Das Kunststoff-Zentrum

SKZ

SKZ – Das Kunststoff-Zentrum
SKZ - KFE gGmbH

Ökologisch-ökonomische Bewertung und Verfahrensoptimierung von Fügeverfahren am Beispiel von Kunststoffrohrsystemen

Abschlussbericht über ein Forschungsprojekt,
gefördert unter dem Az: 27249 – 21/2
von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Dr. Benjamin Baudrit
Dipl.-Volksw. Oliver Stübs

Würzburg, Dezember 2011

06/02

Projektkennblatt

der

Deutschen Bundesstiftung Umwelt

Az	27249	Referat	21/2	Fördersumme	112.245,00 €

Antragstitel **Ökologisch-ökonomische Bewertung und Verfahrensoptimierung von Fügeverfahren am Beispiel von Kunststoffrohrsystemen**

Stichworte

Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)
24 Monate	**02.07.2009**	**30.09.2011**	
Zwischenberichte	31.01.2010 31.07.2011	31.08.2010	31.01.2011

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

Tel 0931 4104-411
Fax 0931 4104-707

Projektleitung
Dipl.-Volsw. Oliver Stübs

Bearbeiter
Dr. Benjamin Baudrit

Kooperationspartner --

Zielsetzung und Anlass des Vorhabens

Die Bedeutung einer ökologischen und ökonomischen Bewertung von Produkten und Prozessen wird seit einigen Jahren stetig größer. Auf dem Gebiet der Kunststoffe liegen zu den verschiedenen Werkstoffen selbst schon viele Erkenntnisse vor, während es noch gravierende Wissenslücken zur Methodik bei den Verarbeitungsverfahren gibt. Der Einsatz von Rohrsystemen in den Bereichen Wasser- und Gasversorgung, Abwasserentsorgung sowie Industrieleitungen ist untrennbar mit zuverlässigen Fügeverbindungen verknüpft. Den Techniken wie Schweißen oder Kleben kommt daher entsprechend hohe Bedeutung zu. Viele Vertreter der Kunststoffrohrbranche forderten vor diesem Hintergrund, Forschungsarbeiten zur ökonomisch-ökologischen Bewertung der verschiedenen Fügeverfahren aufzunehmen. Durch die Wahl der geeigneten Fügeverfahren sollen Umweltbelastungen und negative Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit vermieden sowie Kosten reduziert werden.
Das Ziel des vorliegenden Vorhabens ist daher die Bewertung und Optimierung verschiedener Kunststofffügeverfahren, sowohl in ökologischer wie auch in ökonomischer Hinsicht. Es sollen für die Kunststoffrohrleitungs- und Installationsunternehmen bei den untersuchten Verfahren Schwachpunkte identifiziert und Optimierungspotentiale aufgezeigt werden, um Zeit und Kosten zu sparen sowie Umwelt- und gesundheitliche Belastungen zu vermeiden. Bei der ökologischen Betrachtung wird der Fokus auf den Energieverbrauch und die im Fügeprozess entstehenden Emissionen gelegt.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Ausgewählte Rohrtypen mit am Markt etablierten Material/Durchmesser-Kombinationen werden mittels der jeweils relevanten Verfahren gefügt. Begleitend erfolgt eine ökologische und ökonomische Bewertung der verschiedenen Fügeverfahren für diese Verbindungen. Anschließend wird die Verbindungsqualität hinsichtlich der mechanischen (Kurz- und Langzeitprüfungen) und der thermischen Eigenschaften geprüft, die Ergebnisse ausgewertet und die Stärken und Schwächen jedes Fügeverfahrens analysiert. Daraus werden Vorschläge zur Optimierung der Verfahren unter ökologischen und ökonomischen Gesichtspunkten ausgearbeitet und Empfehlungen für die Industrieunternehmen ausgesprochen.

Ergebnisse und Diskussion

Als Basis für die ökonomische und ökologische Bewertung der Fügeverfahren wurden zu Beginn des Projektes zahlreiche Rohrverbindungen mittels Heizelementstumpf- und Heizwendelschweißen hergestellt. Hierzu wurden Polyethylen- und Polypropylenrohre sowie entsprechende Fittinge verwendet. Während dieser Schweißungen wurde der Zeitbedarf pro Schweißung, die eingebrachte elektrische Leistung sowie die entstehenden Emissionen gemessen. Hierdurch konnte je Fügeverfahren bzw. Werkstoff eine maximale Anzahl an Schweißungen pro Arbeitstag unter idealen Werkstattbedingungen ermittelt werden. Für Rohre mit einem Durchmesser von 110 mm sind dies z.B. 17 Verbindungen mittels Heizelementstumpfschweißen und 43 Verbindungen mittels Heizwendelschweißen. Der Energieverbrauch ist bei beiden Verfahren abhängig vom Hersteller der Maschine bzw. Muffe und von der Heizelement- bzw. Muffengröße. Beim Heizelementstumpfschweißen konnte festgestellt werden, dass der Energieverbrauch in erster Linie vom Heizelementvolumen abhängt, da dieses während der Arbeiten auf einer bestimmten Temperatur gehalten werden muss. Bei Verwendung eines an die Rohrgröße angepassten Heizelements können bis zu 60% an Energie eingespart werden. Beim Heizwendelschweißen konnte festgestellt werden, dass je nach Hersteller der Muffe der Energieverbrauch um bis zu 40% variiert. Emissionen konnten bei diesen Schweißverfahren mit den durchgeführten Methoden nicht nachgewiesen werden. Lediglich beim Kleben konnten in der Luft Lösungsmitteldämpfe detektiert werden.

Die Auswertung der Verfahren nach der Methode der ökologischen Knappheit ergab, dass die Hauptumweltbelastungen beim Heizelementstumpfschweißen vom Energieverbrauch und beim Heizwendelschweißen und Kleben von der Herstellung der Heizwendel- bzw. Klebemuffe verursacht werden. Die ökonomische Auswertung zeigte, dass das Bedienpersonal jeweils hohe Kosten verursacht, diese beim Heizwendelschweißen jedoch vom Preis der Muffe je nach Durchmesser deutlich überlagert werden.

Die Untersuchungen zur Verbindungsqualität zeigten, dass es beim Heizelementstumpfschweißen möglich ist, die Abkühlzeit ohne Beeinträchtigung der mechanischen Kurzzeiteigenschaften deutlich zu reduzieren und somit Energie durch einen verkürzten Schweißzyklus einzusparen. Im Langzeit-Zugversuch zeigten die Proben mit kürzerer Abkühlzeit jedoch deutlich kürzere Standzeiten. Dies bedeutet, dass eine mögliche Reduzierung der Abkühlzeit je nach auftretender Belastung fallspezifisch entschieden werden muss. Die Untersuchungen zum Langzeitverhalten von Heizwendelschweißungen erbrachten keine eindeutigen Ergebnisse.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Die Forschungsergebnisse wurden fortlaufend ausführlich mit Vertretern der Industrie sowie im Rahmen entsprechender DVS-Sitzungen diskutiert und werden nach Abschluss des Projektes den 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 dieser erarbeiteten Forschungsergebnisse. Diese werden in den alljährlich stattfindenden Fachtagungen, Lehrgängen und Seminaren in sämtliche Hierarchien der Unternehmen getragen (z.B. Lehrgänge zum Schweißen und Kleben von Rohren, Würzburger Kunststoffrohrtagung, 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.

Fazit

Anhand der ermittelten Daten konnten Optimierungsvorschläge generiert werden, die für die jeweiligen Fügeverfahren ökologische und ökonomische Verbesserungen aufzeigen. Somit können z.B. beim Heizelementstumpfschweißen Kosten reduziert werden, wenn zwei Schweißmaschinen parallel betrieben und so die Wartezeiten verkürzt sowie die Personalauslastung gesteigert werden. Durch konstruktive Maßnahmen am Heizelement können Energieverbrauch und damit Umweltlasten reduziert werden. Ein weiterführendes Projekt hierzu befindet sich bereits in der Planung. Beim Heizwendelschweißen wird das größte Potential für eine Verbesserung der ökologischen und ökonomischen Bilanzen in einer Optimierung der Heizwendelmuffe hinsichtlich Materialverbrauch und Gewicht gesehen. Hierzu ist ebenfalls ein weiterführendes Projekt geplant.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung 8
2 Recherche des Status quo 10
2.1 Darstellung der unterschiedlichen Fügeverfahren für Rohre 10
2.1.1 Heizelementstumpfschweißen (HS) 10
2.1.2 Heizwendelschweißen (HM) 11
2.1.3 Kleben 13
2.1.4 Anwendbarkeit der Fügeverfahren in Abhängigkeit vom Kunststofftyp 14
2.2 Literaturrecherche 14
2.2.1 Investitionen und Abschreibungen 14
2.2.2 Zeitbedarf (Dauer einer Schweißung) 15
2.2.3 Personalbedarf 15
2.2.4 Kosten für einzelne Schweißung 15
3 Ermittlung des Zeit- und Energiebedarfs sowie der Emissionen beim Fügen von Kunststoffrohren 17
3.1 Ermittlung des Zeitbedarfs 17
3.1.1 Heizwendelschweißen 17
3.1.2 Heizelementstumpfschweißen 18
3.1.3 Zwischenfazit: Gegenüberstellung von HM und HS 20
3.1.4 Übertragbarkeit der Ergebnisse 20
3.2 Messung der elektrischen Leistung 22
3.2.1 Heizelementstumpfschweißen 22
3.2.2 Untersuchung der Unterschiede im Energieverbrauch zwischen verschiedenen Heizelementstumpfschweißmaschinen 23
3.2.3 Heizwendelschweißen 27
3.2.4 Vergleich des Energiebedarfs beim HS gegenüber HM 28
3.3 Messung der Emissionen 28
3.3.1 Heizwendelschweißen 28
3.3.2 Heizelementstumpfschweißen 29
3.3.3 Kleben 29
4 Ökologische Bewertung der Fügeverfahren 31
4.1 Beschreibung des zu untersuchenden Systems 31
4.2 Erstellung der Sachbilanz 32
4.3 Ergebnisse der Umweltbewertung 34
5 Ökonomische Bewertung 37
6 Qualität der Fügeverbindung 40
6.1 Möglichkeiten zur Ermittlung der Schweißnahtqualität 40
6.1.1 Kurz- und Langzeit-Zugversuche 40
6.1.2 Linear-Scherversuche 41
6.2 Bestimmung der Schweißnahtqualität bei Heizelementstumpfschweißungen 42
6.2.1 Kurzzeit-Zugversuch 42
6.2.2 Zeitstand-Zugversuch 42

6.3 Bestimmung der Schweißnahtqualität bei Heizwendelschweißungen 43
6.3.1 Linearscherversuch 43
6.3.2 Zeitstand-Zugversuch 44
7 Umfrage 46
8 Fazit: Vorschläge zur ökologisch-ökonomischen Optimierung der diversen Verfahren 48
8.1 Heizelementstumpfschweißen 48
8.2 Heizwendelschweißen 52
8.3 Kleben 53
9 Maßnahmen zur Verbreitung der Vorhabensergebnisse 53
10 Literatur 55
11 Anhang 57
11.1 Dokumentation der Annahmen 57
11.2 Ökonomische Bewertung 60
11.2.1 Heizelementstumpfschweißen 60
11.2.2 Heizwendelschweißen 64
11.2.3 Kleben 67
11.3 Vorgehen bei der Berechnung der Umweltbelastungspunkte 68
11.4 Fragebogen Heizwendelschweißen 69
11.5 Fragebogen Heizelementstumpfschweißen 72

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Schematische Darstellung einer Heizelementstumpfschweißmaschine für Rohre 10
Abbildung 2-2: Schematischer Ablauf einer Heizelementstumpfschweißung mit Druck- und Wegverlauf . 11
Abbildung 2-3: Schematische Darstellung einer Heizwendelschweißung an Rohrleitungen 12
Abbildung 2-4: Schematischer Längsschnitt durch eine Rohr-Muffen-Schweißung 12
Abbildung 2-5: Schweißvorbereitung durch Schälen der Rohrenden (links) und Reinigen der Schweißflächen (rechts) 12
Abbildung 2-6: Klebfittings aus PVC [BÄN11] 13
Abbildung 2-7: Auftragen des Klebstoffen auf Klebmuffe und Rohr [KWE11] 13
Abbildung 2-8: Graphischer Vergleich der Kosten von HS und HM (bearbeitet nach [DOM01]) 16
Abbildung 3-1: Einzelne Phasen einer HM-Schweißung am Beispiel eines PE-Rohres mit einem Durchmesser von 250 mm bei Verwendung von zwei Einspannungen 17
Abbildung 3-2: Einzelne Phasen von vier HS-Schweißungen am Beispiel von PE-Rohren mit einem Durchmesser von 250 mm; 1 Schweißgerät (SG) 18
Abbildung 3-3: Einzelne Phasen von vier HS-Schweißungen am Beispiel von PE-Rohren mit einem Durchmesser von 110 mm; 2 Schweißgeräte (SG) 19
Abbildung 3-4: 4-Kanal Leistungsmessgerät LMG450 der Firma ZES ZIMMER Electronic Systems GmbH 22
Abbildung 3-5: Vergleich Energieverbrauch je Schweißung beim HS-Schweißen eines PE-Rohres mit einem Durchmesser von 250 mm 23
Abbildung 3-6: Energieverbrauch in Abhängigkeit von der Heizelementdicke (Rohrdurchmesser 110 mm) 25
Abbildung 3-7: Energieverbrauch in Abhängigkeit vom Heizelementdurchmesser (Rohrdurchmesser 110 mm) 25
Abbildung 3-8: Energieverbrauch in Abhängigkeit vom Volumen des Heizelements (Rohrdurchmesser 110 mm) 26
Abbildung 3-9: Vergleich der Energieverbräuche je Verfahrensschritt eines Heizelements mit Einhausung und ohne Einhausung beim Schweißen von PE-Rohren mit d 110 27
Abbildung 3-10:Abhängigkeit des Energiebedarfs vom PE-Muffendurchmesser (50 Messwerte, verschiedene Muffenhersteller) 27
Abbildung 3-11: Rauchentwicklung und Brand in einer Muffe durch unsachgemäße Verwendung 29
Abbildung 3-12: Chromatogramm der GC/MS-Analyse von PVC-Klebstoff 30
Abbildung 4-1: System Heizelementstumpfschweißen 31
Abbildung 4-2: System Heizwendelschweißen 32
Abbildung 4-3: System Kleben 32
Abbildung 4-4: Umweltwirkungen (Methode der ökologischen Knappheit) beim Heizelementstumpfschweißen von Rohren mit Durchmesser 110 mm 34
Abbildung 4-5: Umweltwirkungen (Methode der ökologischen Knappheit) beim Heizwendelschweißen von PE-Rohren mit Durchmesser 110 mm 35
Abbildung 4-6: Umweltwirkungen (Methode der ökologischen Knappheit) beim Kleben von PVC-Rohren mit Durchmesser 110 mm 35
Abbildung 5-1: Anteile einzelner Kostenpositionen pro Schweißung (HS) 38
Abbildung 5-2: Anteile einzelner Kostenpositionen pro Schweißung (HM) 39
Abbildung 6-1: Zugversuch an einem geschweißten Probekörper (links) und Versuchsaufbau Zeitstand-Zugversuch (rechts) 40

Abbildung 6-2: Prüfgerät für den maschinellen Linearscherversuch (links) und Detailaufnahme einer zu prüfenden Probe (rechts) 41

Abbildung 6-3: Schematische Darstellung zweier Probekörper (links) sowie Probekörper (rechts) 41

Abbildung 6-4: Maximale Zugfestigkeiten der geschweißten Proben nach DVS- bzw. ISO-Richtlinien 42

Abbildung 6-5: Standzeiten der geschweißten und ungeschweißten Proben im Zeitstand-Zugversuch (Netzmittel Arkopal N100, Prüfspannung 6 N/mm², Prüftemperatur 80 ℃) 43

Abbildung 6-6: Ergebnisse der Linearscherversuche an heizwendelgeschweißten Rohren verschiedener Durchmesser 43

Abbildung 6-7: Geprüfter (oben) und ungeprüfter Probekörper (unten) für den Langzeit-Zugversuch 44

Abbildung 6-8: Ergebnisse der Langzeit-Zugversuche für eine Heizwendelschweißung an PE-Rohren mit einem Durchmesser von 110 mm 45

Abbildung 7-1: Ausschnitt aus dem Fragebogen zum HM 46

Abbildung 7-2: Graphische Darstellung der Umfrageergebnisse 47

Abbildung 8-1: Vergleich der Heizelementoberfläche mit den tatsächlich zu erwärmenden Rohrringflächen 48

Abbildung 8-2: Schematische Darstellung der Wärmeverluste am Heizelement 49

Abbildung 8-3: Prozentualer Energieverbrauch in Abhängigkeit vom Heizelementdurchmesser (PE-HD, Rohrdurchmesser 110 mm, SDR11) 49

Abbildung 8-4: Maximale Zugspannungen der heizelementstumpfgeschweißten Proben im Kurzzeit-Zugversuch bei variierten Abkühlzeiten unter Fügedruck (d=110 mm, SDR 11, PE-HD) 50

Abbildung 8-5: Standzeiten der heizelementstumpfgeschweißten Proben im Langzeit-Zugversuch bei Variation der Abkühlzeit unter Fügedruck (d=110 mm, SDR 11, PE-HD) 50

Abbildung 8-6: Zeitlicher Ablauf beim Heizelementstumpfschweißen mit einer Schweißmaschine 51

Abbildung 8-7: Zeitlicher Ablauf beim Heizelementstumpfschweißen mit zwei Schweißmaschinen 51

Abbildung 8-8: Theoretische Reduktion der Wanddicke einer Muffe zur Gewichtsreduktion 52

Abbildung 11-1: Durchschnittspreise für PE- und PP-Muffen in Abhängigkeit vom Durchmesser 66

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Übersicht der Rohrwerkstoffe und der anwendbaren Fügeverfahren 14
Tabelle 2-2: Dauer einer Schweißung für die Verfahren HS und HM 15
Tabelle 2-3: Überblick über Berechnungsparameter von [DOM01] und [ECK01] 16
Tabelle 3-1: Maximale Anzahl an Heizwendelschweißungen von PE-Rohren pro Tag 18
Tabelle 3-2: Maximale Anzahl an Heizelementstumpfschweißungen von PE-Rohren pro Tag 20
Tabelle 3-3: Gegenüberstellung der Anzahl der maximal möglichen Schweißungen für PE-Rohre pro Arbeitstag (bei Verwendung einer Schweißmaschine bzw. Einspannung) 20
Tabelle 3-4: Veränderung der Schweißzeiten beim HS von PP-Rohren im Vergleich zu PE-Rohren 20
Tabelle 3-5: Veränderung der Schweißzeiten beim HS von PVC-Rohren im Vergleich zu PE-Rohren 21
Tabelle 3-6: Veränderung der Schweißzeiten beim HM von PP-Rohren im Vergleich zu PE-Rohren 21
Tabelle 3-7: Energieverbrauch für das Aufwärmen und pro Prozessschritt (Durchschnitt über alle betrachteten Schweißmaschinen) 23
Tabelle 3-8: Verwendete Heizelementstumpfschweißmaschinen zur Untersuchung des Einflusses der Geometrie der Heizelemente auf den Energiebedarf 24
Tabelle 3-9: Korrelation Energiebedarf mit Dicke, Durchmesser und Volumen des Heizelements 26
Tabelle 3-10: Verbrauch elektrischer Strom pro Schweißung (PE-Rohre) 28
Tabelle 4-1: Daten zur Modellierung des Heizelementstumpfschweißverfahrens 33
Tabelle 4-2: Daten zur Modellierung des Heizwendelschweißverfahrens 33
Tabelle 4-3: Daten zur Modellierung des Klebens 33
Tabelle 5-1: Berechnung der durchschnittlichen Gesamtkosten pro Schweißung (HS) für PE-Rohre 37
Tabelle 5-2: Berechnung der durchschnittlichen Gesamtkosten pro Schweißung (HM) für PE-Rohre 38
Tabelle A-1: Gewichtsdurchschnitte Muffen (bei durchschnittlichem Kupferanteil von 4 %); Druckrohre 58
Tabelle A-2: Gegenüberstellung der durchschnittlichen Gewichte und des resultierenden global warmings unterschiedlicher Muffen für HM (Trinkwasserbereich) 58
Tabelle A-3: Zusammenstellung der Gewichte beim HM und HS [ECK01] 59
Tabelle A-4: Preistabellen Firma FRANK 60
Tabelle A-5: Preistabellen Firma Plasson 60
Tabelle A-6: Preistabellen Firma Georg Fischer 61
Tabelle A-7: Mittlere Preise der Schweißmaschinen und des Zubehörs 62
Tabelle A-8: Berechnung des Maschinenstundensatzes (1 Maschine) 63
Tabelle A-8: Muffenpreise PE-Muffen 64
Tabelle A-9: Muffenpreise PP-Muffen 65
Tabelle A-10: Mittlere Preise der Schweißmaschinen und des Zubehörs 65
Tabelle A-11: Berechnung des Maschinenstundensatzes 66
Tabelle A-9: Muffenpreise PVC-U Klebe-Muffen [BÄN11] 67

Abkürzungsverzeichnis

$Ä_E^W$	Äquivalenzwert des Wirkungsindikators W für Substanz E [kg]
a_{HM}	Anzahl der möglichen Schweißungen pro Tag (HM)
a_{HS}	Anzahl der möglichen Schweißungen pro Tag (HS)
c_E	Charakterisierungsfaktor der Substanz E nach einer Emission
d	Durchmesser des Rohres [mm]
D_{HE}	Durchmesser des Heizelements [mm]
DVS	Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e.V.
E	Energie [kWh]
EPD	Environmental Product Declaration (dt.: Umweltproduktdeklaration)
FCKW	Fluor-Chlor-Kohlenwasserstoff
FE	Funktionelle Einheit bei der Erstellung einer Ökobilanz
f_Z	Kurzzeitzug-Schweißfaktor [-]
GC/MS	Gaschromatograph mit gekoppeltem Massenspektrometer
HD	Heizelementmuffenschweißen
HM	Heizwendelschweißen
HS	Heizelementstumpfschweißen
LSV	Linearscherversuch
m_E	Kumulierte Emissionen der Substanz E [kg]
P	Leistung [W]
PA12	Polyamid-12
PE	Polyethylen
PP	Polypropylen
PTFE	Polytetrafluorethylen
PVC	Polyvinylchlorid
R	Korrelationskoeffizient (nach Pearson)
R^2	Bestimmtheitsmaß
s	Nennwanddicke [mm]
SDR	Standard Dimension Ratio: Eine zur Klassifizierung von Kunststoffrohren gebräuchliche Kennzahl, die das Verhältnis zwischen Außendurchmesser und Wanddicke eines Rohres angibt
SG	Schweißgerät
t	Zeit [s] bzw. [min]
t_{Ang}	Angleichzeit [min] (HS)
t_{Anw}	Anwärmzeit [min] (HS)
t_{Auf}	Aufwärmzeit des Heizelements [min] (HS)
t_H	Handlingzeit der Rohre [min] (HS)
t_K	Abkühlzeit [min]
t_P	Fügedruckaufbauzeit [min] (HS)
t_S	Schweißzeit [min] (HM)
t_U	Umstellzeit des Heizelements [min] (HS)
t_V	Vorbereitungszeit der Schweißung [min] (HM)
t_{W1}	Wartezeit [min] (HM) $\triangleq R \cdot t_K - t_V - t_S$
t_{W2}	Wartezeit [min] (HS) $\triangleq R \cdot t_K - t_Z - t_H - t_{Ang} - t_{Anw} - t_U - t_P$
t_Z	Zeitbedarf zum Wechseln der Schweißstelle [min]
W	Arbeit [J]
X	Prozentualer Anteil der Abkühlzeit [%]; 100 % $\triangleq$ Vorgegebene Abkühlzeit nach DVS

Zusammenfassung

Ziel des durchgeführten Forschungsvorhabens war die Bewertung und die Optimierung verschiedener Fügeverfahren für Kunststoffrohre, sowohl in ökologischer wie auch in ökonomischer Hinsicht. Hierbei sollten für verschiedene Rohrmaterialien Verbesserungspotentiale für die Kunststoffrohrleitungs- und Installationsunternehmen aufgezeigt werden. Weiterhin sollten Schwachpunkte bei den jeweiligen Verfahren identifiziert werden, um Zeit und Kosten zu sparen sowie Umwelt- und gesundheitliche Belastungen zu vermeiden. Hierbei einbezogen wurden wichtige Größen, wie z.B. die Verbindungsqualität, der Zeitbedarf, der Energieverbrauch und die entstehenden Emissionen während des Fügevorgangs.

Als Basis für die ökonomische und ökologische Bewertung der Fügeverfahren wurden zu Beginn des Projektes zahlreiche Rohrverbindungen mittels Heizelementstumpf- und Heizwendelschweißen hergestellt. Hierzu wurden Polyethylen- und Polypropylenrohre sowie entsprechende Fittinge verwendet. Während dieser Schweißungen wurde der Zeitbedarf pro Schweißung, die eingebrachte elektrische Leistung sowie die entstehenden Emissionen gemessen. Hierdurch konnte je Fügeverfahren bzw. Werkstoff eine maximale Anzahl an Schweißungen pro Arbeitstag unter idealen Werkstattbedingungen ermittelt werden. Für Rohre mit einem Durchmesser von 110 mm sind dies z.B. 17 Verbindungen mittels Heizelementstumpfschweißen und 43 Verbindungen mittels Heizwendelschweißen. Der Energieverbrauch ist bei beiden Verfahren abhängig vom Hersteller der Maschine bzw. Muffe und von der Heizelement- bzw. Muffengröße. Beim Heizelementstumpfschweißen konnte festgestellt werden, dass der Energieverbrauch in erster Linie vom Heizelementvolumen abhängt, da dieses während der Arbeiten auf einer bestimmten Temperatur gehalten werden muss. Bei Verwendung eines an die Rohrgröße angepassten Heizelements können bis zu 60% an Energie eingespart werden. Beim Heizwendelschweißen konnte festgestellt werden, dass je nach Hersteller der Muffe der Energieverbrauch um bis zu 40% variiert. Emissionen konnten bei den Schweißverfahren mit den durchgeführten Methoden nicht nachgewiesen werden. Lediglich beim Kleben konnten in der Luft Lösungsmitteldämpfe detektiert werden. Die Auswertung der Verfahren nach der Methode der ökologischen Knappheit ergab, dass die Hauptumweltbelastungen beim Heizelementstumpfschweißen vom Energieverbrauch und beim Heizwendelschweißen und Kleben von der Herstellung der Heizwendel- bzw. Klebemuffe verursacht werden. Die ökonomische Auswertung zeigte, dass das Bedienpersonal jeweils hohe Kosten verursacht, diese beim Heizwendelschweißen jedoch vom Preis der Muffe je nach Durchmesser deutlich überlagert werden.

Die Untersuchungen zur Verbindungsqualität zeigten, dass es beim Heizelementstumpfschweißen möglich ist, die Abkühlzeit ohne Beeinträchtigung der mechanischen Kurzzeiteigenschaften deutlich zu reduzieren und somit Energie durch einen verkürzten Schweißzyklus einzusparen. Im Langzeit-Zugversuch zeigten die Proben mit kürzerer Abkühlzeit jedoch deutlich kürzere Standzeiten. Dies bedeutet, dass eine mögliche Reduzierung der Abkühlzeit je nach auftretender Belastung fallspezifisch entschieden werden muss.

Anhand der ermittelten Daten konnten Optimierungsvorschläge generiert werden, die für das jeweilige Fügeverfahren ökologische und ökonomische Verbesserungen aufzeigen. Somit können z.B. beim Heizelementstumpfschweißen Kosten eingespart werden, wenn zwei Schweißmaschinen parallel betrieben und so die Wartezeiten verkürzt sowie die Personalauslastung gesteigert werden. Der Energieverbrauch kann ebenfalls durch konstruktive Maßnahmen am Heizelement reduziert werden. Ein weiterführendes Projekt hierzu befindet sich bereits in der Planung. Beim Heizwendelschweißen wird das größte Potential für eine Verbesserung der ökologischen und ökonomischen Bilanzen in einer Optimierung der Heizwendelmuffe hinsichtlich Materialverbrauch und Gewicht gesehen. Hierzu ist ebenfalls ein weiterführendes Projekt geplant.

Dieses Projekt wurde gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt unter dem Aktenzeichen 27249 – 21/2. Wir danken herzlich für die Unterstützung.

1 Einleitung

Kunststoffe erfahren als vergleichsweise junge Werkstoffe eine rasante Entwicklung. Von Massenware bis High-Tech-Produkt gehört ihnen in fast allen Industriezweigen die Zukunft (Bau-, Automobil-, Luftfahrt- und Medizinbereich). Zunehmend finden Kunststoffe auch Anwendung als Konstruktionswerkstoffe z. B. im Bereich Rohrleitungsbau, wo Fügetechniken wie Schweißen oder Kleben unentbehrlich sind.

Thermoplastische Kunststoffe sind mittlerweile mit 54 % Marktanteil und einem Volumen von 2.500.000 Tonnen/Jahr die wichtigsten Werkstoffe für Rohrsysteme in Europa. Am häufigsten werden Systeme aus PE, PP oder PVC in den Bereichen Wasser- und Gasversorgung, Abwasserentsorgung sowie Industrierohrleitungen eingesetzt. Ihre Anwendung ist untrennbar mit zuverlässigen Fügeverbindungen verknüpft. Die wichtigsten Verfahren sind dabei das Heizelementstumpfschweißen (HS), das Heizwendelschweißen (HM), das Heizelement-muffenschweißen (HD) sowie das Kleben. Beim Schweißvorgang werden die zu fügenden Teile unter Anwendung von Energie und Druck stofflich verbunden, während ein Klebstoff die zu Teile mittels Oberflächenhaftung (Adhäsion) und innerer Festigkeit (Kohäsion) verbindet.

Vor dem Hintergrund eines weltweit steigenden Interesses für eine nachhaltige Produktion wird die ökologische und ökonomische Bewertung von Produkten und Prozessen immer bedeutsamer. Auf dem Gebiet der Kunststoffe liegen zu den Werkstoffen selbst schon viele Erkenntnisse vor, während es noch gravierende Wissenslücken zur Methodik bei den Verarbeitungsverfahren gibt. Sehr viele Vertreter aus allen Bereichen der Kunststoffrohrbranche (Rohstofflieferanten, Halbzeughersteller, Schweißgerätehersteller, Schweißer, Klebstoffhersteller, Monteure, Verleger, ...) forderten aus diesem Grund, Forschungsarbeiten zur ökonomisch-ökologischen Bewertung der verschiedenen Fügeverfahren aufzunehmen. Dies spiegelt die wirtschaftliche Bedeutung der Thematik für die Unternehmen wider. Ungeeignete Verfahren führen zu geringeren Qualitäten der Verbindungen und somit zu einer Verminderung der Lebensdauer, verbunden mit Schäden an den Rohrsystemen, die mit finanziellen Verlusten (z. B. durch notwendig gewordene Sanierungsmaßnahmen) einhergehen. Durch eine geeignete Wahl der Fügeverfahren könnte somit ebenfalls die Umweltbelastung verringert werden.

Das vorliegende Vorhaben hat die Bewertung und die Optimierung verschiedener Kunststofffügeverfahren zum Ziel, sowohl in ökologischer wie auch in ökonomischer Hinsicht. Dabei sollen Verbesserungspotentiale für die Kunststoffrohrleitungs- und Installations-unternehmen gezeigt werden.

