

# Schlussbericht

---

zu IGF-Vorhaben Nr. 19670 BR / 1

## Thema

Qualitätsgerechtes Heizelementstumpfschweißen dickwandiger Halbzeuge aus Polyethylen

## Berichtszeitraum

01. September 2017 - 31. August 2019

## Forschungsvereinigung

Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e.V. des DVS

Aachener Straße 172

40223 Düsseldorf

## Forschungseinrichtung(en)

Technische Universität Chemnitz, Institut für Fördertechnik und Kunststoffe

Professur Kunststoffe, 09107 Chemnitz

Chemnitz, 06.02.2020

Prof. Dr.-Ing. Michael Gehde 

Fabian Friedrich, M.Sc. 

---

Ort, Datum

---

Name und Unterschrift aller Projektleiterinnen und Projektleiter der  
Forschungseinrichtung(en)

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

## Zusammenfassung

In der Praxis des Apparate- und Rohrleitungsbaus werden mittlerweile Wanddicken von 100 mm verarbeitet und mit dem Heizelementstumpfschweißen gefügt. Das Schweißverfahren gilt als sehr gut verstanden und wird seit Jahrzehnten in der Fertigung von Halbzeugen erfolgreich eingesetzt. In den relevanten Richtlinien des DVS finden sich die Ausführungsvorschriften und die Schweißparameter für Wanddicken bis 130 mm. Systematische experimentelle Untersuchungen zu den großen Wanddicken oberhalb 30 mm liegen jedoch nicht vor. Die Parametersätze für große Nennwanddicken aus Polyethylen und Polypropylen wurden extrapoliert. Schadensfälle an geschweißten Rohrleitungen zeigen jedoch, dass das Verständnis zwischen Prozessführung und Nahteigenschaften für das Schweißen großer Rohrdimensionen nicht ausreichend vorhanden ist.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde erstmals das Heizelementschweißen von Platten und Rohrsegmenten mit einer Wanddicke bis 100 mm systematisch analysiert. An Plattenprobekörpern aus Polyethylen und Polypropylen wurden Aufschmelzversuche durchgeführt. Dabei wurde untersucht, zu welchen Schmelzeschichtdicken die in der DVS-Richtlinie in Abhängigkeit der Wanddicke angegebenen Anwärmzeiten führen. Lokale Messungen der Schmelzeschichtdicke ermöglichten eine Analyse des Schmelzeschichtprofils auf der Fügefläche. Weiterhin wurden Schweißversuche sowohl mit den DVS-Parametern als auch mit Variationen durchgeführt. Eine Analyse der Schweißproben erfolgte sowohl optisch als auch mechanisch. Neben der Ermittlung kurzzeitmechanischer Eigenschaften erfolgte die Durchführung von Zeitstanduntersuchungen, um die Langzeitfestigkeit der geschweißten Halbzeuge zu analysieren.

Die durchgeführten Untersuchungen haben gezeigt, dass sich beim Anwärmen des Materials am Heizelement eine unsymmetrisch gekrümmte Schmelzeschicht bildet. Bei dickwandigem Material ist die Krümmung der Schmelzeschicht aufgrund der hohen Fügefläche und langer Anwärmzeiten besonders stark ausgeprägt und spielt daher eine bedeutende Rolle für den weiteren Schweißprozess. Während des Fügeprozesses kommt es zu einer ungleichmäßigen Fügedruckverteilung sowie zu lokal unterschiedlichen Fließbedingungen in der Schweißnaht. Außerdem wurde gezeigt, dass in der Schweißnaht lokal unterschiedliche Abkühlbedingungen vorherrschen, was dazu führt, dass die Randbereiche heizelementgeschweißter Bauteile als Letztes, unter Einwirkung von Zugeigenspannungen, erstarren. Im Zeitstand-Zugversuch hat sich ein frühzeitiges Versagen der Randbereiche gezeigt. Im Vergleich zu den aus der Mitte der Schweißnähte entnommenen Proben kommt es bei den Zugproben am unteren Rand, wo die höchste Restschmelzeschichtdicke vorliegt, bereits nach einer deutlich kürzeren Standzeit zu einem Fügeebenenbruch. Variationen der in der DVS-Richtlinie vorgegebenen Parameter zum Heizelementschweißen haben nicht zur Verbesserung der Standzeiten im Zeitstand-Zugversuch geführt. Eine Verringerung des Fügedrucks sowie eine Verkürzung der Anwärmzeiten führen

sogar zu einer deutlichen Verschlechterung der Langzeiteigenschaften. Die DVS-Parameter haben sich daher im Rahmen des Projekts grundsätzlich als für die Praxis nützliche Werte erwiesen. Dennoch liegt eine Schwächung der geschweißten, dickwandigen Bauteile im Randbereich vor. Zur endgültigen Erforschung des Versagensmechanismus sowie zur Verbesserung der Langzeiteigenschaften heizelementgeschweißter Bauteile mit hoher Wanddicke sind weitere Untersuchungen notwendig.

**Das Ziel des Vorhabens wurde erreicht.**

### **Förderhinweis**

Das IGF-Vorhaben 19670 BR mit der DVS-Nr. 11.052 der Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e. V. des DVS, Aachener Str. 172, 40223 Düsseldorf, wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

## Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung .....	12
1.1	Motivation und Forschungsziel.....	12
1.2	Stand der Forschung und Entwicklung.....	14
1.3	Ausgangssituation .....	15
2	Grundlagen .....	16
2.1	Heizelementschweißen.....	16
2.2	Materialien .....	17
2.3	Spannungsriß- und Zeitstandverhalten teilkristalliner Thermoplaste.....	20
3	Experimentelles.....	23
3.1	Versuchswerkstoffe und Probekörper .....	23
3.2	Schweißanlagen .....	24
3.3	Versuchsplanung und –durchführung .....	28
3.3.1	Überblick über die durchgeführten Versuche .....	28
3.3.2	Aufschmelzversuche.....	29
3.3.3	Temperversuche.....	32
3.3.4	Schweißversuche.....	33
4	Analytik .....	36
4.1	Rheologische Untersuchungen.....	36
4.2	Prozessbegleitende Abkühluntersuchungen .....	36
4.3	Optische Untersuchungen .....	37
4.3.1	Lichtmikroskopische Analyse .....	37
4.3.2	Visualisierung des Schmelzeflusses .....	38
4.4	Mechanische Prüfung .....	39
4.4.1	Kurzzeit-Zugversuch.....	40
4.4.2	Technologischer Biegeversuch .....	42
4.4.3	Schlagbiegeversuch.....	43
4.4.4	Zeitstand-Zugversuch .....	45
4.4.5	Full Notch Creep Test.....	47
5	Forschungsergebnisse und Diskussion .....	49
5.1	Eigenschaften der Versuchswerkstoffe .....	49
5.1.1	Fließverhalten des Grundmaterials .....	49
5.1.2	Zeitstandverhalten des Grundmaterials im FNCT .....	50
5.1.3	Ergebnisse der Temperversuche des Grundmaterials .....	51
5.2	Aufschmelzverhalten der Versuchswerkstoffe.....	52
5.3	Geometrische Betrachtungen an Schweißverbindungen.....	55
5.3.1	Untersuchung der Schweißnahtkrümmung .....	55
5.3.2	Untersuchung des $L/d$ -Verhältnisses .....	57

5.4	Kurzzeitmechanische Eigenschaften von Schweißverbindungen.....	59
5.4.1	Mechanische Eigenschaften bei Zugbelastung .....	59
5.4.2	Mechanische Eigenschaften bei Biegebeanspruchung .....	63
5.4.3	Zähigkeitsverhalten bei schlagartiger Beanspruchung .....	66
5.5	Zeitstandverhalten der Schweißverbindungen .....	67
5.5.1	Zeitstandverhalten von PE .....	67
5.5.2	Zeitstandverhalten von PP .....	71
5.5.3	Zeitstandverhalten bei Parametervariationen .....	72
5.6	Abkühlbedingungen in der Schweißnaht.....	75
5.7	Zeitstandverhalten bei abgeschirmten Schweißnähten .....	76
5.8	Visuelle Darstellung des Quetschflusses .....	78
6	Zusammenfassung.....	81
7	Verwendung der Zuwendung .....	83
7.1	Personaleinsatz – wissenschaftlich-technisches Personal .....	83
7.2	Gerätebeschaffung (Beschaffungswert über 2.500 €).....	85
7.3	Ausgaben für Leistungen Dritter .....	85
8	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit .....	85
9	Bedeutung der Ergebnisse für kmU.....	85
9.1	Wissenschaftlich-technischer Nutzen.....	85
9.2	Wirtschaftlicher Nutzen .....	86
10	Ergebnistransfer.....	87
10.1	Veröffentlichungen.....	87
10.2	Plan zum Ergebnistransfer.....	87
11	Literaturverzeichnis .....	91

## Abbildungsverzeichnis

Bild 1:	Schlagartiges, sprödes Bruchverhalten von PE100 RC (heizelementstumpfgeschweißt nach DVS 2207-1) bei Verlegearbeiten; Wanddicke: 35 mm (links), 60 mm (Mitte) und 75 mm (rechts).....	12
Bild 2:	DVS-Vorgabe für die Anwärmzeiten von PE und PP in Abhängigkeit der Nennwanddicke beim Heizelementstumpfschweißen [51, 52] .....	15
Bild 3:	Schematische Darstellung des druckgeregelten und des weggesteuerten Heizelementschweißprozesses .....	16
Bild 4:	Schematische Darstellung der Zeitstandkurve mit verschiedenen Einflussfaktoren auf den Kurvenverlauf (nach [9] und [72]).....	21
Bild 5:	Heizelement-Stumpfschweißmaschine zum Schweißen von Platten- und Rohrsegmenten.....	24
Bild 6:	Zusammenhang zwischen eingestelltem Druck und resultierender Kraft bei der Schweißanlage der Firma WIDOS.....	25
Bild 7:	Temperaturverteilung auf der Oberfläche des Heizelements der Schweißanlage der Firma WIDOS bei einer eingestellten Temperatur von 220 °C.....	26
Bild 8:	Heizelement-Stumpfschweißmaschine zum Schweißen dickwandiger Halbzeuge ...	27
Bild 9:	Temperaturverteilung auf der Oberfläche des Heizelements der Schweißanlage zum Fügen dickwandiger Halbzeuge bei einer eingestellten Temperatur von 220 °C.....	27
Bild 10:	Positionen zur Temperaturmessung zwischen dem Heizelement und der Fügefläche.. ..	29
Bild 11:	Schematische Darstellung zur Temperaturmessung im Material während des Anwärmens .....	30
Bild 12:	Messposition auf der Fügefläche zur Ermittlung der Schmelzeschichtdicke von PE und PP .....	30
Bild 13:	Messpositionen auf der Fügefläche von PE zur Ermittlung eines Schmelzeschichtdickenprofils.....	31
Bild 14:	Fixierter Messschieber zur Messung der Schmelzeschichtdicke.....	32

Bild 15:	Probenabmessungen der Streifenproben für die Temperversuche .....	32
Bild 16:	Abschirmung der Seiteneinstrahlung des Heizelements mittels Aluminiumfolie .....	35
Bild 17:	Positionierung des Fügeteils am Heizelement; links: In der Mitte des Heizelements; rechts: Am unteren Rand des Heizelements.....	35
Bild 18:	Prüfkörper zur Bestimmung der rheologischen Eigenschaften des Grundmaterials..	36
Bild 19:	Positionen der Thermoelemente in der Fügeebene während des Abkühlprozesses .	36
Bild 20:	Vermessung der Restschmelzeschichtdicke einer Schweißnaht mit einer Wanddicke von 10 mm .....	37
Bild 21:	Plattenverbund aus Polypropylen zur Visualisierung des Schmelzefflusses .....	38
Bild 22:	Plattenverbund aus Polyethylen zur Visualisierung des Schmelzefflusses .....	38
Bild 23:	Visuelle Darstellung der Fließvorgänge beim Heizelementschweißen von PP-H .....	39
Bild 24:	Schematische Darstellung der Probenentnahme für den Kurzzeit-Zugversuch (mit Darstellung der Lochkerbe bei PE) bei einer Wanddicke von 30 mm.....	40
Bild 25:	Schematische Darstellung der Probenentnahme für den Kurzzeit-Zugversuch (mit Darstellung der Lochkerbe bei PE) bei Wanddicken über 30 mm (Beispiel: 100 mm Wanddicke) .....	41
Bild 26:	Schematische Darstellung der Probekörper für den Technologischen Biegeversuch bei einer Wanddicken von 30 mm.....	42
Bild 27:	Schematische Darstellung der Probekörper für den Technologischen Biegeversuch bei Wanddicken über 30 mm.....	42
Bild 28:	Schematische Prüfanordnung des instrumentierten Schlagbiegeversuchs [23] .....	43
Bild 29:	Schematische Darstellung der Probenentnahme für den Schlagbiegeversuch; links: Probenentnahme bei einer Wanddicke von 30 mm; rechts: Probenentnahme bei Wanddicken über 30 mm.....	44
Bild 30:	Schlagpendel mit einem Arbeitsvermögen von 150 J .....	45
Bild 31:	Schematische Darstellung der Funktionsweise einer Zeitstand-Zugprüfanlage [9] ...	46
Bild 32:	Prüfanlagen zur Durchführung der Zeitstand-Zugprüfungen.....	46

Bild 33:	Schematische Darstellung der Probenentnahme für den Zeitstand-Zugversuch.....	47
Bild 34:	Schematische Darstellung des Prüfkörpers für den Full Notch Creep Test.....	47
Bild 35:	Fließverhalten von PE HD (Referenz), PE100, PE100 RC und PP-H in Abhängigkeit der Temperatur.....	49
Bild 36:	Standzeiten der Plattenmaterialien im FNCT (Prüftemperatur: 95 °C, Prüfspannung: 4 MPa).....	50
Bild 37:	Standzeiten eines Rohres aus PE100 an verschiedenen Positionen im FNCT (Prüftemperatur: 95 °C, Prüfspannung: 4 MPa).....	51
Bild 38:	Streifenproben aus verschiedenen Grundmaterialien nach dem Tempern.....	52
Bild 39:	Temperatur an verschiedenen Positionen zwischen dem Heizelement und der Fügefläche über eine Anwärmzeit von 1.000 s (Heizelementtemperatur: 220 °C) ....	52
Bild 40:	Temperaturverlauf während des Anwärmens an verschiedenen Positionen im Material (Heizelementtemperatur: 220 °C).....	53
Bild 41:	Verlauf der Schmelzeschichtdicke von PE und PP in Abhängigkeit der Anwärmzeit	54
Bild 42:	Schmelzeschichtdicke von PE in Abhängigkeit der Anwärmzeit bzw. Wanddicke an verschiedenen Positionen auf der Fügefläche .....	54
Bild 43:	Schematische Darstellung des Wärmestaus an Platten (links) und Rohren (rechts).	55
Bild 44:	Links: Mikroskopieaufnahme PE100 RC, 100 mm Wanddicke (25-fache Vergrößerung, polarisiertes Durchlicht); rechts: Schematische Darstellung der Schweißnaht und Restschmelzeschichtdicke an verschiedenen Positionen .....	56
Bild 45:	Mikroskopieaufnahmen eines geschweißten Rohres mit aufgrund der Seiteneinstrahlung und des Wärmestaus unterschiedlich ausgeprägten Schweißnahtkrümmungen.....	57
Bild 46:	Messposition zur Ermittlung der Restschmelzeschichtdicke (Beispiel: PE100 RC, 30 mm Wanddicke).....	57
Bild 47:	L/d-Verhältnis von PP-H mit einer Wanddicke von 30 mm bei unterschiedlichem Fügedruck .....	58



Bild 48:	Kurzzeit-Zugfestigkeit der Schweißnähte und des Grundmaterials aus PE100 RC mit einer Wanddicke von 100 mm .....	59
Bild 49:	Links: Spannungs-Dehnungs-Diagramm von PE100 RC mit einer Wanddicke von 100 mm; rechts: Bruchbild von PE100 RC im Kurzzeit-Zugversuch.....	60
Bild 50:	Kurzzeit-Zugfestigkeit der Schweißnähte und des Grundmaterials aus PP-H mit einer Wanddicke von 70 mm .....	60
Bild 51:	Links: Spannungs-Dehnungs-Diagramm von PP-H mit einer Wanddicke von 70 mm; rechts: Bruchbild von PP-H im Kurzzeit-Zugversuch.....	61
Bild 52:	Zugfestigkeiten von PE und PP mit Wanddicken von 30 bis 100 mm im Kurzzeit-Zugversuch .....	61
Bild 53:	Kurzzeit-Zugfestigkeit von PE und PP bei verschiedenen Anwärmzeiten und Fügedrücken .....	62
Bild 54:	Kurzzeit-Zugfestigkeit von PE100 mit einer Wanddicke von 100 mm bei verkürzter Anwärmzeit .....	63
Bild 55:	Spannungs-Dehnungs-Diagramm von PE100 mit einer Wanddicke von 100 mm bei einer Anwärmzeit von 200 s .....	63
Bild 56:	Maximalkraft (rechts) und Biegeweg bei Maximalkraft (links) von PP-H mit einer Wanddicke von 30 mm im Technologischen Biegeversuch .....	64
Bild 57:	PE-Proben nach dem Technologischen Biegeversuch bei verschiedenen Prüftemperaturen .....	65
Bild 58:	Schlagzähigkeit von PP-H; links: Wanddicke 30 bis 70 mm; rechts: Wanddicke 70 mm .....	66
Bild 59:	PE-Proben nach dem Schlagbiegeversuch mit einem Pendelhammer mit 25 J Arbeitsvermögen .....	67
Bild 60:	PE-Proben nach dem Schlagbiegeversuch mit einem Schlagpendel mit 150 J Arbeitsvermögen .....	67
Bild 61:	Zeitstandverhalten von PE100 (gepresst) mit einer Wanddicke von 30 bis 100 mm am Rand und in der Mitte der Schweißnaht.....	68

Bild 62:	Bruchverhalten von PE-Proben im Zeitstand-Zugversuch; links: Standzeit 538 h; rechts: Standzeit 26 h.....	68
Bild 63:	Zeitstandverhalten von PE100 mit einer Wanddicke von 30 mm .....	69
Bild 64:	Schematische Darstellung der Probenentnahme aus einem PE-Rohr zur Durchführung von Zeitstand-Zugversuchen.....	70
Bild 65:	Zeitstandverhalten eines Rohres aus PE100 mit einer Wanddicke von 35,8 mm.....	70
Bild 66:	Zeitstandverhalten von PP-H mit einer Wanddicke von 30 bis 70 mm am Rand und in der Mitte der Schweißnaht.....	71
Bild 67:	Mikroskopieaufnahmen von Schweißnähten aus PP-H; links: Wanddicke 50 mm, extrudiert; rechts: Wanddicke 30 mm, gepresst.....	72
Bild 68:	Zeitstandverhalten von PE100 mit einer Wanddicke von 100 mm bei verringerter Anwärmzeit .....	72
Bild 69:	Zeitstandverhalten von PE100 mit einer Wanddicke von 100 mm bei verringerter Anwärmzeit und erhöhter Heizelementtemperatur (240 °C).....	73
Bild 70:	Zeitstandverhalten von PE100 mit einer Wanddicke von 70 mm bei reduziertem Fügedruck .....	73
Bild 71:	Zeitstandverhalten von PE100 mit einer Wanddicke von 30 mm bei erhöhtem Fügedruck .....	74
Bild 72:	Bruchverhalten von PE100 mit einer Wanddicke von 30 mm im Zeitstand-Zugversuch bei erhöhtem Fügedruck (Probenentnahme aus der Mitte der Schweißnaht); links: Fügedruck 0,6 MPa; rechts: Fügedruck 0,3 MPa.....	75
Bild 73:	Abkühlkurven in der Fügeebene einer Platte aus PE100 RC mit einer Wanddicke von 100 mm (grau markierte Bereiche: Kristallisationsphasen) .....	75
Bild 74:	Verringerung der Schweißnahtkrümmung mittels Aluminiumabschirmung.....	76
Bild 75:	Eliminierung der Schweißnahtkrümmung im unteren Randbereich einer Schweißnaht aus PE100 mit einer Wanddicke von 30 mm .....	77
Bild 76:	Zeitstandverhalten einer abgeschirmten Schweißnaht aus PE100 mit einer Wanddicke von 30 mm .....	77

- Bild 77: Bruchbilder einer Schweißnaht mit einseitig reduzierter Krümmung nach der Prüfung im Zeitstand-Zugversuch; links: Mitte der Schweißnaht; rechts: Unterer Rand der Schweißnaht..... 78
- Bild 78: Visualisierung des Quetschflusses bei verschiedenen Plattenverbunden aus PE und PP mit einer Wanddicke von ca. 30 mm ..... 79
- Bild 79: Visualisierung des Quetschflusses bei Plattenverbunden mit einer Wanddicke von 100 mm (PE) und 66 mm (PP) ..... 79

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Übersicht der aktuellen Generationen von PE-HD .....	18
Tabelle 2:	Versuchsmaterialien zur Untersuchung des Dimensionseinflusses beim Heizelementschweißen .....	23
Tabelle 3:	Überblick über die Versuchsdurchführung .....	28
Tabelle 4:	Schweißparameter nach DVS 2207-1 für PE und 2207-11 für PP.....	33
Tabelle 5:	Übersicht über die Parametersätze mit variierten Parametern .....	34
Tabelle 6:	Überblick über die durchgeführten mechanischen Untersuchungen.....	40
Tabelle 7:	Werkstoffspezifische Prüfparameter für den Kurzzeit-Zugversuch .....	41
Tabelle 8:	Werkstoffspezifische Prüfparameter für den Technologischen Biegeversuch.....	43
Tabelle 9:	Werkstoffspezifische Prüfparameter für den Schlagbiegeversuch.....	44
Tabelle 10:	Differenz der gemessenen Schmelzeschichtdicken in Abhängigkeit der Wanddicke und der Messposition .....	55
Tabelle 11:	Verhältnis zwischen der Restschmelzeschichtdicke $L$ und der Wanddicke $d$ bei PE100 RC.....	58
Tabelle 12:	Parametersätze zur Untersuchung des Einflusses der Anwärmzeit und des Fügedrucks auf die Kurzzeit-Zugfestigkeit von PE und PP.....	62
Tabelle 13:	Parametersätze zur Untersuchung der Maximalkraft und des Biegewegs bei Maximalkraft von PP-H mit einer Wanddicke von 30 mm im Technologischen Biegeversuch .....	64

# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation und Forschungsziel

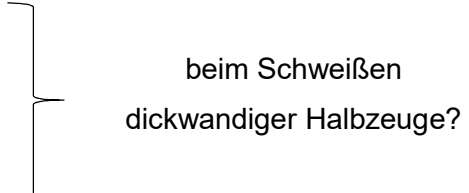
Der Rohrleitungs-, Apparate- und Behälterbau stellt neben der Verpackungs- und Fahrzeugindustrie eines der größten Einsatzgebiete von Kunststoffen in Deutschland dar [1-3]. Die typischen Werkstoffe sind Polyethylen (PE), Polypropylen (PP) und Polyvinylidenfluorid (PVDF) [4]. Rohrsysteme und Formteile aus diesen Kunststoffen sind seit vielen Jahren Stand der Technik, werden jedoch in immer größeren Dimensionen und Wanddicken produziert und verarbeitet [5-7]. Speziell im Rohrleitungsbau haben sowohl die Rohrwickeltechnik als auch die Extrusionstechnik zu Rohrdimensionen von über 2.500 mm Durchmesser und Wanddicken von 100 mm und mehr geführt. Daher haben vor allem PE-Rohre Eingang in Druck- und Volumenstrombereiche gefunden, die in der Vergangenheit dem Stahlrohr vorbehalten waren [8]. Neben dem Heizwendelmuffenschweißen werden die Rohrsysteme mittels Heizelementstumpfschweißen gefügt. Es handelt sich dabei um ein sehr gut verstandenes Verfahren mit prinzipiell hoher Prozesssicherheit [2, 9]. Dennoch treten vermehrt Schweißnahtbrüche an Heizelementschweißnähten bei Bauteilen großer Wanddicke bereits bei kurzzeitigen Belastungen auf. Teilweise kommt es schon bei Einbausituationen zu einem Spröbruch, was in dieser Form für das normalerweise zähe PE untypisch ist. Beispiele für ein schlagartiges, sprödes Bruchverhalten von PE100 RC mit verschiedenen Wanddicken von 35 bis 75 mm zeigt Bild 1. Es liegt hier kein, mit konventionellen Messmethodiken detektierbarer Prozess- oder Werkstoffeinfluss vor. Die Schweißnähte hätten einen Kurz- sowie Langzeitschweißfaktor von 0,8 sicher erreichen und zudem ein zähes Versagen zeigen müssen.



Bild 1: Schlagartiges, sprödes Bruchverhalten von PE100 RC (heizelementstumpfgeschweißt nach DVS 2207-1) bei Verlegearbeiten; Wanddicke: 35 mm (links), 60 mm (Mitte) und 75 mm (rechts)

Die umfangreiche Wissenschaftsliteratur zum Schweißen von PE behandelt Wanddicken oberhalb 20 mm fast ausschließlich theoretisch, während experimentell nur wenige Erkenntnisse vorliegen. Dies ist schon allein dadurch erklärbar, dass es einerseits keine reproduzierbar arbeitenden Laborschweißanlagen für die hohen benötigten Fügekräfte gibt. Andererseits ist das Handling von Proben großer Dimensionen für optische, mechanische und

morphologische Analysen (Probenentnahme, Herstellung und Prüfung) sehr viel aufwendiger als bei den klassisch in der Forschung verwendeten 2, 4, 10 und teilweise 20 mm dicken Halbzeugen bzw. Bauteilen. Die theoretischen Grundlagen zum Heizelementschweißen sind an diesen Geometrien erarbeitet worden. Unterstützt von anwendungsorientierten Versuchen im Rahmen des DVS und anwendender Unternehmen sind die Parametersätze zu großen Dicken hin extrapoliert und verifiziert worden, die Quellen sind aber nicht prüfbar. Die vermehrt auftretenden Schäden an geschweißten PE-Rohrleitungen großer Wanddicke zeigen jedoch, dass das Verständnis zwischen Prozessführung und Nahteigenschaften offensichtlich nicht ausreicht, die Übertragung der Grundlagenerkenntnisse zu großen Wanddicken bzw. Fließwegen hin nicht ohne Weiteres möglich ist und diese insgesamt einer wissenschaftlichen Neubewertung bedürfen. Dabei treten zusammenfassend folgende Fragestellungen hinsichtlich des Heizelementstumpfschweißens dickwandiger Halbzeuge auf:

- Größere Scher- und Dehnströmungsgradienten
  - Inhomogene Kühlbedingungen
  - Unerforschte Schweißnahtmorphologien
  - Unbekannte Eigenspannungszustände
- 
- beim Schweißen  
dickwandiger Halbzeuge?

Möglicherweise beeinflussen diese, bisher unbekannt, Bedingungen die mechanischen Eigenschaften der geschweißten Bauteile derart, dass es zu dem genannten Sprödversagen kommt. Es ist daher notwendig, den Einfluss der Bauteilwanddicke und der Schweißparameter auf das Erwärmverhalten, die rheologischen Schweißnahtbedingungen und die daraus resultierenden mechanischen Eigenschaften zu untersuchen. Die sich daraus ergebende Zielsetzung des bearbeiteten Forschungsvorhabens zum Heizelementschweißen dickwandiger Halbzeuge kann in übergeordnete wissenschaftliche und wirtschaftliche Ziele unterteilt werden:

#### Wissenschaftliche Ziele:

- Systematische Erforschung des Dimensionseinflusses auf das mechanische Verhalten von Halbzeugen aus PE über eine Skala von 30 bis 100 mm Wanddicke beim Heizelementstumpfschweißen
- Untersuchung des Verformungsverhaltens dickwandiger Halbzeuge aus PE
- Sichere Prozessführung für das Heizelementstumpfschweißen von Halbzeugen aus PE bei Wanddicken über 20 mm

#### Wirtschaftliche Ziele:

- Überprüfung und gegebenenfalls Überarbeitung der DVS-Parameter sowie Entwicklung kommerzieller Prozessführungsstrategien zum Heizelementschweißen dickwandiger Halbzeuge aus PE

## 1.2 Stand der Forschung und Entwicklung

Zum Heizelementschweißen von PE, zum Festigkeits- und Versagensverhalten liegen in der Literatur umfangreiche Untersuchungen und Ergebnisse vor [10-25]. Das Heizelementschweißen ist ein seit vielen Jahrzehnten etabliertes und vergleichsweise einfaches Kunststoffschweißverfahren [2]. Es kann als eines der am besten analysierten und theoretisch durchdrungenen Schweißverfahren angesehen werden und wird unter anderem im Apparate-, Behälter- und Rohrleitungsbau angewendet. Experimentelle wissenschaftliche Arbeiten wurden im Wesentlichen mit Wanddicken von 4 – 20 mm durchgeführt. Besonders in den 1980er und 90er Jahren wurden umfangreiche Forschungsarbeiten zum Heizelementstumpfschweißen von PE durchgeführt. Nach der Erkenntnis zum Einfluss der Fließgeschwindigkeit auf die mechanischen Eigenschaften wurde das Strömungsfeld auf Basis der Fügegeschwindigkeit und des Temperaturgradienten theoretisch beschrieben [26, 27]. In weiteren Arbeiten wurde nachgewiesen, dass sich ein Optimum der mechanischen Eigenschaften einstellt, wenn ein dimensionsloses Fügewegverhältnis  $s_F/L_0$  von ca. 0,75 eingehalten wird [21, 28]. Daraus wurde ein von der Dimension und der Schmelzeschichtdicke abhängiger Fügedruck für PE abgeleitet [28]. In einer weiteren Arbeit wurden die Erkenntnisse zu Modellgesetzen zum Schweißen von teilkristallinen Kunststoffen dimensionsunabhängig zusammengefasst [29]. Untersuchungen zum Zeitstandverhalten wurden nur in wenigen Arbeiten durchgeführt [23, 30]. Im DVS, seinen Arbeitskreisen und mit intensiver Unterstützung der Industrie wurde neben dem Schweißen insbesondere die Prüftechnik des Zeitstandverhaltens analysiert [9-13, 31-33]. Im Vordergrund stand die sichere Dimensionierung geschweißter Systeme, also die Ermittlung des Langzeitschweißfaktors als Dimensionierungskennwert. Die Verwendung von Netzmittel zur Prüfzeitverkürzung wurde in aufwendigen Versuchen abgesichert [12]. Unter anderem in nicht veröffentlichten Ringversuchen im Rahmen der DVS-Arbeitsgruppen wurden die Schweißparameter für PE definiert und mit den damaligen PE-Rohrwerkstoffen ein sicheres Erreichen des Zeitstandschweißfaktors von 0,8 sichergestellt. Systematische wissenschaftliche Untersuchungen mit den heute verwendeten Werkstoffen fehlen. Die verwendeten Probekörper der experimentellen Untersuchungen in diesen Arbeiten hatten Wanddicken mit maximal 24 mm [29]. Zu Wanddicken oberhalb 20 mm gibt es anwendungsnahe und praktische Ringversuche, welche die prinzipielle Machbarkeit nachweisen. Wissenschaftliche Arbeiten mit experimentellen Nachweisen, die sich systematisch mit dem Einfluss der Wanddicke über einen großen Skalenbereich befassen, sind nicht bekannt. Weiterhin wurde der Zusammenhang zwischen Prozessführung, Morphologie und mechanischen Kurz- und Langzeiteigenschaften zwar in zahlreichen Arbeiten im Wesentlichen an PP, hier aber auch prozessübergreifend, aufgezeigt [34-49]. Zu PE sind jedoch nur wenige Arbeiten bekannt [50], nicht zuletzt aufgrund der lichtmikroskopisch nur schwierig zu analysierenden, sehr feinsphärolithischen Überstruktur.

Der Stand der Forschung veranschaulicht den umfangreichen Wissensstand zum Heizelementschweißen von PE, zeigt aber auch erhebliche Wissenslücken bei großen Nennwanddicken und dem Prozessverhalten der modernen PE-Typen.

### 1.3 Ausgangssituation

In der DVS-Richtlinie 2207-1, Heizelementschweißen von Rohren, Rohrleitungsteilen und Tafeln aus PE-HD, sind die Schweißparameter für PE mit einer Nennwanddicke bis 130 mm festgelegt [51]. Die Heizelementtemperatur mit 220 °C sowie der Angleich- und der Fügedruck mit 0,15 MPa bleiben unabhängig von der Wanddicke konstant. Mit zunehmender Wanddicke verlängern sich aber die Anwärmzeit, die Umstellzeit, die Zeit des Fügedruckaufbaus und die Abkühlzeit. Bild 2 zeigt, dass eine in Abhängigkeit der Nennwanddicke linear ansteigende Anwärmzeit vorgegeben wird. Die Anwärmzeiten für PP werden in der DVS-Richtlinie 2207-11, Heizelementschweißen von Rohren, Rohrleitungsteilen und Tafeln aus PP, definiert und steigen degressiv an. Die Heizelementtemperatur beträgt 210 °C, der Angleich- und der Fügedruck jeweils 0,1 MPa [52].

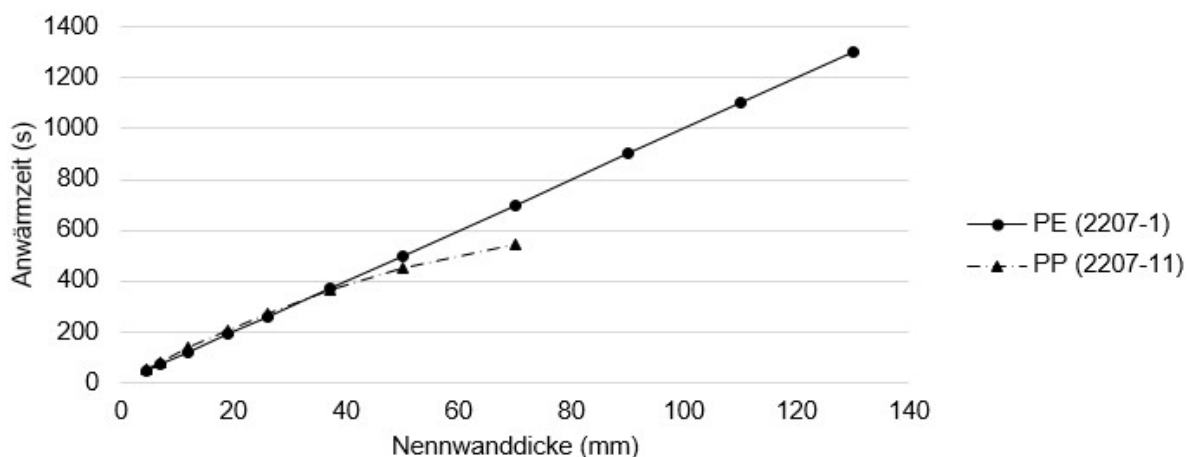


Bild 2: DVS-Vorgabe für die Anwärmzeiten von PE und PP in Abhängigkeit der Nennwanddicke beim Heizelementstumpfschweißen [51, 52]

Aufgrund der fehlenden experimentellen wissenschaftlichen Arbeiten zum Heizelementschweißen dickwandiger Halbzeuge wurden die Anwärmzeiten für PE und PP mit großen Nennwanddicken extrapoliert. Die auftretenden Sprödbrüche an geschweißten Rohrleitungen großer Wanddicken zeigen jedoch, dass das Verständnis zwischen Prozessführung und Nahtigenschaften für das Schweißen großer Rohrdimensionen nicht ausreichend vorhanden ist und andere Gesetzmäßigkeiten zu gelten scheinen.



