



DIPLOMARBEIT
Untersuchung der Eigenschaften
verdichteter und nicht verdichteter
Muffen für das Elektroschrumpfschweißen

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades
eines
Diplom-Ingenieur (Dipl.-Ing.)

eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

Patrick Grünbeck

Matrikelnummer: 11771109

unter der Leitung von

Dipl.-Ing. Dr.techn. Thomas Koch

(E308 Institut für Werkstoffwissenschaft und Werkstofftechnologie,
Bereich: Polymer- und Verbundwerkstoffe)

und

**Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.mont. Vasiliki-Maria
Archodoulaki**

(E308 Institut für Werkstoffwissenschaft und Werkstofftechnologie,
Bereich: Polymer- und Verbundwerkstoffe)

Ort und Datum

Unterschrift



Ich habe zur Kenntnis genommen, dass ich zur Drucklegung meiner Arbeit unter der Bezeichnung

Diplomarbeit

nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin.

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass die vorliegende Arbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen von mir selbstständig erstellt wurde. Alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur, sind in dieser Arbeit genannt und aufgelistet. Die aus den Quellen wörtlich entnommenen Stellen, sind als solche kenntlich gemacht.

Das Thema dieser Arbeit wurde von mir bisher weder im In- noch Ausland einem_r Beurteiler_in zur Begutachtung in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt. Diese Arbeit stimmt mit der von den Begutachter_innen beurteilten Arbeit überein. Ich nehme zur Kenntnis, dass die vorgelegte Arbeit mit geeigneten und dem derzeitigen Stand der Technik entsprechenden Mitteln (Plagiat-Erkennungssoftware) elektronisch-technisch überprüft wird. Dies stellt einerseits sicher, dass bei der Erstellung der vorgelegten Arbeit die hohen Qualitätsvorgaben im Rahmen der geltenden Regeln zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis „Code of Conduct“ an der TU Wien eingehalten wurden. Zum anderen werden durch einen Abgleich mit anderen studentischen Abschlussarbeiten Verletzungen meines persönlichen Urheberrechts vermieden.

Ort und Datum

Unterschrift

Danksagung

Ich bedanke mich bei meinem Betreuer, Thomas Koch, für die Möglichkeit, unter seiner Leitung, die Arbeit durchgeführt haben zu können. Seine stetige Unterstützung, konstruktive Kritik und die Hinweise beim Verfassen der Arbeit haben mich während des gesamten Forschungs- und Schreibprozesses maßgeblich begleitet. Zusätzlich möchte ich mich noch bei Frau Professor Vasiliki-Maria Archodoulaki bedanken, die es mir ermöglicht hat, in ihrem Forschungsbereich die Arbeit durchzuführen und für die Bereitschaft zur Begutachtung meiner Arbeit.

Ein besonderer Dank geht an Martin Lehner, Leiter der Qualitätssicherung und Technologie, der mich durch seine langjährige Erfahrung und große Hilfsbereitschaft sehr unterstützt hat. Ebenso bin ich der Firma Geberit zutiefst dankbar für die Unterstützung und vor allem die Möglichkeit, meine Arbeitszeit der Erforschung von E-Muffen und unterschiedlichen Vorgängen bei der Herstellung widmen zu dürfen.

Ich möchte mich auch bei meiner Familie bedanken, insbesondere bei meinen Eltern und meiner Freundin, die immer an mich geglaubt haben und mich in allen Phasen meiner akademischen Laufbahn unterstützt haben.

Kurzfassung

Die Funktionsweise der Elektroschrumpfschweiß-Muffe (E-Muffe) basiert auf der Schrumpfung der Muffe und dem Aufschmelzen der zu verbindenden Elemente. Der Herstellungsprozess besteht aus vielen einzelnen Prozessschritten. Aus wirtschaftlicher Sicht wurde im Jahr 2020 bei der Firma Geberit in Pottenbrunn einer der Prozesse, nämlich die Lagerung im Klimaraum, durch das Verdichten ersetzt. Diese Änderung führte zu einem komplett anderen Ablauf bei der Herstellung und dadurch auch zu einem anderen Zustand der E-Muffe vor der 16-Taktanlage, welche in 16 Schritten unter anderem den Draht in die E-Muffe einbringt und mit den Kontaktstellen verschweißt. Damit gewährleistet wird, dass das Endprodukt nach der Verarbeitung in der 16-Taktanlage die gleichen Eigenschaften zeigt, wie die Klimaraum gelagerten E-Muffen wurden Untersuchungen der E-Muffe mit Draht, ohne Draht und zu verschiedenen Verarbeitungszeitpunkten für unterschiedliche Temperaturen durchgeführt. Anhand der Ergebnisse sieht man, dass die verdichteten E-Muffen durchaus andere Eigenschaften zu verschiedenen Zeitpunkten aufweisen, zum Beispiel, eine geringere Schwindung was den Außendurchmesser betrifft, aber das Endprodukt nach der 16-Taktanlage, durch das Einbringen des Drahtes wieder sehr ähnliches Verhalten zeigt. In Zukunft wird es mittels der Ergebnisse möglich sein, etwaige Probleme schon vorab zu berücksichtigen.

Abstract

The function of the electroshrink sleeve (e-sleeve) is based on the shrinkage of the sleeve and the melting of the elements to be joined. The manufacturing process consists of many individual process steps. From an economic point of view, one of the processes at Geberit in Pottenbrunn, namely storage in the climate chamber, was replaced by compression in 2020. This change led to a completely different production process and therefore also to a different state of the e-sleeve upstream of the 16-cycle system, which, among other things, inserts the wire into the e-sleeve in 16 steps and welds it to the contact points. To ensure that the end product after processing in the 16-cycle plant has the same properties as the e-sleeves stored in the climatic chamber, tests were carried out on the e-sleeve with wire, without wire and at different processing times for different temperatures. The results show that the compressed e-sleeves exhibit different properties at different times, for example, a lower shrinkage in terms of the outer diameter, but the end product after the 16-cycle plant shows very similar behavior again due to the introduction of the wire. In future, the results will make it possible to take any problems into account in advance.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	4
Abstract	5
1 Einleitung	12
2 Grundlagen	15
2.1 Prozessflussdiagramm und Definition der Maße	15
2.2 Eigenspannungen	17
2.3 Amorpher Zustand	18
2.4 Kristalliner Zustand	19
2.5 Sphärolithe	19
2.6 Teilkristalliner Zustand	19
2.6.1 Teilkristalline Struktur unter Energiebetrachtung	21
2.6.2 Interlamellare Scherung	21
2.7 Polyethylen Typen	22
2.7.1 Polyethylen hoher Dichte	24
2.7.2 PE 80 - Zeitstandinnendruckversuch	24
2.8 Schweißverfahren	24
2.8.1 Heizelementschweißen	26
2.8.2 Warmgas-Fächelschweißen	26
2.8.3 Schweißextruder	26
2.8.4 Ultraschallschweißen	29
2.8.5 Vibrationsschweißen	29
2.8.6 Elektroschrumpfschweißen	30
2.9 Kunststoff Viskoelastizität	31
2.10 Dynamisch mechanische Analyse	31
2.10.1 Deformationsprozess in Abhängigkeit der Spannung	31
3 Methodik	33
3.1 Herstellung der Rohrsegmente für die Eigenspannungsmessungen . .	33
3.2 Vermessung der E-Muffen	35
3.3 Plattenpressen	35
3.4 DMA	36
3.5 TMA	36
3.6 Zugversuch	36
3.7 Formbeständigkeit unter Wärmeeinfluss	36
3.8 DSC-Analyse	37
3.9 Berechnung der Eigenspannungen	37

3.10	Eigenspannungsmessung mittels Ringschlitzversuch	37
3.10.1	Berechnung der Eigenspannung über die Wanddicke	40
3.11	Temperaturverhalten der E-Muffen vor der Verarbeitung in der 16-Taktanlage	41
3.12	Temperaturverhalten der E-Muffen nach der Verarbeitung in der 16-Taktanlage	42
4	Ergebnisse	42
4.1	Zugversuch bei Raumtemperatur	42
4.2	DSC	43
4.3	DMA	44
4.4	TMA	44
4.5	Eigenspannungen der E-Muffen Segmente mittels Ring-Schlitz Versuch	46
4.6	Eigenspannungen der E-Muffen Segmente mittels Ring-Schlitz Versuch unter Wärmeeinfluss	49
4.7	Temperaturverhalten der E-Muffen und Segmente vor der Verarbeitung in der 16-Taktanlage	52
4.8	Temperaturverhalten der E-Muffen nach der Verarbeitung in der 16-Taktanlage	55
4.9	Einfluss des Drahtes auf das Schrumpfverhalten	61
5	Zusammenfassende Betrachtung	62

Abbildungsverzeichnis

1	E-Muffe im fertigen Zustand	13
2	16-Taktanlage zur Herstellung der E-Muffen	14
3	Prozessschritte für die 16-Taktanlage	15
4	Prozessflussdiagramm zur Visualisierung der einzelnen Prozessschritte	15
5	Definition, welche Bezeichnungen welche Position an der E-Muffe definieren	16
6	Spannungszustände in dem extrudierten Rohr (a) exponentieller Ansatz (b) linearer Ansatz [1]	17
7	Eigenspannungsabbau für unterschiedliche Temperaturen [4]	18
8	Spannungs-Dehnungsdiagramm für unterschiedliche Überstrukturen [10]	20
9	(a) interlamellare Gleitung (b) interlamellare Separation (c) Stapel- rotation [7]	22
10	Strukturen und Verzweigungen von Polyethylentypen [14]	23
11	Bimodales PE-HD [14]	24
12	Zeitstandkurven für einen Rohrwerkstoff PE-HD [22]	25
13	Heizelementschweißen [23]	27
14	Warmgasfächelschweißen [23]	28
15	Schweißextruder [23]	28
16	Ultraschallschweißen [23]	29
17	Prinzipbild für das Elektroschrumpfschweißen [25]	30
18	Deformation als Funktion der Zeit für unterschiedliche Temperatu- ren. Aus den gefitteten Kurven wurde dann der E-Modul ermittelt [32]	32
19	Einfluss der Kristallinität und des Molekulargewichtes auf die DMA Ergebnisse [33]	32
20	DMA Kurve, welche die unterschiedlichen Bereiche Umwandlungs- temperaturen und Abhängigkeiten zuordnet [33]	33
21	Aufbau zur Herstellung der E-Muffen Segmente, mittels Drehbank und Abstichmesser	34
22	Vermessung der E-Muffen Segmente mittels dem Vermessungsgerät der Firma Keyence. Verwendete Methode war die drei Punkte Me- thode und der mittlere Durchmesser wurde gewählt	35
23	Plattenpresse Collin P200P, mit welcher die Platten hergestellt wur- den	36
24	Rohrsegment zur Untersuchung der Eigenspannungen nach dem Her- ausschneiden eines 120° Stückes	38
25	Vermessungsmaschine zur Ermittlung des Außendurchmessers	39
26	Vorrichtung zur Herstellung der Segmente mit 120° Winkel Ausschnitt	40

27	Prozessflussdiagramm mit Markierungen beim Aufweitprozess und der 16-Taktanlage	42
28	Ergebnisse der DSC-Messungen, beginnend an der Innenwand 1–1 bis zur Mitte 1–5 der Wandstärke	43
29	Ergebnisse der DSC-Messungen, beginnend an der Außenwand 2–1 bis zur Mitte 2–5 der Wandstärke	44
30	DMA Ergebnisse für PE 100 [25]	45
31	Speichermodul der Proben, welche aus gepressten Platten hergestellt wurden	45
32	TMA Ergebnisse für die Längsrichtung und die Umfangsrichtung der E-Muffen Zustände aufgeweitet, verdichtet und Rohling	46
33	Eigenspannungsmittelwerte für verdichtete, unbearbeitete, aufgeweitete, Klimaraum E-Muffen und aufgeweitete E-Muffen gelagert im Wärmeofen, normiert über die Wanddicke	47
34	Eigenspannungsmittelwerte für verdichtete, unbearbeitete, aufgeweitete und Klimaraum E-Muffen, normiert über die Wanddicke	48
35	Eigenspannungsverlauf für PE-100 Rohre [1]	48
36	Die Proben 72 und 78_1 wurden folgenden Prozessschritten unterzogen. Die Segmente wurden bei Raumtemperatur vermessen (0), danach im Wärmeofen bei 110 °C für 20 Minuten gelagert und dann erneut vermessen (1). Aus den ausgekühlten Segmenten wurden dann 120° Stücke herausgeschnitten und nach 20 Minuten erneut vermessen (2)	49
37	Die Proben 73 und 79 wurden folgenden Prozessschritten unterzogen. Die Segmente wurden bei Raumtemperatur vermessen (0), danach wurde ein 120° Stück aus dem Segment geschnitten und nach 20 Minuten vermessen (1). Anschließend wurden die Segmente im Wärmeofen bei 110 °C für 20 Minuten gelagert und im ausgekühlten Zustand vermessen(2). Probe 78_2 wurde bei Raumtemperatur vermessen (0), danach im Wärmeofen bei 110 °C für 20 Minuten gelagert und erneut vermessen (1). Anschließend wurde aus dem Segment ein 120° Stück herausgeschnitten und vermessen (2). Darauf folgend wurde das Segment nochmals bei 110 °C für 20 Minuten gelagert und vermessen (3).	50
38	Schwindung der E-Muffen für unterschiedliche Temperaturen für 30 Minuten im Wärmeofen und die dazugehörige Legende	53
39	Schwindung der E-Muffen bei 110 °C für 10 Minuten im Wärmeofen	54
40	Außendurchmesser der E-Muffe bei einer Lagerung von –20 °C und einer anschließenden Lagerung bei RT	55
41	Schwindung der E-Muffen nach einer Lagerung bei Raumtemperatur	56

42	Schwindung der E-Muffen nach einer Wärmelagerung bei 30 °C für unterschiedliche Zeiten	56
43	Schwindung der E-Muffen nach einer Wärmelagerung bei 40 °C für unterschiedliche Zeiten	57
44	Schwindung der E-Muffen nach einer Wärmelagerung bei 50 °C für 30 Minuten	58
45	Längenausdehnung der E-Muffen für unterschiedliche Temperaturen und unterschiedliche Zeiten im Wärmeofen und die dazugehörige Legende	59
46	Längenunterschiede der unterschiedlichen E-Muffen Zustände nach 110 °C für 10 Minuten im Wärmeofen.	60
47	Schwindung der E-Muffen nach Verarbeitung in der 16-Taktanlage bei einer Lagerung von 55 °C für 24 h	60
48	Schwindungsuntersuchungen bei verschiedenen Temperaturen im Vergleich von E-Muffen ohne Draht und einer E-Muffe mit Draht und die dazugehörige Legende	61

Tabellenverzeichnis

1	Parameter für die Plattenherstellung	35
2	Innendurchmesser vor und nach der Formbeständigkeitsprüfung. Prüf- temperatur betrug 55 °C. Das (D) bedeutet, dass bei diesen E- Muffen der Draht in die E-Muffe eingebracht wurde	51
3	Freischrumpf der fertigen E-Muffen	57
4	Unterschiedlichen Schrumpfungen mit und ohne Draht bei unter- schiedlichen Temperaturen	62

1 Einleitung

Die Funktionsweise der Elektroschrumpfschweiß-Muffe (E-Muffe) basiert auf der Schrumpfung der Muffe und dem Aufschmelzen der zu verbindenden Elemente. Dabei muss die E-Muffe neben der Einhaltung der geometrischen Abmessungen zwei weitere Anforderungen erfüllen, die Schrumpfung von mindestens 3 % und die Formbeständigkeit unter Wärmeeinfluss (55 °C für 24 h) müssen ebenfalls berücksichtigt werden. Um die Schrumpfung bei Zuführung von Wärme von mindestens 3 % zu erreichen, muss die extrudierte E-Muffe aufgeweitet werden. Dies wird gewährleistet durch das Aufpressen der 115 °C warmen E-Muffe auf einen Metaldorn mit größer werdendem Durchmesser und dem schockartigen Abkühlen auf 16 °C. Das schockartige Abkühlen auf 16 °C wird durch ein Wasserbad gewährleistet, in welchem sich die Dorne befinden. Anschließend müssen die aufgeweiteten E-Muffen in einem Klimaraum gelagert werden (36 h bei 17 °C) um die Anforderungen, Schrumpfung und Formbeständigkeit unter Wärmeeinfluss, erfüllen zu können. Ohne die Lagerung in genanntem Klimaraum wären diese nicht verwendbar, da sie die geometrischen Anforderungen nicht erfüllen würden. Die Schwankungen in den geometrischen Abmessungen wären zu groß und eine Weiterverarbeitung würde nur unter erheblichen Aufwand möglich sein. Die Lagerung ist platz- und zeitintensiv, daher wurde der Vorgang des Verdichtens als Ersatz getestet und für gut befunden. Beim Verdichten wird die aufgeweitete E-Muffe direkt im Anschluss, ungefähr 120 Sekunden nach dem Wasserbad, durch einen verjüngenden Zylinder gepresst. Durch diese anschließende Verdichtung können die erforderliche Schrumpfung und Formbeständigkeit unter Wärmeeinfluss erreicht werden.

Anschließend an diese Prozessschritte, erfolgt immer eine Weiterverarbeitung in einer 16-Taktanlage (siehe Abbildung 2 und Abbildung 3), welche wie der Name schon sagt, in 16 Schritten die E-Muffe nach dem Verdichten oder nach dem Klimaraum zu einem fertigen Produkt verarbeitet. Konstante geometrische Eigenschaften bei Raumtemperatur (22 °C) als auch bei erhöhten Temperaturen (55 °C) sowie ein Schrumpf von mindestens 3 % sind für das fertige Produkt essenziell. Damit die 16-Taktanlage die E-Muffen verarbeiten kann, gibt es einen Toleranzbereich für den Außendurchmesser und den Innendurchmesser. In der 16-Taktanlage wird in den E-Muffen-Querschnitt ein Draht eingebracht, welcher die Aufgabe hat, Wärme in der E-Muffe zu erzeugen und so den Schweißvorgang einzuleiten (siehe Abbildung 1). Der Draht dient auch gleichzeitig als Skelett, welches dem natürlichen Schrumpf der E-Muffen entgegenwirkt.

Um das Verhalten der E-Muffen verstehen zu können und zukünftige Weiterentwicklungen gewährleisten zu können, sind Untersuchungen notwendig. Diese müssen bei verschiedenen Temperaturen durchgeführt werden, weil die E-Muffen-Eigenschaften sehr temperatursensibel sind. Weiters müssen die E-Muffen den unterschiedlichen Temperaturen verschieden lang ausgesetzt werden, daher handelt

es sich sowohl um eine Temperatur- als auch eine Zeitabhängigkeit ($f(T, t)$).

