



DLR-IB-BT-AU-2023-167

**Automatisierter additiver
Materialauftrag bei faserverstärkten
thermoplastischen Strukturbauteilen
zur Vor- und Nachbearbeitung von
Schweißverbindungen (Masterarbeit)**

Adrian Ulmer
Stefan Jarka



Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt

Automatisierter additiver Materialauftrag bei faserverstärkten thermoplastischen Strukturbauteilen zur Vor- und Nachbearbeitung von Schweißverbindungen

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

„Master of Science“

Prüfer: Prof. Dr.-Ing. Michael Kupke

Betreut von: Dr.-Ing Stefan Jarka

Vorgelegt von: Adrian Ulmer

1420643

Wirtschaftsingenieurwesen (M.Sc.), Wintersemester 2022

Abgabetermin: 29.12.2022

Kurzzusammenfassung

Die Masterarbeit befasst sich mit der Weiterentwicklung des WeldSealer-Prozesses am Zentrum für Leichtbauproduktionstechnik (DLR) in Augsburg. Hierbei handelt es sich um ein Verfahren zum automatisierten additiven Auftrag von matrixgleichem Material auf endlosfaserverstärkte thermoplastische FVK mit definierter Geometrie und stoffschlüssiger Anbindung. Im Rahmen der Masterarbeit werden thermoplastische Lamine mit einem Energierichtungsgeber in Form eines kontinuierlich aufgetragenen Materialstegs mit dreieckigem Querschnitt versehen. Diese werden mittels kontinuierlichem Ultraschallschweißen gefügt. Zudem erfolgt eine Versiegelung der Schweißnaht mit werkstoffgleichem Material. Dies dient der Vermeidung von Medieneinlagerung und Rissinitiierung in der Fügezone. Die Analyse der Proben erfolgt mittels wassergekoppelter Ultraschallprüfung, Zugscherprüfung, Bruchflächenanalyse, sowie der mikroskopischen Betrachtung von Schliffbildern. Zusammenfassend zeigt der WeldSealer ein großes Potenzial hinsichtlich der additiven Fertigung und Modifikation faserverstärkter thermoplastischer Lamine. Die Applikation des Energierichtungsgebers erfolgt automatisiert, mit definierter Geometrie und stoffschlüssiger Anbindung, sowie hoher Wiederholgenauigkeit. Die hergestellten Schweißverbindungen weisen eine hohe Qualität der Fügenaht, sowie hohe mechanische Kennwerte auf. Außerdem ist es möglich, Kehlnähte zu erzeugen, die potenziell in der Lage sind mechanische Lasten zu übertragen.

Abstract

The master thesis is centered around advancement of the WeldSealer-process at the Center for Lightweight Production Technology (DLR) in Augsburg. This process allows for the automated additive application of matrix-like materials onto continuous fiber-reinforced thermoplastic FPRs with both a defined geometry and material bonded linkages. As part of this thesis, thermoplastic laminates were equipped with an energy director through a continuously applied stripe of material with a triangular cross-section. These were joined via continuous ultrasonic welding. Additionally, the weld seam was sealed with matrix-like material to avoid incorporation of foreign material and crack formation. Analyses of the samples was realized through water-coupled ultrasonic testing, tensile shear testing, analysis of fractured surfaces and inspection of microsections on a microscopic level. In summary, the WeldSealer-process demonstrated considerable potential with respect to both additive manufacturing and modification of fiber-reinforced thermoplastic laminates. The application of the energy director is an automated process, can be realized with a defined geometry and material bonded linkages and is characterized by a high degree of repeatability. The resulting welded joints show joining seams of high quality and have excellent mechanical properties. Additionally, fabrication of fillet welds that could potentially transmit mechanical stress is possible.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	VI
Tabellenverzeichnis.....	X
Abkürzungsverzeichnis	XI
1 Einführung.....	1
1.1 Darstellung des Forschungsbedarfs.....	2
1.2 Zielsetzung der Masterarbeit	3
2 Stand der Technik.....	4
2.1 Faserverbundkunststoffe	4
2.1.1 Polymere Matrixsysteme.....	4
2.1.2 Verstärkungsfasern.....	7
2.1.3 Textile Halbzeuge	8
2.2 Fügeverfahren endlosfaserverstärkter thermoplastischer Lamine.....	10
2.2.1 Ultraschallschweißen	13
2.2.2 Elektrisches Widerstandsschweißen.....	16
2.2.3 Induktionsschweißen	17
2.3 Zusatzwerkstoffe bei Strukturanwendungen	18
2.3.1 Thermoplastische additive Fertigung	18
2.3.2 Versiegelung von Flugzeugstrukturen.....	20
2.4 Analysemethoden von Fügestellen.....	23
2.4.1 Defekte und Versagensarten.....	23
2.4.2 Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung.....	24
2.4.3 Zerstörende Werkstoffprüfung	26
2.4.4 Bildgebende Prüfverfahren.....	28
3 Aufbau und Funktionsweise des WealdSealers.....	31
3.1 Beschreibung der Komponenten	31
3.2 Prozessablauf.....	31
3.3 Prozessparameter.....	31

4	Versuchsdurchführung	34
4.1	Vorgehensweise	34
4.2	Weiterentwicklung des WeldSealer-Prozesses	35
4.3	Auftrag des Energierichtungsgebers mittels WeldSealer	40
4.3.1	Geometrie des Energierichtungsgebers	40
4.3.2	Parameterfindung	42
4.3.3	Materialauftrag	44
4.4	Kontinuierliches Ultraschallschweißen.....	46
4.4.1	Schweißen mit WeldSealer-Energierichtungsgeber	47
4.4.2	Schweißen mit einer Zwischenschichtfolie als Energierichtungsgeber	52
4.5	Schweißnahtversiegelung mittels WeldSealer	53
5	Versuchsauswertung.....	58
5.1	Wassergekoppelte Ultraschallprüfung	58
5.2	Zugscherprüfung	61
5.3	Bruchflächenanalyse	64
5.4	Mikroskopie	66
6	Zusammenfassung und Ausblick.....	70
	Literaturverzeichnis.....	73
	Anhang A: ABC-Scans der Ultraschallprüfung	80
	Anhang B: Ergebnisse der Zugscherprüfung	84
	Anhang C: Schliffbilder Mikroskopie.....	86

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Schematische Darstellung der Kettenstruktur von Polymeren: a linearer, amorpher Thermoplast, b linearer, teilkristalliner Thermoplast, c chemisch vernetzter Elastomer, d chemisch vernetzter Duroplast (Schürmann, 2007, S. 85).....	5
Abbildung 2.2: Textile Halbzeuge (Eckstein et al., 2012, S. 32).....	9
Abbildung 2.3: Nomenklatur von FVK-Laminaten (Jarka, 2021)	9
Abbildung 2.4: Richtungsabhängiger E-Modul eines FVK (Eckstein et al., 2012)	10
Abbildung 2.5: Einteilung von Fügetechnologien (Neitzel et al., 2014, S. 469)	10
Abbildung 2.6: Prozessschritte beim Schweißen (Costa et al., 2012).....	11
Abbildung 2.7: Der Konsolidierungsprozess (Costa et al., 2012).....	12
Abbildung 2.8: Mischung durch Quetschfluss (Jarka, 2021).....	13
Abbildung 2.9: Einteilung der Schweißverfahren (Ageorges et al., 2001, S. 845).....	13
Abbildung 2.10: Schematischer Aufbau einer Ultraschallschweißanlage (Yousefpour et al., 2004)	15
Abbildung 2.11: Verfahrensprinzip des elektrischen Widerstandschweißens (Jarka, 2021)	16
Abbildung 2.12: Prinzip des Induktionsschweißens (Yousefpour et al., 2004, S. 328)....	17
Abbildung 2.13: Schematische Darstellung eines FDM-Extruders (Vaghani, 2020)	18
Abbildung 2.14: Schematische Darstellung eines Warmgas-Extrusionsschweißgeräts (Belfin, 2013).....	19
Abbildung 2.15: Belastungsverteilung bei unversiegelter Fügezone (Jarka, 2021).....	22
Abbildung 2.16: Belastungsverteilung in der Fügezone bei Versiegelung mit stoffschlüssiger Anbindung (Jarka, 2021).....	22
Abbildung 2.17: Versagensarten in FVK-Laminaten (Oterkus et al., 2016, S. 82)	24
Abbildung 2.18: Ultraschallprüfung mit dem Impuls-Echo-Verfahren (Sause, 2020)	25
Abbildung 2.19: Ultraschallprüfung der Fügezone einer US-Schweißung mit A-Scan (oben links), B-Scan (oben rechts) und C-Scan (unten).....	26
Abbildung 2.20: Spannungsverteilung in einer SLS-Probe (Zinnecker et al., 2020, S. 2).....	27
Abbildung 2.21: Single- und Double-Lap-Shear-Probe (Bergstrom, 2015)	27
Abbildung 2.22: Aufbau eines Durchlichtmikroskops (Kommer et al., 2019, S. 601)	29

Abbildung 2.23: Funktion eines Lichtmikroskops (Kommer et al., 2019, S. 601)	30
Abbildung 3.1: Der WeldSealer und seine Komponenten	29
Abbildung 3.2: Heißluftdüse mit Thermoelement	30
Abbildung 4.1: Schematische Darstellung der Probekörper	34
Abbildung 4.2: Überblick über die Vorgehensweise	35
Abbildung 4.3: Zuvor aufgeschmolzener Bereich (links) und neue Heißluftdüse (rechts)	36
Abbildung 4.4: Neues Hotend aus Kupfer	37
Abbildung 4.5: Befestigung und Formgeberschlitten alt (links) und neu (rechts)	38
Abbildung 4.6: Weiterentwicklung des WeldSealers.....	39
Abbildung 4.7: Geometrie des Energierichtungsgebers und des Formgeberschlittens	41
Abbildung 4.8: Auftrag des Energierichtungsgebers mittels WeldSealer	45
Abbildung 4.9: Auftrag des Energierichtungsgebers finale Proben	45
Abbildung 4.10: Endeffektor Ultraschallschweißen	46
Abbildung 4.11: Versuchsaufbau kontinuierliches Ultraschallschweißen mit WeldSealer- ERG.....	47
Abbildung 4.12: Dekonsolidierung des Laminats durch zu hohen Wärmeeintrag	48
Abbildung 4.13: Prozess kontinuierliches Ultraschallschweißen	49
Abbildung 4.14: Finale Parameter kontinuierliches Ultraschallschweißen mit WeldSealer- ERG.....	50
Abbildung 4.15: Kontinuierliches Ultraschallschweißen mit WeldSealer-ERG und ausgeprägtem Quetschfluss.....	50
Abbildung 4.16: Beschädigung der Oberfläche nach kontinuierlichem Ultraschallschweißen mit WeldSealer-ERG vor und nach Entfernen des überschüssigen Quetschflusses (Probe 15).....	51
Abbildung 4.17: Versuchsaufbau kontinuierliches Ultraschallschweißen mit ERG-Folie	52
Abbildung 4.18: Beschädigung der Laminatoberfläche durch zu hohen Energieeintrag..	52
Abbildung 4.19: Beschädigung der Oberfläche nach kontinuierlichem Ultraschallschweißen mit ERG-Folie (Probe 18 und 19).....	53

Abbildung 4.20: Schematische Darstellung der Geometrie und Abbildung des Formgeberschlittens für die Versiegelung der Fügezone.....	54
Abbildung 4.21: Versiegelungsprozess mittels WeldSealer	55
Abbildung 4.22: Versiegelte Schweißnaht mittels WeldSealer-Auftrag (Probe 17).....	57
Abbildung 5.1: ABC-Scan der Ultraschallprüfung von Probe FV1, Schweißrichtung rechts nach links (C-Scan)	59
Abbildung 5.2: ABC-Scan der Ultraschallprüfung von Probe WS1, Schweißrichtung rechts nach links (C-Scan)	60
Abbildung 5.3: ABC-Scan der Ultraschallprüfung von Probe WSV2, Schweißrichtung rechts nach links (C-Scan).....	61
Abbildung 5.4: Vergleich der Ergebnisse der Zugscherprüfung.....	62
Abbildung 5.5: Bruchflächen WS1, WS2, WSV1 und WSV2 (v. r. n. l.), jeweils Zugprobe 5.....	64
Abbildung 5.6: Bruchflächen FV2, Zugprobe 1 bis 6 (v. l. n. r.).....	65
Abbildung 5.7: Schliffbilder Probe F2 (a, c, e) und WS1 (b, d, f) in 250-facher und 1000-facher Vergrößerung mit Detailaufnahme der Fügezone (c, d) und ihres Randbereichs (e, f)	67
Abbildung 5.8: Schliffbilder Probe WSV2 im Verlauf der Schweißung	68
Abbildung 5.9: Schliffbild Versiegelung Probe WSV1	69
 Anhang A	
Abbildung A 1: ABC-Scan der Probe WS1	80
Abbildung A 2: ABC-Scan der Probe WS2	80
Abbildung A 3: ABC-Scan der Probe WSV1	81
Abbildung A 4: ABC-Scan der Probe WSV2	81
Abbildung A 5: ABC-Scan der Probe F1.....	82
Abbildung A 6: ABC-Scan der Probe F2.....	82
Abbildung A 7: ABC-Scan der Probe FV1	83
Abbildung A 8: ABC-Scan der Probe FV2	83

Anhang C

Abbildung C 1: Schliffbilder Proben WS1, WSV1, WSV2 (Anfang, Mitte, Ende), F1, F2 und FV2.....	87
Abbildung C 2: Schliffbilder Versiegelung Proben WSV1 und WSV2.....	87

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3.1: Liste der WeldSealer-Komponenten	31
Tabelle 4.1: Eigenschaften von VICTREX AM™ 200 FIL (Herstellerangaben)	36
Tabelle 4.2: Parameter vorangegangener WeldSealer-Studien	42
Tabelle 4.3: Auftrag des Energierichtungsgebers mittels WeldSealer finale Parameter...	44
Tabelle 4.4: Startparameter kontinuierliches Ultraschallschweißen	47
Tabelle 4.5: Prozessparameter WeldSealer Schweißnahtversiegelung	56
Tabelle 5.1: Übersicht finale Proben	58
Tabelle 5.2: Ergebnisse der Zugscherprüfung	63

Anhang B

Tabelle B 1: Detaillierte Ergebnisse der Zugscherprüfung	84
--	----

Abkürzungsverzeichnis

AFP	Automated Fiber Placement
CF	Carbonfasern
CFK	Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
DoE	Design of Experiment
DT	Destructive Testing
ERG	Energierichtungsgeber
FDM	Fused Deposition Modeling
FVK	Faserverbundkunststoffe
GFK	Glasfaserverstärkter Kunststoff
LMPAEK	Low Melt Polyaryletherketon
MFFD	Clean Sky 2 Multifunctional Upper Shell Fuselage Demonstrator
NDT	Non Destructive Testing
PAEK	Polyaryletherketon
PAN	Polyacrylnitril
PPS	Polyphenylensulfid
SLS	Single-Lap-Shear
ZLP	Zentrum für Leichtbauproduktionstechnik

1 Einführung

Bedingt durch ihre herausragenden Eigenschaften finden Verbundkunststoffe zunehmend Verbreitung im Bereich der Hochleistungsanwendungen. Hohe Festigkeit und Steifigkeit bei geringem Gewicht ermöglichen neue Anwendungsbereiche und bieten zahlreiche Vorteile gegenüber herkömmlichen Materialien. Hierzu werden verschiedene Werkstoffe miteinander kombiniert, mit dem Ziel die gewünschten jeweiligen Eigenschaften in einem neuen Strukturwerkstoff zu vereinen. Faserverbundwerkstoffe bestehen grundsätzlich aus Fasern, eingebettet in ein Matrixmaterial, wobei die Aufgabe der Faser darin besteht auftretende Last aufzunehmen. Das Matrixmaterial hingegen hat die Funktion, die Fasern zu stützen und einwirkende Kräfte zwischen den Fasern zu verteilen. Am häufigsten kommen Glas- und Carbonfasern zum Einsatz, eingebettet in eine Matrix auf Duromer- oder Thermoplastbasis. Aufgrund des günstigen Preises konnte sich Glasfaserverstärkter Kunststoff (GFK) im Bereich der Massenanwendungen durchsetzen. Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff (CFK) hingegen bleibt bisher aufgrund der energieintensiven Herstellung und der damit verbundenen hohen Kosten Hochleistungsanwendungen vorbehalten. Hierzu zählen der Automobilbau, die Medizintechnik, hochwertige Sportgeräte und als größter Abnehmer die Luft- und Raumfahrtbranche. Im Bereich der Luft- und Raumfahrt ist die Investitionsbereitschaft besonders hoch, bedingt durch das hohe Potential im Bereich der Gewichtsreduktion und damit verbundener Treibstoffeinsparung. Hierzu liegt die Investitionsbereitschaft in der Luftfahrt bei schätzungsweise 1.000 €, in der Raumfahrt bei 25.000 € pro Kilogramm Gewichtsreduktion. (Ehrenstein, 2006)

Aktuell dominieren aus Kostengründen Matrixwerkstoffe auf Basis von Duromeren. Die Verfestigung des Harzes erfolgt hierbei durch eine irreversible chemische Vernetzung. Ein Aufschmelzen und Verschweißen ist nicht möglich, daher stehen im Bereich der Fügetechnik nur Schraub-, Niet- und Klebeverbindungen zur Verfügung. Hierbei reduziert sich das Leichtbaupotential, bedingt durch das zusätzliche Gewicht der Verbindungselemente. Zusätzlich werden durch Bohrungen Fasern durchtrennt, wodurch sich an den Verbindungsstellen lokale Spannungskonzentrationen ergeben. Diesen muss mit Lochleibungslaminat und damit verbundenem Zusatzgewicht begegnet werden. (Neitzel et al., 2014, S. 42–44; Schürmann, 2007, S. 83–85) Vorteile hinsichtlich des Leichtbaupotentials versprechen hier Verbundwerkstoffe mit thermoplastischen Matrixsystemen. Diese lassen sich mit Hilfe verschiedener Prozesse verschweißen und ermöglichen es so, vollflächig geschlossene Fügeverbindungen herzustellen. Sie ermöglichen außerdem eine schnellere Verarbeitung, da keine zeitintensive chemische

Vernetzung notwendig ist. Weitere Vorteile im Vergleich zu Duroplasten sind die unkomplizierte Lagerung, die guten mechanischen Eigenschaften und ein höheres Recyclingpotential. Mit dem Wechsel auf thermoplastische Faserverbundkunststoffe ergeben sich aber auch neue Herausforderungen an den Herstellungsprozess und spezielle Anforderungen an die Fügeprozesse.

1.1 Darstellung des Forschungsbedarfs

Das Zentrum für Leichtbauproduktionstechnik (ZLP) in Augsburg ist als eigenständiger Standort des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) spezialisiert auf automatisierte und qualitätsgesicherte Produktionstechnik im industriellen Maßstab. Ein Schwerpunkt liegt in der Entwicklung von Montage- und Fügeverfahren für Leichtbaustrukturen im Bereich der Luft- und Raumfahrt. (DLR, 2022) Eines der laufenden Projekte ist das EU-Projekt Clean Sky 2 Multifunctional Upper Shell Fuselage Demonstrator (MFFD). Ziel ist die hochautomatisierte Fertigung einer acht Meter langen Flugzeugrumpfhalschale zu Demonstrationszwecken. Eine grundlegende Technologie für den thermoplastischen Rumpf ist das staubfreie Schweißen der Teile. Außerdem sollen die Kosten- und Massenvorteile eines solchen revolutionären Rumpfbaukonzepts verifiziert werden. (AID et al., 2019) Die Rumpfhaut wird hierbei mittels Thermoplastik Automated Fiber Placement (AFP) hergestellt. Anschließend werden die Stringer per Ultraschallschweißen mit der Haut verbunden. Der Rahmen wird durch Widerstandsschweißen integriert. Dies führt zu einer Gewichtsreduktion von ca. 10-15 % und einer Zeitersparnis von ca. 50 %, wobei die gleichen mechanischen Eigenschaften im Vergleich zu dem normalerweise verwendeten genieteten Aluminium erhalten bleiben. (Premium Aerotec, 2019)

Das Schweißen von CFK birgt einige Herausforderungen. Aufgrund des hohen Anteils an Kohlestofffasern ist eine hohe thermische und elektrische Leitfähigkeit vorhanden. Dies kann zu ungleichmäßiger Erwärmung, Delamination oder Verformung des Laminats führen. Außerdem verringert sich mit steigendem Faservolumengehalt die Menge an Matrixmaterial, die zum Aufschmelzen und somit zur Ausbildung des notwendigen Quetschflusses zur Verfügung steht. Um dem entgegenzuwirken, wird beim Ultraschallschweißen ein Energierichtungsgeber (ERG) auf die zu verbindenden Bauteile aufgebracht. (Neitzel et al., 2014, S. 478) Dies geschieht bisher mittels Zuschnitts und manueller Anheftung einer doppellagigen Zwischenschichtfolie bestehend aus Matrixmaterial. Durch ein automatisiertes Verfahren zum additiven Materialauftrag könnten die manuellen Applikationsschritte reduziert werden. Eine Automatisierung bietet

den Vorteil einer höheren Wiederholgenauigkeit, sowie mehr Flexibilität beim Aufbringen des ERG auf schwierige Bauteilgeometrien, z.B. Krümmungen und Biegungen. Auch die Möglichkeiten bei der Gestaltung der Geometrie des ERG selbst werden vergrößert. Eine weitere Herausforderung besteht in der Versiegelung der Fügezone und offener Bauteilkanten. Dies ist notwendig, um ein Eindringen von Medien wie Wasser in die Fügezone zu unterbinden und dient zusätzlich dem Schutz vor elektrochemischer Kontaktkorrosion (DOPAG, 2022a). Die Versiegelung der Bauteilkanten geschieht meist manuell mit Lacken oder Epoxidharzen, die der Fügezone mit matrixfremden Zusatzwerkstoffen wie Lacken oder Silikon (Esch et al., 2020; Miller & Lindberg, 2018). Hierbei findet keine nennenswerte Unterstützung der Fügung durch die Versiegelung statt. Die Versiegelung der Fügezone mit matrixgleichem Material und stoffschlüssiger Anbindung hingegen würde sowohl dem Schutz der Fügezone dienen als auch eine Kraftübertragung ermöglichen.

1.2 Zielsetzung der Masterarbeit

Ziel dieser Meisterarbeit ist den Prozess zum additiven Auftrag von matrixgleichem Material auf endlosfaserverstärkte thermoplastische FVK weiterzuentwickeln. Hierbei soll sowohl der Energierichtungsgeber als auch die Kantenversiegelung automatisiert, mit definierter Geometrie und stoffschlüssiger Anbindung aufgetragen werden. Zudem soll der Einfluss der veränderten Geometrie des ERGs auf den Schweißprozess und die Eigenschaften der Verbindung analysiert und mit Schweißungen mit herkömmlicher ERG-Folie verglichen werden. Ebenfalls soll der Einfluss der Versiegelung auf die Festigkeit von Verbindungen untersucht werden.

Hierzu werden Probekörper mit dem neuen ERG versehen und per kontinuierlichem Ultraschallschweißen verschweißt. Um Vergleichswerte zu erhalten, werden ebenfalls Schweißungen mit Zwischenschichtfolie als ERG hergestellt. Bei einem Teil der Proben wird die Schweißnaht versiegelt und zuletzt alle Proben hinsichtlich morphologischer Anbindung und Festigkeit analysiert und miteinander verglichen.

2 Stand der Technik

Um die Ergebnisse der Masterarbeit einzuordnen, werden im folgenden Kapitel zunächst die Grundlagen von Faserverbundkunststoffen (FVK) mit Schwerpunkt auf endlosfaserverstärkte thermoplastische Lamine dargestellt. Im Vordergrund stehen hierbei Fügetechnologien, im besonderen Schweißverfahren, sowie die nachgelagerte Versiegelung von Fügestellen im Flugzeugbau. Außerdem wird auf zerstörende- und zerstörungsfreie Prüfmethoden eingegangen und die möglichen Versagensarten von Fügestellen vorgestellt.

2.1 Faserverbundkunststoffe

Faserverbundkunststoffe, auch Faserverstärkte Kunststoffe genannt, bestehen aus Verstärkungsfasern, eingebettet in eine Polymermatrix. Hierbei wird nach Art, sowie Länge der Fasern, Faserorientierung und Matrixmaterial unterschieden.

2.1.1 Polymere Matrixsysteme

Die Eigenschaften eines Faserverbundkunststoffs werden entscheidend von der Matrix bestimmt. Abgesehen von der generellen Formgebung des Werkstücks besteht ihre Aufgabe darin, die Fasern in der gewünschten geometrischen Anordnung zu fixieren und die scheuerempfindlichen Fasern auf Abstand zu halten. Durch ihre starke Anhaftung leitet sie Kräfte sowohl in die einzelne Faser als auch von einer Faser zur anderen, bzw. von einer Laminat-Schicht zur nächsten. Außerdem übernimmt sie selbst mechanische Lasten, insbesondere bei Schub- und Druckspannung, sowie Beanspruchung quer zur Faserrichtung. Zusätzlich schützt die Matrix die Faser vor Umgebungseinflüssen, wie mechanischem Abrieb oder der Einwirkung chemischer Reagenzien. Über die Auswahl des Matrixwerkstoffes kann ein Großteil der Eigenschaften eines FVKs entscheidend beeinflusst werden. Hierzu zählen unter anderem Dichte, Steifigkeits- und Festigkeitswerte, Kriech- und Relaxationsverhalten, Schlagzähigkeit, Temperatur-Einsatzgrenzen, thermische Ausdehnungskoeffizienten, Wärmeleitfähigkeiten, Chemikalienbeständigkeit, Witterungs- und Alterungsbeständigkeit und Brandverhalten. (Schürmann, 2007, S. 83–84)

Grundsätzlich kommen als polymere Matrixsysteme Duroplaste, Thermoplaste oder Elastomere in Betracht. In Abbildung 2.1 sind die Hauptgruppen der Polymere und deren Kettenstruktur schematisch dargestellt.

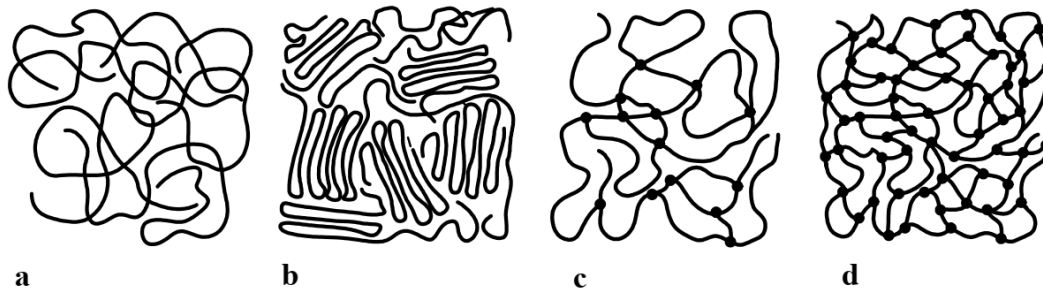


Abbildung 2.1: Schematische Darstellung der Kettenstruktur von Polymeren: a linearer, amorpher Thermoplast, b linearer, teilkristalliner Thermoplast, c chemisch vernetzter Elastomer, d chemisch vernetzter Duroplast (Schürmann, 2007, S. 85)

Duroplaste finden aktuell in der Luft- und Raumfahrt am häufigsten Verwendung. Dies liegt in der langjährigen Erfahrung hinsichtlich der Materialeigenschaften und Verarbeitung begründet. Aufgrund vieler Vorteile, wie schnellerer Verarbeitungsgeschwindigkeit, Schweißbarkeit und hohen mechanischen Eigenschaften, wird in den letzten Jahren zunehmend an Thermoplastischen Matrixsystemen geforscht. Da Elastomere Matrixsysteme in der Luft- und Raumfahrt eine untergeordnete Rolle spielen, wird im Folgenden nicht näher darauf eingegangen. (Schürmann, 2007, S. 84)

Duroplaste

Duroplaste, auch Duromere genannt, bestehen aus räumlich stark vernetzten Kettenmolekülen. Ihr endgültiger, fester Formstoff entsteht durch eine chemische Vernetzungsreaktion, der sogenannten Härtung. Um diese Reaktion in Gang zu setzen, wird dem Reaktionsharz ein sogenannter Härter hinzugefügt. Harz und Härter vernetzen sich räumlich engmaschig zu hochmolekularen Stoffen, siehe hierzu Abbildung 2.1. Die Anordnung der Molekülketten ist ungeordnet, d.h. Duroplaste sind amorph. Die chemische Vernetzungsreaktion zwischen dem Reaktionsharz und dem Härter wird durch Wärme, Strahlung oder Katalysatoren gestartet und insbesondere durch höhere Temperaturen beschleunigt. Duroplasten bieten einige Vorteile wie ein hohes Elastizitätsmodul, geringe Kriechneigung und sehr gute thermische und chemische Beständigkeit. Sie sind im ausgehärteten Zustand nicht löslich. Außerdem ist ihre Verarbeitung unproblematisch, da sie meist sehr dünnflüssig gehalten werden können, sodass die Benetzung der Fasern einfach und zuverlässig erfolgt. Nachteilig ist allerdings, dass Duromere aufgrund ihrer unlöslichen Vernetzung nicht aufschmelzbar und demzufolge nicht schweißbar sind. Als Folge dessen ist ein Recycling nur schwer möglich, duroplastische Verbunde werden meist zermahlen und als Füllstoffe verwendet. Vorwiegend werden Epoxid-Harze, Polyester-Harze und Vinylester-Harze als Matrixsysteme verwendet. Vereinzelt kommen aufgrund

des günstigen Verhaltens bei Bränden Phenol-Harze, sowie Polyimide und Bismaleinimide für Hochtemperaturanwendungen zum Einsatz. (Schürmann, 2007, S. 84–85)

Thermoplaste

Im Gegensatz zu Duroplasten bestehen Thermoplaste aus linearen oder verzweigten Makromolekülen, die räumlich nicht vernetzt sind, siehe Abbildung 2.1. Ihr Zusammenhalt beruht auf Nebenvalenzbindungen aufgrund von Verfilzungen, Verhakungen und Verschlaufungen, sowie Kristallitbildung. Sie bewirken den Zusammenhalt der chemisch nicht gebundenen Makromoleküle und verhindern deren Abgleiten bei Einwirkung von Kräften. Erst bei einer Temperaturzunahme vergrößert sich aufgrund der zunehmenden Molekularbewegung der Kettenabstand, wodurch der Thermoplast plastisch verformbar wird. Dieser Effekt nimmt mit steigender Temperatur zu, bis die physikalischen Bindungen überwunden werden und die Ketten voneinander abgleiten können. Der Thermoplast liegt somit als hochviskose Flüssigkeit vor. Dieser Vorgang ist reversibel und kann beliebig oft wiederholt werden. Im Gegensatz zu Duromeren bieten Thermoplaste somit den großen Vorteil, dass sie schweißbar und durch Aufschmelzen einfach und kostengünstig recyclebar sind. (Schürmann, 2007, S. 84–85)

Thermoplaste lassen sich anhand ihrer Struktur in teilkristallin und amorph einteilen. Amorph bedeutet, dass, wie bei den Duromeren, die Molekülketten völlig ungeordnet zueinander vorliegen. Typische Merkmale sind die Transparenz und erhöhte Schlagzähigkeit. Bei teilkristallinen Thermoplasten hingegen liegen innerhalb einer amorphen Umgebung Bereiche mit orientiert ausgerichteten Molekülketten vor, siehe Abbildung 2.1. Durch die parallele Anordnung wird der Abstand der Molekülketten verringert, sodass die Nebenvalenzkräfte stark ansteigen. Folglich erhöht sich mit dem Anteil kristalliner Bereiche, Kristallinitätsgrad genannt, der Elastizitätsmodul, die Härte, die Zugfestigkeit, die Lösungsmittel-Beständigkeit und die Schmelztemperatur des Thermoplasten. Andererseits geht damit eine Abnahme der Schlagzähigkeit und der Transparenz einher. Bedingt durch den inhomogenen Aufbau existiert kein Schmelzpunkt, sondern ein Schmelzbereich, da kristalline und amorphe Bereiche bei unterschiedlichen Temperaturen aufschmelzen. Als Matrixmaterial ist Polypropylen, Polybutylenterephthalat und Polyethylenterephthalat verbreitet. In der Luft- und Raumfahrt finden vor allem Hochtemperaturkunststoffe Verwendung. Beispiele hierfür sind Polyphenylensulfid (PPS), sowie Polyaryletherketon (PAEK) und Polyetherimid. (Schürmann, 2007, S. 84–86)

2.1.2 Verstärkungsfasern

Fasern können aufgrund ihrer Herkunft eingeteilt werden in Natur-, Organische, Anorganische und Metallische Fasern. Einen nennenswerten Marktanteil bei hoch beanspruchten Faser-Kunststoff-Verbunden haben nur die Glas-, die Kohlenstoff- und die Aramidfaser erreicht, wobei Glasfasern den mit Abstand größten Anteil innehaben. Der große Vorteil besteht in ihren im Vergleich zu anderen Verstärkungsfasern niedrigen Herstellungskosten. Für Hochleistungsanwendungen wie Strukturbauteile in der Luft- und Raumfahrt ist ihr Elastizitätsmodul jedoch zu gering. Hierbei kommen in erster Linie endlosfaserverstärkte Kohlenstofffasern zum Einsatz. (Schürmann, 2007, S. 26–29)

Die Aufgabe der Faser im Werkstoffverbund besteht im Wesentlichen darin, die am Bauteil anliegenden Lasten aufzunehmen. Dies erfordert hohe Steifigkeiten und Festigkeiten. Voraussetzung hierfür sind starke atomare Bindungen. Für den Einsatz im Leichtbau sollte die Faser zudem eine möglichst geringe Dichte aufweisen. Generell weisen die meisten Werkstoffe in Faserform höhere Festigkeiten und zum Teil höhere Steifigkeiten auf, als wenn sie in kompakter Form vorliegen. Dies begründet sich im Wesentlichen auf folgende Mechanismen.

Einfluss des Größeneffekts. Hierbei wird vom Modell des schwächsten Gliedes einer Kette ausgegangen. Je größer das Werkstoffvolumen, desto höher die Anzahl festigkeitsreduzierender Fehlstellen. Durch die Verwendung von Fasern wird das beanspruchte Werkstoffvolumen in sehr viele kleine Volumina aufgeteilt. Das Versagen einer Faser und die damit verbundene Rissinitiierung bleibt somit auf die einzelne Faser begrenzt. Zusätzlich mit den geringen Faserquerschnitten auch die Größe der Fehlstellen und damit ihre Wirksamkeit reduziert.

Einfluss der Orientierung. Fertigungsverfahren wie Ziehen, Spinnen und Verstrecken haben einen großen Einfluss auf die Festigkeits- und Steifigkeitswerte. Die Verbesserung beruht auf der Orientierung der stärksten atomaren Bindungen in Faserlängsrichtung. Die verbesserten Eigenschaften in Faserlängsrichtung gehen jedoch mit reduzierten Werten quer zur Faserrichtung einher. Stark orientierte Fasern zeigen demzufolge ein anisotropes Verhalten.