## 2 Grundlagen

### 2.1 Heizelementschweißen

Das Heizelementschweißen basiert auf der Fremderwärmung der Fügeflächen an einem Heizelement zum Aufbau einer Schmelzeschicht und dem anschließenden Fügen unter Druck [53]. Eine Antihafbeschichtung des Heizelementes, meist eine PTFE-Folie, verhindert die Anhaftung der Schmelze an der Heizelementoberfläche.

Das Verfahren ist ein seit vielen Jahrzehnten etablierter und im Vergleich zu anderen Schweißverfahren einfacher Prozess zum Fügen von Kunststoffhalbzeugen [9]. Es wird vor allem im Apparate-, Behälter- und Rohrleitungsbau angewendet. Eine schematische Darstellung des Prozesses wird in Bild 3 gezeigt. Der zweistufige Schweißprozess besteht aus vier Phasen (Angleichen, Anwärmen, Umstellen, Fügen), sodass der Erwärm- und der Fügevorgang zeitlich getrennt voneinander ablaufen. Das Heizelementschweißen kann entweder druckgeregelt oder weggesteuert stattfinden (Bild 3).

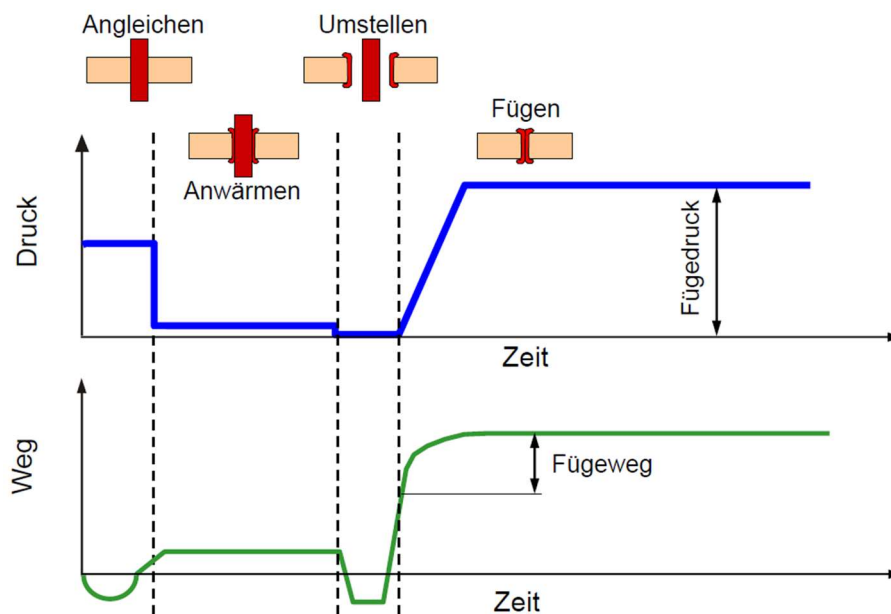


Bild 3: Schematische Darstellung des druckgeregelt und des weggesteuert Heizelementschweißprozesses

#### Phase 1 – Angleichen:

In der Angleichphase werden die zu schweißenden Fügeile mit erhöhter Kraft an das Heizelement gedrückt, um einen flächigen Kontakt der Fügeileoberflächen mit dem Heizelement zu gewährleisten. Durch den erhöhten Druck wird das aufgeschmolzene Material nach außen, in den sogenannten Angleichwulst, verdrängt. Dadurch werden toleranz- und verzugbedingte Unebenheiten der Fügefläche eliminiert, sodass anschließend eine gleichmäßige Wärmeübertragung vom Heizelement auf die Fügeile stattfinden kann. Das

vollständig abgeschlossene Angleichen zeigt sich durch eine gleichmäßige Wulstausbildung an den Rändern der Fügeflächen, was den Übergang zur Anwärmphase kennzeichnet.

#### Phase 2 – Anwärmen:

In der drucklosen Anwärmphase, welche sich der Angleichphase anschließt, wird über eine bestimmte Zeit, die sogenannte Anwärmzeit, eine Schmelzeschicht mit definierter Dicke an den Fügeflächen aufgebaut. Dies erfolgt über das Prinzip der Wärmeleitung vom Heizelement auf die zu fügenden Kunststoffteile. Durch den wegfallenden Druck findet kein Materialfluss statt und dementsprechend wird keine Schmelze in den Wulst verdrängt. Die Dicke der erzeugten Schmelzeschicht stellt ein Kriterium für die Qualität der Schweißverbindung dar [21, 22, 29, 54].

#### Phase 3 – Umstellen:

In der Umstellphase werden die Fügeteile vom Heizelement entfernt und das Heizelement aus der Fügezone gefahren. Während dieses Vorgangs kommt es zu einem Abkühlen der Fügeflächen. Zum Erreichen einer hohen Schweißnahtgüte muss daher eine kurze Umstellzeit realisiert werden.

#### Phase 4 – Fügen (und Abkühlen):

In der Fügephase werden die Fügeflächen zunächst innerhalb einer bestimmten Fügedruckaufbauzeit zusammengefahren. Dabei wird der Druck kontinuierlich bis zum Erreichen des Fügedrucks erhöht. Während des Fügens kommt es zu einem Quetschfluss, der dafür sorgt, dass ein Teil des plastifizierten Materials nach außen verdrängt wird und sich der sogenannte Schweißwulst bildet. Durch den Schmelzeffluss kommt es zu einer festen Verbindung zwischen beiden Fügeteilen, sodass eine Schweißverbindung entsteht. Der zurückgelegte Fügeweg ist beim druckgeregelten Schweißen von der Schmelzeviskosität, vom Fügedruck und von der Schmelzeschichtdicke abhängig.

Mit dem Ende der Anwärmphase bzw. dem Beginn der Umstellphase beginnt gleichzeitig das Abkühlen der Fügeteile. Die Abkühlphase wird in der Literatur teilweise als zusätzliche Phase nach dem Fügen dargestellt [9]. Während der Abkühlzeit erfolgt das Abkühlen der Fügeteile unter Aufrechterhaltung des Fügedrucks.

## **2.2 Materialien**

Im Apparate-, Rohrleitungs- und Behälterbau besitzen die beiden Werkstoffe PP und PE-HD (Polyethylen hoher Dichte) die größte Bedeutung. Das lineare PE und das isotaktische PP bilden aufgrund ihrer linearen molekularen Grundstruktur mit nur geringem Verzweigungsgrad teilkristalline Werkstoffe mit einer komplexen sphärolithischen Struktur [9]. Mit ihren vorteilhaften

Eigenschaften wie hohe Spannungsrisssbeständigkeit, unproblematische Verarbeitung und Sicherheit gegen plötzliches Versagen aufgrund hoher Zähigkeit genügen sie den allgemeinen Anforderungen dieser Marktsegmente. Für den Rohrleitungsbau, beispielsweise der Trinkwasserver- und -entsorgung, wird vor allem PE eingesetzt. PP findet aufgrund seiner hohen thermischen Belastbarkeit häufig im chemischen Apparatebau Anwendung, wird aber ebenso im Rohrleitungsbau eingesetzt.

### Polyethylen:

PE hat sich seit über 60 Jahren in der Gas- und Wasserversorgung als geeigneter Werkstoff für Kunststoffrohrleitungssysteme bewährt, was an einer Vielzahl vorteilhafter Eigenschaften liegt [55, 56]:

- Physiologische Unbedenklichkeit (Trinkwassertauglichkeit)
- Witterungs- und Strahlenbeständigkeit
- Temperaturbeständigkeit von -40 °C bis +50 °C
- Gute chemische Widerstandsfähigkeit
- Sehr hohe Abrasionsbeständigkeit

Weiterhin erfolgt eine ständige Weiterentwicklung des PE-Materials, um den hohen Anforderungen im Rohrleitungsbau gerecht zu werden. Daraus resultieren verschiedene Generationen des Kunststoffes PE, was Tabelle 1 zeigt. Die Bezeichnungen PE80 und PE100 stellen unterschiedliche Belastungsniveaus der Rohre durch Innendruckbeaufschlagung dar. Basierend auf Zeitstand-Innendruckkurven, bei denen die Rohre bei verschiedenen Drücken und Temperaturen bis zum Bruch geprüft werden, erfolgt eine Einteilung in entsprechende Leistungsklassen [57]. Die Zeitstand-Innendruckfestigkeit für das Medium Wasser bei 20 °C dient dabei als Kenngröße und wird auf eine Belastungszeit von 50 Jahren extrapoliert [55, 58]. Bei der jeweils angegebenen Zeitstand-Innendruckfestigkeit handelt es sich um erforderliche Mindestfestigkeiten. Diese liegen für PE80 bei 8 MPa und für PE100 bei 10 MPa [59].

Tabelle 1: Übersicht der aktuellen Generationen von PE-HD

<b>Aktuelle Generationen von PE-HD</b>	
<b>Material</b>	<b>Mindestfestigkeit (50 Jahre, 20 °C)</b>
PE80	8 MPa
PE100	10 MPa
PE100 RC	10 MPa

Die erhöhte Festigkeit bei PE100 wird durch ein modifiziertes Polymerisationsverfahren erreicht, was zu einer veränderten Molmassenverteilung führt. Dadurch werden eine höhere Dichte sowie verbesserte mechanische Eigenschaften, beispielsweise eine höhere Steifigkeit und

Härte sowie eine bessere Zeitstandfestigkeit, erreicht. Ein weiterer Vorteil dieses Materials ist, dass eine bestimmte Druckstufe bereits mit einer geringeren Wanddicke erreicht wird, was zu einer Materialeinsparung führt [56].

Bei der neuesten Generation von PE-HD handelt es sich um PE100 RC (Resistance to Crack). Bei diesem Werkstoff liegt ein verbesserter Widerstand gegen langsames und schnelles Risswachstum vor, was im Full Notch Creep Test (FNCT) geprüft wird. Dies führt zu einer höheren chemischen Widerstandsfähigkeit gegenüber spannungsrisssauslösenden Medien. Ein weiterer Vorteil, der sich daraus ergibt, ist die Möglichkeit, PE100 RC-Materialien sandbettfrei zu verlegen [60].

#### Polypropylen:

PP zeichnet sich im Vergleich zu PE vor allem durch eine höhere Wärmebeständigkeit aus und eignet sich daher für den Einsatz bei höheren Temperaturen. Außerdem weist PP insgesamt ein ausgeglichenes Eigenschaftsniveau mit vorteilhaften Eigenschaften für den Rohrleitungsbau auf [61]:

- Hohe Wärmealterungsbeständigkeit
- Hohe Zeitstandfestigkeit
- Temperaturbeständigkeit von 0 °C bis 95 °C
- Gute chemische Widerstandsfähigkeit
- Sehr hohe Abrasionsbeständigkeit

Bei PP wird im Wesentlichen zwischen zwei verschiedenen Polymertypen unterschieden. Während sich PP-H (Homopolymer) ausschließlich aus Propylen-Molekülen zusammensetzt, werden bei PP-R (Randomcopolymer) statistisch verteilt Ethylenmonomere eingebaut. Beide Polymertypen werden für den Rohrleitungsbau verwendet. PP-R weist allerdings eine höhere Schlagzähigkeit auf als PP-H [61].

Die Firma Simona AG bietet mit dem Material PP-H AlphaPlus ein PP-H an, welches eine für den Behälter- und Apparatebau modifizierte Rezeptur aufweist. Durch eine veränderte Verfahrenstechnik sowie mittels spezieller Nukleierungsmittel wird ein PP erzeugt, welches ein feineres Gefüge als das Standard-PP-H aufweist. Die veränderte Gefügestruktur führt zu einer positiven Beeinflussung verschiedener Eigenschaften. PP-H AlphaPlus hat eine erhöhte Steifigkeit sowie eine verbesserte Kerbschlagzähigkeit bei niedrigen Temperaturen. Weiterhin werden durch das feine Gefüge die thermodynamische Stabilität während des Schweißens sowie die chemische Widerstandsfähigkeit und die Spannungsrisssbeständigkeit erhöht. Dies führt zu einem verbesserten Widerstand gegen langsames Risswachstum und damit zu erhöhten Standzeiten. Außerdem hat PP-H AlphaPlus eine geringere Oberflächenrauigkeit, was ebenso zu einer erhöhten chemischen Widerstandsfähigkeit führt. Die minimierte Rauigkeit

reduziert die Angriffsfläche des Mediums und verlangsamt somit den Angriff der Oberfläche und das Eindiffundieren des Mediums in das Material [62].

### **2.3 Spannungsriss- und Zeitstandverhalten teilkristalliner Thermoplaste**

Die medienbedingte Spannungsrissbildung ist für teilkristalline Thermoplaste, welche im Apparate-, Behälter- und Rohrleitungsbau eingesetzt werden, von großer Bedeutung. Der Grund hierfür ist, dass in diesen Bereichen häufig teils aggressive Medien gelagert und transportiert werden und den Kunststoff dabei schädigen. Daher müssen Kunststoffe mit einem hohen Spannungsrisswiderstand eingesetzt werden, um trotz der hohen Belastung eine ausreichende Lebenszeit der Materialien zu gewährleisten [4, 23, 32, 63-65].

Die medienbedingte Spannungsrissbildung stellt eine Schädigung des Werkstoffs unter gleichzeitiger Wirkung eines Fluids und äußerer sowie innerer Spannungszustände des Materials dar. Materialschädigungen, die schon allein durch das Vorhandensein äußerer und innerer Spannungen stattfinden, werden dabei durch den zusätzlichen Einfluss des Mediums verstärkt [23].

Der Effekt der oberflächenaktiven Medien basiert auf einer Benetzung, Diffusion und Quellung des Werkstoffs. Die Art und Konzentration des Mediums sowie die Umgebungstemperatur bestimmen primär die Benetzung. Dagegen sind die molekulare Struktur sowie die Morphologie des Werkstoffs für die Diffusion und die Quellung verantwortlich [66]. Bei einer Belastung des Werkstoffs entstehen an material- und prozessbedingten Kerben, Poren oder anderen Oberflächendefekten feine Rissnetzwerke, sogenannte Crazes. Das Medium diffundiert nach der Benetzung der Oberfläche hauptsächlich in die amorphen Bereiche des Werkstoffs. Dabei kommt es zur Quellung des Werkstoffs und bei dem Vorhandensein äußerer, mechanischer Belastungen zur weiteren Aufweitung der amorphen Bereiche. Damit ist eine Weichmachung des Kunststoffs verbunden, was dazu führt, dass sich die Moleküle entschlafen und die Beweglichkeit der amorphen Bereiche erhöht wird. Als Folge finden plastisches Fließen und beschleunigtes Risswachstum statt, was letztlich zum Versagen des Werkstoffs führt [23, 67-69].

Das Spannungsrissverhalten und somit die langzeitmechanischen Eigenschaften sowohl von thermoplastischem Grundmaterial als auch von Schweißverbindungen können durch Kurzzeit-Prüfungen nicht ausreichend untersucht werden. Beispielsweise dem Kurzzeit-Zugversuch und dem Biegeversuch liegen andere Versagensmechanismen als den Langzeitprüfungen zugrunde, weshalb von den kurzzeitmechanischen Eigenschaften nicht generell auf das Zeitstandverhalten der teilkristallinen Thermoplaste geschlossen werden kann [38, 70, 71].

Die Prüfung und Beschreibung der langzeitigen Schweißnahtgüte erfolgt durch den Zeitstand-Zugversuch. Die Probekörper werden in diesem Prüfverfahren auf Zug belastet. Aus den Ergebnissen des Zeitstand-Zugversuchs können sogenannte Zeitstandkurven generiert werden, welche das langzeitige Festigkeitsverhalten abbilden. Bild 4 zeigt die schematische Darstellung einer Zeitstandkurve. In der Zeitstandkurve wird die Spannung über die Standzeit in doppelt-logarithmischer Form aufgetragen. Charakteristische Zeitstandkurven bestehen aus drei Kurventeilen mit unterschiedlichen Steigungen und werden dementsprechend jeweils durch einen Knick im Kurvenverlauf voneinander getrennt [9].

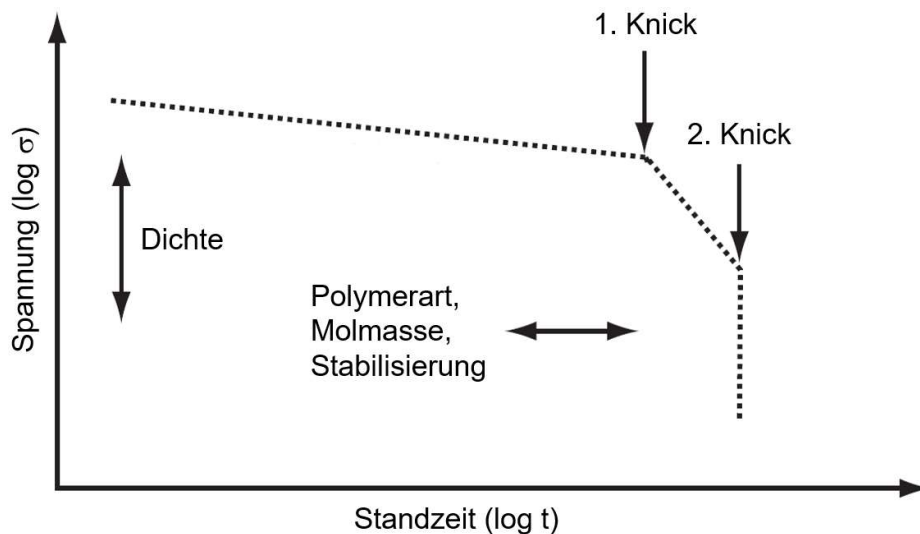


Bild 4: Schematische Darstellung der Zeitstandkurve mit verschiedenen Einflussfaktoren auf den Kurvenverlauf (nach [9] und [72])

Im flachen ersten Kurventeil liegen hohe Spannungen und kurze Standzeiten vor. Dementsprechend kommt es zu einem duktilen Versagen der Probekörper [73]. Der Bruchmechanismus entspricht dem des Kurzzeit-Zugversuchs. Ein Einflussfaktor auf die Lage des ersten Kurventeils ist die Dichte des Kunststoffes. Mit zunehmender Dichte steigt die Streckspannung an [74]. Aufgrund des sehr hohen Verformungsanteils dürfen die Prüfkörper im Zeitstand-Zugversuch nicht im ersten Kurventeil versagen, da es in der Praxis bei der richtigen Dimensionierung der Bauteile zu einem spröden Versagen kommt [75].

Basierend auf einer polymerphysikalischen Änderung des Bruchmechanismus kommt es zu einem ersten Knick in der Zeitstandkurve. Im zweiten, steil abfallenden Kurventeil nehmen die Spannungen ab, sodass es nicht mehr zu einem vollständig duktilen Versagen der Prüfkörper kommt. Stattdessen gleiten zunächst Molekülketten im Mikrobereich aneinander ab, was zu Fehlstellen im Molekülverband führt. Dies hat einen spröde beginnenden und duktil auslaufenden Mischbruch zur Folge [74, 76-77]. Der Bruchmechanismus wird primär durch die molekulare Struktur des Kunststoffes wie beispielsweise die mittlere Molmasse und die Molmassenverteilung

bestimmt [74]. Um eine praxisnahe Prüfung durchzuführen, sollten die Prüfkörper im Zeitstand-Zugversuch den zweiten Kurventeil erreichen.

Im dritten, senkrecht abfallenden Kurventeil tritt ein vollständig sprödes Bruchversagen nach einer langen Standzeit auf. Der Bruchmechanismus wird durch thermo-oxidative Alterung hervorgerufen [74, 78]. Die Art und Güte der Stabilisierung des Polymers bestimmen die Lage des dritten Kurventeils auf der x-Achse [72].

Durch die kontinuierliche Weiterentwicklung der Kunststoffe haben sich die Standzeiten im Zeitstand-Zugversuch erheblich verlängert. Daher wird die Prüfung bei erhöhten Temperaturen sowie unter der Verwendung geeigneter Medien durchgeführt. Beide Faktoren haben eine standzeitverkürzende Wirkung im Zeitstand-Zugversuch. Der Einsatz eines geeigneten Mediums ermöglicht außerdem die praxisnahe Simulation einer medienbedingten Spannungsrissbildung. Das verwendete Medium darf den Kunststoff chemisch nicht angreifen und keine quellende Wirkung haben [9].

### 3 Experimentelles

#### 3.1 Versuchswerkstoffe und Probekörper

Tabelle 2 zeigt eine Übersicht über die verwendeten Werkstoffe, Wanddicken und Herstellverfahren. Obwohl für das Projekt ursprünglich nur PE vorgesehen war, wurde in Abstimmung mit dem Projektbegleitenden Ausschuss beschlossen, auch PP in den Versuchsplan aufzunehmen. Damit wurden für die Untersuchungen mit PE und PP die im Rohrleitungsbau industriell relevanten Kunststoffe verwendet. Bei den beiden PE-Materialien PE100 sowie PE100 RC handelt es sich um die neuesten Generationen von PE-HD, welche aktuell auf dem Markt erhältlich sind. Die schwarze Färbung entsteht durch eine Rußbeimischung, welche vor allem der UV-Stabilisierung des Werkstoffs für dessen Nutzung im Außenbereich dient. Das verwendete PP-H AlphaPlus ist ein dauerwärmestabiles, alpha-nukleiertes Homopolymerisat mit einem extrem feinen Kristallgefüge in  $\alpha$ -kristalliner Form, was zu einer erhöhten Zähigkeit und Steifigkeit führt. Die graue Färbung wird durch die Beimischung von Ruß und einem weißen Farbpigment erzeugt.

Tabelle 2: Versuchsmaterialien zur Untersuchung des Dimensionseinflusses beim Heizelementschweißen

Material	Wanddicke (mm)	Herstellverfahren	Farbe
PE100	30	Gepresst	Schwarz
	70	Gepresst	Schwarz
	100	Gepresst	Schwarz
PE100	30	Extrudiert	Schwarz
PE100 RC	30	Gepresst	Schwarz
	70	Gepresst	Schwarz
	100	Gepresst	Schwarz
PP-H AlphaPlus	30	Gepresst	Grau
	70	Gepresst	Grau
PP-H AlphaPlus	50	Extrudiert	Grau

Bei den in Tabelle 2 gezeigten Materialien handelt es sich um Plattenmaterial. An den Platten wurden die wesentlichen Grundlagenuntersuchungen durchgeführt. Die Herstellung der Platten erfolgte teilweise durch Extrusion und teilweise durch Pressen. Somit konnte der Einfluss des Herstellprozesses berücksichtigt werden. Die Wanddicke der Platten variierte zwischen 30 und 100 mm. Die Schweißversuche erfolgten an Probekörpern mit einer maximalen Länge von 300 mm. Die genauen Abmaße der jeweiligen Probekörper waren vom jeweils durchzuführenden Analyseverfahren abhängig. Die Probekörper wurden mit einer Kreissäge spanend aus Platten mit den Abmessungen 2.000 x 1.000 mm<sup>2</sup> (Länge x Breite)



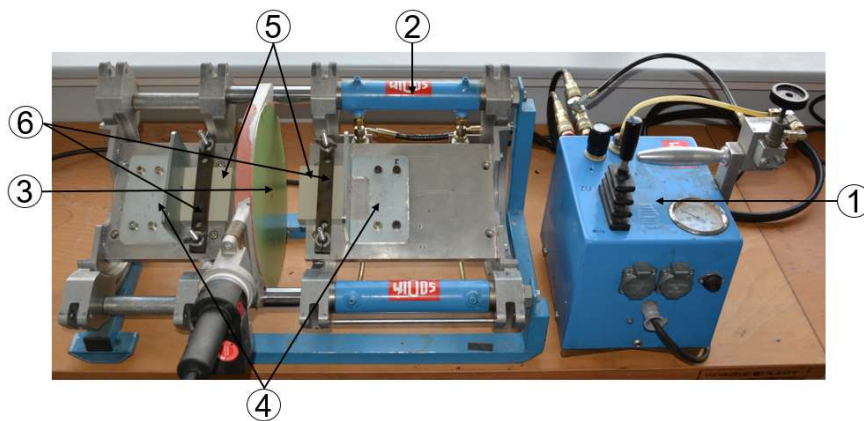
herausgearbeitet. Bei extrudierten Platten wurden die Probekörper so entnommen, dass die Fügeflächen orthogonal zur Extrusionsrichtung der Platten vorlagen.

Zudem wurden für praxisnahe Untersuchungen für den Rohrleitungsbau gezielte Untersuchungen an Rohrsegmenten durchgeführt. Dafür wurde ein Rohr aus PE100 mit einem Außendurchmesser von 610 mm und einer Wanddicke von 35,8 mm verwendet. Das Rohr wurde extern geschweißt und der TU Chemnitz anschließend zur Verfügung gestellt.

### 3.2 Schweißanlagen

Für die Durchführung der Schweißversuche wurden zwei Heizelementschweißanlagen verwendet. Dabei handelt es sich um eine handelsübliche Schweißanlage der Firma WIDOS sowie um eine speziell für die Anforderungen des Heizelementschweißens dickwandiger Halbzeuge entwickelte Schweißmaschine.

Die handelsübliche Schweißanlage ist eine Heizelement-Stumpfschweißmaschine vom Typ 4600 der Firma WIDOS, wobei es sich eigentlich um eine Rohrschweißmaschine handelt. Zum Fügen von Platten und Rohrsegmenten wurde die in Bild 5 gezeigte Anlage entsprechend umgebaut.



Nummer	Maschinenelement
1	Hydraulikaggregat
2	Grundmaschine mit Hydraulikzylinder
3	Heizelement
4	Platteneinsatz mit Winkelanschlag
5	Fügeteile
6	Spannwerkzeug

Bild 5: Heizelement-Stumpfschweißmaschine zum Schweißen von Platten- und Rohrsegmenten

Die Spannelemente zum Einspannen der Rohre wurden entfernt und durch eine geeignete Spannapparatur zum Fixieren der Platten und Rohrabschnitte ersetzt. Die Winkelanschläge

dienen zur parallelen Ausrichtung der Halbzeuge. Die Kraftaufbringung erfolgt hydraulisch über einen Hydraulikzylinder. Der Druck kann mithilfe eines Steuerhebels manuell eingestellt werden. Die maximal einzuspannende Plattenlänge beträgt aufgrund der geometrischen Abmessungen der Schweißanlage 210 mm.

Die Schweißmaschine kann einen Druck von 100 bar aufbringen. Um den Zusammenhang zwischen dem eingestellten Druck und der dadurch aufgebrauchten Kraft zu ermitteln, wurden verschiedene Druckstufen bis 80 bar angefahren und die jeweils resultierende Kraft mit einer Kraftmessdose aufgezeichnet. Die Kraftmesskurve wird in Bild 6 gezeigt. Aufgrund der Begrenzung der Kraftmessdose handelt es sich bei den dargestellten Kräften über 80 bar um extrapolierte Werte. Die Kurve zeigt einen linearen Zusammenhang zwischen dem eingestellten Druck und der daraus resultierenden Kraft, sodass die jeweils benötigte Fügekraft durch Interpolation errechnet und eingestellt werden kann. Der Kraftmesskurve kann entnommen werden, dass der maximale Maschinendruck von 100 bar einer Kraft von etwa 4.700 N entspricht, was für das Schweißen von Halbzeugen mit einer Wanddicke von 100 mm sowie einer maximalen Länge von 210 mm ausreichend ist. Unter Einhaltung des nach der DVS-Richtlinie 2207-1 vorgegebenen Fügedrucks von 0,15 MPa wird für das Schweißen einer Platte aus PE mit diesen Abmaßen eine Fügekraft von 3.150 N benötigt. Für das Schweißen größerer Dimensionen oder zur Durchführung einer Fügedruckvariation stößt die Anlage allerdings an ihre Grenzen.

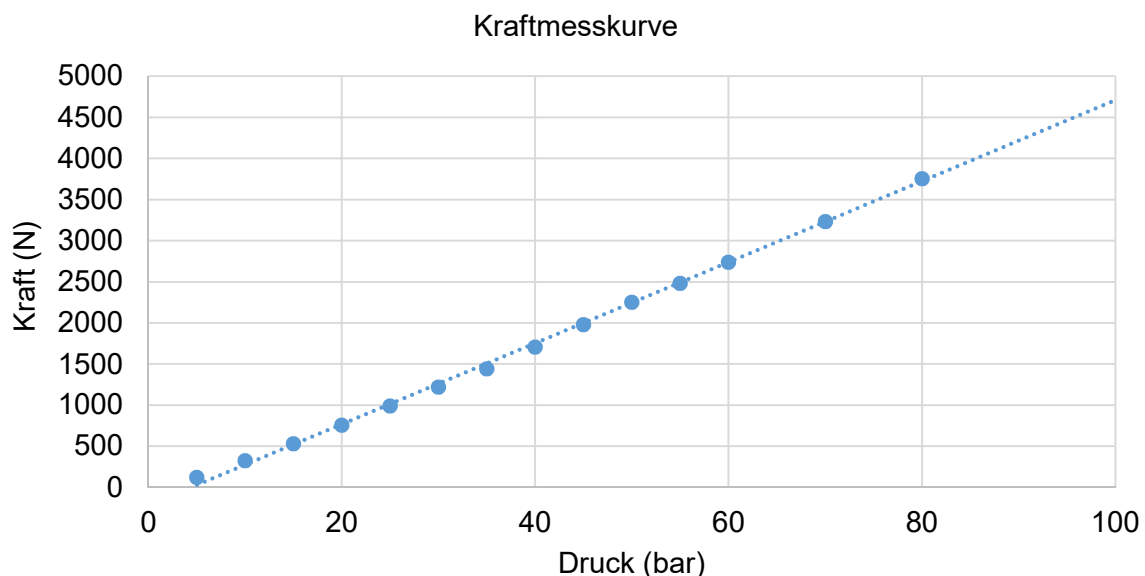


Bild 6: Zusammenhang zwischen eingestelltem Druck und resultierender Kraft bei der Schweißanlage der Firma WIDOS

Zur Überprüfung der Heizelementtemperatur der Schweißanlage wurde das Heizelement aufgeheizt und die eingestellte Temperatur von 220 °C mit der tatsächlichen Temperatur

verglichen. Die auf der Oberfläche des Heizelements gemessenen Temperaturen sowie die Temperaturverteilung werden in Bild 7 gezeigt.

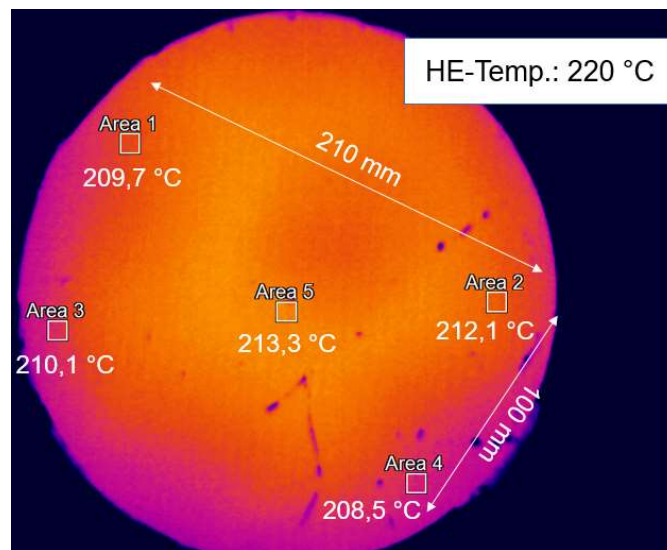


Bild 7: Temperaturverteilung auf der Oberfläche des Heizelements der Schweißanlage der Firma WIDOS bei einer eingestellten Temperatur von 220 °C

Die Temperaturverteilung wurde mit einer Wärmebildkamera aufgenommen, während die Temperaturen mit einem Digitalthermometer gemessen wurden. Die Verteilung der fünf Messpunkte entspricht der Lage eines Fügeteils mit einer Fügefläche von 100 mm x 210 mm am Heizelement. Somit wurde der relevante Bereich des Heizelements überprüft. Die Werte zeigen, dass ein maximaler Temperaturgradient von der Mitte zum Rand des Heizelements von etwa 5 K vorliegt. Die wärmste Position befindet sich in der Mitte des Heizelements und beträgt 213,3 °C. Aufgrund der Differenz zur Soll-Temperatur von 220 °C wurde für die anschließenden Versuche mit der Schweißanlage jeweils eine um 7 °C höhere Temperatur eingestellt, um sicherzustellen, dass die Ist-Temperatur die geforderte Soll-Temperatur erreicht.

Weiterhin wurde für die Durchführung der Schweißversuche eine manuell zu bedienende, pneumatische Heizelement-Stumpfschweißmaschine entwickelt, welche eine Mindestkraft von 50 N sowie eine maximale Kraft von 20.000 N aufbringen kann. Der hohe Kraftbereich wird durch den Einsatz verschiedener Arbeitszylinder realisiert und ermöglicht das Schweißen von Halbzeugen mit großen Fügeflächen sowie das Variieren des Fügedrucks. Die Arbeitsbreite beträgt 400 mm, was durch eine entsprechende Dimensionierung des Heizelements sowie eine geeignete Probenaufnahme realisiert wurde. Die Fügedruckaufbauzeit ist mittels einer Drossel einstellbar. Außerdem kann die Anlage durch eine Schwenkarretierung sowohl horizontal als auch vertikal betrieben werden. Die Schweißanlage mit ihren einzelnen Bestandteilen wird in Bild 8 gezeigt.



Nummer	Maschinenelement / Funktion
1	Heizelement
2	Fügeteil
3	Platteneinsatz mit Winkelanschlag
4	Spannwerkzeug
5	Bedienpult
6	Pneumatikanschluss
7	Schwenkarretierung

Bild 8: Heizelement-Stumpfschweißmaschine zum Schweißen dickwandiger Halbzeuge

Mit den verschiedenen Arbeitszylindern wurden jeweils mehrere Druckstufen angefahren, um den Druck-Kraft-Verlauf zu ermitteln. Analog zur hydraulischen Schweißanlage der Firma WIDOS hat sich auch hier eine lineare Abhängigkeit gezeigt. Ebenso wurde das Heizelement mit einer Wärmebildkamera und einem Digitalthermometer überprüft. Die Wärmeverteilung sowie die gemessenen Temperaturen werden in Bild 9 gezeigt.

