

FORSCHUNGSBERICHT

Einsatzpotenziale und Qualitätssicherung von Heizelement-Stumpfschweißungen an glasfaserverstärkten Kunststoffrohren

HS-GfK

Tobias Eckhardt, Gernot Hochleitner, Eduard Kraus

SKZ – Das Kunststoff-Zentrum

Danksagung

Das Vorhaben 01IF22616 N der Forschungsvereinigung Fördergemeinschaft für das Süddeutsche Kunststoff-Zentrum e.V. (FSKZ) wurde über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ (AiF) und das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR) im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Die Forschungseinrichtung SKZ-KFE gGmbH dankt dem BMW, der AiF und dem DLR für die Förderung sowie der Forschungsvereinigung für die Unterstützung bei der Durchführung des Vorhabens. Darüber hinaus dankt die Forschungseinrichtung den Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses für ihre Unterstützung bei der Bearbeitung des Projektes und für konstruktive Diskussionen zu diversen Fragestellungen

Kurzfassung

Im Rahmen des Projekts HS-GfK wurde untersucht, ob sich das Heizelement-Stumpfschweißen als Fügeprozess für das Verbinden von glasfaserverstärkten Kunststoffrohren eignet. Dabei wurde vor allem die Korrelation von Prozessparametern, der Faserorientierung und der resultierenden Schweißnahtqualität genauer betrachtet. Die verwendeten Rohre waren Mehrschicht-Verbundrohre, die aus einer faserverstärkten Mittelschicht und zwei unverstärkten Polymerschichten innen und außen bestanden. Zum Einsatz kamen Rohre mit den Durchmessern 110 und 200 mm. Diese wurden dann unter Variation verschiedener Parameter mittels Heizelement-Stumpfschweißen gefügt. Es konnte festgestellt werden, dass vor allem die mechanischen Kurzzeiteigenschaften beim Zugversuch und beim technologischen Biegeversuch davon abhängen, wie sich die Glasfasern in der Fügeebene verteilen. Außerdem ist anzumerken, dass bei Berstdruckprüfungen und bei Zeitstandinnendruck-Versuchen die Schweißnaht kein limitierender Faktor und das Rohr immer im Grundmaterial versagte.

Abstract

Within the framework of the HS-GfK project, the suitability of heated plate welding as a joining process for connecting glass fiber-reinforced plastic pipes was investigated. Particular attention was paid to the correlation between process parameters, fiber orientation, and the resulting weld seam quality. The pipes used were multilayer composite pipes, consisting of a fiber-reinforced middle layer and two unreinforced polymer layers on the inside and outside. Pipes with diameters of 110 mm and 200 mm were used. These were joined using heated plate welding while varying different parameters. It was found that the short-term mechanical properties, as determined by tensile and technological bending tests, are primarily influenced by the distribution of glass fibers within the joining plane. Furthermore, it should be noted that in both burst pressure and long-term internal pressure tests, the weld seam did not constitute a limiting factor; failure consistently occurred in the base material of the pipe.

Abkürzungsverzeichnis	III
Projektsteckbrief.....	IV
1 Einleitung.....	1
1.1 Anlass für Forschungsvorhaben.....	1
1.2 Problemstellung	2
1.3 Zielsetzung.....	3
2 Stand der Technik.....	4
2.1 Glasfaserverstärkte Kunststoffe	4
2.2 Heizelement-Stumpfschweißen	5
2.3 Heizelement-Stumpfschweißen von faserverstärkten Kunststoffen	8
2.4 Prüfung und Qualitätskriterien an Kunststoffrohren	9
3 Lösungsweg zur Erreichung des Forschungsziels	11
4 Durchgeführte Arbeiten	13
4.1 Festlegung und Beschaffung der Materialien	13
4.2 Materialcharakterisierung	14
4.2.1 Dynamische Differenzkalorimetrie (DSC).....	14
4.2.2 Laser-Flash-Analyse (LFA).....	15
4.3 Heizelement-Stumpfschweißen	16
4.4 Analyse der Faserorientierung	18
4.5 Mechanische Analyse	19
4.5.1 Kurzzeitprüfungen	19
4.5.2 Innendruck-Versuche	21
5 Diskussion der Ergebnisse	23
5.1 Materialcharakterisierung	23
5.2 Wulstausprägung	26
5.3 Analyse der Faserorientierung	28
5.3.1 Mikroskopie.....	28
5.3.2 Computertomografie.....	29
5.4 Mechanische Analyse	30
5.4.1 Kurzzeitversuche	30
5.4.2 Innendruck-Versuche	31
5.5 Übertragung der Ergebnisse auf zusätzliche Dimension	34
5.5.1 Heizelement-Stumpfschweißungen	34
5.5.2 Kurzzeitversuche	35
5.5.3 Innendruckversuche.....	37

5.6	Korrelationsanalysen	39
5.6.1	Einfluss der Prozessparameter auf die HS-Nahtqualität	39
5.6.2	Zusammenhang zwischen Wulstausprägung und HS-Nahtqualität ...	40
5.6.3	Einfluss der Faserorientierung auf die HS-Nahtqualität	41
6	Zusammenfassung	43
7	Literaturverzeichnis	45
8	Abbildungsverzeichnis	50

Abkürzungsverzeichnis

BBBT	Bead-Bend-Back-Test
DSC	Dynamische Differenzkalorimetrie
DVS	Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e. V.
Fa.	Firma
GF	Glasfaser
GFK	Glasfaserverstärkte Kunststoffe
HD	Heizelementmuffenschweißen
HM	Heizwendelschweißen
HS	Heizelement-Stumpfschweißen
iCT	Industrielle Computertomographie
kmU	Kleine und mittlere Unternehmen
LFA	Laser-Flash-Analyse
PA	Projektbegleitender Ausschuss
PE	Polyethylen
PP	Poylpropylen
PP-RCT	Polypropylene-Random-Crystalline, erhöhte Temperaturbeständigkeit
PVC	Polyvinylchlorid
SDR	Standard dimension ratio
zfP	Zerstörungsfreie Prüfmethoden

Projektsteckbrief

IGF-Projekt 01IF22616 N

„Einsatzpotenziale und Qualitätssicherung von Heizelement-Stumpfschweißungen an glasfaserverstärkten Kunststoffrohren (HS-GfK)“

Dauer: 01.10.2022 – 31.03.2025

Im Rahmen des Projekts HS-GfK wurde untersucht, ob sich das Heizelement-Stumpfschweißen als Fügeprozess für das Verbinden von glasfaserverstärkten Kunststoffrohren eignet. Dabei wurde vor allem die Korrelation von Prozessparametern, der Faserorientierung und der resultierenden Schweißnahtqualität genauer betrachtet. Die verwendeten Rohre waren Mehrschicht-Verbundrohre, die aus einer faserverstärkten Mittelschicht und zwei unverstärkten Polymerschichten innen und außen bestanden. Es konnte festgestellt werden, dass vor allem die mechanischen Kurzzeiteigenschaften beim Zugversuch und beim technologischen Biegeversuch davon abhängen, wie sich die Glasfasern in der Fügeebene verteilen. Außerdem ist anzumerken, dass bei Berstdruckprüfungen und bei Zeitstandinnendruck-Versuchen die Schweißnaht kein limitierender Faktor und das Rohr immer im Grundmaterial versagte.

Unterstützt durch den projektbegleitenden Ausschuss:

Aliaxis Deutschland GmbH	aquatherm GmbH
BÄNNINGER Kunststoff-Produkte GmbH	BASF SE
Continental Automotive GmbH	DuPont de Nemours Geneva Innovation Center
egeplast international GmbH	exateq GmbH
Frank GmbH	Herrmann Ultraschalltechnik GmbH & Co. KG
Hürner Schweisstechnik	Inoutic / Deceuninck GmbH
Lasermicronics GmbH	NORMA Group Holding GmbH
Omya International GmbH	Pierburg GmbH
REHAU AG + Co.	Röchling Engineering Plastics SE Co. KG
SIMONA AG	Wegener International GmbH
Westnetz GmbH	WIDOS Wilhelm Dommer Söhne GmbH

1 Einleitung

1.1 Anlass für Forschungsvorhaben

Kunststoffrohre sind ein integraler Bestandteil der Versorgungsinfrastruktur. Bereits in den 1930er Jahren wurden Rohre aus Hart-PVC (Polyvinylchlorid ohne Weichmacher) für die Trinkwasserversorgung eingesetzt. Später gewann auch der Einsatz von Polyethylen (PE) und Polypropylen (PP) immer weiter an Bedeutung. Zudem wurden auch die Technologien zum Verbinden von Kunststoffrohren immer weiter vorangetrieben. Vor allem das Heizelementschweißen, eines der ältesten und etabliertesten Fügeverfahren, gehört seit Jahrzehnten zu den wichtigsten Schweißtechnologien für den Rohrleitungsbau. [1]

Auch heutzutage ist eine Abnahme der Kunststoffrohrproduktion nicht abzusehen (vgl. Abbildung 1).

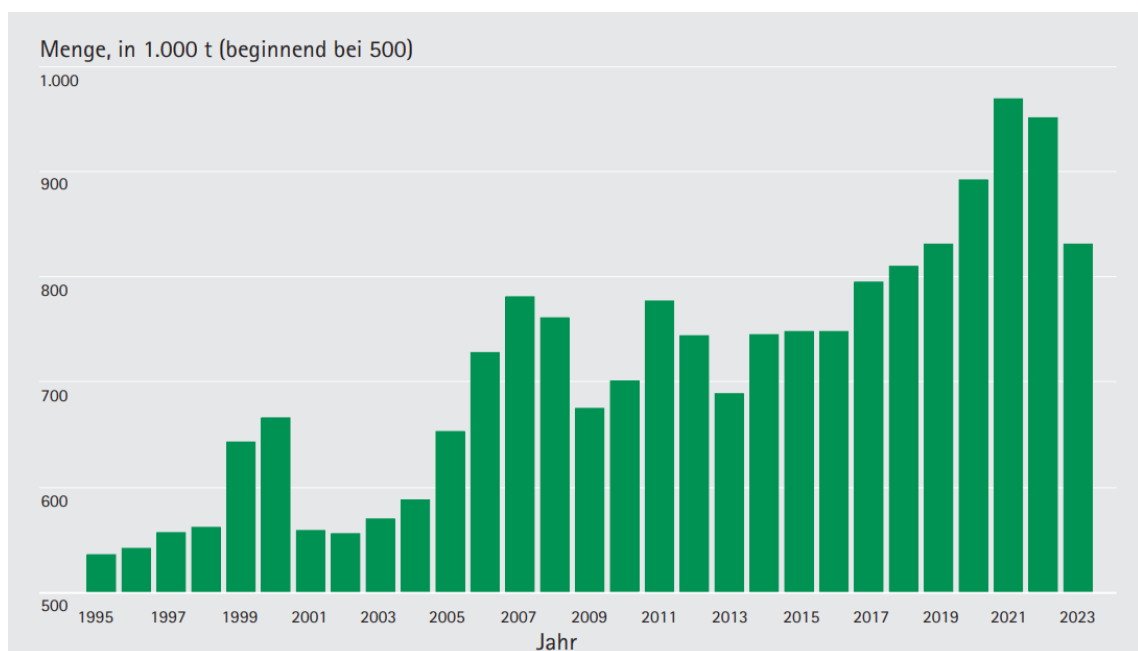


Abbildung 1: Produktion von Kunststoffrohrsystemen aus PE, PVC-U, PP und GFK in Deutschland [2]

Allein in Deutschland wurden im Jahr 2021 ca. 970.000 t Kunststoffrohre hergestellt [3]. Eine Studie des Marktforschungsinstituts Ceresana prognostiziert zudem, dass der weltweite Absatz von Kunststoffrohren bis 2033 jährlich um ca. 3,2 % steigen wird [4]. Aufgrund ihrer hervorragenden Eigenschaften wie geringes Gewicht, hohe Lebensdauer oder einfache Verarbeitbarkeit, sind sie in jeglichen Anwendungen unserer Infrastruktur kaum

noch wegzudenken [1]. Trotzdem bleibt der Einsatzbereich für Kunststoffrohre eingeschränkt. Gründe hierfür sind beispielsweise die auf < 50 Jahre begrenzte Lebensdauer von Polypropylen bei Anwendungen ≥ 60 °C [5] und die im Vergleich zu metallischen Werkstoffen hohe Wärmeausdehnung von Kunststoffen [6].

1.2 Problemstellung

Mit dem Einsatz einer Glasfaserschicht als Verbundrohr ist es möglich den Wärmeausdehnungskoeffizienten um ca. 70 % im Vergleich zu herkömmlichen Kunststoffrohren zu reduzieren [7]. Glasfaserverstärkte Kunststoffrohre bieten somit, in Kombination mit einer temperaturbeständigen Variante des Polypropylens PP-RCT (Polypropylene-Random-Crystalline, erhöhte Temperaturbeständigkeit), eine kostengünstige und umweltfreundliche Alternative zu metallischen oder keramischen Rohrwerkstoffen, für den Einsatz im Temperaturbereich oberhalb von 60 °C. Aufgrund verstärkter Nachfrage, besonders im Bereich der Heizungs-, Kälte- und Klimatechnik, gewinnt die Produktion mehrlagiger Rohre mit Funktionsschichten gegenüber einlagigen Standardrohren in der Rohrextrusion stetig an Bedeutung [8].

Ein Hauptgrund hierfür ist die Erhöhung der Steifigkeit, im Vergleich zu herkömmlichen, unverstärkten Kunststoffrohren. Dies ermöglicht die Anwendung von Rohren mit dünnerer Wandstärke und sorgt für eine Materialersparnis. Weiterhin wird die Durchflussmenge bei gleichen Druckverhältnissen aufgrund der geringeren Wandstärke um bis zu 20 % erhöht [9].

Um die Akzeptanz neuer oder modifizierter Materialien auf dem Kunststoffrohrmarkt zu erlangen, müssen sichere Verbindungstechnologien vorhanden und bewährt sein. Zum aktuellen Zeitpunkt fehlen umfangreiche Kenntnisse, über die Nahtfestigkeit und die notwendigen Prozessparameter für das Heizelement-Stumpfschweißen (HS) von faserverstärkten Kunststoffrohren, um diese wirtschaftlich u. a. in den Bereichen Abwasser, Gas- und Wasserversorgung einsetzen zu können.

Darüber hinaus ist eine schnelle und aussagekräftige Qualitätsprüfung bei Fügeverbindungen von großer Bedeutung. Hier fehlt es bei faserverstärkten Materialien an Prüfungskriterien, da diese bisher nur an den Anforderungen der unverstärkten Materialien gemessen werden.

Bisher werden glasfaserverstärkte Rohre aufgrund mangelnder technischer Nachweise und wissenschaftlicher Erkenntnisse zur Festigkeit überwiegend mit den Verfahren

Heizwendelschweißen (HM) oder Hezelementmuffenschweißen (HD) verbunden. Die Muffen werden für beide Verfahren (HM und HD) jeweils in einem separaten Herstellungsprozess erzeugt und sind damit mit zusätzlichem Energie- und Materialaufwand verbunden. Auch das Schweißen solcher Muffen verursacht einen hohen Energieaufwand, da relativ große Volumina beim Schweißen erwärmt werden müssen. Die Muffe wirkt sich somit negativ auf die Ökobilanz der Schweißung aus [10]. Eine sinnvolle Alternative zum HM bzw. HD bietet das sogenannte Hezelement-Stumpfschweißen (HS). Mit diesem Verfahren ist eine direkte Verschweißung der beiden Stirnflächen eines Rohres ohne Materialzusatz möglich.

1.3 Zielsetzung

Ziel dieses Forschungsvorhabens ist es, den HS-Prozess im Anwendungsbereich der faserverstärkten Kunststoffrohre zu etablieren. Die Untersuchungen werden mit dreischichtigen PP-Verbundrohren durchgeführt. Diese bestehen aus einer unverstärkten PP-RCT Innenschicht, einer glasfaserverstärkten PP-RCT Mittelschicht und einer unverstärkten PP-RCT Außenschicht. Der Schwerpunkt liegt auf der Analyse der Nahtfestigkeit und der daraus resultierenden Kurz- und Langzeitfestigkeit. Darüber hinaus sollen geeignete Schweißparameter und Prüfmethode evaluiert werden, da weder Schweiß- noch Prüfvorgaben für gefüllte bzw. verstärkte Materialien existieren. Weitere Ziele des Projektes sind ein besseres Verständnis der thermisch-rheologischen Eigenschaften von glasfaserverstärkten Rohren sowie die Analyse der Faserorientierung im Bereich der Schweißnaht. Das Projekt „HS-GfK“ verfolgt dabei mehrere aufeinander aufbauende Ziele:

1. Minimierung des negativen Einflusses der Faserorientierung beim Schweißen von faserverstärkten Kunststoffrohren durch die Anpassung der Prozessparameter.
2. Erfüllung gängiger Qualitätskriterien für Kunststoffrohrverbindungen durch die Optimierung des HS-Fügeprozesses.
3. Zerstörungsfreie Bestimmung der HS-Nahtqualitäten von faserverstärkten Kunststoffrohren.
4. Erweiterung der Richtlinien um Schweißparameter und Qualitätskriterien für faserverstärkte Kunststoffrohre.

Die Ergebnisse des Forschungsvorhabens sollen in Handlungsempfehlungen für die Industrie zusammengefasst werden und Anhaltspunkte geben, wie das Hezelement-Stumpfschweißen für faserverstärkte Kunststoffrohre optimiert werden kann.

2 Stand der Technik

2.1 Glasfaserverstärkte Kunststoffe

Glasfaserverstärkte Kunststoffe (GFK) zählen zu den bedeutendsten Werkstoffen im Bereich der Faserverbundmaterialien. Sie bestehen aus einer Polymermatrix und eingebetteten Glasfasern (GF), die als Verstärkungselemente fungieren. Diese Zusammensetzung verleiht GFK eine herausragende Kombination aus hoher mechanischer Festigkeit, geringem Gewicht, Korrosionsbeständigkeit und guter chemischer Resistenz. Aufgrund dieser Eigenschaften finden GFK breite Anwendung in der Automobilindustrie, im Bauwesen, in der Luft- und Raumfahrttechnik sowie in der Energie- und Umwelttechnik. [11] Mit über 90 % am europäischen Gesamtmarkt machen GFK den größten Teil der faserverstärkten Kunststoffe aus [12]. Beim Matrixmaterial werden sowohl Thermoplaste als auch Duroplaste eingesetzt (vgl. Abbildung 2).

