

Frank & Krah Wickelrohr GmbH

SKZ – Das Kunststoff-Zentrum
SKZ - KFE gGmbH

**Entwicklung von ökoeffizienten Muffen
für das Heizwendelschweißen
von Rohrleitungssystemen aus PE100**

Abschlussbericht über ein Forschungsprojekt,
gefördert unter dem Az: 30581 - 21/2
von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Jürgen Kern (Frank & Krah)
Rico Möller (Frank & Krah)
Dr. Benjamin Baudrit (SKZ)
Dipl.-Volksw. Oliver Stübs (SKZ)

Würzburg, April 2015

Bezugsquelle des Forschungsberichts:

SKZ - KFE gGmbH
Friedrich-Bergius-Ring 22
97076 Würzburg

kfe@skz.de
0931 4104-411

Frank & Krah Wickelrohr GmbH

SKZ – Das Kunststoff-Zentrum
SKZ - KFE gGmbH

**Entwicklung von ökoeffizienten Muffen
für das Heizwendelschweißen
von Rohrleitungssystemen aus PE100**

Abschlussbericht über ein Forschungsprojekt,
gefördert unter dem Az: 30581 - 21/2
von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Dipl.-Ing. Jürgen Kern (Frank & Krah)

Rico Möller (Frank & Krah)

Dr. Benjamin Baudrit (SKZ)

Dipl.-Volksw. Oliver Stübs (SKZ)

Würzburg, April 2015

Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Az	30581	Referat	21/2	Fördersumme	124.700,00 €
----	--------------	---------	-------------	-------------	---------------------

Antragstitel **Entwicklung von ökoeffizienten Muffen für das Heizwendelschweißen von Rohrleitungssystemen aus PE100**

Stichworte Schweißen, Kunststoff, Muffe, Rohre, Heizwendel

Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)
24 Monate	16.01.2013	15.01.2015	

Zwischenberichte	20.01.2014	30.07.2014	
------------------	------------	------------	--

Bewilligungsempfänger	Frank & Krah Wickelrohr GmbH Dieselstraße 11 61200 Wölfersheim	Tel	06036 / 989 - 510
		Fax	- 579
		Projektleitung Herr Jürgen Kern	
		Bearbeiter Herr Rico Möller	

Kooperationspartner SKZ - KFE gGmbH
Kunststoff-Forschung und -Entwicklung
Friedrich-Bergius-Ring 22
97076 Würzburg

Zielsetzung und Anlass des Vorhabens

Das Ziel dieses Vorhabens ist die Optimierung von Heizwendelmuffen (Herstellung, Geometrie und Energiebilanz) für den Großrohrbereich (D größer als 250 mm) und die Entwicklung einer dem Konzept entsprechenden ökonomisch und ökologisch effizienten Muffe mit dem Durchmesser bis 1.000 mm. Insbesondere sollen hierbei ökonomische und ökologische Potentiale der herkömmlichen Muffen aufgezeigt und in der Entwicklung berücksichtigt werden. Neben der Überprüfung der Anwendbarkeit des entwickelten Konzepts für alle herkömmlichen Durchmesser soll auch die Validierung des neu entwickelten Konzepts im Vorhaben durchgeführt werden. Hierzu werden in Rohrdimensionen 63, 110, 250, 315 und 560 mm zahlreiche anwendungsbezogene, praxisnahe Schweiß- und Validierungsversuche durchgeführt. Eine ökologische und ökonomische Optimierung sollte als übergeordnetes Ziel haben, den Materialbedarf und die Kosten für die Herstellung der Muffe zu reduzieren. Die zu erwartenden Ergebnisse des vorliegenden Forschungsvorhabens dienen als Grundlage für die Optimierung aller Heizwendelmuffen und -fittings, da nicht nur im Großrohrbereich Einspar- bzw. Optimierungspotential zu erwarten ist.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Eine Veränderung des Muffenaufbaus kann nur erfolgen, wenn die Qualität der Fügeverbindung garantiert und die resultierenden mechanischen Eigenschaften beibehalten oder verbessert werden können. Hierzu muss die Verbindungsqualität sicher und reproduzierbar bewertet werden. Eine Gewichtsreduktion und die damit verbundene Verringerung des Materialbedarfs könnte z. B. durch eine Reduzierung der Wanddicke der Muffe in Kombination mit einer Überarbeitung bzw. Anpassung der Muffengeometrie und der Schweißfläche erreicht werden. Hierbei werden mechanische und thermische Berechnungen der Muffengeometrie unter Berücksichtigung der allgemeinen Rohr- und Muffentoleranzen und diversen Störfaktoren (Außentemperatur, maximal zulässiger Druck in der Rohrleitung usw.) für die Rohrdimensionen 110, 250, 315 und 560 mm durchgeführt. Unter Anwendung von allgemeinen im Rohrleitungsbau verwendeten Sicherheitsfaktoren und den ermittelten thermischen und rheologischen Eigenschaften, werden in Rahmen dieses Forschungsvorhabens ökologisch und ökonomisch effiziente Muffen für den Bereich Großrohre entwickelt und mit praktischen Versuchen validiert.

Ergebnisse und Diskussion

Zu Beginn des Projektes wurde das Grundmaterial der Schweißmuffen thermisch, rheologisch und mechanisch analysiert, um die Materialeigenschaften detailliert in die Optimierung der Muffengeometrie einfließen lassen zu können. Anhand der wissenschaftlichen Untersuchung der Energiebilanz vorhandener Muffensysteme wurde die Basis für die Bewertung des Energieeinsparpotentials während des Schweißprozesses gelegt. In einem weiteren Arbeitspaket wurde die optimale Temperaturverteilung in der Schweißzone analysiert. Dabei zeigte sich u. a., dass eine spiralförmige Anordnung der Heizwendeln besser geeignet ist, als eine meanderförmige Anordnung. Um die Spaltmaße zwischen Rohr und Muffe zu minimieren, wurde das Prinzip einer „Schrumpfmuffe“ analysiert, um aufwändige Vorwärmprogramme bzw. Armierungen an der Muffe zu vermeiden. Diese Thematik konnte im Rahmen dieses Projektes nicht abschließend erarbeitet werden und bedarf weiterer Forschungsarbeit.

Die Korrelation zwischen Muffendurchmesser, Energieeintrag und Schweißlinsengröße wurde in einem weiteren Arbeitspaket untersucht, um weitreichende Kennwerte für die Neukonstruktion der optimierten Muffe applizieren zu können. Die auf Basis der genannten Arbeiten modifizierte und hergestellte Muffe wurde verschweißt und Innendruckprüfungen unterzogen, welche bestanden wurden. Als Ergebnis steht eine um ca. 30 % leichtere Muffe zur Verfügung.

Eine abschließende ökologisch-ökonomische Analyse zeigt das Einsparpotential bei der Muffenherstellung durch die Ergebnisse dieses Forschungsprojektes.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Die Ergebnisse des Vorhabens werden nach Absprache zwischen den Kooperationspartnern interessierten Unternehmen zur Verfügung gestellt. Weiterhin bietet das SKZ als eine der größten Aus- und Weiterbildungseinrichtungen Europas auf dem Kunststoffsektor die Gewähr für Verbreitung und gezielte Umsetzung der erarbeiteten Forschungsergebnisse. Diese werden in den alljährlich stattfindenden Fachtagungen, Lehrgängen und Seminaren in sämtliche Hierarchien der Unternehmen getragen (z. B. Würzburger Schweißertage, SKZ-Expertenkreis „Fügen“). Die Ergebnisse dieser Forschungsarbeit werden ebenfalls in die akademische Lehre der Universität Würzburg sowie der Fachhochschule Würzburg-Schweinfurt übernommen. Neben den genannten Veranstaltungen sind weiterhin zahlreiche Veröffentlichungen in Fachzeitschriften vorgesehen.

Fazit

Das neue Muffenkonzept erlaubt eine deutliche Reduzierung der Wanddicken in bestimmten Bereichen der Muffe. Eine Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften der Schweißverbindung konnte im Rahmen dieses Projektes nicht nachgewiesen werden.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	7
2	Grundlagen zum Heizwendelschweißen.....	9
3	Experimentelle Arbeiten.....	10
3.1	Charakterisierung des Muffenmaterials.....	10
3.1.1	Rheologische Untersuchungen.....	10
3.1.2	DSC.....	12
3.1.3	DMA.....	13
3.1.4	Wärmeleitfähigkeit.....	14
3.2	Energiebilanz-Analyse.....	14
3.3	Simulationsarbeiten.....	18
3.3.1	Ermittlung relevanter Simulationsparameter.....	18
3.3.2	Thermische Simulation.....	19
3.3.3	Zwischenfazit „Thermische Simulation“.....	22
3.3.4	Mechanische Simulation.....	23
3.4	Muffenherstellung.....	28
3.4.1	Erzeugung von Eigenspannung während der Wickelrohrherstellung.....	28
3.4.2	Erzeugung von Eigenspannung nach der Wickelrohrherstellung.....	29
3.4.3	Erzeugung von Eigenspannungen am Muffenkörper.....	31
3.4.4	Entwicklung eines Verfahrens zur Auslegung von E-Muffen.....	34
3.4.5	Einbringung der Heizdrähte in den Muffenkörper.....	35
3.4.6	Entwicklung der Kontaktierung.....	36
3.4.7	Druckprüfungen der neu entwickelten Muffen.....	37
4	Ökologische und ökonomische Bewertung.....	40
4.1	Bewertung der ökologischen Aspekte.....	40
4.2	Bewertung der ökonomischen Aspekte.....	45
5	Fazit der Untersuchungen.....	47
6	Maßnahmen zur Verbreitung der Forschungsergebnisse.....	48
7	Literatur.....	49

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Schematische Darstellung einer Heizwendelschweißung	9
Abbildung 2-2: Schnitt durch eine HM-Verbindung	9
Abbildung 3-1: Auswertung der temperaturabhängigen Rheometer Messungen	11
Abbildung 3-2: Auswertung der temperatur- und frequenzabhängigen Rheometer Messungen.....	11
Abbildung 3-3: Auswertung der DSC-Messungen.....	12
Abbildung 3-4: Auswertung der DMA-Messung	13
Abbildung 3-5: Auswertung der Wärmeleitfähigkeits-Messung.....	14
Abbildung 3-6: Korrelation zwischen Leistung, Gesamtwiderstand und Schweißzeit.....	15
Abbildung 3-7: Korrelation zwischen, Leistung, Gesamtwiderstand und Schweißzeit.....	16
Abbildung 3-8: Energieverteilung während des Schweißprozesses (D1.000)	17
Abbildung 3-9: Vorgehensweise bei der Ermittlung der Heizwendeltemperatur	18
Abbildung 3-10: Temperaturverläufe während der Schweißprozesse	19
Abbildung 3-11: Graphische Ergebnisdarstellung der Temperaturverteilung an einem \varnothing 63 mm System	20
Abbildung 3-12: Links: Positionen der Temperaturfühler; Rechts: Präparierte Muffe	20
Abbildung 3-13: Zeitabhängiger Vergleich der simulierten und gemessenen Temperaturen	21
Abbildung 3-14: Zeitabhängiger Vergleich der simulierten und gemessenen Temperaturen	21
Abbildung 3-15: Verbindungszonen am HM-Innendruckprüfsystem	23
Abbildung 3-16: Schnittdarstellungen der Spannungen	24
Abbildung 3-17: Sondierung der Spannungsergebnisse in der Muffe.....	24
Abbildung 3-18: Sondierung der Spannungsergebnisse im Rohr	25
Abbildung 3-19: Vergleichsspannung in Abhängig der Sondierungsposition (Rohrwand radial)	25
Abbildung 3-20: Vergleichsspannung in Abhängig der Sondierungsposition (Rohrwand axial)	26
Abbildung 3-21: Vergleichsspannung in Abhängig der Sondierungsposition (Muffe radial)	27
Abbildung 3-22: Vergleichsspannung in Abhängig der Sondierungsposition (Muffe axial).....	27
Abbildung 3-23: Graphische Darstellung des Spannungszustandes	28
Abbildung 3-24: Auflage des Wickelbandes auf die Trommel.....	29
Abbildung 3-25: Entnahmerichtung der Probekörper aus dem Wickelrohling.....	30
Abbildung 3-26: Vorrichtung zur Erzeugung von Zugspannungen	30
Abbildung 3-27: Versuchsreihe zur Spannungserzeugung ($T = 80 \text{ }^{\circ}\text{C}$)	30
Abbildung 3-28: Vorrichtung zur Weitung der Muffenrohlinge.....	31
Abbildung 3-29: Prototyp Muffe D315	32
Abbildung 3-30: Angepasste Design Muffe D315	33
Abbildung 3-31: Aus der Schweißnaht ausgetretener Heizdraht (Muffe D315)	34
Abbildung 3-32: Screenshot des Berechnungstools	35
Abbildung 3-33: Links: Bifilare Muffenkonstruktion; Rechts: Monofilare Muffenkonstruktion.....	35

Abbildung 3-34: Kontaktpin	36
Abbildung 3-35: Übertragbare Zugkräfte zwischen Kontaktpin und Heizdraht	36
Abbildung 3-36: Formel zur Berechnung des Prüfdrucks bei der Zeitstand-Innendruckprüfung	37
Abbildung 3-37: Prüfaufbau Muffe D560	39
Abbildung 4-1: Fließschema zu System und Systemgrenzen bei der Ökobilanzierung	41
Abbildung 4-2: Fließbild zur Modellierung der Sachbilanz in GaBi	42
Abbildung 4-3: Vergleich der Umweltwirkungen der Standardmuffe mit der Ökomuffe, Durchmesser D315.....	42
Abbildung 4-4: Vergleich der Umweltwirkungen der Standardmuffe mit der Ökomuffe, Durchmesser D560.....	43
Abbildung 4-5: Vergleich der Sachbilanzindikatoren der Standardmuffe mit der Ökomuffe, Durchmesser D315	44
Abbildung 4-6: Vergleich der Sachbilanzindikatoren der Standardmuffe mit der Ökomuffe, Durchmesser D560	44

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1: Prüfbedingungen der Rheometer-Messungen	10
Tabelle 3-2: Prüfbedingungen der DSC-Messungen	12
Tabelle 3-3: Prüfbedingungen der DMA-Messungen	13
Tabelle 3-4: Vergleich der Schweißlinsengröße.....	22
Tabelle 3-5: Entnahmerichtung der Probekörper aus dem Wickelrohling.....	32
Tabelle 3-6: Notwendige Schweißenergien für verschiedene Muffenabmessungen	34
Tabelle 3-7: Parametersatz Schweißung Muffe D315.....	37
Tabelle 3-8: Prüfbedingungen der Zeitstand-Innendruckprüfung D315	38
Tabelle 3-9: Parametersatz Schweißung Muffe D560.....	38
Tabelle 3-10: Prüfbedingungen der Zeitstand-Innendruckprüfung D560	38
Tabelle 4-1: Prozessdaten zur Modellierung von Standardmuffen	41
Tabelle 4-2: Prozessdaten zur Modellierung der neu entwickelten Muffe.....	41
Tabelle 4-3: Prozessdaten zur Modellierung des Heizwendelschweißverfahrens	41
Tabelle 4-4: Ermittlung des Maschinenstundensatzes des Schweißgerätes	45
Tabelle 4-5: Ermittlung der Gesamtkosten	46
Tabelle 6-1: Geplante Maßnahmen zur Verbreitung der Forschungsergebnisse	48

Abkürzungsverzeichnis

D	Nenn Durchmesser der Rohrsysteme
DIN	Deutsches Institut für Normung
DMA	Dynamisch-mechanische Analyse
DSC	Differential Scanning Calorimetry
DVS	Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e.V.
DVGW	Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V.
FEM	Finite Elemente
HM	Heizwendelschweißen
HS	Heizelementstumpfschweißen
PE	Polyethylen
SDR	Standard Dimension Ratio

Zusammenfassung

Ziel dieses Forschungsprojektes war die Analyse von bestehenden Muffensystemen für das Heizwendelschweißverfahren und eine daraus folgende Optimierung dieser Systeme. Die Ergebnisse des vorliegenden Forschungsprojektes dienen als Grundlage für die Optimierung aller Heizwendelmuffen und -fittings, da nicht nur im Großrohrbereich Einspar- bzw. Optimierungspotential zu erwarten ist.

Zu Beginn des Projektes wurde das Grundmaterial der Schweißmuffen (PE100) thermisch, rheologisch und mechanisch analysiert, um die Materialeigenschaften detailliert in die Optimierung der Muffengeometrie einfließen lassen zu können. Weiterhin wurden in den Rohrdimensionen $\varnothing 63$, $\varnothing 110$, $\varnothing 250$, $\varnothing 315$ und $\varnothing 560$ mm zahlreiche anwendungsbezogene, praxisnahe Schweiß- und Validierungsversuche durchgeführt. Anhand der wissenschaftlichen Untersuchung der Energiebilanz vorhandener Muffensysteme wurde die Basis für die Bewertung des Energieeinsparpotentials während des Schweißprozesses gelegt. In einem weiteren Arbeitspaket wurde die optimale Temperaturverteilung in der Schweißzone analysiert. Dabei zeigte sich u. a., dass eine spiralförmige Anordnung der Heizwendeln besser geeignet ist, als eine meanderförmige Anordnung. Um die Spaltmaße zwischen Rohr und Muffe zu minimieren, wurde das Prinzip einer „Schrumpfmuffe“ analysiert, um aufwändige Vorwärmprogramme bzw. Armierungen an der Muffe zu vermeiden. Die Ergebnisse zeigen ein vielversprechendes Potential zur Schließung des Spaltes durch das gezielte Einbringen von Materialspannungen in die Muffenkonstruktion, welche während des Schweißprozesses freigesetzt werden und das Anlegen der Muffe an die Rohrwandung ermöglichen.

Der Schwerpunkt des Projektes lag in der rechnergestützten Simulation der thermischen und mechanischen Vorgänge während des Schweißprozesses und der Schweißverbindung im Einsatz. Auf Basis dieser Simulationen war es möglich, die Muffengeometrie entsprechend an das Anforderungsprofil bzw. den Spannungszuständen in der Muffe zu berechnen.

Die Korrelation zwischen Muffendurchmesser, Energieeintrag und Schweißlinsengröße wurde in einem weiteren Arbeitspaket untersucht, um ausreichend Kennwerte für die Neukonstruktion der optimierten Muffe zu erlangen. Die auf Basis der genannten Arbeiten modifizierte und hergestellte Muffe wurde verschweißt und Innendruckprüfungen unterzogen, welche bestanden wurden. Als Ergebnis steht eine modifizierte Schweißmuffe zur Verfügung, bei deren Herstellung ca. 30 % weniger Kunststoff zum Einsatz kommt. Die abschließende ökologisch-ökonomische Analyse zeigt das Einsparpotential bei der Muffenherstellung durch die Ergebnisse dieses Forschungsprojektes.

Dieses Forschungsvorhaben wurde als direktes Kooperationsprojekt zwischen der Frank & Krahe Wickelrohr GmbH, Wölfersheim, und der SKZ - KFE gGmbH, Würzburg, durchgeführt. Die Kooperationspartner danken der Deutschen Bundesstiftung Umwelt für die Förderung dieses Vorhabens (Az: 30581 - 21/2).

1 Einleitung

Der größte Teil des 541.000 km langen deutschen Kanalnetzes (Leitungen über 400 mm Außendurchmesser) besteht aus biegesteifen Rohrwerkstoffen wie Beton und Steinzeug [BF09, FHL06]. Bei diesen Rohrmaterialien entstehen sehr hohe Kosten zur Instandhaltung dieser Leitungssysteme, da sie sehr anfällig für Schadensfälle wie beispielsweise Wurzeleinwuchs sind [Stü04]. Laut [Wen06] und [BF09] muss beachtet werden, dass ca. 20 % des gesamten deutschen Kanalnetzes sofort bis mittelfristig saniert werden muss. Beispielsweise lag der geplante Investitionsbedarf der Kommunen für den Zeitraum 2009 bis 2013 zur Behebung von Rohrbrüchen und Einstürzen, schadhafte Anschlüsse, Korrosion, etc. bei rund 1,5 Mrd. € (zu sanierende Länge ca. 2.000 km mit ca. 730 €/Meter) [BF09]. Der Einsatz von hochwertigen Kanalrohrsystemen aus Polyethylen (PE), deren Schadensraten pro km deutlich niedriger liegen, birgt ein beachtliches Kostensenkungspotential in sich [FHW07, FH08, Hes08].

Vor diesem Hintergrund ist es nachvollziehbar, dass immer mehr Kanalnetzbetreiber zu langlebigeren Werkstoffen wie Polyethylen tendieren und ein verstärkter Trend (auch in Nennweiten (D) oberhalb 800 mm) zu biegeweichen Kunststoffrohren in der kommunalen Abwasserentsorgung zu verzeichnen ist. Trotz eines etwas höheren Anschaffungspreises fällt die Entscheidung häufig zugunsten von PE-Rohrsystemen, da bei der Kaufentscheidung der Kanalnetzbetreiber vielmehr die geringen Folgekosten des wartungsfreien Betriebs, der niedrigere Unterhalt und die lange Gebrauchstauglichkeit des Netzes von ca. 100 Jahren berücksichtigt werden.

Neben dem Abwasserbereich werden Polyethylenrohre sehr häufig im Druckbereich in der Gas- und Wasserversorgung eingesetzt. Eine Jahresproduktion der Polyethylenrohre von über 300.000 t konnte in Deutschland schon 2006 überschritten werden. Insgesamt kann seit 1995 ein steigender Trend bei den Kunststoffrohren beobachtet werden [KRV14].

