

HafenCity Universität Hamburg

Bauingenieurwesen | Bereich Fernwärme

BACHELORARBEIT

Untersuchung der Verbundscherfestigkeit von Kunststoffmantelrohren nach erfolgter Knickbelastung

Vorgelegt von: Alexander-Oscar Brodersen

Matrikelnummer: 6074786

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. Ingo Weidlich

Zweitprüfer: Dipl.-Ing. (FH) Marcus Illguth M.Eng.

Bearbeitungszeitraum: 23.01.2025 - 17.04.2025

Ort, Abgabedatum: Hamburg, 16.04.2025

Danksagung

Im Vorfeld möchte ich mich ausdrücklich für die Möglichkeit bedanken, meine Arbeit im Baulabor der HafenCity Universität Hamburg durchführen zu können. Gleichzeitig möchte ich meine Wertschätzung für die Bereitstellung der Kunststoffmantelrohre sowie sämtlicher, für die Durchführung der Untersuchungen, notwendigen Materialien zum Ausdruck bringen.

Mein besonderer Dank gilt den Mitarbeitenden des Baulabors der Hafencity Universität Hamburg, die mir mit Fachwissen und Hilfsbereitschaft zur Seite standen. Die Zusammenarbeit war für mich sowohl fachlich als auch persönlich bereichernd und hat mein Verständnis für das Fachgebiet umfassend erweitert.

Allen beteiligten Personen spreche ich meinen herzlichen Dank aus und wünsche ihnen alles Gute für die Zukunft.

Kurzfassung

In Betrieb genommene Fernwärmeleitungen unterliegen aufgrund des durchgeleiteten Heizwassers einer Temperaturlast $\Delta T > 0$. Diese führt entweder zu einer Längenänderung der Leitungen oder, bei behinderter Dehnung, zu axialen Spannungen im Rohr. Um die Ausdehnungen zu kompensieren und auftretende Axialkräfte innerhalb der Rohrleitung zu minimieren, werden Fernwärmesysteme im Erdreich entsprechend ausgelegt. Wird jedoch die kritische Längskraft überschritten, kann es bei Freilegung oder unzureichendem Querwiderstand zum Biegeknicken der Rohrleitung kommen.

Das am meisten eingesetzte Rohrsystem in der Fernwärme ist das Kunststoffmantelrohr (KMR), das aus einem konzentrisch in einer Polyethylen-Ummantelung (PE) eingebetteten Stahl-Mediumrohr besteht. Der Hohlraum ist mit Polyurethan-Schaum (PUR) gefüllt.

Die temperaturbedingte Längendehnung von eingebauten KMR wird teilweise durch Reibungskräfte zwischen Bodenmaterial und PE-Außenmantel, in Kombination mit dem kraftschlüssigen Verbund des PUR-Schaums zwischen Stahl-Mediumrohr und PE-Ummantelung, reduziert. Die Einhaltung der Mindestscherfestigkeit des Verbunds ist gemäß DIN EN 253 [R4] erforderlich, um die Kraftübertragung sicherzustellen.

Im Rahmen dieser Arbeit werden Proben aus Kunststoffmantelrohren entnommen, die zuvor Biegeknickbelastungen ausgesetzt wurden. Diese Querschnitte werden hinsichtlich visueller Schäden am PUR-Schaum sowie geometrischer Veränderungen untersucht. Darüber hinaus wird die Verbundscherfestigkeit spezifisch ausgewählter Proben normgerecht überprüft.

Die Untersuchungen zeigen, dass keine eindeutigen Schäden wie Risse oder Brüche im PUR-Schaum festgestellt werden konnten. Auch eine unzulässige Degradation der Verbundfestigkeit konnte durch die experimentellen Prüfverfahren nicht nachgewiesen werden. Maßliche Abweichungen belegen jedoch werksseitige Unregelmäßigkeiten und lokale Verformungen einzelner Proben infolge des Biegeknickens.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	I
Kurzfassung	II
1. Einleitung.....	1
1.1 Problemstellung und Zielsetzung.....	1
1.2 Vorgehensweise.....	4
2. Theoretische Grundlagen	5
2.1 Fernwärme Allgemein.....	5
2.2 Rohrleitungen der Wärmeverteilung.....	7
2.2.1 Stahl-Mediumrohr des KMRs.....	7
2.2.2 Polyurethan-Schaum des KMRs	7
2.2.3 Polyethylen-Mantel des KMRs.....	8
2.2.4 Formstücke.....	9
2.2.5 Muffen und Endmuffen.....	10
2.2.6 Reduzierungen	11
2.2.7 Dehnpolster	11
2.2.8 Einmalkompensatoren (EKO)	12
2.3 Scherfestigkeit von KMR	13
2.3.1 Mindestscherfestigkeit des Verbunds.....	13
2.3.2 Reibungswiderstand des PE-Außenmantels	13
2.4 Freigrabelängen und Überdeckungshöhen.....	14
2.4.1 Verlegekonzept bei Freilegung des KMRs	15
2.4.2 Verlegekonzept bei zu geringer Überdeckung des KMRs	17
2.4.3 Verlegekonzept bei Baugruben neben dem KMR.....	19
2.4.4 Verlegekonzept zur Sicherheit gegen Beulen bzw. Ratcheting des KMRs.....	21
2.4.5 Weitere Rahmenbedingungen	21

2.5 Euler Knickfall.....	22
2.5.1 Berechnungsgrundlage nach Euler	22
2.5.2 Anwendungsfall im Betrieb des Fernwärmesystems	23
3. Untersuchungen	25
3.1 Knickbelastung von Kunststoffmantelrohren	25
3.1.1 Versuchsablauf der Knickversuche im Rahmen der Masterarbeit	25
3.1.2 Versuchsergebnisse der Knickversuche	26
3.2 Auswahl und Entnahme der KMR-Probekörper	31
3.2.1 Rahmenbedingungen der Probenentnahme	32
3.2.2 Entnahme der Probekörper	32
3.2.3 Position und Bezeichnung der entnommenen Proben	33
3.3 Visuelle und messtechnische Querschnittsanalyse	35
3.3.1 Visuelle Querschnittsanalyse	35
3.3.1.1 Endergebnis der visuellen Überprüfung	40
3.3.2 Überprüfung der Abmessungen mithilfe eines Messschiebers	41
3.3.2.1 Überprüfung der Abmessungen des Stahl-Mediumrohrs.....	41
3.3.2.2 Überprüfung der Abmessungen der Polyethylen-Ummantelung.....	46
3.3.2.3 Endergebnis der Maßprüfung mithilfe eines Messschiebers	50
3.3.3 Überprüfung der Koaxialitätsabweichung mittels 3D-Messverfahren	51
3.3.3.1 3D-Messungen der Koaxialitätsabweichung	51
3.3.3.2 Endergebnis der Koaxialitätsmessungen	58
3.3.4 Zusammenfassung der visuellen und messtechnischen Ergebnisse.....	60
3.4 Scherfestigkeitsprüfung der Probekörper nach DIN EN 253	61
3.4.1 Rahmenbedingungen der Scherfestigkeitsprüfung nach DIN EN 253	61
3.4.1.1 Berechnung der Scherfestigkeit von KMR.....	61
3.4.1.2 Mindestanforderung der Scherfestigkeit von KMR.....	63

3.4.2 Prüfungsablauf im Labor der HafenCity Universität Hamburg.....	63
3.4.3 Ergänzende Maßbestimmungen zur Scherfestigkeitsprüfung	65
3.4.4 Aufgetretene Probleme bei der Scherfestigkeitsprüfung	68
3.4.5 Ergebnisse der Scherfestigkeitsprüfung nach DIN EN 253.....	68
3.4.6 Analyse des Schubverhaltens im Anfangsverformungsbereich.....	79
3.4.7 Zusammenfassung der Ergebnisse der Scherfestigkeitsuntersuchung.....	82
4. Zusammenfassung	83
5. Ausblick	85
Verwendete Regelwerke, Normen und Gesetze.....	86
Literaturverzeichnis	88
Abbildungsverzeichnis.....	90
Tabellenverzeichnis.....	95
Abkürzungs- und Symbolverzeichnis	96

1. Einleitung

1.1 Problemstellung und Zielsetzung

Der vom Menschen verursachte Klimawandel stellt eine der größten Herausforderungen unserer Zukunft dar. Zur Begrenzung der fortschreitenden globalen Erwärmung sind Maßnahmen in sämtlichen Sektoren erforderlich. Die Bauwirtschaft trägt dabei eine hohe Verantwortung, da sie maßgeblich an den Treibhausgasemissionen beteiligt ist. Mit Berücksichtigung der Energieversorgung von Gebäuden, sind 37% der gesamten globalen CO₂-Emissionen auf den Bausektor zurückzuführen [1, S. 10]. Um die CO₂-Emissionen zu reduzieren und die Energiewende voranzutreiben, setzt Deutschland verstärkt auf den Ausbau der Fernwärme. Am 1. Januar 2024 sind mit dem aktualisierten Gebäudeenergiegesetz (GEG) [R1] und dem Wärmeplanungsgesetz (WPG) [R2] neue Regelungen in Kraft getreten, die auf die Optimierung einer klimaneutralen Energieversorgung abzielen. Das übergeordnete Ziel ist es, bis spätestens 2045 eine treibhausgasneutrale Wärmeversorgung zu erreichen.

Laut dem aktuellen Hauptbericht des Energieverbands für Wärme, Kälte und KWK e.V. (AGFW) beträgt die Trassenlänge der Fernwärme im Jahr 2022 insgesamt 35.383 Kilometer [2, S. 22]. In Verbindung mit dem fortlaufenden Ausbau von Fernwärmeleitungen ist es notwendig, die installierten Fernwärmetrassen nachhaltig und effizient zu erhalten. Dabei ist es erforderlich, spezifische Rahmenbedingungen zu erfüllen, die dem Schutz und der langfristigen Funktionstüchtigkeit der Leitungsinfrastruktur dienen.

Im Rahmen dieser Arbeit werden Fernwärmeleitungen im eingebauten Zustand innerhalb des Erdreichs betrachtet.

Das in Deutschland am häufigsten verwendete Fernwärmerohr ist das Kunststoffmantelrohr (KMR). Es besteht aus einem Stahl-Mediumrohr, durch das das erhitzte Medium, in der Regel Wasser, geleitet wird. Der Raum zwischen dem Mediumrohr und der Polyethylen-Ummantelung (PE) ist mit Polyurethanschaum (PUR) ausgefüllt, der als Wärmeisolierung dient [3, S. 537]. In Betrieb genommene KMR sind aufgrund des durchgeleiteten, geheizten Wassers einer Temperaturlast $\Delta T > 0$ ausgesetzt. Resultierend aus Temperaturänderungen kommt es entweder zu einer Längenänderung der Leitung oder, bei behinderter Dehnung, zum Auftreten axialer Spannungen im KMR. Die maximalen Ausdehnungen entstehen an freien Rohrenden oder Richtungsänderungen des Leitungssystems. Sie werden in der Regel

in Form von U-Bögen und durch die Verwendung von Dehnpolstern in den Bogenbereichen kompensiert [4, S. 633].

Wenn die infolge Temperaturänderungen hervorgerufenen Dehnungen nicht mehr durch entsprechende Maßnahmen kompensiert werden können, entstehen axiale Spannungen in der Leitung. Im Falle einer Freilegung oder unzureichenden Überdeckung der Kunststoffmantelrohre kann es bei Überschreitung der aufnehmbaren Längskraft dazu führen, dass das KMR in die Richtung des geringsten Widerstandes ausweicht [R3, S. 91]. Dieses Stabilitätsversagen wird als „Biegeknicken“ bezeichnet. Darüber hinaus zieht sich das Material beim Freilegen oder Stilllegen der Rohrleitung durch die Abkühlung zusammen. Dies kann ebenfalls mechanische Spannungen in der Rohrleitung hervorrufen und ein Knicken des Systems begünstigen.

Im Rahmen der Masterarbeit, mit dem Titel *Analysis of the Critical Buckling Force of District Heating Pipes*, von Hossein Zamani werden KMR im Labor der HafenCity Universität Hamburg axialen Kräften ausgesetzt. Diese Versuche dienen dazu, den Belastungsfall der Rohrleitungen im eingebauten Zustand, infolge behinderter thermischer Dehnungen, zu simulieren und die maximal aufnehmbaren Axialspannungen der Kunststoffmantelrohre zu ermitteln.

In der folgenden Arbeit werden diese Untersuchungen durch die Analyse des Zustands der KMR ergänzt. Ziel ist es, mögliche Veränderungen der Materialeigenschaften anhand einzelner Querschnitte sowohl visuell als auch mittels geeigneter Prüfverfahren zu analysieren. Ein wichtiger Teil der Untersuchung ist die Funktion des PUR-Hartschaums, der sowohl der Wärmedämmung dient als auch einen schubfesten Verbund zwischen dem Stahl-Mediumrohr und der PE-Ummantelung herstellt. Besonders relevant für die Analyse ist die Verbundscherfestigkeit, da diese ein Maß für die Qualität und das Alter eines Rohrsystems ist. Die Scherfestigkeit des Verbunds ermöglicht es, Verschiebungen innerhalb des Rohres sowie thermisch bedingten Ausdehnungen entgegenzuwirken. Dadurch können die daraus resultierenden Spannungen in den Bogenbereichen verringert werden.

Angesichts des noch begrenzten Kenntnisstands über das Bruch- und Festigkeitsverhalten im Verbund der KMR nach erfolgtem Knickversagen, stellt sich die Frage:

„Lassen sich infolge einer Knickbelastung visuelle Schäden an den Zellstrukturen des Polyurethan-Schaums nachweisen, und wie wirkt sich das Ausknicken auf die Verbundscherfestigkeit der Kunststoffmantelrohre aus?“

Um diese Zusammenhänge systematisch zu untersuchen, werden ausgewählte Probekörper aus den verwendeten Fernwärmerohrstangen entnommen. Diese Proben dienen als Grundlage für weiterführende Analysen, die sowohl visuelle Inspektionen als auch experimentelle Prüfverfahren umfassen.

1.2 Vorgehensweise

Für ein umfassendes Verständnis der Untersuchungen sind grundlegende Kenntnisse über Fernwärmesysteme, Kunststoffmantelrohre und die statischen Bedingungen von Rohrleitungen erforderlich. Ferner ist der eingebaute Zustand von Fernwärmeleitungen hinsichtlich der Freigrabelängen und weiterer Randbedingungen, die dem Schutz der Leitungssysteme dienen, näher zu betrachten. Diese grundlegenden Informationen werden in den folgenden Kapiteln erläutert.

Der Hauptteil beinhaltet die experimentellen Untersuchungen einzelner Probekörper der KMR nach durchgeführter Knickbelastung. Zunächst werden die KMR in einzelne Proben geschnitten und entsprechend ihrer Position im Rohr markiert. Anschließend werden die Querschnitte visuell dokumentiert und ihre Abmessungen mit geeigneten Verfahren überprüft. Darüber hinaus werden gezielt entnommene Probekörper im Labor der HafenCity Universität Hamburg, unter Anwendung einer Universalprüfmaschine, gemäß DIN EN 253 [R4] hinsichtlich der Verbundscherfestigkeit getestet. In Abbildung 1 ist der chronologische Ablauf der experimentellen Untersuchungen dargestellt:

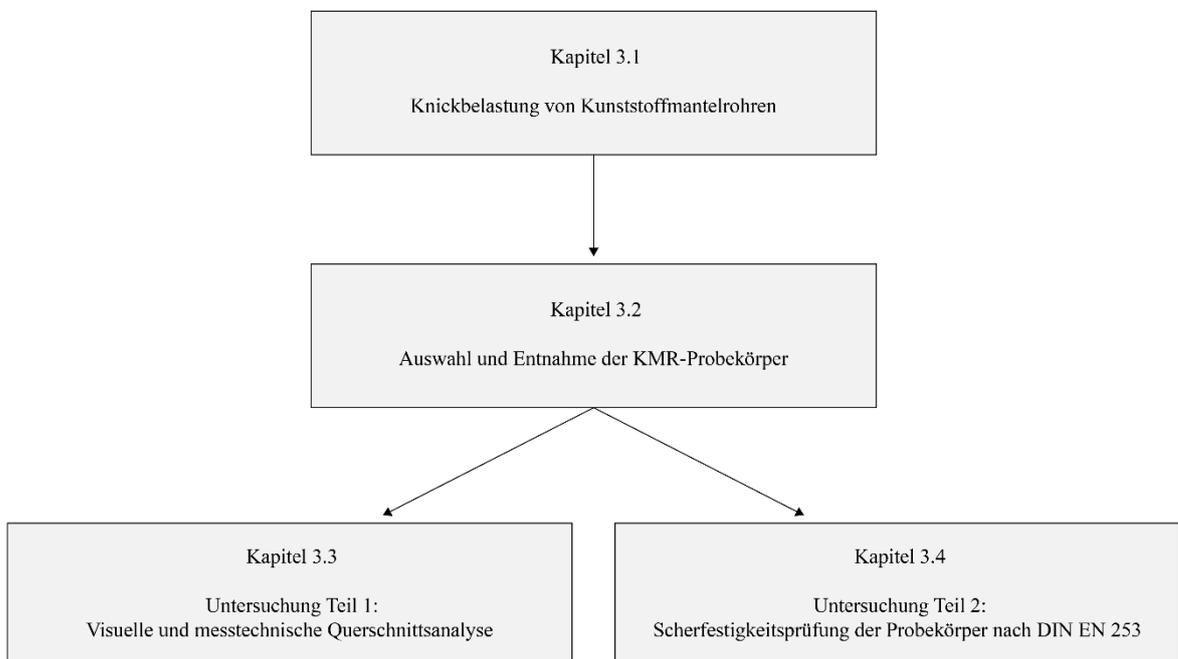


Abb. 1: Ablauf der experimentellen Untersuchungen [Eigene Darstellung]

2. Theoretische Grundlagen

2.1 Fernwärme Allgemein

Der Ausbau von Fernwärmesystemen übernimmt eine tragende Funktion in der klimaneutralen Energiewende. Fernwärme bezeichnet die zentralisierte Erzeugung von Wärmeenergie, die über das Fernwärmenetz an angeschlossene Verbraucher verteilt wird. Ein wesentlicher Vorteil dieser Technologie ist die Versorgung mehrerer Haushalte durch große Heizkraftwerke, wodurch diese insbesondere in dicht besiedelten Gebieten effizient wirkt. Die Klimaneutralität eines Fernwärmesystems hängt jedoch maßgeblich von den verwendeten Energieträgern ab.