Verminderung von Fehlstellen und Kerben. In einem Werkstoffvolumen sind Fehlstellen statistisch verteilt und orientiert. Deren Kerbwirkung wirkt sich gravierend auf die Festigkeit der Faser aus, besonders ungünstig sind quer zur Belastung orientierte Fehlstellen. An ihren Rändern finden sich große Spannungsüberhöhungen, sodass schon bei geringer Belastung der Bruchwiderstand des Werkstoffs lokal überschritten wird. Durch Ausziehen eines Materials zu einer Faser werden die Fehlstellen in Faserlängsrichtung ausgerichtet und zusätzlich gelängt und abgeplattet. Die

Spannungsüberhöhung wird infolge der länglichen Form sehr stark gemindert, wodurch Risswachstum erst bei sehr hohen Belastungen entsteht. (Schürmann, 2007, S. 21–24)

Die höchsten Steifigkeits- und Festigkeitswerte weisen Kohlenstofffasern auf. Sie erreichen Zugfestigkeiten, die 6fach höher als bei Stahl sind bzw. besitzen einen 3fach höheren E-Modul. Dies macht sie besonders attraktiv für Strukturelemente im Flugzeugbau. Die Herstellung erfolgt aus Polyacrylnitril (PAN) Fasern, die zuerst karbonisiert und anschließend, je nach gewünschten Eigenschaften, graphitisiert werden. Weitere wichtige Eigenschaften sind ihre geringe Dichte, hohe Ermüdungsfestigkeit, Korrosionsbeständigkeit, starke Anisotropie, hohe thermische und elektrische Leitfähigkeit, ein negativer Wärmeausdehnungskoeffizient in Faserrichtung und eine hohe Temperaturbeständigkeit. Kohlenstofffasern verhalten sich jedoch spröde und sind daher sehr schlagempfindlich. Da Brüche und Delaminationen mit bloßem Auge nicht erkannt werden können, müssen Bauteile oft aufwendig zerstörungsfrei getestet werden. Ein weiterer Nachteil sind die sehr hohen Kosten. (Kupke, 2020)

2.1.3 Textile Halbzeuge

Bei der Herstellung von Laminaten lässt sich generell aufgrund der Faserlänge unterscheiden, wobei die Fasern entweder als Kurzfasern ($< 1\text{ mm}$), Langfasern (von 1 bis 50 mm) oder Endlosfaser vorliegen können. Dabei gilt, je länger die Fasern, umso größer ist ihre Verstärkungswirkung. Kurze Fasern hingegen ermöglichen auch starke Umformungsprozesse mit großen Fließwegen, wie Pressen oder Spritzgießen. (Eckstein et al., 2012, S. 31–33)

Um Lamine herzustellen, werden die einzelnen Faserfilamente zu sogenannten Rovings gebündelt und zu textilen Halbzeugen weiterverarbeitet. Die Halbzeuge unterscheiden sich durch unterschiedliche Textilstrukturen und Bindungsarten. Zu den häufigsten Textilhalbzeugen zählen Gelege, Gestricke, Geflechte und Gewebe. Diese werden in Abbildung 2.2 gezeigt. Bei Gelegen handelt es sich um eine oder mehrere parallele Lagen, die per Klebevliesen oder stabilisierenden Schussfäden vernäht werden. Gestricke entstehen durch flächige Maschenbildung aus Rovings, ebenso wie Geflechte, die jedoch meist an eine Bauteilform angepasst sind. Gewebe bestehen aus sich zwei in Kette- und Schussrichtung überkreuzende Fäden, was sich vorteilhaft auf die Drapierbarkeit auswirkt, da das ungehinderte Abgleiten der einzelnen Fäden verhindert wird. (Eckstein et al., 2012, S. 31–33)

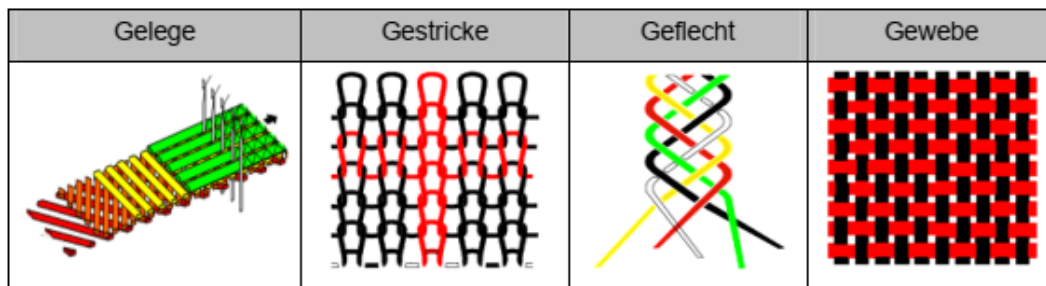


Abbildung 2.2: Textile Halbzeuge (Eckstein et al., 2012, S. 32)

Die höchsten spezifischen Werkstoffeigenschaften ergeben sich bei sogenannten Unidirektionalen-Laminaten (UD). Hierbei handelt es sich um Gelege, in denen die Fasern nur in eine Richtung ausgerichtet sind. Quer zur Faserrichtung fallen die mechanischen Eigenschaften jedoch stark ab, es herrscht eine starke Anisotropie. Durch einen Kreuzverbund [0/90] kann die Steifigkeit und Festigkeit in Querrichtung zwar erhöht werden, allerdings fallen die Absolutwerte durch den Anteil der querorientierten Fasern ab. Durch eine Ausrichtung [0, ± 45 , 90] kann ein quasi-isotropes Verhalten erreicht werden, siehe hierzu Abbildung 2.3 und Abbildung 2.4. (Jarka, 2021)

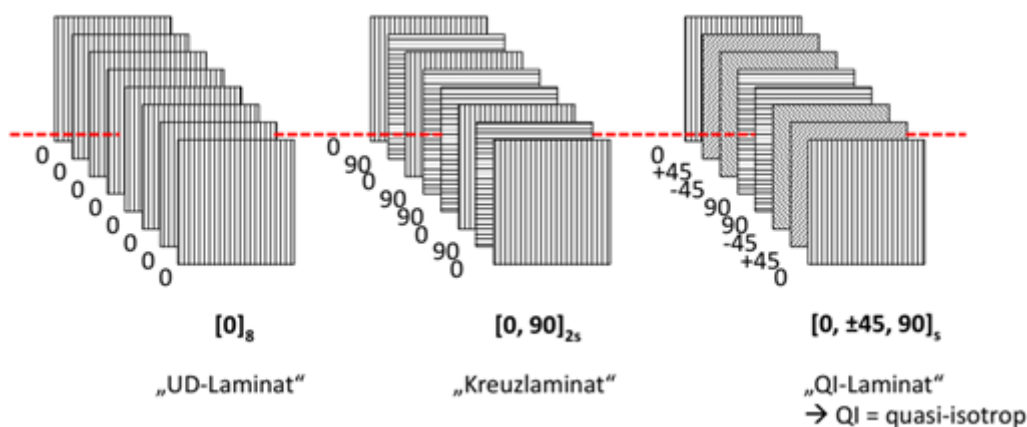


Abbildung 2.3: Nomenklatur von FVK-Laminaten (Jarka, 2021)

Die Matrixinfusion der textilen Halbzeuge kann sowohl während des Bauteil-Fertigungsprozesses erfolgen als auch als vorgelagerter Prozess. Bei der vorgelagerten Infiltration handelt es sich um sogenannten Pre-Impregnet-Sheets, kurz Prepregs. (Kupke, 2020)

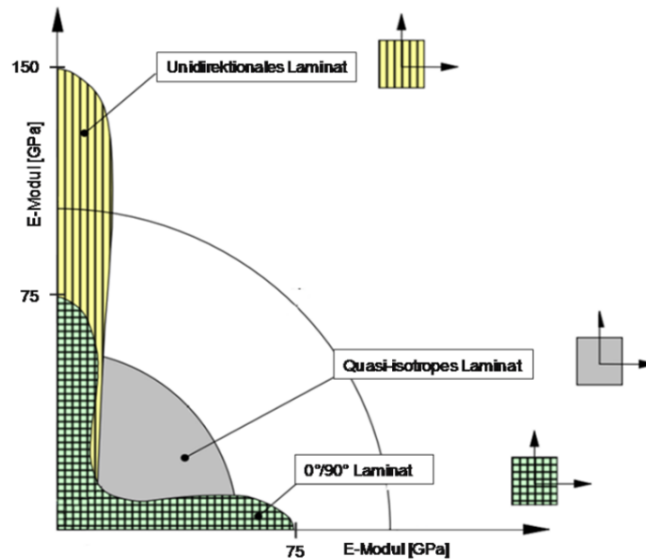


Abbildung 2.4: Richtungsabhängiger E-Modul eines FVK (Eckstein et al., 2012)

2.2 Fügetechniken endlosfaserverstärkter thermoplastischer Lamine

Laut Neitzel et al. lassen sich die Fügetechnologien von Verbundwerkstoffen, auch unter Berücksichtigung von Reparaturverfahren, in lösbare und nicht lösbare Verbindungen einteilen. Hier kann erneut eine Unterteilung in Kraftschluss, Formschluss und Stoffschluss erfolgen. Siehe hierzu Abbildung 2.5.

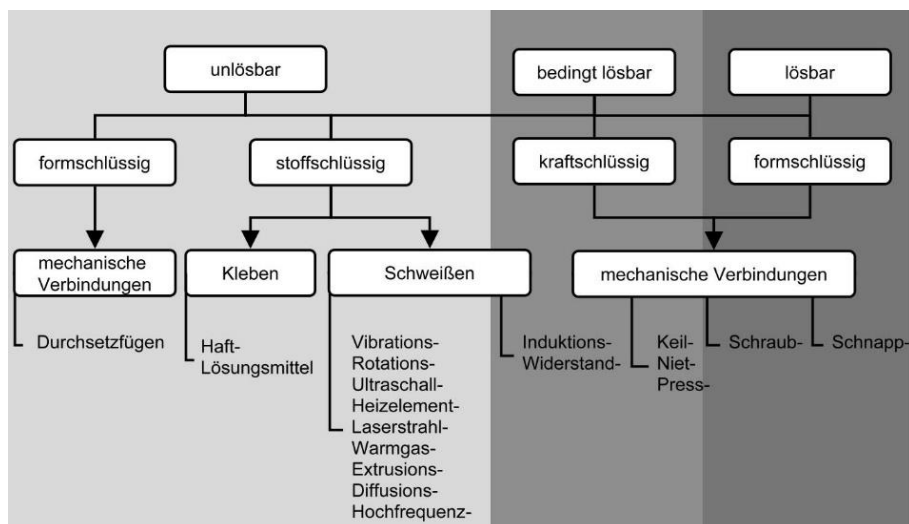


Abbildung 2.5: Einteilung von Fügetechnologien (Neitzel et al., 2014, S. 469)

Während für duroplastische FVK nur mechanische Verbindungstechniken, wie Nieten und Schrauben, oder wärmearme, wie das Kleben, möglich sind, stehen für die thermoplastischen FVK zusätzlich Schweißverfahren zur Verfügung. Typische Probleme, die bei der Verwendung mechanischer Verbindungsmethoden auftreten, werden durch Spannungskonzentrationen, galvanische Korrosion, Ungleichheit der Wärmeausdehnungskoeffizienten und Beschädigung der Verstärkungsfasern durch Bohren verursacht. Mithilfe von Schweißverbindungen können diese Probleme gelöst werden. (Yousefpour et al., 2004) Dieser Vorteil macht die Verwendung von Thermoplasten und damit verbunden die Möglichkeit des Schweißens sehr attraktiv. Ebenso wie beim Kleben kann hierbei allerdings der faserverstärkte Effekt in der Fügezone nicht genutzt werden. (Jarka, 2021)

Das Schweißen thermoplastischer Lamine kann prinzipiell in drei physikalische Prozessschritte untergliedert werden: Das Aufheizen des Thermoplasts in einen schmelzflüssigen Zustand, das Konsolidieren (Verbindungsprozess unter Druck) und das Abkühlen unter Druck bis zur Verfestigung. Die Druckbeaufschlagung in der Fügezone ist aus mehreren Gründen notwendig. Zum einen kommen die Schweißpartner dadurch erst in unmittelbaren Kontakt zueinander, zum andern wird dadurch der Quetschfluss eingeleitet und Luftblasen aus der Fügezone entfernt. Außerdem wird beim Aufschmelzen die in den Fasern gespeicherte elastische Energie frei, was ohne Druckbeaufschlagung zu Deformationen und Dekonsolidierung führen würde. (Ageorges et al., 2001) Abbildung 2.6 zeigt ein typisches Temperatur- und Druckprofil des Fügeprozesses in Abhängigkeit der Zeit.

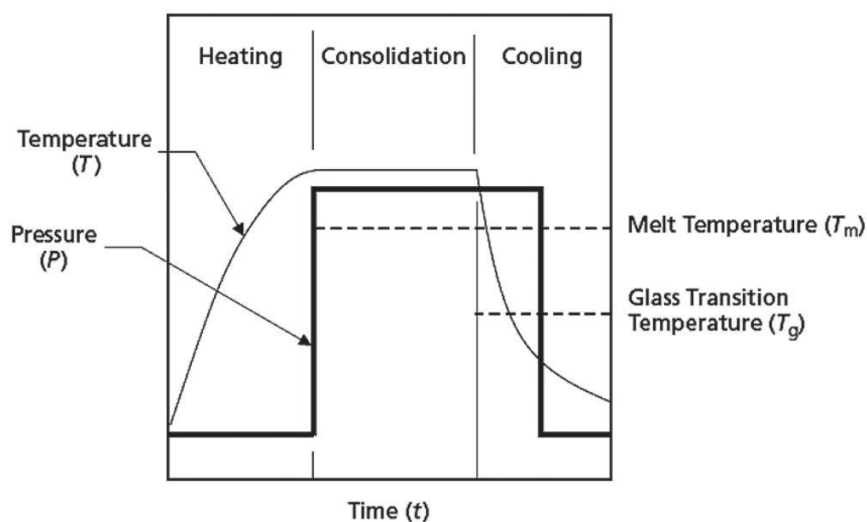


Abbildung 2.6: Prozessschritte beim Schweißen (Costa et al., 2012)

Die Haftfestigkeit in der Grenzfläche beim Fügen von Thermoplasten beruht auf drei verschiedenen Bindungsmechanismen. Die spontane Haftung infolge des Kontakts basiert auf intermolekularen Kräften wie z.B. Van der Waals- Kräfte. Sie stellt dabei eine im Vergleich zu den anderen Haftmechanismen schwache Anhaftung dar. Ein weiterer Mechanismus ist die molekulare Durchdringung infolge der Interdiffusion von Polymerketten in Grenzfläche. (Potente, 2004) Abbildung 2.7 veranschaulicht das Prinzip der Interdiffusion.

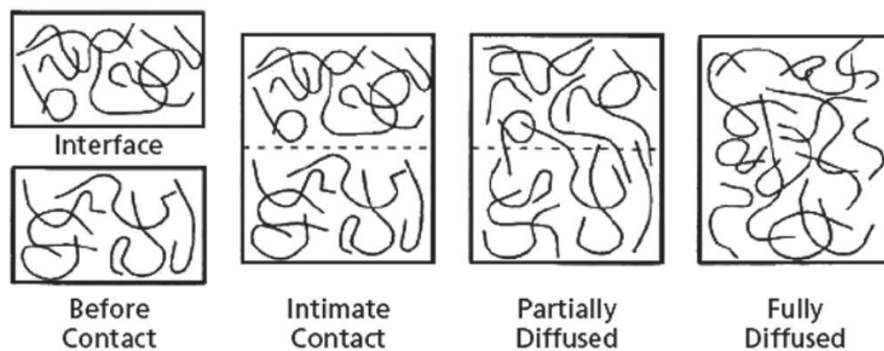


Abbildung 2.7: Der Konsolidierungsprozess (Costa et al., 2012)

Hierbei handelt es sich um einen zeitintensiven Mechanismus, bei dem die Kettenenden über die Grenzfläche wandern und sich Verhakungen oder Verschlaufungen mit den benachbarten Lagen ausbilden. Bei einem idealen Prozessverlauf ist die Fügestelle nicht mehr vom Grundwerkstoff unterscheidbar. Dieser Prozess ist besonders relevant bei der Co-Konsolidierung, beim Schweißen von Laminaten spielt die Interdiffusion aufgrund der kurzen Zykluszeiten allerdings eine untergeordnete Rolle. Der für das Schweißen wichtigste Haftmechanismus ist die Mischung durch Quetschfluss. Hierbei kommt es wie in zu einer durch das Strömungsfeld verursachten Molekülver Streckung und einer anschließenden Relaxation und den damit verbundenen Platzwechselvorgängen durch die Grenzfläche, zu sehen in Abbildung 2.8. (Potente, 2004)

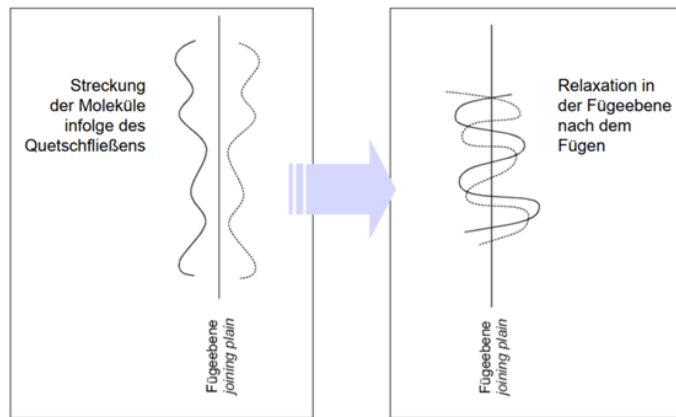


Abbildung 2.8: Mischung durch Quetschfluss (Jarka, 2021)

Die Schweißverfahren können, je nach Art der Wärmeeinbringung, in vier Gruppen eingeteilt werden, siehe hierzu Abbildung 2.9. Dazu gehören die Materialerwärmung (engl.: Bulk Heating), Reibungswärme (engl.: Friction Heating), elektromagnetische Erwärmung (engl.: Electromagnetic Heating) und zwei-stufige Erwärmungsverfahren (engl.: Two-stage Techniques). Laut Ageorges et al. sind die drei vielversprechendsten Schweißtechnologien für endlosfaserverstärkte thermoplastische Lamine das Ultraschallschweißen, das Widerstandsschweißen und das Induktionsschweißen.

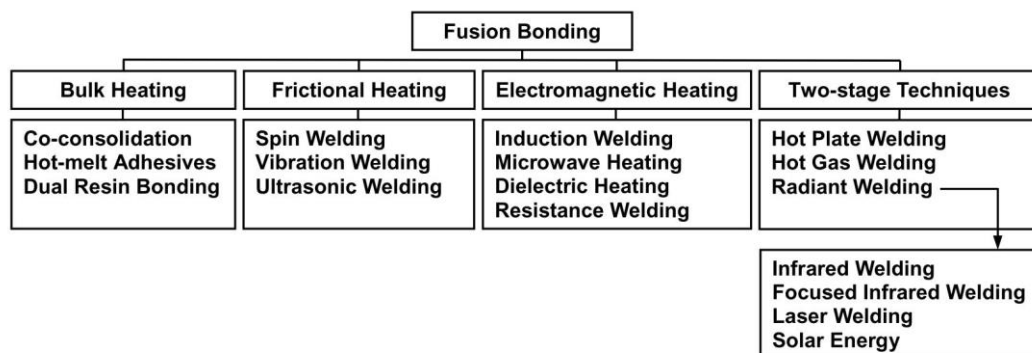


Abbildung 2.9: Einteilung der Schweißverfahren (Ageorges et al., 2001, S. 845)

2.2.1 Ultraschallschweißen

Das Ultraschallschweißen zählt zu den wichtigsten Fügeverfahren für Kunststoffe in der Serienfertigung. Charakteristisch für das Verfahren sind kurze Zykluszeiten im Bereich von 0,1 bis 1,0 Sekunden. (AVK, 2013) Die zu verbindenden Bauteile werden unter Aufbringung einer Fügekraft mit einer hochfrequenten mechanischen Schwingung beaufschlagt. Üblich sind hierbei Frequenzen von 20 bis 70 kHz. Beim Kunststoff-

Ultraschallschweißen ist die Schwingungsrichtung typisch senkrecht zur Füge-naht ausgerichtet. Die Erwärmung der Fügezone erfolgt durch Absorption der Schwingungen, durch Reflexion der Schwingungen in der Fügezone und durch Grenzflächenreibung der Fügeflächen. Durch das gezielte Positionieren eines unverstärkten, matrixgleichen Thermoplasten in Form einer Folie in der Fügezone, wird die Schwingung in diesem Bereich stärker gedämpft als im restlichen Laminat. Infolge von Dissipation erfolgt eine Aufschmelzung des thermoplastischen Materials. Die eingebrachte Folie wird auch als Energierichtungsgeber bezeichnet. Die Druckbeaufschlagung während der Schweiß- und Kühlzeit erfolgt über die Sonotrode. (Neitzel et al., 2014, S. 478)

Alternativ zur Folie als Energierichtungsgeber werden bei unverstärkten und kurzfaserverstärkten Kunststoffen während des Herstellungsprozesses der Fügepartner typischerweise umlaufende, angespritzte Materialstege mit dreieckigem Querschnitt in die Fügezone integriert. Diese ermöglichen eine gezielte und konzentrierte Energieeinleitung und initiieren, bedingt durch ihr Aufschmelzen, den für die Haftung notwendigen Quetschfluss. (*Taschenbuch DVS-Merkblätter Und -Richtlinien*, 2020, S. 774–779) Zudem weisen dreieckige Geometrien als Energierichtungsgeber, bedingt durch die Wärmekonzentration in der Spitze des Dreiecks, ein schnelleres und gleichmäßigeres Aufschmelzverhalten als flächige Alternativen auf. (Koyanagi et al., 2022) Untersuchungen von Villegas und Palardy (2017) kommen zu dem Schluss, dass dreieckige ERG etwa zweimal schneller aufschmelzen und kollabieren als flache ERG. Sie schränken jedoch ein, dass die bis zum Erreichen der maximalen Schweißnahtfestigkeit benötigte Schweißzeit nicht wesentlich geringer ist. Raza et al. (2019) vergleicht zudem dreieckige und halbkreisförmigen Geometrien als Energierichtungsgeber und kommt zu dem Schluss, dass mit dreieckigen Energierichtungsgebern höhere Zugscherfestigkeiten erreicht werden.

In Abbildung 2.10 ist das Wirkprinzip einer Ultraschallschweißanlage dargestellt. Die Ultraschallschweißanlage besteht zunächst aus einer Energieversorgungseinheit und einem piezoelektrischen oder magnetostriktiven Konverter. Im Konverter wird der elektrische Strom mit hoher Frequenz durch den piezoelektrischen bzw. magnetostriktiven Effekt in Schwingungen umgewandelt. Die Amplitude der Schwingung ist zu Beginn noch sehr klein, daher wird dem Konverter ein Booster nachgeschaltet, welcher die Schwingung verstärkt. Die verstärkte Schwingung erreicht nach dem Booster die Sonotrode, worüber sie in die Fügezone eingetragen wird. (Yousefpour et al., 2004)

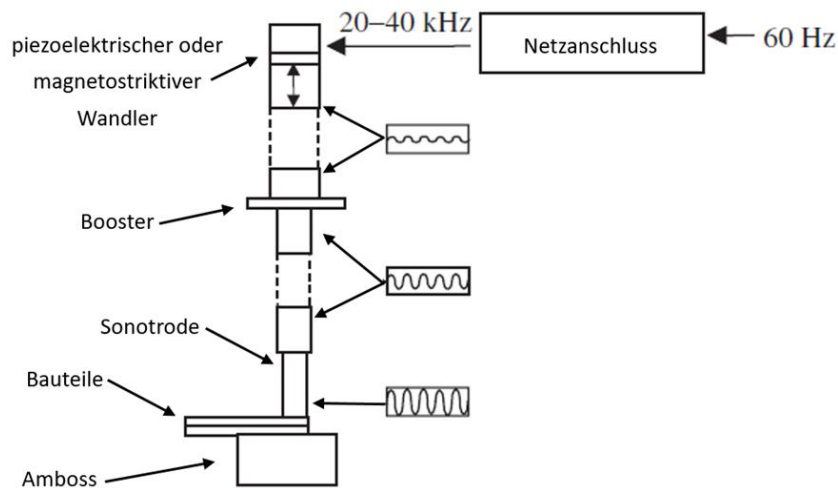


Abbildung 2.10: Schematischer Aufbau einer Ultraschallschweißanlage (Yousefpour et al., 2004)

Der Schweißprozess kann entweder zeitgesteuert, energiegesteuert oder verdrängungsgesteuert verlaufen. Bei zeitgesteuertem Ultraschallschweißen wird vor der Schweißung eine feste Zeit der Vibrationsphase eingestellt, bei energiegesteuertem Schweißen wird ein Energiewert festgelegt und die Schweißzeit an die Leistung angepasst. Beim verdrängungsgesteuerten Schweißen wird so lange Energie in die Fügezone eingetragen, bis die initiale Distanz zwischen den beiden Fügepartnern verdrängt wird. Die initiale Distanz kann z.B. auf die Höhe des Energierichtungsgebers festgelegt werden. Die Leistung wird beim zeit- und verdrängungsgesteuerten Schweißprozess automatisch so angepasst, dass die eingestellte Amplitude erhalten bleibt. (Neitzel et al., 2014, S. 478–479)

Da die Größe der Schweißanlage begrenzt ist, kann entweder sequentielles Ultraschallschweißen (Multi-Spot-Schweißen) oder kontinuierliches Ultraschallschweißen angewendet werden, um größere Verbindungsflächen herzustellen. Beim sequentiellen Ultraschallschweißen werden mehrere Schweißpunkte mit definiertem Abstand nebeneinander gesetzt. Das kontinuierliche Ultraschallschweißen hingegen basiert auf der Schweißung mit konstanter Bewegung der Sonotrode entlang einer festgelegten Schweißnaht.

Untersuchungen zum Ultraschallschweißen von CF/PPS-Laminaten zeigen für eine einfach überlappte Geometrie eine Fügenahtfestigkeit von bis zu 36 MPa. In einigen Untersuchungen wurde Ultraschallschweißen auch zum Verbinden von FVK-Metall-Hybridstrukturen eingesetzt und die prinzipielle Tauglichkeit nachgewiesen. (Heckl, 2022; Neitzel et al., 2014)

2.2.2 Elektrisches Widerstandsschweißen

Beim elektrischen Widerstandsschweißen wird die Erwärmung eines stromdurchflossenen Leiters (Schweißelement) aufgrund seines ohmschen Widerstandes genutzt. Bei dem Schweißelement kann es sich um ein Metall-Mesh oder CF-Prepregs handeln, welches sich zwischen den zu verschweißenden CFK-Laminaten befindet. Um ein Einkoppeln des Stroms in die Lamine zu verhindern, wird je eine Glasfaserlage zwischen Schweißelement und Fügepart ergänzt, welche als Isolator dient. Aufgrund der geringeren Festigkeit von Glasfasern handelt es sich hierbei jedoch um eine potenzielle Schwachstelle innerhalb der Fügezone. Das Schweißelement verbleibt nach dem Schweißprozess in der Fügefläche und sollte daher mit dem Material der Fügekomponenten kompatibel sein. Bei Metall-Mesh besteht beispielsweise die Gefahr der Kontaktkorrosion. (Yousefpour et al., 2004, S. 334) Das Verfahrensprinzip ist in Abbildung 2.11 veranschaulicht.

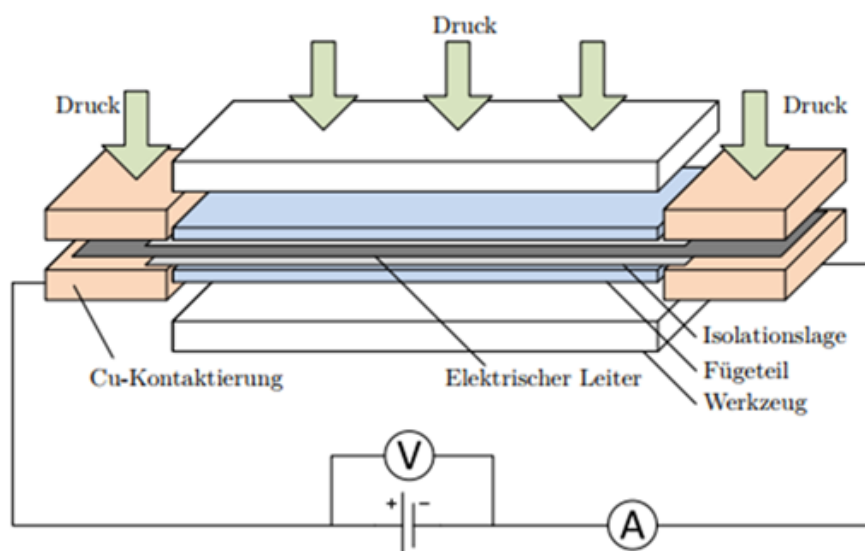


Abbildung 2.11: Verfahrensprinzip des elektrischen Widerstandsschweißens (Jarka, 2021)

Wird Strom und Spannung über einen gewissen Zeitraum am Schweißelement angelegt, erwärmt sich dieses aufgrund seines ohmschen Widerstandes und schmilzt die angrenzenden Laminatschichten der beiden Fügepartner auf. Während des gesamten Prozesses wird Druck auf die Fügezone ausgeübt, um eine Konsolidierung zu erreichen und um Dekonsolidierung der Lamine zu vermeiden. Durch das Schweißelement wird zusätzlich Matrixmaterial in die Fügezone eingebracht, wodurch die Bildung von Quetschfluss verstärkt wird. Generell handelt es sich beim elektrischen Widerstandsschweißen um eine vielversprechende Fügechnik im Luft- und Raumfahrtbereich, welche eine relative kurze Prozesszeit hat und hohe Festigkeiten verspricht. (Costa et al., 2012)

2.2.3 Induktionsschweißen

Beim Induktionsschweißen wird eine in der Fügezone befindliche, elektrisch leitende Schweißhilfe einem hochfrequenten elektromagnetischen Wechselfeld ausgesetzt. Die Schweißhilfe erwärmt sich durch Wirbelstrom- und/oder Hystereseverluste und schmilzt das umgebende Material auf. (Rudolf et al., 2000, S. 1202) Gleichzeitig werden die Fügeflächen aufeinandergepresst und durch das anschließende Erstarren des thermoplastischen Matrixsystems eine Schweißnaht ausgebildet. Ist der zu verschweißende Werkstoff selbst elektrisch leitend, kann auf die Schweißhilfe verzichtet werden. (Rudolf, 2000) Die verwendete elektro-magnetische Frequenz reicht von 20 kHz bis zu etwa 10 MHz. Das Prinzip des Induktionsschweißens ist in Abbildung 2.12 dargestellt.

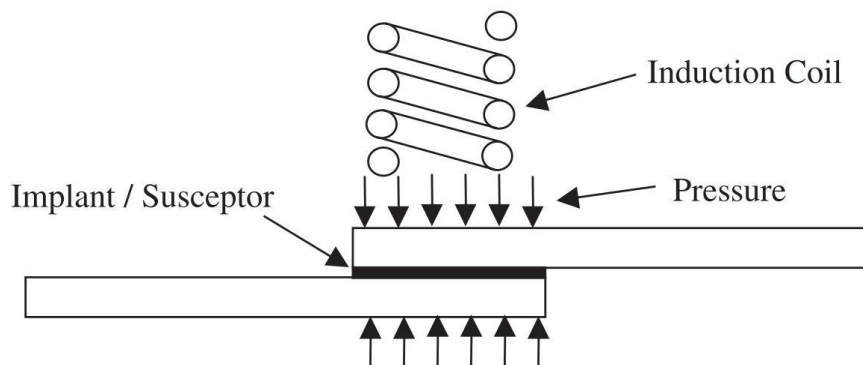


Abbildung 2.12: Prinzip des Induktionsschweißens (Yousefpour et al., 2004, S. 328)

Die meisten Untersuchungen zum Induktionsschweißen von thermoplastischen Faserverbundwerkstoffen beschränken sich auf Parameterstudien. Dabei wurden verschiedene Schweißhilfen, wie z. B. Kohlenstofffaser-Gewebe, Metallgitter oder Kohlenstofffaser-Tapes untersucht. Favorisiert werden nicht-metallische Schweißhilfen, da metallische im Laminat als Fremdkörper wirken und zu Korrosion oder Kerbeffekten führen. (Border & Salas, 1989) Laut einer Studie von Rudolf et al. erwies sich eine Schweißhilfe aus Kohlenstofffasergewebe als am vielversprechendsten. Voraussetzung für das Induktionsschweißen mit Kohlenstofffasern ist jedoch die Bildung von Leiterschleifen der Kohlenstofffasern zur Wirbelstromentstehung. Folglich ist das Induktionsschweißen mit unidirektionalen Fasern nicht möglich. (Rudolf et al., 2000, S. 1202)

2.3 Zusatzwerkstoffe bei Strukturanwendungen

Der Auftrag von Zusatzwerkstoffen spielt bei der Fertigung und besonders im Bereich der Luft- und Raumfahrt eine große Rolle. Im Folgenden wird ein Überblick über die für die Arbeit relevanten Thematiken gegeben.

2.3.1 Thermoplastische additive Fertigung

Additive Fertigungsverfahren gelten als zukunftsweisende Technologie. Der Fertigungsprozess erfolgt schichtweise, was die Herstellung von Bauteilen hoher Komplexität sowie von filigranen und dennoch steifen Strukturen erlaubt. Einzelfertigung und Kleinserienfertigung sind somit möglich, bei nahezu unbegrenzter gestalterischer Freiheit. Dabei werden umfangreiche Anforderungen, wie Reproduzierbarkeit, Vorhersagbarkeit, Betriebsfestigkeit und Bruchsicherheit an additiv gefertigte Bauteile und Strukturen gestellt. Im Rahmen der Kunststofftechnik sind besonders zwei Verfahren relevant.

Das **Fused Deposition Modeling** (FDM) ist ein generatives Fertigungsverfahren, bei dem Thermoplasten in Form von Filamenten über eine beheizte Düse geschmolzen und über den fortlaufenden Drahtvorschub extrudiert werden. Während der Extrusion wird die beheizte Düse über das Druckbett bewegt und trägt so an den entsprechenden Stellen eine Schicht Kunststoff auf. Ist die Schicht beendet, wird entweder die Düse angehoben oder das Druckbett abgesenkt und die Düse beginnt eine neue Lage Kunststoff zu extrudieren. Die Düse inklusive des Heizelements wird als Hotend bezeichnet. (Bonnet, 2014; Vaghani, 2020) Abbildung 2.13 zeigt eine schematische Darstellung eines FDM-Extruders.