Aus den aktuellen Berichten der Kunststoffindustrie und des Rohrleitungsbaus geht darüber hinaus eine eindeutige Tendenz des Rohrmarktes zu Großrohren (D > 250 mm) hervor [AKT08, KUN10]. Die im Großrohrbereich eingesetzten Kunststoffrohre werden aufgrund der besseren Transportmöglichkeiten (durch das geringere Gewicht) auf bis zu zwölf Meter lange Stücke abgelängt. Für das Verlegen von Rohrleitungen müssen diese Stücke anschließend geschweißt werden. Das Schweißen nimmt somit im gesamten Prozess der Verlegung eine nicht vernachlässigbare wirtschaftliche und qualitative Bedeutung ein. Für Rohre aus Polyethylen sind dabei nach DVGW 331 (DVGW = Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e. V.) zwei Fügeverfahren zugelassen: Das Heizwendelschweißen (HM-Verfahren) und das Heizelementstumpfschweißen (HS-Verfahren). Während beim HS-Verfahren die zu verbindenden Rohre mit den Stirnflächen stumpf geschweißt werden, wird bei dem Heizwendelschweißen ein zusätzliches Verbindungselement (Fitting oder Muffe) benötigt. Verfahrensbedingt kann jedoch das Heizelementstumpfschweißen nicht in jedem Fall (insbesondere

schwierig bei Reparaturen und Instandsetzungen) eingesetzt werden, da Rohre bei diesem Verfahren für eine Schweißung bewegt werden müssen. In vielen Anwendungsfällen ist das Heizwendelschweißen alternativlos vorgegeben. Bei dem Heizwendelschweißen entstehen durch die Verwendung von Muffen als Schweißzusatz relativ hohe Kosten [BHS11]. Aufgrund der integrierten Heizwendeln ist der Herstellungsprozess dieser Muffen relativ komplex und entsprechend kostenintensiv.

Um dem Trend zu größeren Kunststoff-Rohrdurchmessern gerecht zu werden, bieten die Muffenhersteller nach DVGW zugelassene Fittings und Muffen für Druckrohre teilweise im Durchmesserbereich bis zu D800 mm an [FRA11, FRI11, PLA11].

Während im kleinen Durchmesserbereich ($< D 500$ mm) die Muffen überwiegend in voll- oder halbautomatisierten Spritzgussprozessen hergestellt werden, werden bei größeren Durchmessern extrudierte oder gewickelte Rohr zu Muffen verarbeitet. Die Heizwendeln werden hierbei vorrangig manuell in die Muffen eingelegt. Es entstehen somit unmittelbare Kosten, welche die Verbreitung dieses Verfahren nachteilig beeinflussen. Zudem müssen die rheologischen, mechanischen und thermischen Eigenschaften des Muffenwerkstoffes und des Rohrwerkstoffes übereinstimmen, um eine hohe Verbindungsqualität zu erzielen. Aufgrund der verschiedenen Verarbeitungsprozesse (Extrusion (Rohre) und Spritzgießen (Muffen)) werden hierfür in der Regel Kunststoffe mit unterschiedlichen Eigenschaften eingesetzt, was den Schweißprozess und die resultierende Schweißnahtfestigkeit negativ beeinflussen kann.

Im Großrohrbereich tritt verstärkt die Problematik von ungleichmäßigen Spaltgrößen zwischen Rohr und Muffe am Umfang verteilt auf. Diese werden beispielsweise durch Ovalitäten am Rohr hervorgerufen, welche durch unsachgemäße Lagerung entstehen können. Ein zu großer Spalt in der Schweißzone mindert den zum Schweißen notwendigen Druck und somit die entstehende Schweißnahtqualität. Um diesen Effekt vorzubeugen, soll in vorliegendem Forschungsvorhaben ein Vorwärmprogramm ermittelt werden, wodurch eine Aufheizung der Muffe vor dem eigentlichen Schweißprozess durchgeführt wird und so die Spaltmaße gegen null verkleinert.

Im Rahmen des DBU-Forschungsvorhabens „Ökologisch-ökonomische Bewertung und Verfahrensoptimierung von Fügeverfahren am Beispiel von Kunststoffrohrsystemen“ konnte gezeigt werden, dass die höchste Umweltbelastung bei dem Heizwendelschweißen durch die Muffenherstellung aufgrund des hohen Kunststoff-Bedarfs entsteht [BHS11]. Diese steigt mit zunehmendem Rohrdurchmesser exponentiell an.

Das Ziel dieses Forschungsvorhabens bestand in der Entwicklung eines übergeordneten Konzepts zur Optimierung von Heizwendelmuffen (Herstellung, Geometrie und Energiebilanz) für den Großrohrbereich ($> D 500$ mm) und Entwicklung einer dem Konzept entsprechenden ökonomisch und ökologisch effizienten Muffe.

2 Grundlagen zum Heizwendelschweißen

Beim HM-Verfahren werden zwei Rohrleitungsteile mit Hilfe einer Heizwendelmuffe miteinander verbunden. In der Muffe ist ein Widerstandsdraht (Heizwendel) integriert. Für den Schweißprozess wird die E-Muffe über die zu verbindenden Rohre gebracht, so dass die Rohroberflächen und die Muffeninnenseite überlappen (siehe Abbildung 2-1).

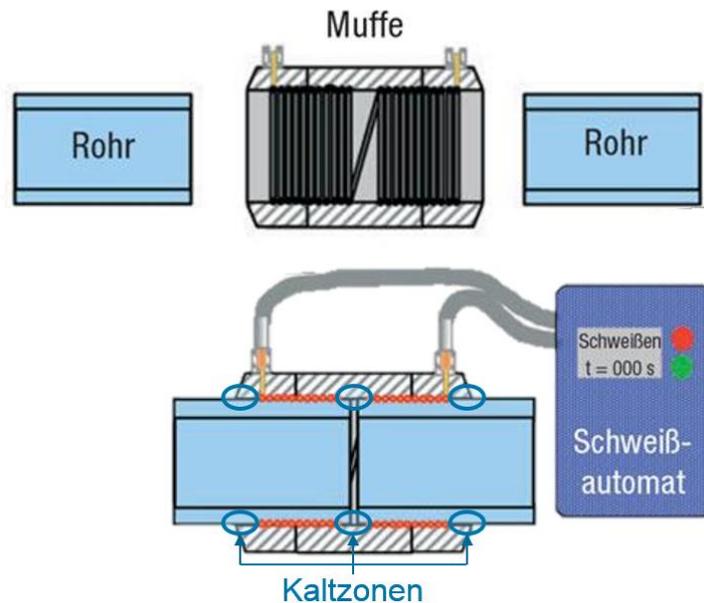


Abbildung 2-1: Schematische Darstellung einer Heizwendelschweißung

Durch ein HM-Schweißgerät wird der Widerstandsdraht mit einem elektrischen Strom beaufschlagt, sodass sich dieser erwärmt. Die hierdurch eingebrachte Wärmeenergie schmilzt das umliegende Muffen- und Rohrmaterial auf. Durch die Wärmeausdehnung des plastifizierten Materials fließen die beiden Schmelzeströmungen ineinander und verbinden sich. Während des Vordringens in die kälteren Bereiche neben der Heizwendel (Kaltzonen) erstarrt die Schmelze und verschließt den Schweißbereich, wodurch der für den Prozess notwendige Schweißdruck entsteht. Während der anschließenden Abkühlphase erstarrt das aufgeschmolzene Material und bildet eine stoffschlüssige Verbindung zwischen Rohr und Muffe.

Abbildung 2-2 zeigt den polierten Sägeschnitt durch eine HM-Verbindung, wobei der durch den Schweißprozess aufgeschmolzene Bereich anhand der „Schweißlinse“ sichtbar gemacht wurde.

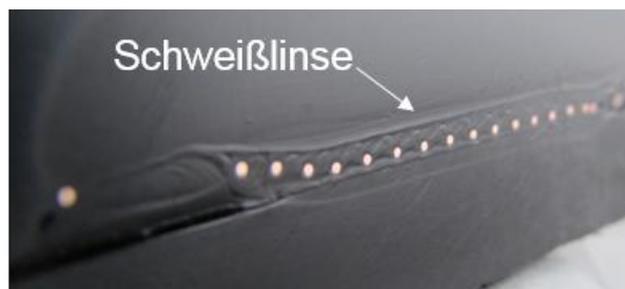


Abbildung 2-2: Schnitt durch eine HM-Verbindung

3 Experimentelle Arbeiten

3.1 Charakterisierung des Muffenmaterials

Um die Materialeigenschaften detailliert in die Optimierung der Muffengeometrie einfließen lassen zu können, wurden diese umfassend durch verschiedene Analyseverfahren ermittelt. Literaturwerte können hierfür nicht bzw. nur begrenzt herangezogen werden, da sich diese im Allgemeinen lediglich auf Raumtemperatur beziehen und deshalb für das vorliegende Forschungsprojekt nur unzureichende Informationen liefern.

Nach umfassender Marktanalyse wurde das Material „EltexTUB121N3000“ der Fa. INEOS als Muffenwerkstoff für dieses Forschungsprojekt ausgewählt.

3.1.1 Rheologische Untersuchungen

An einem Platte-Platte Rheometer wurde das Fließverhalten des Muffenwerkstoffes in Abhängigkeit der Temperatur sowie der Fließgeschwindigkeit (bzw. Scherrate) analysiert. Tabelle 3-1 zeigt die Prüfbedingungen während der Rheometermessungen.

Messgerät	Rheometer HAAKE-Mars, Fa. ThermoFisher
Plattengeometrie	∅ 20 mm, glatte Oberfläche
Deformationsart	Oszillation
Scherung	0,001
Frequenz	1 Hz (bei temperaturabhängiger Messung)
Heizrate	2 K/min (bei temperaturabhängiger Messung)

Tabelle 3-1: Prüfbedingungen der Rheometer-Messungen

In der ersten Messreihe wurde die komplexe Viskosität η^* in Abhängigkeit der Temperatur ermittelt. Hierzu wurde das zu prüfende Kunststoffgranulat bei 250 °C zwischen die Platten des Rheometers gegeben, aufgeschmolzen und die Messung gestartet. Die Temperatur wurde auf 90 °C abgesenkt und anschließend wieder bis auf 250 °C angehoben. Abbildung 3-1 zeigt die übereinstimmenden Kurvenverläufe von beiden Einzelmessungen der komplexen Viskosität η^* in Abhängigkeit der Temperatur. Gut zu erkennen sind hierbei der Erstarrungsbereich in der Abkühlkurve (ca. 115 °C) und der Aufschmelzbereich in der Aufheizkurve (ca. 130 °C).

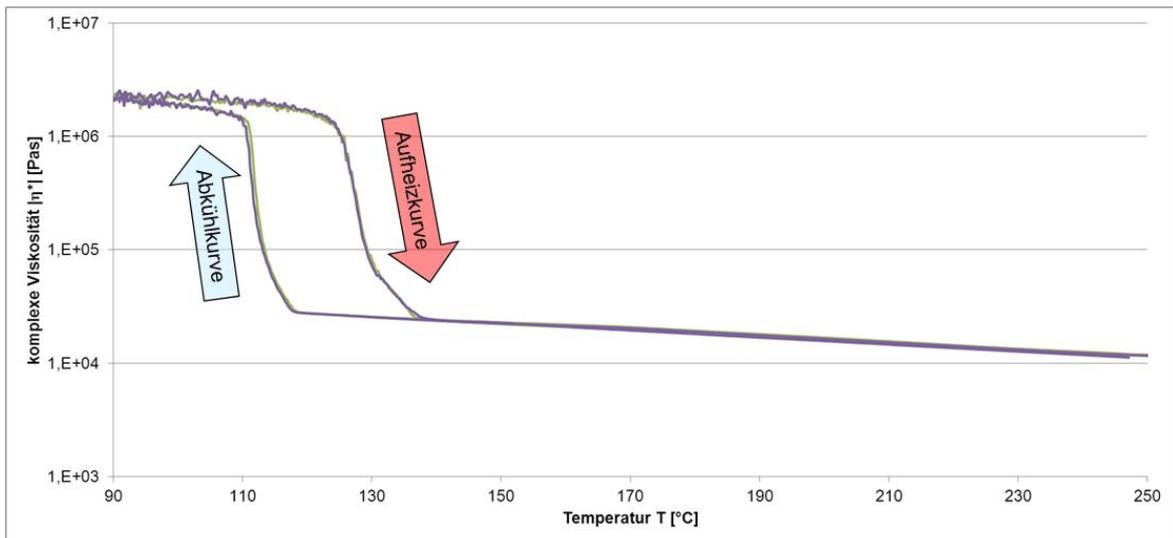


Abbildung 3-1: Auswertung der temperaturabhängigen Rheometer Messungen

In einer weiteren Messreihe wurde die komplexe Viskosität η^* in Abhängigkeit der Frequenz ermittelt. Diese Versuche wurden bei verschiedenen Temperaturen durchgeführt. Abbildung 3-2 zeigt die Auswertung der frequenzabhängigen Messung bei verschiedenen Temperaturen. Erwartungsgemäß zeigt sich eine geringere Viskosität (leichtere Fließfähigkeit) bei höheren Temperaturen.

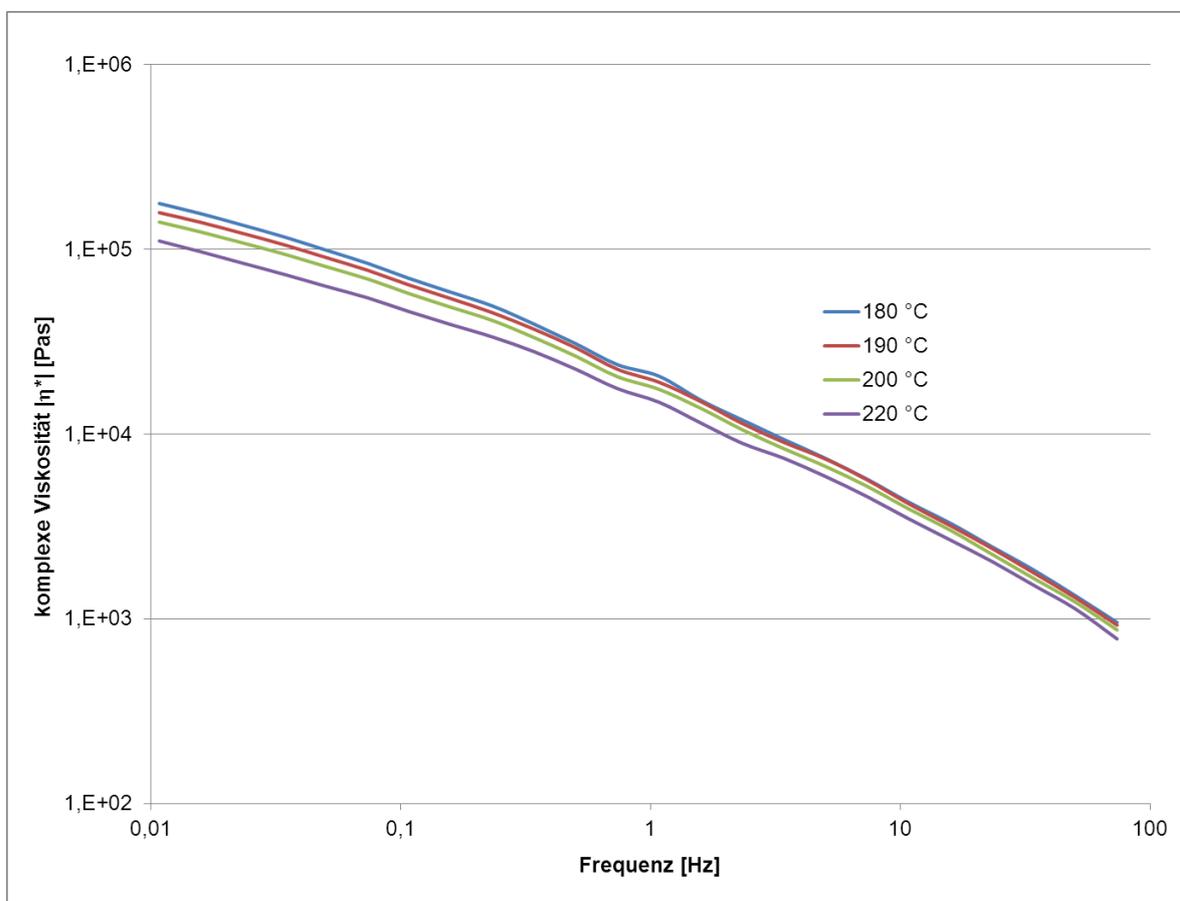


Abbildung 3-2: Auswertung der temperatur- und frequenzabhängigen Rheometer Messungen

3.1.2 DSC

Die thermischen Eigenschaften wie Schmelztemperatur, Wärmekapazität, Schmelzenthalpie und Kristallisationsverhalten des Muffenmaterials wurden in einer DSC-Anlage (Differential Scanning Calorimetrie) analysiert. Das Aufschmelzverhalten der zu schweißenden Materialien ist in Bezug auf die energetische Optimierung der Muffen von hoher Signifikanz. Die Prüfbedingungen sind in Tabelle 3-2 dargestellt.

Messgerät	DSC 204F1 Phönix, Fa. Netzsch
Einwaage	ca. 10 mg in Aluminium-Tiegel (Deckel gelocht)
Heizrate	10 K/min

Tabelle 3-2: Prüfbedingungen der DSC-Messungen

Abbildung 3-3 zeigt exemplarisch einen Ausdruck der Auswertung zweier Einzelmessungen des Muffenmaterials jeweils anhand der ersten und zweiten Aufheizung. Die hier ermittelten Daten dienen den späteren thermischen Berechnungen und Simulationen.

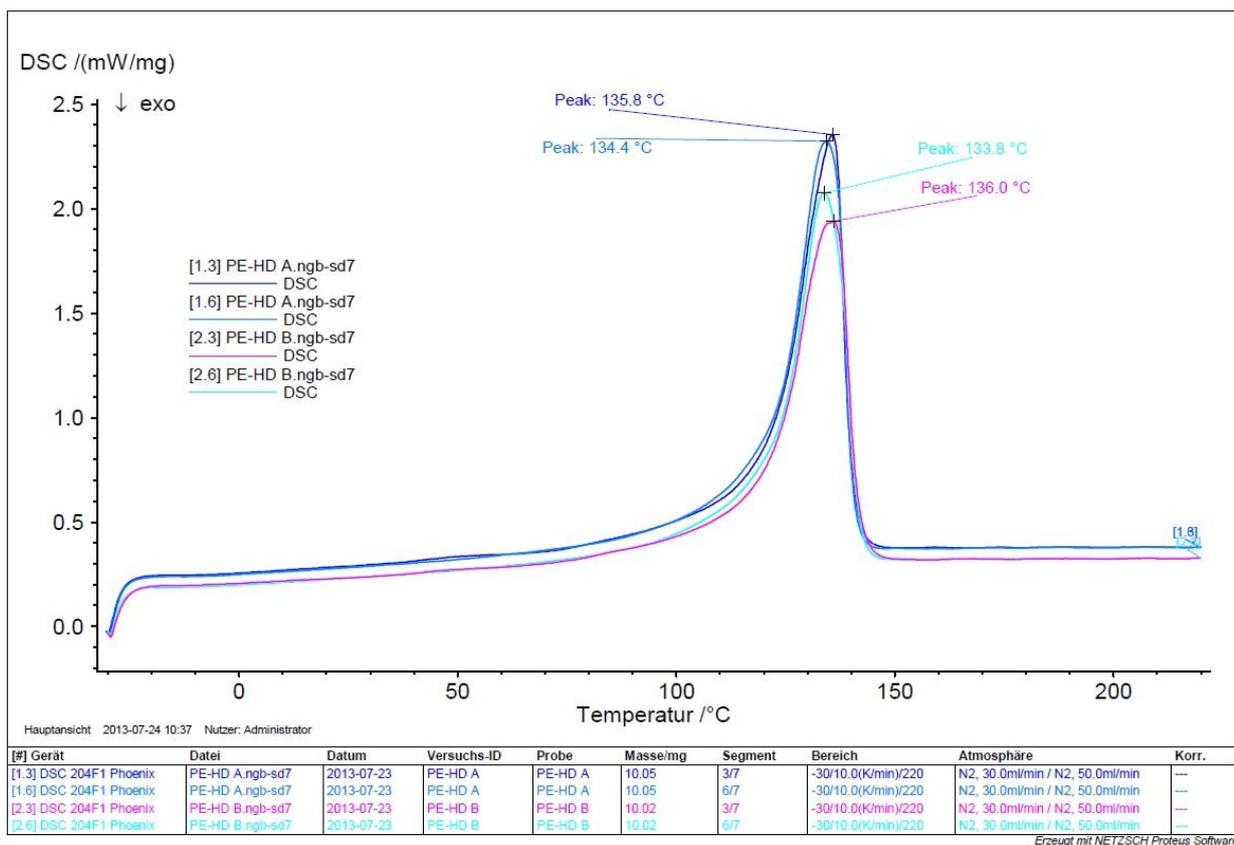


Abbildung 3-3: Auswertung der DSC-Messungen

3.1.3 DMA

Für die Auslegung der optimierten Muffe waren die mechanischen Kennwerte des Muffenmaterials in Abhängigkeit der Temperatur erforderlich, welche durch die dynamisch-mechanische Analyse ermittelt werden konnten. Die entsprechenden Prüfbedingungen sind in Tabelle 3-3 zusammengefasst.

Messgerät	DMA/SDTA861e, Fa. Mettler Toledo
Probekörpergeometrie	19,5 x 3,0 x 1,5 mm
Deformationsart	Zug
Amplitude	5 μm
Frequenz	1 Hz
Heizrate	2 K/min

Tabelle 3-3: Prüfbedingungen der DMA-Messungen

Abbildung 3-4 zeigt die Auswertung dieser Messung anhand des Speicher- und Verlustmoduls sowie des Verlustfaktors. Wichtigstes Merkmal hierbei ist der Verlauf des Speichermoduls, welcher qualitativ analog zum E-Modul verläuft und somit den Steifigkeitsverlust über einen festgelegten Temperaturbereich darstellt.