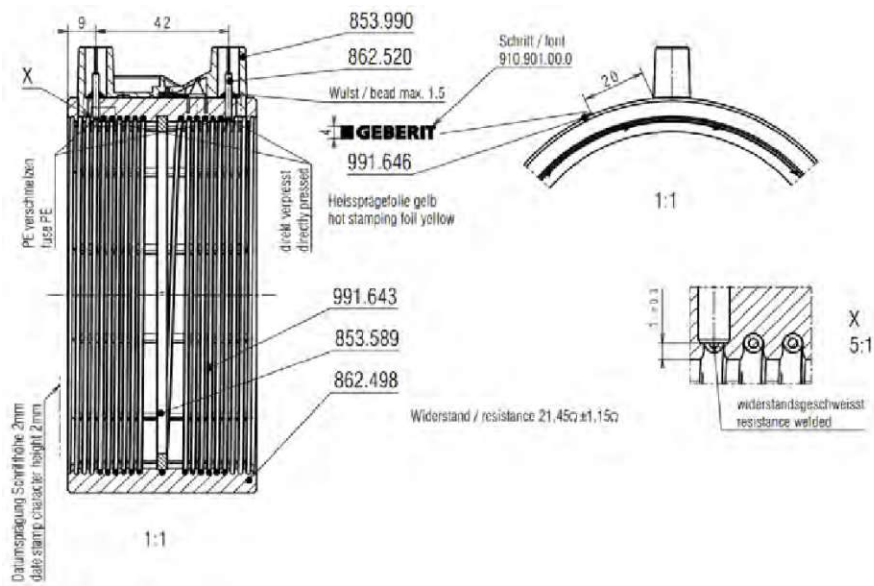


Abbildung 1: E-Muffe im fertigen Zustand

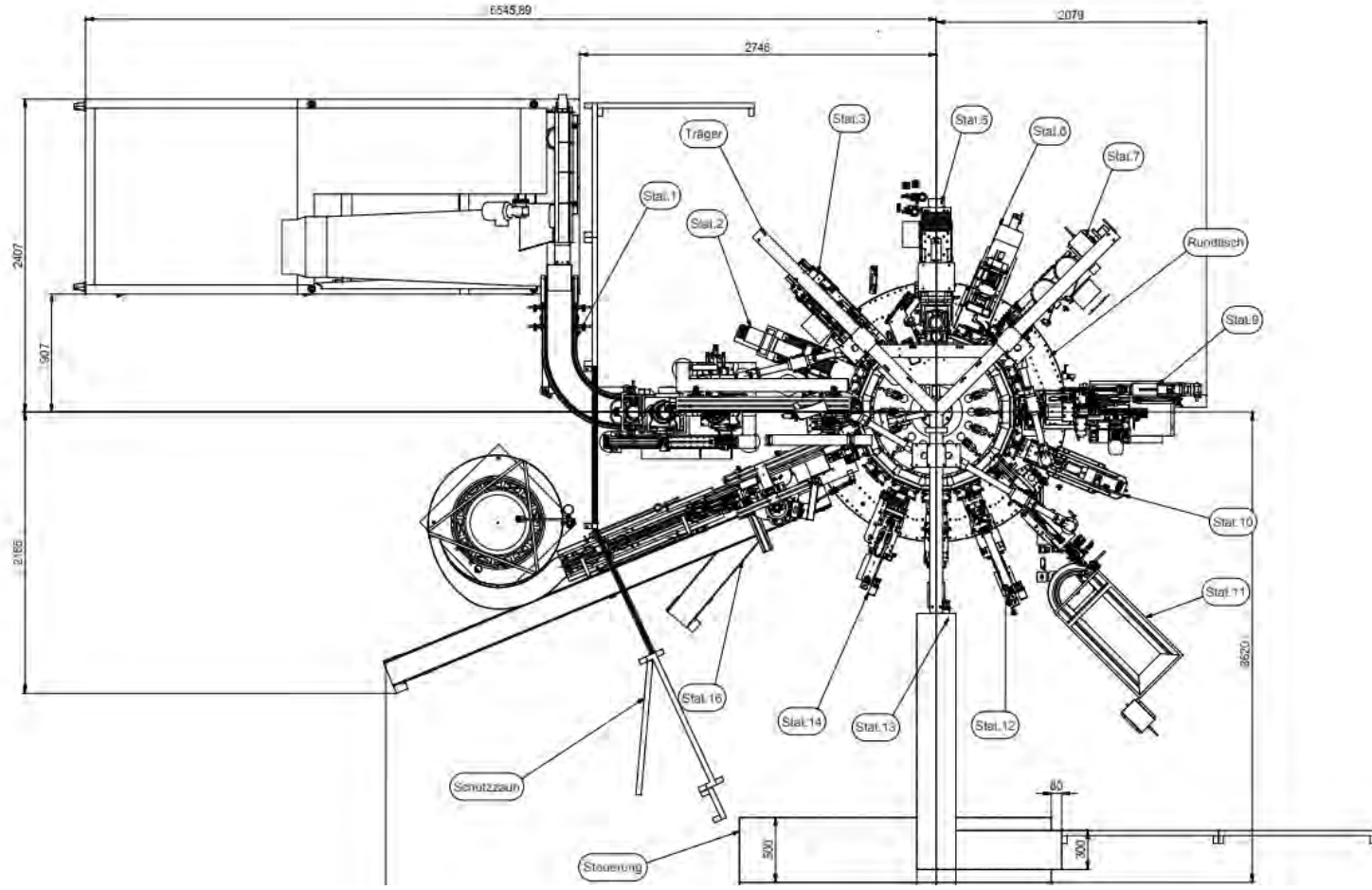


Abbildung 2: 16-Taktanlage zur Herstellung der E-Muffen

1	70041707	Schutzzaun	Schutzzaun	gem. Angebot HOL143056	-	-	Robotunits
1	70037292	Entladen, Anschlagmont (70033622)	Stat.16	Stat.16	-	-	
1	70036839	Schlusskontrolle (70033437)	Stat.14	Stat.14	-	-	
1	70037291	Berührungszapfen hinten wärmen (70034770)	Stat.13	Stat.13	-	-	
1	70037290	Berührungszapfen vorwärmen, (70032734)	Stat.12	Stat.12	-	-	
1	70035605	Berührungsschutzmontage (70032907)	Stat.11	Stat.11	-	-	
1	70037400	Schweißen (70029884)	Stat.10	Stat.10	-	-	
1	70035599	Draht einspulen (70029871)	Stat.9	Stat.9	-	-	
1	70031962	Stecker montieren light (70029883)	Stat.7	Stat.7	-	-	
1	70035571	Anfasen und Mitteinut einlechen (70034340)	Stat.6	Stat.6	-	-	
1	70035566	Lamellenschneiden, Bohren 3-5mm (70028688)	Stat.5	Stat.5	-	-	
1	70036316	Indikator fräsen (70029758)	Stat.4	Stat.04	-	-	
1	70032023	Drahtnute drehen light aus 70024880	Stat.3	E-Muffe, Stat3	-	-	
1	70031959	Aus- Plandrehen, Anfasen (70028542)	Stat.2	E-Muffe, Stat.2	-	-	
1	70035535	Muffenzuführung (70035532)	Stat.1	Stat.1	-	-	
1	70031964	Aufbau Rundschafttisch (70028393)	Rundtisch	Rundtisch	-	-	
1	70035597	Träger (70029688)	Träger	-	-	-	
1	70038803	Steuerung	Steuerung	-	-	-	
1	70028870	Fixierstrebe_links	100	-	-	-	
Stk.	Artikel-Nr.	Artikelbezeichnung	Pos.	Bestelltext	Bestellnummer	H-Nr.	Lieferant

Abbildung 3: Prozessschritte für die 16-Taktanlage

2 Grundlagen

2.1 Prozessflussdiagramm und Definition der Maße

In Abbildung 4 sind die einzelnen Prozessschritte zu erkennen und auch wo in Zukunft die Substitution stattfinden wird, es wird der Klimaraum durch das Verdichten ersetzt werden. Um im Weiteren eine bessere Übersichtlichkeit zu haben, wird zu den jeweiligen Tests der letzte, durchgeführte Schritt angegeben. Weiters ist in Abbildung 5 zu erkennen, welche Bezeichnung (Länge, Dicke, Außendurchmesser), welche Position auf der E-Muffe definiert. Der Begriff E-Muffe bezieht sich in dieser Arbeit auf den E-Muffen-Zustand ohne Draht. Wurden Untersuchungen an E-Muffen mit Draht durchgeführt, wird das im jeweiligen Kapitel extra erwähnt.

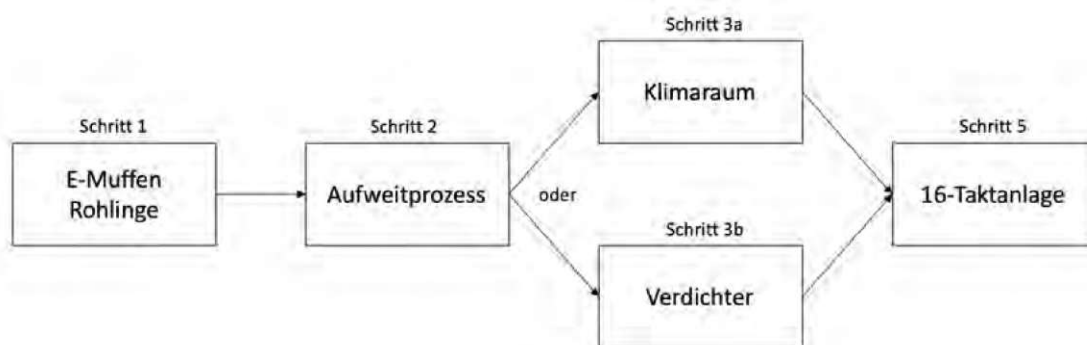


Abbildung 4: Prozessflussdiagramm zur Visualisierung der einzelnen Prozessschritte

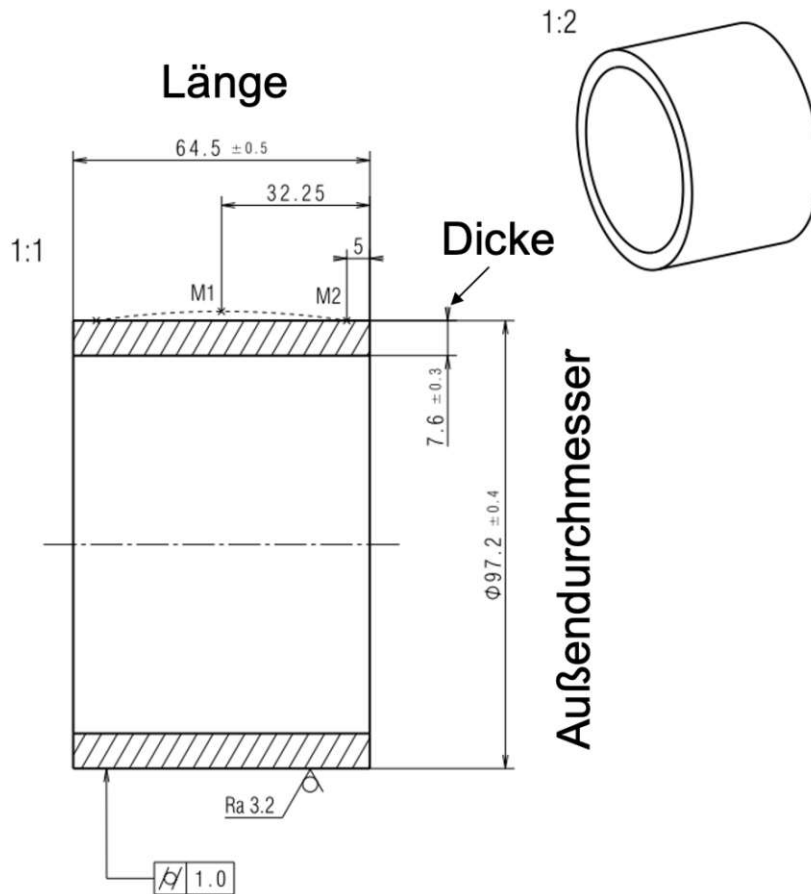


Abbildung 5: Definition, welche Bezeichnungen welche Position an der E-Muffe definieren

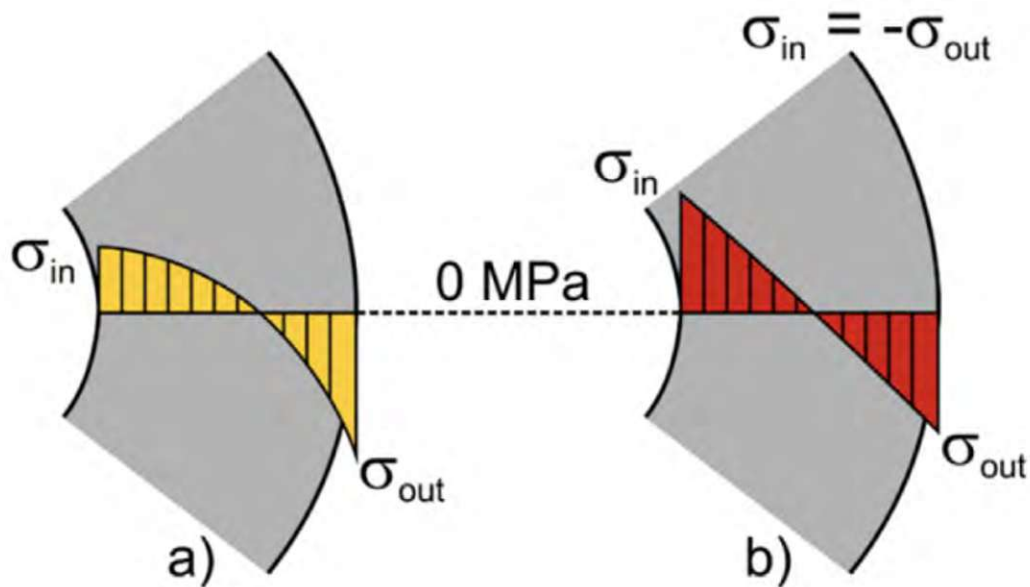


Abbildung 6: Spannungszustände in dem extrudierten Rohr (a) exponentieller Ansatz (b) linearer Ansatz [1]

2.2 Eigenspannungen

Die Eigenspannungen in den E-Muffen, welche mittels Extrusionsverfahren hergestellt werden, entstehen beim Abkühlen in der Kalibrierungseinheit und dem Kühlbecken durch einen Temperaturgradienten über die Wanddicke. An der Außenseite des Rohres befindet sich Wasser als Kühlmedium und im Inneren ist das Kühlmedium Luft. Diese beiden Kühlmedien haben sehr unterschiedliche Wärmeleitkoeffizienten und führen daher zu dem oben erwähnten Temperaturgradienten [1, 2].

Weiters bewirkt der Temperaturgradient unterschiedliche kristalline Überstrukturen im inneren und äußeren Bereich. Dies führt zu Zugspannungen an der Innenseite und zu Druckspannungen an der Außenseite. In Abbildung 6 ist der Spannungsverlauf im Rohr zu sehen. Der exponentielle Ansatz ist der meist verwendete und anerkannte, der lineare Ansatz dient als vereinfachte Variante [1].

Die entstandenen Eigenspannungen treten sowohl in radialer als auch longitudinaler Richtung auf. Die Entstehung der Spannungen im Gefüge sind nur durch die langen Molekülketten im PE Gefüge möglich. Die unterschiedlichen Bereiche im Gefüge (amorph oder kristallin) sind durch Tie-Moleküle und Moleküle, welche von einem Bereich zum nächsten ragen, miteinander verbunden [3]. Durch die Messung der Eigenspannungen in alten Rohren, welche schon länger in Gebrauch

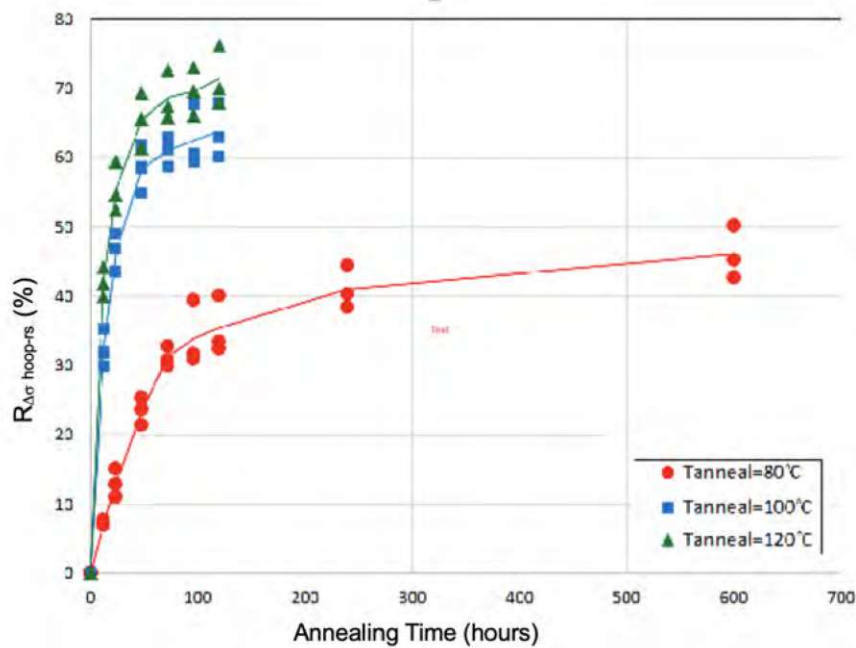


Abbildung 7: Eigenspannungsabbau für unterschiedliche Temperaturen [4]

waren, konnte herausgefunden werden, dass es zu einem Spannungsabbau kommt. Dieser fällt jedoch geringer aus als erwartet [1].

Zur Messung der Eigenspannungen wurde der Ring-Schlitz-Versuch gewählt, da er schnell ist und gleichzeitig auch sehr gute Ergebnisse liefert. Mittels dieses Tests lassen sich die Eigenspannungen sehr gut evaluieren, welche normalerweise dazu dienen, die Langzeiteigenschaften von Rohren vorherzusagen. In dieser Arbeit geht es darum, die Eigenspannungen zu verschiedenen Zeitpunkten und auch für verschiedene Temperaturen zu testen. Die Temperatur, bei welcher die E-Muffen gelagert werden, ist entscheidender als die Zeit, welche sie bei einer bestimmten Temperatur verbringen [4]. Zu erkennen ist das in Abbildung 7.

2.3 Amorpher Zustand

Amorphe Kunststoffe zeigen keine geordneten Strukturen, wie es zum Beispiel kristalline Stoffe tun. Man spricht hier auch von einer Nahordnung, aber keiner Fernordnung. Ein heutzutage anerkanntes Modell zur Beschreibung dieser Struktur ist das Knäuelmodell. Amorphe Kunststoffe können drei unterschiedliche mechanische Zustände aufweisen. Sie können hart und spröde sein, oder elastisch wie Gummi sein, aber auch viskos wie eine Schmelze. Entscheidend dafür, welche Eigenschaften das Materialverhalten am besten beschreiben, ist die Temperatur.

2.4 Kristalliner Zustand

Kristalle zeichnen sich durch eine dreidimensionale, periodische Struktur aus. Sie besitzen eine Nah- und Fernordnung. Teilkristalline Kunststoffe haben auch oberhalb der Glasübergangstemperatur hohe Steifigkeit und Festigkeit, aufgrund der kristallinen Strukturen, welche bei ihnen zu finden sind. Wird die Schmelztemperatur erreicht, kommt es zu einem sprunghaften Abbau der kristallinen Struktur und damit auch der hohen Steifigkeit und Festigkeit.

2.5 Sphärolithe

Sphärolithe sind aus Faltungsblöcken aufgebaut und gelten als Überstrukturen, welche sich beim Abkühlen aus der Schmelze bilden. Der Sphärolithdurchmesser geht normalerweise von 0,1-1 mm. Ganz entscheidend für die Sphärolithbildung und vorher die Lamellenbildung, sind Seitenketten oder Substituenten. Eine zunehmende Kristallisation führt dann zu einer Dichteerhöhung und diese wiederum hat als Folge, dass im Bauteil Spannungen entstehen [5].

2.6 Teilkristalliner Zustand

Für die Untersuchungen der E-Muffen ist der teilkristalline Zustand von Interesse, weil es der Zustand ist, welcher bei den E-Muffen aus PE-HD vorzufinden ist. Aufgrund des Auftretens zweier unterschiedlicher Zustände (amorpher und kristalliner) in einem PE-HD, können auch unterschiedliche Eigenschaften erklärt werden, welche mit einem einzigen Zustand nicht erklärbar wären. Der amorphe Bereich ist die weiche Phase und der kristalline Bereich ist der harte Bereich [6]. Die Komponenten in teilkristallinen Kunststoffen, also die lamellaren Bereiche oder die Sphärolithe, sind über Tie-Moleküle mit anderen lamellaren Bereichen oder Sphärolithen verknüpft. Würden keine Tie-Moleküle existieren, würde PE-HD bei viel geringeren Spannungen versagen [7, 6].

In Abbildung 8 erkennt man das unterschiedliche Verhalten für unterschiedliche Überstrukturen. Sieht man sich die Eigenschaften von E-Muffen an, so ist es auch wichtig, beide Zustände zu berücksichtigen. Denn schon bei 20 °C werden Veränderungen im Material sichtbar, welche nicht erklärbar wären, würde man nur die kristallinen Strukturen in kurzen Zeiträumen betrachten. Werden hingegen auch die amorphen Strukturen berücksichtigt und dass man sich bei 20 °C über der Glasübergangstemperatur befindet, lassen sich Phänomene wie die temperaturabhängige Schwindung besser verstehen. Zusätzlich gilt es zu beachten, dass E-Muffen bei erhöhten Temperaturen weiterverarbeitet werden (115 °C) und sich daher die Molekülketten leichter bewegen können [8]. Beide Zustände tragen zu der Schwindung während des Herstellungsprozesses bei. Hingegen sind es zu späteren

Zeitpunkten vor allem die kristallinen Bereiche, welche für die Schwindung verantwortlich sind, dies geschieht aufgrund der Dichteänderung in den kristallinen Bereichen [9].

Am Beginn der elastischen Deformation von PE sind die amorphen Bereiche jene, welche es zu betrachten gibt, da diese aber sehr schnell an ihre Grenzen stoßen, gilt es die kristallinen Bereiche bei größerer Deformation zu betrachten (plastische Deformation). Hauptsächlich kommt es zu einem Abgleiten der kristallinen Bereiche. Generell handelt es sich bei der plastischen Deformation um einen thermisch aktivierten Prozess, daher hängen die mechanischen Eigenschaften sehr stark von der Temperatur und der Deformationsgeschwindigkeit ab [7].

Teilkristalline Kunststoffe zeigen unterschiedlichste Morphologien, welche durch die unterschiedlichen Herstellungsbedingungen und daher durch unterschiedliche Kristallisationsbedingungen entstehen. Die Mehrheit der teilkristallinen Thermoplaste kristallisieren sphärolithisch [10]. Wird der teilkristalline Thermoplast auf eine gewisse Temperatur erwärmt (Kristallisationstemperatur) und dann verstreckt unterbindet man die Sphärolithbildung [11]. Es kommt zu einer Umwandlung der Struktur in Richtung einer fibrillenartigen Struktur, die Polymerketten orientieren sich in die Richtung, in welche sie verstreckt wurden [12]. Unterhalb der Schmelztemperatur kommt es zu einer Deformation der Sphärolithe in Richtung elliptischer Form [7].