Aktuell wird Fernwärme überwiegend in Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen (KWK) erzeugt, die nach wie vor größtenteils mit fossilen Energieträgern betrieben werden [5, S. 16]. Ein positiver Aspekt dabei ist, dass sich die eingesetzten Brennstoffe durch die gekoppelte Erzeugung von Strom und Wärme in diesen Anlagen besonders effizient nutzen lassen [6, S. 11]. Dadurch können CO₂-Emissionen reduziert und ein Übergang zur klimaneutralen Energieversorgung geschaffen werden. Zudem ermöglicht das Fernwärmenetz die Einbindung großdimensionierter regenerativer Energietechnologien wie Solarthermie, Geothermie sowie Kraft-Wärme-Kopplung unter Einsatz erneuerbarer Energiequellen auf Basis biogener Brennstoffe und Gase [7].

Fernwärmenetze bestehen in der Regel aus Vor- und Rücklaufleitungen, in denen Heizwasser mit Spitzentemperaturen von bis zu 140 °C, unter gängigen Innendruckstufen von 16 bis 25 bar, zum Verbraucher transportiert wird. Dabei darf die durchschnittliche Summe der Spitzentemperaturen innerhalb einer jährlichen Betriebsdauer von 300 h gemäß DIN EN 253 [R4] nicht überschritten werden. Je nach Außentemperaturen liegt die Vorlauftemperatur typischerweise zwischen 70 °C und 130 °C. Eine Vorlauftemperatur von mindestens 70 °C ist erforderlich, um sicherzustellen, dass Brauchwarmwasser in den Hausstationen auf 60 °C erhitzt wird. Die Rücklauftemperatur wird gewöhnlich mit 70 °C angenommen, wobei moderne Fernwärmenetze zunehmend niedrigere und konstante Werte von etwa 50 °C anstreben. Möglichst niedrige Temperaturen sind sowohl im Vorlauf als auch im Rücklauf vorteilhaft, um die Wärmeverluste während des Transports im Leitungssystem zu minimieren [6, S. 51-52].

2. Theoretische Grundlagen

In Industriegebieten wird häufig Wasserdampf als Wärmeträger verwendet, wobei der Dampftransport über die Vorlaufleitung erfolgt und das kondensierte Wasser über die Rücklaufleitung zurückgeführt wird.

Um die Fernwärme über die Hauptleitungen zu den Verbrauchern zu transportieren, kommen Hausanschlussleitungen zum Einsatz, die zur Hausübergabestation führen. Diese fungiert als Bindeglied zwischen dem Fernwärmenetz und der Hausverteilung. Es wird zwischen indirekten und direkten Hausübergabestationen unterschieden. Das Fernwärmenetz ist bei der indirekten Hausübergabe durch einen Wärmetauscher von der Hausverteilung getrennt, wodurch zwei separate Wasserkreisläufe entstehen. Das Heizwasser aus der Fernwärmeleitung dient hierbei der Erwärmung des Wassers aus der Hausleitung. Bei der direkten Hausübergabe hingegen wird das Wasser aus dem Fernwärmenetz direkt in die Hausleitungen gepumpt, sodass das gesamte System einen einzigen Wasserkreislauf bildet. In der Regel ist in der Hausübergabestation ein Brauchwarmwasserbereiter integriert [6, S. 52].

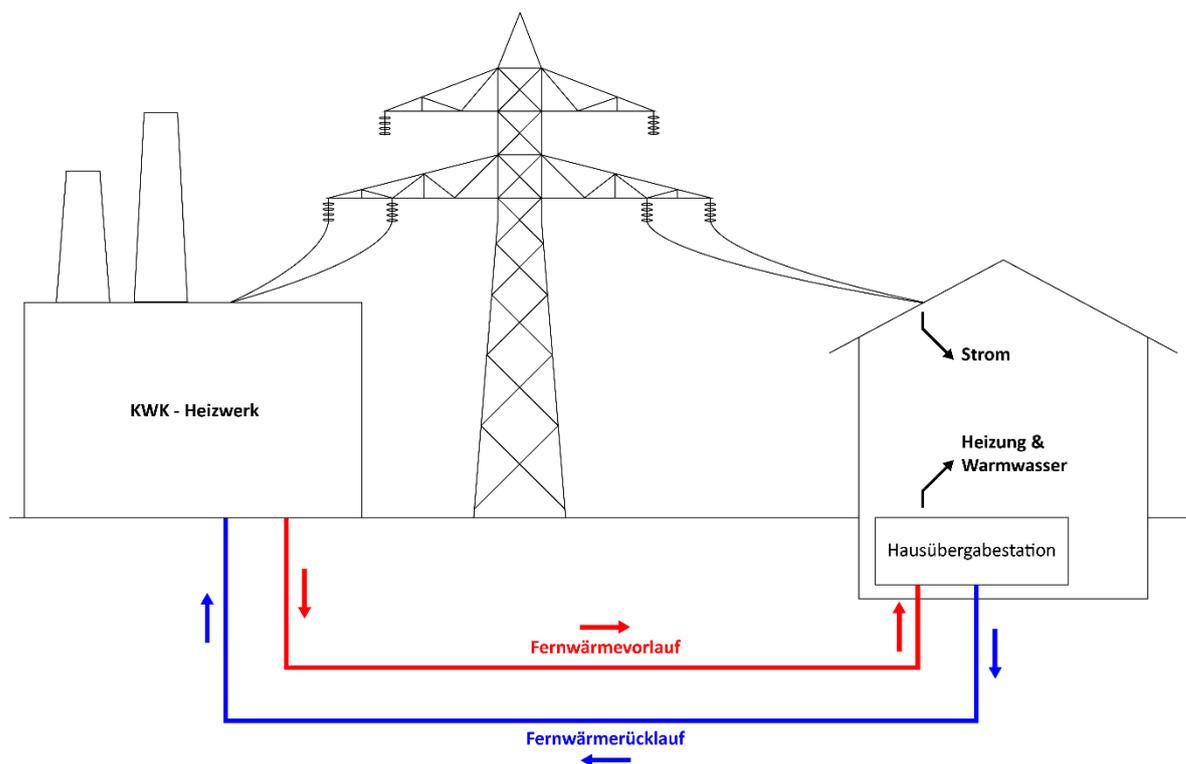


Abb. 2: Funktionsschema einer KWK-Anlage mit angeschlossenerm Fernwärmenetz [Eigene Darstellung]

2.2 Rohrleitungen der Wärmeverteilung

Im Rahmen dieser Arbeit wird das Kunststoffmantelrohr (KMR) als grundlegendes Leitungssystem für die Fernwärmeversorgung untersucht. „Das KMR ist heute Stand der Technik und das am meisten eingesetzte Rohrsystem für die Wärmeverteilung.“ [3, S. 537] Es besteht aus einem Stahl-Mediumrohr, durch das das erhitzte Medium, in der Regel Wasser, unter üblichen Druckstufen von 16 bar und 25 bar geleitet wird. Das Mediumrohr liegt konzentrisch innerhalb einer Polyethylen-Ummantelung (PE). Der Hohlraum zwischen dem Stahlrohr und der äußeren PE-Ummantelung wird mit Polyurethanschaum (PUR) ausgefüllt. Weitere Systeme zur Wärmeverteilung, wie Stahlmantelrohre, flexible Verbundrohrsysteme oder Kupferrohre in der Hausinstallation, werden an dieser Stelle nicht weiter behandelt. Weiterführende Informationen dazu finden sich in Kapitel 39 des Buchs *Rohrleitungen I* [3].

2.2.1 Stahl-Mediumrohr des KMRs

Bei dem Mediumrohr des KMRs für Fernwärme handelt es sich um temperaturbeanspruchte Stahlrohre, die für Druckbelastungen ausgelegt sind. Diese werden in der Regel entweder nahtlos gemäß DIN EN 10216-2 [R5] oder geschweißt nach DIN EN 10217-2 und -5 [R6 und R7] gefertigt. Für erdverlegte Fernwärmerohre ist die Stahlgüte P235GH nach DIN EN 13941-1 [R8] zu verwenden. Dabei steht P für die Eignung unter Druckbeanspruchung, 235 gibt die Mindeststreckgrenze in MPa bei Raumtemperatur an und GH weist auf die Eignung für den Einsatz bei erhöhten Temperaturen hin. Ferner dürfen gleichwertige oder höhere Gütegrade für Stahl unter Berücksichtigung der zugelassenen Normen verwendet werden.

2.2.2 Polyurethan-Schaum des KMRs

Eine zentrale Komponente von Kunststoffmantelrohren ist der wärmeisolierende PUR-Schaum, der den festen Verbund zwischen Mediumrohr und PE-Ummantelung herstellt. Teilweise werden auch Polyisocyanurat-Schäume (PIR-Schäume) eingesetzt, eine Modifikation des klassischen PUR-Schaumes, die sich durch einen höheren Vernetzungsgrad sowie eine erhöhte Stabilität auszeichnet. Zur Herstellung von PUR und PIR werden Diphenylmethan-Diisocyanat (MDI) und Polyol in unterschiedlichem Mischungsverhältnis zu einer flüssigen Masse zusammengeführt. Nach dem Aufsprühen der Masse sorgt das enthaltene Treibmittel für Bläschenbildung, während der Schaum eine Volumenzunahme erfährt und aushärtet. Die dabei entstehende Zellstruktur und die eingeschlossenen Gase führen zu einer geringen Wärmeleitfähigkeit des Schaumes.

Die Herstellung der PUR-Wärmedämmung erfolgt entweder im Produktionswerk oder direkt auf der Baustelle gemäß DIN EN 489-1 [R9]. Dabei werden zwei wesentliche Verfahren unterschieden: das diskontinuierliche und das kontinuierliche Verfahren. Das diskontinuierliche Verfahren ist zwingend für Formstücke des KMR erforderlich, kann jedoch auch zur Herstellung von Rohrstangen eingesetzt werden. Dabei wird der PUR-Schaum nach dem Abdichten der Enden in den Hohlraum zwischen Mediumrohr und PE-Mantel eingespritzt. Das kontinuierliche Verfahren wird ausschließlich in Produktionsstätten angewendet und ermöglicht eine homogenere Schaumbildung. Dabei wird das Mediumrohr in waagerechter Position durch die Fertigungsanlage geführt, während der PUR-Schaum kontinuierlich aufgebracht wird [3, S. 534-535].

2.2.3 Polyethylen-Mantel des KMRs

Die Polyethylen-Ummantelung des Verbunds schützt den PUR-Schaum vor dem Eindringen von Wasser sowie vor mechanischen Einflüssen, die die Dämmwirkung beeinträchtigen könnten. Für starre Rohrleitungen kommt ein PE-HD (Polyethylen hoher Dichte) mit einer erhöhten Dichte zwischen $\rho_{PEHD} = 0,94 \text{ g/cm}^3$ bis $0,97 \text{ g/cm}^3$, zum Einsatz. Ein weiterer Vorteil von Polyethylen ist, dass es ein thermoplastischer Werkstoff ist, der sich zum Schweißen eignet. Bei der Auslegung der Fernwärmerohre muss die zu erwartende Temperatur des Außenmantels während des Betriebes berücksichtigt werden. Gemäß DIN EN 13941-1 [R8] darf die maximale Manteltemperatur 50 °C nicht überschreiten, da eine dauerhafte Überschreitung dieser Grenze zu Versprödung und Rissbildung des Materials führen kann. Falls das Mantelrohr beschädigt wird und Wasser in den Schaum eindringt, kann dieser Schaden mithilfe von Meldeadern über ein Überwachungssystem lokalisiert werden [3, S. 536-537]. Die Meldeadern bestehen aus elektrisch leitenden Messdrähten gemäß DIN EN 14419 [R10], die in die Wärmedämmung eingebettet sind.

Auf der folgenden Seite ist in Abbildung 3 der innere Aufbau eines KMRs anhand eines Querschnitts dargestellt, der für die weiterführenden Untersuchungen entnommen wurde.

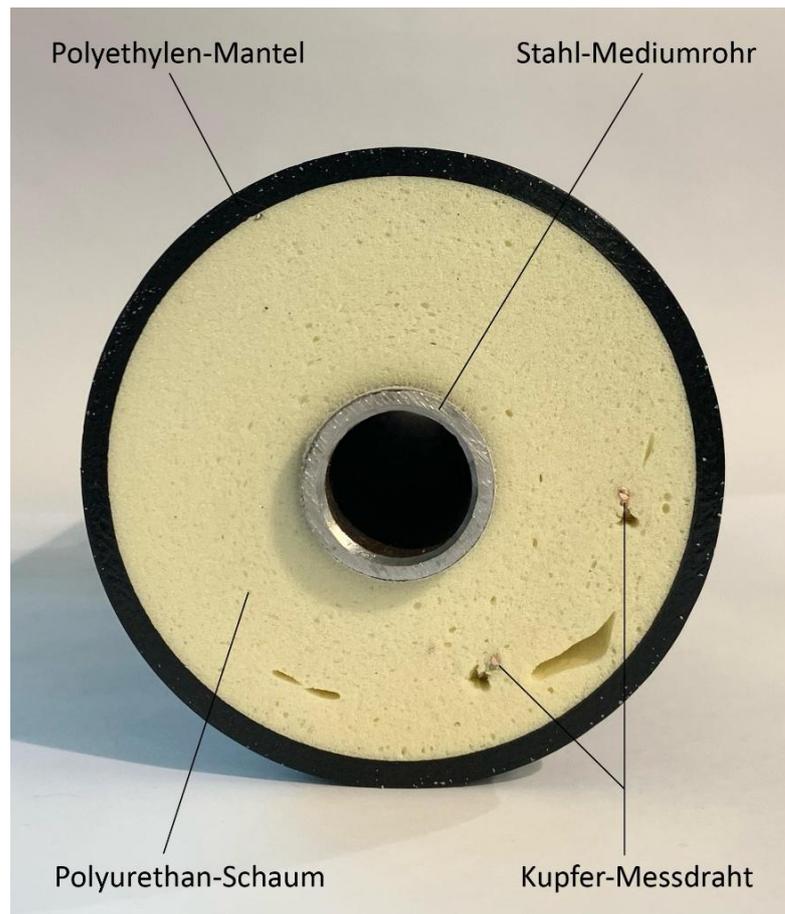


Abb. 3: Querschnitt eines Kunststoffmantelrohrs [Eigene Darstellung]

2.2.4 Formstücke

Zur Realisierung des gewünschten Trassenverlaufs werden Bögen, Winkel und Abzweige im KMR-System eingesetzt. Diese dienen jedoch nicht nur der Richtungsführung, sondern werden gezielt zur Kompensation thermisch bedingter Längenausdehnungen der Leitungen verwendet. In der Regel kommen hierfür 90°-Bögen als Formstücke zum Einsatz, um Dehnungskompensationen in Form von L-Bögen, Z-Versprüngen oder U-Bögen zu realisieren. Dadurch lassen sich Axialspannungen in den geraden Leitungsabschnitten reduzieren.

Typische Konstruktionen zur Dehnungskompensation, wie beispielsweise der in Abbildung 4 dargestellte U-Bogen, erfordern eine deutlich größere Baufläche.