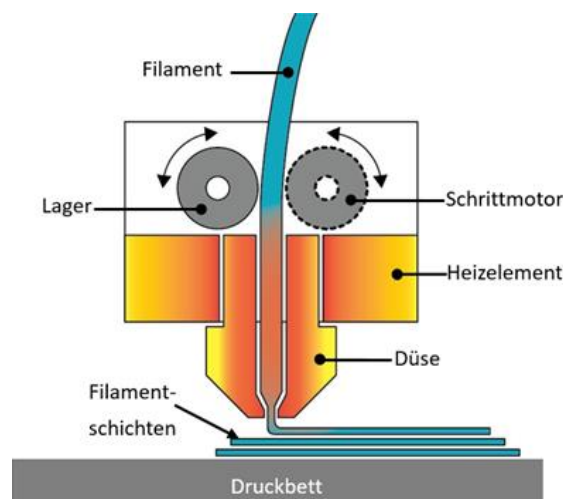


Abbildung 2.13: Schematische Darstellung eines FDM-Extruders (Vaghani, 2020)

Es ist zu sehen, dass der Draht über einen Schrittmotor in die beheizte Düse gefördert und dort aufgeschmolzen wird. Die Kunststoffmenge, die dabei von dem Extruder gefördert wird, hängt ausschließlich von der Drehzahl des Schrittmotors und dem Durchmesser des Drahts ab. Vorteile dieses Verfahrens sind die einfache Technik, der modulare Aufbau und die niedrigen Kosten der Einzelkomponenten. Es wird in den meisten handelsüblichen 3D-Druckern verbaut. (Bonnet, 2014; Vaghani, 2020)

Das **Warmgas-Extrusionsschweißen** wird hauptsächlich im Behälter- und Rohrleitungsbau eingesetzt. Das Schweißgerät besteht dabei aus einem Handextruder und einem Warmgasgebläse. In dem Handextruder befinden sich ein Heizelement und eine Schnecke. Über das Heizelement wird der artgleiche Kunststoff, welcher als Granulat oder als Filament vorliegt, erwärmt, in der Schnecke durchmischt und über den Schweißschuh auf das Laminat extrudiert. Das Warmgasgebläse wird benötigt, um die Oberfläche anzuschmelzen und eine bessere Konsolidierung zu erreichen. In der, durch den Schweißschuh druckbeaufschlagten Abkühlphase, entsteht eine stoffschlüssige Anbindung. Abbildung 2.14 zeigt eine schematische Darstellung eines Warmgas-Extrusionsschweißgeräts. Die Kunststoffmenge, die von diesem Extruder gefördert wird, und exakt dosierbar und hängt ausschließlich von der Drehzahl und der Steigung der Schnecke ab. Im Falle einer Schwankung des Drahtdurchmessers hat dies auf den Durchsatz keinen Einfluss. (Bonnet, 2014; Schuler & Twrdek, 2019)

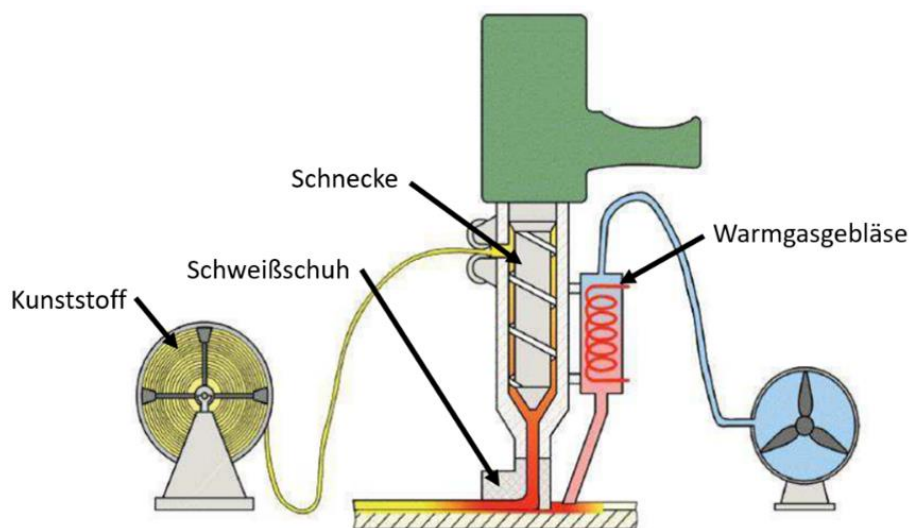


Abbildung 2.14: Schematische Darstellung eines Warmgas-Extrusionsschweißgeräts (Belfin, 2013)

Die thermoplastische additive Fertigung befindet sich im Bereich der Luft- und Raumfahrt aktuell noch in der Entwicklungsphase. Ein aktuelles Beispiel ist die additive Fertigung von Flugzeugflügeln. Chintamreddy und Arigela (2021) nutzen hierzu einen FDM-Endeffektor in Verbindung mit einem Industrieroboter. Die Fertigung erfolgt in nichtlinearen Bahnen auf gekrümmte Oberflächen, um einen Treppeneffekt zu vermeiden und eine hohe Oberflächenqualität zu erreichen. Ein anderes Beispiel ist die additive Fertigung einer thermoplastischen kurzfaserverstärkten CFK-Klammer (engl. fuselage clip) des Airbus A320. C.-Y. Chen (2020) vergleicht deren mechanischen Eigenschaften mit dem aktuell verbauten Clip aus Aluminium. Die Ergebnisse zeigen, dass die additiv gefertigte Klammer die Aluminiumklammer prinzipiell ersetzen kann. Eine weitere Anwendungsmöglichkeit ist der Druck auf endlosfaserverstärkte Lamine. Holzinger (2021) entwickelt ein Verfahren, das den additiven Aufbau von großvolumigen kurzfaserverstärkten Kunststoffbauteilen in Skelettbauweise erlaubt. Der Druck erfolgt auf vorgeheizte, endlosfaserverstärkte Lamine. Hierbei erreicht er mechanische Eigenschaften, die mit denen von Spritzgussbauteilen vergleichbar sind. Neben der Fertigung von kurzfaserverstärkten Bauteilen wird auch an der additiven Fertigung von endlosfaserverstärkten Strukturen geforscht. Diese ermöglichen eine dreidimensionale Ausrichtung der Fasern entsprechend ihrer Beanspruchung. Li et al. (2022) untersuchen in ihrer Grundlagenstudie die mechanischen Eigenschaften solcher Strukturen und vergleichen sie mit denen herkömmlich hergestellter Lamine. Hierbei werden vergleichbare Festigkeiten, jedoch eine hohe Kerbempfindlichkeit festgestellt.

Das Zentrum für Leichtbauproduktionstechnik in Augsburg beschäftigt sich mit der Thematik der additiven Fertigung in Form des WeldSealer-Prozesses. Dieser vereint Komponenten des FDM und des Warmgas-Extrusionsschweißens, um den additiven Auftrag thermoplastischen Materials auf endlosfaserverstärkte thermoplastische Lamine zu ermöglichen. (Gardiner, 2022) Dieser Prozess wurde patentiert und auf der SAMPE Europe Conference 2022 in Hamburg vorgestellt (Jarka et al., 2022; Jarka & Endraß, 2020).

2.3.2 Versiegelung von Flugzeugstrukturen

Das Abdichten von Bauteilen ist in der Luft- und Raumfahrt ein elementarer Prozess, welcher der Erhöhung der Sicherheit und Langlebigkeit dient. Beim sogenannten Sealing werden mithilfe von Dichtstoffen nahezu sämtliche Flugzeugbauteile, auch Strukturelemente wie Rumpf und Flügel, abgedichtet. Die Applikationen für Dichtstoffe sind vielfältig, sie dienen unter anderem zur Lückenfüllung im Montageprozess, als Korrosionsschutz z.B. für Nieten, zur Kantenabdichtung, für aerodynamische Abdichtung an der Außenhaut und Fensterrahmen und Kraftstofftankabdichtung. Für den Bau eines

Flugzeugs wird insgesamt bis zu einer Tonne Dichtmittel verwendet. (DOPAG, 2022b) Diese Tätigkeit erfolgt noch meist manuell, wird jedoch zunehmend automatisiert (Broetje-Automation, 2020).

Beim Edge Sealing handelt es sich um die Versiegelung von offenen Kanten an den Composite-Bauteilen, die durch Zuschnitt oder Schleifen entstehen. Die freiliegenden Kohlefasern müssen zum Schutz vor elektrochemischer Kontaktkorrosion bei anliegenden Bauteilen und vor dem Eindringen anderer Medien wie Wasser abgedeckt werden, da sonst die strukturelle Leistung des Bauteils beeinträchtigt werden kann. Hierzu wird ein Dichtmittel, in der Regel Epoxidharz, manuell mit einem Pinsel oder direkt aus einer Kartusche auf die Kanten des Bauteils aufgetragen. (DOPAG, 2022a) Eine Alternative zum Versiegeln mit Epoxidharzen besteht im Lackieren der offenen Bauteilkanten (Esch et al., 2020). In einer Studie untersuchten Asmatulu et al. (2016) außerdem die Auswirkungen des Edge Sealing auf die mechanischen Eigenschaften von wassergestrahlten Bauteilen. Hierbei konnte eine deutliche Verbesserung der mechanischen Eigenschaften nachgewiesen werden.

Als Joint Sealing wird das Versiegeln der Fügezone nach dem Fügeprozess bezeichnet. Das Eindringen von Feuchtigkeit stellt für Verbindungen eine große Gefahr dar, da die niedrigen Temperaturen in großer Höhe das Gefrieren und damit verbunden, die Ausdehnung des Wassers bewirken. Dies führt zu Ermüdungserscheinungen und im schlimmsten Fall zum Versagen der Verbindung. Außerdem schwächt Feuchtigkeit die sekundären Bindungen einer Klebung und reduziert so deren Festigkeit. (Dhilipkumar & Rajesh, 2022; Panda et al., 2020) Um dies zu verhindern, wird die Fügezone entweder lackiert oder mit Zusatzwerkstoffen wie Silikon versiegelt (Miller & Lindberg, 2018). H. Chen et al. (2022) untersuchten in einer Studie die Auswirkungen der Versiegelung auf die Beständigkeit von Klebeverbindungen gegen hygrothermische Alterung. Für die Versiegelung wurde Polyurethan verwendet. Sie konnten eine deutliche Verlangsamung der Alterung von Klebeverbindungen nachweisen. Generell werden bisher beim Joint Sealing matrixfremde Dichtstoffe verwendet. Aufgrund des unterschiedlichen Dehnungsverhaltens und Elastizitätsmoduls dieser Zusatzwerkstoffe findet keine nennenswerte Unterstützung der Fügung durch die Versiegelung statt. Die Verwendung matrixgleichen Materials bietet sich besonders bei der Verarbeitung thermoplastischer Lamine an, da hierbei eine stoffschlüssige Anbindung unter Druck ermöglicht wird. Dadurch ist die Versiegelung in der Lage, hohe Kräfte zu übertragen und die Festigkeit der Verbindung zu erhöhen. Dies lässt sich mit der Lastverteilung innerhalb der Fügezone erklären.

Bei Betrachtung zweier gefügter Lamine unter Zugbelastung ergeben sich Spannungsspitzen am Rand der Fügezone, siehe Abbildung 2.15. Bedingt durch die Kerbwirkung kann es an den Kanten bei entsprechend großer Belastung zur Rissbildung kommen, Rissinitiierung genannt. Eine Möglichkeit dem beim Schweißen entgegenzuwirken, besteht darin, den Schweißwulst möglichst stark auszuprägen, um scharfe Kanten zu vermeiden. Durch den hohen Faservolumengehalt der Lamine und der Knappheit an Matrixmaterial bildet sich meist jedoch nur ein sehr geringer und zudem geometrisch ungünstiger Schweißwulst aus.

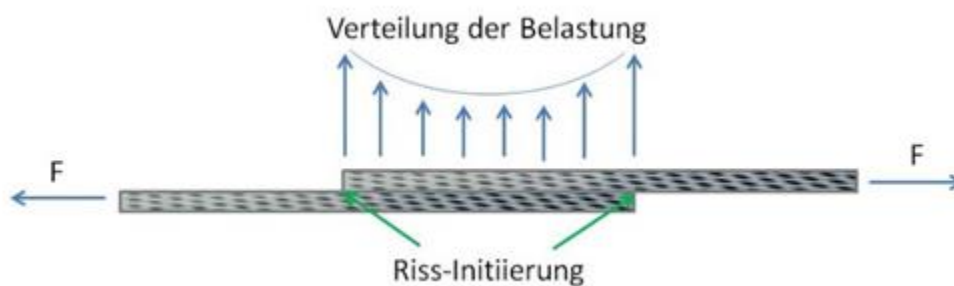


Abbildung 2.15: Belastungsverteilung bei unversiegelter Fügezone (Jarka, 2021)

Eine weitere Möglichkeit die Rissinitiierung zu erschweren, besteht im zusätzlichen Auftrag von Material an den Kanten der Verbindung. Dieses Material muss identisch mit dem Werkstoff der Matrix sein und unter Temperatur- und Druckbeaufschlagung verarbeitet werden, um eine stoffschlüssige Anbindung zu erreichen. Dies ermöglicht eine bessere Spannungsverteilung und erhöht Lastübertragung und Tragfähigkeit, siehe Abbildung 2.16. Erste Versuche hierzu wurden bereits am Zentrum für Leichtbauproduktionstechnik (DLR) in Augsburg durchgeführt (Ehrenreich, 2021; Gardiner, 2022; Haunreiter, 2021).

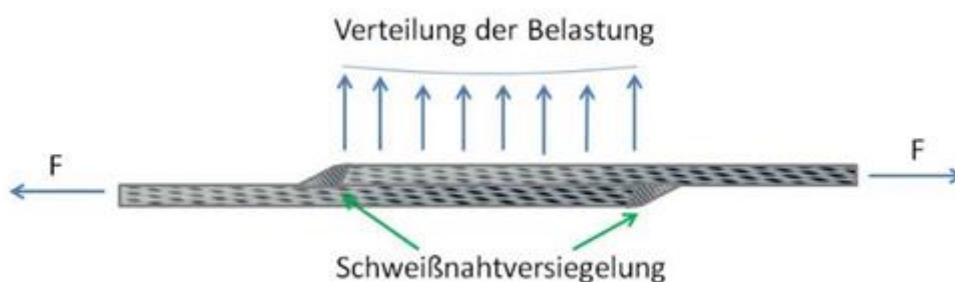


Abbildung 2.16: Belastungsverteilung in der Fügezone bei Versiegelung mit stoffschlüssiger Anbindung (Jarka, 2021)

2.4 Analysemethoden von Fügstellen

Bei der Beurteilung einer Verbindungstechnologie ist die erzielbare Fügenahtqualität von entscheidender Bedeutung. Es müssen geeignete Prüfmethoden und Prüfbedingungen zur Ermittlung der Fügenahtqualität verwendet werden, um vergleichbare Ergebnisse zu erhalten. Hierbei spielt nicht nur die Vergleichbarkeit der Ergebnisse einer Messreihe untereinander, sondern auch die Vergleichbarkeit mit den Ergebnissen aus anderen Quellen eine Rolle. Prinzipiell steht eine Vielzahl bildgebender, zerstörender und zerstörungsfreier Prüfmethoden zur Verfügung. Die am häufigsten angewendeten und am weitesten entwickelten Prüfverfahren sind die Zugscherprüfung, die Ultraschallprüfung und die Mikroskopie. (Neitzel et al., 2014, S. 487) Im Folgenden wird auf Schädigungsmechanismen bei Faserverbundlaminaten eingegangen, sowie die in der Arbeit verwendeten Prüfverfahren beschrieben.

2.4.1 Defekte und Versagensarten

Unter Defekten werden ungewollte Unregelmäßigkeiten eines Laminats oder Fehler beim Fügen zweier Lamine verstanden. Dazu zählen die Gaps und Overlaps eines AFP-Laminats, Delaminationen und Poren im Laminat aufgrund unzureichender Konsolidierung oder schlechter Benetzung der Fasern, sowie trockene Fasern und welliges bzw. gewölbtes Laminat aufgrund des Herstellungsprozesses oder unterschiedlicher Wärmeausdehnung von Faser und Matrix. (Kupke, 2020) Typische Defekte beim Schweißen von Laminaten sind nicht aufgeschmolzene und unverbundene Grenzflächen, eine erhöhte Porosität in der Fügezone, eine Überpressung und somit überhöhter Fasergehalt in der Fügezone, sowie eine degradierte Matrix aufgrund von Überhitzung während des Schweißprozesses (Jarka, 2021).

Bricht ein Laminat oder eine Verschweißung unter Last so wird grundsätzlich zwischen interlaminarem, intralaminarem und translaminarem Versagen unterschieden. Interlaminares Versagen bezeichnet einen Bruch zwischen den Lagen eines Laminats (Delamination) oder den Grenzflächen einer Verschweißung. Bricht ein Laminat in einer Lage und parallel zur Faserrichtung, so handelt es sich um intralaminare Versagen. Bei beiden Versagensarten bricht nur die Matrix. Beim translaminaren Versagen bricht hingegen auch die Faser, es entsteht ein Riss quer zur Faserrichtung. Das Versagen außerhalb der Fügezone wird als Bauteilversagen bezeichnet. Eine Interpretation der Zugscherfestigkeit der Probe ist bei letzterem nicht möglich. (Oterkus et al., 2016, S. 81–82) In Abbildung 2.17 sind die verschiedenen Versagensarten graphisch dargestellt.

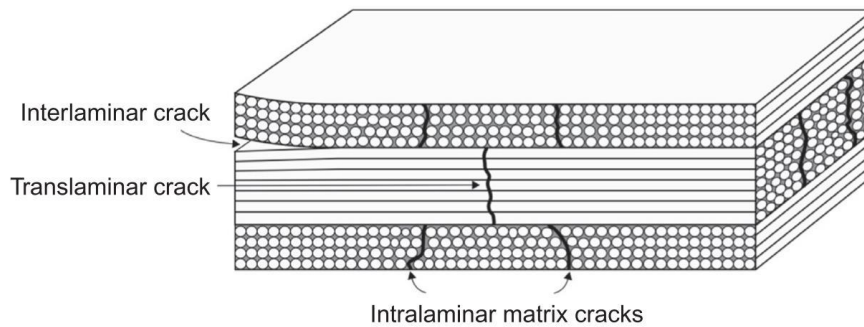


Abbildung 2.17: Versagensarten in FVK-Laminaten (Oterkus et al., 2016, S. 82)

2.4.2 Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung

Bei der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung, engl. auch Non Destructive Testing (NDT) genannt, werden Probekörper auf Fehlstellen und Materialfehler untersucht, ohne dass das Bauteil beschädigt beziehungsweise die Materialeigenschaften verändert werden. Dies ermöglicht die Qualitätskontrolle in laufenden Produktionsprozessen, sowie der späteren regelmäßigen Inspektion. Da Verbundwerkstoffe häufig in sicherheitskritischen Bereichen wie der Luft- und Raumfahrt verwendet werden, steigt die Nachfrage nach NDT-Methoden kontinuierlich an. (Towsyfyan et al., 2020, S. 6–7) Sie werden in berührende und berührungslose Verfahren unterschieden, wobei die US-Prüfung die einzige Kontaktmethode ist. (Gholizadeh, 2016)

Sichtprüfung

Die Sichtprüfung ist die einfachste Art der zerstörungsfreien Prüfung. Es wird wenig, bis keine Ausrüstung benötigt, was sie zu einer der wirtschaftlichsten Prüfmethoden macht. Die Inaugenscheinnahme erfolgt unmittelbar nach dem Fertigungsprozess durch geschultes Personal. Wesentlicher Bestandteil ist auch die Vermessung und der Abgleich mit Zeichnungsdaten. Dennoch ist diese Prüfmethode nur für oberflächliche Schäden geeignet, da innere Schäden nicht sichtbar sind. (Jarka, 2021)

Ultraschallprüfung

Das Prinzip der Ultraschallprüfung basiert auf der geradlinigen Ausbreitung von Schallwellen im Werkstoff in Form von mechanischen Schwingungen. Diese werden an Grenzflächen aufgrund des Dichteunterschieds reflektiert. Grenzflächen können dabei beispielsweise Risse, Lufteinschlüsse oder Trennflächen zwischen Phasen darstellen. Damit der Schalleintritt nicht durch den Luftspalt zwischen Prüfkopf und Werkstoff

verhindert wird, kann eine Ankopplung durch Wasser oder Glyzerin als Kopplungsmittel erfolgen. (Weißbach, 2012, S. 398–401)

In der Ultraschallprüfung kann unter dem Durchschallungs- und dem Impuls-Echo-Verfahren unterschieden werden. Beim Durchschallungsverfahren wird der Prüfkörper zwischen den Sende- und Empfängerköpfen platziert und vom Schall durchdrungen. Bei Fehlern wird der detektierte Schall geschwächt. Die Tiefenlage des Fehlers im Material kann über dieses Verfahren nicht bestimmt werden. Der Sendekopf stellt beim Impuls-Echo-Verfahren dagegen gleichzeitig den Empfängerkopf dar. Der Prüfkopf sendet in kurzen Abständen Ultraschallimpulse mit einer Dauer von 1 bis 10 μs aus. Die an Grenzflächen reflektierten Impulse werden im selben Prüfkopf detektiert. Da der Schall den Prüfkörper bis zum Defekt und zurück zweifach durchläuft, kann die Tiefenlage des Fehlers durch die Laufzeit ermittelt werden. Der Detektor zeigt bei der Prüfung das Eingangs- und das Rückwandsignal des Impulses an. Befindet sich ein Fehler im Prüfkörper, so liegt ein weiteres Signal zwischen Eingangs- und Rückwandsignal vor. (Sause, 2020; Weißbach, 2012, S. 399–400) Das Verfahren wird in Abbildung 2.18 dargestellt.

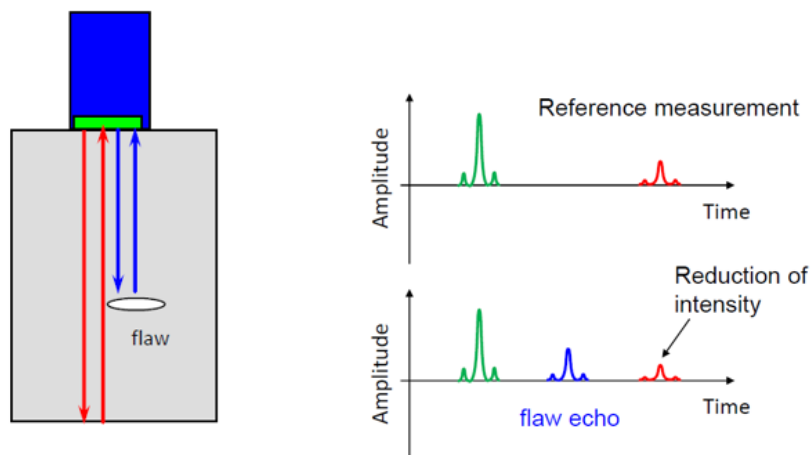


Abbildung 2.18: Ultraschallprüfung mit dem Impuls-Echo-Verfahren (Sause, 2020)

Die Ergebnisse einer Ultraschallprüfung werden üblicherweise über eine Kombination mehrerer Diagramme dargestellt. Der A-Scan zeigt die Amplitude der Echos über dem Schallweg bzw. der Bauteiltiefe an. Es handelt sich um eine Momentaufnahme bei einer Position des Prüfkopfs. Der B-Scan zeigt die Tiefenlage von Fehlstellen in Abhängigkeit einer einachsigen Verschiebung des Prüfkopfs. Damit entspricht dieses Bild einem fixierten Schnitt der Seitenansicht. Der C-Scan zeigt die Position der Fehlstellen in der Draufsicht an. Es handelt sich um eine zusammengesetzte Reihe von Aufnahmen in Längs-

und Querrichtung. Die Betrachtungsebene ist in der Tiefe fixiert. Über Farbkomponenten kann beim B- und C-Scan Aufschluss über die empfangene Ultraschall-Leistung gegeben werden. (Schiebold, 2015) Ein Beispiel einer Ultraschallprüfung ist in Abbildung 2.19 gegeben.

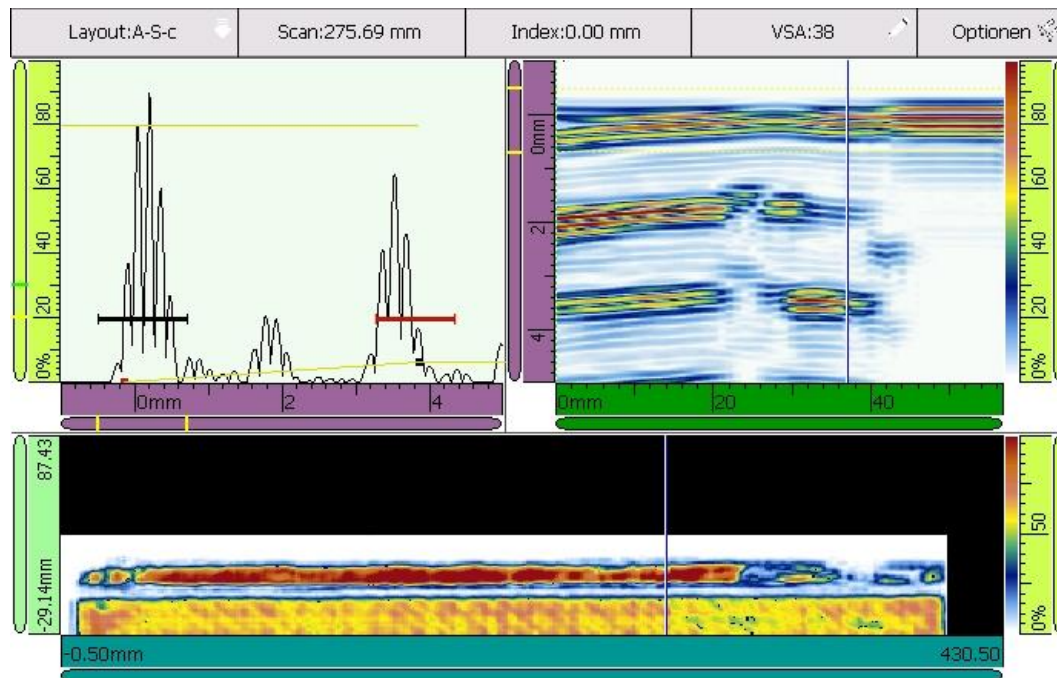


Abbildung 2.19: Ultraschallprüfung der Fügezone einer US-Schweißung mit A-Scan (oben links), B-Scan (oben rechts) und C-Scan (unten)

2.4.3 Zerstörende Werkstoffprüfung

Bei der zerstörenden Werkstoffprüfung, auch engl. Destructive Testing, (DT) genannt, werden Werkstoffe bzw. Bauteile hinsichtlich ihrer mechanischen Eigenschaften untersucht. Die Prüfung kann sowohl an herauspräparierten Proben als auch am Gesamtbauteil erfolgen. Im Gegensatz zum NDT kann der Probekörper nach einer zerstörenden Prüfung nicht weiterverwendet werden.

Zugscherprüfung

Die Zugscherprüfung ist die am häufigsten durchgeführte Prüfung zur Erfassung der Festigkeit von Materialien oder Fugestellen. Hierzu wird eine genormte Probe gleichmäßig, stoßfrei und mit vorgegebener, konstant steigender Prüfkraft bis zum Bruch gedehnt. Die Dehngeschwindigkeit muss niedrig sein, um das Ergebnis nicht zu

verfälschen. Aufgebrachte Kraft und Verlängerung der Probe werden gemessen und in einem Spannungs-Dehnungs-Diagramm aufgezeichnet. (Weißbach, 2012, S. 374)

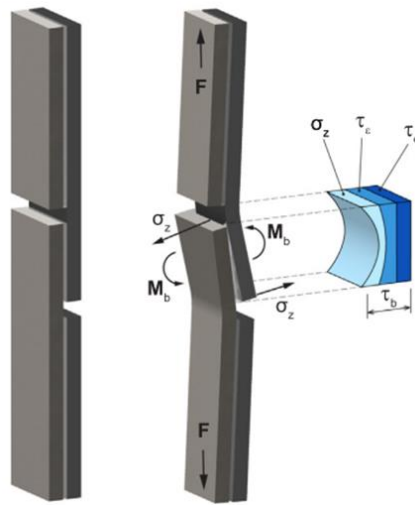


Abbildung 2.20: Spannungsverteilung in einer SLS-Probe (Zinnecker et al., 2020, S. 2)

Der Single-Lap-Shear (SLS)-Versuch, wird häufig verwendet, da er sich durch einen einfachen Aufbau, eine schnelle Durchführung und reproduzierbare Ergebnisse auszeichnet. Zu beachten ist hierbei, dass sich durch den Hebelarm bedingt durch die Probendicke unter Zug ein Biegemoment einstellt, das die Verschweißung neben Scherung auch auf Biegung bzw. Schälung belastet. Somit treten Spannungskonzentrationen an den Kanten der Schweißnaht auf, siehe Abbildung 2.20. Je größer die Überlappung ist, desto geringer sind diese Spannungskonzentrationen. Dies ist bei gekerbten Proben aufgrund der höheren Steifigkeit reduziert, beim Double-Lap-Shear-Versuch tritt praktisch keine Torsionswirkung auf, siehe hierzu Abbildung 2.21. (Neitzel et al., 2014, S. 487–490)

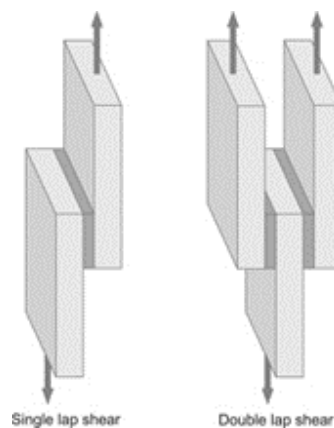


Abbildung 2.21: Single- und Double-Lap-Shear-Probe (Bergstrom, 2015)

Aus der Zugscherprüfung resultiert die Maximalkraft $F_{\max}$ bei der die Probe bricht. Die Zugscherspannung σ ergibt sich aus der Bruchkraft geteilt durch die Fläche der Verschweißung. Sie stellt die Kraft dar, die pro 1 mm^2 Fügefläche benötigt wird, um die Verbindung zu brechen.

$$\sigma = \frac{F_{\max}}{A} \left[\frac{N}{\text{mm}^2} = \text{MPa} \right]$$

2.4.4 Bildgebende Prüfverfahren

Bildgebende Prüfverfahren ermöglichen es die Oberflächengestalt von Laminaten und Bruchflächen zu analysieren und die Güte von Schweißnähten über Schliffbilder zu qualifizieren.

Bruchflächenanalyse

Die Bruchflächenanalyse, auch Fraktographie genannt, ist ein Hilfsmittel zur Aufklärung von Bruchursachen hinsichtlich Beanspruchungsart, Höhe der Beanspruchung, Belastungsart und Grad der makroskopischen Verformung. Außerdem ermöglicht sie zwischen Gewaltbruch und Dauerbruch zu unterscheiden. Weiterhin können Versagensmechanismen charakterisiert und zwischen interlaminarem, intralaminarem und translaminarem Versagen differenziert werden. Darüber hinaus kann die Vollflächigkeit der Anbindung untersucht bzw. der Anteil der angebundener Fläche zur Überlappfläche in Relation gesetzt werden. Dies ist besonders bei der Bewertung von Schweißverbindungen relevant und ermöglicht es Rückschlüsse auf Fügenahtqualität und Festigkeiten zu ziehen. Die Bruchflächenanalyse kann sowohl ohne Vergrößerung als auch unter makroskopischer oder mikroskopischer Vergrößerung stattfinden. (Ilschner & Singer, 2005, S. 27; Reinert & Egberts, 2017, S. 2)

Mikroskopie

Die Mikroskopie ermöglicht die genaue Betrachtung der Fügezonenuerschnittfläche, sowie der Bruchfläche nach zerstörender Prüfung. Dies erleichtert die Einordnung der Ergebnisse anderer Prüfmethode. Die Mikroskopie wird zur Bestimmung des Hohlraumgehalts, der Lagenanzahl und der Faserorientierung eingesetzt. Darüber hinaus kann untersucht werden, ob der Fügweg korrekt eingestellt wurde, ob eine Interdiffusion von Makromolekülen an der Grenzfläche stattgefunden hat und ob eine homogene

Kantenausbildung am Nahtübergang vorliegt. Je nach Anforderung an die Mikroskopie kann zwischen unterschiedlichen Mikroskopen unterschieden werden. Lichtmikroskope, Rasterelektronenmikroskope und Transmissionselektronenmikroskope sind die häufigsten Mikroskopievarianten. (Hayes & Gammon, 2010, S. 19–22)

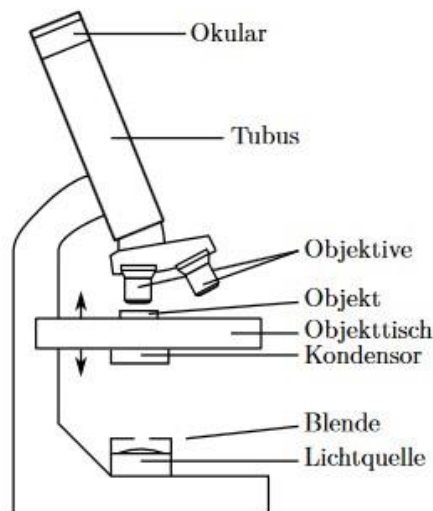


Abbildung 2.22: Aufbau eines Durchlichtmikroskops (Kommer et al., 2019, S. 601)

Bei der Lichtmikroskopie wird zwischen Durchlichtmikroskopie und Auflichtmikroskopie unterschieden. Bei der Durchlichtmikroskopie wird die Beleuchtung von hinten durch das Präparat hindurchgeleitet, bevor es vom Objektiv des Mikroskops aufgefangen wird. Daher sind durchsichtige oder dünn geschnittene Präparate erforderlich. Bei der Auflichtmikroskopie wird das Objekt von oben oder der Seite durch eine weiße oder monochromatische Lichtquelle beleuchtet. Somit können auch undurchsichtigen Präparate untersucht werden. In beiden Fällen ist das Objekt auf einem höhenverstellbaren Tisch fixiert, um die korrekte Gegenstandsweite einzustellen, siehe Abbildung 2.22. Das Objektiv, eine Sammellinse, erzeugt ein reelles Bild des Objekts zwischen dem Objektiv und dem Okular. Das Bild kann durch Veränderung der Gegenstandsweite, sogenanntes Scharfstellen, in der Brennebene des Okulars positioniert werden und somit die Lichtstrahlen für das Auge parallelisieren. Durch die Parallelisierung der Strahlen kann das Auge das Bild scharf wahrnehmen. Die Funktionsweise ist in Abbildung 2.23 dargestellt. Um detaillierte Ergebnisse zu erhalten, ist zuweilen die Anwendung von Ätz- oder Beizmitteln und Farbkontraststoffen erforderlich. Zur Durchführung der Mikroskopie muss ein Stück des Bauteils herausgeschnitten, in ein Epoxidharz eingebettet und seine Oberfläche geschliffen und maschinell poliert werden. Hierbei ist zu beachten, dass die

Schärfentiefe von Lichtmikroskopen mit zunehmender Vergrößerung abnimmt. (Kommer et al., 2019, S. 601; Weißbach, 2012, S. 558–561)

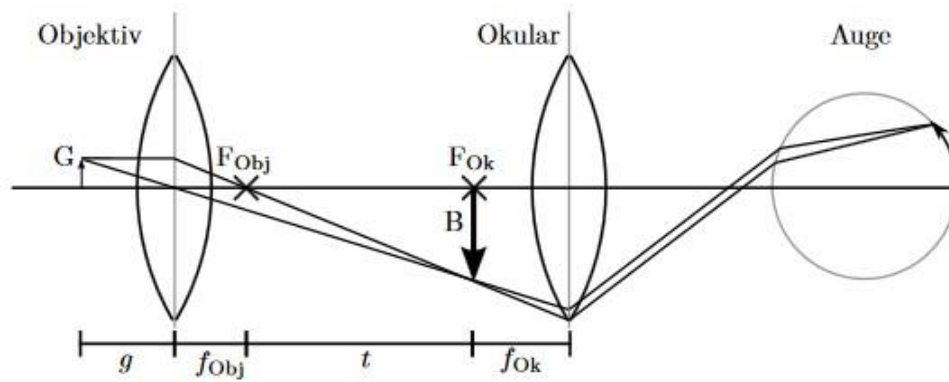


Abbildung 2.23: Funktion eines Lichtmikroskops (Kommer et al., 2019, S. 601)

3 Aufbau und Funktionsweise des WeldSealers

Der WeldSealer wurde am Zentrum für Leichtbauproduktionstechnik (ZLP) in Augsburg im Rahmen einer Masterarbeit entwickelt. Ziel war die Entwicklung eines robotergeführten Endlosprozesses zur additiven Fertigung. Hierbei handelt es sich um den Prototypen eines Endeffektors, der in der Lage ist, matrixgleiches Material auf oberflächlich temperierte thermoplastische Lamine aufzutragen und unter Druck abkühlen zu lassen. Dies ermöglicht eine stoffschlüssige Anbindung. Erste Versuche mit dem Material PPS waren bereits erfolgreich. (Böck, 2022; Haunreiter, 2021; Weng, 2021)

Die folgende Beschreibung des WeldSealers bezieht sich auf den Zustand zu Beginn der Masterarbeit und bevor Änderungen vorgenommen werden. Auf Anpassungen, die im Rahmen der Masterarbeit vorgenommen werden, wird in Kapitel 4.2 eingegangen.

3.1 Beschreibung der Komponenten

Der WeldSealer besteht neben der Steuerung aus drei Hauptkomponenten: Der Temperatureinheit, der Plastifiziereinheit und der Druckeinheit. Ihre Aufgabe besteht im Vorheizen der Laminatoberfläche, Aufschmelzen und Formen des Filaments, sowie Abkühlen unter Druck. Abbildung 3.1 zeigt eine Aufnahme des WeldSealers mit seinen Komponenten. Diese werden in Tabelle 3.1 entsprechend der Nummern aufgelistet und im Folgenden beschrieben.