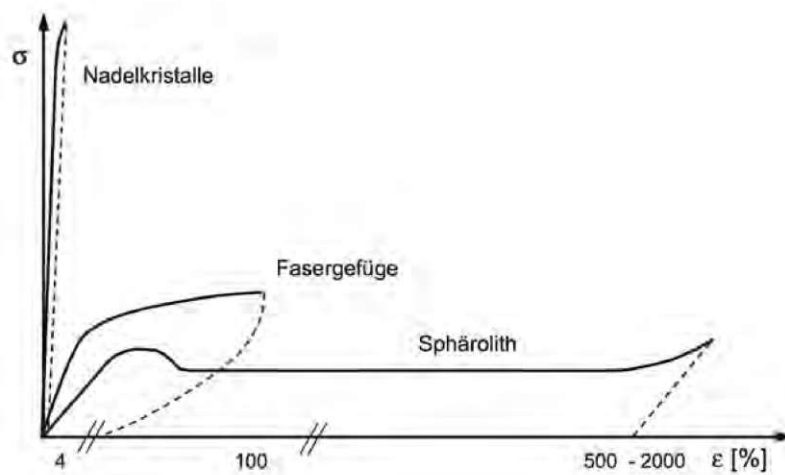


Abbildung 8: Spannungs-Dehnungsdiagramm für unterschiedliche Überstrukturen [10]

2.6.1 Teilkristalline Struktur unter Energiebetrachtung

In einem teilkristallinen Thermoplast ist ein Energieaustausch mit der Umgebung möglich. Beschrieben wird der Zustand dieses Systems durch die freie Enthalpie, ein geringerer Wert bedeutet ein stabileres System. Die Kristallisation wie auch das Nachkristallisieren können durch die Änderung der freien Enthalpie ΔG beschrieben werden. Die Änderung der freien Enthalpie setzt sich zusammen aus der Änderung der inneren Enthalpie ΔH , der Entropie ΔS und der Temperatur T (siehe Formel 1) [5].

$$\Delta G = \Delta H - T * \Delta S \quad (1)$$

Die Entropie beschreibt die Wahrscheinlichkeit, einen möglichen Zustand zu realisieren (Realisierungsmöglichkeiten). Während der Kristallisation kommt es durch die Bildung einer Nahordnung zu einer Abnahme der Entropie. Da es bei der Kristallisation von Thermoplasten nur zu einer teilweisen Ordnung der Makromoleküle kommt, zeigen die unterschiedlichen Molekülabschnitte verschiedene Entropieänderungen. Die Bewegungsfreiheit der nicht fixierten Molekülabschnitte beeinflusst die Größe der Entropieänderung. Je geringer ΔG ist, umso stabiler ist das System [5].

$$\Delta H = \Delta U + p * \Delta V \quad (2)$$

Die innere Enthalpie setzt sich zusammen aus der inneren Energie ΔU und der Volumenarbeit $p*\Delta V$ mit ΔV der Volumenänderung, ersichtlich in Formel 2. Enthalpie und die Entropie hängen beide von der Temperatur ab und der Polymer-Werkstoff wird den Zustand einnehmen, welcher die geringste freie Enthalpie aufweist. Die kristalline Anordnung führt zu einem Minimum der inneren Energie, es stellt sich ein Gleichgewichtszustand ein, welcher durch eine Parallellagerung der Ketten erreicht werden kann [5].

2.6.2 Interlamellare Scherung

Hierbei handelt es sich um die Scherung der amorphen Bereiche zwischen den Lamellen (siehe Abbildung 9(a)). Dieser Effekt spielt sowohl bei Raumtemperatur als auch bei erhöhten Temperaturen eine entscheidende Rolle für das Verständnis des Deformationsverhaltens von PE-HD. Bei erhöhten Temperaturen sind geringere Kräfte für das Abgleiten der lamellaren Schichten notwendig als bei Raumtemperatur. Untersuchungen haben gezeigt, dass ein gewisser Anteil der Deformationen reversibel sind. In den Dehnungsbereichen von 0 bis 10 % ist das Relaxieren zu beobachten [13]. Dies kann durch zweierlei Phänomene beschrieben werden. Entweder das gummiartige Verhalten des amorphen Bereiches über der

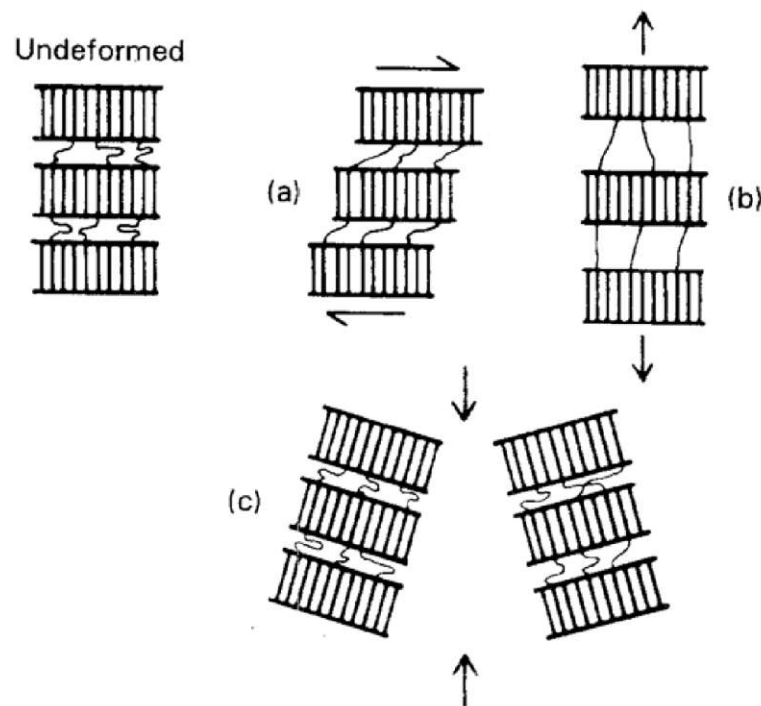


Abbildung 9: (a) interlamellare Gleitung (b) interlamellare Separation (c) Stapelrotation [7]

Glasübergangstemperatur oder durch die Eigenspannungen des umliegenden Bereiches. Bei zu großen Spannungen oder Dehnungen werden die Effekte der Tie-Moleküle zunichtegemacht, weil sie aus den kristallinen Bereichen herausgerissen werden und so ihre Wirkung verlieren. Auch die beiden andere Phänomene, interlamellare Separation und Stapelrotation haben ihren Anteil am Deformationsverhalten, im Gegensatz zu den interlamellaren Scherungen sind dafür aber größere Spannungen und eine größere Dehnung notwendig, welche bei den E-Muffen aber nicht erreicht werden kann [7].

2.7 Polyethylen Typen

Grundsätzlich muss man zwischen vier unterschiedlichen Polyethylen Typen unterscheiden. PE-HD (high density), PE-MD (medium density), PE-LD (low density) und PE-LLD (linear low density) (Abbildung 10). Es gibt noch weitere PE Typen, jedoch machen die vorher erwähnten, den Großteil der sich im Umlauf befindlichen Materialien aus. Für die E-Muffen Herstellung relevant ist PE-HD. Hier gab es im Laufe der Zeit verschiedenste Änderungen, zusätzlich muss das PE-HD selbst nochmals in Untergruppen untergliedert werden.

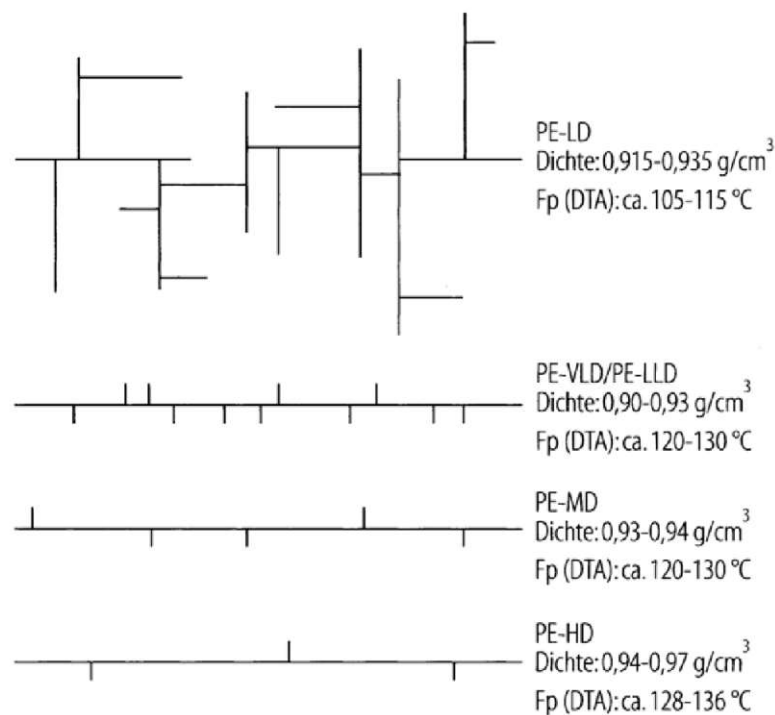


Abbildung 10: Strukturen und Verzweigungen von Polyethylentypen [14]

Begonnen wurde die Produktion der E-Muffen mit einem unimodalen PE 80. Heutzutage werden die E-Muffen immer noch mit einem PE 80 Typen hergestellt, jedoch handelt es sich um ein bimodales Material. Uni- und bimodal beziehen sich auf die Molmassenverteilung im Material. Durch neuere und innovativere Polymerisationsverfahren wurde es möglich, bimodales PE-HD herzustellen, zu sehen in Abbildung 11. Die Erzeugung von zwei Peaks bei der Molmassenverteilung ermöglicht es ganz gezielt auf unterschiedliche Anforderungen einzugehen und Eigenschaften zu erzeugen, welche mittels unimodalen Material nicht möglich wären.

Die Herstellung von bimodalen Polyethylen wurde durch die Verwendung von Metallocen-Katalysatoren ermöglicht. Metallocenkatalysatoren haben nur ein wohldefiniertes katalytisches Zentrum. Damit ist es möglich, sehr genau definierte Polymerprodukte herzustellen. Durch die Kombination von unterschiedlichen Katalysatoren kann die gewünschte Verteilung realisiert werden [15]. So ist es möglich, mittels Copolymerisation Seitenketten an die Hauptkette zu polymerisieren [16, 17].

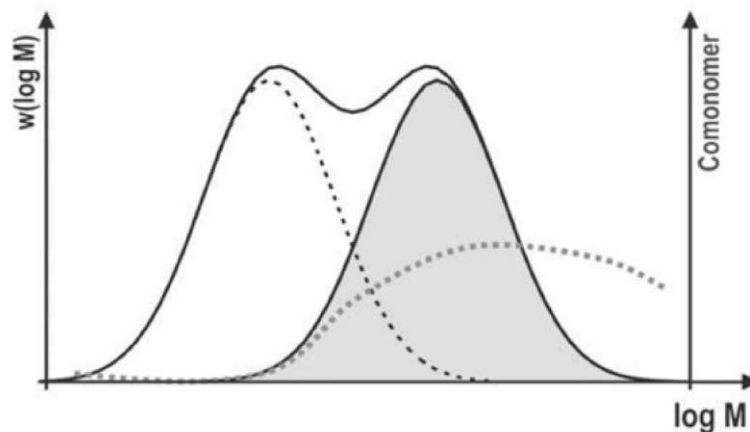


Abbildung 11: Bimodales PE-HD [14]

2.7.1 Polyethylen hoher Dichte

PE-HD hat ungefähr alle 200 CH_2 Einheiten eine Seitenkette. Es weist eine sehr hohe Kristallinität auf (70 - 80 %) [17]. Moderne PE-HD Typen haben durch die Zugabe von 1-buten, 1-hexen oder 1-oktan die Möglichkeit, Kurzkettenverzweigungen zu erzeugen [18]. Diese Verknüpfungen zwischen den Molekülen in den amorphen Bereichen sind ganz entscheidend für die mechanischen Eigenschaften des Kunststoffes [12]. Wie in Punkt 2.6 bereits erwähnt, bilden sich für unterschiedliche Abkühlgeschwindigkeiten verschiedene Gefüge aus. Für PE-HD sind vor allem die unterschiedlichen Sphärolith-Ausprägungen von Interesse. Unter normalen Bedingungen zeigen die Sphärolithe einen Durchmesser von $100 \mu\text{m}$ [7, 19].

2.7.2 PE 80 - Zeitstandinnendruckversuch

PE 80 Rohre haben einen MRS (minimum required strength) Wert von 8,0 MPa. Daraus lässt sich schließen, dass die Mindestfestigkeit um eine Rohrlebensdauer von 50 Jahre bei $20 \text{ }^\circ\text{C}$ zu erreichen, 8,0 MPa beträgt [20]. In Abbildung 12 ist zu erkennen, wie der MRS Wert aus der Zeitstandkurve ermittelt werden kann. Um dies zu ermitteln, wird der Zeitstandinnendruckversuch an den Rohren durchgeführt und mittels ISO 9080 ausgewertet [21].

2.8 Schweißverfahren

Mittels Schweißverfahren werden unlösliche Verbindungen unter Zuhilfenahme von Druck und Temperatur, mit oder ohne Schweißzusatz bezeichnet. Es ist notwendig, die Bauteile in den thermoplastischen Zustand zu überführen, um sie miteinander

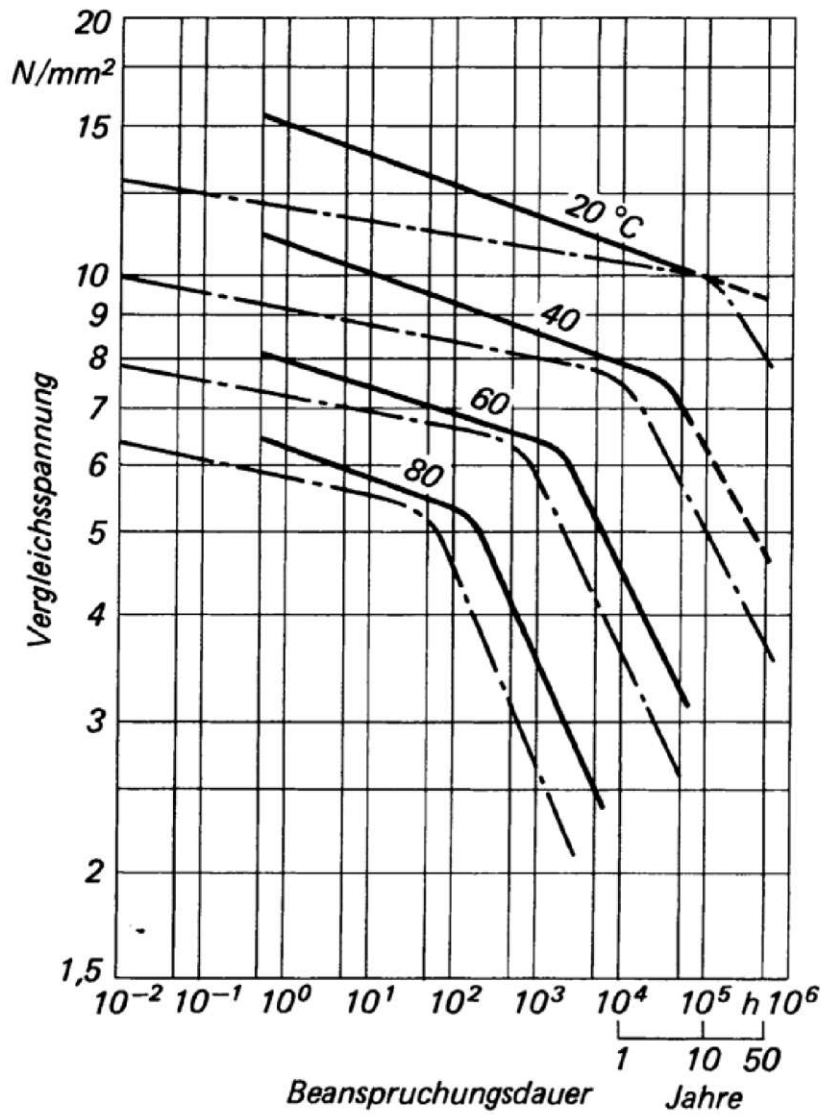


Abbildung 12: Zeitstandkurven für einen Rohrwerkstoff PE-HD [22]

dauerhaft verbinden zu können. Die dadurch beweglichen Moleküle werden mittels Druck zusammengeführt, und bilden so eine Verbindung. Dies bedeutet, dass sich zwischen den unterschiedlichen Bauteilen Verschlaufungen ausbilden können. Es kommt zur Ausbildung von physikalischen Bindungen zwischen den Makromolekülen der beiden Bauteile. Eine Unterteilung der unterschiedlichen Schweißverfahren wird getroffen, in dem man die Wärmeübertragung unterscheidet. Hier gibt es die Wärmeleitung, Konvektion, Reibung und Strahlung. Im Weiteren werden einige Schweißverfahren vorgestellt.

2.8.1 Heizelementschweißen

Bei diesem Verfahren wird schonend und langsam der Bauteil mittels Konturelementen erhitzt und nach dem Erhitzen gefügt. Dieses Verfahren hat sich in der Vergangenheit als äußerst prozesssicher dargestellt, auch für komplexere Geometrien. Der Nachteil dieses Verfahrens sind die doch längeren Zykluszeiten im Vergleich zu anderen Verfahren. Das Verfahren wird in Abbildung 13 beschrieben. Bei diesem Verfahren ist es entscheidend, die Bauteile gleichmäßig zu erwärmen und dann mittels Druckes zu fügen. Darüber hinaus ist es wichtig, qualifiziertes Personal mit dem Heizelementschweißen zu beauftragen, um hochwertige Schweißungen zu erhalten.

2.8.2 Warmgas-Fächelschweißen

Dieses Verfahren findet im Behälterbau sehr oft seine Anwendung. Es wird ein Schweißzusatz verwendet, welcher mit Warmgas und unter ständigem Fächeln in den thermoplastischen Zustand gebracht wird und so eine Verbindung mit dem Bauteil eingeht. Durch das Fächeln wird nicht nur der Schweißzusatz erwärmt, zusätzlich werden auch noch die zu verschweißenden Bauteile erhitzt. Temperatur und Druck sind ganz entscheidend für eine qualitativ hochwertige Schweißung. Das Verfahren wird in Abbildung 14 beschrieben.

2.8.3 Schweißextruder

Auch dieses Verfahren findet im Behälterbau Anwendung und auch dieses Verfahren benötigt einen Schweißzusatz. Jedoch geschieht die Materialzufuhr durch einen kleinen Extruder, welcher den Schweißzusatz in den thermoplastischen Zustand überführt. Zusätzlich wird dann auch noch unter Einsatz von Warmgas der zu schweißende Bauteil erhitzt und die Oberfläche auf Schmelztemperatur gebracht. Das Verfahren wird in Abbildung 15 beschrieben.

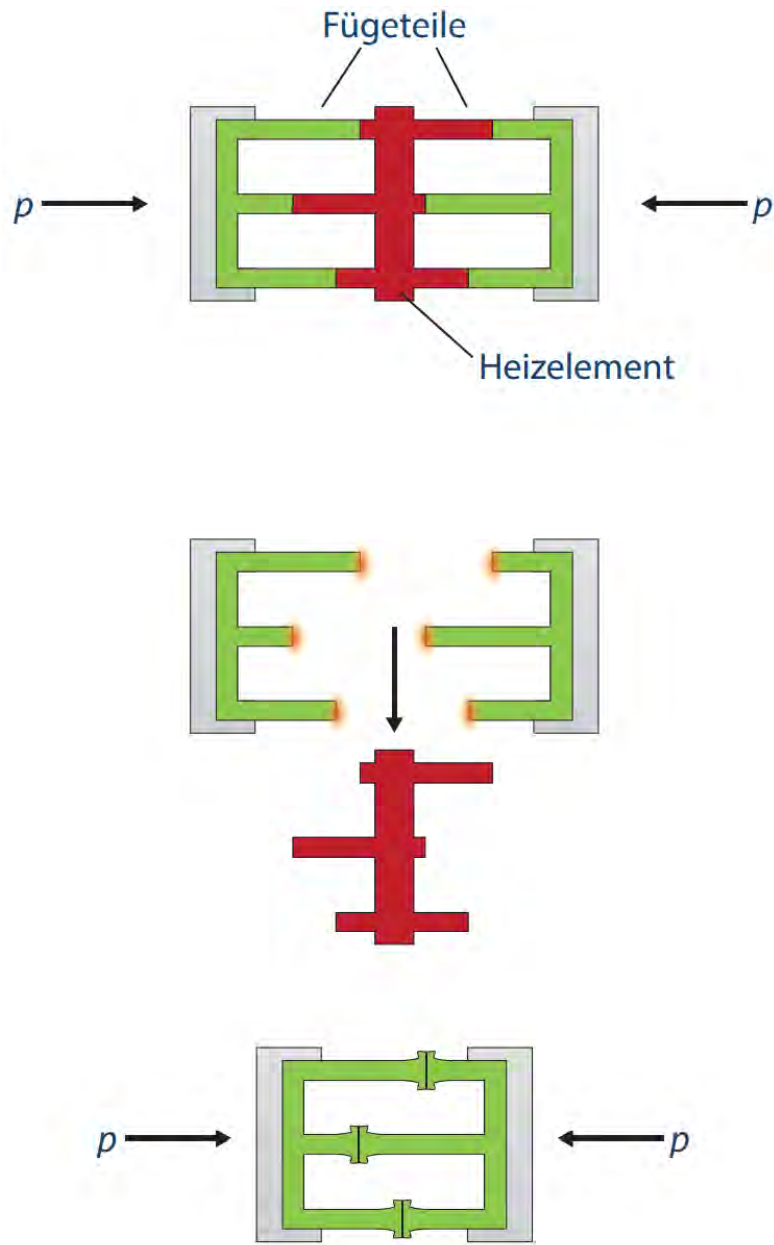


Abbildung 13: Heizelementschweißen [23]

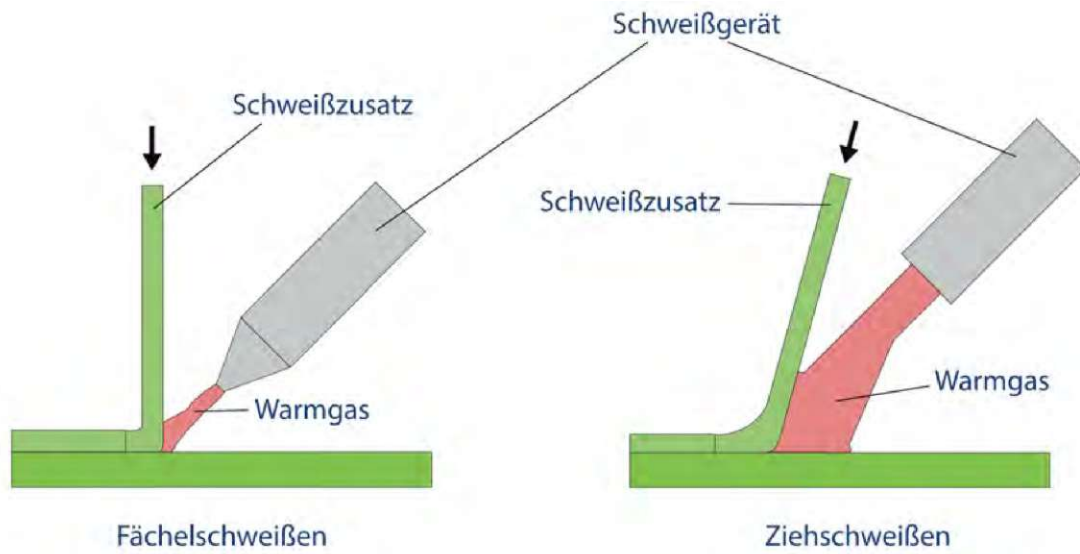


Abbildung 14: Warmgasfächelschweißen [23]