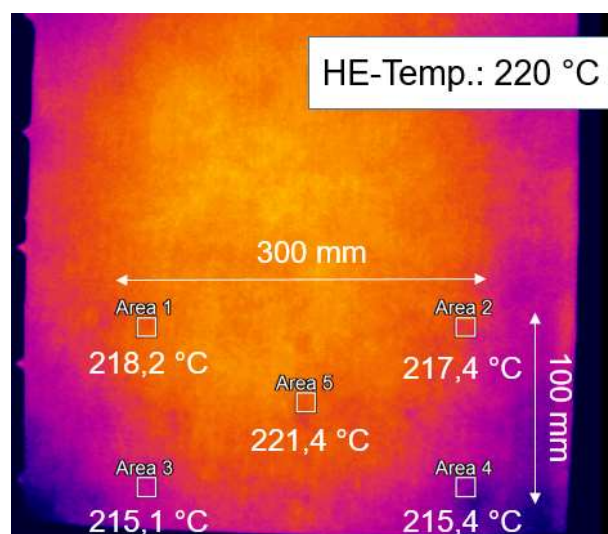


Bild 9: Temperaturverteilung auf der Oberfläche des Heizelements der Schweißanlage zum Fügen dickwandiger Halbzeuge bei einer eingestellten Temperatur von 220 °C

Die Temperaturen wurden im relevanten, unteren Bereich des Heizelements, in dem eine Platte mit einer Fügefläche von 100 mm x 300 mm während des Anwärmens anliegt, gemessen. Der maximale Temperaturgradient von der Mitte zum Rand des Heizelements beträgt etwa 6 K. Da die höchste gemessene Temperatur nur knapp oberhalb der eingestellten Temperatur von 220 °C liegt, wurde für die anschließenden Schweißversuche die eingestellte Soll-Temperatur nicht korrigiert.

Um ein Anhaften der Schmelze am Heizelement nach dem Anwärmen der Fügeiteile zu verhindern, wurden beide Heizelemente mit einer PTFE-Folie beschichtet.

### 3.3 Versuchsplanung und –durchführung

#### 3.3.1 Überblick über die durchgeführten Versuche

Tabelle 3 zeigt einen Überblick über die durchgeführten Versuche, mit denen das Grundmaterial charakterisiert und anschließend heizelementgeschweißt wurde.

Tabelle 3: Überblick über die Versuchsdurchführung

Versuch	Ziele des Versuchs
<b>Charakterisierung des Grundmaterials</b>	
Aufschmelzversuche	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ermittlung der Schmelzeschichtdicke von PE und PP</li> <li>- Zusammenhang zwischen in der DVS-Richtlinie vorgegebener Anwärmzeit und resultierender Schmelzeschichtdicke</li> <li>- Einfluss der Wanddicke auf die Schmelzeschichtdicke</li> <li>- Lokale Unterschiede auf der Fügeebene</li> </ul>
Temperversuche	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ermittlung des Eigenspannungszustandes von Rohren und Platten aus PE und PP</li> <li>- Einfluss des Herstellverfahrens</li> </ul>
<b>Schweißversuche</b>	
Heizelementstumpfschweißen nach DVS	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ermittlung der Schweißnahtgüte von nach DVS geschweißten Bauteilen</li> </ul>
Parametervariationen	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ermittlung des Verbesserungspotenzials der Schweißnahtgüte durch Veränderung einzelner Parameter</li> </ul>
Modifizierung des Prozesses (Abschirmversuche)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Beeinflussung der Schmelzeschichtbildung (basierend auf Erkenntnissen zum Aufschmelzverhalten und zur Festigkeit geschweißter Bauteile)</li> </ul>

Zum Erreichen der Zielsetzung des Forschungsvorhabens wurden zunächst Grundmaterialuntersuchungen an PE und PP durchgeführt. Aufschmelzversuche am Heizelement dienten dabei der Charakterisierung der unterschiedlichen Grundmaterialien hinsichtlich ihrer Schmelzeschichtbildung. Weiterhin wurden Temperversuche durchgeführt, um den Eigenspannungszustand der Grundmaterialien qualitativ zu ermitteln.

Die Schweißversuche wurden zunächst mit den in der DVS-Richtlinie vorgegebenen Parametern durchgeführt. Anschließend wurden verschiedene Parameter variiert, um den Einfluss einer Parametervariation auf die Schweißnahtgüte zu ermitteln. Ebenso wurde, basierend auf ersten Erkenntnissen zum Aufschmelzverhalten und zur Festigkeit hezelementgeschweißter Bauteile, der Hezelementschweißprozess modifiziert. Mit sogenannten Abschirmversuchen wurde die Seiteneinstrahlung des Hezelements auf die anzuwärmenden Fügeteile unterdrückt und somit Einfluss auf die Schmelzeschichtbildung genommen.

### 3.3.2 Aufschmelzversuche

Zur Bestimmung des Aufschmelzverhaltens wurde zunächst die Temperatur zwischen der Fügefläche eines Fügeteils aus PE und dem Hezelement gemessen. Vorherige Messungen haben bereits gezeigt, dass die beiden verwendeten Hezelemente während des freien Aufwärmens, also ohne Kontakt zu einem Füge teil, lediglich geringe Temperaturschwankungen aufweisen. Bei dieser Messung wurde hingegen untersucht, ob die Fügeteile während des Anwärmens die Hezelementtemperatur beeinflussen. Das Ziel der Messung war daher die Ermittlung des tatsächlich während des Anwärmens eines Fügeteils auf der Hezelementoberfläche auftretenden, lokalen und zeitlichen Temperaturprofils. Dadurch konnte geklärt werden, ob Temperaturschwankungen am Hezelement während der Anwärmphase Auswirkungen auf das Aufschmelzverhalten der Kunststoffhalbzeuge haben können. Bei großen Bauteilen ist die Temperaturverteilung auf der Fügefläche aufgrund der längeren Anwärmzeiten sowie der großen Fügeflächen, welche am Hezelement anliegen, besonders relevant. Die Temperatur wurde mittels Thermoelementen Typ K während des Anwärmens einer 100 mm dicken Kunststoffplatte an drei verschiedenen Positionen zwischen dem Hezelement und der Fügefläche gemessen. Die drei Thermoelemente wurden in gleichmäßigen Abständen von der Mitte zum Rand der Fügefläche positioniert. Entsprechend der in der DVS-Richtlinie 2207-1 für eine Wanddicke von 100 mm vorgegebenen Anwärmzeit wurde die Kunststoffplatte 1.000 s angewärmt. Bild 10 zeigt die Positionen der Thermoelemente zur Bestimmung der Temperatur auf der Fügefläche eines Fügeteils mit einer Wanddicke von 100 mm.

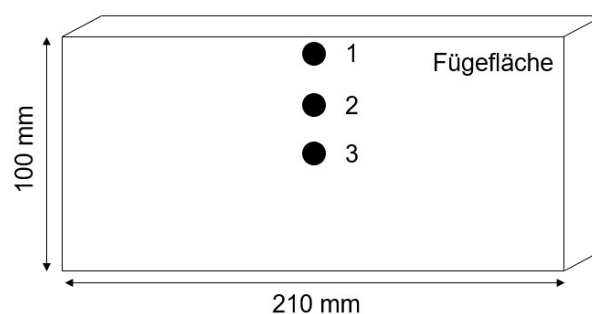


Bild 10: Positionen zur Temperaturmessung zwischen dem Hezelement und der Fügefläche

Weiterhin wurden Temperaturmessungen an zwei verschiedenen Positionen in einer PE-Platte durchgeführt. Dies ermöglichte eine Aussage über die Temperaturverteilung, welche während des Anwärmens nicht direkt am Heizelement, sondern im Material des Fügeteils vorliegt. Dazu wurden Löcher von oben in das Fügeteil gebohrt, was Bild 11 zeigt. Die Fügeteile hatten eine Wanddicke von 30 mm sowie eine Breite von 90 mm. Die Löcher wurden in der Mitte und am Rand des Fügeteils angebracht, um einen möglichen Temperaturunterschied vom Rand zur Mitte ermitteln zu können. Die Bohrungen hatten eine Tiefe von 15 mm sowie einen Durchmesser von 6 mm. Die Mittelpunkte der Bohrungen befanden sich in einem Abstand von 5 mm zur Fügefläche. Zur Temperaturmessung wurden die gebohrten Löcher mit Wärmeleitpaste ausgefüllt. Anschließend wurden Thermoelemente Typ K in die Bohrungen eingebracht. Um einen Einfluss von Unebenheiten der Fügeteile auf die Temperaturmessung auszuschließen, wurden die Fügeteile vor dem Anwärmen an das Heizelement angeglich. Dabei wurde darauf geachtet, dass das Material zwischen dem Heizelement und den Bohrungen nicht vollständig weggeschmolzen wurde.

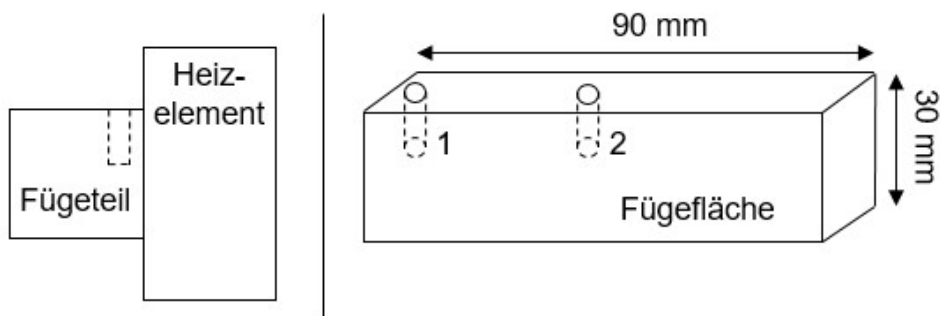


Bild 11: Schematische Darstellung zur Temperaturmessung im Material während des Anwärmens

Zur Ermittlung der Schmelzeschichtdicke wurden Platten aus PE und PP mit einer Wanddicke von 30 mm drucklos am Heizelement erwärmt. Die Messung der Schmelzeschichtdicke wurde jeweils mittig am unteren Rand der Fügefläche und somit immer an der gleichen Position durchgeführt, was Bild 12 zeigt. Um die Schmelzeschichtdicke in Abhängigkeit der Anwärmezeit ermitteln zu können, wurden verschiedene Anwärmezeiten von 100 s bis 1.000 s gewählt.

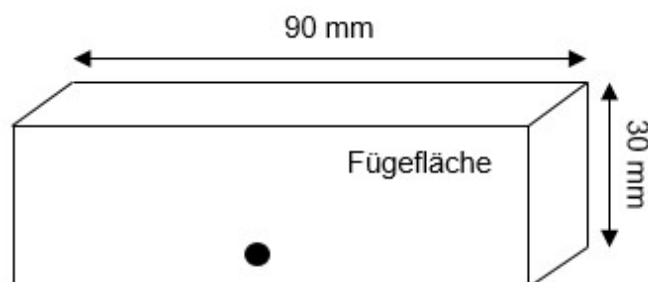


Bild 12: Messposition auf der Fügefläche zur Ermittlung der Schmelzeschichtdicke von PE und PP

Um den lokalen Einfluss der Messposition auf der Fügefläche zu ermitteln und ein Schmelzeschichtdickenprofil erstellen zu können, wurden PE-Platten mit unterschiedlichen Wanddicken erwärmt und die Schmelzeschichtdicke jeweils am oberen und am unteren Rand sowie in der Mitte der Fügefläche gemessen. Bild 13 zeigt die jeweiligen Messpositionen auf der Fügefläche. Die Anwärmzeiten für die Wanddicken von 30, 70 und 100 mm richteten sich nach der jeweiligen Vorgabe in der DVS-Richtlinie 2207-1 und betragen dementsprechend 300, 700 und 1.000 s.

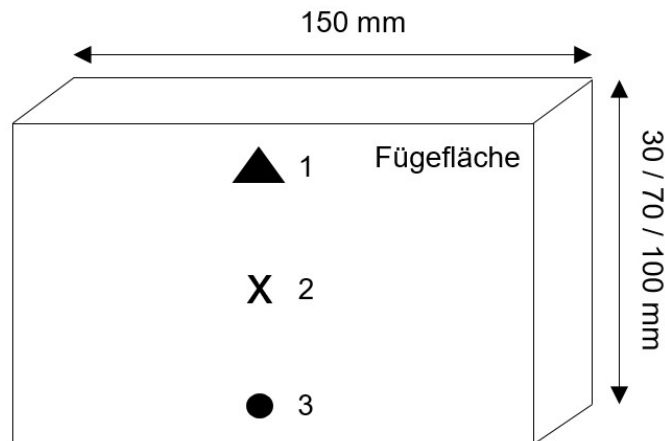


Bild 13: Messpositionen auf der Fügefläche von PE zur Ermittlung eines Schmelzeschichtdickenprofils

Die Heizelementtemperatur für die Versuche zur Bestimmung des Aufschmelzverhaltens der Materialien wurde nach DVS 2207-1 für PE (220 °C) und DVS 2207-11 für PP (210 °C) ausgewählt.

Zur messtechnischen Ermittlung der Schmelzeschichtdicke wird in der Regel der erwärmte Fügebereich mit einem Druck von über 2 N/mm<sup>2</sup> gegen eine kalte Oberfläche gepresst. Aus veröffentlichten Arbeiten ist bekannt, dass der dabei zurückgelegte Weg zu ca. 95 % der Schmelzeschichtdicke des Kunststoffes nach dem Erwärmen entspricht [9, 41]. Aufgrund der hier gegebenen Besonderheit hoher Wanddicken ist bei dieser Methode allerdings zu erwarten, dass der Schmelzefluss nicht ausreicht, um nahezu den gesamten Schmelzeanteil vor dem Erstarren der Schmelze aus der Fügeebene zu pressen. Außerdem wäre es mit dieser Art der Messung nicht möglich, die Schmelzeschichtdicke lokal zu bestimmen. Daher wurde die Schmelzeschichtdicke mit einem fixierten Messschieber ermittelt. Den Messaufbau zeigt Bild 14. Dazu wurde das Fügeteil nach dem Anwärmen am Heizelement aus der Heizelementschweißmaschine entnommen und unter den fixierten Messschieber gelegt. Anschließend konnte mit dem Messschieber an verschiedenen Positionen in die Schmelzeschicht gestochen und die Schmelzeschichtdicke abgelesen werden. Trotz der manuellen Bedienung war aufgrund der Fixierung des Messschiebers eine reproduzierbare



Messung der Schmelzeschichtdicke möglich. Zur Bestätigung der gemessenen Schmelzeschichtdicken wurden außerdem vereinzelte mikroskopische Analysen durchgeführt.

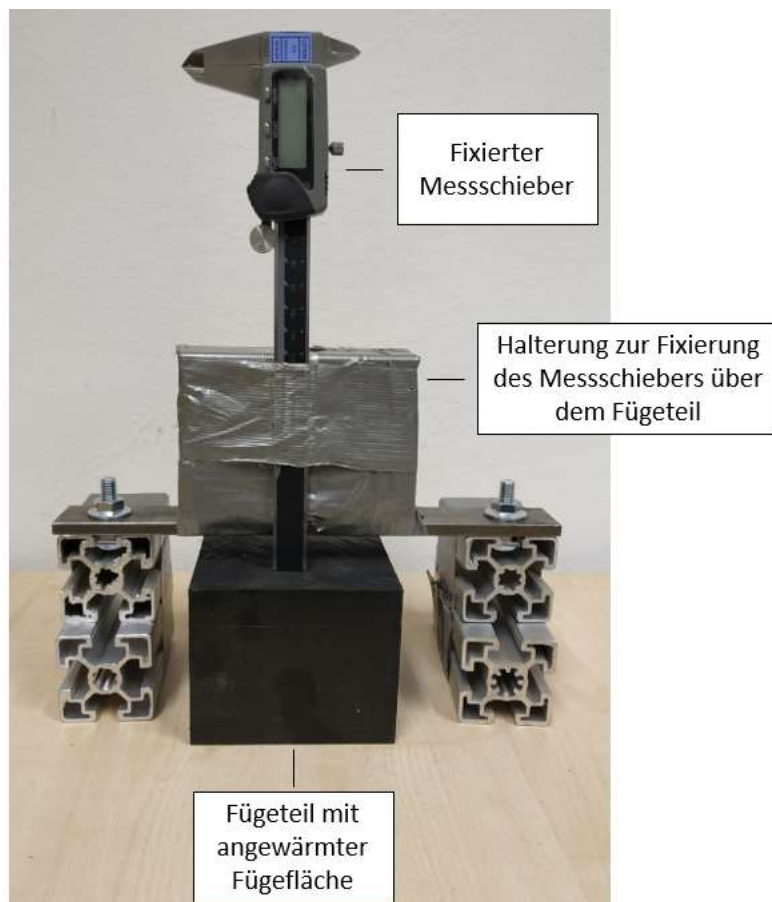


Bild 14: Fixierter Messschieber zur Messung der Schmelzeschichtdicke

### 3.3.3 Temperversuche

Zur qualitativen Ermittlung des Eigenspannungszustands der Grundmaterialien wurden Temperversuche durchgeführt. Dazu wurden Streifenproben aus gepressten und extrudierten PE- und PP-Platten sowie aus einem PE-Rohr mit den in Bild 15 gezeigten Abmaßen herauspräpariert. Die Proben wurden mehrere Stunden in einem Ofen 10 bis 15 °C unterhalb der Kristallitschmelztemperatur getempert. Die Stärke der während des Temperns auftretenden Krümmung der Streifenproben gibt einen Hinweis auf den im Grundmaterial vorhandenen Grad der Eigenspannungen.

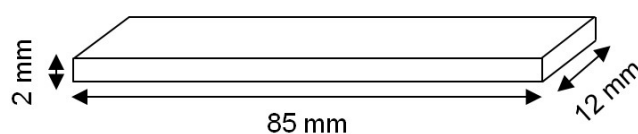


Bild 15: Probenabmessungen der Streifenproben für die Temperversuche

### 3.3.4 Schweißversuche

#### 3.3.4.1 Schweißparameter

Die Heizelementschweißversuche wurden zunächst mit den in der DVS-Richtlinie 2207-1 für PE und 2207-11 für PP angegebenen Parametern durchgeführt. Tabelle 4 zeigt die in den Richtlinien für die verwendeten Materialien und Wanddicken vorgegebenen Heizelementtemperaturen, Fügedrücke und Anwärmzeiten. Mit diesen drei Parametern wurden im weiteren Verlauf des Forschungsvorhabens auch Variationen durchgeführt. Weiterhin werden in den Richtlinien der Angleich- und der Anwärmdruck sowie die Zeiten für das Angleichen, das Umstellen und das Fügen vorgegeben. Diese Parameter wurden bei der Durchführung der Schweißversuche jeweils eingehalten.

Tabelle 4: Schweißparameter nach DVS 2207-1 für PE und 2207-11 für PP

Material	Wanddicke (mm)	Heizelementtemperatur (°C)	Fügedruck (MPa)	Anwärmzeit (s)
PE100	30	220	0,15	300
	70			700
PE100 RC	100			1.000
PP-H	30	210	0,1	305
	50			450
	70			546

Für die Parametervariationen wurden die Materialien PE100 und PP-H verwendet. Bei beiden Materialien wurde jeweils eine Verdopplung und eine Vervierfachung des Fügedrucks durchgeführt. Bei PE fand außerdem eine Halbierung des Fügedrucks statt. Die Anwärmzeit wurde bei beiden Materialien mehrfach variiert, sodass sowohl mit erhöhten als auch mit verkürzten Anwärmzeiten geschweißt wurde. Bei PE wurde außerdem eine verkürzte Anwärmzeit mit einer erhöhten Heizelementtemperatur kombiniert. Tabelle 5 zeigt eine Übersicht über die durchgeführten Parametervariationen.

Tabelle 5: Übersicht über die Parametersätze mit variierten Parametern

<b>Material</b>	<b>Wanddicke (mm)</b>	<b>Heizelementtemperatur (°C)</b>	<b>Fügedruck (MPa)</b>	<b>Anwärmzeit (s)</b>
PE100	70	220	<b>0,075</b>	700
	30		<b>0,3</b>	300
			<b>0,6</b>	
	100		<b>0,15</b>	<b>360</b>
				<b>500</b>
				<b>200</b>
		<b>240</b>		
PP-H	30	210	<b>0,2</b>	305
			<b>0,4</b>	
			<b>0,1</b>	<b>245</b>
				<b>365</b>
				<b>430</b>

### 3.3.4.2 Abschirmversuche

Neben den Parametervariationen wurden sogenannte Abschirmversuche durchgeführt, bei denen mit einer Modifizierung des Heizelementschweißprozesses Einfluss auf die Schweißnahtgüte genommen werden sollte. Diese Versuche basierten auf ersten Erkenntnissen, welche durch die Untersuchungen zur Schmelzeschichtbildung sowie zur Schweißnahtfestigkeit ermittelt wurden.

Bei den Abschirmversuchen wurde auf verschiedene Arten die Seiteneinstrahlung des Heizelements auf die Fügeteile reduziert, um die Ausbildung der Schmelzeschicht zu beeinflussen. Bild 16 zeigt die erste Abschirmungsvariante, bei der ein Fügeteil, welches am Heizelement anliegt, mit einer Aluminiumfolie ummantelt ist. Die Aluminiumfolie sorgt für eine Reduzierung der Seiteneinstrahlung während des Anwärmprozesses.



Bild 16: Abschirmung der Seiteneinstrahlung des Heizelements mittels Aluminiumfolie

Weitere Versuche wurden mit einer veränderten Positionierung der Fügeteile am Heizelement durchgeführt, was Bild 17 zeigt. In Bild 17 (links) ist die standardmäßige Positionierung des Fügeteils in der Mitte zu sehen. In dieser Position wird das Fügeteil an allen vier Seiten der Seiteneinstrahlung des Heizelements während des Anwärmens ausgesetzt. Daher wurden Versuche durchgeführt, bei denen die Seiteneinstrahlung durch eine abgeänderte Position des Fügeteils teilweise reduziert wurde. Durch die Platzierung am unteren Rand des Heizelements (siehe Bild 17 rechts) wird der Teil der Seiteneinstrahlung, welcher normalerweise von unten auf das Fügeteil einwirkt, eliminiert.

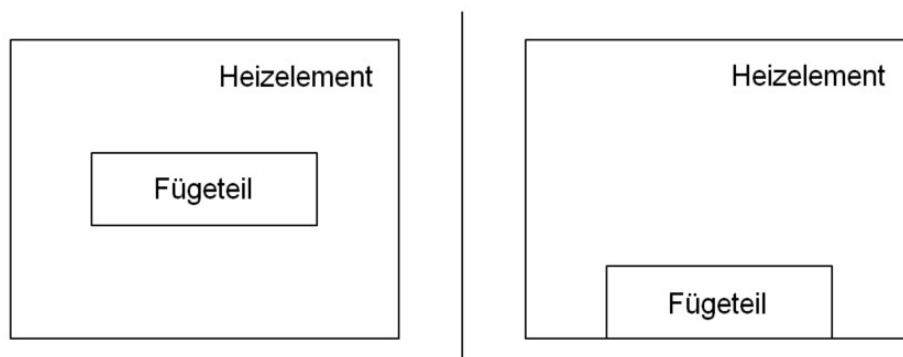


Bild 17: Positionierung des Fügeteils am Heizelement; links: In der Mitte des Heizelements; rechts: Am unteren Rand des Heizelements

## 4 Analytik

### 4.1 Rheologische Untersuchungen

Zur Bestimmung der rheologischen Eigenschaften des Grundmaterials wurden Versuche an einem Rotationsrheometer vom Typ AR2000ex der Firma TA Instruments nach DIN 53019 [79] mit dem System Platte-Platte durchgeführt. Die Ergebnisse der rheologischen Untersuchungen dienten zur Charakterisierung des Fließverhaltens der Schmelze während der Fügephase.

Für die Messung in Oszillation wurden aus dem Grundmaterial 3 mm dicke Prüfkörper mit einem Durchmesser von 25 mm ausgestanzt (siehe Bild 18). Die oszillatorische Messung ermöglicht die Bestimmung der komplexen Viskosität der geprüften Materialien. Als Spülgas wurde Luft verwendet. Die Prüffrequenz betrug 1 Hz und die Heizrate 5 K/min.

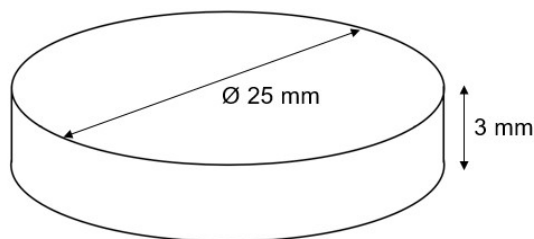


Bild 18: Prüfkörper zur Bestimmung der rheologischen Eigenschaften des Grundmaterials

### 4.2 Prozessbegleitende Abkühluntersuchungen

Zur Ermittlung der Kristallisationsbedingungen in der Abkühlphase wurden Schweißversuche durchgeführt, bei denen während der Umstellphase Thermoelemente Typ K in der Fügeebene platziert wurden. Bild 19 zeigt die Positionen der Thermoelemente in der Schweißnaht. Durch die Platzierung in der Mitte und am unteren Rand konnten lokale Temperatur-Zeit-Verläufe ermittelt und Aussagen über die Kristallisation in der Schweißnaht getroffen werden.

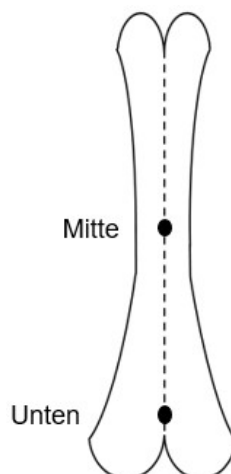


Bild 19: Positionen der Thermoelemente in der Fügeebene während des Abkühlprozesses

## 4.3 Optische Untersuchungen

### 4.3.1 Lichtmikroskopische Analyse

Für die lichtmikroskopische Analyse der Schweißnähte wurde ein Olympus BX51 der Firma Olympus, welches sowohl für Durchlicht- als auch Auflichtaufnahmen geeignet ist, verwendet. Das Mikroskop ist mit einer 12-Megapixel-Kamera ausgestattet, mit der die Aufnahmen in Verbindung mit einer entsprechenden Bildbearbeitungssoftware digitalisiert werden können. Zur Darstellung und Beschreibung der morphologischen Details der Schweißnähte wurden Durchlichtaufnahmen mit polarisiertem Licht und Blaufilter erzeugt. Zur Präparation der Proben für die Mikroskopie wurde ein Rotationsmikrotom RM 2155 der Firma Leica verwendet. Damit wurden 10 µm dicke Dünnschnitte der zu untersuchenden Materialien erzeugt. Aufgrund der hohen Wanddicke der Proben von, inklusive Schweißwulst, teilweise über 100 mm wurden die Proben zur Herstellung der Dünnschnitte in mehrere Bereiche segmentiert. Diese Bereiche wurden anschließend im Mikroskop einzeln abgerastert und mithilfe der Bildbearbeitungssoftware zu einem Mikroskopiebild zusammengesetzt.

Die Mikroskopiebilder wurden einerseits zur Betrachtung von Besonderheiten der Gefügestruktur sowohl des Grundmaterials als auch der Schweißnähte mit unterschiedlichen Wanddicken verwendet. Andererseits ermöglichten die Aufnahmen präzise geometrische Betrachtungen der Schweißnähte. Durch die lokale Vermessung der Restschmelzeschichtdicke konnten beispielsweise geometrische Unterschiede zwischen der Mitte und dem Rand der Schweißnaht ermittelt werden. Außerdem wurde das Verhältnis zwischen der Restschmelzeschichtdicke  $L$  und der Wanddicke  $d$  ( $L/d$ -Verhältnis) für unterschiedliche Wanddicken analysiert. Bild 20 zeigt als Beispiel die Vermessung einer mikroskopierten Schweißnaht mit einer Wanddicke von 10 mm.

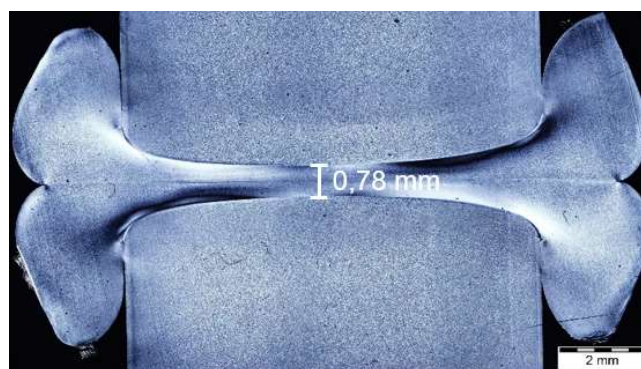


Bild 20: Vermessung der Restschmelzeschichtdicke einer Schweißnaht mit einer Wanddicke von 10 mm

Weiterhin wurde die Mikroskopie zur optischen Schadensanalyse genutzt. Dabei wurde vor allem der Bruchverlauf nach der Zeitstand-Zugprüfung analysiert. Außerdem fanden mithilfe der Mikroskopie vereinzelt Messungen der Schmelzeschichtdicke statt.

### 4.3.2 Visualisierung des Schmelzefflusses

Für die optische Untersuchung des Fließverhaltens der Schmelze während der Fügephase wurden natur- und rußgefüllte Platten geschichtet und unter Druck im Bereich der Kristallitschmelztemperatur zu einem Block verbunden. Bild 21 zeigt einen Verbund aus insgesamt elf, abwechselnd rußgefüllten und naturfarbenen Platten aus PP mit einer jeweiligen Plattendicke von 6 mm. Daraus ergibt sich eine Wanddicke von 66 mm. Die Platten wurden zunächst jeweils einzeln mit einem Warmgasstrahl erhitzt und anschließend unter leichtem, manuell aufgebrachtem Druck miteinander verbunden. Dabei wurde darauf geachtet, dass die Erwärmung nur bis unterhalb der Kristallitschmelztemperatur stattfand, sodass es nicht zu einem Fließen des Materials während des Pressvorgangs kommen konnte.

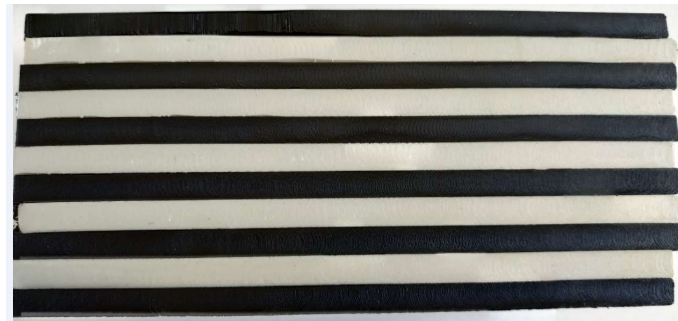


Bild 21: Plattenverbund aus Polypropylen zur Visualisierung des Schmelzefflusses

Bild 22 zeigt einen Plattenverbund aus 25 abwechselnd weißen und schwarzen Platten aus PE mit einer jeweiligen Plattendicke von 4 mm und somit einer gesamten Wanddicke von 100 mm. Es wurden Plattenverbunde mit unterschiedlichen Wanddicken hergestellt und paarweise heizelementgeschweißt. Um eine optische Auswertung der während des Fügens zurückgelegten Fließwege durchführen zu können, musste der Angleichweg so gering wie möglich gehalten werden. Daher wurden die Fügeflächen der Plattenverbunde vor dem Schweißen plangefräst. Dies ersetzte allerdings nicht vollständig die Angleichphase.



Bild 22: Plattenverbund aus Polyethylen zur Visualisierung des Schmelzefflusses

Bild 23 zeigt beispielhaft die Mikroskopieaufnahme eines hezelementgeschweißten Plattenverbunds aus PP mit unterschiedlich gefärbten Platten. Durch die unterschiedliche Färbung ist eine optische Auswertung der Fließvorgänge während des Fügevorgangs möglich. Die Dicke der einzelnen Platten ist ein limitierender Faktor für die erreichbare Auflösung des Schmelzeflusses.

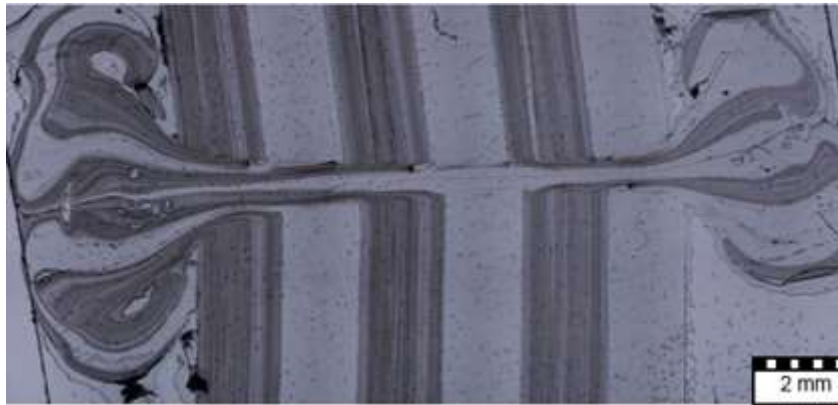


Bild 23: Visuelle Darstellung der Fließvorgänge beim Hezelementschweißen von PP-H

#### 4.4 Mechanische Prüfung

Zur mechanischen Untersuchung der Proben wurden Kurz- und Langzeitprüfungen an den Grundmaterialien und Schweißverbindungen durchgeführt. Zur Bestimmung der kurzzeitigen mechanischen Eigenschaften dienten der Kurzzeit-Zugversuch in Anlehnung an die DVS-Richtlinie 2203-2 [80] sowie der Technologische Biegeversuch nach DVS 2203-5 [81] und der Schlagbiegeversuch nach DIN EN ISO 179-2 (Charpy) [82].

Eine besondere Rolle in Hinsicht auf die industrielle Anwendung der Materialien im Rohrleitungsbau spielt die mechanische Langzeitfestigkeit [23, 47]. Die langzeitmechanischen Eigenschaften der Schweißnähte wurden daher im Rahmen des Forschungsvorhabens schwerpunktmäßig untersucht. Dazu wurde der Zeitstand-Zugversuch nach der DVS-Richtlinie 2203-4 [83] durchgeführt.

Die Probenentnahme aus Material mit Wanddicken über 30 mm wird in den Normen und Richtlinien nicht genau definiert. Zur orts aufgelösten Prüfung der gesamten Wanddicke wurden die Proben teilweise segmentiert aus den Schweißnähten entnommen.

Tabelle 6 zeigt einen Überblick über die mechanische Analyse und die zum jeweiligen Verfahren gehörende Richtlinie bzw. Norm.



Tabelle 6: Überblick über die durchgeführten mechanischen Untersuchungen

Verfahren	Richtlinie / Norm
Kurzzeit-Zugversuch	DVS-Richtlinie 2203-2
Technologischer Biegeversuch	DVS-Richtlinie 2203-5
Schlagbiegeversuch	DIN EN ISO 179-2 (Charpy)
Zeitstand-Zugversuch	DVS-Richtlinie 2203-4

#### 4.4.1 Kurzzeit-Zugversuch

Die Durchführung der Kurzzeit-Zugversuche erfolgte in Anlehnung an DVS 2203-2 an einer Universalprüfmaschine Z250 der Firma ZwickRoell mit einer 50 kN Kraftmessdose und Parallelspannbacken. Die Entnahme der Probekörper aus geschweißten Platten mit einer Wanddicke von 30 mm zeigt Bild 24. Aus den Platten wurden jeweils 25 mm breite Streifen spanend mit einer Bandsäge entnommen. Zur Vermeidung von Randeinflüssen wurde vorher von den geschweißten Platten beidseitig ein 7,5 mm breiter Randstreifen entfernt.

