten, weil sowohl die Imprägnierung als auch der vorbereitende Aufbau des Prozesses deutlich länger dauert als beispielsweise bei der RTM-Technik.

Mit einem speziellen Harzinjektionsverfahren, dem **RTM-Verfahren** (Resin Transfer Moulding), werden Bauteile mit einem hohen Faseranteil reproduzierbar und in relativ kurzen Taktzeiten hergestellt. Das Harz wird dabei mit einem Druck von bis zu 10 bar in eine geschlossene Form injiziert und imprägniert alle Fasern. Die in der Kavität vorhandene Luft wird während der Injektion durch austretendes Harz (positionierte Steiger) entfernt. Durch das Anlegen eines Vakuums kann die Tränkung der Fasern und die Entgasung des Harzes unterstützt werden. Das Harzinjektionsverfahren bietet die Möglichkeit, hochreaktive Harzsysteme in komplexen Werkzeugen zu verarbeiten. Dieser Prozess ist weitestgehend automatisierbar und ist geeignet für große Stückzahlen [4]. Die hohen Prozessdrücke erfordern hochsteife Werkzeuge und Zuhaltssysteme.

Eine weitere Variation ist das **Light-RTM-Verfahren**. Dabei wird das Harz mit Hilfe von Vakuum in die geschlossene Form eingebracht. Bei diesem Verfahren müssen die Werkzeuge nicht so massiv wie bei dem RTM-Verfahren ausgelegt werden, da der Druck geringer ist [5]. Für RTM und Vakuuminfusion werden, zwecks einer besseren Tränkung der Fasern, niedrigviskose Harzsysteme benötigt. In beiden Verfahren sind Faservolumenanteile im FVK-Bauteil von bis zu 60 % erreichbar und oft auch konstruktiv angestrebt.

Das **Formpressverfahren** ist gekennzeichnet durch eine volumetrisch genaue Füllung des Werkzeuges. Beim Schließen der Formhälften wird dabei ein Umformvorgang der textilen Struktur eingeleitet. Die geometrische Komplexität des umzuformenden Bauteils ist daher wesentlich durch deren Verformungsverhalten definiert [4]. Es besteht die Möglichkeit Kurz- und Endlosfasern zu verarbeiten. Die Größe der Bauteile wird durch die Größe der Presse limitiert.

2.3 Zerstörungsfreie Prüfverfahren (ZfP)

Für die zerstörungsfreie Prüfung von Faserverbundkunststoffen, z. B. zur Detektion von Fehlstellen, Lunkern oder Delaminationen, gibt es eine Vielzahl unterschiedlicher Verfahren, die jeweils spezifische Vor- aber auch spezifische Nachteile aufweisen [6, 7]. Grundsätzlich kann unterschieden werden zwischen direkt bildgebenden Verfahren und damit schnellen Prüfungen und punktuell messenden Verfahren, die i. d. R. einen höheren Informationsgehalt aufweisen, aber mit längeren Prüfzeiten verbunden sind, unterschieden werden.

Die Terahertz-Technik ermöglicht Auflösungen im Millimeterbereich, relativ hohe Tiefenreichweiten und durch die Gewinnung von spektroskopischen Informationen die Beurteilung chemischer Aspekte des Prüfmaterials. Nachteilig ist allerdings, dass ausschließlich punktuell und somit rasternd geprüft werden kann, was zu langen Prüfzeiten führt. Weiterhin reflektieren leitfähige Materialien wie kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe (CFK) die Terahertz-Strahlung vollständig, sodass keine Informationen über das Bauteilinnere gewonnen werden können. Andererseits ermöglicht die Technologie eine genauere Untersuchung der Grenzfläche von Kunststoff-Metall-Hybridstrukturen [8-10].

Ein weiteres rasterndes Prüfverfahren ist die Ultraschall-Technik. Bei dieser ist mit Verwendung eines Koppelmediums z. B. in Form von Wasser eine Auflösung im Submillimeterbereich möglich. Zusätzlich bestehen koppelmedium-freie und damit berührungslos arbeitende Systeme, die zwar eine geringe Ortsauflösung im Sub-Zentimeterbereich, dafür aber auch eine deutlich größere Eindringtiefe von vielen Dezimetern aufweisen. Die Ultraschall-Technik ist etabliert und es existieren Normen sowie ein großer Erfahrungsschatz bei den Anwendern. Hier steht v. a. die Berücksichtigung der Bauteilgeometrie im Vordergrund laufender Entwicklungen [11-14].

Bei elektrisch leitenden Werkstoffen wie CFK kann die Wirbelstromprüfung angewandt werden, bei der mittels eines magnetischen Wechselfeldes Wirbelströme im Bauteil induziert werden. Die Auflösung der Wirbelstromprüfung liegt im Millimeter-Bereich und Prüfungen sind aufgrund der punktuellen Messmethode langwierig [15-17].

Flächige, direkt bildgebende und damit schnelle Prüfungen sind sowohl mittels der Shearografie als auch der Thermografie möglich. Erstere misst reversible Verformungen der Materialoberfläche, letztere die Oberflächentemperatur, infolge einer energetischen Anregung des zu prüfenden Bauteils. Beide Verfahren haben gemein, dass die Messauflösung im Millimeterbereich mit zunehmender Betrachtungstiefe im Material stark abnimmt und somit nur oberflächennahe Schichten effektiv geprüft werden können [11,18-24]. Der große Vorteil dieser Verfahren liegt darin, dass die Messzeit pro Quadratmeter nur wenige Sekunden bis Minuten beträgt und nicht viele Minuten bis Stunden wie bei den o. g. punktuell messenden Verfahren.

Darüber hinaus gibt es die Radiographie, die eine hohe örtliche Auflösung im Mikrometerbereich und Eindringtiefe im Zentimeterbereich aufweist. Je nach Verfahrensvariante sind jedoch spezielle Strahlenschutzmaßnahmen erforderlich, die Prüfzeiten liegen im Stundenbereich und es ist eine allseitige Bauteilzugänglichkeit erforderlich, was sich letztlich in sehr hohen Anlagenpreisen oder nur geringen möglichen Prüfvolumen äußert [25-26].

Zusammenfassend kann zwischen Messverfahren unterschieden werden, die:

- schnell eine große Fläche prüfen, dabei aber nur oberflächennahe Defekte detektieren
- zunächst nur punktuelle, dafür aber detailliertere und tiefer aus dem Prüfkörper stammenden Informationen erlangen.

In der Literatur sind viele Prüfmethode zur Lösung spezieller Probleme beschrieben. Für eine ganzheitliche Bauteilprüfung, wie sie im Projekt angestrebt wurde, ist eine Kombination mehrerer Verfahren notwendig.

3 Lösungsweg zur Erreichung des Forschungsziels

Zu Beginn wurden gemeinsam mit den Projektpartnern Verbindungstechnologien mit deren derzeit bekannten Eigenschaften und notwendigen Informationen, in einem Anforderungskatalog aus den schiffbaulichen Anwendungen, wie auch einer Risikobewertung zusammengefasst. Es wurden gemäß der Analyse Fügevarianten für die weitere Entwicklung ausgewählt. Die Ergebnisse wurden für die späteren Arbeitspakete genutzt.

Die Lasteinleitung in Faserverbundbauteile sollte möglichst harmonisch und großflächig erfolgen, um Spannungsspitzen und Spannungskonzentrationen zu verhindern. Es wurden Verbindungsprinzipien folgender Kategorien aufgegriffen: Oberflächenmodifikation, modifizierter Laminataufbau, Einbringen von Stütz- oder Haltestrukturen, formschlüssige oder stoffschlüssige Verbindungen mit Verstärkungsfaser/ Metall. Dies erfolgte durch die Recherche von bereits angewendeten Verfahren als auch Verfahren im Entwicklungsstadium. Die erarbeiteten Verbindungsmöglichkeiten und deren fasergerechte Umsetzung wurden hinsichtlich der schiffbaulichen Anforderungen bzw. der definierten maritimen Anwendungen bewertet. Hybride Verbindungstechnologien hatten zum Zeitpunkt der Beantragung des Projektes keinen einheitlichen Teststandard oder bereits anerkannte Methoden zum Prüfen der mechanischen Eigenschaften. Dies galt sowohl für die Verfahren in Bezug auf quasi-statische wie auch zyklische Lasten. Auch der Aufbau, also das Design solcher Proben und geeigneter Referenzproben, war weder standardisiert, noch entwickelt. Neben der mechanischen Prüfung und Vorversuchen wurden Vorversuche in Bezug auf die Herstellungsverfahren und die Integration (Produktion) unternommen.

Anschließend wurden erste Proben der ausgewählten Verbindungstechnologien mittels Vakuuminfusion hergestellt. Die metallischen Halbzeuge mussten zwingend vor bzw. nach der Applikation (je nach verwendeter Fügevariante) des textilen Halbzeugs durch die Anwendung verschiedener Reinigungsverfahren von anhaftenden, haftungsbehindernden Schichten befreit werden. Problematisch dabei waren die teilweise aufwändigen Geometrien und Feinheiten der jeweiligen Fügevarianten, welche ein mechanisches Abwischen mit Reinigern ausschließen. Zum Feinreinigen kam daher eine CO₂-Strahl Druckanlage sowie eine Atmosphärendruckplasma-Anlage zum Einsatz. Die Reinigung der Oberflächen sollte eine reproduzierbare Benetzbarkeit und Adhäsion des flüssigen Kunststoffes mit dem Metall ermöglichen.

Die (quasi)-statischen Prüfmethode zur Ermittlung der mechanischen Eigenschaften sowie die ZfP-Versuche wurden am SKZ durchgeführt. Die zyklische Prüfung erfolgte durch die Schweiß-

technische Lehr- und Versuchsanstalt Halle GmbH (SLV). Zum Vergleich der hybriden Verbindungen wurden Referenzprüfkörper (z. B. Klebproben) hergestellt und geprüft. Das übergeordnete Ziel war die Entwicklung einer Versuchsmethodik, welche eine schiffbauliche Zulassung der Verbindungselemente ermöglicht.

In Zusammenarbeit mit der SLV bzw. der Fritz Moll Textilwerke (Moll) standen dazu ausgewählte metallische Halbzeuge sowie Faserhalbzeuge zur Verfügung.

4 Durchgeführte Arbeiten

4.1 Anforderungen und Evaluierung Verbindungstechnologie

4.1.1 Definition der maritimen Anwendungen und Erstellung eines Anforderungskataloges

Das Ziel des Arbeitsschrittes war es, einen Überblick über hybride Fügemethoden zu geben und diese zu typisieren. Es wurden relevante Anbindungskonzepte (vgl. Tabelle 1) bei Nutzung von Mischbauweisen recherchiert und für eine Auswahl späterer Arbeitspakete deren Vor- und Nachteile benannt. Generell ließen sich die infrage kommenden Verbindungsvarianten untergliedern in die Arten:

- Stoffschlüssig (z. B. Kleben)
- Formschlüssig (z. B. Umschließen von Hinterschnidungen oder Vertiefungen)
- Kraftschlüssig (z. B. Nieten oder Schrauben).

Die Bezeichnung „hybrides Fügen“ ist gekennzeichnet durch das Kombinieren von mindestens zwei Arten von Fügemethoden.

Im Folgenden werden die ausgewählten Methoden (vgl. Tabelle 1) zur Herstellung einer Hybridverbindung beschrieben.

Fügen durch den Einsatz einer thermoplastischen Matrix [1]

Das Aufschmelzen einer thermoplastischen Matrix entspricht dem Prinzip eines physikalischen Klebstoffes (Hot-Melt bzw. Schmelzklebstoff). Die feste Verbindung zwischen den Bauteilen entsteht durch das Erstarren einer Schmelze. Bei der Verwendung von thermoplastischen Composites (faserverstärkte, schmelzbare Matrix) wird kein zusätzlicher Klebstoff benötigt, sondern direkt das Grundmaterial aufgeschmolzen. Die Anwendung des Verfahrens ist demnach nicht möglich bei duroplastischen Faserverbundwerkstoffen. Das Aufschmelzen erfolgt bspw. durch Infrarotschweißen oder Reibschweißen.

Vorteil: Kein zusätzlicher Klebstoff notwendig

Nachteil: Keine Anwendbarkeit bei duroplastischer Matrix; hoher lokaler Wärmeeintrag notwendig bei ggf. hohem Fügedruck

Oberflächenmodifikationen zur verbesserten Adhäsion [2]

Durch den Einsatz energiereicher Lasertechnologie ist es möglich, Oberflächen gezielt für eine hohe Adhäsion zu bearbeiten (Strukturieren). Dabei kann bspw. eine definierte Rauhtiefe und damit die effektive Oberfläche vergrößert oder sogar Ausformungen in der Art von Hinterschnitten erzeugt werden. Die ausgehärtete Kunststoffmatrix kann dadurch einen Verklammerungseffekt aufbauen.

Vorteil: Reproduzierbare Modifikation, sehr gut automatisierbar

Nachteil: Maschinentechologie begrenzt die Bauteildimensionen

Schäften und Überlappen von metallischen Anteilen und Faserverbundkunststoffen [3]

Die Technologie des Schäftens ist eine aus dem Holzbau übertragene Technik, um eine möglichst homogene Kraftübertragung zwischen bspw. zwei Stäben zu erreichen. Statt einer stirnseitigen Verbindung entsteht ein Längsstoß mit wesentlich vergrößerter Klebfläche. Die Schäftungslänge sollte im Verhältnis zur Dicke der Bauteile möglichst hoch sein. Die Schäftung minimiert auftretende Schälkräfte am Ende der Verbindung (Klebung), vermindert Steifigkeitssprünge und ermöglicht es, die vorhandene Faserverstärkung über die Länge der Schäftung aufrecht zu erhalten.

Vorteil: Einfache Ausführung

Nachteil: Bei ungeeigneten Geometrien (Winkel, kurze Bauteile) nicht umsetzbar

Einbringen von mechanischen Barrieren auf Makroebene [4]

Eingebrachte mechanische Barrieren bestehen häufig aus metallischen Werkstoffen in Form von Bolzen, Nieten oder Schrauben und sind in der Lage, sowohl Formschluss als auch Kraftschluss zwischen den Fügepartnern zu erzeugen. Problematisch sind die notwendigen Löcher, welche häufig durch Bohren hergestellt werden. Dabei wird die zur Kraftübertragung notwendige Faserverstärkung des Laminats lokal zerstört oder mindestens stark geschwächt. Eine Alternative ist es, das Loch „vorzuformen“. Dabei wird in das Faserhalbzeug ein Dorn eingeführt, welcher das spätere Loch bereits ausformt und dabei die Fasern umlenkt. Die mechanische Verbindung kann bspw. durch Schrauben oder Nieten hergestellt werden. Beim Zusammentreffen von kohlenstofffaserverstärkten Laminatschichten und Aluminium kann es zur raschen Korrosion des unedlen Aluminiums führen. Hierbei muss bspw. auf Titanlegierungen ausgewichen werden oder ein Klebstoff für elektrochemische Isolierung sorgen.

Vorteil: Hergestellte Verbindungen sind wieder lösbar; mechanische Sicherung

Nachteil: Geringe Lochleibungsfestigkeit der FVK; Spaltkorrosion möglich

Einbringen von mechanischen Barrieren auf Mikroebene [5]

Die Verbindungsfestigkeit zwischen FVK und Metallen lässt sich steigern, indem bspw. Pins- oder Haken auf dem metallischen Fügepartner aufgebracht werden. Die Strukturen werden üblicherweise durch ein Cold Metal Transfer (CMT) Schweißverfahren aufgebracht. Auf die erzeugten Pin-Strukturen werden anschließend die trockenen Faserhalbzeuge aufgelegt und angedrückt. Der erzielbare Effekt ist eine Steigerung der Verbindungsfestigkeit durch den entstandenen Formschluss zwischen Faserverstärkung und der erzeugten Pin-Struktur. Die Form und Größe der Pins/Haken sowie die Versagensmechanik ist Gegenstand von Forschungsvorhaben.

Vorteil: Steigerung der Zug- und Torsionsfestigkeit der hybriden Verbindung; mechanische Sicherung

Nachteil: Aufwändige Maschinenteknologie zur Herstellung der Strukturen

Vernähen von Schichten aus Metall- und Faserhalbzeugen [6]

Das Vernähen von Faserhalbzeugen aus Glasfasern mit plattenförmigen, metallischen Halbzeugen (Gitterstrukturen, Lochplatten) erzielt eine mechanische Sicherung gegenüber einer reinen Adhäsionsklebung und erfolgt vor dem eigentlichen Laminierprozess. Durch die Wahl eines reißfesten Nähfadens lassen sich hohe Sicherungskräfte erzielen. Die laminierten, metallischen Halbzeuge können im Nachgang an Metallstrukturen angeschweißt werden.

Vorteil: Fixierung der Faserhalbzeuge während der Herstellung; hohe Automatisierung möglich; mechanische Sicherung

Nachteil: Geringer Faservolumengehalt im Bereich der metallischen Halbzeuge

Verwirken von Metalldrähten oder -garnen mit textilen Halbzeugen [7]

Das Verwirken von Metallgarnen und Glasfasern soll das Ziel erreichen, eine Art Kupplungsstück zwischen dem reinen Glasfaserlaminat und einem metallischen Fügepartner herzustellen. Das Gewirk ermöglicht im laminierten Zustand eine hohe Kraftübertragung zwischen den unterschiedlichen Füge teilen. Dazu wird vor dem Laminieren das metallische Ende des Gewirks durch ein spezielles Schweißverfahren mit dem Metallbauteil verschweißt.

Vorteil: Einfache Integration in bestehende Laminierprozesse; mechanische Sicherung

Nachteil: Spezielles Faserhalbzeug notwendig

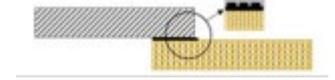
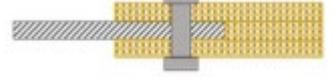
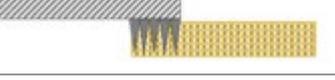
Einbetten der FVK-Verstärkungsfasern in Metall [8]

Eine Möglichkeit zum Verbinden von Faserverbundkunststoffen und Metallen besteht darin, einen Teil der Faserverstärkung in einem Aluminium-Druckgussprozess mit flüssigem Aluminium zu umgießen. Die temperaturfeste Glasfaser bleibt dabei unbeschädigt und behält ihre Funktion zur Kraftübertragung bei. Die freien Faserenden, welche aus dem Gießprozess isoliert werden, können daraufhin wie üblich in einem Laminierprozess mit anderen Faserhalbzeugen zu einem Laminat verarbeitet werden. Diese Technologie ermöglicht damit das Angießen eines metallischen Verbinders, welcher dann mit konventionellen Montageverfahren weiterverarbeitet werden kann [27].

Vorteil: Homogener Übergang

Nachteil: Spezieller Prozess; auf Glasfasern beschränkt

Tabelle 1: Übersicht Fügemethoden Metall – FVK

Methode	Schema
[1] Fügen durch den Einsatz einer thermoplastischen Matrix	
[2] Oberflächenmodifikation zur verbesserten Adhäsion	
[3] Schäften und Überlappen von metallischen Anteilen und FVK-Verstärkungsfasern vor dem Laminieren zur Vergrößerung der Verbindungsflächen	
[4] Einbringen von mechanischen Barrieren auf Makroebene (Bolzen-, Schraub-, Nietverbindungen)	
[5] Einbringen von mechanischen Barrieren auf Mikroebene (Haken auf Oberfläche- CMT-Pin)	
[6] Vernähen von Ebenen sich überlappenden Metall-FVK Schichten vor dem Laminieren	
[7] Verwirken, Weben von Metalldrähten oder Garnen mit FVK-Verstärkungsfasern	
[8] Einbetten der FVK-Verstärkungsfasern in Metall	

4.1.2 Evaluierung Verbindungen und Anforderungen

Die Methoden zur Herstellung einer klebfreien FVK-Metall-Verbindung wurden mit den Projektpartnern eingehend diskutiert. Insbesondere die Projektpartner mit schiffbaulichem Hintergrund geben den Varianten Vorzug, welche im Brandfall beim Versagen der Adhäsion bzw. der Kohäsion durch eine mechanische Sicherung ein abruptes Versagen der Verbindungsstelle verhindern und damit einen brandschutztechnischen Vorteil gegenüber reinen Klebverbindungen aufweisen. Verbindungsmethoden, welche eine starke Affinität zum konventionellen Kleben aufweisen (vgl. Tabelle 1, Nr.1 – Nr. 3) wurden im Projekt nicht weiterverfolgt, da hier die gleiche Problematik wie bereits beim Kleben zu erwarten ist (keine Standards bei den Klassifikationsgesellschaften, keine einheitliche Auslegung, ungeeignete Umgebungsbedingungen in Werften). Da der Fokus im Forschungsprojekt auf den Einsatz im maritimen Sektor und dessen anspruchsvollen Brandschutzanforderungen liegt, wurden die Varianten ohne mechanische Sicherung ebenfalls nicht weiterverfolgt.