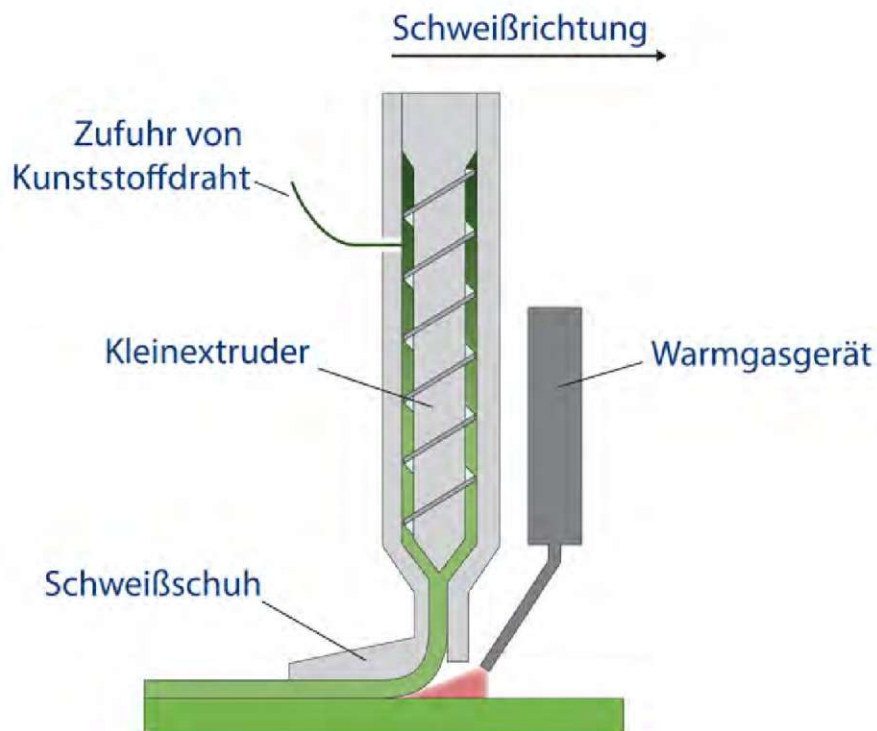


Abbildung 15: Schweißextruder [23]

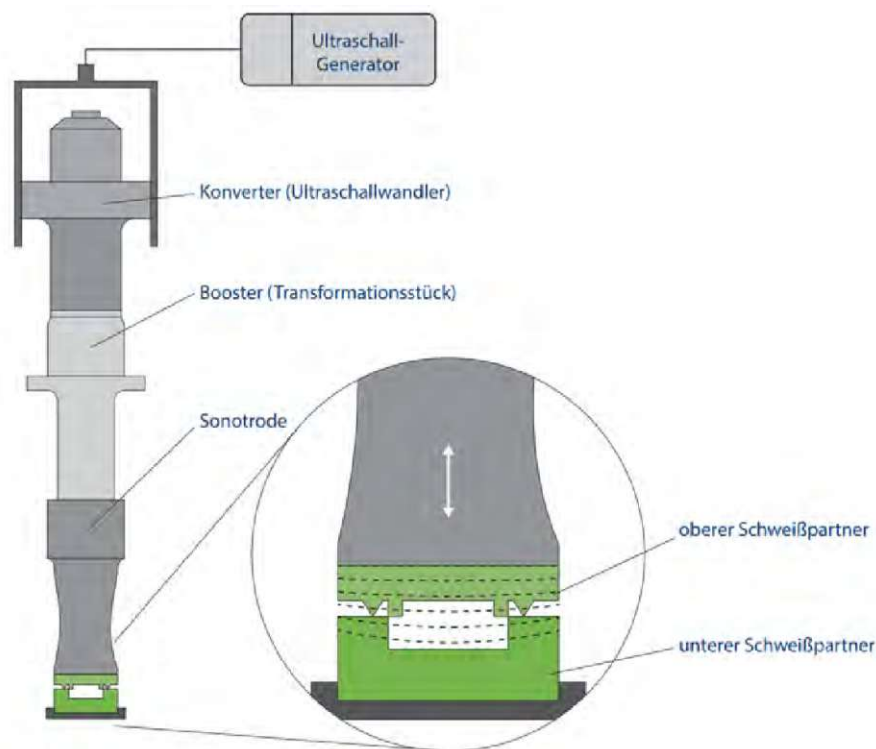


Abbildung 16: Ultraschallschweißen [23]

2.8.4 Ultraschallschweißen

Durch die Sonotrode werden Wellen im Ultraschallbereich in den Bauteil eingebracht. Diese führen zu einer Erwärmung des Bauteils an spezifischen, vorher definierten Stellen. Grund für die Erwärmung des Kunststoffes, ist seine große innere Dämpfung, welche die Welle daran hindert, sich auszubreiten, daher kommt es zur Umwandlung von Schall in Wärme. Mit diesem Verfahren ist es möglich, schnell Schweißverbindungen herzustellen. Auf der anderen Seite sind die Festigkeitswerte dieser Schweißverbindungen um 80 % geringer als jene des Werkstoffes [23]. Die Geometrie des Bauteils muss auf das Schweißverfahren abgestimmt werden. Das Verfahren wird in Abbildung 16 beschrieben.

2.8.5 Vibrationsschweißen

Bei diesem Verfahren werden die Bauteile entweder in einer oder in zwei Richtungen aneinander gerieben. Der Wärmefluss wird mittels Reibung erzeugt. Um eine hohe Qualität der Füge-Verbindung zu gewährleisten, ist hoher Druck notwendig, was eine gewisse Steifigkeit des zu verschweißenden Bauteils erfordert.

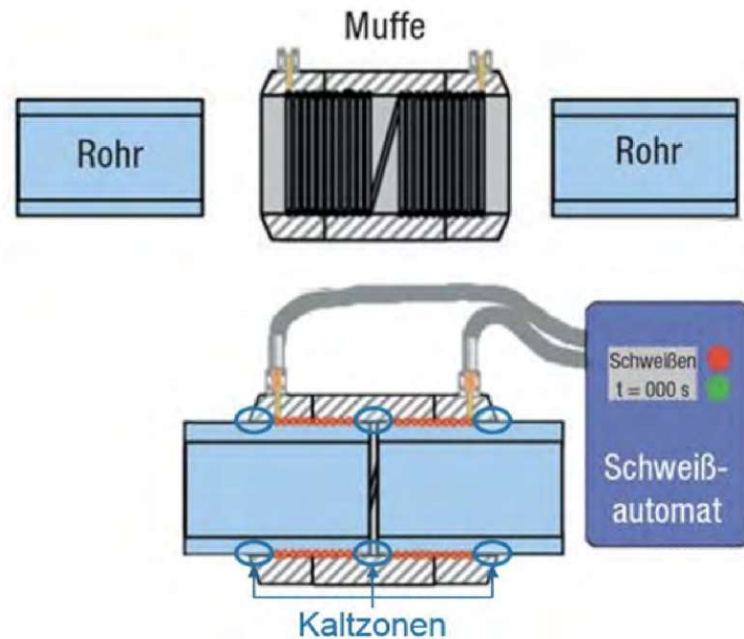


Abbildung 17: Prinzipbild für das Elektroschrumpfschweißen [25]

2.8.6 Elektroschrumpfschweißen

Die E-Muffe, welche mittels Extrusionsverfahren und anschließend in vielen weiteren Arbeitsschritten (Aufweitung, Klimaraum, Verdichter, 16-Taktanlage) hergestellt wird, ist eine Kombination aus mehreren Verfahren. Der eingelegte Draht dient zur Erwärmung der E-Muffe, der Aufweitprozess dient zur Eigenschaftsregulierung, also zur Erzeugung des für die Schweißung notwendigen Druckes. Als Schweißzusatz kann der Draht angesehen werden, ohne dem eine Wärmezufuhr nicht möglich wäre. Aufgrund der Tatsache, dass sich der Draht in der Nähe der beiden zu verbindenden Flächen befindet, ist die Wärmeübertragung sehr gut und führt zu einer idealen Wärmeverteilung. Werden die Fügeflächen sauber gehalten und das Rohr aufgeraut, sind die Schweißverbindungen von sehr hoher Qualität. In der Schweißzone spricht man auch von Co-Kristallisation [24]. Ein Prinzipbild des Schweißvorganges ist in Abbildung 17 zu sehen.

Es gilt zu berücksichtigen, dass die geringe Wärmeleitfähigkeit von Polyethylen dazu führt, dass während des Schweißvorganges sehr große Temperaturunterschiede zwischen einzelnen Bereichen in der E-Muffe entstehen. Zusätzlich ist die Temperatur im Draht auch nicht konstant [26]. Nach einer gewissen Zeit stellt sich eine Gleichgewichtstemperatur zwischen Rohr und Muffe ein. Grund dafür ist die Energiefreigabe bei der Polyethylen Kristallisation (120 °C) [27]. Ganz entscheidend für eine qualitativ hochwertige Schweißung ist das Reinigen vor dem Prozess

sowie das Abschaben der zu verschweißenden Oberflächen [28, 29]. Die Schweißung einer 110er E-Muffe benötigt ungefähr circa 83 Sekunden.

2.9 Kunststoff Viskoelastizität

Für Polyethylen beträgt die Glasübergangstemperatur circa -70 °C und die Schmelztemperatur 125 °C . Die 125 °C passen gut zu den Ergebnissen für das PE, welches für die E-Muffen verwendet wird und mittels DSC analysiert wurde. In diesem Temperaturbereich weist das Material einen sehr hohen E-Modul auf, weil der Kristallinitätsgrad in diesem Temperaturbereich sehr groß ist und daher der eigenschaftsbestimmende Faktor ist. Der Kristallinitätsgrad und die genaue Form der kristallinen Bereiche hängt sehr stark von der Wärmeeinwirkung ab (Temperatur, Dauer, Temperaturverlauf) [30]. Ganz entscheidend für die Ausbildung der kristallinen Überstruktur ist die Abkühlrate, welche direkt Einfluss auf den Kristallinitätsgrad und die Sphärolithgröße nimmt. Die Wahrscheinlichkeit zweimal exakt denselben Kristallinitätsgrad und dieselbe Sphärolithgröße zu erzeugen, ist sehr gering. Daher müssen wir immer von einem Eigenschaftsspektrum sprechen, welches der Kunststoff aufweist [31].

Durch die Untersuchung einer Polyethylen-Membran auf Durchbiegung bei einer bestimmten Temperatur, kann dann über ein korrektes mathematisches Modell auf den E-Modul geschlossen werden. In dem Artikel [32] wurde genau das durchgeführt. Die Autoren haben ein modifiziertes Burger's Modell verwendet, um die Kurve an die Messergebnisse anzupassen und so den E-Modul zu erhalten. Die Messergebnisse und die gefitteten Kurven sind in Abbildung 18 zu sehen. Der so erhaltene E-Modul beträgt 980 MPa .

2.10 Dynamisch mechanische Analyse

In Abbildung 20 sind die unterschiedlichen Bereiche und Umwandlungen in einem Kunststoff zu sehen. Der für uns entscheidende Bereich ist das Gummiplateau, dieses liegt in dem für uns interessanten Temperaturbereich. Entscheidend für die weiteren Diskussionen am Ende ist es im Hinterkopf zu behalten, dass wir das Material oberhalb der Glasübergangstemperatur verwenden. In Abbildung 19 erkennt man, welchen Einfluss die Kristallinität und das Molekulargewicht haben. Aufgrund der unterschiedlichen Abkühlraten entstehen E-Muffen mit unterschiedlicher Kristallinität und daher unterschiedlichen DMA Kurven [33].

2.10.1 Deformationsprozess in Abhängigkeit der Spannung

Da es sich bei Polyethylen um einen teilkristallinen Kunststoff handelt, besteht er zum Teil aus amorphen und zum Teil aus kristallinen Bereichen. Je nach aufge-

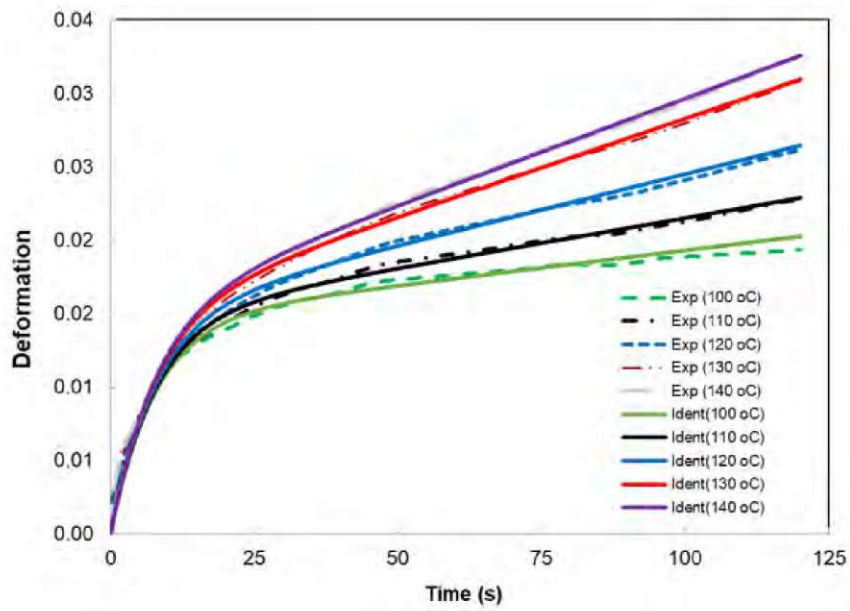


Abbildung 18: Deformation als Funktion der Zeit für unterschiedliche Temperaturen. Aus den gefitteten Kurven wurde dann der E-Modul ermittelt [32]

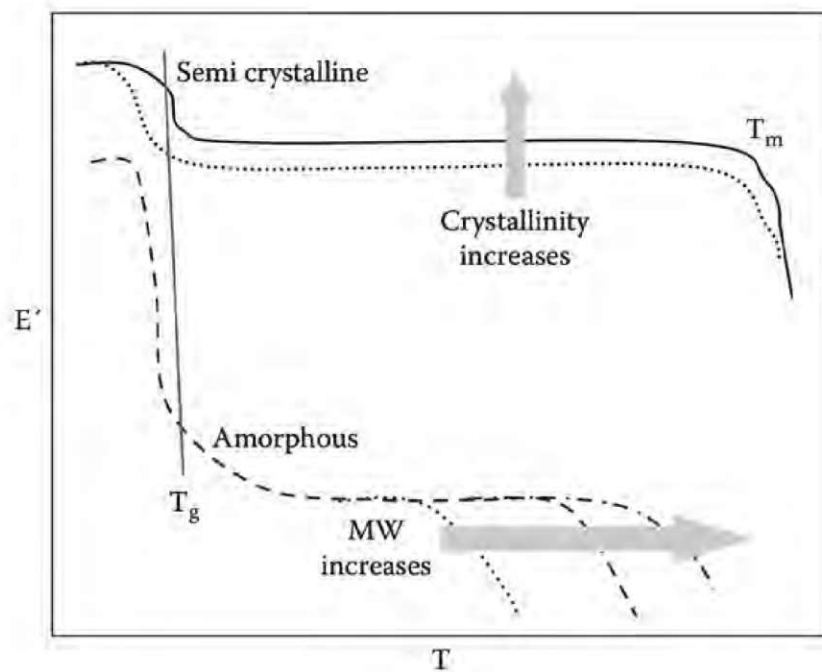


Abbildung 19: Einfluss der Kristallinität und des Molekulargewichtes auf die DMA Ergebnisse [33]

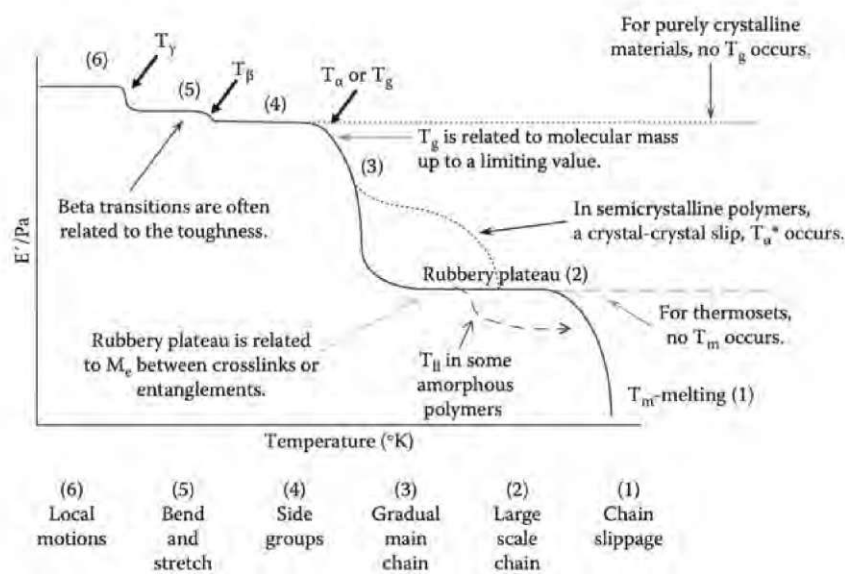


Abbildung 20: DMA Kurve, welche die unterschiedlichen Bereiche Umwandlungstemperaturen und Abhängigkeiten zuordnet [33]

brachtem Spannungsniveau werden unterschiedliche Bereiche aktiviert und tragen zum Verformungsverhalten bei. Ist das Spannungsniveau noch niedrig, werden die amorphen Bereiche aktiviert und die kristallinen Bereiche haben fast gar keinen Beitrag, steigt hingegen das Spannungsniveau, ist es genau umgekehrt und die kristallinen Bereiche tragen maßgeblich zum Deformationsverhalten bei [34].

3 Methodik

3.1 Herstellung der Rohrsegmente für die Eigenspannungsmessungen

Für die Herstellung der Rohrsegmente wurden die E-Muffen mittels eines Abstichmesser auf einer Drehbank abgestochen und entgratet (Abbildung 21). Bei der Herstellung der Rohrsegmente wurde darauf geachtet, den Wärmeeintrag so gering wie möglich zu halten. Durch das Abstechen entstand an der Innenseite des Rohrsegmentes ein Grat, welcher mittels Entgrater entfernt wurde. Die Breite der Segmente liegt zwischen 7,8 mm bis 8,2 mm.

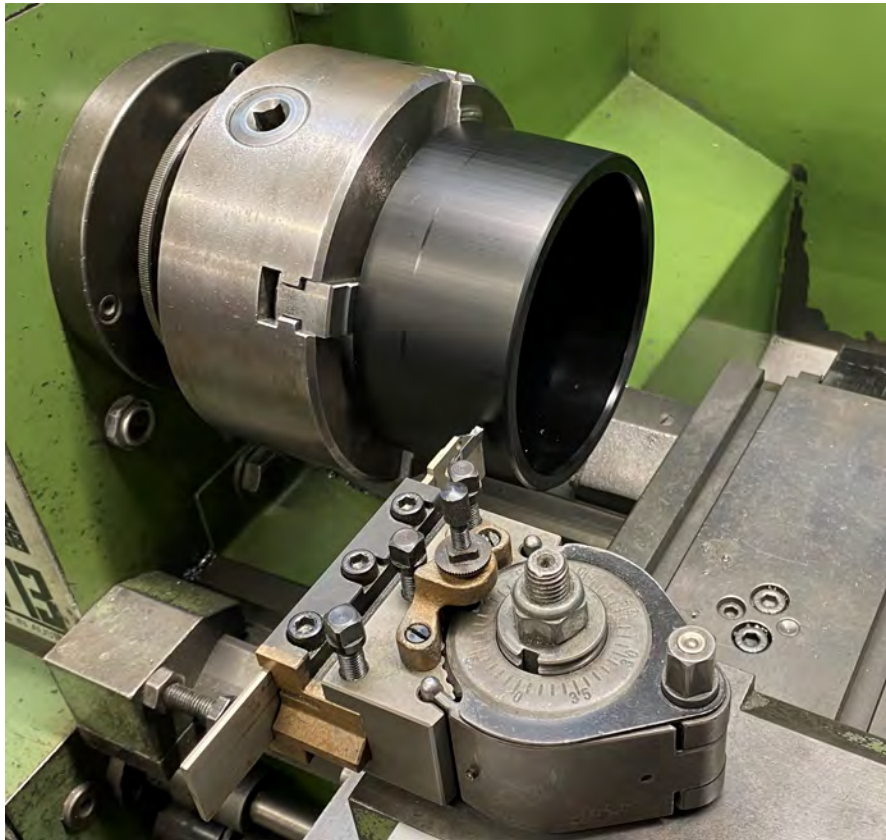


Abbildung 21: Aufbau zur Herstellung der E-Muffen Segmente, mittels Drehbank und Abstichmesser

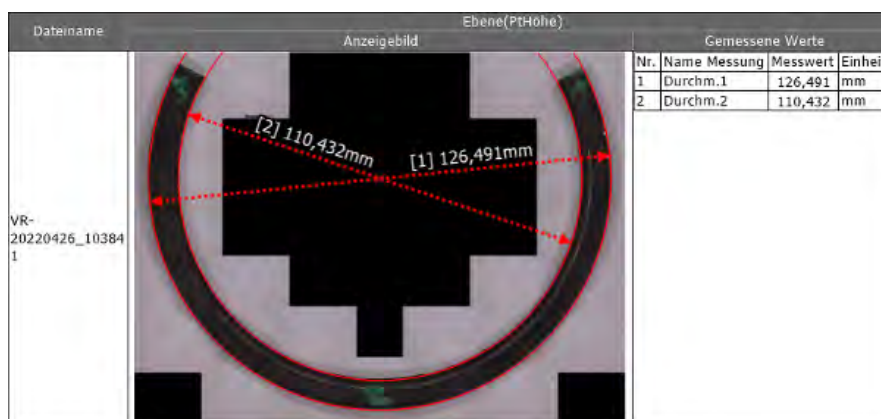


Abbildung 22: Vermessung der E-Muffen Segmente mittels dem Vermessungsgerät der Firma Keyence. Verwendete Methode war die drei Punkte Methode und der mittlere Durchmesser wurde gewählt

Tabelle 1: Parameter für die Plattenherstellung

Rampe 1 [°C]	Rampe 2 [°C]	Rampe 3 [°C]	Rampe 4 [°C]	Rampe 5 [°C]
80	190	190	190	30
[min]	[min]	[min]	[min]	[min]
10	22	3	2	19
[°C/min]	[°C/min]	[°C/min]	[°C/min]	[°C/min]
0	5	0	0	10

3.2 Vermessung der E-Muffen

In der Abbildung 22 ist zu erkennen, wie die E-Muffen mittels der 3D Vermessungsmaschine der Firma Keyence vermessen wurden. Um den Durchmesser ermitteln zu können war es notwendig, zwischen verschiedenen Optionen zu wählen. Es wurde die sogenannte Dreipunktmethode gewählt, wo durch drei Punkte ein Kreis gebildet wird und dieser dann an das Prüfobjekt gefittet wird, um eine größtmögliche Übereinstimmung zu erhalten.