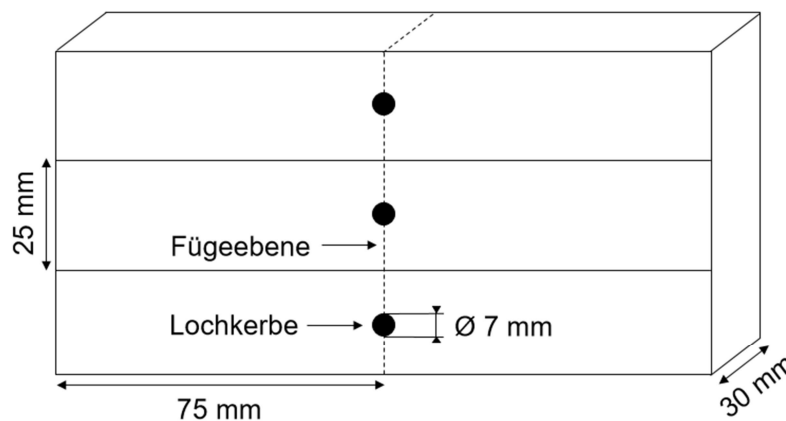


Bild 24: Schematische Darstellung der Probenentnahme für den Kurzzeit-Zugversuch (mit Darstellung der Lochkerbe bei PE) bei einer Wanddicke von 30 mm

Bei geschweißten Platten mit Wanddicken über 30 mm wurden die Zugproben segmentiert entnommen. Zum einen war dies nötig, da die Prüfmaschine sowohl in ihren geometrischen Abmessungen als auch in der maximalen Kraftaufbringung limitiert ist. Zum anderen hatte die Segmentierung den Vorteil, dass dadurch eine lokale Analyse der Zugfestigkeit möglich wurde. Bild 25 zeigt als Beispiel die Probenentnahme aus einer geschweißten Platte mit einer Wanddicke von 100 mm. Die Zugproben hatten eine Breite von 15 mm und eine Dicke von 10 mm, sodass insgesamt neun Zugproben aus einer 100 mm dicken Platte entnommen werden konnten.

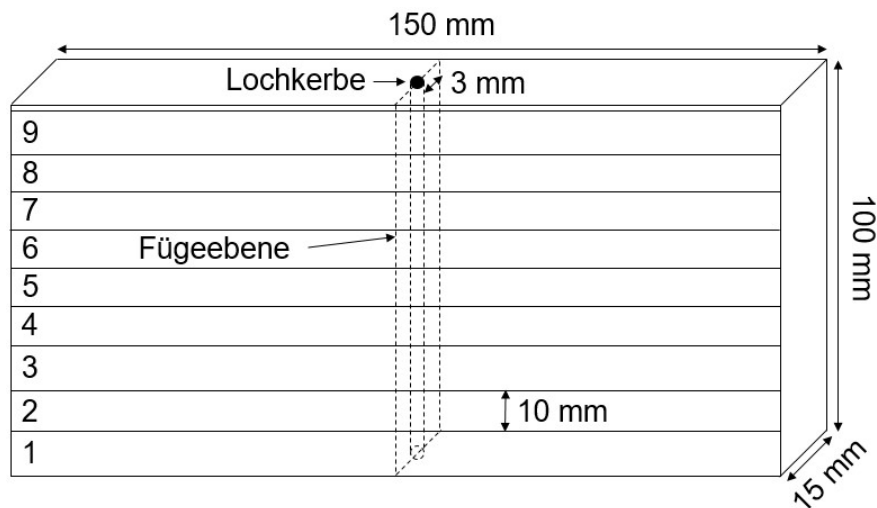


Bild 25: Schematische Darstellung der Probenentnahme für den Kurzzeit-Zugversuch (mit Darstellung der Lochkerbe bei PE) bei Wanddicken über 30 mm (Beispiel: 100 mm Wanddicke)

Aufgrund des duktilen Verhaltens wurden die Zugproben aus PE vor der Prüfung mit einer Lochkerbe versehen, um ein Versagen in der Schweißnaht zu gewährleisten. Bei PP war es aufgrund des spröderen Verhaltens nicht nötig, eine Lochkerbe einzubringen. Jede Prüfung wurde mindestens zweimal wiederholt, sodass es sich bei den ermittelten Werten für die Spannung und die Dehnung um Mittelwerte handelt. Die werkstoffspezifischen Prüfparameter werden in Tabelle 7 gezeigt.

Tabelle 7: Werkstoffspezifische Prüfparameter für den Kurzzeit-Zugversuch

Versuchsparameter	Einheit	Werkstoff	
		Polypropylen	Polyethylen
Freie Einspannlänge	mm	60	
Vorspannkraft	N	50	
Prüfgeschwindigkeit	mm/min	20	50
Lochkerbe	-	nein	ja
Prüfklima	-	23 °C / 50 % RF	

Die Grundmaterialfestigkeit der Versuchswerkstoffe wurde an gefrästen Zugstäben aus den Platten ermittelt. Aus extrudierten Platten wurden die Zugstäbe so entnommen, dass die Zugrichtung parallel zur Extrusionsrichtung der Platte vorlag. Dies entspricht einer zur Fügefläche senkrechten Entnahmerichtung und ermöglichte das Prüfen der Grundmaterial- und Schweißproben in der gleichen Zugrichtung.

#### 4.4.2 Technologischer Biegeversuch

Der Technologische Biegeversuch diente zur Ermittlung des Verformungsverhaltens unter Biegebeanspruchung und erfolgte in Anlehnung an DVS 2203-5. Die Versuche wurden ebenso an einer Universalprüfmaschine Z250 der Firma ZwickRoell mit einer 50 kN Kraftmessdose durchgeführt. Die Probekörper wurden in einer Dreipunktauflage bis zu einem erkennbaren Riss oder Bruch bzw. bis zur maximal möglichen Biegung gebogen. Als Versuchskennwerte wurden die maximale Biegekraft sowie der zurückgelegte Weg bei Maximalkraft ermittelt. Die Geometrie der Probekörper, welche aus geschweißten Platten mit einer Wanddicke von 30 mm entnommen wurden, zeigt Bild 26. Die Abmaße der Probekörper betragen 30 mm x 30 mm x 300 mm (Breite x Dicke x Länge). Auf der Seite, auf der der Biegestempel auflag, wurde die Schweißwulst entfernt, um eine sichere Auflage des Stempels zu ermöglichen.

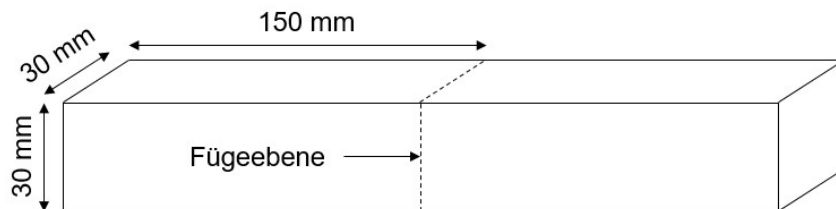


Bild 26: Schematische Darstellung der Probekörper für den Technologischen Biegeversuch bei einer Wanddicken von 30 mm

Aus den Schweißproben mit höheren Wanddicken wurden die Biegeproben segmentiert mit den Abmaßen 20 mm x 10 mm x 300 mm (Breite x Dicke x Länge) entnommen (siehe Bild 27).

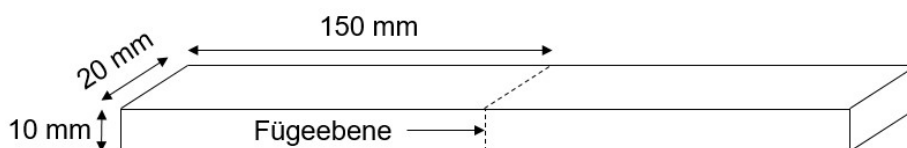


Bild 27: Schematische Darstellung der Probekörper für den Technologischen Biegeversuch bei Wanddicken über 30 mm

Die Versuche wurden sowohl bei Normtemperatur als auch bei verschiedenen niedrigeren Temperaturen durchgeführt. Um eine Prüftemperatur von  $-26\text{ °C}$  zu erreichen, wurden die Probekörper 24 Stunden in einem Gefrierschrank gelagert. Weiterhin wurden Versuche in einer Kältekammer durchgeführt, welche eine Temperatur von  $-40\text{ °C}$  aufweist. Eine Prüftemperatur von etwa  $-160\text{ °C}$  wurde durch Stickstoffkühlung erzielt. Die werkstoffspezifischen Prüfparameter werden in Tabelle 8 gezeigt.

Tabelle 8: Werkstoffspezifische Prüfparameter für den Technologischen Biegeversuch

Versuchsparameter	Einheit	Werkstoff	
		Polypropylen	Polyethylen
Stützweite	mm	160	
Radius der Auflagerrollen	mm	30	
Radius des Biegestempels	mm	15	
Vorspannkraft	N	50	
Prüfgeschwindigkeit	mm/min	20	50
Prüftemperatur	°C	+23	+23 / -26 / -40 / ~ -160

#### 4.4.3 Schlagbiegeversuch

Mit dem Schlagbiegeversuch kann der Einfluss einer schlagartigen Beanspruchung auf die Rissausbreitung im Material ermittelt werden. Die ungekerbten Schweißproben wurden dazu in Anlehnung an DIN EN ISO 179-2 mit einem voll instrumentierten Pendelschlagwerk HIT 25P der Firma ZwickRoell geprüft. Für die Prüfung wurden Streifenproben mit einem Querschnitt von  $4 \times 10 \text{ mm}^2$  und einer Länge von 80 mm bei einer Stützweite von 62 mm verwendet. Die Probekörper wurden mit einem Pendelhammer mit 25 J Arbeitsvermögen schmalseitig und zentral in der Schweißnaht belastet. Den schematischen Prüfaufbau des instrumentierten Schlagbiegeversuchs zeigt Bild 28 [23].

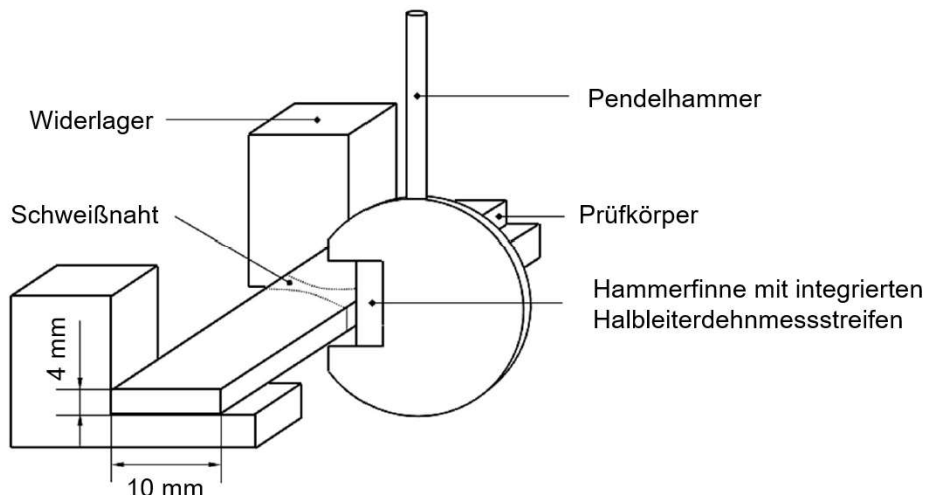


Bild 28: Schematische Prüfanordnung des instrumentierten Schlagbiegeversuchs [23]

Bild 29 zeigt die Probenentnahme für den Schlagbiegeversuch aus den Schweißproben mit unterschiedlichen Wanddicken. Aus einer Wanddicke von 30 mm wurden jeweils drei Proben herauspräpariert (siehe Bild 29 links), während aus Schweißproben mit größeren Wanddicken jeweils fünf Proben (siehe Bild 29 rechts) für den Schlagbiegeversuch entnommen wurden. Bei

den vom Schweißrand entnommenen Probekörpern wurde die Schweißwulst entfernt, um einen Einfluss der geometrischen Wulstkerbe auf das Versagen auszuschließen.

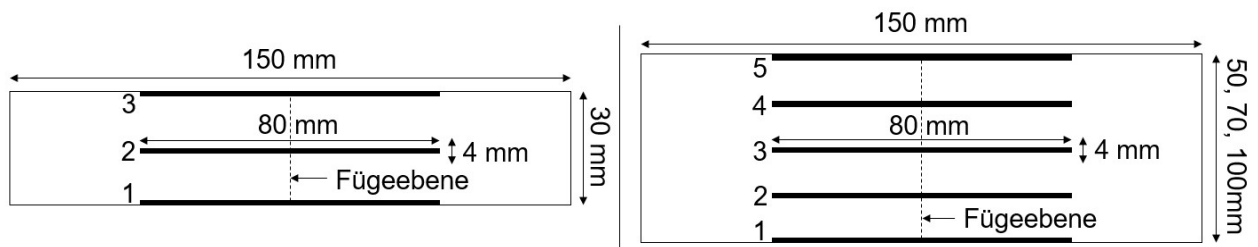


Bild 29: Schematische Darstellung der Probenentnahme für den Schlagbiegeversuch; links: Probenentnahme bei einer Wanddicke von 30 mm; rechts: Probenentnahme bei Wanddicken über 30 mm

Die werkstoffspezifischen Prüfparameter für den Schlagbiegeversuch werden in Tabelle 9 gezeigt. Mit dem Ziel, ein sprödes Versagen zu erreichen, wurden die Probekörper aus PE vor der Versuchsdurchführung teilweise auf 0 °C abgekühlt. Die Durchführung des Schlagbiegeversuchs ermöglicht die Beurteilung des Zähigkeitsverhaltens der Schweißnaht über die Bestimmung der CHARPY-Schlagzähigkeit, die sich aus der verbrauchten Schlagarbeit bezogen auf den Anfangsquerschnitt des Prüfkörpers ergibt.

Tabelle 9: Werkstoffspezifische Prüfparameter für den Schlagbiegeversuch

Versuchsparameter	Einheit	Werkstoff	
		Polypropylen	Polyethylen
Stützweite	mm	62	
Arbeitsvermögen Pendelhammer	J	25	
Schlagrichtung	-	schmalseitig	
Prüftemperatur	°C	+23	+23 / 0

Um Prüfkörper mit größeren Dimensionen zu prüfen und somit einen praxisnahen Schlagbiegeversuch durchzuführen, wurde neben dem Pendelschlagwerk HIT 25P auch ein Schlagpendel mit einem Arbeitsvermögen von 150 J verwendet. Bild 30 zeigt das Schlagpendel, welches ursprünglich zum Prüfen von Holzwerkstoffen konstruiert wurde [84]. Die Probengeometrien, welche bei den Versuchen mit diesem Schlagpendel verwendet wurden, entsprechen denen des Technologischen Biegeversuchs.



Bild 30: Schlagpendel mit einem Arbeitsvermögen von 150 J

#### 4.4.4 Zeitstand-Zugversuch

Zur Beurteilung der langzeitmechanischen Eigenschaften der Schweißnähte wurde der Zeitstand-Zugversuch nach DVS 2203-4 durchgeführt. Im Zeitstand-Zugversuch werden die Probekörper bei konstanter Temperatur, gleichbleibender Zugkraft und konstanten Umgebungsbedingungen bis zum Bruch belastet. Die Prüfungen erfolgten bei einer Prüftemperatur von 95 °C sowie einer Prüfspannung von 4 MPa in einer 2 %-igen wässrigen Netzmittellösung. Als Netzmittel wurde das nichtionische Tensid Arkopal N100 verwendet. Als Kriterium für die Beurteilung der Schweißnahtgüte wurde die Standzeit bis zum Versagen herangezogen. Außerdem wurden mikroskopische Analysen der Bruchverläufe durchgeführt. Bild 31 zeigt die Funktionsweise einer Zeitstand-Zugprüfanlage [9]. Die Schweißproben werden in einem Becken eingespannt, welches mit dem temperierten Prüfmedium gefüllt ist. Die Belastung der Schweißproben erfolgt durch Gewichte, welche über einen Hebelarm mit den Einspannungen verbunden sind. Die genaue Einstellung der Prüfspannung wird mit einer Kraftmessdose durchgeführt. Eine Umwälzpumpe sorgt für eine ständige Durchmischung des Prüfmediums. Zum Zeitpunkt des Probenbruchs fällt das Gewicht auf einen Bruchsensor, bei

dem es sich um einen induktiven Näherungssensor handelt. Die Standzeit bis zum Versagen der Probe kann mithilfe einer Zeitschaltuhr minutengenau abgelesen werden.

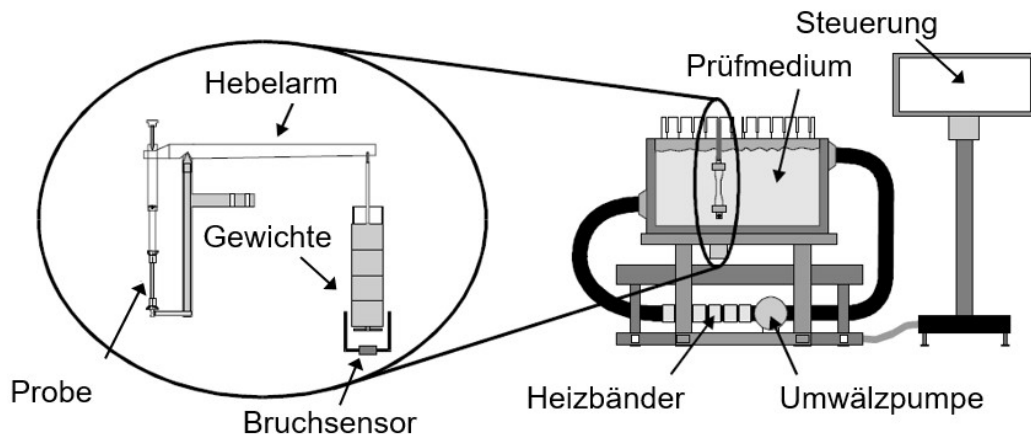


Bild 31: Schematische Darstellung der Funktionsweise einer Zeitstand-Zugprüfanlage [9]

Bild 32 zeigt zwei Prüfanlagen zur Durchführung der Zeitstand-Zugprüfungen. Für die Versuche wurden vier Anlagen mit jeweils zwölf Prüfplätzen verwendet.



Bild 32: Prüfanlagen zur Durchführung der Zeitstand-Zugprüfungen

Für die Durchführung der Zeitstand-Zugversuche wurden Zugproben mit den Abmaßen 10 mm x 10 mm x 150 mm (Breite x Dicke x Länge) aus der Mitte und aus dem unteren Rand der Schweißproben entnommen. Bei der Entnahme der Proben aus dem unteren Rand wurde auf die Entfernung der Wulstkerbe geachtet, um einen Einfluss der geometrischen Kerbe auf die Standzeit auszuschließen. Die Probenentnahme für den Zeitstand-Zugversuch zeigt Bild 33.

Um eine möglichst kerb- und riefenfreie Oberfläche zu erhalten und somit ein vorzeitiges Risswachstum zu vermeiden, wurden die Probekörper an allen vier Seiten geschliffen. Die Versuche wurden jeweils mindestens dreimal wiederholt, sodass es sich bei den ermittelten Standzeiten um Mittelwerte handelt.

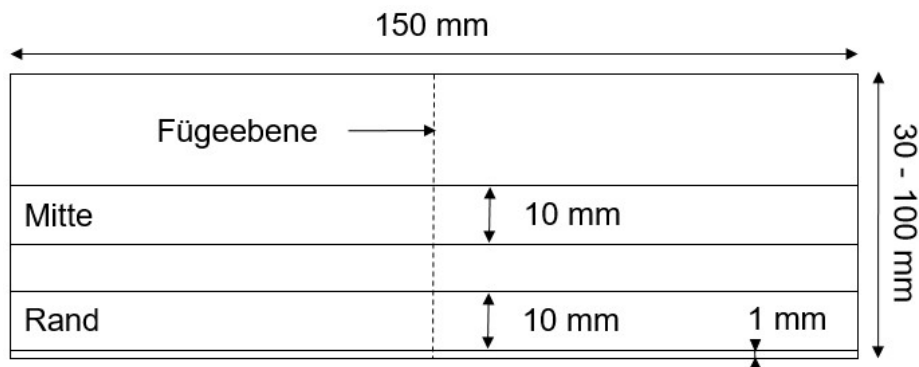


Bild 33: Schematische Darstellung der Probenentnahme für den Zeitstand-Zugversuch

#### 4.4.5 Full Notch Creep Test

Die Langzeitfestigkeit der Grundmaterialien wurde mit dem Full Notch Creep Test (FNCT) nach ISO 16770 [85] und DVS 2203-4 Beiblatt 2 [86] ermittelt. Die Prüfanordnung für den FNCT entspricht der des Zeitstand-Zugversuchs. Die Prüftemperatur betrug 95 °C und die Prüfspannung 4 MPa. Die Zugproben für den FNCT wurden analog zum Zeitstand-Zugversuch aus der Mitte und aus dem unteren Rand der Grundmaterialplatten entnommen. Die Abmaße der Zugproben entsprechen ebenfalls denen des Zeitstand-Zugversuchs. Allerdings wird beim FNCT zusätzlich eine umlaufende Kerbe mittig in die Probe eingebracht, was durch eine Rasierklinge realisiert wurde. Die Tiefe der Kerbe betrug 1,7 mm. Bild 34 zeigt eine schematische Darstellung des Prüfkörpers für den FNCT.

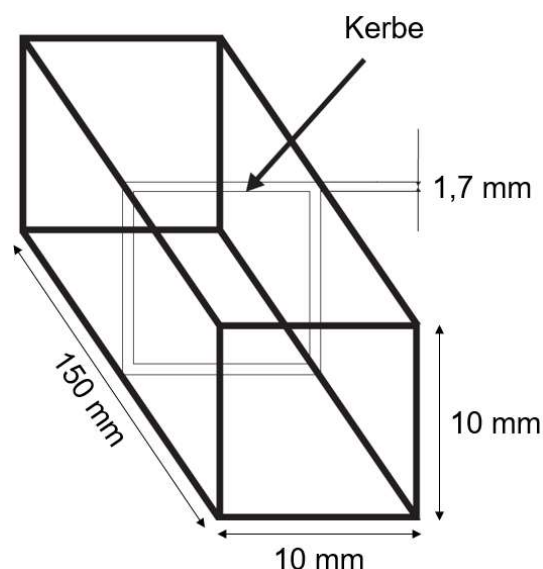


Bild 34: Schematische Darstellung des Prüfkörpers für den Full Notch Creep Test

Prinzipiell hätte die Langzeitfestigkeit der Grundmaterialien auch mit dem Zeitstand-Zugversuch untersucht werden können. Während mit dem Zeitstand-Zugversuch die Gesamtlebensdauer der Probe ermittelt wird, wird durch den FNCT allerdings nur die Kerbempfindlichkeit bzw. die



Rissfortschrittszeit des Versuchsmaterials geprüft. Durch den Wegfall der Rissinitiierungszeit, welche den Hauptteil der gesamten Prüfzeit beim Zeitstand-Zugversuch darstellt, hat der FNCT den Vorteil deutlich kürzerer Prüfzeiten. Aufgrund der teilweise hohen zu erwartenden Standzeiten der Grundmaterialien wurde daher für die Prüfung der Grundmaterialien der FNCT gewählt.

Neben den kürzeren Prüfzeiten hat der FNCT außerdem den Vorteil geringerer Standardabweichungen gegenüber dem Zeitstand-Zugversuch. Die Rissinitiierung basiert wesentlich auf verarbeitungsbedingten und damit materialunabhängigen Fehlstellen, was zu hohen Standardabweichungen führt. Durch das Einbringen einer Kerbe beim FNCT wird die Phase der Rissinitiierung übersprungen und dadurch die Streuung der Messwerte erheblich verringert, da verarbeitungsbedingte Fehlstellen keinen Einfluss mehr auf das Zeitstandverhalten haben. Es wird somit lediglich der Widerstand des Materials gegen langsames Risswachstum gemessen, was entscheidend für die Langzeiteigenschaften eines Materials ist [9].

## 5 Forschungsergebnisse und Diskussion

### 5.1 Eigenschaften der Versuchswerkstoffe

#### 5.1.1 Fließverhalten des Grundmaterials

Zur Charakterisierung des Fließverhaltens beim Heizelementschweißen während der Fügephase wurde die komplexe Viskosität verschiedener Materialien in Abhängigkeit der Temperatur ermittelt. Der Temperaturbereich umfasst die Temperaturen, welche während des Heizelementschweißens in der Schmelze vorliegen. Bild 35 zeigt die Verläufe der komplexen Viskosität von PE100, PE100 RC und PP-H. Es handelt sich dabei jeweils um gepresstes Material. Die Untersuchung der komplexen Viskosität von extrudierten Platten wurde ebenfalls durchgeführt. Dabei haben sich keine Unterschiede zu gepresstem Material gezeigt. Als Referenzmaterial wurde außerdem PE HD untersucht.

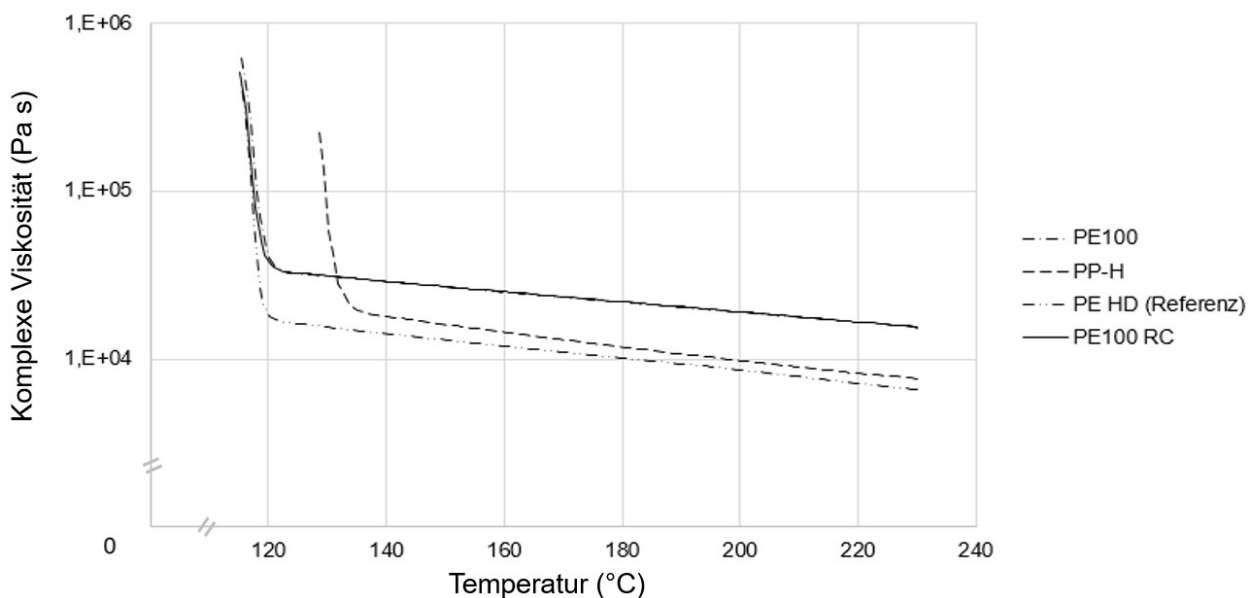


Bild 35: Fließverhalten von PE HD (Referenz), PE100, PE100 RC und PP-H in Abhängigkeit der Temperatur

Der sprunghafte Anstieg der komplexen Viskosität korreliert mit dem Kristallisationsbeginn des jeweiligen Materials. Die Verschiebung des Anstiegs von PP um etwa 10 °C nach oben zeigt dessen im Vergleich zu PE bei höheren Temperaturen beginnende Kristallisation. Eine Auswertung der komplexen Viskosität im Bereich der Kristallisation ist allerdings aufgrund von Messungenauigkeiten schwierig. Der für den Fügeprozess relevante Temperaturbereich liegt aber ohnehin oberhalb der Kristallisation.

Die geringste Viskosität weist das Referenzmaterial PE HD auf. Im Vergleich dazu liegt die Viskosität von PP-H etwas höher, was sich durch dessen höhere Molmasse erklären lässt. Die beiden Materialien PE100 und PE100 RC weisen oberhalb der Kristallisation identische Werte auf. Die komplexen Viskositäten sind aufgrund der im Vergleich zu PE HD größeren

Molekülkettenlängen deutlich erhöht. Daher ist bei diesen Materialien während der Fügephase des Heizelementschweißens ein verringerter Schmelzefluss zu erwarten.

### 5.1.2 Zeitstandverhalten des Grundmaterials im FNCT

Die Standzeiten der Grundmaterialien im FNCT zeigt Bild 36. Die Probekörper wurden aus Platten entnommen. Aufgrund der bereits vor Prüfbeginn in das Material eingebrachten Kerbe handelt es sich bei den erreichten Standzeiten um die Rissfortschrittszeit, die einen Hinweis auf den werkstoffabhängigen Widerstand gegenüber langsamem Rissfortschritt darstellt.

Die Materialien aus gepresstem PE100 weisen wanddickenunabhängig ein etwas schnelleres Versagen in der Mitte auf, während bei PE100 RC die Standzeit in der Mitte etwas höher ist. Aufgrund der teilweise relativ hohen Standardabweichungen lässt sich allerdings keine Systematik hinsichtlich des Probenentnahmeortes erkennen. Deutlich sind hingegen die unabhängig vom Entnahmeort der Proben höheren Standzeiten bei PE100 RC, was mit den Erwartungen an die verbesserte Langzeitfestigkeit des RC-Materials korreliert. Das extrudierte Material aus PE100 weist hingegen sowohl in der Mitte als auch am Rand kürzere Standzeiten als das gepresste Material auf. Zusätzlich liegt hier ein Unterschied zwischen den Probenentnahmeorten vor, da die Randproben im Vergleich zu den Proben aus der Mitte nur etwa die Hälfte der Standzeit erreichen. Die Proben aus PP weisen Standzeiten auf, welche mit dem extrudierten Material aus PE vergleichbar sind.

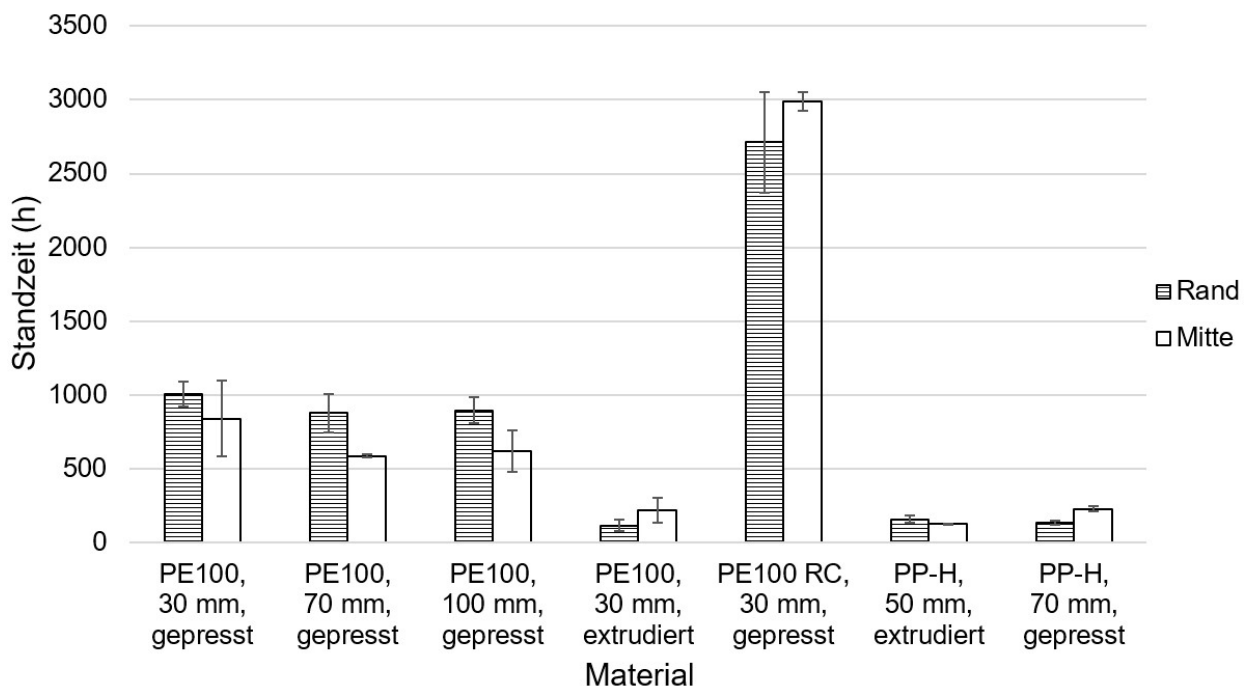


Bild 36: Standzeiten der Plattenmaterialien im FNCT (Prüftemperatur: 95 °C, Prüfspannung: 4 MPa)

Bild 37 zeigt das Zeitstandverhalten eines extrudierten Rohres aus PE100 mit einer Wanddicke von 35,8 mm und einem Außendurchmesser von 610 mm im FNCT. Die Zugproben wurden aus der Innenseite, aus der Mitte und aus der Außenseite des Rohres entnommen. Während die Innenseite und die Mitte vergleichbare Standzeiten aufweisen, fällt die Standzeit an der Außenseite auf weniger als die Hälfte ab. Sowohl die Außenseite extrudierter Platten als auch die Außenseite extrudierter Rohre zeigen damit kurze Standzeiten im FNCT.

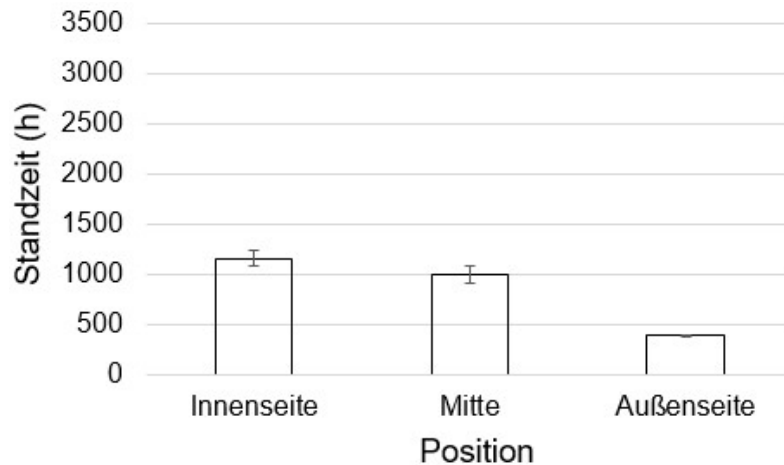


Bild 37: Standzeiten eines Rohres aus PE100 an verschiedenen Positionen im FNCT (Prüf­temperatur: 95 °C, Prüfspannung: 4 MPa)

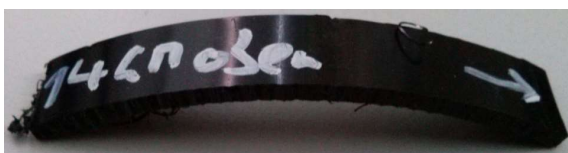
### 5.1.3 Ergebnisse der Temperversuche des Grundmaterials

Bild 38 zeigt verschiedene Streifenproben nach dem Tempern. Bei PP haben sich die Proben durch das Tempern nicht verändert. Ebenso kann bei Streifen aus gepresstem PE keine Veränderung festgestellt werden. Bei den aus dem Randbereich extrudierter Platten und Rohre entnommenen Streifen ist dagegen eine deutliche Krümmung zu beobachten. Die Krümmung, die durch das Tempern erzielt wird, deutet darauf hin, dass die extrudierten Materialien aus PE eigenspannungsbehaftet sind. Diese Eigenspannungen werden während des Extrusionsprozesses in das Material induziert und können das Zeitstandverhalten negativ beeinflussen.