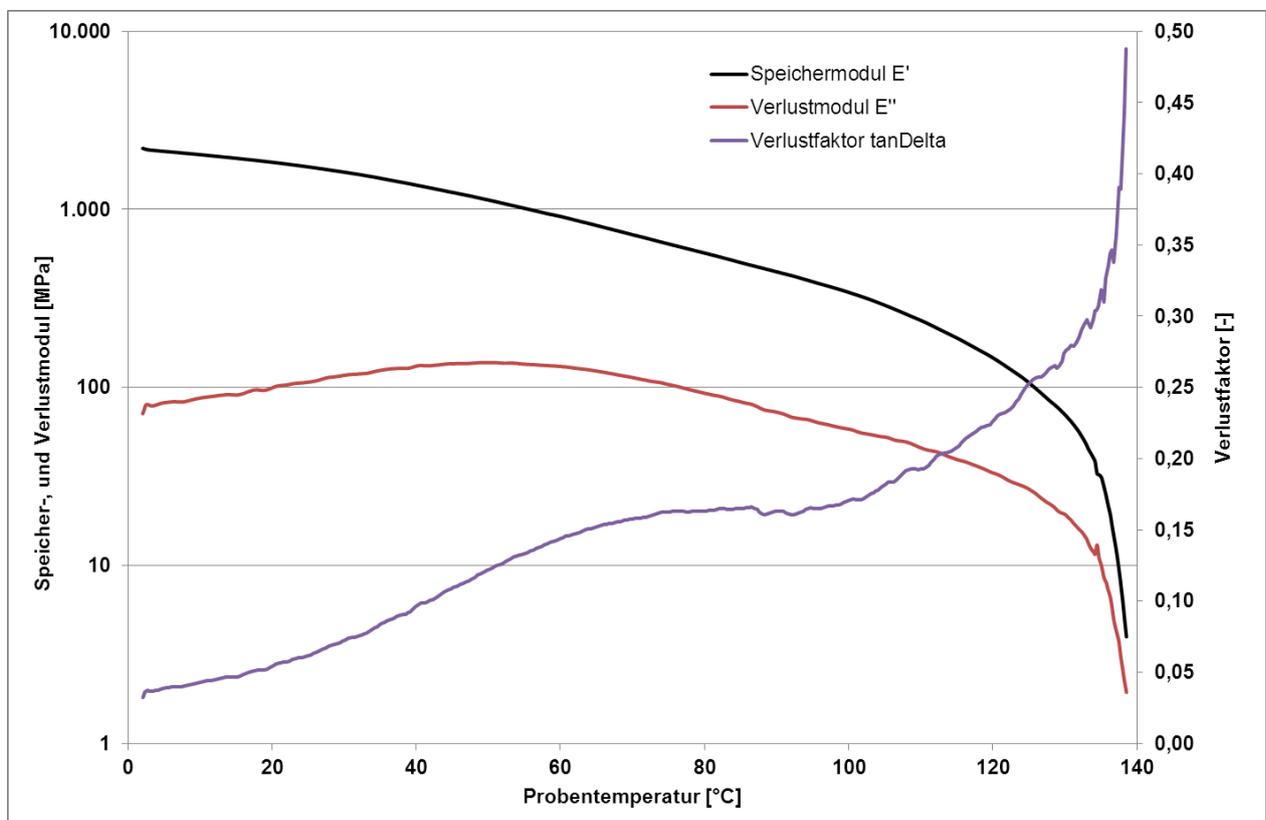


Abbildung 3-4: Auswertung der DMA-Messung

3.1.4 Wärmeleitfähigkeit

Um die thermischen Simulationen realitätsnah durchführen zu können, wurde die Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit der Temperatur ermittelt. Herkömmliche Messanlagen können diesen Kennwert lediglich an Festkörpern bzw. bei Raumtemperatur bestimmen. Die verwendete Anlage (LFA 447 Nano Flash, Fa. NETZSCH) ist in der Lage die Wärmeleitfähigkeit bis in Schmelzbereich hinein zu ermitteln, was speziell für den Schweißvorgang wichtig ist. Abbildung 3-5 zeigt die Auswertung dieser Messung.

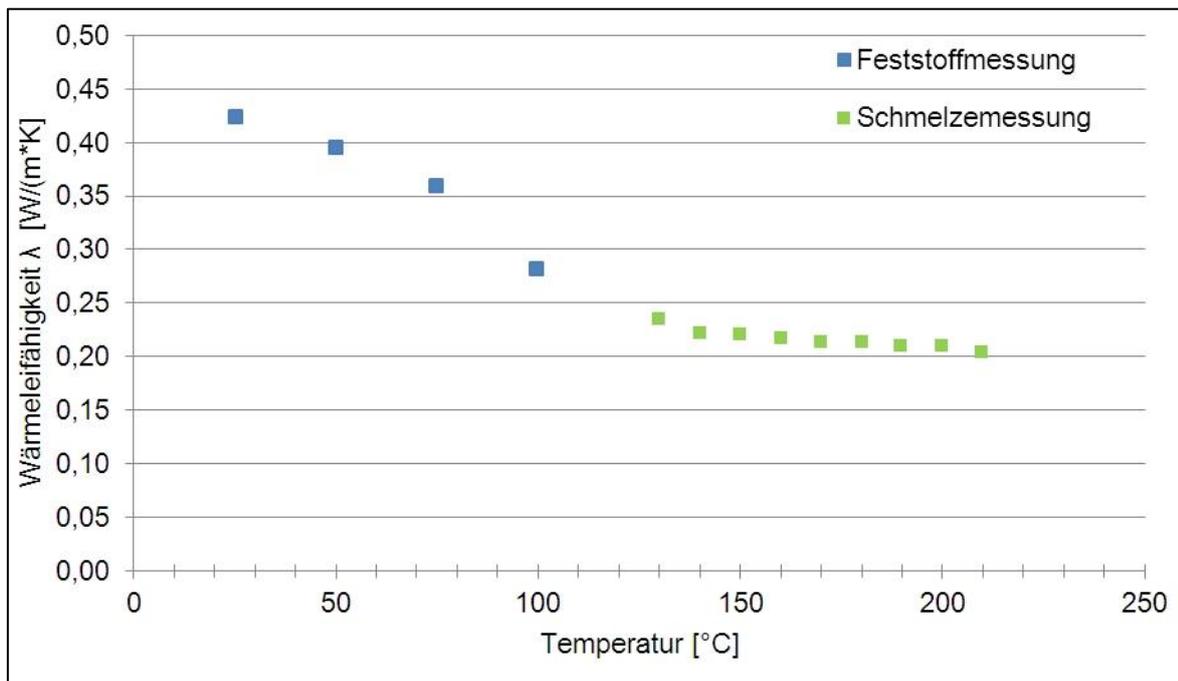


Abbildung 3-5: Auswertung der Wärmeleitfähigkeits-Messung

3.2 Energiebilanz-Analyse

Für HM-Muffen im Großrohrbereich existieren keine exakt ermittelten Werte in Bezug auf die notwendige Energie, welche in die Schweißzone eingebracht werden muss. Aktuell genutzte Schweißparameter basieren auf Erfahrungswerten oder wurden entsprechend extrapoliert. Um Schweißparameter ökonomisch und ökologisch sinnvoll auszulegen, ist speziell im Großrohrbereich darauf zu achten, dass nur die minimal notwendige Energie in die Schweißzone eingebracht wird. Die bereits erwähnte Schweißlinsengröße stellt hierbei die beste Korrelation zu der in die Schweißnaht eingebrachten Energie dar. Durch vorausgegangene Forschungsarbeiten konnten am SKZ umfassende Korrelationen zwischen Schweißlinsengröße und Schweißnahtfestigkeit ermittelt werden, wodurch „Mindest-Schweißlinsengrößen“ für verschiedene Muffendurchmesser bekannt sind [BKK10, BKK11]. Auf Basis dieser Kenntnisse, müssen die Schweißparameter (besonders die Heizzeit) durch entsprechende Energiebilanzen ermittelt werden (vgl. hierzu auch Kap. 3.4.4).

Im Folgenden wird exemplarisch die Parameterentwicklung für eine Großmuffe (D1.000) aufgezeigt. Die Schweißzeit ergibt sich aus der momentanen Leistung (Funktion der Zeit bzw. Temperatur), die das Schweißgerät abgibt und der Energie:

$$E = U \times I \times t$$

E = Energie
U = Stromspannung
I = Stromstärke
t = Zeit

Auf der Baustelle ist die Spannung konstant und die Stromstärke über die Drahteigenschaften durch den Widerstand variabel. Eine Optimierung der Schweißzeit ist somit nur über die Geometrie des Drahtes (Widerstand der Muffe) möglich. Die Leistung des Schweißgerätes ist über den Gesamtwiderstand der Muffe festgelegt, da eine Schweißspannung (üblicherweise 40 V) vorgegeben ist. Bei der gegebenen Geometrie der Muffe (D1.000) und des Drahtes (\varnothing 2,0 mm) ergibt sich ein Widerstand von 0,87 Ohm (Anfangsleistung bei ca. 2,3 kW), was zu einer Schweißzeit von ca. 80 Minuten führt. Diese Daten können nur näherungsweise unter der Annahme berechnet werden, dass am Ende des Schweißvorgangs eine Temperatur von 250 °C erreicht wird (Leistungsabfall berücksichtigt). Unter diesen Voraussetzungen sollte der Drahtdurchmesser 2,8 bis 3,0 mm betragen, wie es in Abbildung 3-6 zu erkennen ist.

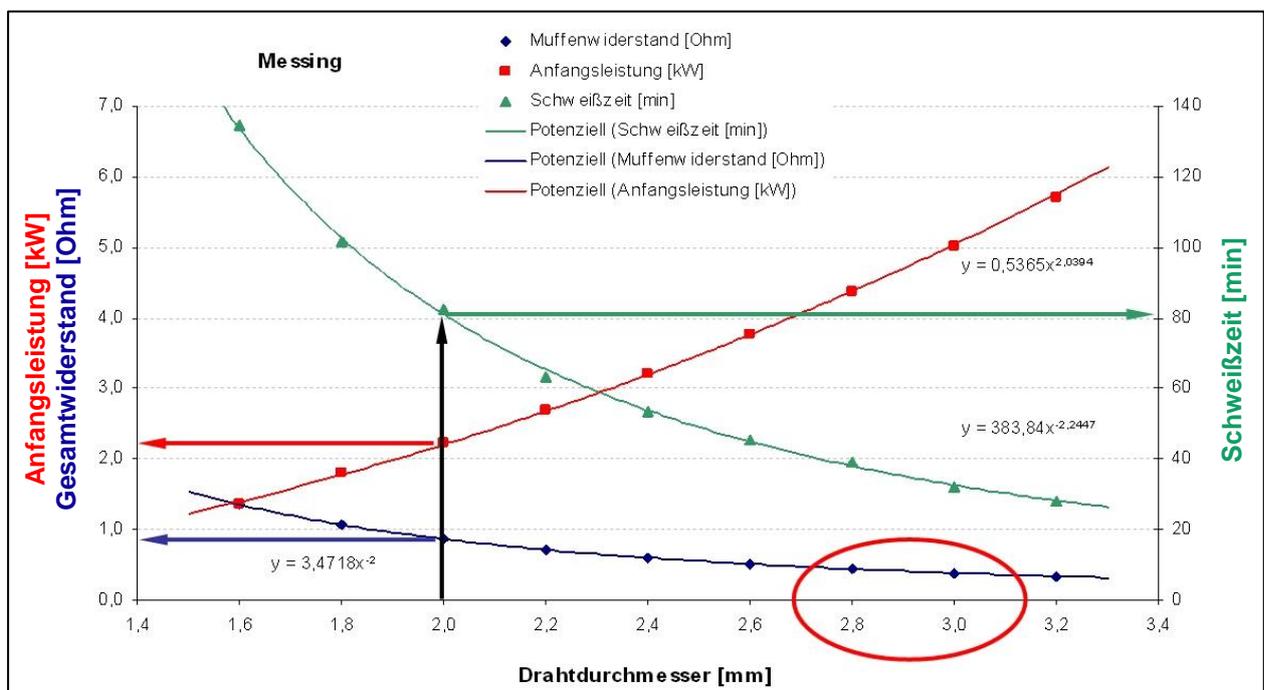


Abbildung 3-6: Korrelation zwischen Leistung, Gesamtwiderstand und Schweißzeit

Ein Messingdraht mit einem Durchmesser von 3,0 mm bringt jedoch relativ große „Fehlstellen“ in der Fügeebene. Daher sollte ein anderes Drahtmaterial eingesetzt werden. Anhand von elektrischen Kennwerten wurde Kupfer als Drahtmaterial in Betracht gezogen. Bei einem Kupferdraht ($D = 1,6 \text{ mm}$) ergibt sich ein Widerstand von 0,43 Ohm (Anfangsleistung bei ca. 4,8 kW). Unter Berücksichtigung eines höheren Wärmekoeffizienten (stärkere Abnahme der Leistung im Vergleich zu Messing) muss jedoch die Schweißzeit verlängert berechnet werden. Die gesamte Schweißzeit ergibt sich daher zu ca. 42 Minuten (vgl. Abbildung 3-7).

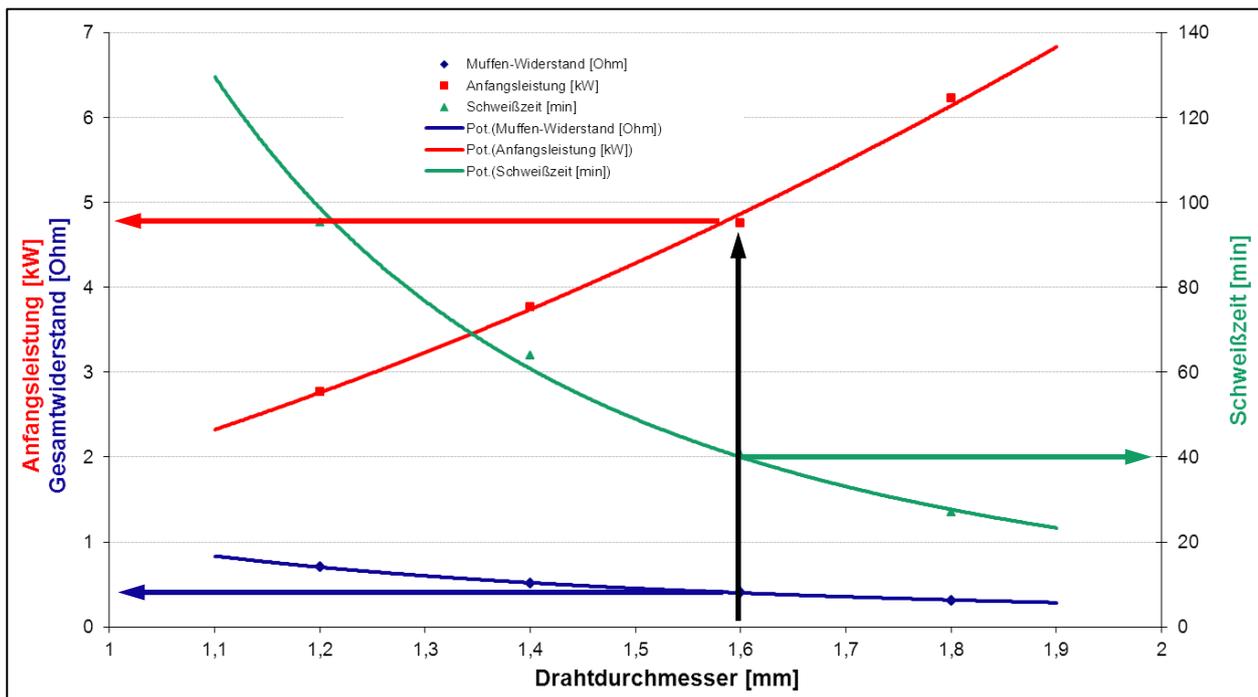


Abbildung 3-7: Korrelation zwischen, Leistung, Gesamtwiderstand und Schweißzeit

Für eine qualitativ hochwertige Schweißverbindung sollte ein bestimmtes Kunststoffvolumen auf eine bestimmte Temperatur (oberhalb des Schmelzpunktes) in einem vorgegebenen Zeitraum erwärmt werden. Für die Berechnung und Extrapolation von verschiedenen Kenngrößen wurden zwei verschiedene Wege (theoretische Berechnung und praktischer Nachweis) eingeleitet. Hierbei wird die eingebrachte Energie als Kerngröße betrachtet.

Als Systemgrenzen der Energiebilanz, dienen die unten angeführten Kennwerte. Die gesamte Energiebilanz eines Heizwendel-Schweißprozesses kann wie folgt dargestellt werden:

$$E_{\text{Gesamt}} = (E_{\text{Umgebung}} + E_{\text{Schmelze}} + E_{\text{Draht}}) / \eta = 8.870,87 \text{ kJ}$$

E_{Umgebung} : Ist die Energie, die aufgrund der Konvektion an die Umgebung abgegeben wird. Dieser Anteil kann als verlorene Energie betrachtet werden. Der Betrag wurde näherungsweise über eine Wärmebildkamera ermittelt werden.

E_{Schmelze} : Ist die Energie, die notwendig ist, um den festen Kunststoff in die Schmelze zu überführen. Hierzu wurde anhand der Schweißlinse das aufgeschmolzene Volumen ermittelt. Die durch die DSC-Messungen ermittelten Wärmekapazitäten c_p der Kunststoffe erlauben dann anhand der Formel $E = c_p \times m \times \Delta T$ die Ermittlung dieses Energiebetrages (mit m = zu erwärmende Masse und ΔT = Temperaturdifferenz).

E_{Draht} : Ist die Energie, die notwendig ist, um den Draht auf eine Temperatur von z. B. 250 °C zu erhitzen. Dieser Betrag wurde rechnerisch über die entsprechenden Drahtkennwerte ermittelt.

η : Ist der Wirkungsgrad des Schweißgerätes. Aufgrund der Eigenerwärmung und des damit verbundenen Ansteigens des internen Widerstandes des Schweißgerätes, sinkt der Wirkungsgrad mit steigender Schweißzeit bzw. steigendem Rohrdurchmesser. Anhand von Energiemessungen „vor dem Schweißgerät“ (Steckdose) und „nach dem Schweißgerät“ konnte der Wirkungsgrad ermittelt werden ($\eta=0,9$ für lange Schweißzeiten (> 200 s)).

Als optimale Parameter konnten dabei eine Schweißzeit von ca. 45 Minuten (2.700 s), bei einer Spannung von 44 Volt und einem Muffenwiderstand von 0,40 Ohm abgeleitet werden. Die ermittelte Energieverteilung stellte sich hierbei wie in Abbildung 3-8 gezeigt dar.

$$E_{\text{Gesamt}} = (E_{\text{Umgebung}} + E_{\text{Schmelze}} + E_{\text{Draht}}) / \eta = 8.870,87 \text{ kJ}$$

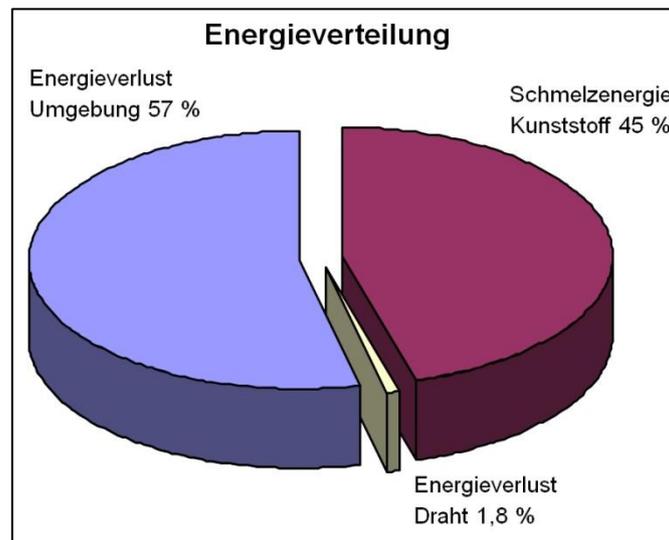


Abbildung 3-8: Energieverteilung während des Schweißprozesses (D1.000)

Diese Vorgehensweise eignet sich sehr gut, um auch für weitere Großrohrabmessungen ökonomisch und ökologisch adäquate Schweißparameter zu ermitteln, da hierdurch unnötig lange Schweißzeiten vermieden werden können.

3.3 Simulationsarbeiten

Ein Arbeitsschwerpunkt in diesem Forschungsprojekt stellten die thermischen Simulationen des Schweißprozesses sowie die mechanischen Simulationen der Schweißverbindung dar. Ziel hierbei war es, den Einfluss verschiedener Parameter (z. B. Heizwendelverteilung, Heizzeit oder Heizwendeltemperatur) bereits im Vorfeld am Computer zu simulieren und dadurch den HM-Prozess ökologisch und ökonomisch optimieren zu können. Bisherige Optimierungsversuche basieren auf einer Vielzahl von Probeschweißungen und deren Auswertungen.

3.3.1 Ermittlung relevanter Simulationsparameter

Die Durchführung der thermischen sowie mechanischen Simulationen erfordert die Eingabe spezifischer Materialkennwerte. Diese müssen allen Rohrleitungskomponenten (Muffe, Heizwendel, Rohr), die in den Simulationen zum Einsatz kommen, zugeordnet werden. Die Qualität der Simulations-Resultate wird hierbei von der Genauigkeit dieser Eingabewerte maßgeblich beeinflusst. Die Ergebnisse der unter Abschnitt 3.1 erläuterten Analysen fließen hier in die entsprechenden Simulationsebenen ein.

Ein ausschlaggebender Kennwert für die thermische Simulation ist die Temperatur der Heizwendel während des Schweißprozesses. Dieser wurde durch umfassende Messreihen an den verschiedenen Muffendurchmessern bestehender Muffensysteme direkt an der Heizwendel ermittelt. Abbildung 3-9 zeigt die Vorgehensweise zur Ermittlung der Temperaturverläufe an der Heizwendel.

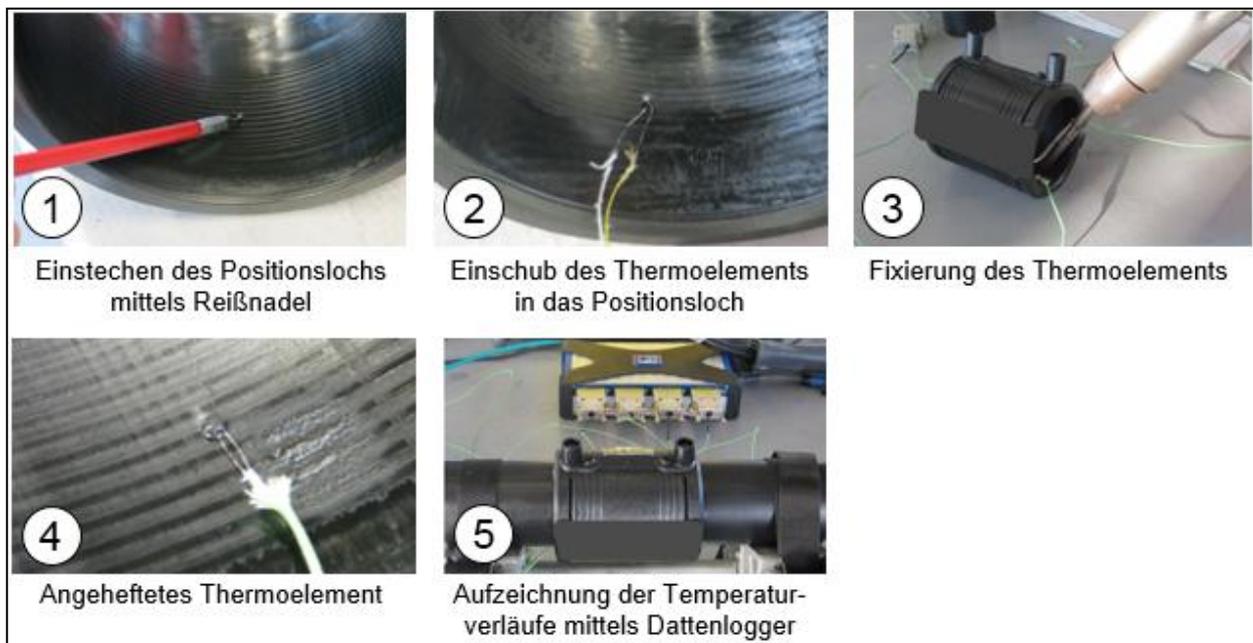


Abbildung 3-9: Vorgehensweise bei der Ermittlung der Heizwendeltemperatur

Abbildung 3-10 zeigt die ermittelten Temperaturverläufe in Abhängigkeit der Zeit, welche als Basisdaten für die thermische Simulationen dienen.