Abb. 4: U-Bogen im Fernwärmesystem: Bauvorhaben HH, Anckelmannsplatz [Eigene Darstellung]

2.2.5 Muffen und Endmuffen

Die Rohrleitungen des Fernwärmesystems sind durch Schweißen am Stahl-Mediumrohr kraftschlüssig zu verbinden. Nach dem Herstellen der Schweißverbindung wird das Kunststoffmantelrohr mit einer Muffe umschlossen. Der entstehende Hohlraum wird entweder mit vorgefertigten Polyurethan-Dämmschalen ausgekleidet oder direkt vor Ort ausgeschäumt, um eine lückenlose Dämmung des Rohrsystems sicherzustellen. Die Muffen dienen, analog zum PE-Mantel, der Abdichtung der Trasse und verhindern das Eindringen von Wasser [3, S. 546]. Die Funktionalität der gewählten Muffe ist gemäß DIN EN 489-1 [R9] zu überprüfen.

Enden Fernwärmerohrleitungen im Erdreich, werden sie mit einer wasserdichten Endmuffe verschlossen. Zum Schutz vor Druckeinwirkungen durch das umgebende Bettungsmaterial sowie vor Längenausdehnungen des KMR, werden zusätzlich Dehnpolster hinter der Muffe eingebaut. Dabei sind Endmuffen von Endkappen zu unterscheiden. Endkappen dienen ausschließlich dem Schutz des PUR-Schaums während der Lagerung und des Transports vor Wasser, Luftfeuchtigkeit und Verunreinigungen [3, S. 548].

2.2.6 Reduzierungen

Zur Anpassung unterschiedlicher Nenndurchmesser der Mediumrohre werden üblicherweise Reduzierungen als Formteile eingesetzt [3, S. 548]. Diese sind als werksseitig vorgefertigte Bauteile erhältlich und in den Produktnormen DIN EN 253 [R4], DIN EN 448 [R11] sowie DIN EN 488 [R12] geregelt.

2.2.7 Dehnpolster

Dehnpolster kommen zur Anwendung, um die Bewegungsmöglichkeiten von Formstücken zu erhöhen. Dadurch können kritische Stellen mit hohen Bettungsdrücken oder auftretenden Axialspannungen entlastet werden, denn Dehnpolster sind deutlich weicher als das umgebene Erdreich. Das meist verwendete Material zur Herstellung von Dehnpolstern sind vernetzte Polyethylen-Schäume. Zudem können auch unvernetzte PE- und PUR-Schäume sogenannte Flockenverbundschaumstoffe genutzt werden.

Dehnpolster werden entweder als vollständige Umhüllung oder seitliche Teilumhüllung am Rohrmantel befestigt. Zunächst werden die Oberflächen angeflämmt, bevor die Polster an den PE-Mantel des KMR-Systems geklebt werden. Zum zusätzlichen Schutz vor äußeren Einflüssen werden sie mit Polyethylen-Schaumfolie oder Geotextilfolie umhüllt [3, S. 549].

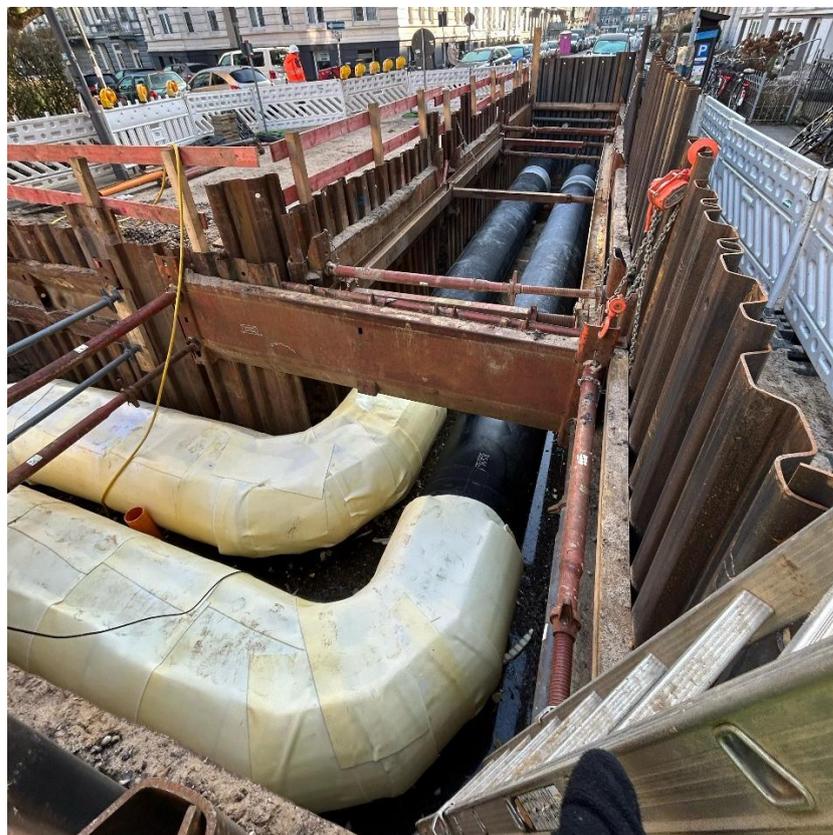


Abb. 5: 90°-Bogen mit Dehnpolstern: Bauvorhaben HH, Haferweg Spange Grindel [Eigene Darstellung]

2.2.8 Einmalkompensatoren (EKO)

Neben punktuellen Dehnmöglichkeiten in Form von U-Bögen oder Z-Versprüngen im Leitungssystem, können auch spezielle Bauteile zur Kompensation von Längenausdehnungen beitragen. In Fernwärmesystemen kommen in der Regel Einmalkompensatoren zum Einsatz. Temperaturinduzierte Ausdehnungen in axialer Richtung werden dabei über ein Wellrohr (Metallbalg) innerhalb des Kompensators aufgenommen. Gemäß DIN EN 13941-1 [R8] wird zwischen den Typen 1, 2 und 3 von Einmalkompensatoren unterschieden:

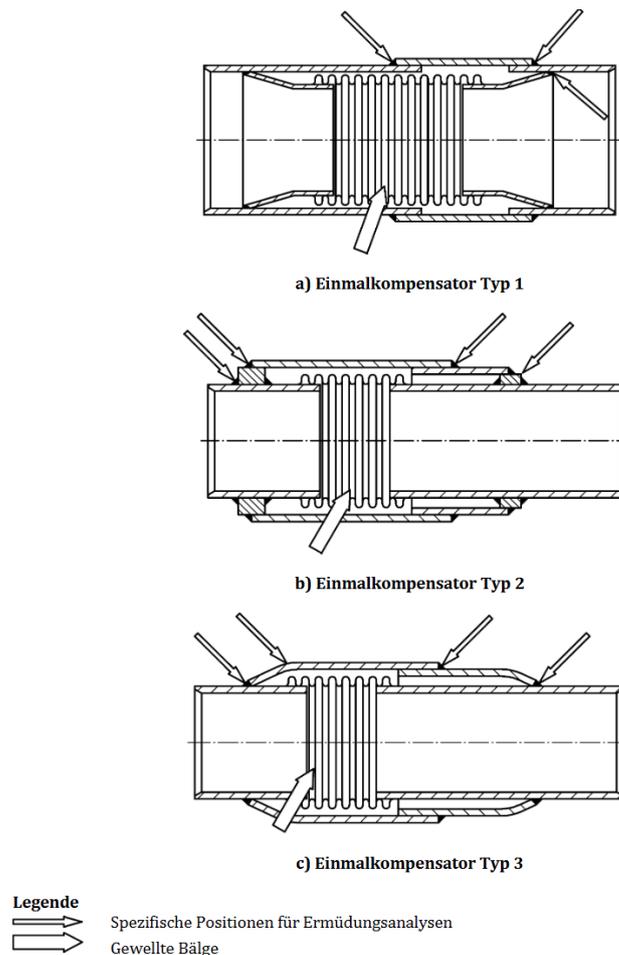


Abb. 6: Typen von Einmalkompensatoren gemäß DIN EN 13941-1, Bild 26 [R8, S. 77]

Beim Einbau wird der Kompensator entsprechend der Vorwärmtemperatur zusammengedrückt, während die äußeren Führungsrohre miteinander verschweißt werden. Das fertige System verhält sich bei späteren Temperaturänderungen wie der übliche Verbund einer Fernwärmeleitung [4, S. 638-639]. Alle sicherheitsrelevanten Schweißnähte müssen gemäß DIN EN 13941-1 [R8] nachgewiesen werden, wie es in den Positionen für die Ermüdungsanalysen der Typen 1, 2 und 3 vorgesehen ist. Die in den Einmalkompensatoren verwendeten Bälge müssen EN 13480-3 [R13] entsprechen.

2.3 Scherfestigkeit von KMR

2.3.1 Mindestscherfestigkeit des Verbunds

Eine entscheidende Eigenschaft des Kunststoffmantelrohres resultiert aus dem PUR-Schaum, der einen kraftschlüssigen Verbund zwischen Außenmantel und Mediumrohr herstellt. Der kraftschlüssige Verbund reduziert, durch entstehende Reibungskräfte zwischen der Rohrleitung und dem umgebenden Boden, die axiale Ausdehnung des Rohrs aufgrund von Temperaturänderungen.

Damit ein KMR diese Voraussetzung erfüllen kann, muss die Scherfestigkeit des PUR-Schaumes im Verbund im nicht gealterten Zustand (bei $23 \pm 2 \text{ °C}$ Prüftemperatur) eine Mindestanforderung von $\tau_{ax} = 0,12 \text{ MPa}$ gemäß DIN EN 253 [R4] einhalten.

Tabelle 1: Mindestscherfestigkeit gemäß DIN EN 253, Tab. 6 [R4, S. 17]

Prüftemperatur °C	Prüfabschnitt	τ_{ax} min. MPa	
		im nicht gealterten Zustand	im gealterten Zustand
23 ± 2	5.4.1.4	0,12	45 % des (tatsächlichen) Anfangswerts und 0,12
140 ± 2	5.4.1.5	0,08	0,08

2.3.2 Reibungswiderstand des PE-Außenmantels

Die Reibungswiderstände von Fernwärmeleitungen werden maßgeblich durch den PE-Außenmantel der Rohre beeinflusst. Der Reibungswert zwischen dem PE-Mantel und dem umgebenden Bodenmaterial wird in der statischen Auslegung berücksichtigt, um die Widerstandskraft gegen temperaturinduzierte Längenänderungen zu bestimmen. In der Praxis erfolgt die Berechnung üblicherweise mit einem Reibungskoeffizienten von $\mu = \tan(2/3 \times \varphi') = 2/3 \times 32,5^\circ = 0,40$ gemäß AGFW FW 401 [R14]. Alternativ kann der Kontaktreibungswinkel experimentell gemäß DIN EN 13941-1 [R8] ermittelt werden, was eine genauere Analyse der Wechselwirkungen zwischen Boden und Rohrleitung ermöglicht. Darüber hinaus ist die maximal zulässige Manteltemperatur von 50 °C gemäß DIN EN 13941-1 [R8] einzuhalten, da sich das Materialverhalten von Polyethylen in Abhängigkeit von der Temperatur verändert [3, S. 536-537].

Auch eingebaute Muffen oder Reduzierungen können aufgrund der Durchmesserunterschiede, im Vergleich zu den ansonsten geraden Rohrabschnitten, die Bodenreaktionskräfte erhöhen [3, S. 547].

2.4 Freigrabelängen und Überdeckungshöhen

Die Gefahr des Ausknickens der Kunststoffmantelrohre im eingebauten Zustand besteht, sobald die kritische Axialkraft erreicht wird, insbesondere bei freigelegten Fernwärmerohren oder unzureichender Überdeckungshöhe mit zu geringem Querwiderstand. Allgemein ist sicherzustellen, dass die durch axiale Kräfte induzierte Beanspruchung die Stabilitätsgrenze gegenüber Stabknicken nicht überschreitet [R3, S. 90].

Nach dem Regelwerk des Energieeffizienzverbands für Wärme, Kälte und KWK e.V. (AGFW) wird dabei zwischen verschiedenen Verlegekonzepten unterschieden:

2.4.1 Bei Freilegung des KMRs:

- a) Verlegekonzept ohne und mit Vorwärmung und ohne Überschreitung der Stahlrohrstreckgrenze
- b) Verlegekonzept ohne Vorwärmung und mit Überschreitung der Stahlrohrstreckgrenze
- c) Lagesicherung freiliegender KMR ohne axiale Spannungen

2.4.2 Bei zu geringer Überdeckung des KMRs:

- a) Verlegekonzept ohne und mit Vorwärmung und ohne Überschreitung der Stahlrohrstreckgrenze
- b) Verlegekonzept ohne Vorwärmung und mit Überschreitung der Stahlrohrstreckgrenze

2.4.3 Bei Baugruben neben dem KMR:

- a) Baugrube mit Verbau nach DIN 4124
- b) Baugrube ohne Verbau

2.4.4 Zur Sicherheit gegen Beulen bzw. Ratcheting des KMRs:

- a) Verlegekonzept ohne und mit Vorwärmung und ohne Überschreitung der Stahlrohrstreckgrenze
- b) Verlegekonzept ohne Vorwärmung und mit Überschreitung der Stahlrohrstreckgrenze

2.4.1 Verlegekonzept bei Freilegung des KMRs

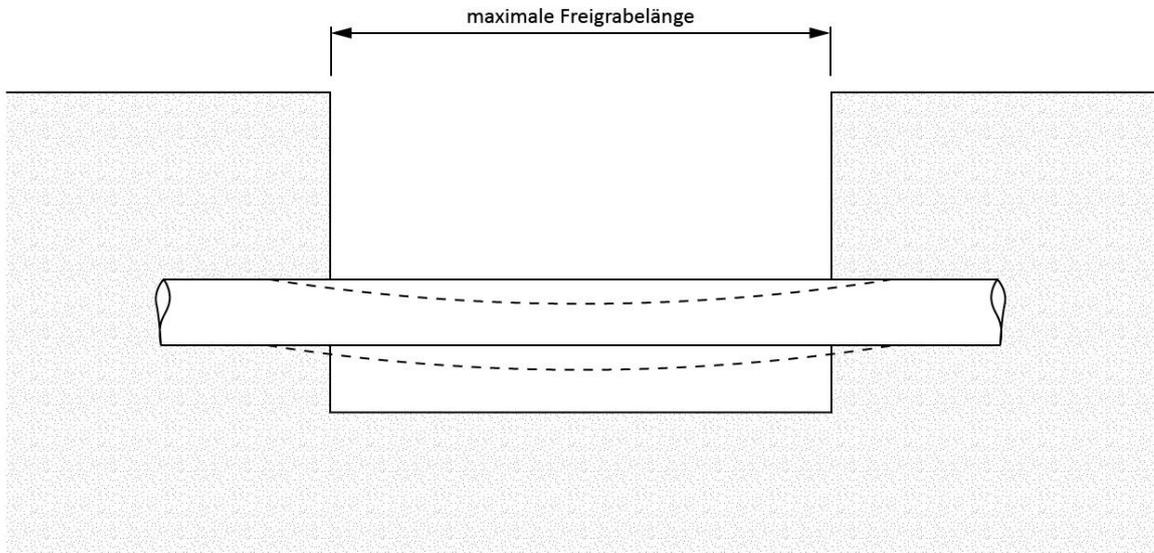


Abb. 7: Verlegekonzept bei Freilegung des KMRs [Eigene Darstellung]

Beim Freilegen der Fernwärmeleitungen wird grundsätzlich überprüft, ob die durch axiale Kräfte hervorgerufene Beanspruchung, unter Berücksichtigung der Freigrabelänge, die Widerstandskräfte gegen Stabknicken nicht überschreitet. Die Überprüfung der zulässigen Knicklänge erfolgt dabei in zwei wesentlichen Fällen:

a) ohne Überschreitung der Stahlrohrstreckgrenze:

Hierbei muss sichergestellt sein, dass die axialen Spannungen infolge behinderter Temperaturdehnung die Streckgrenze des Stahlrohres nicht überschreiten, sodass die Bedingung $\sigma_{ax} < R_{eT}$ erfüllt ist. In diesem Fall befinden sich die Spannungen des Stahlrohres noch im elastischen Bereich der Spannungs-Dehnungs-Kurve. Die elastische Biegesteifigkeit des Rohres, beschrieben durch die Eulersche Knickkraft, ist in diesem Zusammenhang maßgebend. Die Berechnung der axial einwirkenden Kräfte erfolgt differenziert für die Fälle mit und ohne Vorwärmung.

b) mit Überschreitung der Stahlrohrstreckgrenze:

In diesem Fall überschreiten die axialen Spannungen infolge Temperaturdehnung die Stahlrohrstreckgrenze, wodurch die Bedingung $\sigma_{ax} > R_{eT}$ gegeben ist. Die Knicksicherheit oberhalb der Streckgrenze ist dabei nur gering. Um ein Ausknicken zu verhindern, werden Queraussteifungen (Zwangsführungen) in Schächten und Baugruben eingebaut.