Schwachpunkte bei den jeweiligen Verfahren werden identifiziert, um Zeit und Kosten zu sparen sowie Umwelt- und gesundheitliche Belastungen zu vermeiden. Wichtige Größen, die hierbei einbezogen werden, sind: Qualität der Verbindung, Zeitbedarf, Energieverbrauch und Emissionen während des Schweißvorgangs. Bei der ökologischen Betrachtung wird der Fokus auf den Energieverbrauch und die im Fügeprozess entstehenden Emissionen und damit auf die aus Praxisperspektive wesentlichen Aspekte gelegt.

Die Untersuchung der Qualität der Verbindung gibt Hinweise auf deren Lebensdauer. Die eingesetzte Energiemenge und der Zeitbedarf bei den jeweiligen Fügeverfahren lassen gemeinsam mit ökologischen und ökonomischen Daten zu den eingesetzten Materialien Rückschlüsse auf die entstehenden Kosten und die Belastungen auf Menschen und die Umwelt zu. Die Qualität und somit die Lebensdauer haben dabei direkte Auswirkungen auf die Beurteilung der Verfahren: Führt ein Fügeverfahren im Vergleich zu anderen Alternativen zu einer deutlich reduzierten Lebensdauer, ist das betreffende Bauteil früher auszutauschen, woraus eine zusätzliche Umweltbelastung und Mehrkosten resultieren.

Um das Projektziel zu erreichen, wurden zunächst in enger Zusammenarbeit mit Industrieunternehmen die häufigsten Fügeverfahren und die am Markt etablierten Material/Durchmesser-Kombinationen identifiziert. Auf dieser Grundlage wurden die entsprechenden Rohrtypen beschafft. Die ausgewählten Rohre wurden mit unterschiedlichen Verfahren, u. a. nach den Methoden des Heizelementstumpf- und Heizwendelschweißens,

und mit Geräten diverser Hersteller gemäß der Richtlinien des Deutschen Verbands für Schweißen und verwandte Verfahren e.V. (DVS) gefügt. Um damit verbundene Kosten und die wesentlichen Umweltbelastungen zu erfassen und zu quantifizieren, wurden die Zeiten und der Energieeinsatz beim Fügen der Rohre gemessen sowie mögliche freigesetzte Emissionen mittels Gaschromatographen mit Massenspektrometer (GC/MS) untersucht. Alle durchgeführten Messungen dienten dazu, die Belastungen für die Umwelt und das Personal bei den jeweiligen Fügeverfahren zu ermitteln.

Im weiteren Projektverlauf sollten die Fügeverfahren hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die Umwelt bewertet werden. Zu diesem Zweck wurden Ökobilanzmodelle nach den ISO-Normen 14040 und 14044 erstellt und mit diesen die Produkt-, Stoff- oder Energieflüsse sowie die potenziellen Umweltwirkungen der unterschiedlichen Fügeverfahren zusammengestellt und beurteilt. Hierzu wurden die Messergebnisse des Zeit- und Energiebedarfs, die Ergebnisse aus der Qualitätsprüfung, Angaben der Hersteller und wissenschaftliche Literatur verwendet. Die international anerkannte Ökobilanz-Software SimaPro wurde zur Modellierung verwendet. Die Umweltbelastung wurden quantifiziert, indem die Ergebnisse des Sachbilanzmodells in der Phase der Wirkungsabschätzung zu Wirkungskategorien zusammengefasst, gewichtet und normiert wurden. Dazu waren die relevanten Wirkungsindikatoren auszuwählen. Es handelte sich hierbei um Indikatoren aus der derzeitigen Umweltdiskussion (Verknappung der stofflichen und energetischen Ressourcen, Treibhauspotential) sowie um Indikatoren, welche die direkte Einwirkung von Emissionen auf die menschliche Gesundheit beim Fügeverfahren abbilden. Am Ende der Arbeiten war das Ökobilanzmodell die Grundlage, um die ökologischen Stärken und Schwächen der einzelnen Fügeverfahren im Detail analysieren zu können.

Bei der ökonomischen Bewertung wurden die Lebenszykluskosten ermittelt. Im Gegensatz zur ökologischen Bilanzierung stehen hierbei keine genormte Vorgehensweise oder anerkannte Regeln zur Verfügung. Analog zur Vorgehensweise bei der Erstellung der Ökobilanz wurde das gleiche System betrachtet, um die Kalkulation der Kosten aus Sicht des Endverbrauchers für die einzelnen Fügeverfahren zu bestimmen. Die Kosten der Fügeverfahren hängen von dem benötigten Ressourcen- und Zeitbedarf ab. Näherungsweise wurden die Kosten für die Herstellung der benötigten Inputs (beispielsweise für Strom) – die sich aus allen anfallenden Kosten aus der Vorkette zusammensetzen – mit den auf dem Markt üblichen Einkaufs- bzw. Verkaufspreisen gleichgesetzt. Die berechneten Lebenszykluskosten der unterschiedlichen Verfahren dienten dazu, Einsparpotenziale bei den jeweiligen Fügeverfahren aufzuzeigen.

Aussagen zur Lebensdauer der Fügeverbindungen, die anhand der Qualität der hergestellten Verbindungen getroffen werden können, waren ein wesentliches Teilergebnis in Bezug auf das Projektziel. Sie wurden aus den Ergebnissen mechanischer Kurz- und Langzeituntersuchungen gewonnen.

Die wichtigsten ökologischen und ökonomischen Belastungen wurden identifizieren. Darauf aufbauend wurden Vorschläge zur Optimierung der Fügeprozesse bzw. Maschinen erarbeitet.

2 Recherche des Status quo

2.1 Darstellung der unterschiedlichen Fügeverfahren für Rohre

Die wichtigsten Schweißverfahren für Rohre aus PE und PP sind das Heizelementstumpfschweißen und das Heizwendelschweißen. Beide Schweißtechniken sind einfach zu handhaben und weisen ein hohes Maß an Verarbeitungssicherheit auf. [ECK01] zufolge wird im Hausanschlussbereich fast ausschließlich die Heizwendelschweißtechnik angewandt. Außerdem sei diese Technik für Sattelformteile, Druckanbohrarmaturen und Stutzenschellen nahezu die einzige Möglichkeit. Beide Techniken führen zu einer unlösbaren, homogenen und stoffschlüssigen Verbindung. Sie werden im den Abschnitten 2.1.1 und 2.1.2 erläutert. Rohre aus PVC können sowohl mittels HS als auch mit Klebmuffen und entsprechendem PVC-Klebstoff gefügt werden. Auf das Kleben von PVC-Rohren wird in Abschnitt 2.1.3 eingegangen. Neben den genannten Verfahren können Rohre auch mittels Heizelementmuffenschweißen gefügt werden. Aufgrund des sehr geringen Marktanteils wurde dieses Verfahren in der vorliegenden Untersuchung nicht betrachtet.

2.1.1 Heizelementstumpfschweißen (HS)

Beim HS stehen die beiden zu fügenden Halbzeuge bei der Erwärmung in direktem Kontakt mit einem Heizelement. Dieses Verfahren zeichnet sich durch ausgereifte Technologie, einfache und sichere Handhabung und geringe laufende Kosten aus. Das Haupteinsatzgebiet dieser Technik ist das Fügen von Rohrleitungsteilen, Profilen und Platten. Entsprechende Maschinen sind für nahezu alle Rohrdurchmesser und Plattengrößen bei diversen Herstellern erhältlich. Abbildung 2-1 zeigt eine schematische Darstellung einer Heizelementstumpfschweißmaschine für Rohrleitungen.

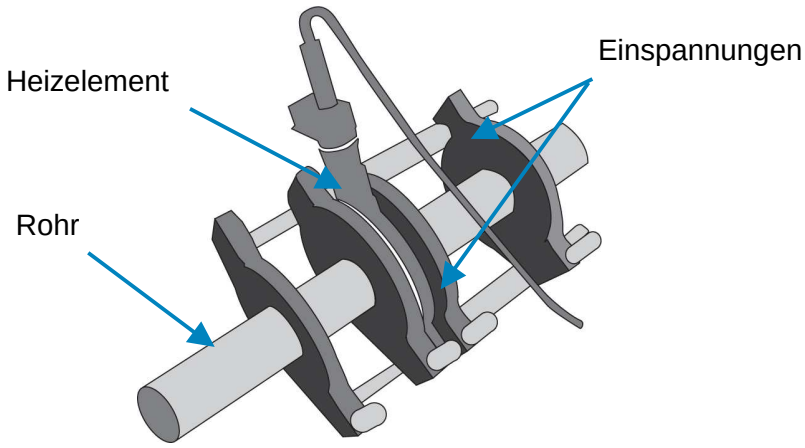


Abbildung 2-1: Schematische Darstellung einer Heizelementstumpfschweißmaschine für Rohre

Abbildung 2-2 zeigt den prinzipiellen Ablauf sowie den schematischen Druck- und Wegverlauf einer Heizelementstumpfschweißung. Beim Angleichen werden die beiden Fügepartner unter hohem Druck an das Heizelement gepresst, um mögliche Unebenheiten an den Fügeflächen abzuschmelzen. Anschließend wird der Druck reduziert und die Fügepartner auf die entsprechende Schweißtemperatur erwärmt. Nach dem Umstellen, also dem Entfernen des Heizelements, werden die zu fügenden Bauteile wiederum unter hohem Druck zusammengedrückt, wobei sich der typische Wulst bildet und eine Schweißverbindung entsteht.

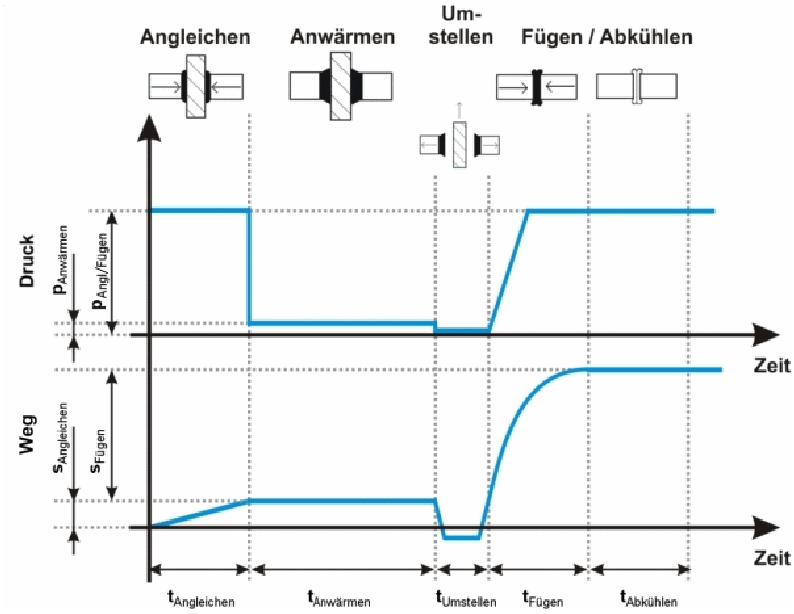


Abbildung 2-2: Schematischer Ablauf einer Heizelementstumpfschweißung mit Druck- und Wegverlauf

Mit Hilfe dieses Verfahrens können geringe Ungenauigkeiten in den Fügeflächen ausgeglichen, die Temperatur der zu fügenden Flächen genau kontrolliert und selbst komplexe Geometrien gefügt werden. Das Heizelement, welches in der Regel aus einer Aluminiumlegierung mit eingebrachten Heizpatronen und Temperaturfühlern besteht, überträgt in den Angleich-, Anwärm- und Fügeschritten die elektrisch erzeugte Wärme auf die zu fügenden Bauteile. Sie sind in verschiedenen, dem Einsatzgebiet angepassten Geometrien erhältlich und müssen für reproduzierbare Schweißungen eine möglichst gleichmäßige Temperaturverteilung an der Oberfläche aufweisen. Um ein Ankleben des Kunststoffes am Heizelement zu verhindern, wird dieses in der Regel mit PTFE beschichtet, wodurch sich eine obere Temperatureinsatzgrenze von ca. 270 ℃ ergibt .

Die Schweißvorbereitung beinhaltet beim HS folgende Punkte:

- Einlegen und Einspannen der Rohre in die Maschine
- Reinigen der zu schweißenden Rohrenden mit PE-Reiniger
- Abhobeln der Fügeflächen mittels eines speziellen Rohrhobels

2.1.2 Heizwendelschweißen (HM)

Das HM hat sich als einfaches Verbindungsverfahren für kleine bis mittlere Rohrdurchmesser bewährt. Eine Schweißung dauert hier zwischen 5 und 45 Minuten je nach Rohrdurchmesser. Die Dauer der Abkühlung ist gleich derjenigen beim HS, allerdings werden die Rohrenden bei diesem Verfahren während der Abkühlzeit von separaten Befestigungen gehalten, wodurch das Schweißgerät nach dem Ende der eigentlichen Schweißung sofort für eine weitere Schweißung zur Verfügung steht.

Spritzgegossene Muffen aus PE sind bis zu einem maximalen Durchmesser von 0,5 m kommerziell erhältlich. Bei größeren Rohren werden in der Regel Sonderanfertigungen eingesetzt.

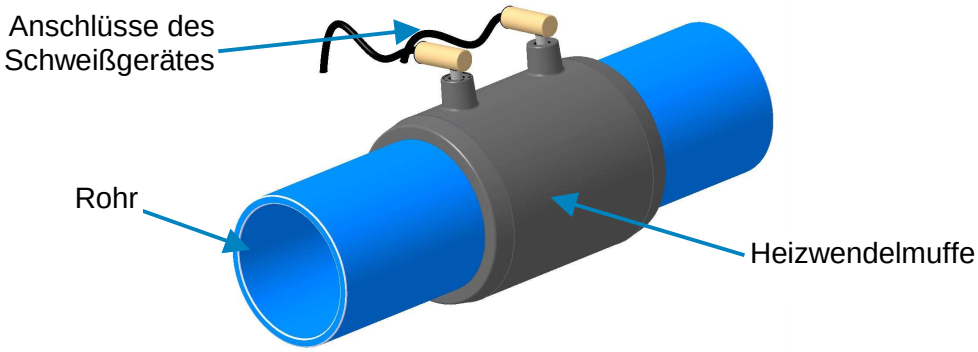


Abbildung 2-3: Schematische Darstellung einer Heizwendelschweißung an Rohrleitungen

Beim HM werden die Rohroberfläche und die Muffeninnenseite überlappend geschweißt (siehe Abbildung 2-3 und Abbildung 2-4). Dabei werden die Verbindungsflächen mit in der Muffe angeordneten Widerstandsdrähten (Heizwendeln) durch elektrischen Strom auf Schweißtemperatur erwärmt und dadurch geschweißt. Das Elektromuffen-Schweißgerät liefert für die jeweilige Elektroschweißmuffe dank einer standardisierten Kodierung die erforderliche Spannung.

Sobald der Schweißstelle die erforderliche Wärmemenge zugeführt wurde, schaltet das Gerät automatisch ab. Die Wärmeausdehnung des plastifizierten Kunststoffes erzeugt den erforderlichen Anpressdruck der Fügeflächen.

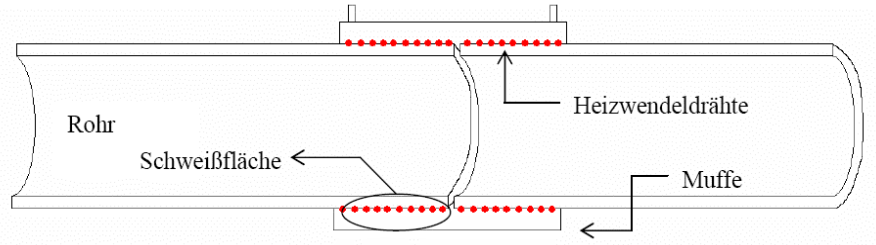


Abbildung 2-4: Schematischer Längsschnitt durch eine Rohr-Muffen-Schweißung

Zur Vorbereitung einer Heizwendelschweißung muss die oberste Schicht des Rohres im Schweißbereich mit Hilfe eines speziellen Rohrschälers abgetragen werden (siehe Abbildung 2-5, links). Hierdurch werden die oxidativ angegriffene Schicht des Rohres und etwaige Verunreinigungen entfernt, wodurch die Schweißnahtfestigkeit verbessert wird. Zusätzlich wird die Schweißzone, also die Außenbereiche der Rohrenden sowie die Innenseite der Heizwendelmuffe, mit PE-Reiniger gereinigt (siehe Abbildung 2-5, rechts). Anschließend können die Rohre zusammen mit der Muffe zur Schweißung in eine Halterung eingespannt werden.

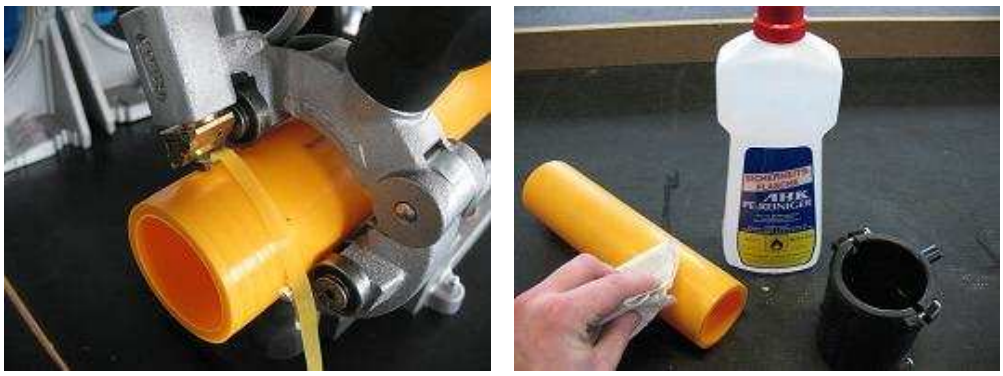


Abbildung 2-5: Schweißvorbereitung durch Schälen der Rohrenden (links) und Reinigen der Schweißflächen (rechts)

2.1.3 Kleben

Wie das Schweißen gehört auch das Kleben zu den stoffschlüssigen Fügeverfahren der Fertigungstechnik. Der Klebstoff haftet an der Fügeteiloberfläche durch physikalische (selten auch chemische) Wechselwirkungen. Dieses Phänomen der Haftung wird auch Adhäsion genannt. Anders als Schweißen gehört die Klebtechnik zu den wärmearmen Fügeverfahren. Es findet beim Kleben auch kein Diffusionsprozess zwischen Zusatzwerkstoff und Fügeteil statt. Daher weisen Klebverbindungen in der Regel geringere Festigkeiten als Schweißverbindungen auf. Diese auf den ersten Blick nachteilige Eigenschaft kann jedoch durch großflächige Klebungen kompensiert werden. Dies bedingt eine dem Kleben angepasste Konstruktion und Gestaltung der Klebestellen.

Technisch betrachtet ist das Kleben ein Fügeverfahren, welches nahezu alle Werkstoffe miteinander und untereinander verbinden kann. Dabei ist die Klebtechnik besonders schonend, da sie keiner großen Hitze bedarf, welche Verzug, Abkühlspannungen oder Gefügeveränderung der Fügeteile hervorrufen kann. Außerdem wird beim Kleben die Kraft flächig vom einen zum anderen Fügeteil übertragen.

Das Kleben wird im Rohrleitungsbau hauptsächlich bei PVC-Rohren und -Bauteilen eingesetzt, da sich diese durch ihre Polarität und prinzipielle Löslichkeit besser zum Verkleben eignen als beispielsweise PE. Abbildung 2-6 zeigt einige Klebfittings aus PVC.

Abbildung 2-6: Klebfittings aus PVC [BÄN11]

Zur Vorbereitung einer Klebung muss das zu verklebende PVC-Rohr mit einer Fase versehen werden. Hierzu sind spezielle Rohranschräggeräte am Markt erhältlich. Nach der Reinigung der Rohre kann der Klebstoff nach den Herstellerangaben auf die Rohrenden außen und die Bauteile innen aufgetragen werden. Das Rohrende wird anschließend bis zur Einstecktiefe in das Bauteil geschoben (siehe Abbildung 2-7). Überschüssiger Klebstoff muss entfernt werden. Der Klebstoff sollte nach den Herstellerangaben eine vorgegebene Zeit aushärten, bevor das Rohr bewegt oder mit Druck beaufschlagt wird [KWE11].

Abbildung 2-7: Auftragen des Klebstoffen auf Klebmuffe und Rohr [KWE11]

Je nach Verwendungszweck und Eigenschaftsprofil können Cyanacrylat-, Acrylat- und Silikonklebstoffe als Einkomponentsysteme sowie Epoxid-, Acrylat- und Polyurethanklebstoffe als 2-Komponenten-Systeme zum Fügen von Kunststoffen eingesetzt werden.

2.1.4 Anwendbarkeit der Fügeverfahren in Abhängigkeit vom Kunststofftyp

Tabelle 2-1 zeigt eine Übersicht der wichtigsten Rohrwerkstoffe und ihrer anwendbaren Fügeverfahren nach DVS im Rohrleitungsbau.

Tabelle 2-1: Übersicht der Rohrwerkstoffe und der anwendbaren Fügeverfahren

	HS	HM	HD	Kleben
PE	☑	☑	☑	☒
PP	☑	☑	☑	☒
PVC	☑	☒	☒	☑
PA12	☑	☑	☒	☒

Hierbei kann festgestellt werden, dass das HS ein universell einsetzbares Verfahren darstellt, welches mit allen wichtigen Rohrwerkstoffen durchgeführt werden kann.

Das HM wird, wie das Heizelementmuffenschweißen, hauptsächlich für PE und PP eingesetzt. Nach den DVS-Richtlinien wäre allerdings auch eine Heizwendelschweißung von PA12-Rohren möglich.

Werden PVC-Rohre nicht stumpfgeschweißt, können sie auch mittels Muffen bzw. Fittings geklebt werden. Dieses Verfahren wird bereits seit den 50er Jahren vor allem in der Gasversorgung erfolgreich eingesetzt.

2.2 Literaturrecherche

Es gibt zwei kontroverse Veröffentlichungen, [DOM01] und [ECK01], in denen die Wirtschaftlichkeit der Heizelementstumpfschweißtechnik und der Heizwendelschweißtechnik verglichen wurde. Dabei wurden Investitionskosten, Zeitbedarf, benötigtes Personal und die daraus resultierenden Kosten berücksichtigt. Im Folgenden wird auf die Ergebnisse dieser Veröffentlichungen und deren Unterschiede eingegangen. Die ursprünglichen Angaben in DM wurden zur Vergleichbarkeit mit dem offiziellen Kurs (1 € = 1,95583DM) in € umgerechnet.

2.2.1 Investitionen und Abschreibungen

Die erforderlichen Investitionen setzen sich zusammen aus den Kosten für die Schweißmaschine sowie den Abschreibungen. Während [DOM01] bei Heizelement-Stumpfschweißmaschinen von 12.526,65 € (90 bis 315 mm Durchmesser) bzw. 33.285,10 € (355 bis 630 mm Durchmesser) Anschaffungskosten ausgeht und anschließend noch 15% Rabatt abzieht, geht [ECK01] von wesentlich höheren Preisen – 20.442,98 € (90 bis 315 mm Durchmesser) bzw. 43.601,95 € (355 bis 630 mm Durchmesser) – aus, ohne einen Rabatt einzuberechnen. Außerdem geht [ECK01] davon aus, dass jeweils eine Schweißmaschine für den Durchmesserbereich von 90 bis 315 mm (20.442,98 €) wie auch für den Bereich von 355 bis 630 mm (43.601,95 €) angeschafft wird. Folglich addiert er deren Kosten (64.044,93 €), um diesen Gesamtwert später in die Berechnung der Kosten pro Schweißnaht einfließen zu lassen.

Eine HM-Maschine kann im Durchmesserbereich 20 bis 630 mm eingesetzt werden, ihr Preis liegt bei ca. 4.600 € [ECK01] [DOM01]. Für Durchmesser zwischen 63 und 315 mm beträgt der Preis somit etwa ein Viertel der Preise für entsprechende Heizelement-Stumpfschweißmaschinen, während das Preisverhältnis für Durchmesser zwischen 355 und 630 mm sogar bei 1 zu 10 liegt. Die Investitionskosten gehen in die abschließende Rechnung in Form der monatlichen Abschreibung dieser Kosten zuzüglich Verzinsung ein. [ECK01] geht von einer Abschreibungsdauer von 60 Monaten, [DOM01] hingegen von 96 Monaten aus. Gemeinsam ist beiden Quellen die Verzinsung von 7 %.

[ECK01] berechnet die monatliche Abschreibung für die Heizelementstumpfschweißmaschinen und teilt diese durch die von ihm berechnete Anzahl der Schweißungen für einen Durchmesser von 90 mm pro Monat (180). Dabei erhält er eine Abschreibung von 8,01 € pro Heizelementstumpfschweißung gemittelt über alle Durchmesser. Beim HM errechnet er einen Mittelwert von 540 Schweißungen pro Monat was in einer Abschreibung von 0,26 € pro Schweißung resultiert. [DOM01] hingegen schreibt pro Heizelementstumpfschweißung je nach Durchmesserbereich zwischen 0,62 € (d 90 mm) und 10,23 € (d 630 mm) ab und berücksichtigt hierbei die Anzahl der Schweißungen pro Monat sowie die Anschaffung der jeweiligen Schweißmaschine. Beim HM schreibt [DOM01] pro Schweißung zwischen 0,19 € (d 90 mm) und 1,47 € (d 630 mm) ab.

2.2.2 Zeitbedarf (Dauer einer Schweißung)

[DOM01] setzt für die Heizelementstumpfschweißtechnik wesentlich kürzere Schweißzeiten als [ECK01] an, da er die Handlingzeit sowie die Abkühlzeit in seinen Berechnungen ausklammert. Die Zeiten für die Heizwendelschweißtechnik entnehmen [DOM01] und [ECK01] gleichermaßen den Angaben der Hersteller, welche die Handlingzeit, jedoch nicht die Abkühlzeit berücksichtigen (Tabelle 2-2).

Tabelle 2-2: Dauer einer Schweißung für die Verfahren HS und HM

Durchmesser	HS		HM	
	[DOM01]	[ECK01]	[DOM01]	[ECK01]
d 110	16 min	31 min	10 min	10 min
d 160	22 min	35 min	15 min	15 min
d 250	33 min	53 min	19 min	19 min

2.2.3 Personalbedarf

[ECK01] vertritt die Ansicht, dass beim HS stets zwei Personen beschäftigt seien und beim HM lediglich eine. [DOM01] erwähnt die Anzahl der benötigten Personen nicht explizit, geht in seinen Berechnungen allerdings bei beiden Schweißverfahren von einer Person aus, was im Fall des HS nicht in allen Fällen den tatsächlichen Gegebenheiten entspricht. Das bedeutet, die Kosten für die Löhne der Arbeiter könnten bei [DOM01] bis um 50 % niedriger angesetzt werden.

2.2.4 Kosten für einzelne Schweißung

Durch die höheren Anschaffungskosten und die kürzere Abschreibedauer sowie die Gleichbehandlung aller Durchmesser beim HS sind bei [ECK01] kleine Durchmesserbereiche wesentlich kostenintensiver als große; die errechneten Kosten je Schweißung sind deutlich höher als bei [DOM01].

[ECK01] stellt mithilfe seiner Kalkulation fest, dass die Heizwendelschweißtechnik bis zu einem Durchmesser von 250 mm erheblich wirtschaftlicher als die Heizelementstumpfschweißtechnik ist.

[DOM01] folgert, dass die Heizelementstumpfschweißtechnik einerseits für Durchmesser ab 250 mm kostengünstiger ist und andererseits deren Kosten mit steigender Anzahl von Schweißungen unabhängig vom Durchmesser sinken, sodass beispielsweise bei einem Durchmesser von d 90 die Heizelementstumpfschweißtechnik ab ca. 800 Schweißungen kostenvorteilhaft wird (siehe Abbildung 2-8).

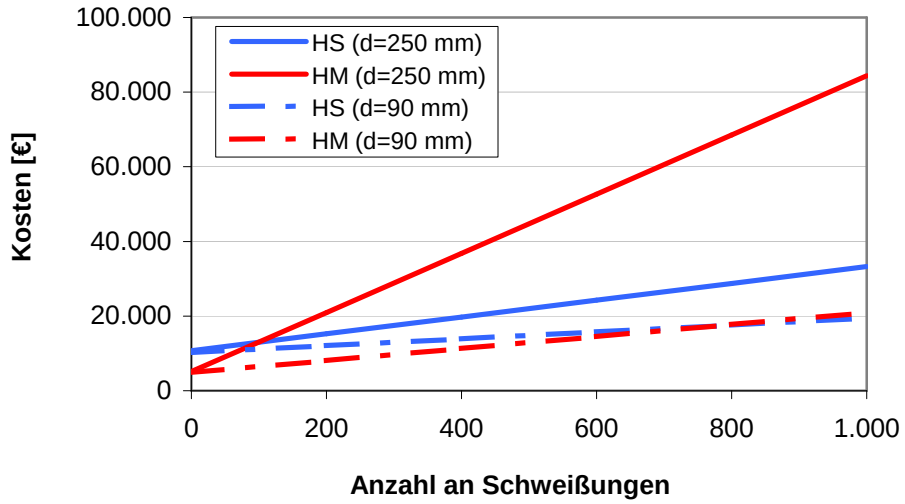


Abbildung 2-8: Graphischer Vergleich der Kosten von HS und HM (bearbeitet nach [DOM01])

Diese Kostenvorteile des HS bei einer steigenden Anzahl von Schweißungen mit dem Heizelement unabhängig vom Durchmesser, ist unter anderem darauf zurückzuführen, dass beim HM für jede Schweißung Kosten für eine Muffe anfallen.

Tabelle 2-3: Überblick über Berechnungsparameter von [DOM01] und [ECK01]

	[DOM01]	[ECK01]
Preise der Maschinen	HM: 4.606,74 € HS: 10.647,65 € (< 315mm) bzw. 28.292,34 € (< 630mm)	HM: 6.244,92 € HS: 64.044,93 €
Abschreibungszeitraum	8 Jahre	5 Jahre
Verzinsung	7%	7%
Anzahl der Personen	HM: 1 – HS: 1	HM: 1 – HS:2
Gewicht/Transportierbarkeit/ Platzbedarf	k.A.	HM: 26kg – HS: 1.085kg
Schweiß- und Abkühlzeit	HM: zw. 9 und 70 min bei 90 mm bzw. 630 mm (inkl. Handling und ohne Abkühlzeit) HS: zw. 13 und 79 min (ohne Handling und Abkühlzeit)	HM: zw. 9 und 70 min bei 90 mm bzw. 630 mm (ohne Handling und Abkühlzeit) HS: zw. 29 und 95 min (inkl. Handling- und Abkühlzeit)

Diese beiden Veröffentlichungen haben versucht die Produktpaletten der Firmen Friatec [ECK01] bzw. WIDOS [DOM01] als wirtschaftlich darzustellen und haben in ihrer Branche zu heftigen Diskussionen geführt.

Das SKZ untersucht als unabhängige Einrichtung in den folgenden Kapiteln ökonomische und ökologische Aspekte der beiden Verfahren, um entsprechend neutrale Ergebnisse, die unter gleichen Voraussetzungen ermittelt wurden, zu erhalten.