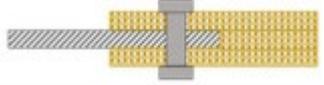
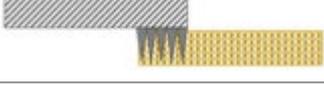
In Zusammenarbeit und Austausch mit den am Projekt beteiligten Partnern haben sich folgende Fügemethoden im Hinblick auf die schiffbaulichen Anforderungen für eine weitere Entwicklung als besonders geeignet herausgestellt (vgl. Tabelle 3):

- mechanische Barrieren, welche die beiden Fügepartner durchdringen und damit eine kraft- und formschlüssige Verbindung ermöglichen
- mechanische Barrieren, welche einseitig auf einem Fügepartner bereitstehen und im nachfolgenden Verarbeitungsprozess eine formschlüssige Verbindung ermöglichen
- vernähte Ebenen in z-Richtung, welche eine mechanische Sicherung nach der Imprägnierung mit Harz ermöglichen
- spezielle Textilien, welche durch einen hybriden Aufbau bestehend aus konventionellen Glasfasern sowie metallischen Garnen oder Fasern ein direktes Anschweißen an metallische Fügepartner ermöglichen. Eine mechanische Sicherung erfolgt durch das Verwirren der Fasern und damit einer hohen Faserreibung.
-

Tabelle 2: Übersicht der Verbindungseigenschaften, ✓ erfüllt, ✗ nicht erfüllt

Methode	mechanische Sicherung	Verbindung entsteht ohne Zusatzstoff	Kraftübertragung über gesamten Querschnitt	Σ
1	✗	✗	✗	✗
2	✗	✓	✗	✓
3	✗	✓	✓	✓✓
4	✓	✓	✓	✓✓✓
5	✓	✓	✓	✓✓✓✓
6	✓	✓	✓	✓✓✓✓
7	✓	✓	✓	✓✓✓✓
8	✓	✗	✓	✓✓

Tabelle 3: ausgewählte Verbindungsmethoden

Methode	Schema
Einbringen von mechanischen Barrieren auf Makroebene (Bolzen-, Schraub-, Nietverbindungen)	
Einbringen von mechanischen Barrieren auf Mikroebene (Haken auf Oberfläche- CMT-Pin)	
Vernähen von Ebenen sich überlappenden Metall-FVK Schichten vor dem Laminieren	
Verwirken, Weben von Metalldrähten oder Garnen mit FVK-Verstärkungsfasern	

4.2 Versuchsmethodik und Verfahren

Um eine gleichmäßige Probenqualität zu gewährleisten, wurden die Verbindungsmethoden einheitlich durch die Herstellung im Vakuuminfusionsverfahren (vgl. Abbildung 1 und 2) realisiert. Mit diesem Verfahren lassen sich hochwertige Bauteile reproduzierbar herstellen. Es basiert auf dem Prinzip einer künstlich hergestellten Druckdifferenz der Umgebung zum Bauteil, welches unter einer abgedichteten Folie von enthaltener Luft evakuiert (Vakuumpumpe) wird. Der Differenzdruck beträgt maximal 1 bar bzw. $0,1 \text{ N/mm}^2$. Der Druckunterschied wird für die Tränkung der Faserverstärkung ausgenutzt, indem eine im Prozess geöffnete Zuleitung aus einem Vorratsbehälter die flüssige Harzmatrix ansaugt und damit das Bauteil infiltriert. Das vollständig mit Harz getränkte Bauteil muss im Anschluss über den Faktor Zeit und Temperatur noch unter Vakuum ausgehärtet werden. Eine anschließende Wärmenachbehandlung für 8 Stunden bei $60 - 80 \text{ }^\circ\text{C}$ führt zu einer Erhöhung der Vernetzungsdichte der Kunststoffmatrix und damit zu gesteigerten mechanischen Eigenschaften sowie einer hohen Beständigkeit.

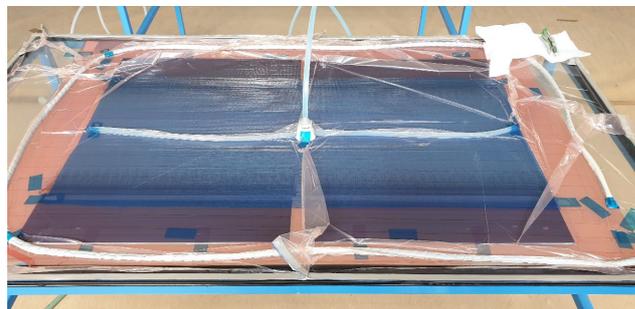


Abbildung 1: Vakuuminfusion der hybriden Verbinder

Versuchsübergreifend wurde auf ein konventionelles, industrielles Harzsystem zurückgegriffen (Hexion RIMR 426 mit Härter Hexion RIMH 434). Dies zeichnet sich durch eine niedrige Viskosität (Mischviskosität ca. 350 mPas) bereits bei Raumtemperatur aus und ermöglicht damit eine gute Imprägnierung von stark komprimierten Faserlagen. Die Wahl der Faserverstärkung fiel auf

ein Glasfaser-Unidirektional (UD)-Gelege mit einem Flächengewicht von ca. 600 g/m². Unidirektionale Fasergelege zeichnen sich durch eine höchstmögliche Verstärkungswirkung in Faserichtung aus (0° Faserrichtung).

Vom Projektpartner SLV Halle wurden die für die jeweiligen Verbindungsmethoden präparierten, gestuften Bleche aus CrNi-Stahl zur Verfügung gestellt. Aufgrund dessen, dass nur exakt rechtwinklige Faserzuschnitte in Kombination mit dem gestuften Anschlussbereich eine gleichmäßige Kraftübertragung zwischen Faserverstärkung und Blech ermöglichen, wurden sämtliche Faserzuschnitte mit dem im Projekt beschafften CNC-Fasercutter (Aristomat TL 1617) durchgeführt (vgl. Abbildung 3). Der CNC-Zuschnitt ermöglicht präzise 90°-Schnittkanten unter Einhaltung der Faserorientierung (2-Punkt-Einmessung zum Vermeiden von Winkelfehlern).

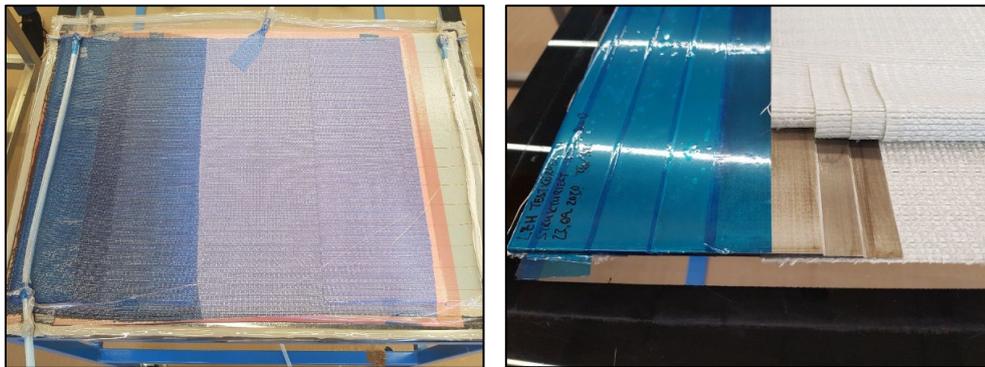


Abbildung 2: links: geschlossener Vakuumaufbau mit erkennbarer Fließfront; rechts: gestuftes Blech mit aufgelegter Faserverstärkung



Abbildung 3: CNC-Zuschnitt der Faserverstärkung auf dem CNC-Cutter Aristomat TL 1617

Eine besondere Bedeutung kam der Reinigung bzw. Entfernung von haftungsmindernden Schichten im Vorfeld der Vakuuminfusion zu. Entsprechend der gängigen Praxis wurde durch das Aufbringen von sog. Testtinten (Substanzen mit genau definierter Oberflächenspannung) die Oberflächen (OF)-spannungen der CrNi-Bleche sowie des hybriden Gewirkes bewertet. Dabei wurde festgestellt, dass die vorhandene OF-Spannung für das verwendete Epoxidharz zu niedrig ist (< 38 mN/m) und ohne eine intensive Untersuchung der optimalen Oberflächenvorbehandlung keine zufriedenstellenden Ergebnisse erzielt werden können. Im engen Austausch mit dem Projektpartner Faserinstitut Bremen konnten durch EDX-Analyse organische Substanzrückstände auf den Fasern nachgewiesen werden. Eine genaue Aussage, um welche Substanz es sich handelt,

konnte jedoch nicht getroffen werden. Jedoch liegt es nahe, dass es ölige Verarbeitungsrückstände aus der Herstellung der Metallfasern sind.

4.2.1 Entfernung haftungsmindernder Schichten

Das hybride Gewirk, bestehend aus Glasfasern und Stahlfasern, wurde drei verschiedenen Reinigungsmethoden unterzogen. Das gereinigte Gewirk wurde anschließend über eine gereinigte Metallfläche gerieben, um einen Übertrag von Kontaminationen zu provozieren. Auf der Metallfläche wurde dann die Testtinte aufgetragen. Die Methoden der Reinigung waren Ultraschallbad, manuelles Abwischen mit Lösungsmittel und die Reinigung mit Atmosphärendruckplasma (vgl. Abbildung 4).



Abbildung 4: Reinigung des hybriden Fasergewirkes v. l. n. r: Ultraschallbad in Aceton; Abwischen mit Aceton; Reinigen mit Atmosphärendruckplasma

Die Auswertung ergab, dass sowohl die Reinigung im Ultraschallbad als auch die Behandlung mit Atmosphärendruckplasma eine ausreichende Reinigungsleistung erzielen konnten (Steigerung der Oberflächenspannung von < 38 mN/m auf über 50 mN/m). Keine ausreichende Reinigungsleistung erzielte das Abwischen, da hierbei lediglich Bereiche gereinigt wurden, welche in Kontakt mit dem Reinigungstuch kamen. Aufgrund der über einen langen Zeitraum im Gewirk vorliegenden Aceton-Konzentration nach dem Ultraschallbad wurde das Reinigen mit Atmosphärendruckplasma für die weiteren Arbeiten favorisiert. Das mobile Atmosphärendruckplasma vom Typ relyon plasmatool wurde im Rahmen des Projekts für die Reinigung von Oberflächen angeschafft.

CrNi- Bleche

Nach den ersten Versuchen zeigte sich, dass auslaufende Laminatbereiche auf den CrNi-Blechen zu Delaminationen neigen (vgl. Abbildung 5). Außerdem deuteten erste Zugversuche ein generelles Haftungsproblem zwischen Epoxidharz und den metallischen Fügepartnern an, denn die hybride Verbindung ließ sich ohne große Kraftaufwendung trennen und überstand kaum die Prüfkörperpräparation (horizontale, wassergekühlte Bandsäge). Nichtrostende Stähle beinhalten Legierungsbestandteile wie Chrom, Nickel und Molybdän, welche eine Passivierung der Oberfläche erreichen. Die passive Oberfläche erschwert jedoch die Ausbildung von Wechselwirkungen mit dem aufgetragenen Laminierharz und muss durch spezielle Schritte auf das Laminieren vorbereitet werden.

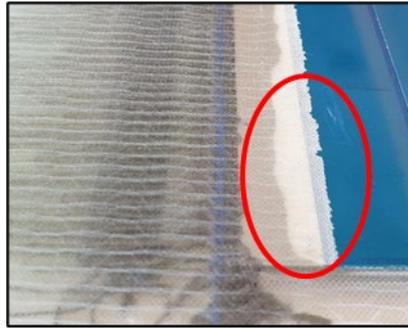


Abbildung 5: Übergangsbereich GFK zu Metall; Delamination rot markiert

Um zum einen die Adhäsion zwischen dem metallischen Füge­teil (CrNi-Stahl) und der Epoxid­harzmatrix zu bewerten und zum anderen eine grundsätzliche Aussage zur optimalen Oberflächen­vorbereitung treffen zu können, wurden Haftabzugstests auf den CrNi-Blechen mit unterschiedlichen Methoden der Oberflächen- (OF-)Vorbehandlung durchgeführt. Aus der Kleb­technologie bekannt sind Haftabzugstests, womit geprüft wird, wie gut eine Beschichtung auf einem Füge­teil haftet. Ist keine Beschichtung zum Testen vorhanden, so lässt sich damit folglich die Haft­festigkeit zwischen verwendetem Klebstoff und Füge­teil messen. Eine Übersicht der ange­wandten Methoden der OF-Vorbehandlung sowie deren ermittelte Haft­festigkeiten ist in Tabelle 4 ersichtlich. Die Herstellung der Probekörper erfolgte durch das Aufkleben von speziellen Zu­ge­elementen auf das Blech und das anschließende Entfernen von Klebstoffresten um das Zuge­element herum (vgl. Abbildung 6). Als Referenzklebstoff wurde ein 2K-Epoxid Klebstoff verwendet (Henkel Teroson 221 i. V. m. 0,3 mm Glaskugeln zum Einstellen des Klebspalts), welcher für 3 h bei 100 °C ausgehärtet wurde. Die eigentliche Prüfung wird vom Gerät (TQC PosiTest AT-A) vollautomatisch durchgeführt. Im Detail wird die maximal ermittelte Kraft im Moment des Ab­risses durch die Klebfläche des Zuge­lements (62,83 mm²) geteilt und als Festigkeit auf dem Dis­play ausgegeben.



Abbildung 6: v. l. n. r.: PosiTest AT-A zum Ermitteln der Haft­festigkeit; aufgeklebtes Zuge­element; freigestelltes Zuge­element

Tabelle 4: Angewandte Methoden zur Oberflächenbehandlung und ermittelte Haftfestigkeiten

Methoden der Oberflächenbehandlung	ermittelte Haftfestigkeit in MPa
unbehandelt	6,0
gereinigt mit Aceton (ger.)	6,98
ger. + Atmosphärendruckplasma (AD)	14,36
ger. + AD + Silikatisiert (Sil)	19,68
ger. + geschliffen (Schleifvlies medium)	15,0
ger. + geschliffen (Korn 80)	20,68
Laserbehandelt	12,81
gebeizt	9,91

Insbesondere das Vorbehandeln mit Atmosphärendruckplasma + dem Beflammen mit Silan-dotiertem Gas (Silikatisieren) sowie das manuelle Anschleifen mit grobem Schleifpapier ermöglicht eine deutliche Steigerung der Haftfestigkeit (vgl. Tabelle 4). Für die weiterführenden Versuche wurde daher das Anschleifen und anschließende Reinigen mit Atmosphärendruckplasma als OF-Vorbehandlungsmethode festgelegt.

4.2.2 Bewertung der Oberflächenvorbehandlungen mittels Kontaktwinkelmessung

Für die Festlegung der optimalen Oberflächenvorbereitung auf CrNi-Stahl der Sorte S 1.4301 und Aluminium AlMg₃ wurden etablierte Möglichkeiten zur Optimierung der Oberflächeneigenschaften angewendet und anschließend mit dem Mobile Surface Analyzer der Firma Krüss durch Kontaktwinkelmessungen analysiert (vgl. Abbildung 7 und Abbildung 8). In

Tabelle 5 und Tabelle 6 sind die durchgeführten Methoden der Oberflächenbehandlung sowie die ermittelten freie Oberflächenenergien (SFE – Surface Free Energy) nach Abschluss der Maßnahmen aufgeführt. Der Strahlvorgang erfolgte mit Korund F150, der Anschliff wurde mit Schleifvlies (P80) durchgeführt und für die Plasmabehandlung kam ein OpenAir Rotationsplasma der Firma Plasmatreat zur Anwendung.

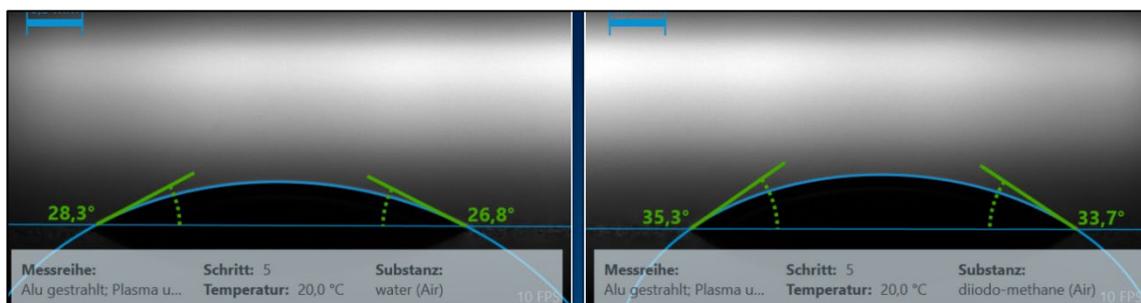


Abbildung 7: Ermittlung der freien Oberflächenenergie durch Kontaktwinkelmessung



Abbildung 8: Messung der Kontaktwinkel an $AlMg_3$ für die Bestimmung der freien Oberflächenenergie

Tabelle 5: Übersicht über die Ergebnisse der Kontaktwinkelmessung auf CrNi-Stahl S 1.4301

Methode	SFE	StAbw	Dispersiv	StAbw	Polar	StAbw
	(mN/m)		(mN/m)		(mN/m)	
unbehandelt	37,63	7,1	34,03	4,95	3,6	2,14
gereinigt mit Aceton	39,91	9,16	34,47	4,38	5,44	4,77
angeschliffen nach Reinigung	52,06	2,62	39,57	0,87	12,48	1,75
gestrahlt nach Reinigung	59,47	7,06	35,26	1,21	24,21	5,86
Plasma nach Reinigung	62,1	6,24	34	1,3	28,1	4,94
Plasma nach Anschliff	66,83	3,03	36,72	0,72	30,11	2,31
Plasma nach Strahlen	73,05	1,69	40,3	0,85	32,75	0,84
Beflammt nach Reinigung und Plasma	53,95	3,57	34,45	0,83	19,5	2,73
Beflammt nach Anschliff und Plasma	64,55	3,83	36,31	0,84	28,24	2,99
Beflammt nach Strahlen und Plasma	65,54	3,69	40,29	1,41	25,25	2,28

Tabelle 6: Übersicht über die Ergebnisse der Kontaktwinkelmessung auf Aluminium AlMg₃

Methoden	SFE	StAbw	Dispersiv	StAbw	Polar	StAbw
	(mN/m)		(mN/m)		(mN/m)	
unbehandelt	42,78	10,22	32,63	2,44	10,15	7,77
gereinigt mit Aceton	52,89	3,83	38,46	0,93	14,43	2,9
angeschliffen nach Reinigung	47	3,01	38,61	1,89	8,39	1,13
gestrahlt nach Reinigung	53,98	3,62	36,89	1,4	17,09	2,22
Plasma nach Reinigung	67,67	3,29	35,37	1,56	32,3	1,73
Plasma nach An-schliff	72,15	2,82	41,09	0,75	31,06	2,07
Plasma nach Strahlen	71,64	4,11	42,43	2,32	29,21	1,79
Beflammt nach Reinigung und Plasma	71,33	3,34	35,84	1,87	35,49	1,47
Beflammt nach An-schliff und Plasma	69,3	3,64	42,53	1	26,77	2,64
Beflammt nach Strahlen und Plasma	65,55	10,26	43,54	1,45	22,01	8,81

Die nachgeschaltete Plasmareinigung erzielte von den untersuchten Methoden die höchsten freien Oberflächenenergien. Die Plasmaanwendung erzielt auf der metallischen Oberfläche eine besonders tiefgreifende Reinigung und entfernt dabei nahezu sämtliche organischen Verbindungen auf ein Minimum bei hoher Umweltverträglichkeit.

Mit steigender (freier) Oberflächenenergie wird die Benetzung mit Klebstoffen bzw. Harzen verbessert. Die Benetzung ist eine notwendige Grundvoraussetzung für die Ausbildung der Adhäsion und somit ist zu erwarten, dass die plasmagereinigten Proben die beste Adhäsion erzielen.

4.2.3 Bewertung der Oberflächenvorbehandlungen durch Haftabzugstests

In den durchgeführten Untersuchungen wurden neben dem bereits verwendeten CrNi-Stahl (S 1.4301) weitere häufig verwendete Metalllegierungen (S355JR, AL6000, AlMg₃) auf deren Haftungsvermögen nach erfolgter Oberflächenbearbeitung durch Haftzugprüfung untersucht. Die zur Verfügung stehenden Methoden der Oberflächenbearbeitung waren:

- Atmosphärendruckplasma mit Rotationsdüse
- Silikatisieren durch Flammenpyrolyse
- Behandlung mit Primer bzw. Haftvermittler.

Da sich in den vorangegangenen Arbeiten zeigte, dass generell ein verbessertes Haftvermögen durch die mechanische Oberflächenbearbeitung (Strahlen, Schleifen) erreicht werden kann, erfolgte für

alle betrachteten Metalle eine vergleichbare Vorbereitung durch Korundstrahlen. Begleitend erfolgte die Messung der Oberflächenrauigkeit R_a nach dem Strahlvorgang. Nach dem Strahlen wurden alle Oberflächen manuell mit Lösungsmittel (Aceton) gereinigt. Die Oberflächen der Metalle wurden anschließend entweder Silikatisiert oder mit Primer beschichtet. Ergänzend zu den vorherigen Versuchen wurde vor dem Aufkleben der Zuelemente (bzw. nach der Oberflächenbehandlung) auf die metallische Oberfläche eine Lage Glasfasern (163 g/m², 2-2-Körper) mittels Vakuuminfusion aufgebracht. Damit sollte die tatsächliche Haftfestigkeit zwischen faserverstärktem Harz und metallischer Oberfläche ermittelt werden. Darauf aufbauend wurden die benötigten Zuelemente (Dollies) mit einem hochfesten 2K- Epoxidharzklebstoff (Sika Force 1277) aufgeklebt (vgl. Abbildung 9).

Tabelle 7: Ermittelte Haftfestigkeiten (in MPa) nach Oberflächenbehandlung und Oberflächenrauigkeit nach Strahlvorgang

Material Methode	S355Jr	1.4301	AlMg3	AL 6000
Rotationsplasma (MPa)	20,51	15,45	9,8	5,96
nur gestrahlt (MPa)	20,6	15,49	17	7
Flammenpyrolyse (MPa)	20,19	15,86	10,7	5,34
Primer Plexus PC120 (MPa)	20,6	7,37	11,7	3,02
Primer CODU TEC 1K (MPa)	20,6	10,42	8,31	4,39
Oberflächenrauigkeit R_a (μm)	3,00	2,23	3,71	3,82



Abbildung 9: Abzugsvorrichtung zur Ermittlung der Haftfestigkeit

Anhand der Messergebnisse wurde festgestellt, dass die Verwendung des Primers keinen nutzbaren Vorteil gegenüber den anderen Verfahren erzielen konnte. Dies ist anwendungsrelevant, da durch den Verzicht auf Primer die Fehleranfälligkeit der Applikation, das begrenzte Zeitfenster zur Weiterverarbeitung und die laufenden Kosten reduziert werden können.

4.2.4 Verarbeitung der Fügevarianten

Die Herstellung der Fügevarianten (hybrides Gewirk; CMT-Pin; Nietverbindung; besticktes Drahtgitter) erfolgte ausnahmslos unter Verwendung folgender Halbzeuge und Hilfsstoffe:

- Faserverstärkung: Unidirektionales Glaslegele; Flächengewicht 640 g/m²

- Harz: Hexion EPIKOTE RIMR 426 Härter: Hexion EPIKURE RIMH 434
- Trennmittel: Mikon W-53
- Blechhalbzeug: CrNi-Stahl (1.4301) mit einer Dicke von 3,0 mm

Variante hybrides Gewirk

Das Verbindungselement besteht aus dem FAUSST-Textil (hybrides Verstärkungstextil aus Glasroving- und Stahlgarn mit schweißbarem Saum) und einem Metallprofil (z. B. blechförmig). An diese werden eine oder mehrere Lagen FAUSST-Textil verschweißt. Danach können die Verbindungselemente in den Faserverbundherstellungsprozess direkt integriert werden. Vom Projektpartner SLV Halle wurde an 2-fach gestufte CrNi-Blechen ($t = 3 \text{ mm}$) das technische Textil FAUSST per Rollnahtschweißverfahren angeschweißt. Damit besaß ein Blech jeweils zwei Lagen des FAUSST-Gewirks. Für den Aufbau der Prüfplatten wurden die Zwischenräume zwischen den FAUSST-Lagen mit Glasgelege aufgefüllt. Außerdem wurde die Ober- und Unterseite des Bleches zusätzlich mit einer Lage Glasgelege abgedeckt (50 mm Abstand von der unteren Stufe). Der Lagenaufbau kann schematisch Abbildung 10 entnommen werden. Die Faserverstärkung wurde so ausgerichtet, dass alle Rovings in 0° -Richtung auf die Verbindungsstelle zeigen.