Berechnungsgrundlagen gemäß AGFW-Regelwerk für Fall a) und b):

Die spezifischen Berechnungsformeln zur Überprüfung der Freilegungssituation von Fernwärmeleitungen mit Axialspannungen sind im AGFW-Regelwerk FW 401 Teil 10, Abschnitt 6.10.2 [R3, S. 90-91], festgelegt. Darüber hinaus lassen sich die zulässigen Freigrabelängen für bestimmte Anwendungsfälle (Stahlrohr-Nennweiten DN 20 bis 250) unter Berücksichtigung der betrieblichen Temperaturdifferenz, des Abstands zum Dehnschenkel und der Überdeckungshöhe anhand von Diagrammen im AGFW-Regelwerk FW 401 Teil 11, Abschnitt 17 [R15, S. 182-194], vereinfacht ermitteln.

c) Lagesicherung freiliegender KMR ohne axiale Spannungen:

Befindet sich das KMR bei der Freilegung im spannungsfreien Zustand, also ohne Axialspannungen infolge von Temperaturdehnungen, sind Unterstützungen oder Abhängungen entsprechend der erforderlichen Stützweite anzusetzen. Dies ist zwingend notwendig, wenn die zulässige Freigrabelänge die maximal zulässige Stützweite des KMR überschreitet. Als Unterstützung sollten Rohrsättel aus Polyethylen oder einem gleichwertigen Material verwendet werden, während für Abhängungen Textilgurte empfohlen werden.

Berechnungsgrundlagen gemäß AGFW-Regelwerk für Fall c):

Die zulässigen Stützweiten sowie die Mindestbreiten der Halterungen für KMR mit Stahlrohr-Nennweiten bis DN 600 sind Tabelle 9 des AGFW-Regelwerks FW 401 Teil 11, Abschnitt 19 [R15, S. 196], zu entnehmen.

2.4.2 Verlegekonzept bei zu geringer Überdeckung des KMRs

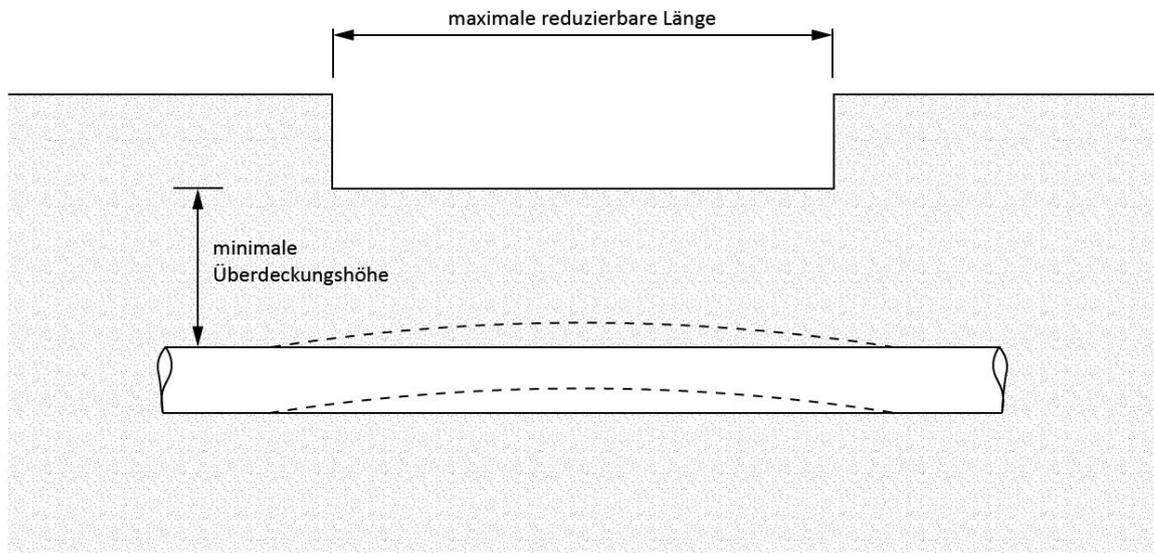


Abb. 8: Verlegekonzept bei zu geringer Überdeckung des KMRs [Eigene Darstellung]

Bei unzureichender Überdeckung der Fernwärmeleitungen erfolgt die Überprüfung des Biegeknickens grundsätzlich in Analogie zur vorherigen Betrachtung. Es wird ebenfalls überprüft, ob die durch axiale Kräfte verursachte Beanspruchung die Widerstandskräfte gegen Stabknicken nicht überschreitet. Zusätzlich wird die erforderliche Überdeckungslast berücksichtigt, aus der die Mindestüberdeckungshöhe zur Gewährleistung einer ausreichenden Stabilität abgeleitet wird. Die Bestimmung der Mindestüberdeckung gegen Stabknicken erfolgt wiederum in zwei differenzierten Betrachtungen:

a) ohne Überschreitung der Stahlrohrstreckgrenze:

Die Bedingung $\sigma_{ax} < R_{eT}$ muss erfüllt sein. Die Widerstandskraft gegen Stabknicken setzt sich aus zwei Komponenten zusammen. Zum einen aus dem Anteil, der die elastische Biegesteifigkeit des Rohres (Euler'sche Knickkraft) überwindet, und zum anderen aus dem Anteil, der den Gewölbewiderstand des Erdreichs überwindet. Das Eigengewicht des Rohres wird sicherheitshalber vernachlässigt. Die erforderliche Mindestüberdeckung wird durch iterative Berechnung der Gleichungen ermittelt, bis die Stabilität gegen Knicken aufgrund der Widerstandskräfte gewährleistet ist.

b) mit Überschreitung der Stahlrohrstreckgrenze:

Um nach dieser Berechnung fortfahren zu können, muss $\sigma_{ax} > R_{eT}$ gegeben sein. Durch die Überschreitung der Stahlrohrstreckgrenze entfällt der elastische Anteil (Eulerkraft) der Widerstandskraft gegen das Biegeknicken der Rohrleitung. Somit verhindert hier nur noch der Gewölbewiderstand des Bodens das Ausknicken des Rohres.

Berechnungsgrundlagen gemäß AGFW-Regelwerk für Fall a) und b):

Die Berechnungsformeln zur Ermittlung der Überdeckungshöhen von Fernwärmeleitungen sind im AGFW-Regelwerk FW 401 Teil 10, Abschnitt 6.10.3 [R3, S. 91-93], festgelegt. Entsprechende Bemessungsdiagramme zur Verringerung der Überdeckungshöhe für Mediumrohr-Nennweiten bis DN 250, unter Berücksichtigung der betrieblichen Temperatureinwirkung, des Abstands zum Dehnschenkel und der zulässigen reduzierbaren Freigrabellänge, sind im AGFW-Regelwerk FW 401 Teil 11, Abschnitt 16 [R15, S. 169-181], enthalten.

2.4.3 Verlegekonzept bei Baugruben neben dem KMR

Grundsätzlich sind Parallelaufgrabungen neben KMR so auszuführen, dass ein seitliches Ausknicken der Rohre in Richtung der Aufgrabung ausgeschlossen wird. Die Stabilität des Leitungssystems wird durch die Anwendung seitlicher Führungskräfte sichergestellt. Dabei wird zwischen zwei Varianten der Parallelaufgrabung unterschieden:

a) Baugrube mit Verbau nach DIN 4124:



Abb. 9: Baugrube neben KMR mit Verbau nach DIN 4124 [Eigene Darstellung]

Hierbei dürfen Parallelaufgrabungen neben dem KMR nur durchgeführt werden, wenn die Reibungsbedingungen am KMR nicht wesentlich beeinträchtigt werden. Dies ist gewährleistet, wenn die freigelegte Baugrube gemäß DIN 4124 [R16] flächig und kraftschlüssig verbaut wird, wodurch der Baugrubenverbau den entfernten Boden ersetzt. Dabei ist die zulässige unverbaute Grabenlänge vor der Einbringung des Verbaus gemäß Tabelle 10 des AGFW-Regelwerks FW 401 Teil 11, Abschnitt 20.2 [R15, S. 198], zu beachten.

b) Baugrube ohne Verbau:

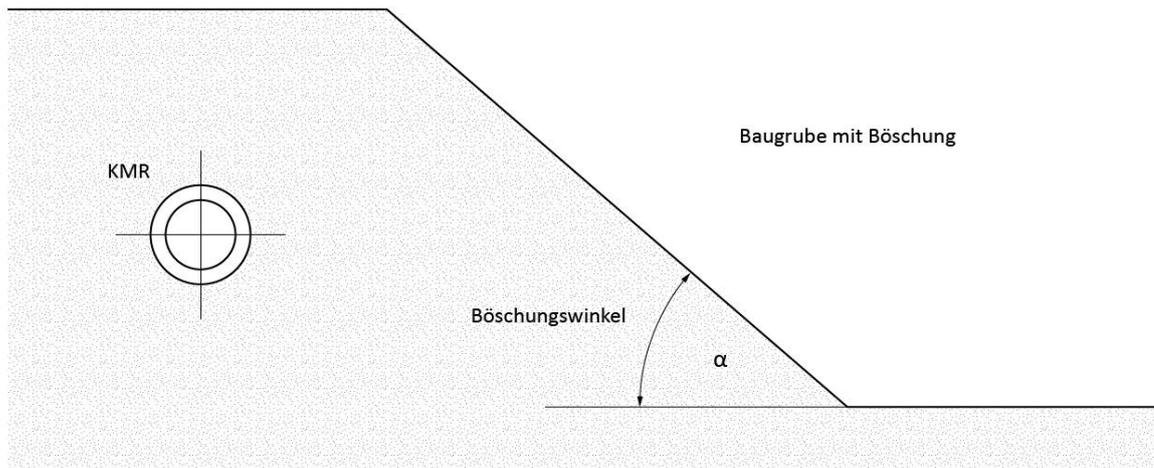


Abb. 10: Baugrube neben KMR ohne Verbau [Eigene Darstellung]

Aufgrund potenzieller Setzungen ist die Böschung der Baugrube so zu gestalten, dass die KMR nicht im 60°-Gleitkeil liegen. Zudem muss zwischen der Baugrube und dem KMR ein fester Erdstreifen verbleiben. Der Mindestabstand des KMR zum unverbauten Graben ist Tabelle 11 des AGFW-Regelwerks FW 401 Teil 11, Abschnitt 20.3 [R15, S. 199], zu entnehmen. Darüber hinaus ist die Standsicherheit der Grabenböschung nachzuweisen und bei Abzweigungen im Rohrleitungsverlauf ist im Einzelfall eine weiterführende statische Analyse vorzunehmen.

Berechnungsgrundlagen gemäß AGFW-Regelwerk für Fall a) und b):

Die Anwendung sowie spezifische Bemessungstabellen zur Evaluation von Parallelaufgrabungen von KMR, bis zu einem Stahl-Nenndurchmesser von DN 250, sind in Abschnitt 20 des AGFW-Regelwerks FW 401 Teil 11 [R15, S. 197-199] festgelegt.

2.4.4 Verlegekonzept zur Sicherheit gegen Beulen bzw. Ratcheting des KMRs

a) ohne Überschreitung der Stahlrohrstreckgrenze:

Eingebaute Kunststoffmantelrohre können bei hohen Axialspannungen zum Ausbeulen des Mantelrohres neigen. In diesem Fall sind die Spannungen durch die Streckgrenze begrenzt und befinden sich im elastischen Bereich. Der Nachweis gilt als erbracht, wenn die Widerstandskraft gegen Beulen die einwirkende Axialspannung übersteigt. Die widerstehende Beulspannung hängt dabei maßgeblich von der Wanddicke des PE-Mantels ab.

b) mit Überschreitung der Stahlrohrstreckgrenze:

Nach der Beultheorie kommt es immer zum Ausbeulen, sobald die vereinfacht linear-elastisch berechneten Axialspannungen die Streckgrenze des Stahlrohrs überschreiten. Versuchsergebnisse belegen, dass ein Ausbeulen bei sehr kleinen plastischen Dehnungen noch nicht auftritt [R3, S. 94]. Im Zusammenhang mit dem Prozess des stress-ratcheting, bei dem sich durch wiederholte Belastung die plastischen Verformungen eines Materials im Laufe der Zeit vergrößern, während die Belastung konstant bleibt, können die Berechnungen gemäß den zulässigen Grenzwerten aus Tabelle 18 [R3, S. 94] erfolgen.

Berechnungsgrundlagen gemäß AGFW-Regelwerk für Fall a) und b):

Die entsprechenden Berechnungsformeln und Tabellen zum Nachweis der Beulspannung sind in Abschnitt 6.10.6 des AGFW-Regelwerks FW 401 Teil 10 [R3, S. 93-94] zu finden.

2.4.5 Weitere Rahmenbedingungen

Eine weitere Voraussetzung stellt die Einhaltung der maximal zulässigen Überdeckungshöhe dar, um temperaturinduzierte Längenänderungen des Rohrleitungssystems im Erdreich ausgleichen zu können. Die maximal zulässige axiale Scherbeanspruchung im PUR-Schaum beträgt $\tau_{PUR,zul} = 0,04$ MPa und darf nicht überschritten werden. Die maximal zulässigen Überdeckungshöhen für KMR ergeben sich aus der Stahlrohr-Nennweite (DN 20 bis 600), der Nennweite des PE-Mantels und der Dämmserie. Die Bemessungswerte sind Tabelle 8 des AGFW-Regelwerks FW 401 Teil 11, Abschnitt 18 [R15, S. 195], zu entnehmen.

2.5 Euler Knickfall

Das Biegeknicken von Stäben bezeichnet den Stabilitätsverlust eines druckbeanspruchten Stabs, der sich durch ein Ausweichen des Systems äußert. Wichtig zu verstehen ist, dass Biegeknicken nicht zwangsläufig ein „Durchknicken“ bzw. Bruch des Stabs bedeutet. Es beschreibt vielmehr den Zustand, in dem ein System unter Druckbelastung seine Stabilität verliert und infolge einer seitlichen Auslenkung zunehmende Verformung erfährt, die zu einem Versagen des Systems führen kann.

Zur Betrachtung der Stabilität biegeknickgefährdeter Rohrleitungen werden die Knickfälle nach Euler herangezogen. Leonhard Euler untersuchte als Erster das Knicken schlanker Stäbe. Er klassifizierte seine Untersuchungen in vier Knickfälle, die einen elastischen Stab mit mittig angreifender Druckkraft entlang der Stabachse, unter Berücksichtigung der Lagerungsart, beschreiben [8, S. 419].

2.5.1 Berechnungsgrundlage nach Euler

Die Knicklasten von Stabsystemen werden unter folgenden idealisierten Annahmen bestimmt: Die Stabachsen sind gerade, die Stäbe werden ausschließlich durch Längskräfte (Axialkräfte) beansprucht und das Hookesche Gesetz gilt uneingeschränkt. Kurz gefasst besagt das Hookesche Gesetz, dass die Verformung eines elastischen Körpers proportional zur einwirkenden Kraft ist, sofern die Elastizitätsgrenze nicht überschritten wird [9, S. 11]. Es wird weiterhin angenommen, dass die Stäbe eine konstante Biegesteifigkeit EI sowie eine konstante Axialkraft N besitzen. Dabei werden ausschließlich die Momenten-Verformungsanteile berücksichtigt, während die Dehnsteifigkeit EA vereinfacht als $EA \rightarrow \infty$ angenommen wird.

Die kritische Knicklast eines solchen Stabsystems berechnet sich nach:

$$N_{ki} = \left(\frac{\pi}{s_k}\right)^2 \times EI$$

Dabei ist:

- N_{ki} die kritische Knicklast, in kN;
- s_k die Knicklänge des Stabs, in m;
- EI die Biegesteifigkeit des Stabs, in kNm².

2. Theoretische Grundlagen

Die Knicklänge s_k beschreibt den Abstand zwischen zwei Wendepunkten der Knickbiegeline, die aufgrund der konstanten Längskraft dem Verlauf einer Sinuskurve folgt. Somit entspricht s_k der Länge einer Sinus-Halbwellen. Die sinusförmige Auslenkung stellt die Biegelinie der Stäbe im jeweiligen Verzweigungsfall qualitativ dar [10, S. 4.51].