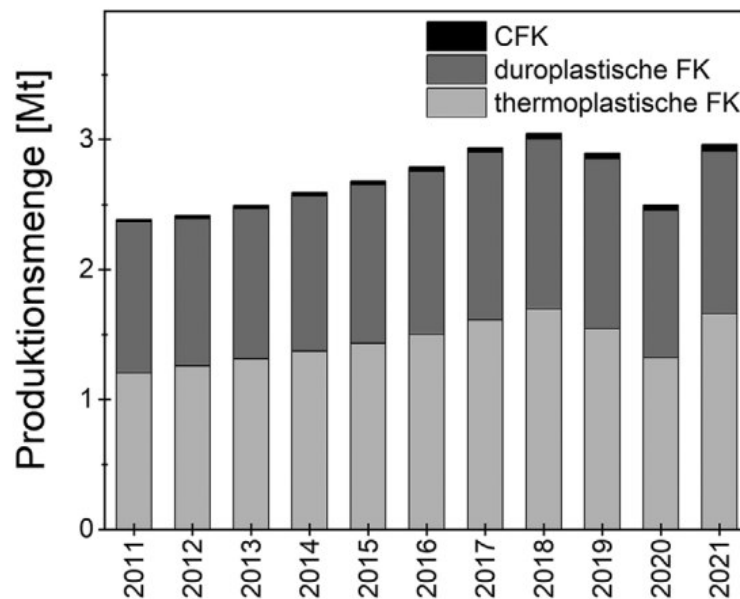


Abbildung 2: Jahresproduktion faserverstärkter Kunststoffe in Europa [13].

Auch in Rohrleitungssystemen kommen GFK zum Einsatz. Die Anwendung von GFK-Rohren für erdverlegte Abwasserkanäle und -leitungen wurde erstmals Ende der 1980er Jahre in einer Norm festgehalten [1]. Heutzutage werden GFK-Rohre häufig im Anlagenbau, im Rohrleitungsbau sowie in der Öl-, Gas- und Chemie-Industrie eingesetzt [12].

Mit dem Einsatz einer Glasfaserschicht als Verbundrohr ist es möglich den Wärmeausdehnungskoeffizienten um ca. 70 % im Vergleich zu herkömmlichen Kunststoffrohren zu reduzieren [7]. Dieser spielt eine wesentliche Rolle bei der Verlegung von Rohrleitungen,

denn die auftretenden Längenänderungen müssen durch Dehnungsbögen kompensiert werden (vgl. Abbildung 3). Eine fehlende Kompensation würde zu Schäden in den Rohrleitungen führen. Da sich die temperaturbedingte Längenausdehnung, durch den Einsatz von glasfaserverstärkten Rohren, im Vergleich zu herkömmlichem ungefülltem Kunststoff um deutlich verringert, lässt sich die Anzahl der im Leitungssystem notwendigen Dehnungsbögen reduzieren. Damit ergeben sich sowohl beim Platzbedarf (Raum für Ausdehnungsbögen), der Befestigungstechnik (reduzierte Anzahl von Festpunkten) als auch in der notwendigen Verbindungstechnik energetische und materielle Einsparpotenziale.

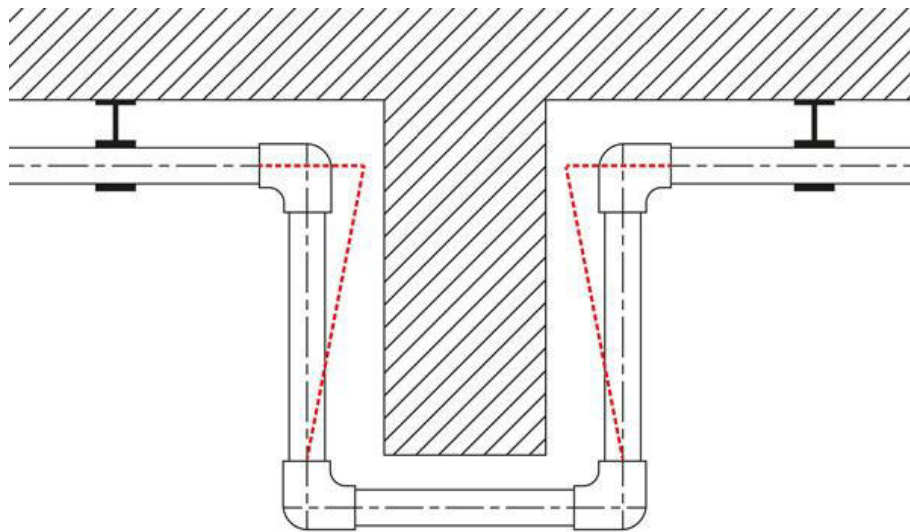


Abbildung 3: Prinzipskizze eines U-Dehnungsbogens [14].

Im Vergleich zum Gesamtverbrauch aller Kunststoffrohre in Europa machen GFK-Rohre mit 1,7 % jedoch nur einen geringen Anteil aus, da ihre Herstellung mit höheren Kosten und Anforderungen verbunden ist als bei unverstärkten Rohren [15].

2.2 Hezelement-Stumpfschweißen

Das Hezelement-Stumpfschweißen gehört zu den ältesten und etabliertesten Verfahren zum Schweißen von thermoplastischen Kunststoffen. Bereits in den 1960er Jahren wurden erste Maschinen entwickelt, die einen automatisierten Prozessablauf realisieren konnten. Beim HS handelt es sich um einen mehrstufigen Prozess, der folgendermaßen abläuft: die zu verbindenden Fügepartner werden durch Kontakt mit einem Hezelement – meist mit einer Antihaftbeschichtung versehen – erwärmt. Dadurch bilden sich Schmelzschichten auf den Oberflächen der Fügepartner. Anschließend wird das Hezelement entfernt und die aufgeschmolzenen Kunststoffflächen zusammengedrückt. Unter definiertem Druck kühlen die Kunststoffschmelzen ab und es entsteht eine stoffschlüssige

Verbindung. Trotz des mehrstufigen Prozesses und langer Taktzeiten findet sich das HS in einem breiten Anwendungsspektrum wieder. Dies liegt vor allem an der Reproduzierbarkeit, hohen Nahtfestigkeiten und der Möglichkeit, eine Vielfalt an Bauteilgeometrien zu verbinden. [16, 17]

Der Schweißprozess beim HS ist meist kraft- und zeitregelt und lässt sich in mehrere Phasen unterteilen (vgl. Abbildung 4).

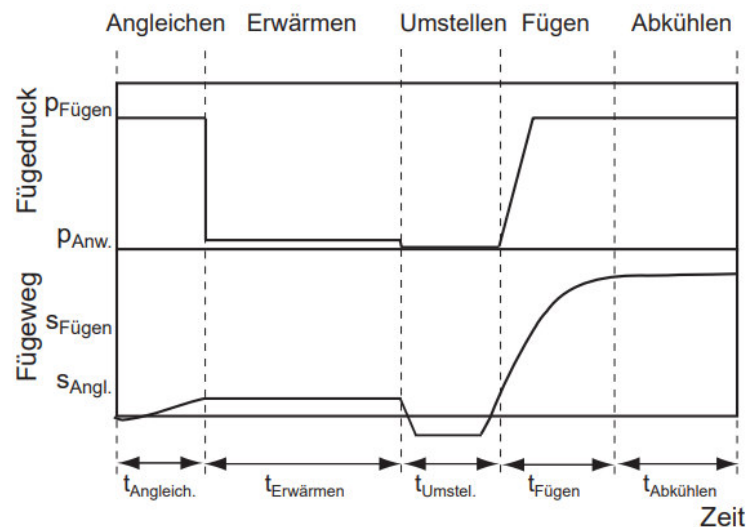


Abbildung 4: Schematische Darstellung des HS-Prozesses mit den entsprechenden Druck- und Wegverläufen [16].

Im ersten Schritt erfolgt in der Regel das Abhobeln der Bauteile, um für den weiteren Verlauf planparallele Fügeflächen zu gewährleisten. Nach einer Versatzkontrolle wird das Heizelement zwischen die Fügepartner gebracht. [18]

Beim Angleichen werden dann die beiden Fügepartner mit konstantem Druck (üblicherweise im Bereich von 0,1 bis 2 MPa [19]) an das Heizelement gepresst. Dies sorgt dafür, dass Unebenheiten ausgeglichen werden und die Fügepartner entsprechend flächig am Heizelement anliegen. Dies sorgt im weiteren Verlauf für eine möglichst optimale Wärmeübertragung. Durch das Aufschmelzen der Fügeflächen und dem anliegenden Druck wird Schmelze nach außen gedrückt, wodurch sich ein Wulst ausbildet. Das Angleichen ist abgeschlossen, sobald der Wulst eine vorgegebene Höhe erreicht hat.

Das Erwärmen bzw. Anwärmen erfolgt danach nahezu drucklos. Dies soll verhindern, dass die Schmelze weiter in den Wulst gedrückt. Die Erwärmungsphase dient lediglich dazu, die Schmelzeschichtdicke der Fügepartner zu vergrößern (vgl. Abbildung 5). [20]

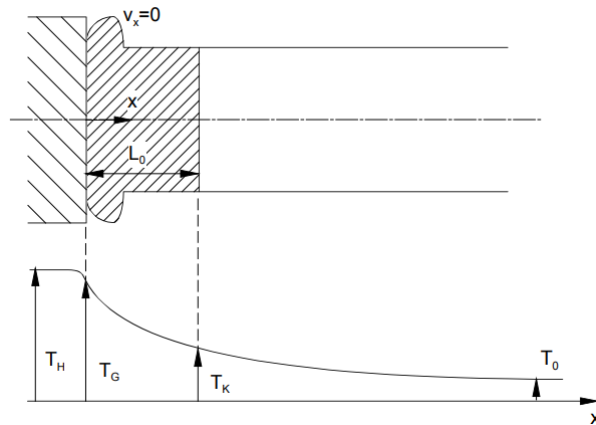


Abbildung 5: Schmelzeschichtdicke L_0 nach der Erwärmungsphase [20].

Nach Abschluss der Erwärmungsphase erfolgt das Umstellen. Dieser Schritt umfasst das Zurückfahren der Fügepartner, das Herausnehmen des Heizelements und somit die Vorbereitung auf die Fügephase. Die Umstellzeit soll dabei so gering wie möglich gehalten werden, um ein Abkühlen der Schmelze zu minimieren. Moderne HS-Maschinen können Umstellzeiten < 2 s realisieren [21].

Schließlich fahren die Fügepartner zusammen und es wird langsam der benötigte Fügedruck aufgebaut. Typischerweise sind der Füge- und Angleichdruck identisch. Während der Druck konstant aufrechterhalten wird, kühlt die Schmelze ab und es entsteht eine stoffschlüssige Verbindung. Vor allem zu Beginn der Fügephase entsteht durch den aufgebrauchten Druck ein Quetschfluss, welcher zur weiteren Ausprägung der Schweißwülste führt. Sobald die Schweißnaht ausreichend abgekühlt ist, darf das Bauteil entnommen werden. Bis zur vollständigen Abkühlung darf jedoch keine Belastung auf die Schweißnaht einwirken. [20]

Es wurden bereits verschiedene Theorien entwickelt, die beschreiben, welche Mechanismen beim Schweißen von Thermoplasten wirken und zur Verbindung der Fügepartner beitragen.

Die viskoelastische Kontakttheorie nach Anand et al. besagt beispielsweise, dass sich die vor dem Fügeprozess unebenen Oberflächen der Bauteile durch den aufgebrauchten Schweißdruck deformieren und angleichen. Es kommt zu einer vergrößerten Kontakt- bzw. Grenzfläche, wodurch Nebenvalenzkräfte wirken und eine Haftung eintritt. [22, 23]

Bei der Diffusionstheorie von Voyutskii wird hingegen davon ausgegangen, dass die Moleküle während des Fügeprozesses eine ausreichende Beweglichkeit aufweisen, dass es

in der Grenzfläche zu Platzwechselfvorgängen zwischen den beiden Fügepartnern kommt und die Moleküle ineinander diffundieren [24].

Einen entscheidenden Einfluss auf die Nahtfestigkeit hat vor allem die Fließgeschwindigkeit der Schmelze, welche abhängig ist von der Schmelzeschichtdicke, der Viskosität und dem Fügedruck [25]. Für unverstärkte Thermoplaste werden i. d. R. Kurzzeitzug-Schweißfaktoren¹ von 1 erreicht, d. h. die Schweißnaht erreicht ähnliche Festigkeiten wie das Grundmaterial.

2.3 Hezelement-Stumpfschweißen von faserverstärkten Kunststoffen

Für das HS von GFK werden geringe Schweißfaktoren erreicht als für unverstärkte Thermoplaste. Dies wurde bereits mehrfach gezeigt. [26, 27, 28] Grund dafür ist die Änderung der Faserorientierung durch die Fließvorgänge der Schmelze während des Fügeprozesses (vgl. Abbildung 6). Für das Schweißen von faserverstärkten Kunststoffrohren bedeutet das, dass sich die Glasfasern, die i. d. R. entlang der Extrusionsrichtung orientiert sind, um 90° drehen und folglich längs in der Fügeebene liegen [20].

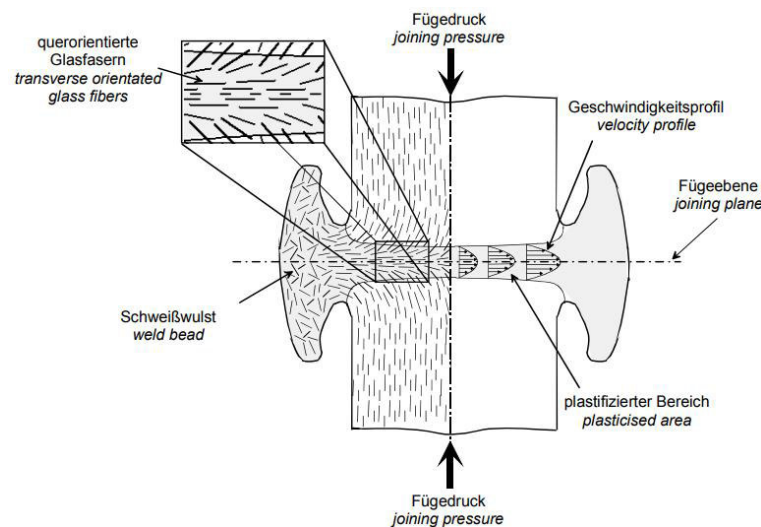


Abbildung 6: Schematische Darstellung der Faserorientierung in einer Schweißnaht [20].

Brübel zeigte zudem, dass sich die Schweißnahtfestigkeit und der damit verbundene Schweißfaktor mit Zunahme des Fasergewichtsanteils verringert (vgl. Abbildung 7) [28].

¹ $f_z = \frac{\sigma_w}{\sigma_r}$; f_z : Kurzzeitzug-Schweißfaktor, σ_w : Festigkeit geschweißte Probekörper, σ_r : Festigkeit Probekörper aus Grundmaterial [30]

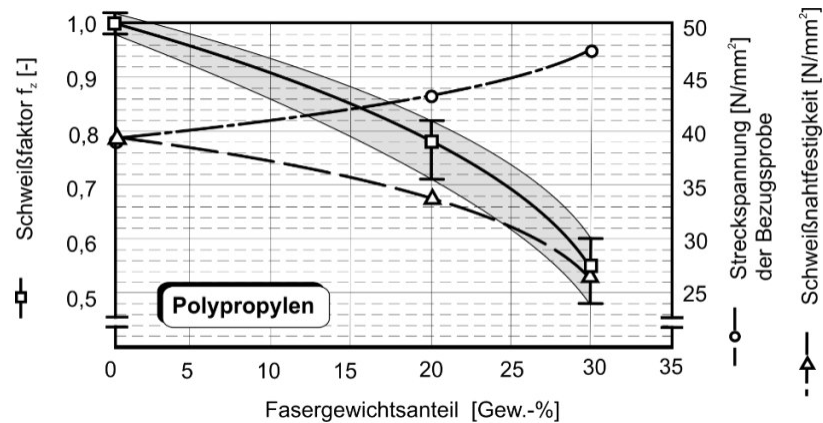


Abbildung 7: Streckspannung, Schweißnahtfestigkeit und Schweißfaktor von Polypropylen in Abhängigkeit des Fasergewichtsanteils [28].

Laut Fiebig lassen sich drei Ansätze wählen, um eine Erhöhung der Nahtfestigkeit beim HS von GFK zu erreichen. Dazu zählt die Wahl geeigneter Prozessparameter, die Wahl der Anfangsorientierung der Fasern und die Erhöhung des Anteils des Matrixmaterials. [29] Zweiteres ist bei Kunststoffrohren durch den kontinuierlichen Herstellungsprozess und die damit gleichbleibende Faserorientierung nicht umsetzbar.

2.4 Prüfung und Qualitätskriterien an Kunststoffrohren

Zur Bewertung der Qualität von Kunststoffrohren werden in Deutschland überwiegend Prüfungen aus dem Regelwerk des Deutschen Verbands für Schweißen und verwandte Verfahren e. V. (DVS) angewendet.

Dazu gehören unter anderem der Zugversuch nach DVS-Richtlinie 2203-2 [30] und der technologische Biegeversuch nach DVS-Richtlinie 2203-5 [31]. Im Zugversuch wird die Festigkeit der Schweißverbindung geprüft sowie der Schweißfaktor bestimmt. Die Prüfung im technologischen Biegeversuch gibt Aufschluss darüber, welcher Dehnung die Schweißverbindung ausgesetzt werden kann, bevor es zu einem Anriss kommt.

Die Qualität von Schweißverbindungen lässt sich auch in Langzeitprüfungen bestimmen und damit eine Aussage über die Lebensdauer der Verbindung treffen. Im Bereich der Langzeitprüfung werden u. a. der Zeitstandinnendruck-Versuch nach DIN EN ISO 1167-1 [32] und der Zeitstand-Zugversuch nach DVS-Richtlinie 2203-4 [33] angewendet.