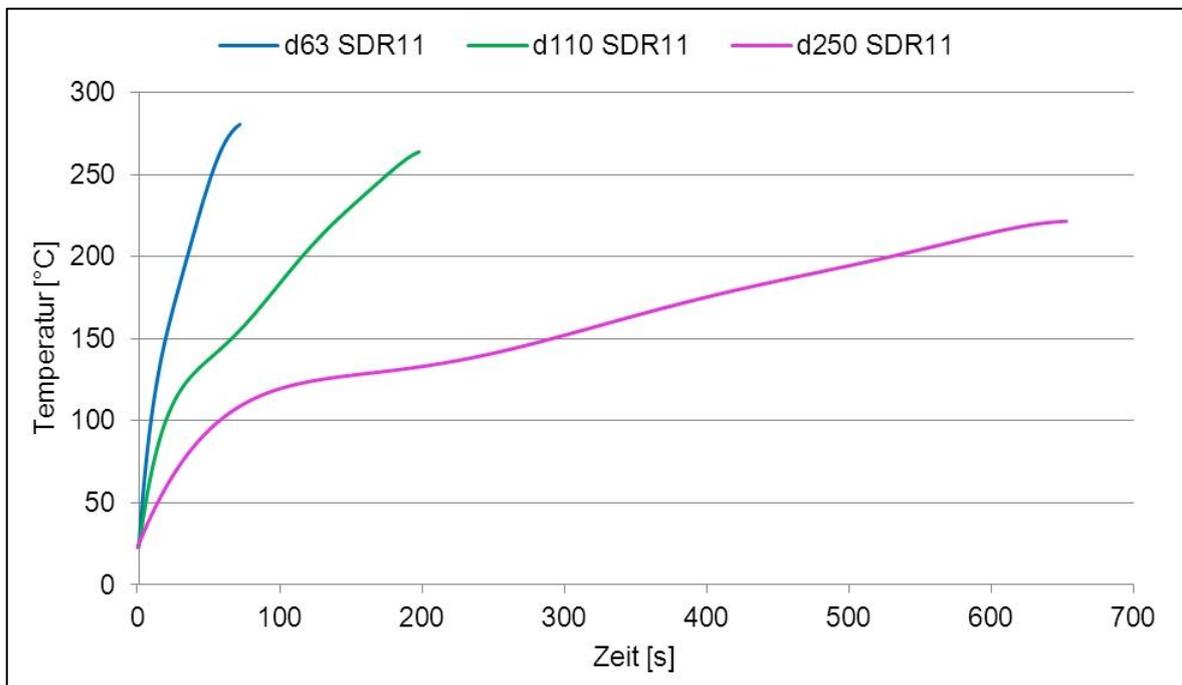


Abbildung 3-10: Temperaturverläufe während der Schweißprozesse

3.3.2 Thermische Simulation

Das Ziel dieses Arbeitspakets bestand darin, den Schweißprozess einer Heizwendelschweißverbindung simulationstechnisch nachzustellen. Hierbei wurde das Muffe-Rohr-System unter thermischer Last (Heizwendeltemperatur) auf die sich einstellende Temperaturverteilung im System hin untersucht. Daraus werden Rückschlüsse gezogen, wie der Schweißprozess simulationstechnisch umgesetzt werden kann und welche Einflüsse die Qualität der Simulation beeinträchtigen. Zu Beginn wurden die zu untersuchenden Baugruppen in die Simulationsumgebung von SolidWorks® geladen und eine thermische Studie erstellt.

Die Resultate der thermischen Studien bestehen zum einen aus dem sich durch die Wärmelasten örtlich einstellenden Wärmefluss und zum anderen aus der resultierenden Temperaturverteilung. In Abbildung 3-11 ist die Temperaturverteilung an einem \varnothing 63-Schweißsystem am Ende der Heizzeit (72 s) und zur Hälfte der Heizzeit (36 s) gegenübergestellt.

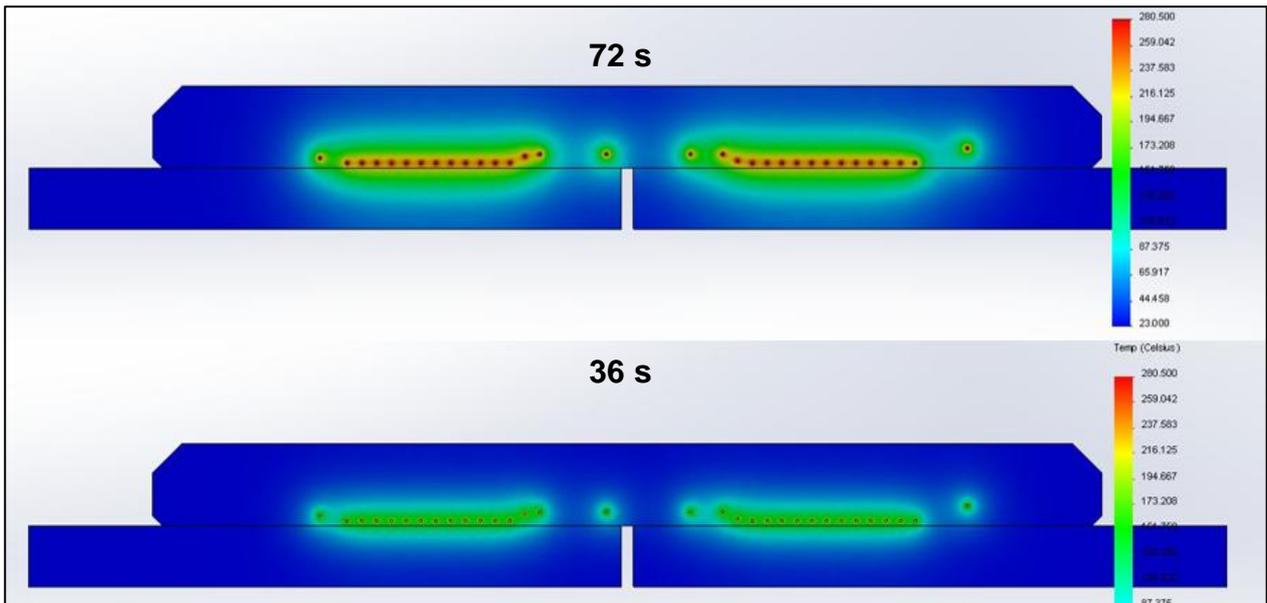


Abbildung 3-11: Graphische Ergebnisdarstellung der Temperaturverteilung an einem \varnothing 63 mm System

Zur Verifizierung der Ergebnisse wurden weitere umfangreiche Messreihen durchgeführt, um die Temperaturen im Bereich der Schweißnaht zu ermitteln. Hierzu wurden Schweißmuffen an verschiedenen Stellen mit Thermoelementen präpariert, wie es in Abbildung 3-12 dargestellt ist.

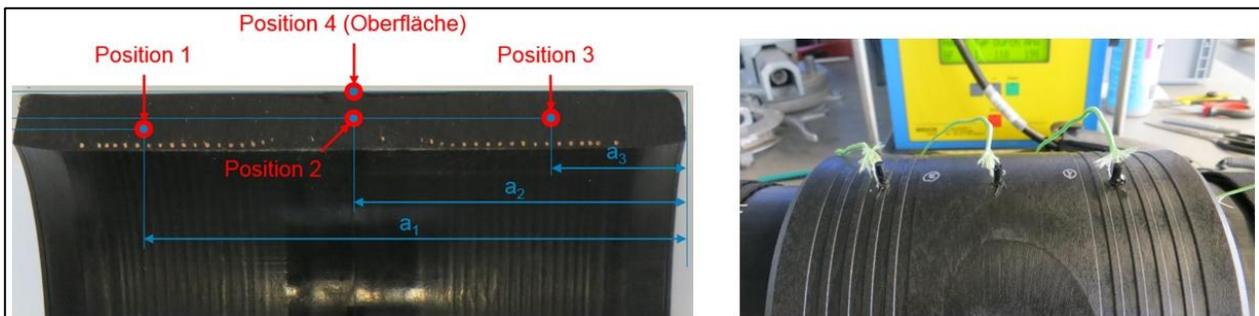


Abbildung 3-12: Links: Positionen der Temperaturfühler; Rechts: Präparierte Muffe

Der Vergleich der Simulations- und der Messergebnisse wurde in zwei Schritten vollzogen. Im ersten Schritt wurden die Temperaturen an den einzelnen Messpositionen in Abhängigkeit der Heizzeit verglichen. Abbildung 3-13 und Abbildung 3-14 zeigen die Auswertung an den Messpositionen 1-4 (vgl. Abbildung 3-12). Es zeigt sich, dass die simulierten und gemessenen Temperaturverläufe relativ gut übereinstimmen.

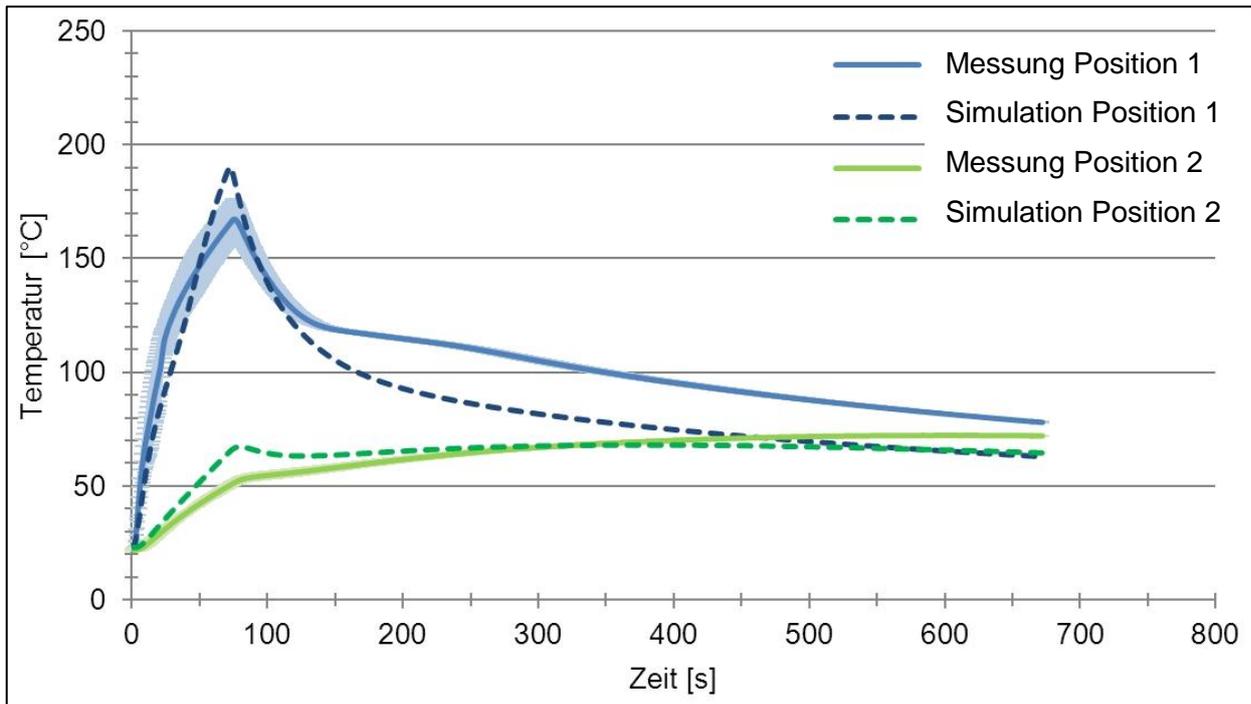


Abbildung 3-13: Zeitabhängiger Vergleich der simulierten und gemessenen Temperaturen

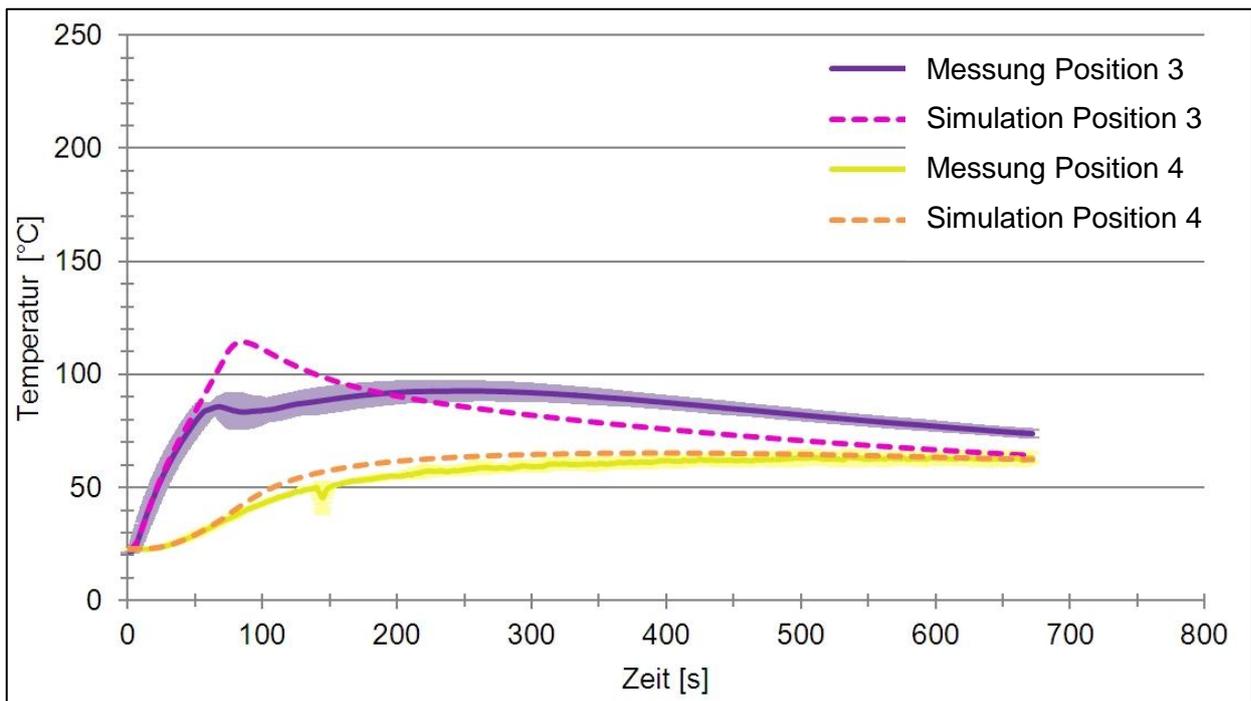


Abbildung 3-14: Zeitabhängiger Vergleich der simulierten und gemessenen Temperaturen

Im zweiten Schritt, wurde die Größe der Schweißlinse in Abhängigkeit der in die Schweißzone eingebrachten Energie verglichen. Um Vergleichswerte zu den Simulationsergebnissen nutzen zu können, wurden die Schweißversuche bei unterschiedlichen Heizzeiten abgebrochen. Auch hier zeigt sich (siehe Tabelle 3-4), dass die Ergebnisse der Simulation gut mit den tatsächlichen Größen der Schweißlinse korrelieren.

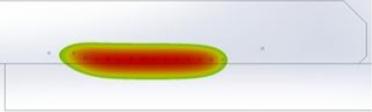
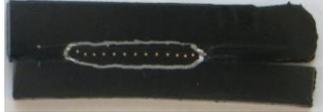
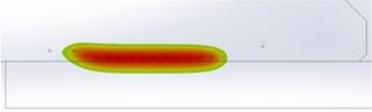
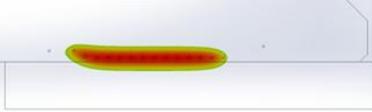
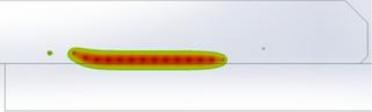
Relative Schweißzeit	Messung D63 SDR11	Simulation D63 SDR11
100 %	 4,95 ± 0,21 mm	 4,82 ± 0,04 mm
85 %	 4,25 ± 0,13 mm	 3,86 ± 0,02 mm
75 %	 3,70 ± 0,22 mm	 3,24 ± 0,02 mm
65 %	 3,08 ± 0,19 mm	 2,60 ± 0,01 mm
55 %	 2,33 ± 0,10 mm	 1,98 ± 0,01 mm

Tabelle 3-4: Vergleich der Schweißlinsengröße

3.3.3 Zwischenfazit „Thermische Simulation“

Der Temperaturkurvenvergleich zwischen Simulation und Messung zeigt, dass der qualitative Verlauf der Studienergebnisse der Realität durchaus sehr nahe kommt. Dabei muss zusätzlich beachtet werden, dass die Vergleichsergebnisse von der Positionierung der Thermoelemente stark beeinflusst werden. Würde die Messposition exakt definierbar sein, wären die Temperaturdifferenzen zwischen Messung und Simulation sicherlich noch geringer. Eine genaue Analyse der thermischen Rahmenbedingungen (Umgebungstemperatur, Konvektionskoeffizient, Wärmestrahlung) und deren Umsetzung in den Simulations-Modellen, würde außerdem die Qualität der Simulationen weiter steigern. Folglich ist die in diesem Arbeitspaket erstellte Simulationsmethodik durchaus geeignet, den idealisierten (ohne Spaltmaße, Rohrovalitäten) HM-Schweißprozess, in Bezug auf die resultierende Temperaturverteilung im System, simulationstechnisch umzusetzen. Der Abgleich der Schweißlinsengeometrie ist stark abhängig von der eingestellten Schmelztemperaturgrenze. Vor diesem Hintergrund sind auf Basis dieser Vorgehensweise absolute Aussagen nicht möglich. Für vergleichende Untersuchungen zur Ausprägung der Schweißellipse in Folge der eingebrachten Wärmeenergie, können die Ergebnisse erste Aussagen auf die Art der Wärmeeinbringung liefern. Hiermit könnte beispielsweise untersucht werden, wie die geometrische Gestaltung der Heizwendel oder deren Lage in der Muffe den Wärmestrom und die daraus resultierende Temperaturverteilung beeinflussen.

3.3.4 Mechanische Simulation

Das Ziel der nachfolgenden Ausführungen war der Aufbau einer Simulationsmethodik, die es ermöglicht die Heizwendelschweißverbindung unter mechanischer Belastung korrekt darzustellen und zu analysieren. Zu diesem Zweck wurden verschiedene mechanische FEM-Studien generiert, die zunächst durch grundlegende Untersuchungen zum Simulationsaufbau überprüft werden. Nachfolgend werden auf Basis der getätigten Untersuchungen Simulationsmodelle für die Spannungsanalyse einer mechanisch belasteten Heizwendelschweißverbindung eingesetzt. Hierbei wird der Lastfall festgelegt, der den Simulationen für die spätere strukturmechanische Auslegung des Muffen-Neuentwurfs zu Grunde gelegt wird. Zur Beurteilung der FEM-Modelle in Bezug auf eine praxistaugliche Anwendbarkeit, werden abschließend die im experimentellen Teil ermittelten Abgleichkennwerte mit entsprechenden Simulationsergebnissen verglichen.

Zur Generierung der mechanischen Simulationsmodelle wird in der Simulationsumgebung von SolidWorks® eine „statische Studie“ angelegt. Ähnlich des Aufbaus der thermischen Simulationen werden zunächst die Simulationseigenschaften eingestellt. Die Materialkennwerte werden analog der thermischen Studien definiert. Zwingend erforderlich ist hierbei die Angabe des E-Moduls, der Querkontraktionszahl, der Dichte und der Streckgrenze. Die mechanischen Kennwerte werden für alle Rohrleitungskomponenten als gleich vorausgesetzt.

Da die Heizwendeln für das mechanische Verhalten der HM-Verbindung nicht von Relevanz sind, werden diese für die folgenden Analysen ausgeschlossen. Die Kontakte und Verbindungen werden demzufolge für Muffe, Rohr und Verschlussstücke festgelegt. Diese Ausgangssituation wird durch verschiedene Kontaktsätze weiter differenziert. Im realen Schweißsystem besteht die Verbindung zwischen Muffe und Rohr ausschließlich im Fügezonesbereich. Deshalb wird im Simulationssystem die Schweißzonenlänge (für Standardheizzeit) umlaufend als „verbunden“ definiert. Hierzu wird die Innenfläche der Muffe durch sogenannte Trennlinien aufgeteilt, die es ermöglichen, die einzelnen Bereiche voneinander abzugrenzen und somit eine Art Fügezonesbereich zu erstellen. Für die mechanischen Studien die eine Innendruckprüfung darstellen, werden zusätzlich die Kontaktflächen zwischen Rohr und Verschlussstück als verbunden definiert. Diese Kontaktzonen sind in Abbildung 3-15 dargestellt.