Tabelle 3.1: Liste der WeldSealer-Komponenten

Nr.	Bezeichnung	Nr.	Bezeichnung
1	Heißluftpistole	12	Heizpatrone
2	Leistungsregler	13	Thermoelement Heizblock
3	Durchflussregelventil	14	Wärmebrücke (engl. Heat-Break)
4	Beweglichen Halterung	15	Reservoir
5	Lösbaren Klemmen	16	Pumpe
6	Aufgesteckte Heißluftdüse	17	Wärmetauscher
7	Thermoelement Heißluft	18	Druckblock
8	Filament	19	Kufen
9	Fördereinheit	20	pneumatischen Zylinder
10	Düse (engl. Nozzle)	21	EtherCat-Busklemmen
11	Heizblock	22	KUKA-Roboter

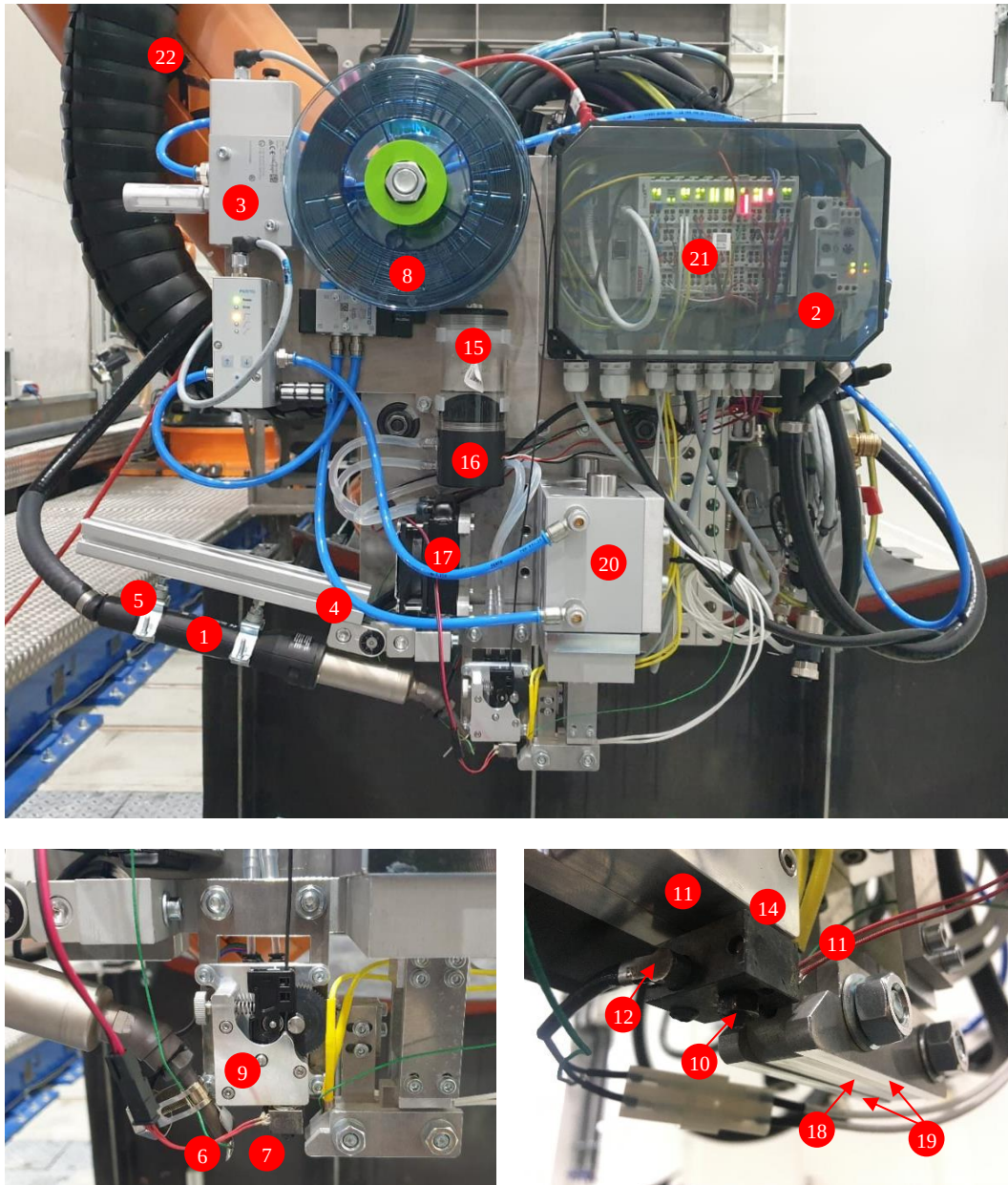


Abbildung 3.1: Der WeldSealer und seine Komponenten

Temperiereinheit

Die Temperiereinheit besteht aus einer Heißluftpistole (1), gekoppelt mit einem Leistungsregler (2) zur Einstellung der Heizleistung. Das Durchflussregelventil (3) ermöglicht die Anpassung des Volumenstroms. Die Heißluftpistole ist an einer beweglichen Halterung (4) mit Winkelanzeige befestigt, sodass der Winkel zum Laminat genau eingestellt werden kann. Die Befestigung mit zwei lösbaren Klemmen (5) ermöglicht eine Anpassung des Abstands zum Laminat. Die exakte Ausrichtung des Luftstroms erfolgt über eine aufgesteckte Heißluftdüse (6), an der ein Thermoelement (7) angebracht ist, um die Temperatur der ausströmenden Luft zu messen, siehe Abbildung 3.2. Die Aufgabe der

Heißluftpistole besteht darin, die Oberfläche des Laminats in der Applikationszone aufzuschmelzen, um eine stoffschlüssige Anbindung des Extrudats zu ermöglichen. Diesbezüglich ähnelt der Prozess dem Warmgas-Extrusionsschweißen, vgl. Kapitel 2.3.1.

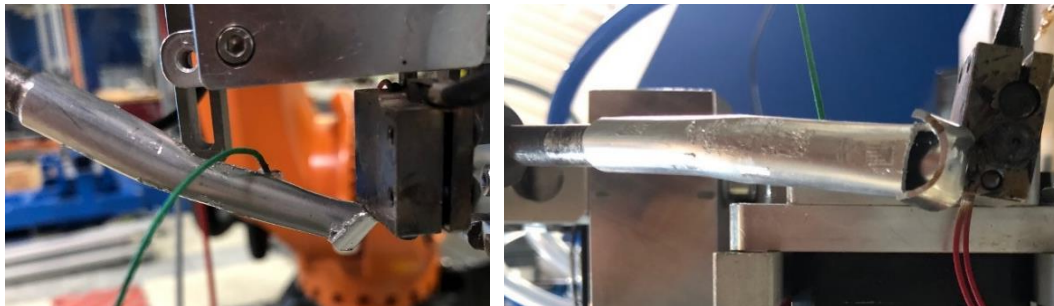


Abbildung 3.2: Heißluftdüse mit Thermoelement

Plastifiziereinheit

Die Plastifiziereinheit besteht aus Komponenten aus dem Bereich des Fused Deposition Modeling, vgl. Kapitel 2.3.1. Das thermoplastische Filament (8) wird über eine Fördereinheit (9) durch die beheizte Düse (engl. Nozzle) (10) gepresst und aufgeschmolzen. Der Heizblock (11), der die Düse umgibt, wird durch eine elektrische Heizpatrone (12) beheizt und ist mit einem Thermoelement (13) versehen. Heizblock, Düse und Heizpatrone ergeben zusammen das sogenannte Hotend. Um den Wärmefluss in die Vorrichtung zu minimieren und die Bauteile vor Überhitzung zu schützen, ist der Heizblock von der Fördereinheit durch eine Wärmebrücke (engl. Heat-Break) (14) getrennt. Außerdem ist die Fördereinheit an ein Wasserkühlsystem angeschlossen, das aus einem Reservoir (15), einer Pumpe (16) und einem Wärmetauscher (17) besteht.

Druckeinheit

Die Druckeinheit besteht aus einem beheizten Druckblock (18) und zwei äußeren Kufen (19), die zusammen den Schweißschuh bzw. Formgeberschlitten bilden. Die Kufen sind höhenverstellbar und gleiten über die Laminatoberfläche. Sie sorgen für den nötigen Abstand zwischen dem Druckblock und dem Laminat. Das Extrudat gelangt unter den Druckblock und verfestigt unter Druck in der gewünschten Form. Da das Laminat zuvor durch die Temperiereinheit aufgeschmolzen wird, findet eine Konsolidierung statt. Um eine bessere Anhaftung durch ein langsames Abkühlen zu erreichen, wird der Druckblock über eine elektrische Heizpatrone beheizt. Der Prozess gleicht dem Warmgas-Extrusionsschweißen. Die Kufen sind mit einem pneumatischen Zylinder (20) verbunden,

über den die Druckbeaufschlagung erfolgt. Der Druckblock ist austauschbar und die Geometrie kann je nach Anwendungsbereich variiert werden.

Prozessteuerung

Alle Komponenten des WeldSealer sind über EtherCat-Busklemmen der Firma Beckhoff (21) mit einem Computer verbunden. Die Steuerung erfolgt über die Software TwinCAT, die von Beckhoff zur Verfügung gestellt wird und in eine Microsoft Visual Studio Umgebung implementiert ist. Hierüber erfolgt die Eingabe sämtlicher Parameter den Endeffektor betreffend. Der WeldSealer ist an einen KUKA-Roboter (22) montiert. Die Steuerung des Roboters erfolgt über das KUKA-SmartPad, worüber auch die Startposition, die Länge der Bahn und die Vorschubgeschwindigkeit definiert werden.

3.2 Prozessablauf

Der Roboter startet in der sogenannten Home-Position. Vor Beginn des Prozesses werden über das KUKA-SmartPad die Startposition, die Länge der Bahn und die Fahrgeschwindigkeit des Roboters definiert. Über die Benutzeroberfläche in TwinCAT wird zuerst das Kühlsystem aktiviert. Danach werden über manuelle Eingaben die Heißluftpistole, der Heizblock und der Formgeberschlitten auf die gewünschte Temperatur aufgeheizt. Sobald die Temperaturen konstant sind, kann der Prozess gestartet werden. Der Roboter fährt in die vordefinierte Startposition, woraufhin die Druckeinheit mit zuvor definiertem Druck ausgefahren wird. Während sich der Endeffektor mit einer definierten Prozessgeschwindigkeit in Materialrichtung bewegt, wird die Fördereinheit des Extruders aktiviert. Das aufgeschmolzene Filament tritt aus der Düse aus, wird vom Formgeberschlitten aufgenommen und definiert unter Druck abgekühlt. Sobald das Ende des Laminats erreicht ist, werden die Förder- und Druckeinheit deaktiviert und der Roboter fährt zurück in seine Ausgangsposition. Der Prozess kann nun erneut gestartet oder alle Komponenten abgekühlt und heruntergefahren werden. Derzeit finden alle Eingaben manuell statt, eine Automatisierung ist jedoch möglich.

3.3 Prozessparameter

Im Folgenden wird auf die wichtigsten veränderlichen Parameter eingegangen. Hierzu gehören Temperatur und Volumenstrom der Heißluftpistole, Temperatur des Heizblocks und des Schweißschuhs, sowie die Geschwindigkeit der Fördereinheit.

Temperiereinheit

Als Heißluftpistole wird der "Welding PEN S" von Leister verwendet. Dieser kann Temperaturen bis zu 600°C erreichen (Leister, 2005). Dies genügt, um bei Matrixmaterialien wie PPS (Schmelztemperatur ca. 285 °C) oder LMPAEK (Schmelztemperatur ca. 305 °C) die Laminatoberfläche anzuschmelzen. Die Steuerung der Temperatur erfolgt über den Leistungsregler. Dieser hat eine Eingangsspannung von 0 bis 10 V. Die Eingabe erfolgt als integer Wert. Der minimale Durchfluss ist im Datenblatt mit 60 l/min angegeben. Das vorgeschaltete Durchflussregelventil erlaubt jedoch Werte zwischen 35 - 1500 l/min (FESTO, 2021b). Der gewünschte Wert kann ganzzahlig als l/min eingegeben werden. Es hat sich gezeigt, dass niedrige Werte vorteilhaft sind, da ein hoher Volumenstrom durch Luftverwirbelungen eine Abkühlung des Hotends bewirkt. Die real gemessene Temperatur der Heißluft beträgt maximal etwa 560 °C, jedoch kühlt die ausgestoßene Luft nach dem Austritt aus der Düse schnell ab. Laut Weng (2021) beträgt die Temperatur beim Auftreffen auf das Laminat noch etwa 300 °C.

Plastifiziereinheit

Der installierte Heizblock "Volcano Plated Copper HeaterBlock" hat eine Leistung von 65 W und erreicht Temperaturen von über 500°C (E3D, 2021a, 2021b). Die Eingabe der Temperatur erfolgt ganzzahlig in °C. Hierbei ist zu beachten, dass das Aufschmelzen des Filaments nicht nur von der Temperatur des Heizblocks abhängt, sondern auch von der Fördergeschwindigkeit. Diese hat Einfluss auf die Dauer des Verbleibs des Filaments im Hotend und damit auf die Dauer der Wärmeeinwirkung. Eine höhere Temperatur ermöglicht eine höhere Fördergeschwindigkeit, eine zu hohe Temperatur bewirkt jedoch eine Degradation des Filamentmaterials. Temperatur und Fördergeschwindigkeit müssen folglich aufeinander abgestimmt sein. Die Eingabe der Fördergeschwindigkeit erfolgt in mm/min.

Druckeinheit

Der Druckzylinder kann einen maximalen Druck von 10 bar aufbringen, was zu einer maximalen Belastung von 2810 N führt (FESTO, 2010, 2021a). Der Druck wird benötigt, um das Material zu formen, Lufteinschlüsse zu minimieren und zu konsolidieren, sowie die Position des Druckwerkzeugs auf dem Laminat sicherzustellen. Somit wird der Druck nicht komplett auf die Naht ausgeübt, da ein Teil durch die beiden äußeren Kufen auf das Laminat übertragen wird. Weiterhin kann die Temperatur des Druckblocks variiert werden. Die integrierte Heizpatrone hat eine Leistung von 200W und eine theoretische maximale

Temperatur von 750 °C (Heinz Stegmeier Heizelemente, 2022). Aufgrund der großen Masse und Oberfläche, über die Wärme abgegeben wird, sind jedoch nur Temperaturen bis 240 °C realisierbar. Dies genügt jedoch, da nur der Abkühlprozess verlängert werden soll, um eine bessere Konsolidierung zu erreichen.

Vorschubgeschwindigkeit des Endeffektors

Die Eingabe der Geschwindigkeit, mit der der Endeffektor über das Laminat bewegt wird, erfolgt über das KUKA-SmartPad in mm/min. Hierüber ist es auch möglich die Startposition und die Länge der Bahn zu definieren. Die Fahrriichtung ist immer parallel zur x-Achse des Systems. Die Geschwindigkeit muss an die Aufschmelzgeschwindigkeit der Heißluft, sowie an das Fördervolumen des Hotends angepasst werden.

4 Versuchsdurchführung

Im folgenden Kapitel wird das genaue Vorgehen erläutert, sowie die vorgenommenen Anpassungen am WeldSealer-Prozess vorgestellt. Die Arbeitsschritte gliedern sich in den Auftrag des Energierichtungsgebers, das kontinuierliche Ultraschallschweißen und die Versiegelung der Schweißnähte.

4.1 Vorgehensweise

Wie in Kapitel 1.1 beschrieben, findet die Masterarbeit im Rahmen des Projekts Clean Sky 2 Multifunctional Upper Shell Fuselage Demonstrator (MFFD) statt. Die gewonnenen Erkenntnisse sollen unter anderem beim Anbringen der Stringer per kontinuierlichem Ultraschallschweißen Anwendung finden. Es werden daher identische Materialien verwendet. Hierbei handelt es sich um Organobleche der Firma *Toray* mit einer Matrix aus LMPAEK und neun Lagen CF mit der Ausrichtung ($\pm 45/90/0/90/0/90/\pm 45$). Aus den Organoblechen mit einer Dicke von 1,6 mm werden Probekörper mit den Abmessungen 390*100 mm per Wasserstrahlanalage zugeschnitten. Danach werden die Organobleche mit Aceton gereinigt, um Fett und andere Verunreinigungen zu entfernen. Abbildung 4.1 zeigt eine schematische Darstellung der Probekörper. Der Überlapp für die Verschweißung beträgt 12,7 mm.

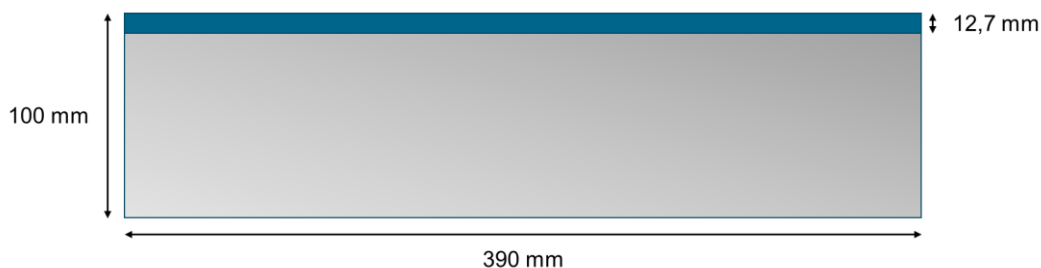


Abbildung 4.1: Schematische Darstellung der Probekörper

Insgesamt werden 42 Probekörper zugeschnitten. Da jede Schweißung zwei Fügepartner erfordert, stehen folglich 21 Paare zur Verfügung. Hiervon werden 16 Proben mit dem WeldSealer-ERG bedruckt. Die verbliebenen fünf Proben werden mit strukturierter ERG-Folie versehen, um Vergleichswerte zu erhalten. Im nächsten Schritt werden alle 21 Paare per kontinuierlichem Ultraschallschweißen verschweißt. Die deutlich höhere Anzahl an Proben mit WeldSealer-ERG ist notwendig, da es sich um ein neues Verfahren handelt, zu dem bisher keine Daten vorliegen. Dies ermöglicht Vorversuche zur Parameterfindung.

Von den finalen Schweißungen werden bei jeweils zwei mit WeldSealer-ERG und zwei mit ERG-Folie die Schweißnaht versiegelt. Insgesamt werden acht Proben analysiert: Vier mit WeldSealer-ERG, vier mit ERG-Folie, jeweils zwei versiegelt. Das Vorgehen wird in Abbildung 4.2 schematisch dargestellt.

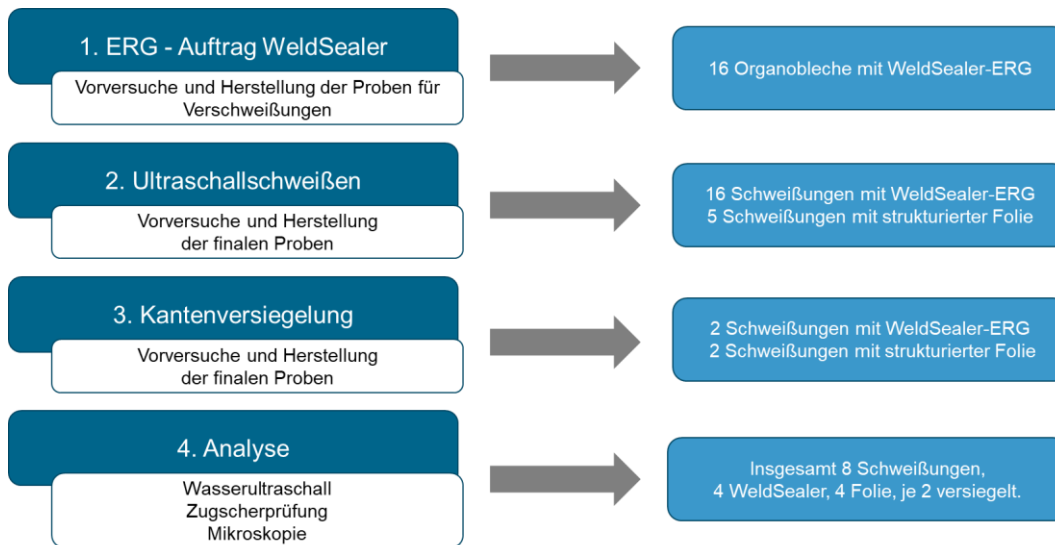


Abbildung 4.2: Überblick über die Vorgehensweise

4.2 Weiterentwicklung des WeldSealer-Prozesses

Bisher wurde mit dem WeldSealer in erster Linie PPS verarbeitet. Da die Verarbeitung von LMPAEK höhere Temperaturen erfordert und die bisherige Konstruktion nicht darauf ausgelegt ist, sind umfangreiche Anpassungen erforderlich.

Filament

Als Filament wird *VICTREX AM™ 200 FIL* verwendet. Der Hersteller *Victrex* liefert auch das Matrixmaterial für die Lamine und Prepregs von *Toray*, wodurch optimale Kompatibilität garantiert wird. Um Blasenbildung bei der Verarbeitung zu vermeiden, wird das Filament vor der Verwendung 48 Stunden bei 60 °C und 0 % Luftfeuchtigkeit getrocknet. Bei längerer Verwendung werden mehrere Filamentspeicher im Wechsel verwendet, da bereits nach wenigen Stunden Kontakt mit Luftfeuchtigkeit die Verarbeitungsqualität nachlässt (Dirnhofer, 2021, S. 51). Die Eigenschaften des Filaments sind Tabelle 4.1 zu entnehmen (Victrex, 2022).

Tabelle 4.1: Eigenschaften von VICTREX AM™ 200 FIL (Herstellerangaben)

Eigenschaft	Wert / Bereich
Filamentdurchmesser	1,75 mm
Schmelzpunkt	303 °C
Glasübergangstemperatur	151 – 154 °C
Kristallisationstemperatur	249 °C
Schmelzviskosität	400 Pa*s
Empfohlene Extrusionstemperatur	380 – 410 °C

Temperiereinheit

Heißluftpistole und zugehörige Heißluftdüse bilden den Hauptbestandteil der Temperiereinheit. Die Aufgabe der Düse besteht in der Lenkung der Heißluft mit dem Ziel einen definierten Bereich der Laminatoberfläche aufzuschmelzen. Die bisher verwendete Düse, siehe Abbildung 3.2, schmilzt einen Bereich mit einer Breite von etwa 17 mm auf, siehe Abbildung 4.3 (links). Um einen konzentrierteren Wärmeeintrag zu erreichen, wird eine Düse mit kleinerem Luftauslass konstruiert, siehe Abbildung 4.3 (rechts). Dies ermöglicht ein schnelleres Aufschmelzen der Oberfläche und folglich eine höhere Prozessgeschwindigkeit. Die resultierende Breite des temperierten Bereichs beträgt 10 mm.

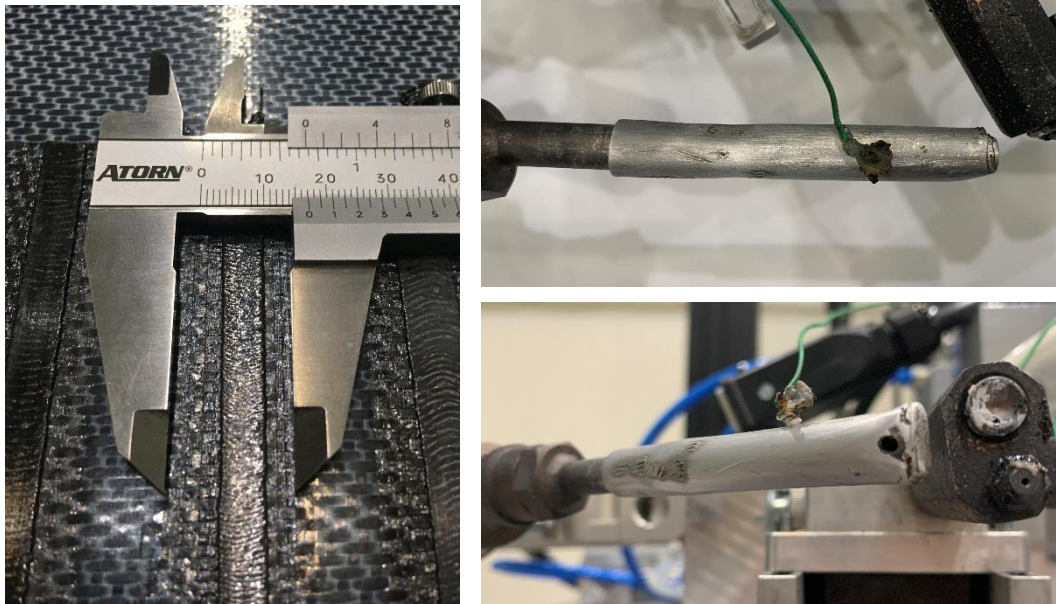


Abbildung 4.3: Zuvor aufgeschmolzener Bereich (links) und neue Heißluftdüse (rechts)

Plastifiziereinheit

Die Hauptaufgabe der Plastifiziereinheit besteht im Aufschmelzen des Filaments. Bei der Verwendung von LMPAEK sind hierfür Temperaturen von 380 – 410 °C notwendig, siehe Tabelle 4.1. Das zuvor verbaute Hotend war nicht in der Lage diese Temperatur zu erreichen, ohne Schaden zu nehmen. Ursache hierfür war das Fehlen einer Leistungsbegrenzung der verbauten Heizpatronen. Um die Implementierung einer Heat Control in die TwinCAT-Steuerung zu realisieren, werden neue Heizpatronen verbaut. Diese haben eine Leistung von 200 W und sind mit internen Temperaturfühlern versehen, deren Informationen eine entsprechende Regelung ermöglichen (Heinz Stegmeier Heizelemente, 2022). Auf die Heat Control wird im Abschnitt „Prozesssteuerung“ genauer eingegangen. Aufgrund der neuen Abmessungen der Heizpatronen mit einer Länge von 60 mm wird der Heizblock entsprechend neu konstruiert. Dieser besteht aus Kupfer, da das zuvor verwendete Material Aluminium maximal bis Temperaturen von 350 °C ausgelegt ist. Ein weiterer Vorteil von Kupfer besteht in der erheblich höheren Wärmeleitfähigkeit. Die Länge der Nozzle wird ebenfalls entsprechend angepasst und der Heizblock mit einem externen Temperaturfühler versehen. Bedingt durch die neuen Abmessungen erhöht sich die Strecke der Wärmeinwirkung, was sich vorteilhaft auf den Schmelzprozess auswirkt. Das Hotend ist in Abbildung 4.4 dargestellt.

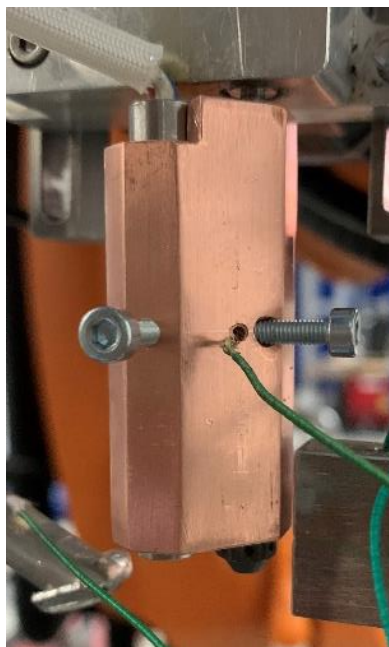


Abbildung 4.4: Neues Hotend aus Kupfer

Druckeinheit

Die Aufgabe der Druckeinheit besteht in der Formgebung und langsamen Verfestigung des Extrudats unter Druck. Konstruktionsbedingt neigt der Formgeberschlitten zum Verkappen. Die Druckbeaufschlagung erfolgt verstärkt über die rechte Kufe, bedingt durch deren direkte Befestigung an der Einheit des pneumatischen Zylinders. Mit dieser Kufe sind wiederum Druckblock und zweite Kufe verbunden. Die Befestigung wird in Abbildung 4.5 (links) dargestellt. Um ein Verkappen zu unterbinden, wird die Befestigung überarbeitet, siehe Abbildung 4.5 (rechts). Die Druckbeaufschlagung erfolgt nun von oben mittig. Der Formgeberschlitten wird entsprechend angepasst. Auf Kufen wird verzichtet, da die Geometrie des Materialauftrags direkt in den jeweiligen Druckblock integriert wird. Hierauf wird in den Kapitel 4.3 und 4.5 näher eingegangen. Wie beim Hotend werden Heizpatronen mit integriertem Thermoelement verbaut und eine Heat Control implementiert. Der Formgeberschlitten ist ebenfalls mit einem externen Temperatursensor versehen.

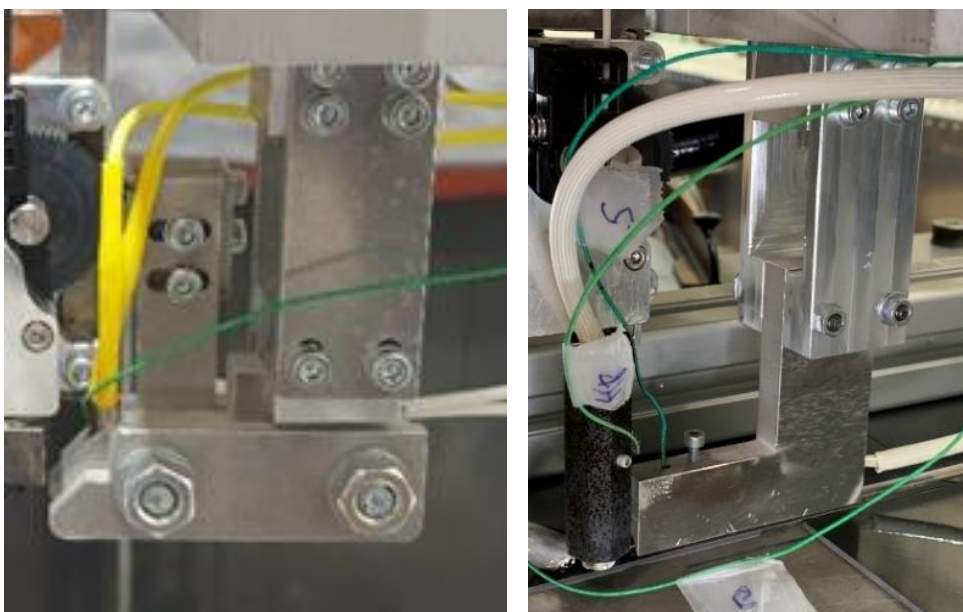


Abbildung 4.5: Befestigung und Formgeberschlitten alt (links) und neu (rechts)

Prozesssteuerung

Die Steuerung der Heizpatronen erfolgt zuvor über die Eingabe der gewünschten externen Temperatur. Diese bezieht sich auf die Temperatur des umgebenden Materials, konkret Heiz- und Druckblock. Die interne Temperatur bezieht sich auf die Temperatur der Heizpatrone. Aufgrund der thermischen Trägheit des Materials, reagiert die externe Temperatur beim Aufheizen zeitverzögert. Bis zum Erreichen dieser Temperatur werden

die Heizpatronen mit maximaler Leistung betrieben. Da keine Leistungsbegrenzung vorhanden ist, können interne Temperaturen von über 1000 °C erreicht werden. Dies führt bereits nach wenigen Minuten zum Versagen der Patrone. Um das zu verhindern, wird in die TwinCAT-Steuerung eine Heat Control implementiert. Diese regelt über die intern verbauten Temperaturfühler der Heizpatronen und verhindert so schädigende interne Temperaturen über 750 °C. Zudem neigt die externe Temperatur, bedingt durch die thermische Trägheit, zum starken Übersteuern bzw. zu Temperaturschwankungen. Um dem entgegenzuwirken, erfolgt die Steuerung über die manuelle Eingabe der internen Temperatur. Diese wird konstant gehalten und verhindert so Temperaturschwankungen. Die externe Temperatur dient der Kontrolle, wobei die Differenz aufgrund von Abstrahlungsverlusten bis zu 250 °C beträgt.

Bedingt durch die Verwendung der leistungsstärkeren Heizpatronen und zusätzlichen Sensoren erfolgt der Einbau weiterer Steuereinheiten in Form von EtherCat-Klemmen der Firma Beckhoff, sowie sicherheitsrelevante Leistungs- und Fehlerstrom-Schutzschalter. Das Installationsgehäuse wird hierzu ausgetauscht und neu verkabelt. Der WeldSealer mit sämtlichen Anpassungen wird in Abbildung 4.6 dargestellt.



Abbildung 4.6: Weiterentwicklung des WeldSealers

4.3 Auftrag des Energierichtungsgebers mittels WeldSealer

Der automatisierte Auftrag des Energierichtungsgebers dient der Reduktion der manuellen Vorverarbeitung, sowie der Erhöhung der Wiederholgenauigkeit. Er bietet zudem mehr Flexibilität hinsichtlich anspruchsvoller Bauteilgeometrien oder der Gestaltung des Energierichtungsgeber selbst.

4.3.1 Geometrie des Energierichtungsgebers

Vorangegangene Versuche mit rechteckigen ERG-Formen zeigen ein nicht ideales und volatiles Aufschmelzverhalten (Böck, 2022). Beim Ultraschallschweißen unverstärkter Kunststoffe werden während des Herstellungsprozesses der Fügepartner typischerweise umlaufende, angespritzte Materialstege mit dreieckigem Querschnitt in die Fügezone integriert. Dreieckige Geometrien als Energierichtungsgeber bewirken bedingt durch die Wärmekonzentration in der Spitze des Dreiecks eine schnelleres und gleichmäßigeres Aufschmelzverhalten als flächige Alternativen. Zudem bietet die Geometrie den Vorteil des großen Fügewegs und damit verbundenen starken Quetschflusses. Dieser wirkt sich positiv auf die Prozesssicherheit und die Eigenschaften der Fügung aus. Während bei zu geringen Mengen an ERG-Material nicht ausreichend Quetschfluss entsteht, zeigen vorangegangene Studien, dass zu große Materialmengen sich nachteilig auf das Aufschmelzverhalten auswirken (Böck, 2022). Basierend auf diesen Erkenntnissen werden folgende Kriterien für den mittels WeldSealer aufgetragenen Energierichtungsgeber identifiziert:

1. Kontinuierlicher Auftrag eines Materialstegs mit dreieckigem Querschnitt
2. Identische Materialmenge im Vgl. zu Schweißungen mit Folien-ERG

Die Maße des dreieckigen ERG berechnen sich daher basierend auf dem Volumen der üblicherweise für Schweißungen mit einem Überlapp von 12,7 mm verwendeten Folie. Die Dicke der Folie beträgt 0,1 mm, die Breite 10 mm. Für den Schweißprozess werden zwei übereinander geschichtete Lagen verwendet, daher beträgt die Querschnittsfläche

$$A_{Folie} = 2 * B * H = 2 * 10 \text{ mm} * 0,1 \text{ mm} = 2 \text{ mm}^2$$

Die Fläche eines rechtwinkligen, gleichseitigen Dreiecks berechnet sich durch

$$A_{Dreieck} = \frac{H * B}{2} = \frac{2 * H}{2} * H = H^2$$

Hierbei entspricht die Breite des Dreiecks der doppelten Höhe. Bei einer identischen Querschnittsfläche der Energierichtungsgeber ergibt sich somit eine Höhe des Dreiecks von

$$H = \sqrt{A} = \sqrt{2} \approx 1,4$$

Basierend auf diesen Berechnungen wird ein Formgeberschlitten mit entsprechender Geometrie konstruiert. Die Kontaktfläche wird mit der entsprechenden Dreiecksgeometrie, sowie einem Trichter zur Aufnahme des Extrudats versehen. Die Geometrie des Energierichtungsgebers, sowie der Formgeberschlitten werden in Abbildung 4.7 schematisch dargestellt.