3 Ermittlung des Zeit- und Energiebedarfs sowie der Emissionen beim Fügen von Kunststoffrohren

3.1 Ermittlung des Zeitbedarfs

In diesem Kapitel wird die maximal mögliche Anzahl an Schweißungen pro Tag ermittelt. Dieser Wert soll später dazu verwendet werden, um die Verfahren HS und HM ökologisch und ökonomisch zu bewerten. Die tatsächliche Schweißdauer z. B. auf einer Baustelle kann von den hier unter idealen Bedingungen in einer Werkstatt ermittelten Werten zum Teil deutlich abweichen, da unter realen Bedingungen verschiedene Umwelteinflüsse und Unwägbarkeiten, wie z. B. die Erreichbarkeit der Schweißung im Graben, Wettereinflüsse, die längeren Wege, fehlendes Equipment, Unterbrechungen der Stromzufuhr, etc., berücksichtigt werden müssen.

Bei der Ermittlung der maximal möglichen Anzahl an Schweißungen wird ausschließlich Stangenware (Kurzrohre mit einer Länge von 6 m) betrachtet. „Ungünstigere Bedingungen“ liegen vor, wenn Ringbundware (100 m lange Rohre) im Graben verlegt und geschweißt wird. Unter diesen Bedingungen würde sich die Zeit des einzelnen Schweißvorgangs im Vergleich zur Stangenware deutlich verlängern und somit die Anzahl der möglichen Schweißungen pro Tag reduzieren. Im Folgenden beziehen sich alle Werte auf Rohre aus PE mit einem SDR von 11. Die Schweißzeiten bei Rohren aus PP und PVC unterscheiden sich beim HS und werden in Abschnitt 3.5 betrachtet.

3.1.1 Heizwendelschweißen

Bevor die erste Schweißung gestartet werden kann, müssen die Rohre, wie in Kapitel 2.1.2 beschrieben, vorbereitet werden. Während der Abkühlzeit der ersten Schweißung kann bereits mit der Vorbereitung der zweiten Schweißung begonnen werden. Während dieser Abkühlzeit dürfen die Rohre nicht bewegt werden und müssen in den Rohrhalterungen eingespannt bleiben. Somit stehen die Universalrohrhalteklemmen erst nach der Abkühlung der ersten Schweißung für weitere Fügevorgänge zur Verfügung. Nach Beendigung des zweiten Schweißvorgangs ist es nicht sofort möglich, die dritte Schweißung zu starten. Es muss daher eine bestimmte Dauer gewartet werden, bis die erste Schweißung abgekühlt ist, da erst zu diesem Zeitpunkt die Halte- und Schweißvorrichtungen entfernt und die Rohre bewegt werden dürfen. Diese Wartezeit tritt zyklisch immer wieder nach jeder zweiten Schweißung auf. Allerdings ist die erste Wartezeit um 0,5 Minuten länger als die restlichen Wartezeiten, da noch umgestellt werden muss (was bei späteren Schweißungen während der jeweiligen Abkühlzeiten möglich ist). Um diesen Ablauf einhalten zu können, muss sichergestellt werden, dass Rohrhalterungen in ausreichendem Maße (mind. zwei Stück) zur Verfügung stehen. Der zeitliche Verlauf für das HM wird in Abbildung 3-1 am Beispiel eines PE-Rohres mit dem Durchmesser 250 mm gezeigt.

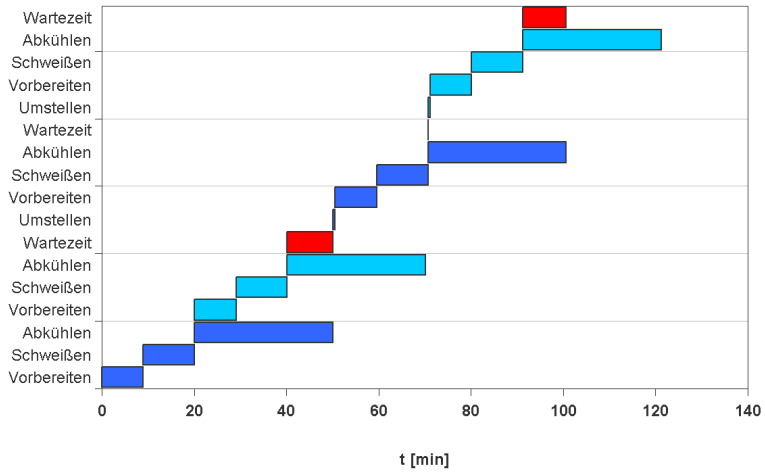


Abbildung 3-1: Einzelne Phasen einer HM-Schweißung am Beispiel eines PE-Rohres mit einem Durchmesser von 250 mm bei Verwendung von zwei Einspannungen

Dabei lässt sich folgende allgemeingültige Formel zur Berechnung der maximal möglichen Anzahl an Schweißungen a_{HM} pro Tag aufstellen.

$$a_{HM} = \frac{480 - 2t_V - 2t_S - (t_{W1} + 4)}{t_V + t_S + t_Z + \frac{1}{2}t_{W1}} + 2 \qquad (3\text{-}1)$$

Hierbei bildet der Nenner die Dauer einer durchschnittlichen Schweißung in Minuten. Im Zähler der Formel werden die ersten zwei Schweißungen abgezogen, da sich diese von den restlichen, wie oben erläutert, durch die Wartezeit unterscheiden und am Ende der Formel wieder addiert.

Die Wartezeit t_{W1} ist die Zeit, die der Arbeiter untätig warten muss. Sie entspricht der Zeitspanne, die zwischen dem Ende der Abkühlzeit t_K der aktuellen und der vorherigen Schweißung liegt. Eine solche Wartezeit tritt nach jeder zweiten Schweißung auf (siehe Abbildung 10). Die Abkühlzeit geht nicht direkt in die Formel ein, durch ihre Variation lässt sich jedoch die Wartezeit verringern, da diese direkt von der Abkühlzeit abhängig ist. Tabelle 3-1 listet die maximal mögliche Anzahl an Schweißungen von PE-Rohren unterschiedlicher Durchmesser pro Tag auf. Die angegebenen Werten gelten nur unter idealen Werkstattbedingungen und sind nicht auf reale Bedingungen, wie sie z. B. auf einer Baustelle vorherrschen, übertragbar.

Tabelle 3-1: Maximale Anzahl an Heizwendelschweißungen von PE-Rohren pro Tag bei Verwendung von zwei Einspannungen

	d 63	d 110	d 160	d 250
Anzahl der Schweißungen pro Tag	56	43	27	18

3.1.2 Heizelementstumpfschweißen

Bevor die erste Schweißung erfolgen kann, muss das Heizelement 20 Minuten lang aufgewärmt werden, um es auf eine Temperatur von ca. 220 ℃ zu bringen. Erst dann steht genug thermische Energie zur Verfügung um den Kunststoff zu plastifizieren.

Nach dem Aufwärmen erfolgt das Handling, das heißt Einspannen, Einstellen und Programmieren, Rohr reinigen sowie Zufahren, Kalibrieren, Hobeln, Versatzausgleich und Einlegen des Heizelementes. Zusätzlich müssen die Rohre angeglichen und angewärmt, das Heizelement umgestellt und der Fügedruck aufgebaut werden. Anschließend kühlt die Schweißnaht ab, während das nächste Rohr vorbereitet wird.

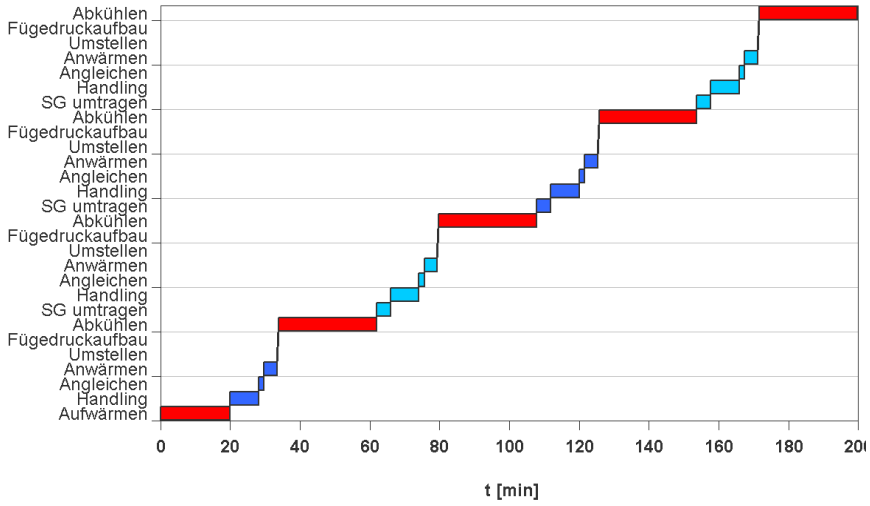


Abbildung 3-2: Einzelne Phasen von vier HS-Schweißungen am Beispiel von PE-Rohren mit einem Durchmesser von 250 mm; 1 Schweißgerät (SG)

Durch eine Verringerung der Schweißzeit ist es möglich, Kosten pro Schweißung einzusparen (Fixkosten etc.). Diese lassen sich beispielsweise dadurch verringern, dass zwei Schweißmaschinen anstelle von einer verwendet werden. Während der Abkühlzeit der ersten Schweißung kann dadurch bereits die nächste Schweißung starten. Besonders effizient wird dies bei größeren Durchmessern.

Beim Fügen von Rohren bestimmt die Wartezeit gerade bei größeren Durchmessern entscheidend die Schweißzeit. Diese beträgt bei Rohren mit einem Durchmesser von 250 mm bis zu 280 min pro Tag beim HS mit einer Maschine und bis zu 65 min bei Verwendung von zwei Maschinen (im Vergleich dazu 85 min beim HM). Der Unterschied bei den Schweißzeiten zwischen einer und zwei Maschinen liegt darin, dass bei einer Maschine beim HS während der gesamten Abkühlzeit nicht weiter gearbeitet werden kann. Wie beim HM kann jedoch auch beim HS bei Verwendung von zwei Maschinen während der Dauer der Abkühlzeit bereits eine erneute Schweißung gestartet werden. Bei zwei Schweißmaschinen fällt für Rohre mit einem Durchmesser größer als 110 mm eine Wartezeit nach jeder zweiten Schweißung an (siehe Abbildung 3-3).[1] Wartezeiten haben direkte Auswirkungen auf die berechneten Kosten pro Schweißung, nicht jedoch auf die potentiellen Umweltwirkungen (vgl. Abschnitt 3.2).

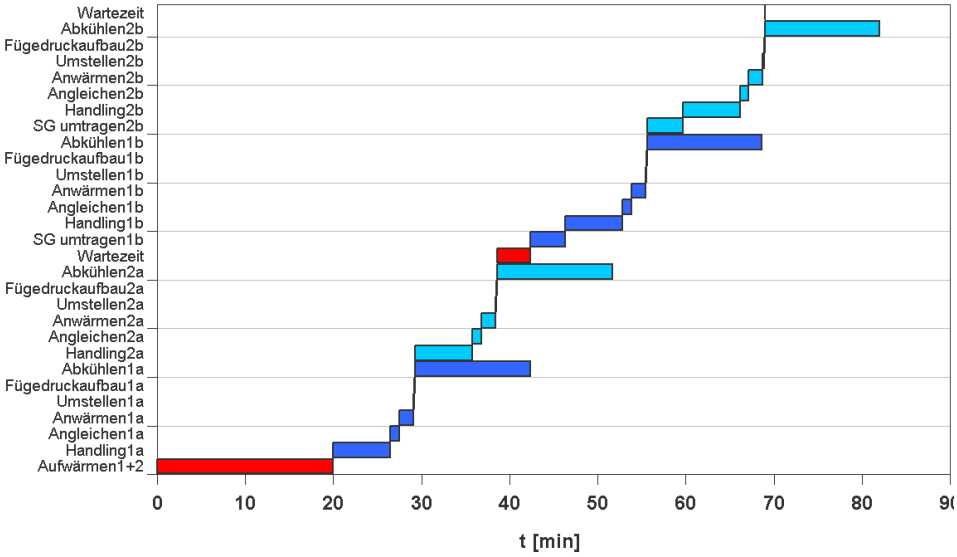


Abbildung 3-3: Einzelne Phasen von vier HS-Schweißungen am Beispiel von PE-Rohren mit einem Durchmesser von 110 mm; 2 Schweißgeräte (SG)

Tabelle 3-2 listet die maximal mögliche Anzahl an Schweißungen von PE-Rohren unterschiedlicher Durchmesser pro Tag auf. Die angegebenen Werten gelten nur unter idealen Werkstattbedingungen und sind nicht auf reale Bedingungen, wie sie z. B. auf einer Baustelle vorherrschen, übertragbar. Die Formel zur Berechnung der maximal möglichen Anzahl an Schweißungen pro Tag lautet:

$$a_{HS} = \frac{480 - t_{Auf} - t_H - t_{Ang} - t_{Anw} - t_U - t_P - R[\%] \cdot t_{W2}}{t_Z + t_H + t_{Ang} + t_{Anw} + t_U + t_P + R[\%] \cdot t_{W2}} + 1 \qquad (3\text{-}2)$$

Der Wert „480“ entspricht hierbei der Dauer eines achtstündigen Arbeitstages in Minuten.

[1] Bei PE-Rohren mit 63 mm Durchmesser tritt keine Wartezeit auf, da die Abkühlzeit immer geringer ist als die Zeit für den nächsten Fügevorgang (Handling, Angleichen, Anwärmen, Umstellen, Fügedruckaufbau und Schweißgerät (SG) umtragen). Bei Rohren mit einem Durchmesser von 110 mm tritt eine solche Wartezeit nur ein einziges Mal nach der zweiten Schweißung auf.

Tabelle 3-2: Maximale Anzahl an Heizelementstumpfschweißungen von PE-Rohren pro Tag

	d 63	d 110	d 160	d 250
1 Schweißmaschine	23	17	13	10
2 Schweißmaschinen	45	34	25	19

3.1.3 Zwischenfazit: Gegenüberstellung von HM und HS

Beim Fügen von Rohren bestimmt die Wartezeit gerade bei größeren Durchmessern entscheidend die Schweißzeiten. Diese entspricht beim HS mit einer Maschine der Abkühlzeit und beträgt bei Rohren mit einem Durchmesser von 250 mm bis zu 28 min. Diese Wartezeiten haben letztlich Auswirkungen auf die berechneten Kosten pro Schweißung (nicht aber auf die potentiellen Umweltwirkungen). Generell ist es möglich, durch Verringerung der Schweißzeit, Kosten pro Schweißung einzusparen (da die Fixkosten gleich bleiben).

Da beim HM kein Heizelement zum Einsatz kommt, entfällt hier die Aufwärmphase desselben und es kann direkt nach dem Anschließen der Kabel mit der Schweißung begonnen werden. Man benötigt beim HM lediglich eine Schweißmaschine, die während der Abkühlzeit bereits mit der nächsten Muffe verbunden wird. Allerdings muss sichergestellt sein, dass mindestens zwei Rohrhalterungen zur Verfügung stehen.

Beim HS kann durch die Verwendung von zwei Maschinen die Effizienz deutlich gesteigert werden, da hierdurch Wartezeiten deutlich verringert werden können. Der Energieverbrauch pro Schweißung wird durch die Verwendung von zwei Maschinen allerdings nicht reduziert.

Tabelle 3-3: Gegenüberstellung der Anzahl der maximal möglichen Schweißungen für PE-Rohre pro Arbeitstag (bei Verwendung einer Schweißmaschine bzw. Einspannung)

	HM	HS	Prozentuale Abweichung
d 63	56	23	59%
d 110	43	17	60%
d 160	27	13	52%
d 250	18	10	44%

3.1.4 Übertragbarkeit der Ergebnisse

In der DVS-Richtlinie 2207-11 werden Richtwerte für das HS von PP-Rohren gegeben. Diese werden herangezogen und mit den gemessenen Werten für das Handling und das Umtragen des Schweißgeräts verknüpft. Eine Auswertung der Angaben zu den Zeiten bei den einzelnen Schweißschritten zeigt, dass diese verglichen mit PE-Rohren zwischen 93 % und 210 % schwanken, wobei die Abkühlzeit am bedeutendsten ist. Hier ist für jeden Schweißvorgang mit einer Verlängerung um ca. 20 % zu rechnen (siehe Tabelle 7).

Tabelle 3-4: Veränderung der Schweißzeiten beim HS von PP-Rohren im Vergleich zu PE-Rohren

SDR 11		Prozentuale Änderung von			
d [mm]	**s [mm]**	**t_{Anw}**	**t_U**	**t_P**	**t_K**
63	5,8	270%	100%	118%	113%
110	10	221%	93%	129%	123%
160	14,6	185%	89%	147%	125%
250	22,7	162%	91%	156%	125%
	Durchschnitt	***210%***	***93%***	***138%***	***121%***

(bezogen auf Zeiten für PE)

Die Wandstärke von PP- und PE-Rohren ist für die Betrachtung gleich. Bei PVC-Rohren ist es jedoch so, dass bei gleichen Druckbedingungen die Wandstärke deutlich niedriger ist als bei vergleichbaren PP und PE-Rohren. Dies führt dazu, dass beim PVC-Rohr die Schweißdauer entsprechend der DVS-Richtlinie 2207-12 aufgrund der dünneren Wandstärke deutlich geringer ist als bei einem vergleichbaren PE- bzw. PP-Rohr. Wie auch beim PP-Rohr wird die Schweißdauer von der Abkühlzeit dominiert, welche allerdings hier mehr als halbiert ist (siehe Tabelle 8).

Tabelle 3-5: Veränderung der Schweißzeiten beim HS von PVC-Rohren im Vergleich zu PE-Rohren

SDR 34		Prozentuale Änderung von			
d [mm]	**s [mm]**	**t_{Anw}**	**t_U**	**t_P**	**t_K**
63	1,9	50%	36%	36%	50%
110	3,2	47%	29%	43%	46%
160	4,7	39%	22%	32%	40%
250	7,3	47%	18%	36%	50%
	Durchschnitt	***46%***	***26%***	***37%***	***47%***

(bezogen auf Zeiten für PE)

Beim Heizwendelschweißen von PP-Rohren der Durchmesser 63, 75, 110 und 160 mit passenden Heizwendelmuffen verschiedener Hersteller konnte festgestellt werden, dass die vom Hersteller der Muffe vorgegebenen Schweißzeiten im Gegensatz zu PE-Muffen mit steigendem Durchmesser sehr stark variieren. Während bei Schweißungen mit Durchmesser 63 mm die Schweißzeiten zwischen 110 und 165 s lagen, konnten bei Muffen mit einem Durchmesser von 160 mm Schweißzeiten von 320 s einerseits und 650 s andererseits ermittelt werden. Diese Diskrepanz begründet sich durch die geringere Erfahrung der Muffenhersteller hinsichtlich des Schweißablaufs und möglicher Optimierungen beim Heizwendelschweißen von PP aufgrund der relativ seltenen Verwendung von PP-Muffen mit Durchmessern größer als 63 mm.

Weiterhin geben die Muffenhersteller für die Schweißungen von PP-Muffen längere Abkühlzeiten vor, welche hierbei ebenfalls berücksichtigt werden müssen. Diese variieren ebenfalls stark zwischen den einzelnen Herstellern. Für Schweißungen an Rohren mit Durchmesser 63 mm muss mit einer Abkühlzeit von 15 min gerechnet werden, während man die Schweißung bei größeren Rohren mit Durchmesser 160 mm zwischen 20 und 40 min abkühlen lassen sollte. Tabelle 3-6 stellt die prozentualen Änderungen der Schweiß- und Abkühlzeiten beim Heizwendelschweißen von PP gegenüber PE dar.

Tabelle 3-6: Veränderung der Schweißzeiten beim HM von PP-Rohren im Vergleich zu PE-Rohren

SDR 11		Prozentuale Änderung von	
d [mm]	**s [mm]**	t_S	t_K
63	5,8	197%	167%
110	10	117%	149%
160	14,6	141%	150%
	Durchschnitt	***152%***	***155%***

(bezogen auf Zeiten für PE)

3.2 Messung der elektrischen Leistung

Ein Leistungsmesser oder Leistungsmessgerät ist ein Messgerät, welches die elektrische Leistung misst. Die Leistung ist die Arbeit, die ein System in einer bestimmten Zeit verrichtet:

$$P = \frac{W}{t} \qquad (4\text{-}1)$$

Die Arbeit W ist äquivalent zur Energie – in diesem Zusammenhang spricht man auch von Energie als gespeicherte Arbeit bzw. die Fähigkeit Arbeit zu verrichten.

Abbildung 3-4: 4-Kanal Leistungsmessgerät LMG450 der Firma ZES ZIMMER Electronic Systems GmbH

Zur Ermittlung der Leistung wird in diesem Projekt auf das 4-Kanal Präzessions-Leistungsmessgerät LMG450 der Firma ZES ZIMMER Electronic Systems GmbH zurückgegriffen (Abbildung 3-4). Es ist ausgelegt als universelles Messgerät für die gesamte Leistungselektronik und die Netzanalyse. Das LMG450 verfügt über eine Grundgenauigkeit von 0,1 %. Die Bandbreite beträgt DC- 20 kHz und es können direkt Ströme bis zu 16 A_{eff} und Spannungen bis 600 V_{eff} gemessen werden.

Typische Anwendungen des LMG450 sind:

- Messungen an 3-phasigen Motoren und Antrieben,
- Stromversorgungen mit mehreren Ein- und Ausgängen,
- Messung von Wirkungsgrad und Schaltgruppen von Transformatoren,
- Einfache und genaue Leistungsmessung in Schaltschränken.

Über die Leistung wird mithilfe der Zeiterfassung die Arbeit und somit der Energieverbrauch ermittelt. In den nachfolgenden Abschnitten werden die Ergebnisse der Leistungsmessung bei den Verfahren HS und HM vorgestellt.

3.2.1 Heizelementstumpfschweißen

Zur Ermittlung des Energiebedarfs beim HS werden mehrere Schweißungen durchgeführt. Hierbei wird zunächst das Heizelement einer Schweißmaschine aufgeheizt. Die hierfür nötige Zeit beträgt in der Regel 20 Minuten. Anschließend folgen die Aktionen Handling, Angleichen und Anwärmen, für die jeweils eine spezifische elektrische Leistung erbracht wird. Daraufhin wird die Maschine umgestellt, also das Heizelement entfernt und der Fügedruck wird aufgebaut. Abschließend kühlt die Schweißnaht ab. Während dieser Prozessschritte wird die Maschine auf Grundlast gefahren (Durchschnittsleistung: 515 W), ebenso wie beim anschließenden Umtragen der Schweißmaschine (vgl. Tabelle 3-7).

Tabelle 3-7: Energieverbrauch für das Aufwärmen und pro Prozessschritt (Durchschnitt über alle betrachteten Schweißmaschinen)

Prozessschritt	t [min]	P [W]	E [kWh]
Aufwärmen	20	1340	0,447
Handling	6,5	515	0,056
Angleichen	1	632	0,011
Anwärmen	1,58	672	0,018
Umstellen	0,12	515	0,001
Fügedruckaufbau	0,12	515	0,001
Abkühlen	13	515	0,111
SG umtragen	4	515	0,034

Unter optimalen Bedingungen können mit einer Heizelementstumpfschweißmaschine an einem Tag 17 PE-Rohre mit einem Durchmesser von 110 mm geschweißt werden (siehe Tabelle 3-1). Der Energiebedarf beträgt dann ca. 4,14 kWh. Man kann jedoch auch mit zwei Schweißmaschinen parallel arbeiten. Dadurch ist es möglich, doppelt so viele Rohre zu schweißen, wobei der Energieverbrauch am Tag etwa doppelt so hoch ist. Der Energieverbrauch pro Schweißung ist bei einer Maschine somit genauso hoch wie bei zwei Maschinen. In Abbildung 3-5 ist links der Energieverbrauch je Schweißung eines Rohres mit einem Durchmesser von 250 mm bei der Verwendung einer Heizelementstumpfschweißmaschine und rechts bei Verwendung von zwei Maschinen für denselben Rohrdurchmesser zu sehen.

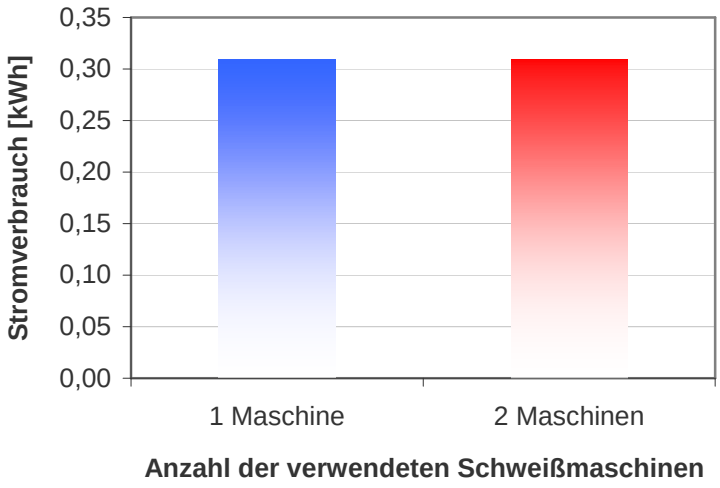


Abbildung 3-5: Vergleich Energieverbrauch je Schweißung beim HS-Schweißen eines PE-Rohres mit einem Durchmesser von 250 mm

3.2.2 Untersuchung der Unterschiede im Energieverbrauch zwischen verschiedenen Heizelementstumpfschweißmaschinen

Es wird untersucht, ob der unterschiedliche Aufbau der Schweißmaschinen für unterschiedliche Energieverbräuche beim Schweißen verantwortlich sind. Hierzu wird die Leistungsaufnahme von unterschiedlichen Schweißmaschinen gemessen. Ein Ergebnis ist, dass der Energiebedarf einer CNC-Steuerung im Bereich der Messungenauigkeiten liegt und somit vernachlässigbar ist. Ein weiteres Ergebnis ist, dass eine Umhüllung des Heizelements nur zu geringen Energieeinsparungen führt und somit aus ökologischen Gründen nicht

notwendig ist (siehe Abbildung 3-6). Folglich resultiert nahezu der gesamte Energiebedarf aus der Aufheizung und der Konstanthaltung der Temperatur des Heizelements. In den weiteren Untersuchungen wird der Schwerpunkt darauf gelegt, herauszufinden, welchen Einfluss die Ausgestaltung des Heizelements (Dicke, Durchmesser, Volumen) auf den Energieverbrauch hat. Die gemessenen Energieverbräuche zum Schweißen von Rohren mit einem Durchmesser von 110 mm mit unterschiedlichen Heizelementstumpfschweißmaschinen (siehe Tabelle 3-8) werden dazu mit Hilfe der statistischen Regressionsanalyse ausgewertet.

Tabelle 3-8: Verwendete Heizelementstumpfschweißmaschinen zur Untersuchung des Einflusses der Geometrie der Heizelemente auf den Energiebedarf

Hersteller	Typ	d [mm]	Heizelement			
			Typ	P [W]	Farbe	D_{HE} [mm]
WIDOS	H4600	63 - 250	H4600E	1500	grün	290
	H4600 CNC	63 - 250	H4600E	1500	grün	290
	Miniplast	63-110	HMINIE	600	grün	150
	2500/160	50 - 160	H0900E	800	grün	190
GF	GF250	75 - 250	GF250	1500	grau	290
	SG315	90 - 315	--	1700	grau	~350
Rothenberger	P250B	90 - 250	HEP250B	1500	schwarz	300
	P250B CNC S4	90 - 250	HEP250B	1500	schwarz	300
KWH	PT250	63 - 250	HMirrorPT250	2300	grün	290

Um die Abhängigkeiten der Geometrien der Heizelemente vom Energiebedarf darzustellen, wird eine Regressionsanalyse durchgeführt. Diese dient dazu, Beziehungen zwischen einer abhängigen (Strombedarf) und einer oder mehreren unabhängigen Variablen (Dicke, Durchmesser oder Volumen des Heizelements) festzustellen. Die Stärke der Korrelation wird mit Hilfe des multiplen Bestimmtheitsmaßes R^2 ausgedrückt, welches in folgenden Auftragungen mit einer Trendkurve angezeigt wird. Der dabei berechnete Wert liegt zwischen 0 (es existiert kein Zusammenhang) und 1 (sehr guter Zusammenhang). Generell gilt somit, je näher der Wert des Bestimmtheitsmaßes bei 1 liegt, desto größer ist die Güte der Regression. Diese Methode ist sowohl bei linearen als auch bei nichtlinearen Regressionsmodellen anwendbar [KES06, MEI08].

Die Wurzel aus dem Bestimmtheitsmaß R^2 ist der Korrelationskoeffizient R (nach Pearson). Dieser gibt die Stärke des Zusammenhangs zwischen Variablen an.

In Abbildung 3-6 wird der Energieverbrauch in Abhängigkeit von der Dicke des Heizelements dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Korrelation relativ gering ist. Das bedeutet, eine Reduktion der Heizelementdicke ist nur mit geringen Einsparungen beim Energieverbrauch verbunden.

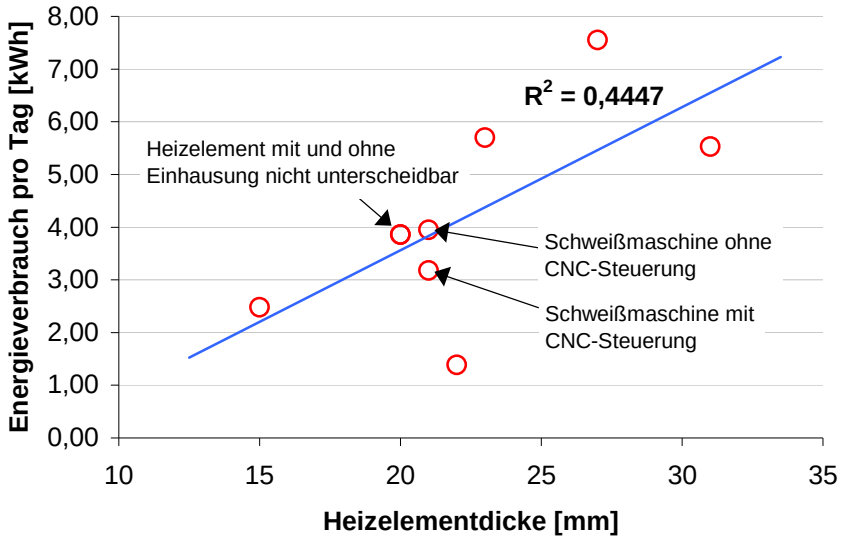


Abbildung 3-6: Energieverbrauch in Abhängigkeit von der Heizelementdicke (Rohrdurchmesser 110 mm)

Der Energieverbrauch korreliert stärker mit dem Durchmesser als mit der Dicke des Heizelements (Abbildung 3-7).