Im Folgenden sind die vier Eulerfälle dargestellt:

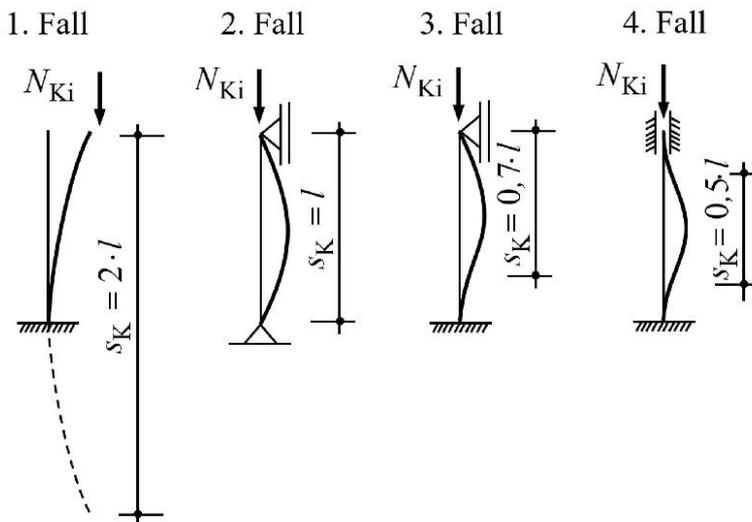


Abb. 11: Euler Knickfälle gemäß SBT 25, Kapitel 4A [10, S. 4.51]

Die Eulerfälle unterscheiden sich in der Lagerungsart der Stabenden:

1. Fall: frei / eingespannt
2. Fall: gelenkig / gelenkig
3. Fall: gelenkig / eingespannt
4. Fall: nicht drehbar (eingespannt) / eingespannt

2.5.2 Anwendungsfall im Betrieb des Fernwärmesystems

Das Prinzip der Euler-Knickfälle lässt sich auf den Lastfall der Fernwärmeleitungen infolge von Temperaturdehnungen übertragen. Grundsätzlich werden Rohrleitungen im Erdreich so ausgelegt, dass sie eine gewisse Beweglichkeit behalten. Temperaturbedingte Längenausdehnung wird durch U-Bögen, Dehnpolster und weitere erwähnte Maßnahmen kompensiert. Die durch Temperaturänderungen verursachten Längenänderungen in den Bogenbereichen des Leitungssystems werden anhand eines U-Bogens in Abbildung 12 veranschaulicht. Dieser stellt eine typische Kompensationsgeometrie dar, die thermisch bedingte Längenausdehnungen aufnimmt und Spannungen innerhalb der Rohrleitung reduziert.



Abb. 12: Kompensation temperaturinduzierter Längenänderungen im U-Bogen [Eigene Darstellung]

Sobald die thermisch bedingte Längenausdehnung in den Endbereichen des Rohrleitungssystems nicht mehr aufgenommen werden kann, verhalten sich die Rohrenden wie feste, unverschiebliche Lager. Die rotatorische Bewegungsfreiheit der Rohrleitung bleibt dabei erhalten, sodass im technischen Sinne von gelenkigen Lagerbedingungen auszugehen ist. Aufgrund der behinderten Längenausdehnung entstehen Axialkräfte entlang der Rohrachse, die insbesondere bei Freilegung oder unzureichendem Querwiderstand zum Biegeknicken führen können. Das resultierende Belastungssystem entspricht dem zweiten Euler'schen Knickfall.

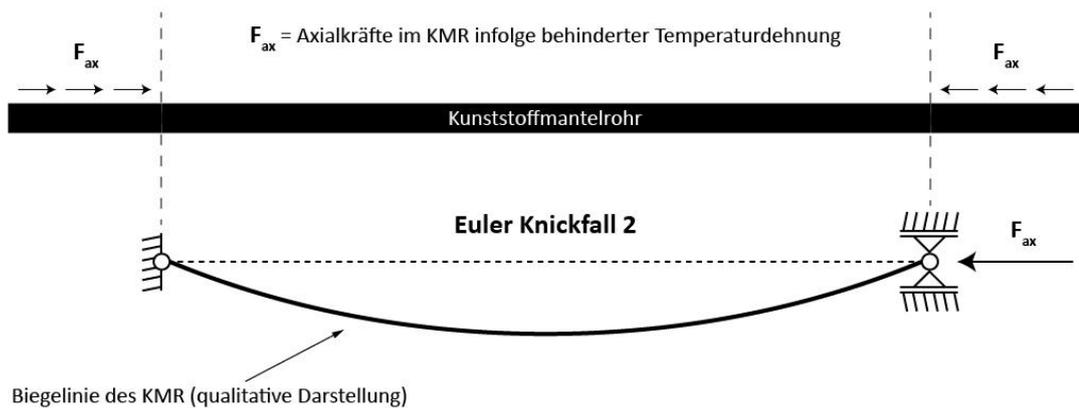


Abb. 13: Statisches KMR-Belastungssystem infolge behinderter Temperaturdehnung [Eigene Darstellung]

3. Untersuchungen

3.1 Knickbelastung von Kunststoffmantelrohren

Zur Untersuchung des Biegeknickverhaltens von Kunststoffmantelrohren unter axialen Spannungen werden im Rahmen der Masterarbeit von Hossein Zamani, mit dem Titel *Analysis of the Critical Buckling Force of District Heating Pipes*, insgesamt 20 Kunststoffmantelrohre des Herstellers Isoplus getestet. Die Testreihe umfasst je drei Single-Rohrstangen und drei Twin-Rohrstangen pro Nennweite (DN 20 und DN 32) mit einer Bestelllänge von vier Metern, sowie zusätzlich je vier Twin-Rohrstangen pro Nennweite (DN 20 und DN 32) mit einer Bestelllänge von drei Metern.

Im Zuge der weiterführenden Untersuchungen dieser Bachelorarbeit werden ausschließlich belastete Rohrstangen mit einer Länge von vier Metern analysiert, da im Vergleich zu drei Meter langen Stäben, bei sonst gleichen Abmessungen, größere Verformungen zu erwarten sind. Zur Eingrenzung des Untersuchungsumfangs werden zudem lediglich zwei der drei Single-KMR pro Nennweite, sowie jeweils nur das erste der drei Twin-KMR pro Nennweite in die detaillierte Analyse einbezogen.

3.1.1 Versuchsablauf der Knickversuche im Rahmen der Masterarbeit

Zum Aufbringen der Axialkraft wird ein Hydraulikzylinder des Typs INOVA AH250-400 mit einer 250 kN Kraftmessdose und INOVA Regler EU3000 verwendet. Der Hydraulikzylinder ermöglicht eine lineare Hubbewegung von bis zu 400 mm. Die Kraftmessdose erfasst die, durch die Verschiebung des Zylinders entstehenden, Axialkräfte bis zu einer maximalen Belastung von 250 kN. Das eingesetzte Regelgerät dient der präzisen Erfassung und Steuerung des Hubs.

Zur Dokumentation der Verformungen der Rohrstangen kommt das optische 3D-Messsystem ARAMIS der Firma GOM zum Einsatz. Es beinhaltet eine 12-Megapixel-Kamera, die an einem variablen Kameraträger montiert ist, sodass Position und Kamerawinkel entsprechend den Messanforderungen angepasst werden können. Der für die Prüfung erfasste Messbereich beträgt etwa 4500 mm in der Breite und 3620 mm in der Höhe. Die Ortsauflösung liegt bei etwa 0,9 Pixel pro Millimeter, wodurch eine Messgenauigkeit von ca. 0,2 mm erreicht wird. Zur optischen Erfassung der Verformungen werden auf der Außenfläche der Rohrstangen Messmarken, sogenannte GOM-Referenzpunkte, aufgebracht, die in den folgenden Abbildungen als kleine weiße Punkte sichtbar sind.

Der Versuchsaufbau jeder Rohrstange basiert auf dem Prinzip des zweiten Euler-Falls. Das KMR ist horizontal ausgerichtet und beidseitig gelenkig gelagert, sodass an beiden Rohrenden sämtliche rotatorischen Freiheitsgrade uneingeschränkt bleiben. Wie in den folgenden Abbildungen ersichtlich, sind am linken Lager alle translatorischen Freiheitsgrade gesperrt, während am rechten Lager, auf der Seite des Hydraulikzylinders, die lateralen Freiheitsgrade eingeschränkt und die axialen Freiheitsgrade zur Hubbewegung freigegeben sind. Durch die kontinuierliche Verschiebung mit einer Geschwindigkeit von $v = 1 \text{ mm/min}$ entstehen Axialkräfte entlang der Rohrachse, die mittels der Kraftmessdose aufgezeichnet werden. Nach Überschreiten der maximal aufnehmbaren Axialkraft kommt es zum Biegeknicken des KMR, wobei die Knickrichtung aufgrund des Eigengewichts nach unten verläuft. Die dabei entstehende Durchbiegung entspricht der Biegelinie des zweiten Euler'schen Knickfalls und beschreibt das charakteristische Durchbiegungsverhalten unter gegebenen Bedingungen, bei axialer Belastung.

3.1.2 Versuchsergebnisse der Knickversuche

Die folgenden Abbildungen zeigen alle relevanten Knickversuche der Rohrstangen, die im Rahmen dieser Bachelorarbeit weiter analysiert werden. Dargestellt sind Aufnahmen des 3D-Messsystems zum Zeitpunkt der maximal aufnehmbaren Axialkraft. Die maximal aufnehmbare Kraft der einzelnen KMR ist in Kilonewton (kN) direkt den Abbildungen zu entnehmen. Zudem sind der Verschiebungsweg des Hydraulikzylinders sowie die Durchbiegung der einzelnen Messpunkte in Millimetern (mm) angegeben. Die Richtung der Durchbiegung wird durch Pfeile hervorgehoben, um die resultierende Biegelinie qualitativ zu veranschaulichen.

S-P1-DN20-4

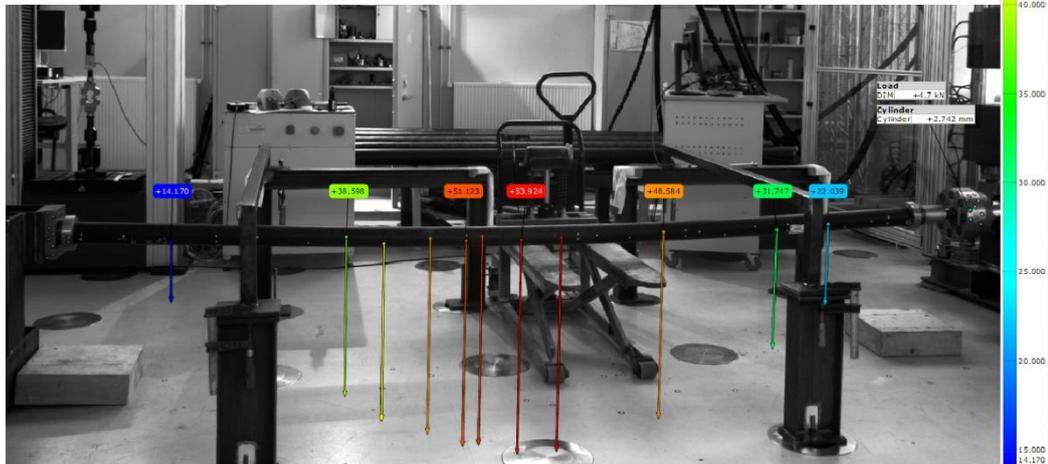


Abb. 14: Biegeknickversuch des S-P1-DN20-4 [Eigene Darstellung]

S-P1-DN32-4



Abb. 15: Biegeknickversuch des S-P1-DN32-4 [Eigene Darstellung]

S-P2-DN20-4

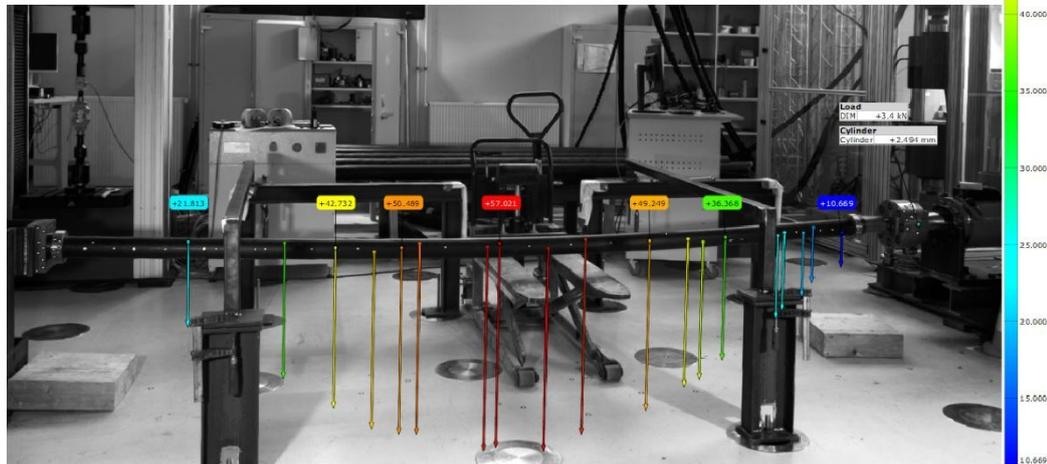


Abb. 16: Biegeknickversuch des S-P2-DN20-4 [Eigene Darstellung]

S-P2-DN32-4

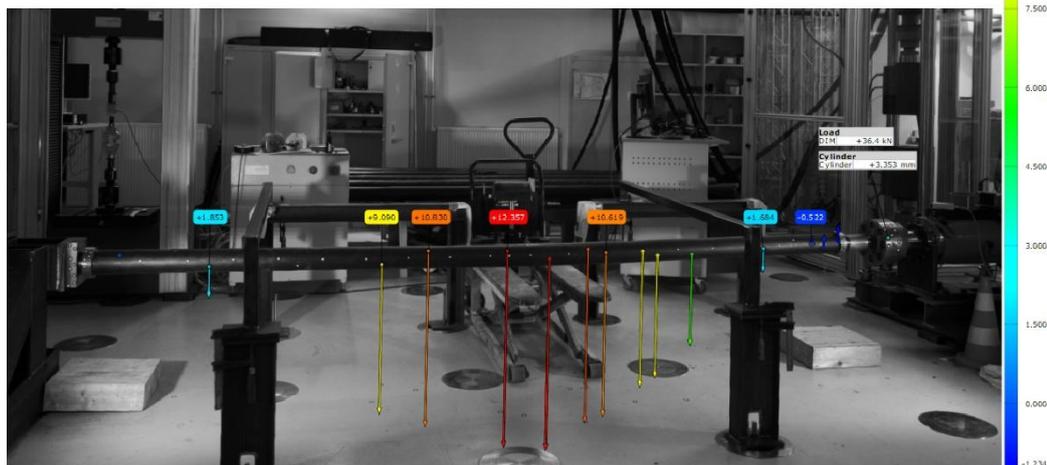


Abb. 17: Biegeknickversuch des S-P2-DN32-4 [Eigene Darstellung]

T-P1-DN20-4

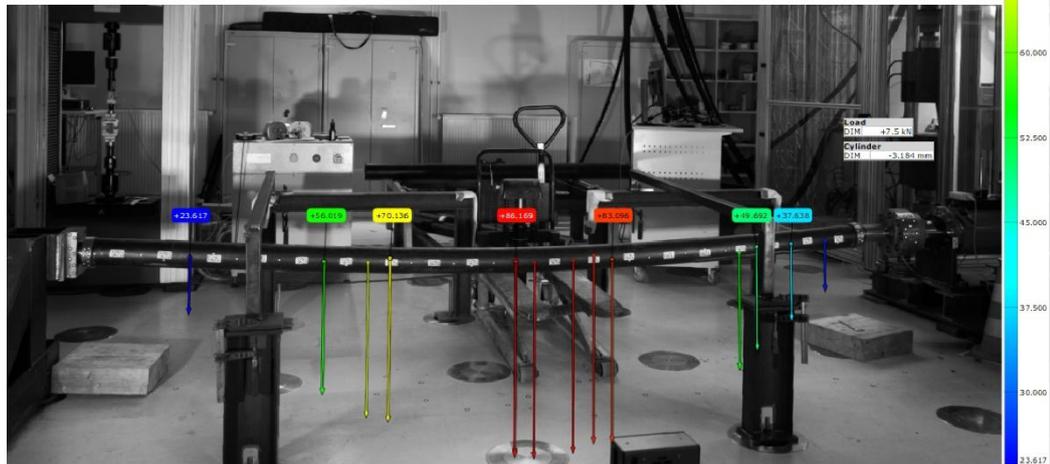


Abb. 18: Biegeknickversuch des T-P1-DN20-4 [Eigene Darstellung]

T-P1-DN32-4

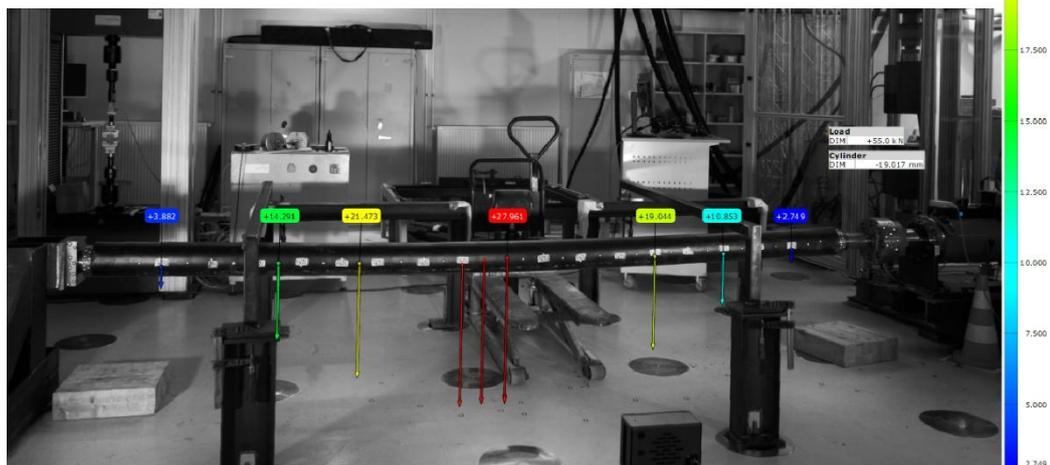


Abb. 19: Biegeknickversuch des T-P1-DN32-4 [Eigene Darstellung]

Die unterschiedlichen Durchmesser sowie die Ausführungen als Einzel- oder Doppelrohr lassen sich anhand der aufnehmbaren axialen Kraft und der resultierenden Durchbiegung charakterisieren. Es bestätigt sich, dass KMR mit identischen Abmessungen eine ähnlich starke Durchbiegung aufweisen und die maximale Axialkraft in einem vergleichbaren Bereich liegt.