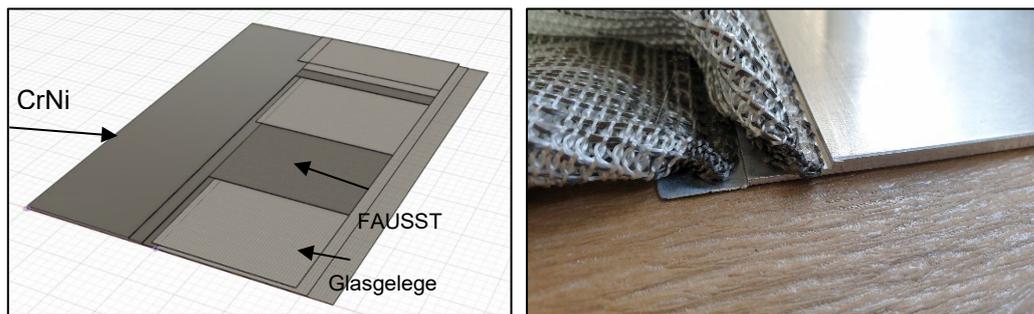


Abbildung 10: links: Lagenaufbau Platte mit FAUSST; rechts: CrNi-Blech mit FAUSST

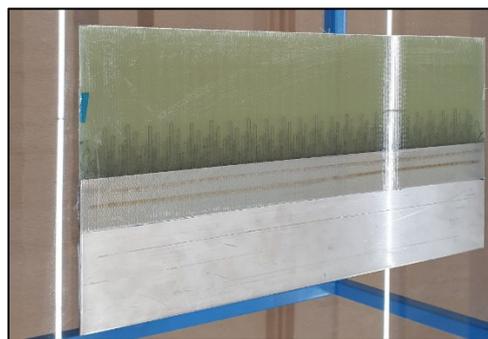


Abbildung 11: Hybride Verbindung FAUSST im VARI-Verfahren

Die hergestellte Platte (vgl. Abbildung 11) wurde nach 24 h bei Raumtemperatur (RT) einer Wärmenachbehandlung bei 70°C für 4 h unterzogen. Um geometrischen Verzug zu vermeiden, erfolgte die Entformung erst nach der Wärmenachbehandlung von der formgebenden Glasplatte.

Variante CMT-Pin

Die Fügevariante zeichnet sich dadurch aus, dass auf dem metallischen Fügebereich eine Vielzahl von Pins mit kugelförmigem Kopf additiv aufgebracht wird (vgl. Abbildung 12). Die Pins befinden sich im Anschlussbereich zur Faserverstärkung und bewirken dort eine mechanische Verklammerung. Im Vorfeld der Vakuuminfusion wurden die Faserhalbzeuge mechanisch über die vorhandene Pin-Struktur fixiert (vgl. Abbildung 12). Um einen besseren Formschluss zwischen den Pins und der Faserverstärkung zu erzielen, wurden auf jeder Stufe die Fasern in $0^\circ/90^\circ$ Orientierung angeordnet (vgl. Abbildung 12), sodass Fasern parallel der Stufenkante hinter den Pinreihen eingebracht werden konnten, wie auch Fasern in Richtung der späteren Krafrichtung vorhanden waren.

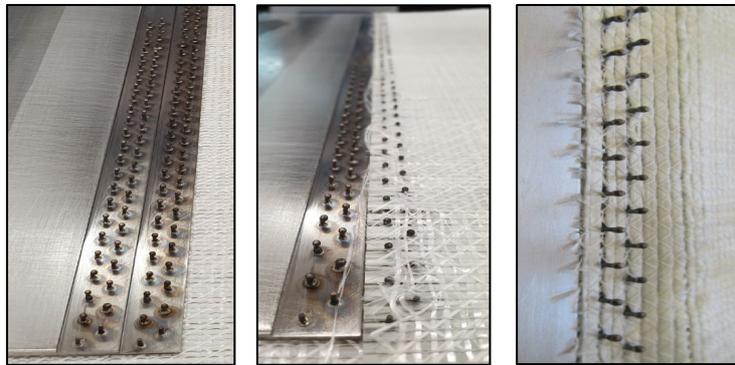


Abbildung 12: v. l. n. r.: Additiv gefertigte Pin-Reihen; 0° Faserorientierung; 90° Faserorientierung

Variante Nietverbindung

Die Fügemethode Nietverbindung ist eine weitere Verbindungsart, bei welcher eine mechanische Sicherung das Abgleiten bzw. den Totalausfall einer hybriden Verbindung verhindern soll. Im Vorfeld der Herstellung der Verbindung wurde analog zur Klebreferenz eine im VARI-Verfahren hergestellte GFK-Platte (Faserablage $0^\circ/90^\circ$ zur Erhöhung der Lochleibungsfestigkeit) entsprechend dem metallischen Pendant spanend bearbeitet, d. h. das Negativ zur metallischen Stufung abgefräst. Im nächsten Schritt wurde gemeinsam mit dem Projektpartner SLV Halle die Positionierung der Niete konzipiert. Es wurden dabei zwei Varianten untersucht, welche sich darin unterschieden, dass die Hälfte der Platte mit einem abweichenden Nietmuster verbunden wurde (vgl. Abbildung 13). Die benötigten Löcher in den zu verbindenden Bauteilen wurden auf einer Fräse vorgebohrt. Eine Alternative zu den gebohrten Löchern bestünde darin, im Herstellprozess der GFK-Platte die Nietlöcher vorzuformen und damit den Faserverlauf nicht zu zerstören.

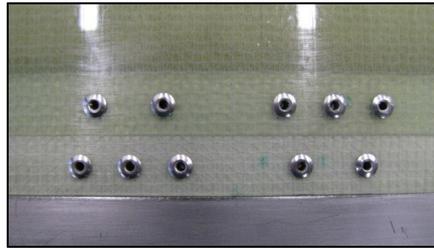


Abbildung 13: hergestellte Nietverbindung mit zwei (Niet2) - bzw. dreireihiger (Niet3) Anordnung der Nieten auf der dünneren GFK-Stufe

Variante besticktes Drahtgitter

Das Besticken eines metallischen Gitters bzw. Lochblechs wurde an einem ebenen Drahtgitter untersucht. Die zur Kraftübertragung notwendige Faserverstärkung in Form von Glasgelegen wurde durch manuelles Besticken mit dem angeschweißten Gitter kraftschlüssig verbunden und lag danach als kompaktes Halbzeug vor (Stahlplatte-Gitter-Faserverstärkung) (vgl. Abbildung 14). Da die Dicke des Drahtgitters geringer als die der angeschweißten CrNi-Platte war, wurde mit zusätzlichen Lagen des Glasgeleges die Dicke der der Stahlplatte angepasst. Neben der mechanischen Sicherung durch das Vernähen der Fasern mit dem Drahtgitter ermöglicht die Maschenstruktur eine Hinterschnittgeometrie und damit eine ähnliche Funktion wie Harzstege in Sandwich-Kernmaterialien.

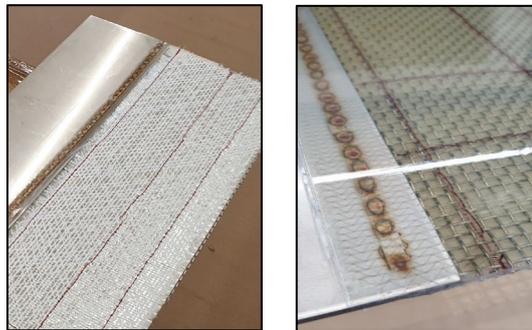


Abbildung 14: links: aufgenähte Faserverstärkung; rechts: Laminat nach Vakuuminfusion

Zum Vergleich der ausgewählten Fügemethoden mit der Klebtechnologie, wurde eine geklebte Prüfplatte bestehend aus den gleichen Ausgangsmaterialien, wie der der hybriden Verbinder, hergestellt. Dazu wurde eine GFK-Platte (Vakuuminfusion, 6 Lagen UD-Gelege mit 600 g/m^2 , 0° Orientierung) hergestellt und durch CNC-Bearbeitung dem Anschlussbereich der gestuften CrNi-Platte angepasst (vgl. Abbildung 15). Unter Berücksichtigung der Klebspaltdicke entstand dadurch eine ebene Prüfplatte zur Prüfkörperentnahme (vgl. Abbildung 16), das heißt ohne eine Exzentrizität im Bereich der Fügegeometrie. Als Klebstoff kam ein SikaPower-1277 2K-Epoxydklebstoff zur Anwendung. Der Klebstoff ist mit Glaskugeln vom Durchmesser $0,3 \text{ mm}$ als Abstandhalter ausgestattet.

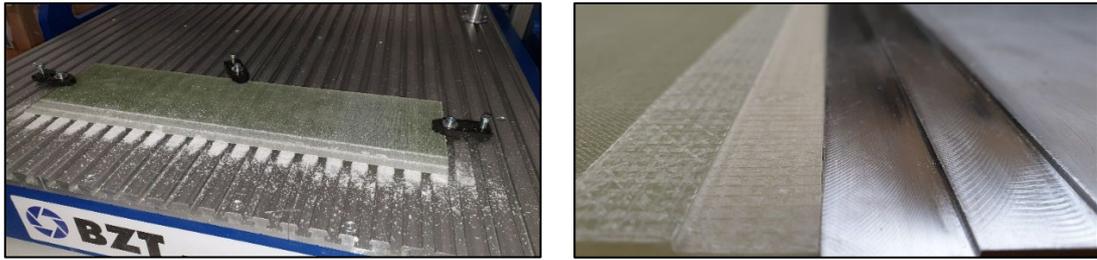


Abbildung 15: links: CNC-Bearbeitung der GFK-Platte zum Erzeugen der Stufung; rechts: präparierte Anschlussbereiche der Klebreferenz vor dem Klebstoffauftrag

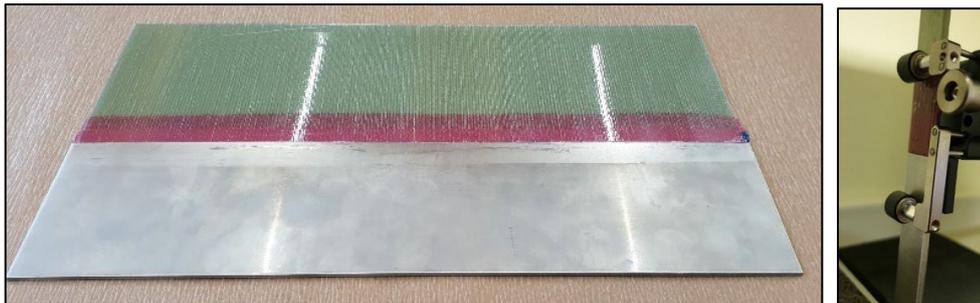
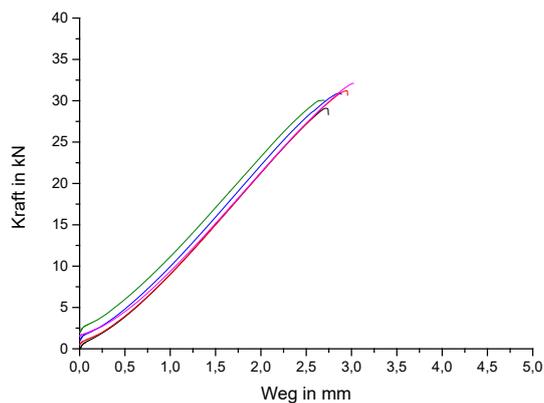


Abbildung 16: links: geklebte Referenzplatte zur Entnahme von Prüfkörpern; rechts: Zugscherprüfung mit digiClip-Wegaufnehmer (Ansetzdehnungsaufnehmer)

Nach der Prüfkörperpräparation mittels horizontaler Bandsäge erfolgte die Bestimmung der Zugscherfestigkeit in Anlehnung an die Norm DIN EN ISO 1465 (Klebstoffe – Bestimmung der Zugscherfestigkeit von Überlappungsklebung). Die ermittelten Kennwerte sind in Abbildung 17 dargestellt und stehen als Referenz für den Vergleich mit den hybriden Verbindern zur Verfügung.



F_{max} in N	Zugscherfestigkeit in N/mm ²
29.600 ± 1.100	19,8 ± 0,7

Abbildung 17: Kraft-Weg-Diagramm der Klebreferenz

4.2.5 Vergleich der Fügevarianten unter Zugbeanspruchung

Die hergestellten Verbindungsvarianten wurden unter einheitlichen Prüfparametern auf deren mechanische Eigenschaften unter Zugbelastung untersucht.

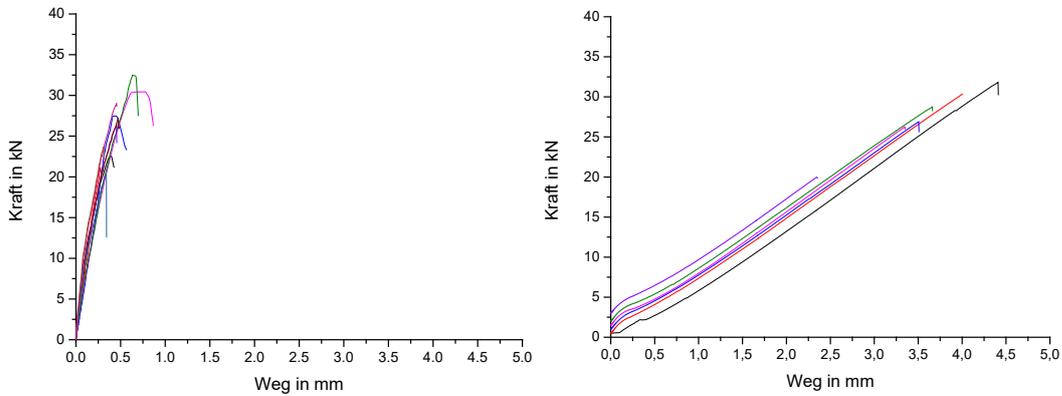


Abbildung 18: links: Kraft-Weg-Diagramm CMT PIN; rechts: Kraft-Weg-Diagramm Drahtgitter

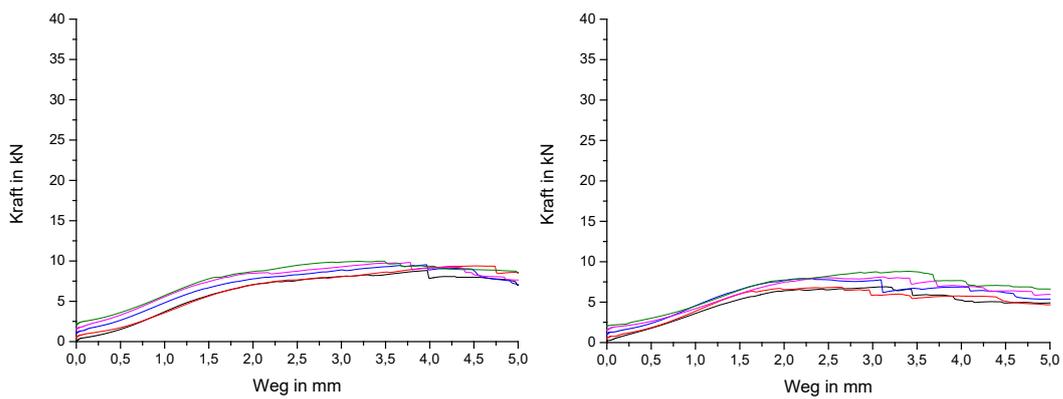


Abbildung 19: links: Kraft-Weg-Diagramm Niet 3; rechts: Kraft-Weg-Diagramm Niet 2

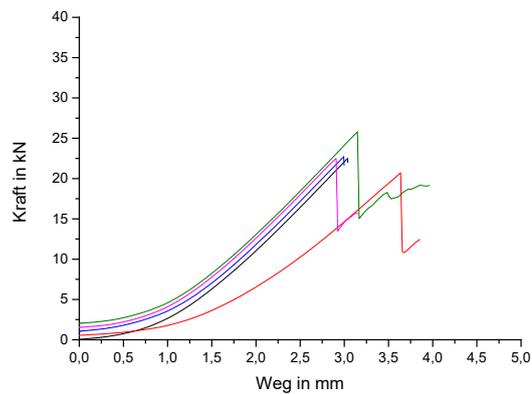


Abbildung 20: Kraft-Weg-Diagramm FAUSST

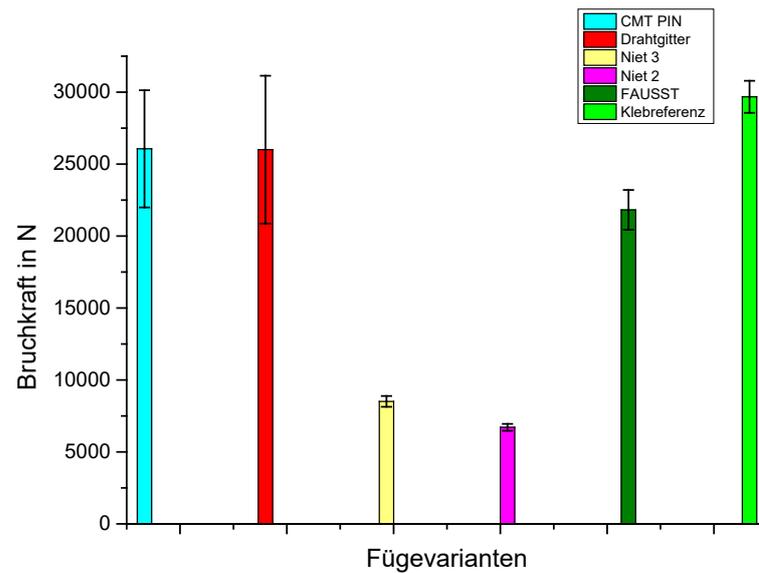


Abbildung 21: Bruchkraft der Fügevarianten im Vergleich zur Klebreferenz

Die Bruchkräfte der untersuchten Fügevarianten sind in Abbildung 21 der Klebreferenz gegenübergestellt.

Wie in Abbildung 21 zu erkennen ist, konnten die beiden genieteten Fügemethoden nicht das Niveau der restlichen Varianten erzielen. Dies hängt vor allem damit zusammen, dass die Bruchkraft maßgeblich durch die ertragbare Lochleibung der GFK-Platte bestimmt wird. Die Nietvariante mit drei Nieten auf der dünnsten Stufe erreichte dabei eine höhere Bruchkraft, da sich die wirkende Belastung über eine größere Fläche verteilen kann. Die Belastbarkeit könnte wahrscheinlich durch einen anderen Laminataufbau (bspw. Gewebeverstärkung) oder vorgeformter anstelle gebohrter Löcher erhöht werden. Der Vergleich der übrigen Varianten mit der Klebung (vgl. Abbildung 21) zeigt, dass die Klebreferenz zum Teil bereits erreicht oder gar übertroffen wird. Dies zeigt das Potential der hybriden Fügevarianten. Die hohe Standardabweichung bei CMT-Pin und Drahtgitter lässt sich vermutlich auf einen noch nicht dauerhaft stabilen/ optimalen Fertigungsprozess beim Schweißen zurückführen. Dem gegenüber zeigt das FAUSST-Textil zwar eine geringere Festigkeit, jedoch auch eine bedeutend geringere Streuung über die Prüfserie. Ergänzend zu den Varianten mit Stahlblech wurden Versuche mit Aluminium (EN AW 5754) durchgeführt, bei welchen im Verlauf des Versuchs eine Einschnürung und anschließendes Versagen im Grundwerkstoff auftrat (vgl. Abbildung 22). Die Ursache des Versagens im Grundmaterial liegt in einer Grobkornbildung / metallurgischen Kerbe im Schweißprozess. Eine thermische Nachbehandlung zur Verbesserung der Gefügeeigenschaften scheidet aufgrund der erforderlichen Temperaturen im laminierten Zustand aus, sollte jedoch zukünftig nach dem Schweißprozess geprüft werden.

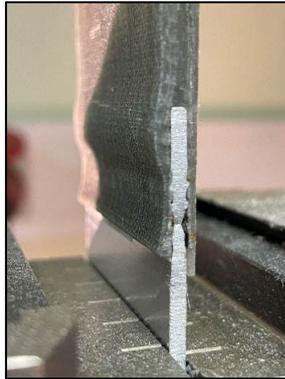


Abbildung 22: Zugprobe in der Kombination Aluminium und GFK im Zugversuch

4.2.6 Verarbeitungsverfahren RTM – Resin Transfer Moulding

Für die Verarbeitung der hybriden Verbinder wurde unter anderem das automatisierte RTM-Verfahren untersucht. Dafür wurde im Rahmen des Vorhabens eine RTM-Anlage der Firma Wolfangel sowie ein modulares Formgebungswerkzeug der Firma K+S GmbH beschafft (vgl. Abbildung 23). Beide Komponenten sind für einen maximalen Arbeitsdruck von bis zu 10 bar ausgelegt. Die Plattendicke kann in den Schritten 4, 6 und 8 mm eingestellt werden. Für eine möglichst realistische Abbildung der Herstellung im Sinne einer hohen Automation wurden zudem ein Automatik-Injektionsventil sowie eine automatische Auslasssteiger-Erkennung am Formgebungswerkzeug realisiert (vgl. Abbildung 24). In Analogie zu den Anforderungen bei der Vakuuminfusion bzgl. Oberflächenbeschaffenheit der Bleche und der Schnittpräzision von Fasermaterialien wurde identisch verfahren. Das heißt, es wurde die gleiche Oberflächenvorbehandlung sowie der präzise Zuschnitt durch den CNC-Fasercutter angewandt. Als duromere Matrix wurde das Harz Hexion RIMR 426 mit dem Härter Hexion RIMR 434 verwendet.

Dazu wurde das mit Trennmittel beaufschlagte Formgebungswerkzeug mit einer 3 mm dicken CrNi-Platte und insgesamt 8 Lagen UD-Glasgelege (640 g/m^2) belegt (vgl. Abbildung 23). Die Bereiche des CrNi-Blechtes, welche harzfrei bleiben sollten, wurden mit Airtech Flashbreaker Tape maskiert. Im Anschluss erfolgte das Verschließen des Werkzeugs und die Kontrolle der Dichtigkeit über ein angelegtes Vakuum. Dabei konnte ein absoluter Druckunterschied von 1 bar über einen Zeitraum von mind. 30 min nach Ausschalten der Vakuumpumpe aufrechterhalten werden.

Der Ablauf der anschließenden Injektion wurde in drei Teilschritten durchgeführt:

- initiale Injektion mit einem Druck von max. 2,0 bar (4 Doppelhübe á 80 ml)
- Hauptinjektion mit einem Druck von max. 4,0 bar (10 Doppelhübe á 80 ml)
- Nachdruck von 5,0 bar für eine Zeit von 15 min.