Neben den mechanisch zerstörenden Methoden gibt es auch zerstörungsfreie Qualitätsprüfungen, wie die Sichtprüfung nach DVS-Richtlinie 2202 Beiblatt 1 [34]. Hierbei sind optische Kriterien, wie Wulstform oder -größe, ausschlaggebend. Das Regelwerk des DVS unterscheidet weder bei den Prüfmethode noch bei der Beurteilung der Qualität

zwischen gefüllten und ungefüllten Kunststoffen. Es gibt nur wenige Kenntnisse darüber, inwieweit die aktuellen Prüfmethode auf faserverstärkte Materialien anwendbar sind.

Neben dem Regelwerk des DVS gibt es weitere nicht standardisierte zerstörungsfreie Prüfmethode (zFP), die eine Beurteilung der Schweißnahtqualität erlauben. Dazu gehört bspw. der Bead-Bend-Back-Test (BBBT) (vgl. DIN EN 12007) [35]. Bei dieser Prüfung wird nach der äußeren Begutachtung der Schweißwulst mit einem Wulstentferner abgeschält, die Schnittkante zwischen Wulst und Rohr optisch begutachtet und anschließend der Wulst von Hand gegen die Umfangsrichtung gebogen. Befinden sich Fremdkörper in der Fügeebene, kommt es durch die Biegung zu Spalteffekten. Das Verfahren bietet für PE eine Zuverlässigkeit von 81 %, bei der Detektion abweichender Schweißparameter. [36]

Wie bereits beschrieben hängt die Qualität einer HS-Verbindung bei GFK davon ab, wie die Fasern in der Fügenaht liegen [26, 27]. Zur Analyse der Faserorientierung ist der Einsatz eine industriellen Röntgen-Computertomografie (iCT) zielführend. Zur Bildgebung werden Röntgenstrahlen detektiert, nachdem diese vom Bauteil abgeschwächt wurden. Die Absorption der Strahlung ist dabei u. a. abhängig von der Materialdichte. Da sich die Dichte von Glasfasern und PP unterscheidet, können diese von der iCT erkannt werden [6].

3 Lösungsweg zur Erreichung des Forschungsziels

Um die Einsatzpotenziale des HS-Prozesses für glasfaserverstärkte Kunststoffrohre zu evaluieren, wurden mehrere aufeinander aufbauende Arbeitsschritte definiert (vgl. Abbildung 8):

1. Für die Untersuchungen wurden marktrelevante Rohrdurchmesser und Standard Dimension Ratio (SDR)² ausgewählt. Diese wurden dann von Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses (PA) zur Verfügung gestellt.
2. Die bereitgestellten Materialien wurden mittels thermischer Analysemethoden, z. B. Laser-Flash-Analyse (LFA) oder Dynamische Differenzkalorimetrie (DSC), charakterisiert. Dabei wurden sowohl die GF-Schicht als auch die unverstärkte Thermoplastschicht analysiert. Die Ergebnisse der Materialcharakterisierung dienten u. a. dazu, die Prozessfenster für die Schweißversuche festzulegen.
3. Für die Herstellung der Fügeverbindungen mittels HS wurde ein Versuchsplan erstellt, bei dem verschiedene Prozessparameter in mehreren Schritten variiert wurden. Als Grundlage dienten dabei die Parametervorgaben für unverstärktes PP aus den DVS-Richtlinien, die Ergebnisse der Materialcharakterisierung und die Arbeiten aus bereits bekannten Literaturquellen.
4. Mittels Mikroskopie und iCT wurde für die hergestellten Schweißverbindungen die Faserorientierung und die Konzentration der Fasern im Nahtbereich untersucht.
5. Zur Beurteilung der Schweißnahtqualität wurden zerstörungsfreie (BBBT) sowie mechanische Kurz- und Langzeitprüfungen (Kurzzeit-Zugversuch, technologischer Biegeversuch, Berstdruckprüfung und Zeitstand-Innendruckversuch) herangezogen.
6. Die Korrelationen zwischen den HS-Prozessparametern, der Faseranalyse und der Schweißnahtqualität wurde systematisch untersucht.

² Standard Dimension Ratio (SDR): Verhältnis von Durchmesser zu Wanddicke [1]

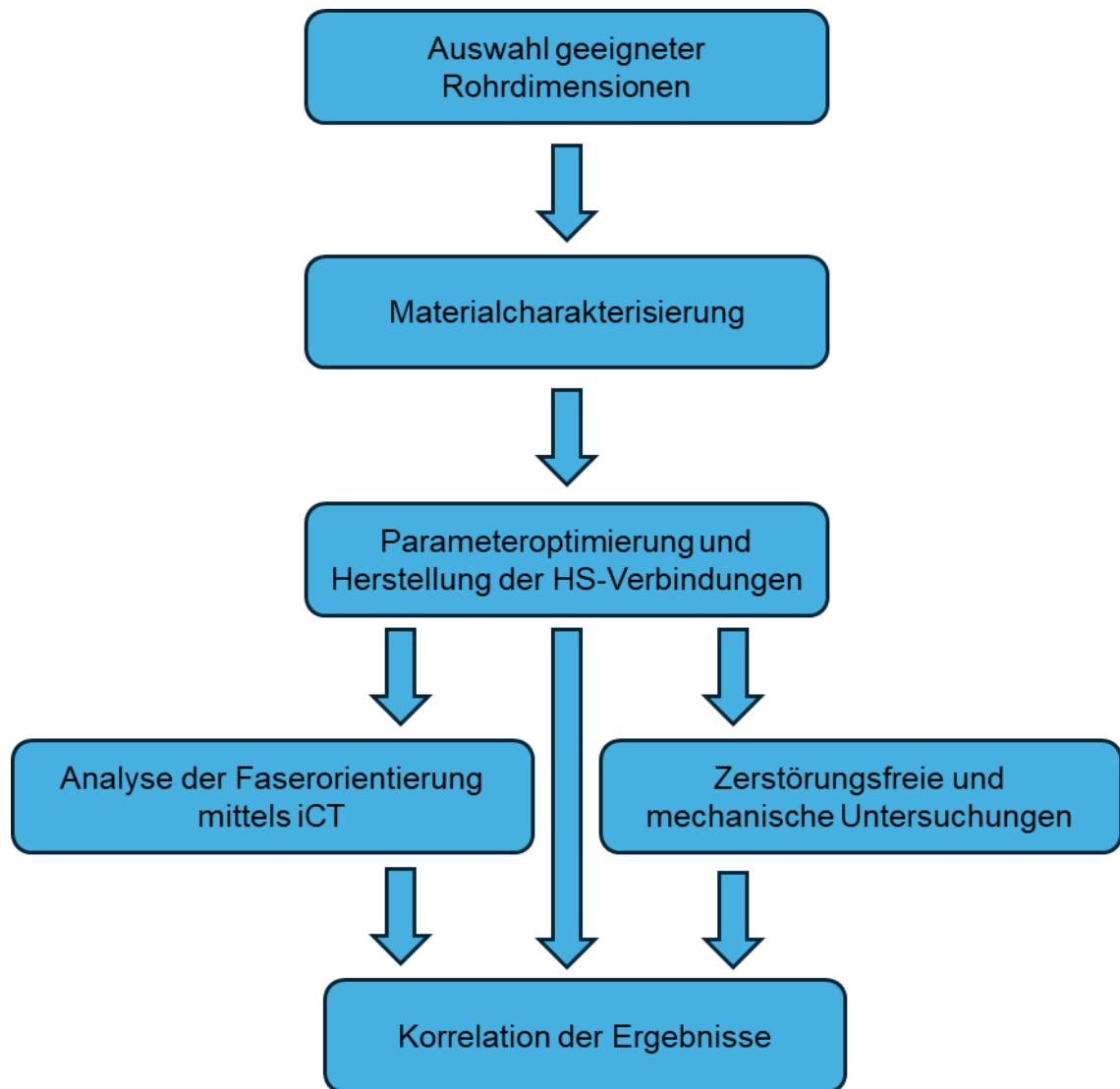


Abbildung 8: Schematische Darstellung des Arbeitsplans.

4 Durchgeführte Arbeiten

4.1 Festlegung und Beschaffung der Materialien

Für das Projekt wurden Mehrschicht-Verbundrohre aus PP-RCT (Polypropylen-Random-Copolymer mit erhöhter Temperatur- und Druckbeständigkeit) der Fa. aquatherm GmbH und der Fa. Bänninger Kunststoff-Produkte GmbH verwendet. Diese bestehen aus einer Mittelschicht mit Faserfüllung und den unverstärkten Polymerschichten innen bzw. außen (vgl. Abbildung 9).

Es kamen Rohre mit den Durchmessern 110 und 200 mm Einsatz, jeweils mit einer SDR von 11. Dies entspricht einer Wandstärke von 10,0 bzw. 18,2 mm.

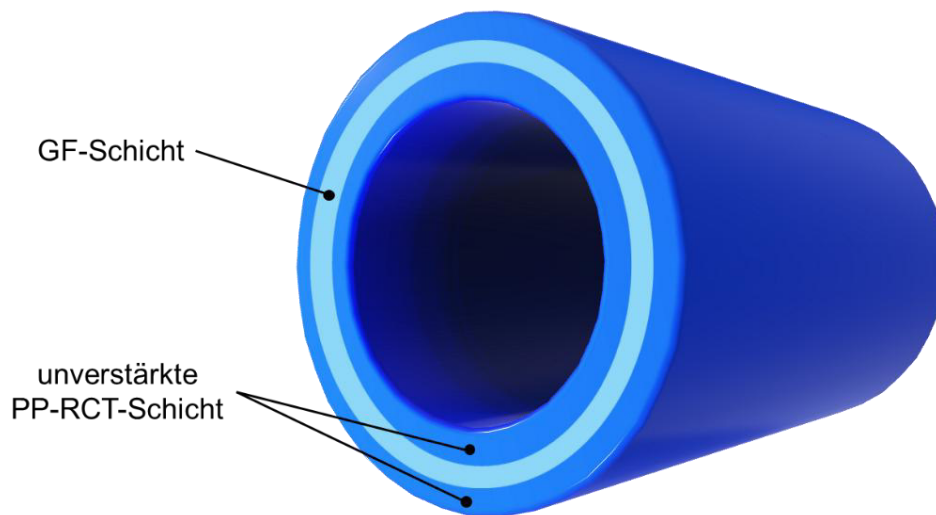


Abbildung 9: Schematische Darstellung des Rohraufbaus.

Die eingebrachten Glasfasern führen zu einigen Verbesserungen bei den mechanischen Eigenschaften (vgl. Tabelle 1).

Tabelle 1: Vergleich ausgewählter mechanischer Eigenschaften zwischen der unverstärkten und glasfaserverstärkten PP-Schicht bei den Rohren der Fa. aquatherm GmbH [9].

Technische Eigenschaften	unverstärkt	verstärkt
E-Modul	800 N/mm ²	1200 N/mm ²
Streckspannung	25 N/mm ²	30 N/mm ²
Zugfestigkeit	25 MPa	35 MPa
Längenausdehnungskoeffizient	1,5 * 10 ⁻⁴ K ⁻¹	0,35 * 10 ⁻⁴ K ⁻¹

4.2 Materialcharakterisierung

4.2.1 Dynamische Differenzkalorimetrie (DSC)

Zur Bestimmung der thermischen Eigenschaften wurde eine DSC (englisch: differential scanning calorimetry) mit dem Gerät DSC 204 F1 Phoenix der Fa. NETZSCH-Gerätebau GmbH durchgeführt (vgl. Abbildung 10).



Abbildung 10: Messgerät DSC 204 F1 Phoenix der Fa. NETZSCH-Gerätebau GmbH.

Für die Untersuchungen wurden aus den unterschiedlichen Rohrschichten jeweils eine Probenmenge von ca. 15 mg entnommen. Gemessen wurde in einem Temperaturbereich von -20 bis 220 °C mit einer Aufheiz- und Abkühlrate von 10 K/min.

Mittels DSC und der Saphir-Methode wurde u. a. auch die spezifische Wärmekapazität c_p bestimmt. Es handelt sich dabei um eine Vergleichsmethode, bei welcher insgesamt drei Messungen unter identischen Bedingungen durchgeführt werden. Für die erste Messung werden zwei leere Tiegel gemessen. In der zweiten wird in einen der Tiegel eine flache Saphirscheibe, mit bekannter Masse und spezifischer Wärmekapazität, für die Referenzmessung gelegt und anschließend wieder beide Tiegel gemessen. In der dritten Messung wird die Saphirscheibe gegen die Probe ausgetauscht, für die der c_p -Wert bestimmt werden soll. Aus den gemessenen Werten lässt sich ein Verlauf der spezifischen Wärmekapazität in Abhängigkeit der Temperatur für die Probe berechnen. [37]

4.2.2 Laser-Flash-Analyse (LFA)

Zur Bestimmung der Temperatur- und Wärmeleitfähigkeiten wurde eine LFA mit dem Gerät NanoFlash LFA 447 der Fa. NETZSCH-Gerätebau GmbH durchgeführt (vgl. Abbildung 11).



Abbildung 11: Messgerät NanoFlash LFA 447 der Fa. NETZSCH-Gerätebau GmbH.

Die Messungen erfolgten an drei Proben für jeweils beide Schichten. Hierfür wurden zylindrische Scheiben (Dicke ca. 2 mm, Durchmesser 12,7 mm) spanend aus den Rohren präpariert. Für die Analyse wurden die Probekörper jeweils auf 25, 50, 75 und 100 °C erwärmt. Sobald für die einzelnen Temperaturstufen ein thermisches Gleichgewicht erreicht wurde, erfolgte eine thermische Anregung mittels einer Xenon-Blitzlampe (Pulsdauer ca. 0,2 ms). Der daraus resultierende Temperaturanstieg auf der Probenrückseite wurde mit einem Infrarot-Halbleiterdetektor (InSb) gemessen.

Anhand der Messdaten und nach dem Modell von Cowan [38] kann die Temperaturleitfähigkeit α bestimmt werden. Zusammen mit der Wärmekapazität c_p und der Materialdichte ρ kann mit der folgenden Formel [39] die Wärmeleitfähigkeit λ berechnet werden:

$$\lambda(T) = \rho(T) \cdot c_p(T) \cdot \alpha(T)$$

4.3 Heizelement-Stumpfschweißen

Die Schweißversuche wurden auf einer Werkstattmaschine der Fa. HÜRNER Schweißtechnik GmbH vom Typ HWT 400 CS durchgeführt (vgl. Abbildung 12).



Abbildung 12: Werkstattmaschine HÜRNER HWT 400 CS.

Als Grundlage für die Schweißversuche diente die DVS-Richtlinie 2207-11 [40], in welcher der Prozess und die Parameter (vgl. Tabelle 2) für das Schweißen von Rohren aus PP beschrieben sind.

Tabelle 2: Standardparameter für PP-Rohre D110 SDR11.

Heizelementtemperatur [°C]	Angleichdruck [N/mm ²]	Anwärmzeit [s]	Fügedruck [N/mm ²]
210	0,1	108	0,1

Durch Anpassung der Prozessparameter sollte dann der negative Einfluss der Faserorientierung in der Schweißnaht minimiert werden, um die Qualität der HS-Verbindungen zu erhöhen. Zunächst wurde die Hypothese aufgestellt, dass geringere Drücke zusammen mit einer erhöhten Schmelzeschichtdicke, also höheren Temperaturen bzw. verlängerten Anwärmzeiten, zu verbesserten Schweißnahtqualitäten führen könnten. Dies hat sich in ersten Vorversuchen zwar bestätigt, allerdings wurde auch festgestellt, dass es möglich ist, Schweißungen mit ähnlichen Festigkeitswerten herzustellen, indem die Parameter in die entgegengesetzte Richtung angepasst werden, also erhöhter Druck bei verringerter

Schmelzeschichtdicke. Daher wurden für den Versuchsplan die Parameter in beide Richtungen angepasst. (vgl. Tabelle 3). Die Schweißungen wurden dabei zunächst nur für Rohre D110 durchgeführt. Bei einer Wanddicke von 10 mm und der daraus resultierenden Fläche entspricht eine aufgebrauchte Kraft von 300 N einem Druck von ca. $0,1 \text{ N/mm}^2$.

Tabelle 3: Versuchsplan für Rohre D110.

Nummer	Heizelement-temperatur [°C]	Angleichkraft [N]	Anwärmzeit [N]	Fügekraft [N]
1	210	300	108	300
2	210	250	108	250
3	210	300	135	300
4	230	300	135	300
5	230	300	162	300
6	230	250	135	250
7	230	250	135	300
8	210	470	108	470
9	210	470	135	470
10	230	470	108	470
11	210	470	81	470
12	190	470	108	470
13	210	250	108	470
14	210	300	108	470
15	230	300	108	470
16	230	300	135	470
17	210	300	162	470
18	210	470	108	300
19	210	470	108	640
20	210	640	108	470

Im Anschluss an die Schweißungen wurde jeweils der Schweißwulst an vier Stellen um den Umfang im Abstand von 90° hinsichtlich Breite und Höhe vermessen. Auch die Wulstausprägung soll später mit den Ergebnissen der mechanischen Prüfungen korreliert werden. Zudem wurde bei einem Teil der Schweißnähte der Wulst entfernt, um den BBT (vgl. Kapitel 2.4) durchzuführen. Allerdings führte der Test nicht zu aussagekräftigen Ergebnissen und wird deshalb nicht weiter behandelt.

Die Parametersätze, welche zu den besten Schweißnahtqualitäten führten, wurden später auf Rohre D200 angewendet.

4.4 Analyse der Faserorientierung

Zunächst wurden die Querschnittsflächen von angeschliffenen Probekörper unter einem Mikroskop der Fa. Leica Microsystems GmbH vom Typ M165 C betrachtet (vgl. Abbildung 13). Dabei lag der Fokus auf der Orientierung und Konzentration der Fasern in der Fügeebene.



Abbildung 13: Mikroskop Leica M165 C (links) und Beispiel einer Mikroskopieaufnahme einer Fügeebene von geschweißten GF-Rohren (rechts).

Mit der iCT ist natürlich eine detailliertere Faseranalyse möglich (vgl. Abbildung 14). Aufgrund des deutlich höheren Aufwands wurden jedoch nur ausgewählte Proben mit diesem Verfahren analysiert.