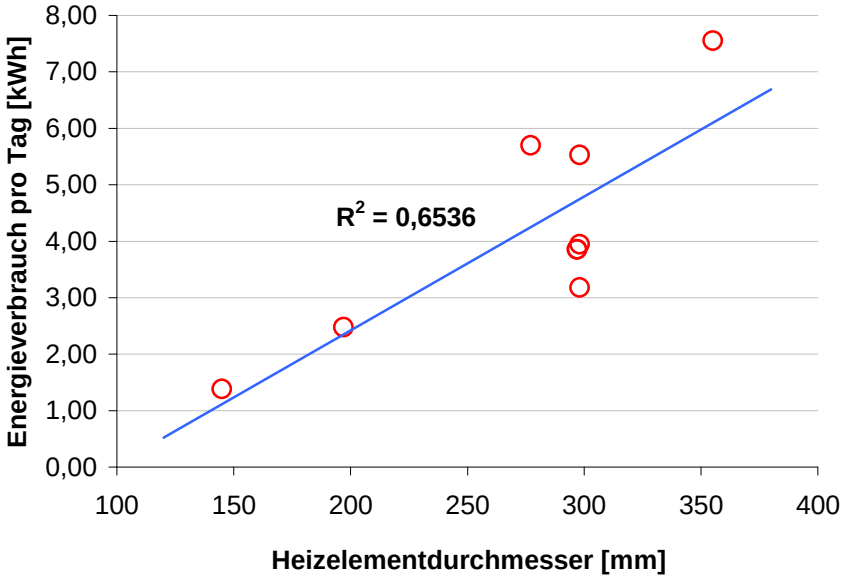


Abbildung 3-7: Energieverbrauch in Abhängigkeit vom Heizelementdurchmesser (Rohrdurchmesser 110 mm)

Die stärkste Korrelation ist zu beobachten, wenn Dicke und Durchmesser bei der Betrachtung des Volumens gemeinsam betrachtet werden (siehe Abbildung 3-8).

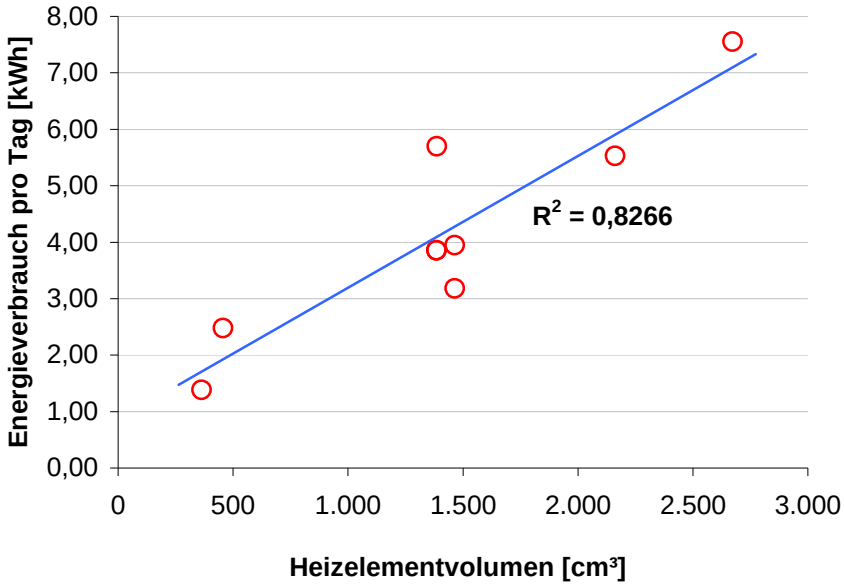


Abbildung 3-8: Energieverbrauch in Abhängigkeit vom Volumen des Heizelements (Rohrdurchmesser 110 mm)

Der Energieverbrauch korreliert, wie zu erwarten war, positiv mit der Heizelementdicke, dem Durchmesser und dem Volumen des Heizelements (siehe Tabelle 3-9).

Tabelle 3-9: Korrelation Energiebedarf mit Dicke, Durchmesser und Volumen des Heizelements

	Dicke	Durchmesser	Volumen
Bestimmtheitsmaß R^2	0,445	0,654	0,827
Korrelationskoeffizient R	0,67	0,81	0,91
Interpretation nach [BRO99]	Gute Korrelation	Starke Korrelation	Sehr starke Korrelation

Die Erklärung hierfür ist, das die Reduktion des Durchmessers direkt proportional zur Fläche und somit zu 2 Dimensionen ist. Dies hat einen größeren Einfluss auf die Energieeinsparung als eine Reduktion der Dicke (1-dimensional).

Eine Einhausung des Heizelements zur Verminderung des Wärmeverlustes bringt keine Vorteile hinsichtlich des Energieverbrauchs. Wie in Abbildung 3-9 zu erkennen ist, zeigt das eingehauste Heizelement zwar geringfügige Unterschiede im Energieverbrauch verglichen mit einem identischen Heizelement ohne Einhausung, im Schnitt stellt sich jedoch ein vergleichbarer Energieverbrauch ein. Die Einhausung dient in diesem Fall vornehmlich als Schutz vor Verletzungen und nicht als Maßnahme zur Energieeinsparung.

Es bestünde die Möglichkeit, das Heizelement in der Leerlaufphase in einen z.B. mit Steinwolle isolierten Köcher zu geben, um den Wärmeverlust an die Umgebung zu minimieren. Hierfür müsste die Leistungsregelung des Heizelements angepasst werden, um eine gleichmäßige Temperaturführung zu gewährleisten.

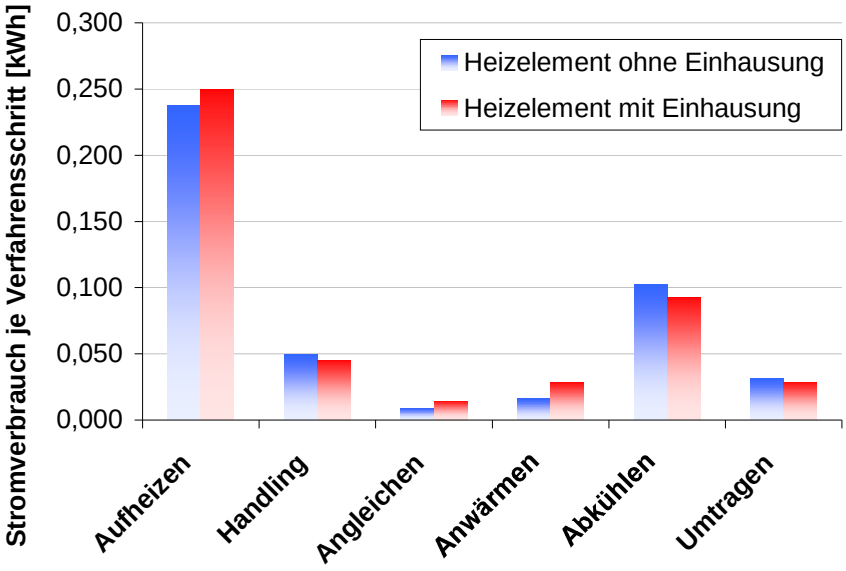


Abbildung 3-9: Vergleich der Energieverbräuche je Verfahrensschritt eines Heizelements mit Einhausung und ohne Einhausung beim Schweißen von PE-Rohren mit d 110

Die größten Energieeinsparungen können somit bei der Reduktion des Volumens des Heizelementes über die Reduktion der Fläche erfolgen (z. B. durch eine Öffnung in der Mitte des Heizelements). Andere Möglichkeiten zur Energieeinsparung bestehen in der Änderung des Materials der Heizelementbeschichtung oder in einer konstruktiven Weiterentwicklung des Heizelements hin zur Infrarottechnik mit Mess-Sensoren.

3.2.3 Heizwendelschweißen

Der Energiebedarf beim Schweißen von PE-Muffen verschiedener Hersteller und unterschiedlicher Größen wird experimentell ermittelt. Abbildung 3-10 zeigt den Zusammenhang zwischen Muffendurchmesser und der eingebrachten Energie, der anhand von 50 Messwerten ermittelt wurde. Die Spanne der Werte je Durchmesser wird durch Minimal- und Maximalwerte angezeigt, das arithmetische Mittel wird in der Abbildung durch ein (x) angezeigt.

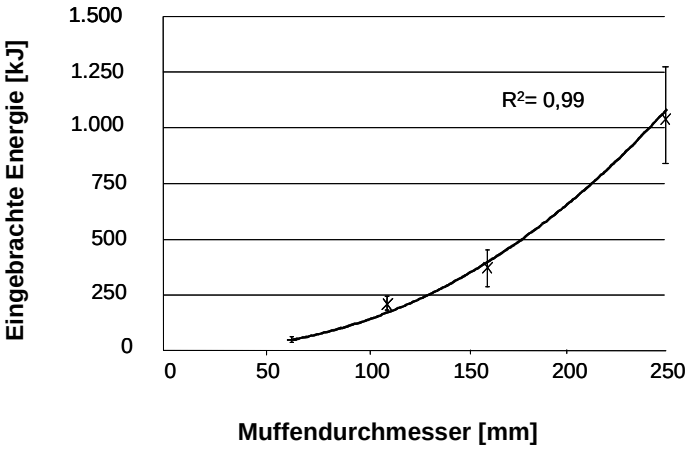


Abbildung 3-10:Abhängigkeit des Energiebedarfs vom PE-Muffendurchmesser (50 Messwerte, verschiedene Muffenhersteller)

Es ist zu erkennen, dass der Energieeintrag beim Schweißen von PE-Heizwendelmuffen im Durchmesserbereich von 63 bis 250 mm deutlich ansteigt. Beim Vergleich der Minima- und Maximawerte je nach Durchmesser fällt auf, dass bis zu 40 % Energieeinsparung möglich sind. Der unterschiedliche Energiebedarf hängt von den parameterabhängigen

Herstellerangaben und den physikalischen Eigenschaften der Muffe (z. B. Material des Heizdrahtes) ab.

Anders als beim Heizelementstumpfschweißen, bei dem zwischen unterschiedlichen Rohrmaterialen keine nennenswerten Unterschiede im Energieverbrauch festgestellt werden konnten, zeigen PP-Heizwendelmuffen im Vergleich zu PE-Heizwendelmuffen einen deutlich unterschiedlichen Energiebedarf. Dieser steigt im Durchmesserbereich zwischen 63 und 110 mm ebenfalls potentiell, jedoch mit geringerer Steigung an. Die eingebrachte Energie für PP liegt mit durchschnittlich 43 kJ für den Durchmesser 63 mm im Bereich des PE. Bei Schweißungen mit einem Durchmesser von 110 mm wird allerdings bei PP-Heizwendelmuffen trotz der deutlich längeren Schweißzeit etwa 27 % weniger Energie verbraucht als bei den entsprechenden PE-Bauteilen. Gründe hierfür sind unterschiedliche thermische Eigenschaften des Materials (z.B. Wärmeleitfähigkeit bzw. Wärmekapazität) und der verwendeten Heizwendeln.

3.2.4 Vergleich des Energiebedarfs beim HS gegenüber HM

Der Durchschnitt der gemessenen Energieverbräuche beim Schweißen von PE-Rohren wird gebildet und in Tabelle 7 für HM, HS sowie den Durchmessern d 110 und d 250 dargestellt. Beim HS beinhaltet der über verschiedene Maschinen gemittelte Durchschnittswert anteilig den Energiebedarf für das Aufheizen des Heizelements. Der Unterschied beim HS um ca. 50 % ergibt sich zum einen daher, dass pro Zeiteinheit mehr Schweißungen bei d 110 durchgeführt werden können als bei d 250 (aufgrund der unterschiedlichen Abkühlzeiten), zum anderen werden überwiegend Heizelemente mit kleineren Durchmessern verwendet. Beim HM wird der angegebene Wert gebildet aus Messwerten verschiedener Muffen-Hersteller.

Tabelle 3-10: Verbrauch elektrischer Strom pro Schweißung (PE-Rohre)

HS (Durchschnittswerte versch. Hersteller)		HM (Durchschnittswerte versch. Muffenhersteller)	
d 110	d 250	d 110	d 250
876 kJ	1.113 kJ	209 kJ	498 kJ

Beim HS von PE-Rohren mit d 250 mm ist der direkte Stromverbrauch pro Schweißung um ca. 50 % höher als beim HM, bei kleineren Durchmessern wird dieser relative Verbrauch sogar noch größer (für d 110 liegt er bei HS ca. 300 % höher als bei HM) (Tabelle 12). Dies suggeriert auf den ersten Blick einen ökologischen Vorteil für das HM. Bei der Bewertung der Umweltwirkungen der alternativen Schweißverfahren wird jedoch der Lebenszyklus berücksichtigt, d.h. neben dem Stromverbrauch gehen weitere Produkte bzw. Prozesse in die Bewertung ein (Herstellung der Schweißmaschinen, Lebensdauer der Schweißmaschinen, Herstellung der Muffe) (siehe Kapitel 4).

3.3 Messung der Emissionen

Die potentiell entstehenden Emissionen wurden sowohl beim Heizelementstumpfschweißen als auch beim Heizwendelschweißen mittels Konstantflusspumpe über ein Aktivkohlesammelröhrchen (SKC, Anasorb 747) mit einem Volumenstrom von 1 l / min und einer Laufzeit von 1 h aufgefangen. Die Aktivkohle wurde danach in ein Vial überführt und mit 1 ml Benzylalkohol versetzt, um die Emissionen wieder von der Kohle freizusetzen. Benzylakohol desorbiert leicht- bis mittelflüchtige Substanzen. Die sich im Gasraum befindlichen Emissionen wurden zur Analyse in ein GC/MS überführt und die erhaltenen Chromatogramme ausgewertet.

3.3.1 Heizwendelschweißen

Beim Heizwendeschweißen gibt es ein erhöhtes Risiko, dass schädliche Emissionen aufgrund einer Überhitzung der Elektroschweißmuffen freigesetzt werden. Dieses „worst-case“-Szenario wurde simuliert, indem eine Elektroschweißmuffe (Durchmesser 200 mm) aus PE ohne zu

verbindende Rohre bei erhöhter elektrischer Spannung betrieben wurde bis es über eine Rauchentwicklung schließlich zur Flammenbildung kam (siehe Abbildung 3-11).

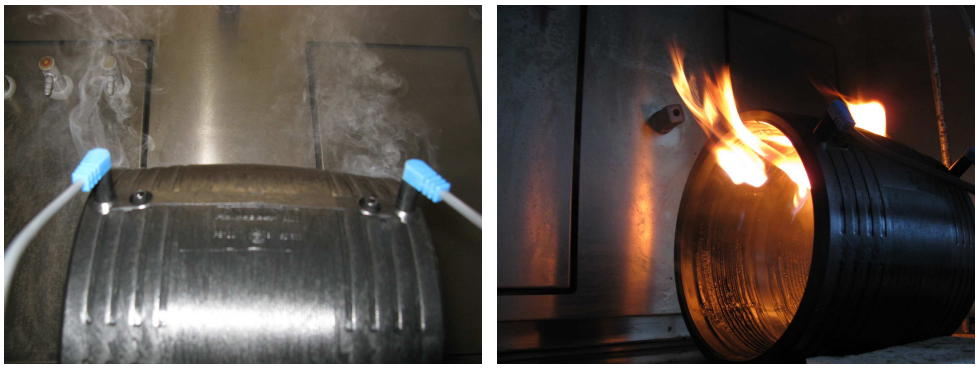


Abbildung 3-11: Rauchentwicklung und Brand in einer Muffe durch unsachgemäße Verwendung

Abgesehen von Kohlenmonoxid, welches durch die unvollständige Verbrennung entstand, konnten bei diesem Versuchsaufbau jedoch keine Emissionen mit der GC/MS identifiziert werden. Es wird vermutet, dass die auftretenden Emissionen langkettig, wachsartig sowie schwer flüchtig sind und zum größten Teil an den Rußpartikeln, die bei der Verbrennung entstanden sind, haften und gebunden sind und deshalb nicht erfasst werden können.

Um alle entstehenden Emission sammeln und detektieren zu können, müssten neue Methoden entwickelt und entsprechende Versuche durchgeführt werden. Diese könnten beispielsweise durch direktes erhitzen beziehungsweise pyrolysieren der Probe im Vial verwirklicht werden.

Um das Probenvial kontrolliert auf der Heizplatte erhitzen zu können, bedarf es einer Vorrichtung die ggf. in einem Nachfolgeprojekt konzipiert werden könnte.

3.3.2 Heizelementstumpfschweißen

Zur Messung der Emissionen beim Heizelementstumpfschweißen von PE-Rohren wurden in der Abteilung „Aus- und Weiterbildung“ des SKZ während eines Schweißlehrgangs an zwei Tagen Luftproben mit Aktivkohleröhrchen genommen. Hierbei waren im Labor bis zu zehn Heizelementstumpfschweißmaschinen gleichzeitig im Einsatz. Die Analytik erfolgte wie unter Abschnitt 3.6 beschrieben. Bei einer Probenahmedauer von 6 h und einer Durchflussrate von 1 l / min konnten keine Emissionen nachgewiesen werden. Analog zum Heizwendelschweißen wird vermutet, dass die Emissionen langkettige Moleküle sind und damit schwerer flüchtig und somit nicht auf den Aktivkohleröhrchen adsorbiert werden können und so in der GC/MS nicht detektierbar sind.

Wie in 3.6.1 beschrieben, bedarf es auch hier an weiterer Untersuchungen mit neuen Versuchsaufbauten, um das Gefährdungspotential abschließend beurteilen zu können.

3.3.3 Kleben

Bei der GC/MS-Analyse von PVC-Klebstoff konnten die flüchtigen Lösungsmittelbestandteile Tetrahydrofuran (sowie ein Spaltprodukt) und Cyclohexanon nachgewiesen werden (siehe Abbildung 3-12).

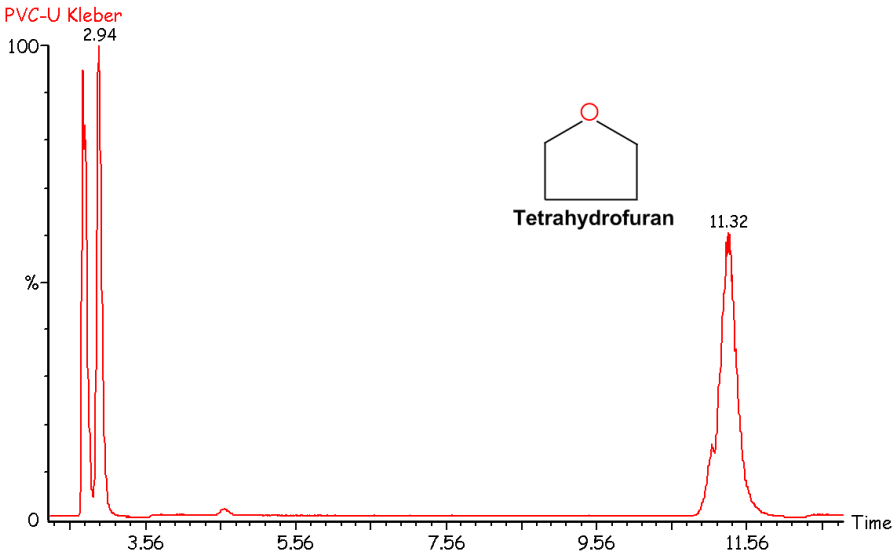


Abbildung 3-12: Chromatogramm der GC/MS-Analyse von PVC-Klebstoff

Diese Stoffe sind gesundheitsgefährdend bzw. reizend sowie leicht entzündlich. Die MAK-Werte liegen bei 150 mg/m^3 für Tetrahydrofuran bzw. 80 mg/m^3 für Cyclohexanon. Beim Kleben muss sichergestellt werden, dass die MAK-Werte eingehalten werden. Da die Konzentration vom Arbeitsplatzaufbau und der Probennahme abhängt, sind umfangreiche Versuche unter realen Bedingungen (z.B. in der Produktion oder am Einsatzort) erforderlich, um das Gefährdungspotential abschließend beurteilen zu können

4 Ökologische Bewertung der Fügeverfahren

Zur ökologischen Bewertung der Fügeverfahren wird ein Ökobilanzmodell nach den DIN EN ISO-Normen 14040 und 14044 mit der international anerkannten Ökobilanz-Software *SimaPro* erstellt. Mit dem Modell sollen die ökologischen Stärken und Schwächen der Fügeverfahren analysiert werden. Hierzu werden die Ergebnisse der technischen Untersuchungen und die in der Software SimaPro hinterlegten Datensätze verwendet. Hinzu kommen Angaben der Hersteller, ergänzt durch wissenschaftliche Literatur und Statistiken. Das Modell bildet die Grundlage zur detaillierten Analyse der einzelnen Prozessschritte der Verfahren sowie deren wechselseitigen Abhängigkeiten.

Die Produkt-, Stoff- oder Energieflüsse der unterschiedlichen Verfahren werden in der Sachbilanz zusammengestellt. Danach werden diese in der Wirkungsabschätzung hinsichtlich ihrer potentiellen Umweltwirkungen mit Hilfe der Methode der ökologischen Knappheit nach [FRI06] bewertet. Diese Methode ist ein eindimensionales Bewertungsinstrument zur Wirkungsabschätzung in Ökobilanzen, das einen direkten umweltbezogenen Vergleich anhand einer einzigen Kennzahl (sogenannte Umweltbelastungspunkte UBP) ermöglicht. Hierbei wird die aktuelle Belastung der Umwelt (Ist-Menge) mit der gesellschaftspolitisch als zulässig angesehenen Belastung (Toleranzmenge) verglichen. Das Verhältnis von Ist-Menge zu Toleranzmenge wird als ökologische Knappheit bezeichnet. Beim „Distance to Target“-Prinzip liegt die Annahme zugrunde, dass eine Wechselbeziehung zwischen der Bedeutung eines Umwelteffektes und dem Abstand zwischen dem gegenwärtigen Niveau und dem Zielniveau besteht. Weitere Informationen zur Berechnung der Umweltbelastungspunkte finden sich im Anhang 11.3.

4.1 Beschreibung des zu untersuchenden Systems

Für Kunststoffrohre aus dem gleichen Material und mit definiertem Durchmesser stehen unterschiedliche Fügeverfahren zur Wahl. Ebenso ist es möglich, das gleiche Verfahren bei Rohren aus unterschiedlichen Materialien einzusetzen.

In dieser Arbeit werden die Umweltwirkungen der Fügeverfahren bewertet, daher wird dieser entsprechende Abschnitt des Lebenszyklusses eines Rohres betrachtet. Herstellung und Entsorgung der Rohre liegen somit außerhalb des zu betrachtenden Systems. Die betrachteten Systeme für die verschiedenen Fügeverfahren sind in Abbildung 4-1 bis Abbildung 4-3 dargestellt.

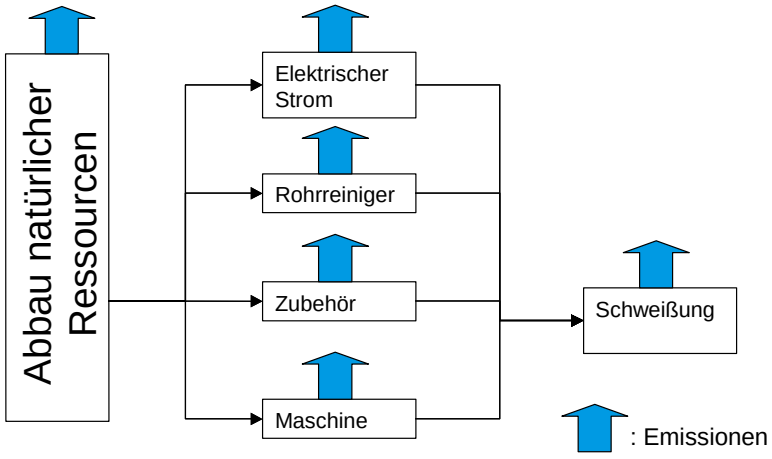


Abbildung 4-1: System Heizelementstumpfschweißen

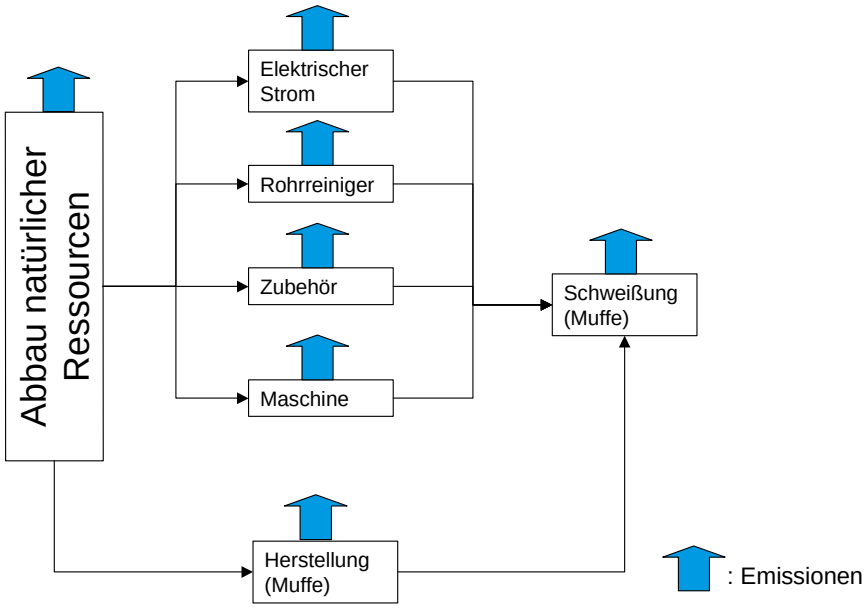


Abbildung 4-2: System Heizwendelschweißen

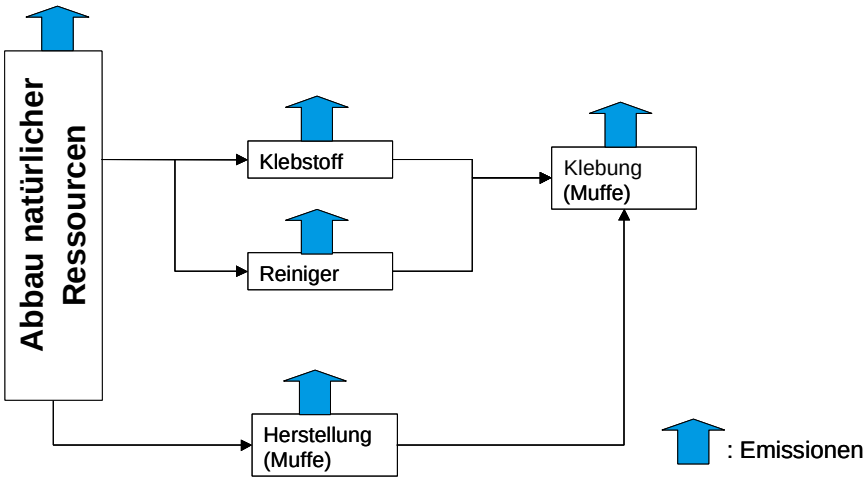


Abbildung 4-3: System Kleben

4.2 Erstellung der Sachbilanz

Für die Sachbilanz werden – soweit relevant – bei allen Schweißverfahren folgende Aspekte berücksichtigt:

- Herstellung der Schweißmaschine sowie des Zubehörs (über deren Gewicht, siehe Tabelle A im Anhang) unter Berücksichtigung der Lebensdauer der Schweißmaschine
- Herstellung der Muffe
- Energieverbrauch während des Fügens
- Emissionen während des Fügens

Die Material- und Energieinputs der betrachteten Fügeverfahren und die verwendeten Datensätze sind in Tabelle 4-1 bis Tabelle 4-3 zusammengefasst. Zur Messung der Emissionen beim Fügen siehe Abschnitt 3.3.

Tabelle 4-1: Daten zur Modellierung des Heizelementstumpfschweißverfahrens

Material	Menge d 110	Menge d 250	Verwendeter Datensatz in SimaPro
Schweißmaschine und Hobel	97 kg	97 kg	Building machine/RER/I U
Zubehör	30 kg	30 kg	Chromium steel 18/8, at plant/RER S
CNC Steuerung	40 kg	40 kg	Desktop computer, without screen, at plant/GLO U
Spanneinsätze / Einstellkasten	21 kg	21 kg	Steel, electric, un- and low-alloyed, at plant/RER S
Transportkiste	21 kg	21 kg	Wood board ETH S
Heizelementbeschichtung	0,35 g	0,35 g	Tetrafluoroethylene film, on glass/RER S
Strom	753 kJ	1542 kJ	Electricity, low voltage, at grid/DE S

Tabelle 4-2: Daten zur Modellierung des Heizwendelschweißverfahrens

Material	Menge d 110	Menge d 250	Verwendeter Datensatz in SimaPro
Schweißmaschine	15 kg	15 kg	Desktop computer, without screen, at plant/GLO S
Muffe			
Kupfer	0,03 kg	0,22 kg	Copper, at regional storage/RER S
Kupferdraht ziehen	0,03 kg	0,22 kg	Wire drawing, copper/kg/RER
PE-HD	0,655 kg	5,5 kg	Polyethylene, HDPE, granulate, at plant/RER U
Spritzgießen	0,655 kg	5,5 kg	Injection moulding/kg/RER
Transport Muffe	0,685 kg	5,72 kg	Transport, lorry 16-32t, EURO4/RER U
Zubehör (Schälgerät, Rundungsschellen)	5 kg	8 kg	Chromium steel 18/8, at plant/RER S
Rohrreiniger	5,03 g	7,5 g	Ethanol from ethylene, at plant/RER S
Strom	209 kJ	1050 kJ	Electricity, low voltage, at grid/DE S

Tabelle 4-3: Daten zur Modellierung des Klebens

Material	Menge d 110	Menge d 250	Verwendeter Datensatz in SimaPro
Klebstoff	0,08 kg	0,38 kg	
Tetrahydrofuran 1/3			Tetrahydrofuran, at plant RER
Butanon 1/3			Methyl ethyl ketone, at plant RER
Cyclohexanon 1/3			Cyclohexanone, at plant RER
Reiniger	0,017 kg	0,065 kg	
Aceton			Acetone, liquid, at plant/ RER
Methylethylketon			Methyl ethyl ketone, at plant RER
Muffe			
Polyvinylchlorid	0,72 kg	4,00 kg	Polyvinylchloride, at regional storage RER U
Spritzgießen	0,72 kg	4,00 kg	Injection moulding/kg/RER

4.3 Ergebnisse der Umweltbewertung

Im Rahmen des Projekts wurde ein MS Excel®-basiertes Tool entwickelt, mit dem die Ökobilanz des Fügenprozesses unter den spezifischen Randbedingungen eines Unternehmens (Kunststoff, Rohrdurchmesser, verwendete Schweißmaschine, Energieverbrauch etc.) erstellt werden kann. Die Risiken durch Emissionen beim Fügen konnten im Projekt nicht abschließend beurteilt werden und sind deshalb hier noch nicht berücksichtigt (siehe 3.3). Im folgenden werden die Ergebnisse der Ökobilanz exemplarisch für das Fügen von Rohren mit einem Durchmesser von 110 mm diskutiert.

Abbildung 4-4 zeigt die Umweltwirkungen in Umweltbelastungspunkten nach der Methode der ökologischen Knappheit für das Heizelementstumpfschweißen von PE-Rohren mit einem Durchmesser von 110 mm. Dieses Ergebnis ist auf die im Projekt untersuchten Rohre weitgehend unabhängig vom gewählten Material und Rohrdurchmesser übertragbar. Die Höhe der Umweltwirkungen wird durch die Dicke der Pfeile repräsentiert. Die größten Umweltwirkungen werden durch den Stromverbrauch und die Herstellung der Heizelementstumpfschweißmaschine verursacht.