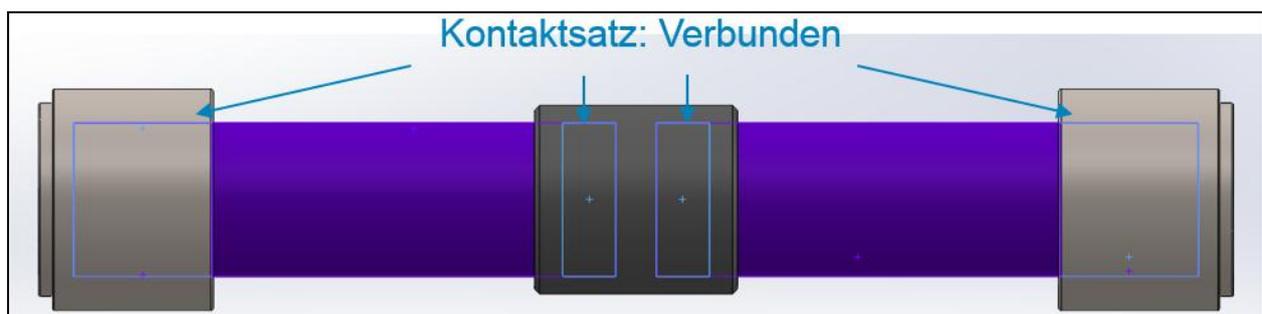


Abbildung 3-15: Verbindungszonen am HM-Innendruckprüfsystem

Die mechanischen Simulationsstudien ermöglichen eine Analyse der Spannungen, Verschiebungen und Dehnungen, die aus der Belastung resultieren. Wie bei den thermischen Studien werden die Ergebnisse zunächst graphisch angezeigt. Im weiteren Verlauf ist es häufig notwendig die Spannungswerte detailliert zu untersuchen. In Bezug darauf, wird als Studienergebnis zunächst eine graphische Spannungsdarstellung erstellt. Auf Basis dieser Darstellung werden dann die Ergebnisse mit dem Sondierungswerkzeug näher analysiert. Diesbezüglich muss eine Sondierungsansicht erzeugt werden (siehe Abbildung 3-16).

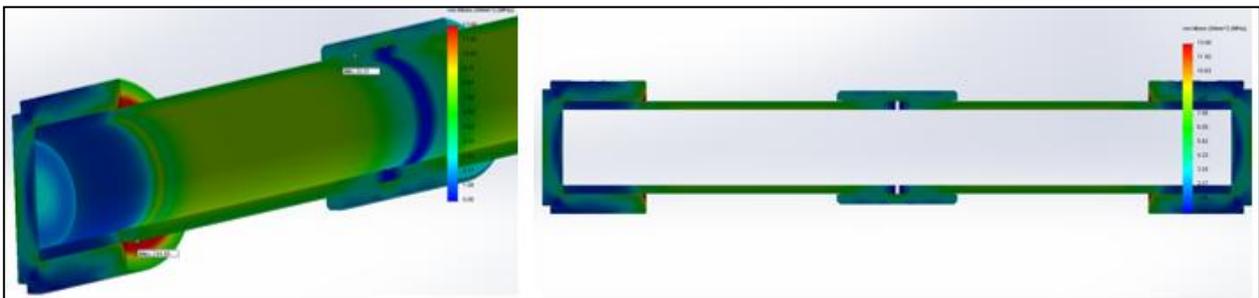


Abbildung 3-16: Schnittdarstellungen der Spannungen

Für die Auswertung der Spannungswerte werden in der Sondierungsumgebung an definierten Stellen an Muffe und Rohr Sondierungspunkte gesetzt. Da die höchsten Spannungen axial entlang der Innenseite der Rohrleitungskomponenten auftreten, werden diese Bereiche näher betrachtet. Zusätzlich werden jeweils die Spannungen an den höchst belasteten Stellen an Fitting und Rohr radial entlang der Wanddicke untersucht. In Abbildung 3-17 sind die Sondierungspunktreihen zur Analyse der Muffe gegenübergestellt.

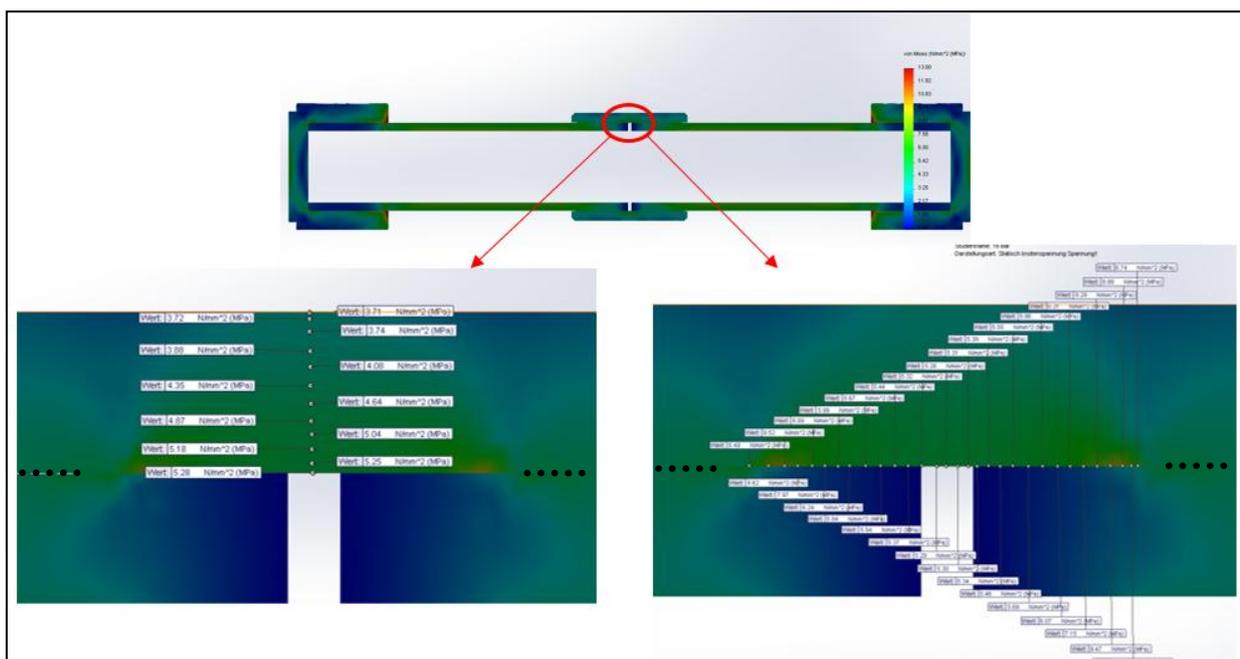


Abbildung 3-17: Sondierung der Spannungsergebnisse in der Muffe

Analog dazu werden die Ergebnisse für das Rohr aufgezeichnet. Die radiale Sondierungsreihe befindet sich hierbei auf halber Strecke zwischen Verschlussstück und Muffe (siehe Abbildung 3-18).

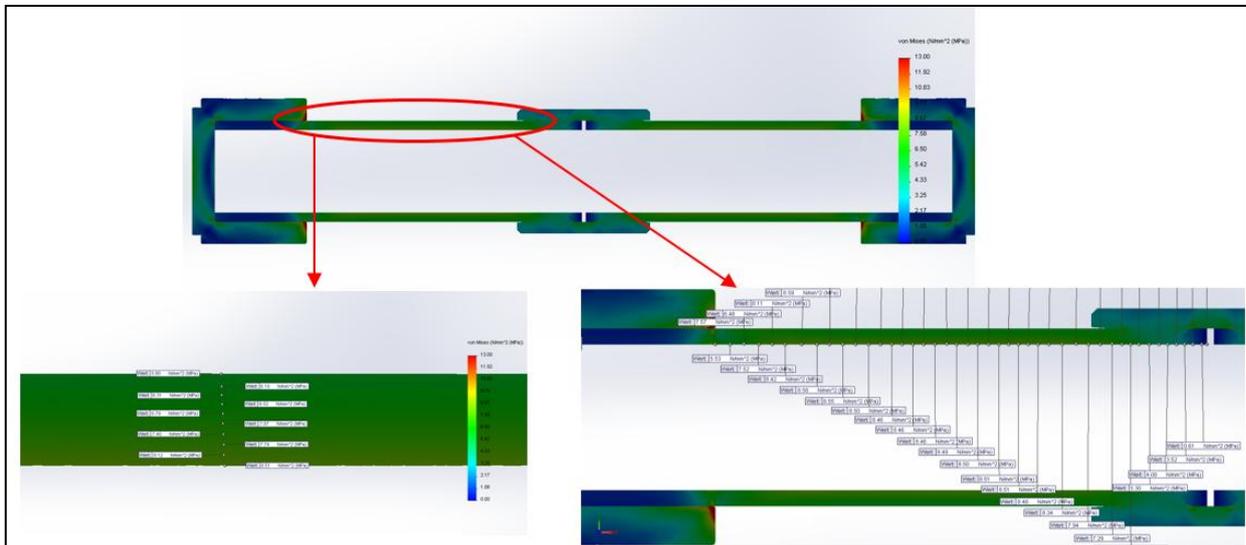


Abbildung 3-18: Sondierung der Spannungsergebnisse im Rohr

Die Sondierungsreihenergebnisse werden anschließend in einem Tabellenkalkulationsprogramm verarbeitet, wo die Aufbereitung der Spannungswerte erfolgt. In Abbildung 3-19 sind die Spannungsergebnisse beispielhaft für ein D110, SDR11 System unter 16 bar Innendruckbelastung für die radiale Sondierungsreihe entlang der Rohrwanddicke dargestellt.

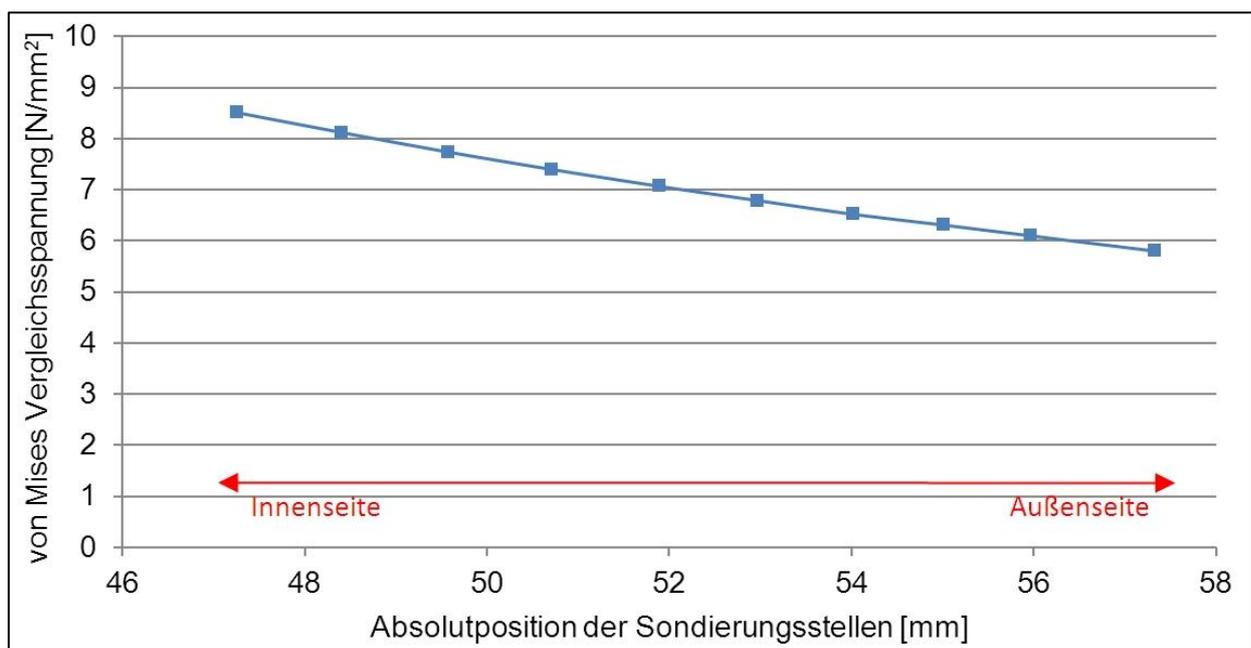


Abbildung 3-19: Vergleichsspannung in Abhängig der Sondierungsposition (Rohrwand radial)

Wie zu erwarten, treten die maximalen Spannungswerte an der Innenseite des Rohres auf. Diese nehmen entlang der Wanddicke nach außen hin ab. In Abbildung 3-20 sind die Spannungswerte axial entlang der Rohrinneinnenseite aufgetragen.

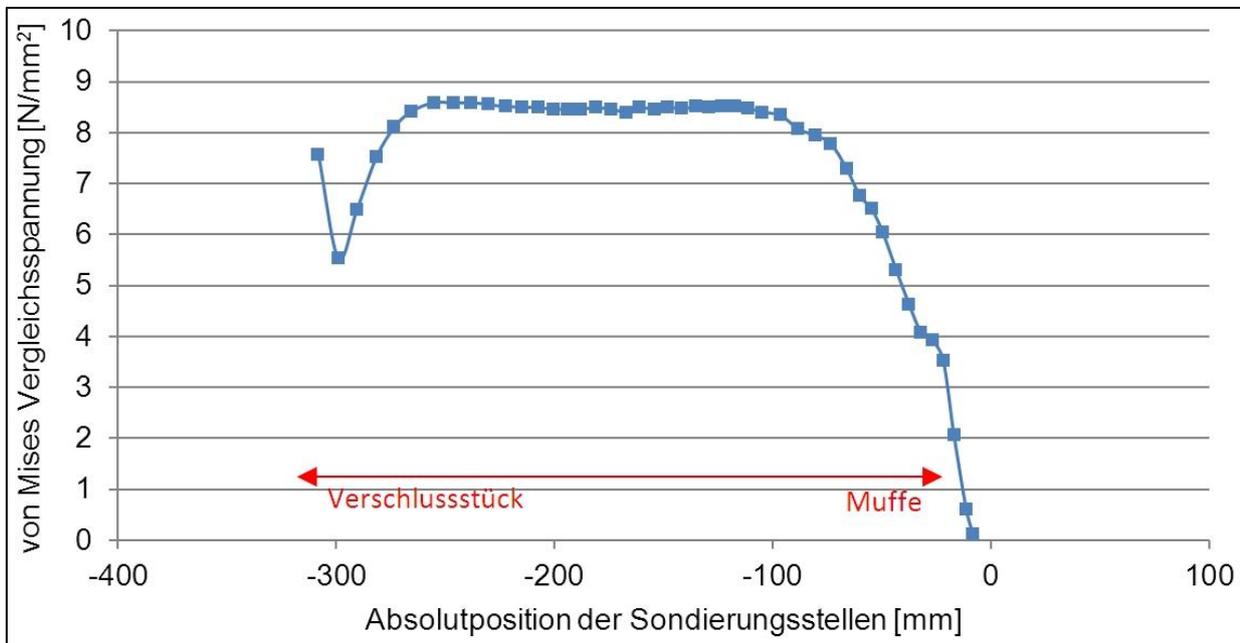


Abbildung 3-20: Vergleichsspannung in Abhängig der Sondierungsposition (Rohrwand axial)

Die Spannungswerte sind im freien Bereich zwischen Verschlussstück und Muffe nahezu konstant. Durch die erhöhte Gesamtwanddicke im Bereich des Verschlussstücks und des Fittings werden die Spannungen geringer. Die Minimalspannungen befinden sich im inneren Kaltzonenbereich, wo der Innendruck und der Druck zwischen Muffe und Rohr entgegengesetzt wirken. Für die Neukonstruktion der Muffe sind speziell die Spannungen innerhalb der Muffe selbst wichtig. Die radiale Sondierungsreihe in der Muffe ist in Abbildung 3-21 dargestellt.

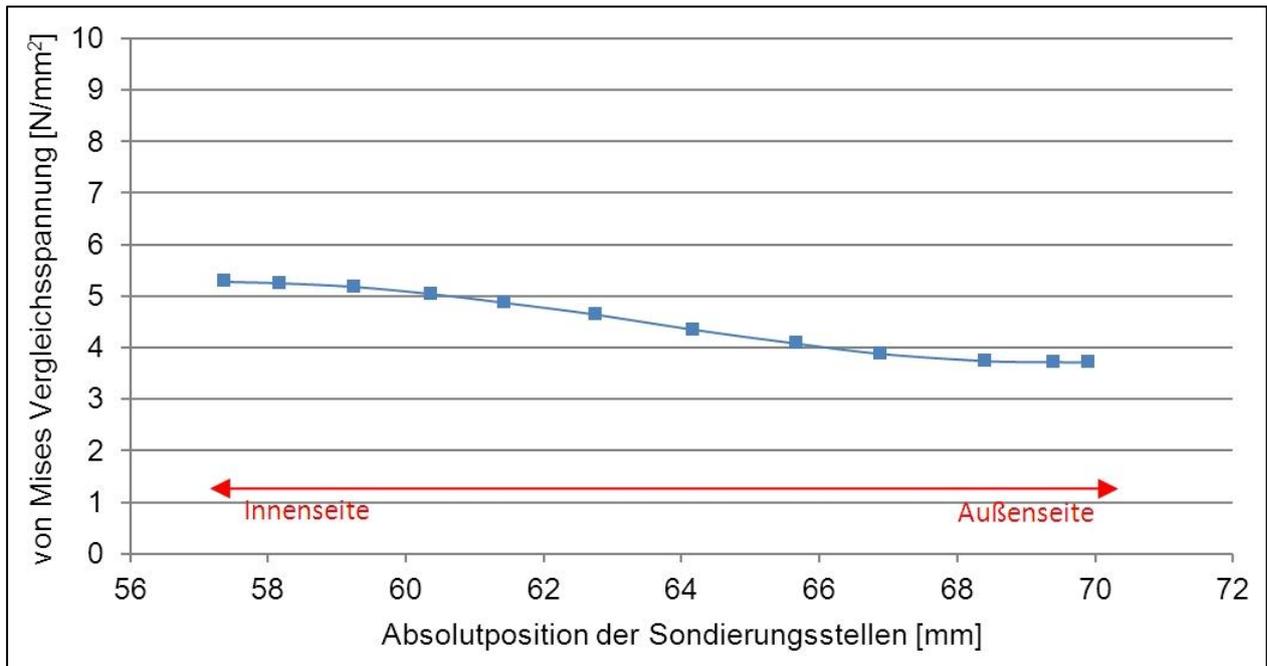


Abbildung 3-21: Vergleichsspannung in Abhängig der Sondierungsposition (Muffe radial)

Entsprechend der Sondierung radial in der Rohrwand nehmen die Spannungen auch hier in Richtung Außendurchmesser ab. Insgesamt sind die Spannungswerte geringer als im Rohr, da die Wanddicke der Muffe größer ist als die Rohrwanddicke. Die Sondierungsergebnisse entlang der Innenseite der Muffe sind in Abbildung 3-22 dargestellt.

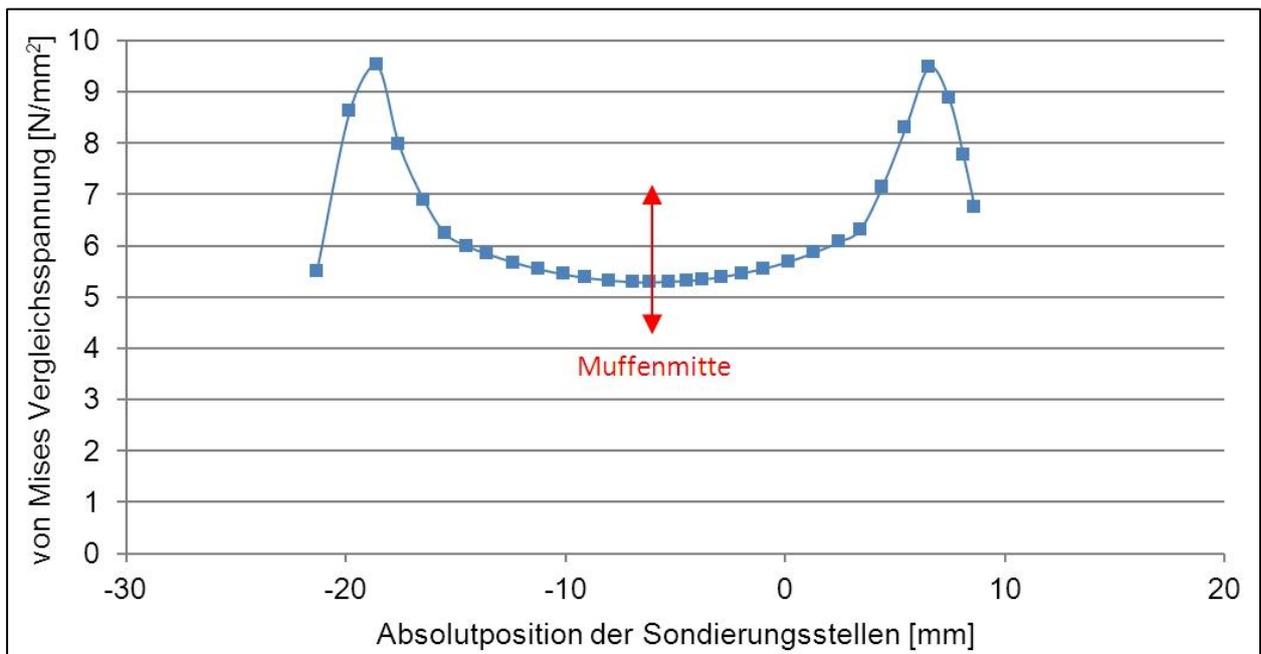


Abbildung 3-22: Vergleichsspannung in Abhängig der Sondierungsposition (Muffe axial)

Das Diagramm zeigt, dass die maximalen Spannungswerte der Muffe am Rand des Fügezonbereichs entstehen. Dies zeigt sich auch entsprechend in der graphischen Auswertung, welche in Abbildung 3-23 dargestellt ist.



Abbildung 3-23: Graphische Darstellung des Spannungszustandes

Die Ursache liegt darin begründet, dass die Muffenmitte aufgrund des Innendrucks nach oben verschoben wird, wohingegen die Rohrenden im Bereich der Kaltzonen nach unten gedrückt werden. Das FEM-Element (Tetraeder) das sich direkt am Übergang zwischen Fügezone (Kontaktsatz: Verbunden) und Kaltzone (Kontaktsatz: Keine Penetration) befindet, wird dementsprechend auseinandergezogen. Folglich entstehen hier die höchsten Spannungswerte. Ob dieser Effekt auch in der Realität so auftritt, müsste durch weiterführende Untersuchungen näher analysiert werden. Da allerdings diese Spannungen eher zu einem Aufscheren der Verbindung führen würden und nicht zu einem Versagen des Bauteils durch Bruch, werden die erhöhten Spannungen in diesen Bereichen für die strukturmechanische Analyse der Rohrleitungskomponenten nicht berücksichtigt. Somit ergibt sich die Maximalspannung der Muffe zu ca. $5,5 \text{ N/mm}^2$. Die Maximalspannung für das Gesamtsystem tritt erwartungsgemäß an den Rohren auf (hier ca. $8,5 \text{ N/mm}^2$).