3.3 Plattenpressen

Aus dem Granulat wurden mittels einer Presse unter vorgegebenen Aufheiz- und Abkühlraten Platten hergestellt (siehe Abbildung 23). Diese Platten wurden dann auf der Universalprüfmaschine weiterverarbeitet. Schulterstäbe vom Typ 2 entsprechend ISO 527-2 wurden mittels einer Universalprüfmaschine herausgestanzt [35]. Das verwendete Temperaturprogramm ist in Tabelle 1 zu sehen.



Abbildung 23: Plattenpresse Collin P200P, mit welcher die Platten hergestellt wurden

3.4 DMA

Mittels der DMA-Analyse (TA Instruments DMA Q850) wurde der E-Modul bei 115 °C ermittelt. Dieser ist für die E-Muffen entscheidend, weil bei dieser Temperatur das Aufweiten durchgeführt wird. Die Messung hat einen E-Modul von 100 MPa bei 115 °C ergeben. Die Aufheizrate betrug 3 K/min.

3.5 TMA

Die TMA-Analyse (TA Instruments TMA Q400) wurde mit folgenden Einstellungen des Gerätes durchgeführt. Es wurde der Makrostempel verwendet, bei einer Last von 0.02 N und einer Heizrate von 2 K/min.

3.6 Zugversuch

Die Schulterstäbe, welche wie in 3.3 besprochen hergestellt wurden, dienen zur Ermittlung des E-Moduls bei Raumtemperatur. Der E-Modul bei Raumtemperatur kann dann zur Berechnung der Eigenspannungen mittels Ringschlitzversuch herangezogen werden. (Zwick/Röll Z050 mit 2.5 kN-Kraftsensor)

3.7 Formbeständigkeit unter Wärmeeinfluss

Bei der Formbeständigkeit unter Wärmeeinfluss, welche bei den E-Muffen getestet und benötigt wird, handelt es sich um eine firmeninterne Prüfung. Es wird die fer-

tige E-Muffe also nach der 16-Taktanlage (siehe 2.1 Schritt 5) im Wärmeschrank bei 55 °C gelagert und nach 5 h und 24 h vermessen. Der Schrumpf der fertigen E-Muffe darf nicht zu groß sein und die geometrischen Eigenschaften müssen verschiedenen Anforderungen entsprechen. Das Hauptkriterium nach den 24 h Lagerungszeit ist der Innendurchmesser, welcher 110,6 mm nicht unterschreiten darf. Diese Vorgabe gewährleistet, dass die E-Muffen mit geringem Kraftaufwand auf das Rohr aufgeschoben werden können. Die 55 °C werden als die maximale Temperatur angenommen, die es während des Transports in einem Lastwagenanhänger bekommen kann. Somit wurde diese Temperatur als Referenztemperatur herangezogen. Einen genauen Zeitpunkt, wann die E-Muffen nach der Produktion in den Wärmeofen gelagert werden müssen, gibt es nicht. Daher wurden auch hier verschiedene Zeitpunkte für die Lagerung im Wärmeofen nach der Produktion gewählt.

3.8 DSC-Analyse

Über die Wandstärke der E-Muffen wurden in radial gleichmäßigen Abständen die Proben für den DSC Tiegel entnommen. Für die Präparation wurde ein Mikrotom (Mikrom HM 360) verwendet. Die Proben wurden dann mittels DSC Gerät (TA Instruments Q 2000) analysiert. Die DSC-Analyse eignet sich besonders für die Ermittlung der Temperatur, bei der im Material strukturelle Änderungen beginnen.

3.9 Berechnung der Eigenspannungen

3.10 Eigenspannungsmessung mittels Ringschlitzversuch

Durch Herausschneiden eines 120° Winkelstückes aus dem 8 mm dicken Rohrsegment (Abbildung 24), wurden die Eigenspannungen gemessen und berechnet. Das Herausschneiden wurde mittels einer Rasierklinge bewerkstelligt. Eine Vorrichtung wie in dem Artikel [36] wurde mittels 3D Drucker hergestellt (Abbildung 26), jedoch dann nicht weiterverwendet, weil es durch die verschiedenen Durchmesser welche untersucht wurden, nicht möglich war, nur eine Vorrichtung zu nutzen. Dennoch hatten die Winkelsegmente circa 120°. Um den Einfluss des Winkels ermitteln zu können, wurde eine Probe mit einem Winkel von 80° präpariert. Damit die Ergebnisse vergleichbar sind, wurde immer dieselbe Dauer (20 Minuten) gewählt, um die Segmente vor und nach dem Herausschneiden zu vermessen. Zur Vermessung der einzelnen Segmente und der E-Muffen wurde ein Vermessungsgerät der Firma Keyence verwendet (VR-5200 siehe Abbildung 25 und 24).

Um die erforderlichen Eigenschaften zu erlangen, müssen die E-Muffen viele unterschiedliche Prozessschritte durchlaufen (siehe 2.1). Einer davon ist die Lagerung



Abbildung 24: Rohrsegment zur Untersuchung der Eigenspannungen nach dem Herausschneiden eines 120° Stückes

in einem großen Wärmeofen (115 °C für 2 h) und das anschließende Aufpressen der warmen E-Muffe auf einem im Wasserbad befindlichen Dorn. Dies führt zur raschen Abkühlung und zur Erzeugung von Eigenspannungen, gleichzeitig führt die Lagerung im Wärmeofen zum Abbau von produktionsbedingten Eigenspannungen. Wird daher der Ringschlitzversuch an diesen E-Muffen durchgeführt (siehe 2.1 Schritt 2), sind bei Raumtemperatur keine Eigenspannungen messbar. Werden jedoch die E-Muffen nach dem Herausschneiden nochmals in einem Wärmeofen gelagert (110 °C), können Eigenspannungen sichtbar gemacht werden.

Die 110 °C wurden gewählt, weil die DSC-Analyse ergeben hat, dass bei 110 °C eine Änderung des Wärmestroms eintritt und daher angenommen werden kann, dass die relevanten Vorgänge mit dieser Temperatur sichtbar gemacht werden können (Abbildung 28 und 29). Weiters wurden dann noch andere Untersuchungsreihenfolgen gewählt, um auch bei den verdichteten E-Muffen Effekte hervorzurufen. Es wurden einerseits die Rohrsegmente ohne Herausschneiden im Ofen gelagert und danach wurde der Außendurchmesser vermessen. Anschließend wurden aus den bereits wärmegelegerten Muffen 120° Stücke herausgeschnitten und danach nochmals der Außendurchmesser gemessen. Als letzte Untersuchung wurden die E-Muffen mit herausgeschnittenen Stücken dann nochmals in dem Wärmeofen gelagert und danach wieder vermessen.

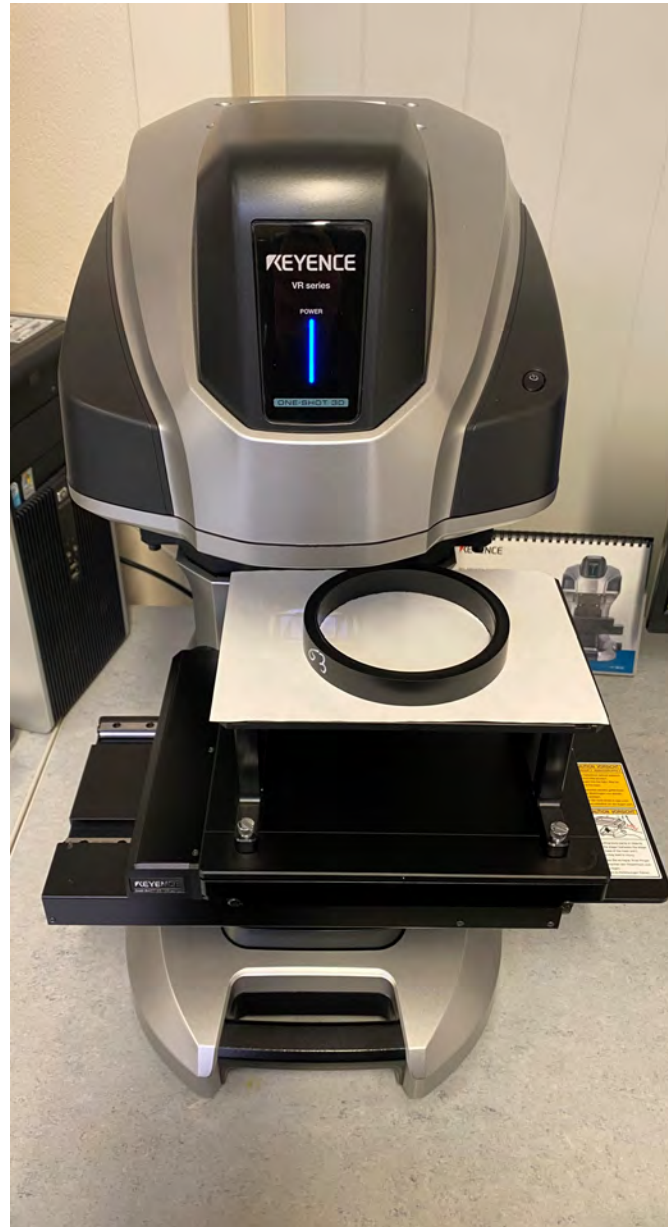


Abbildung 25: Vermessungsmaschine zur Ermittlung des Außendurchmessers



Abbildung 26: Vorrichtung zur Herstellung der Segmente mit 120° Winkel Ausschnitt

3.10.1 Berechnung der Eigenspannung über die Wanddicke

Der Spannungsverlauf wurde als exponentiell angenommen und ist in der Formel 3 erkennbar [36].

$$\sigma_{res}(x) = C_1 + C_2 * e^{3,2*x} \quad (3)$$

$\sigma_{res}(x)$ ist der Eigenspannungsverlauf über die Wanddicke. C_1 und C_2 sind Konstanten und x ist die normalisierte Wanddicke, mit $x = 0$ entspricht der Innenwand.

Zur Bestimmung der Konstanten C_1 und C_2 wurde angenommen, dass sich die Normalkräfte über den Querschnitt zu Null aufsummieren. Ersichtlich in der Formel 4 [36].

$$\int_0^1 \sigma_{res} * A * dx = \int_0^1 (C_1 + C_2 * e^{3,2*x}) * A * dx = 0 \quad (4)$$

Unter der Annahme kleiner Deformationen und dadurch einer konstanten Querschnittsfläche A , erhält man folgenden Zusammenhang [36]:

$$C_1 = 7,354 * C_2$$

Weitere Annahmen und Rechenschritte führen dann zu der endgültigen Formel 5 [36].

$$\frac{-(D_0 - h - 2R) * (R - R') * E}{3,382hR'} \quad (5)$$

D_0 und h lassen sich direkt an der Probe messen und mit folgender Formel 6 lassen sich R und R' berechnen [36].

$$\frac{R_{out} - R_{in}}{\ln \frac{R_{out}}{R_{in}}} \quad (6)$$

Für R' müssen dann der Innendurchmesser (R_{in}) und der Außendurchmesser (R_{out}) nachdem Herausschneiden des Segmentes gemessen werden. Für den E-Modul wurde ein Wert von 1000 MPa angenommen, welcher durch Messungen an der Universalprüfmaschine bestimmt wurde.

3.11 Temperaturverhalten der E-Muffen vor der Verarbeitung in der 16- Taktanlage

Um das Verhalten der E-Muffen zu analysieren, wurden die E-Muffen bei verschiedenen Temperaturen und Verweilzeiten noch vor der Verarbeitung in der 16-Taktanlage vermessen (siehe 2.1 Schritt 3a oder 3b). Einerseits wurden E-Muffen Rohlinge direkt nach der Aufweitung entnommen und dann sofort vermessen (siehe 2.1 Schritt 2). Andererseits wurden E-Muffen Rohlinge nach der erforderlichen Verweilzeit im Klimaraum entnommen und sofort vermessen (siehe 2.1 Schritt 3a). Weiters wurden auch E-Muffen nach dem Verdichter entnommen, getestet und vermessen (siehe 2.1 Schritt 3b). Folgende Temperaturen wurden für die Untersuchungen gewählt, $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $30\text{ }^{\circ}\text{C}$, $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, $55\text{ }^{\circ}\text{C}$ und $110\text{ }^{\circ}\text{C}$. Diese Temperaturen wurden gewählt, da diese relevant für die Produktion und Lagerung sind. Die Verweilzeiten im Ofen variieren von 5 bis 180 Minuten. Zur Lagerung der E-Muffen bei Minustemperaturen wurde ein Gefrierschrank verwendet. Auch die E-Muffen wurden mittels der Vermessungsmaschine der Firma Keyence (siehe Abbildung 25) vermessen. Es wurden sowohl der Außendurchmesser als auch die Länge der E-Muffen ermittelt. Die Länge wurde mittels eines Messschiebers vermessen. Durch das Aufpressen der E-Muffe auf den kalten Dorn im Wasserbad bei $16\text{ }^{\circ}\text{C}$ werden sowohl radiale als auch axiale Spannungen in die E-Muffe induziert, daher ist es von Interesse sowohl den Außendurchmesser als auch die Länge zu evaluieren. Jedoch muss hier erwähnt werden, dass die Länge für die Weiterverarbeitung eine untergeordnete Rolle spielt.

Um das genaue Verhalten besser verstehen zu können, wurden diese Temperaturen auch auf die unterschiedlichen Zustände der E-Muffen angewendet (E-Muffen Segmente, die ganze E-Muffe, E-Muffen Segmente mit 120° Ausschnitt).

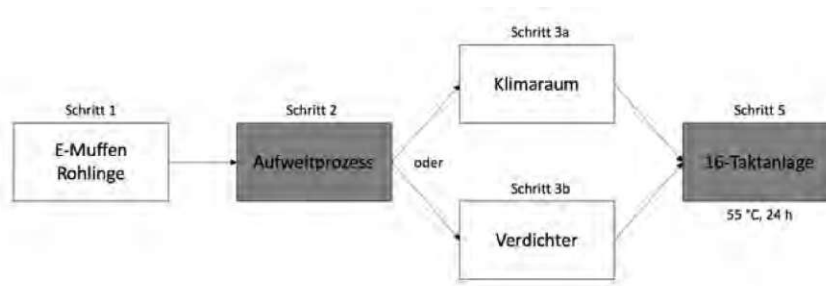


Abbildung 27: Prozessflussdiagramm mit Markierungen beim Aufweitprozess und der 16-Taktanlage

3.12 Temperaturverhalten der E-Muffen nach der Verarbeitung in der 16-Taktanlage

Hier wurden E-Muffen direkt nach der Aufweitung vermessen und dann in dem klimatisierten Messraum gelagert (siehe 2.1 Schritt 2 und Abbildung 27). Von der ersten Messung ausgehend wurden die E-Muffen dann jede Stunde wieder gemessen, um zu eruieren, wann sie den richtigen Außendurchmesser haben (125,9 mm). Dieser Außendurchmesser entspricht im Mittel dem Außendurchmesser der E-Muffen nach dem Klimaraum und jenem Durchmesser, welchen die 16-Taktanlage verarbeiten kann. Die durch diesen Vorgang hergestellten E-Muffen wurden denselben Tests wie jene E-Muffen mit Klimaraumlagerung unterzogen. Es wurden wieder der Schrumpf von 3 % und die Formbeständigkeit unter Wärmeeinfluss (55 °C für 24 h) getestet. Zur Ermittlung der Formbeständigkeit unter Wärmeeinfluss wurden zwei Varianten angewendet. Einerseits wurden die E-Muffen direkt nach der 16-Taktanlage in dem Wärmeofen gelagert, andererseits wurden sie eine Woche bei Normbedingungen (20 °C, 50 %) gelagert danach wurde die Formbeständigkeit unter Wärmeeinfluss überprüft.

Durch die Lagerung der E-Muffen bei Normbedingungen und der anschließenden Prüfung der Formbeständigkeit unter Wärmeeinfluss war es möglich, einen größeren Innendurchmesser zu messen als ohne Lagerung und sofortiger Prüfung im Wärmeofen.

4 Ergebnisse

4.1 Zugversuch bei Raumtemperatur

Die 800 MPa, welche in dem Artikel [36] verwendet wurden, haben sich aus einer FEM Berechnung ergeben, welche dann zu den mechanischen Prüfungen gefittet wurde. Der E-Modul für das E-Muffen-Material wurde an der Universal-

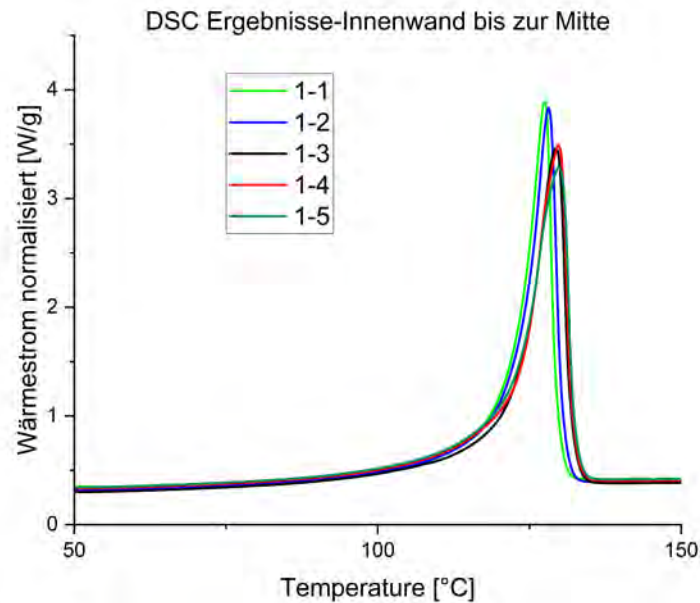


Abbildung 28: Ergebnisse der DSC-Messungen, beginnend an der Innenwand 1–1 bis zur Mitte 1–5 der Wandstärke

prüfmaschine ermittelt und beträgt 1000 MPa. Daher wurden für die Berechnung der Eigenspannungen mittels Ringschlitzversuch die 1000 MPa herangezogen. Weiters gilt es zu berücksichtigen, dass sich der E-Modul auch für unterschiedliche Deformationsgeschwindigkeiten ändert. Bei der E-Muffen Deformation ist die Deformationsgeschwindigkeit im Vergleich zu anderen Vorgängen relativ hoch und daher sind die 1000 MPa ein angemessener Wert [37].

4.2 DSC

In den Abbildungen 28 und 29 sind die Ergebnisse des DSC-Versuchs zu sehen. Einerseits beginnend an der Innenwand in Abbildung 28 und andererseits beginnend an der Außenwand in Abbildung 29. Beide Abbildungen lassen erkennen, dass sich bei 110 °C die ersten Bereiche aufschmelzen lassen und es daher bei dieser Temperatur interessant ist, Versuche durchzuführen. Man erkennt in den anschließenden Wärmelagerungsversuchen die Temperaturabhängigkeit des Schrumpfens. Wird die ermittelte Temperatur von 110 °C als Lagerungstemperatur verwendet, ist eine größere Schwindung erkennbar (siehe Abbildung 39).