#### Polyethylen



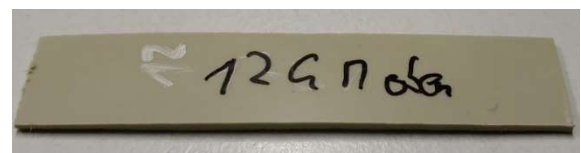
PE100, Platte, gepresst, Rand, 100 mm



#### Polypropylen



PP-H, gepresst, Rand, 70 mm



PE100, Platte, extrudiert, Rand, 30 mm



PE100, Platte, extrudiert, Mitte, 30 mm



PE100, Rohr, extrudiert, Rand, axial entnommen,  
35,8 mm



PE100, Rohr, extrudiert, Mitte, axial entnommen,  
35,8 mm

PP-H, extrudiert, Rand, 50 mm

Bild 38: Streifenproben aus verschiedenen Grundmaterialien nach dem Tempern

## 5.2 Aufschmelzverhalten der Versuchswerkstoffe

Die Ergebnisse der Temperaturmessung zwischen der Fügefläche eines Fügeteils aus PE und dem Heizelement während des Anwärmens werden in Bild 39 gezeigt. Vorher wurde das Fügeteil an das Heizelement angeglichen. Während der Anwärmzeit von 1.000 s wurde an allen Positionen (siehe Bild 10) die gleiche Temperatur gemessen. Somit kann ausgeschlossen werden, dass Schwankungen der Heizelementtemperatur einen Einfluss auf das Aufschmelzverhalten haben.

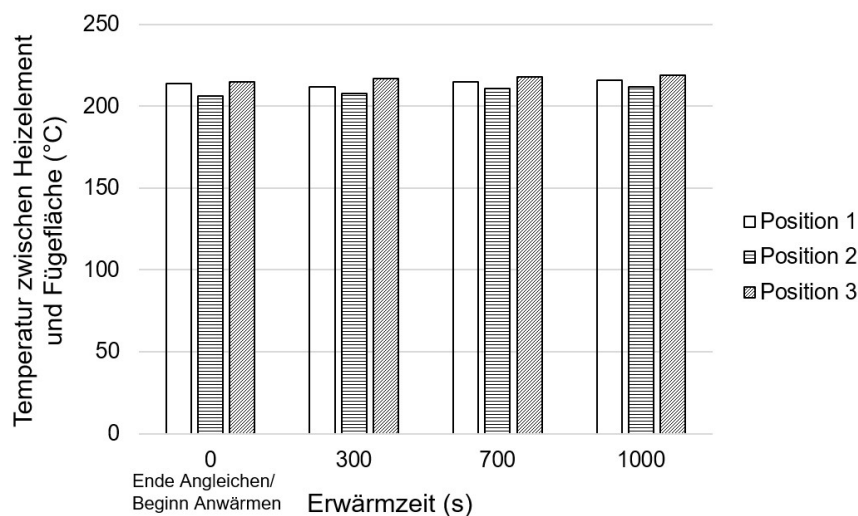


Bild 39: Temperatur an verschiedenen Positionen zwischen dem Heizelement und der Fügefläche über eine Anwärmzeit von 1.000 s (Heizelementtemperatur: 220 °C)

Die während des Anwärmens über eine Zeit von 300 s gemessene Temperatur an zwei verschiedenen Positionen im Material einer 30 mm dicken PE-Platte (siehe Bild 11) wird in Bild 40 gezeigt. Die Temperaturen beginnen bereits bei etwa 60 bis 80 °C, da die Platte vorher an das Heizelement angeglichen wurde und es währenddessen schon zu einem Wärmeübertrag vom Heizelement auf den Kunststoff kam.

Sowohl zu Beginn als auch während der gesamten Messzeit bis zum Ende des Anwärmens wird am Rand eine höhere Temperatur als in der Mitte des Materials gemessen. Der Temperaturunterschied steigt dabei kontinuierlich leicht an. Dies bedeutet, dass trotz der zwischen Heizelement und Fügefläche konstanten Temperatur während des Anwärmens ein Temperaturunterschied im Material vorliegt.

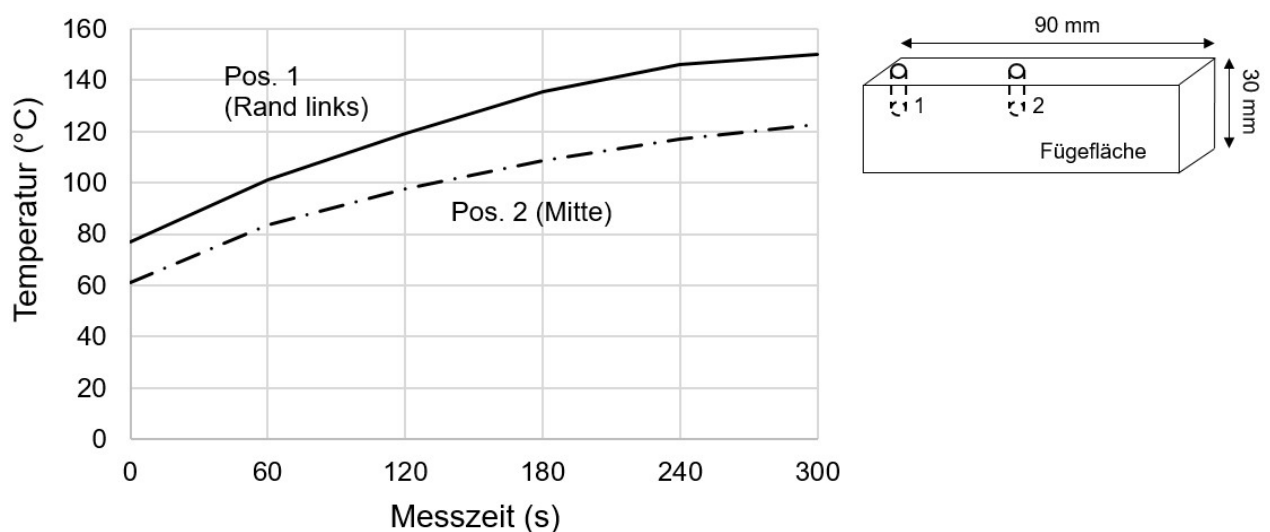


Bild 40: Temperaturverlauf während des Anwärmens an verschiedenen Positionen im Material (Heizelementtemperatur: 220 °C)

Bild 41 zeigt den Verlauf der Schmelzeschichtdicke von PE und PP in Abhängigkeit der Anwärmzeit. Die Messposition befand sich immer an der gleichen Stelle auf der Fügefläche (siehe Bild 12). Es zeigt sich, dass entgegen der in der DVS-Richtlinie vorgegebenen linear ansteigenden Anwärmzeit (siehe Bild 2) die Schmelzeschichtdicke von PE degressiv zunimmt. Weiterhin ist zu sehen, dass die Schmelzeschichtdicke von PP bei gleichen Anwärmzeiten deutlich geringer ist als die Schmelzeschichtdicke von PE. Beispielsweise wird bei einer Anwärmzeit von 600 s bei PP nur die Hälfte der Schmelzeschichtdicke von PE erreicht.

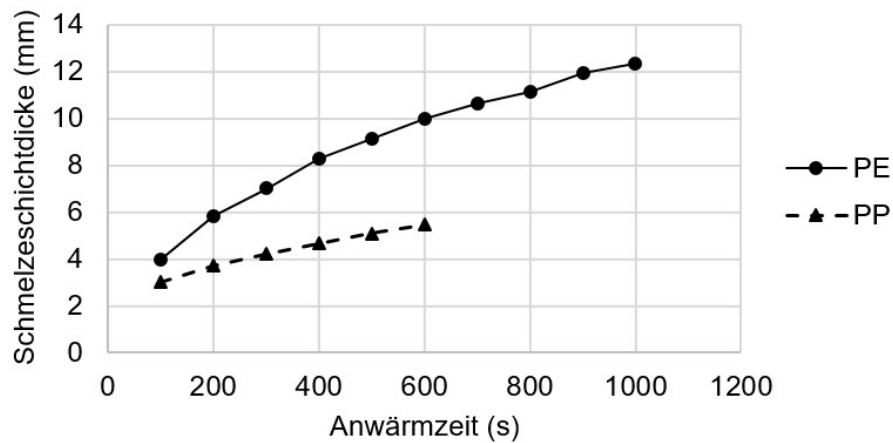


Bild 41: Verlauf der Schmelzeschichtdicke von PE und PP in Abhängigkeit der Anwärmzeit

Die Schmelzeschichtdicke an verschiedenen Positionen auf der Fügefläche von PE (siehe Bild 13) wird in Bild 42 gezeigt. Mit ansteigender Wanddicke und entsprechender Anwärmzeit steigt die Schmelzeschichtdicke an. Die niedrigste Schmelzeschichtdicke wurde jeweils in der Mitte der Fügefläche (Position 2) gemessen. Während sich am oberen Rand der Fügefläche (Position 1) eine im Vergleich zur Mitte nur leicht erhöhte Schmelzeschicht bildet, wird am unteren Rand (Position 3) deutlich mehr Material aufgeschmolzen. Während des Anwärmens bildet sich somit ein unsymmetrisch gekrümmtes Schmelzeschichtprofil aus, bei dem sich die Schmelzeschichtdicke zum Rand hin ausweitet.

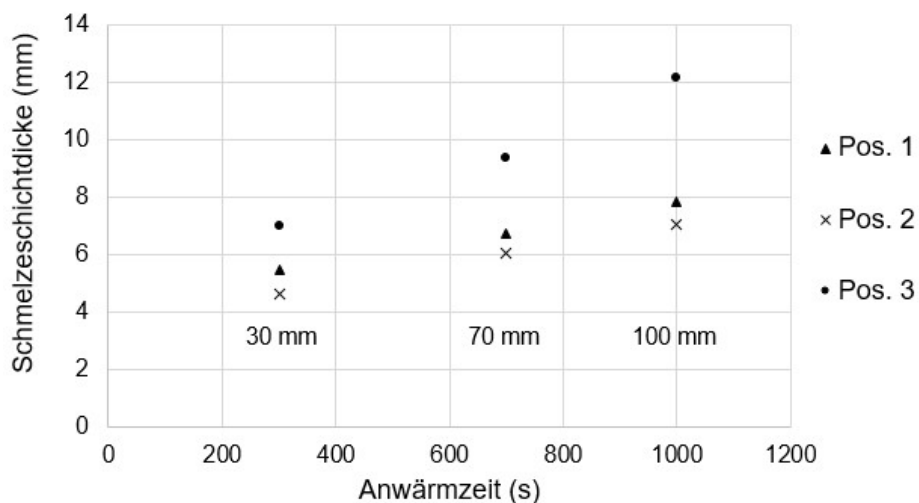


Bild 42: Schmelzeschichtdicke von PE in Abhängigkeit der Anwärmzeit bzw. Wanddicke an verschiedenen Positionen auf der Fügefläche

Der Vergleich verschiedener Wanddicken in Tabelle 10 zeigt, dass die Krümmung mit steigender Wanddicke bzw. Anwärmzeit zunimmt. Die größte Differenz der Schmelzeschichtdicke liegt zwischen den Positionen in der Mitte und am unteren Rand vor. Während sie bei einer Wanddicke von 30 mm und einer entsprechenden Anwärmzeit von 300 s 2,4 mm beträgt, steigt sie bei einer Wanddicke von 100 mm und der dazugehörigen Anwärmzeit

von 1.000 s um mehr als das Doppelte auf 5,0 mm an. Dies zeigt, dass die Krümmung der Schmelzeschicht mit zunehmender Wanddicke eine größer werdende Rolle spielt.

Tabelle 10: Differenz der gemessenen Schmelzeschichtdicken in Abhängigkeit der Wanddicke und der Messposition

Wanddicke (mm)	Schmelzeschichtdicke Mitte (mm)	Schmelzeschichtdicke unten (mm)	Differenz (mm)
30	4,6	7,0	2,4
70	6,0	9,4	3,4
100	7,1	12,1	5,0

Die während des Anwärmens erzeugte Krümmung der Schmelzeschicht ist durch den Heizelementschweißprozess zu erklären. Während der Anwärmphase kommt es zu einer Seiteneinstrahlung des Heizelements auf die Fügeteile, sodass in die Randbereiche der zu schweißenden Materialien mehr Wärme induziert wird als in die Mitte der Fügeflächen. Am unteren Rand der Fügeteile kommt es außerdem zu einem Wärmestau, was eine stark erhöhte Schmelzebildung zur Folge hat. Analog zum Anwärmen von Platten ist bei der Erwärmung von Rohren aufgrund des Wärmestaus eine erhöhte Schmelzebildung an der unteren Außenseite sowie an der oberen Innenseite der Rohre zu erwarten. Die Bildung des Wärmestaus an den zu schweißenden Halbzeugen wird in Bild 43 schematisch gezeigt.

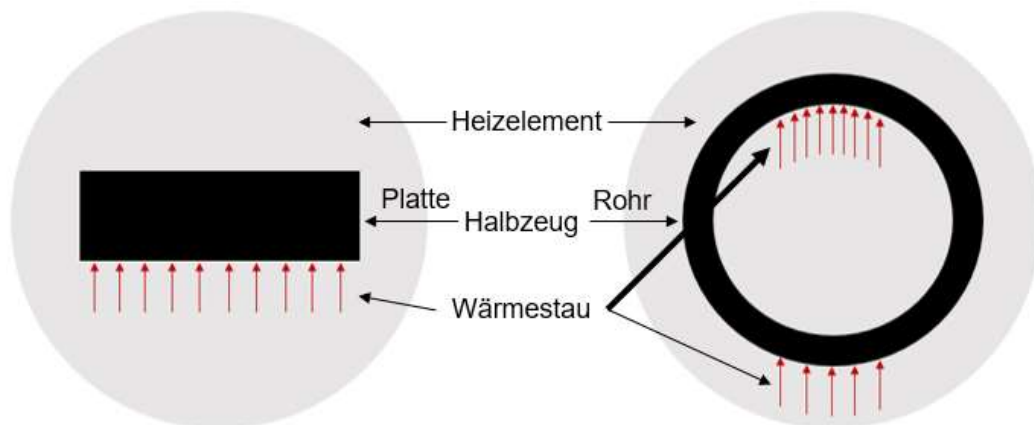


Bild 43: Schematische Darstellung des Wärmestaus an Platten (links) und Rohren (rechts)

### 5.3 Geometrische Betrachtungen an Schweißverbindungen

#### 5.3.1 Untersuchung der Schweißnahtkrümmung

Bild 44 zeigt die Mikroskopieaufnahme einer Schweißnaht aus PE100 RC mit einer Wanddicke von 100 mm. Zur Aufnahme des Mikroskopiebildes wurde die Schweißnaht aufgrund ihrer Größe in drei Teile geteilt. Das Bild wurde in polarisiertem Durchlicht aufgenommen. Mithilfe der



Bildbearbeitungssoftware sind geometrische Betrachtungen wie beispielsweise die Ermittlung der Restschmelzeschichtdicke möglich. Die Restschmelzeschichtdicke wurde in der Mitte sowie am oberen und am unteren Rand der Schweißnaht gemessen. Entsprechend den Erkenntnissen, welche bei den Aufschmelzversuchen gewonnen wurden, zeigt sich auch bei der Betrachtung der Schweißnaht eine deutliche Krümmung. Während in der Mitte der Schweißnaht die geringste Restschmelzeschichtdicke gemessen wurde, dehnt sich die Schweißnaht aufgrund des hohen erzeugten Schmelzeanteils vor allem zum unteren Rand hin stark aus.

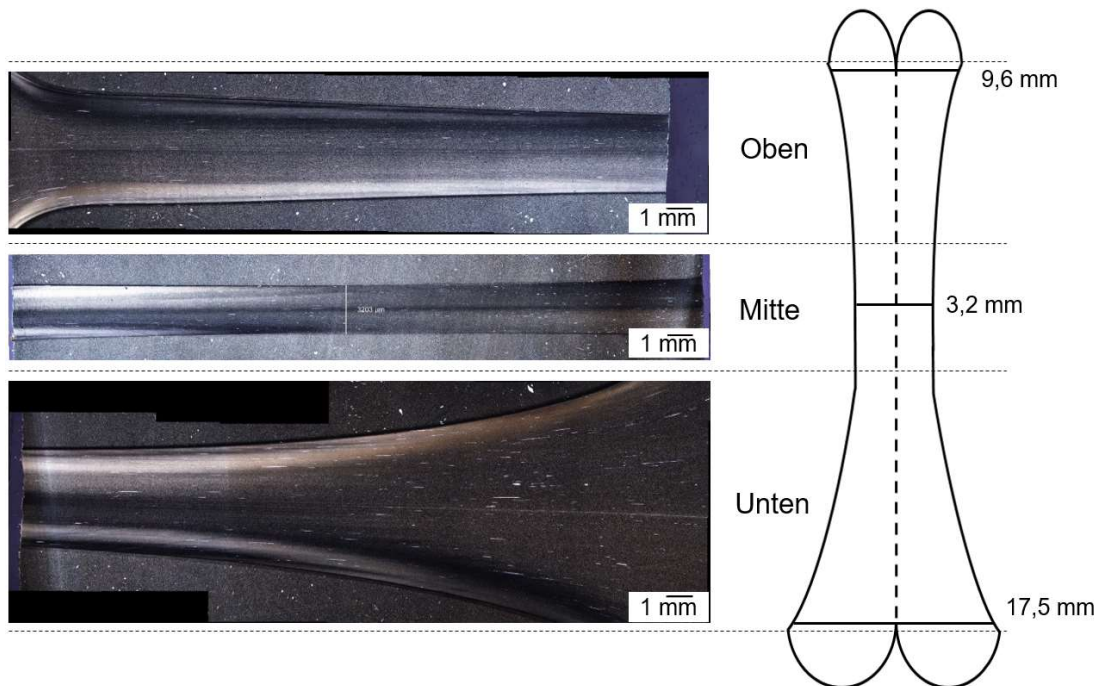


Bild 44: Links: Mikroskopieaufnahme PE100 RC, 100 mm Wanddicke (25-fache Vergrößerung, polarisiertes Durchlicht); rechts: Schematische Darstellung der Schweißnaht und Restschmelzeschichtdicke an verschiedenen Positionen

Bild 45 zeigt drei Mikroskopieaufnahmen eines geschweißten Rohres mit einer Wanddicke von 35,8 mm. Die Tabelle in Bild 45 zeigt die prozentuale Verbreiterung an der Außen- und an der Innenseite im Vergleich zur Mitte der jeweiligen Schweißnaht. Die Schweißnähte wurden an verschiedenen Positionen des Rohrumfanges entnommen (oben, Mitte, unten). Die oben und unten entnommenen Schweißnähte weisen aufgrund des Wärmestaus eine unsymmetrische Krümmung auf. Dagegen ist die aus der Mitte entnommene Schweißnaht symmetrisch gekrümmt, da an dieser Stelle während des Anwärmens lediglich die Seiteneinstrahlung des Heizelements gewirkt hat. Beim Heizelementschweißen von Rohren bildet sich damit eine über den Rohrumfang ungleichmäßige Schweißnaht aus, was bedeutet, dass die Fließbedingungen der Schmelze während des Schweißens sowie die Abkühlbedingungen nicht konstant sind.

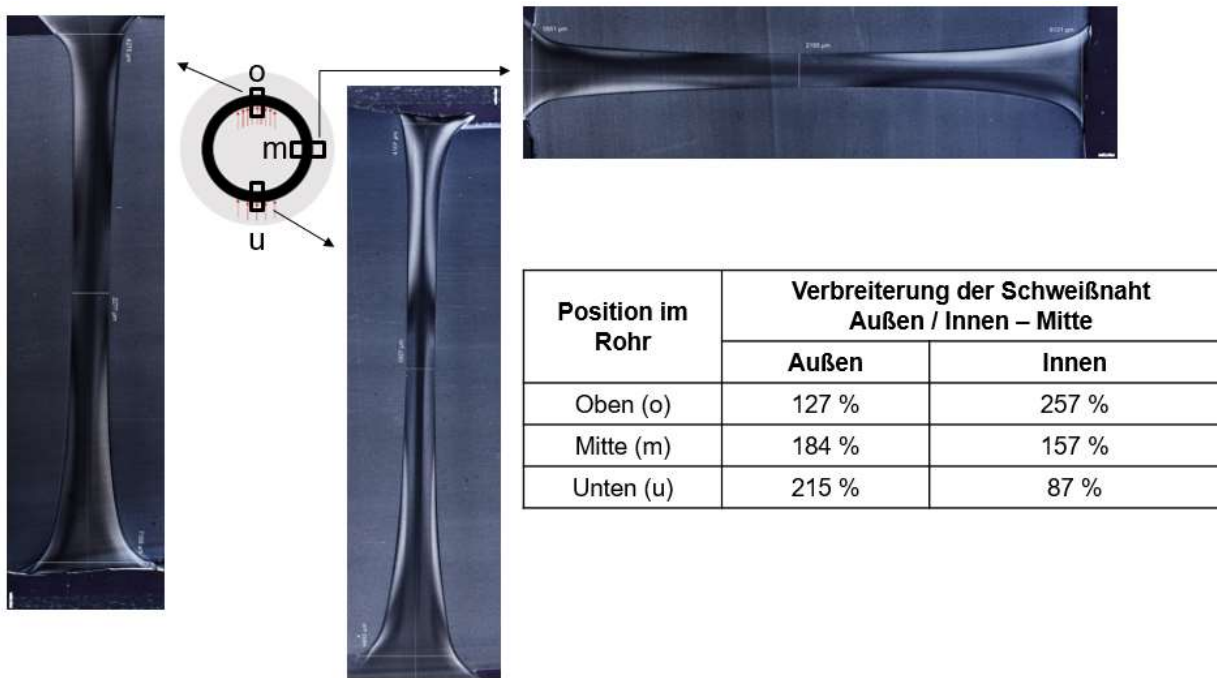


Bild 45: Mikroskopieaufnahmen eines geschweißten Rohres mit aufgrund der Seiteneinstrahlung und des Wärmestaus unterschiedlich ausgeprägten Schweißnahtkrümmungen

### 5.3.2 Untersuchung des $L/d$ -Verhältnisses

Die Bestimmung der Restschmelzeschichtdicke  $L$  in Abhängigkeit der Wanddicke  $d$  wurde ebenfalls an den Mikroskopieaufnahmen durchgeführt. Da hierbei die Schweißnahtkrümmung unberücksichtigt bleiben sollte, wurde immer die in der Mitte und somit an der dünnsten Stelle der Schweißnaht vorliegende Restschmelzeschichtdicke herangezogen. Bild 46 zeigt als Beispiel die Restschmelzeschichtdicke einer Schweißnaht aus PE100 RC mit einer Wanddicke von 30 mm.



Bild 46: Messposition zur Ermittlung der Restschmelzeschichtdicke (Beispiel: PE100 RC, 30 mm Wanddicke)

Tabelle 11 zeigt die Restschmelzeschichtdicke bei verschiedenen Wanddicken von PE100 RC. Das Verhältnis zwischen der Restschmelzeschichtdicke und der Wanddicke nimmt mit zunehmender Wanddicke ab. Die Werte verdeutlichen, dass es keine Proportionalität bzw.

geometrische Ähnlichkeit zwischen der Restschmelzeschichtdicke und der Wanddicke gibt. Ebenso konnte bei PP keine geometrische Ähnlichkeit nachgewiesen werden. Dies bedeutet, dass die Wanddicke auch unabhängig von der Schweißnahtkrümmung einen Einfluss auf die Fließ- bzw. Schergeschwindigkeiten während des Schweißprozesses haben muss. Mit zunehmender Wanddicke spielt zusätzlich die Krümmung der Schweißnaht eine größer werdende Rolle.

Tabelle 11: Verhältnis zwischen der Restschmelzeschichtdicke  $L$  und der Wanddicke  $d$  bei PE100 RC

Wanddicke $d$ (mm)	Restschmelzeschichtdicke $L$ (mm)	$L/d$
30	1,83	0,061
70	2,77	0,040
100	3,20	0,032

Weiterhin wurde der Einfluss des Fügedrucks auf das Verhältnis zwischen der Restschmelzeschichtdicke und der Wanddicke untersucht. Bild 47 zeigt als Beispiel das  $L/d$ -Verhältnis von drei Schweißnähten aus PP-H mit einer Wanddicke von 30 mm. Dabei wurde der Fügedruck von 0,1 MPa auf 0,2 MPa sowie 0,4 MPa erhöht. Das  $L/d$ -Verhältnis verhält sich in etwa umgekehrt proportional zum Fügedruck. In den nachfolgenden Kapiteln wird dargestellt, welche Auswirkungen ein erhöhter Fügedruck und damit einhergehend eine Reduzierung der Restschmelzeschichtdicke auf die kurzzeitigen und langzeitigen mechanischen Eigenschaften haben.

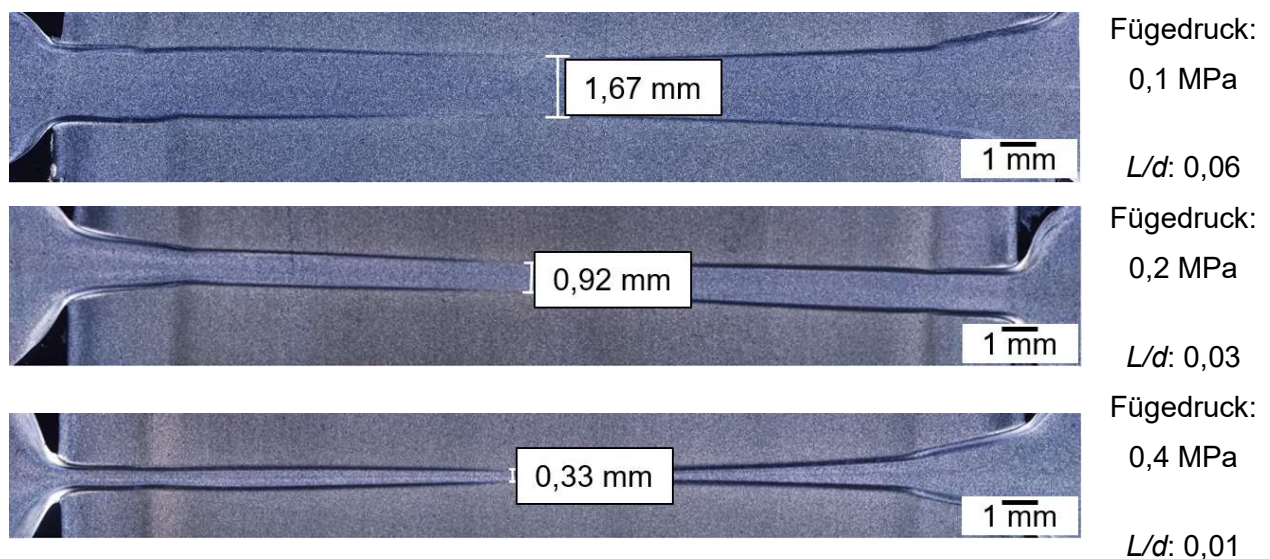


Bild 47:  $L/d$ -Verhältnis von PP-H mit einer Wanddicke von 30 mm bei unterschiedlichem Fügedruck

## 5.4 Kurzzeitmechanische Eigenschaften von Schweißverbindungen

### 5.4.1 Mechanische Eigenschaften bei Zugbelastung

Bild 48 zeigt die lokalen Grundmaterial- und Schweißnahtfestigkeiten von PE100 RC mit einer Wanddicke von 100 mm. Die Position 1 befindet sich am unteren Rand der Schweißnaht, während die Position 9 aus dem oberen Rand entnommen wurde (siehe Bild 25). Die Schweißnähte erreichen eine hohe Kurzzeit-Zugfestigkeit, welche unabhängig vom Entnahmeort ist und auf Grundmaterialniveau liegt. Der Abfall der Grundmaterialfestigkeit in den Randbereichen ist durch die Herstell- und Abkühlbedingungen des Plattenmaterials zu begründen, was zu einer Schwächung im Randbereich führt. Die höhere Festigkeit der Schweißnähte im Vergleich zum Grundmaterial liegt vermutlich an einer Versteifung bzw. Verhärtung des Materials in der Schweißnaht aufgrund der thermischen Belastung der Fügezone, was in der Literatur bereits diskutiert wurde [30].

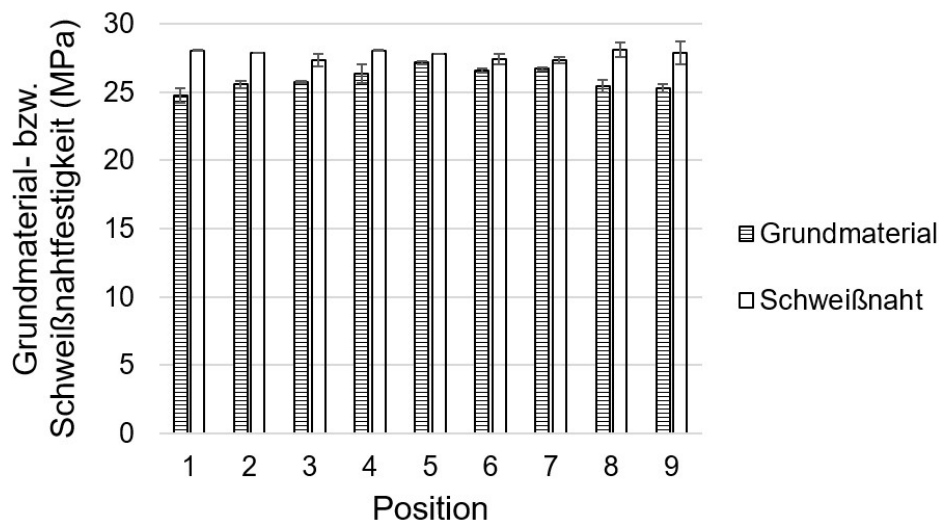


Bild 48: Kurzzeit-Zugfestigkeit der Schweißnähte und des Grundmaterials aus PE100 RC mit einer Wanddicke von 100 mm

Eine erweiterte Aussage zum Werkstoffverhalten ermöglicht die Spannungs-Dehnungsanalyse der Zugversuche. Bild 49 (links) zeigt das Spannungs-Dehnungs-Diagramm von PE100 RC mit einer Wanddicke von 100 mm. Ein Unterschied zwischen den einzelnen Entnahmepositionen der Proben kann hier ebenfalls nicht festgestellt werden. Nach Erreichen der Streckspannung verziehen sich die Proben und es kommt zu einem duktilen Versagen. Das makroskopische Bruchbild (siehe Bild 49 rechts) bestätigt dieses Bruchverhalten.

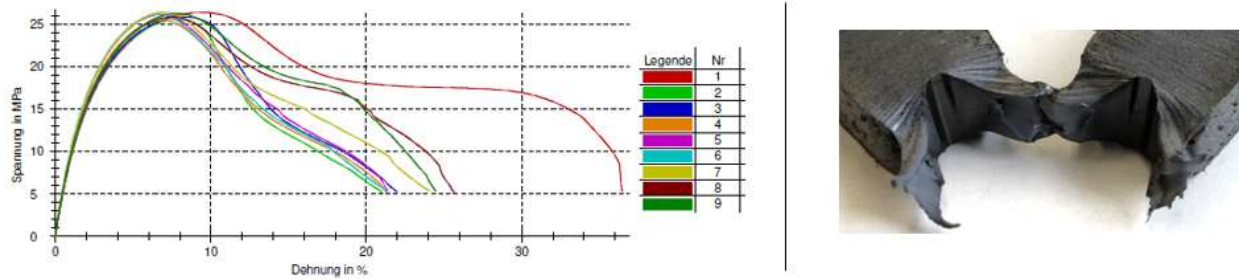


Bild 49: Links: Spannungs-Dehnungs-Diagramm von PE100 RC mit einer Wanddicke von 100 mm; rechts: Bruchbild von PE100 RC im Kurzzeit-Zugversuch

Die lokalen Grundmaterial- und Schweißnahtfestigkeiten von PP-H mit einer Wanddicke von 70 mm werden in Bild 50 gezeigt. Die Position 1 wurde am unteren Schweißnahttrand entnommen, während sich die Position 6 am oberen Rand befindet. Entsprechend der Zugfestigkeiten von PE werden auch hier Schweißnahtfestigkeiten im Bereich der Grundmaterialfestigkeit erreicht. Festigkeitsunterschiede zwischen den einzelnen Entnahmeorten können weder für das Grundmaterial noch für die Schweißnaht festgestellt werden.

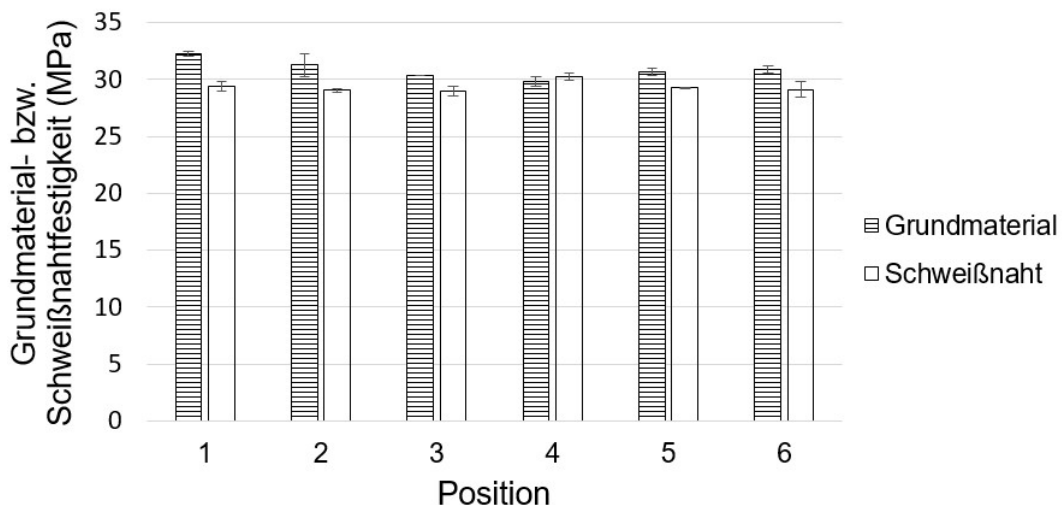


Bild 50: Kurzzeit-Zugfestigkeit der Schweißnähte und des Grundmaterials aus PP-H mit einer Wanddicke von 70 mm

Das Spannungs-Dehnungs-Diagramm von PP-H (siehe Bild 51 links) zeigt ein anderes Bruchverhalten als bei PE. Es kommt bereits im Bereich der Streckspannung zu einem Versagen der Zugproben in der Schweißnaht, sodass ein sprödes Bruchverhalten vorliegt. Die Betrachtung des makroskopischen Bruchbildes (siehe Bild 51 rechts) bestätigt dies. Eine Differenzierung zwischen den verschiedenen Entnahmepositionen ist allerdings auch hier nicht möglich.