Während des aufgebracht Nachdrucks wurden nacheinander und abwechselnd die 4 Auslassventile geöffnet, um am Steiger verbliebene Luftblasen zu entfernen. Dieser Vorgang wurde wiederholt bis nur noch blasenfreies Harz erkennbar war. Danach wurde die Injektion bei einem wirkenden Druck von 5,0 bar beendet und verschlossen.

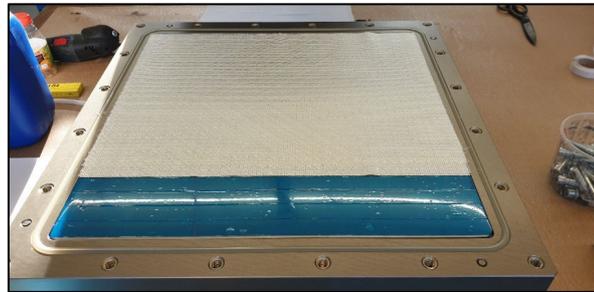


Abbildung 23: belegtes RTM-Werkzeug mit CrNi-Platte (blau maskiert) und Faserverstärkung

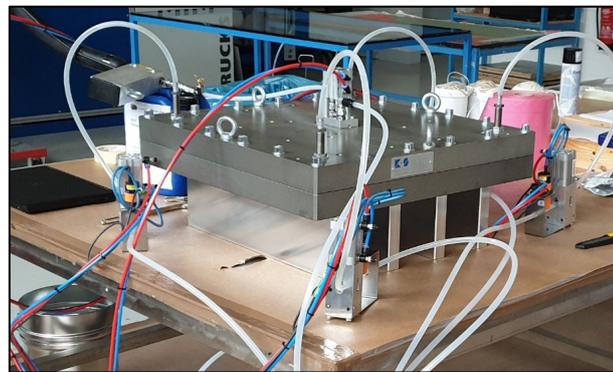


Abbildung 24: RTM-Plattenwerkzeug mit Injektionsventil, Versorgungsschläuchen und Auslasserkennung

4.2.7 Verarbeitungsverfahren Light-RTM

Neben der Herstellung durch RTM wurde untersucht, ob die weitverbreitete Light-RTM-Technologie ebenfalls eine Herstellung der hybriden Verbindung ermöglicht. Im Unterschied zur bisherigen RTM-Technologie wurde keine aktive Unterstützung der Harzinjektion durch Druckbeaufschlagung angewendet. Der zur Füllung der Kavität erforderliche Harzfluss wurde durch das Evakuieren der mit Fasern belegten Form (vgl. Abbildung 25) erzeugt (ca. 1 bar Druckdifferenz). In Anlehnung an die vorherigen RTM-Versuche wurde zunächst ein zentraler Anguss mit in den Ecken befindlichen Harzsteigern angewendet. Dabei zeigte sich ein erwartungsgemäß langsamer Prozessfortschritt. Beim direkten Vergleich der Prozesszeiten der beiden Technologien ist dies gut erkennbar. Im Schnitt wurde für die RTM eine Zeitspanne von ca. 10 Minuten für eine vollständige Tränkung und luftblasenfreies Harz an den Steigern benötigt. Die Versuche im Light-RTM-Verfahren benötigten dagegen durchschnittlich 50 Minuten. Bestimmend für die Geschwindigkeit im Prozess sind die Viskosität der Harzmatrix, die Art der Faserhalbzeuge sowie deren Packungsdichte. Dies kann bei hoch reaktiven Harz-Härter-Kombinationen zu Problemen mit der Topfzeit führen. Zu Beginn der Versuche zeigten sich

wiederholt trockene Bereiche im mittleren Randbereich (vgl. Abbildung 26 links). Die fehlerhaften Stellen lassen sich durch ungünstige Fließwege entlang der unidirektionalen Faserverstärkung erklären. Um eine Verbesserung der Formfüllung sowie vollständig getränkte Fasern zu erreichen, erfolgte aufbauend auf den Vorversuchen ein Harzzufluss über die in den Ecken befindlichen Steiger. Der zentrale Steiger in Plattenmitte diente daher dem Harzauslass. Es zeigte sich, dass mit Änderung der Injektion ein fehlerfreies Bauteil in kürzerer Zeit realisiert werden kann (vgl. Abbildung 26).

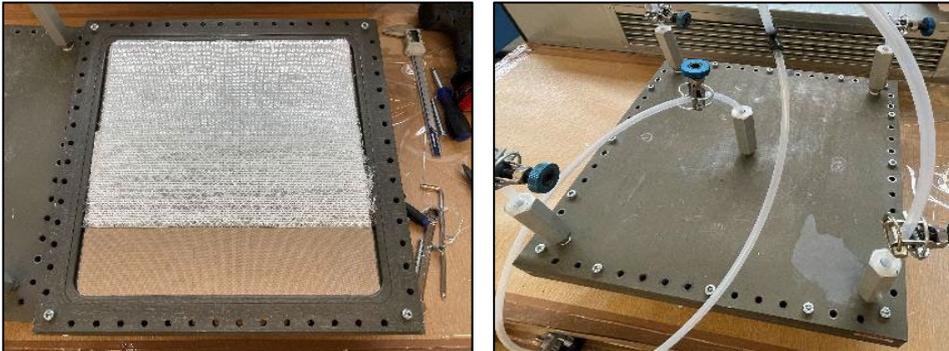


Abbildung 25: links: trockener Faserzuschnitt; rechts: geschlossenes Formgebungswerkzeug

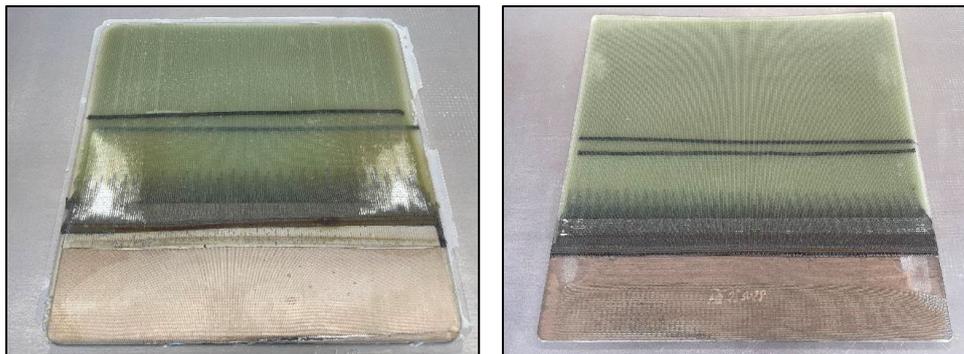


Abbildung 26: Light-RTM Bauteil mit zentralem Anguss (links) und zentralem Auslass (rechts)

4.2.8 Herstellung der hybriden Verbindung durch Nasspressen

Als weitere Herstellmethode wurde neben den Injektionsmethoden das Nasspressen untersucht. Der Ausgangspunkt des Verfahrens ist die Verwendung von geeigneter Maschinentechologie (Presse) sowie dazugehöriger Formgebungswerkzeuge (bspw. Tauchkantenwerkzeug). Analog zu den bisherigen Verfahren war die Vorgehensweise bezüglich der exakten Vorbereitung der Faserverstärkung identisch (vgl. Abbildung 27).

Nach Abschluss der vorbereiteten Schritte wurde die Faserverstärkung am Blech sowie untereinander mittels speziellem Sprühklebstoff fixiert, da ein Abgleiten der Faserverstärkung von der Blechkante verhindert werden muss. Zudem könnten sich durch den entstehenden hydraulischen Druck beim Schließen der Presse die einzelnen Lagen der Faserstärkung verschieben. Die blanken Bereiche außerhalb des Fügebereichs wurden durch ein

Teflonklebeband maskiert, um anhaftende Harzbereiche später entfernen zu können. Der so entstandene Körper wird fortführend „Preform“ genannt



Abbildung 27: Faserzuschnitte und Blechhalbzeug mit hybridem Gewirk

Der hergestellte Preform konnte anschließend in das Werkzeug eingelegt und die vorher vermischte und durch Vakuum entgaste Harz-/Härtermischung zugegeben werden (vgl. Abbildung 28). Das Tauchkantenwerkzeug wurde im Anschluss geschlossen, wobei überschüssiges Harz sowie Luftblasen am Tauchspalt ausgetreten sind. Als Presskraft wurden 50 kN aufgebracht, welches einem Druck von ca. 1,8 N/mm² entspricht. Zusätzlich wurde das Werkzeug für eine beschleunigte Aushärtung auf 60 °C beheizt.



Abbildung 28: links: Einlegen des Preforms; rechts: Zugabe der Harzmischung

Nach der anschließenden Wärmenachbehandlung im Presswerkzeug konnte das Bauteil direkt fehlerfrei entformt werden (vgl. Abbildung 29). Es zeigte sich, dass die Kombination aus niedrigviskoser Harzmischung und der gewählten Presskraft optimal aufeinander abgestimmt war. Weiterhin konnte nachgewiesen werden, dass die Verarbeitung der hybriden Verbindung durch das Nasspressverfahren problemlos möglich ist. In weiteren Versuchen konnte der Einsatz von Sprühklebstoff auf ein Minimum reduziert werden, ohne dass eine Verschiebung von Faserlagen festgestellt wurde.

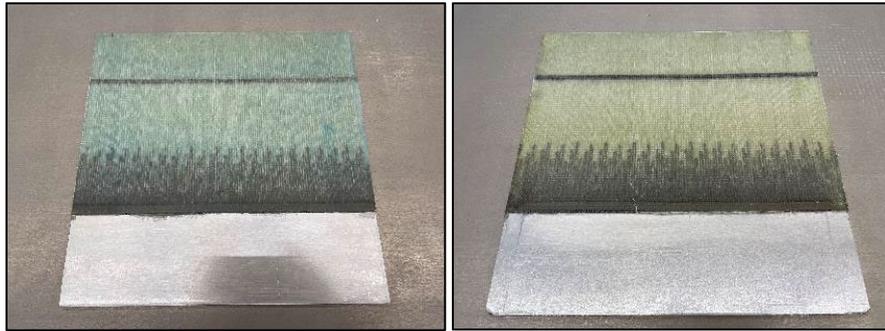


Abbildung 29: Pressbauteile; links: Blaufärbung durch Sprühklebstoff; rechts: reduzierter Einsatz von Sprühklebstoff

4.2.9 Biegeversuche in 3-Punkt sowie 4-Punkt Belastung

Neben den Zugversuchen wurde die Beanspruchung der Hybridverbindungen durch Biegung untersucht. Es wurden Versuche unter 3-Punkt als auch 4-Punkt-Biegung in Anlehnung an die DIN EN ISO 14125 durchgeführt (vgl. Abbildung 30). Die Konfiguration der hybriden Verbindung bestand aus einem 1 mm Stahlblech (verzinkt) mit einer gefrästen Stufe und darauf befindlicher Schweißnaht. Zusätzlich zur Verbindungsstelle wurde das Grundlaminat in beiden Biegeverfahren charakterisiert (vgl. Tabelle 8).

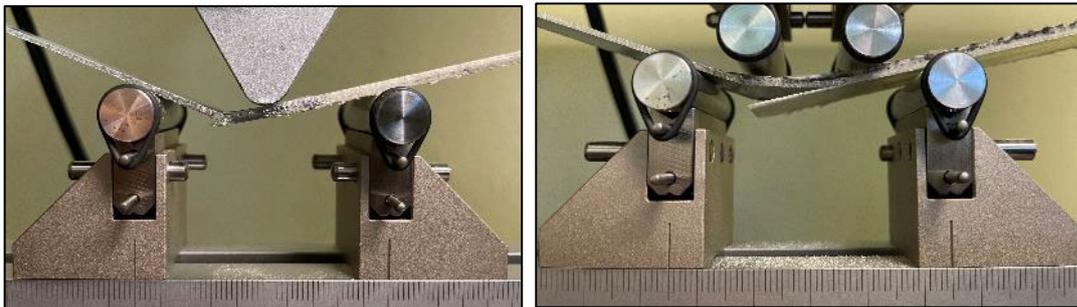


Abbildung 30: links: 3-Punkt-Biegung; rechts: 4-Punkt-Biegung

Tabelle 8: Ermittelte Kennwerte aus den Biegeversuchen

Biegeprüfung im 3-Punkt und 4-Punkt-Verfahren		
Grundlaminat	3-Punkt	4-Punkt
E-Modul in N/mm ²	32.750 ± 1.618	32.441 ± 2.522
Biegefestigkeit σ_{\max} in N/mm ²	760 ± 44	805 ± 80
Verbindungsstelle		
Schweißnaht im Druckbereich		
E-Modul in N/mm ²	23.521 ± 1.303	32.868 ± 2.539
Biegefestigkeit σ_{\max} in N/mm ²	233 ± 39	360 ± 23
Schweißnaht im Zugbereich		
E-Modul in N/mm ²	18.530 ± 3.508	34.127 ± 2.914
Biegefestigkeit σ_{\max} in N/mm ²	78 ± 13	120 ± 17

Die Biegeversuche haben gezeigt, dass bei der Anwendung von 3-Punkt-Biegung an der Verbindungsstelle ein außermittiges Versagen (Knicken des reinen Stahlblechs) auftritt (vgl. Abbildung 30, links). Die damit ungleichmäßige Belastung führt zu erheblich niedrigeren Biegezugfestigkeiten im direkten Vergleich zur 4-Punkt-Biegung, da der Faserverbundanteil nicht zur Stabilität beitragen kann. Ein weiteres Phänomen konnte beobachtet werden, indem abwechselnd die Schweißnaht im Druck- bzw. Zugbereich positioniert wurde. Sobald die Schweißnaht im Druckbereich positioniert wurde (nach oben zeigend), trat wie aus dem Zugversuch bekannt eine Delamination der äußersten Faserverbunddecklage (Adhäsionszone zum Stahlblech) im Zugbereich auf und es ließen sich moderate Festigkeitswerte erreichen. Damit lässt sich für diese hybride Konfiguration erkennen, dass die gewählte Positionierung der Schweißnaht im Hinblick auf angreifende Lasten/ Momente große Relevanz für den Praxiseinsatz besitzt. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass für die Ermittlung der Biegeeigenschaften an den untersuchten Proben der 4-Punkt-Biegeversuch besser geeignet ist.

4.2.10 Dehnungsunterschiede an ausgewählten Prüfkörpern

Zur Untersuchung der Dehnungen an verschiedenen Positionen entlang des Prüfkörpers wurden ebene Platten durch Vacuum Assisted Resin Infusion (VARI) sowie RTM-Technologie hergestellt. Sowohl das Faserlayup (6 Lagen unidirektionales Glaslege 640 g/m², 2 Lagen des FAUSST 3 Textils) als auch Matrix (Epicote RIMR 426 mit Härter RIMH 433) und Härtingsbedingungen waren identisch. Die Dehnungen wurden in quasistatischen Zugversuchen ermittelt. Die Traversengeschwindigkeit betrug 2 mm/min bis zum definierten Kraftmaximum von 15 kN. Nach Erreichen des vordefinierten $F_{max} = 15$ kN wurde die Probe wieder entlastet und die Dehnungsmessung durch Versetzen des Dehnungsaufnehmers an anderer Stelle erneut durchgeführt. Wie erwartet, entstehen durch den Materialmix (Metall/ Kunststoff und unterschiedliche Faser volumina über den Querschnitt) große Dehnungsunterschiede im Prüfkörper (vgl. Abbildung 31 und Abbildung 32). Dabei konnten typische Werte (Dehnung und E-Modul) im reinen Stahl- und GFK-Bereich bestätigt werden. Im Bereich der hybriden Verbindung wurden erhöhte Dehnungen gemessen, wenn die Messschneiden nur Kontakt mit dem GFK haben. Dies liegt vermutlich am erhöhten Harzgehalt und vorhandenen Ondulationen des hybriden Textils. Berührte dagegen eine Messschneide den metallischen Bereich, entstand eine Superposition der Dehnung am Ort der Verbindung Metall/Kunststoff. Im Verlauf der Optimierungen durch bspw. Oberflächenvorbehandlungen und verbesserter Faserarchitektur und damit erhöhter Festigkeiten konnte außerdem eine Einschnürung des sich verjüngenden Stufendesigns des metallischen Teils beobachtet werden (vgl. Abbildung 33). Diese deutlich erkennbare, plastische Verformung erzeugt im ursprünglichen einachsigen Zugversuch einen mehrachsigen Spannungszustand (Normal- und Schubspannungen) im schwächsten Punkt der Verbindung. Weiterhin zeigen die Ergebnisse damit auf, dass die unterschiedlichen Dehnungen in folgenden Arbeitsschritten im Fokus stehen sollten. Eine

Möglichkeit soll dabei die Verwendung einer zäh-modifizierten Harzmatrix bieten, um bei Dehnungen eine Entkopplung zwischen Laminat und Metall zu verzögern.

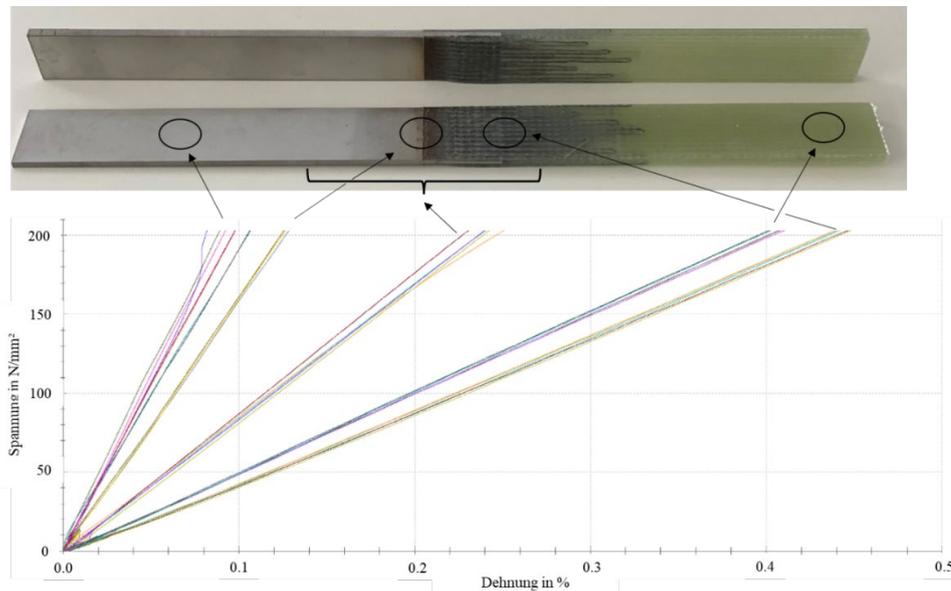


Abbildung 31: Erkennbare Unterschiede im mechanischen Verhalten in Abhängigkeit von der Messposition an Hybridproben

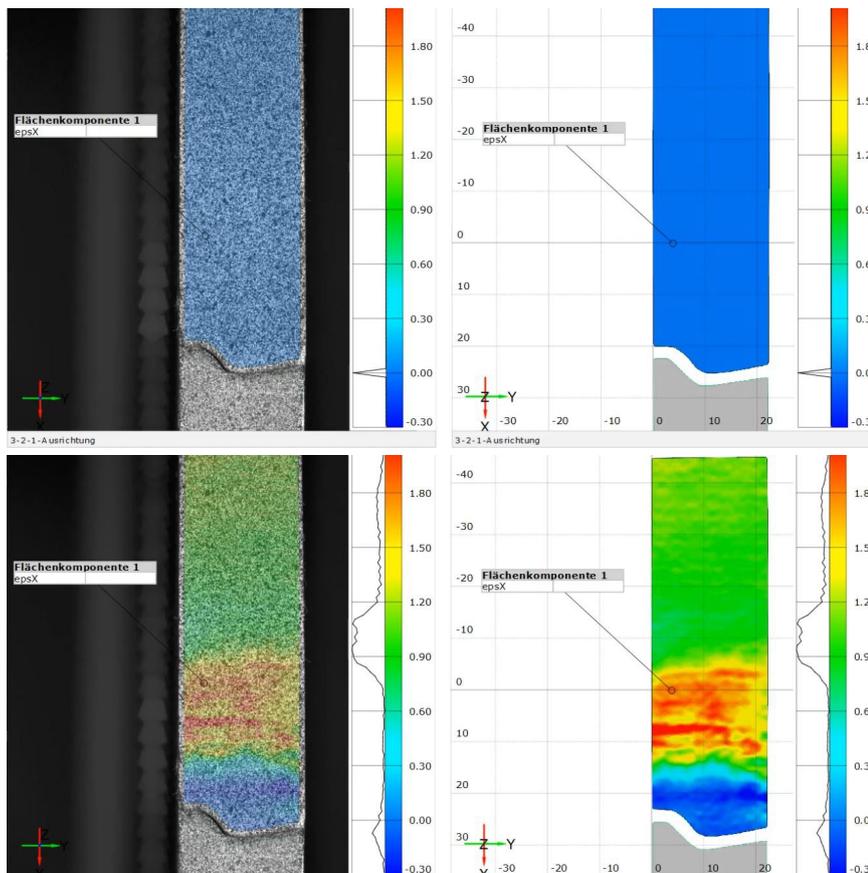


Abbildung 32: Zugversuch (oben: Versuchsbeginn, unten: Erreichen von F_{max}) mit berührungsloser Verformungsmessung durch digitale Bildkorrelation (DIC); erkennbare inhomogene Bereiche über die Prüfkörperlänge

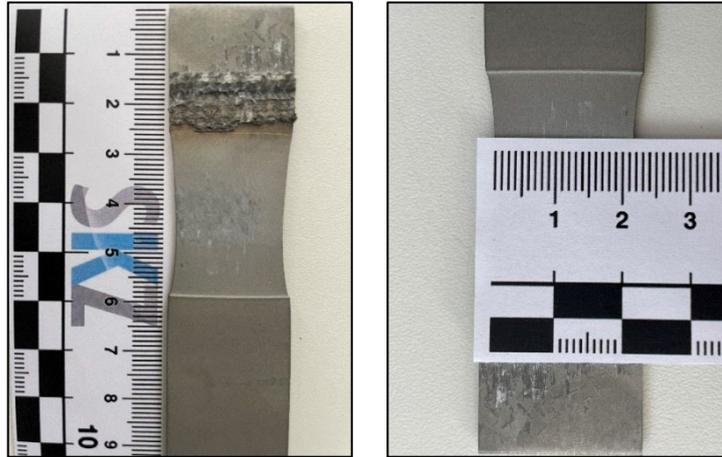


Abbildung 33: Eingeschnürte metallische Verbinderkomponente (Stufenbereich ursprünglich L x B = 50 mm x 25 mm) nach Zugversuch mit ausgeprägter Längsdehnung und Querkontraktion

4.2.11 Alterung einer Serie durch Salzsprühnebel-Test

Exemplarisch wurden FAUSST-Verbindungen (F3 2S 5025: FAUSST 3, 2 Schweißnähte, Schweißversatz 50 und 25 mm) auf ihre mechanischen Eigenschaften vor und nach einer Alterung durch Salzsprühnebel untersucht. Die Alterung erfolgte durch kontinuierliche Benebelung (120 Stunden) mit einer Mischung aus Wasser und Natriumchlorid (NaCl). Die Temperatur des Mediums betrug 36 °C. Bereits bei der Betrachtung der Oberflächen war die korrosive Wirkung des Mediums deutlich zu erkennen (vgl. Abbildung 34). Da die CrNi-Halbzeuge zu den korrosions- und säurebeständigen Materialien zählen, stellte sich die Frage nach den Ursachen der Verfärbungen. Es wird vermutet, dass im vorgelagerten Strahlprozess durch verunreinigtes Strahlgut nicht-korrosionsbeständige Metallpartikel in die Oberfläche eingebracht wurden. Dazu passt die Verminderung der Zugfestigkeit (vgl. Tabelle 9). Die kritischen Stellen der Adhäsionszone auf den Blechen waren die Schnittkanten und das Laminatende. Dort sind verstärkt Verfärbungen zu erkennen. Die „offenen“ Laminatbereiche ermöglichten es dem Medium, die Haftungsgebiete zwischen Blech und GFK anzugreifen. Für zukünftige Anwendungen stellt sich damit deutlich heraus, dass eine Versiegelung von Schnittkanten insbesondere bei Medieneinfluss Priorität hat.