Aufgrund des höheren Trägheitsmomentes der KMR mit einem größeren Durchmesser von DN 32, wird in den Versuchen eine sieben- bis zehnfach höhere Axialkraft vor dem Knickversagen aufgenommen als ein KMR mit einer Nennweite von DN 20. Die Durchbiegung der Single-DN32-Rohrstangen bei maximaler Belastung beträgt etwa ein Fünftel der Durchbiegung der Single-DN20-Rohre.

Darüber hinaus wird ersichtlich, dass KMR in der Doppelrohrausführung eine höhere axiale Belastbarkeit aufweisen als solche in der Einfachrohrausführung. Ergänzend zeigt sich, dass Twin-KMR unter maximaler Belastung stärker verformen als die entsprechenden Single-KMR.

3.2 Auswahl und Entnahme der KMR-Probekörper

Im Rahmen der Masterarbeit erfolgt eine strukturierte Kennzeichnung der belasteten KMR. Diese Systematik wird in der vorliegenden Arbeit übernommen und weitergeführt. Zur Differenzierung der Typen werden folgende Bezeichnungen verwendet:

S	Single KMR
T	Twin KMR
P1/P2	Rohr 1 / Rohr 2
DN20/DN32	Nennweite Stahl-Mediumrohr (in Millimetern)
4	bestellte Rohrlänge (in Metern)
N	Neu

Für die weiterführenden Analysen der untersuchten KMR werden Probekörper aus den folgenden 4 m langen Rohrstangen der Masterarbeit entnommen:

- **S-P1-DN20-4**
- **S-P1-DN32-4**
- **T-P1-DN20-4**
- **T-P1-DN32-4**

Zusätzlich wird ein neues Endstück einer Rohrstange verwendet. Dieses Endstück wurde keiner Biegeknickbelastung ausgesetzt und dient als Vergleichsmaterial für neue Rohrstangen ab Werk. Es wird unter folgender Bezeichnung geführt:

- **N-S-P1-DN20-4**

Während der Untersuchungen zur Scherfestigkeit der Prüfkörper zeigt sich, dass die Ergebnisse der getesteten Single-KMR-Probekörper eine hohe Streuung aufweisen. Um aussagekräftigere Resultate zu erhalten, werden nachträglich zwei weitere knickbelastete Rohrstangen in die Analyse einbezogen. Diese entsprechen den vorherigen Untersuchungen und sind unter folgenden Bezeichnungen erkennbar:

- **S-P2-DN20-4**
- **S-P2-DN32-4**

3.2.1 Rahmenbedingungen der Probenentnahme

Im ersten Teil der Untersuchungen wird der Zustand der geknickten Kunststoffmantelrohre visuell anhand entnommener Querschnitte bewertet. Zudem erfolgt eine Kontrolle der relevanten Abmessungen gemäß EN 253 [R4]. Die Auswahl der Entnahmestellen und -längen für die Probekörper kann hierbei individuell entschieden werden.

Im zweiten Teil werden spezifisch ausgewählte Probekörper hinsichtlich der Verbundscherfestigkeit gemäß DIN EN 253 [R4] geprüft. Für die Bestimmung der axialen Scherfestigkeit werden pro Rohr drei Prüfkörper entnommen. Zwei dieser Querschnitte werden an den Rohrenden mit einem Mindestabstand von 500 mm zum jeweiligen Ende herausgeschnitten, der dritte in der Rohrmitte. Jeder Prüfkörper muss eine Länge aufweisen, die dem 2,5-fachen der Dicke des PUR-Schaums entspricht, jedoch mindestens 200 mm beträgt [R4].

3.2.2 Entnahme der Probekörper

Im ersten Teil der Untersuchung werden alle ausgewählten KMR berücksichtigt. Um möglichst präzise senkrecht zur Rohrachse geschnittene Probekörper zu erhalten, kommt die in Abbildung 20 gezeigte BOMAR Metall-Bandsägemaschine des Herstellers ELMAG zum Einsatz. Es werden an beiden Enden jeder Rohrstange jeweils drei Probekörper mit einer Länge von 10 cm herausgeschnitten. Da die Rohrenden der etwa 4 m langen KMR mit Metallbuchsen abgedichtet sind, muss im Voraus ein Abschnitt entfernt werden. Für DN20-KMR beträgt dieser Abstand 6,5 cm, für DN32-KMR 10 cm vom Rohrende. Die Rechtwinkligkeit des Querschnitts zur Rohrachse ist für jeden Probekörper eingehalten, siehe beispielhaft in Abbildung 21.



Abb. 20: Aufbau Bandsägemaschine [Eigene Darstellung]

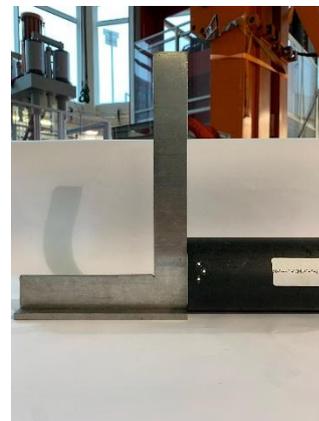


Abb. 21: Rechtwinkligkeit [Eigene Darstellung]

3. Untersuchungen

Im zweiten Teil der Untersuchung werden ausschließlich die Single-KMR analysiert. Die tatsächliche Dämmdicke der Single-KMR beträgt maximal 31,5 mm, sodass die festgelegte Mindestlänge der Probekörper im Verbund von 200 mm gilt. Die drei Probekörper werden unter Einhaltung des Mindestabstands von 500 mm von den Rohrenden, sowie aus der Mitte der KMR, senkrecht zur Rohrachse herausgeschnitten. Die Entnahme erfolgt als zusammenhängender Verbund mit einer Länge von 250 mm. Anschließend wird auf einer Seite der äußere Teil des Verbunds (PE-Mantel & PUR-Schaum) mittels einer Drehbank auf etwa 200 mm gekürzt. Das Stahl-Mediumrohr ragt dadurch etwa 5 cm aus dem Verbund heraus, um die Messung des Scherwegs zu ermöglichen.



Abb. 22: ungekürzter Verbund [Eigene Darstellung]



Abb. 23: gekürzter Verbund [Eigene Darstellung]

3.2.3 Position und Bezeichnung der entnommenen Proben

Alle entnommenen Probekörper der KMR sind in der folgenden Darstellung abgebildet. Die Darstellungen sind nicht maßstabsgetreu und dienen lediglich der schematischen Veranschaulichung. Die spezifischen Maße und Bezeichnungen der Probekörper sowie ungenutzte Querschnitte sind den Zeichnungen zu entnehmen. Es wird zwischen linker und rechter Seite differenziert, wobei diese Zuordnung ausschließlich aus dem Schneidevorgang mittels der Metall-Bandsägemaschine resultiert. Die Ausrichtung der Rohrstangen während der Knickversuche wurde nicht dokumentiert und lässt sich nachträglich nicht genau bestimmen. Daher ist die Zuordnung von links und rechts unabhängig von der Orientierung auf den Fotos der Knickversuche. Die Benennung dient dazu, die Querschnitte der beiden Rohrseiten klar zu unterscheiden.

3. Untersuchungen

Die Benennung der Prüfkörper erfolgt gemäß dem gewählten KMR und wird durch die Positionen L (links), M (mitte) und R (rechts) sowie deren Reihenfolge systematisch gekennzeichnet. Alle nicht gekennzeichneten Querschnitte dienen ausschließlich der Einhaltung der Rahmenbedingungen gemäß DIN EN 253 [R4].

Die KMR-Stangen wurden in einer definierten Bestelllänge von vier Metern geliefert. Für die Durchführung der Knickversuche müssen die freien Stahlrohrenden gekürzt werden, wodurch die tatsächliche Rohrlänge etwas unter vier Metern liegt. Die exakte Gesamtlänge jedes KMRs kann der nachfolgenden Darstellung entnommen werden.

Alle Maße sind in Millimetern (mm) angegeben.

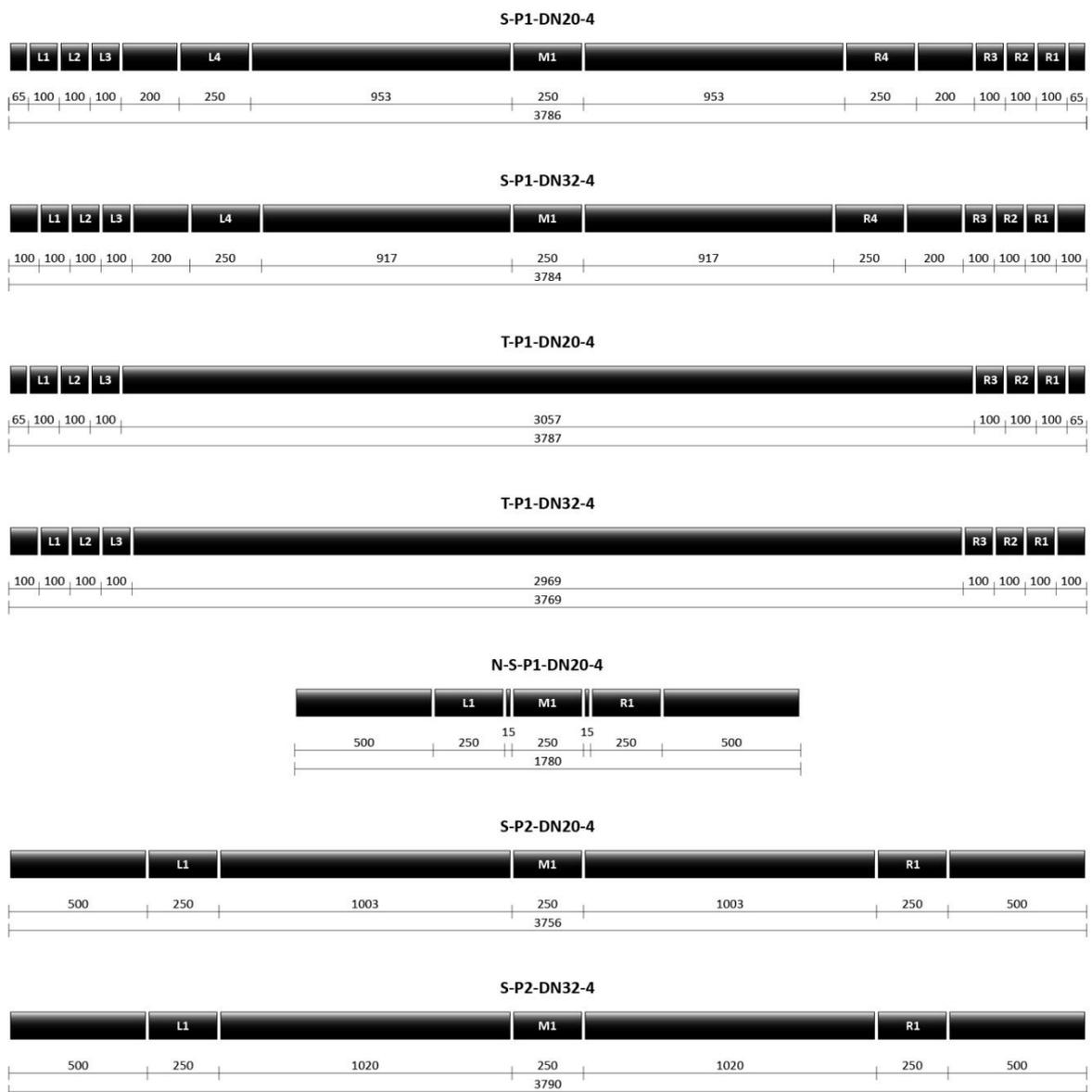


Abb. 24: Position und Bezeichnung der Probekörper [Eigene Darstellung]

3.3 Visuelle und messtechnische Querschnittsanalyse

Im ersten Teil der Untersuchungen wird der Zustand der Kunststoffmantelrohre visuell anhand entnommener Querschnitte überprüft und die erforderlichen Abmessungen nach DIN EN 253 [R4] kontrolliert. Jeder Probekörper wird umfassend dokumentiert und beidseitig an den Schnittufern fotografiert. Aufgrund der großen Anzahl an Querschnitten werden sämtliche Aufnahmen digital zur Verfügung gestellt. Im vorliegenden Text werden zentrale Beispiele sowie repräsentative Normalfälle zur Analyse präsentiert.

Zunächst erfolgt eine visuelle Inspektion jedes Probekörpers zur Identifikation möglicher Schäden. Anschließend werden die Außendurchmesser und Wanddicken gemäß DIN EN 253 [R4] mittels eines Messschiebers erfasst und überprüft. Im letzten Schritt wird die Koaxialitätsabweichung zwischen Mediumrohr und Außenmantel mithilfe eines 3D-Messsystems untersucht.

3.3.1 Visuelle Querschnittsanalyse

Nach der Entnahme der Probekörper wird jeder Querschnitt visuell untersucht und durch drei Fotos dokumentiert, wie in den folgenden Abbildungen dargestellt.



Abb. 25: Frontansicht [Eigene Darstellung]



Abb. 26: Rechtes Schnittufer [Eigene Darstellung]



Abb. 27: Linkes Schnittufer [Eigene Darstellung]

Die Querschnittsfotos der einzelnen Probekörper werden um die Bezeichnungen RS (rechtes Schnittufer) und LS (linkes Schnittufer) ergänzt.

Im Folgenden wird jede untersuchte Rohrstanze individuell bewertet und anhand repräsentativer Beispielfotos veranschaulicht.

S-P1-DN20-4:

Exemplarisch zeigt Abbildung 28 einen Probekörper in einem einwandfreien Zustand ohne erkennbare Mängel. Neben des generell guten Zustands des Schaums lässt sich in Abbildung 29 jedoch erkennen, dass insbesondere im Bereich der PE-Zentrierelemente, die zur konzentrischen Fixierung des Mediumrohrs im PE-Mantel eingebaut werden, ausgeprägte Inhomogenitäten der Zellstrukturen vorliegen. Es ist anzunehmen, dass diese bereits während der Herstellung entstehen, jedoch durch ein Biegeknicken des Verbunds weiter verstärkt werden können.

In Abbildung 30 ist zudem ersichtlich, dass das Mediumrohr exzentrisch innerhalb des PUR-Schaums positioniert ist. Die Abweichung der Koaxialität zwischen Mediumrohr und PE-Ummantelung liegt möglicherweise bereits produktionsbedingt vor, kann jedoch durch die Biegung im Rahmen des Knickversuchs weiter verstärkt werden. Im äußeren Randbereich des PUR-Schaums sind inhomogene Zellstrukturen in Richtung der Abweichung des Mediumrohrs erkennbar, die eventuell infolge einer Komprimierung während des Biegeversuchs entstehen, wobei diese Annahme nicht eindeutig verifiziert werden kann.



Abb. 28: S-P1-DN20-4-L3-RS
[Eigene Darstellung]



Abb. 29: S-P1-DN20-4-L3-LS



Abb. 30: S-P1-DN20-4-R3-RS

S-P1-DN32-4:

Hinsichtlich möglicher Brüche im Schaum bleibt auch das zweite Single-KMR unbeeinträchtigt. Lediglich ein Riss, der durch die Verschiebung einer Meldeader infolge des Schneidens entstanden ist, kann festgestellt werden. Dieser ist in Abbildung 31 ersichtlich. Darüber hinaus veranschaulicht Abbildung 32 eine ausgeprägte Exzentrizität des Stahlrohrs in Bezug auf die Achse des KMRs, wobei zudem geringfügige Veränderungen in der Zellstruktur des Schaums um das Stahlrohr erkennbar sind.