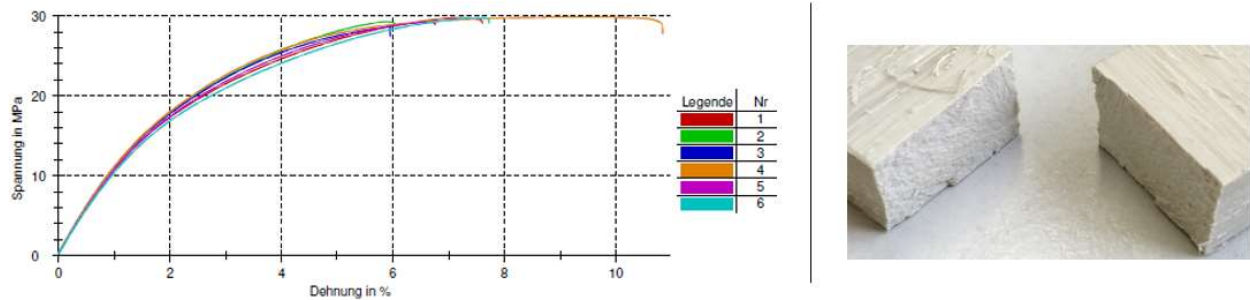


Bild 51: Links: Spannungs-Dehnungs-Diagramm von PP-H mit einer Wanddicke von 70 mm; rechts: Bruchbild von PP-H im Kurzzeit-Zugversuch

Weitere Kurzzeit-Zugversuche haben gezeigt, dass die Zugfestigkeit wanddickenunabhängig ist. Bild 52 zeigt eine Übersicht aller im Kurzzeit-Zugversuch untersuchten Grundmaterialien und Schweißnähte mit einer Wanddicke von 30 bis 100 mm. Die geringen Standardabweichungen verdeutlichen, dass sich die Entnahmeposition der Zugproben grundsätzlich nicht auf die Zugfestigkeit auswirkt. Es ist lediglich festzustellen, dass PP allgemein eine höhere Zugfestigkeit als PE erreicht.

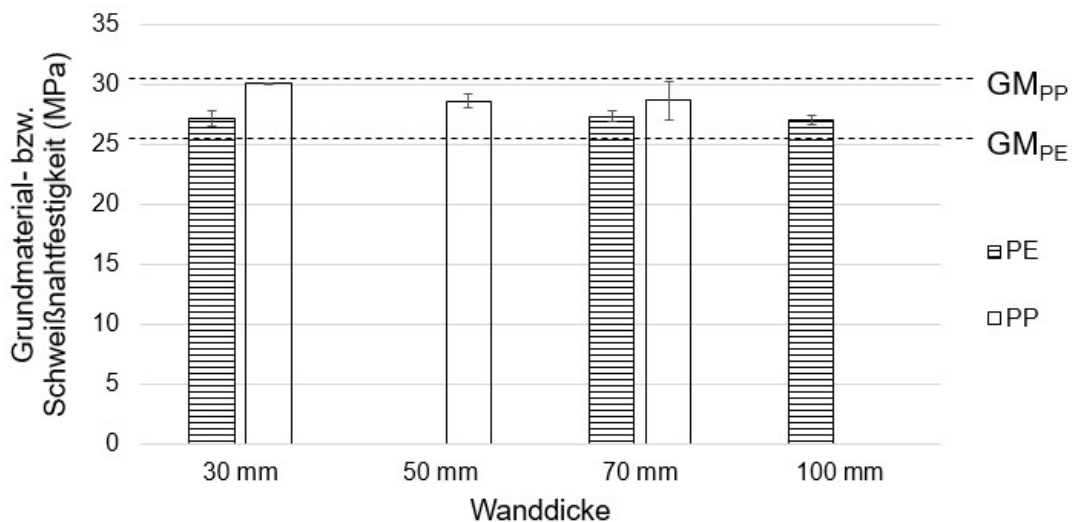


Bild 52: Zugfestigkeiten von PE und PP mit Wanddicken von 30 bis 100 mm im Kurzzeit-Zugversuch

Nachfolgend wird der Einfluss einer Variation verschiedener Parameter auf die Kurzzeit-Zugfestigkeit diskutiert. Bild 53 zeigt die Zugfestigkeiten von PE100 und PP-H mit einer Wanddicke von 30 mm bei erhöhtem Fügedruck sowie verlängerten Anwärmzeiten. Die zur jeweiligen Probennummer gehörenden Parametersätze können Tabelle 12 entnommen werden.

Tabelle 12: Parametersätze zur Untersuchung des Einflusses der Anwärmzeit und des Fügedrucks auf die Kurzzeit-Zugfestigkeit von PE und PP

Material	Wanddicke (mm)	Anwärmzeit (s)	Fügedruck (MPa)	Probennummer
PP-H	30	305	0,1	1 (DVS)
		305	<b>0,2</b>	2
		305	<b>0,4</b>	3
		<b>430</b>	0,1	4
PE100	30	300	0,15	5 (DVS)
		300	<b>0,3</b>	6
		300	<b>0,6</b>	7
		<b>360</b>	0,15	8

Trotz der veränderten Parameter befindet sich die Schweißnahtfestigkeit weiterhin auf Grundmaterialniveau. Ein Einfluss des erhöhten Fügedrucks oder der verlängerten Anwärmzeit auf die Zugfestigkeit kann nicht festgestellt werden.

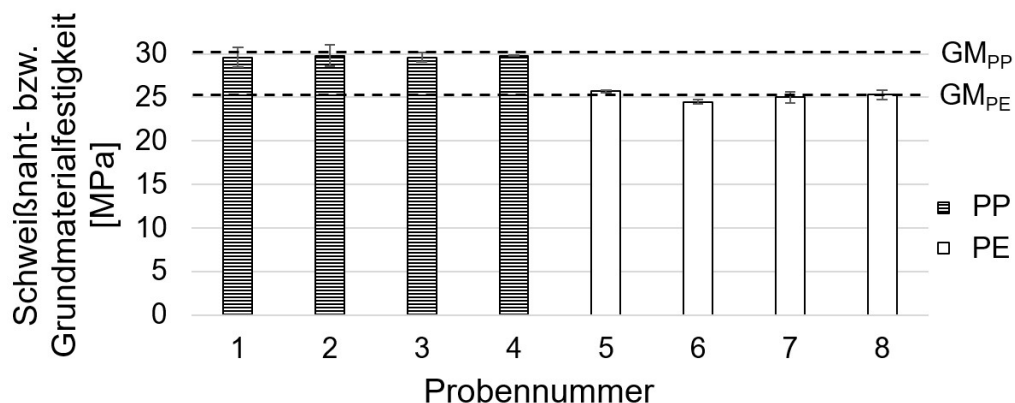


Bild 53: Kurzzeit-Zugfestigkeit von PE und PP bei verschiedenen Anwärmzeiten und Fügedrücken

Die Schweißnahtfestigkeit von PE100 mit einer Wanddicke von 100 mm bei reduzierter Anwärmzeit zeigt Bild 54. Die Zugproben wurden jeweils aus der Mitte und aus dem unteren Rand der Schweißnaht entnommen. Eine Verkürzung der Anwärmzeit auf 500 s und damit auf die Hälfte der DVS-Vorgabe wirkt sich kaum auf die Kurzzeit-Zugfestigkeit aus. Es ist lediglich eine etwas erhöhte Standardabweichung bei den Zugproben aus dem Randbereich festzustellen. Eine Verringerung der Anwärmzeit auf 200 s und damit auf ein Fünftel der nach DVS vorgegebenen Anwärmzeit zeigt eine Reduzierung der Schweißnahtfestigkeit auf etwa 24 bis 25 MPa. Ein systematischer Unterschied zwischen dem Entnahmeort der Proben ist unter Einbezug der Standardabweichungen nicht feststellbar.

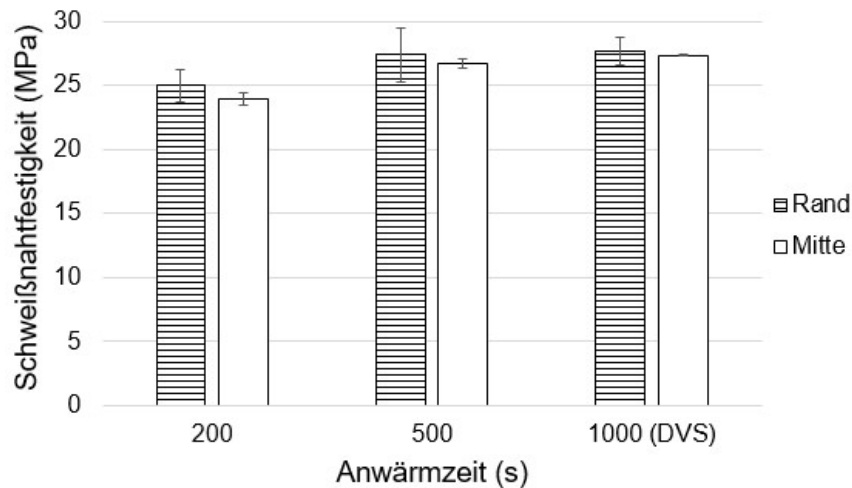


Bild 54: Kurzzeit-Zugfestigkeit von PE100 mit einer Wanddicke von 100 mm bei verkürzter Anwärmzeit

Das in Bild 55 gezeigte Spannungs-Dehnungs-Diagramm veranschaulicht das Bruchverhalten von PE100 bei einer Anwärmzeit von 200 s. Im Gegensatz zum duktilen Bruchverhalten, welches bei einer Anwärmzeit von 1.000 s vorliegt, versagen die Zugproben bereits vor Erreichen der Streckspannung. Eine Verkürzung der Anwärmzeit auf 200 s bei einer Wanddicke von 100 mm führt somit zu einer Verschlechterung der Schweißnahtfestigkeit.

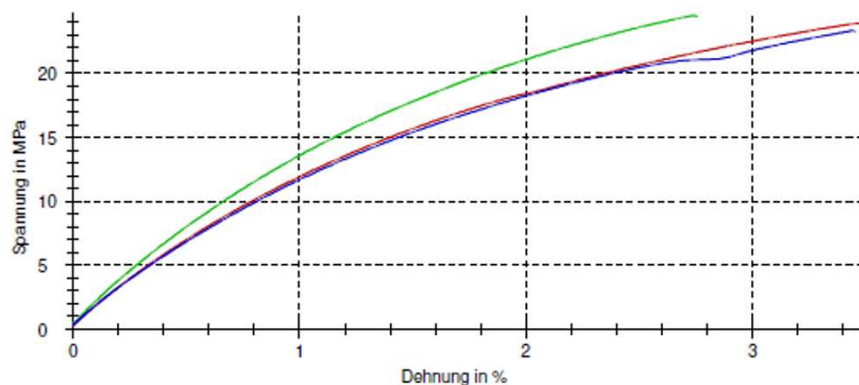


Bild 55: Spannungs-Dehnungs-Diagramm von PE100 mit einer Wanddicke von 100 mm bei einer Anwärmzeit von 200 s

#### 5.4.2 Mechanische Eigenschaften bei Biegebeanspruchung

Die Bewertung der Schweißnahtqualität bei Biegebeanspruchung erfolgt mittels Maximalkraft sowie des Biegewegs bei Maximalkraft. Bild 56 zeigt die Ergebnisse der Prüfung von PP-H mit einer Wanddicke von 30 mm. Es sind sowohl die Werte für das Grundmaterial als auch für die Schweißnähte zu sehen. Die entsprechenden Parametersätze werden in Tabelle 13 gezeigt. Es wurden sowohl Versuche nach DVS als auch mit erhöhtem Fügedruck sowie veränderter Anwärmzeit durchgeführt.



Tabelle 13: Parametersätze zur Untersuchung der Maximalkraft und des Biegewegs bei Maximalkraft von PP-H mit einer Wanddicke von 30 mm im Technologischen Biegeversuch

Probenbezeichnung	Fügedruck (MPa)	Anwärmzeit (s)
PP1	0,1	305 (DVS)
PP2	<b>0,2</b>	305
PP3	<b>0,4</b>	305
PP4	0,1	<b>245</b>
PP5	0,1	<b>365</b>
PP6	Grundmaterial	

Bei den PP-Proben kommt es im Technologischen Biegeversuch zu einem spröden Versagen in der Schweißnaht. Die Maximalkraft sinkt bei den Schweißnähten im Vergleich zum Grundmaterial etwas ab, während der Biegeweg der Schweißnähte bei Maximalkraft sogar deutlich unter Grundmaterialniveau liegt. Dennoch werden die in der DVS-Richtlinie 2203-1 Beiblatt 3 [87] geforderten Biegewege von 12,5 mm deutlich überschritten. Eine Erhöhung des Fügedrucks führt sowohl hinsichtlich der Maximalkraft als auch des Biegewegs zu einer Verbesserung der erzielten Werte. Die besten Ergebnisse werden bei einer Vervierfachung des Fügedrucks erzielt. Ebenso wird durch eine Verlängerung der Anwärmzeit eine Erhöhung des Biegewegs und der Maximalkraft erreicht. Eine Verkürzung der Anwärmzeit führt dagegen zu einer Verschlechterung der Ergebnisse im Vergleich zu den nach DVS gefertigten Schweißnähten. Der Einfluss der Parametervariationen auf den Biegeweg und die Maximalkraft ist allerdings insgesamt gering.

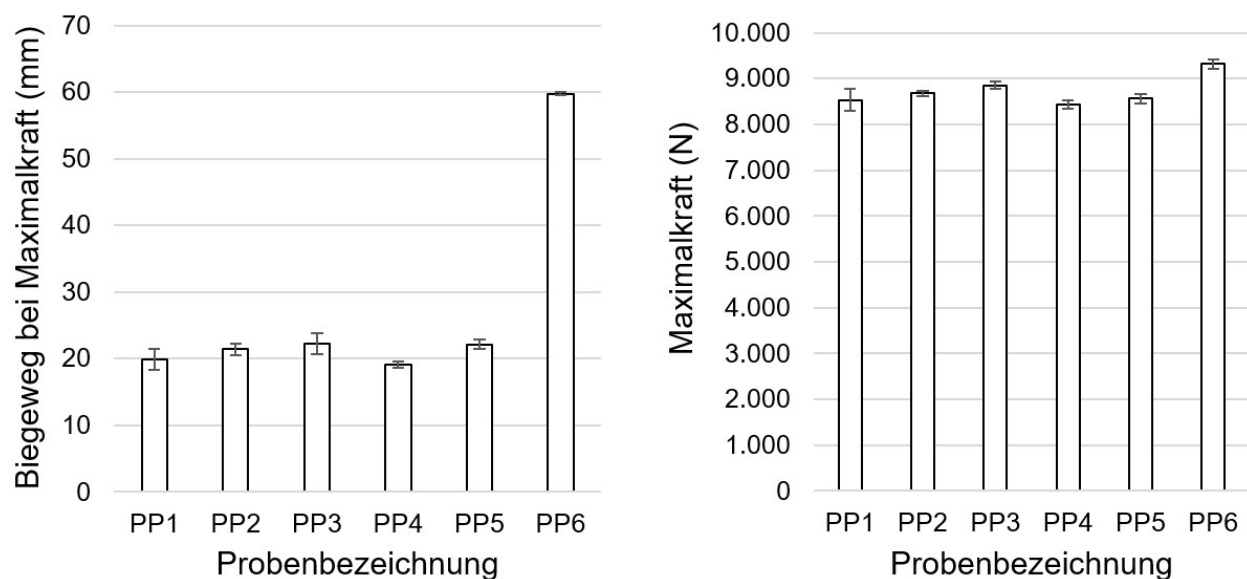


Bild 56: Maximalkraft (rechts) und Biegeweg bei Maximalkraft (links) von PP-H mit einer Wanddicke von 30 mm im Technologischen Biegeversuch

Bei den PE-Proben konnte im Technologischen Biegeversuch bei Raumtemperatur kein Versagen festgestellt werden. Es kam weder zu einem Riss noch zu einem Bruch der Probekörper. Daher wurden die Proben gekühlt und bei verschiedenen niedrigeren Prüftemperaturen erneut dem Biegeversuch unterzogen. Bild 57 zeigt die Biegeproben nach der jeweiligen Versuchsdurchführung. Bei einer Abkühlung der Proben auf  $-26\text{ °C}$  sowie bei der Durchführung des Biegeversuchs bei  $-40\text{ °C}$  in der Kältekammer konnte ebenso kein Versagen festgestellt werden. Durch eine Abkühlung der Biegeproben auf etwa  $-160\text{ °C}$  mittels Stickstoff ist ein Versagen der Proben aufgetreten. Allerdings führte die Abkühlung zu einer derartigen Versprödung der Proben, dass eine Auswertung ebenfalls nicht möglich ist.

Raumtemperatur ( $+23\text{ °C}$ )Kältekammer ( $-40\text{ °C}$ )Gefrierschrank ( $-26\text{ °C}$ )Stickstoffkühlung ( $\sim -160\text{ °C}$ )

Bild 57: PE-Proben nach dem Technologischen Biegeversuch bei verschiedenen Prüftemperaturen

### 5.4.3 Zähigkeitsverhalten bei schlagartiger Beanspruchung

Zur Charakterisierung des Zähigkeitsverhaltens der Schweißverbindungen wurde der Schlagbiegeversuch nach Charpy durchgeführt. Bei den PP-Proben wurde dabei ein sprödes Bauteilversagen hervorgerufen. Bild 58 (links) zeigt die Schlagzähigkeit von PP-H bei verschiedenen Wanddicken. Da die Proben jeweils aus verschiedenen Positionen der Schweißnaht (siehe Bild 29) entnommen wurden, handelt es sich bei den dargestellten Ergebnissen um Mittelwerte der verschiedenen Positionen. Die höchste Schlagzähigkeit wird bei einer Wanddicke von 50 mm erreicht, was vermutlich daran liegt, dass es sich hierbei um extrudiertes Material handelt, während die Platten mit einer Wanddicke von 30 und 70 mm gepresst wurden. Bild 58 (rechts) zeigt die Schlagzähigkeit der einzelnen Positionen in der Schweißnaht bei einer Wanddicke von 70 mm. Aufgrund der hohen Schwankungen der Schlagzähigkeit im Grundmaterial ist eine Interpretation der Ergebnisse der geschweißten Proben nicht möglich.

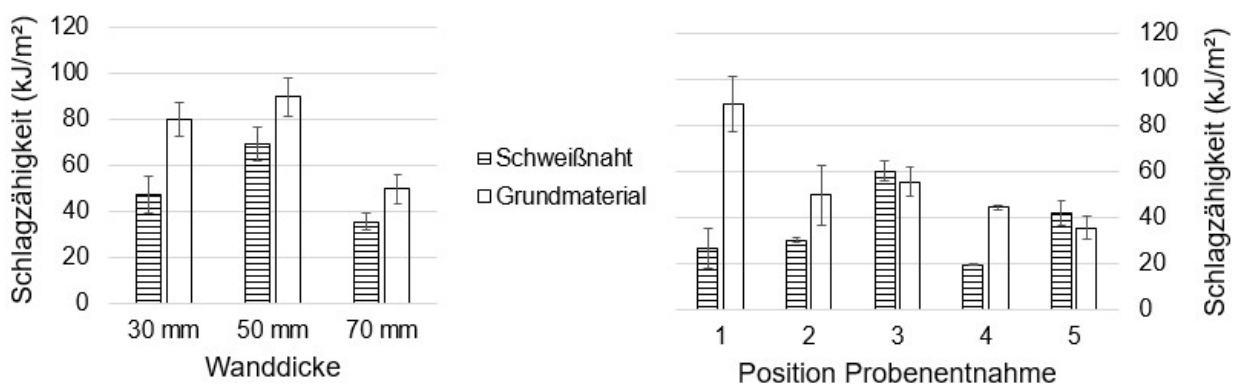


Bild 58: Schlagzähigkeit von PP-H; links: Wanddicke 30 bis 70 mm; rechts: Wanddicke 70 mm

Ein Versagen der PE-Proben konnte auch im Schlagbiegeversuch bei Raumtemperatur nicht festgestellt werden. Daher wurde der Versuch bei einer Prüftemperatur von 0 °C wiederholt. Die verschärften Prüfbedingungen haben aber ebenfalls nicht zu einem Bauteilversagen geführt. Der Werkstoff kann somit bei den vorliegenden Prüfbedingungen genügend Energie dissipieren, um ein instabiles Risswachstum und ein sprödes Versagen zu unterbinden. Die nach der Durchführung des Schlagbiegeversuchs äußerlich unveränderten PE-Proben werden in Bild 59 gezeigt.



Bild 59: PE-Proben nach dem Schlagbiegeversuch mit einem Pendelhammer mit 25 J Arbeitsvermögen

Selbst mit einem Schlagpendel, welches ein Arbeitsvermögen von 150 J aufweist, bleiben die PE-Proben nach dem Schlagbiegeversuch optisch unverändert. Bild 60 zeigt die entsprechenden Proben nach der Versuchsdurchführung.



Bild 60: PE-Proben nach dem Schlagbiegeversuch mit einem Schlagpendel mit 150 J Arbeitsvermögen

## 5.5 Zeitstandverhalten der Schweißverbindungen

### 5.5.1 Zeitstandverhalten von PE

Für den Zeitstand-Zugversuch wurden die Proben aus der Mitte und dem unteren Rand der Schweißnaht entnommen, da zwischen diesen beiden Bereichen der größte Unterschied in der Restschmelzeschichtdicke ermittelt wurde. In den Kapiteln zum Aufschmelzverhalten der Versuchswerkstoffe sowie zu den geometrischen Betrachtungen an den Schweißverbindungen wird dies ausführlich dargestellt. Ein Unterschied in der Restschmelzeschichtdicke beeinflusst die lokalen rheologischen Bedingungen während des Fügeprozesses sowie die lokalen Abkühlbedingungen. Auswirkungen auf lokale Unterschiede im langzeitmechanischen Verhalten der Schweißproben werden daher zuerst zwischen der Mitte und dem Rand der Schweißnähte sichtbar sein.

Bild 61 zeigt die Ergebnisse des Zeitstand-Zugversuchs von gepressten Platten aus PE100 mit verschiedenen Wanddicken von 30 bis 100 mm. Bei allen untersuchten Wanddicken sind die

Standzeiten der Proben aus dem Randbereich geringer als die Standzeiten in der Mitte der Schweißnaht. Dies deutet auf ein frühzeitiges sprödes Versagen des Materials im Randbereich hin, was den Schadensfällen in der Praxis entspricht.

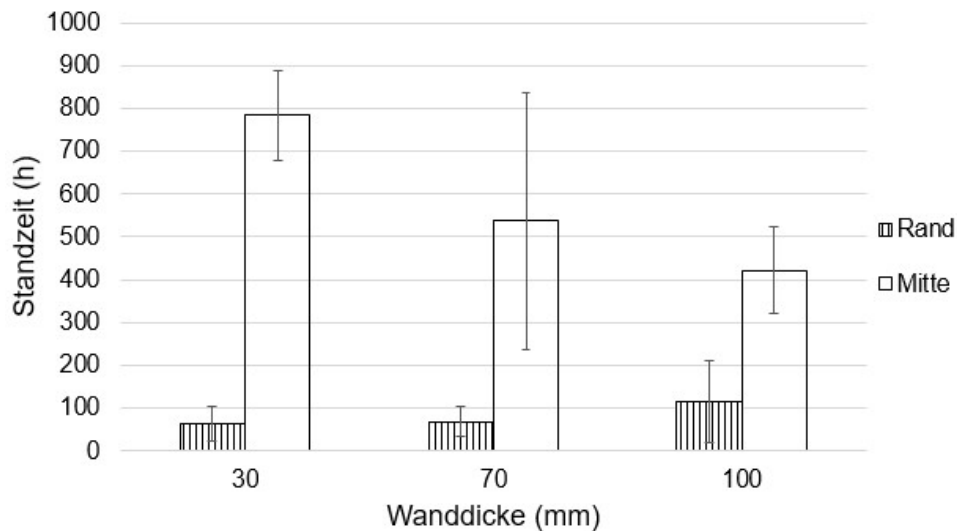


Bild 61: Zeitstandverhalten von PE100 (gepresst) mit einer Wanddicke von 30 bis 100 mm am Rand und in der Mitte der Schweißnaht

Mikroskopische Bruchanalysen der Randproben zeigen, dass das Versagen durch Fügeebenenbrüche zustande kommt. Bei der in Bild 62 (rechts) gezeigten Zeitstand-Zugprobe aus dem Randbereich ist nach 26 Stunden ein Fügeebenenbruch aufgetreten. Allerdings verläuft auch bei Zugproben, welche aus der Mitte der Schweißnaht entnommen wurden und eine entsprechend längere Standzeit aufweisen, der Bruch durch die Fügeebene. Als Beispiel wird in Bild 62 (links) das Bruchverhalten einer Zugprobe aus der Mitte gezeigt, welche im Zeitstand-Zugversuch eine Standzeit von 538 Stunden aufgewiesen hat. Eine Differenzierung des Bruchverhaltens zwischen der Mitte und dem Rand der Schweißnaht mittels Mikroskopie ist daher nicht möglich.

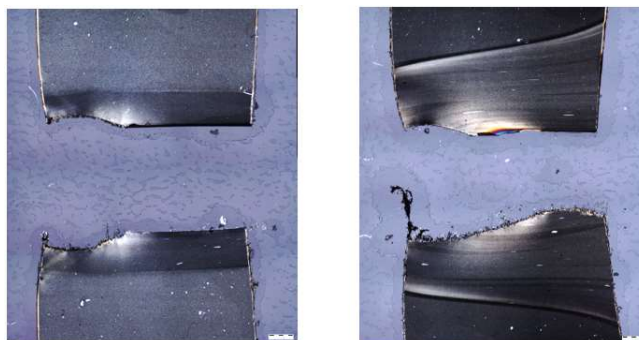


Bild 62: Bruchverhalten von PE-Proben im Zeitstand-Zugversuch; links: Standzeit 538 h; rechts: Standzeit 26 h

In Bild 63 wird der Unterschied des Zeitstandverhaltens zwischen gepressten und extrudierten Platten bei einer jeweiligen Wanddicke von 30 mm gezeigt. Während sich die Standzeiten bei den Proben aus dem Randbereich nur unwesentlich unterscheiden, ist bei den extrudierten Zugproben aus der Mitte der Schweißnaht eine deutliche Reduzierung der Standzeit zu erkennen. Die kurzen Standzeiten der geschweißten Probekörper aus extrudiertem Material korrelieren mit den geringen und vom Entnahmeort der Proben unabhängigen Standzeiten des extrudierten Grundmaterials im FNCT.

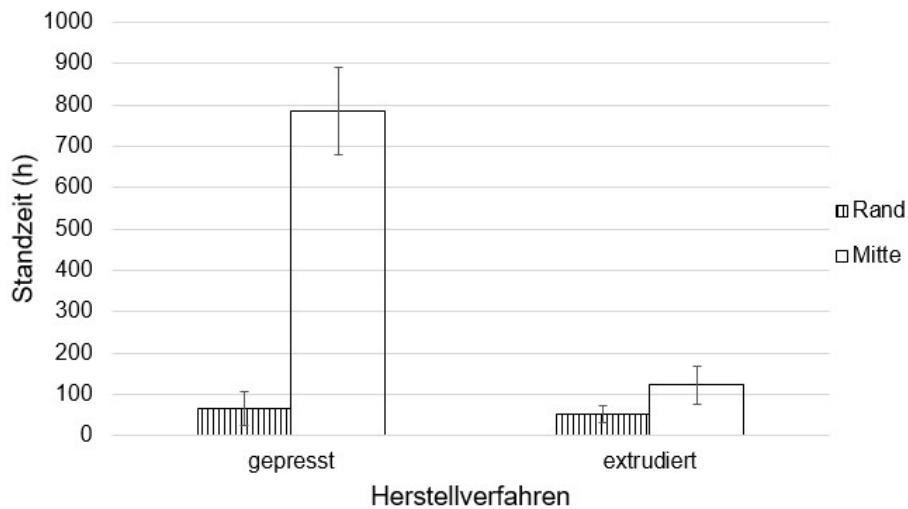


Bild 63: Zeitstandverhalten von PE100 mit einer Wanddicke von 30 mm

Um zu ermitteln, inwiefern das Zeitstandverhalten geschweißter Platten auf das Verhalten geschweißter Rohre übertragen werden kann, wurden aus einem extrudierten Rohr aus PE100 mit einer Wanddicke von 35,8 mm mehrere Zugproben für den Zeitstand-Zugversuch entnommen. Bild 64 zeigt schematisch die Entnahme der Proben aus dem Rohr sowie den sich bildenden Wärmestau während der Anwärmphase. Die Zugproben wurden aus dem oberen, dem unteren und dem mittleren Bereich des geschweißten Rohres entnommen, wobei jeweils zwischen der inneren, der mittleren und der äußeren Position unterschieden wurde. Dadurch haben sich insgesamt neun verschiedene Positionen ergeben. Aufgrund des Wärmestaus und der daraus resultierenden Restschmelzeschichtdicke sowie den Erkenntnissen, welche an den Plattenmaterialien gewonnen wurden, ist eine kurze Standzeit an der unteren Außenseite sowie an der oberen Innenseite zu erwarten.

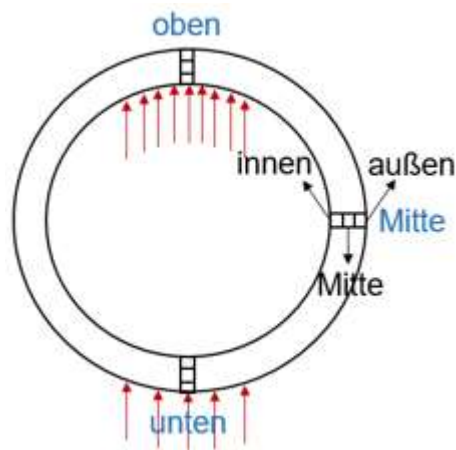


Bild 64: Schematische Darstellung der Probenentnahme aus einem PE-Rohr zur Durchführung von Zeitstand-Zugversuchen

Die Ergebnisse der Zeitstand-Zugversuche, welche mit dem Rohr durchgeführt wurden, zeigt Bild 65. Unabhängig von der Entnahmeposition (oben, Mitte, unten) liegt die kürzeste Standzeit jeweils im Außenbereich des Rohres vor. Ein Einfluss des Wärmestaus und der daraus resultierenden Restschmelzeschichtdicke ist dagegen nicht festzustellen. Dies zeigt die hohe Standzeit der aus der oberen Innenseite entnommenen Probe. Die an der Außenseite des Rohres durch die Herstell- und Kühlbedingungen vorliegenden Eigenspannungen, die bereits bei den Temperversuchen gezeigt wurden, dominieren somit das Versagensverhalten im Zeitstand-Zugversuch.

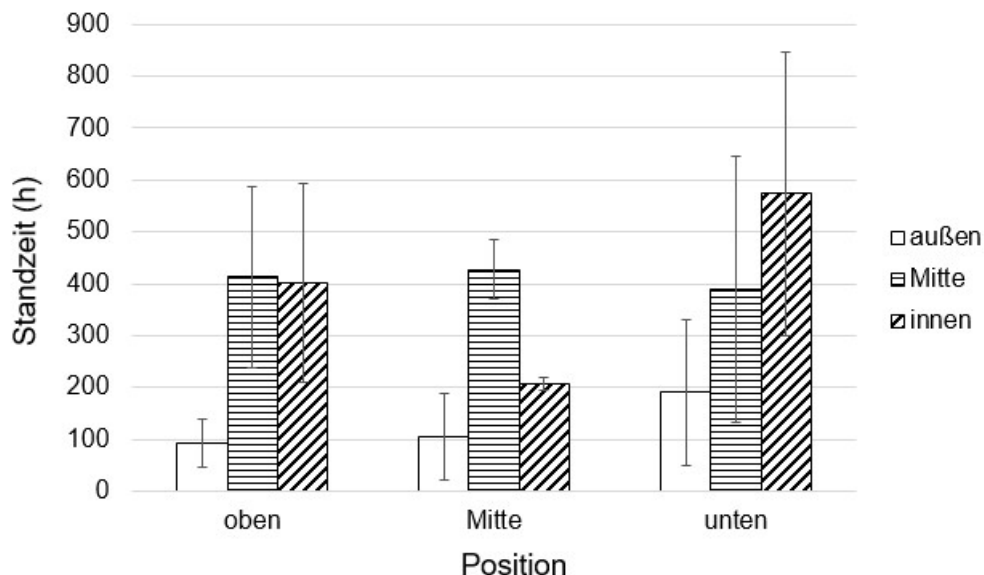


Bild 65: Zeitstandverhalten eines Rohres aus PE100 mit einer Wanddicke von 35,8 mm

### 5.5.2 Zeitstandverhalten von PP

Bild 66 zeigt die Ergebnisse des Zeitstand-Zugversuchs von Platten aus PP-H mit verschiedenen Wanddicken von 30 bis 70 mm. Aufgrund der hohen Standardabweichungen ist eine Unterscheidung der Standzeit hinsichtlich der Wanddicke sowie des Entnahmeortes der Proben nicht möglich. Bei allen Wanddicken sind teilweise Grundmaterialbrüche aufgetreten, was keine Rückschlüsse auf die Schweißnahtfestigkeit zulässt. Eine Interpretation der Ergebnisse ist daher schwierig. Möglicherweise liegt das unstetige Verhalten von PP im Zeitstand-Zugversuch an strukturellen Besonderheiten im Grundmaterial, was zu hohen lokalen Schwankungen der Festigkeit führt.