Tabelle 9: ermittelte Zugfestigkeit vor und nach der Salzsprühnebelalterung

Salzsprühnebeltest (120 h, 36 °C, NaCl + H₂O)		
Anzahl Proben	je 6 Prüfkörper	
Zustand der Proben	nicht gealtert	gealtert
Zugfestigkeit σ_{\max} in N/mm ²	257	215
Standardabweichung in N/mm ²	19,3	30,8

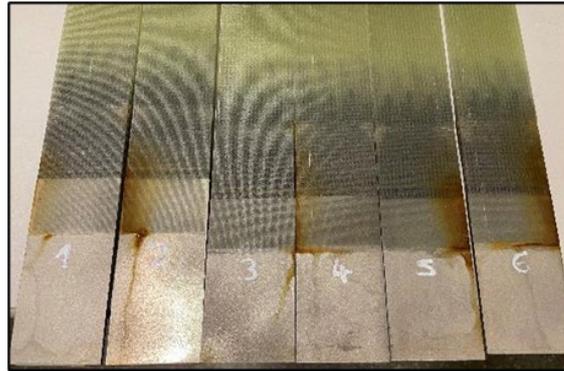


Abbildung 34: Gealterte Prüfkörper nach Salzsprühnebeltest

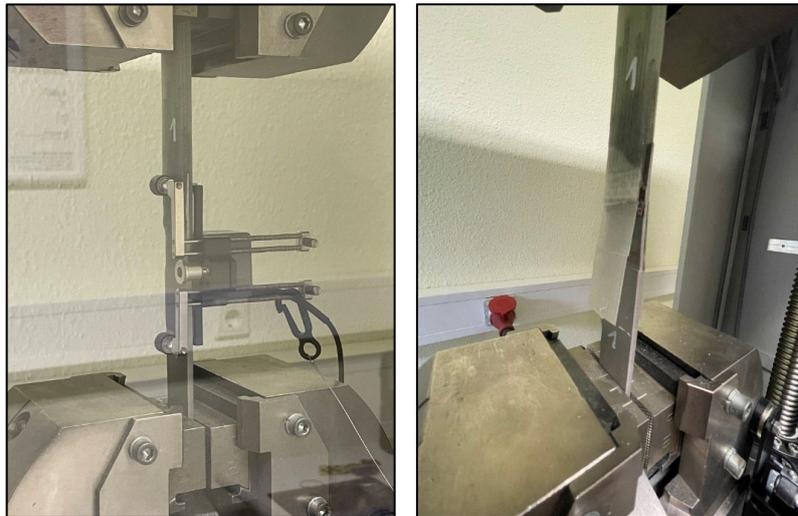


Abbildung 35: links: Zugprüfung an einer hybriden Variante; rechts: adhäsives Versagen im Übergangsbereich Laminat zu Stahl

4.2.12 Betriebsfestigkeit

Zur Ermittlung des Ermüdungseinflusses der Hybridverbindungen wurde an exemplarischen Fügevarianten der Festigkeitsverlust über die Lastspielzahl bei gegebener Belastung ermittelt. Im Vorlauf der zyklischen Prüfung erfolgte an der identischen Fügekonfiguration (31190V25) eine quasistatische Zugprüfung (Ringversuch bei SKZ sowie SLV). Anhand der gemittelten Zugfestigkeit von 12 Prüfkörpern wurden die prozentualen Lasten für die zyklische Prüfung festgelegt. Die Berechnung sowie die Abstufung der Lastober- und Untergrenzen sind in Tabelle 10 und Tabelle 11 dargestellt.

Die Parameter der Prüfung sind wie folgt:

- Vorkraft 1 kN
- Versagenkriterium: Überschreiten einer Dehnung von 0,25 %
- Prüffrequenz 1 Hz bei schwellender Zugbelastung
- Anzahl der zu erreichenden Zyklen: 100.000

Tabelle 10: Berechnungsgrundlage der Laststufen der zyklischen Versuche

Basis: Zugversuche SLV + SKZ auf 25x250 mm² Proben, FAUSST III zweiseitig		
Anzahl der Proben:	12	
	F_{max} in kN:	Zugfestigkeit in MPa
Mittelwert	21,9	293 ± 16
Standard Abw.	1,8	
Normalverteilt	Ja	
Unterstes Quartil	20,7	276
Median	21,8	291

Tabelle 11: Übersicht über die Kraftober- und Untergrenzen sowie die erreichte Lastspielzahl der ausgewählten Abstufungen im zyklischen Zugversuch

Last in %	Kraft in N	Obergrenze	Kraft in N	Untergrenze	ΔF in N	Anzahl der Zyklen
80		15.802		1.102	14.700	34
75		15.067		1.837	13.230	51
70		13.965		2.940	11.025	7.254
60		11.943		4.961	6.982	31.537
55		11.025		5.880	5.145	100.000

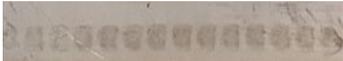
Es zeigte sich, dass im Falle der zweiseitigen FAUSST III- Verbindung bei einer aufgebracht Last von 55 % eine Lastspielzahl von mindestens 100.000 Zyklen erreicht werden kann (vgl. Tabelle 11). Die maximale Längsdehnung betrug 0,16 % bei 100.000 Zyklen.

4.3 Zerstörungsfreie Prüfung

4.3.1 Herstellung der fehlerbehafteten Bauteile für die ZfP

Die Herstellung der Verbinder sowie die Weiterverarbeitung zu Laminaten sollte im Projekt Hy-FiVE mit zerstörungsfreien Prüfmethode überwacht werden. Als übergeordnetes Ziel sollten geeignete Messverfahren identifiziert, erprobt und bei Bedarf angepasst werden. Dazu wurden Probebauteile mit künstlich erzeugten Defekten hergestellt. Die Defekte lassen sich untergliedern in Fehler der Schweißnaht und der Faserverstärkung (vgl. Tabelle 12). An den fehlerbehafteten Bauteilen wurden die Methoden Luftultraschall und Thermografie getestet. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die Luftultraschalltechnik erwartungsgemäß gut geeignet ist, Fehler oder Schäden im Laminatbereich zu erkennen (vgl. Abbildung 36). Mit der Puls-Thermografie konnten Schweißunterbrechungen sowie Veränderungen der Fügeverbindungen durch gepulstes Schweißen und Änderungen der Stromstärke hervorragend dargestellt werden (vgl. Abbildung 39).

Tabelle 12: Übersicht der künstlich erzeugten Defekte

Bezeichnung Fehler	Bemerkung	Abbildung
i.O. Bereich Schweißnaht	Referenz als Vergleich	
t_p 500	500 µs Pausenzeit während des Schweißens	
t_p 250	250 µs Pausenzeit während des Schweißens	
4,75 kA	verringerte Stromstärke	
3,75 kA	Verringerte Stromstärke	
Fremdkörper	Kupfer-Fremdkörper in Schweißnaht	
i.O. Bereich Fasern	Referenz als Vergleich	
15 ° Drehung	15 ° Drehung UD-Gelege	
Faserausschnitt	fehlende Faserverstärkung im Stufenbereich	
Trennmittel	Trennmittel auf Fasern aufgebracht	
Luft einschüsse	eingebrachte Luft durch Aerosil/Harzmischung	
UD-Fehler	einzelne UD-Rovings entnommen	

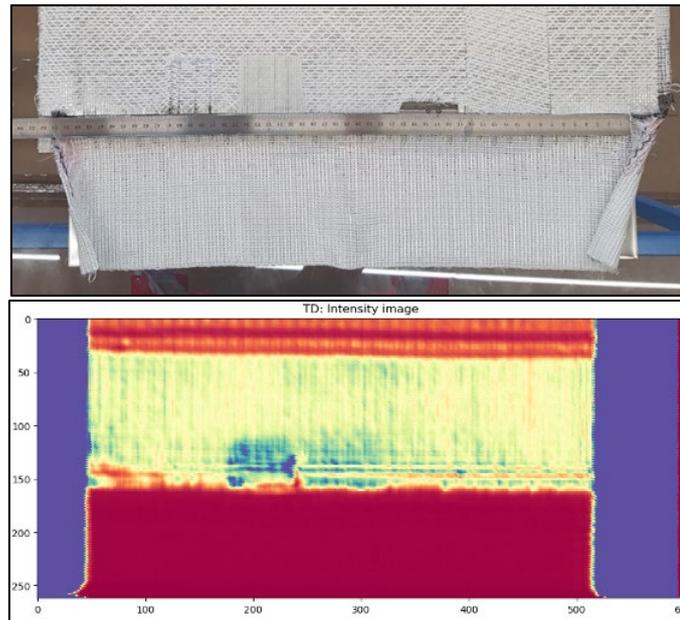


Abbildung 36: Darstellung von Faserfehlern mittels Luftultraschall (210 kHz, 400 V)

4.3.2 Thermografie

Im Zuge des Forschungsprojekts wurden zwei etablierte Methoden der aktiven Thermografie auf ihre Eignung für die Detektion typischer Fehler untersucht. Bei der Puls-Thermografie wird das Bauteil über ein oder mehrere kurze Lichtpulse erwärmt und i. d. R. das Abkühlverhalten betrachtet, während die Anregung bei der Lock-in-Thermografie über eine sinusförmige Intensitätsmodulation über einen längeren Zeitraum stattfindet und zeitgleich das Erwärmungsverhalten mit der Infrarotkamera gemessen wird. Für die pulsformige Anregung wurde die Blitzlampe VH3-6000 der Firma Hensel-Visit GmbH und Co. KG und für die sinusförmige Anregung Halogenstrahler YLS108 der Firma Tele-Sound GmbH verwendet, während die Aufnahmen mit der Infrarotkamera VarioCam hr der Firma Infratec GmbH erstellt wurden. In Abbildung 37 sind die Messaufbauten beider Thermografie-Methoden exemplarisch dargestellt.

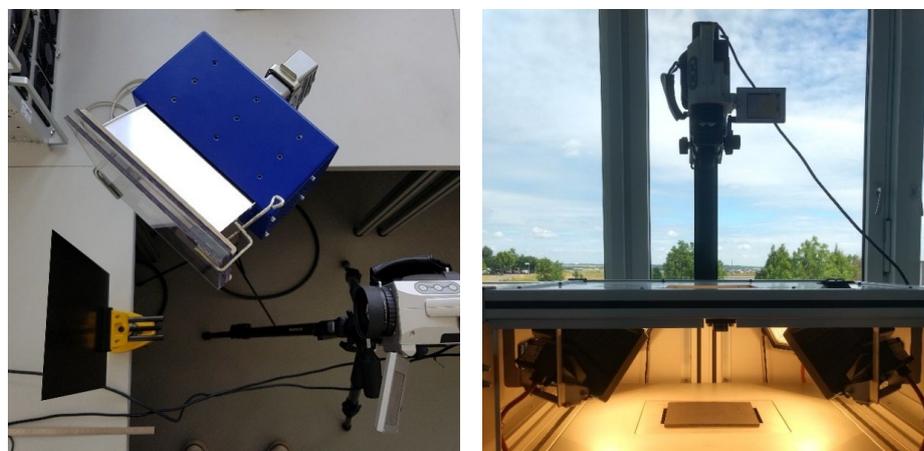


Abbildung 37: Exemplarische Darstellung des Messaufbaus für Puls-Thermografie bestehend aus Probe, Anregungsquelle und Thermografiekamera (links) und Lock-in-Thermografie (rechts).

Zunächst wurde die Puls-Thermografie zur Analyse der Prüfkörper mit Schweißfehlern eingesetzt. Abbildung 38 zeigt die Fotos zweier Proben mit den jeweiligen Bereichen, die während der Messungen betrachtet wurden. Die resultierenden Ergebnisbilder der Probe mit Schweißfehler sind in Abbildung 39 dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass die metallischen Strukturen deutlich mittels Puls-Thermografie visualisiert werden können. Auffällige Strukturen sind durch hellere Bereiche und eine lokal inhomogenere Temperaturverteilung erkennbar. Dies ist in den Thermogrammen insbesondere in der Region direkt oberhalb des Metallbauteils zu erkennen. In den Thermogrammen der Probe mit Faserfehlern sind die metallischen Strukturen ebenfalls deutlich erkennbar (vgl. Abbildung 40). Darüber hinaus ist im zweiten Thermogramm (blaue Umrandung) der künstlich eingebrachte Fehler erkennbar.

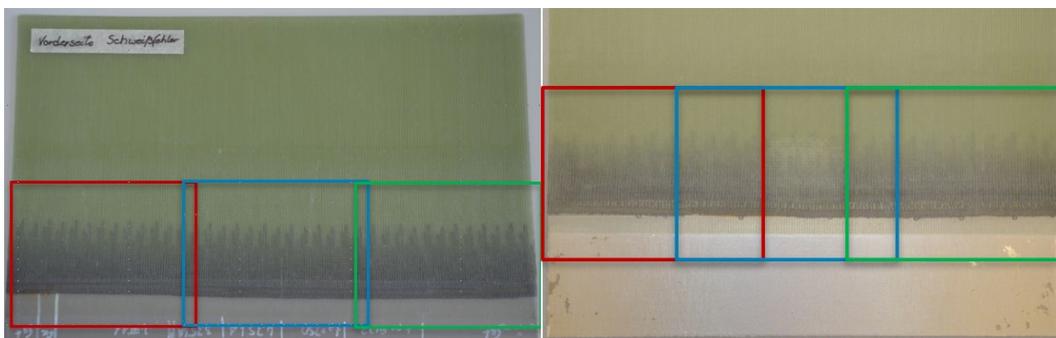


Abbildung 38: Fotos des Prüfkörpers mit Schweißfehler (links) und Faserfehler (rechts). Die farbigen Rechtecke zeigen die mittels Puls-Thermografie untersuchten Bereiche.

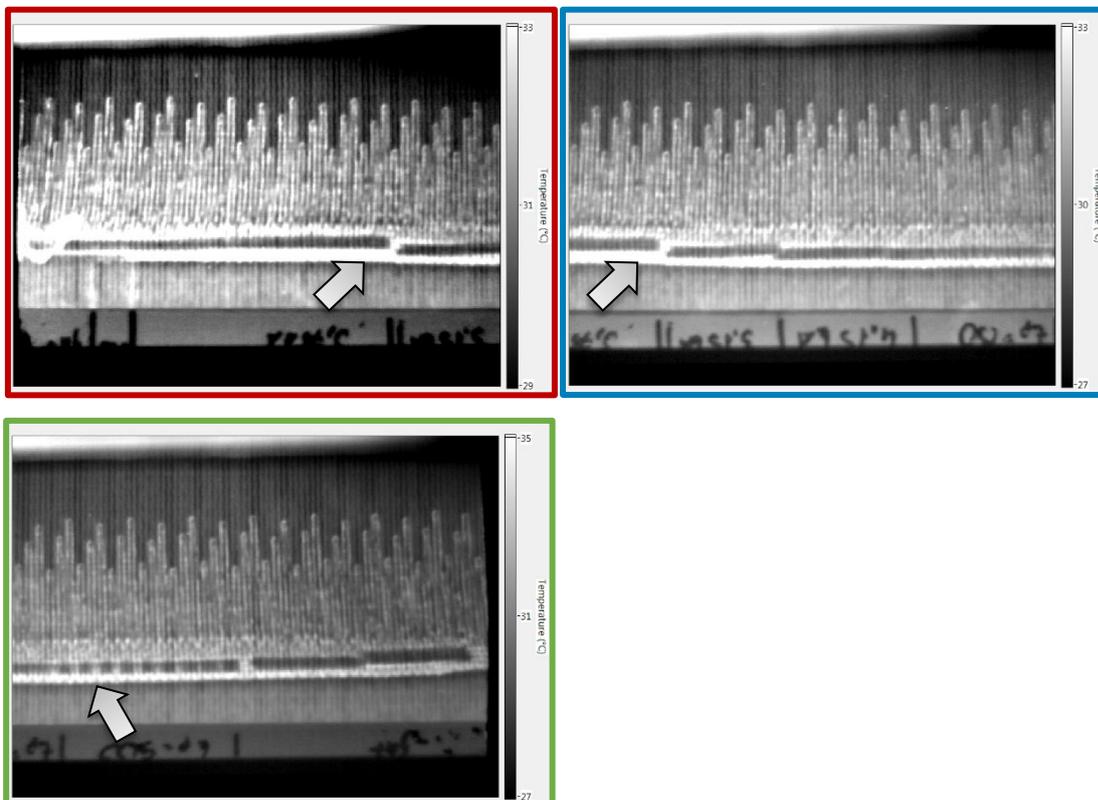


Abbildung 39: Thermogramme unterschiedlicher Bereiche der Probe mit Schweißfehlern (Pfeilmarkierung). Die farbige Umrandung entspricht dabei den jeweiligen Bereichen in Abbildung 38 (links).

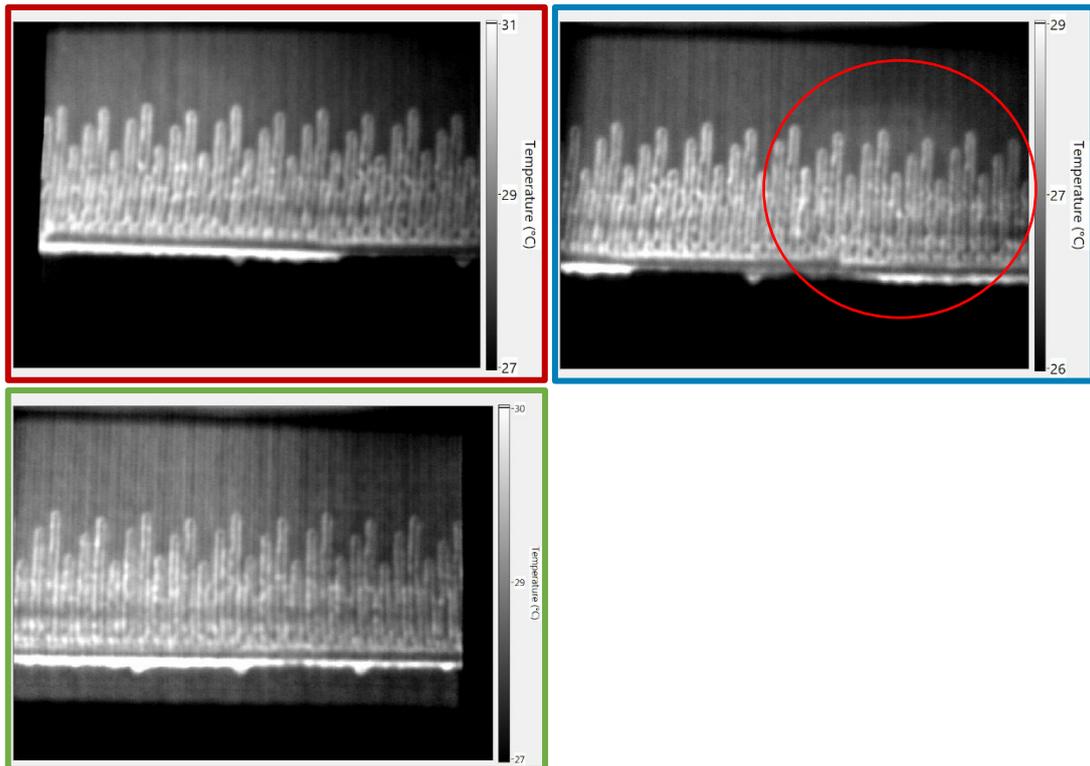


Abbildung 40: Thermogramme unterschiedlicher Bereiche der Probe mit Faserfehlern. Die farbige Umrandung entspricht dabei den jeweiligen Bereichen in Abbildung 38 (rechts). Der rote Kreis markiert hierbei die eingebrachte Fehlstelle.

In Abbildung 41 sind die Bereiche, die mittels Lock-in-Thermografie untersucht wurden, an der Probe mit Faserfehlern farblich markiert. Es hat sich herausgestellt, dass bei der Auswertung der Lock-in-Aufnahmen die in Abbildung 42 dargestellt Phasenbilder die inneren Strukturen und Inhomogenitäten am deutlichsten zeigen können. In den Phasenbildern sind ebenfalls die metallischen Strukturen im Verbindungsbereich erkennbar. Dabei fällt auf, dass oberflächennahe Strukturen mit einer großen Amplitude und dementsprechend heller im Phasenbild ersichtlich sind, während tieferliegende Strukturen mit einer geringeren Amplitude dargestellt werden und nur noch leicht vom umgebenden Material unterscheidbar sind. Darüber hinaus ist in beiden Phasenbildern die eingebrachte Fehlstelle erkennbar (vgl. Abbildung 42, rote kreisförmige Markierung).

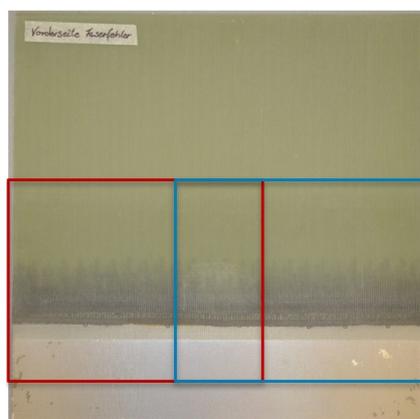


Abbildung 41: Foto des Prüfkörpers mit Faserfehlern, in dem die mittels Lock-in-Thermografie untersuchten Bereiche farblich markiert sind.