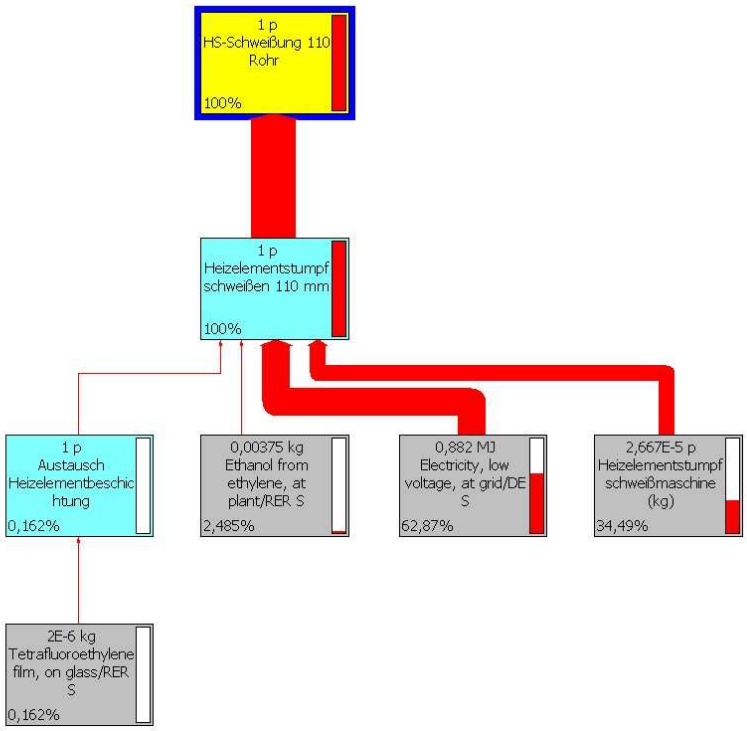


Abbildung 4-4: Umweltwirkungen (Methode der ökologischen Knappheit) beim Heizelementstumpfschweißen von Rohren mit Durchmesser 110 mm

Abbildung 4-5 zeigt die Umweltwirkungen in Umweltbelastungspunkten nach der Methode der ökologischen Knappheit für das Heizwendelschweißen von PE-Rohren mit einem Durchmesser von 110 mm. Beim Heizwendelschweißen verursacht die Herstellung der Muffe die größten Umweltbelastungen. Die absolute Höhe der Umweltbelastungspunkte unterscheidet sich je nach Material und vor allem Rohrdurchmesser. Je größer der Durchmesser, um so größer ist die Muffe und der Materialbedarf zu deren Herstellung und somit auch die Umweltbelastung pro Schweißung.

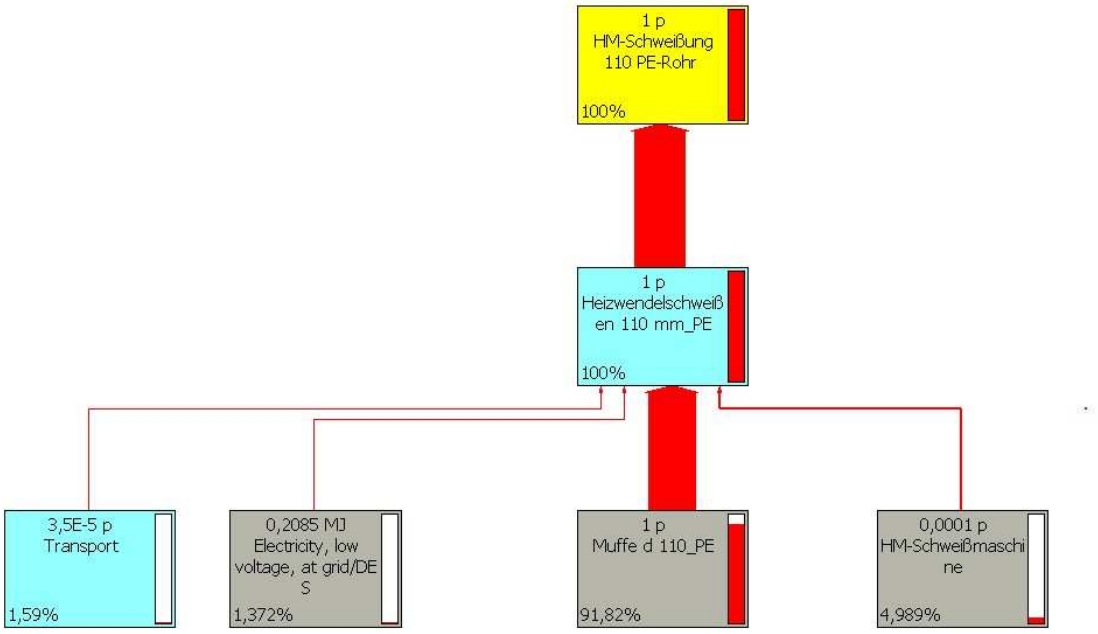


Abbildung 4-5: Umweltwirkungen (Methode der ökologischen Knappheit) beim Heizwendelschweißen von PE-Rohren mit Durchmesser 110 mm

Abbildung 4-6 zeigt die Umweltwirkungen in Umweltbelastungspunkten nach der Methode der ökologischen Knappheit für das Kleben von PVC-Rohren mit einem Durchmesser von 110 mm. Auch beim Kleben hat die Muffe den größten Anteil an den Umweltbelastungen.

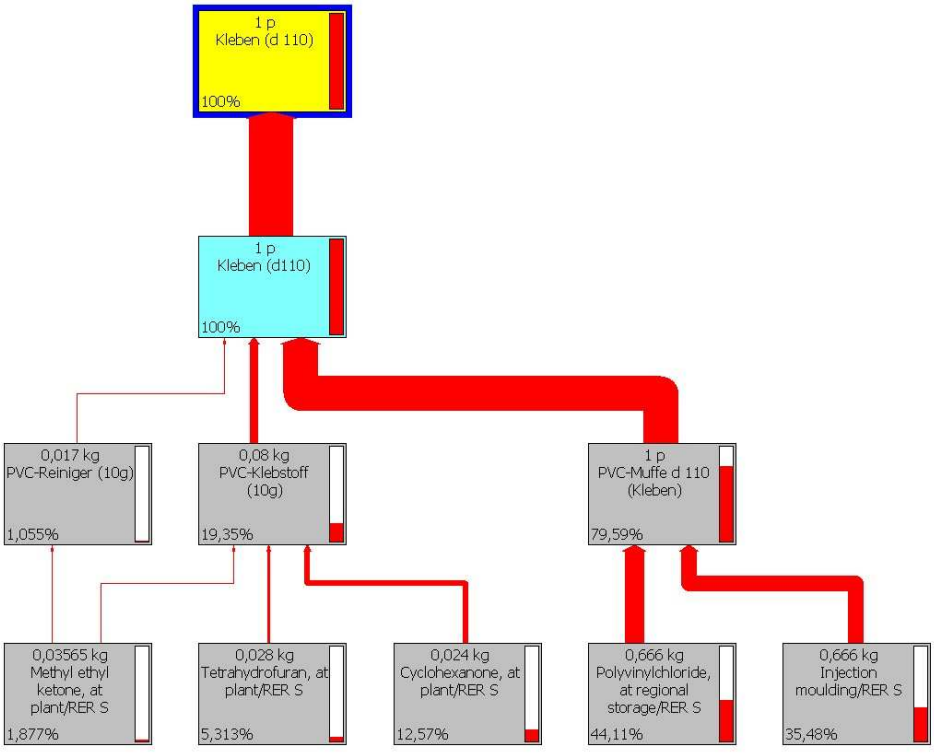


Abbildung 4-6: Umweltwirkungen (Methode der ökologischen Knappheit) beim Kleben von PVC-Rohren mit Durchmesser 110 mm

Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass ein direkter Vergleich der Fügeverfahren und eine Bewertung hinsichtlich ökologisch „besser“ oder „schlechter“ aus diesen Ergebnissen nicht möglich ist. Hierzu müsste zunächst das Gesamtsystem eines Rohrs in einer speziellen Anwendung analysiert werden. Dabei ist die Qualität der Verbindung ein wesentliches Kriterium (vgl. Abschnitt 6) – sie ist entscheidend, ob eine bestimmte Anwendung überhaupt möglich ist und welche Lebensdauer für eine Rohrleitung in dieser Anwendung zu erwarten ist. Erst bei Berücksichtigung dieser und weiterer Aspekte wie z.B. die Wahl des Kunststoffs kann das Gesamtsystem und somit auch der Fügeprozess vergleichend beurteilt werden.

5 Ökonomische Bewertung

Zur ökonomischen Bewertung der Fügeverfahren werden die Kosten für jeweils einen Fügevorgang für die beiden verbreitetsten Verfahren Heizelementstumpfschweißen und Heizwendelschweißen berechnet. Damit sollen die ökonomischen Stärken und Schwächen der Fügeverfahren analysiert werden. In die Berechnung geht ein, wie viele Fügevorgänge am Tag durchgeführt werden können (siehe Abschnitt 3.1), Maschinen- und Personalkosten, Energiekosten sowie Kosten für Verbrauchsmaterial.

Um die Maschinenkosten zu berechnen, werden für verschiedene Grundmaschinen und das notwendige Zubehör (Muffen, Rollenböcke, Reduktionsspanneinsätze etc.) von verschiedenen Herstellern Preise recherchiert und für jedes Fügeverfahren ein Durchschnittspreise ermittelt.

Für die Berechnung des Maschinenstundensatzes werden die kalkulatorische Abschreibung, die Kosten für Instandhaltung Wartung und Versicherung der Schweißmaschine sowie die kalkulatorischen Zinsen zu Grunde gelegt. Dazu wird die kalkulatorische Abschreibung für das oben aufgeführte Zubehör addiert.

Zur Berechnung der Schweißkosten je Stunde werden zum Maschinenstundensatz die Bedienpersonalkosten (Bruttodurchschnittsstundenlohn), die Energiekosten pro Stunde sowie die Kosten der Rohrreinigung pro Stunde (Flüssigreiniger + Reinigungstücher) addiert.

Zur Berechnung der Schweißkosten je Schweißung wird zudem die Anzahl der Schweißungen pro Stunde ermittelt und mit den Schweißkosten je Stunde verrechnet. Hinzu kommen die Kosten für die Neubeschichtung im Rahmen der Wartungsarbeiten:

$$\text{Schweißkosten je Schweißung} = \frac{\text{Kosten für Neubeschichtung} + \text{Schweißkosten je Stunde}}{60 \times \text{Schweißzeit je Schweißung}} \qquad (7\text{-}1)$$

Die Datengrundlage und Berechnung einzelnen Kostenpositionen sowie der Gesamtkosten ist in Anhang 11.2 dokumentiert.

Tabelle 5-1 zeigt die Berechnung der Gesamtkosten für das Heizelementstumpfschweißen unter Berücksichtigung folgender Bedingungen:

- Eine Schweißmaschine
- Größe des Heizelements auf Durchmesser bezogen (Energieverbrauch)
- Abschreibungszeit bzw. Nutzungsdauer: 8 Jahre
- Zinssatz: 7 %

Tabelle 5-1: Berechnung der durchschnittlichen Gesamtkosten pro Schweißung (HS) für PE-Rohre

		Durchmesser [mm]			
Bezeichnung		**63**	**110**	**160**	**250**
Anzahl Schweißungen pro Tag		23	17	13	10
Schweißzeit pro Schweißung	min	20,90	28,20	36,90	48,00
Maschinenstundensatz	€ / h	2,37	2,81	2,88	3,22
Bedienpersonalkosten	€ / h	48,00	48,00	48,00	48,00
Energieverbrauch pro Schweißung	kWh	0,17	0,24	0,28	0,31
Energiekosten	€ / h	0,07	0,08	0,07	0,06
Kosten Rohrreinigung	€ / h	0,57	0,42	0,32	0,50
Neubeschichtung	€ / h	0,43	0,32	0,24	0,19
Schweißkosten je Stunde	€ / h	51,37	51,55	51,44	51,90
Schweißkosten je Schweißung	€	17,87	24,26	31,66	41,52

Abbildung 5-1 zeigt die Anteile der einzelnen Kostenpositionen an den Gesamtkosten. Die mit Abstand größte Kostenposition beim Heizelementstumpfschweißen sind die Personalkosten.

Die Schweißmaschine, Energiekosten und Verbrauchsmaterial haben unabhängig vom Rohrdurchmesser nur einen sehr geringen Einfluss auf die Gesamtkosten pro Fügevorgang.

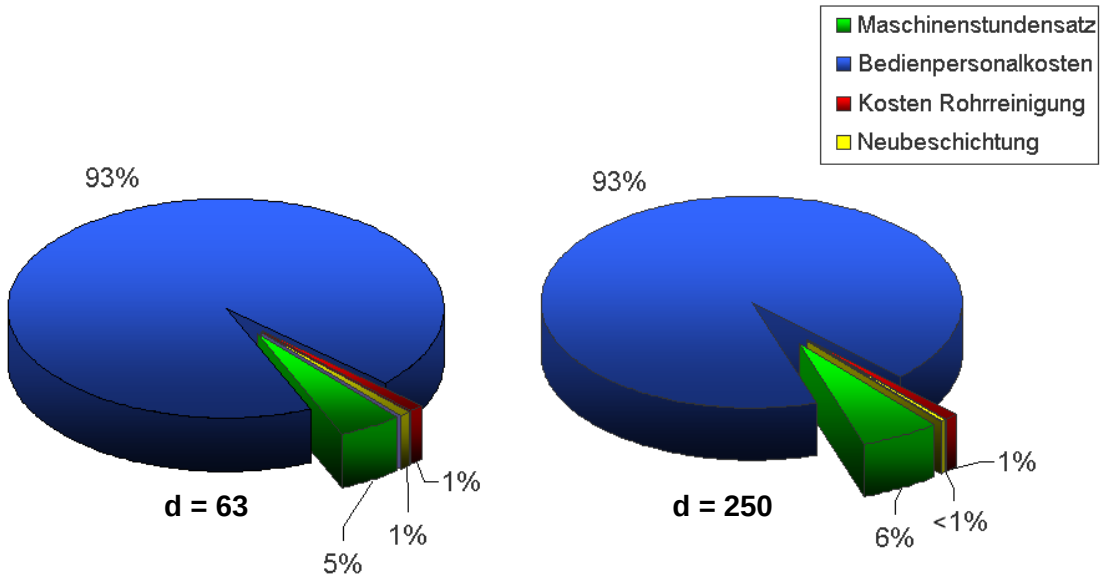


Abbildung 5-1: Anteile einzelner Kostenpositionen pro Schweißung (HS)

Tabelle 5-2 zeigt die Berechnung der Gesamtkosten für das Heizwendelschweißen unter Berücksichtigung folgender Bedingungen:

- Abschreibungszeit bzw. Nutzungsdauer: 8 Jahre
- Zinssatz: 7 %

Tabelle 5-2: Berechnung der durchschnittlichen Gesamtkosten pro Schweißung (HM) für PE-Rohre

		Durchmesser [mm]			
Bezeichnung		**63**	**110**	**160**	**250**
Anzahl Schweißungen pro Tag		56	43	27	18
Schweißzeit pro Schweißung	min	8,60	11,20	17,80	26,70
Maschinenstundensatz	€ / h	0,75	0,83	0,86	0,95
Bedienpersonalkosten	€ / h	24,00	24,00	24,00	24,00
Energieverbrauch (Tag)	kWh	0,68	2,49	2,74	5,25
Energiekosten	€ / h	0,01	0,05	0,05	0,10
Kosten Rohrreinigung	€ / h	1,39	1,07	0,67	0,90
Kosten Heizwendelmuffe	€	16,79	38,15	69,35	206,75
Schweißkosten je Stunde	€ / h	143,65	230,95	259,59	491,03
Schweißkosten je Schweißung	€	20,52	42,97	76,91	218,23

Abbildung 5-2 zeigt die Anteile der einzelnen Kostenpositionen an den Gesamtkosten beim Heizwendelschweißen am Beispiel von PE-Rohren. Mit zunehmendem Durchmesser steigt bei allen untersuchten Materialien der Anteil der Muffe an den Gesamtkosten. Haben bei einem Durchmesser von 63 mm die Personalkosten einen Anteil von über 50%, so sinkt dieser auf rund 10% bei einem Durchmesser von 250 mm. Die Muffe verursacht dann rund 90% der Kosten pro Schweißung.

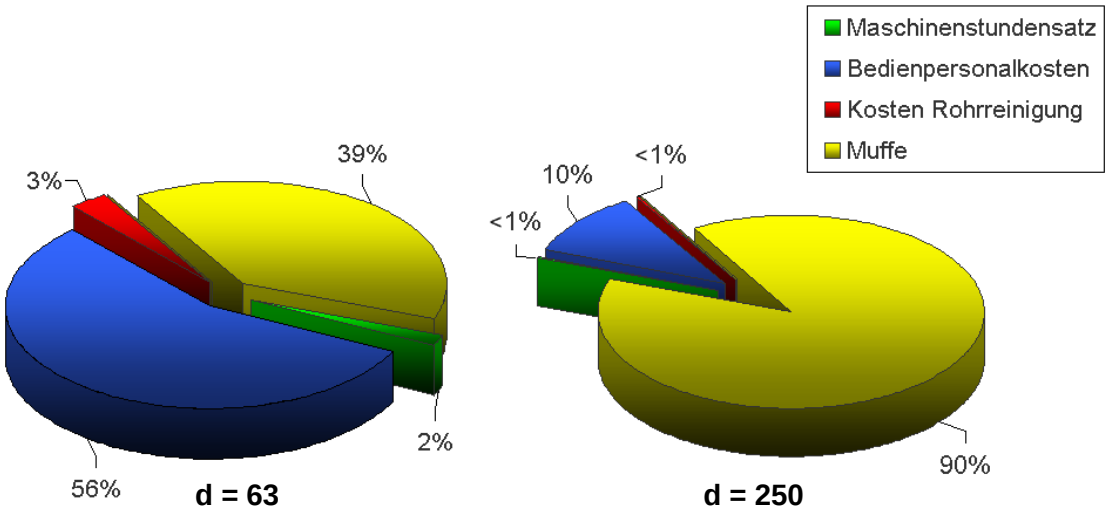


Abbildung 5-2: Anteile einzelner Kostenpositionen pro Schweißung (HM)

Im Gegensatz zum Heizelementstumpf- und Heizwendelschweißen werden beim Kleben von PVC-Rohren keine Maschinen eingesetzt. Das Kleben ist ein rein manuelles Verfahren und somit hinsichtlich der Reproduzierbarkeit von zahlreichen Faktoren abhängig. Eine Ermittlung der maximal möglichen Klebungen pro Tag war somit im Rahmen des Projektes nicht eindeutig möglich. Für die ökonomische Auswertung wurde die Anzahl an möglichen Klebungen an die Anzahl der Schweißungen pro Tag beim Heizelementstumpfschweißen angelehnt. Tabelle 5-3 zeigt die Berechnung der Gesamtkosten für das Kleben von PVC-Rohren.

Tabelle 5-3: Berechnung der durchschnittlichen Gesamtkosten pro Klebung für PVC-Rohre

		Durchmesser [mm]			
Bezeichnung		**63**	**110**	**160**	**250**
Angenommene Anzahl Klebungen pro Tag		23	17	13	10
Zeit pro Klebung	min	20,90	28,20	36,90	48,00
Bedienpersonalkosten	€ / h	24,00	24,00	24,00	24,00
Kosten Klebstoff[2]	€ / h	1,24	4,25	7,72	11,88
Kosten Rohrreinigung[2]	€ / h	0,44	0,51	0,57	1,14
Kosten Klebemuffe	€	4,93	29,73	67,13	292,05
Klebkosten je Stunde	€ / h	39,84	91,93	141,37	402,08
Kosten je Klebung	€	13,88	43,21	86,44	321,66

Beim Kleben von PVC-Rohren werden, wie bereits erwähnt, weder Maschinen noch Energie benötigt. Jedoch tragen die zu verwendenden Klebemuffen und der Klebstoff selbst deutlich zu den Kosten bei. Die Personalkosten sind vergleichbar mit dem Heizwendelschweißen, da in der Regel nur eine Personen für eine Klebung eingesetzt wird.

[2] Die benötigte Menge an Reiniger und Klebstoff wurde [HEN10] entnommen.

6 Qualität der Fügeverbindung

Neben den effektiven Schweißkosten und den Umweltwirkungen eines Schweißverfahrens ist besonders die Qualität einer Schweißung relevant für eine umfassende ökonomische und ökologische Bewertung. Durch eine Beurteilung der Schweißnahtqualität kann die Lebensdauer einer Schweißung und damit die Nutzungsdauer eines Produktes, in diesem Fall eines Rohres, abgeschätzt werden.

Zur Ermittlung der Qualität einer Schweißung kommen in der Regel mechanische Prüfungen, wie z.B. Kurz- und Langzeit-Zugversuche zum Einsatz.

6.1 Möglichkeiten zur Ermittlung der Schweißnahtqualität

6.1.1 Kurz- und Langzeit-Zugversuche

Der Standard-Zugversuch (siehe Abbildung 6-1), wie z. B. nach DVS 2203-2, dient vor allem zur Ermittlung des Kurzzeit-Zugschweißfaktors f_Z (siehe Gleichung 1).

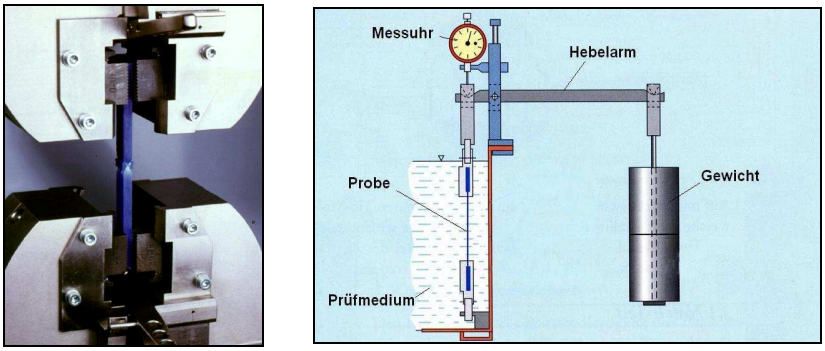


Abbildung 6-1: Zugversuch an einem geschweißten Probekörper (links) und Versuchsaufbau Zeitstand-Zugversuch (rechts)

Dieser Faktor gibt das Verhältnis der Schweißnahtfestigkeit bezogen auf die Festigkeit des ungeschweißten Grundmaterials an und ist beim Schweißen von Kunststoffen ein unerlässlicher Anhaltspunkt zur Bewertung der Verbindung. Der Schweißfaktor wird in vielen Bereichen und bei nahezu allen Schweißverfahren eingesetzt, um einen ersten Hinweis auf die Qualität der Schweißnaht zu erhalten. Der ermittelte Schweißfaktor und das entsprechende Bruchbild geben somit Auskunft über die statische Verformbarkeit der Schweißnaht und damit über die Qualität der Schweißausführung. Das Langzeitverhalten einer Schweißnaht kann allerdings mit dieser Prüfung alleine nicht beurteilt werden.

$$f_Z = \frac{\text{Max. Zugfestigkeit der Proben [N/mm²]}}{\text{Max. Zugfestigkeit des Grundmaterials [N/mm²]}}$$

Gleichung 1: Kurzzeit-Zugschweißfaktor f_Z

Der Zeitstand-Zugversuch, wie z. B. nach DVS 2203-4, hat sich bei der Analyse des Langzeitverhaltens von Schweißungen an thermoplastischen Kunststoffen bewährt. Hierbei werden geschweißte Probekörper aus Rohren oder Tafeln über eine relativ lange Zeit in einem flüssigen Medium mit einer bestimmten Temperatur und mit einer zeitlich konstanten Kraft belastet. Ausschlaggebend ist bei diesem Versuch die Zeit die benötigt wird, bis der Probekörper versagt. Abbildung 6-1, rechts, zeigt den prinzipiellen Versuchsaufbau hierzu.

Eine Beschleunigung des Verfahrens tritt ein, wenn bei erhöhten Temperaturen geprüft wird, wenn die Kraft bzw. die Spannung erhöht wird und wenn die Konzentration des verwendeten Benetzungsmediums zunimmt. Aus diesen Versuchen lassen sich die Langzeit-

Schweißfaktoren ermitteln, welche Aufschluss über die Schweißnahtqualität und das Langzeit-Tragverhalten geben.

Diese Prüfvorschrift gilt sowohl für Heizelementstumpf- wie auch für Heizwendelschweißungen ab einer Rohrwanddicke von 5 mm. Bei Heizelementstumpfschweißungen werden zur Prüfung der Verbindungsqualität Zugstäbe verwendet, bei denen sich die zu prüfende Schweißnaht in der Mitte befindet. Bei Heizwendelschweißungen ist die Probenpräparation aufwendiger. Hierzu wird aus dem Mittenbereich der jeweiligen Fügefläche eine Probe herausgesägt, an die mittels HS Verlängerungen angeschweißt werden.

6.1.2 Linear-Scherversuche

Im Rahmen eines am SKZ durchgeführten Forschungsprojektes konnte eine Anlage zur definierten und reproduzierbaren Ermittlung der Kraft beim Prüfen von Heizwendelschweißverbindungen mittels maschinellem Linearscherversuch entwickelt werden.

Der Linearscherversuch wurde ursprünglich zur Ermittlung von Schweißfahlern, wie z.B. falsche Einschublängen der Rohre in die Muffe, Öl in der Fügefläche, zweimaliges Schweißen, etc., konzipiert. Bisherige Ergebnisse mit dieser Linearscherapparatur sind sehr zufriedenstellend, da hiermit nicht nur vergleichende Untersuchungen vorgenommen werden können, sondern sehr aussagekräftige und reproduzierbare Absolutwerte ermittelbar sind. Aus aktueller Sicht stellt der maschinelle Linearscherversuch (LSV) eine sehr gute Prüfmethodik für HM- und HD-Schweißungen dar. Abbildung 6-2 zeigt links den Aufbau und rechts eine gescherte Probe in der Einspannvorrichtung der Prüfapparatur zum Linearscherversuch.

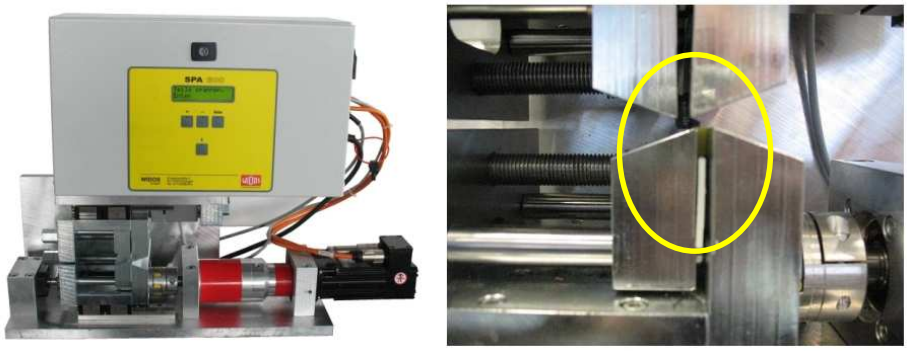


Abbildung 6-2: Prüfgerät für den maschinellen Linearscherversuch (links) und Detailaufnahme einer zu prüfenden Probe (rechts)

Die Probekörperentnahme für den Linearscherversuch erfolgte an einer Fräsmaschine auf deren horizontaler Spindel zwei Kreissägeblätter montiert wurden. Der Abstand der beiden Sägeblätter zueinander wird durch einen Zwischenring auf die gewünschte Größe eingestellt und bestimmt somit die Probenkörperbreite.

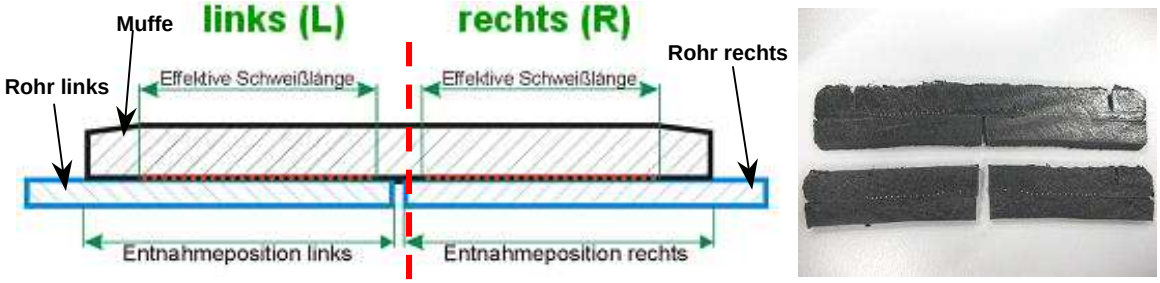


Abbildung 6-3: Schematische Darstellung zweier Probekörper (links) sowie Probekörper (rechts)

Aus den gefrästen Rohren können nun die Prüfkörper entnommen werden (siehe Abbildung 6-3). Aus statistischen Gründen werden über den Rohrumfang an acht Entnahmepositionen somit insgesamt 16 Probekörper entfernt.

6.2 Bestimmung der Schweißnahtqualität bei Heizelementstumpfschweißungen

6.2.1 Kurzzeit-Zugversuch

Die Bestimmung der Kurzzeit-Eigenschaften geschweißter Proben erfolgt wie unter 6.1.1 erläutert mittels Zugversuchen. Die Festigkeit der geschweißten Proben im Verhältnis zur Festigkeit des Grundmaterials liefert den sogenannten Kurzzeit-Zugschweißfaktor, welcher ein international anerkanntes Maß für die Schweißnahtqualität darstellt.

Im Rahmen des Projektes wurden zur Ermittlung der Qualitätsfaktoren Schweißungen an PE-Rohren mit einem Durchmesser von 110 mm, SDR 11 nach DVS- und ISO-Richtlinien durchgeführt. Die ISO-Richtlinie unterscheidet sich von der DVS-Richtlinie durch unterschiedliche Schweißparameter. So wird z.B. beim Single-Pressure-Verfahren ein Schweißdruck von 5,2 bar über 4,3 Minuten angelegt, während beim Dual-Pressure-Verfahren zu Beginn für 10 Sekunden ein Schweißdruck von 1,7 bar anliegt, welcher anschließend für die restliche Abklühlzeit von 13 Minuten auf nahezu 0 reduziert wird. Zur Erfüllung der DVS-Richtlinie wird mindestens ein Schweißfaktor von 0,9 (also einer Schweißnahtfestigkeit von 90 % der Grundmaterialfestigkeit) gefordert. Die ISO-Norm setzt explizit keinen Schweißfaktor fest. Das Ziel hierbei war zu untersuchen, ob eine wirtschaftliche Optimierung durch Variation der Schweißparameter möglich ist.

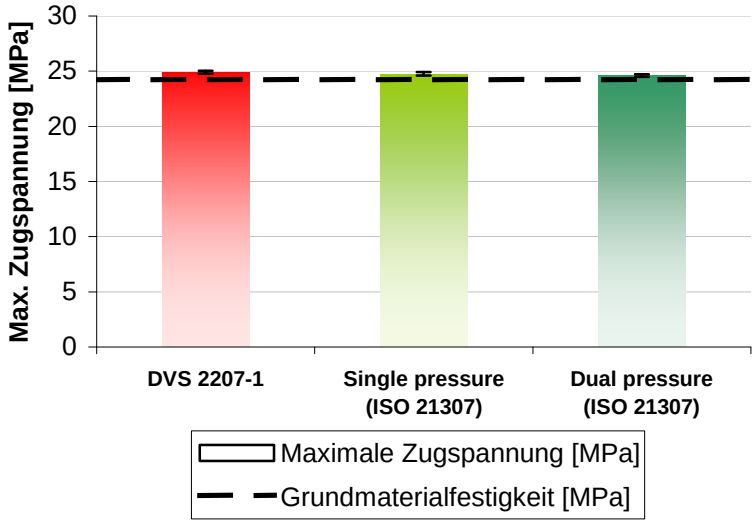


Abbildung 6-4: Maximale Zugfestigkeiten der geschweißten Proben nach DVS- bzw. ISO-Richtlinien

Abbildung 6-4 zeigt die ermittelten maximalen Zugfestigkeiten der Probekörper aus den geschweißten Rohren. Wie deutlich zu erkennen ist, liegen die Festigkeiten im Bereich der Grundmaterialfestigkeit, woraus sich sowohl bei allen Proben ein Schweißfaktor von 1,0 ergibt. Die geringfügig höheren Festigkeiten der geschweißten Proben ergeben sich aus dem minimal größeren Probenquerschnitt bedingt durch die Wulstausbildung während des Schweißens.