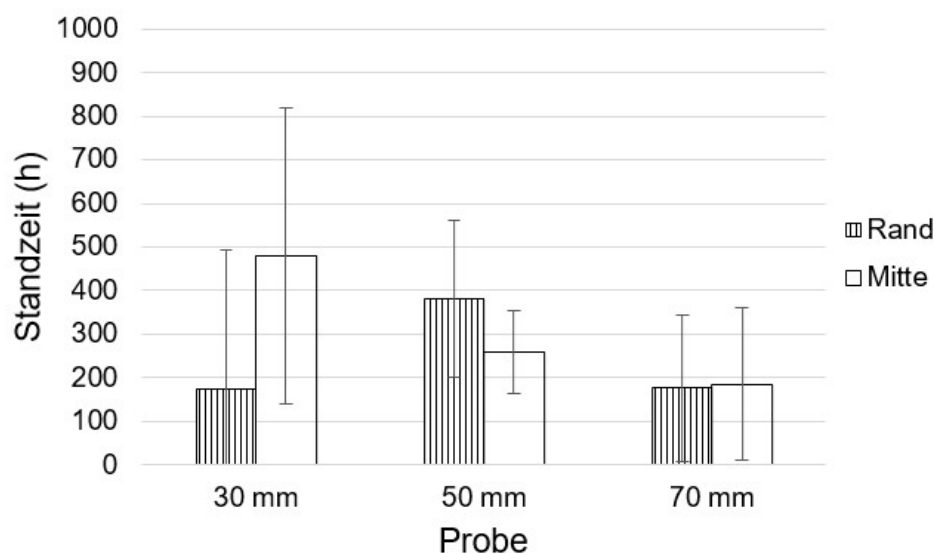


Bild 66: Zeitstandverhalten von PP-H mit einer Wanddicke von 30 bis 70 mm am Rand und in der Mitte der Schweißnaht

Bild 67 zeigt die Mikroskopieaufnahmen von zwei Schweißnähten aus PP-H. In Bild 67 (links) ist ein Streifen im Randbereich des extrudierten Grundmaterials zu erkennen, was vermutlich den Übergang von Zug- zu Druckspannungen in der extrudierten Platte darstellt. Dieser Übergangsbereich wirkt sich auch auf die Geometrie der Schweißnaht aus, die an dieser Stelle einen deutlichen Knick aufweist. Eine Auswirkung dieser Unstetigkeit auf die Schweißnahtfestigkeit ist zu erwarten. Bild 67 (rechts) zeigt eine gepresste Platte aus PP-H mit einer Wanddicke von 30 mm. Aufgrund des Pressverfahrens weist das Grundmaterial eine starke Inhomogenität auf, was sich auch in der Struktur der Schweißnaht widerspiegelt. Lokale Unterschiede in der Schweißnahtfestigkeit sind daher vorstellbar.

Aufgrund der starken Schwankungen der Ergebnisse bei den mit PP durchgeführten Zeitstand-Zugversuchen beschränken sich die nachfolgenden Parametervariationen auf die Untersuchung des Zeitstandverhaltens von PE.





Bild 67: Mikroskopieaufnahmen von Schweißnähten aus PP-H; links: Wanddicke 50 mm, extrudiert; rechts: Wanddicke 30 mm, gepresst

### 5.5.3 Zeitstandverhalten bei Parametervariationen

Zur Untersuchung des Verbesserungspotenzials der langzeitmechanischen Eigenschaften durch die Variation verschiedener Parameter wurden geschweißte Platten aus PE100 abweichend von den DVS-Standardparametern hergestellt. Zunächst wurde eine Variation der Anwärmzeit durchgeführt. Ausgehend von der nach DVS 2207-1 für PE vorgegebenen Anwärmzeit von 1.000 s bei einer Wanddicke von 100 mm wurde diese auf die Hälfte sowie auf ein Fünftel reduziert. Daraus ergeben sich Anwärmzeiten von 500 s sowie 200 s. Der Grund für die Reduzierung der Anwärmzeit liegt in der Verkleinerung der Seiteneinstrahlung und des Wärmestaus während der Anwärmphase, was vor allem im Randbereich zu einer Verringerung des erzeugten Schmelzevolumens führen soll. Außerdem hat eine kürzere Anwärmzeit den Vorteil schnellerer Prozesszeiten, was für die Anwendung in der Industrie ein wichtiges Kriterium ist. Bild 68 zeigt die Standzeiten, welche die Schweißproben mit unterschiedlichen Anwärmzeiten und einer unveränderten Heizelementtemperatur von 220 °C im Zeitstand-Zugversuch jeweils erreicht haben. Sowohl eine Halbierung der Anwärmzeit auf 500 s als auch eine Reduzierung auf 200 s führen unabhängig vom Entnahmeort der Proben zu einer starken Verkürzung der Standzeiten.

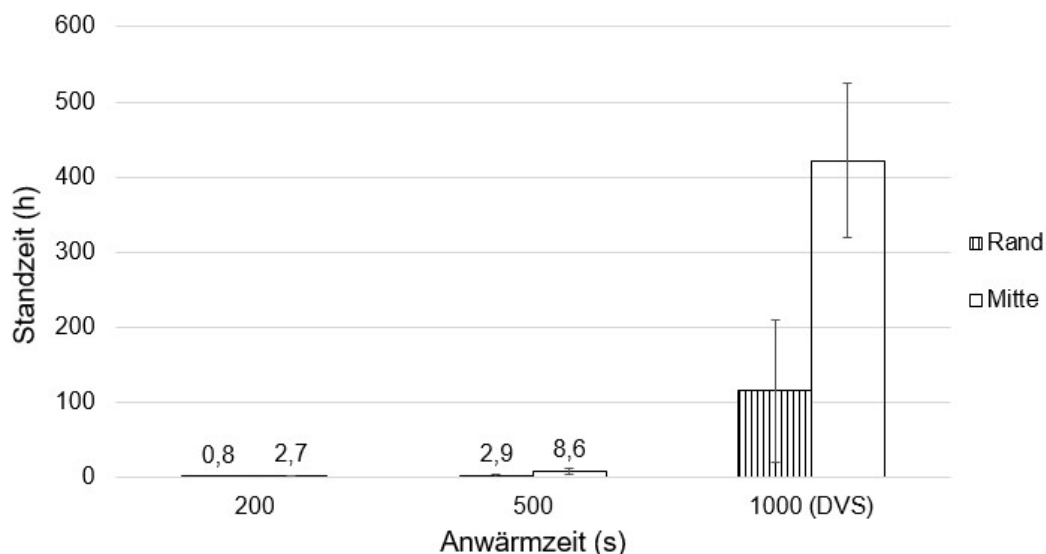


Bild 68: Zeitstandverhalten von PE100 mit einer Wanddicke von 100 mm bei verringerter Anwärmzeit

Weiterhin wurden Untersuchungen durchgeführt, bei denen eine Reduzierung der Anwärmzeit auf 200 s mit einer erhöhten Heizelementtemperatur von 240 °C kombiniert wurde (siehe Bild 69). Die Erhöhung der Heizelementtemperatur hat lediglich einen geringen Einfluss auf die erreichbaren Standzeiten, während die reduzierte Anwärmzeit das Zeitstandverhalten dominiert. Eine Verkürzung der Anwärmzeit wirkt sich somit nachteilig auf die Schweißnahtfestigkeit aus und kann durch eine Erhöhung der Heizelementtemperatur nicht ausgeglichen werden.

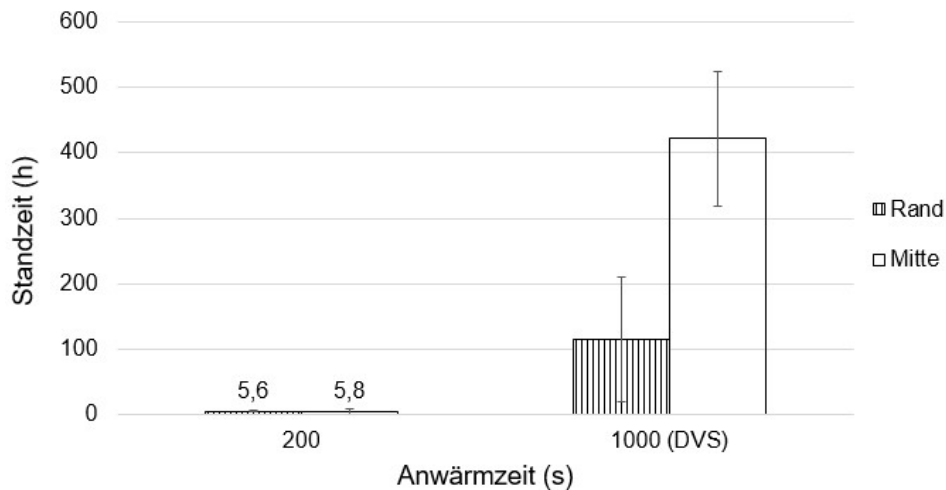


Bild 69: Zeitstandverhalten von PE100 mit einer Wanddicke von 100 mm bei verringerter Anwärmzeit und erhöhter Heizelementtemperatur (240 °C)

Die Standzeiten von PE100 mit einer Wanddicke von 70 mm, welche mit einer Halbierung des Fügedrucks auf 0,075 MPa erzielt wurden, werden in Bild 70 gezeigt. Die Reduzierung des Fügedrucks führt unabhängig vom Ort der Probenentnahme zu einer starken Reduzierung der erreichten Standzeiten.

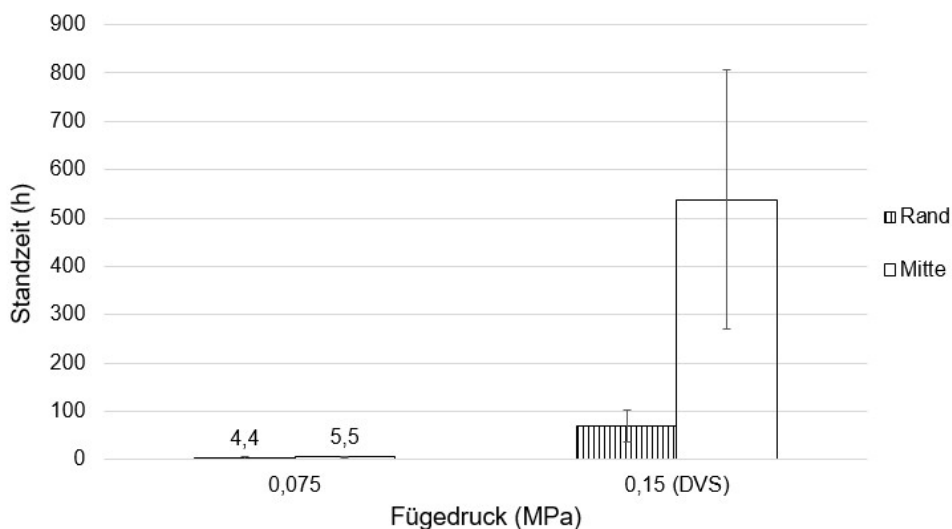


Bild 70: Zeitstandverhalten von PE100 mit einer Wanddicke von 70 mm bei reduziertem Fügedruck

Bild 71 zeigt die Standzeiten, die durch eine Erhöhung des Fügedrucks bei einer Wanddicke von 30 mm erzielt wurden. Sowohl eine Verdopplung auf 0,3 MPa als auch eine Vervielfachung auf 0,6 MPa führen zu Standzeiten, welche mit einem Fügedruck von 0,15 MPa vergleichbar sind. Allerdings zeigen die Standzeiten bei größerem Fügedruck erhöhte Standardabweichungen im Vergleich zu der Standzeit, die mit einem Fügedruck von 0,15 MPa erzielt wurde.

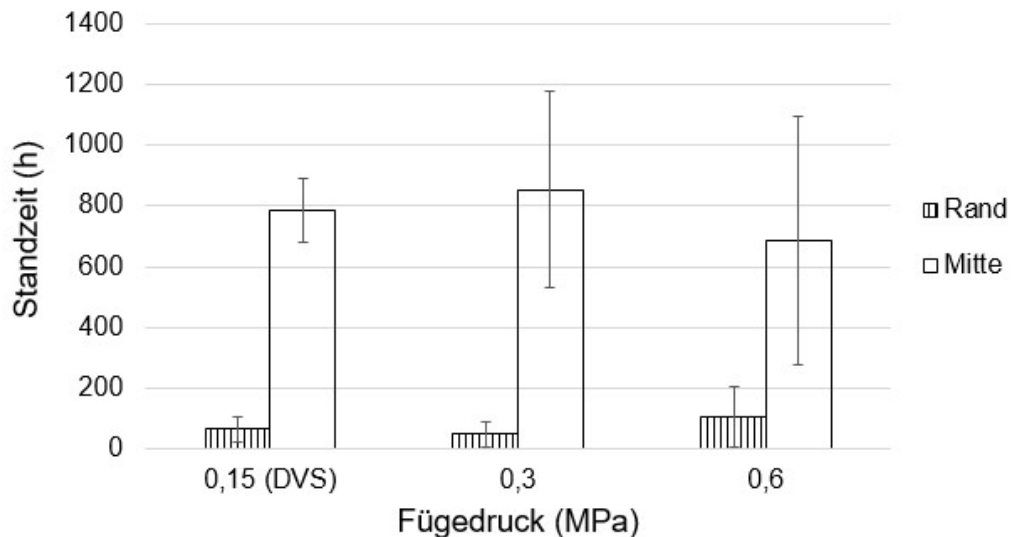


Bild 71: Zeitstandverhalten von PE100 mit einer Wanddicke von 30 mm bei erhöhtem Fügedruck

Bild 72 zeigt die Bruchverläufe von zwei Schweißproben, welche mit erhöhtem Fügedruck hergestellt wurden. Die in Bild 72 (links) dargestellte Probe, die mit einem Fügedruck von 0,6 MPa geschweißt wurde, hat eine Standzeit von 1.267 Stunden erzielt. Bei der in Bild 72 (rechts) gezeigten und mit einem Fügedruck von 0,3 MPa gefertigten Probe ist nach 1.339 Stunden ein Schweißnahtbruch aufgetreten. Im Gegensatz zu den nach DVS 2207-1 geschweißten Proben, bei denen der Bruch durch die Fügeebene verläuft, zeigt sich bei diesen beiden Proben eine Bruchinitiierung im Bereich der deformierten Sphärolithe, was auf eine Verbesserung der Festigkeit in der Fügeebene hindeutet. Die hohen Standardabweichungen der Standzeiten zeigen allerdings, dass durch eine Erhöhung des Fügedrucks keine gleichbleibende Verbesserung der Festigkeit erzielt werden kann.

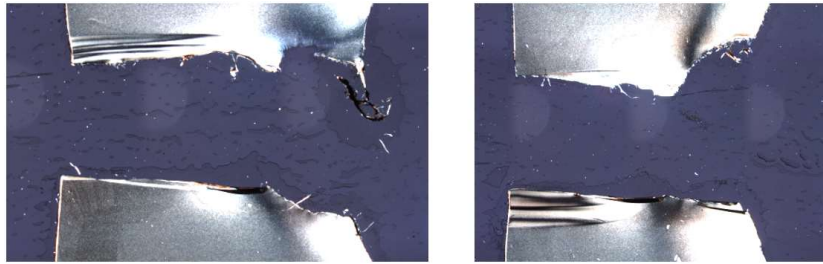


Bild 72: Bruchverhalten von PE100 mit einer Wanddicke von 30 mm im Zeitstand-Zugversuch bei erhöhtem Fügedruck (Probenentnahme aus der Mitte der Schweißnaht); links: Fügedruck 0,6 MPa; rechts: Fügedruck 0,3 MPa

Zusammenfassend verdeutlichen die dargestellten Standzeiten, dass weder eine Reduzierung der Anwärmzeit noch eine Verringerung oder Erhöhung des Fügedrucks zu einer wesentlichen Verbesserung der Langzeitfestigkeit führt.

## 5.6 Abkühlbedingungen in der Schweißnaht

Zur Erforschung der Ursache für den im Zeitstand-Zugversuch geschwächten Randbereich geschweißter Platten wurden die Abkühlbedingungen der Schweißnähte nach dem Fügen an verschiedenen Positionen in der Fügeebene (siehe Bild 19) untersucht. In den Abkühlkurven, die in Bild 73 gezeigt werden, sind die Kristallisationsphasen zu erkennen. Es zeigt sich, dass die Kristallisationsvorgänge während des Abkühlens im unteren Randbereich aufgrund des höheren Restschmelzevolumens später beginnen und länger anhalten als in der Mitte der Schweißnaht. Diese inhomogene Abkühlung hat zur Folge, dass der Randbereich unter Zugeigenstress erstarrt, was möglicherweise im Zeitstand-Zugversuch zu einer kürzeren Standzeit führt. Erstaunlich ist jedoch, dass der geschwächte Randbereich im Kurzzeit-Zugversuch nicht nachgewiesen werden kann, weshalb für die endgültige Erforschung des Versagensmechanismus weitere Untersuchungen stattfinden müssen.

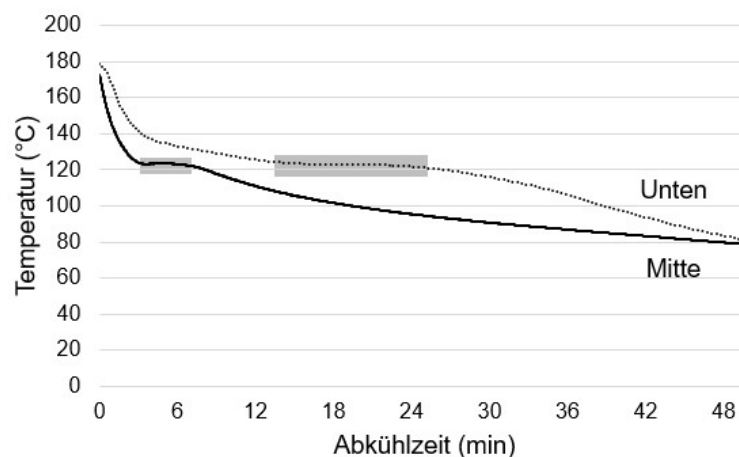


Bild 73: Abkühlkurven in der Fügeebene einer Platte aus PE100 RC mit einer Wanddicke von 100 mm (grau markierte Bereiche: Kristallisationsphasen)

## 5.7 Zeitstandverhalten bei abgeschirmten Schweißnähten

Um eine gleichmäßige Abkühlung der Schweißnaht zu erzielen, wurden Versuche durchgeführt, bei denen die Fügeteile während der Anwärmphase von der Seiteneinstrahlung abgeschirmt wurden. Dies hatte zum Ziel, die Schweißnahtkrümmung zu reduzieren und dadurch die Standzeiten der Randbereiche im Zeitstand-Zugversuch zu verbessern.

Bild 74 zeigt zwei Schweißnähte aus PE mit einer Wanddicke von jeweils 30 mm. Bei der linken Schweißnaht wurde während des Anwärmens keine Abschirmung verwendet. Im Gegensatz dazu wurden die Fügeteile bei der rechten Schweißnaht mit Aluminiumfolie umwickelt (siehe Bild 16), sodass sie während des Anwärmprozesses von der Seiteneinstrahlung des Heizelements abgeschirmt wurden. Die Aluminiumfolie hat eine Reduzierung der Schweißnahtkrümmung bewirkt, was durch die in Bild 74 angegebenen Tabellenwerte verdeutlicht wird. Dies beweist, dass die Seiteneinstrahlung die Ursache für die Schweißnahtkrümmung ist. Allerdings ist die Aluminiumfolie nicht für eine vollständige Eliminierung der Seiteneinstrahlung geeignet.

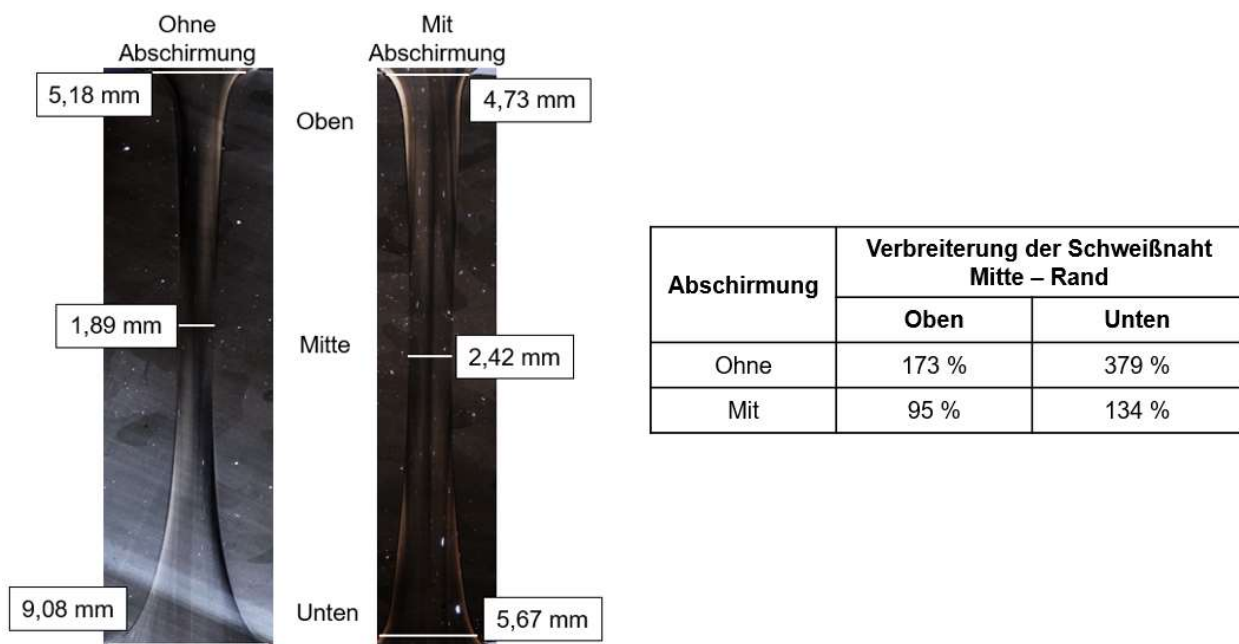


Bild 74: Verringerung der Schweißnahtkrümmung mittels Aluminiumabschirmung

Um eine bessere Unterdrückung der Seiteneinstrahlung und somit eine weitere Reduzierung der Schweißnahtkrümmung zu erzielen, wurden Fügeteile aus PE100 mit einer Wanddicke von 30 mm während des Anwärmens am unteren Rand des Heizelements positioniert (siehe Bild 17). Bild 75 zeigt, dass dadurch am unteren Rand der Schweißnaht die Krümmung fast vollständig beseitigt wurde und ein gerader Schweißnahtausgang vorliegt. Da die Eliminierung der Seiteneinstrahlung bei diesem Versuch nur einseitig erfolgte, ist die Krümmung am oberen Rand der Schweißnaht allerdings weiterhin vorhanden.



Bild 75: Eliminierung der Schweißnahtkrümmung im unteren Randbereich einer Schweißnaht aus PE100 mit einer Wanddicke von 30 mm

Bild 76 zeigt das Zeitstandverhalten der in Bild 75 dargestellten Schweißnaht. Trotz des geraden Schweißnahtausgangs liegt am unteren Rand eine niedrige Standzeit vor. Zusätzlich ist auch in der Mitte der Schweißnaht eine geringe Standzeit festzustellen. Die Gründe für die Verschlechterung des Zeitstandverhaltens liegen möglicherweise in einer nachteiligen Beeinflussung des Schmelzefflusses durch die Verringerung der Schweißnahtkrümmung. Einerseits hat die Reduzierung der Krümmung eine geringere Breite des Schmelzekanals zur Folge, was das Fließen der Schmelze am unteren Schweißnahtausgang behindern kann. Weiterhin ist es vorstellbar, dass die Schmelze durch die einseitige Reduzierung der Krümmung vor allem in Richtung des oberen Schweißnahtausgangs fließt und somit ein insgesamt ungleichmäßiger Schmelzeffluss in der Schweißnaht vorliegt. Außerdem sind in der in Bild 75 gezeigten Mikroskopieaufnahme starke Scherströmungen am unteren Schweißnahtausgang zu erkennen, was sich nachteilig auf die Schweißnahtfestigkeit auswirken kann.

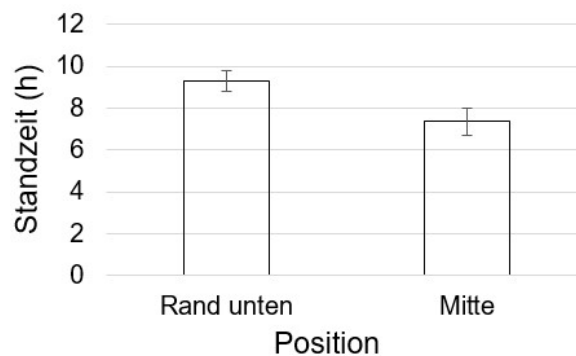


Bild 76: Zeitstandverhalten einer abgeschirmten Schweißnaht aus PE100 mit einer Wanddicke von 30 mm

Bild 77 zeigt die Bruchbilder der Schweißnaht nach der Prüfung im Zeitstand-Zugversuch. Sowohl in der Mitte (siehe Bild 77 links) als auch am unteren Rand (siehe Bild 77 rechts) der Schweißnaht ist ein Versagen durch Fügeebenenbrüche aufgetreten.



Bild 77: Bruchbilder einer Schweißnaht mit einseitig reduzierter Krümmung nach der Prüfung im Zeitstand-Zugversuch; links: Mitte der Schweißnaht; rechts: Unterer Rand der Schweißnaht

Es sind weitere Untersuchungen notwendig, um den Versagensmechanismus zu verstehen und die Beeinflussung der Schweißnahtkrümmung vorteilhaft zu modifizieren. Bis jetzt konnte nicht abschließend geklärt werden, inwiefern die Krümmung der Schweißnaht das Zeitstandverhalten der geschweißten Kunststoffe beeinflusst.

## 5.8 Visuelle Darstellung des Quetschflusses

Zur visuellen Darstellung des Quetschflusses während des Fügens wurden Plattenverbunde aus PE und PP hergestellt und paarweise geschweißt. Um eine geeignete Versuchsmethodik zu entwickeln, wurden zunächst im Rahmen von Vorversuchen verschiedene Plattenverbunde mit einer Gesamtdicke von jeweils etwa 30 mm geschweißt. Die Schweißversuche wurden nach DVS 2207-1 für PE und DVS 2207-11 für PP durchgeführt, wobei die Angleichphase teilweise weggelassen wurde. Der Grund hierfür ist, dass während der Angleichphase bereits ein ungleichmäßiger Schmelzefluss stattfindet, der das Fließbild beeinflusst und die optischen Auswertemöglichkeiten beeinträchtigt.

Die Ergebnisse der Vorversuche werden in Bild 78 gezeigt. Die Probe PE 1 stellt beispielhaft einen geschweißten Plattenverbund aus Polyethylen dar, während die Proben PP 1 bis PP 3 geschweißte Plattenverbunde aus Polypropylen zeigen. Die Proben PP 1 und PP 2 unterscheiden sich lediglich in der farblichen Anordnung der Platten und wurden ohne Angleichen geschweißt. Ein wesentlicher Einfluss der Plattenreihenfolge ist nicht feststellbar. Bei der Probe PP 3 wurde die Angleichphase nicht weggelassen, was sichtbare Auswirkungen auf das Fließbild hat. Es ist zu erkennen, dass die Schmelze der schwarzen Platten bis in den Randbereich der Wulst fließt, während dies bei der Probe PP 1 nicht der Fall ist.

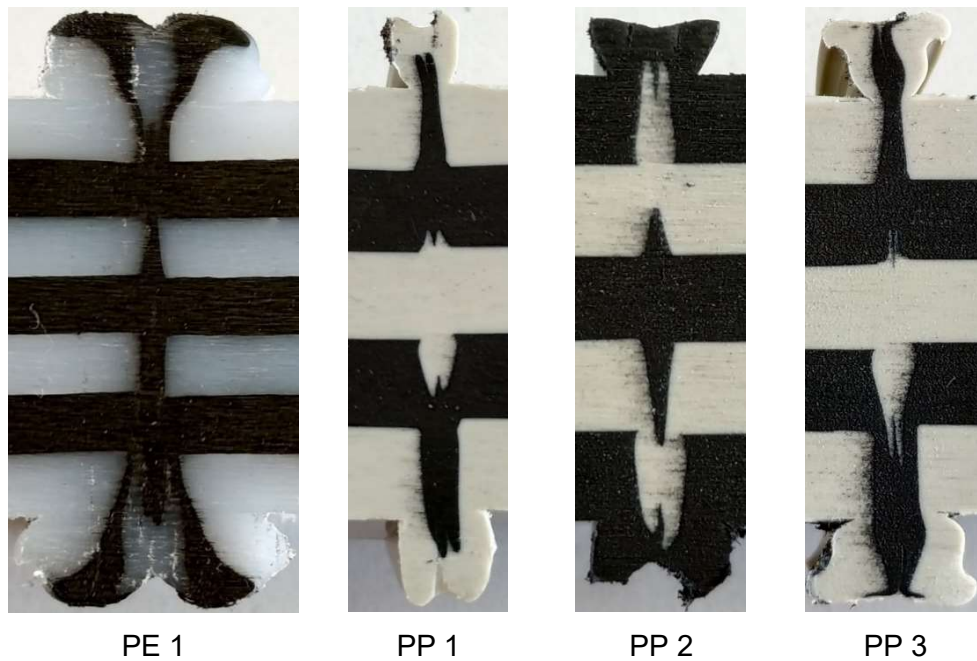


Bild 78: Visualisierung des Quetschflusses bei verschiedenen Plattenverbunden aus PE und PP mit einer Wanddicke von ca. 30 mm

Bild 79 zeigt die visuelle Darstellung des Quetschflusses von PE und PP mit einer Wanddicke von insgesamt 100 mm bzw. 66 mm.



Bild 79: Visualisierung des Quetschflusses bei Plattenverbunden mit einer Wanddicke von 100 mm (PE) und 66 mm (PP)



Um ein praxisnahes Fließbild zu erstellen, wurde der Schweißprozess inklusive Angleichphase durchgeführt. Die Fügeflächen der Plattenverbunde wurden vor dem Schweißen plangefräst, um ein möglichst gleichmäßiges Fließen während des Angleichens zu erzielen.

Bei der Betrachtung der Fließlinien fällt auf, dass die Fügeebene aus dem Material der Fügeteilmitte gebildet wird und damit Oberflächeneffekte eliminiert werden. Eine vertiefte Analyse wurde im Rahmen des vorliegenden Vorhabens nicht vorgenommen.

## 6 Zusammenfassung

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde das Heizelementschweißen von Platten und Rohrsegmenten mit einer Wanddicke bis 100 mm systematisch untersucht. Die Aufschmelzversuche des Plattenmaterials haben gezeigt, dass sich während des Anwärmens ein unsymmetrisch gekrümmtes Schmelzeschichtprofil ausbildet. Während sich in der Mitte der Fügefläche die geringste Schmelzeschichtdicke bildet, wird vor allem am unteren Rand der Fügeiteile deutlich mehr Schmelze erzeugt. Dabei wurde mit ansteigender Wanddicke bzw. Anwärmzeit eine zunehmende Krümmung beobachtet.

Der Grund für die ungleichmäßige Ausbildung der Schmelzeschicht ist zum einen die Seiteneinstrahlung des Heizelements auf die Fügeiteile. Zum anderen kommt es während des Anwärmens zu einem Wärmestau an den unteren Rändern der Halbzeuge, der mit größeren Wanddicken und damit zunehmenden Anwärmzeiten ansteigt. Beim Heizelementschweißen von Rohren führen die Seiteneinstrahlung sowie der Wärmestau zu einer ungleichmäßigen Schweißnaht und damit zu unterschiedlichen Abkühlbedingungen über den gesamten Rohrumfang.

Bei den kurzzeitmechanischen Untersuchungen konnte ein Einfluss der Schweißnahtkrümmung auf die Festigkeit der geschweißten Kunststoffe nicht festgestellt werden. Im Kurzzeit-Zugversuch wurden material- und wanddickenunabhängig Zugfestigkeiten der Schweißnähte auf Grundmaterialniveau erreicht. Im Technologischen Biegeversuch weist PP hohe Biegeewege und Maximalkräfte auf. Weder im Technologischen Biegeversuch noch im Schlagbiegeversuch kann bei PE ein Bauteilversagen hervorgerufen werden.

Bei den Zeitstand-Zugversuchen des Plattenmaterials aus PE hat sich bei allen untersuchten Wanddicken ein frühzeitiges Versagen des äußeren Randbereichs gezeigt. Eine mögliche Erklärung hierfür ist die Schweißnahtkrümmung, die eine ungleichmäßige Abkühlung der Schweißnaht nach dem Fügen zur Folge hat. Aufgrund des hohen Schmelzevolumens erstarrt der untere Rand der Schweißnaht als Letztes unter Einwirkung von Zugeigenspannungen, was zu einer Schwächung der Schweißnaht führt.

Bei der Betrachtung des Zeitstandverhaltens von Rohren spielt die Schweißnahtkrümmung allerdings keine Rolle, da hier grundsätzlich zuerst ein Versagen im äußeren Randbereich auftritt. Temperversuche haben gezeigt, dass die Randschichten extrudierter Rohre eigenspannungsbehaftet sind, was das Versagensverhalten im Zeitstand-Zugversuch dominiert.

Eine Verbesserung des Zeitstandverhaltens geschweißter Platten aus PE durch die Variation der Anwärmzeit und des Fügedrucks ist nicht möglich. Sowohl eine Verkürzung der Anwärmzeit als auch eine Verringerung des Fügedrucks führen zu einer Verschlechterung des

mechanischen Verhaltens. Die in DVS 2207-1 für PE sowie DVS 2207-11 für PP angegebenen Parameter sind aktuell am besten zum Schweißen von Halbzeugen geeignet.

Ebenso konnte durch eine Abschirmung der Fügeiteile während der Anwärmphase und eine dadurch erzielte Verringerung der Schweißnahtkrümmung keine Verbesserung der langzeitmechanischen Eigenschaften erzielt werden.

Die in der Praxis auftretenden Sprödbrüche können mit den bisherigen Forschungsergebnissen nicht endgültig erklärt werden. Daher sind weitere Untersuchungen notwendig, um den Schadensmechanismus an dickwandigen, geschweißten Rohrleitungen zu verstehen.

## 7 Verwendung der Zuwendung

### 7.1 Personaleinsatz – wissenschaftlich-technisches Personal

In folgender Tabelle werden die durchgeführten Arbeiten laut Antrag und Schlussbericht mit den Zielen und erreichten Ergebnissen zusammenfassend dargestellt. Zudem sind die erforderlichen Personenmonate für die Bearbeitung der jeweiligen Arbeitsschritte in der Tabelle angegeben.