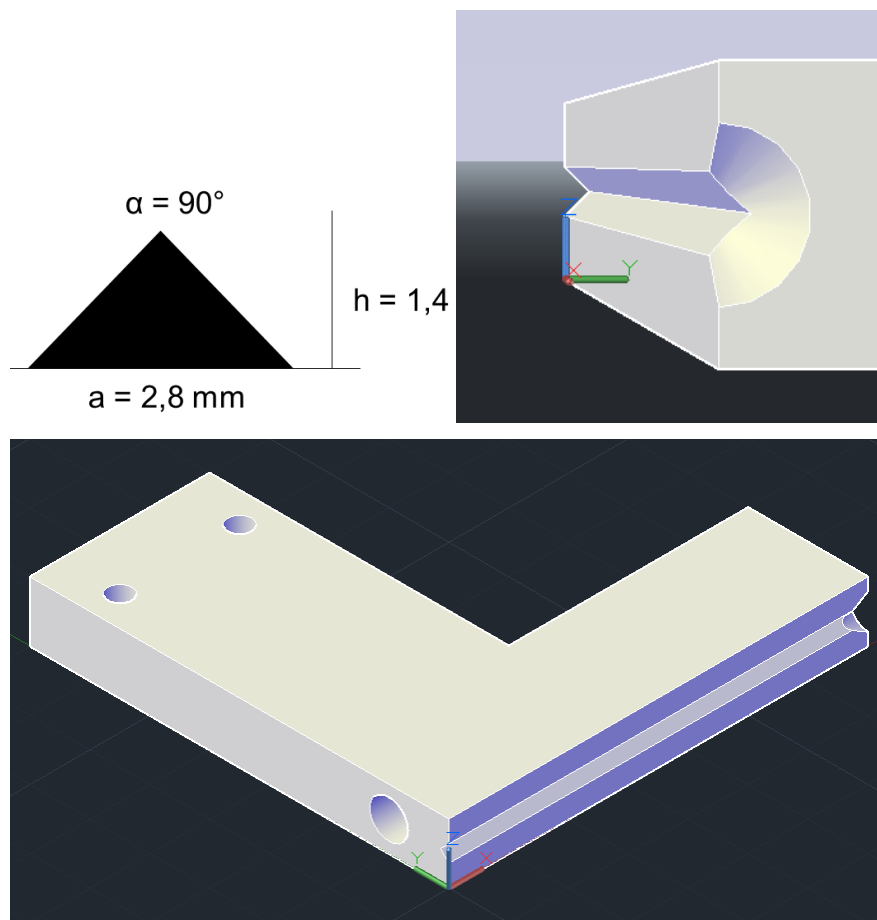


Abbildung 4.7: Geometrie des Energierichtungsgebers und des Formgeberschlittens

4.3.2 Parameterfindung

Vorangegangene Studien beschäftigen sich in erster Linie mit der Verarbeitung von PPS. Die hierbei gewonnenen Erkenntnisse dienen als Grundlage bei der Parameterfindung. Bedingt durch das neue Material LMPAEK, sowie die vorgenommenen Änderungen am WeldSealer-Prozess müssen einige Parameter neu evaluiert werden. Tabelle 4.2 zeigt die Parameter vorangegangener Studien.

Tabelle 4.2: Parameter vorangegangener WeldSealer-Studien

Zugehörigkeit	Parameter	Wert / Bereich
Temperiereinheit	Volumenstrom [l/min]	35 - 45
	Heizleistung	17500
	Temperatur [°C]	490-535
Plastifiziereinheit	Temperatur extern [°C]	350 - 415
	Filamentgeschwindigkeit [mm/min]	280 - 345
Druckeinheit	Temperatur extern [°C]	92 - 250
	Zylinderdruck [bar]	2 - 5
Roboter	Vorschubgeschwindigkeit [mm/s]	1,5 - 3

Temperiereinheit

Wie auch in vorangegangenen Studien wird die Heißluftpistole dauerhaft mit maximaler Leistung betrieben. Dies ermöglicht ein schnelleres Aufschmelzen der Laminatoberfläche und eine Erhöhung der Prozessgeschwindigkeit. Vorversuche zeigen, dass ein minimaler Volumenstrom von 35 l/min das Aufschmelzverhalten optimiert.

Vorschubgeschwindigkeit des Endeffektors

Um eine industrielle Anwendung des WeldSealer-Prozesses zu ermöglichen, ist eine hohe Prozessgeschwindigkeit anzustreben. Als limitierender Faktor erweist sich hierbei die Leistung der Temperiereinheit. Bei zu hohen Geschwindigkeiten erfolgt kein Aufschmelzen der Laminatoberfläche und infolgedessen keine Anhaftung. Im Rahmen von Vorversuchen kann eine maximale Vorschubgeschwindigkeit von 3 mm/s ermittelt werden. Bei 4 mm/s erfolgt bereits nur noch eine geringe bis keine Anhaftung. Niedrigere Geschwindigkeiten ab 2 mm/s führen zum verfrühten Erstarren der Schmelze und zum Verstopfen des Formgeberschlittens.

Plastifiziereinheit

Die Fördergeschwindigkeit des Filaments berechnet sich aus der Querschnittsfläche des aufgetragenen Energierichtungsgebers, sowie der Prozessgeschwindigkeit. Die Querschnittsfläche beträgt 2 mm^2 , die Prozessgeschwindigkeit 3 mm/s . Das benötigte Volumen pro Sekunde berechnet sich durch

$$\frac{V_{ERG}}{t} = A_{ERG} * v_{Prozess} = 2 \text{ mm}^2 * 3 \frac{\text{mm}}{\text{s}} = 6 \frac{\text{mm}^3}{\text{s}}$$

Bei einem Durchmesser von $1,75 \text{ mm}$ beträgt die Querschnittsfläche des Filaments

$$A_{Filament} = \pi * r^2 = \pi * \left(\frac{1,75 \text{ mm}}{2}\right)^2 = 2,41 \text{ mm}^2$$

Das Volumen des Extrudats pro Sekunde berechnet sich daher durch

$$\frac{V_{Filament}}{t} = A_{Filament} * v_{Filament}$$

Da das Volumen des Auftrags und des Extrudats pro Sekunde identisch ist, beträgt die Geschwindigkeit der Fördereinheit

$$v_{Filament} = \frac{A_{ERG}}{A_{Filament}} * v_{Prozess} = \frac{6 \frac{\text{mm}^3}{\text{s}}}{2,41 \text{ mm}} = 2,49 \frac{\text{mm}}{\text{s}} \approx 150 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$$

Vorversuche mit 150 mm/min zeigen jedoch eine ungleichmäßige Oberfläche, sowie Lufteinschlüsse innerhalb des Materialauftrags. Dies deutet auf eine zu geringe Materialverfügbarkeit hin. Begründen lässt sich dies durch einen leichten seitlichen Quetschfluss, sowie einen geringen Schlupf der Fördereinheit. Die Fördergeschwindigkeit wird daher auf 170 mm/min erhöht.

Die Extrusionstemperatur beträgt gemäß der Empfehlung des Herstellers *Victrex* in Tabelle 4.1 410 °C. Eine hohe Temperatur verringert die Viskosität, zu hohe Temperaturen über 410 °C führen jedoch zur Degradation des Extrudats.

Druckeinheit

Die Temperatur des Formgeberschlittens befindet sich mit 240 °C knapp unterhalb der Kristallisationstemperatur des Extrudats. Dies ermöglicht ein langsames Abkühlen und die Kristallisation der Schmelze, wodurch die Anbindung an die Laminatoberfläche erhöht wird. Vorversuche zeigen zudem ein leichtes Abheben des Formgeberschlittens bedingt durch einen seitlichen Quetschfluss. Um diesen zu minimieren, wird die Druckbeaufschlagung auf 8 bar erhöht.

Die finalen Parameter werden in Tabelle 4.3 dargestellt.

Tabelle 4.3: Auftrag des Energierichtungsgebers mittels WeldSealer finale Parameter

Zugehörigkeit	Parameter	Wert / Bereich
Temperiereinheit	Volumenstrom [l/min]	35
	Heizleistung	17500
	Temperatur [°C]	490-530
Plastifiziereinheit	Temperatur intern [°C]	640
	Temperatur extern [°C]	410
	Filamentgeschwindigkeit [mm/min]	170
Druckeinheit	Temperatur intern [°C]	440
	Temperatur extern [°C]	240
	Zylinderdruck [bar]	8
Roboter	Vorschubgeschwindigkeit [mm/s]	3

4.3.3 Materialauftrag

Um einen gleichmäßigen Materialauftrag über die gesamte Länge der Probe zu ermöglichen, wird diese zwischen zwei baugleichen Laminaten eingespannt. Dies ist notwendig, um dem Formgeberschlitten vor Beginn des Prozesses eine Auflagefläche zur Verfügung zu stellen, sowie ein Verkippen bei Beendigung des Prozesses zu verhindern. Der Auftrag des Energierichtungsgebers wird in Abbildung 4.8 dargestellt.



Abbildung 4.8: Auftrag des Energierichtungsgebers mittels WeldSealer

Nach den vorangegangenen Versuchen zur Parameterfindung zeigen die finalen Proben eine definierte und gleichmäßige Dreiecksgeometrie. Die Bildung eines seitlichen Quetschflusses lässt sich nicht vollständig verhindern, erweist sich jedoch nicht als störend. Der Prozess zeigte eine hohe Wiederholgenauigkeit für alle 16 Lamine über die gesamte Länge von 390 mm. Während des Prozesses mussten keine Werte manuell angepasst werden. Die finalen Proben werden in Abbildung 4.9 dargestellt.

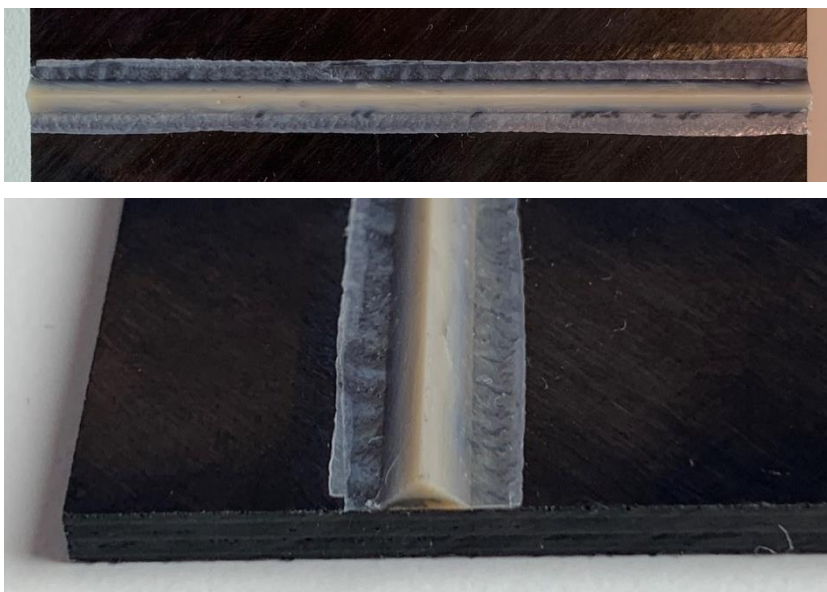


Abbildung 4.9: Auftrag des Energierichtungsgebers finale Proben

Die Prozessgeschwindigkeit erweist sich mit 3 mm/s als gering. Der limitierende Faktor hierbei ist die Temperiereinheit. Diese wurde hinsichtlich Leistung und Positionierung bereits optimiert. Um eine industrielle Anwendung zu ermöglichen und die Prozessgeschwindigkeit zu erhöhen, empfiehlt sich die Installation einer leistungsstärkeren Heizquelle.

4.4 Kontinuierliches Ultraschallschweißen

Im Gegensatz zum sequentiellen Ultraschallschweißen, wobei die Sonotrode zwischen einzelnen Schweißpunkten neu positioniert wird, basiert das kontinuierliche Ultraschallschweißen auf einer konstanten Bewegung der Sonotrode entlang einer festgelegten Schweißnaht. Bei dem verwendeten Endeffektor handelt es sich um eine eigens entwickelte Konstruktion des ZLP. Dieser basiert auf dem *Branson Ultraschallgenerator DCX* mit einer Frequenz von 20 kHz und einer Ausgangsleistung von 4,0 kW. Der Endeffektor ist in Abbildung 4.10 dargestellt.



Abbildung 4.10: Endeffektor Ultraschallschweißen

Um geeignete Parameter und Konfigurationen des Schweißprozesses zu ermitteln, werden Vorversuche durchgeführt und der Schweißprozess variiert. Der Prozess wird durch die Parameter Schweißamplitude, Schweißkraft und Schweißgeschwindigkeit, sowie Konsolidierungsdruck charakterisiert. Zudem kann der vorgelagerte Anpressdruck der Kompaktierrolle variiert werden. Die Steuerung der Schweißamplitude erfolgt weggeregt. Die Frequenz ist durch die Schweißeinheit auf 20 kHz festgelegt und wird in den Versuchen nicht variiert. Die Startparameter basieren auf Erkenntnissen vorangegangener Studien mit identischen Laminaten und ERG-Folie, siehe Tabelle 4.4.

Tabelle 4.4: Startparameter kontinuierliches Ultraschallschweißen

Schweißamplitude [%]	86 - 92
Schweißkraft [N]	700
Konsolidierungsdruck [bar]	7,0
Anpressdruck Kompaktierrolle [N]	300
Schweißgeschwindigkeit [mm/s]	25,5

4.4.1 Schweißen mit WeldSealer-Energierichtungsgeber

Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 4.11 schematisch veranschaulicht. Die Sonotrode wird in Hellblau, die Proben in Blau und der ERG in Gelb dargestellt. Die obere, mit WeldSealer-Auftrag versehene Probe wird verkippt eingespannt, mit dem Ziel den Fügeweg von 1,4 mm zu kompensieren. Die Fügepartner befinden sich nach Vollendung des Fügewegs parallel zueinander. Die Sonotrode wird mittig über dem ERG positioniert. Um die Verkipfung der Probe auszugleichen und einen flächigen Kontakt zur Laminatoberfläche zu ermöglichen, besitzt diese eine ballige Auflagefläche mit einem Radius von 500 mm und einem Durchmesser von 22 mm.

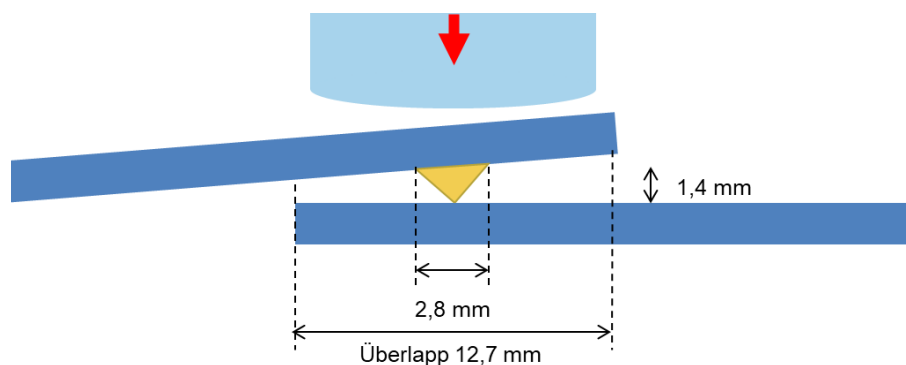


Abbildung 4.11: Versuchsaufbau kontinuierliches Ultraschallschweißen mit WeldSealer-ERG

Erste Versuche mit den in Tabelle 4.4 dargestellten Parametern weisen starke Verbrennungen im Randbereich auf. Dies lässt sich mit der hohen thermischen Leitfähigkeit der Fasern begründen. Die gezielt eingebrachte Energie wird von den Fasern aufgenommen und längs der Faserorientierung verteilt. In den Randbereichen kommt es hierbei zu einem Wärmestau, der zu Degradation der Matrix und zur Dekonsolidierung des Laminats führt, siehe Abbildung 4.12. Im seitlichen Randbereich wird dieser Effekt bedingt durch die rechteckige Form der Proben verstärkt. Folglich wird die Schweißamplitude in diesem Bereich reduziert. Zusätzlich kommt es über die Dauer der Schweißung zu einer stetigen Temperaturzunahme der gesamten Probe. Dem kann mit einer linearen Abnahme der Amplitude über die Strecke der Schweißung begegnet werden.



Abbildung 4.12: Dekonsolidierung des Laminats durch zu hohen Wärmeeintrag

Um die Verkipfung des oberen Fügepartners zu kompensieren, wird eine Sonotrode mit balliger Auflagefläche verwendet. Aufgrund des großen Fügewegs von 1,4 mm und der daraus resultierenden starken Neigung befindet sich die Kontaktfläche der Sonotrode nicht mittig der Fügezone. Der Endeffektor wird daher um 3 mm quer zur Fahrtrichtung versetzt. Resultierend aus der größeren Entfernung zum Rand der Probe werden Verbrennungen deutlich reduziert. Der Prozess ist zudem sehr empfindlich gegenüber Verunreinigungen der Sonotrode. Bereits kleinste Materialreste an der Auflagefläche führen zu einem deutlich erhöhten Energieeintrag und daraus resultierenden Verbrennungen. Weiterhin kann die Oberfläche des Laminats beschädigt werden. Um eine hohe Wiederholgenauigkeit zu ermöglichen, wird die Auflagefläche daher nach jeder Durchführung gereinigt und poliert.

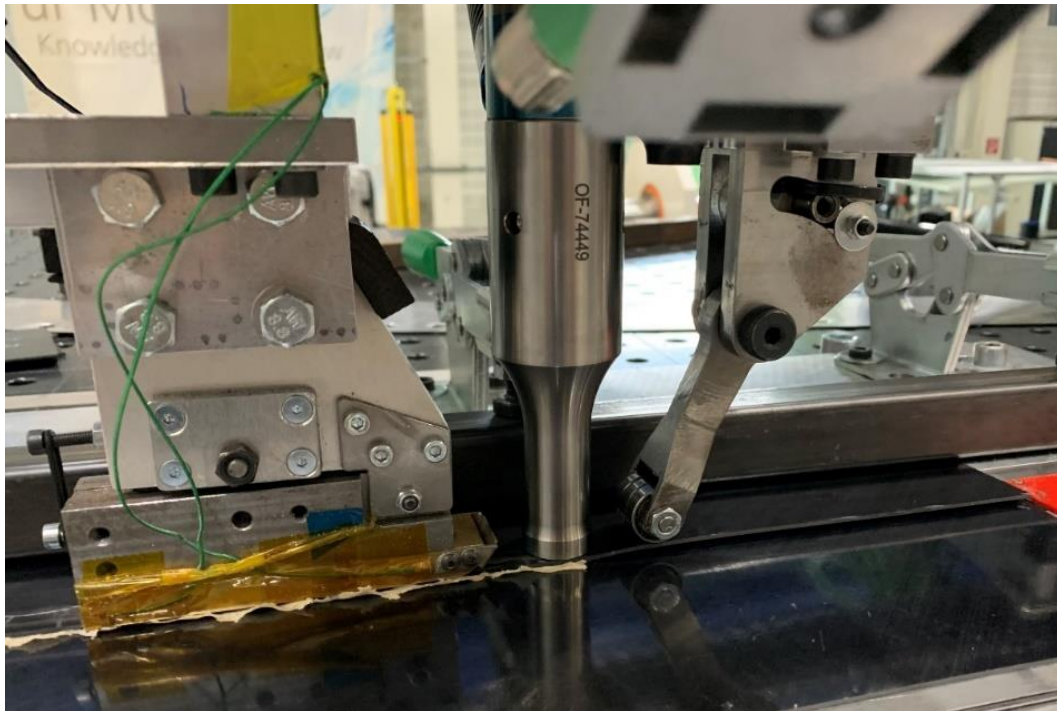


Abbildung 4.13: Prozess kontinuierliches Ultraschallschweißen

Der Schweißprozess wird in Abbildung 4.13 dargestellt. Um eine vollflächige Anbindung zu erreichen, muss der Energierichtungsgeber vollständig aufgeschmolzen und die Proben unter hohem Druck konsolidiert werden. Erste Schweißungen weisen einen deutlich sichtbaren Spalt zwischen den Fügepartnern auf. Eine Erhöhung des Schweißdrucks erweist sich als nicht möglich, da bei Kräften über 700 N die Schwingungen der Sonotrode stark gedämpft werden. Eine Erhöhung des Anpressdrucks von Kompaktierrolle und Heatsink bewirkt keine Verbesserung hinsichtlich der Spaltbildung. Bruchflächenanalysen zeigen ein unvollständiges Aufschmelzen des ERG. Durch Anpassung der Schweißamplitude wird ein vollständiges Aufschmelzen erreicht und die Spaltbildung unterbunden. Die finalen Parameter werden in Abbildung 4.14 dargestellt.

Amplitudenprofil

	Distance	Amplitude
0	0.0 mm	89.0 %
1	10.0 mm	90.0 %
2	318.0 mm	89.0 %
3	368.0 mm	86.0 %
4	0.0 mm	0.0 %
5	0.0 mm	0.0 %
6	0.0 mm	0.0 %
7	0.0 mm	0.0 %
8	0.0 mm	0.0 %
9	0.0 mm	0.0 %

Schweißgeschwindigkeit	25.50 mm/s
Heatsink Länge (mm):	100.00 mm
Heatsink Breite (mm):	12.70 mm

	Soll	Ist
☐ Zylinder Links (Heatsink) ausfahren (bar)	7.00 bar	0.01 bar
☐ Zylinder rechts (Kompaktierrolle) ausfahren (N)	300.00 N	6.28 N
☐ Sonotrode ausfahren (N)	700.00 N	12.79 N

Abbildung 4.14: Finale Parameter kontinuierliches Ultraschallschweißen mit WeldSealer-ERG

Bedingt durch den langen Fügeweg und das vollständige Aufschmelzen des ERG zeigt sich ein deutlich ausgeprägter Quetschfluss über die gesamte Länge der Proben, siehe Abbildung 4.15. Bis auf wenige Ausnahmen können Verbrennungen weitestgehend eliminiert werden. Bedingt durch die aufgebrachte Schweißkraft in Kombination mit der Erwärmung des Laminats kommt es zur Beschädigung der Oberfläche, dargestellt in Abbildung 4.16. Hierbei handelt es sich jedoch um nicht vermeidbare Begleiterscheinungen des Ultraschallschweißens.



Abbildung 4.15: Kontinuierliches Ultraschallschweißen mit WeldSealer-ERG und ausgeprägtem Quetschfluss

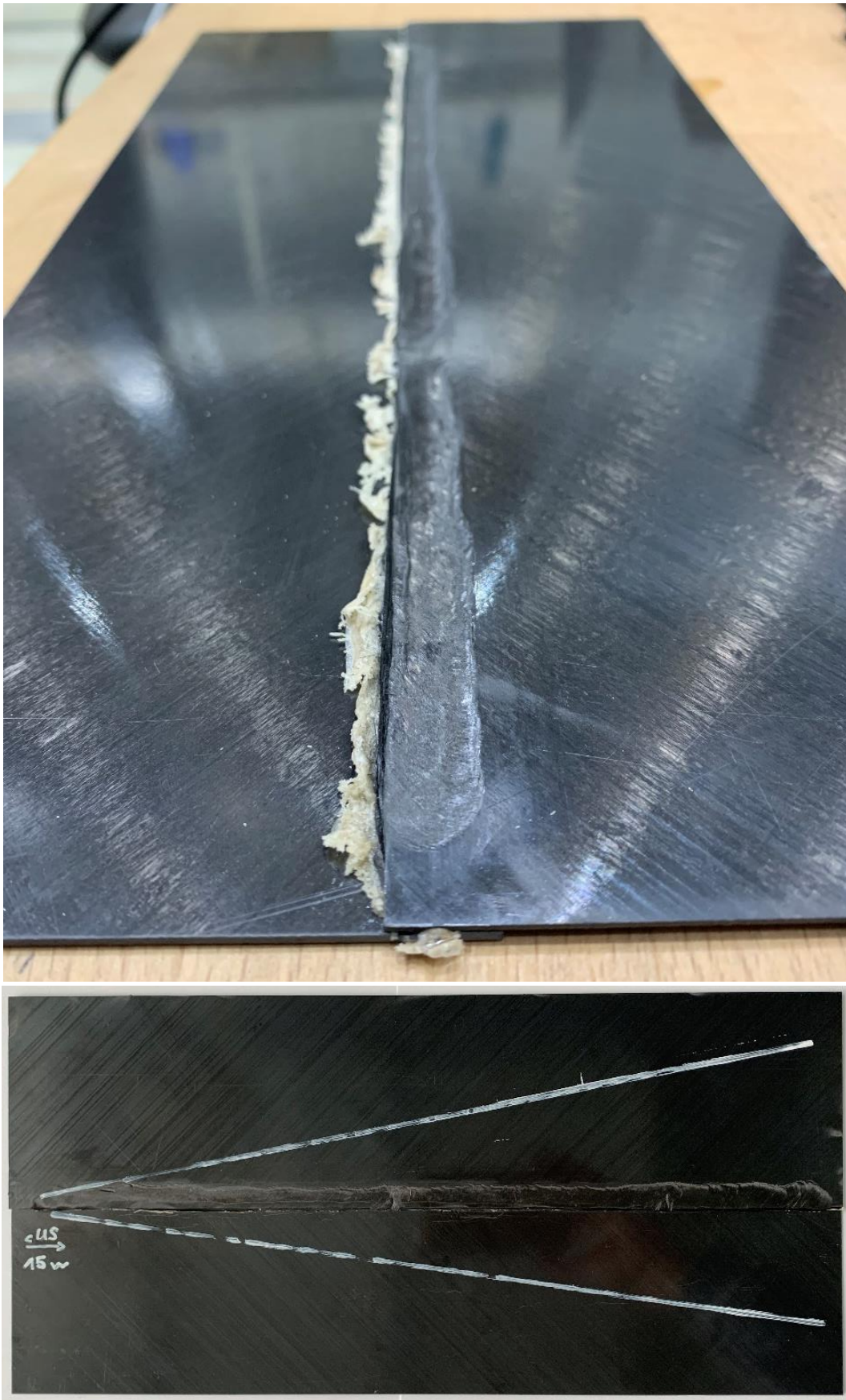


Abbildung 4.16: Beschädigung der Oberfläche nach kontinuierlichem Ultraschallschweißen mit WeldSealer-ERG vor und nach Entfernen des überschüssigen Quetschflusses (Probe 15)

4.4.2 Schweißen mit einer Zwischenschichtfolie als Energierichtungsgeber

Als Energierichtungsgeber wird eine 0,1 mm dicke, vorstrukturierte Folie aus LMPAEK und einer Breite von 9 mm verwendet. Die Positionierung erfolgt doppelagig mit einem Abstand von 2 mm zur Kante der Probe. Um ein Herausvibrieren der Folie während des Schweißprozesses zu verhindern, wird diese mit einem Handultraschallgerät manuell vorgeheftet. Aufgrund des geringen Setzweges von 0,2 mm werden die Fügepartner parallel zueinander eingespannt. Die Sonotrode befindet sich mittig über dem Energierichtungsgeber. Der Aufbau wird in Abbildung 4.17 schematisch dargestellt.

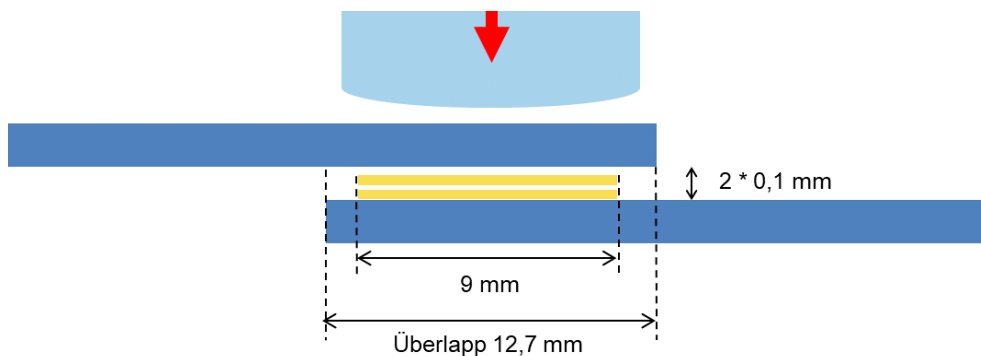


Abbildung 4.17: Versuchsaufbau kontinuierliches Ultraschallschweißen mit ERG-Folie

Die erste Schweißung basiert auf den Parametern aus Tabelle 4.4. Diese Parameter sind ursprünglich für identische Proben ausgelegt. Hierbei zeigen sich jedoch deutliche Verbrennungen im Randbereich, sowie den Kanten der Proben, siehe Abbildung 4.18.



Abbildung 4.18: Beschädigung der Laminatoberfläche durch zu hohen Energieeintrag

Resultierend aus den Erkenntnissen aus Kapitel 4.4.1 werden daher für die folgenden Schweißungen die Parameter aus Abbildung 4.14 verwendet. Hierbei zeigt sich ein deutlich geringerer Quetschfluss als bei den Schweißungen mit WeldSealer-Auftrag. Dies ist jedoch bei Schweißungen mit ERG-Folie üblich. Die Schweißungen mit Folie weisen, wie auch die Schweißung mit WeldSealer-ERG, eine Beschädigung der Laminatoberfläche in der Fügezone auf. Bei den Schweißungen mit Folie treten jedoch häufiger Verbrennungen auf, siehe Abbildung 4.19.

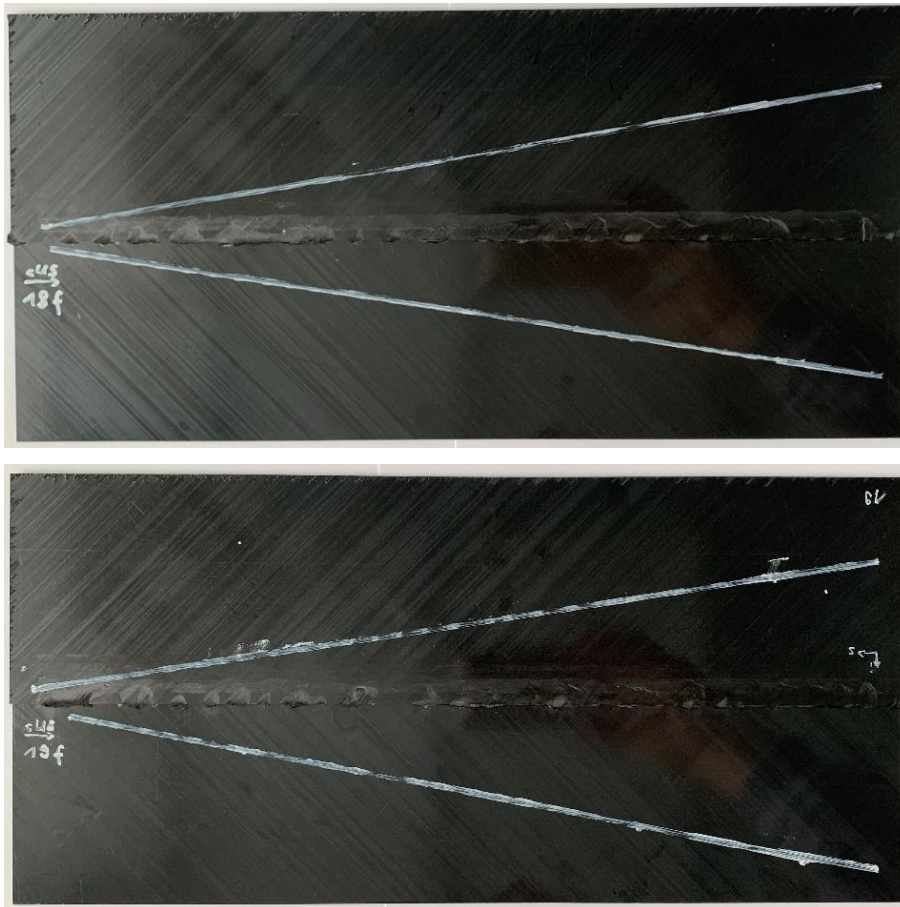


Abbildung 4.19: Beschädigung der Oberfläche nach kontinuierlichem Ultraschallschweißen mit ERG-Folie (Probe 18 und 19)

4.5 Schweißnahtversiegelung mittels WeldSealer

Für die Versiegelung der Fügekanten wird ein neuer Formgeberschlitten konstruiert. Die Konstruktion ist an Weng (2021) und Böck (2022) angelehnt. Das grundlegende Design entspricht dem Formgeberschlitten, der in Kapitel 4.3 Anwendung findet, die Kontaktfläche zum Laminat wird jedoch modifiziert. Diese ist mit einer Schräge versehen, welche das Extrudat aufnimmt und somit die Fügezone verschließt. An der Vorderseite ist

ein Trichter eingearbeitet. Die Höhe der Schräge von 1,6 mm entspricht der Dicke des Laminats. In Abbildung 4.20 wird die Geometrie des Formgeberschlittens dargestellt.

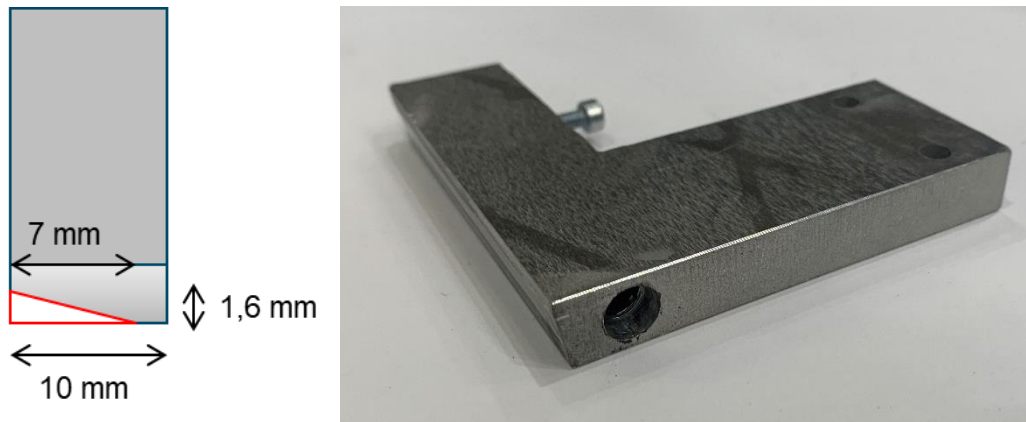


Abbildung 4.20: Schematische Darstellung der Geometrie und Abbildung des Formgeberschlittens für die Versiegelung der Fügezone

Die für den Auftrag der Versiegelung verwendeten Parameter basieren auf den Erkenntnissen aus Kapitel 4.3. Aufgrund der veränderten Querschnittsfläche des Auftrags wird jedoch die Fördergeschwindigkeit des Filaments angepasst. Die Querschnittsfläche der aufgetragenen Kehlnaht berechnet sich durch

$$A_{\text{Versiegelung}} = \frac{H * B}{2} = \frac{1,6 \text{ mm} * 7 \text{ mm}}{2} = 5,6 \text{ mm}^2$$

Bei einer Prozessgeschwindigkeit von 3 mm/s berechnet sich das benötigte Volumen pro Sekunde durch

$$\frac{V_{\text{Versiegelung}}}{t} = A_{\text{Versiegelung}} * v_{\text{Prozess}} = 5,6 \text{ mm}^2 * 3 \frac{\text{mm}}{\text{s}} = 16,8 \frac{\text{mm}^3}{\text{s}}$$

Bei einem Durchmesser von 1,75 mm beträgt die Querschnittsfläche des Filaments

$$A_{\text{Filament}} = \pi * r^2 = \pi * \left(\frac{1,75 \text{ mm}}{2} \right)^2 = 2,41 \text{ mm}^2$$

Das Volumen des Extrudats pro Sekunde berechnet sich daher durch

$$\frac{V_{Filament}}{t} = A_{Filament} * v_{Filament}$$

Da das Volumen von Versiegelung und Extrudat pro Sekunde identisch ist, beträgt die Geschwindigkeit der Fördereinheit

$$v_{Filament} = \frac{A_{Versiegelung}}{A_{Filament}} * v_{Prozess} = \frac{16,8 \frac{mm^3}{s}}{2,41 mm} = 6,97 \frac{mm}{s} \approx 420 \frac{mm}{min}$$

Der Versuchsaufbau ist identisch zum Auftrag des Energierichtungsgebers. Um einen gleichmäßigen Auftrag über die gesamte Länge der Probe zu erreichen, werden zusätzliche Lamine vor und nach der Probe eingespannt.