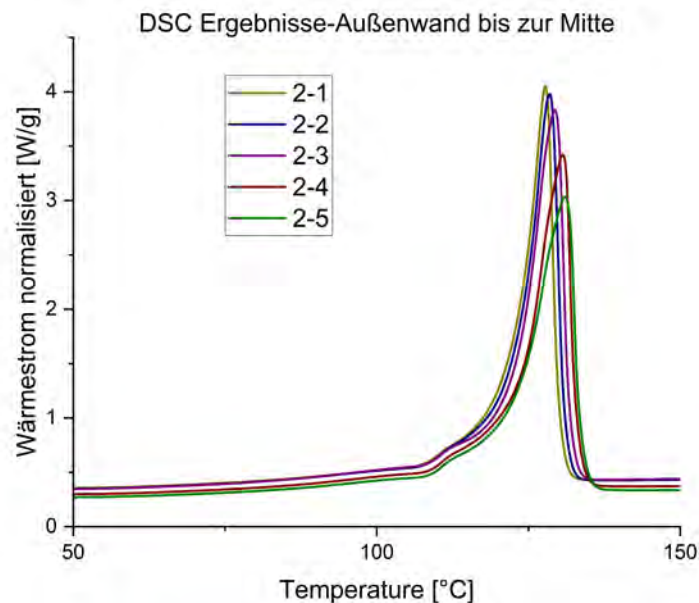


Abbildung 29: Ergebnisse der DSC-Messungen, beginnend an der Außenwand 2–1 bis zur Mitte 2–5 der Wandstärke

4.3 DMA

In Abbildung 31 sind die DMA Ergebnisse für die Proben, welche aus gepressten Platten hergestellt wurden, zu finden. Man erkennt, dass bei 115 °C der Speichermodul circa 100 MPa beträgt. Weiters erkennt man, dass der Speichermodul bei Raumtemperatur um die 1000 MPa beträgt. Dieser Wert deckt sich mit den Ergebnissen aus dem Zugversuch bei Raumtemperatur und den Ergebnissen aus dem Artikel [8], wo mittels des Burger's Modell und den Messwerten der E-Modul ermittelt wurde.

Ähnliche Werte für den Speichermodul wurden auch in dem Forschungsprojekt [25] ermittelt (siehe Abbildung 30).

4.4 TMA

In der Abbildung 32 sind die Ergebnisse der TMA-Analyse zu sehen. Die Ergebnisse decken sich mit den Schwindungsmessungen an den E-Muffen. Man erkennt eine Ausdehnung in Längsrichtung und eine Schwindung in Umfangsrichtung. Die Verläufe der Zustände verdichtet und aufgeweitet sind sehr ähnlich. Die Rohlinge zeigen einen anderen Verlauf.

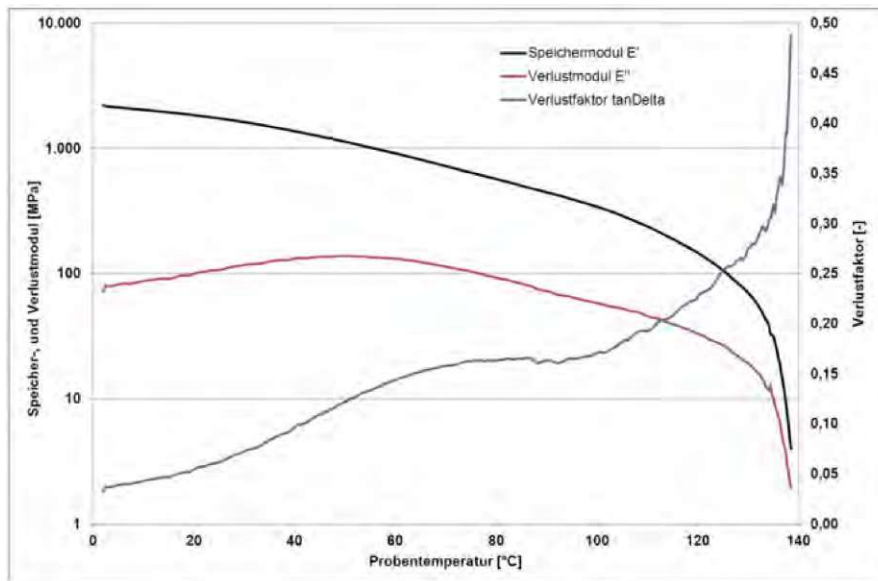


Abbildung 30: DMA Ergebnisse für PE 100 [25]

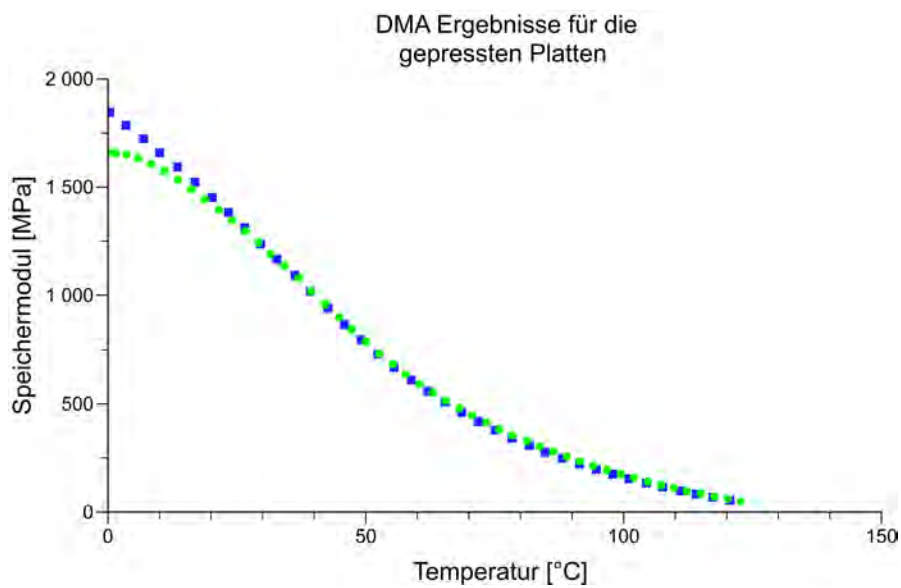


Abbildung 31: Speichermodul der Proben, welche aus gepressten Platten hergestellt wurden

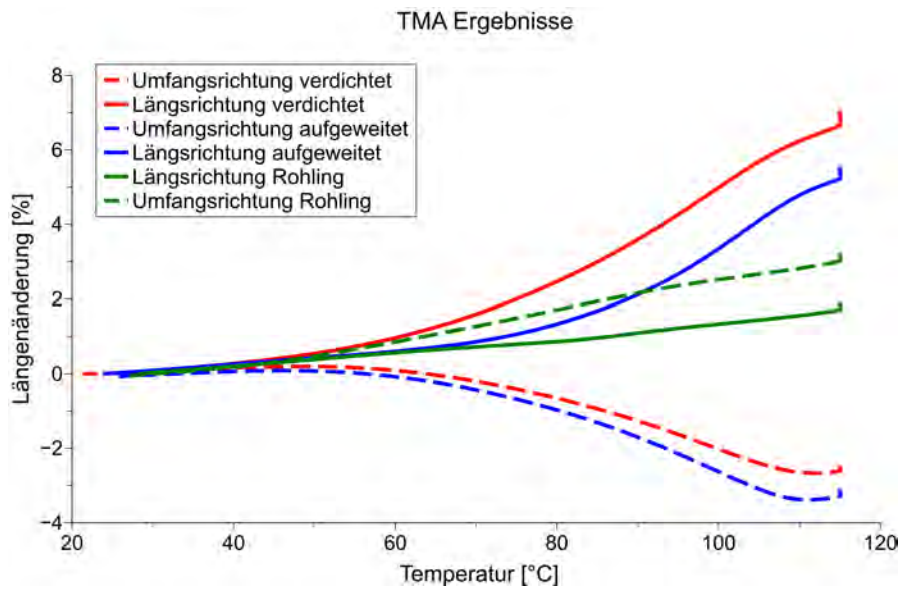


Abbildung 32: TMA Ergebnisse für die Längsrichtung und die Umfangsrichtung der E-Muffen Zustände aufgeweitet, verdichtet und Rohling

Ab circa 50 °C ist in Abbildung 32, für die Zustände verdichtet und aufgeweitet eine Änderung der Steigung zu erkennen. Dominierend ist in diesem Bereich für beide Richtungen die Wärmeausdehnung. Dieses Ergebnis deckt sich mit den Messungen der Außendurchmesser unter Wärmeeinfluss, welche in Abbildung 38a zu sehen sind. Die E-Muffen welche bei 50 °C gelagert wurden zeigen einen kleineren Außendurchmesser als jene bei 30 °C und 40 °C.

4.5 Eigenspannungen der E-Muffen Segmente mittels Ring-Schlitz Versuch

Die Eigenspannungsverläufe über die normierte Wandstärke sind in den Abbildungen 33 und 34 zu sehen. Aufgrund der geringen Breite der Segmente (8 mm) wurden die axialen Eigenspannungen gering gehalten und waren auch bei den Rohlingen nicht messbar.

Die Abbildungen 33 und 34 zeigen die arithmetischen Mittelwerte der Eigenspannungen der 8 mm Segmente für die vier unterschiedlichen Zustände der E-Muffen Segmente. Die Verläufe in den Abbildungen 33 und 34 zeigen, dass die unbearbeiteten E-Muffen Segmente (Rohlinge) die größten Eigenspannungen aufweisen (siehe 2.1 Schritt 1). Grund dafür ist der wie schon in Kapitel 2.2 besprochene Temperaturgradient von der Außenwand zur Innenwand, welcher sich durch die Rohrherstellung nicht zur Gänze vermeiden lässt. Die Ergebnisse decken

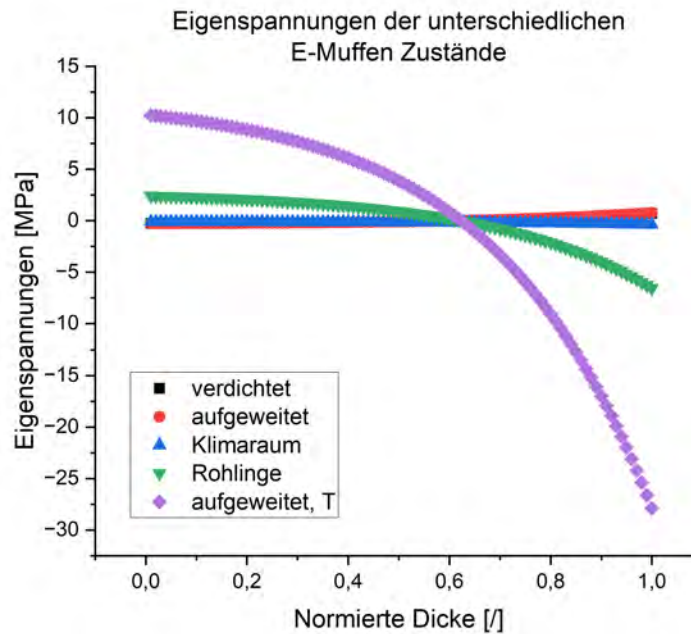


Abbildung 33: Eigenspannungsmittelwerte für verdichtete, unbearbeitete, aufgeweitete, Klimaraum E-Muffen und aufgeweitete E-Muffen gelagert im Wärmeofen, normiert über die Wanddicke

sich mit denen aus dem Artikel [1] und liegen zwischen 1 und 5 MPa, obwohl dort Rohre aus PE 100 verwendet wurden. Zum Vergleich sind die Ergebnisse aus dem Artikel [1] in Abbildung 35 zu sehen. Im Weiteren zeigen die aufgeweiteten E-Muffen Segmente ohne Klimaraumlagerung direkt nach dem Aufweiten ohne Klimaraum sehr geringe radiale Eigenspannungen bei Raumtemperatur. Durch die Wärmebehandlung beim Aufweiten (110 °C) kam es zu einem Abbau der produktionsbedingten radialen Eigenspannungen.

Die E-Muffen Segmente, welche nach dem Aufweiten in den Klimaraum kommen, zeigen unterschiedliches Verhalten bezüglich der Eigenspannungen im Vergleich zu den aufgeweiteten E-Muffen-Segmente ohne Klimaraumlagerung. Die Höhe der Eigenspannungen sind für beide Zustände gering, jedoch unterscheiden sich die Spannungen in ihren Vorzeichen. Die verdichteten und die aufgeweiteten E-Muffen haben positive Eigenspannungswerte. Im Gegensatz dazu haben die Rohlinge und die Klimaraum E-Muffen negative Eigenspannungen. Abbildung 34 verdeutlicht dies.

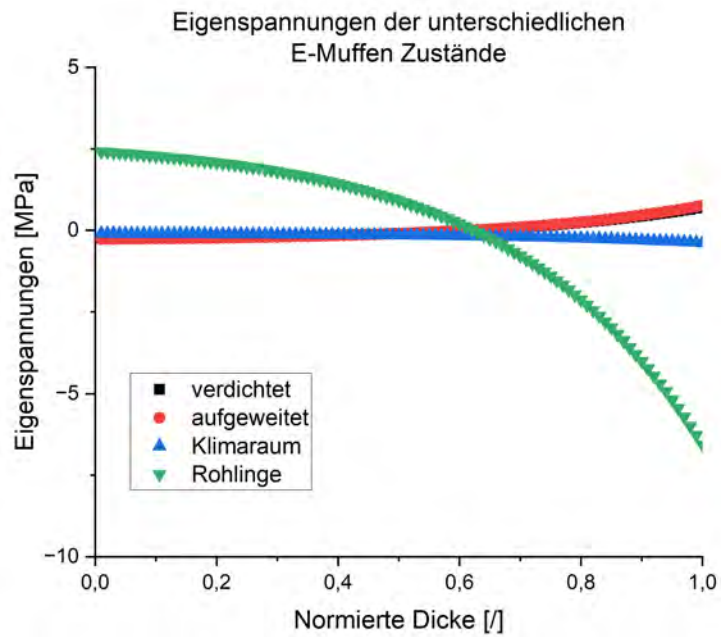


Abbildung 34: Eigenspannungsmittelwerte für verdichtete, unbearbeitete, aufgeweitete und Klimaraum E-Muffen, normiert über die Wanddicke

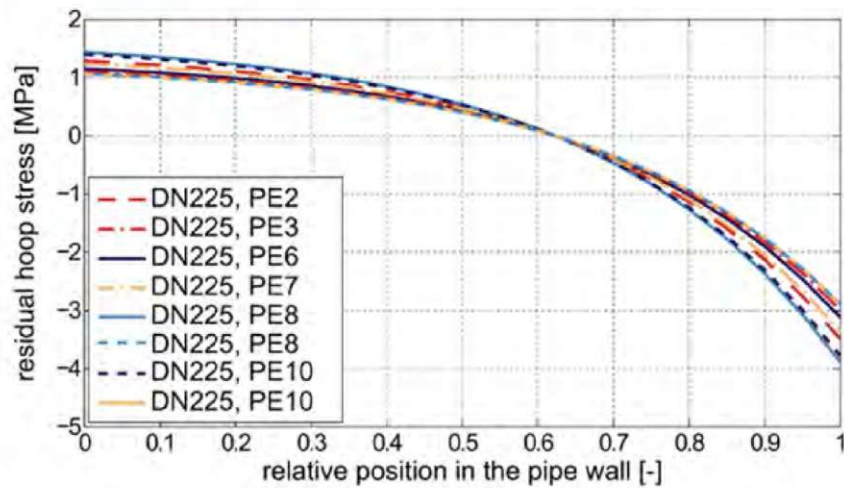


Abbildung 35: Eigenspannungsverlauf für PE-100 Rohre [1]

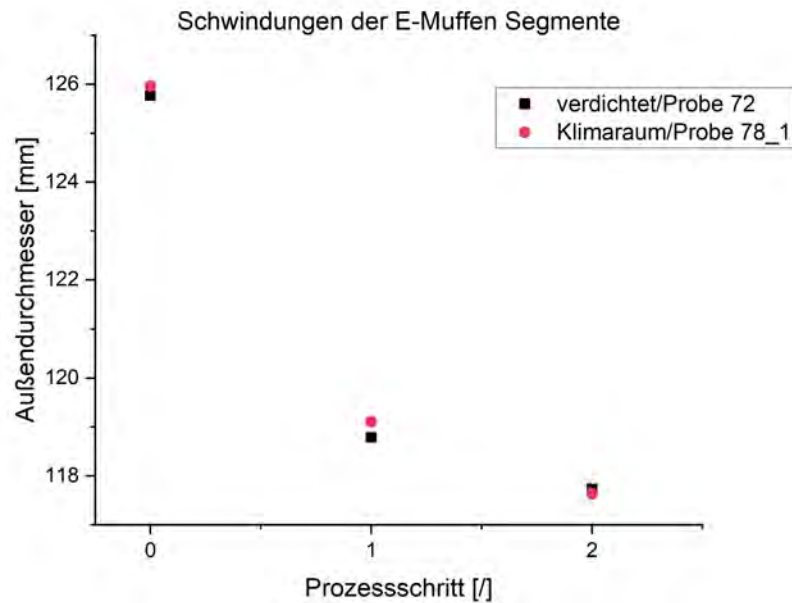


Abbildung 36: Die Proben 72 und 78_1 wurden folgenden Prozessschritten unterzogen. Die Segmente wurden bei Raumtemperatur vermessen (0), danach im Wärmeofen bei 110 °C für 20 Minuten gelagert und dann erneut vermessen (1). Aus den ausgekühlten Segmenten wurden dann 120° Stücke herausgeschnitten und nach 20 Minuten erneut vermessen (2)

4.6 Eigenspannungen der E-Muffen Segmente mittels Ring-Schlitz Versuch unter Wärmeeinfluss

Es wurden die Segmente zu unterschiedlichen Zeitpunkten im Wärmeofen gelagert und dann vermessen. Diese Methodik wurde in Kapitel 3.10 besprochen. In den Abbildungen 36 und 37 sind die Außendurchmesser in den unterschiedlichen Prozessschritten zu sehen. In Abbildung 36 ist ersichtlich, dass zwischen Probe 72 und 78 keine merklichen Unterschiede erkennbar sind. Die Abbildung 37 lässt erkennen, dass die Proben 73 und 79 im Prozessschritt 0 und 2 beinahe idente Werte zeigen. Jedoch unterscheiden sich die Werte im Prozessschritt 1. Im Gegensatz dazu sind die Werte der Probe 78_2 in allen Prozessschritten unterschiedlich zu den Proben 73 und 79.

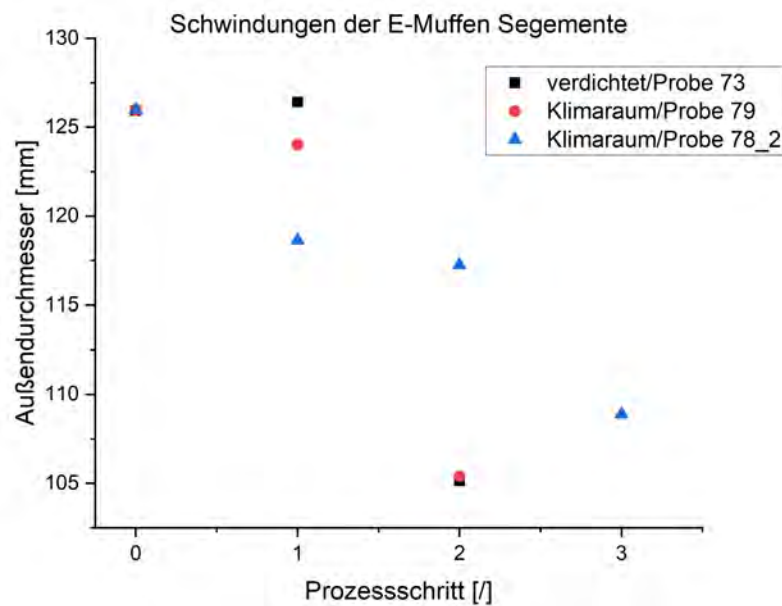


Abbildung 37: Die Proben 73 und 79 wurden folgenden Prozessschritten unterzogen. Die Segmente wurden bei Raumtemperatur vermessen (0), danach wurde ein 120° Stück aus dem Segment geschnitten und nach 20 Minuten vermessen (1). Anschließend wurden die Segmente im Wärmeofen bei 110 °C für 20 Minuten gelagert und im ausgekühlten Zustand vermessen(2). Probe 78_2 wurde bei Raumtemperatur vermessen (0), danach im Wärmeofen bei 110 °C für 20 Minuten gelagert und erneut vermessen (1). Anschließend wurde aus dem Segment ein 120° Stück herausgeschnitten und vermessen (2). Darauf folgend wurde das Segment nochmals bei 110 °C für 20 Minuten gelagert und vermessen (3).

Tabelle 2: Innendurchmesser vor und nach der Formbeständigkeitsprüfung. Prüftemperatur betrug 55 °C. Das (D) bedeutet, dass bei diesen E-Muffen der Draht in die E-Muffe eingebracht wurde

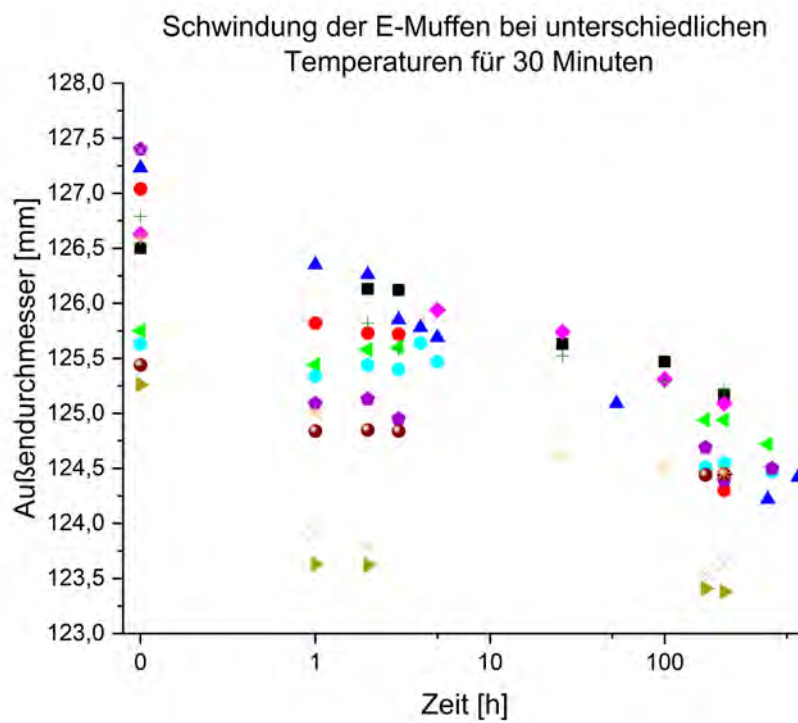
Prozesszustand	Innendurchmesser bei t = 0 h [mm]	Innendurchmesser bei t = 24h [mm]
aufgeweitet (D)	111,17	110,65
aufgeweitet (D)	111,23	110,69
verdichtet (D)	111,29	110,41
aufgeweitet	112,26	108,47
aufgeweitet	112,36	108,15
verdichtet	111,12	108,44

4.7 Temperaturverhalten der E-Muffen und Segmente vor der Verarbeitung in der 16-Taktanlage

In Abbildung 39 ist die Schwindung der E-Muffen zu sehen, wenn die E-Muffen bei einer Temperatur von 110 °C für 10 Minuten im Wärmeofen gelagert und danach bei Raumtemperatur abgekühlt werden. Man erkennt, dass die E-Muffen Rohlinge die geringsten Schwindungen zeigen, da sie die geringste Steigung aufweisen, was darauf hindeutet, dass die unterschiedlichen Spannungszustände in den Rohlingen zu einer kleineren Schwindung führen. Dies steht im Widerspruch mit den Eigenspannungsmessungen mittels Ringschlitzversuch, wo die Rohlinge die größten Eigenspannungen zeigen. Jedoch wirkt die Lagerung im Wärmeofen bei 110 °C wie die Lagerung vor dem Aufweiten. Daher lassen sich die zuerst widersprüchlichen Ergebnisse bei genauerer Betrachtung erklären. Die Eigenspannungen durch die Extrusion lassen sich abbauen, indem man die E-Muffen bei 110 °C in einem Wärmeofen lagert.