Die in den DVS-Richtlinien vorgegebenen Mindestschweißfaktoren können für PE, PP und PVC-C bei Beachtung der entsprechenden Richtlinie erreicht werden.

6.2.2 Zeitstand-Zugversuch

Mit Hilfe des Zeitstand-Zugversuches wurde die Standzeit von geschweißten und ungeschweißten Proben ermittelt und diese miteinander verglichen. Die Schweißungen wurden hierbei nach DVS- bzw. ISO-Richtlinien durchgeführt. Die Prüfbedingungen setzten sich aus einer Prüftemperatur von 80 °C, einer Prüf spannung von 6 N/mm² und 2 % des Netzmittels Arkopal N100 zusammen. Abbildung 6-5 zeigt die Ergebnisse dieser Prüfung.

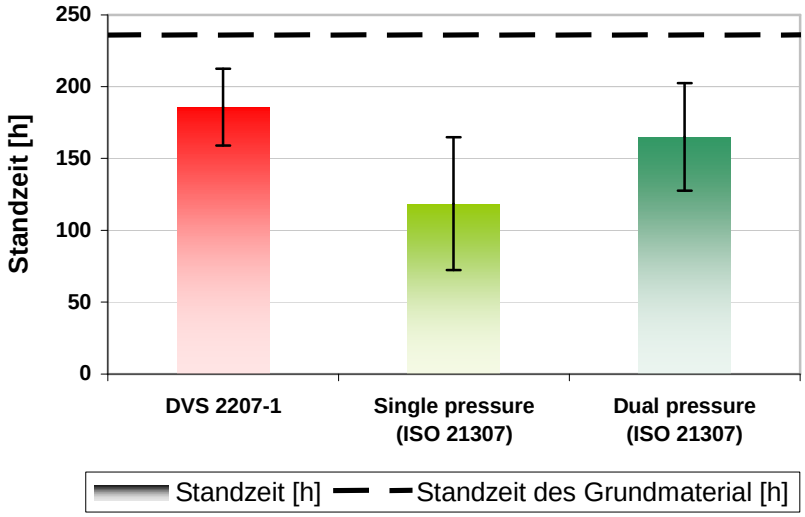


Abbildung 6-5: Standzeiten der geschweißten und ungeschweißten Proben im Zeitstand-Zugversuch (Netzmittel Arkopal N100, Prüfspannung 6 N/mm², Prüftemperatur 80 °C)

Es konnte festgestellt werden, dass die nach DVS-Richtlinien geschweißten Proben etwa 80 % und die nach dem Dual-Pressure-Verfahren geschweißten Proben 70 % der Standzeit des Grundmaterials erreicht. Lediglich die nach dem Single-Pressure-Verfahren geschweißten Proben zeigten bereits nach der Hälfte der Standzeit des Grundmaterials einen Bruch. Es kann somit festgehalten werden, dass Schweißungen, die nach den derzeit gültigen DVS-Richtlinien durchgeführt werden, auch im Langzeitverhalten keine qualitativen Einbußen aufzeigen und den Anforderungen der Richtlinien entsprechen. Bei einer ganzheitlichen Beurteilung von Rohrleitungen nach ökonomischen und ökologischen Kriterien ist daher kein negativer Einfluss durch derartige Fügeverbindungen zu erwarten.

6.3 Bestimmung der Schweißnahtqualität bei Heizwendelschweißungen

6.3.1 Linearscherversuch

Im Rahmen des Projektes wurden Heizwendelschweißungen an PE-Rohren mit den Durchmessern d 63, d 110 und d 250 mm mittels Linearscherversuch hinsichtlich ihrer mechanischen Eigenschaften untersucht. Eine Analyse der Schweißungen an Rohren mit einem Durchmesser von 160 mm bzw. größer als 250 mm wurde aufgrund der aufwendigen Probenvorbereitung verzichtet. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind in Abbildung 6-6 dargestellt.

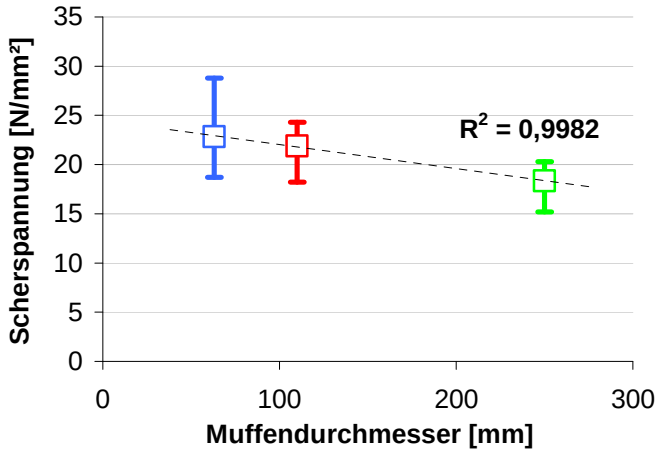


Abbildung 6-6: Ergebnisse der Linearscherversuche an heizwendelgeschweißten Rohren verschiedener Durchmesser

Zur Auswertung wurde die mittels LSV ermittelte Kraft auf die eigentliche Schweißfläche bezogen, welche anhand der Verteilung der Heizwendeln im Querschnitt (Schweißzone zwischen erster und letzter Heizwendel) abgeschätzt wurde, um die wirkende Scherspannung zu erhalten. Es ist deutlich zu erkennen, dass die mechanische Festigkeit der Schweißverbindung mit zunehmendem Durchmesser leicht abnimmt. Der Grund hierfür konnte im Rahmen dieses Vorhabens nicht eindeutig geklärt werden. Es wird vermutet, dass durch den höheren Energieeintrag bei größeren Muffen die Festigkeit durch lokale Schädigungen des Materials oder durch Bildung von Lunkern bzw. Vakuolen während des Abkühlens gemindert wird. Hierzu sollten weitere Untersuchungen in Kooperation mit diversen Industriepartnern vorgenommen werden.

6.3.2 Zeitstand-Zugversuch

Aus früheren Arbeiten am SKZ ist bekannt, dass trotz guter Kurzzeiteigenschaften einer Schweißverbindung, die Langzeiteigenschaften durchaus mangelhaft sein können. Daher wurden im Rahmen dieses Projektes neben den Kurzzeit- auch die Langzeiteigenschaften heizwendelgeschweißter Proben ermittelt.

Da solche Langzeituntersuchungen sehr zeit- und kostenintensiv sind, wurde hier lediglich eine Heizwendelschweißung aus PE mit einem Rohrdurchmesser von 110 mm geprüft. Es wurden je vier Probekörper in die Prüfeinrichtung eingespannt und die Zeit bis zum Bruch ermittelt.

Für die Probekörperherstellung muss gemäß DVS-Richtlinie 2203-4 BB 1 eine runde oder rechteckige Probe aus der Schweißzone entnommen werden und mittels HS an zwei Verlängerungen angeschweißt werden, um die sichere Einspannung in die Prüfvorrichtung gewährleisten zu können. In vorliegendem Fall wurde eine kreisrunde Probe ø 16 mm aus der Schweißzone entnommen. In Abbildung 6-7 ist eine geprüfte und eine ungeprüfte Probe dargestellt.

Abbildung 6-7: Geprüfter (oben) und ungeprüfter Probekörper (unten) für den Langzeit-Zugversuch

In Abbildung 6-8 sind die Ergebnisse der Zeitstandzugversuche dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Standzeiten bereits für vier Proben aus einer Muffe deutlich zwischen ca. 160 und 500 Stunden schwanken. Es wird davon ausgegangen, dass sich dieser Effekt analog bei anderen Muffengrößen zeigt.

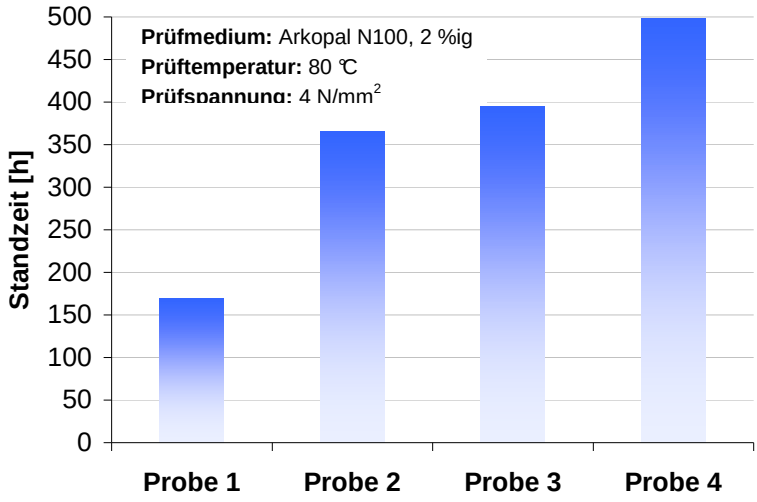


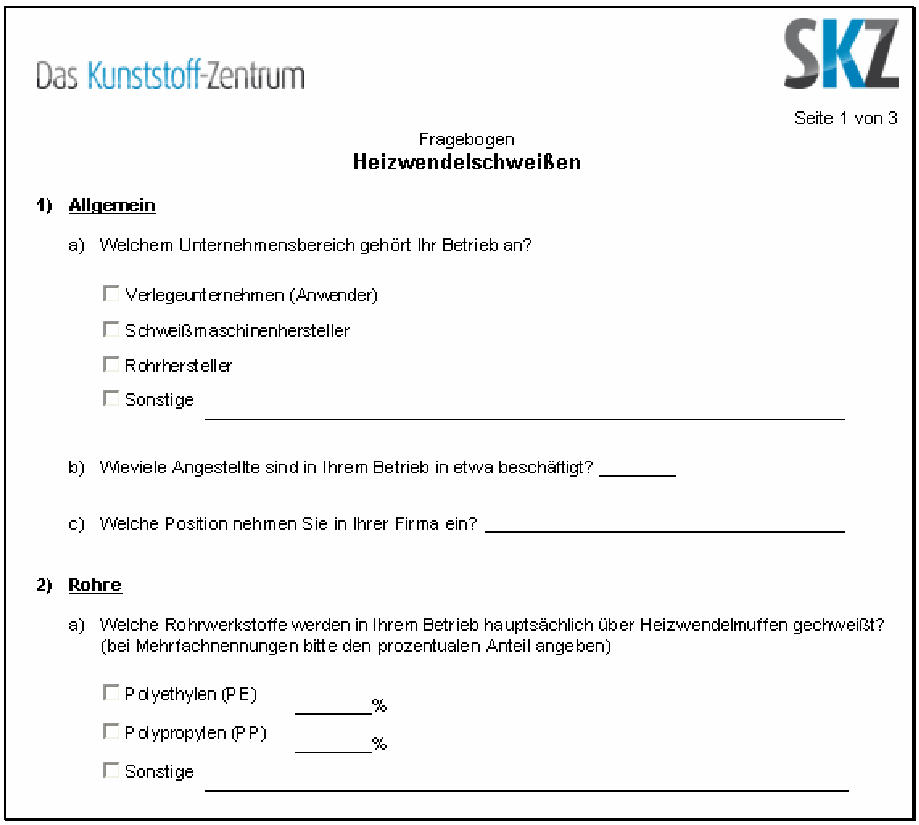
Abbildung 6-8: Ergebnisse der Langzeit-Zugversuche für eine Heizwendelschweißung an PE-Rohren mit einem Durchmesser von 110 mm

Die Gründe für die beobachteten hohen Schwankungen sind vielfältig. So ist bisher nicht wissenschaftlich vollständig geklärt, welchen Einfluss das Netzmittel Arkopal 100 und dessen lokale Konzentration im Prüfbecken auf die erreichbare Standzeit der Proben haben. Weiterhin könnte die zu prüfende Heizwendelverbindung durch das Anschweißen der Verlängerungen thermisch belastet worden sein, was unter Umständen ebenfalls einen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften hat. Weiterhin können Lunker, Vakuolen oder Verschiebungen der Heizwendeln in der Muffe zu Schwankungen in den Standzeiten führen. Zu diesen Themen sollten in aufbauenden Forschungsprojekten weitere Untersuchungen erfolgen.

Eine gesicherte Aussage über die erreichbare Standzeit heizwendelgeschweißter PE-Rohre ist daher aufgrund der deutlich unterschiedlichen Standzeiten innerhalb einer Schweißung zum jetzigen Zeitpunkt nicht möglich.

7 Umfrage

Die Untersuchungen zu den Schweißzeiten und Kosten im Rahmen dieses Projektes fanden ausschließlich unter Laborbedingungen statt. Hierdurch konnten Witterungseinflüsse verhindert und das Handling der Maschinen, Materialien und Messgeräte vereinfacht und unter optimalen Bedingungen eingesetzt werden. Damit jedoch auch Erkenntnisse aus der Praxis angemessen berücksichtigt werden können, wurden Fragebögen zum HS und HM entwickelt, welche an Industrievertreter verteilt wurden. Als Zielgruppe wurden Verantwortliche von Gas- und Wasserversorgungsunternehmen und von Kommunen sowie Baustellenpersonal festgelegt. Die Fragebögen wurden u.a. während eines Lehrgangs am SKZ verteilt und von den betreffenden Personen ausgefüllt. Ziel hierbei war es zum einen, Informationen aus der täglichen Arbeit der Arbeiter zu erhalten und zum anderen, einen repräsentativen Überblick über die verwendeten Rohre, die dazu angewandten Verfahren sowie den Schweißbetrieb an sich zu bekommen.



Das Kunststoff-Zentrum

SKZ

Seite 1 von 3

Fragebogen

Heizwendelschweißen

1) Allgemein

a) Welchem Unternehmensbereich gehört Ihr Betrieb an?

- ☐ Verlegeunternehmen (Anwender)
- ☐ Schweißmaschinenhersteller
- ☐ Rohrhersteller
- ☐ Sonstige _____

b) Wieviele Angestellte sind in Ihrem Betrieb in etwa beschäftigt? _____

c) Welche Position nehmen Sie in Ihrer Firma ein? _____

2) Rohre

a) Welche Rohrwerkstoffe werden in Ihrem Betrieb hauptsächlich über Heizwendelmuffen geschweißt? (bei Mehrfachnennungen bitte den prozentualen Anteil angeben)

- ☐ Polyethylen (PE) _____%
- ☐ Polypropylen (PP) _____%
- ☐ Sonstige _____

Abbildung 7-1: Ausschnitt aus dem Fragebogen zum HM

Die Fragebögen (siehe Abbildung 7-1 sowie Kapitel 11.4 und 11.5) teilen sich in die Bereiche Heizwendel- und Heizelementstumpfschweißen. Es konnte u.a. festgestellt werden, dass PE mit über 90 % als Hauptwerkstoff für Rohre anzusehen ist. Das Heizelementstumpfschweißen findet hierbei eher Einsatz bei größeren Rohrdurchmessern, wohingegen mittels Heizwendelschweißen eher kleinere Rohrdurchmesser verbunden werden (siehe Abbildung 7-2, links). Dies zeigt sich ebenfalls im leicht höheren Anteil an Ringbundware beim Heizwendelschweißen (siehe Abbildung 7-2, rechts).

Zum Heizelementstumpfschweißen werden überwiegend hydraulische (61,5 %) und CNC-gesteuerte Maschinen (30,8 %) verwendet. Die Standzeit einer Heizelementbeschichtung wird von den Teilnehmern der Umfrage auf etwa 1,7 Jahre und die Lebensdauer einer Heizelementstumpfschweißmaschine auf etwa 10 Jahre geschätzt. Eine Heizwendelschweißmaschine wird laut den Teilnehmern allerdings im Mittel lediglich 7,5 Jahre eingesetzt. Die überwiegende Anzahl an Schweißungen (87,3 % der Heizelementstumpfschweißungen und 97,0 % der Heizwendelschweißungen) finden auf der Baustelle statt.

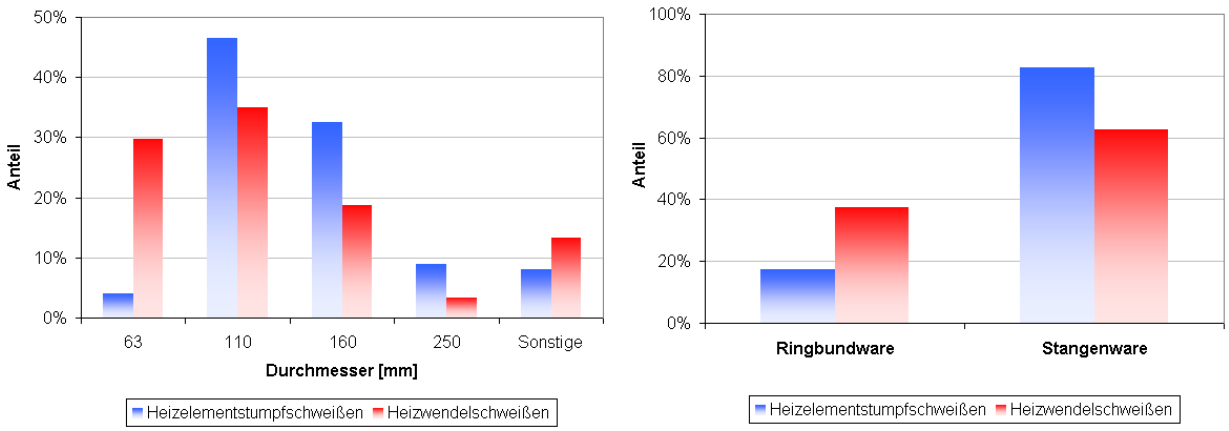


Abbildung 7-2: Graphische Darstellung der Umfrageergebnisse

Die geschätzte Anzahl der möglichen Schweißungen pro Arbeitstag schwankte auch bei den Teilnehmern der Umfrage sehr. Während manche lediglich 12 Stumpfschweißungen an 110er Rohren pro Tag für realistisch halten, können bei einigen Firmen bis zu 25 Schweißungen durchgeführt werden. Ein vergleichbares Bild ergibt sich beim Heizwendelschweißen. Hier variiert die Anzahl pro Tag sogar zwischen 6 und 25 möglichen Schweißungen. Einen Überblick der Bandbreite biete folgende Tabelle.

Tabelle 7-1: Maximale Anzahl an Schweißungen laut Umfrage je Verfahren und Durchmesser

	Heizelementstumpfschweißen				Heizwendelschweißen			
Durchmesser [mm]	63	110	160	250	63	110	160	250
Bandbreite	20 .. 25	12 .. 25	8 .. 20	5 .. 15	10 .. 25	6 .. 25	6 .. 20	4 .. 12
Mittlere Anzahl möglicher Schweißungen	22,5	17,3	12,2	10,0	17,4	14,3	11,3	8,2

Die Umfrageergebnisse belegen, dass aufgrund der hohen Bandbreite an erhaltenen Werten eine Aussage zu den maximal möglichen Schweißungen pro Tag praxisnah nicht zu verifizieren ist. Die Anzahl der Schweißungen hängt stark von der Einhaltung der geltenden Normen (DVS), den Umgebungsbedingungen, dem Personal und den Hilfsmitteln ab. Jedoch zeigte sich eine sehr gute Übereinstimmung der berechneten Anzahl an Heizelementstumpfschweißungen aus den Laborversuchen mit der abgeschätzten Anzahl an Schweißungen pro Tag der Umfrageteilnehmer.

Einig waren sich die Umfrageteilnehmer darüber, dass an einer Heizelementstumpfschweißung immer zwei Personen beteiligt sein müssen. Dies konnte auch in den Laborversuchen bestätigt werden und spiegelt sich somit in den Personalkosten wider. Eine Heizwendelschweißung hingegen kann laut 20 % der Befragten auch alleine ausgeführt werden. 67 % der Umfrageteilnehmer setzen hierbei allerdings auch zwei Schweißer ein.

8 Fazit: Vorschläge zur ökologisch-ökonomischen Optimierung der diversen Verfahren

8.1 Heizelementstumpfschweißen

Beim HS handelt es sich um ein weit verbreitetes und sicheres Verfahren zum Verbinden von Kunststoffbauteilen. Speziell im Rohrleitungsbau wird dieses Verfahren häufig eingesetzt.

Der Energieverbrauch beim Fügen hat den größten Anteil an den Umweltwirkungen und ist daher eine die wichtigste Stellschraube, um eine ökologische Optimierung zu erreichen. Der Energieverbrauch beim HS kommt hauptsächlich durch die ständige Temperaturregelung des Heizelements während der Schweißungen zu Stande, da das Heizelement den kompletten Arbeitstag auf einer festgelegten Temperatur gehalten werden muss.

Wie Abbildung 8-1 darstellt, werden zum HS von konventionellen Rohren mit Durchmessern zwischen 63 mm und 250 mm (SDR 11) lediglich zwischen 5 und 25 % der zur Verfügung stehenden Heizelementoberfläche zum Erwärmen der Fügepartner verwendet. Dies bedeutet im Umkehrschluss, dass bis zu 95 % der Heizelementoberfläche Wärme in die Umgebung abgibt, welche für den eigentlichen Schweißvorgang verloren ist.

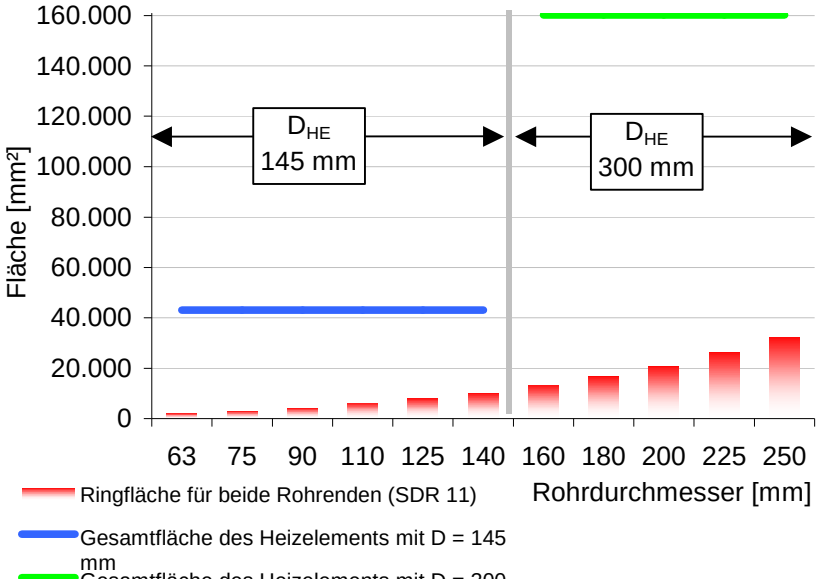


Abbildung 8-1: Vergleich der Heizelementoberfläche mit den tatsächlich zu erwärmenden Rohrringflächen

Der Wirkungsgrad einer Heizelementstumpfschweißung kann somit als sehr gering eingestuft werden. Bei Rohren mit geringerer Wandstärke (z. B. SDR 17) verringert sich sogar der Wirkungsgrad noch weiter. Abbildung 36 veranschaulicht diesen Verlusteffekt. Es besteht somit ein nicht von der Hand zu weisender Optimierungsbedarf hinsichtlich des Energieverbrauchs bzw. Wärmeverlustes z. B. vor dem Hintergrund der anhaltenden Klimaschutzdiskussion.

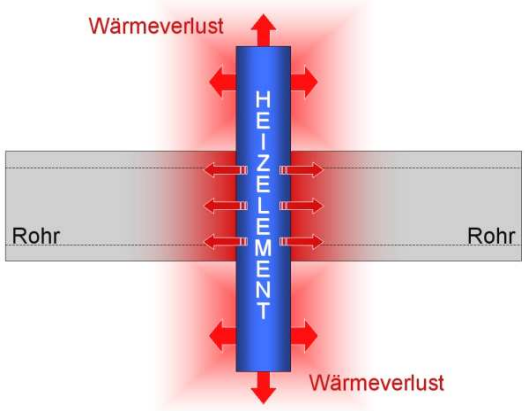


Abbildung 8-2: Schematische Darstellung der Wärmeverluste am Heizelement

Beim Schweißen von Rohren ist es daher zu empfehlen, Maschinen zu verwenden, deren Heizelementdurchmesser nicht sehr viel größer ist als das zu schweißende Rohr. Abbildung 8-3 veranschaulicht, dass der Energieverbrauch um bis zu 60 % verringert werden kann, wenn der Durchmesser des Heizelements dem Durchmesser des Rohres angepasst wird. So wird beispielsweise bei der Verwendung eines Heizelements mit einem Durchmesser von 15 cm zum Schweißen von 110er Rohren ca. 60 % weniger Energie benötigt als bei der Verwendung eines Heizelements mit einem Durchmesser von 30 cm.

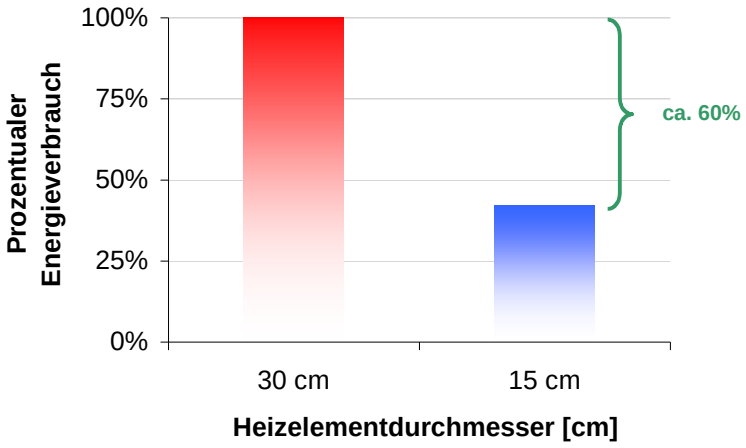


Abbildung 8-3: Prozentualer Energieverbrauch in Abhängigkeit vom Heizelementdurchmesser (PE-HD, Rohrdurchmesser 110 mm, SDR11)

Ein weiterer Ansatz wäre, die Größe und Geometrie des Heizelements durch eine „kalte“ Zone in der Mitte oder durch zuschaltbare Heizkreise je nach Durchmesser sowie mit unterschiedlichen Beschichtungen zu ändern.

Der Energieverbrauch könnte beim HS auch reduziert werden, indem mehr Schweißungen pro Tag durchgeführt werden. Dies könnte durch eine Reduzierung der Abkühlzeit umgesetzt werden. Die Abkühlzeit ist vom Rohrdurchmesser, dem Rohrmaterial und der Rohrwanddicke abhängig. Bei Heizelementstumpfschweißungen von PE-Rohren mit Durchmessern von 110 mm und einer Wanddicke von 10 mm schreibt die DVS-Richtlinie beispielsweise eine Abkühlzeit unter Fügedruck von 13 Minuten vor. Zur Überprüfung einer möglichen Optimierung wurden im Rahmen des Projektes Untersuchungen zum Einfluss der Abkühlzeit auf die Schweißnahtqualität durchgeführt (vgl. Abbildung 8-4 und Abbildung 8-5).

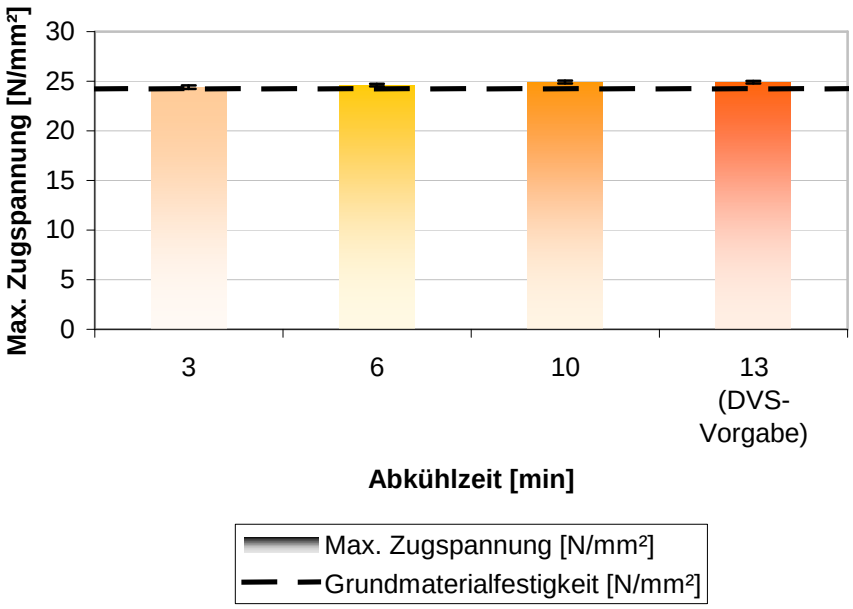


Abbildung 8-4: Maximale Zugspannungen der heizelementstumpfgeschweißten Proben im Kurzzeit-Zugversuch bei variierten Abkühlzeiten unter Fügedruck (d=110 mm, SDR 11, PE-HD)

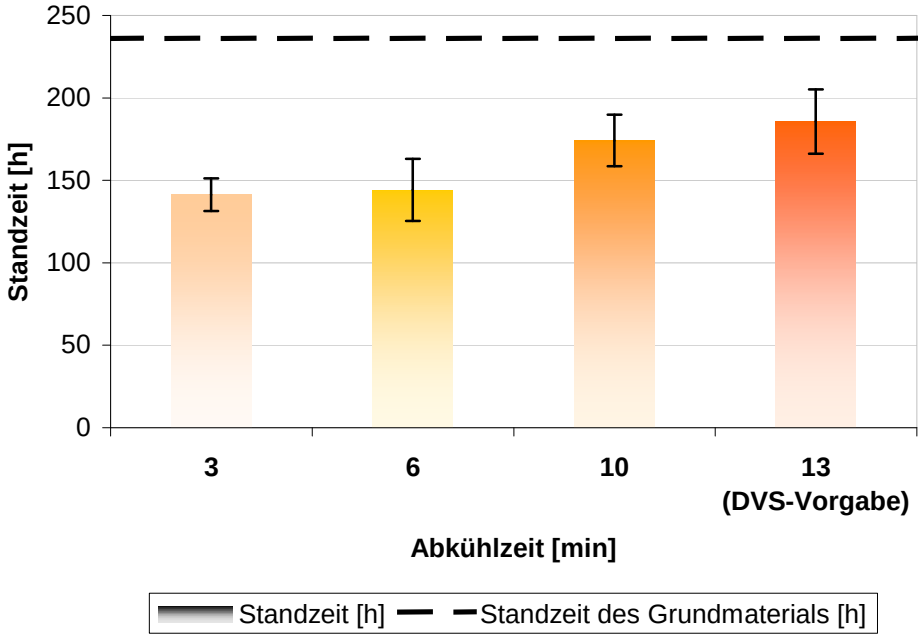


Abbildung 8-5: Standzeiten der heizelementstumpfgeschweißten Proben im Langzeit-Zugversuch bei Variation der Abkühlzeit unter Fügedruck (d=110 mm, SDR 11, PE-HD)

Es konnte festgestellt werden, dass die Kurzzeiteigenschaften auch bei einer Reduzierung der Abkühlzeit die von der DVS geforderten Werte erreichen. In den Langzeiteigenschaften war jedoch eine Abnahme der Festigkeit erkennbar. Da die Langzeiteigenschaften allerdings von zahlreichen Faktoren beeinflusst werden können, wie unter Kapitel 6.1.1 bereits beschrieben, sollten hier zur Verifizierung der Ergebnisse aufbauende Untersuchungen durchgeführt werden. Da in den durchgeführten Untersuchungen die Standzeiten der Proben bei einer Abkühlzeit von z.B. drei bis zehn Minuten jedoch nahe an der Standzeit der nach den aktuellen DVS-Richtlinien geschweißten Proben liegen, kann ein Potential zur Reduzierung des Energieverbrauchs beim Heizelementstumpfschweißen durch Verkürzung der Abkühlzeit gesehen werden.