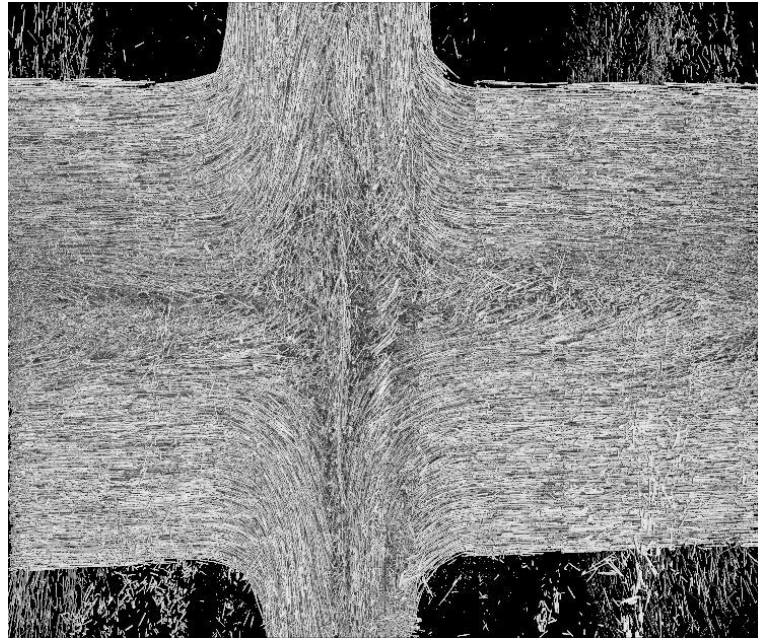


Abbildung 14: Beispiel einer iCT-Aufnahme einer Fügeebene von geschweißten GF-Rohren.

4.5 Mechanische Analyse

4.5.1 Kurzzeitprüfungen

Für die mechanische Analyse wurde als erstes der Zugversuch gemäß DVS-Richtlinie 2203-2 [30] durchgeführt. Dieser erfolgte auf einer Prüfmaschine der Fa. ZwickRoell GmbH & Co. KG vom Typ Z250 (vgl. Abbildung 15).



Abbildung 15: Zugprüfung an der Z250.

Material und der Probendicke einen Mindestbiegewinkel bzw. einen Mindestbiegeweg erreichen, um die Qualitätsanforderungen des DVS an eine HS-Verbindung zu erfüllen.

Tabelle 5: Abmessungen der Probekörper und der Versuchsanordnung für den technologischen Biegeversuch.

Dimension	Probekörper			Versuchsanordnung	
	Dicke	Breite	Länge	Stützweite	Biegestempeldicke
D110 SDR11	10 mm	11 mm	200 mm	90 mm	8 mm
D200 SDR11	18,2 mm	20 mm	250 mm	120 mm	16 mm

4.5.2 Innendruck-Versuche

Schließlich wurden Schweißungen ausgewählter Parameterkombinationen auch Innendruck-Versuchen unterzogen.

Es wurde eine Berstdruckprüfung durchgeführt, um den maximalen Innendruck zu ermitteln, dem das (geschweißte) Rohr widerstehen kann, bevor es versagt – also berstet. Dabei wurden Rohrabschnitte zunächst auf eine definierte Länge zugeschnitten und mit geeigneten Endstücken versehen (vgl. Abbildung 17). Anschließend wurden diese mit einem Prüfmedium – in diesem Fall Wasser – vollständig gefüllt.

Sobald das Rohr vorbereitet war, wurde der Innendruck mithilfe einer Druckpumpe kontinuierlich mit einer Rate von 1 bar pro 10 s erhöht. Während des gesamten Prozesses wird der Druck überwacht, bis das Rohr versagt – sei es durch Rissbildung oder vollständiges Bersten. Der höchste gemessene Druck unmittelbar vor dem Versagen gilt als Berstdruck.



Abbildung 17: Versuchsaufbau der Berstdruckprüfung.

Zudem wurden Zeitstandinnendruck-Versuche in Anlehnung an DIN EN ISO 1167-1 [32] durchgeführt. Dafür wurden Rohrabschnitte in ein temperiertes Wasserbecken bei 95 °C gegeben und mit einem konstanten Innendruck von 8,5 bar beaufschlagt. Ziel unter diesen Bedingungen war, eine Mindeststandzeit von 165 h zu erreichen. Diese Parameter werden auch für die Überwachung der Rohre selbst verwendet.

5 Diskussion der Ergebnisse

5.1 Materialcharakterisierung

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen die Auswertungen der DSC und Wärmekapazität der verschiedenen Schichten (vgl. Abbildung 18 unverstärktes PP und Abbildung 19 GF-PP).

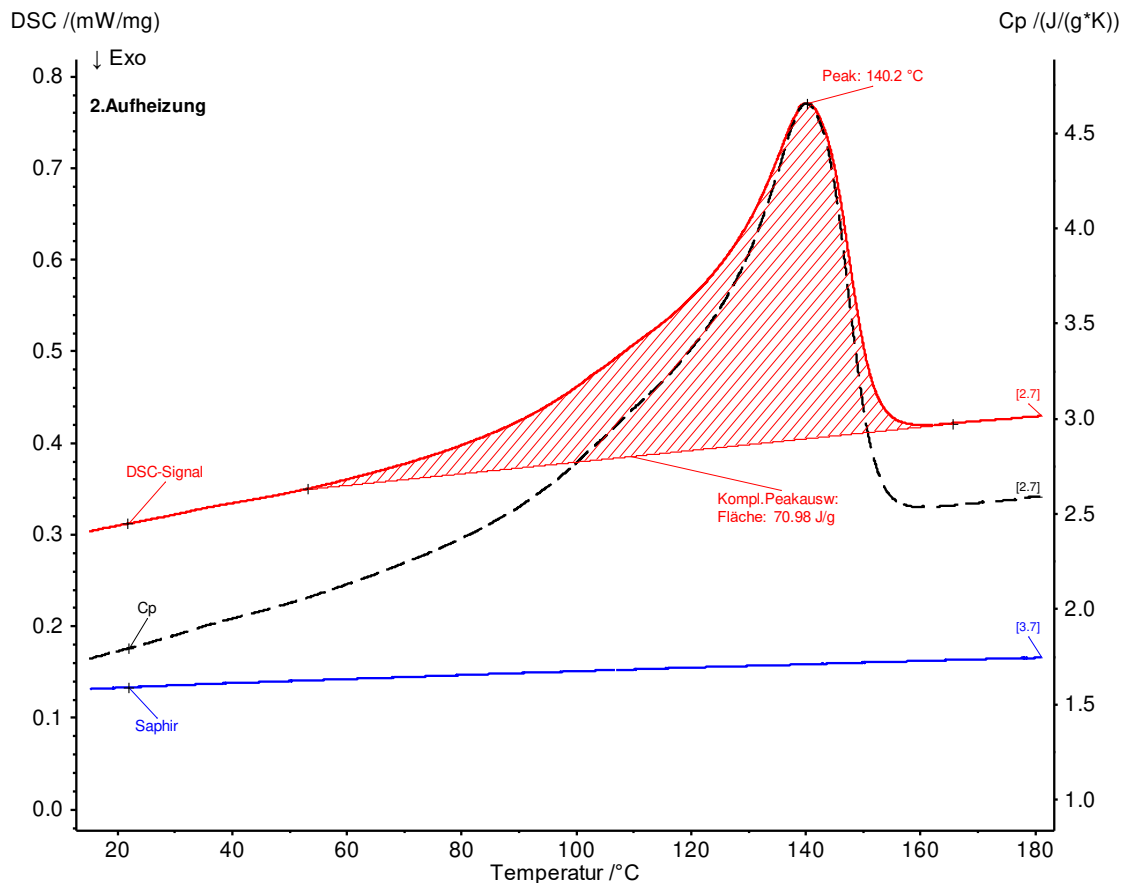


Abbildung 18: Auswertung der DSC für das unverstärkte PP.

Die DSC-Kurve für das unverstärkte PP zeigt einen ausgeprägten Schmelzpeak bei 140,2 °C. Dieser ist typisch für ein PP-R [6]. Die zugehörige Schmelzenthalpie beträgt 70,98 J/g. Diese Werte bestätigen die kristalline Struktur von PP und dienen als Referenz für die nachfolgende Untersuchung des GF-PP.

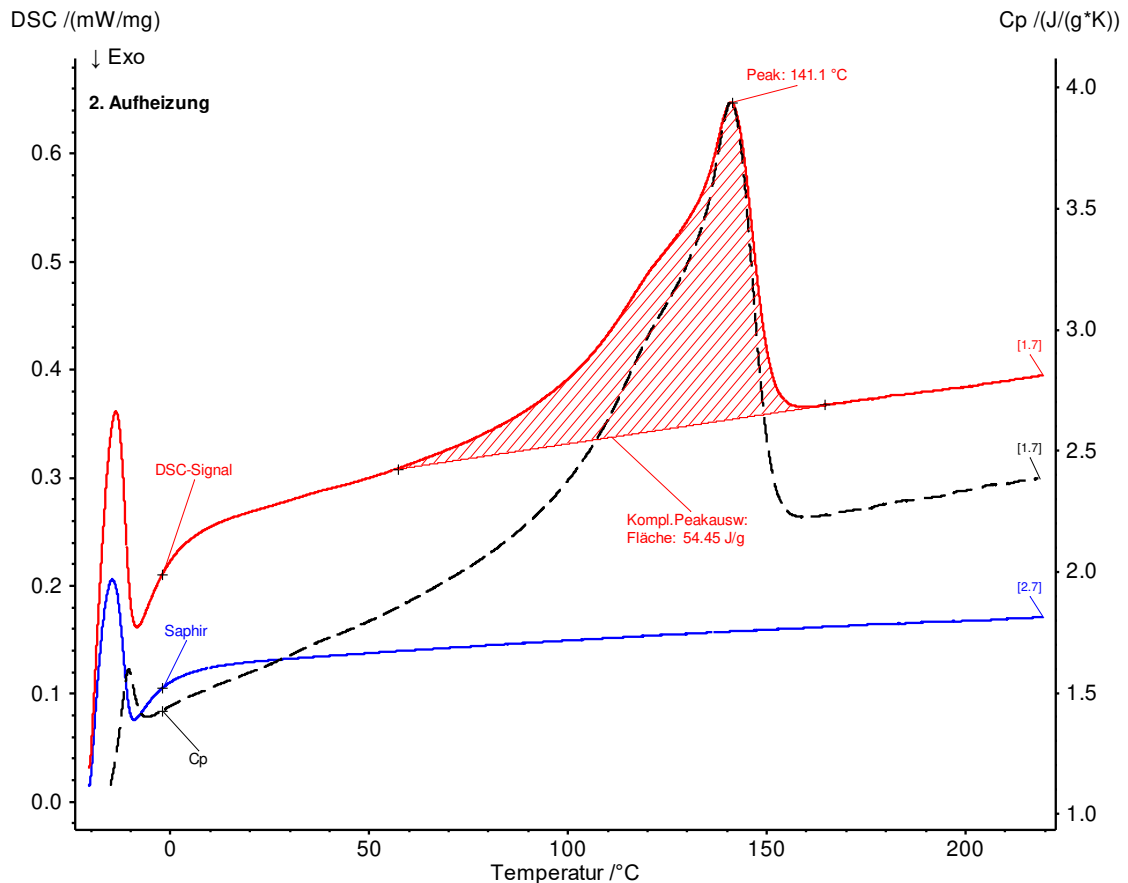


Abbildung 19: Auswertung der DSC für das GF-PP.

Für das GF-PP liegt der Schmelzpeak mit 141,1 °C nur geringfügig über dem des unverstärkten PP. Allerdings ist die Schmelzenthalpie mit 54,45 J/g deutlich reduziert. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Glasfasern als inerte Füllstoffe die Gesamtmasse des Materials erhöhen, aber selbst nicht kristallisieren oder zur Schmelzenthalpie beitragen.

Der Vergleich der beiden Materialien zeigt, dass die Zugabe von Glasfasern keinen signifikanten Einfluss auf die Schmelztemperatur hat. Die reduzierte Schmelzenthalpie weist darauf hin, dass der kristalline Anteil im GF-PP durch die Glasfasern reduziert wird. Dies könnte sich auf die mechanischen und thermischen Eigenschaften des Gesamtverbunds auswirken, insbesondere auf das Schmelz- und Fließverhalten während der Verarbeitung oder des Schweißprozesses. Da das Rohr aus einer inneren und äußeren unverstärkten Schicht sowie einer mittleren GF-Schicht besteht, kann die unterschiedliche thermische Reaktion der Materialien an den Grenzflächen eine Rolle bei der Schweißqualität und der Haftung der Schichten spielen.

Tabelle 6 zeigt die in der DSC ermittelten Wärmekapazitäten, welche nachfolgend für die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit verwendet werden.

Tabelle 6: Wärmekapazitäten der verschiedenen Rohrschichten.

Bereich	$C_{p25^{\circ}\text{C}}$ [J/(kg*K)]	$C_{p50^{\circ}\text{C}}$ [J/(kg*K)]	$C_{p75^{\circ}\text{C}}$ [J/(kg*K)]	$C_{p100^{\circ}\text{C}}$ [J/(kg*K)]
unverstärkt	1821	2033	2306	2769
verstärkt	1619	1797	2020	2378

Mittels LFA wurden die in Tabelle 7 dargestellten Temperaturleitfähigkeiten ermittelt.

Tabelle 7: Temperaturleitfähigkeiten der verschiedenen Rohrschichten.

Bereich	$\alpha_{p25^{\circ}\text{C}}$ [m ² /s]	$\alpha_{p50^{\circ}\text{C}}$ [m ² /s]	$\alpha_{p75^{\circ}\text{C}}$ [m ² /s]	$\alpha_{p100^{\circ}\text{C}}$ [m ² /s]
unverstärkt	$1,29 \cdot 10^{-7}$	$1,18 \cdot 10^{-7}$	$1,08 \cdot 10^{-7}$	$0,92 \cdot 10^{-7}$
verstärkt	$1,44 \cdot 10^{-7}$	$1,32 \cdot 10^{-7}$	$1,20 \cdot 10^{-7}$	$1,05 \cdot 10^{-7}$

Unter Berücksichtigung der Materialdichten [9] lässt sich die Wärmeleitfähigkeit mit der in Kapitel 4.2.2 beschriebenen Formel berechnen, wodurch sich die Ergebnisse in Tabelle 8 ergeben.

Tabelle 8: Wärmeleitfähigkeiten der verschiedenen Rohrschichten.

Bereich	$\lambda_{p25^{\circ}\text{C}}$ [W/(m*K)]	$\lambda_{p50^{\circ}\text{C}}$ [W/(m*K)]	$\lambda_{p75^{\circ}\text{C}}$ [W/(m*K)]	$\lambda_{p100^{\circ}\text{C}}$ [W/(m*K)]
unverstärkt	0,21	0,22	0,22	0,23
verstärkt	0,23	0,24	0,24	0,25

Für GF-PP zeigt sich eine höhere Wärmeleitfähigkeit im Vergleich zum unverstärkten PP. Die Zunahme der Wärmeleitfähigkeit beider Materialien mit steigender Temperatur ist – bei Betrachtung der Formel aus Kapitel 4.2.2 – auf die erhöhte Wärmekapazität bei höheren Temperaturen zurückzuführen [42]. Glasfasern verbessern die Wärmeleitung des verstärkten Kunststoffes, da sie eine deutlich höhere Wärmeleitfähigkeit als die Polymermatrix besitzen. Dies kann zu einer schnelleren Wärmeverteilung in der mittleren Schicht des Rohres führen, was sich auf die Temperaturverteilung während des Schweißprozesses auswirken könnte.

5.2 Wulstausprägung

Da die Wulstausprägung bereits ein Indikator für die Schweißnahtqualität sein kann [43], wurde der Schweißwulst jeder HS-Verbindung an vier Stellen um den Umfang gemessen und jeweils der Mittelwert gebildet (vgl. Abbildung 20).

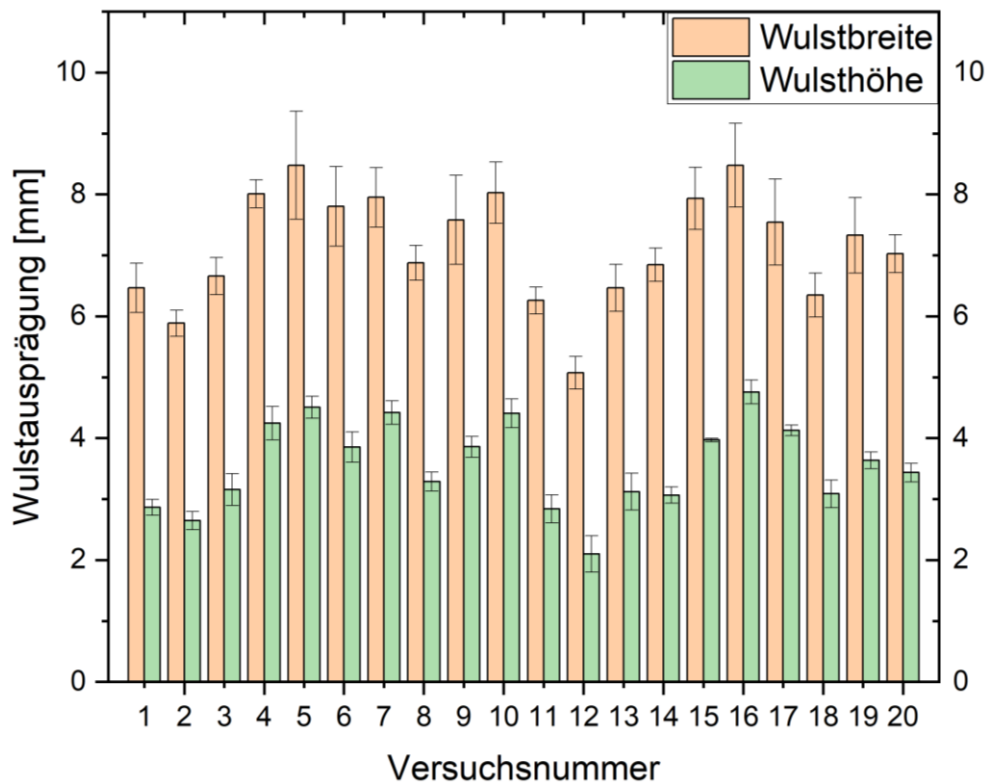


Abbildung 20: Ergebnisse der Wulstvermessung hinsichtlich Breite und Höhe für die Rohre D110.