Abb. 31: S-P1-DN32-4-L1-RS [Eigene Darstellung]

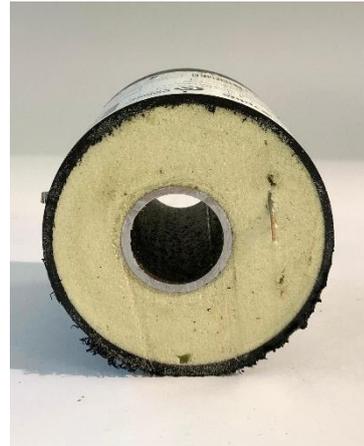


Abb. 32: S-P1-DN32-4-L3-RS [Eigene Darstellung]

T-P1-DN20-4:

Die Zellstruktur des Twin-DN20-KMRs weist eine homogene Ausbildung auf und zeigt keine Schäden des PUR infolge von Biegeknicken, wie in Abbildung 33 ersichtlich ist. Abbildung 34 verdeutlicht anhand der Doppelrohrausführung, dass die Stahl-Mediumrohre produktionsbedingt innerhalb des Verbundsystems verschoben sind. Eine zusätzliche Verstärkung dieser Exzentrizität infolge des Biegeknickens lässt sich nicht ausschließen. Darüber hinaus zeigt der PE-Außenmantel, dass das ursprünglich kreisförmige Profil des KMRs eine leichte Deformation aufweist, wobei in senkrechter Richtung zur Mittelachse der Doppelrohranordnung eine Durchmesserverkürzung auftritt.



Abb. 33: T-P1-DN20-4-L3-RS [Eigene Darstellung]



Abb. 34: T-P1-DN20-4-L3-LS [Eigene Darstellung]

T-P1-DN32-4:

Die Twin-KMR-Ausführung mit größerem Durchmesser weist keine Brüche oder Risse auf. Die in den Abbildungen 35 und 36 dargestellten Querschnitte zeigen deutliche geometrische Verformungen, insbesondere im Hinblick auf die Exzentrizität der Mediumrohre relativ zur Achse des PE-Außenmantels sowie auf Abweichungen von der idealen Kreisform. In Abbildung 36 sind zudem Unregelmäßigkeiten in der PUR-Zellstruktur erkennbar, die entweder bereits während des Herstellungsprozesses entstanden sind oder infolge einer Verschiebung der Mediumrohre mit anschließender lokaler Kompression des Schaums auftreten.



Abb. 35: T-P1-DN32-4-R3-LS [Eigene Darstellung]



Abb. 36: T-P1-DN32-4-L3-LS [Eigene Darstellung]

N-S-P1-DN20-4:

Die unbelastete Rohrstanze weist, ebenso wie der Großteil der geknickten KMR, keine sichtbaren Mängel am PUR-Schaum auf. Abbildung 37 veranschaulicht den unversehrten Verbund des neuen Rohrs. Abbildung 38 zeigt jedoch, dass das Mediumrohr innerhalb des Verbunds nicht exakt koaxial angeordnet ist. Es ist daher anzunehmen, dass die Abweichungen in der Koaxialität des Stahl-Mediumrohrs in gewissem Maße auf prozessbedingte Fertigungstoleranzen zurückzuführen sind.



Abb. 37: N-S-P1-DN20-4-R1-LS [Eigene Darstellung]



Abb. 38: N-S-P1-DN20-4-L1-LS [Eigene Darstellung]

S-P2-DN20-4:

Ähnlich wie bei der ersten Rohrstanze des Single-DN20-KMRs sind in der Dämmschicht keinerlei Risse oder Bruchstellen erkennbar. Wie Abbildung 39 zeigt, bleibt die Zellstruktur des PUR-Schaums auch unter den gegebenen Bedingungen homogen. Abbildung 40 verdeutlicht zudem eine leichte Exzentrizität des Stahl-Mediumrohrs in Bezug auf die konzentrische Lage innerhalb der PE-Ummantelung.



Abb. 39: S-P2-DN20-4-L1-LS [Eigene Darstellung]



Abb. 40: S-P2-DN20-4-M1-RS [Eigene Darstellung]

S-P2-DN32-4:

Im Vergleich zur ersten untersuchten Rohrstanze des Single-DN32-KMRs zeigen alle Querschnitte deutliche Inhomogenitäten in der Struktur des PUR-Schaums, wie exemplarisch in den Abbildungen 41 und 42 dokumentiert. Diese Unregelmäßigkeiten lassen

3. Untersuchungen

sich vermutlich auf eine ungleichmäßige Schaumbildung während des Produktionsprozesses zurückführen. Darüber hinaus sind in Abbildung 43 größere Zellgasansammlungen innerhalb der Dämmschicht zu erkennen, die aufgrund ihrer Form missverständlich als rissartige Strukturen interpretiert werden könnten. Es handelt sich hierbei ausschließlich um werkseitig bedingte Unregelmäßigkeiten in der Schaumstruktur.



*Abb. 41: S-P2-DN32-4-M1-RS
[Eigene Darstellung]*



*Abb. 42: S-P2-DN32-4-R1-LS
[Eigene Darstellung]*



*Abb. 43: S-P2-DN32-4-M1-LS
[Eigene Darstellung]*

3.3.1.1 Endergebnis der visuellen Überprüfung

Die visuelle Untersuchung der Probekörper zeigt, dass keine erkennbaren Risse durch Biegeknickbelastungen entstehen. Eine gezielte Markierung potenzieller Mikrorisse mittels Epoxidharz ist aufgrund der feinen Zellstruktur des Materials nicht möglich. Beobachtbare Risse resultieren primär aus dem Schneiden der Probekörper, insbesondere beim Lösen der Meldeadern. Ungleichmäßige oder vermehrt ausgeprägte Zellgasansammlungen sind auf produktionsbedingte Einflüsse zurückzuführen und stehen in keinem direkten Zusammenhang mit der aufgetragenen Knickbelastung. Während die Zellstruktur des PUR größtenteils homogen bleibt, sind vereinzelt lokale Inhomogenitäten festzustellen, die überwiegend fertigungsbedingt sind. Es ist jedoch nicht auszuschließen, dass stellenweise Abweichungen auch infolge des Biegeknickens auftreten können.

3.3.2 Überprüfung der Abmessungen mithilfe eines Messschiebers

Nach der visuellen Inspektion sowie der Erfassung der Querschnittsaufnahmen erfolgt die Überprüfung der Abmessungen der Probekörper gemäß DIN EN 253 [R4]. Zur präzisen Messwerterfassung wird ein digitaler Messschieber vom Typ 16 EWRi des Herstellers Mahr eingesetzt. Die Messung umfasst, wie in den Abbildungen 44 bis 47 dargestellt, die Bestimmung der Wanddicke sowie des Außendurchmessers des Stahl-Mediumrohrs und des PE-Mantels. Zur präzisen Messung der Wanddicken und des Stahl-Außendurchmessers wird mit dem Messschieber eine geringe Eindringtiefe in den PUR-Schaum vorgenommen.



Abb. 44: PE-Durchmesser
[Eigene Darstellung]



Abb. 45: PE-Wanddicke
[Eigene Darstellung]



Abb. 46: S-Durchmesser
[Eigene Darstellung]



Abb. 47: Stahl-Wanddicke
[Eigene Darstellung]

3.3.2.1 Überprüfung der Abmessungen des Stahl-Mediumrohrs

Zunächst werden die Abmessungen des Stahl-Mediumrohrs gemäß den Vorgaben der DIN EN 253 [R4] überprüft. Der genormte Außendurchmesser d_0 sowie die Mindestwanddicke t_{min} in Millimetern (mm) sind entsprechend den Nennweiten gemäß Tabelle 1 der DIN EN 253 [R4] zu berücksichtigen. Da es sich bei den Mediumrohren der untersuchten KMR um nahtlose Stahlrohre handelt, sind die zulässigen Toleranzen für den Außendurchmesser und die Mindestwanddicke gemäß DIN EN 10216-2 [R5], Tabelle 9 einzuhalten.

Tabelle 2: Stahl-Mediumrohr Grenzabmaße gemäß DIN EN 10216-2, Tab. 9 [R5, S. 33]

Außen- durchmesser D mm	Grenzabmaße für D	Grenzabmaße für die Wanddicke T_{min} bei einem T_{min}/D -Verhältnis von			
		$\leq 0,02$	$> 0,02 \leq 0,04$	$> 0,04 \leq 0,09$	$> 0,09$
$D \leq 219,1$	$\pm 1\%$ oder $\pm 0,5$ mm, es gilt jeweils der größere Wert	$+28\%$ oder $+8\%$ mm, es gilt jeweils der größere Wert			
$D > 219,1$		$+50\%$ 0	$+35\%$ 0	$+28\%$ 0	$+22\%$ ^a 0
^a Für Außendurchmesser $D \geq 355,6$ mm darf das obere Grenzabmaß der Wanddicke örtlich um weitere 5 % der Wanddicke T überschritten werden.					

Prüfung des Außendurchmessers D_s :

Die Messung des Außendurchmessers D_s kann gemäß DIN EN 253 [R4] bis zu einem genormten Außendurchmesser von $d_0 = 168,3$ mm mit einem Messschieber erfolgen. Bei größeren Durchmessern muss die Messung mittels eines umlaufenden Bandes durchgeführt und der tatsächliche Durchmesser als Quotient aus dem Umfang und π berechnet werden.

Für die im Rahmen dieser Untersuchung betrachteten Probekörper beträgt der genormte Außendurchmesser maximal $d_0 = 42,4$ mm. Daher wird die Messung für jeden Querschnitt mit einem Messschieber durchgeführt. Um Messungenauigkeiten zu minimieren und eine möglichst präzise Bestimmung des Außendurchmessers vorzunehmen, werden mehrere Einzelmessungen in Anlehnung an DIN EN ISO 3126 [R17] durchgeführt. Gemäß dieser Norm sind für Nennweiten bis einschließlich DN 40 vier Einzelmessungen pro Querschnitt erforderlich. Diese Messungen werden in einem Winkelabstand von 90° zueinander vorgenommen. Das arithmetische Mittel der vier Messungen dient als Referenzwert.

Der genormte Wert des Außendurchmessers d_0 ist Tabelle 1 der DIN EN 253 [R4] zu entnehmen. Für das Stahlrohr mit der Nennweite DN 20 ist ein Außendurchmesser von $d_0 = 26,9$ mm festgelegt, während für die Nennweite DN 32 ein genormter Außendurchmesser von $d_0 = 42,4$ mm vorgegeben ist. Für die zu prüfenden Außendurchmesser beträgt die zulässige Toleranz $\pm 0,5$ mm. Dieser Wert ist für beide Nennweiten größer als 1 % des jeweiligen Außendurchmessers und wird nach Tabelle 2 als maßgebliche Toleranz angewendet.

Ergebnisse der Prüfung:

Aus der Prüfung geht hervor, dass die Anforderungen an die Abmessungen des Stahl-Mediumrohrs von allen Prüfkörpern erfüllt werden. Somit besteht jedes der untersuchten KMR im Hinblick auf den Stahlrohr-Außendurchmesser die Maßprüfung. Zur übersichtlichen Darstellung der Überprüfung der Abmessungen werden auf der nächsten Seite repräsentativ die Mittelwerte des tatsächlichen Außendurchmessers D_s der einzelnen Probekörper präsentiert. Jede Einzelmessung, die zur Berechnung des arithmetischen Mittels herangezogen wurde, liegt ebenfalls innerhalb des zulässigen Toleranzbereichs für den Außendurchmesser. Die vollständigen Einzelwerte sind den digital bereitgestellten Dateien zu entnehmen.

3. Untersuchungen

Tabelle 3: Maßprüfung Stahl-Mediumrohr Außendurchmesser [Eigene Darstellung]

Probnummer	Maße des Stahl-Mediumrohr Außendurchmessers				
	Gemessen	Genormt	Prüfung des Außendurchmessers D_s		
	Außendurchmesser D_s [mm]	d_0 [mm]	zulässiger Mindestwert [mm]	zulässiger Maximalwert [mm]	eingehalten?
N= Neu ; S= Single ; T= Twin P1= Rohr 1 ; P2= Rohr 2 DN= Nennweite Stahlrohr [mm] 4= bestellte Rohrlänge [m] L= links ; M= mitte ; R= rechts					
S-P1-DN20-4-L1	26,7	26,9	26,4	27,4	ja
S-P1-DN20-4-L2	26,7	26,9	26,4	27,4	ja
S-P1-DN20-4-L3	26,7	26,9	26,4	27,4	ja
S-P1-DN20-4-L4	26,8	26,9	26,4	27,4	ja
S-P1-DN20-4-M1	26,7	26,9	26,4	27,4	ja
S-P1-DN20-4-R4	26,8	26,9	26,4	27,4	ja
S-P1-DN20-4-R3	26,8	26,9	26,4	27,4	ja
S-P1-DN20-4-R2	26,8	26,9	26,4	27,4	ja
S-P1-DN20-4-R1	26,7	26,9	26,4	27,4	ja
S-P1-DN32-4-L1	42,6	42,4	41,9	42,9	ja
S-P1-DN32-4-L2	42,6	42,4	41,9	42,9	ja
S-P1-DN32-4-L3	42,6	42,4	41,9	42,9	ja
S-P1-DN32-4-L4	42,4	42,4	41,9	42,9	ja
S-P1-DN32-4-M1	42,4	42,4	41,9	42,9	ja
S-P1-DN32-4-R4	42,4	42,4	41,9	42,9	ja
S-P1-DN32-4-R3	42,4	42,4	41,9	42,9	ja
S-P1-DN32-4-R2	42,5	42,4	41,9	42,9	ja
S-P1-DN32-4-R1	42,5	42,4	41,9	42,9	ja
T-P1-DN20-4-L1	26,9	26,9	26,4	27,4	ja
T-P1-DN20-4-L2	26,9	26,9	26,4	27,4	ja
T-P1-DN20-4-L3	26,9	26,9	26,4	27,4	ja
T-P1-DN20-4-R3	26,9	26,9	26,4	27,4	ja
T-P1-DN20-4-R2	26,9	26,9	26,4	27,4	ja
T-P1-DN20-4-R1	26,9	26,9	26,4	27,4	ja
T-P1-DN32-4-L1	42,4	42,4	41,9	42,9	ja
T-P1-DN32-4-L2	42,4	42,4	41,9	42,9	ja
T-P1-DN32-4-L3	42,4	42,4	41,9	42,9	ja
T-P1-DN32-4-R3	42,5	42,4	41,9	42,9	ja
T-P1-DN32-4-R2	42,4	42,4	41,9	42,9	ja
T-P1-DN32-4-R1	42,4	42,4	41,9	42,9	ja
N-S-P1-DN20-4-L1	26,8	26,9	26,4	27,4	ja
N-S-P1-DN20-4-M1	26,7	26,9	26,4	27,4	ja
N-S-P1-DN20-4-R1	26,8	26,9	26,4	27,4	ja
S-P2-DN20-4-L1	26,7	26,9	26,4	27,4	ja
S-P2-DN20-4-M1	26,7	26,9	26,4	27,4	ja
S-P2-DN20-4-R1	26,7	26,9	26,4	27,4	ja
S-P2-DN32-4-L1	42,4	42,4	41,9	42,9	ja
S-P2-DN32-4-M1	42,4	42,4	41,9	42,9	ja
S-P2-DN32-4-R1	42,4	42,4	41,9	42,9	ja

3. Untersuchungen

Prüfung der Wanddicke t :

Die Bestimmung der Wanddicken erfolgt ebenfalls unter Verwendung eines Messschiebers. Zur strukturierten und präzisen Prüfung der Wanddicken des Mediumrohrs werden die Messungen in Anlehnung an DIN EN ISO 3126 [R17] durchgeführt. Entsprechend der Norm sind mindestens sechs Messpunkte gleichmäßig über den Rohrumfang verteilt zu erfassen, um den Mittelwert der Wanddicke zu ermitteln.

Die Mindestwanddicken des Stahl-Mediumrohrs sind Tabelle 1 der DIN EN 253 [R4] zu entnehmen. Darüber hinaus sind für nahtlose Stahlrohre die zulässigen Toleranzen der Mindestwanddicke gemäß DIN EN 10216-2 [R5], Tabelle 9 einzuhalten.

Für die zu analysierenden Rohrquerschnitte sind gemäß den festgelegten Spezifikationen Mindestwanddicken von $t_{min} = 2,0$ mm für Nennweiten von DN 20 und $t_{min} = 2,6$ mm für DN 32 definiert. Das obere Grenzmaß der Mindestwanddicke wird entsprechend der Tabelle 2 um 8,0 mm addiert, da der größere Wert maßgeblich ist. Es resultieren zulässige maximale Wanddicken von $t_{max} = 10,0$ mm für DN 20 und $t_{max} = 10,6$ mm für DN 32.

Ergebnisse der Prüfung:

Die messtechnische Prüfung der Wanddicken des Stahl-Mediumrohrs bestätigt ebenfalls die Einhaltung der vorgegebenen Spezifikationen, wobei alle gemessenen Werte deutlich innerhalb der zulässigen Grenzabmaße liegen. Dementsprechend bleiben die Abmessungen des Stahl-Mediumrohrs aller untersuchten KMR auch nach der Biegeknickbelastung innerhalb der normativen Toleranzen. Analog zur vorherigen Prüfung sind auf der nächsten Seite die repräsentativen Mittelwerte der Wanddicken aufgeführt und analysiert. Die vollständigen Einzelmesswerte der Wanddicken werden digital zur Verfügung gestellt.