Die aufgeweiteten als auch die Klimaraumproben zeigen eine größere Schwindung, erkennbar an der größeren Steigung. Ihnen wurde durch eine erneute Erwärmung ein Relaxieren ermöglicht und so konnten die zuvor initiierten Eigenspannungen durch Wärmezufuhr abgebaut werden. Im Vergleich dazu erkennt man in Abbildung 33 die Eigenspannungen bei Herausschneiden eines Segmentes und der daraus resultierenden Spannung und Schwindung. Die E-Muffen Zustände, verdichtet, aufgeweitet und Klimaraum zeigen kleinere Eigenspannungen, was dazu passt, dass ihnen die Zeit gegeben wurde zu Relaxieren und so die produktionsbedingten Eigenspannungen abgebaut werden konnten. Zusätzlich wurden die E-Muffen bei verschiedenen Temperaturen und Verweilzeiten untersucht. Die Ergebnisse sind in den Abbildungen 38a, 41, 42, 43 und 44 zu sehen. In Abbildung 38a sind die Ergebnisse der unterschiedlichen Lagerungstemperaturen zu erkennen. Abbildung 38b zeigt die dazugehörige Legende. In allen Diagrammen ist zu erkennen, dass sich nach circa einer Woche ein Gleichgewichtszustand einstellt und der Außendurchmesser keine Änderungen mehr zeigt. Auf der logarithmischen x-Achse erkennt man ab ca. 100 h nur mehr sehr kleine Veränderungen bezüglich des Außendurchmessers. Diese Resultate sind sehr ähnlich denen des Artikels [4].

Mittels der drei Punkte Methode wird ein passender Kreis über die E-Muffe gelegt. Erkennbar ist das in Abbildung 22 und daraus lassen sich auch die fluktuierenden Messergebnisse erklären. Aus den Abbildungen ist zu erkennen, dass sich bei circa 124,5 mm ein konstanter Außendurchmesser einstellt, für alle Temperaturen und Verweilzeiten, außer den E-Muffen welche bei 50 °C im Wärmeschrank gelagert wurden. Diese zeigen eine größere Schrumpfung und es stellt sich ein konstanter Außendurchmesser von circa 123,5 mm ein. Auch hier zeigen sich übereinstimmende Ergebnisse mit dem Artikel [4]. Verschiedene Temperaturen führen zu unterschiedlichen Außendurchmessern und diese führen zu unterschiedlichen Spannungen.



(a) Schwindung der E-Muffen für unterschiedliche Temperaturen für 30 Minuten im Wärmeofen

- ▲ aufgeweitet, RT
- ◆ verdichtet, RT
- Klimaraum, RT
- ◆ aufgeweitet, 40 °C für 30 min
- Klimaraum, 40 °C für 30 min
- + verdichtet, 40 °C für 30 min
- aufgeweitet, 30 °C für 30 min
- verdichtet, 30 °C für 30 min
- ▲ Klimaraum, 30 °C für 30 min
- × aufgeweitet, 50 °C für 30 min
- ★ verdichtet, 50 °C für 30 min
- ▶ Klimaraum, 50 °C für 30 min

(b) Legende für die Abbildung (a)

Abbildung 38: Schwindung der E-Muffen für unterschiedliche Temperaturen für 30 Minuten im Wärmeofen und die dazugehörige Legende

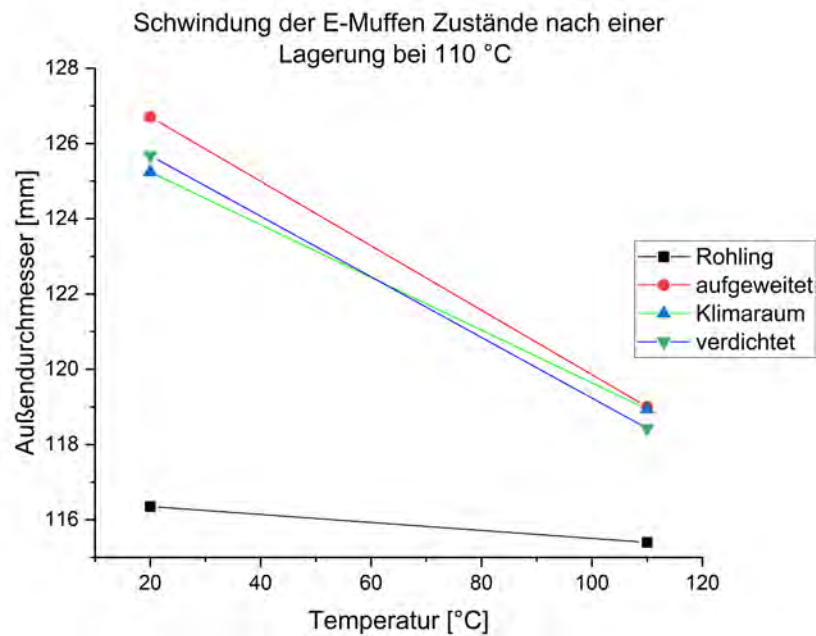


Abbildung 39: Schwindung der E-Muffen bei 110 °C für 10 Minuten im Wärmeofen

Weiters ist in den Abbildungen 41, 42, 43 und 44 zu erkennen, dass die verdichteten E-Muffen eine geringere Schwindung aufweisen. Parallel dazu wurden auch die Längen der E-Muffen aufgezeichnet.

Die Längen wurden mittels eines Messschiebers (Mitutoyo CD-P20K) vermessen. In Abbildung 45a sind die Längenentwicklungen der aufgeweiteten E-Muffen bei unterschiedlichen Lagerungstemperaturen zu sehen und in Abbildung 45b ist die Legende zu den Längenentwicklungen zu sehen. Abbildung 46 zeigt die Längenentwicklungen der E-Muffen, welche bei 110 °C gelagert wurden. Weiters wurde das Verhalten der aufgeweiteten E-Muffen bei minus Temperaturen untersucht, dazu wurde die E-Muffe direkt nach der Aufweitung gemessen und anschließend in einem Gefrierschrank mit -20 °C gelagert (siehe 2.1 Schritt 2). Zwischendurch wurde immer wieder der Außendurchmesser gemessen. Nach einer Woche zeigte sich immer noch keine Änderung des Außendurchmessers, nach einer weiteren Woche wurde die E-Muffe dann wieder bei Raumtemperatur gelagert und erneut vermessen. Die Messung ergab eine Schrumpfung, welche bis zu dem schon bekannten Außendurchmesser von 124,5 mm geführt hat (siehe Abbildung 40).

Die Untersuchung bei negativen Temperaturen wurde durchgeführt, um herauszufinden, ob das Schwinden der E-Muffen gebremst oder sogar unterbunden werden kann und wie sich ein anschließendes Lagern bei Raumtemperatur auswirkt. Mit der Lagerung bei -20 °C war es möglich, die Schrumpfung der E-Muffen zu verhin-

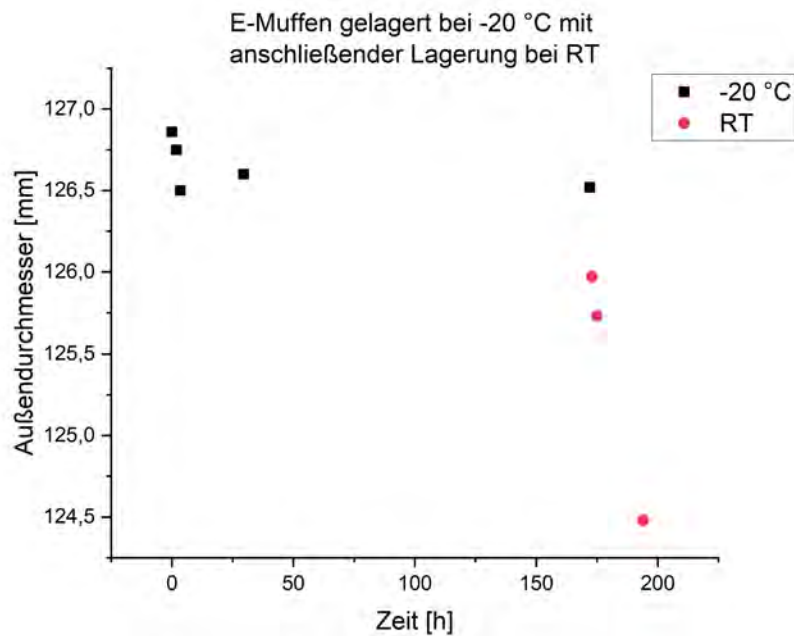


Abbildung 40: Außendurchmesser der E-Muffe bei einer Lagerung von -20 °C und einer anschließenden Lagerung bei RT

dern, durch die darauffolgende Lagerung bei Raumtemperatur konnten dieselben Vorgänge wie ohne Lagerung bei -20 °C beobachtet werden. Die Schrumpfung kann daher unterbunden werden, solange eine gewisse Temperatur nicht überschritten wird (Abbildung 40).

4.8 Temperaturverhalten der E-Muffen nach der Verarbeitung in der 16-Taktanlage

Es wurden E-Muffen Rohlinge direkt nach der Aufweitung entnommen und vermessen (siehe 2.1 Schritt 2). Es ist entscheidend, dass die E-Muffen den richtigen Außen- und Innendurchmesser haben, um sie in den 16-Taktanlagen verarbeiten zu können. Aus diesem Grund wurden die E-Muffen, welche direkt nach der Aufweitung entnommen wurden, jede Stunde vermessen bis sie den richtigen Durchmesser hatten. Dann wurden die E-Muffen der 16-Taktanlage zugeführt und gelagert. Zuerst wurde die Schrumpfung kontrolliert. Diese muss mindestens 3 % betragen, um sie als positiv anzusehen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 3 zu sehen.

In Abbildung 47 sind die Ergebnisse der fertigen E-Muffen nach dem Formbeständigkeitsversuch unter Wärmeeinfluss zu sehen. Die untere Grenze für den Innendurchmesser ist intern bei 110,60 mm festgelegt worden. Die obere Grenze

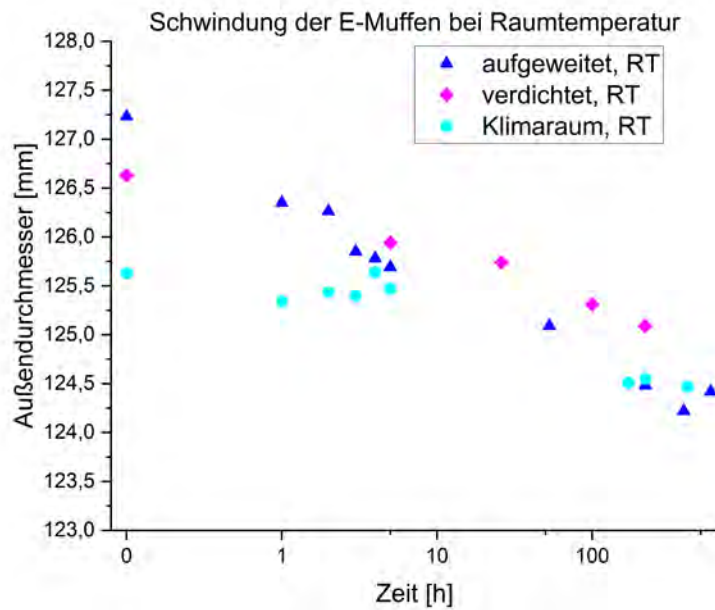


Abbildung 41: Schwindung der E-Muffen nach einer Lagerung bei Raumtemperatur

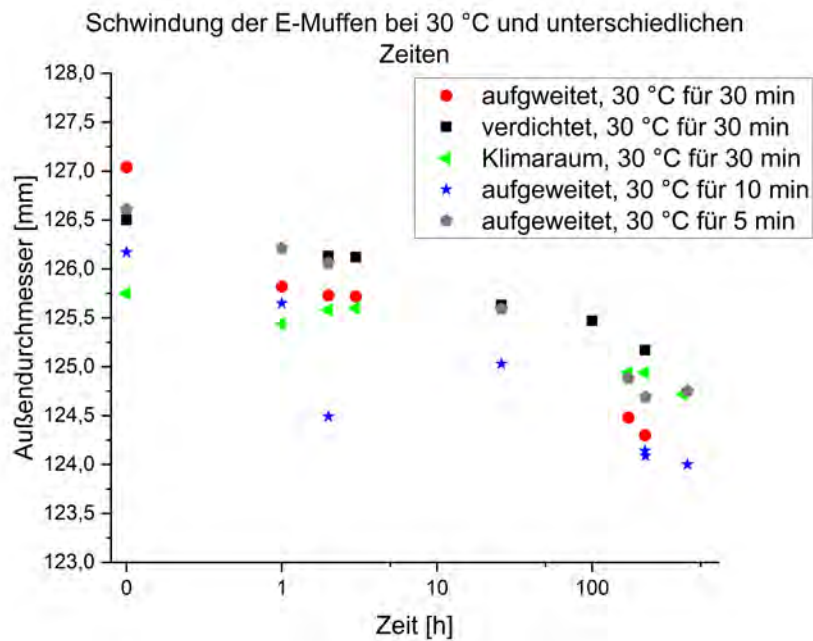


Abbildung 42: Schwindung der E-Muffen nach einer Wärmelagerung bei 30 °C für unterschiedliche Zeiten

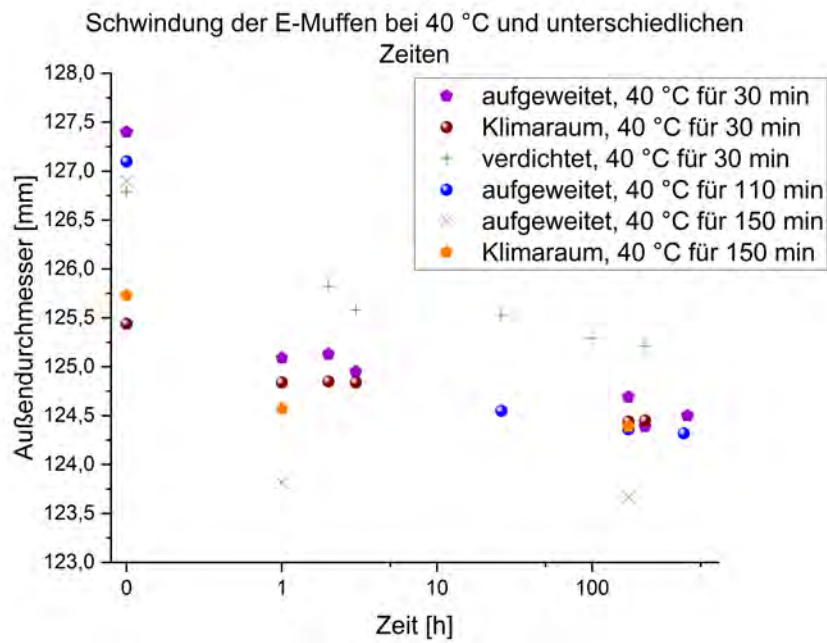


Abbildung 43: Schwindung der E-Muffen nach einer Wärmelagerung bei 40 °C für unterschiedliche Zeiten

Tabelle 3: Freischrumpf der fertigen E-Muffen

Prozesszustand	Schwindung [%]
aufgeweitet	3,72
aufgeweitet	3,52

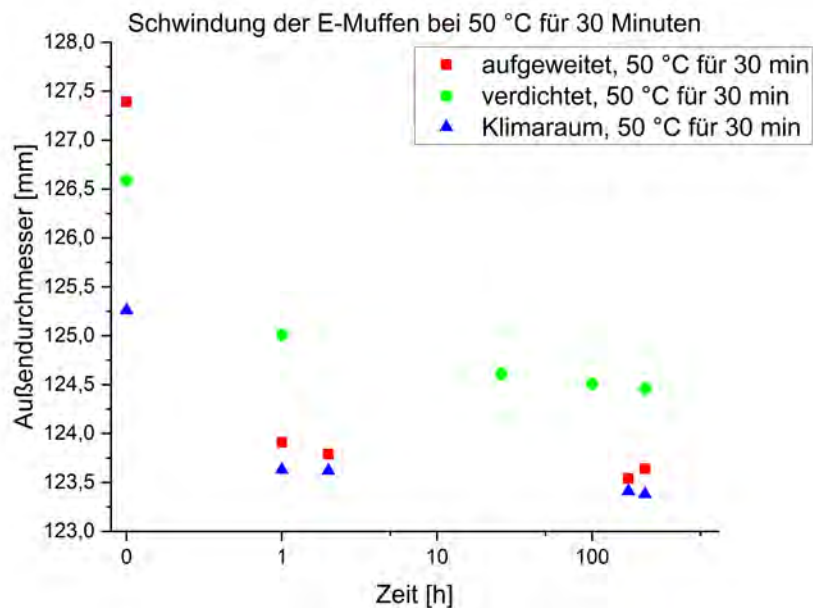
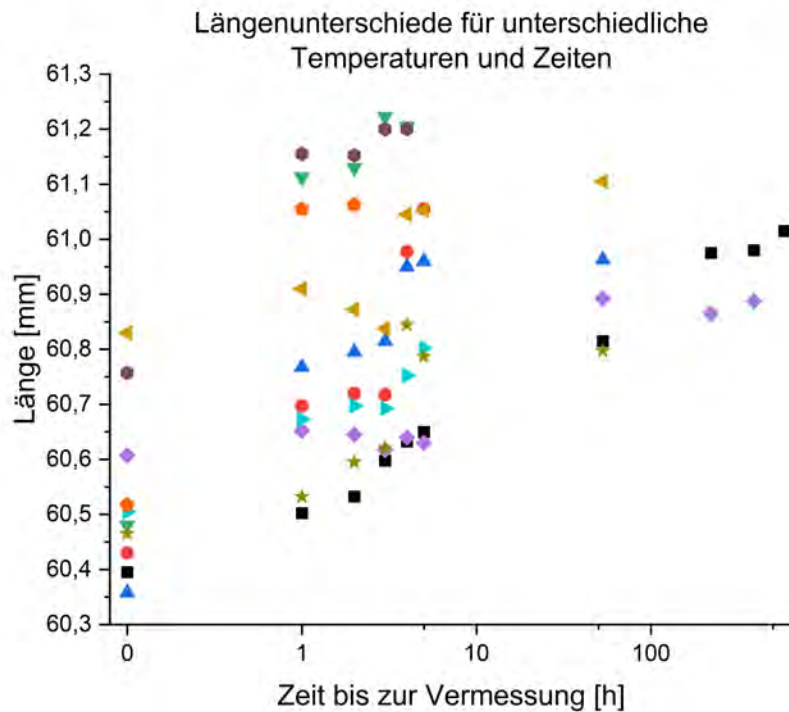


Abbildung 44: Schwindung der E-Muffen nach einer Wärmelagerung bei 50 °C für 30 Minuten

für den Außendurchmesser, damit die 16-Taktanlage die E-Muffen noch verarbeiten kann, beträgt 126,5 mm. Man erkennt, dass die Klimaraum E-Muffen und die aufgeweiteten E-Muffen mit Wartezeit die Anforderung erfüllen. Hingegen ist die Schrumpfung der aufgeweiteten E-Muffen ohne Wartezeit zu groß und die Anforderung an den Innendurchmesser wird nicht erfüllt. Weiters erkennt man, dass die verdichteten E-Muffen die größte Schrumpfung aufweisen. Die Klimaraum E-Muffen wurden für 36 h im Klimaraum gelagert und dann erst verarbeitet und die aufgeweiteten E-Muffen, welche 3 h nach dem Aufweiten in der 16-Taktanlage verarbeitet wurden, lagerten danach für eine Woche unter Normbedingungen.