Eine Erhöhung der Fügevorgänge pro Tag würde zudem die Kosten pro Schweißung erheblich reduzieren. Eine effektive und einfache Maßnahme ist die Verwendung einer zweiten Schweißmaschine. Die Wartezeiten werden dadurch deutlich verkürzt, die Personalauslastung gesteigert und die Personalkosten pro Fügevorgang somit signifikant reduziert. Der zeitliche Ablauf und die resultierende Einspaarung durch eine zweite Schweißmaschine sind in Abbildung 8-6 und Abbildung 8-7 am Beispiel eines Rohres mit 110 mm Durchmesser dargestellt. Der Energieverbrauch bzw. die Umweltlasten pro Schweißung wird durch diese Maßnahme nicht beeinflusst.

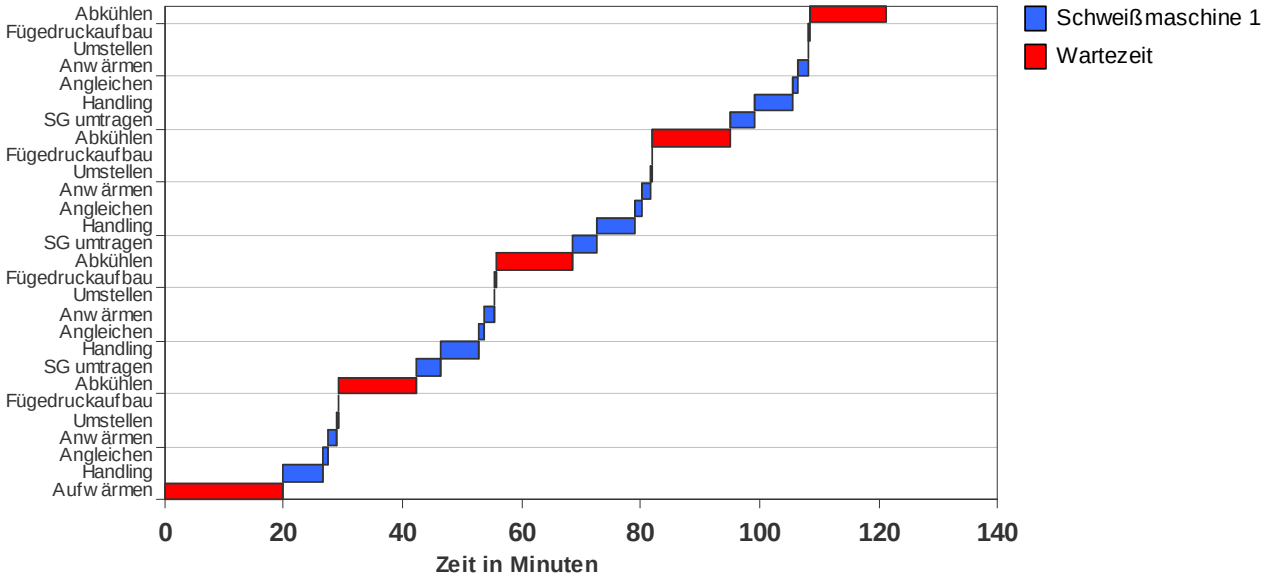


Abbildung 8-6: Zeitlicher Ablauf beim Heizelementstumpfschweißen mit einer Schweißmaschine

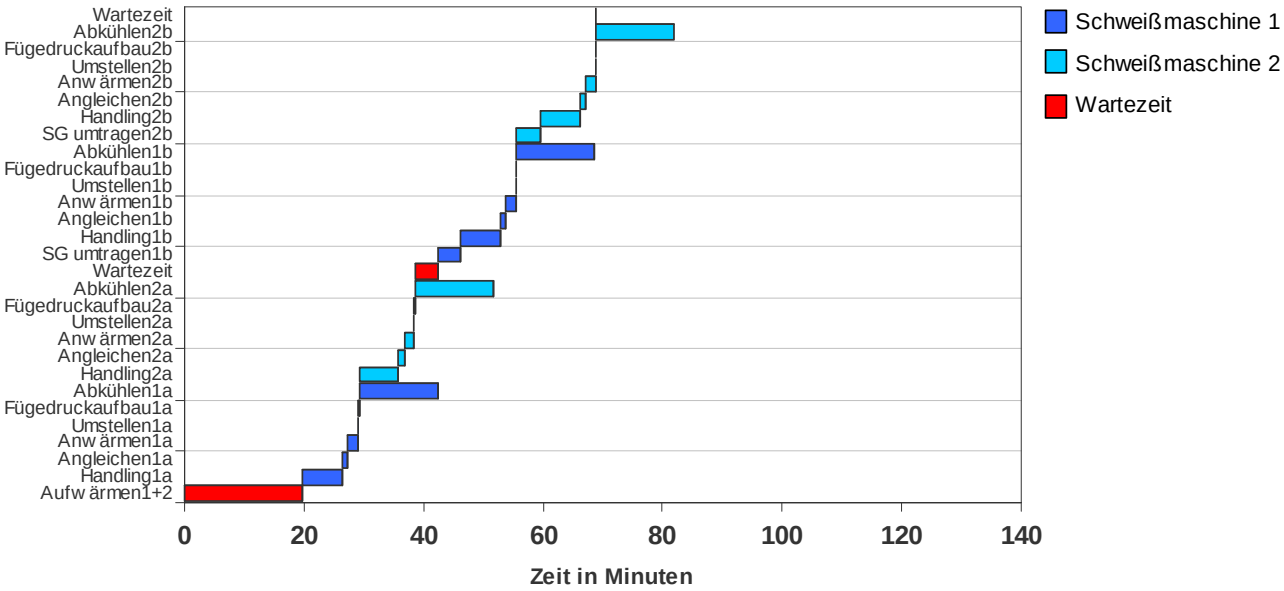


Abbildung 8-7: Zeitlicher Ablauf beim Heizelementstumpfschweißen mit zwei Schweißmaschinen

Durch Entkopplung des Heizelements von der eigentlichen Schweißmaschine wäre es zudem möglich, mehrere Maschinen mit einem einzigen Heizelement zu betreiben, wodurch eine Reduzierung des Energieverbrauch und eine Verkürzung der Wartezeit zwischen den Schweißungen kombiniert werden könnte.

8.2 Heizwendelschweißen

Das HM ist ein etabliertes, sicheres und einfaches Verfahren zum Verbinden von Rohrleitungsteilen u.a. im Trink- und Abwasserbereich. Bei diesem Fügeverfahren verursachen die Muffen über 90% der Umweltlasten und einen großen Teil der Kosten. Sowohl Umweltlasten als auch Kosten steigen beim Heizwendelschweißen mit zunehmenden Rohrdurchmesser deutlich an, da immer größerer Muffen benötigt werden. Es wird für jede Schweißung eine neue Muffe benötigt, so dass die übrigen Kosten, also die Maschinen- und Stromkosten, gegenüber den Muffenkosten bei größeren Durchmessern praktisch vernachlässigbar sind. Die Muffe kann als verlorener Schweißzusatz betrachtet werden und verteuert auf diese Weise deutlich die Schweißung. Eine ökologische und ökonomische Optimierung sollte deshalb zum Ziel haben, den Materialbedarf und die Kosten für die Herstellung der Muffe zu reduzieren.

Eine Gewichtsreduktion und damit Verringerung des Materialbedarfs könnte z. B. durch Reduzierung der Wanddicke der Muffe in Kombination mit einer Überarbeitung der Muffengeometrie und der Schweißfläche oder durch eine angepasste Profilierung erreicht werden (s. Abbildung 8-8).

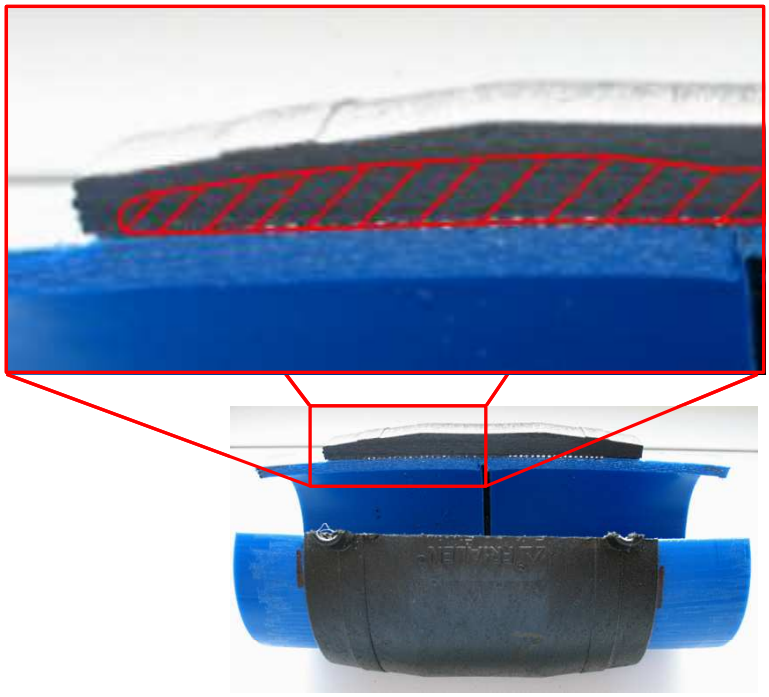


Abbildung 8-8: Theoretische Reduktion der Wanddicke einer Muffe zur Gewichtsreduktion

Eine Veränderung des Muffenaufbaus kann jedoch nur erfolgen, wenn die Qualität der Fügeverbindung garantiert und die resultierenden mechanischen Eigenschaften beibehalten oder sogar verbessert werden können. Hierzu muss die Verbindungsqualität sicher und reproduzierbar bewertet werden. Dies ist mit den derzeit verfügbaren Methoden zur Bewertung der Langzeiteigenschaften von Fügeverbindungen nicht möglich (siehe Kapitel 5.3.2). Um verlässliche Aussagen zu Standzeiten heizwendelgeschweißter Verbindungen treffen zu können, ist es daher zwingend notwendig, die Prüfmethodik des Langzeit-Zugversuchs zu überarbeiten. Es sollte geklärt werden, welche Einflüsse die Netzmittelart und -konzentration sowie das Anschweißen von Verlängerungen an der Proben auf die Langzeiteigenschaften der zu prüfenden Schweißnaht haben. Ziel sollte eine Prüfung sein, die eindeutige Aussagen über die Lebensdauer heizwendelgeschweißter Rohre zulässt. Hierzu sind weitere Forschungsarbeiten in Planung.

8.3 Kleben

Beim Kleben von PVC-Rohren werden analog zum Heizwendelschweißen die meisten Umweltlasten durch die Herstellung der Muffen verursacht. Wie auch bei den Heizwendelmuffen wäre daher eine Gewichtsreduktion der Klebmuffen ökologisch und ökonomisch vorteilhaft. Dadurch würden sowohl Materialverbrauch als auch Kosten bei der Muffen-Herstellung reduziert.

Die Versuche zu Emissionen beim Kleben haben gezeigt, das die gesundheitsschädlichen Stoffe Tetrahydrofuran und Cyclohexanon emittiert werden könnten. Um das Risiko abschließend zu beurteilen sind jedoch noch weitere umfangreiche Versuche unter realen Arbeitsbedingungen erforderlich. Unabhängig davon könnte geprüft werden, ob alternative, weniger toxische Verbindungen als Klebestoff zur Verfügung stehen.

Bei jeder Veränderung der Muffen oder des Klebstoffs muss dabei die Qualität der Fügeverbindung überwacht werden – auch und insbesondere über längere Zeiträume. Mechanische Kurz- und Langzeiteigenschaften müssen deshalb sorgfältig analysiert werden. Bei der Prüfmethodik der Langzeitversuche besteht dringender Forschungsbedarf, um verlässliche Aussagen zu den Standzeiten von Klebeverbindungen treffen zu können.

9 Maßnahmen zur Verbreitung der Vorhabensergebnisse

Die Forschungsergebnisse wurden fortlaufend ausführlich mit Vertretern der Industrie sowie im Rahmen der entsprechenden DVS-Sitzungen der Arbeitsgruppe 4.1a (HS und HM) und 4.4 (Messen und Prüfen) diskutiert und werden nach Abschluss des Projektes den 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 und Kleben von Rohren, Würzburger Kunststoffrohrtagung, 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 9-1 zeigt einen Überblick der geplanten Transfermaßnahmen.

Tabelle 9-1: Geplante Maßnahmen zum Ergebnistransfer

Maßnahme	Ziel	Datum / Zeitraum
Aus- und Weiterbildung am SKZ Lehrgang „Schweißen von Kunststoffrohren“	Information der Facharbeiter	Ab Herbst 2012
Vorlesung „Technologie der Polymermodifizierung“ der Universität Würzburg: Studiengang „Technologie der Funktionswerkstoffe“	Information der Studenten	20 Vorlesungen: einmal pro Jahr
Praktikum „Technologie der Polymermodifizierung“ der Universität Würzburg: Studiengang „Technologie der Funktionswerkstoffe“	Information der Studenten	20 Praktika: einmal pro Jahr
Fachtagung „10. Würzburger Kunststoffrohrtagung“	Information der Kunststoffrohrbranche	Sommer 2012 (jährlicher Turnus)

Maßnahme	Ziel	Datum / Zeitraum
Fachtagung „Würzburger Schweißertage“	Information der Schweißbranche	Frühjahr 2012 (jährlicher Turnus)
Übernahme der Ergebnisse in die akademische Lehre	Lehrveranstaltungen an der Universität Würzburg und FH Würzburg-Schweinfurt	Nach Abschluss des Vorhabens
Beratung von Unternehmen	Direkte Umsetzung und Nutzung der Forschungsergebnisse in den Unternehmen	Nach Abschluss des Vorhabens
Veröffentlichung der Ergebnisse	Information der gesamten Kunststoffindustrie	Frühjahr 2012

10 Literatur

[AQU11a] Aquaristikshop. Preis für Tangit PVC-Reiniger. Online-Information. URL: http://www.aquaristikshop.com/cgi-bin/neu/webshop.pl?f=NR&c=190470+*+190471&t=temartic&use-rid=0b7eQwSwL0xCGG2Myiic4fdLYbKLU6L3tu7 (abgerufen am 15.03.2011)

[AQU11b] Aquaristikshop. Preis für Tangit PVC-U Klebstoff. Online-Information. URL: http://www.aquaristikshop.com/cgi-bin/neu/webshop.pl?f=NR&c=190460+*+190461+*+190462+*+190463&t=temartic&userid=0b7eQwSwL0xCGG2Myiic4fdLYbKLU6L3tu7 (abgerufen am 15.03.2011)

[BÄN11] Bänninger: Fittings aus PVC-U für fast alle flüssigen Medien. Brutto-Preisliste. Online-Information. URL: http://www.baenninger.de/ba-web/PVC_U_Preisliste_1_10_1_004.pdf (abgerufen am 16.03.2011)

[BRA10] Braun, A., Fa. WIDOS: Angebot Tausch Heizplatten WIDOS 4600 + Miniplast vom 20.01.2010

[BRO99] Brosius, F.: SPSS 8.0 : professionelle Statistik unter Windows. MITP-Verl.: Bonn,1999

[DOM01] Dommer, M.: Sicherheit und Kostenreduzierung im Rohrleitungsbau durch Einsatz der Heizelement-Stumpfschweißtechnik, GWF-Gas/Erdgas (142 (2001) Nr.12) Hrsg.: DVGW, Bonn 2001

[DOM10] Dommer, M., Fa. WIDOS, Persönliche Mitteilung vom 18.01.2010

[ECK01] Eckert, R.: Heizwendelschweißtechnik als Mittel zur Kostensenkung im Rohrleitungsbau?, Energie Wasser Praxis (6/2001), Hrsg.: DVGW, Bonn, 2001

[EUR10] Eurostat - Statistisches Amt der Europäischen Gemeinschaft (Hrsg.): Strompreise nach Art des Benutzers – Deutschland Euro je kWh. Online Information. URL: http://epp.eurostat.ec.europa.eu/tgm/refreshTableAction.do?tab=table&plugin=1&pcode=tsier040&language=de (abgerufen am 24.09.2010)

[FRA11] Frank: Heizelement-Stumpfschweißmaschinen. F – Serie. Online-Information. URL: http://www.frank-gmbh.de/download/download-deutsch/schweisstechnik/Schweissmaschine_F_Serie_de.pdf (abgerufen am 16.03.2011)

[FRI06] Frischknecht, R., Steiner, R., Jungbluth, N. 2009: Methode der ökologischen Knappheit - Ökofaktoren 2006. Methode für die Wirkungsabschätzung in Ökobilanzen. Umwelt-Wissen Nr. 0906. Bundesamt für Umwelt (BAFU), Bern

[FRU89] Fruhstorfer, L. (1989): Heizelementschweißen. In Rische, U.W.: Heizelementschweißen in der Kunststoff-Fügetechnik. Herfurth GmbH

[HEN10] Henkel AG & Co. KGaA (Hrsg.): TANGIT PVC-U Rohr-Klebstoff für PVC-U Technisches Merkblatt Ausgabe 26.03.2010. Online Information. URL: http://deweb02.henkel.com/4125683F004C5C76/0/87439A666C17EE18C12576F20053DC91/$file/Tangit%20%20PVC_U%20TM_DE_032010.pdf (abgerufen am 10.02.2011)

[KES06] Kessler, W.: Multivariate Datenanalyse für die Pharma-, Bio- und Prozessanalytik, Wiley-VCH Verlag, 1. Auflage, 2006, S.96

[KWE11] Kwerk.de: Anleitung zur Herstellung von Klebeverbindungen, Online Information, URL: http://www.kwerk-shop.de/anleitungen/ka_pvcu_pvcc.pdf (abgerufen am 22.03.2011)

[MEI08] Meissner, J., Wendler, T.: Statistik-Praktikum mit Excel: Grundlegende quantitative Analysen realistischer Wirtschaftsdaten mit vollständigen Lösungen. Vieweg + Teubner Verlag, 2008, S.133f.

[MÜL78] Müller-Wenk, R.: Die ökologische Buchhaltung, Campus Verlag, 1978

[PLA10] Plasson: Fusamatic-Elektroschweißsystem. Preisliste 2009. Online-Information. URL: http://www.plasson.de/site2006/downloads/ef_2010.pdf (abgerufen am 16.03.2011)

[PRA09] Fischer, F., Albrecht, U.: Wasserstrahlschneiden im Vergleich zum thermischen Schneiden – Einsatzbereiche und Wirtschaftlichkeitsgesichtspunkte. Der Praktiker 11/2009

11 Anhang

11.1 Dokumentation der Annahmen

Lebensdauer der Heizelementstumpfschweißmaschine

Annahme: 10 Jahre, dann vollständiger Ersatz [FRU89]

Anzahl an Schweißungen in 10 Jahren:

- Annahme: 15 Schweißungen pro Tag (vgl. Umfrage Kapitel 6)
  → 250 Arbeitstage * 15 Schweißungen * 10 Jahre = 37.500 Schweißungen
- Stückzahl: Bereitstellung Maschine zum Schweißen: **1 / 37.500**

Lebensdauer der Heizelementbeschichtung

Die Heizelementbeschichtung einer Heizelementstumpfschweißmaschine wird nach rund 1.000 Schweißungen ausgetauscht. Die Beschichtung besteht im wesentlichen aus Polytetrafluorethylen (PTFE).

40 µm Tetrafluoroethylene film, on glass/RER S

Durchmesser Heizelement: 30 cm

Dichte PTFE: 2,16 g/cm³

→ 2 g PTFE-Folie pro 1.000 Schweißungen

Verbrauch an Rohrreiniger (Ethanol)

750 ml pro 200 Schweißungen (Durchschnittswert für Rohre d 63 bis 110)

→ 3,75 ml / Schweißung (d 110)

→ 7,5 ml / Schweißung (d 250)

Berechnung des Kupferanteils in einer PE - Muffe d 110 mm

Es sind 38 Wendeln in der Muffe gewickelt.

- Dichte: 8,92 g/cm^3
- Durchmesser Draht: 0,55mm
- Radius Draht: 0,275mm
- Kreisfläche Draht: $r^2*\pi$=0,23758294415625 mm²
- Radius Muffe: 55mm
- Umfang Muffe: $2*r*\pi$=345,5749mm
- Volumen eines Drahtes: 345,5749mm*0,2375829mm² = 82,102687mm³
- Volumen aller Drähte: 38*82,102687mm³ = 3119,9021mm³ = 3,1199cm³

Masse an Kupfer in einer Muffe:

Volumen * Dichte = 3,1199cm³ * 8,92 g/cm^3 = <u>27,8 g</u>

Schätzung des Kupferanteils in der 250 mm PE-Muffe

Gewicht 250 mm Muffe ca. 5.500 g

Gewicht 110 mm Muffe: 685 g

Verhältnis: 685 / 5.500 = 0,125

Kupfergewicht: 27,8 * 1/0,125 = 222,4 g

Muffengewicht

Tabelle A-1: Gewichtsdurchschnitte Muffen (bei durchschnittlichem Kupferanteil von 4 %); Druckrohre

Durchmesser	Gewicht gesamt [g]	Gewicht Kupfer [g]	Gewicht Kunststoff [g]
63	228	10	218
110	781	31	750
160	1.722	69	1.653
250	4.420	177	4.243

Zum Vergleich: Abwassermuffe d 250 (drucklos):
1.662 g Gesamtgewicht, davon 177 g Kupfer (Anteil von 11 %)

Transport der Muffen

Annahme: 20 t Strecke 500 km entspricht 10.000 tkm

→ wird auf das jeweilige Gewicht einer Muffe bezogen: Gewicht Muffe / 20 t

Gewicht der Maschinen (zur Erstellung der Ökobilanz)

Heizwendelschweißmaschine: 20 kg [PLA10]

Heizelementstumpfschweißmaschine: 185 kg (ohne Spanneinsätze) [FRA11]

Tabelle A-2: Gegenüberstellung der durchschnittlichen Gewichte und des resultierenden global warmings unterschiedlicher Muffen für HM (Trinkwasserbereich)

Durchmesser	Gewicht Muffe	Kumulierte Emissionen
d 63	ca. 230g	0,86 kg CO_2 eq. / Muffe
d 110	ca. 780 g	2,70 kg CO_2 eq. / Muffe
d 160	ca. 1.720kg	5,81 kg CO_2 eq. / Muffe
d 250	ca. 4.420 kg	15,20 kg CO_2 eq. / Muffe

Tabelle A-3: Zusammenstellung der Gewichte beim HM und HS [ECK01]

Heizelementstumpf-schweißtechnik	Gewicht:	Heizwendel-schweißtechnik	Gewicht:
• Grundmaschine (Schweißschlitten), z.B. d90-d315	60 kg		
• Spanneinsätze (d90, d110, d125, d140, d160, d180, d200, d225, d250, d280)	10,5 kg		
• CNC-Steueraggregat	40,5 kg	• Universalschweißgerät d20-d630	15 kg
• Planhobel	24,5 kg	• Schälgerät d90-d225	3 kg
• Heizelement	12,6 kg	• Schälgerät d250-d630	6 kg
• Einstellkasten für Heizelement/Planhobel	10,5 kg	• Transportbox	2 kg
• Transportkiste	21 kg	• ggf. Rundungsschellen	∑ **26 kg**
	∑ **222 kg**		
• Grundmaschine (Schweißschlitten), z.B. d355-d630	226 kg		
• Spanneinsätze (d355, d400, d450, d500, d560)	200 kg		
• CNC-Steueraggregat*	40 kg		
• Planhobel*	103 kg		
• Heizelement*	36 kg	**zusätzlich: **Gewicht der Formteile:**	
• Einstellkasten für Heizelement/Planhobel	20 kg	• d90: ≈ 0,5 kg	
• Galgen und Kettenzug	43 kg	• d225: ≈ 5 kg	
• Transportkiste	195 kg	• d630: ≈ 36 kg	
	∑ **863 kg**		
* Im Großrohrbereich ist Starkstrom erforderlich.			
Gesamtgewicht, ca.:	∑ **1085kg**		∑ **26kg****

Tabelle 5: Erforderliche Geräte und Werkzeuge

11.2 Ökonomische Bewertung

11.2.1 Heizelementstumpfschweißen

Berechnung des mittleren Preises von Schweißmaschinen und Zubehör

Die Preise für verschiedene Schweißmaschinen sowie notwendiges Zubehör wurden bei verschiedenen Herstellern (WIDOS, Frank, Plasson, Georg Fischer) ermittelt (Tabelle A-4 bis A-6).

Tabelle A-4: Preistabelle der Firma FRANK

Frank GmbH	Anzahl		Stückpreis / €	Gesamtpreis / €	Quelle
Grundmaschine	2	F 250 CNC	15.676,00	31.352,00	(A)
Reduktionsspanneinsätze	2	75 bis 225mm	1.930,00	3.860,00	(A)
Grundmaschine	2	F 315 CNC	17.351,00	34.702,00	(A)
Reduktionsspanneinsätze	2	90 bis 280mm	2.380,00	4.760,00	(A)
Grundmaschine	2	Widos 4400 im Set	7.350,00	14.700,00	(A)
Reduktionsspanneinsätze	2	50 bis 140mm	1.250,00	2.500,00	(A)
Grundmaschine	2	Widos 5100 im Set	14.200,00	28.400,00	(A)
Reduktionsspanneinsätze	2	200 bis 400mm	3.860,00	7.720,00	(A)
Heizelement		bei Maschine inkl.			(A)
CNC-Steueraggregat		bei Maschine inkl.			(A)
Spanneinsatz		bei Maschine inkl.			(A)
Planhobel		bei Maschine inkl.			(A)
Rollenböcke	4	bis d 315	65,00	260,00	(A)
Runddrückklemme	1	63			(B)
Runddrückklemme	1	110			(B)
Runddrückklemme	1	160			(B)
Runddrückklemme	1	250			(B)
Flüssigreiniger	0,005	0,75l	10,80	0,05	(A)
Reinigungstücher	0,01	100	12,90	0,13	(A)
Temperaturmessgerät	1		150,00	150,00	(A)
Schutzeinrichtung (Zelt)	1	Firma CEPRO	668,00	668,00	(C)

(A) FRANK "Auszug aus dem Kunststoff-Schweißmaschinen-Programm", November 2008:
http://www.frank-gmbh.de/download/download-deutsch/download/preislisten/aktuellen_preise/21-01-schweisstechnik-komplett.pdf
(B) FRANK "Preisliste 2006 Kunststoff-Schweißtechnik", Januar 2006 ALT
http://www.frank-gmbh.de/download/download-deutsch/download/preislisten2006/Schweisspreisliste_2006_komplett_mail.pdf
(C) CEPRO siehe Email vom 19. Januar 2010

Tabelle A-5: Preistabelle der Firma Plasson

Plasson	Anzahl		Stückpreis / €	Gesamtpreis / €	Quelle
Grundmaschine	2	WIDOS 4400 CNC	17.249,00	34.498,00	(E)
Reduktionsspanneinsätze	2	50-160mm	1.308,00	2.616,00	(E)
Grundmaschine	2	WIDOS 4600 CNC	17.963,00	35.926,00	(E)
Reduktionsspanneinsätze	2	75-250mm	2.022,00	4.044,00	(E)

Plasson	Anzahl		Stückpreis / €	Gesamtpreis / €	Quelle
Grundmaschine	2	WIDOS 4900 CNC	19.034,00	38.068,00	(E)
Reduktionsspanneinsätze	2	90-315mm	2.498,00	4.996,00	(E)
Grundmaschine	2	WIDOS 4400 manuell	7.732,00	15.464,00	(E)
Reduktionsspanneinsätze	2	50-160mm	1.308,00	2.616,00	(E)
Grundmaschine	2	WIDOS 4600 manuell	8.328,00	16.656,00	(E)
Reduktionsspanneinsätze	2	75-250mm	2.022,00	4.044,00	(E)
Grundmaschine	2	WIDOS 4900 manuell	9.398,00	18.796,00	(E)
Reduktionsspanneinsätze	2	90-315mm	2.498,00	4.996,00	(E)
Grundmaschine	2	WIDOS 4900 CNC	19.034,00	38.068,00	??
Reduktionsspanneinsätze	2	200 bis 400mm	969,00	1.938,00	??
Heizelement		bei Maschine inkl.			(E)
CNC-Steueraggregat		bei Maschine inkl.			(E)
Spanneinsatz		bei Maschine inkl.			(E)
Planhobel		bei Maschine inkl.			(E)
Rollenböcke	4	bis d 315	77,90	311,60	(D)
Rollenböcke		bis d 630	Wir betrachten nur bis 250		(D)
Runddrückklemme	1	63	114,00	114,00	(E)
Runddrückklemme	1	110	153,00	153,00	(E)
Runddrückklemme	1	160	298,00	298,00	(E)
Runddrückklemme	1	250	382,00	382,00	(E)
Flüssigreiniger	0,00375	1 Liter	14,50	0,05	(E)
Reinigungstücher	0,01	100	10,70	0,11	(E)
Temperaturmessgerät	1		198,40	198,40	(D)
Schutzeinrichtung (Zelt)	1	Firma CEPRO	668,00	668,00	(E)

(D) http://www.friedrich-ebner.at/fileadmin/www.friedrich-ebner.at/download_neu/02_schweiss/PLASSON_PE-SCHWEISS_Preisliste_2010.pdf
(E) http://www.plasson.de/site2006/downloads/ef_2010.pdf

Tabelle A-6: Preistabelle der Firma Georg Fischer

Georg Fischer	Anzahl		Stückpreis / €	Gesamtpreis / €	Quelle
Rollenböcke	4	RB bis d 315		0,00	(D)
Rollenböcke	4	RB bis d 630		0,00	(D)
Grundmaschine	2	CNC GF 160 (40-160mm)	16.525,00	33.050,00	(F)
Grundmaschine	2	CNC GF (75-250mm)	17.495,00	34.990,00	(F)
Grundmaschine	2	CNC GF (90-315mm)	18.715,00	37.430,00	(F)
Grundmaschine	2	CNC GF (125-400mm)	24.075,00	48.150,00	(F)
Reduktionsspanneinsätze	2	63mm	1.090,00	2.180,00	(F)
Reduktionsspanneinsätze	2	110mm	1.090,00	2.180,00	(F)
Reduktionsspanneinsätze	2	160mm	2.005,00	4.010,00	(F)

Georg Fischer	Anzahl		Stückpreis / €	Gesamtpreis / €	Quelle
Reduktionsspanneinsätze	2	250mm	2.680,00	5.360,00	(F)
Reduktionsspanneinsätze	2	400mm	3.300,00	6.600,00	(F)
Heizelement	2	bei Maschine inkl.		0,00	(E)
CNC-Steueraggregat	2	bei Maschine inkl.		0,00	(E)
Spanneinsatz	2	bei Maschine inkl.		0,00	(E)
Runddrückklemme	1	63	113,40	113,40	
Runddrückklemme	1	110	141,10	141,10	(B)
Runddrückklemme	1	160	308,50	308,50	(B)
Runddrückklemme	1	250	528,00	528,00	(B)
Runddrückklemme	1	400		0,00	(B)
Flüssigreiniger	0,00375	1 Liter	9,65	0,04	(E)
Reinigungstücher	0,01	100	7,80	0,08	(E)
Planhobel	1	bei Maschine inkl.		0,00	(E)
Temperaturmessgerät	1		198,40	198,40	(E)
Schutzeinrichtung (Zelt)	1	Firma CEPRO	668,00	668,00	(E)

(F) Preisliste Georg Fischer, per Post zugesandt am 26. Januar 2010

Aus den Preisen für Schweißmaschine und Zubehör der einzelnen Hersteller werden Durchschnittswerte gebildet (Tabelle A-7).