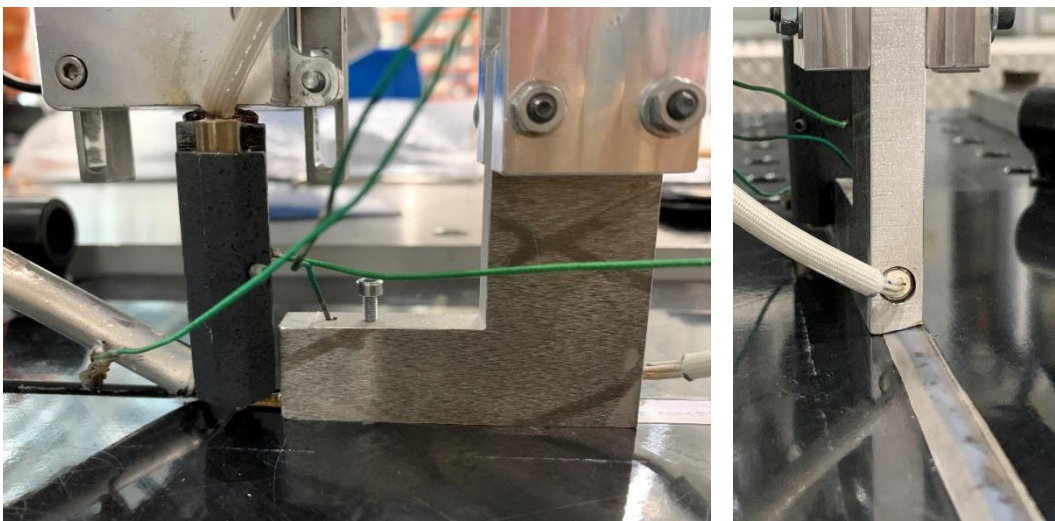


Abbildung 4.21: Versiegelungsprozess mittels WeldSealer

Eine große Herausforderung beim Auftrag der Kehlnaht besteht in kleinen Abweichungen des Volumens unter dem Formgeberschlitten. Diese werden durch unregelmäßige Bauteilkanten, bedingt durch Verformung beim Schweißprozess und Quetschflussreste verursacht. Zudem existiert ein minimaler Versatz der Fügenaht zur Fahrtrichtung des Endeffektors. Um dem zu begegnen, werden die Schweißnähte erneut von Quetschflussresten gereinigt und die Ausrichtung der Proben in 0,1 mm Schritten

korrigiert. Es genügen jedoch bereits kleinste Änderungen des Volumens, wodurch zu viel oder zu wenig Material extrudiert wird. Steht zu wenig Material zur Verfügung, ist der ausgeübte Druck zu gering, was zu Luftblasen, einer unebenen Oberfläche und geringen Anhaftung führt. Bei überschüssigem Material kommt es zu Verstopfungen des Formgeberschlittens. In beiden Fällen muss der Prozess wiederholt werden. Diese Herausforderung führt aktuell unumgänglich zu einer dauerhaften Überwachung und manuellen Anpassung der Fördergeschwindigkeit.

Bedingt durch die geringere und einseitige Auflagefläche des Formgeberschlittens ist zudem eine Reduktion des Konsolidierungsdrucks auf 2 bar notwendig. Bei höheren Drücken kommt es zur Verkantung und Beschädigung der Laminatoberfläche. Die finalen Parameter werden in Tabelle 4.5 dargestellt. Änderungen im Vergleich zu Kapitel 4.3 werden hier grau markiert.

Tabelle 4.5: Prozessparameter WeldSealer Schweißnahtversiegelung

Zugehörigkeit	Parameter	Wert / Bereich
Temperiereinheit	Volumenstrom [l/min]	35
	Heizleistung	10000
	Temperatur [°C]	490-530
Plastifiziereinheit	Temperatur intern [°C]	640
	Temperatur extern [°C]	410
	Filamentgeschwindigkeit [mm/min]	410 - 430
Druckeinheit	Temperatur intern [°C]	440
	Temperatur extern [°C]	240
	Zylinderdruck [bar]	2
Roboter	Vorschubgeschwindigkeit [mm/s]	3

Eine weitere Herausforderung besteht in Temperaturschwankungen der Temperiereinheit. Bei niedrigen Temperaturen von unter 500 °C wird die Laminatoberfläche nicht breit genug aufgeschmolzen, um eine vollflächige Anbindung zu erreichen. Dies wird in Abbildung 4.21 anhand des hellen Streifens im Randbereich ersichtlich und erfordert eine Wiederholung des Versiegelungsprozesses. In vorangegangenen Untersuchungen zum WeldSealer-Prozess wurden Gelege mit einer PPS-Matrix und einer Glasfaserdecklage verarbeitet. Glasfasern weisen eine geringere Wärmeleitfähigkeit auf und dienen somit als Isolationsschicht. Das an dieser Stelle verwendete UD-Laminat zeigt eine deutlich höhere Wärmeableitung, zusätzlich zu der erhöhten Schmelztemperatur der LMPAEK-Matrix. Die

Anforderungen an die Temperiereinheit sind daher deutlich erhöht. Eine finale versiegelte Probe wird in Abbildung 4.22 dargestellt.

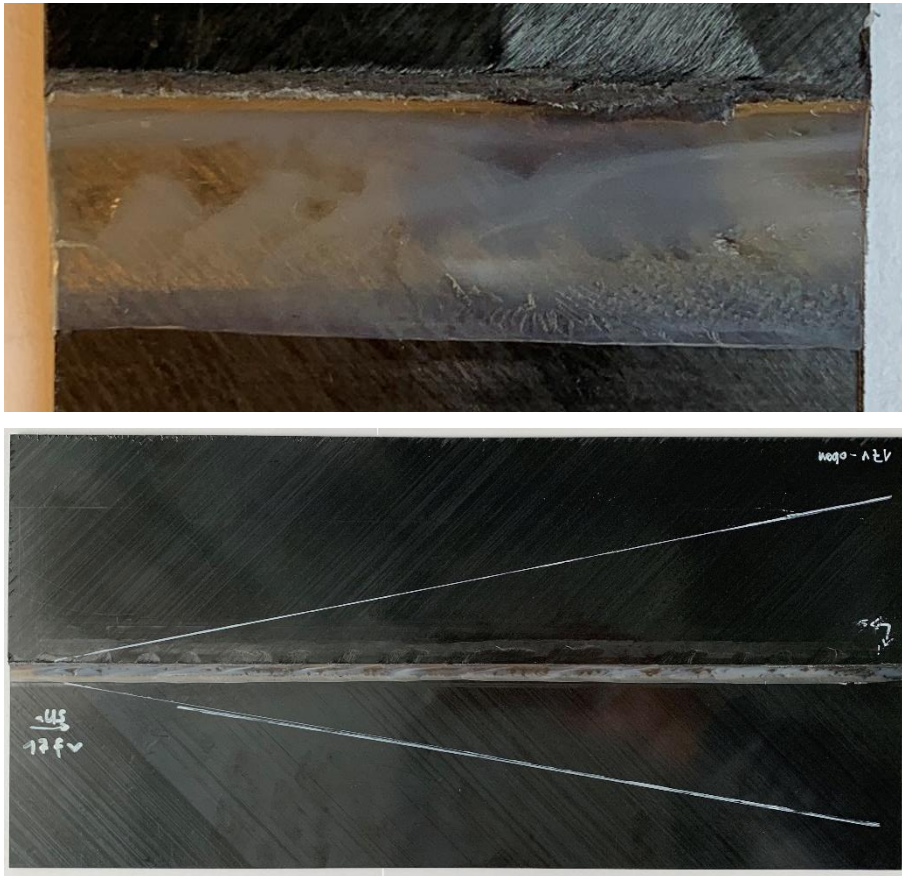


Abbildung 4.22: Versiegelte Schweißnaht mittels WeldSealer-Auftrag (Probe 17)

Wie bereits erwähnt, muss die Fördergeschwindigkeit des Filaments während des Auftrags überwacht und manuell angepasst werden. Dies stellt eine Herausforderung für die Automation und Wiederholgenauigkeit des Versiegelungsprozesses dar. Um dem zu begegnen, ist die Implementierung einer automatisierten Steuerung notwendig. Diese soll Veränderungen der Geometrie erkennen und entsprechende Parameter anpassen. Zudem soll die exakte Position der Fügenaht realisiert und die Ausrichtung des WeldSealers korrigiert werden. Erneut hat sich die Temperiereinheit als limitierender Faktor hinsichtlich der Prozessgeschwindigkeit erwiesen. Dies zeigt die Notwendigkeit einer leistungstärkeren Heizquelle, um die Prozessgeschwindigkeit zu erhöhen und eine industrielle Anwendung zu ermöglichen.

5 Versuchsauswertung

Die Analyse der Proben erfolgt zunächst mittels wassergekoppelter Ultraschallprüfung. Hierauf folgt der Zuschnitt der Probekörper zu Zug- und Schliffproben. Mittels Zugscherprüfung wird die mechanische Festigkeit der Verschweißung bewertet. Durch die Analyse der Bruchflächen können Versagensmechanismen charakterisiert und die unterschiedlichen Festigkeiten der Verbindungen begründet werden. Die mikroskopische Betrachtung von Querschnittsflächen ermöglicht die Einordnung der Ergebnisse vorangegangener Untersuchungen, sowie einer Bewertung der Qualität der Fügezone. Tabelle 5.1 zeigt die Übersicht über die getesteten Proben. Um einen besseren Überblick zu gewährleisten, werden die finalen Proben umbenannt und die Art des Energierichtungsgebers, sowie der Versiegelungsstatus in den Namen integriert.

Tabelle 5.1: Übersicht finale Proben

Probenname	Probennr.	Energierichtungsgeber	Versiegelung
WS1	15	WeldSealer	nein
WS2	16	WeldSealer	nein
WSV1	13	WeldSealer	ja
WSV2	14	WeldSealer	ja
F1	18	Folie	nein
F2	19	Folie	nein
FV1	17	Folie	ja
FV2	20	Folie	ja

5.1 Wassergekoppelte Ultraschallprüfung

Wie in Kapitel 2.4.2 beschrieben, basiert das Prinzip der Ultraschallprüfung auf der Reflektion von mechanischen Schwingungen an Grenzflächen innerhalb des Probekörpers. Bei dem verwendeten Gerät handelt es sich um ein *Olympus OmniScan MX2* zusammen mit einem Phased-Array Prüfkopf (*OMNI-P-PA32:128*) und einem 2-Achs-Encoder (*GLIDER 36x36*). Die Ankopplung des Prüfkopfs erfolgt durch regelmäßige Benetzung des Probekörpers mit Wasser. Die Prüfung basiert auf dem Impuls-Echo-Verfahren. Hierbei erfolgt die Feststellung von Fehlstellen in der Fügezone durch die Messung des Rückwandechos. Die Dämpfung des Signals erlaubt es Rückschlüsse auf die Porosität innerhalb der Fügezone zu ziehen. Eine starke Dämpfung deutet auf eine schlechte

Anbindung hin, wohingegen eine schwache Dämpfung und starkes Rückwandecho auf eine hochwertige Schweißung schließen lassen.

Prüfung der Proben mit Zwischenschichtfolie als Energierichtungsgeber

Abbildung 5.1 zeigt den ABC-Scan von Probe FV1. Hierbei handelt es sich um eine Schweißung mit Folie als Energierichtungsgeber. Zudem ist die Fügezone der Probe versiegelt. Im A-Scan (links oben) ist die gemessene Amplitude in Prozent des ausgesendeten Signals in Relation zum Abstand des Prüfkopfs zu erkennen. Der rote Balken markiert das sogenannte Gate, die Position entspricht in etwa der Rückwand des Probekörpers. Diese setzt sich zusammen aus der Dicke des Bauteils plus dem Einkopplungsabstand von etwa 1 mm. Es handelt sich um eine Momentaufnahme bei einer Position des Prüfkopfs. Rückwand und Fügezone sind deutlich erkennbar. Der B-Scan (rechts oben) zeigt die Tiefenlage von Fehlstellen in Abhängigkeit einer einachsigen Verschiebung des Prüfkopfs. Damit entspricht dieses Bild einem fixierten Schnitt der Seitenansicht. Rückwand und Fügezone sind ebenfalls deutlich erkennbar. Zudem ist die Versiegelung schwach sichtbar. Der C-Scan (unten) zeigt eine Abbildung der Fügezone in der Draufsicht an. Es handelt sich um eine zusammengesetzte Reihe von Aufnahmen in Längs- und Querrichtung. Der

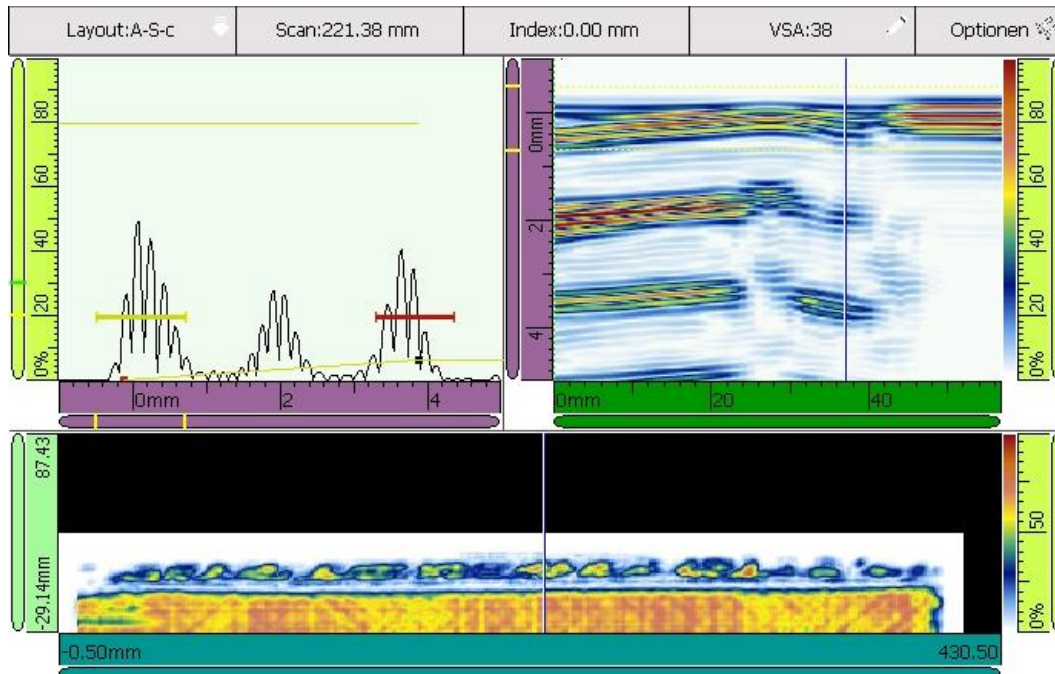


Abbildung 5.1: ABC-Scan der Ultraschallprüfung von Probe FV1, Schweißrichtung rechts nach links (C-Scan)

Der C-Scan (unten) zeigt eine Abbildung der Fügezone in der Draufsicht an. Es handelt sich um eine zusammengesetzte Reihe von Aufnahmen in Längs- und Querrichtung. Der

farbliche Verlauf gibt Rückschluss auf die gemessene Amplitude des Echos. Eine rötliche Färbung deutet auf eine geringe Dämpfung und somit gute Anbindung hin. Im Fall der Proben mit ERG-Folie zeigt sich eine sehr ungleichmäßige Anbindung. Die gemessene Amplitude ist im Durchschnitt sehr gering bis teilweise nicht vorhanden. Nur punktuell werden Amplituden von 40 bis 65 % gemessen, was auf eine mittelmäßige Anbindung in diesen Bereichen hindeutet. Gleiche Ergebnisse werden für die restlichen Proben mit ERG-Folie festgestellt.

Prüfung der Proben mit WeldSealer-Auftrag als Energierichtungsgeber

Abbildung 5.2 zeigt den ABC-Scan von Probe WS1. Hierbei handelt es sich um eine Schweißung mit WeldSealer-ERG. Im Vergleich zu Probe 17 ist ein deutlich stärkeres Rückwandecho im A-Scan erkennbar. Dies deutet auf eine geringere Dämpfung und somit bessere Anbindung hin. Im B-Scan zeigt das Rückwandecho eine gemessene Amplitude von bis zu 90 %, was auf eine sehr gute Anbindung schließen lässt. Abbildung 5.1 zeigt hingegen nur eine Amplitude von maximal 50 %.

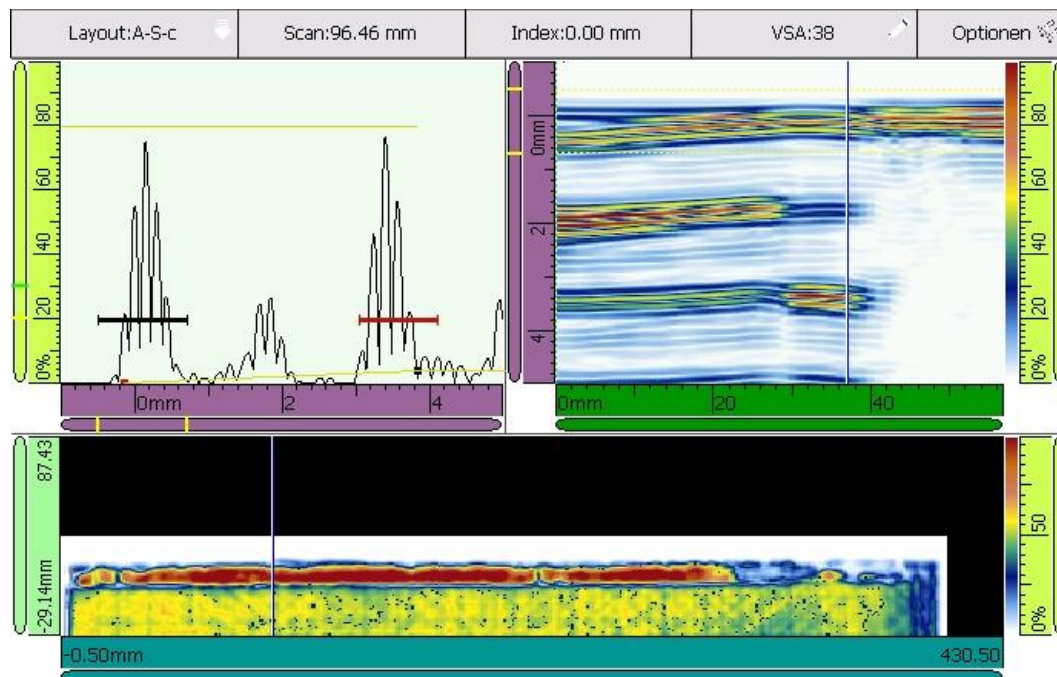


Abbildung 5.2: ABC-Scan der Ultraschallprüfung von Probe WS1, Schweißrichtung rechts nach links (C-Scan)

Im C-Scan lässt sich eine durchgängig sehr hohe gemessene Amplitude von bis zu 100 % über beinahe die gesamte Länge der Probe erkennen. Ausgenommen hiervon sind die ersten 100 mm und letzten 30 mm der Schweißung. Die gemessene Amplitude ist in diesem

Bereich deutlich verringert, was auf eine geringe Anbindung schließen lässt. Die verringerte Festigkeit, besonders zu Beginn einer Schweißung, stellt eine bekannte Herausforderung beim kontinuierlichen Ultraschallschweißen dar. Gleiche Ergebnisse werden für die WS2 und WSV1 festgestellt. Probe WSV2 hingegen zeigt eine leicht verringerte und ungleichmäßigere Amplitude im Bereich von 50 bis 90 %, siehe Abbildung 5.3. Es wurden jedoch für alle Schweißungen die gleichen Parameter verwendet. Auch sonst sind keine Abweichungen der Probe bekannt, die Ursache ist daher unklar. Die ABC-Scans aller Proben können dem Anhang A entnommen werden

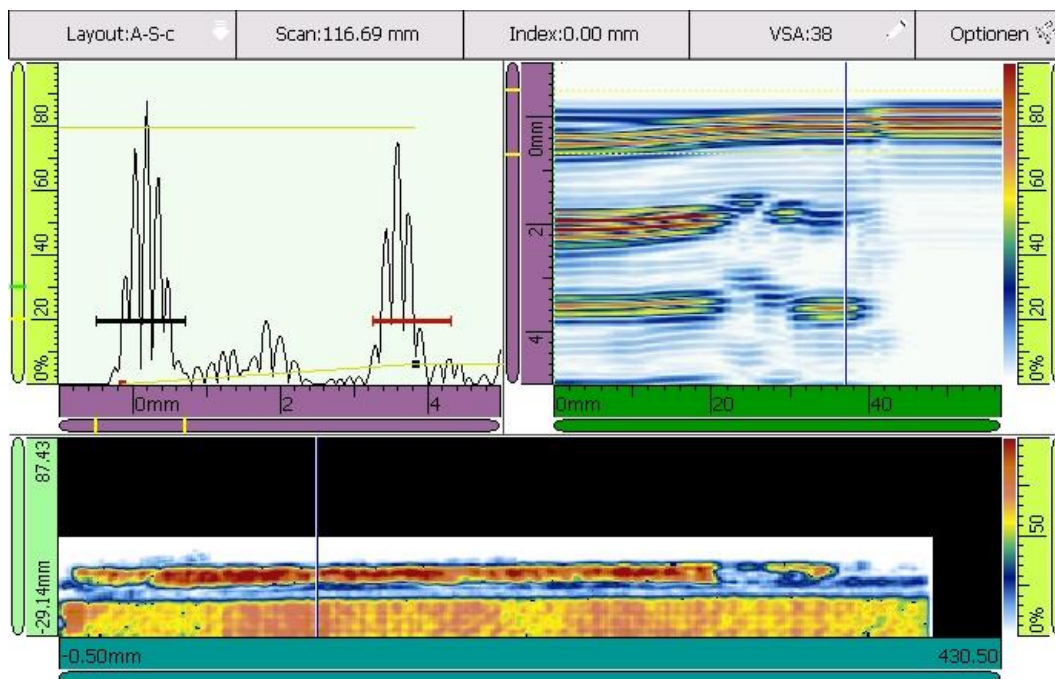


Abbildung 5.3: ABC-Scan der Ultraschallprüfung von Probe WSV2, Schweißrichtung rechts nach links (C-Scan)

5.2 Zugscherprüfung

Die Probekörper werden in jeweils sechs Zugproben mit einer Breite von 1 Zoll zugeschnitten. Diese sind gleichmäßig über die Länge der Schweißung verteilt, abzüglich der ersten 50 mm und letzten 30 mm. Insgesamt werden somit 48 Single-Lap-Shear-Proben geprüft. Die jeweils erste Zugprobe wird den ersten 100 mm entnommen. Wie in Kapitel 5.1 bereits erwähnt, ist der kontinuierliche Ultraschallschweißprozess in diesem Bereich noch nicht eingefahren, was zu einer Verringerung der Anbindung führt. Da dies nicht repräsentativ für die gesamte Schweißung ist, werden entsprechende Werte zwar ermittelt, jedoch nicht in die Berechnung der Durchschnittswerte miteinbezogen. Die entsprechenden Werte sind in Abbildung 5.4 ausgegraut. Die Zugscherprüfung erfolgt gemäß der Norm

ASTM D1002 mit einer Prüfgeschwindigkeit von 1 mm/min. Bei der Prüfmaschine handelt es sich um *Zwick/Roell Kappa 050 DS*, die Bezeichnung der Kraftmessdose lautet *Load Cell Xforce K 50kN 755636 2mV/V*. Die Ergebnisse der Zugversuche werden in Abbildung 5.4, sowie in Tabelle 5.2 zusammengefasst. Eine detaillierte Übersicht kann zudem Anhang B entnommen werden.

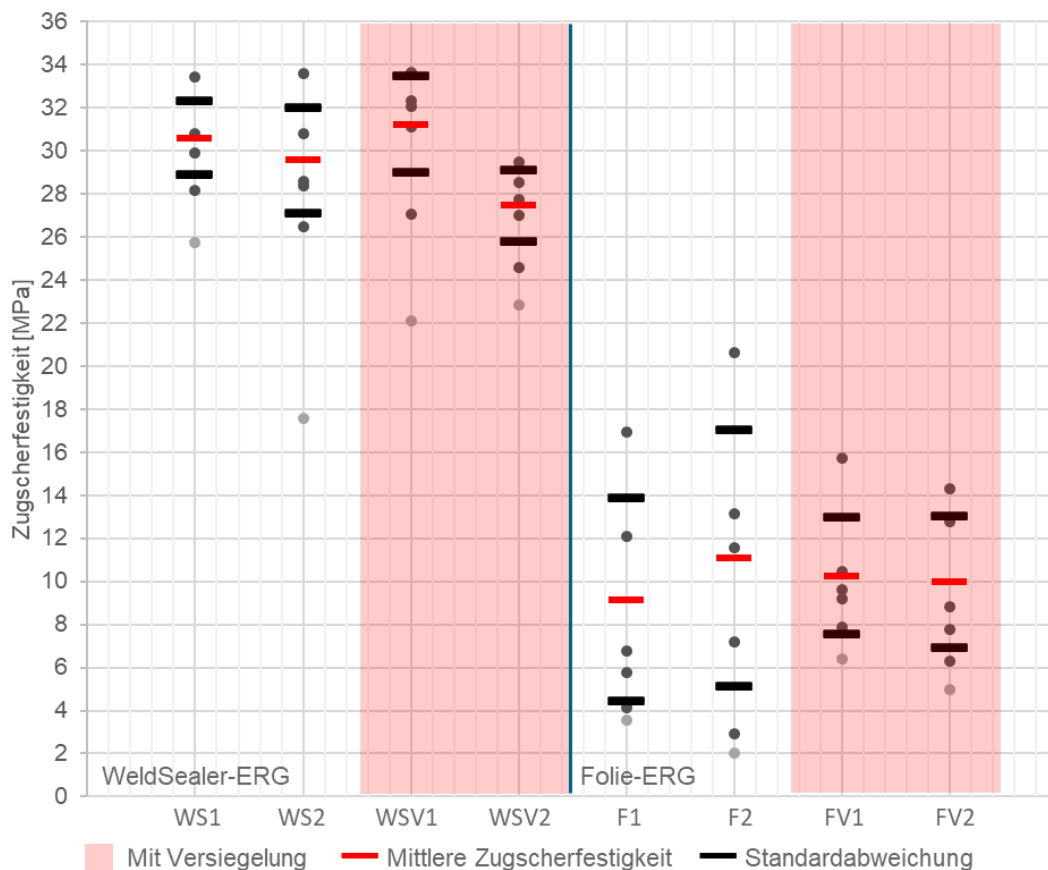


Abbildung 5.4: Vergleich der Ergebnisse der Zugscherprüfung

Die Proben mit WeldSealer-ERG erreichen bei der Zugscherprüfung Festigkeitswerte bis zu knapp 11.000 N, die durchschnittliche Mittlere Zugscherfestigkeit beträgt etwa 31 MPa. Vereinzelt erreichen Proben eine Zugscherfestigkeit von bis zu 34 MPa. In der Literatur, sowie in vorangegangenen Versuchen am ZLP werden Zugscherfestigkeiten bis zu 36 MPa ermittelt. Die Schweißungen mit WeldSealer-ERG erreichen somit ca. 85 % bzw. bis zu 95 % der Zugscherfestigkeit der Referenzproben. Hierbei gilt zu beachten, dass entsprechende Referenzwerte in umfangreichen Studien mit einer großen Varianz an Parametern ermittelt werden. Eine entsprechende Parameteroptimierung der vorangegangenen Versuche ist somit sinnvoll. Probe WSV2 zeigt im Vergleich leicht verringerte durchschnittliche Werte von 27,5 MPa. Dies entspricht den Erkenntnissen der

Ultraschallprüfung in Kapitel 5.1. Hier ist eine verringerte Anbindung hinsichtlich Anbindungsfläche und -qualität erkennbar. Wie zuvor erwähnt werden die Zugproben aus dem Anfangsbereich der Schweißung separat betrachtet und nicht in die Ermittlung der Durchschnittswerte miteinbezogen. Hier zeigen sich deutliche Abweichungen von bis zu 12 MPa zu den durchschnittlich gemessenen Werten. Unter Vernachlässigung dieser Werte weisen die Zugproben der Schweißungen mit WeldSealer-ERG eine geringe relative Standardabweichung von 5,6 bis 8,2 % auf.

Tabelle 5.2: Ergebnisse der Zugscherprüfung

Probe	Fmax [N]	Mittlere Zugscherfestigkeit [MPa]	Standard- abweichung abs.	Standard- abweichung rel. [%]
WS1	10784	30,60	1,71	5,58
WS2	10830	29,56	2,43	8,22
WSV1	10851	31,24	2,24	7,16
WSV2	9515	27,46	1,67	6,08
F1	5467	9,15	4,72	51,65
F2	6657	11,09	5,96	53,78
FV1	5070	10,27	2,71	26,35
FV2	4619	10	3,05	30,47

Die Proben mit ERG-Folie hingegen weisen eine relative Standardabweichung von bis zu 53,8 % auf. Zudem werden nur mittlere Zugscherfestigkeiten von etwa 10 MPa erreicht. Somit werden weniger als 30 % der Zugfestigkeit der Referenzwerte realisiert. Dies deckt sich mit den Erkenntnissen der Ultraschallprüfung aus Kapitel 5.1. Hierbei zeigt sich eine sehr ungleichmäßige und punktuelle Anbindung der Fügepartner. Zudem ist die Qualität der Anbindung gering. Ursache hierfür sind die verwendeten Schweißparameter. Trotz Verbrennung der Oberfläche und Delamination der Bauteilkanten, ist der Energieeintrag in die Fügezone zu gering. Da die Schweißparameter bei beiden Energierichtungsgebern identisch sind, zeigt sich ein deutlich positiver Einfluss der dreieckigen Geometrie auf das Aufschmelzverhalten hinsichtlich Zeit und Energieintensität. Dies deckt sich mit Erkenntnissen von Villegas und Palardy (2017), siehe Kapitel 2.2.1.

Die Versiegelung zeigt keinen eindeutig erkennbaren Einfluss auf die Festigkeit der Verbindung. Ursache hierfür ist die geringe Grenzflächenanbindung, siehe Kapitel 5.4. Probe WSV1 weist zwar die höchsten Zugscherfestigkeiten auf, aufgrund der niederen

Werte von Probe WSV2 lassen sich jedoch keine generell gültigen Aussagen zu der Auswirkung der Versiegelung treffen. Hier empfiehlt sich eine erneute Durchführung der Versuche mit einer größeren Anzahl an Proben. Ein deutlicher Einfluss der Versiegelung zeigt sich jedoch bei der Standardabweichung der mit ERG-Folie verschweißten Proben. Diese ist bei den versiegelten Proben mit 26 – 30 % nur etwa halb so hoch wie bei den unversiegelten Proben mit über 50 %. Dies ist vermutlich auf die generell sehr geringen Festigkeiten der Proben, sowie einer geringen Unterstützungswirkung der Versiegelung zurückzuführen.

5.3 Bruchflächenanalyse

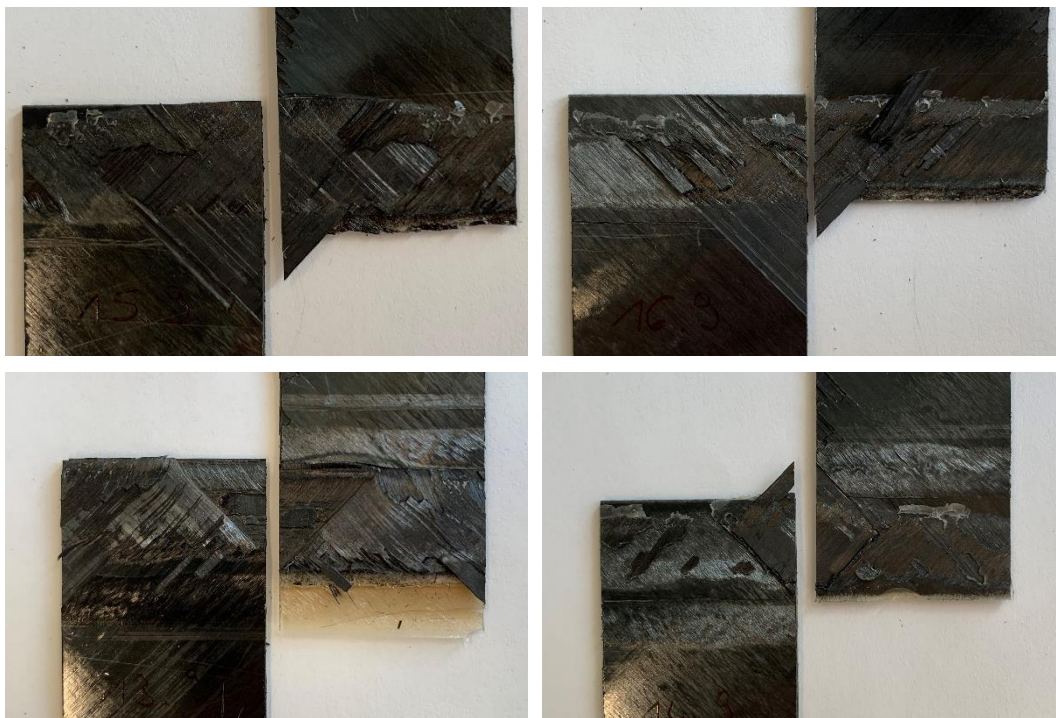


Abbildung 5.5: Bruchflächen WS1, WS2, WSV1 und WSV2 (v. r. n. l.), jeweils Zugprobe 5

Bei Betrachtung der Bruchflächen zeigt sich ein vollständiges Aufschmelzen des WeldSealer-ERG über die gesamte Länge der Schweißung. Ausgenommen hiervon ist Probe WSV2. Diese zeigt nicht aufgeschmolzenen Energierichtungsgeberreste im Randbereich der Schweißung. Zudem sind LMPAEK-Reste auf den Kontaktflächen erkennbar. Dies deutet auf einen zu geringen Energieeintrag in der Fügezone hin. Alle Proben weisen interlaminares, sowie intralaminares Versagen auf. Schweißung WS1, WS2 und WSV1 zeigen zudem translaminare Versagen. In Probe WS2 kann die Ablösung,

sowie der Riss einzelner Faserstränge beobachtet werden. Zudem kommt es bei einer Vielzahl der Proben zur Dekonsolidierung der Laminatlagen. Hierbei kann jedoch eine vorangegangene Schädigung des Laminats durch das Heißluftgebläse des WeldSealers, sowie den Zuschnitt der Proben nicht ausgeschlossen werden.

Im Bereich der Versiegelung handelt es sich ausnahmslos um interlaminares Versagen. Zwar kann eine Veränderung der Laminatoberfläche beobachtet werden, diese lässt sich jedoch auf das Aufschmelzen mittels Heißluft zurückzuführen. Ein intra-, sowie translaminare Versagen kann nicht beobachtet werden.