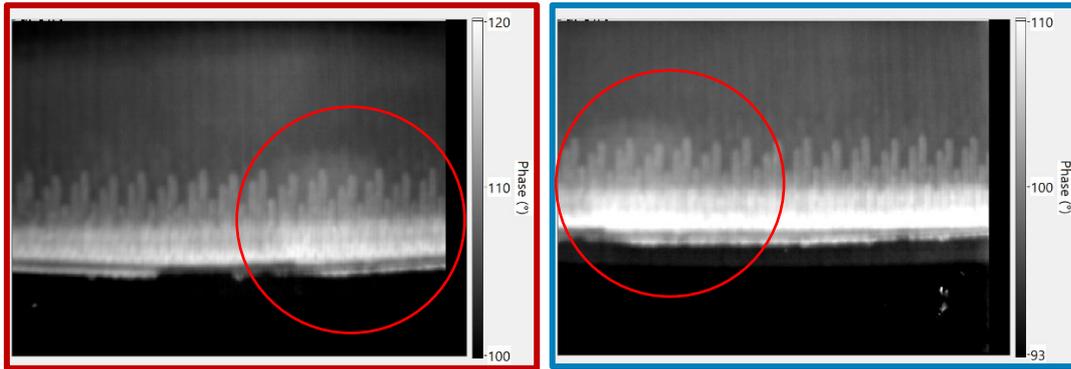


Abbildung 42: Phasenbilder der beiden Bereiche der Probe mit Faserfehlern. Die farbige Umrandung entspricht dabei den jeweiligen Bereichen in Abbildung 41. Die roten Kreise zeigen jeweils die eingebrachte Fehlstelle auf.

Es konnte gezeigt werden, dass sich sowohl die Puls- als auch die Lock-in-Thermografie geeignet sind, um den Fügebereich zu überprüfen und vorhandene Fehler zu detektieren. Während mit der Puls-Thermografie eine kürzere Messzeit realisiert werden konnte, war es mit der Lock-in-Thermografie möglich, die untersuchten Strukturen und Defekte mit einem höheren Signal-Rausch-Verhältnis sichtbar zu machen. Bei den exemplarisch aufgeführten Ergebnissen konnte gezeigt werden, dass oberflächennahe Strukturen in den Thermogrammen der Puls-Thermografie sehr deutlich erkennbar sind, während tiefer liegende Strukturen ausschließlich in den Phasenbildern der Lock-in-Thermografie sichtbar werden. Da sich je nach Bauteil oder Fehlermerkmal die Thermogramme selbst oder Amplituden- und Phasenbilder besser für die Detektion geeignet haben, wird empfohlen, bei der Anwendung jedes dieser Ergebnisbilder zu betrachten.

4.3.3 Luftultraschall-Messungen

Das verwendete Setup für Luftultraschall-Messungen ist in Abbildung 43 dargestellt. Zwei Achsen verfahren Empfänger und Sender mäanderförmig über die Probe hinweg, wobei an jedem Rasterpunkt ein einzelnes LUS-Signal (A-Bild) aufgenommen wird. Anschließend wird für jedes einzelne A-Bild entweder der Wert des Signalmaximums oder die zeitliche Position des Signalmaximums berechnet, je nachdem, was bessere Ergebnisse zeigt. Diese Werte werden pixelweise in der Anordnung der mäanderförmigen Abtastung angeordnet und farblich codiert, um das sogenannte C-Bild zu erhalten.

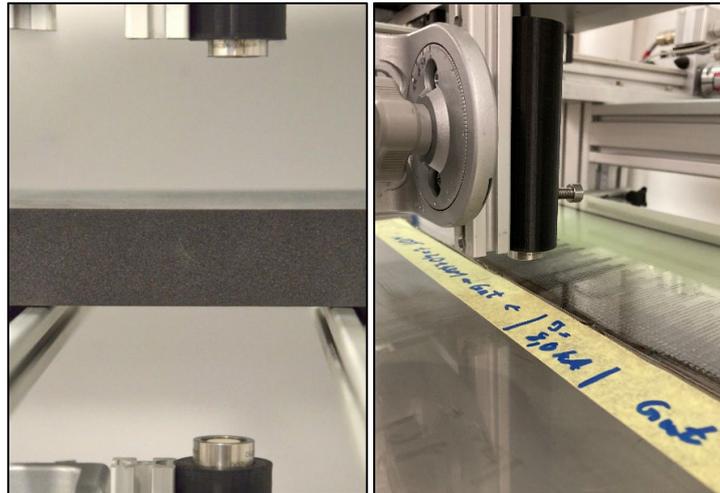


Abbildung 43: links: Messprinzip der Transmissionsmessung. Empfänger und Sender zeigen zueinander, die zu untersuchende Probe liegt dazwischen. rechts: Messaufbau mit der gemessenen Probe.

Messungen an Proben vor dem Laminieren zeigen deutliche Unterschiede im LUS-Signal an den Stellen der Schweißnähte, die mit unterschiedlichen Stromstärken geschweißt wurden (vgl. Abbildung 44). Eine Korrelation zwischen der Stromstärke und der maximalen Signalamplitude des LUS-Signals scheint gegeben zu sein, wobei eine höhere verwendete Stromstärke zu einem stärkeren Signal führt. Bindefehler, wie in der rechten Probe in Abbildung 44 zu sehen, heben sich deutlich ab.

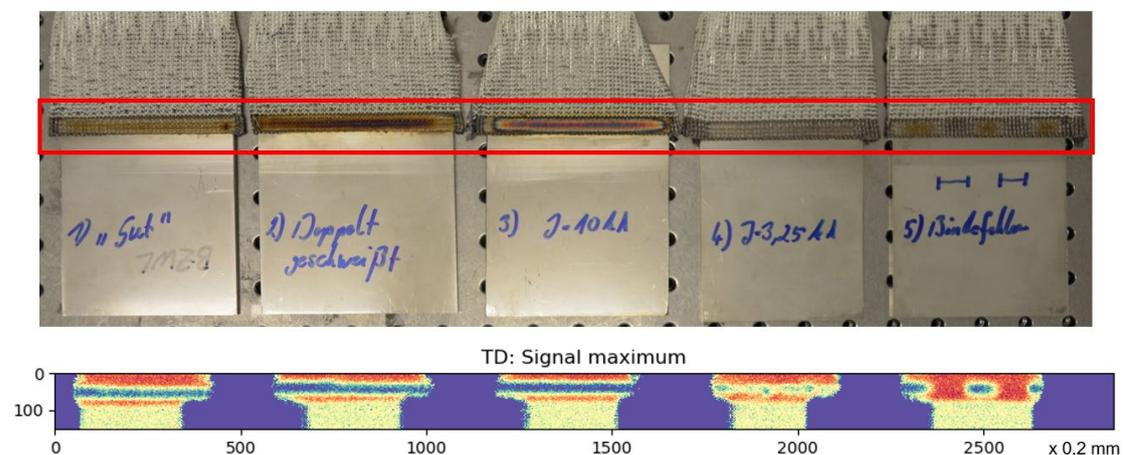


Abbildung 44: Luftultraschall-Messungen der Schweißnähte vor der Laminierung. Gemessen wurde in Transmission. Oben: Proben mit eingezeichnetem Messbereich (roter Rahmen). Unten: C-Bild der Messung, wobei die maximale Amplitude aus dem A-Bild dem einzelnen Pixel zugeordnet ist

Die Messung an einer Probe mit mehreren, direkt hintereinander wechselnden Schweißnähten zeigt ebenfalls Unterschiede im LUS-Signal bei unterschiedlichen verwendeten Stromstärken in der Schweißnaht (vgl. Abbildung 45). Hervorzuheben ist besonders der ungeschweißte Bereich „I=0 kA“ und dessen ausgeprägte Rotfärbung im Signalbild.

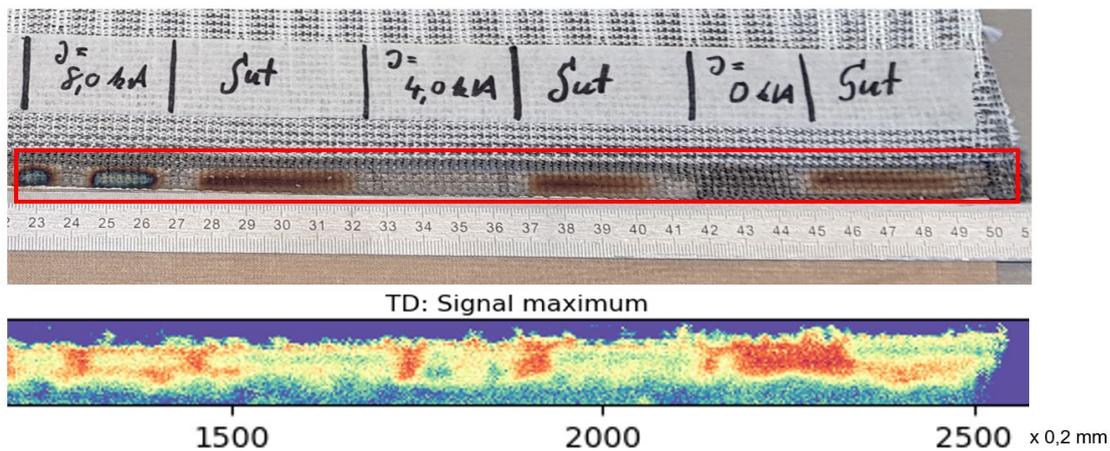


Abbildung 45: Luftultraschall-Messungen der Schweißnähte (direkt hintereinander) vor der Laminierung. Gemessen wurde in Transmission. Oben: Proben mit eingezeichnetem Messbereich (roter Rahmen). Unten: C-Bild der Messung, wobei die maximale Amplitude aus dem A-Bild dem einzelnen Pixel zugeordnet ist.

Die Messung der gleichen Proben wie in Abbildung 44 nach der Laminierung ist in Abbildung 46 dargestellt. Dies liegt an den veränderten Beugungs- und Brechungseigenschaften bezüglich des LUS-Signals an den Rändern der Probe. Noch deutlicher als in der Messung der unlaminieren Proben ist der Übergang jeweils ober- und unterhalb der Schweißnaht zu erkennen. Die Schweißnähte, die mit unterschiedlich hohen Stromstärken erzeugt wurden, sind wie zuvor unterscheidbar. Die Bindefehler sind allerdings nur noch sehr schlecht abgegrenzt, wobei die nicht abgebildeten 2,5 cm großen Bereiche am Rand der Probe die Lokalisation ebenfalls erschweren.

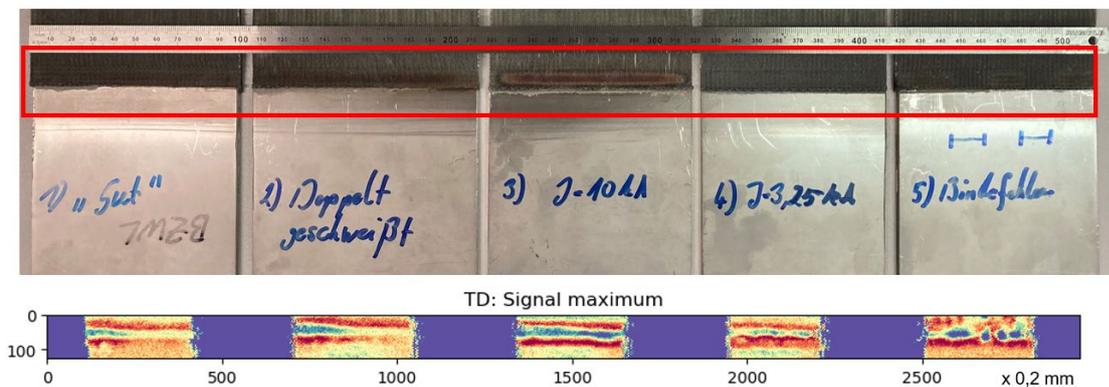


Abbildung 46: Luftultraschall-Messungen der Schweißnähte nach der Laminierung. Gemessen wurde in Transmission. Oben: Proben mit eingezeichnetem Messbereich (roter Rahmen). Unten: C-Bild der Messung, wobei die maximale Amplitude aus dem A-Bild dem einzelnen Pixel zugeordnet ist.

Abbildung 47 zeigt die Messung einer laminierten Platte mit unterschiedlichen Faserfehlern. Mittels LUS darstellbar ist insbesondere der mit Trennwachs manipulierte Bereich sowie der Lufteinschluss. Schwach erkennbar sind die Übergänge zwischen den normal orientierten Fasern und den um 15° gedrehten Fasern im linken Teil der Probe.

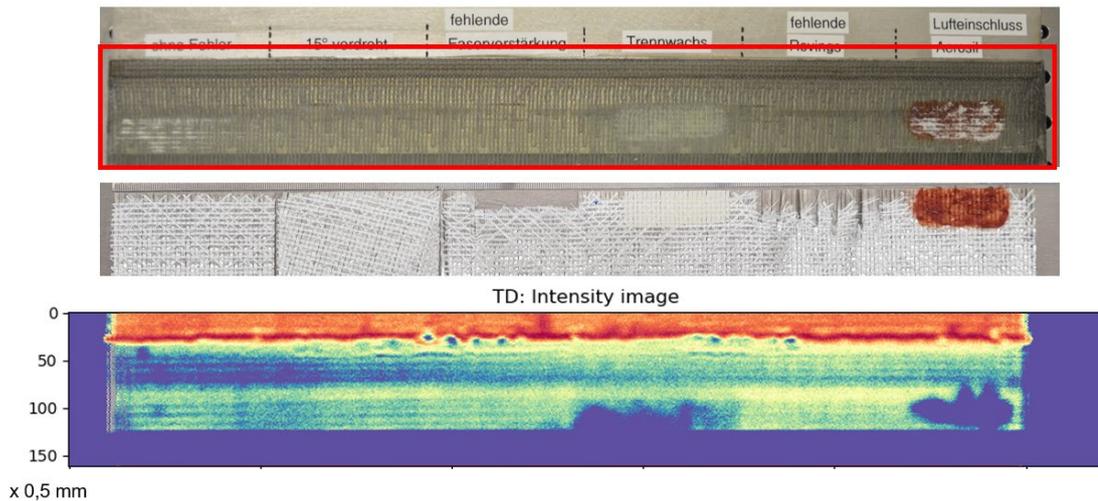


Abbildung 47: Luftultraschallmessung einer Probe mit unterschiedlichen Faserfehlern. Oben: Probe mit eingezeichnetem Messbereich. Mitte: Faserorientierung vor der Laminierung. Unten: C-Bild der Messung, wobei ein Pixelwert aus dem integrierten A-Bild berechnet ist.

Aus den durchgeführten Messungen kann geschlossen werden, dass eine Überprüfung der Schweißnaht sowohl vor als auch nach dem Laminieren mittels LUS möglich ist. Die Messungen davor zeigen jedoch schärfer abgetrennte Grenzen der unterschiedlichen präparierten Bereiche und deutlicher Unterschiede in der Stärke des LUS-Signals in den verschieden stark geschweißten Nähten. Deshalb wird eine Prüfung vor dem Laminieren empfohlen. Die gezeigten Messungen decken einen großen Bereich der Probe ab und wurden mit einer feinen Abtastung von 0,1 mm gemessen. Beides ist für die Schweißnahtprüfung an sich nicht erforderlich. So ist eine punktweise durchgeführte Messung denkbar, bei der stichprobenartig die Schweißnaht überprüft wird, oder eine Messung, die einen kleinen Teil der Schweißnaht abdeckt oder mit einer gröbereren Abtastung durchgeführt wird. Hier ist stets ein Kompromiss aus kurzer Messzeit und einem großen Messbereich bzw. einer feinen Abtastung festzulegen.

4.3.4 Luftultraschallmessungen an vorbelasteten Zugprüfkörpern

Auf Grund des Schichtaufbaus im Übergangsbereich Metall – Kunststoff sowie im Bereich des reinen Laminats führt eine mechanische Überlastung zu einem teilweisen oder kompletten Haftungsverlust zwischen einzelnen Lagen (Delamination) sowie adhäsivem Versagen zwischen Faserverbund und metallischem Verbinder. Im Gegensatz zu homogenen Werkstoffen, die mit Rissbildung reagieren, entstehen in der Regel keine oder kaum sichtbare Veränderungen an der Oberfläche. Der zerstörungsfreie Nachweis solcher Schädigungen im Fügebereich ist daher eine wichtige Voraussetzung zur Beurteilung der Betriebssicherheit und der Lebensdauer von hybriden Fügeverbindungen. Zur Qualifizierung geeigneter Messverfahren werden Probekörper benötigt, welche solche Delaminationen in praxisrelevanter Ausprägung enthalten. Zur Bestimmung der

exakten Fehlergröße und -ausprägung können nur zerstörungsfreie Prüfverfahren eingesetzt werden, da sonst der Probekörper nicht mehr verwendbar wäre. Für den Versuch wurde eine Verbinderkonfiguration mit Schweißnahtversatz (50/25) hergestellt, da sich bei diesen im Zugversuch ein beginnendes Ablösen der GFK-Überlappung vom Stahl optisch gut erkennen lässt. Zuvor wurden identische Proben im Zugversuch auf deren Zugfestigkeit untersucht, um die Bruchkraft zu ermitteln. Als Kriterium für die Vorbelastung bzw. Vorschädigung wurden daraufhin 50 % der Bruchkraft festgelegt. Wie gewünscht, zeigten dabei die Prüfkörper ein mehr oder weniger fortgeschrittenes Ablösen zwischen GFK und Stahl (vgl. Abbildung 48, links). Die vorgeschädigten Prüfkörper wurden anschließend mit der bereits erprobten Luftultraschall (LUS)-Messmethodik begutachtet. Dabei lassen sich augenscheinliche Unterschiede zwischen Prüfkörper 1+3 und den restlichen erkennen (vgl. Pfeile Abbildung 48, rechts). Die bei Prüfkörper 1+3 vergrößerte gelbe Färbung ergibt sich durch die weniger fortgeschrittene Ablösung zwischen GFK und Stahlverbinder gegenüber den restlichen Proben. Generell konnte jedoch kein scharf eingegrenzter Fehler sichtbar gemacht werden. Es werden daher noch Versuche mit Prüfkörpern der doppelten Breite durchgeführt, um einen Signalweg des Ultraschallsignals um den Prüfkörper herum zu minimieren.

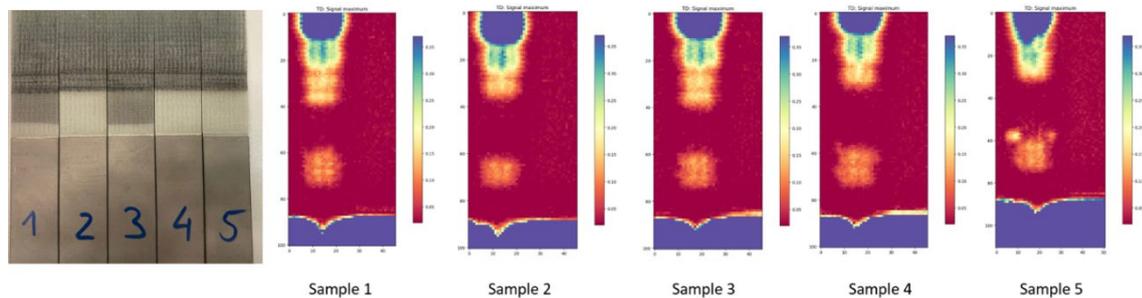


Abbildung 48: links: vorbelastete Zugproben; rechts: Ultraschallbild der jeweiligen Proben

Im Folgenden wurde weiter an der Optimierung der Verfahrensparameter der Prüfmethode gearbeitet. Im Folgenden werden die Ergebnisse an jeweils einer der folgenden Proben erläutert:

- eine ebene Platte (VARI)
- eine Vergleichsprobe ohne Vorbelastung (VARI)
- eine Vergleichsprobe, welche zyklisch belastet wurde und eine Delamination zeigte (VARI) (50 % F_{\max} bei 200.000 Zyklen und 5 Hz)
- eine Vergleichsprobe ohne Vorbelastung (RTM).

Der Prüfaufbau erfolgte in Transmissionsmessung durch luftgekoppelten Ultraschall (L-US). Die Messung erfolgte mit einem Flächenscan von 1 mm x 1 mm und einer Prüffrequenz von 200 kHz. Die Anregungsspannung betrug 400 V bei einer Verstärkung von 79 db.

Platte (Vakuuminfusion)

Die Platte ließ sich sehr gut mit LUS prüfen (Prüfklima 23 °C/ 50 r.F.). Die verschiedenen Bereiche der Probe (GFK, Hybrid, Stahl) waren deutlich erkennbar (vgl. Abbildung 49). Der reine Metallbereich (x-Achse von 100 mm bis ca. 135 mm) ist kaum durchschallbar und ist dunkellila abgebildet. Der anschließende Bereich bis ca. 150 mm ist der Übergangsbereich (Stufung) und der Bereich der zunehmenden Probendicke (Aufdickung durch textile Halbzeuge). Im rot-gelben Bereich bis ca. 180 mm ist noch teilweise eine dünne Metallschicht (Stahlfasern im Textil), die dann in den reinen GFK-Bereich übergeht. Bei 200 mm befindet sich auf der Proben-Platte eine rote Markierung (Ende des hybriden Textils), welche den Übergang in den reinen GFK-Bereich markiert. Im Prüfbild (vgl. Abbildung 49) ist dieser Dickenübergang als blaue Linie erkennbar. Der reine GFK-Bereich ist dann auch wieder schlechter durchschallbar (blau-grüne Farbgebung). Das liegt an der gewählten Prüffrequenz von 200 kHz. Diese erweist sich als optimal für den relevanten Bereich der hybriden Fügezone. Dort ist die Signalintensität am größten (rot-gelbe Farbgebung).