Diese hier erlangten Erkenntnisse durch die Simulationsarbeiten wurden in den Konstruktionsüberlegungen zur Muffenherstellung entsprechend berücksichtigt.

3.4 Muffenherstellung

3.4.1 Erzeugung von Eigenspannung während der Wickelrohrherstellung

Ein großes Problem beim Verschweißen von Rohren größeren Durchmessers mittels HM-Verfahren stellen die zum Teil hohen Spaltmaße zwischen Rohr und Muffe dar, welche aufgrund der zulässigen Toleranzen der Systempartner möglich sind. Um die Spaltmaße während der Schweißung möglichst klein zu halten, soll eine Technik entwickelt werden, welche es aufgrund von eingebrachten Eigenspannungen ein Aufschrumpfen der Muffe auf das Rohr ermöglicht. Im Rahmen dieses Arbeitspaketes wurden verschiedene Rohrabmessungen hergestellt und das Eigenspannungsverhalten mit Hilfe des Verfahrens nach Prof. Janson untersucht. Dabei konnte festgestellt werden, dass die Herstellung der Rohre mit Hilfe des Wickelverfahrens im Grundsatz bereits eine Orientierung der Molekülfäden herbeiführt, diese sich aber nicht in erhöhten (gewünschten) Eigenspannungen in tangentialer Richtung zeigen.



Abbildung 3-24: Auflage des Wickelbandes auf die Trommel

Die tangentialen Eigenspannungen können durch gezieltes Unterziehen des Polymerbandes erzeugt werden. Hierbei können über die Parameter „Masseausstoß“ und „Drehgestell-Geschwindigkeit“ leicht bis stark orientierte Bänder erzeugt und auf die Trommel (bzw. die bereits produzierte Wickellage) abgelegt werden (siehe Abbildung 3-24). Bei höherer Drehgestell-Geschwindigkeit erhöht sich der Zug auf das plastische Polymerband, welches dabei an Breite und Dicke verliert. Beim anschließenden Auflegen des so orientierten Bandes, entstehen tangentielle Spannungen im Rohr. Durch den lagenweisen Aufbau jedoch werden die zuvor eingebrachten Spannungen durch das erneute Aufwärmen der Oberfläche (zum Zweck des Verschweißens mit der „neuen“ Lage) wieder abgebaut. Diese Aufwärmvorgänge entsprechen einer Temperung des Wickelrohres und führen zu einem signifikanten Abbau dieser zuvor eingebrachten Eigenspannungen. Der Effekt ist umso ausgeprägter, je mehr Lagen für den Wandaufbau benötigt werden. Die gezielte Erzeugung von Eigenspannungen im Rahmen des Wickelprozesses scheint somit nicht realisierbar.

3.4.2 Erzeugung von Eigenspannung nach der Wickelrohrherstellung

Nachdem die Erzeugung von Eigenspannungen direkt während des Wickelprozesses nicht realisiert werden konnte, konzentrierten sich weitere Überlegungen darauf, wie diese Eigenspannungen in einem nachgeschalteten Prozess in das Bauteil eingebracht werden könnten. Zu diesem Zweck wurde ein vereinfachter Versuchsaufbau gewählt, in dessen Verlauf Streifenproben, welche tangential aus einem Wickelrohr entnommen wurden, in einer einfachen Zugvorrichtung bei unterschiedlichen Temperaturniveaus unterschiedlichen Belastungen durch Längenänderungen unterworfen wurden. Abbildung 3-25 zeigt die Entnahmerichtung der Zugstäbe aus dem Rohling während Abbildung 3-26 eine solche Zugvorrichtung zeigt.



Abbildung 3-25: Entnahmerichtung der Probekörper aus dem Wickelrohling

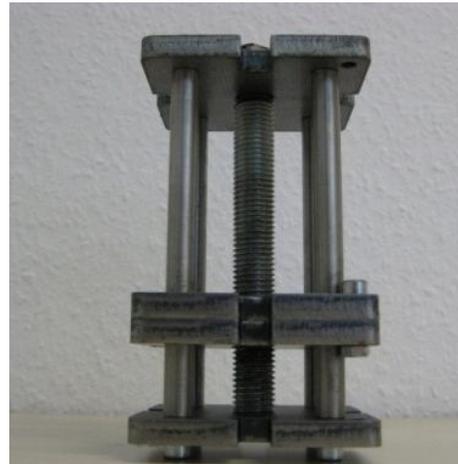


Abbildung 3-26: Vorrichtung zur Erzeugung von Zugspannungen

Es wurden umfangreiche Untersuchungen im Temperaturbereich von 70 °C bis 110 °C bei unterschiedlichen Spannungsniveaus durchgeführt und anschließend die am geeignetsten erscheinende Kombination aus Temperatur und Verformung (Spannung) für die Verformung der herzustellenden Muffe gewählt. Abbildung 3-27 zeigt exemplarisch die Ergebnisse der Untersuchungen der Probekörper bei 80 °C. Hierbei wurden die Proben auf 80 °C erwärmt, um jeweils 4 %, 6 %, 8 % sowie 10 % gedehnt und diese Dehnung für 17 min aufrechterhalten. Anschließend wurden die Proben aus der Einspannung genommen und bei Raumtemperatur gelagert.

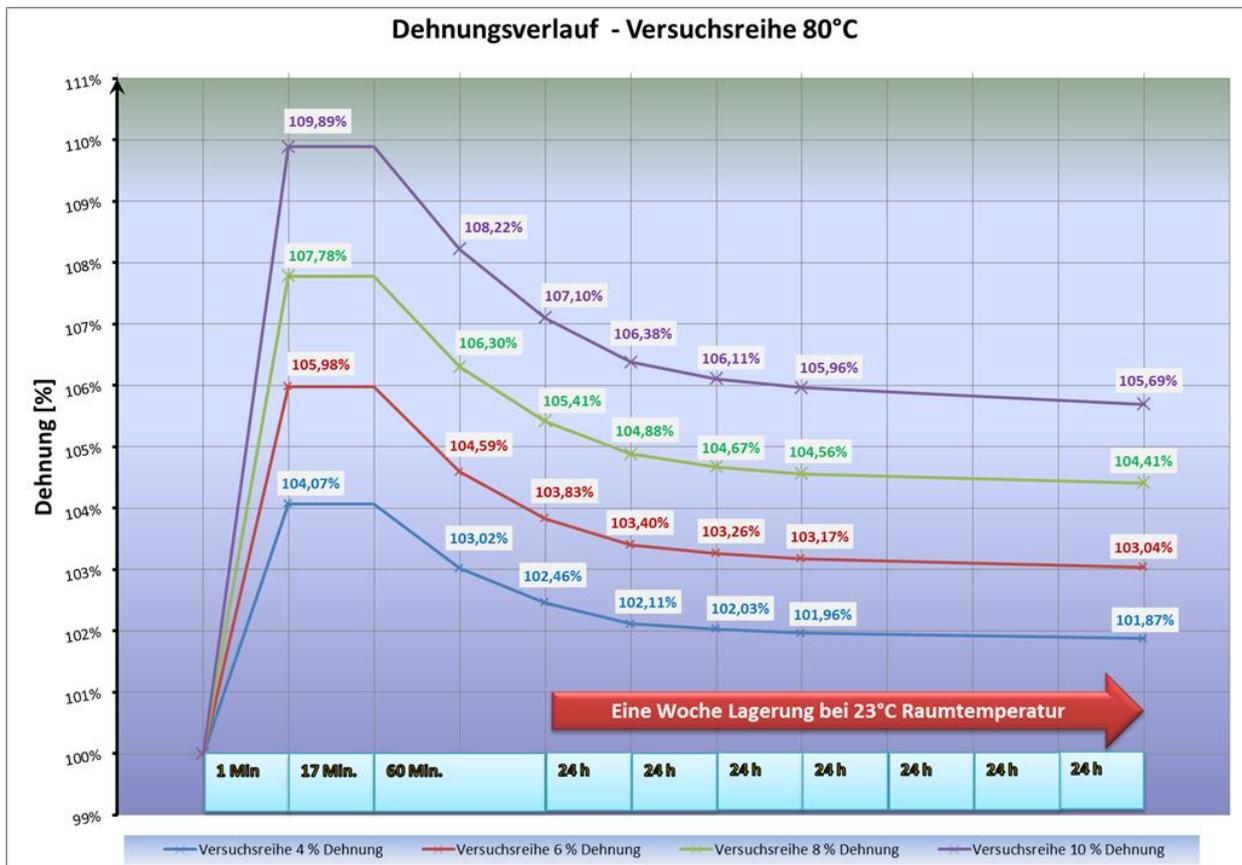


Abbildung 3-27: Versuchsreihe zur Spannungserzeugung ($T = 80 \text{ }^{\circ}\text{C}$)

3.4.3 Erzeugung von Eigenspannungen am Muffenkörper

Die Ergebnisse der Untersuchungen gemäß 3.4.2 führten zu der konzeptionellen Ausgestaltung eines Aufweitkörpers, der für die nachträgliche Verformung der gefertigten Muffenrohlinge verwendet wurde. Die Schwierigkeit der Auslegung diesen Aufweitkörpers bestand in der geometrischen Gestaltung im Bereich der Muffenmitte, in der verfahrensbedingt keine Aufweitung stattfinden sollte. Eine weitere Herausforderung bestand in der Auswahl geeigneter Werkstoffe, die zum einen den thermischen und mechanischen Anforderungen genügen, zum anderen aber auch eine leichte Anpassbarkeit der Kontur in Abhängigkeit der Versuchsergebnisse zulassen sollte. Diese Aufgabe wurde durch die Herstellung mehrerer Kegel aus einem geeigneten Polymer gelöst.



Abbildung 3-28: Vorrichtung zur Weitung der Muffenrohlinge

Die Verformungstests wurden unter Verwendung einer Pressvorrichtung (Abbildung 3-28) durchgeführt. Die entsprechenden Kräfte für die Verformung konnten aufgrund einiger nicht spezifizierbarer Rahmenbedingungen (Reibungseinfluss zwischen Muffen- und Kegeloberfläche, mittlerer E-Modul des vorgewärmten Muffenrohlings usw.) mathematisch nicht berechnet werden und wurden deshalb im „trial and error-Verfahren“ ermittelt.

Nach Grundsatzuntersuchungen zur Temperaturentwicklung im Muffenwerkstoff und verschiedenen Positionierungsarten, wurden die Muffenrohlinge (D315) bei definierten Temperaturen über festgelegte Zeiträume im Wärmeofen gelagert und so die Voraussetzungen für die Verformbarkeit geschaffen. Die für diesen Arbeitsgang notwendigen Energieverbräuche wurden erfasst und sind der folgenden Tabelle zu entnehmen.

Muffen-abmessung	SDR [-]	Vorwärm-dauer [h]	Benötigte Energie [kWh]
D315	11	1,2	0,15
D400	11	1,8	0,24
D450	11	2,4	0,32
D500	11	3,3	0,42
D560	11	4,4	0,56
D630	11	6,0	0,77
D710	11	8,3	1,07
D800	11	11,5	1,48
D900	11	15,9	2,05
D1000	11	21,4	2,75
D1200	11	35,9	4,61
D1400	11	55,8	7,17

Tabelle 3-5: Entnahmerichtung der Probekörper aus dem Wickelrohrling

Die in Tabelle 3-5 genannten Energiebeträge, die zum Vorwärmen der Muffen auf 110 °C notwendig sind, stellen die reinen Energiemengen für das Vorwärmen des Muffenrohrlings dar. Die Aufheizeiten des Ofens wurden nicht berücksichtigt und sind im Rahmen der Serienfertigung detaillierter zu betrachten.



Abbildung 3-29: Prototyp Muffe D315

Anschließend erfolgte die Verformung des Muffenrohrlings mit Hilfe der Pressvorrichtung. Die Abkühlung erfolgte an Raumluft mit eingepressten Kegeln. Die so „eigenspannungsgeladenen“ Muffen wurden anschließend mit der entsprechenden Schweißtechnik ausgestattet. Basis der Auslegung der Schweißleistung war das aufzuschmelzende Volumen in Muffe und Rohr in Abhängigkeit des Nenndrucks des Rohrleitungssystems, für welches die Muffe ausgelegt worden ist. In diesem Fall wurden alle Muffen für den Nenndruck von 16 bar (Wasser, Sicherheitsfaktor 1,25) ausgelegt. In Abbildung 3-29 ist eine Muffe D315 dargestellt. Diese wurde noch nicht auf Basis der mechanischen Simulation, sondern im Vorfeld lediglich auf Grundlage interner Berechnungen ausgelegt. Abbildung 3-30 zeigt eine Muffe D315, die nach Vorliegen der Simulationsergebnisse hergestellt wurde.



Abbildung 3-30: Angepasstes Design Muffe D315

Sowohl in der mechanischen Simulation als auch bei der Auslegung der Muffen wurden Spannungsüberlagerungen aus der Druckprüfung gemäß DVGW W 400 sowie der Annahme einer im zulässigen Biegeradius ($20 \times d$) gebogenen Leitung berücksichtigt.

Das geometrische Verhalten während und nach Beendigung des Schweißvorgangs wurde gemessen und dokumentiert und so das Spaltschließvermögen beurteilt. Parallel dazu wurde auch das Verformungsverhalten einer „unbehandelten“ Muffe untersucht und das Verhalten mit einer „eigenspannungsgeladenen“ Muffe verglichen.

Folgende Ergebnisse wurden erzielt:

Die eigenspannungsgeladenen Muffen weisen während des Schweißvorgangs – im Gegensatz zu den Standardmuffen – keine Aufweitung am Muffenende auf. Die Tatsache, dass die Muffe keine Aufweitung während des Schweißvorgangs aufweist, führt zu einem leichteren Kontaktschluss zwischen Rohr und Muffe vor und während des Schweißvorgangs. Auch nach dem eigentlichen Schweißvorgang ist eine deutlich höhere Durchmesserabnahme am Muffenende zu beobachten. Somit ist die Hypothese, eine Technik zu entwickeln, die auf der Baustelle ein verbessertes Spaltschließvermögen aufweist, bestätigt worden. Es sind jedoch noch weitere Entwicklungsarbeiten bis zur Erreichung dieses Ziels zu tätigen. Zum einen wirkt durch die konische Gestaltung der Innenoberflächen und den damit einhergehenden Kraftlinien, der Schmelzedruck nicht mehr allein senkrecht auf die Rohrachse, sondern weist auch eine in Richtung des Muffenmundes gerichtete Komponente auf. Diese sorgen dafür, dass der Heizdraht aus dem Schweißbereich herausgedrückt wird (siehe Abbildung 3-31). Insofern ist diesem Bestreben durch konstruktive Maßnahmen (z. B. Verlängerung der äußeren Kaltzonen) Rechnung zu tragen. Darüber hinaus bedarf es noch weiterer Untersuchungen, wie diese Eigenspannungen über einen längeren Zeitraum und bei widrigen Lagerbedingungen (erhöhte Temperatur z. B. durch Sonneneinstrahlung) in der Muffe gehalten werden können.



Abbildung 3-31: Aus der Schweißnaht ausgetretener Heizdraht (Muffe D315)

3.4.4 Entwicklung eines Verfahrens zur Auslegung von E-Muffen

Es wurde ein Verfahren entwickelt, welches es erlaubt, auf Basis vorgegebener Parameter (PE-Werkstoff, Betriebsdruck, Sicherheitsfaktor, Heizdrahtwerkstoff, Heizdrahtdurchmesser usw.) die Auslegung von E-Muffen durchzuführen. Grundlage dieses Tools sind Berechnungen unter Verwendung der mechanischen Kennwerte der eingesetzten Rohstoffe sowie die Berücksichtigung der Ergebnisse von Scher- und Zugprüfungen an geschweißten Probekörpern. Das Berechnungstool kam beim Design der Muffen D315 und D560 zum Einsatz. Neben den elektrischen und geometrischen Auslegungen – welche auf den Ergebnissen der mechanischen und thermischen Simulationen beruhen – ermöglicht dieses Tool auch die Berechnung der notwendigen Energiemengen zur Schweißung der Muffen (siehe Tabelle 3-6 und Abbildung 3-32).

Dimension [mm]	Erforderliche Aufheizenergie [kJ]	Verlustleistung Umgebung [kJ]	Verlustleistung Heizdraht [kJ]	Gesamte Aufheizenergie [kJ]
315	404	218	4,0	626
400	618	334	6,2	958
450	755	408	7,6	1.171
500	921	497	9,2	1.427
560	1.124	607	11,2	1.742
630	1.389	750	13,9	2.153
800	2.447	1.321	24,5	3.793
1000	3.849	2.078	38,5	5.966
1200	5.526	2.984	55,3	8.565
1400	7.507	4.054	75,1	11.636

Tabelle 3-6: Notwendige Schweißenergien für verschiedene Muffenabmessungen

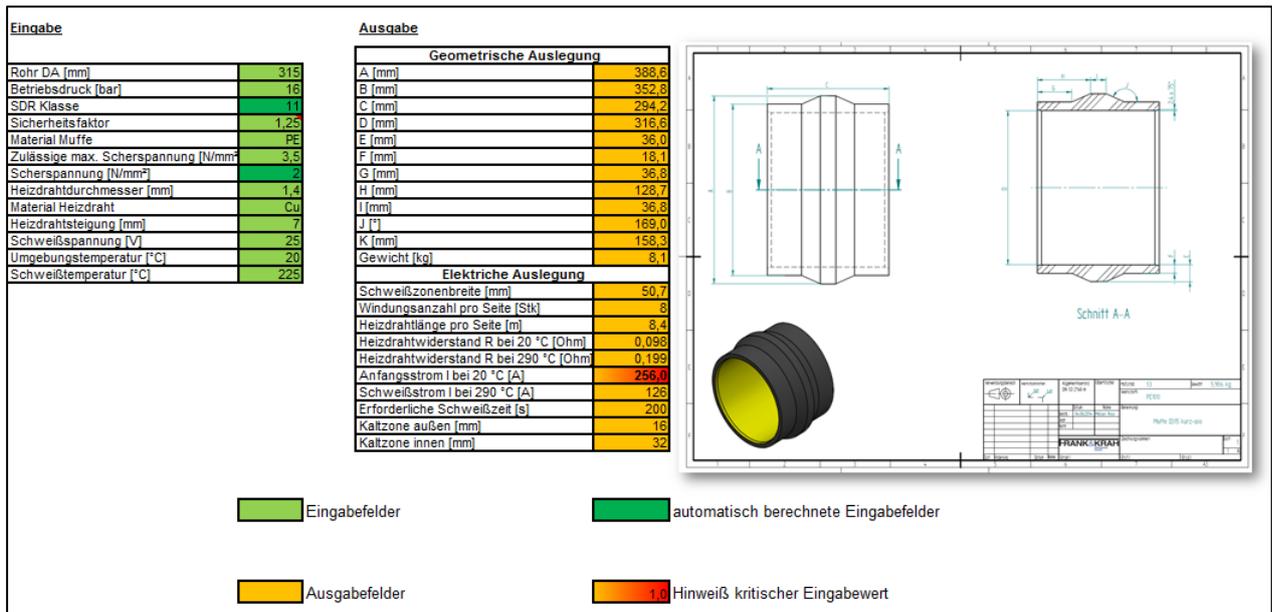


Abbildung 3-32: Screenshot des Berechnungstools

3.4.5 Einbringung der Heizdrähte in den Muffenkörper

Weiterhin wurde ein Verfahren entwickelt, mit dessen Hilfe es möglich war den über die schweißtechnische Auslegung ermittelten Heizdraht in eine definierte Tiefe in den Muffenrohling einzubetten.

Hierzu wurde die Muffeninnenoberfläche mit Hilfe einer scharfen Klinge auf eine definierte Tiefe geöffnet, der Draht eingelegt und nachträglich die Riefe mechanisch wieder verschlossen. Der hier beschriebene Vorgang kann sowohl bei der Herstellung monofilarer als auch bifilarer Muffen eingesetzt werden (siehe Abbildung 3-33).

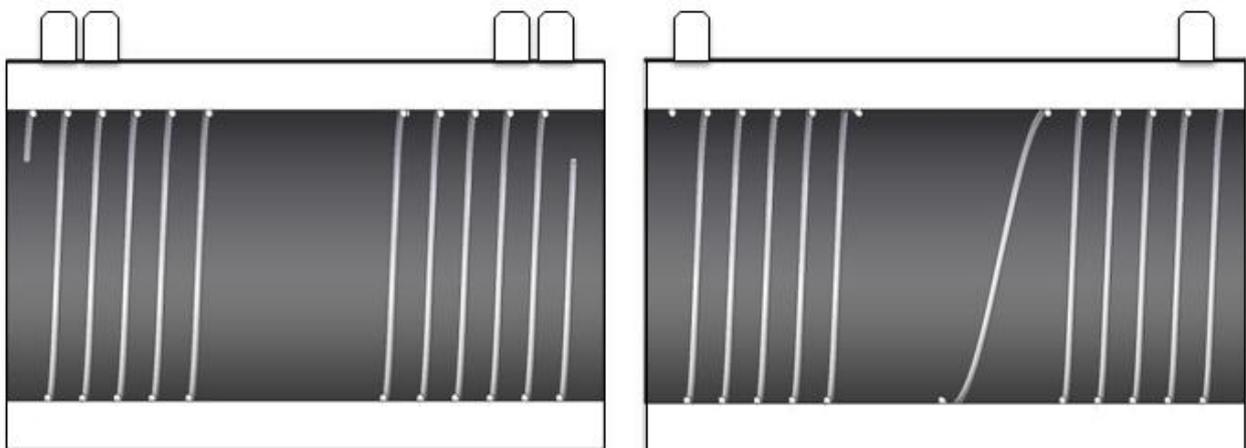


Abbildung 3-33: Links: Bifilare Muffenkonstruktion; Rechts: Monofilare Muffenkonstruktion

3.4.6 Entwicklung der Kontaktierung

Die Kontaktierung stellt die Verbindung zwischen Schweißkontakt und dem Heizdraht dar. Beim Schweißen entstehen durch unterschiedliche Wärmeausdehnungskoeffizienten Kräfte, die von der Kontaktstelle zwischen eigentlichem Kontakt und dem Heizdraht aufgenommen werden müssen. Im Rahmen umfangreicher Untersuchungen sind verschiedene Verfahren zur Verbindung von Kontaktpin und Heizdraht untersucht worden. Diese wurden hinsichtlich übertragbarer Zugkräfte bewertet und so die für die E-Muffenkonstruktion passende Verbindungstechnik ausgewählt. Abbildung 3-34 zeigt einen Kontaktpin, wie er in diesem Projekt eingesetzt wurde. Die Ergebnisse der Zugversuche sind in Abbildung 3-35 zusammengefasst. Aufgrund der höchsten Abzugskraft wurde die Version „Ü0,1 P3“ gewählt.