Für die Wulstbreite wurden Werte zwischen 5,07 und 8,48 mm gemessen, für die Wulsthöhe von 2,10 bis 4,76 mm. Auffällig ist, dass für diese Versuche die Heizelementtemperatur den größten Einfluss auf die Wulstausprägung hat. Dies wird deutlich, wenn die Wulstvermessung zusammen mit den Parametersätzen in einer Tabelle nach der Wulstbreite sortiert wird (vgl. Tabelle 9). Beispielsweise wurde bei Versuchsnummer 4 im Vergleich zur Versuchsnummer 3 nur die Heizelementtemperatur von 210 °C auf 230 °C erhöht. Die Wulstbreite erhöhte sich durch diese Parameteränderung um ca. 20 %. Bei Versuchsnummer 1 und Versuchsnummer 8 wurde hingegen der Angleich- und Fügedruck von 300 N auf 470 N erhöht. Dabei erhöhte sich die Wulstbreite lediglich um ca. 6 %.

Tabelle 9: Auflistung der Schweißversuche sortiert nach der Wulstbreite.

Versuchsnummer	Wulstbreite [mm]	Heizelementtemperatur [°C]	Angleichkraft [N]	Anwärmzeit [s]	Fügekraft [N]
12	5,07	190	470	108	470
2	5,89	210	250	108	250
11	6,26	210	470	81	470
18	6,35	210	470	108	300
1	6,47	210	300	108	300
13	6,47	210	250	108	470
3	6,66	210	300	135	300
14	6,85	210	300	108	470
8	6,88	210	470	108	470
20	7,03	210	640	108	470
19	7,33	210	470	108	640
17	7,55	210	300	162	470
9	7,58	210	470	135	470
6	7,80	230	250	135	250
15	7,93	230	300	108	470
7	7,95	230	250	135	300
4	8,01	230	300	135	300
10	8,03	230	470	108	470
5	8,48	230	300	162	300
16	8,48	230	300	135	470

5.3 Analyse der Faserorientierung

5.3.1 Mikroskopie

In Abbildung 21 ist zu sehen, wie die Fasern in der Fügeebene liegen (angedeutet mit den gestrichelten roten Linien), bei einer Schweißung mit den Standardparametern für PP. Die Fasern wurden durch den Schmelzfluss bis in den Wulst gedrückt und laufen nach außen hin spitz zu.

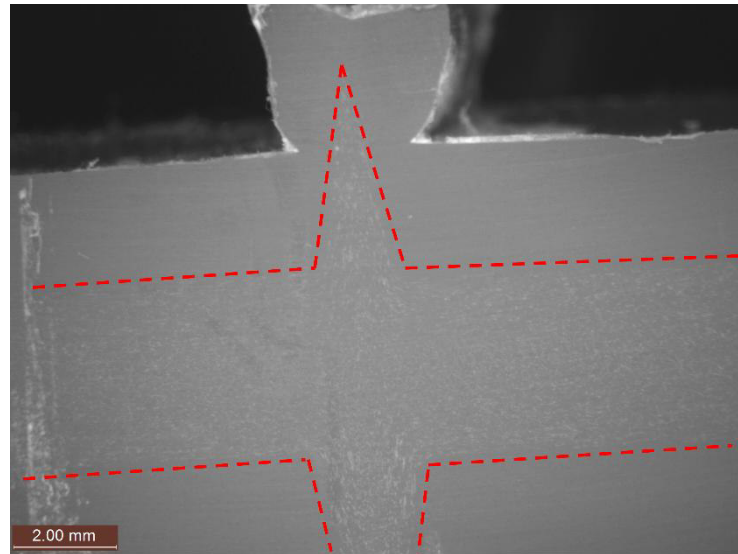


Abbildung 21: Mikroskopieaufnahme der Fügeebene von Versuchsnummer 1.

Eine Anpassung der Parameter hatte zur Folge, dass sich die Faserverteilung in der Fügeebene änderte. In Abbildung 22 ist auf der linken Seite eine Schweißnaht zu sehen, bei der die Fasern von der Mitte aus relativ gleichmäßig nach außen verlaufen. Hier wurde mit verringertem Druck und erhöhter Heizelementtemperatur und Anwärmzeit geschweißt. Auf der rechten Seite verlaufen die Fasern mittig eher schmal und konzentrieren sich dafür stärker in der Schweißwulst. Hier wurde Temperatur, Zeit und Fügedruck erhöht.

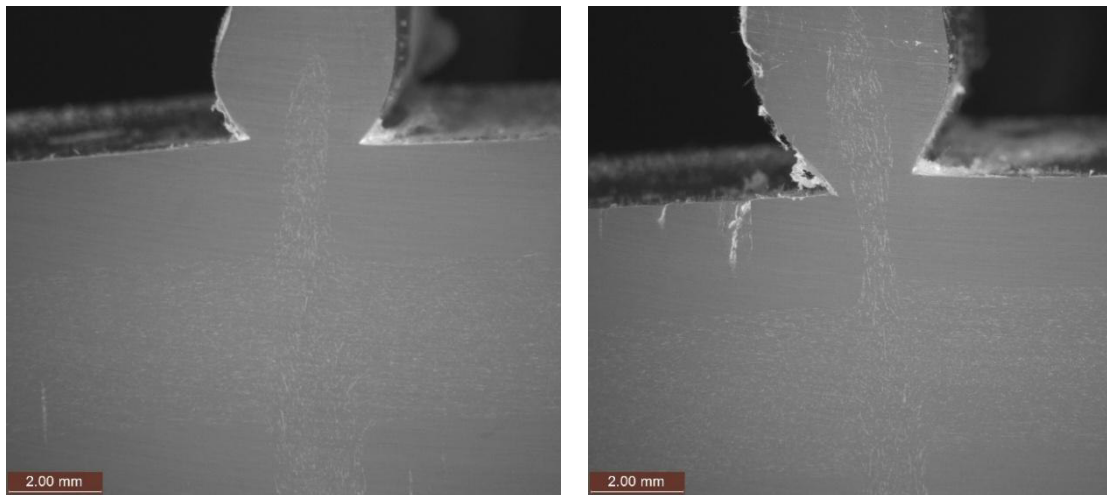


Abbildung 22: Mikroskopieaufnahmen der Fügeebenen von Versuchsnummer 6 (links) und Versuchsnummer 16 (rechts).

5.3.2 Computertomografie

Die unterschiedlichen Formen, wie die Fasern nach der Schweißung in der Fügeebene liegen können, wird bei der Betrachtung in der iCT nochmal deutlich (vgl. Abbildung 23).

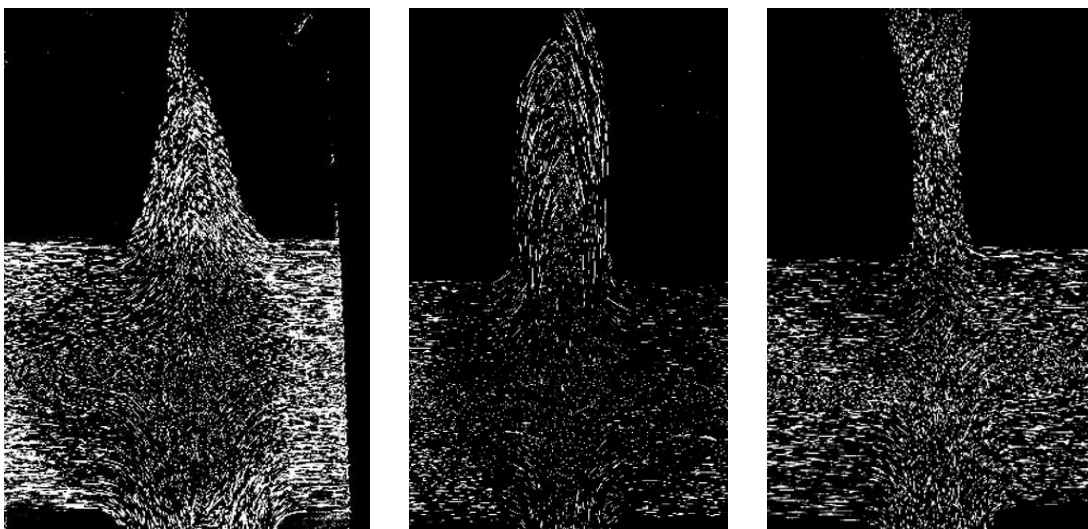


Abbildung 23: Aufnahmen aus der iCT für verschiedene Arten der Faserverteilung in der Fügeebene.

5.4 Mechanische Analyse

5.4.1 Kurzzeitversuche

5.4.1.1 Zugversuch

Zunächst wurden Probekörper aus einem ungeschweißten Rohr entnommen, um später mit den Ergebnissen der HS-Verbindungen den Kurzzeitzug-Schweißfaktor zu ermitteln. Die Proben aus dem GF-Rohr erreichten im Mittel eine Zugfestigkeit von 34,56 MPa. Dies stimmt auch mit dem von der Fa. aquatherm angegebenen Wert von 35 MPa für das GF-PP überein [9]. Die Zugfestigkeit der Schweißverbindungen sind in Abbildung 24 dargestellt. Da die Werte nah beieinander liegen (zwischen 24,45 und 27,34 MPa), ist auf der y-Achse für eine bessere Differenzierung nur der Bereich von 20 bis 30 MPa dargestellt.

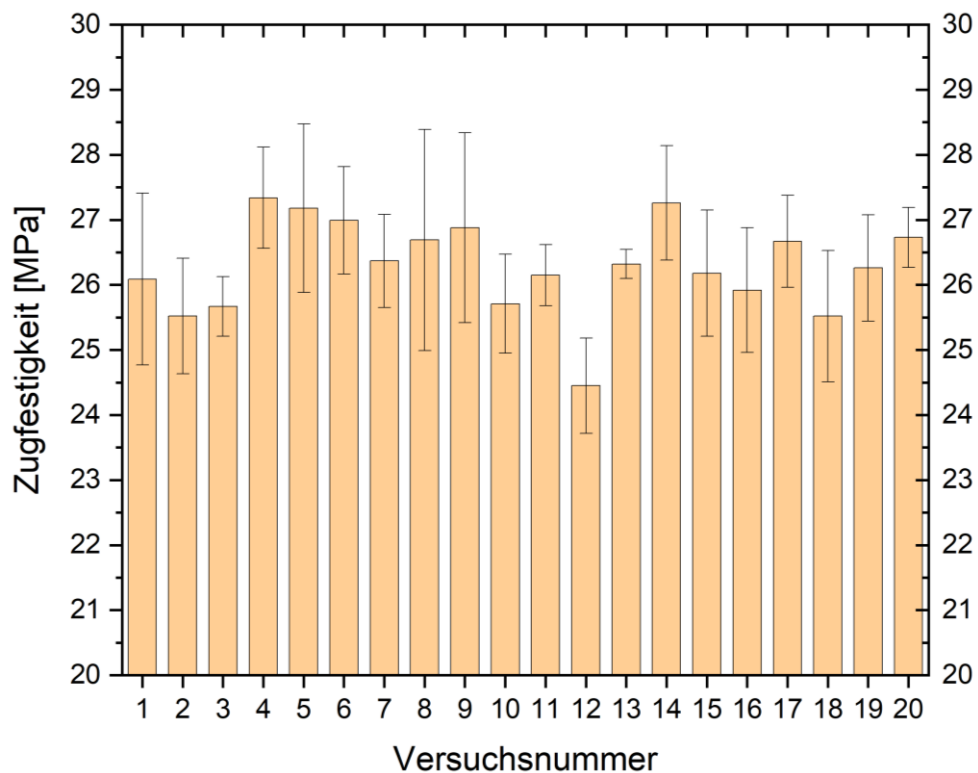


Abbildung 24: Zugfestigkeiten der geschweißten GF-Rohre D110.

HS-Verbindungen aus unverstärkten PP-R-Rohren sollen gemäß der DVS-Richtlinie 2203-1 Beiblatt 1 [44] einen Kurzzeitzug-Schweißfaktor von mindestens 0,9 erreichen. Die hier verschweißten GF-Rohre erreichen Kurzzeitzug-Schweißfaktoren bis 0,79. Der Schweißfaktor für die HS-Verbindung mit den Standardparametern (Versuchsnummer 1)

für unverstärktes PP lag bei 0,75, d. h. die Kurzzeitzugfestigkeit konnte durch die Anpassung der Prozessparameter nur um ca. 5 % erhöht werden.

5.4.1.2 Technologischer Biegeversuch

Gemäß den Anforderungen der DVS-Richtlinie 2203-1 Beiblatt 3 [41] gilt für Rohre aus PP-R mit einer Wanddicke von 10 mm ein Mindestbiegewinkel von 120°. Hier ist deutlich zu sehen, dass die Glasfasern die Biegeeigenschaften negativ beeinflussen, da die HS-Verbindungen der GF-Rohre im Mittel nur einen Biegewinkel von maximal 60° erreichen. Die Ergebnisse des technologischen Biegeversuchs sind in Abbildung 25 dargestellt.

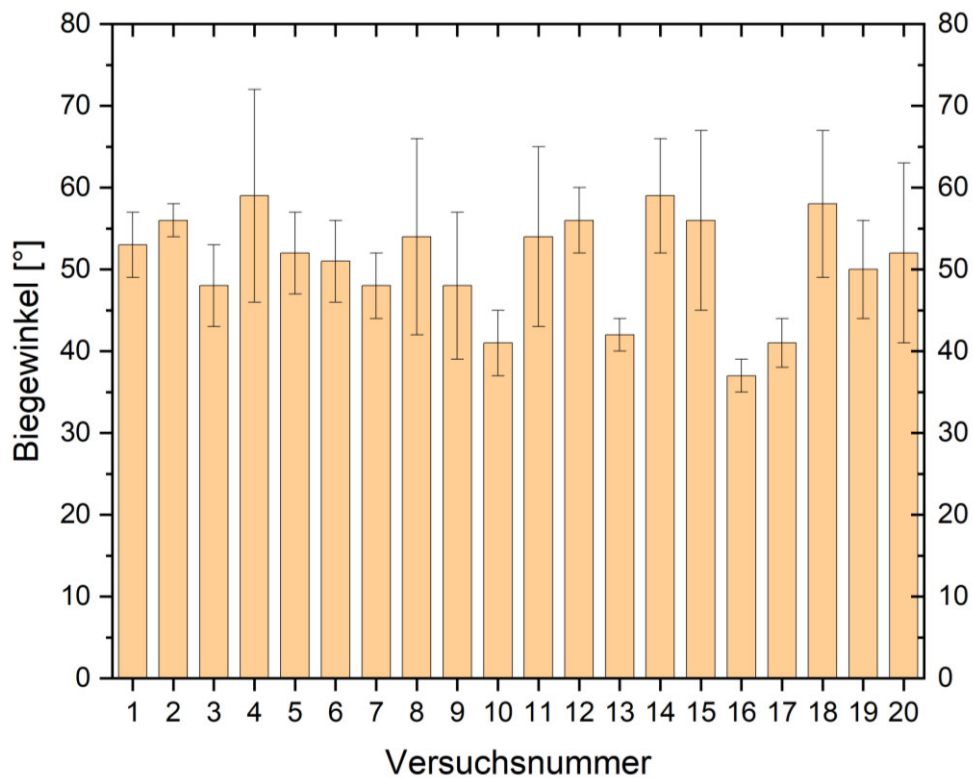


Abbildung 25: Biegewinkel der geschweißten GF-Rohre D110.

5.4.2 Innendruck-Versuche

5.4.2.1 Berstdruckprüfung

Die Druckverläufe der Berstdruckprüfung sind in den Abbildungen 26 und 27 dargestellt. Bis ca. 50 bar steigt der Druck konstant mit der eingestellten Rate von 1 bar pro 10 Sekunden. Kurz vor dem Versagen blähten sich die Rohre auf, wodurch die Schwankungen in den Graphen vor dem Absinken der Kurven zu erklären sind. Sowohl das

ungeschweißte Rohr als auch die HS-Verbindung (mit den Parameter von Versuchsnummer 10) erreichten bis zum Bersten einen maximalen Innendruck von ca. 50 bar. Zudem zeigt auch Abbildung 28, dass die HS-Verbindung nicht in der Schweißnaht versagte, sondern im Grundmaterial. Dies deutet an, dass die Fügeverbindung keinen limitierenden Faktor bei der Berstdruckprüfung darstellte.

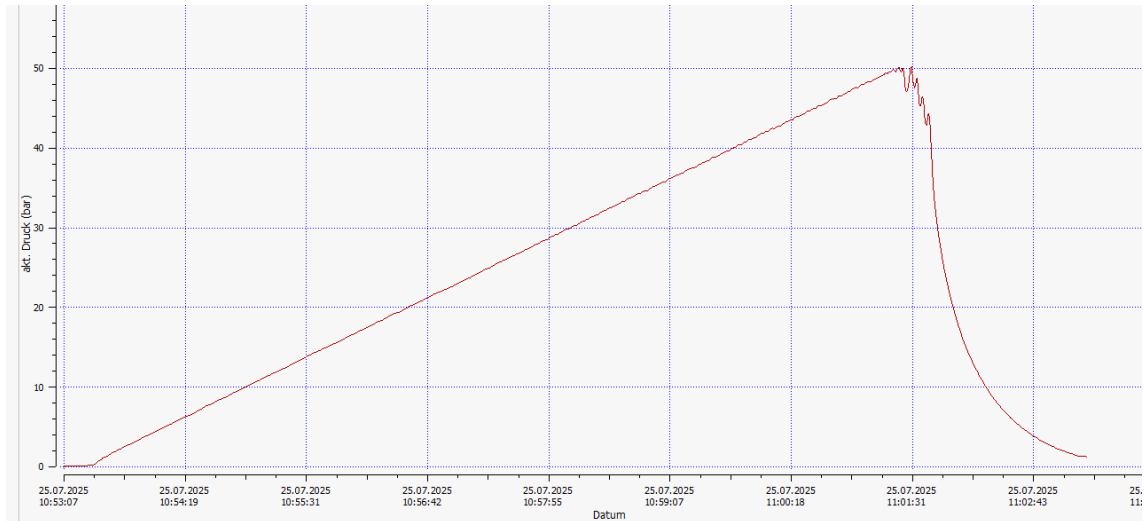


Abbildung 26: Innendruckverlauf bei der Berstdruckprüfung des ungeschweißten Rohrs D110.