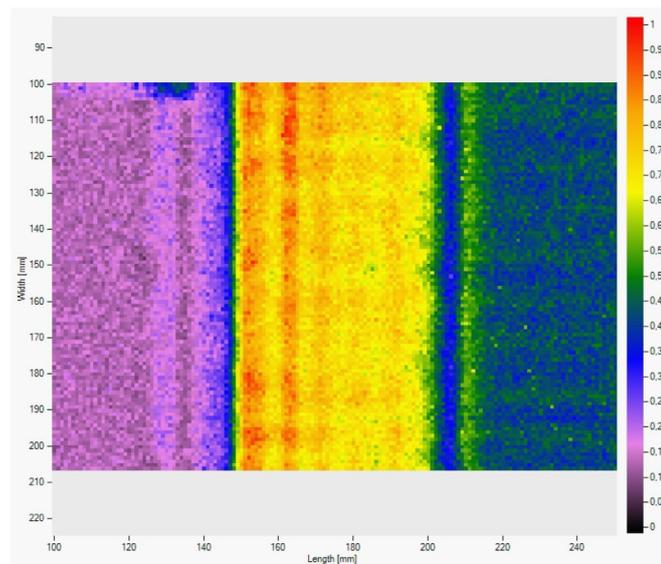


Abbildung 49: C-Bild (2-dimensionale Abbildung) der Ultraschalluntersuchung an der Platte im hybriden Bereich; die Farbskala entspricht der Amplitude des US-Signals

Vergleichsprobe (unbelastet, Vakuuminfusion)

Die Vergleichsprobe ist ein Streifen von 25 mm Breite. Die Farbgebung entspricht dem Verlauf wie er für die Platte (vgl. 4.2.6) beschrieben wurde (vgl. Abbildung 50). Der prüfbare Bereich ist ca. 12 mm breit. Das heißt, dass ein Randbereich von jeweils ca. 6 mm ohne zusätzliche Abschattungsmaßnahmen nicht prüfbar ist. Im Gegenzug bedeutet es aber, dass ca. die Hälfte der Probenbreite ohne zusätzlichen Aufwand zugänglich und prüfbar ist.

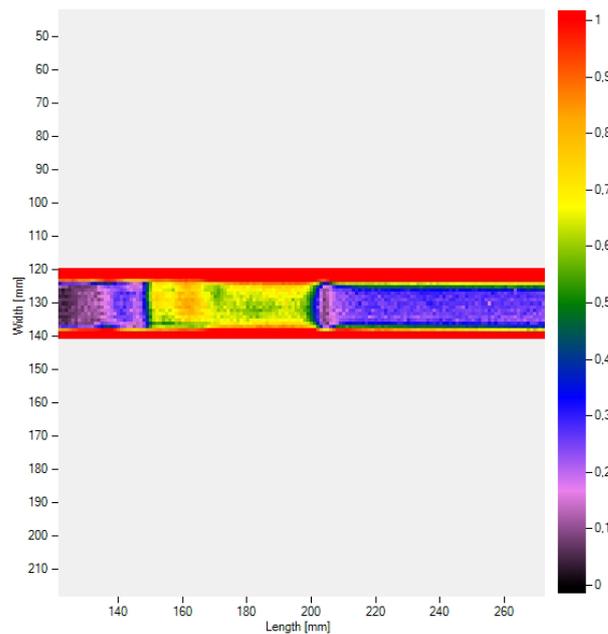


Abbildung 50: C-Bild der Ultraschalluntersuchung an einem unbelasteten Probekörper im hybriden Bereich

Vergleichsprobe (zyklisch belastet und mit Delamination, Vakuuminfusion)

Im Bereich der Fügezone war die Delamination zyklisch belasteter Proben deutlich zu erkennen (vgl. Abbildung 51). Hier konnte der Schall die Probe nicht mehr durchdringen. Das Signal brach komplett zusammen, was durch die schwarze Färbung deutlich sichtbar ist. Der Schädigungsbereich schien sogar deutlich größer zu sein, als es die optisch sichtbare Delamination vermuten lässt, da sich ein weiterer blauer Bereich mit verringerter Signalintensität anschloss. Die ursprüngliche gelb-grüne Färbung in diesem Bereich war nur noch als Rest an den Rändern vorhanden.

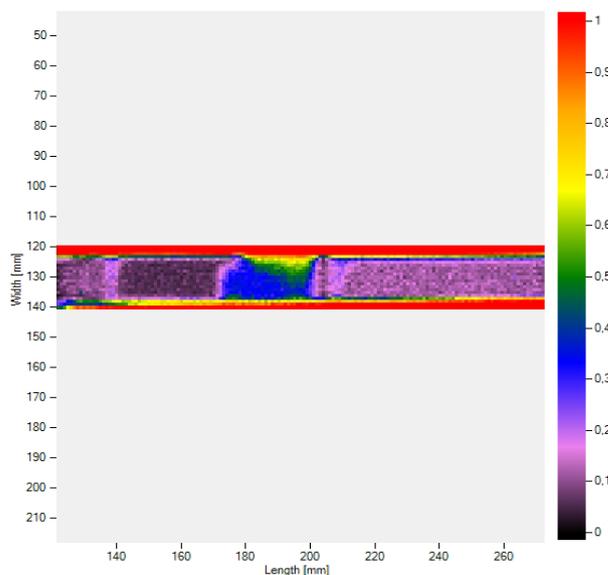


Abbildung 51: C-Bild der Ultraschalluntersuchung an einem vorbelasteten Probekörper im hybriden Bereich

Vergleichsprobe (unbelastet, Herstellung durch RTM-Verfahren)

Die beidseitig glatte Probe zeigte nur noch 3 zu unterscheidende Bereiche: reines Metall (0 mm – 125 mm), Metall/GFK (125 mm – 200 mm) und GFK (200 mm – 270 mm) (vgl. Abbildung 52). Es war deutlich zu erkennen, dass die Amplitudenunterschiede und Linien im Vergleich zur Platte mit den unterschiedlichen lokalen Probendicken (bedingt durch die Herstellung in Vakuuminfusion) nicht vorhanden waren. Jedoch stören diese herstellungsbedingten, unterschiedlichen Probendicken nicht bei der Detektion von Delaminationen, da der Vergleich zu einer baugleichen und unbeschädigten Probe vorliegt.

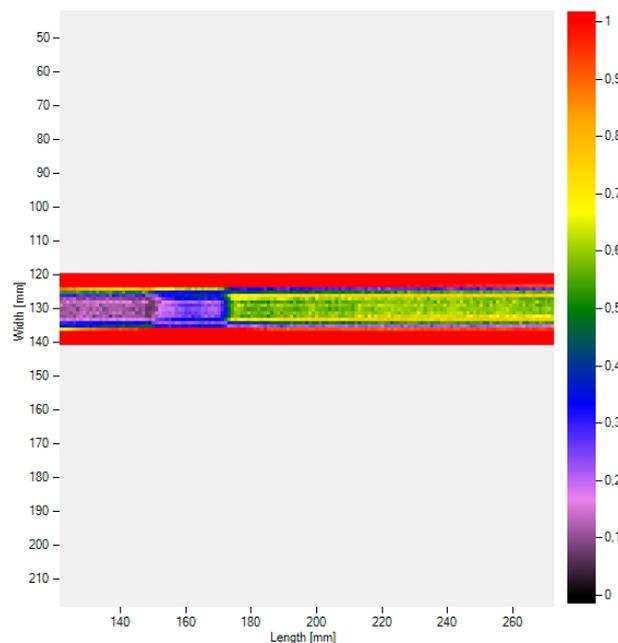


Abbildung 52: C-Bild der Ultraschalluntersuchung an einem unbelasteten mit RTM hergestellten Probekörper im hybriden Bereich

4.3.5 Handlungsempfehlungen

Aus den durchgeführten Untersuchungen ergeben sich folgende Handlungsempfehlungen für die Bewertung der Verarbeitungsqualität der hybriden Verbindung mittels LUS:

- Vor dem Laminieren prüfen: Die LUS-Messungen vor dem Laminieren zeigen schärfere Abgrenzungen und deutlichere Unterschiede in der Signalstärke, was eine effektivere Fehlererkennung ermöglicht.
- Auswertemethode anpassen: Je nach Probe kann der Wert des Signalmaximums oder die zeitliche Position des Signalmaximums das bessere Ergebnis liefern
- Messmethode auswählen: Es ist möglich, nur einzelne Punktmessungen oder eine flächige Messung durchzuführen. Vorteilhaft einer flächigen Messung ist der geringere Einfluss von lokalen Abweichungen wie z. B. Oberflächenimperfectionen.
- Messbereich anpassen: Der Messbereich sollte auf die relevanten Bereiche der Schweißnaht beschränkt werden, um die Messzeit zu optimieren.

- Abtastung optimieren: Eine feinere Abtastung kann zwar genauere Ergebnisse liefern, verlängert aber die Messzeit. Ein Kompromiss zwischen Abtastungsintervall und Messbereich sollte gefunden werden.
- Ränder beachten: Die Beugungs- und Brechungseigenschaften des LUS-Signals an den Rändern der Probe können die Messergebnisse beeinflussen. Daher sollten die Ränder bei der Auswertung mit besonderer Vorsicht bewertet werden.

4.4 Optimierung der Verbindergeometrie - Hinterschneidung

In Zusammenarbeit mit dem Projektpartner SLV Halle wurde ein optimiertes Anschlussdesign des metallischen Verbinders realisiert, welches in Teilen eine Hinterschneidung beinhaltet. Hinterschneidungen sind hervorstehende Elemente, welche häufig bei Spritzgussbauteilen als Problem auftreten. Dabei erschweren ungünstige Modellgeometrien (sog. Hinterschnitte), dass sich das gespritzte Bauteil nach dem Abkühlen problemlos entformen lässt. Es besteht die Möglichkeit, entweder unter Ausnutzung der Verformbarkeit durch Zwangsentformung oder mittels spezieller Schieber eine Entformung zu realisieren. Im Projekt soll dieser Effekt, der Formschluss, einen positiven Beitrag zur Verbundfestigkeit erzielen. Der Verbinder (vgl. Abbildung 53) wurde durch CNC-Fräsen realisiert und besitzt eine flache Hinterschnittstufe am Beginn des Verbinders und eine erhöhte Stufe im mittleren Bereich. Die verringerte Stufenhöhe soll dabei eine übermäßige „Out-of-Plane“-Umlenkung der unidirektionalen Faserumlenkung am Steifigkeitssprung vermeiden.

Das neue Verbinder-Design wurde anschließend unter identischen Bedingungen gemeinsam mit einer bisherigen Konfiguration durch Vakuuminfusion zu ebenen Platten (500 x 500 mm²) verarbeitet. Die Prüfkörperentnahme erfolgte durch gekühlten Trennschnitt an einer horizontalen Bandsäge. Die beiden Varianten wurden danach durch Zugversuche miteinander verglichen, wobei die bisherige Variante eine Zugfestigkeit von $275 \pm 24,4$ MPa und das optimierte Design eine Zugfestigkeit von $285 \pm 8,2$ MPa erreichte (vgl. Abbildung 54). Es zeigte sich, dass neben der leichten Erhöhung der Festigkeit vor allem deren Streuung reduziert werden konnte (von 8,9 % auf 2,9 %). Weiterhin zeigte sich, dass die Positionierung der Schweißnähte mit einem Versatz zu einer Biegung des Verbinders führte (vgl. Abbildung 55). Es ist davon auszugehen, dass durch eine symmetrische Anordnung der Schweißnähte und damit dem Verhindern einer Verbiegung während der Belastung die Zugfestigkeit weiter gesteigert werden kann.

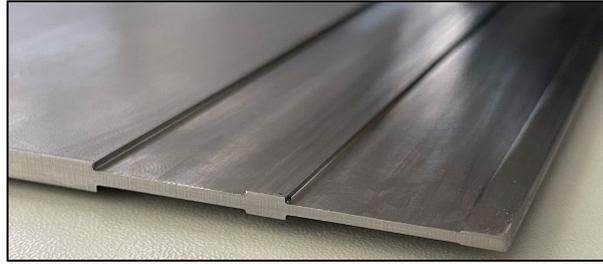


Abbildung 53: Verbinder mit Hinterschnittgeometrie

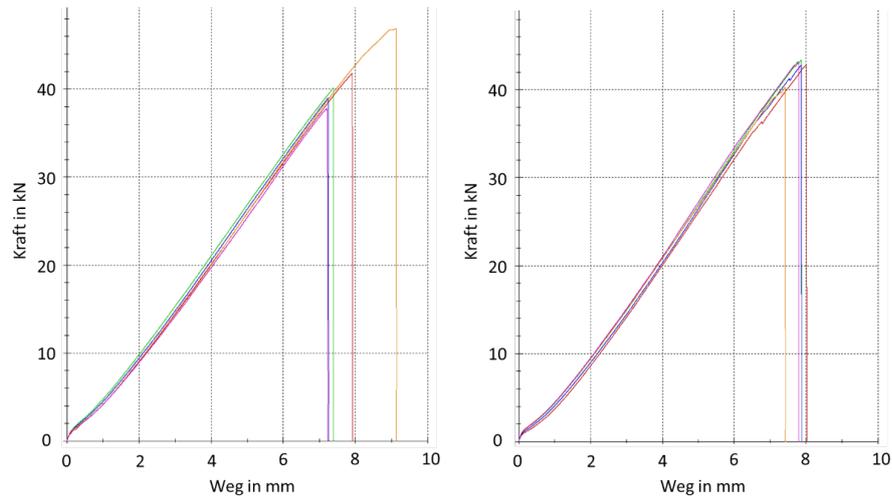


Abbildung 54: Vergleich der Kraft-Weg Kurven von bisheriger (links) und optimierter (rechts) Variante

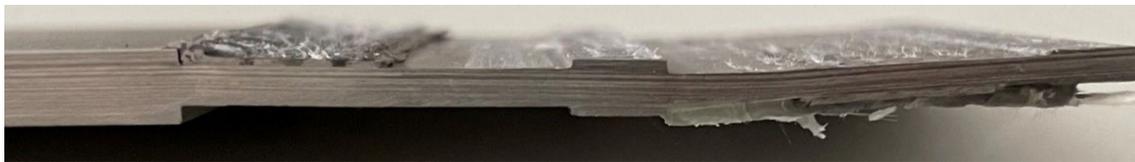


Abbildung 55: metallischer Verbinder mit Hinterschnitt nach Zugversuch; asymmetrische Positionierung der Schweißnähte

4.5 Optimierung der Verbindung – B-FAUSST I- IV und kurze Stufung

Durch den Projektpartner Moll Textil erhielt das SKZ vier optimierte Varianten des FAUSST-Textils (vgl. Abbildung 56), wobei sich diese im Detail durch die Länge der Metallfäden, eine höhere Maschendichte (Glas) und einen optimierten Stahlfaserteil mit hoher Maschendichte unterschieden. Begleitend wurden durch den Partner SLV Halle die metallischen Verbinder vorbereitet (verkürzte Stufung von 50 mm auf 25 mm Länge) und die textilen Halbzeuge angeschweißt. Vor der Verarbeitung durch Vakuuminfusion wurden die Verbinder gestrahlt und mit Atmosphärendruckplasma gereinigt. Um Unterschiede durch die Verarbeitung zu verhindern, wurden alle Varianten im gleichen Infusionsprozess mit dem Standard-Harz (Hexion RIMR 426) imprägniert (vgl. Abbildung 57) und anschließend bei 80 °C

für 8 Stunden ausgehärtet. Die Prüfkörperentnahme erfolgte durch flüssigkeitsgekühlten Trennschnitt an einer horizontalen Bandsäge.

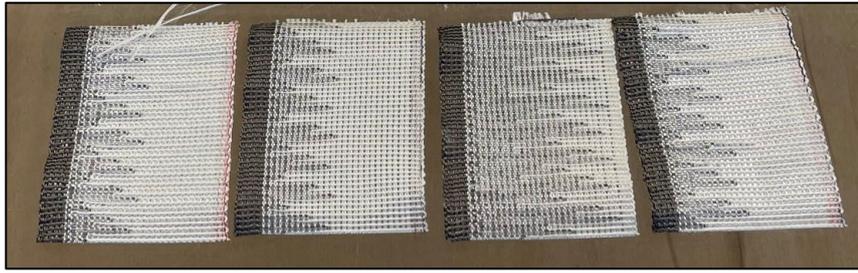


Abbildung 56: optimierte Textilvarianten FAUSST (BF I-IV)

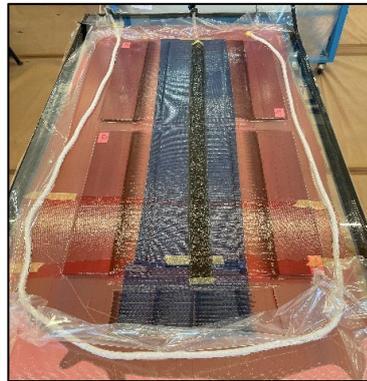


Abbildung 57: Vakuuminfusion der optimierten FAUSST Textilien

Die mechanische Charakterisierung erfolgte in quasi-statischen Zugversuchen an Prüfkörpern mit den Abmaßen 250 mm x 50 mm bzw. 250 mm x 25 mm. Mit Ausnahme der Variante BF III ergaben die Zugversuche eine verbesserte und hohe Verbindungsfestigkeit und eine gleichmäßige, niedrige Streuung. Die Ergebnisse zeigen, dass sich die Änderungen am Textil und Verbinder nicht negativ auf die Verbindung auswirken, was aufgrund der verringerten Verbindungsfläche zwischen GFK und Stahl zunächst erwartet wurde (vgl. Abbildung 58). Vielmehr zeigt sich, wie sehr die hybride Verbindung von der Schweißverbindung und dem FAUSST-Textil profitiert und gleichzeitig die Überlappungslänge analog zu Klebungen einen großen Einfluss auf die Spannungsverteilung hat. Die Variante BF III erreichte nicht das Festigkeitsniveau der anderen Varianten. Nach Analyse der Bruchflächen durch die SLV-Halle wurde zunächst eine schlechte Schweißung identifiziert. Dabei kam es durchweg zum Ablösen der Schweißnaht vom Stahlverbinder. Die metallischen Faserbereiche der restlichen Varianten sind unmittelbar hinter der Schweißnaht unter Ausnutzung der Faserfestigkeit gerissen. Die Variante BF III wurde daher im Verlauf des Projekts wiederholt hergestellt und geprüft, um sie danach erneut mit den anderen Varianten zu vergleichen. Trotz sorgfältiger Herstellung erreichte die Variante BF III nicht das Festigkeitsniveau der anderen Verbinder. Es ist wahrscheinlich, dass die Erhöhung des Verhältnisses von Metallfasern zu Glasfasern ein negativer Faktor war. Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die vorgenommenen Änderungen sowohl am

Textil als auch am Verbinder eine Kostenersparnis ermöglichen, ohne dass Kompromisse bei der Verbindungsfestigkeit eingehen zu müssen. Jedoch zeichnet es sich im Hinblick auf Variante BF III ab, dass sich die Zugeigenschaften mit unterschiedlichen Anteilen der Faserverstärkung wieder verschlechtern können.

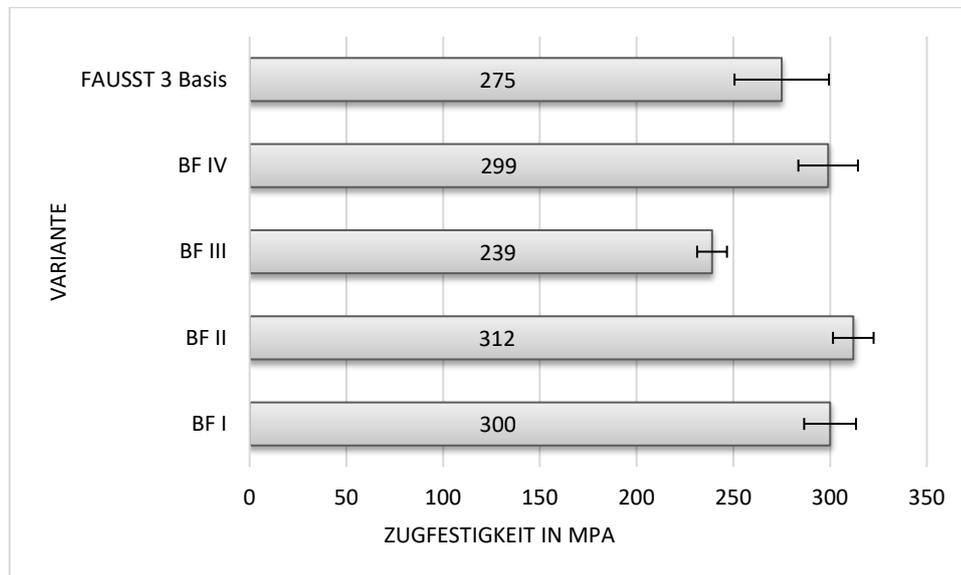


Abbildung 58: ermittelte Zugfestigkeiten an den FAUSST-Varianten

4.6 Vergleich der hybriden Verbindung mit Klebungen

Für den Vergleich der hybriden Verbindung mit Klebungen wurde ein handelsüblicher Epoxidharz (EP)-Klebstoff auf CrNi-Stahl/ CFK-EP Probekörpern verarbeitet und mit Varianten der hybriden Verbindung verglichen. Die Gestaltung der Verklebungen orientierte sich hinsichtlich der Lasteinleitung an der hybriden Verbindungsvariante B-FAUSST (optimiertes, kurzes FAUSST Gewirk auf CrNi Blech mit 2 mm x 25 mm bzw. 2 mm x 15 mm Stufen). Zum Verhindern einer exzentrischen Krafteinleitung und damit verbunden auftretender Normalspannung (Biegemoment) erfolgte ein zweischnittiges Probendesign bei den Klebproben (vgl. Abbildung 59).



Abbildung 59: zweischnittige Epoxidharzklebstoff-Referenzklebungen

Tabelle 13: Ermittelte Kennwerte in Anlehnung an den Zugscherversuch nach DIN EN 1465

Bezeichnung	Fmax in kN	Zugscherfestigkeit in N/mm ²	Geometrie Klebfläche
B-FAUSST (25 mm)	22,7 ± 0,8	18,6 ± 0,6	25 mm * 25 mm *2
B-FAUSST (15 mm)	12,5 ± 0,8	16,7 ± 1,1	15 mm * 25 mm *2
ergo 7440	15,4 ± 0,4	24,84 ± 0,93	12,5 mm * 25 mm *2

Beide hybriden Verbindungsvarianten konnten nicht die Zugscherfestigkeit der geklebten Prüfkörper erreichen. Es zeigte sich, dass das verwendete Klebstoffsystem eine höhere Verbundfestigkeit erzielen konnte. Die Formulierung von Klebstoffen ergibt in der Regel eine Rezeptur mit idealen Eigenschaften auf bestimmten Oberflächen. Wichtige Bestandteile sind dabei funktionelle Füllstoffe und adhäsions- und kohäsionsbeeinflussende Additive, die erheblichen Einfluss auf die Oberflächenhaftung nehmen können, den Schrumpf und das Benetzungsverhalten. Diese Rezepturoptimierungen sind bei Laminierharzen nicht vorhanden. Weiterhin sind im ausgehärteten Klebstoff Einflüsse auf die mechanischen Eigenschaften wie Steifigkeiten und Bruchdehnung zu erwarten. Dem gegenüber steht das verwendete niedrigviskose Injektionsharz, welches vor allem auf eine gute Adhäsion zum Finish (Haftvermittler) textiler Halbzeuge, eine hohe Scher- und Zugfestigkeit optimiert wurde. Obwohl beide Systeme, das Laminierharz als auch der Klebstoff auf der Grundlage von Epoxidharz (DGEBA) und aminischen Härtern basieren, lassen sich die Kunststoffe im ausgehärteten Zustand kaum miteinander vergleichen. Die Vorbereitung der Oberflächen der Klebung als auch vor dem Laminieren der hybriden Proben erfolgte durch manuelle Lösemittelreinigung (Isopropanol) und im Anschluss durch einen Strahlvorgang (Korund). Der reduzierten Belastbarkeit der hybriden Verbinder steht der hohe Aufwand für die Herstellung der zweiseitigen Klebverbindung gegenüber. Kalkuliert man den Aufwand für die Herstellung von Klebungen an großflächigen Bauteilen (Klebstoffauftrag, Fügen- und Fixieren, Wärmenachbehandlung), so wird das Potential der hybriden Verbindungsvariante gegenüber einer nachträglichen Verklebung noch deutlicher. Der größte Vorteil besteht darin, dass sowohl die eigentlichen FVK-Bauteile als auch deren Verbindung mit dem metallischen Fügepartner in einem Prozessschritt hergestellt werden können.