Abbildung 3-34: Kontaktpin

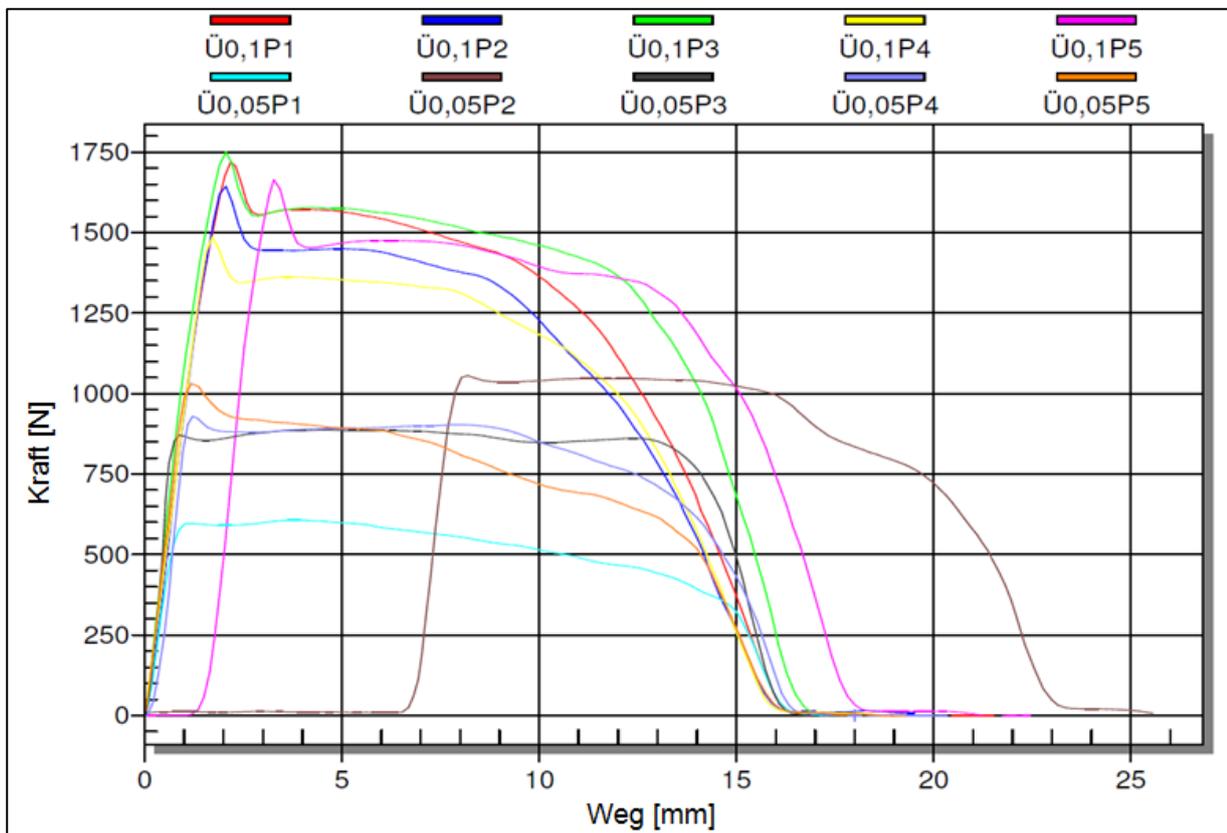


Abbildung 3-35: Übertragbare Zugkräfte zwischen Kontaktpin und Heizdraht

3.4.7 Druckprüfungen der neu entwickelten Muffen

Zum Nachweis der Einsetzbarkeit müssen neben den verschiedenen physikalischen Anforderungen (Farbe, Oberflächenbeschaffenheit, Schmelzviskosität, thermische Stabilität, elektrische Eigenschaften usw.) auch die mechanischen Eigenschaften der Schweißverbindung den Anforderungen der gültigen Regelwerke entsprechen. Mit einer der wichtigsten Anforderungen ist der Nachweis der Langzeitfestigkeit unter Innendruck. Dieser Nachweis wird mit Hilfe der Zeitstand-Innendruckprüfung geführt. Nach positivem Abschluss dieser Prüfung kann von einer Mindestlebensdauer der Verbindung von 50 Jahren ausgegangen werden. Abbildung 3-36 zeigt schematisch die Formel zur Bestimmung des notwendigen Prüfdruckes für die Zeitstand-Innendruckversuche.

$$p = \frac{2 \cdot (10 \cdot \sigma_t)}{SDR - 1}$$

σ_t = Tangentiale Spannung
 σ_a = Axiale Spannung

Abbildung 3-36: Formel zur Berechnung des Prüfdruckes bei der Zeitstand-Innendruckprüfung

Im letzten Abschnitt des Projekts wurden mehrere E-Muffen (D315 und D560) mit Hilfe des hierfür entwickelten Berechnungstools ausgelegt, unter Verwendung der entwickelten Verfahren hergestellt, geschweißt und im Rahmen von Zeitstand-Innendruckprüfungen (gemäß DIN 8075) getestet und so die Langzeitfestigkeit nachgewiesen. Während der gesamten Prüfdauer wurden Innendruck sowie Beckentemperatur geloggt und anschließend ausgewertet.

Für die Schweißung der Muffen wurden die Parameter aus Tabelle 3-7 verwendet:

Muffenabmessung	D315
Schweißspannung [V]	13
Schweißstrom (Anfang) [A]	93,8
Schweißzeit [min]	600
Theor. Energiemenge [kJ]	626
Bewertung	Schweißung i. O.

Tabelle 3-7: Parametersatz Schweißung Muffe D315

Die Prüfbedingungen für diese Zeitstand-Innendruckprüfung wurden gemäß der Tabelle 3-8 festgelegt:

Messgerät	Zeitstand-Druckprüfanlage, Modell 2500, Fabrikat Sciteq-Hammel A/S
Durchmesser/SDR	D315/11
Werkstoff	ELTEX TUB121 N3000
Prüftemperatur [°C]	80
Prüfdruck [bar]	11,5
Mindeststandzeit [h]	>165
Standzeit [h]	704,81
Bewertung	Prüfung bestanden

Tabelle 3-8: Prüfbedingungen der Zeitstand-Innendruckprüfung D315

Für die Prüfung der Muffe D560 kamen Endkappen eines Zulieferers zum Verschließen der Rohrenden zum Einsatz. Die Prüfung wurde ebenfalls gemäß DIN 8075 durchgeführt und mit positivem Ergebnis abgeschlossen. Die Schweißparameter sind in Tabelle 3-9 zusammengefasst, die Prüfbedingungen in Tabelle 3-10.

Muffenabmessung	D560
Schweißspannung [V]	33
Schweißstrom (Anfang) [A]	95,9
Schweißzeit [min]	1.122
theor. Energiemenge [kWh]	1.742
Bewertung	Schweißung i. O.

Tabelle 3-9: Parametersatz Schweißung Muffe D560

Messgerät	Zeitstand-Druckprüfanlage, Modell 2500, Fabrikat Sciteq-Hammel A/S
Durchmesser/SDR	D560/11
Werkstoff	ELTEX TUB121 N3000
Prüftemperatur [°C]	80
Prüfdruck [bar]	11,5
Mindeststandzeit [h]	>165
Standzeit [h]	443,54
Bewertung	Prüfung bestanden

Tabelle 3-10: Prüfbedingungen der Zeitstand-Innendruckprüfung D560

Abbildung 3-37 zeigt den Prüfaufbau der Muffe D560 mit den beidseitig angeschweißten Endkappen. Die Endkappen wurden hierbei durch das Heizelementstumpfschweißverfahren angeschweißt.



Abbildung 3-37: Prüfaufbau Muffe D560

4 Ökologische und ökonomische Bewertung

4.1 Bewertung der ökologischen Aspekte

Zur ökologischen Bewertung des Fügeverfahrens Heizwendelschweißen wurde eine Ökobilanz nach ISO 14040/14044 erstellt und die Unterschiede zwischen einer Standardmuffe und der neu entwickelten Muffe ermittelt [DIN09, DIN06]. Zur Erstellung der Ökobilanz wurden die Ergebnisse der technischen Untersuchungen und die in der verwendeten Software *GaBi* hinterlegten generischen Datensätze, zum Beispiel zu Rohstoffverbräuchen oder Luftemissionen bei der Herstellung von Polyethylen, verwendet. Das mit der Software erstellte Modell bildet die einzelnen Prozessschritte der Verfahren ab und liefert die Grundlage für eine entsprechende detaillierte Analyse sowie zur Untersuchung wechselseitiger Abhängigkeiten.

Die Produkt-, Stoff- und Energieflüsse wurden zunächst in der Sachbilanz zusammengestellt und die potentiellen Umweltwirkungen anhand verschiedener Umweltwirkungskategorien ermittelt. Die Bewertung der Umweltwirkungen erfolgte gemäß ISO 14040 durch eine Charakterisierung, bei der die in der Sachbilanz erfassten Ströme im Verhältnis zu einer Referenzgröße durch Charakterisierungsfaktoren gewichtet, mit den jeweiligen Mengen multipliziert und schließlich zu einer eindimensionalen Kennzahl für jede einzelne Wirkungskategorie, dem sogenannten Wirkungsindikator, aufsummiert werden [DIN09]. Hierfür wurde die etablierte CML-Methode (Centrum voor Milieukunde, der Universität Leiden (NL), CML) eingesetzt. Die gewählten Wirkungskategorien umfassen [CML01]:

- ADPE = Potential für den abiotischen Abbau nicht-fossiler Ressourcen
- ADPF = Potential für den abiotischen Abbau fossiler Brennstoffe
- EP = Eutrophierungspotential
- ODP = Abbaupotential der stratosphärischen Ozonschicht
- POCP = Photochemisches Ozonbildungspotential
- GWP = Treibhauspotential
- AP = Versauerungspotential

In diesem Projekt wurden die Umweltwirkungen über folgende Lebenszyklusphasen einer Muffe berücksichtigt:

- Rohstoffbereitstellung
 - Herstellung der Muffe
 - Einbau der Muffe (Fügevorgang)
 - Transportprozesse
-

Abbildung 4-1 zeigt das betrachtete System innerhalb der Systemgrenzen.

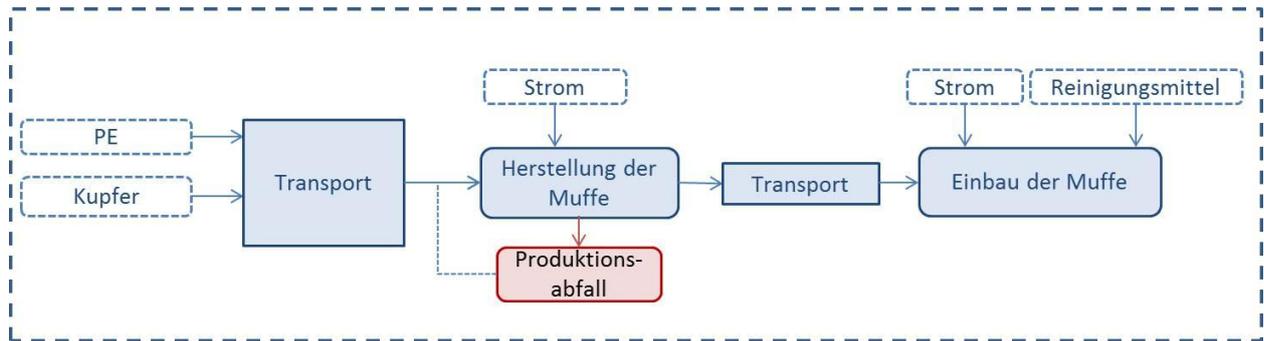


Abbildung 4-1: Fließschema zu System und Systemgrenzen bei der Ökobilanzierung

Die Material- und Energieströme sowie die verwendeten Datensätze sind den nachfolgenden Tabelle 4-1 bis 4-3 zu entnehmen.

		D315	D560	D1000
Input				
Polyethylen	kg	18,9	62,5	264,5
Kupferdraht	kg	0,2	0,5	1,7
Energiebedarf	MJ	132,8	222,5	599,4
Output				
Muffe	Stück	1	1	1
Rücklauf	kg	7,4	16,9	41,5

Tabelle 4-1: Prozessdaten zur Modellierung von Standardmuffen

		D315	D560	D1000
Input				
Polyethylen	kg	12,8	42,6	195,1
Kupferdraht	kg	0,2	0,5	1,7
Energiebedarf	MJ	105,2	181,8	535,9
Output				
Muffe	Stück	1	1	1
Rücklauf	kg	3,6	9,1	26,5

Tabelle 4-2: Prozessdaten zur Modellierung der neu entwickelten Muffe

		D315	D560	D1000
Input				
Muffe	Stück	1	1	1
Reinigungsmittel	g	10	17	30
Energiebedarf	MJ	1,62	3,15	4,00
Output				
Geschweißte Muffe	Stück	1	1	1

Tabelle 4-3: Prozessdaten zur Modellierung des Heizwendelschweißverfahrens

Abbildung 4-2 zeigt den Systemaufbau für die Berechnung der Ökobilanz mittels der Software *GaBi* [PEI15]. Dargestellt werden von links nach rechts die Rohstoffe und deren Transport, die Produktion der Muffe sowie anschließend der Transport und Einbau der Muffe. Zudem können die entstehenden Produktionsabfälle, da sie eingemahlen und anschließend wieder rückgeführt werden, in einem geschlossenen Kreislauf modelliert werden.

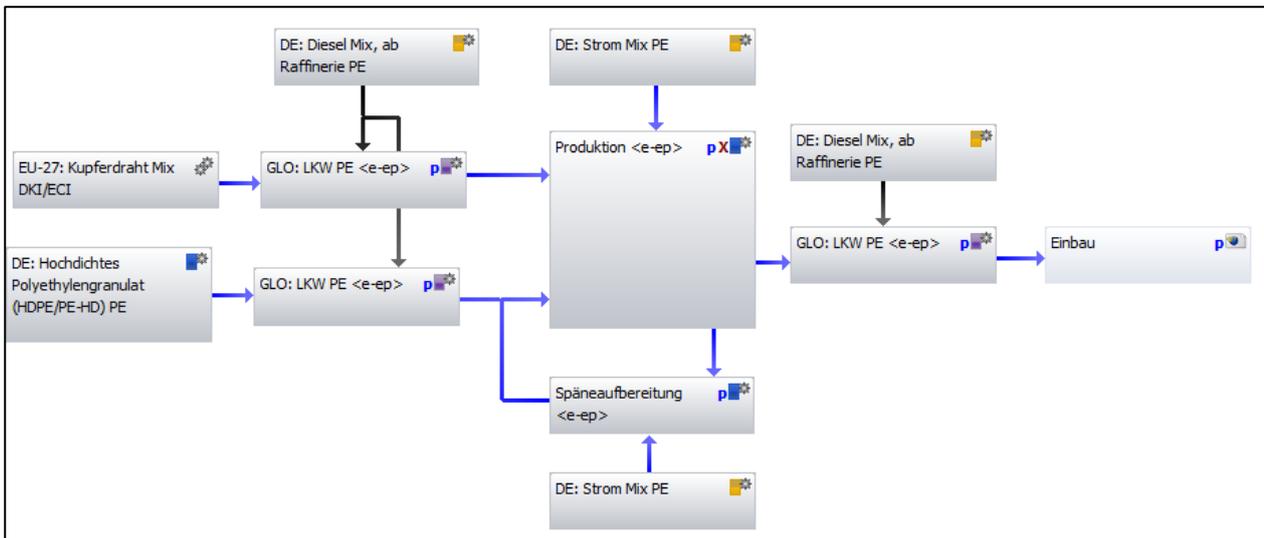


Abbildung 4-2: Fließbild zur Modellierung der Sachbilanz in GaBi

Die Umweltwirkungen der Muffe wurden anhand der verschiedenen Umweltwirkungskategorien ausgewertet. Nachfolgende Abbildungen zeigen den Vergleich der Standardmuffe mit der neu entwickelten Muffe (nachfolgend „Ökomuffe“ genannt) für verschiedene Durchmesser.

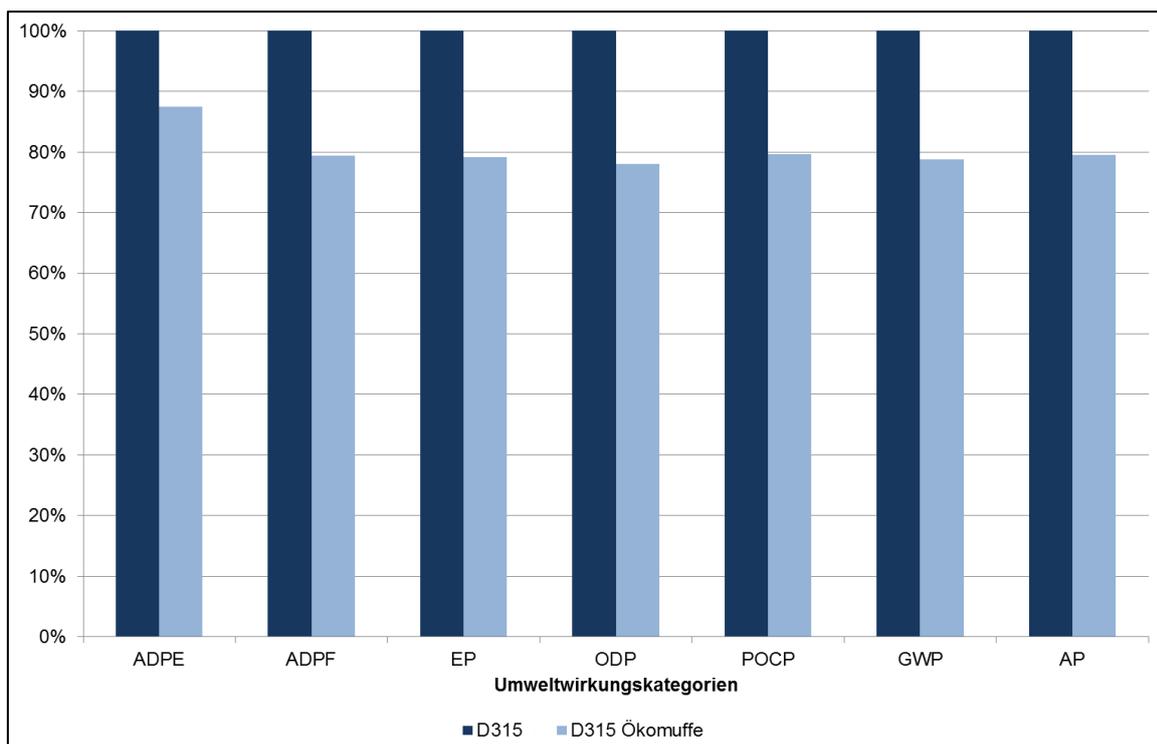


Abbildung 4-3: Vergleich der Umweltwirkungen der Standardmuffe mit der Ökomuffe, Durchmesser D315

Die Umweltwirkungen der Muffe mit D315 werden um ca. 12 % bis 22 % durch Material- und Energieeinsparungen reduziert. Da vor allem die Materialeinsparung einen großen Einfluss auf die Ökobilanz hat, ist die Verringerung der Umweltauswirkungen in allen Kategorien in derselben Größenordnung. Bei genauer Betrachtung der einzelnen Umweltwirkungskategorien in Abbildung 4-3 ist festzustellen, dass durch den geringen erneuerbaren Anteil das Potential für den abiotischen Abbau nicht-fossiler Ressourcen (ADPE) sich im Gegensatz zu anderen Kategorien weniger verringert.

Bei einer Muffe mit einem Durchmesser von D560 bringen die Veränderungen der Muffenkonstruktion eine Verringerung der Umweltwirkungen um 18 % bis 28 % mit sich. Durch die betragsmäßig größeren Materialeinsparungen ist bei Muffen mit größerem Durchmesser das Optimierungspotential höher. Anhand Abbildung 4-4 wird deutlich, dass in allen Kategorien eine Verringerung um ca. 28 % vorliegt, lediglich bei ADPE sind es nur 18 %.