Arbeitsschritt gemäß Antrag	Zuordnung gemäß Schlussbericht (Kapitel)	Ziel	Ergebnis	Personaleinsatz
1	3.3.2, 5.2	Untersuchungen zur Schmelzeschichtbildung beim Heizelementstumpfschweißen	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ungleichmäßige Temperatur in der Schmelze während des Anwärmens</li> <li>- Unsymmetrisch gekrümmte Schmelzeschicht</li> </ul>	3,5 PM
2	5.2, 4.3.1, 5.3.1, 5.3.2	Herstellung der Schweißproben und Polarisationsmikroskopische Analyse	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Nach DVS und mit Parametervariationen geschweißte Proben aus PE und PP mit unterschiedlichen Wanddicken zur weiteren Analyse bereitgestellt</li> <li>- Krümmung der Restschmelzeschichtdicke optisch erkennbar</li> <li>- Bei Rohren ungleichmäßige Schweißnahtdicke über den gesamten Rohrumfang</li> </ul>	3,5 PM
3	3.3.3, 4.2, 5.1.3, 5.6	Untersuchung des Spannungszustandes des Grundmaterials und der Schweißnähte	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Nachweis von Spannungen mittels Tempern und Abkühluntersuchungen</li> <li>- Temperversuche: Unterschiedliches Krümmungsverhalten zwischen gepresstem und extrudiertem Material</li> <li>- Abkühlverhalten: Langsameres Abkühlen des Randbereichs der Schweißnaht</li> </ul>	4 PM

4	4.4.1 – 4.4.4, 5.4, 5.5, 5.7	Mechanische Prüfung der Schweißproben	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Keine Unterschiede in den Kurzzeit-Prüfungen erkennbar</li> <li>- Frühzeitiges Versagen der Randbereiche im Zeitstand-Zugversuch bei Plattenmaterial</li> <li>- Versagen des Rohrmaterials im Zeitstand-Zugversuch zuerst in der äußeren Randschicht</li> </ul>	2,74 PM
5	4.3.2, 5.8	Untersuchungen zur Visualisierung des Quetschflusses	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Herstellung und Schweißen von geschichteten Plattenverbunden aus PE und PP</li> <li>- Lokaler Schmelzefluss aufgrund unterschiedlicher Plattenfärbung erkennbar</li> <li>- Ausbildung der Fügeebene hauptsächlich aus Material aus dem Mittenbereich der Füge Teile</li> </ul>	2,75 PM
6	3.3.4, 5.4.1, 5.4.2, 5.5.3, 5.7	Optimierung der Prozessführung beim Heizelementstumpfschweißen	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Keine verbesserten Eigenschaften durch Variation der Schweißparameter</li> <li>- Verschlechterte Standzeiten durch Reduzierung der Anwärmzeit und des Fügedrucks</li> <li>- Keine Verbesserung der Standzeit durch einseitige Reduzierung der Schweißnahtkrümmung mittels Abschirmung</li> </ul>	3 PM
7	Alle Kapitel	Auswertung und Verallgemeinerung der Versuchsergebnisse; Transfer in die Praxis und Berichterstattung	<p>Allgemein:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Unterschiedliches Bruchverhalten zwischen geschweißten Platten und Rohren</li> <li>- Schwächung der Randbereiche</li> <li>- DVS-Parameter zum</li> </ul>	4 PM

			Heizelementstumpfschweißen gut  Transfermaßnahmen: - Mitarbeit in den DVS Arbeitsgruppen W 4.4 „Messen und Prüfen“ und W 4.1a „Heizelementschweißen von Rohren und Tafeln“ - Halbjährliche Vorstellung des aktuellen Projektstandes auf den Sitzungen des FA11 des DVS - Treffen mit dem Projektbegleitenden Ausschuss - Veröffentlichungen (siehe Kapitel 10.1)	
--	--	--	--	--

## 7.2 Gerätebeschaffung (Beschaffungswert über 2.500 €)

Keine.

## 7.3 Ausgaben für Leistungen Dritter

Keine.

## 8 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die durchgeführten Arbeiten und erzielten Ergebnisse wurden vom Projektbegleitenden Ausschuss als zielführend und produktiv bewertet. Die geleistete Arbeit entspricht in vollem Umfang dem begutachteten und bewilligten Antrag und war daher für die Durchführung des Vorhabens notwendig und angemessen.

## 9 Bedeutung der Ergebnisse für kmU

### 9.1 Wissenschaftlich-technischer Nutzen

Obwohl das Heizelementschweißen ein etablierter und sowohl theoretisch als auch praktisch weitreichend analysierter Prozess ist, hat sich das Forschungsvorhaben erstmals mit dem Schweißen dickwandiger Halbzeuge beschäftigt. Die Ergebnisse des Forschungsvorhabens zeigen das Aufschmelz- und Schweißverhalten dickwandiger Halbzeuge beim Heizelementstumpfschweißen. Die optischen und mechanischen Untersuchungen haben gezeigt, dass die Krümmung der Schweißnähte bei dickwandigem Material eine wichtige Rolle

spielt. Das Langzeitverhalten ist für den Einsatz der Halbzeuge in der Praxis besonders relevant. Im Zeitstand-Zugversuch hat sich eine offensichtliche Schwächung des Randbereichs gezeigt, die weiter untersucht werden muss.

## 9.2 Wirtschaftlicher Nutzen

Der industrielle Einsatz von Rohrleitungen mit Wanddicken über 30 mm nimmt aufgrund der weltweit wachsenden Infrastruktur immer mehr zu. Der Hauptgrund für die Verwendung von dickwandigen Kunststoffrohren ist die höhere Durchflussmenge, die damit gewährleistet werden kann. Der Nutzen einer systematischen Untersuchung des Schweißverhaltens dickwandiger Materialien für die KMU des Behälter- und Rohrleitungsbaus liegt sowohl in der Fertigung langzeitstabiler Schweißverbindungen hoher Nahtqualitäten als auch in der optimalen Ausnutzung des Werkstoffpotenzials sowie in der Wettbewerbsfähigkeit gegenüber herkömmlichen Systemen.

Die im Forschungsvorhaben durchgeführten Zeitstanduntersuchungen bieten den Unternehmen eine wissenschaftlich fundierte Aussage über das Langzeitverhalten dickwandiger, geschweißter Kunststoffhalbzeuge. Aufgrund der fehlenden zeitlichen Ressourcen sowie des notwendigen Prüfequipments können derartige Untersuchungen in der Industrie in der Regel nicht stattfinden. Obwohl Rohrsysteme in der Praxis für eine Lebensdauer bis 100 Jahre ausgelegt werden, werden die Materialien daher häufig nur in Kurzzeituntersuchungen getestet. Die Ergebnisse des Forschungsvorhabens zeigen aber deutlich, dass eine Aussage über das Langzeitverhalten auf Basis von Kurzzeitprüfungen nicht möglich ist. Die Zeitstanduntersuchungen haben eine offensichtliche Schwächung des Randbereichs der geschweißten Halbzeuge gezeigt, was für einen zukünftig sicheren Einsatz dickwandiger Kunststoffprodukte in der Praxis weiter untersucht werden muss.

Obwohl sich die Industrie auf die in der DVS-Richtlinie angegebenen Parameter zum Schweißen dickwandiger Halbzeuge verlässt und diese seit langer Zeit anwendet, handelt es sich dabei lediglich um extrapolierte Parameter. In dem Projekt wurden diese Werte erstmals systematisch analysiert. Durch Parametervariationen wurde außerdem das Verbesserungspotenzial der angegebenen Werte untersucht. Zusammenfassend hat sich gezeigt, dass die DVS-Parameter für die Praxis grundsätzlich geeignet sind und dass insbesondere die angegebene Anwärmzeit sowie der Fügedruck für eine langzeitstabile Schweißverbindung einzuhalten sind.

## 10 Ergebnistransfer

### 10.1 Veröffentlichungen

F. Friedrich; M. Gehde: Heizelementschweißen dickwandiger Bauteile. Joining Plastics. 1/2019. S. 11. DVS Media GmbH. Düsseldorf (2019)

F. Friedrich; M. Gehde: Heated Tool Welding of Thick-Walled Components. Konferenzbeitrag. 13<sup>th</sup> International Conference Advances in Plastics Technology APT'19. 29.-31.10.2019. Chorzów, Poland. ISBN 978-83-63555-59-7

F. Friedrich; M. Gehde: Qualitätsgerechtes Heizelementstumpfschweißen dickwandiger Halbzeuge aus Polyethylen. Konferenzbeitrag. Technomer 2019 – 26. Fachtagung über Verarbeitung und Anwendung von Polymeren. 07.-08.11.2019. Chemnitz. ISBN 978-3-939382-14-0

F. Friedrich; M. Gehde: Heated Tool Welding of Thick-Walled Components. Vortrag. PPS 2019 Europe-Africa Regional Conference of the Polymer Processing Society. 18.-21.11.2019. Pretoria, South Africa.

### 10.2 Plan zum Ergebnistransfer

Transfermaßnahmen während der Projektlaufzeit:

Maßnahme	Ziel	Rahmen	Zeitraum
<b>Maßnahme A:</b>  <b>Regelmäßige Treffen mit dem PA</b>	Bekanntmachung der Erkenntnisse in den betroffenen Unternehmen; kritische Diskussion der Ergebnisse	<b>A1</b> Kick-Off-Meeting mit Diskussion der geplanten Arbeiten <b>A2</b> Vorstellung der ersten Ergebnisse und Abstimmung über weiteres Vorgehen <b>A3</b> Vorstellung der fortgeführten Arbeiten <b>A4</b> Abschlusspräsentation der Ergebnisse	11/2017  01/2019  05/2019  08/2019
<b>Maßnahme B:</b>  <b>Gezieltes Ansprechen der industriellen Anwender</b>	Kommunikation der Ergebnisse in die Industrie; dabei standen besonders die Anwender der Halbzeugschweißverfahren im Vordergrund	<b>B1</b> Firmenbesuche (z.B. Ludwig Pfeiffer GmbH, Dresden im Jahr 2018)	01/2018 bis 08/2019
<b>Maßnahme C:</b>  <b>Vorträge bei den Gremien des DVS und in der Forschungsvereinigung des DVS</b>	Kommunikation der Ergebnisse an die Vertreter der kunststoffverarbeitenden Industrie	<b>C1</b> DVS FA 11 „Kunststofffügen“  <b>C2</b> DVS AG W4 „Fügen von Kunststoffen“ Plenarsitzung <b>C3</b> Vorträge im Ausschuss	11/2017 04/2018 11/2018 04/2019 10/2019  05/2019  ab 2019



		für Technik des DVS	
<b>Maßnahme D:</b>  <b>Mitarbeit in den Gremien zur Richtlinienarbeit und im Ausschuss für Technik des DVS</b>	Einbringen der Erkenntnisse in DVS Richtlinien	<b>D1</b> DVS AG W 4.4 „Messen und Prüfen“	04/2018 11/2018 04/2019
		<b>D2</b> DVS AG W 4.1a „Heizelementschweißen von Tafeln und Rohren“	10/2019
		<b>D3</b> Ausschuss für Technik des DVS	ab 2018
<b>Maßnahme E:</b>  <b>Fachvorträge</b>	Bekanntmachung der Ergebnisse in der Industrie und Wissenschaft	<b>E1</b> Fachvortrag auf der Großen Schweißtechnischen Tagung des DVS	Nicht erfolgt
		<b>E2</b> Vortrag auf der Fachtagung „Technomer“	11/2019
		<b>E3</b> Vortrag auf der Plastic Pipes Conference	Nicht erfolgt
		<b>E4</b> Vortrag auf der 13 <sup>th</sup> International Conference Advances in Plastics Technology APT'19, Chorzów, Poland	10/2019
		<b>E5</b> Vortrag auf der PPS 2019 Europe-Africa Regional Conference of the Polymer Processing Society, Pretoria, South Africa	11/2019
<b>Maßnahme F:</b>  <b>Fachartikel</b>	Bekanntmachung der Ergebnisse in der Industrie und Wissenschaft	<b>F1</b> (Kunststofftechnische) Fachzeitschriften (Joining Plastics)	01/2019
		<b>F2</b> Bekanntmachung über den DVS Newsletter und den DVS Newsticker	Nicht erfolgt
		<b>F3</b> DVS-Magazin	Nicht erfolgt
<b>Maßnahme G:</b>  <b>Messeauftritte</b>	Bekanntmachung der Ergebnisse in der Industrie und Wissenschaft	<b>G1</b> Fakuma, Messestand der TU Chemnitz	Nicht erfolgt
		<b>G2</b> Hannover Messe, Messestand der TU Chemnitz	Nicht erfolgt
<b>Maßnahme H:</b>  <b>Veröffentlichungen im Internet</b>	Bekanntmachung der Ergebnisse in der Industrie und Wissenschaft	<b>H1</b> Internetauftritt der Professur Kunststoffe (Homepage der TU Chemnitz)	ab 02/2018
		<b>H2</b> Internetauftritt der Forschungsvereinigung	ab 2017
<b>Maßnahme I:</b>  <b>Übernahme in die Lehre an der TU Chemnitz</b>	Schulung der zukünftigen Ingenieure	<b>I1</b> kunststofftechnische Vorlesungen an der TU Chemnitz	ab 10/2018

Transfermaßnahmen nach Abschluss des Vorhabens:

<b>Maßnahme</b>	<b>Ziel</b>	<b>Rahmen</b>	<b>Zeitraum</b>
<b>Maßnahme J:</b> <b>Gezieltes Ansprechen der industriellen Anwender</b>	Kommunikation der Ergebnisse in die Industrie; dabei stehen besonders die Anwender der Halbzeugschweißverfahren im Vordergrund	<b>J1</b> Firmenbesuche <b>J2</b> Bekanntmachung über den Newsletter des DVS <b>J3</b> Beitrag im DVS Geschäftsbericht 2019	ab 04/2020 ab 04/2020  06/2020
<b>Maßnahme K:</b> <b>Vorträge bei den Gremien des DVS und in der Forschungsvereinigung des DVS</b>	Kommunikation der Ergebnisse an die Vertreter der Kunststoffverarbeitenden Industrie;	<b>K1</b> DVS FA 11 „Kunststofffügen“ <b>K2</b> DVS AG W4 „Fügen von Kunststoffen“ <b>K3</b> Vorträge im Ausschuss für Technik	s. Tabelle oben 05/2020 ab 2020
<b>Maßnahme L:</b> <b>Mitarbeit in den Gremien zur Richtlinienarbeit und im Ausschuss für Technik des DVS</b>	Einbringen der Erkenntnisse in DVS Richtlinien und im Ausschuss für Technik	<b>L1</b> DVS AG W 4.4 „Messen und Prüfen“ <b>L2</b> DVS AG W 4.1a „Heizelementschweißen von Tafeln und Rohren“ <b>L3</b> Ausschuss für Technik des DVS	03/2020 04/2020 ab 2020
<b>Maßnahme M:</b> <b>Fachvorträge</b>	Bekanntmachung der Ergebnisse in der Industrie und Wissenschaft	<b>M1</b> Fachvortrag auf der ANTEC <b>M2</b> Fachvortrag auf der PPS <b>M3</b> Fachvortrag auf der Plastic Pipes Conference	03/2021 s. Tabelle oben 09/2020
<b>Maßnahme N:</b> <b>Fachartikel</b>	Bekanntmachung der Ergebnisse in der Industrie und Wissenschaft	<b>N1</b> Kunststofftechnische Fachzeitschriften (z. B. Kunststoffe, Joining Plastics, Schweißen und Schneiden, 3R...) <b>N2</b> Bekanntmachung über den DVS Newsletter und den DVS Newsticker <b>N3</b> DVS-Magazin	ab 2020 04/2020 ab 2020
<b>Maßnahme O:</b> <b>Abschlussbericht</b>	Bekanntmachung der Ergebnisse in der Industrie und Wissenschaft	<b>O1</b> Schlussbericht zum Forschungsvorhaben	03/2020

Einschätzung zur Realisierbarkeit des Transferkonzepts:

Der dargestellte Plan für den Ergebnistransfer in die Wirtschaft wurde teilweise bereits erfolgreich umgesetzt und wird auch in Zukunft aller Voraussicht nach erfolgreich umgesetzt werden können. Durch die Veröffentlichungen „Heizelementschweißen dickwandiger Bauteile“, „Qualitätsgerechtes Heizelementstumpfschweißen dickwandiger Halbzeuge aus Polyethylen“ sowie den beiden veröffentlichten, internationalen Vorträgen „Heated Tool Welding of Thick-Walled Components“ wurde der Transfer der Ergebnisse in die Wirtschaft bereits realisiert. Die Veröffentlichungen fassen alle Ergebnisse des durchgeführten Vorhabens zusammen und sind für die Industrie, v.a. für kmU, welche davon zukünftig profitieren können, einsehbar. Die Unternehmen können unter anderem die in den Veröffentlichungen dargestellten Erkenntnisse

zur Ausbildung der Schmelzeschichtdicke sowie zu den Zeitstand-Zugversuchen und Parameterstudien in ihre Tätigkeit einbinden.

## 11 Literaturverzeichnis

- [1] P. Eyrer; T. Hirth; P. Elsner: Polymer Engineering - Technologien und Praxis. Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg (2008)
- [2] G. W. Ehrenstein: Polymer Werkstoffe. Struktur-Eigenschaften-Anwendung. 3. Auflage. Carl Hanser Verlag. München (2011)
- [3] E. Baur; S. Brinkmann; T. A. Osswald; E. Schmachtenberg: Saechtling Kunststoff Taschenbuch. 30. Ausgabe. Carl Hanser Verlag. München (2007)
- [4] H. Renneberg; W. Schneider: Kunststoffe im Anlagenbau - Werkstoffe, Konstruktion, Schweißprozesse, Qualitätssicherung. Fachbuchreihe Schweißtechnik Band 135. Verlag für Schweißen und verwandte Verfahren DVS-Verlag GmbH. Düsseldorf (1998)
- [5] M. Bastian: Kunststoffrohre – Netze für heute und morgen!. 3R international (45) Heft 9. 2006. Vulkan Verlag GmbH. Essen (2006)
- [6] B. Baudrit; E. Kraus; P. Heydemeyer; M. Bastian; J. Kern: Sicheres Verbinden von Giganten. Plastverarbeiter. S. 44-46. Ausgabe März (2011)
- [7] B. Baudrit; F. Dorbath; P. Heydemeyer; M. Bastian: Untersuchung zur Oxidschichtbildung und –entfernung an PE-Rohren vor dem Heizwendelschweißen. Joining Plastics. 2/2011. S. 102-110. DVS Media GmbH. Düsseldorf (2011)
- [8] B. Baudrit; E. Kraus; M. Bastian; P. Heydemeyer; J. Kern: Entwicklung des Heizwendelschweißverfahrens für die Verbindung von Großrohren aus Polyethylen mittels universal anwendbarer flexibler Wickelmuffen. Joining Plastics. 1/2011. S. 26-33. DVS Media GmbH. Düsseldorf (2011)
- [9] G. W. Ehrenstein (Hrsg.); M. Gehde; Et. Al.: Handbuch Kunststoff-Verbindungstechnik. Carl Hanser Verlag. München (2004)
- [10] J. Hessel: Langzeitprüfung von Schweißverbindungen aus Polyethylen bei komplexer Beanspruchung. Z. Werkstofftechnik 15, S. 153-157. Verlag Chemie GmbH. Weinheim (1984)
- [11] J. Hessel: 50 Jahre Rohre aus Polyethylen – Eine ingenieurtechnische Betrachtung. 3R international (45) Heft 3-4. 2006. Vulkan Verlag GmbH. Essen (2006)
- [12] B. Kempe; J. Hessel: Zeitstandverhalten von Schweißverbindungen aus HDPE bei der Einwirkung von Chemikalien. Z. Werkstofftechnik 14, S. 37-41. Verlag Chemie GmbH. Weinheim (1983)
- [13] J. Hessel: Langzeitverhalten von Schweißverbindungen an Großrohren aus

- Polyethylen. 3R international (50) Heft 4-5. 2004. S. 314-317. Vulkan Verlag GmbH. Essen (2004)
- [14] T. Böhm; M. Haese; J. Obermayer: Großrohre aus PE100 in der Abwasseraufbereitung. 3R international (48) Heft 1-2. 2009. S. 62-66. Vulkan Verlag GmbH. Essen (2009)
- [15] B. Damkowski: Großrohre und Verbindungen für Druckleitungen, PE100 – anhand von Praxisbeispielen. Vortragsunterlagen. InfraTech 2014. Essen (2014)
- [16] R. Lenk: Heizelementstumpfschweißen und Extrusionsschweißen von PE-Rohren > d 1000 mm. Fachbericht. Frank GmbH. Mörfelden-Walldorf
- [17] J. Heß; T. Böhm: Gewickelte Großrohre aus Polyethylen erschließen neue Einsatzmöglichkeiten. 3R international (43) Heft 4-5. 2004. Vulkan Verlag GmbH. Essen (2004)
- [18] T. Frank: Profilierte Kanalrohre aus PE-HD – Heizwendelschweißverbindungen bis DN 1800. Fachbericht. Frank GmbH. Mörfelden-Walldorf
- [19] J. Hessel: „PE 100-RC“ – Ein PE 100 mit erweitertem Anwendungspotenzial. 3R international (47) Heft 3-4. S. 189-193. Vulkan Verlag GmbH. Essen (2008)
- [20] J. Hessel: Das Langzeitverhalten von Schweißverbindungen an Halbzeugen aus Polyethylen – Eine Frage der Kerbempfindlichkeit. Joining Plastics. 2/2007. S. 161-163. DVS Media GmbH. Düsseldorf (2007)
- [21] J. Kreiter: Optimierung der Schweißnahtfestigkeit von Heizelementstumpfschweißungen von Formteilen durch verbesserte Prozeßführung und Selbsteinstellung. Dissertation an der Universität Paderborn (1987)
- [22] J. Natrop: Rechnergestützte Parameteroptimierung und Qualitätssicherung in der Serienfertigung am Beispiel des Heizelementschweißens. Dissertation an der Universität Paderborn (1992)
- [23] R. Dietz: Strukturbezogene Betrachtung zum Zeitstandverhalten geschweißter Polyolefinhalbzeuge. Dissertation an der Technischen Universität Chemnitz (2017)
- [24] H. Potente: Fügen von Kunststoffe – Grundlagen, Verfahren, Anwendung. Carl Hanser Verlag. München (2004)
- [25] H. Potente; P. Tappe: Modellgesetze für das Heizelement-Stumpfschweißen von PE-Rohren. Abschlussbericht zum AiF-Forschungsprojekt Nr. 5825
- [26] H. Potente: Eine Analyse des Heizelementstumpfschweißens von Rohren aus teilkristallinen Thermoplasten. DVS – Berichte 84. DVS-Verlag GmbH. Düsseldorf (1983)

- [27] H. Potente: Theorie des Heizelementstumpfschweißens. Kunststoffe 67 (1977)
- [28] P. Michel: Parameteroptimierung beim Heizelementschweißen am Beispiel von HDPE. Dissertation an der Universität Paderborn (1987)
- [29] P. Tappe: Modellgesetze beim Heizelementstumpfschweißen teilkristalliner Thermoplaste. Dissertation an der Universität Paderborn (1989)
- [30] H. - J. Michel: Untersuchungen zur Verschweißbarkeit unterschiedlicher HD-Polyethylene mittels Heizelementstumpfschweißen. Dissertation an der RWTH Aachen (1984)
- [31] M. Haager; T. Frank; A. Lueghamer: Einfluss der Werkstoffqualität auf das Langzeitverhalten von Schweißverbindungen. Joining Plastics. 1/2007. S. 75-83. DVS Media GmbH. Düsseldorf (2007)
- [32] E. Gaube: Der Kunststoff im Apparate- und Anlagenbau. Z. Werkstofftechnik 12, S. 2-10. Verlag Chemie GmbH. Weinheim (1981)
- [33] P. John: Schweißen im Behälter- und Apparatebau. Z. Werkstofftechnik 15, S. 149-153. Verlag Chemie GmbH. Weinheim (1984)
- [34] M. J. Oliveira; C. A. Bernado; D. A. Hemsley: Morphology and mechanical behavior of polypropylene hot plate welds. Polymer Engineering and Science. Vol. 41, No. 11 (2001)
- [35] M. J. Oliveira; D. A. Hemsley: The microstructure of polypropylene welds as a guide to processing history. British Polymer Journal. Vol. 17, No. 3 (1985)
- [36] E. Schmachtenberg; C. Tüchert: Long-term properties of butt-welded poly(propylene). Macromolecular Material and Engineering. Vol. 288 (2003)
- [37] U. Egen: Gefügestruktur in Heizelementschweißnähten an Polypropylenrohren. Dissertation an der Universität-Gesamthochschule Kassel (1986)
- [38] M. Gehde: Zum Extrusionsschweißen von Polypropylen. Dissertation an der Universität Erlangen-Nürnberg (1993)
- [39] V. D. Grinyuk; A. V. Zolotar; A. A. Shadrin: Macro- and microstructure peculiarities of butt-welded polyolefin semi-products of different processing. International Institute of Welding. IIW Doc. XVI-557-88 (1988)
- [40] L. Kamenova; K. Alexiev; G. Korab; L. Bezruk; G. Borisova: A study of relations between the welding parameters, the morphology and mechanical characteristics of polypropylene welded joints. International Institute of Welding. IIW Doc. XVI-518-87 (1987)
- [41] R. Fuhrich: Infrarotschweißen von Kunststoffen mit thermischen

- Strahlungsemittern. Dissertation an der Technischen Universität Chemnitz (2013)
- [42] A. K. Schlarb: Zum Vibrationsschweißen von Polymerwerkstoffen – Prozess-Struktur-Eigenschaften. Dissertation an der Universität-Gesamthochschule Kassel (1989)
- [43] C. Tüchert; C. Bonten; M. Gehde: Große Halbzeuge schweißen. Kunststoffe 91. S. 62-64 (2001)
- [44] M. Gehde: Qualitätsanforderungen in Schweiß- und Fügeprozessen. Tagungsband BMBF KUZ Innovationsforum Leipzig. 25./26.01.2007 Leipzig (2007)
- [45] R. Fuhrich; M. Gehde: Strahlungserwärmung beim Kunststoffschweißen mit Infrarotstrahlung. Abschlussbericht der AiF Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e.V. des DVS
- [46] R. Dietz; M. Gehde: Zeitstandfestigkeit alternativer Schweißverfahren im Apparate- und Behälterbau. Verifizierung der Prozess-Struktur-Eigenschaftsbeziehung als verfahrensunabhängige Qualitätsbeschreibung beim Schweißen. Plenarsitzung der AG W4 (DVS) am 27./28.05.2013. Würzburg (2013)
- [47] R. Dietz; M. Gehde: Zeitstandfestigkeit alternativer Schweißverfahren im Apparate- und Behälterbau. Joining Plastics 1/2014. S. 52-59. DVS Media GmbH. Düsseldorf (2014)
- [48] M. Gehde; Y. Kuriykov; G. W. Ehrenstein: Prozessoptimierung beim Vibrationsschweißen von thermoplastischen Kunststoffen. Plenarvortrag der DVS AG W4.4. Würzburg (2005)
- [49] Y. Kuriykov; R. Künkel; G. W. Ehrenstein: Vibrationsschweißen – Die entscheidende Sekunde für die Schweißnahtqualität. Schweißen und Schneiden 57. 10. S. 569-574 (2005)
- [50] K. Leskovics; M. Kollar; P. Barczy: A study of structure and mechanical properties of welded joints in polyethylene pipes. Materials Science and Engineering A (2006)
- [51] N.N.: DVS-Richtlinie 2207-1. Taschenbuch DVS Merkblätter und Richtlinien. Fügen von Kunststoffen. Fachbuchreihe Schweißtechnik Band 68/IV. 16. Auflage. S. 310. DVS Media GmbH. Düsseldorf (2016)
- [52] N.N.: DVS-Richtlinie 2207-11. Taschenbuch DVS Merkblätter und Richtlinien. Fügen von Kunststoffen. Fachbuchreihe Schweißtechnik Band 68/IV. 16. Auflage. S. 396. DVS Media GmbH. Düsseldorf (2016)
- [53] E. Pecha: Gütesicherung beim Heizelementstumpfschweißen in der Serienfertigung. DVS – Berichte 48. S. 25-31. DVS-Verlag GmbH. Düsseldorf

(1977)

- [54] D. Pieschel: Untersuchungen zur Optimierung der Wärmekontaktschweißverfahren für Plastomere (Heizelementschweißen – Wärmeimpulsschweißen). Dissertation an der RWTH Aachen (1975)
- [55] N.N.: Rohrsysteme aus PE 100-RC in der Trinkwasserversorgung. Fachverband der Kunststoffrohr-Industrie. <https://www.krv.de/artikel/rohre-systeme-aus-pe-100-rc-der-trinkwasserversorgung>. Dezember 2019
- [56] N.N.: Rohrsysteme aus PE (Polyethylen). FRANK GmbH. [https://www.frank-gmbh.de/de/Produktgruppen/Industrie/Rohrsysteme\\_aus\\_PE\\_100.php](https://www.frank-gmbh.de/de/Produktgruppen/Industrie/Rohrsysteme_aus_PE_100.php). Dezember 2019
- [57] DIN: DIN EN ISO 12162 – Thermoplastische Werkstoffe für Rohre und Formstücke für Anwendungen unter Druck – Klassifizierung, Werkstoffkennzeichnung und Gesamtbetriebs-(berechnungs-)Koeffizient. Berlin (2010)
- [58] DIN: DIN EN ISO 9080 – Kunststoff-Rohrleitungs- und Schutzrohrsysteme – Bestimmung des Zeitstand-Innendruckverhaltens von thermoplastischen Rohrwerkstoffen durch Extrapolation. Berlin (2013)
- [59] N.N.: SIMONA PE 100-RC. SIMONA AG. <https://www.simona.de/unternehmen/pressemitteilungen/detail/simonar-pe-100-rc/>. Dezember 2019
- [60] N.N.: PE100-RC. FRANK GmbH. <https://www.frank-gmbh.de/de/Produktgruppen/Versorgung-Biogas/pe100rc.php>. Dezember 2019
- [61] N.N.: PP-Rohre, Formteiler und Armaturen. FRANK GmbH. <https://www.frank-gmbh.de/de/Produktgruppen/Industrie/PP-Rohrsysteme.php>. Dezember 2019
- [62] N.N.: SIMONA PP-H AlphaPlus. SIMONA AG. [https://www.simona.de/fileadmin/user\\_upload/Medien/Mediacenter/Produktinformationen/Halbzeuge\\_und\\_Fertigteile/SIMONA-PP-H\\_AlphaPlus\\_Platte\\_-\\_Ihr\\_Vorteil\\_im\\_industriellen\\_Behaelter-\\_und\\_Apparatebau.pdf](https://www.simona.de/fileadmin/user_upload/Medien/Mediacenter/Produktinformationen/Halbzeuge_und_Fertigteile/SIMONA-PP-H_AlphaPlus_Platte_-_Ihr_Vorteil_im_industriellen_Behaelter-_und_Apparatebau.pdf). Dezember 2019
- [63] G. Menges: Neue Erkenntnisse und Möglichkeiten im Kunststoff-, Chemie-, Apparate- und Rohrleitungsbau. Z. Werkstofftechnik 12, S. 375-383. Verlag Chemie GmbH. Weinheim (1981)
- [64] H. Domininghaus: Kunststoffe im chemischen Apparatebau – Werkstoffliche und technologische Entwicklungstendenzen. Chemie-Ing.-Techn 39. 18. S. 1062-1066 (1967)
- [65] H. Busse; H. Schindler: Polymerwerkstoffe im Chemie-Apparatebau. Chemie-Ing.-



- Techn 62. 4. S. 271-277 (1990)
- [66] P. Fiedler; D. Braun; G. Weber, G. H. Michler: Einfluss von molekularer Struktur und Morphologie auf die Spannungsrißbeständigkeit von Polyethylen. Acta Polymerica 39. 9. S. 481-487 (1988)
- [67] F. Fischer: Spannungsrißbildung und Spannungsrißkorrosion bei Kunststoffen. Z. Werkstofftechnik, J. of Materials Technology 1. 2. S. 74-83 (1970)
- [68] R. Grosse-Boes; R. Kloth: Das langsame Risswachstum von Polyethylen – Mythos und Wirklichkeit. 3R international (43) Heft 4-5. S. 233-236. Vulkan Verlag GmbH. Essen (2004)
- [69] C. Hopmann; N. Borchmann; S. Koch; P. Heidemeyer; J. Wiedemann: Spannungsrisse als Versagenskriterium. Kunststoffe 4. S. 97-100 (2016)
- [70] M. Gehde: Langzeit- und Versagensverhalten von Extrusionsschweißverbindungen. Schweißen und Schneiden 48. 4. S. 278-285 (1996)
- [71] J. Hessel; P. John: Langzeitfestigkeit von HDPE-Schweißverbindungen. Kunststoffe 74. 7. S. 385-388 (1984)
- [72] H. Gebler: Langzeitverhalten und Alter von PE-HD-Rohren. Kunststoffe 79. 9. S. 823-826 (1989)
- [73] G. Diedrich; B. Kempe; K. Graf: Zeitstandfestigkeit von Rohren aus Polyethylen (HDPE) und Polypropylen (PP) unter Chemikalieneinwirkung. Kunststoffe 69. 9. S. 470-476. (1979)
- [74] R. Lecht; U. Schulte: Welches Material? Rohr- und Behälterwerkstoffe mit dem Zeitstand-Zugversuch (FNCT) auswählen. Materialprüfung 40. 10. S. 399-402 (1998)
- [75] J. Hessel; E. Mauer: Zeitstandzugprüfung in wäßriger Netzmittellösung. Materialprüfung 36. S. 240-243 (1994)
- [76] E. Gaube; H. Kausch: Bruchtheorien bei der industriellen Anwendung von Thermoplasten und glasfaserverstärkten Kunststoffen. Kunststoffe 63. 6. S. 391-397 (1973)
- [77] E. Gaube; W. Müller: Einfluß des Werkstoffs und der Verarbeitung auf die Zeitstandfestigkeit von Rohren aus HDPE. Kunststoffe 72. 5. S. 297-299 (1982)
- [78] U. Schulte: 100 Jahre Lebensdauer. Langzeitfestigkeit von Druckrohren aus bimodalen PE-HD nach ISO/TR 9080 bestätigt. Kunststoffe 87. 2. S. 203-206 (1997)
- [79] DIN: DIN 53019 – Viskosimetrie – Messung von Viskositäten und Fließkurven mit

- Rotationsviskosimetern. Berlin (2008)
- [80] N.N.: DVS-Richtlinie 2203-2. Taschenbuch DVS Merkblätter und Richtlinien. Fügen von Kunststoffen. Fachbuchreihe Schweißtechnik Band 68/IV. 16. Auflage. S. 75-77. DVS Media GmbH. Düsseldorf (2016)
- [81] N.N.: DVS-Richtlinie 2203-5. Taschenbuch DVS Merkblätter und Richtlinien. Fügen von Kunststoffen. Fachbuchreihe Schweißtechnik Band 68/IV. 16. Auflage. S. 99-101. DVS Media GmbH. Düsseldorf (2016)
- [82] DIN: DIN EN ISO 179-2 – Kunststoffe – Bestimmung der Charpy-Schlageigenschaften – Teil 2: Instrumentierte Schlagzähigkeitsprüfung. Berlin (2012)
- [83] N.N.: DVS-Richtlinie 2203-4. Taschenbuch DVS Merkblätter und Richtlinien. Fügen von Kunststoffen. Fachbuchreihe Schweißtechnik Band 68/IV. 16. Auflage. S. 82-85. DVS Media GmbH. Düsseldorf (2016)
- [84] C. Müller: Untersuchung von Holzwerkstoffen unter Schlagbelastung zur Beurteilung der Werkstoffeignung für den Maschinenbau. Dissertation an der Technischen Universität Chemnitz (2015)
- [85] DIN: DIN ISO 16770 – Kunststoffe – Bestimmung der Spannungsrisssbeständigkeit von Polyethylen unter Medieneinfluss (ESC) – Kriechversuch an Probekörpern mit umlaufender Kerbe (FNCT). Genf (2004)
- [86] N.N.: DVS-Richtlinie 2203-4 Beiblatt 2. Taschenbuch DVS Merkblätter und Richtlinien. Fügen von Kunststoffen. Fachbuchreihe Schweißtechnik Band 68/IV. 16. Auflage. S. 88-89. DVS Media GmbH. Düsseldorf (2016)
- [87] N.N.: DVS-Richtlinie 2203-1 Beiblatt 3. Taschenbuch DVS Merkblätter und Richtlinien. Fügen von Kunststoffen. Fachbuchreihe Schweißtechnik Band 68/IV. 16. Auflage. S. 61-71. DVS Media GmbH. Düsseldorf (2016)