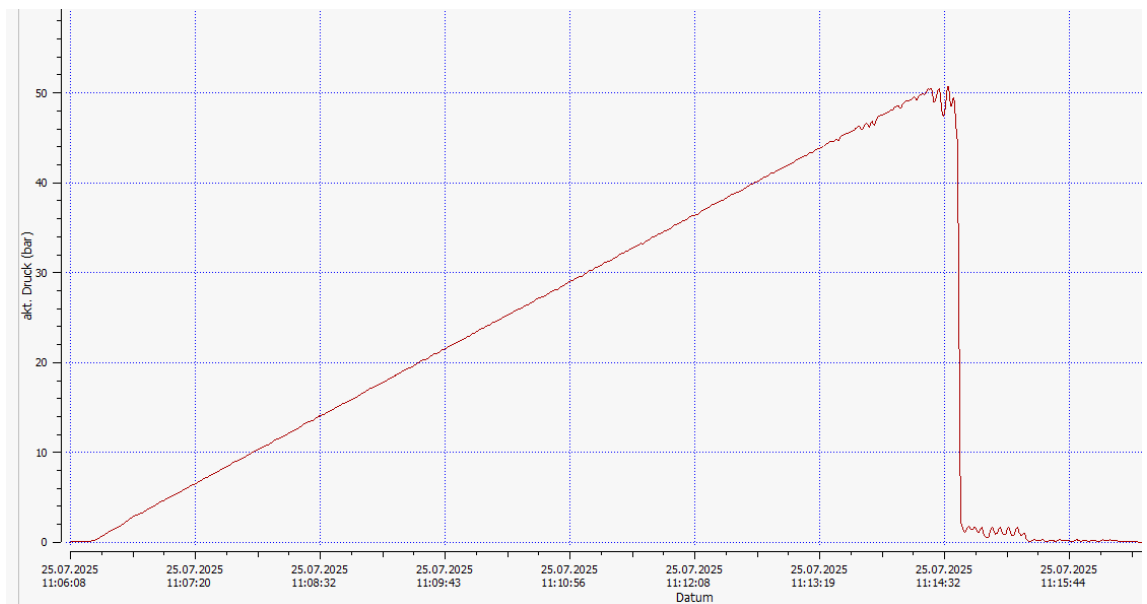


Abbildung 27: Innendruckverlauf bei der Berstdruckprüfung des geschweißten Rohrs D110.



Abbildung 28: Versagen im Grundmaterial bei der Berstdruckprüfung des geschweißten Rohrs.

5.4.2.2 Zeitstandinnendruck-Versuch

Beim Zeitstandinnendruck-Versuch wurde ein ungeschweißtes Rohr (Versuchsnummer 0) und sechs HS-Verbindungen geprüft. Hierfür wurden Parameterkombinationen ausgewählt, mit denen gute Ergebnisse bei der Kurzzeitmechanik erzielt wurden. Versuchsnummer 21 ist zudem eine weitere Parameterkombination (Temperatur: 230 °C, Anlegkraft: 250 N, Anwärmzeit: 162 s, Fügekraft: 250 N), welche nur im Zeitstandinnendruck-Versuch geprüft wurde. Die erreichten Standzeiten sind in Tabelle 10 dargestellt.

Tabelle 10: Ergebnisse des Zeitstandinnendruck-Versuch für die Rohre D110.

Versuchsnummer	Temperatur [°]	Druck [bar]	Zeit [h]	Bemerkung
0	95	8,5	418,1	Bruch am Rohr
1	95	8,5	218,8	Bruch am Rohr
4	95	8,5	271,2	Bruch am Rohr
5	95	8,5	426,4	Bruch am Rohr
6	95	8,5	330,5	Bruch am Rohr
14	95	8,5	349,1	Bruch am Rohr
21	95	8,5	408,6	Bruch am Rohr

Alle Prüfkörper erreichten die geforderte Standzeit von mindestens 165 h. Die HS-Verbindungen erreichten dabei teils ähnliche Zeiten wie das ungeschweißte Rohr. Dieses Ergebnis spiegelt auch die Tatsache wider, dass alle Prüfkörper ein Versagen am Rohr

aufwiesen und kein Bruch in den Schweißnähten aufgetreten ist (vgl. Abbildung 29). Ähnlich wie bei der Berstdruckprüfung hatten die Schweißnähte keinen negativen Einfluss auf den Widerstand gegen Innendruck.

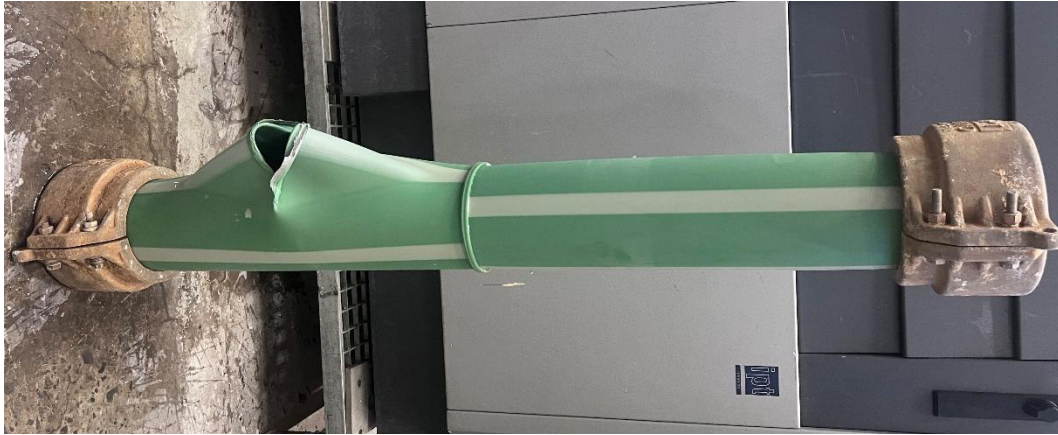


Abbildung 29: Bruchbild eines verschweißten Rohrs D110 nach der Prüfung im Zeitstandinnen-druck-Versuch.

5.5 Übertragung der Ergebnisse auf zusätzliche Dimension

5.5.1 Hezelement-Stumpfschweißungen

Des Weiteren wurden Parametersätze mit vielversprechenden Ergebnissen bei den mechanischen Prüfungen auch auf Rohre mit der Dimension D200 SDR11 (Wanddicke ca. 18,2 mm) angewendet. Dafür wurden die Parameter entsprechend der größeren Schweißfläche angepasst (vgl. Tabelle 11). Die dazugehörigen Ergebnisse der Wulstvermessung sind in Abbildung 29 dargestellt. Die Wülste sind hier generell stärker ausgeprägt als bei den D110er Rohren (vgl. Abbildung 30).

Tabelle 11: Parametersätze für die Rohre D200.

Versuchsnummer	Hezelement-temperatur [°C]	Angleichkraft [N]	Anwärmzeit [N]	Fügekraft [N]
22	230	990	224	990
23	230	990	251	990
24	230	830	224	830
25	210	990	197	1550
26	230	830	251	830

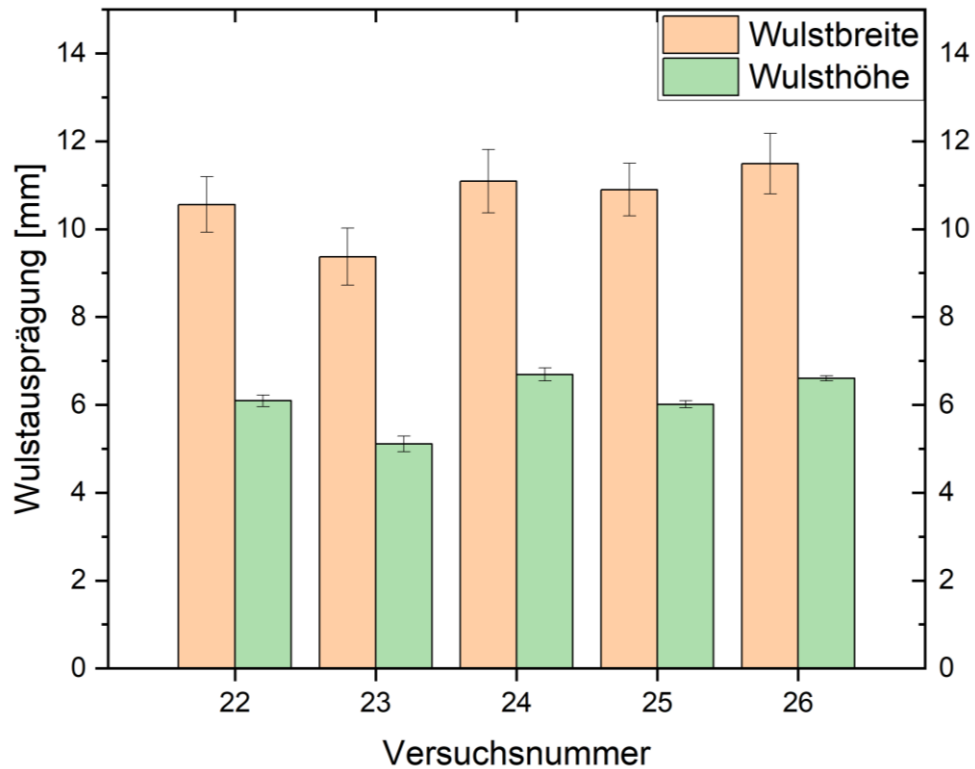


Abbildung 30: Ergebnisse der Wulstvermessung hinsichtlich Breite und Höhe für die Rohre D200.

5.5.2 Kurzzeitversuche

Die Zugfestigkeit der ungeschweißten Referenzproben lag im Mittel bei 30,88 MPa. Die verschweißten Rohre erreichten Zugfestigkeiten zwischen 24 und 26 MPa (vgl. Abbildung 31). Daraus ergeben sich Schweißfaktoren von ca. 0,8, was die Ergebnisse mit den Rohren D110 bestätigt.

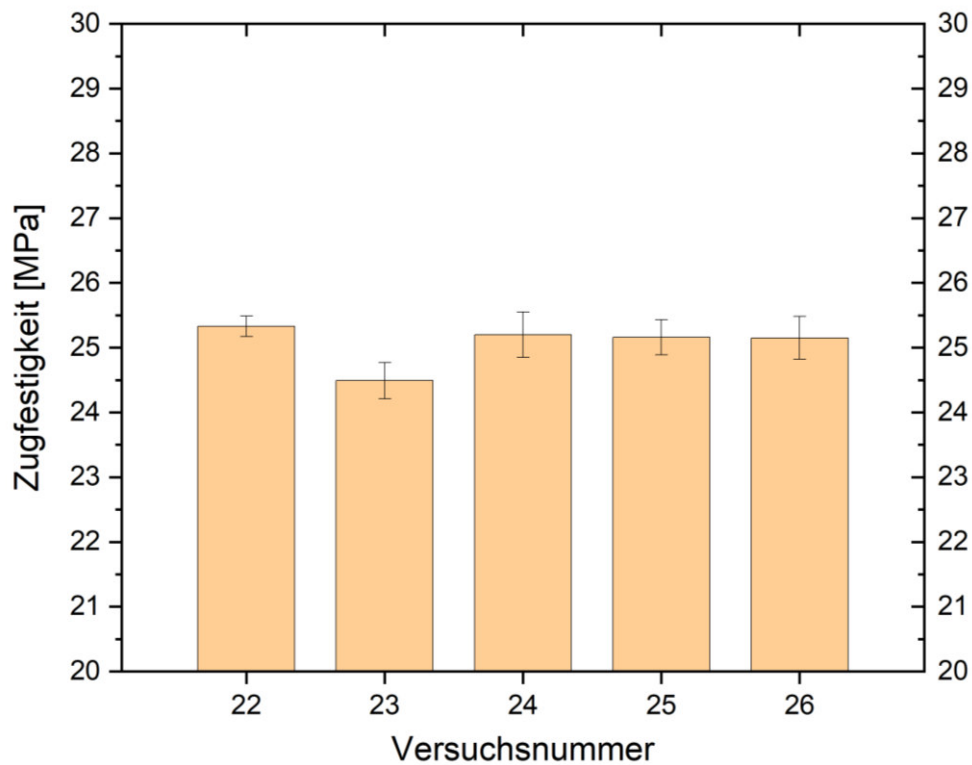


Abbildung 31: Zugfestigkeiten der geschweißten GF-Rohre D200.

Beim technologischen Biegeversuch müssen Probekörper aus PP-R mit einer Dicke von 18,2 mm gemäß der DVS-Richtlinie 2203-1 Beiblatt 3 [41] einen Mindestbiegewinkel von ca. 68° erreichen. Auch hier liegen die Schweißungen wieder deutlich unter den Anforderungen des DVS (vgl. Abbildung 32). Allerdings wurden bei dieser Versuchsreihe als Vergleich auch ungeschweißte Probekörper der GF-Rohre im technologischen Biegeversuch untersucht. Im Durchschnitt erreichen diese bis zu einem sichtbaren Anriss Biegewinkel von ca. 50° und bleiben somit auch unter den eigentlichen Anforderungen für unverstärktes PP-R. Allerdings konnten die Proben des Grundmaterial bis 160° gebogen werden, ohne dass es zu einem vollständigen Bruch kam. Die geschweißten Probekörper sind spätestens bei 70° vollständig durchgebrochen. Trotzdem zeigen die Ergebnisse, dass in den DVS-Richtlinien bei den Anforderungen an HS-Verbindungen eine Ergänzung hinsichtlich glasfaserverstärkter Materialien in Betracht gezogen werden muss.

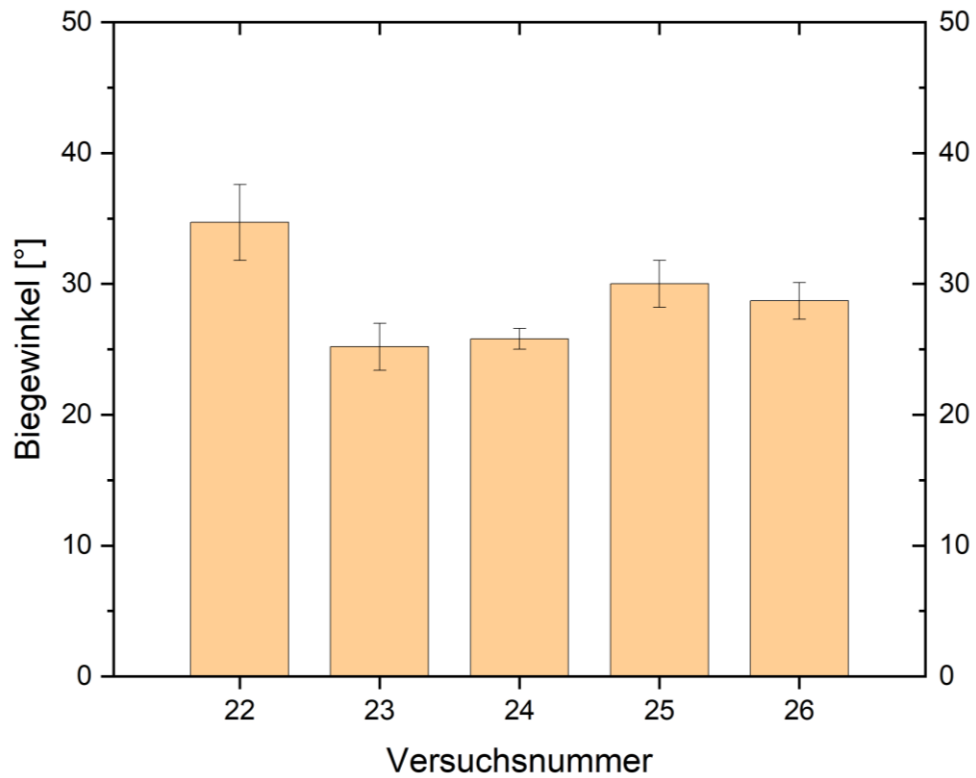


Abbildung 32: Biegewinkel der geschweißten GF-Rohre D200.

5.5.3 Innendruckversuche

Beim Berstdruckversuch erreichten wieder sowohl das unverschweißte als auch das geschweißte Rohr einen ähnlichen maximalen Innendruck (ca. 54 bar), wodurch die Ergebnisse der ersten Versuchsreihe bestätigt werden (vgl. Abbildung 33 und 34).

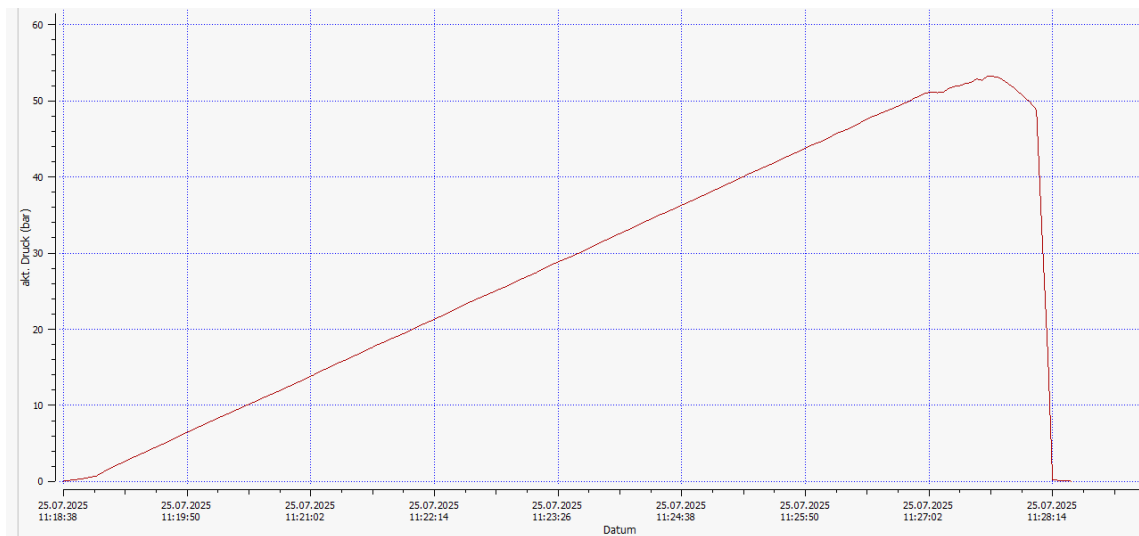


Abbildung 33: Innendruckverlauf bei der Berstdruckprüfung des ungeschweißten Rohrs D200.