(a) Längenunterschiede der verschiedenen E-Muffen Zustände

- aufgeweitet, RT
- aufgeweitet, 30 °C
- ▲ aufgeweitet, 40 °C
- ▼ aufgeweitet, 50 °C
- ◆ Klimaraum, RT
- ◀ Klimaraum, 30 °C
- ◀ Klimaraum, 40 °C
- Klimaraum, 50 °C
- ★ aufgeweitet, 30 °C, 5'
- aufgeweitet, 40 °C, 150'

(b) Legende für die Abbildung (a). Alle Proben ohne Zeitangabe lagerten für 30 Minuten im Wärmeofen

Abbildung 45: Längenausdehnung der E-Muffen für unterschiedliche Temperaturen und unterschiedliche Zeiten im Wärmeofen und die dazugehörige Legende

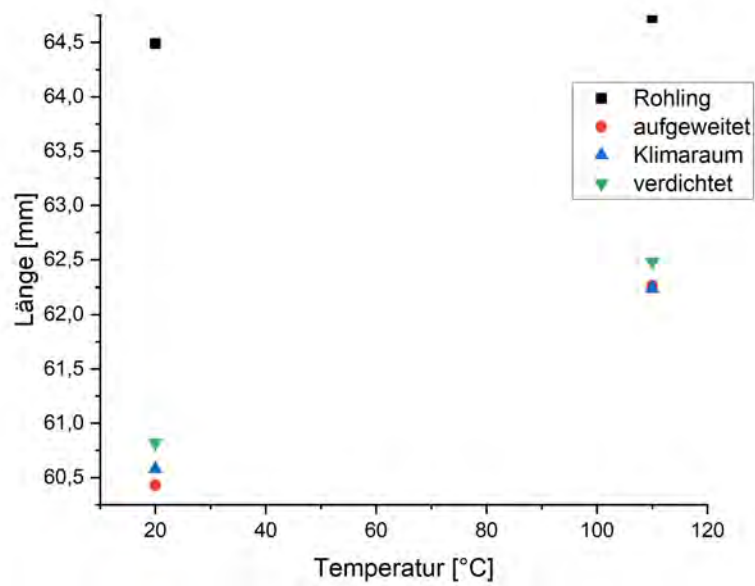


Abbildung 46: Längenunterschiede der unterschiedlichen E-Muffen Zustände nach 110 °C für 10 Minuten im Wärmeofen.

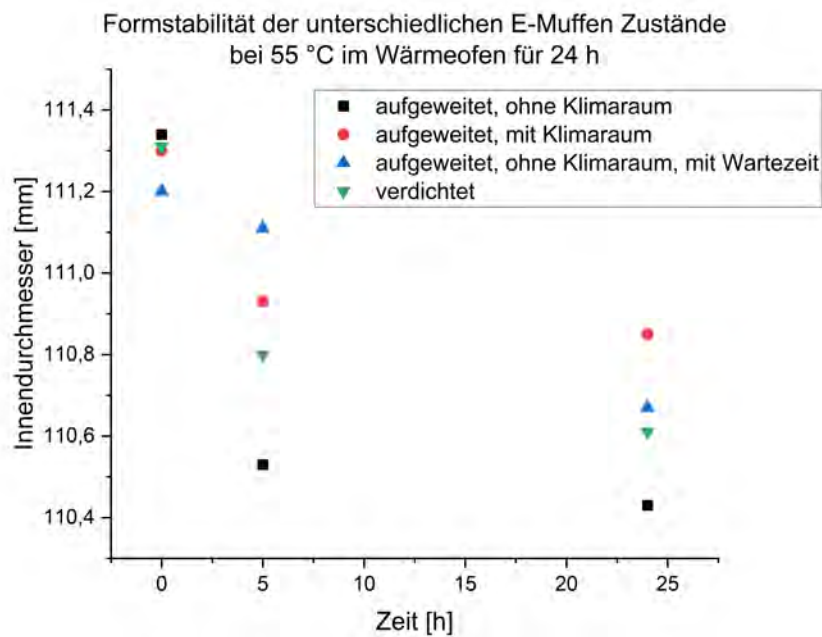
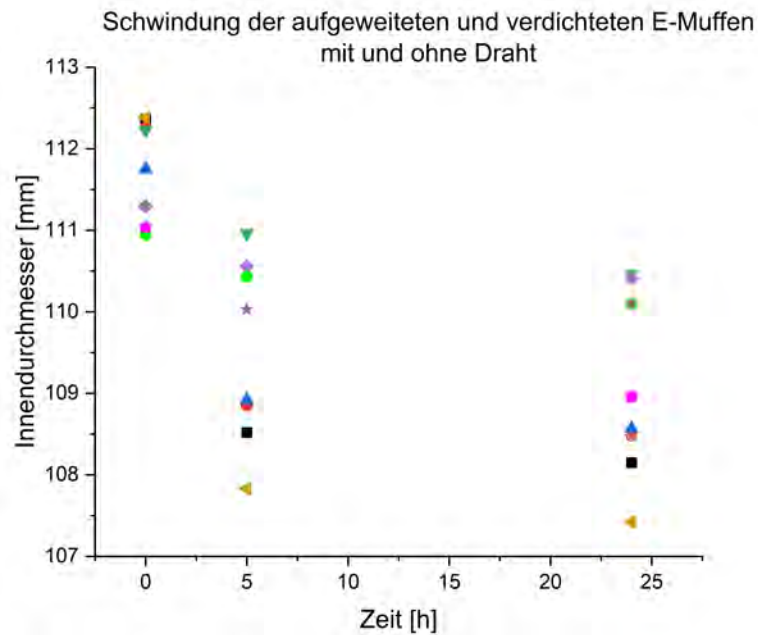


Abbildung 47: Schwindung der E-Muffen nach Verarbeitung in der 16-Taktanlage bei einer Lagerung von 55 °C für 24 h

4.9 Einfluss des Drahtes auf das Schrumpfverhalten

Vergleicht man die Schwindungen der unterschiedlichen E-Muffen Zustände, nämlich die fertigen E-Muffen nach der 16-Taktanlage und E-Muffen direkt nach dem Aufweiten und lagert beide bei 55 °C für 24 h, erkennt man eine Differenz in der Schwindung. Dieser Unterschied kommt von dem eingelegten Draht, welcher durch seine Steifigkeit der Schwindung entgegenwirkt (siehe Abbildung 48a und 48b).



(a) Schwindungsuntersuchungen bei verschiedenen Temperaturen im Vergleich von E-Muffen ohne Draht und einer E-Muffe mit Draht

- 55 °C, aufgeweitet, ohne Draht
- 50 °C, aufgeweitet, ohne Draht
- ▲ 40 °C, aufgeweitet, ohne Draht
- ▼ 30 °C, aufgeweitet, ohne Draht
- ◆ 55 °C, aufgeweitet mit Draht
- ▲ 60 °C, aufgeweitet, ohne Draht
- 30 °C, verdichtet, ohne Draht
- * 40 °C, verdichtet, ohne Draht
- ◆ 50 °C, verdichtet, ohne Draht
- 60 °C, verdichtet, ohne Draht

(b) Legende für die Abbildung (a)

Abbildung 48: Schwindungsuntersuchungen bei verschiedenen Temperaturen im Vergleich von E-Muffen ohne Draht und einer E-Muffe mit Draht und die dazugehörige Legende

Tabelle 4: Unterschiedlichen Schrumpfungen mit und ohne Draht bei unterschiedlichen Temperaturen

Prozesszustand	Innendurchmesser [mm]	Draht	Prüftemperatur [°C]
verdichtet	110,41	ja	55
aufgeweitet	110,69	ja	55
verdichtet	108,41	nein	60
verdichtet	109,84	nein	40
verdichtet	110,01	nein	30
aufgeweitet	108,48	nein	50
aufgeweitet	108,15	nein	55
aufgeweitet	108,57	nein	40
aufgeweitet	110,46	nein	30
aufgeweitet	107,42	nein	60

In Tabelle 4 sind die Schrumpfungen für unterschiedliche Temperaturen zu sehen und in Tabelle 2 sind die Schrumpfungen bei 55 °C zu sehen. Der Rohling hat einen Innendurchmesser von 100,7 mm und nach dem Aufweiten beträgt der Innendurchmesser 111,29 mm. Daraus ergibt sich eine Dehnung von 10,6 %.

5 Zusammenfassende Betrachtung

Die E-Muffen durchlaufen viele Prozessschritte und das bei unterschiedlichsten Temperaturen (Jahreszeiten). Die Versuche bei unterschiedlichen Temperaturen, in verschiedenen Zuständen (mit Draht, ohne Draht, Rohling, aufgeweitet, verdichtet und Klimaraum) und verschiedenen Lagerungszeiten haben gezeigt, dass in dem Temperaturbereich (0–55 °C) für die Verwendung nach der Herstellung durchaus große geometrische Änderungen vorstatten gehen.

Das Aufweiten und gleichzeitige Abkühlen führt zu einem energetisch labilen Zustand. Dieser Zustand wird hervorgerufen durch das Verstrecken der Tie-Moleküle und der Deformation der Sphärolithe. Dieser energetische nicht vorhandene Gleichgewichtszustand führt zu morphologischen Vorgängen, welche das Ziel haben einen energetischen Gleichgewichtszustand herzustellen. Dies geschieht über das Relaxieren der gestreckten Tie-Moleküle und auch über die Nachkristallisation. Um dies so kontrolliert wie möglich ablaufen zu lassen, wurden die E-Muffen in der Vergangenheit in einem temperaturkontrollierten Lager (Klimaraum) aufbewahrt. Heutzutage wird anstatt der Klimaraumlagerung das Verdichten als Alternativprozess angewendet. Das Verdichten der E-Muffen direkt nach dem Aufweiten und Abkühlen ist als ein Prozessschritt zu sehen, welcher den E-Muffen in einen

energetisch günstigeren Zustand verhilft. Das Verdichten als Ersatz für den Klimaraum funktioniert deshalb, weil hier zwei Effekte zu tragen kommen. Einerseits wird durch die rasche Weiterverarbeitung und das Verdichten wieder ein labiler Zustand erzeugt, jedoch energetisch günstiger als der Zustand direkt nach dem Aufweiten. Zusätzlich wird der E-Muffe im Weiteren keine Möglichkeit gegeben weiter zu schrumpfen, da sie in der 16-Taktanlage weiterverarbeitet wird und der Draht mit seiner Steifigkeit der Schwindung entgegenwirkt. Die Ergebnisse zeigen, dass die verdichteten E-Muffen bei allen getesteten Temperaturen einen größeren Außendurchmesser aufweisen als die im Klimaraum gelagerten E-Muffen. Die Ergebnisse zeigen auch, dass weder der Klimaraum noch der Verdichter notwendig wären, um alle erforderlichen Eigenschaften zu erhalten, aber um den Klimaraum oder den Verdichter ersetzen zu können, müsste der komplette Produktionsbereich temperiert werden und gleichzeitig müsste zusätzlich der Außendurchmesser jeder einzelnen E-Muffe vor der Zuführung in die 16-Taktanlage kontrolliert werden. Dadurch wäre gewährleistet, dass die 16-Taktanlage die E-Muffe auch verarbeiten kann und die zwei Anforderungen, die Formbeständigkeit unter Wärmeeinfluss und den Schrumpf von 3 % erfüllt sind. Jedoch wären diese Änderungen wirtschaftlich nicht zu vertreten.

In Zukunft gilt es diese zwei Vorgänge genau zu beachten, sollten Änderungen an den Prozessen vorgenommen werden. Das Nachkristallisieren ist ein Vorgang, welcher erst zu späteren Zeitpunkten relevant wird, vor allem wenn die E-Muffen zu lange unverarbeitet gelagert werden. Weiters gilt es, die Relaxation der verstreckten Ketten zu berücksichtigen. Diese Vorgänge starten sehr schnell nach dem Aufweiten und können zwar durch sehr niedrige Temperaturen (siehe Abbildung 40) unterbunden werden, jedoch führt eine kurze Lagerung bei Raumtemperatur schon zu einem Relaxieren der E-Muffen. Da eine Lagerung bei -20 °C wirtschaftlich nicht möglich ist, kann die Schwindung nicht unterbunden werden und muss daher einkalkuliert werden.

Der Draht mit seiner stabilisierenden Wirkung führt auch dazu, dass die E-Muffen allen Anforderungen entsprechen. Wird das Material oder der Durchmesser des Drahtes geändert und hat das Drahtmaterial andere mechanische Eigenschaften, wird die E-Muffe einen anderen neuen Gleichgewichtszustand einnehmen. Daher ist die E-Muffe immer als System zu betrachten, welches durch seine Komponenten (Muffe, Draht) und Prozessschritte (Aufweiten, Verdichten, 16-Taktanlage) definiert ist. Jede Änderung in diesem System führt zu einem anderen Zustand des Systems.

Literatur

- [1] Jan Poduška u. a. „Residual stress in polyethylene pipes“. In: *Polymer Testing* 54 (Sep. 2016), S. 288–295. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2016.07.017.
- [2] A. Kazakov. „An automated method for the measurement of residual stress in melt-extruded plastic pipes“. In: *Polymer Testing* 17.6 (Sep. 1998), S. 443–450. DOI: 10.1016/S0142-9418(97)00069-X.
- [3] John Sweeney u. a. „Shrinkage restraint forces in oriented PET, PMMA and PET/PMMA blend: Contrasting effects on cooling“. In: *Express Polymer Letters* 17.12 (2023), S. 1212–1223. DOI: 10.3144/expresspolymlett.2023.92.
- [4] Jong-Sung Kim, Jeong-Ho Yoo und Young-Jin Oh. „A study on residual stress mitigation of the HDPE pipe for various annealing conditions“. In: *Journal of Mechanical Science and Technology* 29.3 (März 2015), S. 1065–1073. DOI: 10.1007/s12206-015-0218-7.
- [5] Gottfried W. Ehrenstein. *Polymer Werkstoffe, Struktur-Eigenschaften-Anwendung*. Bd. 3. Hanser Verlag, 2011. ISBN: 978-3-446-42283-4.
- [6] Ludwig L. Bohm, Hans F. Enderle und Manfred Fleißner. „High-density polyethylene pipe resins“. In: *Advanced Materials* 4.3 (März 1992), S. 234–238. DOI: 10.1002/adma.19920040317.
- [7] L. Lin und A. S. Argon. „Structure and plastic deformation of polyethylene“. In: *Journal of Materials Science* 29.2 (1994), S. 294–323. DOI: 10.1007/BF01162485.
- [8] Ozgen U. Colak und Necmi Dusunceli. „Modeling Viscoelastic and Viscoplastic Behavior of High Density Polyethylene (HDPE)“. In: *Journal of Engineering Materials and Technology* 128.4 (1. Okt. 2006), S. 572–578. DOI: 10.1115/1.2345449.
- [9] Shailesh R. Doshi. „Prediction of residual stress distribution in plastic pipe extrusion“. In: *Journal of Vinyl and Additive Technology* 11.4 (Dez. 1989), S. 190–194. DOI: 10.1002/vnl.730110410.
- [10] Martin Bonnet. *Kunststofftechnik*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2016. ISBN: 978-3-658-13827-1. DOI: 10.1007/978-3-658-13828-8.
- [11] Georg Menges u. a. *Menges Werkstoffkunde Kunststoffe*. 6. Carl Hanser Verlag, 2011. 445 S. ISBN: 978-3-446-42762-4.
- [12] D. Milicevic u. a. „Microstructure and crystallinity of polyolefins oriented via solid-state stretching at an elevated temperature“. In: *Fibers and Polymers* 13.4 (Apr. 2012), S. 466–470. DOI: 10.1007/s12221-012-0466-4.

- [13] Necmi Dusunceli und Ozgen U. Colak. „High density polyethylene (HDPE): Experiments and modeling“. In: *Mechanics of Time-Dependent Materials* 10.4 (Dez. 2006), S. 331–345. DOI: 10.1007/s11043-007-9026-5.
- [14] Hans Domininghaus u. a. *Kunststoffe*. 8. Aufl. Springer Verlag, 2012. ISBN: 978-3-642-16172-8.
- [15] Carsten Ihmels. „Metallocenkatalysierte Gasphasenpolymerisation von Ethylen in einem Minireaktor“. Diss. URL: <https://api-depositonce.tu-berlin.de/server/api/core/bitstreams/1427b13b-8ec5-4844-9fcd-941cb70e3fde/content> (besucht am 18.10.2023).
- [16] L. L. Böhm u. a. „Polyethylen, polypropylen: Neue perspektiven für standardpolymere“. In: *Angewandte Makromolekulare Chemie* 244.1 (Jan. 1997), S. 93–120. DOI: 10.1002/apmc.1997.052440105.
- [17] Margit Weltschev. „Vergleich der Materialkennwerte von Formstoffen aus Polyethylen hoher Dichte mit dem Baumsterverhalten von Gefahrgutverpackungen“. In: (). URL: https://opus4.kobv.de/opus4-bam/files/105/diss53_vt.pdf (besucht am 18.10.2023).
- [18] Jyotishkumar Parameswaranpillai u. a. *Polymer Crystallization*. Wiley-VCH. ISBN: 978-3-527-35081-0.
- [19] Ariane Jungmeier, Martina Vetter und Ernst Schmachtenberg. „Charakterisierung der Struktur teilkristalliner Thermoplaste mittels Kleinwinkellichtstreuung“. In: *Practical Metallography* 46.4 (1. Apr. 2009), S. 173–193. DOI: 10.3139/147.110013.
- [20] L Hubert u. a. „Physical and mechanical properties of polyethylene for pipes in relation to molecular architecture. I. Microstructure and crystallisation kinetics“. In: *Polymer* 42.20 (Sep. 2001), S. 8425–8434. DOI: 10.1016/S0032-3861(01)00351-2.
- [21] *DIN EN ISO 9080:2013-02, Kunststoff-Rohrleitungs-und Schutzrohrsysteme-Bestimmung des Zeitstand-Innendruckverhaltens von thermoplastischen Rohrwerkstoffen durch Extrapolation (ISO9080:2012); Deutsche und Englische Fassung EN ISO9080:2012*. Beuth Verlag GmbH. DOI: 10.31030/1908468.
- [22] Simon Geier u. a. „Synthetische Kunststoffe“. In: Hans Domininghaus. *Kunststoffe*. Hrsg. von Peter Elsner, Peter Eyerer und Thomas Hirth. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012, S. 115–1201. DOI: 10.1007/978-3-642-16173-5_2.
- [23] Christian Bonten. *Kunststofftechnik*. 3. Aufl. Hanser Verlag, 2020. ISBN: 978-3-446-46471-1.

- [24] Markus Haager, Thomas Frank und Albert Lueghamer. „Einfluss der Werkstoffqualität auf das Langzeitverhalten von Schweißverbindungen Influence of the material quality on the long-term behaviour of welded joints“. In: (). URL: https://www.frank-gmbh.de/de-wAssets/docs/download-englisch/download/objektberichte/fachbeitrag_joining_2007_12.pdf (besucht am 10.11.2023).
- [25] Jürgen Kern u. a. *DBU-Abschlussbericht-AZ-30581.pdf*. URL: <https://www.dbu.de/OPAC/ab/DBU-Abschlussbericht-AZ-30581.pdf> (besucht am 19.10.2023).
- [26] Ziad Chebbo u. a. „Numerical and experimental study of the electrofusion welding process of polyethylene pipes“. In: *Polymer Engineering & Science* 55.1 (Jan. 2015), S. 123–131. DOI: 10.1002/pen.23878.
- [27] Jeremy Bowman. „A review of the electrofusion joining process for polyethylene pipe systems“. In: *Polymer Engineering & Science* 37.4 (Apr. 1997), S. 674–691. DOI: 10.1002/pen.11712.
- [28] Benjamin Baudrit und Oliver Stübs. *DBU-Abschlussbericht-AZ-27249.pdf*. URL: <https://www.dbu.de/OPAC/ab/DBU-Abschlussbericht-AZ-27249.pdf> (besucht am 06.10.2023).
- [29] Selim Serkan Say und Abdulkadir Alper Akgungor. „Welding defects and their reasons observed in electrofusion welding of polyethylene pipes“. In: (2009). URL: <http://members.igu.org/html/wgc2009/papers/docs/wgcFinal00064.pdf> (besucht am 12.10.2023).
- [30] Y. Kong und J.N. Hay. „The measurement of the crystallinity of polymers by DSC“. In: *Polymer* 43.14 (Juni 2002), S. 3873–3878. DOI: 10.1016/S0032-3861(02)00235-5.
- [31] John J. Aklonis und William J. MacKnight. *Introduction to polymer viscoelasticity*. 3rd ed. Hoboken, N.J: Wiley-Interscience, 2005. 316 S. ISBN: 978-0-471-74045-2.
- [32] N. Ben Aoun u. a. „Viscoelastic characterization of high-density polyethylene membranes under the combined effect of the temperature and the gravity for thermoforming applications“. In: *Polymer Engineering & Science* 60.11 (Nov. 2020), S. 2676–2684. DOI: 10.1002/pen.25513.
- [33] Kevin P. Menard und Noah Menard. *Dynamic mechanical analysis*. Boca Raton: Taylor und Francis, 2020. ISBN: 978-1-4822-5551-5.
- [34] Na Tan und P.-Y. Ben Jar. „Determining Deformation Transition in Polyethylene under Tensile Loading“. In: *Polymers* 11.9 (28. Aug. 2019), S. 1415. DOI: 10.3390/polym11091415.

- [35] *DIN EN ISO 527-2:2012-06, Kunststoffe- Bestimmung der Zugeigenschaften_- Teil_2: Prüfbedingungen für Form- und Extrusionsmassen (ISO_527-2:2012); Deutsche Fassung EN_ISO_527-2:2012.* Beuth Verlag GmbH. DOI: 10.31030/1860304.
- [36] Na Tan u. a. „Evaluating the Residual Stress and Its Effect on the Quasi-Static Stress in Polyethylene Pipes“. In: *Polymers* 14.7 (3. Apr. 2022), S. 1458. DOI: 10.3390/polym14071458.
- [37] Jianfeng Shi u. a. „Finite element analysis of high-density polyethylene pipe in pipe gallery of nuclear power plants“. In: *Nuclear Engineering and Technology* 53.3 (März 2021), S. 1004–1012. DOI: 10.1016/j.net.2020.08.019.