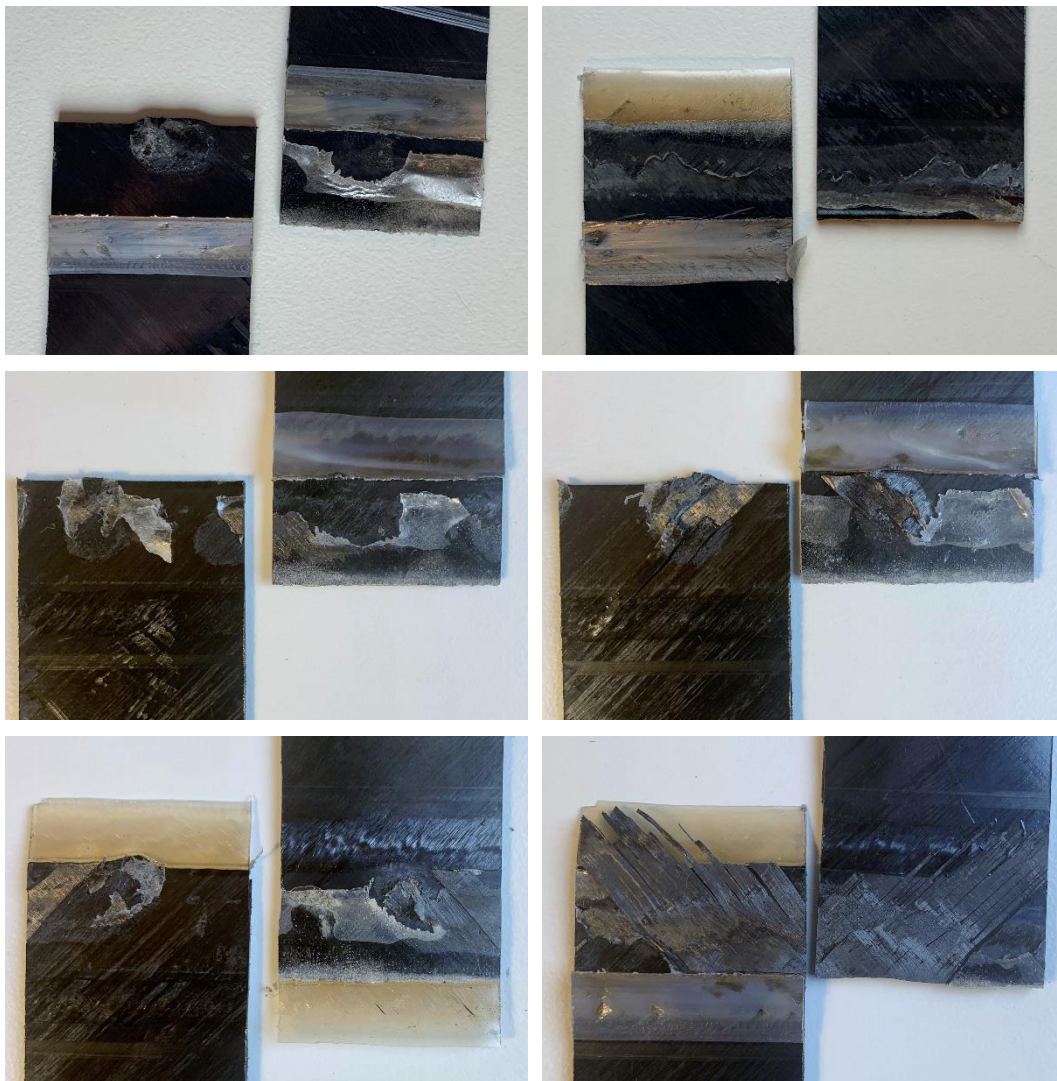


Abbildung 5.6: Bruchflächen FV2, Zugprobe 1 bis 6 (v. l. n. r.)

Abbildung 5.6 zeigt die Bruchflächen der Probe FV2 im Verlauf über die gesamte Schweißung. Es zeigt sich deutlich, dass der ERG nicht komplett aufgeschmolzen ist, eine Anhaftung findet nur punktuell statt. Besonders zu Beginn der Schweißung liegen noch

große Bereiche der ERG-Folie unaufgeschmolzen vor, die Strukturierung ist deutlich erkennbar. Bei Probe FV2.1 weist die Folie bis auf einen etwa 25 mm² großen Punkt keinerlei Anhaftung zu einem der Fügepartner auf. Im Verlauf der Schweißung nimmt der Anteil der angebundener Fläche zu, bleibt jedoch gering. Erst Probe FV2.5 zeigt interlaminares Versagen. In Probe FV2.6 kann zudem translaminare Versagen beobachtet werden. Der Anteil der angebundener Fläche in Relation zur Überlappfläche beträgt jedoch maximal 65 %. Probe FV2 steht hierbei stellvertretend für alle mit ERG-Folie geschweißten Proben.

5.4 Mikroskopie

Im Rahmen der mikroskopischen Untersuchung wird jeder Schweißprobe ein Präparat aus dem mittleren Bereich der Schweißung entnommen und in ein Epoxidharzsystem eingebettet. Den Proben WSV2 und FV1 werden zusätzliche Schliffbildproben aus den ersten und letzten 100 mm entnommen. Aufgrund von Lufteinschlüssen im Harzsystem können die Schliffbilder der Proben WS2 und FV1 nicht ausreichend poliert werden, eine Auswertung ist daher nicht möglich. Bei dem für die Untersuchung verwendeten Auflichtmikroskop handelt es sich um ein *Keyence Digital Microscope VHX-5000 3012853*.

Die Fügezone von Probe F2 zeigt in Abbildung 5.7 (a) keinerlei Anzeichen für das Aufschmelzen der Laminatoberfläche. Lufteinschlüsse und Grenzflächen zwischen dem ERG und der Laminatoberfläche sind in Abbildung (c) deutlich erkennbar. Die ausgeprägte Grenzfläche spricht für eine sehr schmale Wärmeeinflusszone und folglich inhomogene Druckverteilung. Dies führt zu einem kaum vorhandenen Quetschfluss. Daraus bedingt sich auch die Dicke der Fügezone und die hohe Porosität. Durch das geringe Aufschmelzen der Matrix ist zudem keine Konsolidierung möglich. Im Randbereich der Fügezone ist die Porosität und Grenzflächenbildung besonders ausgeprägt, siehe Abbildung (e). Hieraus resultiert eine hohe Wahrscheinlichkeit der Rissinitiierung. Die Probe weist daher geringe Festigkeiten auf. Die Proben F1, FV1 und FV2 zeigen ähnliche Ergebnisse.

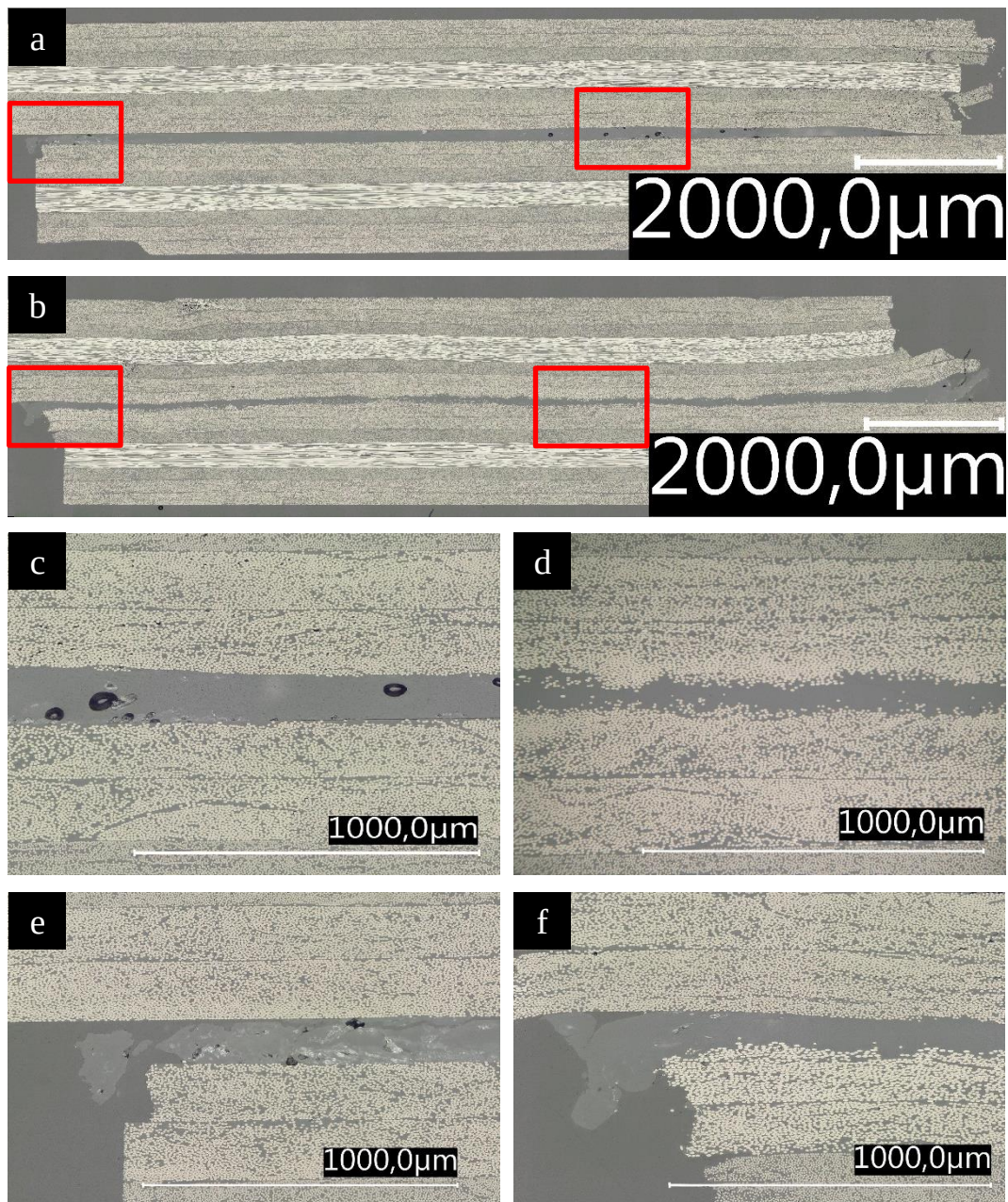


Abbildung 5.7: Schliffbilder Probe F2 (a, c, e) und WS1 (b, d, f) in 250-facher und 1000-facher Vergrößerung mit Detailaufnahme der Fügezone (c, d) und ihres Randbereichs (e, f)

Die Laminatoberfläche der Probe WS1 zeigt in der Fügefläche eine deutlich sichtbare Verformung, siehe Abbildung 5.7 (b). Dies lässt auf einen hohen Energieeintrag durch den Schweißprozess und ein ausgeprägtes Aufschmelzverhalten der Matrix schließen. Zudem sind weder Lufteinschlüsse noch Grenzflächenbildung zu erkennen, was auf eine gute Konsolidierung schließen lässt. Dies ist auf einen ausgeprägten Quetschfluss zurückzuführen. Daraus bedingt sich auch die geringere Dicke der Fügezone im Vergleich zu Probe F2. In Abbildung (d) sind zudem keine scharfen Grenzen zwischen Laminat und Fügezone erkennbar, da die Fasern des Laminats in die Fügezone eingedrungen sind. Dies

erschwert das Risswachstum erheblich und begünstigt hohe Festigkeitswerte. In Abbildung (b) wurde der ERG auf dem oberen Fügepartner appliziert, Abbildung (d) zeigt jedoch eine beidseitiges Eindringen der Fasern in die Fügezone. Der Effekt ist folglich nicht auf die Vorbehandlung mit Heißluft während des Auftrags des ERGs zurückzuführen, wird hierdurch jedoch möglicherweise begünstigt. Auch im Randbereich der Fügezone sind keine Grenzflächen erkennbar. Bedingt durch der ausgeprägten Quetschfluss kommt es jedoch zur Ausbildung einer scharfkantigen Fügenaht, welche die Rissinitiierung begünstigt. Um die Festigkeit der Verbindung zu erhöhen, ist daher die Nachbearbeitung oder Versiegelung der Schweißnaht empfehlenswert. Die Proben WS2 und WSV1 weisen ähnliche Ergebnisse vor.

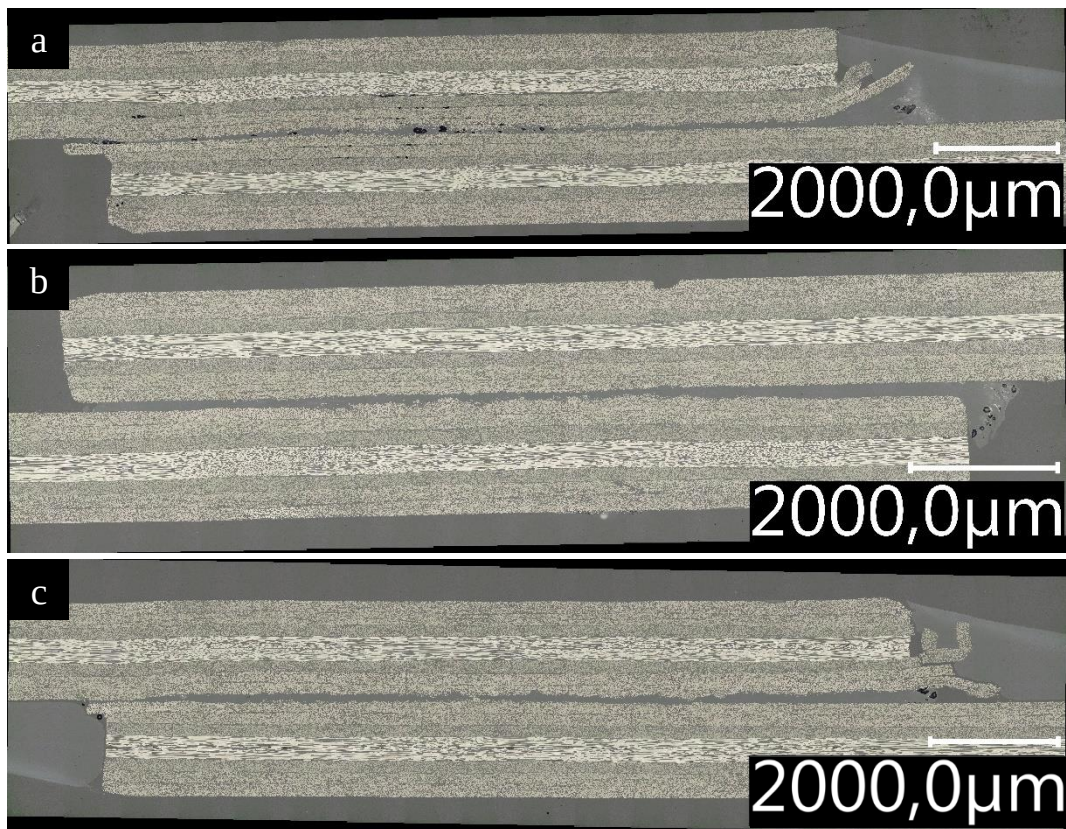


Abbildung 5.8: Schliffbilder Probe WSV2 im Verlauf der Schweißung

Abbildung 5.8 zeigt Aufnahmen der Probe WSV2 über den Verlauf der Schweißung hinweg. Hier zeigt sich zu Beginn (a) eine hohe Porosität, sowie sichtbare Grenzflächen innerhalb der Fügezone. Zudem ist eine deutlich erkennbare Delamination des Laminats sichtbar. Dies ist möglicherweise auf den unvollständig aufgeschmolzenen ERG und daraus resultierende Druckunterschiede auf die Fügefläche zurückzuführen. Die Probe wurden den ersten 100 mm der Schweißung entnommen. Wie bereits in Kapitel 5.1

erwähnt, handelt es sich hierbei um eine bekannte Herausforderung des kontinuierlichen Ultraschallschweißprozesses. Abbildung (c) und (d) zeigen geringere Anzeichen für das Aufschmelzen der Laminatoberfläche als Probe WS1. Die Verformung der Laminatoberfläche, sowie das Eindringen der Fasern in die Fügezone ist deutlich geringer ausgeprägt. Der Effekt tritt nur in der Mitte der Fügezone auf. Die mikroskopische Untersuchung lässt auf eine verringerte Anbindung der Probe schließen, was den Ergebnissen vorangegangener Untersuchungen entspricht.

Die Versiegelung von Probe WSV1 in Abbildung 5.9 zeigt eine hohe Porosität. Diese ist besonders an der Kontaktfläche zur Fügenaht ausgeprägt. Ursache hierfür ist vermutlich eine zu geringe Druckbeaufschlagung während des Materialauftrags. Eine Erhöhung ist jedoch aufgrund der Verkantung des Formgeberschlittens nicht möglich, siehe Kapitel 4.5. Eine andere mögliche Ursache besteht in der zu hohen Viskosität der Schmelze, um in die Unebenheiten der Oberfläche einzudringen. Eine Erhöhung der Extrusionstemperatur führt jedoch zur Degradation des Materials. Folglich ist eine Steigerung der Prozessgeschwindigkeit notwendig. Hierfür wird eine leistungsstärkere Heizquelle benötigt. Die Laminatoberfläche wurde außerdem besonders im Randbereich nicht genug aufgeschmolzen, um eine Konsolidierung zu ermöglichen. Es sind deutliche Grenzflächen erkennbar, im Randbereich findet keine Anhaftung statt. Hierdurch wird die Rissinitiierung erheblich verstärkt. Dies erklärt die geringe Unterstützungswirkung der Versiegelung auf die Festigkeit der Verbindung. Eine Wiederholung der Versuche unter Berücksichtigung der gewonnenen Erkenntnisse wird empfohlen. Die Mikroskopieaufnahmen aller Schliffbilder können Anhang C entnommen werden.

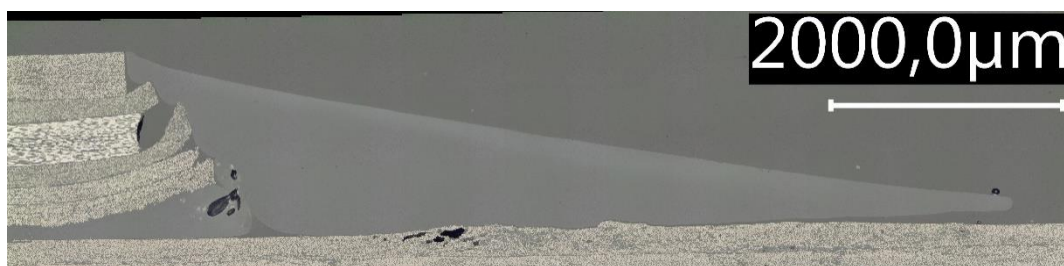


Abbildung 5.9: Schliffbild Versiegelung Probe WSV1

6 Zusammenfassung und Ausblick

Beim Fügen endlosfaserverstärkter thermoplastischer Lamine mittels Ultraschallschweißen ist die Applikation eines Energierichtungsgebers in Form einer Zwischenschichtfolie üblich. Die Anheftung erfolgt meist manuell. Zudem entsteht beim Fügen von Überlappverbindungen typischerweise eine scharfe Kante am Übergang der Fügezone. Diese Kante stellt potenziell eine Schwachstelle für das Bauteil durch Medieneinlagerung oder Rissinitiierung dar. Ziel der Masterarbeit ist die Weiterentwicklung des WeldSealer-Prozesses zum additiven Auftrag von matrixgleichem Material auf endlosfaserverstärkte thermoplastische FVK. Hierbei soll sowohl der Energierichtungsgeber als auch die Kantenversiegelung automatisiert, mit definierter Geometrie und stoffschlüssiger Anbindung aufgetragen werden. Weiterhin soll der Einfluss der dreieckigen Geometrie des ERGs auf den Schweißprozess und die Eigenschaften der Verbindung analysiert und mit Schweißungen mit herkömmlicher Zwischenschichtfolie verglichen werden. Ferner soll der Einfluss der Versiegelung auf die Festigkeit von Verbindungen untersucht werden.

Im Rahmen der Masterarbeit wird der aktuelle Stand der Forschung evaluiert und die hieraus gewonnenen Erkenntnisse auf den WeldSealer-Prozess angewendet. Als zu verarbeitendes Material kommt LMPAEK zum Einsatz. Da der WeldSealer-Endeffektor auf die Verarbeitung von PPS mit einem deutlich niedrigeren Schmelzpunkt ausgelegt ist, sind umfangreiche Anpassungen erforderlich. Die Temperiereinheit wird modifiziert, um ein Aufschmelzen der Laminatoberfläche zu ermöglichen. Zudem wird die Plastifiziereinheit neu konstruiert und leistungsstärkere Heizpatronen zum Erreichen der notwendigen Extrusionstemperatur verbaut. Die Druckeinheit wird ebenfalls überarbeitet. Hierbei werden neue Formgeberschlitten zum additiven Materialauftrag, sowie eine neue Befestigung entworfen. Außerdem wird eine Temperatursteuerung für die Plastifizier- und Druckeinheit implementiert. Basierend auf den Erkenntnissen vorangegangener Untersuchungen, sowie der Literaturrecherche, erfolgt der Applikation des Energierichtungsgebers in Form eines kontinuierlich aufgetragenen Materialstegs mit dreieckigem Querschnitt. Hierzu werden Vorversuche zur Parameterfindung durchgeführt. Die finalen Proben weisen einen definierten und gleichmäßigen Materialauftrag mit dreieckiger Geometrie und stoffschlüssiger Anbindung auf. Dabei erweist sich die Temperiereinheit als limitierender Faktor hinsichtlich der Prozessgeschwindigkeit. Die mit WeldSealer-Auftrag versehenen Proben werden mittels kontinuierlichem Ultraschallschweißen gefügt. Hierzu werden ebenfalls Vorversuche zur Parameterfindung durchgeführt. Die finalen Proben weisen einen stark ausgeprägten Quetschfluss über die gesamte Länge der Schweißungen auf. Es zeigen sich leichte Beschädigungen der

Laminatoberfläche, Verbrennungen können jedoch weitestgehend vermieden werden. Um einen Vergleich zu ermöglichen, werden Proben mit ERG-Folie und identischen Schweißparametern hergestellt. Diese weisen einen deutlich geringeren Quetschfluss auf, trotz identischer Materialmenge der Energierichtungsgeber. Zudem ist die Beschädigung der Laminatoberfläche stärker ausgeprägt und es treten häufig Verbrennungen auf. Bei der Hälfte der Proben erfolgt die Versiegelung der Schweißnaht mittels WeldSealer-Auftrag. Hierbei ist eine dauerhafte Überwachung und manuelle Anpassung der Extrusionsgeschwindigkeit aktuell unumgänglich. Bereits kleine Abweichungen der Schweißnahtgeometrie, bedingt durch Quetschflussreste oder Verformungen durch den Fügeprozess erfordern ein manuelles Eingreifen. Dies stellt eine Herausforderung für die Automation und Wiederholgenauigkeit des Versiegelungsprozesses dar. Zudem erweist sich die Temperiereinheit erneut als limitierender Faktor hinsichtlich der Prozessgeschwindigkeit und Anbindungsqualität.

Die Analyse der Proben erfolgt mittels wassergekoppelter Ultraschallprüfung, Zugscherprüfung, Bruchflächenanalyse, sowie der mikroskopischen Betrachtung von Schliffbildern. Bei den Proben mit WeldSealer-Auftrag zeigt sich ein vollständiges Aufschmelzen des Energierichtungsgebers und eine vollflächige Anbindung der Fügepartner. Die Fügezone weist keinerlei Porosität auf, bei der mikroskopischen Betrachtung sind keine Grenzflächen zu erkennen. Ausgenommen hiervon sind die ersten 100 mm. Die verringerte Anbindung zu Beginn einer Schweißung stellt eine bekannte Herausforderung beim kontinuierlichen Ultraschallschweißen dar. Die mikroskopische Untersuchung zeigt zudem bedingt durch den starken Quetschfluss ein Loslösen der Fasern aus dem Laminat und Eindringen in die Fügezone. Hieraus resultiert die Auflösung der Grenze zwischen Laminat und Fügezone, wodurch das Risswachstum erheblich erschwert wird. Die Zugscherprüfung liefert Zugscherfestigkeiten von 26 bis 34 MPa, die mittlere Zugscherfestigkeit beträgt 31 MPa. In der Literatur werden beim Ultraschallschweißen mit Zwischenschichtfolie als Energierichtungsgeber Referenzwerte von 36 MPa erreicht. Hierbei gilt zu beachten, dass es sich bei den im Rahmen der Masterarbeit durchgeführten Versuchen nicht um Optimierungsprozesse im Sinne eines DoE handelt. Es werden lediglich erste Prozessfenster für die Herstellung von Ultraschallschweißungen mit additiv aufgetragenem Energierichtungsgeber erfasst. Im Vergleich weisen die Schweißungen mit Zwischenschichtfolie geringe mittlere Zugscherfestigkeiten von etwa 10 MPa auf. Die Ultraschallprüfung, sowie die Bruchflächenanalyse zeigen ein unvollständiges Aufschmelzen des Energierichtungsgebers, wie auch eine punktuelle und unregelmäßige Anbindung der Fügepartner. Die mikroskopische Untersuchung belegt eine hohe Porosität, Grenzflächen sind zudem deutlich erkennbar. Dies deutet auf einen zu geringen Energieeintrag durch den Schweißprozess hin. Zudem zeigt sich der positive Einfluss der

dreieckigen Geometrie auf das Aufschmelzverhalten des ERGs. Zur Unterstützungswirkung der Versiegelung kann keine eindeutige Aussage getroffen werden. Aufgrund der zu geringen Leistung der Temperiereinheit fand keine ausreichende Konsolidierung der Versiegelung statt. Die Mikroskopie zeigt eine hohe Porosität, sowie deutlich erkennbare Grenzflächen. Zudem war die Anzahl der Proben zu gering, um Rückschlüsse hinsichtlich der Zugscherfestigkeit zu ermöglichen.

Im Rahmen zukünftiger Untersuchungen empfiehlt sich die Weiterentwicklung des WeldSealer-Prozesses. Besonders relevant ist hierbei die Installation einer leistungsstärkeren Temperiereinheit. Eine Möglichkeit besteht im Austausch der Heißluftpistole durch eine Vorheizquelle auf Infrarotbasis. Dies ermöglicht ein schnelleres Aufschmelzen der Laminatoberfläche und folglich eine Verbesserung der Anhaftung, sowie eine Erhöhung der Prozessgeschwindigkeit. Um die Automation und eine hohe Wiederholgenauigkeit des Versiegelungsprozesses zu ermöglichen, ist weiterhin die Implementierung einer automatisierten Steuerung notwendig. Diese soll Veränderungen der Fügenahtgeometrie erkennen und die Extrusionsgeschwindigkeit entsprechend anpassen. Zudem soll die exakte Position der Fügenaht realisiert und die Ausrichtung des WeldSealers korrigiert werden. Hiernach empfiehlt sich die Wiederholung der Versuche zu Schweißnahtversiegelung unter Berücksichtigung der gewonnenen Erkenntnisse. Außerdem ist die Durchführung eines DoE zur Parameteroptimierung des Ultraschallschweißprozesses mit per WeldSealer aufgetragenen Energierichtungsgeber sinnvoll. Dies ermöglicht eine Optimierung der mechanischen Kennwerte. Weiterhin ist die Implementierung einer vdrängungsgesteuerten Regelung des Schweißprozesses erstrebenswert. Hierzu kann der Vorteil des großen Setzwegs, bedingt durch die Höhe des WeldSealer-Auftrag genutzt werden. Alternativ zum kontinuierlichen Ultraschallschweißen können ferner statische Versuche durchgeführt werden. Versuche mit Single-Spot-Schweißung waren im Vorfeld erfolgreich. Hierbei empfiehlt sich der Auftrag mehrerer Reihen mit Energierichtungsgeber, sowie die Verwendung einer großflächigen Sonotrode zum Schweißen flächiger Bauteile.

Zusammenfassend zeigt der WeldSealer ein großes Potenzial hinsichtlich der additiven Fertigung und Modifikation faserverstärkter thermoplastischer Lamine. Die Applikation des Energierichtungsgebers erfolgt automatisiert, mit definierter Geometrie und stoffschlüssiger Anbindung, sowie hoher Wiederholgenauigkeit. Der aufgetragene Energierichtungsgeber erweist sich hinsichtlich Aufschmelzverhalten und Festigkeit als vielversprechend. Außerdem ist es möglich, Kehlnähte zu erzeugen, die potenziell in der Lage sind mechanische Lasten zu übertragen. Hierzu sind weitere Untersuchungen notwendig.

Literaturverzeichnis

- Ageorges, C., Ye, L. & Hou, M. (2001). Advances in fusion bonding techniques for joining thermoplastic matrix composites: a review. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 32(6), 839–857. [https://doi.org/10.1016/S1359-835X\(00\)00166-4](https://doi.org/10.1016/S1359-835X(00)00166-4)
- AID, PAG, DLR & ANN (2019). Clean Sky 2 Upper Shell Fuselage Demonstrator.
- Asmatulu, R., Yeoh, J., Alarifi, I. M. & Alharbi, A. (2016). Effects of edge grinding and sealing on mechanical properties of machine damaged laminate composites. In T. Yu, A. L. Gyekenyesi, P. J. Shull & H. F. Wu (Hrsg.), *SPIE Proceedings, Nondestructive Characterization and Monitoring of Advanced Materials, Aerospace, and Civil Infrastructure 2016* (98042G). SPIE. <https://doi.org/10.1117/12.2235477>
- AVK. (2013). *Handbuch Faserverbundkunststoffe/Composites*. Springer Fachmedien Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-02755-1>
- Belfin, J. (2013). *Kunststoffschweißverfahren im Handwerk und ihre Anwendung in der Praxis*. <https://www.luebecker-werkstoffmesse.de/belfin.pdf>
- Bergstrom, J. (2015). *Mechanics of solid polymers: Theory and computational modeling* (First edition). William Andrew is an imprint of Elsevier.
- Böck, S. (2022). *Further development of an automated process for applying thermoplastic material onto fiber reinforced thermoplastics as preand postprocessing of joints* (DLR-Interner Bericht DLR-IB-BT-AU-2022-163) [Masterarbeit]. Universität Augsburg, Augsburg.
- Bonnet, M. (2014). *Kunststofftechnik: Grundlagen, Verarbeitung, Werkstoffauswahl und Fallbeispiele* (2. Aufl.). Springer eBook Collection. Imprint: Springer Vieweg. <http://link.springer.com/book/10.1007/978-3-658-03139-8> <https://doi.org/10.1007/978-3-658-03139-8>
- Border, Z. & Salas, R. (1989). Induction Heated Joining of Thermoplastic Composites Without Metal Susceptors. 34. *International SAMPE Symposium*, 2569 – 2578.
- Broetje-Automation (2020). Broetje-Automation bringt robotergesteuertes Versiegeln von Flugzeugbauteilen zur Industriereife. *Niedersachsen Aviation*. <https://www.broetje-automation.de/de/news/weltneuheit-broetje-automation-bringt-robotergesteuertes-versiegeln-von-flugzeugbauteilen-zur-industriereife/#world-first-broetje-automation-brings-robot-controlled-sealing-of-aircraft-components-to-industrial-maturity>

- Chen, C.-Y. (2020). *Investigations on Hot-Formed Plastic Parts Made by Additive Manufacturing* [Masterarbeit]. Technische Universität Dortmund, Ruhr-Universität Bochum und Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg.
- Chen, H., Na, J., Mu, W., Tan, W. & Luan, J. (2022). Effect of sealing treatment on the resistance of lap joints to hygrothermal aging. *The Journal of Adhesion* (98 (14), 2231–2252. <https://doi.org/10.1080/00218464.2021.1958681>
- Chintamreddy, V. K. & Arigela, S. H. (2021). Fused Deposition Modeling of an Aircraft Wing using Industrial Robot with Non-linear Tool Path Generation. *International Journal of Engineering*, 34(1). <https://doi.org/10.5829/ije.2021.34.01a.30>
- Costa, A., Botelho, E. & Costa, Michelle, Tarpani, Ricardo (2012). A Review of Welding Technologies for Thermoplastic Composites in Aerospace Applications.
- Dhilipkumar, T. & Rajesh, M [Murugan]. (2022). Adhesively Bonded Composite Joints in Aerospace Application. In M. Thariq, M. Rajesh & K. Jayakrishna (Hrsg.), *Repair of advanced composites for aerospace applications* (S. 71–85). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003200994-7>
- Dirnhofer, C. (2021). *Entwicklung eines automatisierbaren Prozesses zur geometrischen und gefügesteitigen Modifikation thermoplastischer Lamine für Schweißanwendungen* (DLR-Interner Bericht DLR-IB-BT-AU-2021-186) [Masterarbeit]. Hochschule Augsburg.
- DLR. (2022). *Zentrum für Leichtbauproduktionstechnologie* [Press release]. <https://www.dlr.de/zlp>
- DOPAG. (2022a). *Edge Sealing: Kanten von Composites-Bauteilen effektiv versiegeln*. <https://www.dopag.de/anwendungen/composites-verarbeiten/edge-sealing/>
- DOPAG. (2022b). *Sealing: Dichtstoffe dosieren bei der Herstellung von Composites-Bauteilen*. <https://www.dopag.de/anwendungen/composites-verarbeiten/sealing/>
- E3D. (2021a). *Plated Copper Volcano Block*. <https://e3donline.com/products/plated-copper-volcano-block>
- E3D. (2021b). *Titan Aqua*. <https://e3d-online.com/products/titan-aqua>
- Eckstein, L., Ickert, L., Thomas, D. & Tröster, T. (2012). Beitrag zum Fortschritt im Automobilleichtbau durch belastungsgerechte Gestaltung und innovative Lösungen für lokale Verstärkungen von Fahrzeugstrukturen in Mischbauweise. <https://d-nb.info/1053277504/>

- Ehrenreich, E. (2021). *Entwicklung eines Verfahrens zur Kantenversiegelung während des Ultraschallschweißens faserverstärkter thermoplastischer Kunststoffe* [Masterarbeit]. Hochschule Kempten, Kempten.
- Ehrenstein, G. W. (2006). *Faserverbund-Kunststoffe: Werkstoffe - Verarbeitung - Eigenschaften* (2. völlig überarbeitete Auflage). Hanser.
- Esch, P., Frommknecht, A. & Niemeier, W. (2020). Integrierte Komplettbearbeitung von CFK-Struktur- und Großbauteilen. *ATZproduktion*, 7(2), 10–17.
<https://doi.org/10.1007/s35726-020-0074-3>
- FESTO. (2010). *Druck-Kraft-Tabelle*.
https://www.festo.com/net/SupportPortal/Files/40313/Druck-KraftTabelle_2011_de.pdf
- FESTO. (2021a). *Datenblatt Führungszylinder DFM-63-50-P-A-KF (170954)*.
https://www.festo.com/cat/de-at_at/data/doc_de/PDF/DE/DFM_DE.PDF
- FESTO. (2021b). *Datenblatt Proportional-Durchflussregelventil VPCF-6-L-8-G38-10-V1-E-EX2*.
https://www.festo.com/cat/engb_gb/data/doc_DE/PDF/DE/VPCF_DE.PDF
- Premium Aerotec. (2019). *Premium AEROTEC displays thermoplastic CFRP pressure bulkhead* [Press release]. Augsburg.
<https://www.compositesworld.com/news/premium-aerotec-displays-thermoplastic-cfrp-pressure-bulkhead>
- Gardiner, G. (2022). DLR develops additive WeldSealer process to seal joints, edges or modify surfaces. *CompositesWorld*. <https://www.compositesworld.com/news/dlr-develops-additive-weldsealer-process-to-seal-joints-edges-or-modify-surfaces>
- Gholizadeh, S. (2016). A review of non-destructive testing methods of composite materials. *Procedia Structural Integrity*, 1, 50–57.
<https://doi.org/10.1016/j.prostr.2016.02.008>
- Haunreiter, A. (2021). *Entwicklung eines automatisierten Prozesses zum Modifizieren von Fügstellen faserverstärkter, thermoplastischer Strukturbauteile durch Materialzugabe mit stoffschlüssiger Anbindung* (DLR-Interner Bericht DLR-IB-BT-AU-2021-183) [Masterarbeit]. Universität Augsburg, Augsburg.
- Hayes, B. S. & Gammon, L. M. (2010). *Optical microscopy of fiber reinforced composites*. ASM International.