Tabelle A-7: Mittlere Preise der Schweißmaschinen und des Zubehörs

		Durchmesser [mm]				
Bezeichnung	**Einheit**	**63**	**110**	**160**	**250**	**400**
Grundmaschine	€	13.708,00	16.483,00	16.483,00	18.010,00	19.103,00
Rollenböcke	€	286,00	286,00	286,00	286,00	1.945,00
Reduktionsspanneinsätze	€	4.864,00	5.771,00	6.991,00	9.443,00	10.839,00
Runddrückklemme	€	113,00	141,00	309,00	528,00	--
Flüssigreiniger	€	0,05	0,06	0,08	0,09	0,11
Reinigungstücher	€	0,10	0,10	0,10	0,21	0,21
Temperaturmessgerät	€	182,00	182,00	182,00	182,00	182,00
Schutzeinrichtung	€	668,00	668,00	668,00	668,00	668,00

Berechnung des Maschinenstundensatzes

Zur Ermittlung des Maschinenstundensatzes wurde zunächst die Investitionssumme als Durchschnittswert der Kosten für eine Schweißmaschine – je nach Durchmesserbereich – berechnet. Für die Nutzungszeit werden 211 Arbeitstage pro Jahr zu je 8 Stunden mit 20 % Ausfallzeit angenommen, was zu einer Nutzungszeit von 1.350 Arbeitsstunden pro Jahr führt [PRA09]. Für die Kosten der Versicherung sind ca. 0,25 % vom Wiederbeschaffungswert der Schweißmaschine anzusetzen [PRA09], kalkulatorische Zinsen werden in Höhe von 7 % auf die Hälfte des Wiederbeschaffungswerts veranschlagt; die kalkulatorische Abschreibung wird auf 8 Jahre Nutzungsdauer verteilt und die Kosten für Instandhaltung und Wartung betragen 3 % des Wiederbeschaffungswertes. Weiterhin wurde der Energieverbrauch in der Aufheizphase, im Standby-Betrieb, beim Hobeln und dem eigentlichen Fügevorgang durch eine Vielzahl von Schweißungen ermittelt und anschließend die Energiekosten zu einem Preis von 9,75 Ct pro

Kilowattstunde ohne angewandte Steuern [EUR10] berechnet.[3] Schließlich werden die Kosten für das Zubehör in der jeweils pro Schweißung benötigten Menge berechnet und hierfür die Abschreibung bei ebenfalls 8 Jahren Nutzungsdauer ermittelt.

Der Maschinenstundensatz ergibt sich, indem die Kosten für die Versicherung, die kalkulatorischen Zinsen, die kalkulatorische Abschreibung, die Instandhaltung und Wartung, die Energiekosten und die kalkulatorische Abschreibung des Zubehörs auf die angenommenen 1.350 Stunden pro Jahr verteilt und abschließend addiert werden (Tabelle A-8).

Tabelle A-8: Berechnung des Maschinenstundensatzes (1 Maschine)

		Durchmesser [mm]			
Bezeichnung		**63**	**110**	**160**	**250**
Investitionssumme	€	13.708,00	16.483,00	16.483,00	18.010,00
Nutzungszeit 80%	h / a	1.350,00	1.350,00	1.350,00	1.350,00
Versicherung	€ / h	0,03	0,03	0,03	0,03
kalkulatorische Zinsen	€ / h	0,36	0,43	0,43	0,47
kalkulatorische Abschreibung	€ / h	1,27	1,53	1,53	1,67
Instandhaltung und Wartung	€ / h	0,30	0,37	0,37	0,40
Investition Zubehör	€	3.681,00	4.124,00	4.940,00	6.385,00
kalkulatorische Abschreibung Zubehör	€ / h	0,34	0,38	0,46	0,59
Summe	€ / h	2,37	2,81	2,88	3,22

Berechnung der Gesamtkosten

Für die Berechnung der Gesamtkosten wurde zunächst die Schweißzeit pro Schweißung für die verschiedenen Durchmesserbereiche gemessen. Die Bedienpersonalkosten wurden mit 24 € pro Stunde veranschlagt [PRA09].

Die Kosten für die Rohrreinigung ergeben sich aus der Summe aus Flüssigreiniger und Reinigungstücher, die pro Schweißung verwendet werden und anschließender Multiplikation mit 60 Minuten und Division für die jeweilige Schweißzeit. Die Kosten für den Flüssigreiniger werden auf die verbrauchte Menge berechnet. Diese Menge wurde für 63mm und für 250mm gemessen und für die übrigen Durchmesser interpoliert. Die Kosten für die Neubeschichtung sind den Angaben von [DOM10] und [BRA10] entnommen. Die Schweißkosten je Stunde ergeben sich schließlich aus der Summe des oben berechneten Maschinenstundensatzes, der Bedienpersonalkosten, der Energiekosten und der Kosten für die Rohrreinigung.

Die Schweißkosten je Schweißung ergeben sich durch Division der Schweißkosten je Stunde durch 60 und durch die Schweißzeit pro Schweißung und anschließender Hinzurechnung der Kosten für die Neubeschichtung.

[3] Es handelt sich hierbei um einen nationalen Durchschnittspreis ohne angewandte Steuern für industrielle Verbraucher mittlerer Größe (der zur Ermittlung der Kosten verwendete Preis liegt somit brutto bei 0,13 € / kWh.).

11.2.2 Heizwendelschweißen

Berechnung des mittleren Preises von Schweißmaschinen, Zubehör und Muffen

Zur Bestimmung der Wirtschaftlichkeit des Heizwendelschweißverfahrens wurden die Preise für verschiedene Schweißmaschinen, notwendiges Zubehör und Muffen unterschiedlicher Durchmesser (63mm, 110mm, 160mm, 250mm und 400mm) und unterschiedlichen Materialien (PE, PP) bei verschiedenen Herstellern ermittelt (Tabelle A-8 bis A-9)

Tabelle A-8: Muffenpreise PE-Muffen

	Agru Frank (2008)	Plasson (2009)	Friatec (2009)	Georg Fischer (2009)	
Durchmesser [mm]	Preis [€]				Ø [€]
20	8,20	7,60	7,60	8,55	7,99
25	8,90	8,90	8,90	9,45	9,04
32	9,90	9,80	9,80	10,20	9,93
40	10,20	10,10	10,10	10,65	10,26
50	15,80	15,70	15,70	16,35	15,89
63	16,75	16,60	16,50	17,30	16,79
75	23,30	23,10	23,00	24,45	23,46
90	31,15	31,10	30,90	32,40	31,39
110	37,80	37,80	37,60	39,40	38,15
125	51,80	51,70	51,00	53,80	52,08
140	59,60	59,70	60,00	62,20	60,38
160	68,80	68,80	68,00	71,80	69,35
180	101,30	101,40	0	106,90	103,20
200	117,55	117,40	0	123,60	119,52
225	144,50	144,90	0	151,60	147,00
250	206,25	202,30	0	211,70	206,75
280	292,30	287,40	0	300,70	293,47
315	333,60	327,40	0	334,30	331,77
355	561,35	550,90	0	570,00	560,75
400	681,95	676,70	0	703,00	687,22

Tabelle A-9: Muffenpreise PP-Muffen

	Agru Frank (2008)	Plasson (2009)	Strengweld (2009)	Friatec (2009)	Georg Fischer (2009)	Preise
Durchmesser [mm]			Preis [€]			Ø [€]
20	13,95	Keine PP-Produkte im Programm	Planung, PP-Produkte ins Programm aufzunehmen	Keine PP-Produkte im Programm	10,70	12,33
25	16,00				11,15	13,58
32	17,70				11,30	14,50
40	18,70				12,05	15,38
50	28,65				13,70	21,18
63	30,45				17,90	24,18
75	42,25				23,80	33,03
90	57,75				28,25	43,00
110	70,35				39,40	54,88
125	99,35					99,35
140	112,25					112,25
160	127,55					127,55
180	188,75					188,75
200	212,40					212,40
225	262,00					262,00
250	351,25					351,25
280	441,70					441,70
315	643,85					643,85

Quellen:

- http://www.streng-plastic.com/de/druckformteile
- http://www.frank-gmbh.de/Deutsch/download/preise_2009_komplett.php?navid=93
- http://www.plasson.de/site2006/
- http://www.friatec.de/content/Germany/friatec_neu/Entsorgung/preislisten/refresh

In Abhängigkeit vom Muffendurchmesser werden Durchschnittspreise ermittelt (Abbildung 11-1) und die mittleren Preise für Schweißmaschine und Zubehör ermittelt (Tabelle A-10).

Tabelle A-10: Mittlere Preise der Schweißmaschinen und des Zubehörs

		Durchmesser [mm]			
Bezeichnung		**63**	**110**	**160**	**250**
Grundmaschine	€	3.222,00	3.222,00	3.222,00	3.222,00
Rollenböcke	€	285,80	285,80	285,80	285,80
Handscanner	€	483,30	483,30	483,30	483,30
Universalrohrhalteklemmen	€	644,50	996,33	1087,33	1154,33
Hebelspanner/Gewindespanner	€	110,47	143,67	292,17	418,83
Rohrschälgerät	€	624,70	653,23	763,70	990,67
Flüssigreiniger	€	0,05	0,05	0,05	0,09
Reinigungstücher	€	0,10	0,10	0,10	0,21
Temperaturmessgerät	€	174,20	174,20	174,20	174,20
Schutzeinrichtung	€	668,00	668,00	668,00	668,00
Muffen SDR 11, PE-100	€	16,79	38,15	69,35	206,75

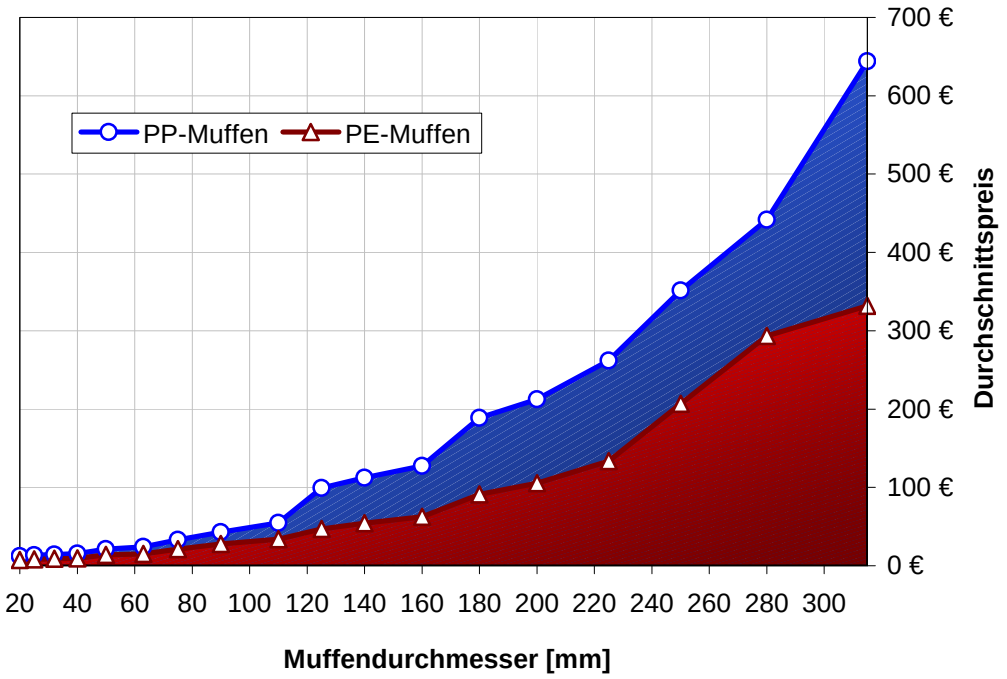


Abbildung 11-1: Durchschnittspreise für PE- und PP-Muffen in Abhängigkeit vom Durchmesser

Bestimmung des Maschinenstundensatzes

Zur Ermittlung des Maschinenstundensatzes wurde zunächst die Investitionssumme als Durchschnittswert der Kosten für eine Schweißmaschine – je nach Durchmesserbereich – berechnet. Für die Nutzungszeit werden 211 Arbeitstage pro Jahr zu je 8 Stunden mit 20 % Ausfallzeit angenommen, was zu einer Nutzungszeit von 1.350 Arbeitsstunden pro Jahr führt [PRA09]. Für die Kosten der Versicherung sind ca. 0,25 % vom Wiederbeschaffungswert der Schweißmaschine anzusetzen [PRA09], kalkulatorische Zinsen werden in Höhe von 7 % auf die Hälfte des Wiederbeschaffungswerts veranschlagt; die kalkulatorische Abschreibung wird auf 8 Jahre Nutzungsdauer verteilt und die Kosten für Instandhaltung und Wartung betragen 3 % des Wiederbeschaffungswertes. Weiterhin wurde der Energieverbrauch beim Fügevorgang durch eine Vielzahl von Schweißungen ermittelt und anschließend die Energiekosten zu einem Preis von 9,75 Ct pro Kilowattstunde ohne angewandte Steuern [EUR10] berechnet.[4] Schließlich werden die Kosten für das Zubehör in der jeweils pro Schweißung benötigten Menge berechnet und hierfür die Abschreibung bei ebenfalls 8 Jahren Nutzungsdauer ermittelt.

Der Maschinenstundensatz ergibt sich, indem die Kosten für die Versicherung, die kalkulatorischen Zinsen, die kalkulatorische Abschreibung, die Instandhaltung und Wartung, die Energiekosten sowie die kalkulatorische Abschreibung des Zubehörs auf die angenommenen 1.350 Stunden pro Jahr verteilt und abschließend addiert werden (Tabelle A-11).

Tabelle A-11: Berechnung des Maschinenstundensatzes

		Durchmesser [mm]			
Bezeichnung		**63**	**110**	**160**	**250**
Investitionssumme	€	3.222,00	3.222,00	3.222,00	3.222,00

[4] Es handelt sich hierbei um einen nationalen Durchschnittspreis ohne angewandte Steuern für industrielle Verbraucher mittlerer Größe (der zur Ermittlung der Kosten verwendete Preis liegt somit bei 0,09 € / kWh.).

Bezeichnung		Durchmesser [mm] 63	110	160	250
Nutzungszeit 80%	h / a	1350,00	1350,00	1350,00	1350,00
Versicherung	€ / h	0,01	0,01	0,01	0,01
kalkulatorische Zinsen	€ / h	0,08	0,08	0,08	0,08
kalkulatorische Abschreibung	€ / h	0,30	0,30	0,30	0,30
Instandhaltung und Wartung	€ / h	0,07	0,07	0,07	0,07
Energiekosten	€ / h	0,01	0,05	0,05	0,10
Investition Zubehör	€	2.991,00	3.405,00	3.755,00	4.175,00
kalkulatorische Abschreibung Zubehör	€ / h	0,28	0,32	0,35	0,39
Summe	€ / h	0,75	0,83	0,86	0,95

Berechnung der Gesamtkosten

Für die Berechnung der Gesamtkosten wurde zunächst die Schweißzeit pro Schweißung für die verschiedenen Durchmesserbereiche gemessen. Die Bedienpersonalkosten wurden mit 24 € pro Stunde veranschlagt [PRA09].

Die Kosten für die Rohrreinigung ergeben sich aus der Summe aus Flüssigreiniger und Reinigungstücher, die pro Schweißung verwendet werden und anschließender Multiplikation mit 60 Minuten und Division für die jeweilige Schweißzeit. Die Schweißkosten je Stunde ergeben sich schließlich aus der Summe des oben berechneten Maschinenstundensatzes, der Bedienpersonalkosten, der Energiekosten und der Kosten für die Rohrreinigung.

Die Schweißkosten je Schweißung ergeben sich durch Division der Schweißkosten je Stunde durch 60 und durch die Schweißzeit pro Schweißung und die Kosten für die Muffen.

11.2.3 Kleben

Die Kosten für PVC-Reiniger liegen bei 14 Euro / 1.000 ml, für PVC-Klebstoff bei 25 Euro / 1.000 g und für Fließpapier bei 16,00 Euro (1 Paket a 100 Blatt). [AQU11a, AQU11b]

In Tabelle A-9 sind die Muffenpreise der PVC-U Klebemuffen hinterlegt. Ähnlich wie bei den PP und PE Muffen steigen die Preise mit zunehmendem Durchmesser stark an.

Tabelle A-9: Muffenpreise PVC-U Klebe-Muffen [BÄN11]

Durchmesser [mm]	Preis [€]	Durchmesser [mm]	Preis [€]
d=8	2,10 €	d=75	13,75 €
d=10	2,10 €	d=90	21,95 €
d=12	2,10 €	d=110	33,15 €
d=16	2,05 €	d=140	62,80 €
d=20	2,05 €	d=160	74,95 €
d=25	2,10 €	d=225	176,15 €
d=32	2,30 €	d=250	292,05 €
d=40	3,40 €	d=280	310,75 €
d=50	4,05 €	d=315	360,70 €
d=63	5,55 €		

Weitere Quellen zu Preisinformationen unter:

- http://www.kwerk-shop.de/?do=detail&kat1=PVC-U%20Rohrsysteme&kat2=Klebefittinge&kat3=Muffe&unterkategorie3=&artikel_nr=72109101012

- http://www.hgt-technik.de/pvc-fittings-und-rohre/muffen/klebemuffen/pvc-klebemuffen-aus-spritzguss/?aoff=15

11.3 Vorgehen bei der Berechnung der Umweltbelastungspunkte

Eine Berechnung der ökologischen Knappheit durch Berechnung von UBP wurde 1978 eingeführt [MÜL78] und immer wieder angepasst, zuletzt im Jahr 2006.

Für die Berechnung werden zunächst ein bestimmter Ort/eine Region und ein bestimmter Zeitraum festgelegt. In die Kalkulation fließen die Istmengen und Toleranzmengen bestimmter Schadstoffe oder Ressourcen ein. Daraus wird der Ökofaktor für den jeweiligen Stoff bzw. Stoffgruppe bestimmt. Anhand dieses Ökofaktors und der Daten aus der Sachbilanz lassen sich schließlich die UBP berechnen. Nachfolgend wird auf die Berechnung des Ökofaktors eingegangen:

$$\text{Ökofaktor} = K \cdot \frac{1}{\text{Normierungsmenge}} \cdot \left(\frac{\text{Istmenge}}{\text{Toleranzmenge}} \right)^2 \cdot 10^{12} \qquad (5\text{-}3)$$

Die Toleranzmengen sind Mengen, welche durch nationale und internationale Normen oder Grenzwerte definiert werden. Sie variieren dementsprechend von Region zu Region – teilweise erheblich. Der tatsächliche Fluss eines Schadstoffes, einer Verbrauchsmenge, einer Ressource oder die Menge einer charakterisierten Umwelteinwirkung in einem Referenzgebiet wird als Istmenge bezeichnet. K ist der Charakterisierungsfaktor eines Schadstoffes oder einer Ressource. Er wird bestimmt, wenn der jeweilige Stoff einer spezifischen Umweltwirkung zugeordnet werden kann. Die Wirkung eines bestimmten Stoffes wird dabei zur Wirkung einer Referenzsubstanz in Beziehung gesetzt. Der Anpassung der jeweiligen Knappheitssituation an die aktuellen Emissionen einer Region dient die Normierung. Im Regelfall sind Istmenge und Normierungsmenge identisch. Sie unterscheiden sich lediglich bei regionaler oder zeitlicher Differenzierung bei der Berechnung. Dann ist die Normierungsmenge der aktuelle Fluss eines Schadstoffes oder einer Ressource zu einer bestimmten Zeit oder an einem bestimmten Ort. Das Quadrat des Quotienten aus Istmenge und Toleranzmenge stellt die Gewichtung dar. Durch diese fallen leichte Überschreitungen der Toleranzmenge weniger stark ins Gewicht als starke Überschreitungen. Es wird also eine zusätzliche Emission stärker gewichtet je höher die Belastungssituation bereits ist. Die Gewichtung basiert in der Regel auf nationalen jährlichen Mengen. Der Faktor 10^{12} führt zu einer besseren Handhabbarkeit sowie Anschaulichkeit und ist für alle Ökofaktoren gleich. Die dimensionslose Einheit des Ökofaktors ist „Umweltbelastungspunkte (UBP) pro Umwelteinwirkungseinheit". [FRI06]

Der Ökofaktor sollte für jede Emissionsart, für den Energieverbrauch, Wasserverbrauch und für Abfallmengen berechnet werden. Ökofaktoren beziehen sich auf ein Referenzgebiet und auf eine Referenzzeit (in der Regel ein Jahr) sowie eine Referenzeinheit, beispielsweise UBP pro Tonne Output. Sie können nicht von einem Land auf ein anderes übertragen werden, bzw. von einer Region auf eine andere. Die Ergebnisse der Sachbilanz (Emissionen, Energieverbrauch, Abfallmengen, Wasserverbrauch), welche den Outputmengen entsprechen, werden mit den zugehörigen Ökofaktoren multipliziert:

$$\text{Umweltbelastungspunkte}_{\text{Stoff(Gruppe)}} = \text{Ökofaktor}_{\text{Stoff(Gruppe)}} \cdot \text{Output}_{\text{Stoff(Gruppe)}}$$

Die Addition der Umweltbelastungspunkte aller Sachbilanzpositionen eines Produktsystems, eines Prozesses oder eines Unternehmens ergibt eine Kennzahl, welche die Umweltbelastung in eindimensionaler Form, nämlich den Umweltbelastungspunkten darstellt:

$$\text{Umweltbelastungspunkte}_{\text{Unternehmen}} = \sum \text{Ökofaktoren}_{\text{Stoffgruppen}}$$

11.4 Fragebogen Heizwendelschweißen

1) Allgemein

a) Welchem Unternehmensbereich gehört Ihr Betrieb an?

- ☐ Verlegeunternehmen (Anwender)
- ☐ Schweißmaschinenhersteller
- ☐ Rohrhersteller
- ☐ Sonstige _____

b) Wieviele Angestellte sind in Ihrem Betrieb in etwa beschäftigt? _____

c) Welche Position nehmen Sie in Ihrer Firma ein? _____

2) Rohre

a) Welche Rohrwerkstoffe werden in Ihrem Betrieb hauptsächlich über Heizwendelmuffen gechweißt?
(bei Mehrfachnennungen bitte den prozentualen Anteil angeben)

- ☐ Polyethylen (PE) _____%
- ☐ Polypropylen (PP) _____%
- ☐ Sonstige _____

b) Welche Rohrgrößen werden in Ihrem Betrieb hauptsächlich über Heizwendelmuffen geschweißt?
(bei Mehrfachnennungen bitte den prozentualen Anteil angeben)

- ☐ D 63 _____%
- ☐ D 110 _____%
- ☐ D 160 _____%
- ☐ D 250 _____%
- ☐ Sonstige _____

c) Verwenden Sie Ringbund- oder Stangenware?
(bei Mehrfachnennungen bitte den prozentualen Anteil angeben)

- ☐ Ringbundware _____%
- ☐ Stangenware _____%

3) Schweißmaschinen

a) Nach ca. welchem Zeitraum müssen die verwendeten Heizwendel-Schweißmaschinen ersetzt werden und was sind die ausschlaggebenden Gründe hierfür?

nach ca. _____ Jahren, da...

- ☐ Gerät defekt
- ☐ Gerät nicht mehr auf dem aktuellen Stand der Technik
- ☐ Sonstige _____

4) Schweißzubehör

a) Welches Schweißzubehör für das Heizwendelschweißen ist insgesamt in Ihrem Betrieb vorhanden?
Wenn möglich, bitte Anzahl eintragen.

_____ Rollböcke
_____ Rohrhalterungen
_____ Runddrückklemmen
_____ Flüssigreiniger/Reinigungstücher
_____ Schutzeinrichtungen (Zelt, Schirm, etc.)
_____ Rohrschäler
_____ Handschaber
_____ _____ (Sonstige)

b) Welches Schweißzubehör wird hiervon regelmäßig im laufenden Schweißbetrieb eingesetzt?

- ☐ Rollböcke
- ☐ Rohrhalterungen
- ☐ Runddrückklemmen
- ☐ Flüssigreiniger + Reinigungstücher
- ☐ Schutzeinrichtungen (Zelt, Schirm, etc.)
- ☐ Rohrschäler
- ☐ Handschaber
- ☐ Sonstige _____

5) <u>Schweißbetrieb</u>

a) Werden in Ihrem Betrieb verschiedene Schweißverfahren durchgeführt?
Falls ja, wie wird im Einzelfall entschieden, welches Schweißverfahren angewendet wird?

☐ nein

☐ ja, Entscheidung ☐ durch Vorgesetzten

☐ aufgrund der Firmenphilosophie

☐ durch externe Vorgaben (z.B. Ausschreibung, Auftraggeber, Pläne, etc.)

☐ Sonstige _____

b) Wo werden in Ihrem Betrieb hauptsächlich Heizwendelschweißungen durchgeführt?
(bei Mehrfachnennungen bitte den prozentualen Anteil angeben)

☐ Baustelle _____%

☐ Werkstatt _____%

☐ Sonstige _____

c) Wieviele Personen sind in der Regel an einer Heizwendelschweißung beteiligt?

_____

d) Wieviele Heizwendelschweißungen können durchschnittlich pro Tag (pro Rohrdurchmesser) durchgeführt werden bzw. welche Anzahl an Schweißungen pro Tag ist in Ihren Augen realistisch?

D 63 _____ D 160 _____

D 110 _____ D 250 _____

Sonstige _____ _____

11.5 Fragebogen Heizelementstumpfschweißen

1) Allgemein

a) Welchem Unternehmensbereich gehört Ihr Betrieb an?

- ☐ Verlegeunternehmen (Anwender)
- ☐ Schweißmaschinenhersteller
- ☐ Rohrhersteller
- ☐ Sonstige _____

b) Wie viele Angestellte sind in Ihrem Betrieb in etwa beschäftigt? _____

c) Welche Position nehmen Sie in Ihrer Firma ein? _____

2) Rohre

a) Welche Rohrwerkstoffe werden in Ihrem Betrieb hauptsächlich stumpfgeschweißt?
(bei Mehrfachnennungen bitte den prozentualen Anteil angeben)

- ☐ Polyethylen (PE) _____%
- ☐ Polypropylen (PP) _____%
- ☐ Polyvinylchlorid (PVC) _____%
- ☐ Sonstige _____

b) Welche Rohrgrößen werden in Ihrem Betrieb hauptsächlich stumpfgeschweißt?
(bei Mehrfachnennungen bitte den prozentualen Anteil angeben)

- ☐ D 63 _____%
- ☐ D 110 _____%
- ☐ D 160 _____%
- ☐ D 250 _____%
- ☐ Sonstige _____

c) Verwenden Sie Ringbund- oder Stangenware?
(bei Mehrfachnennungen bitte den prozentualen Anteil angeben)

- ☐ Ringbundware _____%
- ☐ Stangenware _____%

3) Schweißmaschinen

a) Welche Schweißmaschinentypen werden in Ihrem Betrieb hauptsächlich eingesetzt?
Bitte, wenn möglich die Größe und bei Mehrfachnennungen den prozentualen Anteil angeben.

☐ mechanische HS-Maschinen — Heizelement-∅: _____ _____%

☐ hydraulische HS-Maschinen — Heizelement-∅: _____ _____%

☐ CNC-gesteuerte HS-Maschinen — Heizelement-∅: _____ _____%

☐ Sonstige _____

b) Nach ca. welchem Zeitraum müssen die verwendeten Heizelemente neu beschichtet werden?

_____

c) Nach ca. welchem Zeitraum müssen die verwendeten Schweißmaschinen komplett ersetzt werden und was sind die ausschlaggebenden Gründe hierfür?

nach ca. _____ Jahren, da...

☐ Gerät defekt

☐ Gerät nicht mehr auf dem aktuellen Stand der Technik

☐ Sonstige _____

4) Schweißzubehör

a) Welches Schweißzubehör für das Heizelementstumpfschweißen ist insgesamt in Ihrem Betrieb vorhanden? Wenn möglich, bitte Anzahl eintragen.

_____ Rollböcke

_____ Flüssigreiniger + Reinigungstücher

_____ Temperaturmessgerät

_____ Spanneinsätze

_____ Schutzeinrichtungen (Zelt, Schirm, etc.)

_____ _____ (Sonstige)

b) Welches Schweißzubehör wird hiervon regelmäßig im laufenden Schweißbetrieb eingesetzt?

☐ Rollböcke

☐ Flüssigreiniger + Reinigungstücher

☐ Temperaturmessgerät

☐ Spanneinsätze

☐ Schutzeinrichtungen (Zelt, Schirm, etc.)

☐ Sonstige _____

5) <u>Schweißbetrieb</u>

a) Werden in Ihrem Betrieb verschiedene Schweißverfahren durchgeführt?
Falls ja, wie wird im Einzelfall entschieden, welches Schweißverfahren angewendet wird?

☐ nein

☐ ja, Entscheidung ☐ durch Vorgesetzten

☐ aufgrund der Firmenphilosophie

☐ durch externe Vorgaben (z.B. Ausschreibung, Auftraggeber, Pläne, etc.)

☐ Sonstige _____

b) Wo werden in Ihrem Betrieb hauptsächlich Heizelementstumpfschweißungen durchgeführt?
(bei Mehrfachnennungen bitte den prozentualen Anteil angeben)

☐ Baustelle _____%

☐ Werkstatt _____%

☐ Sonstige _____

c) Wie viele Personen sind in der Regel an einer Heizelementstumpfschweißung beteiligt?

_____

d) Beim Schweißen verschiedener Rohrdurchmesser an einem Arbeitstag, ...

☐ ...werden verschiedene Schweißmaschinen mit den entsprechenden Durchmessern eingesetzt.

☐ ...wird mit einer großen Schweißmaschine und entsprechenden Reduzierungseinsätzen gearbeitet.

☐ ...wird folgende Lösung benutzt: _____

e) Wie viele Heizelementstumpfschweißungen können durchschnittlich pro Tag (pro Rohrdurchmesser) durchgeführt werden bzw. welche Anzahl an Schweißungen pro Tag ist in Ihren Augen realistisch?

D 63 _____ D 110 _____

D 160 _____ D 250 _____

Sonstige _____