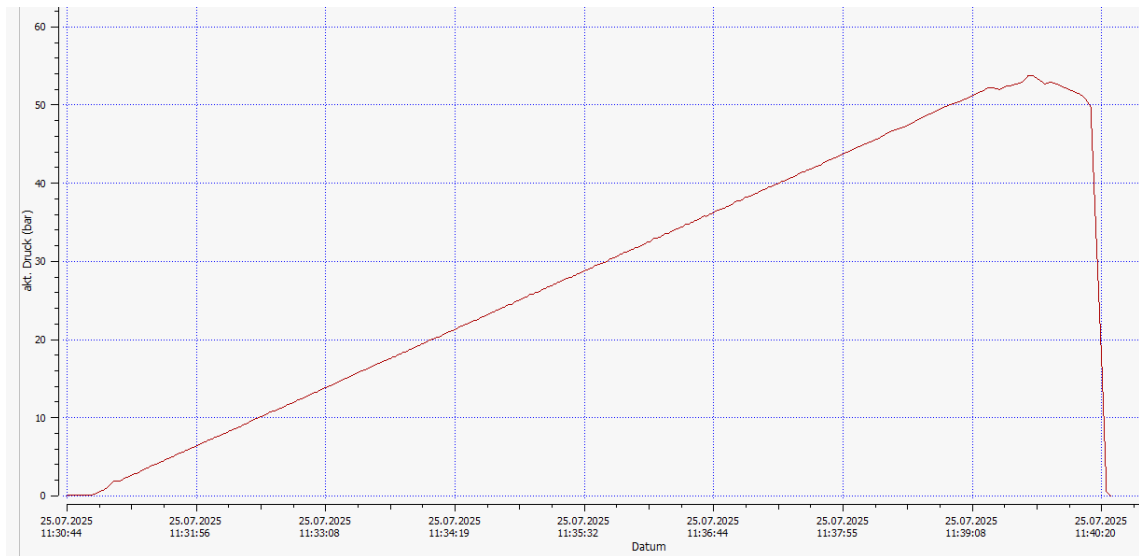


Abbildung 34: Innendruckverlauf bei der Berstdruckprüfung des ungeschweißten Rohrs D200.

Beim Zeitstandinnendruck-Versuch für die Rohre D200 wurde auch mit einem Druck von 8,5 bar gestartet. Dabei wurden jedoch Standzeiten weit über 165 h erreicht. Da die Prüfung mit dem ungeschweißten Rohr (Versuchsnummer 0) früher gestartet wurde, wurde hier der Druck testweise zunächst auf 10,0 bar erhöht. Nach weiteren 24 h ohne Versagen wurde der Druck ein weiteres Mal auf 11,5 bar erhöht. Bei diesen Bedingungen kam es dann nach kurzer Zeit zu einem Bruch (vgl. Tabelle 12).

Tabelle 12: Ergebnisse des Zeitstandinnendruck-Versuch für die Rohre D200.

Versuchsnummer	Temperatur [°]	Druck [bar]	Zeit [h]	Bemerkung
0	95	8,5 10,0 11,5	1359,6	Druck bei 1334,5 h auf 10 bar erhöht, Druck bei 1359,5 h auf 11,5 bar erhöht, danach Bruch am Rohr
22	95	8,5 11,5	1014,5	Druck bei 1010,5 h auf 11,5 bar erhöht, danach Bruch am Rohr
23	95	8,5 11,5	1014,4	Druck bei 1010,5 h auf 11,5 bar erhöht, danach Bruch am Rohr
24	95	8,5 11,5	1002,0	Druck bei 1000,1 h auf 11,5 bar erhöht, danach Bruch am Rohr

25	95	8,5 11,5	1014,2	Druck bei 1010,5 h auf 11,5 bar erhöht, danach Bruch am Rohr
26	95	8,5 11,5	1013,5	Druck bei 1010,5 h auf 11,5 bar erhöht, danach Bruch am Rohr

Dementsprechend wurde dann bei den HS-Verbindungen der Druck, nach einer erreichten Standzeit von > 1000 h der Druck direkt auf 11,5 bar erhöht. Alle Schweißungen versagten im Anschluss im Bereich von zwei bis vier Stunden. Analog zu den Ergebnissen der Rohre D110, kam es bei der größeren Dimension bei keinem Prüfkörper zu einem Bruch in der Schweißnaht, sondern immer nur am Rohr selbst.

5.6 Korrelationsanalysen

5.6.1 Einfluss der Prozessparameter auf die HS-Nahtqualität

Im Rahmen dieser Untersuchungen wurden bei den Schweißungen die Heizelementtemperatur, die Anwärmzeit, sowie die Angleich- und Fügekraft variiert. Zur Bewertung der Schweißnahtqualität wurden die mechanischen Eigenschaften ermittelt. Die Ergebnisse lassen jedoch auf keine klaren Trends schließen. Dies liegt u. a. daran, dass die Ergebnisbereiche sehr nah beieinander liegen. Hierzu ein Blick auf die Kurzzeitzug-Schweißfaktoren der Versuche mit Rohren D110: Mit den Standardparametern für unverstärktes PP gemäß der DVS-Richtlinie 2207-11 [40] konnte ein Schweißfaktor von 0,75 erzielt werden. Durch die Parameteränderungen variierte der Schweißfaktor nur zwischen minimal 0,71 und maximal 0,79, was einer Verringerung bzw. Erhöhung von < 6 % entspricht. Beim technologischen Biegeversuch sieht es ähnlich aus, v. a. was die Verbesserung der Biegeeigenschaften betrifft. Hier konnte der Biegewinkel durch Anpassung der Parameter nur von 53° mit den Standardparametern auf maximal 59° erhöht werden. Zudem kommen beim technologischen Biegeversuch hohe Standardabweichungen hinzu, was die Aussagekraft der Ergebnisse abschwächt. Letztendlich stachen zwei Parametersätze heraus, bei denen ein Kurzzeitzug-Schweißfaktor von 0,79 und ein Biegewinkel von 59° erreicht wurden (vgl. Tabelle 13). Die Pfeile zeigen an, ob der Parameter im Vergleich zum Standardparameter verringert (↓) bzw. erhöht (↑) wurde oder gleichgeblieben (–) ist. Auch hieraus lässt sich schließen, dass keine Trends hinsichtlich Prozessparameter und Schweißnahtqualität zu erkennen waren. Lediglich die Verringerung einzelner Parameter führte zu schlechteren mechanischen Eigenschaften.

Tabelle 13: Parametersätze mit den besten Ergebnissen bei der Kurzzeitmechanik.

Nummer	Heizelementtemperatur [°C]	Angleichkraft [N]	Anwärmzeit [N]	Fügekraft [N]
4	230 (↑)	300 (-)	135 (↑)	300 (-)
14	210 (-)	300 (-)	108 (-)	470 (↑)

5.6.2 Zusammenhang zwischen Wulstausprägung und HS-Nahtqualität

Zusätzlich wurde geprüft, ob ein erkennbarer Zusammenhang zwischen der Wulstausprägung und den mechanischen Eigenschaften besteht. Hierfür wurden in den Abbildung 35 und 36 die Wulstbreite bzw. die Wulsthöhe mit der Zugfestigkeit verglichen. Es ist ein leichter Trend zu erkennen, dass bei einer stärkeren Wulstausprägung höhere Zugfestigkeiten erzielt werden.

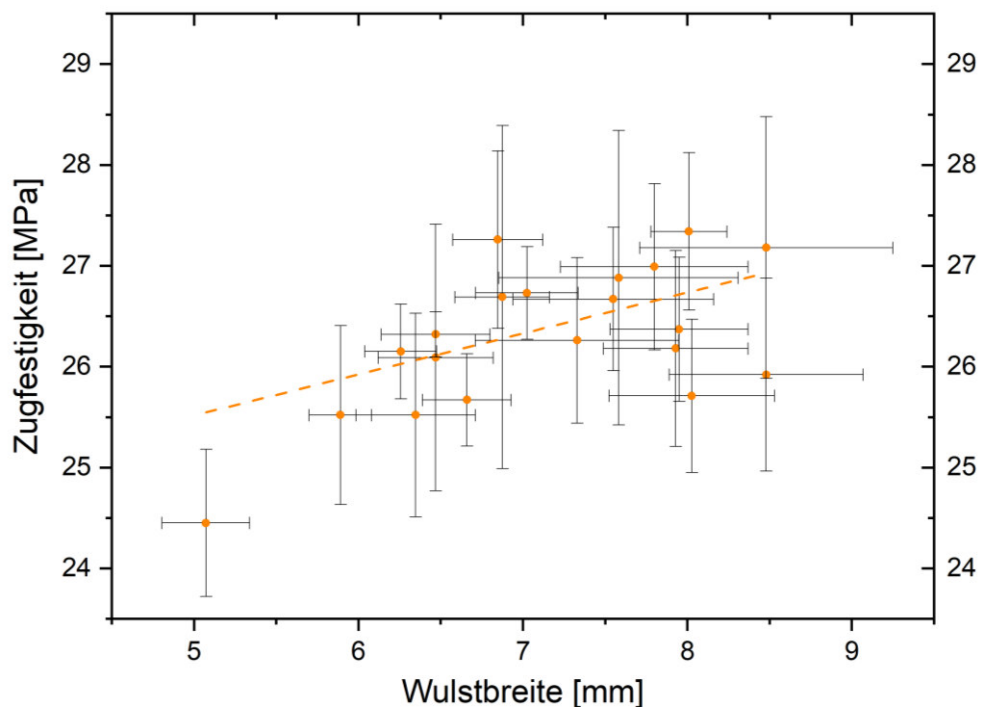


Abbildung 35: Zusammenhang zwischen Wulstbreite und Zugfestigkeit.

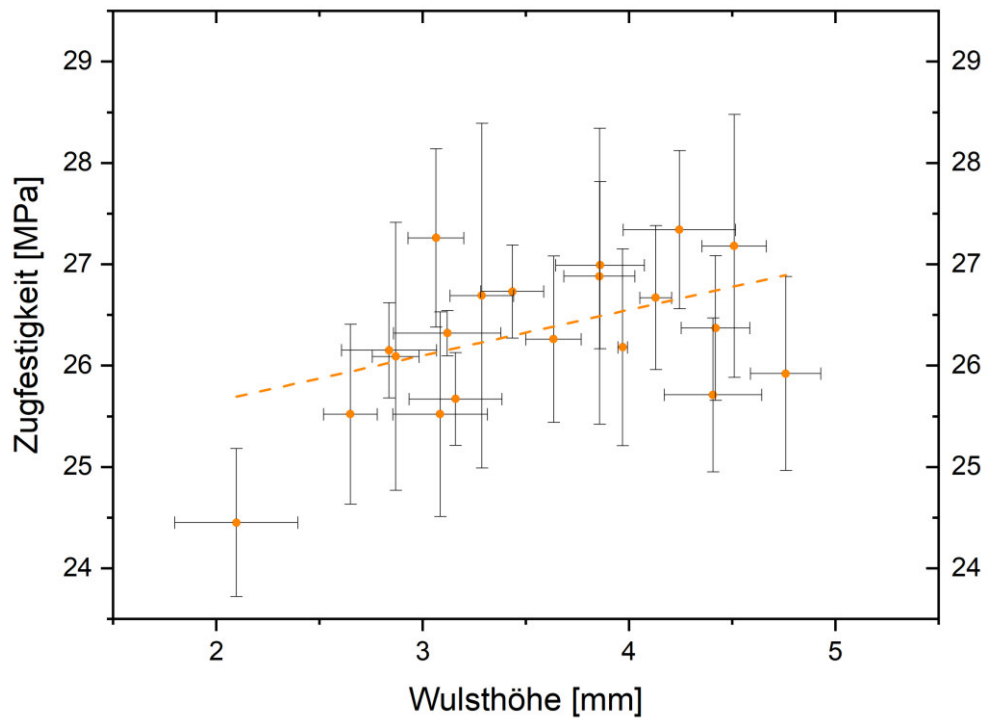


Abbildung 36: Zusammenhang zwischen Wulsthöhe und Zugfestigkeit.

5.6.3 Einfluss der Faserorientierung auf die HS-Nahtqualität

Eine wesentliche Beobachtung ist die Auswirkung der Umorientierung bzw. Verlagerung der Glasfasern auf die Schweißnahtqualität. In Abbildung 37 ist entsprechend der Ergebnisse aus der Mikroskopie und der iCT nochmal dargestellt, in welcher „Form“ sich die Glasfasern in der Fügeebene verteilen. Dabei wird unterschieden, ob der Bereich der Fasern nach außen hin spitz zu läuft, gleichmäßig bleibt oder im Wulstbereich nochmal breiter wird.

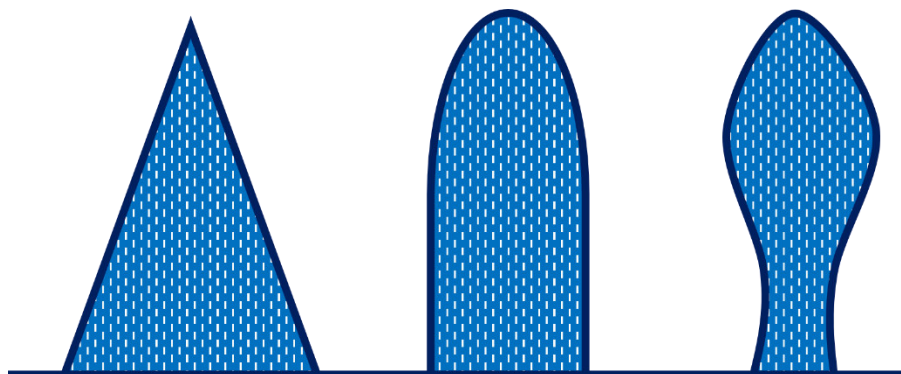


Abbildung 37: Schematische Darstellung zur Verteilung der Glasfasern in der Fügeebene: „spitz“ (links), „gleichmäßig“ (mittig) und „breit“ (rechts).

Die „spitze“ Form der Glasfaserverteilung trat vor allem in Verbindung mit einer geringen Wulstausprägung auf. Bei der mechanischen Analyse weisen diese Schweißungen geringere Zugfestigkeiten und leicht verbesserte Biegeeigenschaften auf im Vergleich zu anderen Verbindungen. Bei der „breiten“ Form dagegen sind die erreichten Zugfestigkeiten höher, die maximalen Biegewinkel jedoch geringer. Bei der „gleichmäßigen“ Verteilung werden sowohl in der Zugprüfung als auch beim technologischen Biegeversuch die besten Ergebnisse erzielt. Hierfür sind in Abbildung 38 nochmal die Aufnahmen der iCT für die in Kapitel 5.6.1 beschriebenen Parametersätze 4 und 14 dargestellt.

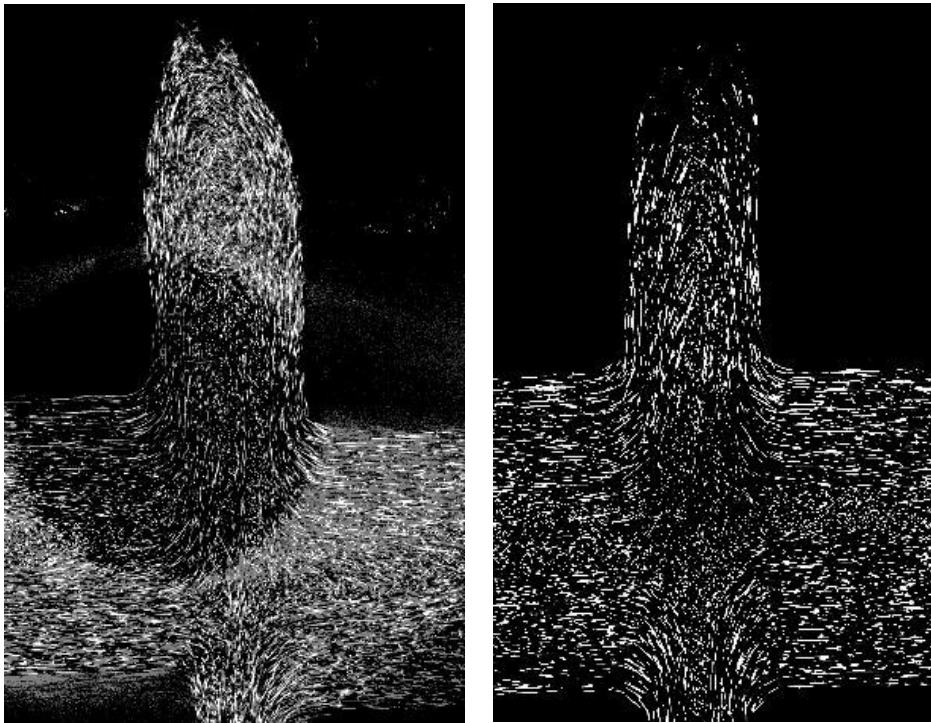


Abbildung 38: Aufnahmen aus der iCT für Versuchsnummer 4 (links) und Versuchsnummer 14 (rechts).

6 Zusammenfassung

Das vorliegende Forschungsvorhaben hat gezeigt, dass das Heizelement-Stumpfschweißen grundsätzlich als Fügeverfahren für die hier verwendeten glasfaserverstärkten Mehrschichtrohre geeignet ist. Die umfassende Analyse der Prozessparameter, der Faserverteilung sowie der mechanischen Eigenschaften hat ein differenziertes Bild über die Herausforderungen und Potenziale dieses Verfahrens geliefert.

Ein zentrales Ergebnis ist, dass die Schweißnahtqualität bei GFK-Rohren von der Faserorientierung im Nahtbereich beeinflusst wird. Die Umorientierung der Fasern während des Schweißprozesses kann zu einer signifikanten Reduktion der Nahtfestigkeit führen, insbesondere im Vergleich zu unverstärkten Thermoplasten. Dennoch konnten durch gezielte Anpassung der Prozessparameter – insbesondere der Heizelementtemperatur, der Anwärmzeit und der Fügekraft – Schweißfaktoren bis zu 0,82 erreicht werden. Auch wenn dieser Wert unter dem Richtwert für unverstärktes PP liegt ($\geq 0,9$), stellt er für faserverstärkte Materialien ein gutes Ergebnis dar.

Die Innendruckprüfungen, also die Berstdruck- und Zeitstandinnendruckversuche, zeigten, dass die Schweißnähte nicht den limitierenden Faktor für die Belastbarkeit der Rohrsysteme gegenüber Innendruck darstellen. In allen Fällen erfolgte das Versagen im Grundmaterial, nicht in der Schweißnaht. Dies unterstreicht die prinzipielle Eignung des HS-Verfahrens für sicherheitsrelevante Anwendungen, auch bei erhöhten Temperaturen und Druckbelastungen.