5 Zusammenfassung

Im Projekt Hy-FIVE wurde erfolgreich eine hybride Füge­technologie Metall-Kunststoff für Verbindungen im maritimen Einsatz entwickelt. Durch den Einsatz solcher Verbindungen können der Einsatz von Leichtbaumaterialien im Schiffbau weiter vorangetrieben, die Prozesszeiten in der Werft verkürzt und gänzlich neue Designs und Konzepte ermöglicht werden. Durch die Integration klebstofffreier Verbindungen können erhebliche Zulassungshürden abgebaut und die Umsetzung von Leichtbaukonzepten im Schiffbau vereinfacht werden.

Im Teilprojekt am SKZ „Evaluierung und Optimierung von etablierten Fertigungsmethoden bezüglich deren spezieller Anwendung zur Herstellung hybrider Fügeverbindungen“ wurde die Umsetzung von halbautomatischen Faserverbund-Herstelltechnologien zur Herstellung klebfreier, hybrider Metall- Kunststoff-Übergänge untersucht. Hierzu wurden zu Beginn des Projektes mit den beteiligten Projektpartnern auf Basis von Literaturrecherchen stoff- und formschlüssige Fügevarianten identifiziert und hinsichtlich der Anforderungen aus dem maritimen Bereich bewertet. Als Ergebnis wurden vier ausgewählte Verbindungselemente näher betrachtet und zunächst durch Vakuuminfusionen zu flächigen Bauteilen verarbeitet. Anschließend wurden Prüfkörper aus den Bauteilen entnommen und unter Zugbelastung geprüft und verglichen. Die Materialauswahl von nicht-rostendem Stahl als Fügepartner machte umfangreiche Untersuchungen zur optimalen Vorbereitung der überlappenden Verbindungsbereiche notwendig. Die speziellen Oberflächenvorbereitungen konnten sowohl durch Kontaktwinkelmessungen als auch durch erhöhte Haftfestigkeiten bestätigt werden. Im weiteren Verlauf konnten mit den Partnern Fügevarianten für eine fasergerechte Lasteinleitung weiterentwickelt werden. An ausgewählten Varianten wurde anschließend durch Vakuuminfusion, Resin Transfer Moulding; Light-RTM sowie Nasspressen die Anwendbarkeit demonstriert. Begleitend zu den Herstellmethoden wurden an den Varianten Zugversuche durchgeführt, um grundlegende mechanische Zugeigenschaften zu erhalten und den Entwicklungsfortschritt messbar zu machen. Für die Aufnahme der Dehnungen an den Prüfkörpern wurden Ansatzdehnaufnehmer verwendet. Je nach Positionierung des Prüfkörper bzw. der Dehnaufnehmer an der Füge­stelle traten Unterschiede im Dehnverhalten auf. Die festgestellten Abweichungen sind auf die inhomogene Struktur der Füge­stelle zurückzuführen und es wird empfohlen, bei zukünftigen Untersuchungen auf ein kamerabasiertes Dehnungsmesssystem einzusetzen. Die Anwendung der 3- und 4- Punkt-Biegung zur Ermittlung der Biegeeigenschaften erwies sich als nicht zielführend, da sich die Verbindungsstellen als zu heterogen mit der Folge des abermittigen Versagens erwiesen. Beim Versagen kam es zum Teil zur plastischen Deformation des metallischen Füge­teils (Knicken) sowie zum adhäsiven Versagen der auf Zug belasteten Laminatseite.

Neben den zerstörenden Prüfmethoden wurden auch etablierte zerstörungsfreie Prüfmethoden auf deren Eignung zur Detektion von Herstellungsfehlern als auch Schädigung nach Belastung untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass die Detektierbarkeit von Schweißfehlern sowohl mit der Puls- oder Lock-in-Thermographie als auch mit luftgekoppeltem Ultraschall möglich ist. Die Unterschiede der Thermografieverfahren zeigten sich entweder in einer kürzeren Messzeit (Puls-Thermografie) oder der Visualisierung einer größeren Empfindlichkeit (Lock-in-Thermografie). Ebenfalls gut sichtbar mittels Lock-in-Thermografie waren künstlich eingebrachte Fehler im Faserverbundlaminat. Die Untersuchungen mit Ultraschall erfolgten durch Luftultraschall in Sender-Empfänger-Anordnung. Auch hier konnten die gezielt eingebrachten Schweißfehler (Variation der Stromstärke, Schweißnahtunterbrechungen) sowohl vor als auch nach dem Laminieren eindeutig detektiert werden, wobei jedoch eine Prüfung vor dem Laminieren zu schärferen Abgrenzungen führte. Die künstlichen Defekte im Bereich des Laminats (Trennmittelkontamination, Lufteinschlüsse) ließen sich deutlich erkennen. Aus den Ergebnissen der ZfP-Prüfungen konnten Handlungsempfehlungen für die Qualitätssicherung abgeleitet werden. Ebenso konnten an den hybriden Verbindungen die relevanten Bereiche der Verbindung mittels Transmissionsmessung (Luftultraschall) detektiert werden (Stahl, Hybrid, FVK). Vorgeschiedigte Proben und Delaminationen konnten eindeutig von unbeschädigten Proben unterschieden werden. Unterschiede in der Prüfkörpergestalt (Dicke) durch die Herstellmethode (beidseitig glatt bzw. einseitig glatt) wirkten sich generell auf die US-Amplitude aus. Die Detektion von Delaminationen ist davon jedoch nicht gestört.

Im Rahmen von Optimierungen konnten bei der Variante mit dem hybriden Textil entweder durch geometrische Veränderungen am Stahlprofil, durch die Wahl der Überlappungslänge und der Schweißnahtpositionierung oder durch Veränderungen am Textil selbst verbesserte Festigkeiten und eine Verringerung der Streuung erzielt werden. Es zeigte sich, dass aus der Klebtechnik bekannte Phänomene, dass oberhalb und unterhalb einer optimalen Überlappungslänge keine Steigerung der Verbundfestigkeit mehr auftritt. Die besten Konfigurationen der Hybrid-Textil-Variante wurden mit einer zweischnittigen, symmetrischen Klebung verglichen, wobei die Klebung eine um 25 % höhere Verbundfestigkeit erzielen konnte. Demgegenüber stehen der hohe technologische Aufwand des Klebens sowie die üblicherweise längere, notwendige Fixier- und Aushärtezeiten. Der Vorteil eines gleichzeitig möglichen Hybridübergangs zu Metallen im Herstellungsprozess von FVK-Bauteilen liegt also nicht nur in den guten Verbundfestigkeiten, sondern auch in der unkomplizierten Verarbeitung. Im Gesamtergebnis konnte der Nachweis erbracht werden, dass die betrachteten hybriden Verbindungsmethoden eine Alternative zum Kleben darstellen können und ohne große technische Anpassungen durch etablierte Fertigungsmethoden zur Her-

stellung von Faserverbundbauteilen nutzbar sind. Weiterhin konnte gezeigt werden, dass zerstörungsfreie Prüfmethoden wie Ultraschall und Thermografie eine sinnvolle Ergänzung im Rahmen der Qualitätssicherung beim Herstellprozess der Fügeverbindungen sind.

6 Literaturverzeichnis

- [1]: P.Noury, B. Hayman, D. McGeorge and J. Weitzenböck: Lightweight construction for advanced shipbuilding – recent development, Det Norske Veritas, 2002
- [2]: Bonding of lightweight materials for cost effective production of high speed craft and passenger ships, Klebtechnik und Oberflächen, Jahresbericht IFAM 2003
- [3]: Michaeli, W., Fischer, K.: Untersuchungen zur Fertigung von flächigen Bauteilen aus faserverstärkten Kunststoffen mithilfe des Spaltimprägnierverfahrens, Zeitschrift Kunststofftechnik, Vol. 4, 2008.
- [4]: Flemming, M; Ziegmann, G.; Roth, S.: „Faserverbundbauweisen“; Springer Verlag, Berlin 1999.
- [5]: <http://composite-integration.co.uk/resin-transfer-moulding/> , Stand 10.06.2024
- [6]: Gholizadeh, S. (2016). A review of non-destructive testing methods of composite materials. *Procedia Structural Integrity*, 1, 50-57.
- [7]: Jolly, M. R., Prabhakar, A., Sturzu, B., Hollstein, K., Singh, R., Thomas & Shaw, A. (2015). Review of non-destructive testing (NDT) techniques and their applicability to thick walled composites. *Procedia CIRP*, 38, 129-136.
- [8]: Amenabar, I., Lopez, F., & Mendikute, A. (2013). In introductory review to THz non-destructive testing of composite mater. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 34(2), 152-169.
- [9]: Dong, J., Kim, B., Locquet, A., McKeon, P., Declercq, N., & Citrin, D. S. (2015). Nondestructive evaluation of forced delamination in glass fiber-reinforced composites by terahertz and ultrasonic waves. *Composites Part B: Engineering*, 79, 667-675.
- [10]: Zhong, S. (2019). Progress in terahertz nondestructive testing: A review. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 1-9.
- [11]: Abou-Khousa, M. A., Ryley, A., Kharkovsky, S., Zoughi, R., Daniels, D., Kreitingner, N., & Steffes, G. (2007, March). Comparison of X-Ray, Millimeter Wave, Shearography and Through-Transmission Ultrasonic Methods for Inspection of Honeycomb Composites. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 894, No. 1, pp. 999-1006). AIP.

- [12]: Raišutis, R., Kažys, R., Žukauskas, E., & Mažeika, L. (2011). Ultrasonic air-coupled testing of square-shape CFRP composite rods by means of guided waves. *Ndt & E International*, 44(7), 645-654.
- [13]: Solodov, I., Pfliederer, K., Gerhard, H., Predak, S., & Busse, G. (2006). New opportunities for NDE with air-coupled ultrasound. *Ndt & E International*, 39(3), 176-183.
- [14]: Fahim, A. A., Gallego, R., Bochud, N., & Rus, G. (2013). Model-based damage reconstruction in composites from ultrasound transmission. *Composites Part B: Engineering*, 45(1), 50-62.
- [15]: Heuer, H., Schulze, M. H., & Meyendorf, N. (2013). Non-destructive evaluation (NDE) of composites: eddy current techniques. In *Non-destructive evaluation (NDE) of polymer matrix composites* (pp. 33-55). Woodhead Publishing.
- [16]: He, Y., Tian, G., Pan, M., & Chen, D. (2014). Non-destructive testing of low-energy impact in CFRP laminates and interior defects in honeycomb sandwich using scanning pulsed eddy current. *Composites Part B: Engineering*, 59, 196-203.
- [17]: Sophian, A., Tian, G., & Fan, M. (2017). Pulsed eddy current non-destructive testing and evaluation: A review. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 30(3), 500.
- [18]: Hung, Y. Y., Chen, Y. S., Ng, S. P., Liu, L., Huang, Y. H., Luk, B. L., ... & Chung, P. S. (2009). Review and comparison of shearography and active thermography for nondestructive evaluation. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 64(5-6), 73-112.
- [19]: Gryzagoridis, J., & Findeis, D. (2008). Benchmarking shearographic NDT for composites. *Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 50(5), 249-252.
- [20]: Hung, Y. Y., Yang, L. X., & Huang, Y. H. (2013). Non-destructive evaluation (NDE) of composites: digital shearography. In *Non-Destructive Evaluation (NDE) of Polymer Matrix Composites* (pp. 84-115). Woodhead Publishing.
- [21]: Francis, D., Tatam, R. P., & Groves, R. M. (2010). Shearography technology and applications: a review. *Measurement science and technology*, 21(10), 102001.
- [22]: Yang, R., & He, Y. (2016). Optically and non-optically excited thermography for composites: A review. *Infrared Physics & Technology*, 75, 26-50.

- [23]: Meola, C., Carlomagno, G. M., Squillace, A., & Vitiello, A. (2006). Non-destructive evaluation of aerospace materials with lock-in thermography. *Engineering Failure Analysis*, 13(3), 380-388.
- [24]: Fernandes, H., Zhang, H., Figueiredo, A., Ibarra-Castanedo, C., Guimaraes, G., & Maldague, X. (2016). Carbon fiber composites inspection and defect characterization using active infrared thermography: numerical simulations and experimental results. *Applied optics*, 55(34), D46-D53.
- [25]: Schilling, P. J., Karedla, B. R., Tatiparthi, A. K., Verges, M. A., & Herrington, P. D. (2005). X-ray computed microtomography of internal damage in fiber reinforced polymer matrix composites. *Composites Science and Technology*, 65(14), 2071-2078.
- [26]: Garcea, S. C., Wang, Y., & Withers, P. J. (2018). X-ray computed tomography of polymer composites. *Composites Science and Technology*, 156, 305-319.
- [27]: <https://industrieanzeiger.industrie.de/technik/entwicklung/giesstechnisch-verbunden-cfk-und-aluminium/>, Stand 10.06.2024

7 **Abbildungsverzeichnis**

Abbildung 1: Vakuuminfusion der hybriden Verbinder.....	16
Abbildung 2: links: geschlossener Vakuumaufbau mit erkennbarer Fließfront; rechts: gestuftes Blech mit aufgelegter Faserverstärkung	17
Abbildung 3: CNC-Zuschnitt der Faserverstärkung auf dem CNC-Cutter Aristomat TL 1617	17
Abbildung 4: Reinigung des hybriden Fasergewirkes v. l. n. r: Ultraschallbad in Aceton; Abwischen mit Aceton; Reinigen mit Atmosphärendruckplasma.....	18
Abbildung 5: Übergangsbereich GFK zu Metall; Delamination rot markiert	19
Abbildung 6: v. l. n. r: PosiTest AT-A zum Ermitteln der Haftfestigkeit; aufgeklebtes Zugelement; freigestelltes Zugelement.....	19
Abbildung 7: Ermittlung der freien Oberflächenenergie durch Kontaktwinkelmessung	20
Abbildung 8: Messung der Kontaktwinkel an $AlMg_3$ für die Bestimmung der freien Oberflächenenergie	21
Abbildung 9: Abzugsvorrichtung zur Ermittlung der Haftfestigkeit.....	23
Abbildung 10: links: Lagenaufbau Platte mit FAUSST; rechts: CrNi-Blech mit FAUSST	24
Abbildung 11: Hybride Verbindung FAUSST im VARI-Verfahren.....	24
Abbildung 12: v. l. n. r: Additiv gefertigte Pin-Reihen; 0° Faserorientierung; 90° Faserorientierung	25
Abbildung 13: hergestellte Nietverbindung mit zwei (Niet2) - bzw. dreireihiger (Niet3) Anordnung der Nieten auf der dünneren GFK-Stufe.....	26
Abbildung 14: links: aufgenähte Faserverstärkung; rechts: Laminat nach Vakuuminfusion	26
Abbildung 15: links: CNC-Bearbeitung der GFK-Platte zum Erzeugen der Stufung; rechts: präparierte Anschlussbereiche der Klebreferenz vor dem Klebstoffauftrag.....	27
Abbildung 16: links: geklebte Referenzplatte zur Entnahme von Prüfkörpern; rechts: Zugscherprüfung mit digiClip-Wegaufnehmer (Ansetzdehnungsaufnehmer)	27
Abbildung 17: Kraft-Weg-Diagramm der Klebreferenz	27
Abbildung 18: links: Kraft-Weg-Diagramm CMT PIN; rechts: Kraft-Weg-Diagramm Drahtgitter.....	28

Abbildung 19: links: Kraft-Weg-Diagramm Niet 3; rechts: Kraft-Weg-Diagramm Niet 2	28
Abbildung 20: Kraft-Weg-Diagramm FAUSST	28
Abbildung 21: Bruchkraft der Fügevarianten im Vergleich zur Klebreferenz	29
Abbildung 22: Zugprobe in der Kombination Aluminium und GFK im Zugversuch	30
Abbildung 23: belegtes RTM-Werkzeug mit CrNi-Platte (blau maskiert) und Faserverstärkung	31
Abbildung 24: RTM-Plattenwerkzeug mit Injektionsventil, Versorgungsschläuchen und Auslasserkennung.....	31
Abbildung 25: links: trockener Faserzuschnitt; rechts: geschlossenes Formgebungswerkzeug	32
Abbildung 26: Light-RTM Bauteil mit zentralem Anguss (links) und zentralem Auslass (rechts).....	32
Abbildung 27: Faserzuschnitte und Blechhalbzeug mit hybridem Gewirk	33
Abbildung 28: links: Einlegen des Preforms; rechts: Zugabe der Harzmischung	33
Abbildung 29: Pressbauteile; links: Blaufärbung durch Sprühklebstoff; rechts: reduzierter Einsatz von Sprühklebstoff	34
Abbildung 30: links: 3-Punkt-Biegung; rechts: 4-Punkt-Biegung.....	34
Abbildung 31: erkennbare Dehnungsunterschiede je nach Messposition an hybriden Proben.....	36
Abbildung 32: Zugversuch (oben: Versuchsbeginn, unten: Erreichen von F_{max}) mit berührungsloser Verformungsmessung durch digitale Bildkorrelation; erkennbare inhomogene Bereiche über die Prüfkörperlänge.....	36
Abbildung 33: Eingeschnürte metallische Verbinderkomponente (Stufenbereich ursprünglich $L \times B = 50 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$) nach Zugversuch mit ausgeprägter Längsdehnung und Querkontraktion	37
Abbildung 34: Gealterte Prüfkörper nach Salzsprühnebeltest	38
Abbildung 35: links: Zugprüfung an einer hybriden Variante; rechts: adhäsives Versagen im Übergangsbereich Laminat zu Stahl	38
Abbildung 36: Faserfehler; Luftultraschall (210 kHz, 400 V).....	41

- Abbildung 37: Exemplarische Darstellung des Messaufbaus für Puls-Thermografie (links) und Lock-in-Thermografie (rechts)..... 41
- Abbildung 38: Fotos des Prüfkörpers mit Schweißfehler (links) und Faserfehler (rechts). Die farbigen Rechtecke zeigen die mittels Puls-Thermografie untersuchten Bereiche.. 42
- Abbildung 39: Thermogramme unterschiedlicher Bereiche der Probe mit Schweißfehlern. Die farbige Umrandung entspricht dabei den jeweiligen Bereichen in Abbildung 38 (links)..... 42
- Abbildung 40: Thermogramme unterschiedlicher Bereiche der Probe mit Faserfehlern. Die farbige Umrandung entspricht dabei den jeweiligen Bereichen in Abbildung 38 (rechts). Der rote Kreis markiert hierbei die eingebrachte Fehlstelle..... 43
- Abbildung 41: Foto des Prüfkörpers mit Faserfehlern, in dem die mittels Lock-in-Thermografie untersuchten Bereiche farblich markiert sind. 43
- Abbildung 42: Phasenbilder der beiden Bereiche der Probe mit Faserfehlern. Die farbige Umrandung entspricht dabei den jeweiligen Bereichen in Abbildung 41. Die roten Kreise zeigen jeweils die eingebrachte Fehlstelle auf..... 44
- Abbildung 43: links: Messprinzip der Transmissionsmessung. Empfänger und Sender zeigen zueinander, die zu untersuchende Probe liegt dazwischen. rechts: Messaufbau mit der gemessenen Probe..... 45
- Abbildung 44: Luftultraschall-Messungen der Schweißnähte vor der Laminierung. Gemessen wurde in Transmission. Oben: Proben mit eingezeichnetem Messbereich (roter Rahmen). Unten: C-Bild der Messung, wobei die maximale Amplitude aus dem A-Bild dem einzelnen Pixel zugeordnet ist 45
- Abbildung 45: Luftultraschall-Messungen der Schweißnähte (direkt hintereinander) vor der Laminierung. Gemessen wurde in Transmission. Oben: Proben mit eingezeichnetem Messbereich (roter Rahmen). Unten: C-Bild der Messung, wobei die maximale Amplitude aus dem A-Bild dem einzelnen Pixel zugeordnet ist..... 46
- Abbildung 46: Luftultraschall-Messungen der Schweißnähte nach der Laminierung. Gemessen wurde in Transmission. Oben: Proben mit eingezeichnetem Messbereich (roter Rahmen). Unten: C-Bild der Messung, wobei die maximale Amplitude aus dem A-Bild dem einzelnen Pixel zugeordnet ist. 46
- Abbildung 47: Luftultraschallmessung einer Probe mit unterschiedlichen Faserfehlern. Oben: Probe mit eingezeichnetem Messbereich. Mitte: Faserorientierung vor der

Laminierung. Unten: C-Bild der Messung, wobei ein Pixelwert aus dem integrierten A-Bild berechnet ist.....	47
Abbildung 48: links: vorbelastete Zugproben; rechts: Ultraschallbild der jeweiligen Proben.....	48
Abbildung 49: C-Bild (2-dimensionale Abbildung) der Ultraschalluntersuchung an der Platte im hybriden Bereich; die Farbskala entspricht der Amplitude	49
Abbildung 50: C-Bild der Ultraschalluntersuchung an einem unbelasteten Probekörper im hybriden Bereich	50
Abbildung 51: C-Bild der Ultraschalluntersuchung an einem vorbelasteten Probekörper im hybriden Bereich	50
Abbildung 52: C-Bild der Ultraschalluntersuchung an einem unbelasteten mit RTM hergestellten Probekörper im hybriden Bereich.....	51
Abbildung 53: Verbinder mit Hinterschnittgeometrie	53
Abbildung 54: Vergleich der Kraft-Weg Kurven von optimierter (links) und bisheriger (rechts) Variante.....	53
Abbildung 55: metallischer Verbinder mit Hinterschnitt nach Zugversuch; asymmetrische Positionierung der Schweißnähte	53
Abbildung 56: optimierte Textilvarianten FAUSST (BF I-IV)	54
Abbildung 57: Vakuuminfusion der optimierten FAUSST Textilien.....	54
Abbildung 58: ermittelte Zugfestigkeiten an den FAUSST-Varianten.....	55
Abbildung 59: zweischnittige Epoxidharzklebstoff-Referenzklebungen.....	55