- Heckl, M. (2022). *Herstellung von thermoplastischen Faserverbund-Metall-Hybriden durch Press- und Schweißprozesse* (DLR-Interner Bericht DLR-IB-BT-AU-2022-159) [Bachelorarbeit]. Universität Augsburg, Augsburg.
- Heinz Stegmeier Heizelemente. (2022). *Hochleistungs-Heizpatronen Standard*.
<https://www.hs-heizelemente.de/productareas/vde/>
- Holzinger, M. (2021). *Neues additives Fertigungsverfahren für faserverstärkte Kunststoffbauteile in Skelettbauweise* [Dissertation, Technische Universität Chemnitz, Chemnitz]. GBV Gemeinsamer Bibliotheksverbund. <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:ch1-qucosa2-772910>
- Ilchner, B. & Singer, R. F. (2005). *Werkstoffwissenschaften und Fertigungstechnik: Eigenschaften, Vorgänge, Technologien ; mit 33 Tabellen* (4. Aufl.). Springer-Lehrbuch. SPRINGER.
<http://bookview.libreka.de/retailer/urlResolver.do?id=9783540218722&retid=100024>
- Jarka, S. (2021). *Fügetechnik für Faserverbundkunststoffe* [Vorlesungsskript]. Universität Augsburg.
- Jarka, S. & Endraß, M. (2020). DE102020126667A1. Deutschland.
- Jarka, S., Endraß, M., Bauer, S., Engelschall, M., Weng, C., Böck, S., Dornstädter, N., Larsen, L. & Kupke, M. (2022). *Thermoplastic Processing Technologies Towards Industrialization: SAMPE Europe Conference 2022 Hamburg - Germany*. German Aerospace Center (DLR), Center for Lightweight Production Technology (ZLP), Am Technologiezentrum 4, Augsburg 86159, Hamburg.
- Kommer, C., Tugendhat, T. & Wahl, N. (2019). *Das Lichtmikroskop* (2. Aufl. 2019). SPRINGER. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-662-59396-7_21
- Koyanagi, J., Takamura, M., Wakayama, K., Uehara, K. & Takeda, S. (2022). Numerical simulation of ultrasonic welding for CFRP using energy director. *Advanced Composite Materials*, 31(4), 428–441.
<https://doi.org/10.1080/09243046.2022.2031376>
- Kupke, M. (2020). *Faserverbundkunststoffe für Ingenieure: Eigenschaften, Produktion, Anwendung*. Augsburg.
- Leister. (2005). *Leister WELDING PEN S Bedienungsanleitung*. Sarnen/Schweiz.
- Li, L., Liu, W. & Sun, L. (2022). Mechanical characterization of 3D printed continuous carbon fiber reinforced thermoplastic composites. *Composites Science and Technology*, 227, 109618. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2022.109618>

- Miller, C. & Lindberg, M. (30. November 2018). Silicone aerospace applications. *Aerospace Manufacturing and Design*.
<https://www.aerospacemanufacturinganddesign.com/article/silicone-aerospace-applications/>
- Neitzel, M [Manfred], Mitschang, P [Peter] & Breuer, U. (Hrsg.). (2014). *Handbuch Verbundwerkstoffe: Werkstoffe, Verarbeitung, Anwendung* (2., aktualisierte und erweiterte Auflage). Hanser.
- Oterkus, E., Diyaroglu, C., Meo, D. de & Allegri, G. (2016). Fracture modes, damage tolerance and failure mitigation in marine composites. In *Marine Applications of Advanced Fibre-Reinforced Composites* (S. 79–102). Elsevier.
<https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-250-1.00004-1>
- Panda, H. S., Samant, R., Mittal, K. L. & Panigrahi, S. K [S. K.]. (2020). Durability Aspects of Structural Adhesive Joints. In K. L. Mittal & S. K. Panigrahi (Hrsg.), *Structural adhesive joints: Design, analysis and testing* (Bd. 229, S. 97–134). Wiley-Scrivener. <https://doi.org/10.1002/9781119737322.ch4>
- Potente, H. (2004). *Fügen von Kunststoffen: Grundlagen, Verfahren, Anwendung ; mit 31 Tabellen*. Hanser.
- Raza, S. F., Khan, S. A. & Mughal, M. P. (2019). Optimizing the weld factors affecting ultrasonic welding of thermoplastics. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 103(5-8), 2053–2067.
<https://doi.org/10.1007/s00170-019-03681-7>
- Reinert, U. & Egberts, U. (2017). *Bruchflächenanalyse* [Vorlesungsmanuskript]. Hochschule Bremen City University of Applied Sciences, Bremen.
<https://docplayer.org/80107289-Bruchflaechenanalyse-diese-unterlagen-dienen-gemaess-53-54-urg-ausschliesslich-der-ausbildung-an-der-hochschule-bremen.html>
- Rudolf, R. (2000). Entwicklung einer neuartigen Prozess- und Anlagentechnik zum wirtschaftlichen Fügen von thermoplastischen Faser-Kunststoff-Verbunden. *IVW-Schriftenreihe*(10).
- Rudolf, R., Mitschang, P [P.] & Neitzel, M [M.] (2000). Induction heating of continuous carbon-fibre-reinforced thermoplastics. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 31(11), 1191–1202. [https://doi.org/10.1016/S1359-835X\(00\)00094-4](https://doi.org/10.1016/S1359-835X(00)00094-4)

- Sause, M. (2020). *Non Destructive Testing* [Vorlesungsskript]. Universität Augsburg, Augsburg.
- Schiebold, K. (2015). *Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung-Ultraschallprüfung* (1. Aufl.). Springer eBook Collection. Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-44700-0>
- Schuler, V. & Twrdek, J. (2019). *Praxiswissen Schweißtechnik: Werkstoffe, Prozesse, Fertigung* (6. Aufl. 2019). Springer Fachmedien Wiesbaden; Springer Vieweg. <https://ebookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=5628971>
- Schürmann, H. (2007). *Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden* (2., bearbeitete und erweiterte Auflage). Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-72190-1>
- Taschenbuch DVS-Merkblätter und -Richtlinien: Fügen von Kunststoffen* (18. Aufl.). (2020). *Fachbuchreihe Schweißtechnik: Band 68/IV*. DVS Media GmbH.
- Towsyfy, H., Biguri, A., Boardman, R. & Blumensath, T. (2020). Successes and challenges in non-destructive testing of aircraft composite structures. *Chinese Journal of Aeronautics*, 33(3), 771–791. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2019.09.017>
- Vaghani, M. (2020). *Fused Deposition Modeling | FDM 3D Printer Technology*. <https://www.creativitybuzz.org/fused-deposition-modeling/>
- Victrex. (2022). *VICTREX AM™ 200 FIL: Semi crystalline, filament for Additive Manufacture by filament fusion and other melt extrusion 3D printing processes*. <https://www.victrex.com/en/downloads/datasheets/victrex-am-200-fil>
- Villegas, I. F. & Palardy, G. (2017). Ultrasonic welding of CF/PPS composites with integrated triangular energy directors: melting, flow and weld strength development. *Composite Interfaces*, 24(5), 515–528. <https://doi.org/10.1080/09276440.2017.1236626>
- Weißbach, W. (2012). *Werkstoffkunde: Strukturen, Eigenschaften, Prüfung* (18. Aufl.). Springer eBook Collection. Vieweg+Teubner Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-8348-8318-6>
- Weng, C. (2021). *Weiterentwicklung eines Automatisierten Prozesses zum Modifizieren von Fügestellen faserverstärkter, thermoplastischer Strukturbauteile durch Materialzugabe mit stoffschlüssiger Anbindung* (DLR-Interner Bericht DLR-IB-BT-AU-2021-185) [Bachelorarbeit]. Hochschule München, München.

- Yousefpour, A., Hojjati, M. & Immarigeon, J.-P. (2004). Fusion Bonding/Welding of Thermoplastic Composites. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 17(4), 303–341. <https://doi.org/10.1177/0892705704045187>
- Zinnecker, V., Stokes-Griffin, C. M., Khudiakova, A., Wolfahrt, M. & Compston, P. (2020). A comparative study for shear testing of thermoplastic-based composites and metal-composite hybrids. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 137, 105953. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2020.105953>

Anhang A: ABC-Scans der Ultraschallprüfung

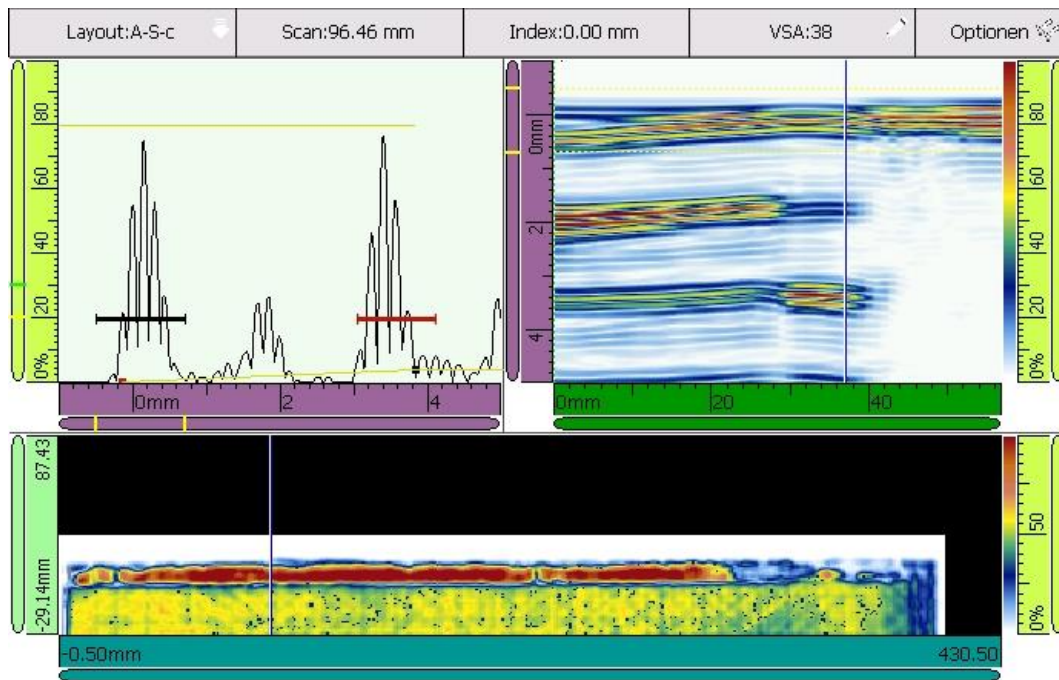


Abbildung A 1: ABC-Scan der Probe WS1

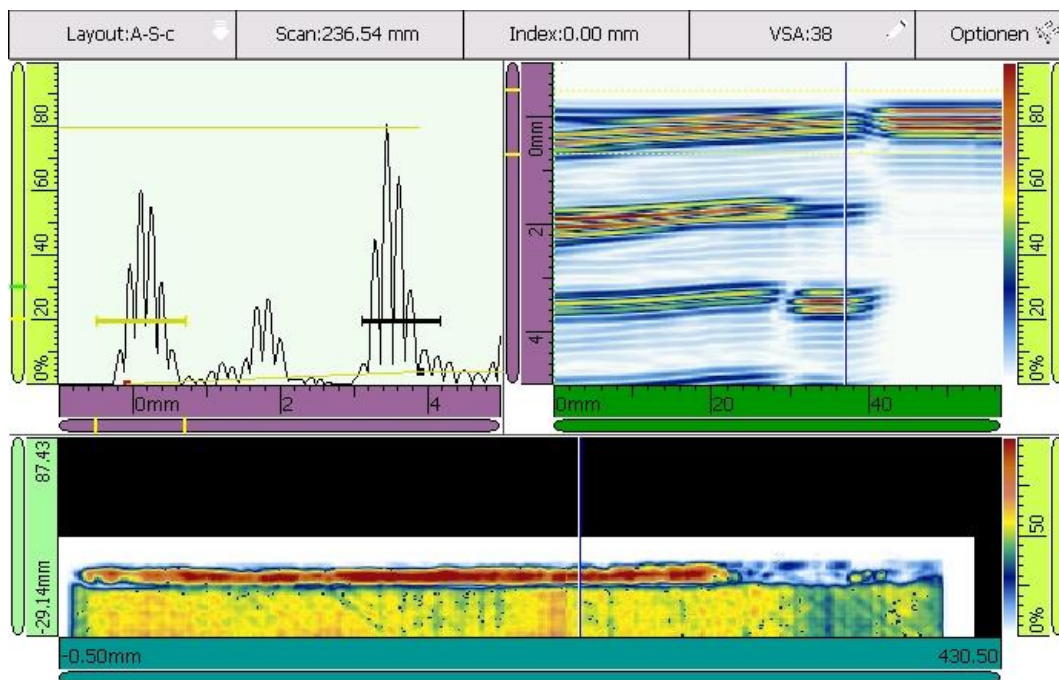


Abbildung A 2: ABC-Scan der Probe WS2

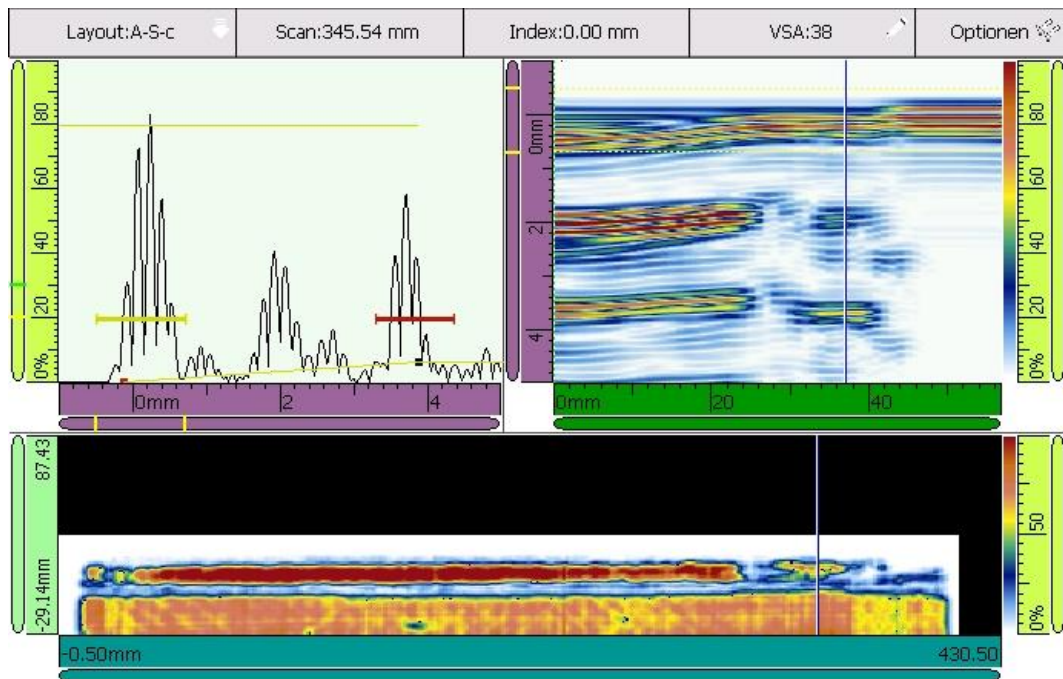


Abbildung A 3: ABC-Scan der Probe WSV1

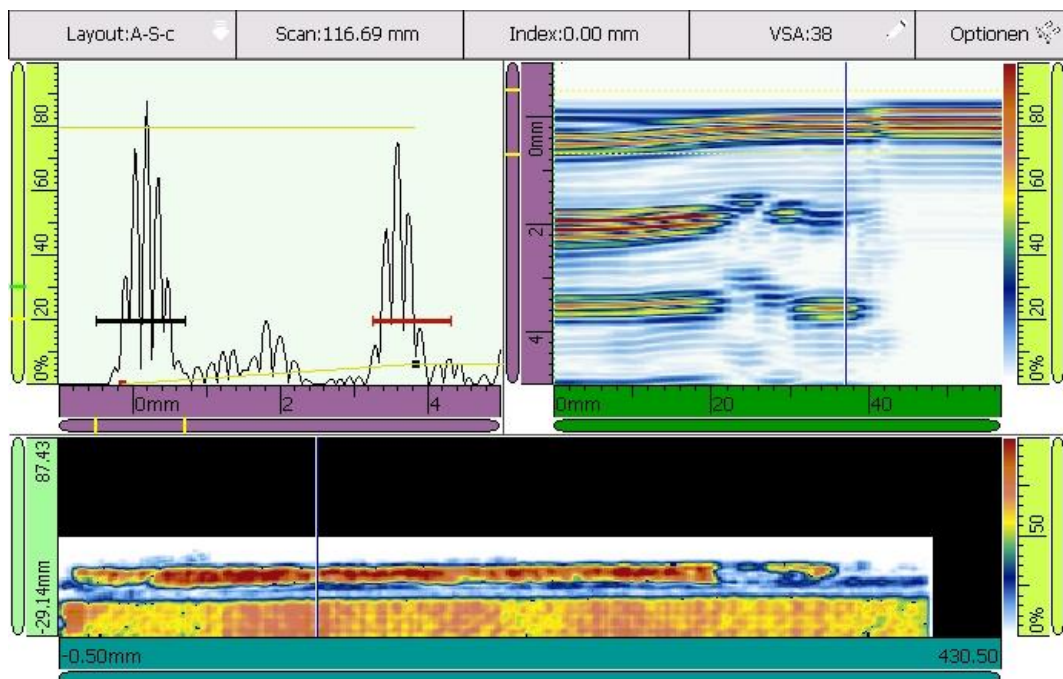


Abbildung A 4: ABC-Scan der Probe WSV2

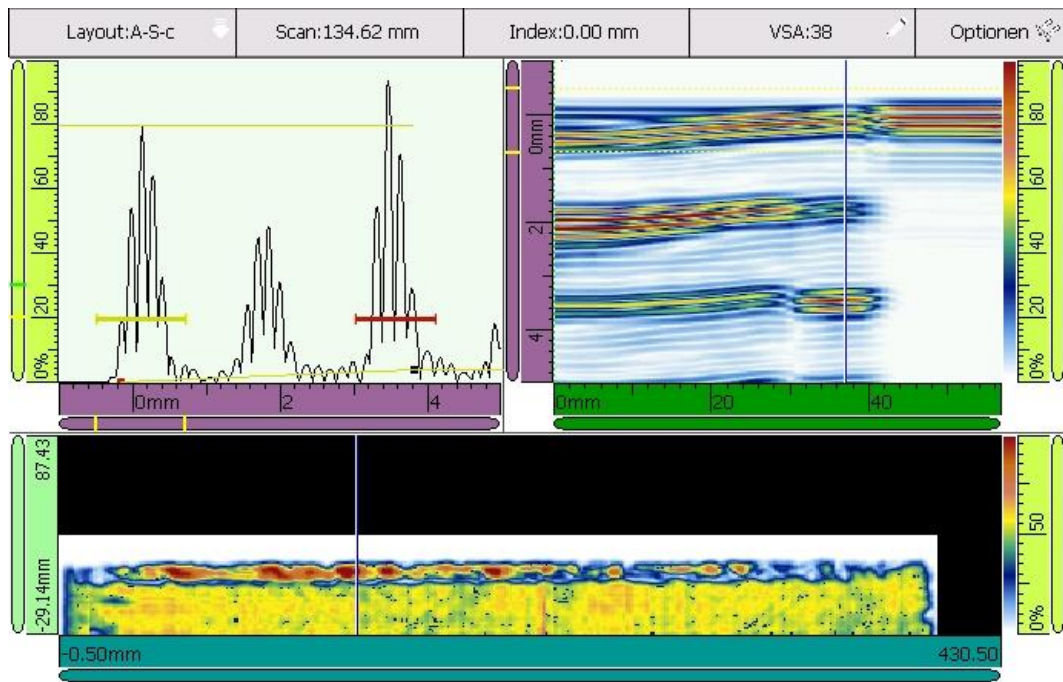


Abbildung A 5: ABC-Scan der Probe F1

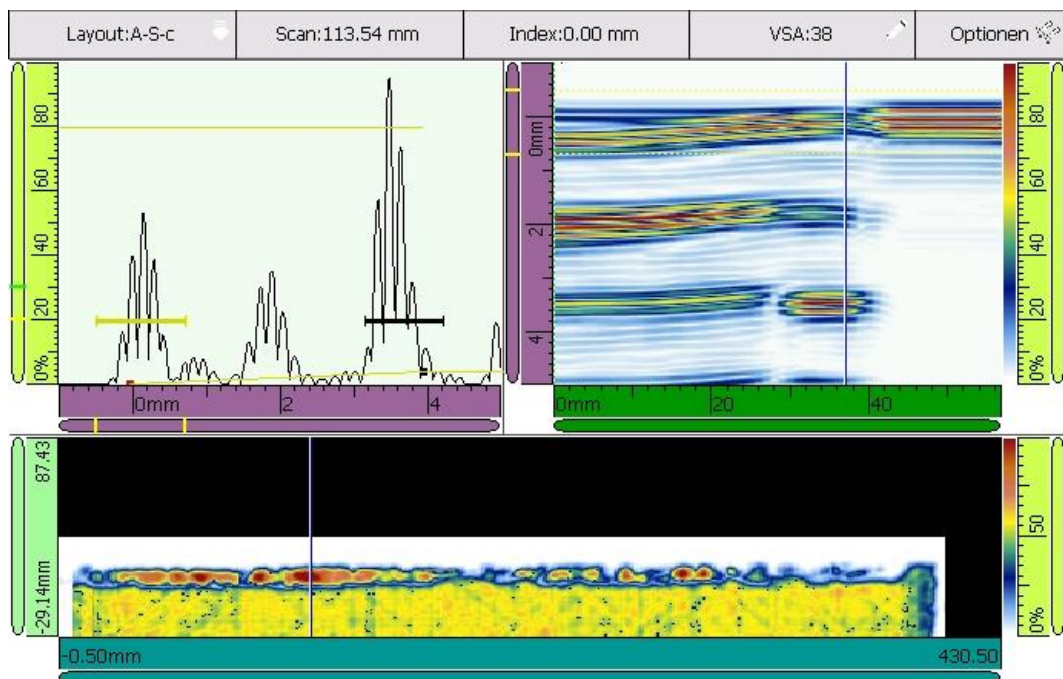


Abbildung A 6: ABC-Scan der Probe F2

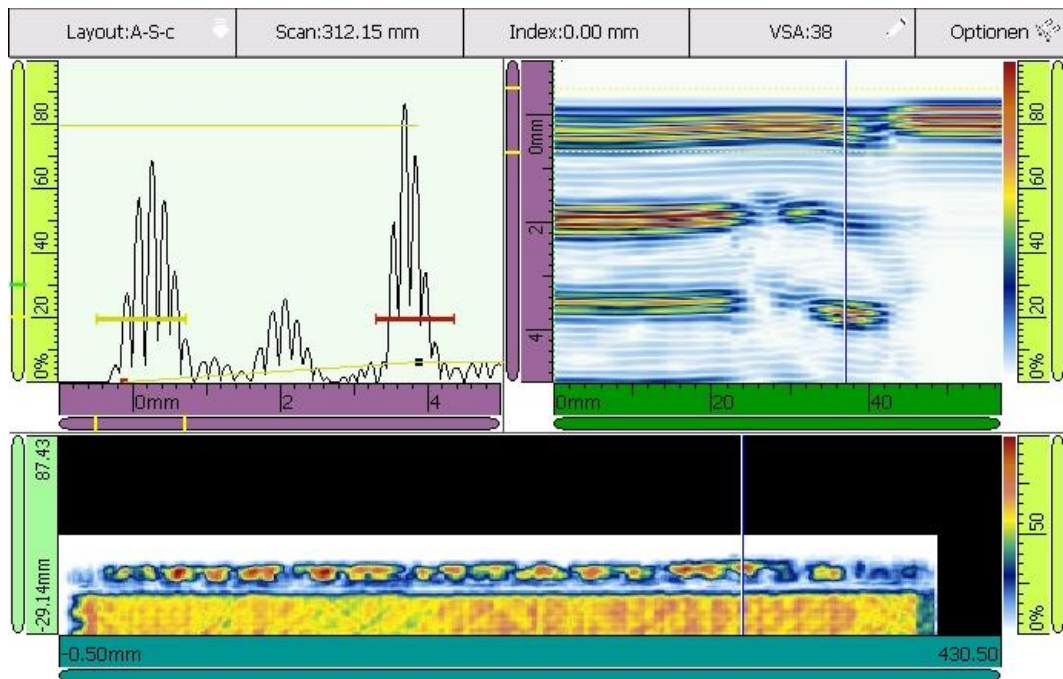


Abbildung A 7: ABC-Scan der Probe FV1

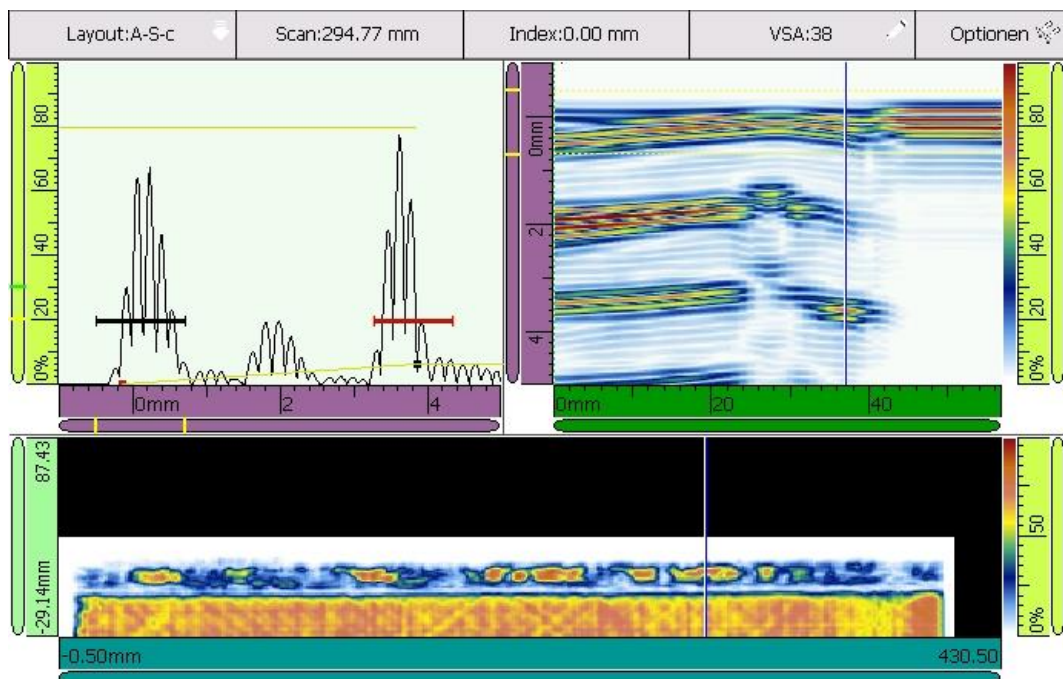


Abbildung A 8: ABC-Scan der Probe FV2

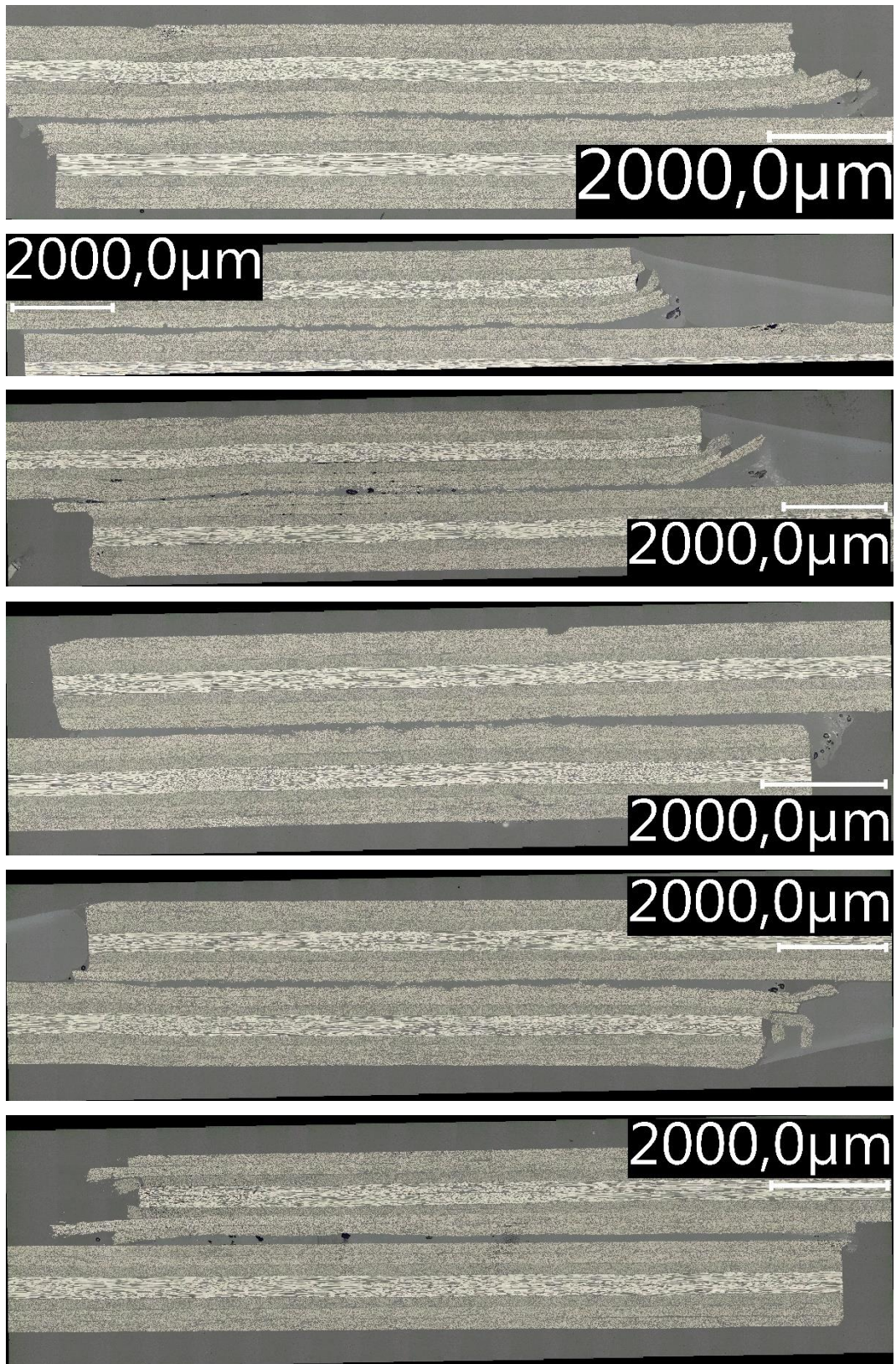
Anhang B: Ergebnisse der Zugscherprüfung

Tabelle B 1: Detaillierte Ergebnisse der Zugscherprüfung

Proben-Nr.	Zugehörigkeit	Zugehörigkeit-Nr.	Fmax [N]	Zugscherfestigkeit [MPa]
1	WS1	1	8306	25,75
2	WS1	2	9932	30,79
3	WS1	3	9639	29,88
4	WS1	4	9916	30,74
5	WS1	5	10784	33,43
6	WS1	6	9080	28,15
7	WS2	1	5672	17,58
8	WS2	2	9216	28,57
9	WS2	3	8541	26,48
10	WS2	4	9156	28,38
11	WS2	5	9931	30,79
12	WS2	6	10830	33,57
13	WSV1	1	7124	22,08
14	WSV1	2	8730	27,06
15	WSV1	3	10420	32,30
16	WSV1	4	10851	33,64
17	WSV1	5	10041	31,13
18	WSV1	6	10344	32,07
19	WSV2	1	7368	22,84
20	WSV2	2	9195	28,51
21	WSV2	3	8707	26,99
22	WSV2	4	7923	24,56
23	WSV2	5	8951	27,75
24	WSV2	6	9515	29,50
25	F1	1	1145	3,55
26	F1	2	1336	4,14
27	F1	3	1867	5,79
28	F1	4	3904	12,10
29	F1	5	5467	16,95
30	F1	6	2180	6,76
31	F2	1	645	2,00
32	F2	2	939	2,91
33	F2	3	2316	7,18
34	F2	4	3731	11,57
35	F2	5	6657	20,64
36	F2	6	4243	13,15
37	FV1	1	2544	6,40
38	FV1	2	2065	7,89
39	FV1	3	2961	9,18

Proben-Nr.	Zugehörigkeit	Zugehörigkeit-Nr.	Fmax [N]	Zugscherfestigkeit [MPa]
40	FV1	4	3368	10,44
41	FV1	5	5070	15,72
42	FV1	6	3095	9,60
43	FV2	1	1602	4,97
44	FV2	2	2036	6,31
45	FV2	3	2502	7,76
46	FV2	4	2846	8,82
47	FV2	5	4619	14,32
48	FV2	6	4123	12,78

Anhang C: Schliffbilder Mikroskopie



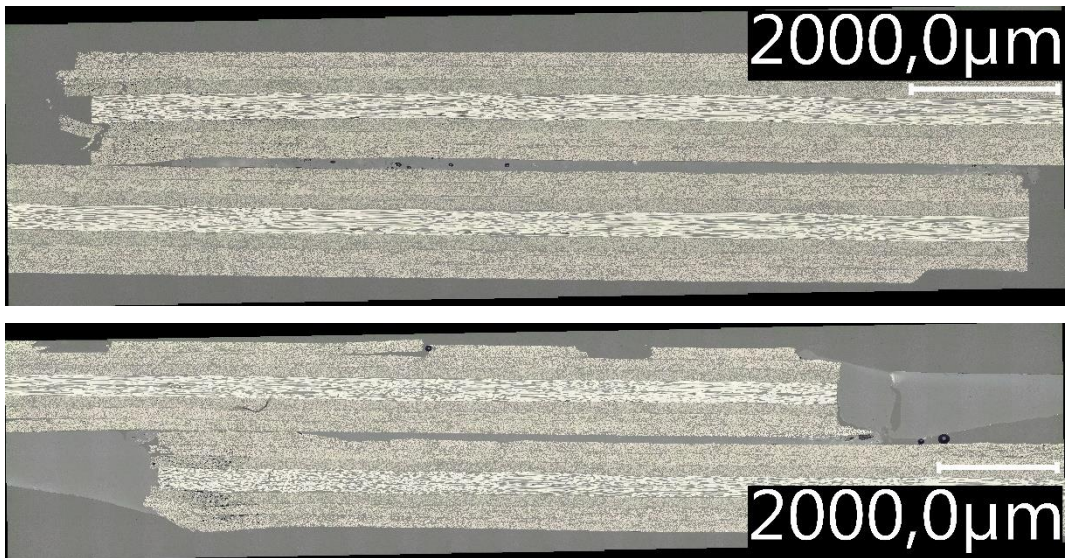


Abbildung C 1: Schliffbilder Proben WS1, WSV1, WSV2 (Anfang, Mitte, Ende), F1, F2 und FV2

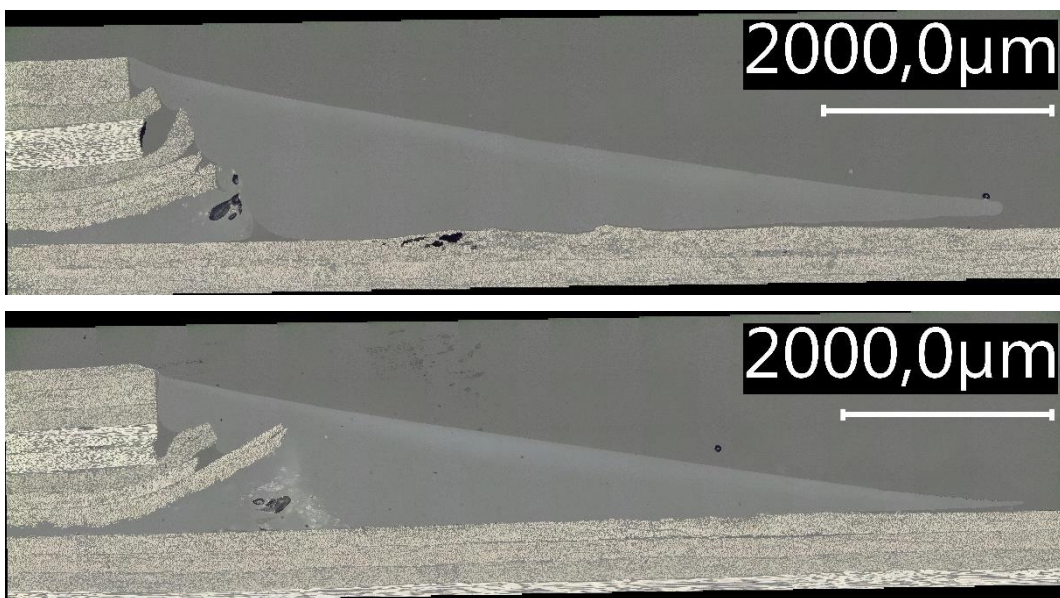


Abbildung C 2: Schliffbilder Versiegelung Proben WSV1 und WSV2

Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere, dass ich die vorliegende Arbeit ohne fremde Hilfe und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Quellen angefertigt habe, und dass die Arbeit in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegen hat. Alle Ausführungen der Arbeit, die wörtlich oder sinngemäß übernommen wurden, sind als solche gekennzeichnet.

Ulmer, Adrian

Augsburg, 29.12.2022