Ein weiterer wichtiger Aspekt betrifft die Untersuchungen zur Faserorientierung. Sowohl die Mikroskopie als auch die industrielle Computertomografie erwiesen sich als geeignet, um die Faserverteilung im Nahtbereich zu analysieren. Die Ergebnisse zeigen, dass eine „gleichmäßige“ Faserverteilung mit einer verbesserten Kombination aus Zugfestigkeit und Biegeeigenschaften einhergeht.

Die Ergebnisse des Projekts legen nahe, dass die bestehenden DVS-Richtlinien für das Heizelement-Stumpfschweißen um spezifische Anforderungen für faserverstärkte Materialien ergänzt werden sollten. Insbesondere die Bewertungskriterien für mechanische Prüfungen wie den technologischen Biegeversuch müssen angepasst werden, da die Steifigkeit der Glasfasern zu systematisch niedrigeren Biegewinkeln führt, die mit den aktuellen Anforderungen nicht vereinbar sind.

Für die industrielle Anwendung ergeben sich aus dem Projekt mehrere konkrete Handlungsempfehlungen:

- Optimierung der Prozessparameter. Die gezielte Anpassung der Schweißparameter kann die Nahtqualität verbessern. Dabei spielt die richtige Kombination aus Temperatur, Druck und Zeit eine entscheidende Rolle.
- Normierung und Richtlinienentwicklung: Die Erweiterung bestehender Regelwerke um spezifische Anforderungen für GFK-Rohre ist essenziell, um die industrielle Anwendung des HS-Verfahrens zu erleichtern.

Insgesamt liefert das Projekt einen wichtigen Beitrag zur Weiterentwicklung der Füge-technologie für moderne Kunststoffrohrsysteme. Die gewonnenen Erkenntnisse ermöglichen es, glasfaserverstärkte Rohrsysteme effizienter, ressourcenschonender und sicherer zu verbinden. Damit wird ein entscheidender Schritt in Richtung nachhaltiger Infrastrukturtechnologien gemacht – insbesondere für Anwendungen in der Energie-, Wasser- und Gebäudetechnik.

7 Literaturverzeichnis

- [1] Kunststoffrohrverband e.V. Bonn, Kunststoffrohr Handbuch: Rohrleitungssysteme für die Ver- und Entsorgung sowie weitere Anwendungsgebiete, Essen: Vulkan-Verlag, 1997.
- [2] Kunststoffrohrverband e. V., „Nachrichten - Branchentrends und Wirtschaftsnews vom Fachverband der Kunststoffrohr-Industrie,“ Mai 2024. [Online]. Available: https://krv.de/wp-content/uploads/2025/02/00_krv_n_2024_gesamt_web3.pdf. [Zugriff am 29 Juli 2025].
- [3] Kunststoffrohrverband e. V., „Wie innovative Kunststoffrohr-Systeme zum Gelingen der Infrastruktur- und Ressourcenwende beitragen,“ September 2024. [Online]. Available: <https://krv.de/wp-content/uploads/2024/01/krv-impulse-2024.pdf>. [Zugriff am 15 Juli 2025].
- [4] Ceresana, „Marktstudie Kunststoffrohre - Welt,“ April 2025. [Online]. Available: <https://ceresana.com/produkt/marktstudie-kunststoffrohre-welt>. [Zugriff am 15 Juli 2025].
- [5] *DIN 8078:2008-09: Rohre aus Polypropylen (PP) - PP-H, PP-B, PP-R, PP-RCT - Allgemeine Güteanforderungen, Prüfung*, Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2008.
- [6] E. Baur, D. Drummer, T. A. Osswald und N. Rudolph, Saechtling: Kunststoff-Handbuch, München: Hanser, 2022.
- [7] Bänninger Kunststoff-Produkte GmbH, „Technisches Handbuch,“ [Online]. Available: https://www.baenninger.de/fileadmin/pdf/drucksachen/BR_Technisches_Handbuch_-_Technical_Manual_de-en_1807.pdf. [Zugriff am 29 Juli 2025].
- [8] KraussMaffei Berstorff GmbH, „KraussMaffei Berstorff: Mehrlagige Rohre mit Funktionsschichten verdrängen Standardrohre,“ 12 August 2010. [Online]. Available: https://plasticker.de/Kunststoff_News_11694_KraussMaffei_Berstorff_Mehrlagi

- ge_Rohre_mit_Funktionsschichten_verdrngen_Standardrohre?begriff=Berstorff &firmid=4381&submit=true. [Zugriff am 2025 Juli 29].
- [9] aquatherm GmbH, „aquatherm blue,“ April 2025. [Online]. Available: https://www.aquatherm.de/fileadmin/user_upload/Germany/Downloads/Kataloge/aquatherm_blue_Katalog_2025.pdf. [Zugriff am 29 Juli 2025].
- [10] M. Hoffmann, B. Baudrit, O. Stübs, P. Heidemeyer und M. Bastian, „Ökonomische und ökologische Bewertungen beim Schweißen von Kunststoffrohren,“ *Joining Plastics*, Nr. 3, pp. 194-200, 2012.
- [11] K. K. Chawla, *Composite Materials*, New York: Springer, 2013.
- [12] E. Witten und V. Mathes, „Der Markt für Glasfaserverstärkte Kunststoffe (GFK) 2020,“ 2020.
- [13] M. Milek und S. Fuhrmann, „Ein Überblick zum Recycling und zur Verwertung glasfaserverstärkter Kunststoffe,“ *Chemie Ingenieur Technik*, Bd. 96, Nr. 7, pp. 902-912, 2024.
- [14] MÜPRO GmbH, „Ausgleich Längenänderungen,“ [Online]. Available: <https://www.muepro.de/Ausgleich-Laengenaenderungen/>. [Zugriff am 21 August 2025].
- [15] Ceresana, „Marktstudie Kunststoffrohre - Europa,“ 2024. [Online]. Available: <https://ceresana.com/produkt/marktstudie-kunststoffrohre-europa>. [Zugriff am 30 Juli 2025].
- [16] G. W. Ehrenstein, Hrsg., *Handbuch Kunststoff-Verbindungstechnik*, München: C. Hanser, 2004.
- [17] A. I. Alhatti, S. Deveci, I. Barsoum und A. I. Hosny, „Advancements in butt fusion jointing of HDPE pipes: A comprehensive review of fusion conditions and joint integrity assessment techniques,“ *Polymer Testing*, Nr. 150, 2025.
- [18] C. Balzer, J. Lambers, M. Heller, B. Baudrit, E. Kraus, T. Hochrein und M. Bastian, *Wärmeströme beim Heizelementschweißen von Kunststoffen: Messung, Modellierung und Qualitätssicherung*, Düren: Shaker, 2022.

- [19] H. J. Fahrenwaldt und V. Schuler, *Praxiswissen Schweißtechnik*, Dordrecht: Springer, 2012.
- [20] H. Potente, *Fügen von Kunststoffen: Grundlagen, Verfahren, Anwendung*, München: Hanser, 2004.
- [21] HÜRNER Schweisstechnik GmbH, „HÜRNER WhiteLine HWT 400 CS,“ 2025. [Online]. Available: https://www.huerner.de/fileadmin/produkte/werkstattmaschinen/hwt_400-linie/prospekte/hwt_400-cs_alug.backen_de_web.pdf. [Zugriff am 30 Juli 2025].
- [22] J. H. Anand und H. J. Kabam, „Interfacial Contact and Bonding in Autohesion I-Contact Theory,“ *The Journal of Adhesion*, Nr. 1, pp. 16-23.
- [23] J. N. Anand und R. Z. Balwinski, „Interfacial Contact and Bonding in Autohesion II-Intermolecular Forces,“ *The Journal of Adhesion*, Nr. 1, pp. 24-30, Januar 1969.
- [24] S. S. Voyutskii, *Autohesion and Adhesion of High Polymers*, New York, London, Sydney: Interscience Publishers, 1963.
- [25] H. Potente, „Zur Theorie des Heizelement-Stumpfschweißens,“ *Kunststoffe*, Nr. 2, pp. 98-102, 1977.
- [26] C. B. Bucknall, I. C. Drinkwater und G. R. Smith, „Hot Plate Welding of Plastics: Factors Affecting Weld Strength,“ *Polymer Engineering and Science*, Bd. 20, Nr. 6, pp. 432-440, April 1980.
- [27] H. Potente, J. Natrop, T. K. Pedersen und M. Uebbing, „Comparative Investigations into the Welding of Glass-Fiber-Reinforced PES,“ *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, Bd. 6, pp. 147-159, April 1993.
- [28] A. Brüßel, *Fertigungstechnische und werkstoffspezifische Aspekte zum Fügen von Thermoplasten mittels Heizelement*, Universität-Gesamthochschule Paderborn, 1999.
- [29] I. Fiebig, *Beitrag zur Erhöhung der Wirksamkeit der Faserverstärkung in der Schweißnaht faserverstärkter Thermoplaste*, Universität Paderborn, 2019.

- [30] DVS, Ausschuss für Technik, Arbeitsgruppe "Fügen von Kunststoffen", Richtlinie DVS 2203-2: Prüfen von Schweißverbindungen an Tafeln und Rohren aus thermoplastischen Kunststoffen - Zugversuch, 20 Hrsg., Düsseldorf: DVS Media GmbH, 2024, pp. 101-103.
- [31] DVS, Ausschuss für Technik, Arbeitsgruppe "Fügen von Kunststoffen", Richtlinie DVS 2203-5: Prüfen von Schweißverbindungen an Tafeln und Rohren aus thermoplastischen Kunststoffen - Technologischer Biegeversuch, 20 Hrsg., Düsseldorf: DVS Media GmbH, 2024, pp. 137-146.
- [32] *DIN EN ISO 1167-1:2006-05: Rohre, Formstücke und Bauteilkombinationen aus thermoplastischen Kunststoffen für den Transport von Flüssigkeiten - Bestimmung der Widerstandsfähigkeit gegen inneren Überdruck - Teil 1: Allgemeines Prüfverfahren*, Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2006.
- [33] DVS, Ausschuss für Technik, Arbeitsgruppe "Fügen von Kunststoffen", Richtlinie DVS 2203-4: Prüfen von Schweißverbindungen an Tafeln und Rohren aus thermoplastischen Kunststoffen - Zeitstand-Zugversuch, 20 Hrsg., Düsseldorf: DVS Media GmbH, 2024, pp. 108-117.
- [34] DVS, Ausschuss für Technik, Arbeitsgruppe "Fügen von Kunststoffen", Richtlinie DVS 2202 Beiblatt 1: Bewertung von Fügeverbindungen aus thermoplastischen Kunststoffen an Rohrleitungsteilen und Tafeln – Heizelementstumpfschweißen (HS, IR), 20 Hrsg., Düsseldorf: DVS Media GmbH, 2024, pp. 33-40.
- [35] *DIN EN 12007-2: Gasinfrastruktur – Rohrleitungen mit einem maximal zulässigen Betriebsdruck bis einschließlich 16 bar – Teil 2: Spezifische funktionale Anforderungen für Polyethylen (MOP bis einschließlich 10 bar); Deutsche Fassung EN 12007-2:2012*, Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2012.
- [36] B. Baudrit, M. Eckes und W. Weßing, „Zerstörungsfreier Integritätstest für stumpfgeschweißte Kunststoffrohre auf der Baustelle – Bead-Bend-Back-Test,“ GW 201716, 2020.
- [37] Linseis, „Spezifische Wärmekapazität mit modulierter DSC,“ [Online]. Available: <https://www.linseis.com/wissen/spezifische-waermekapazitaet-mit-modulierter-dsc/>. [Zugriff am 26 August 2025].

- [38] C. J. van Oss, M. K. Chaudhury und R. J. Good, „Interfacial Lifshitz-van der Waals and polar interactions in macroscopic systems,“ *Chemical Reviews*, Bd. 88, Nr. 6, pp. 927-941, 1988.
- [39] F. M. Fowkes, „Role of acid-base interfacial bonding in adhesion,“ *Journal of Adhesion Science and Technology*, Bd. 1, Nr. 1, pp. 7-27, 1987.
- [40] DVS, Ausschuss für Technik, Arbeitsgruppe "Fügen von Kunststoffen", Richtlinie DVS 2207-11: Schweißen von thermoplastischen Kunststoffen - Heizelementschweißen von Rohren, Rohrleitungsteilen und Tafeln aus PP, 20 Hrsg., Düsseldorf: DVS Media GmbH, 2024, pp. 662-683.
- [41] DVS, Ausschuss für Technik, Arbeitsgruppe "Fügen von Kunststoffen", Richtlinie DVS 2203-1 Beiblatt 3: Prüfen von Schweißverbindungen an Tafeln und Rohren aus thermoplastischen Kunststoffen - Anforderungen im technologischen Biegeversuch - Biegewinkel/Biegeweg, 20 Hrsg., Düsseldorf: DVS Media GmbH, 2024, pp. 77-93.
- [42] U. Gaur und B. Wunderlich, „Heat capacity and other thermodynamic properties of linear macromolecules. IV. Polypropylene,“ *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, Bd. 10, Nr. 4, pp. 1051-1064, 1981.
- [43] Fördergemeinschaft für das Süddeutsche Kunststoff-Zentrum e.V. - FSKZ, „Automatische Qualitätssicherung von Kunststoff-Schweißnähten mittels Oberflächenmesssystemen (WeldControl),“ Schlussbericht zu IGF-Vorhaben Nr. 21023, Laufzeit 01.07.2020 - 30.06.2022, 2022.
- [44] DVS, Ausschuss für Technik, Arbeitsgruppe "Fügen von Kunststoffen", Richtlinie DVS 2203-1 Beiblatt 1: Prüfen von Schweißverbindungen an Tafeln und Rohren aus thermoplastischen Kunststoffen - Anforderungen im Zugversuch - Kurzzeitzug-Schweißfaktor fz, 20 Hrsg., Düsseldorf: DVS Media GmbH, 2024, p. 75.

8 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Produktion von Kunststoffrohrsystemen aus PE, PVC-U, PP und GFK in Deutschland [2].....	1
Abbildung 2: Jahresproduktion faserverstärkter Kunststoffe in Europa [13].....	4
Abbildung 3: Prinzipskizze eines U-Dehnungsbogens [14].	5
Abbildung 4: Schematische Darstellung des HS-Prozesses mit den entsprechenden Druck- und Wegverläufen [16].....	6
Abbildung 5: Schmelzeschichtdicke L_0 nach der Erwärmungsphase [20].	7
Abbildung 6: Schematische Darstellung der Faserorientierung in einer Schweißnaht [20].	8
Abbildung 7: Streckspannung, Schweißnahtfestigkeit und Schweißfaktor von Polypropylen in Abhängigkeit des Fasergewichtsanteils [28].....	9
Abbildung 8: Schematische Darstellung des Arbeitsplans.	12
Abbildung 9: Schematische Darstellung des Rohraufbaus.	13
Abbildung 10: Messgerät DSC 204 F1 Phoenix der Fa. NETZSCH-Gerätebau GmbH.	14
Abbildung 11: Messgerät NanoFlash LFA 447 der Fa. NETZSCH-Gerätebau GmbH.	15
Abbildung 12: Werkstattmaschine HÜRNER HWT 400 CS.	16
Abbildung 13: Mikroskop Leica M165 C (links) und Beispiel einer Mikroskopieaufnahme einer Fügeebene von geschweißten GF-Rohren (rechts).....	18
Abbildung 14: Beispiel einer iCT-Aufnahme einer Fügeebene von geschweißten GF-Rohren.....	19
Abbildung 15: Zugprüfung an der Z250.....	19
Abbildung 16: Aufbau des technologischen Biegeversuchs (links) und Messgerät zum Ablesen des Biegewinkels (rechts).	20
Abbildung 17: Versuchsaufbau der Berstdruckprüfung.	22
Abbildung 18: Auswertung der DSC für das unverstärkte PP.....	23
Abbildung 19: Auswertung der DSC für das GF-PP.....	24
Abbildung 20: Ergebnisse der Wulstvermessung hinsichtlich Breite und Höhe für die Rohre D110.....	26
Abbildung 21: Mikroskopieaufnahme der Fügeebene von Nummer 1.	28

Abbildung 22: Mikroskopieaufnahmen der Fügeebenen von Versuchsnummer 6 (links) und Versuchsnummer 16 (rechts).....	29
Abbildung 23: Aufnahmen aus der iCT für verschiedene Arten der Faserverteilung in der Fügeebene.....	29
Abbildung 24: Zugfestigkeiten der geschweißten GF-Rohre D110.....	30
Abbildung 25: Biegewinkel der geschweißten GF-Rohre D110.....	31
Abbildung 26: Innendruckverlauf bei der Berstdruckprüfung des ungeschweißten Rohrs D110.....	32
Abbildung 27: Innendruckverlauf bei der Berstdruckprüfung des geschweißten Rohrs D110.....	32
Abbildung 28: Versagen im Grundmaterial bei der Berstdruckprüfung des geschweißten Rohrs.....	33
Abbildung 29: Bruchbild eines verschweißten Rohrs D110 nach der Prüfung im Zeitstandinnendruck-Versuch.....	34
Abbildung 30: Ergebnisse der Wulstvermessung hinsichtlich Breite und Höhe für die Rohre D200.....	35
Abbildung 31: Zugfestigkeiten der geschweißten GF-Rohre D200.....	36
Abbildung 32: Biegewinkel der geschweißten GF-Rohre D200.....	37
Abbildung 33: Innendruckverlauf bei der Berstdruckprüfung des ungeschweißten Rohrs D200.....	37
Abbildung 34: Innendruckverlauf bei der Berstdruckprüfung des ungeschweißten Rohrs D200.....	38
Abbildung 35: Zusammenhang zwischen Wulstbreite und Zugfestigkeit.....	40
Abbildung 36: Zusammenhang zwischen Wulsthöhe und Zugfestigkeit.....	41
Abbildung 37: Schematische Darstellung zur Verteilung der Glasfasern in der Fügeebene: „spitz“ (links), „gleichmäßig“ (mittig) und „breit“ (rechts).....	41
Abbildung 38: Aufnahmen aus der iCT für Versuchsnummer 4 (links) und Versuchsnummer 14 (rechts).....	42