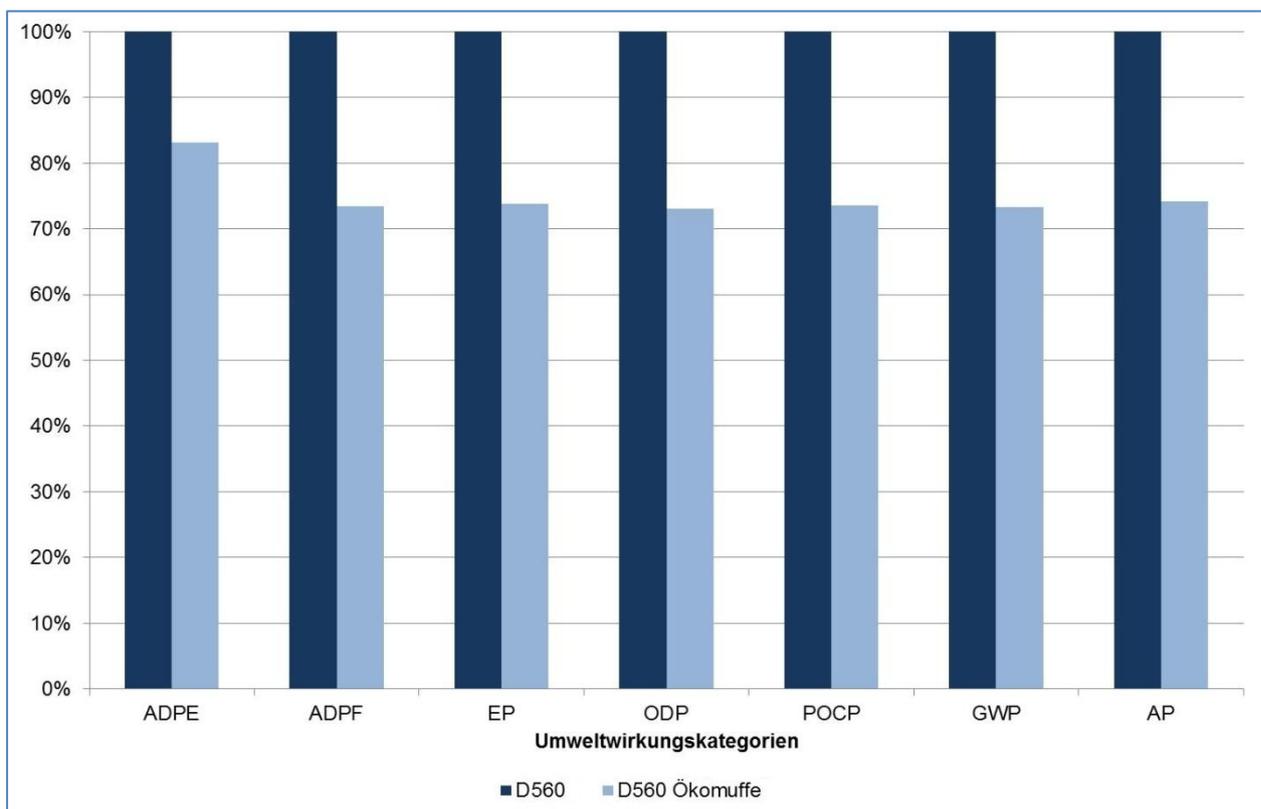


Abbildung 4-4: Vergleich der Umweltwirkungen der Standardmuffe mit der Ökomuffe, Durchmesser D560

Neben den nach CML ausgewerteten Umweltwirkungen, zeigen auch die Sachbilanzindikatoren den Effekt der Material- und Energieeinsparungen auf. Sachbilanzindikatoren werden definiert als eine quantitative Aussage über den betrachteten Lebenszyklus eines Produktes anhand eines bestimmten Indikators, wie beispielsweise dem Ressourcenverbrauch [KG07].

Die Indikatoren nicht-erneuerbare und erneuerbare Primärenergie sowie der Frischwasserverbrauch können bei der Produktion der Ökomuffe mit D315 auf weniger als 80 % reduziert werden (siehe Abbildung 4-5). Ein größerer Durchmesser, wie

beispielsweise D560, führt bei der Ökomuffe zu einer weiteren Verringerung der Sachbilanzindikatoren fast bis zu 70 % (siehe Abbildung 4-6).

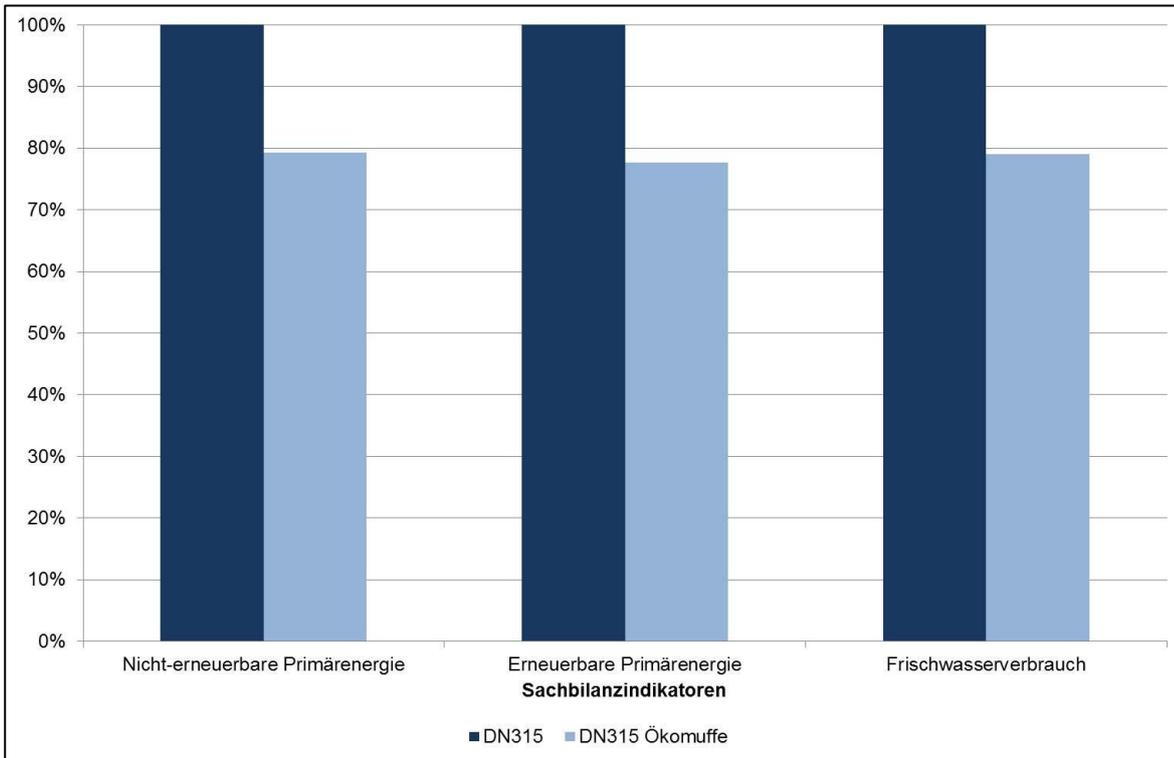


Abbildung 4-5: Vergleich der Sachbilanzindikatoren der Standardmuffe mit der Ökomuffe, Durchmesser D315

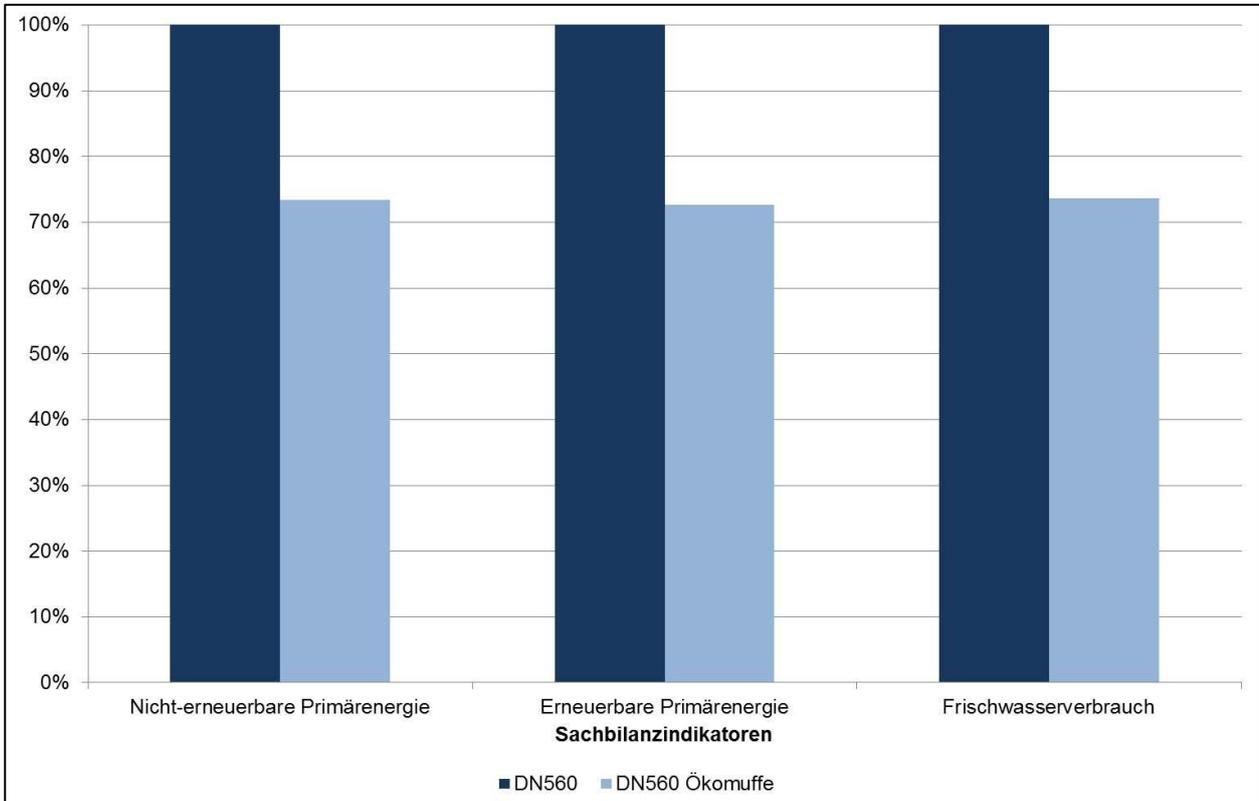


Abbildung 4-6: Vergleich der Sachbilanzindikatoren der Standardmuffe mit der Ökomuffe, Durchmesser D560

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass eine veränderte Muffenkonstruktion je nach Durchmesser die Ökobilanz einer Muffe um bis zu 30 % verbessern kann.

4.2 Bewertung der ökonomischen Aspekte

Die ökonomische Analyse und der Vergleich von Standard- und Ökomuffe erfolgte anhand der Kosten pro Fügevorgang (Fv). Diese setzten sich zusammen aus den Kosten für das Heizwendelschweißen selbst und für die dafür notwendigen Ressourcen. Zunächst wurde dazu der Maschinenstundensatz des Schweißgerätes ermittelt (siehe Tabelle 4-4). Die Berechnung erfolgt in Anlehnung an [BHS11].

Maschinenstundensatz	Einheit	D315	D560
Investitionssumme Schweißgerät	€	2.807	2.807
Abschreibungszeit (Laufzeit)	h	1.350	1.350
Nutzungsdauer	a	8	8
Abschreibung des Gerätes	€/h	0,26	0,26
Zinssatz	%	0,01	0,01
Kalkulatorischer Zins für das Gerät	€/h	0,02	0,02
Versicherung	€/h	0,01	0,01
Instandhaltung und Wartung	€/h	0,06	0,06
Zubehör [FRA14, PLA11]	€	4.472	5.673
Abschreibung des Zubehörs	€/h	0,41	0,53
Energiekosten	€/h	0,10	0,04
Maschinenstundensatz	€/h	0,86	0,92

Tabelle 4-4: Ermittlung des Maschinenstundensatzes des Schweißgerätes

Das in der Tabelle aufgeführte Zubehör setzt sich wie folgt zusammen: Rollböcke, Universalrohrhalteklemmen, Gewindespanner, Rohrschälgerät sowie einer Schutzeinrichtung. Zur Datenerhebung wurden Listenpreise ohne Rabattierung herangezogen.

Die Gesamtkosten berechnen sich aus den in der nachfolgenden Tabelle 4-5 aufgeführten Kosten, wie Maschinenstundensatz des Schweißgerätes, Personalkosten, Energiekosten sowie den Kosten für die Muffe. Es ist derzeit davon auszugehen, dass sich die Kosten für die Ökomuffe nicht von den Kosten für die Standardmuffe unterscheiden. Diese setzen sich aus den Material- und Herstellungskosten zusammen. Trotz Materialeinsparungen bei der Ökomuffe sind die Kosten durch den höheren Herstellungsaufwand (teurere notwendige Technologie) in der gleichen Größenordnung wie die Kosten der Standardmuffe. Ab einer bestimmten Muffenstückzahl (je nach Anschaffungspreis dieser Technologie zur profitablen Herstellung) sollte die Ökomuffe kostengünstiger als die Standardmuffe werden.

Nachfolgende Tabelle 4-5 schlüsselt die einzelnen Posten zur Berechnung der Gesamtkosten je Fügevorgang auf.

Gesamtkosten	Einheit	D315	D560
Anzahl der Fv pro Tag	Fv/d	13	6
Energieverbrauch je Fv	kWh/Fv	0,45	0,88
Zeit je Fv	min/Fv	33	48
Maschinenstundensatz	€/h	0,86	0,92
Bedienpersonalkosten	€/h	30	30
Kosten je Rohrreinigung	€/h	0,24	0,16
Kosten je Muffe (Richtpreis)	€/Fv	70	810
Kosten je Fv	€/Fv	90	851

Tabelle 4-5: Ermittlung der Gesamtkosten

Zusammenfassend werden bei einer Muffe mit D315 78 % der Gesamtkosten pro Fügevorgang durch die Muffe verursacht und 22 % durch die restlichen Aufwendungen. Bei größerem Muffendurchmesser, wie D560, ist der Anteil der Kosten durch die Muffe an den Gesamtkosten deutlich höher. Hier werden 95 % der Gesamtkosten durch die Kosten der Muffe verursacht. Unabhängig vom Muffendurchmesser werden die ermittelten Kosten je Fügevorgang durch die Kosten der Muffe dominiert.

5 Fazit der Untersuchungen

Im Rahmen dieses Forschungsprojektes sollten die ökologischen und ökonomischen Optimierungspotentiale bei der Herstellung von Muffen für das Heizwendelverfahren aufgezeigt werden.

Im ersten Teil der Forschungsarbeiten wurde das Muffenmaterial durch mehrere thermische und mechanische Analyseverfahren charakterisiert. Speziell für die realitätsnahen Simulationsarbeiten (thermisch und mechanisch) waren diese Ergebnisse von großer Wichtigkeit, da übliche Hersteller- bzw. Datenblattangaben hierfür nicht ausreichend sind. Weiterhin wurden aufbauend auf diesen Ergebnissen Energiebilanzen für den Heizwendelschweißprozess ermittelt.

Die thermischen und mechanischen Simulationen in diesem Forschungsprojekt zeigten relativ deutlich die Möglichkeiten der angewendeten Simulations-Methodik in Bezug auf die thermischen Verhältnisse in der Muffe während des Schweißprozesses und die mechanischen Eigenschaften der Schweißverbindung. Die Konstruktion der ökologisch und ökonomisch optimierten Muffe wurde auf Basis der hier erlangten Ergebnisse durchgeführt. Um die neue Muffengeometrie an den durch die Simulationen ermittelten Konturen angleichen zu können, wurden die gewickelten Muffenkörper anschließend spanend bearbeitet, wodurch die ökologischen und ökonomischen Vorteile neutralisiert wurden. In der folgenden Muffenproduktion soll allerdings ein weiterentwickelter konturnaher Wickelprozess diese Vorteile wieder zum Tragen kommen lassen.

Die positiven Prüfergebnisse durch die Innendruckversuche an den Schweißverbindungen mit der überarbeiteten Muffe belegen die Aussagefähigkeit der Simulationen.

Weiterhin wurden Möglichkeiten zur Überbrückung der Spaltmaße zwischen Rohr und Muffe untersucht. Die Einbringung von Eigenspannungen in die Muffe, welche sich während des Schweißprozesses abbauen und den Spalt schließen, zeigte sich als vielversprechend. Diese Arbeiten konnten im Rahmen dieses Forschungsprojektes nicht abgeschlossen werden und sollten aufgrund der Marktrelevanz weitergeführt werden.

Die ökologische und ökonomische Bewertung der optimierten Muffe zeigt das Materialeinsparpotential, welches bei der Herstellung der HM-Muffen berücksichtigt werden kann. Der geringere Materialeinsatz führt zu einer Verringerung der Umweltwirkungen im Vergleich zu einer Standard-Muffe um 20 % bis 30 % abhängig vom Durchmesser des Rohres.

6 Maßnahmen zur Verbreitung der Forschungsergebnisse

Die Ergebnisse dieses Vorhabens werden nach Absprache zwischen SKZ und Frank & Krah interessierten Unternehmen zur Verfügung gestellt. Weiterhin bietet das SKZ als eine der größten Aus- und Weiterbildungseinrichtungen Europas auf dem Kunststoffsektor die Gewähr für Verbreitung und gezielte Umsetzung der erarbeiteten Forschungsergebnisse. Diese werden in den alljährlich stattfindenden Fachtagungen, Lehrgängen und Seminaren in sämtliche Hierarchien der Unternehmen getragen (z. B. Lehrgänge zum Schweißen von Rohren, Kunststoffrohr-Tagung, Würzburger Schweißertage, etc.). Die Ergebnisse dieser Forschungsarbeit werden ebenfalls in die akademische Lehre der Universität Würzburg sowie der Fachhochschule Würzburg-Schweinfurt übernommen. Neben den genannten Veranstaltungen sind weiterhin zahlreiche Veröffentlichungen in Fachzeitschriften, wie z. B. „Kunststoffe“ und „Joining Plastics“, vorgesehen. Tabelle 6-1 zeigt einen Überblick der geplanten Transfermaßnahmen.

Maßnahme	Ziel	Datum / Zeitraum
Fachtagung „Würzburger Kunststoffrohr-Tage“	Information der Kunststoffrohrbranche	Juni 2015 (jährlicher Turnus)
Lehrgang am SKZ „Schweißen von Kunststoffrohren“	Information der Verarbeiter	Ab Oktober 2015 (jährlicher Turnus)
Übernahme der Ergebnisse in die akademische Lehre	Lehrveranstaltungen an der Universität Würzburg und FH Würzburg-Schweinfurt	Ab Oktober 2015
Fachtagung „Würzburger Schweißertage“	Information der Schweißbranche	Frühjahr 2016 (jährlicher Turnus)
Beratung von Unternehmen	Direkte Umsetzung und Nutzung der Forschungsergebnisse in den Unternehmen	Ab 2015
Veröffentlichung der Ergebnisse in der Fachpresse	Information der gesamten Kunststoffindustrie	Ab 2015
Berichterstattung bzw. Einarbeitung der Ergebnisse im DVS Ausschuss für Technik: - AG W 4.1 a (Heizelementschweißen) - AG W 4.4 (Messen und Prüfen)	Information des DVS und Einholen von Feedback	Ab März 2016

Tabelle 6-1: Geplante Maßnahmen zur Verbreitung der Forschungsergebnisse

7 Literatur

- [AKT08] Verein zur Berufsförderung der Bauwirtschaft Nord e.V.: Aktuell 02/2008, Wedemark, 2008.
- [BKK10] Baudrit, B., Kern, J., Kraus, E.: Entwicklung des Heizwendelschweißverfahrens für die Verbindung von Großrohren aus Kunststoff bis 2,5 m Durchmesser mittels universal anwendbarer, flexibler Wickelmuffen, Abschlussbericht, ZIM-Projektnummer KF2012501VT8, SKZ, Würzburg, 2010.
- [BKK11] Baudrit, B., Kern, J., Kraus, E.: Entwicklung des Heizwendelschweißverfahrens für die Verbindung von Großrohren aus Polyethylen mittels universal anwendbarer flexibler Wickelmuffen, Joining Plastics: Ausgabe 1 (2011), 3R: Ausgabe 6 (2011), bbr: Ausgabe 3 (2011) und Plastverarbeiter: Ausgabe 5 (2011).
- [BHS11] Baudrit, B., Hoffmann, M., Stübs, O.: Ökologisch-ökonomische Bewertung und Verfahrensoptimierung von Fügeverfahren am Beispiel von Kunststoffrohrsystemen“, Abschlussbericht, DBU-Projektnummer Az: 27249 – 21/2, SKZ, Würzburg 2011.
- [BF09] Berger, C. und Falk, C.: Zustand der Kanalisationen in Deutschland, DWA-Bericht Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V., Hennef, 2009.
- [BIF04] Bayerisches Institut für angewandte Umweltforschung und -technik GmbH (Hrsg.): Praxishilfe zur Durchführung von Ökoeffizienzanalysen als Instrument einer Integrierten Produktpolitik (IPP) an einem Beispiel aus der Automobilindustrie“, , BIFA-Text Nr. 26, Augsburg, 2004.
- [CML01] CML - Centre of Environmental Science – Leiden University: Life cycle assessment – An operational guide to the ISO standards, 2001.
- [DIN06] DIN EN ISO 14044: Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen (ISO 14044:2006), 2006.
- [DIN09] DIN EN ISO 14040: Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14040:2006), 2009.
- [FRI11] Friatec AG, Produktkatalog, Mannheim, 2011.
- [FHL06] Frank, T., Habedank, C., Lindenau, V.: Rohrwerkstoffe in der öffentlichen Abwasserentsorgung, Fachbericht, 3R International, Oldenburg, 2006.
- [FHW07] Frank, T., Habedank, C., Wennemer, J.: Kostensenkungspotentiale durch die Rohrwerkstoffwahl in der öffentlichen Abwasserentsorgung, 3R International, Oldenburg, 2007.
-

- [FH08] Frank, T. und Habedank, C.: PE-100-Rohrsysteme für den Transport kommunaler Abwässer - Kostenanalyse und Betrachtung der Nutzungsdauer, Wiesbadener Kunststoffrohrtage, 2008.
- [FRA11] Frank GmbH, Produktkatalog, Mörfelden, 2011.
- [FRA14] Frank & Krah GmbH, Preisliste, Wölfersheim, 2014.
- [Hes08] Hessel, J.: PE 100-RC – Ein PE100 mit erweitertem Anwendungspotenzial, Fachbericht, 3R International (47), Oldenburg, 2008.
- [KRV14] Fachverband der Kunststoffrohrindustrie, Kunststoffrohrverband e.V., Jahresbericht 2014, Bonn, 2014.
- [KUN10] Internetquelle: www.kunststoffreport.de, 06/2010.
- [KG07] Klöpffer, W. und Grahl, B.: Ökobilanz LCA – Ein Leitfaden für die Ausbildung und Beruf, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2007.
- [PLA11] Plasson GmbH, Produktkatalog, Wesel, 2011.
- [PEI15] PE International: GaBi Software-System and Database for Life Cycle Engineering, Leinfelden-Echterdingen, 2015.
- [Stü04] Stützel, T.: Wurzeleinwuchs in Abwasserkanäle, Forschungsbericht, Institut für unterirdische Infrastruktur, Gelsenkirchen, 2004.
- [Wen06] Wennemer, J.: Kalkulatorische Abschreibungen und Sanierungskosten als Kostensenkungspotenziale in der öffentlichen Abwasserentsorgung, Diplomarbeit, Lehrstuhl für Technologiemanagement und Marketing, Technische Universität Darmstadt, 2006.
-