Tabelle 4: Maßprüfung Stahl-Mediumrohr Wanddicke [Eigene Darstellung]

Probennummer	Maße der Stahl-Mediumrohr Wanddicke			
	Gemessen	Prüfung der Wanddicke t		
N= Neu ; S= Single ; T= Twin P1= Rohr 1 ; P2= Rohr 2 DN= Nennweite Stahlrohr [mm] 4= bestellte Rohrlänge [m] L= links ; M= mitte ; R= rechts	Wanddicke t [mm]	zulässiger Mindestwert [mm]	zulässiger Maximalwert [mm]	eingehalten?
S-P1-DN20-4-L1	3,05	2,0	10,0	ja
S-P1-DN20-4-L2	3,07	2,0	10,0	ja
S-P1-DN20-4-L3	3,06	2,0	10,0	ja

3. Untersuchungen

S-P1-DN20-4-L4	3,14	2,0	10,0	ja
S-P1-DN20-4-M1	3,13	2,0	10,0	ja
S-P1-DN20-4-R4	3,11	2,0	10,0	ja
S-P1-DN20-4-R3	3,18	2,0	10,0	ja
S-P1-DN20-4-R2	3,08	2,0	10,0	ja
S-P1-DN20-4-R1	3,12	2,0	10,0	ja
S-P1-DN32-4-L1	3,23	2,6	10,6	ja
S-P1-DN32-4-L2	3,27	2,6	10,6	ja
S-P1-DN32-4-L3	3,24	2,6	10,6	ja
S-P1-DN32-4-L4	3,16	2,6	10,6	ja
S-P1-DN32-4-M1	3,15	2,6	10,6	ja
S-P1-DN32-4-R4	3,18	2,6	10,6	ja
S-P1-DN32-4-R3	3,14	2,6	10,6	ja
S-P1-DN32-4-R2	3,15	2,6	10,6	ja
S-P1-DN32-4-R1	3,20	2,6	10,6	ja
T-P1-DN20-4-L1	3,00	2,0	10,0	ja
T-P1-DN20-4-L2	2,91	2,0	10,0	ja
T-P1-DN20-4-L3	2,93	2,0	10,0	ja
T-P1-DN20-4-R3	2,95	2,0	10,0	ja
T-P1-DN20-4-R2	2,97	2,0	10,0	ja
T-P1-DN20-4-R1	2,95	2,0	10,0	ja
T-P1-DN32-4-L1	3,14	2,6	10,6	ja
T-P1-DN32-4-L2	3,11	2,6	10,6	ja
T-P1-DN32-4-L3	3,10	2,6	10,6	ja
T-P1-DN32-4-R3	3,10	2,6	10,6	ja
T-P1-DN32-4-R2	3,10	2,6	10,6	ja
T-P1-DN32-4-R1	3,10	2,6	10,6	ja
N-S-P1-DN20-4-L1	3,11	2,0	10,0	ja
N-S-P1-DN20-4-M1	3,05	2,0	10,0	ja
N-S-P1-DN20-4-R1	3,10	2,0	10,0	ja
S-P2-DN20-4-L1	2,98	2,0	10,0	ja
S-P2-DN20-4-M1	3,03	2,0	10,0	ja
S-P2-DN20-4-R1	3,06	2,0	10,0	ja
S-P2-DN32-4-L1	3,09	2,6	10,6	ja
S-P2-DN32-4-M1	3,13	2,6	10,6	ja
S-P2-DN32-4-R1	3,13	2,6	10,6	ja

3.3.2.2 Überprüfung der Abmessungen der Polyethylen-Ummantelung

Im nächsten Schritt erfolgt die Überprüfung der Abmessungen des PE-Mantelrohrs gemäß den Anforderungen der DIN EN 253 [R4]. Die relevanten Maßgrößen, einschließlich des Nenn-Außendurchmessers D_c , des minimalen Außendurchmessers D_{min} , des maximalen Außendurchmessers D_{max} sowie der minimalen Wanddicke e_{min} , sind in Tabelle 4 der DIN EN 253 [R4] festgelegt.

Tabelle 5: Maße der PE-Ummantelung gemäß DIN EN 253, Tab. 4 [R4, S. 16]

Nenn-Außendurchmesser D_c mm	Mindestaußendurchmesser D_{min} mm	Maximaler Außendurchmesser D_{max} mm	Mindestwanddicke e_{min} mm
90	90	95	3,0
110	110	116	3,0
125	125	132	3,0
140	140	147	3,0
160	160	168	3,0

Die Bestimmung des tatsächlichen Außendurchmessers D und der tatsächlichen Wanddicke e erfolgt nach den Vorgaben der DIN EN ISO 3126 [R17]. Für die Messungen kommt der digitale Messschieber zum Einsatz. Bei Abmessungen über 150 mm wird ein herkömmlicher Stahl-Messschieber verwendet. Die ermittelten Werte müssen an jedem Messpunkt innerhalb der in Tabelle 5 definierten Grenzmaße liegen. Zudem sind sämtliche Messwerte auf das nächsthöhere Vielfache von 0,1 mm aufzurunden.

Prüfung des Außendurchmessers D :

Der Nenn-Außendurchmesser D_c der untersuchten PE-Mantelrohre beträgt 90 mm für Single-DN-20, 110 mm für Single-DN-32, 125 mm für Twin-DN-20 und 160 mm für Twin-DN-32. Gemäß DIN EN ISO 3126 [R17] sind für Nennweiten D_c im Bereich > 40 mm bis ≤ 600 mm sechs Einzelmessungen erforderlich, um den mittleren Außendurchmesser zu bestimmen. Die Messpunkte sind gleichmäßig über den Rohrumfang verteilt und in einem Winkelabstand von etwa 60° angeordnet.

Ergebnisse der Prüfung:

Am Polyethylen-Mantel der untersuchten Rohre sind deutliche Verformungen erkennbar. Dabei nimmt die Maßabweichung der Kunststoffmantelrohre mit steigendem Außendurchmesser zu.

3. Untersuchungen

Die Außenmantelabmessungen der Rohrstangen mit einer Nennweite von DN 20 für das Stahl-Mediumrohr bleiben innerhalb der zulässigen Toleranzen und weisen nur minimale Abweichungen auf. Ebenso erfüllt das geprüfte Kunststoffmantelrohr S-P2-DN32-4 die festgelegten Grenzmaße.

Das belastete KMR S-P1-DN32-4 zeigt hingegen geringfügige Maßabweichungen, die in einzelnen Fällen den Mindestaußendurchmesser D_{min} um 0,1 mm unterschreiten.

Bei den Twin-KMR sind stärkere Schwankungen in den Abmessungen der Probekörper festzustellen. Während beim T-P1-DN20-4 die zulässigen Mindestwerte vereinzelt um bis zu 0,3 mm unterschritten werden, weist das T-P1-DN32-4 im Vergleich zu den anderen Rohrstangen deutliche Verformungen auf, die sich auch in der Maßprüfung widerspiegeln. Die entnommenen Rohrquerschnitte zeigen Außendurchmesserunterschiede von bis zu 10 mm. Zwar bleibt das obere Grenzmaß von $D_{max} = 168$ mm eingehalten, jedoch wird der Minstdurchmesser D_{min} bei allen untersuchten Probekörpern um bis zu 4,3 mm unterschritten.

Zur kompakten Darstellung werden im Folgenden ausschließlich Probekörper aufgeführt, die die Maßprüfung nicht bestehen. Die Rohrstangen S-P1-DN20-4, N-S-P1-DN20-4, S-P2-DN20-4 sowie S-P2-DN32-4 sind in der nachfolgenden Tabelle nicht enthalten, da deren Außendurchmesser jedes Probekörpers vollständig innerhalb der zulässigen Grenzmaße liegen. Die vollständige Maßprüfungstabelle ist den digital bereitgestellten Dateien zu entnehmen.

Tabelle 6: Maßprüfung PE-Mantel Außendurchmesser [Eigene Darstellung]

Probennummer	Maße des Polyethylen-Mantel Außendurchmessers				
	Gemessen	Genormt	Prüfung des Außendurchmessers D		
N= Neu ; S= Single ; T= Twin P1= Rohr 1 ; P2= Rohr 2 DN= Nennweite Stahlrohr [mm] 4= bestellte Rohrlänge [m] L= links ; M= mitte ; R= rechts	Außendurchmesser D [mm]	Nenn-Außendurchmesser D_c [mm]	Mindestaußendurchmesser D_{min} [mm]	Maximaler Außendurchmesser D_{max} [mm]	eingehalten?
S-P1-DN32-4-L1	110,8	110	110	116	ja
	109,9				nein
	110,9				ja
	111,4				ja
	110,8				ja
	109,9				nein
	Mittelwert				110,6
S-P1-DN32-4-L2	110,1	110	110	116	ja
	111,6				ja
	111,7				ja
	110,8				ja
	109,9				nein
	110,5				ja
	Mittelwert				110,8

3. Untersuchungen

S-P1-DN32-4-L3	109,9	110	110	116	nein
	110,6				ja
	111,9				ja
	111,6				ja
	110,8				ja
	110,1				ja
Mittelwert	110,8				ja
T-P1-DN20-4-R2	125,1	125	125	132	ja
	124,7				nein
	125,0				ja
	125,5				ja
	126,4				ja
	126,0				ja
Mittelwert	125,5				ja
T-P1-DN20-4-R1	124,8	125	125	132	nein
	124,7				nein
	125,4				ja
	126,1				ja
	126,3				ja
	125,5				ja
Mittelwert	125,5				ja
T-P1-DN32-4-L1	156,9	160	160	168	nein
	162,7				ja
	166,0				ja
	165,4				ja
	163,1				ja
	159,5				nein
Mittelwert	162,3				ja
T-P1-DN32-4-L2	157,1	160	160	168	nein
	161,9				ja
	165,2				ja
	164,9				ja
	164,0				ja
	159,3				nein
Mittelwert	162,1				ja
T-P1-DN32-4-L3	157,1	160	160	168	nein
	162,0				ja
	165,0				ja
	165,1				ja
	163,1				ja
	160,2				ja
Mittelwert	162,1				ja
T-P1-DN32-4-R3	155,7	160	160	168	nein
	163,6				ja
	166,0				ja
	162,8				ja
	160,8				ja
	157,0				nein
Mittelwert	161,0				ja
T-P1-DN32-4-R2	155,8	160	160	168	nein
	163,1				ja
	165,7				ja
	165,2				ja
	162,8				ja
	158,9				nein
Mittelwert	161,9				ja
T-P1-DN32-4-R1	155,8	160	160	168	nein
	163,4				ja
	165,7				ja
	164,2				ja
	160,8				ja
	158,4				nein
Mittelwert	161,4				ja

3. Untersuchungen

Prüfung der Wanddicke e :

Zur Bestimmung der mittleren Wanddicke jedes Probekörpers sind gemäß DIN EN ISO 3126 [R17] sechs Messungen gleichmäßig über den Umfang verteilt durchzuführen. Für die Konformitätsprüfung muss jede einzelne Messung den in Tabelle 4 der DIN EN 253 [R4] festgelegten Mindestwanddicken entsprechen.

Ergebnisse der Prüfung:

Die Prüfung zeigt, dass die Mindestwanddicken aller untersuchten Querschnitte, mit Ausnahme des breitesten Querschnitts des T-P1-DN32-4, eingehalten werden. Beim Twin-DN-32-KMR wurden Unterschreitungen der Mindestwanddicke e_{min} von bis zu 0,3 mm festgestellt. In der folgenden Tabelle ist repräsentativ die Maßprüfung des T-P1-DN32-4 dargestellt.

Tabelle 7: Maßprüfung PE-Mantel Wanddicke [Eigene Darstellung]

Probennummer	Maße der Polyethylen-Mantel Wanddicke		
	Gemessen	Prüfung der Wanddicke e	
N= Neu ; S= Single ; T= Twin P1= Rohr 1 ; P2= Rohr 2 DN= Nennweite Stahlrohr [mm] 4= bestellte Rohrlänge [m] L= links ; M= mitte ; R= rechts	Wanddicke e [mm]	Mindestwanddicke e_{min} [mm]	eingehalten?
T-P1-DN32-4-L1	3,3	3,0	ja
	3,0		ja
	3,1		ja
	3,4		ja
	3,4		ja
	3,2		ja
	Mittelwert 3,2		ja
T-P1-DN32-4-L2	2,9	3,0	nein
	3,4		ja
	3,3		ja
	3,2		ja
	3,1		ja
	2,8		nein
	Mittelwert 3,1	ja	

3. Untersuchungen

T-P1-DN32-4-L3	3,0	3,0	ja
	3,3		ja
	3,5		ja
	3,3		ja
	3,0		ja
	3,1		ja
Mittelwert	3,2		ja
T-P1-DN32-4-R3	3,1	3,0	ja
	3,3		ja
	3,3		ja
	2,9		nein
	3,1		ja
	3,2		ja
Mittelwert	3,2		ja
T-P1-DN32-4-R2	3,3	3,0	ja
	3,3		ja
	3,2		ja
	2,9		nein
	2,7		nein
	3,0		ja
Mittelwert	3,1		ja
T-P1-DN32-4-R1	3,0	3,0	ja
	3,0		ja
	3,4		ja
	3,2		ja
	2,8		nein
	2,9		nein
Mittelwert	3,1		ja

3.3.2.3 Endergebnis der Maßprüfung mithilfe eines Messschiebers

Die Maßprüfung der Stahl-Mediumrohre ergibt, dass sowohl der Außendurchmesser als auch die Wanddicken aller untersuchten Proben, auch nach Biegeknickbelastung, innerhalb der zulässigen Toleranzen gemäß DIN EN 253 [R4] liegen.

Im Gegensatz dazu zeigen sich an den Abmessungen der PE-Ummantelung teils deutliche Verformungen. Während die meisten Single-Rohrstangen mit kleinerem PE-Nenn-Außendurchmesser die Grenzmaße einhalten, treten insbesondere bei den biegeknickbelasteten Twin-KMR Abweichungen auf. Mit zunehmendem Außenmanteldurchmesser nehmen auch die Maßabweichungen zu, wobei ausschließlich der Mindestaußendurchmesser unterschritten wird. Der maximale Außendurchmesser der PE-

Ummantelung bleibt stets innerhalb der zulässigen Grenzen. Bei der Prüfung der PE-Wanddicken erfüllen die meisten Proben die Vorgaben, jedoch weist das Twin-DN-32-KMR stellenweise geringe Unterschreitungen auf.

Insgesamt bestätigen die Ergebnisse die Maßhaltigkeit der Stahlrohre, während am PE-Außenmantel, insbesondere bei größeren Manteldurchmessern, teilweise unzulässige Maßabweichungen infolge des Biegeknickens auftreten.

3.3.3 Überprüfung der Koaxialitätsabweichung mittels 3D-Messverfahren

Zur Bestimmung der Exzentrizität des Stahl-Mediumrohrs im Verbund ist die Koaxialitätsabweichung gemäß DIN EN 253 [R4] zu überprüfen. Diese beschreibt den Abstand zwischen den Mittellinien des Stahl-Mediumrohrs und der PE-Ummantelung, welcher idealerweise nahezu null betragen sollte. Aufgrund produktionstechnischer Toleranzen ist eine vollständige Koaxialität nicht realisierbar. Daher sind in Tabelle 5 der DIN EN 253 [R4] die maximal zulässigen Koaxialitätsabweichungen in Abhängigkeit vom Mantelaußendurchmesser festgelegt.

Für die untersuchten Kunststoffmantelrohre mit Nenn-Außendurchmessern der Ummantelung zwischen 90 mm und 160 mm beträgt die maximal zulässige Koaxialitätsabweichung 3,0 mm.

Tabelle 8: Koaxialitätsabweichung gemäß DIN EN 253, Tab. 5 [R4, S. 16]

Nenn-Außendurchmesser der Ummantelung mm	Maximale Koaxialitätsabweichung mm
90 bis 160	3,0
180 bis 400	5,0
450 bis 630	8,0

3.3.3.1 3D-Messungen der Koaxialitätsabweichung

Zur präzisen Ermittlung der Koaxialitätsabweichung wird jeder Probekörper mithilfe der ARAMIS 3D-Kamera des Herstellers GOM mbH digital im Messsystem erfasst. Die zugehörige Software berechnet die 3D-Koordinaten und ordnet die Punkte aus den Kamerabildern eindeutig einander zu. Das System besteht aus zwei 6-Megapixel-Kameras, die jeweils auf der linken und rechten Seite positioniert sind und mithilfe des Prinzips der digitalen Bildkorrelation in der Lage sind, 3D-Koordinaten zu erfassen. Zwischen den beiden Kameras befindet sich ein Lichtprojektor, der den Erfassungsbereich der Kameras belichtet. Das gesamte System ist auf einem verstellbaren Stativ montiert [11].



Abb. 48: Aufbau Koaxialitätsmessung [Eigene Darstellung]

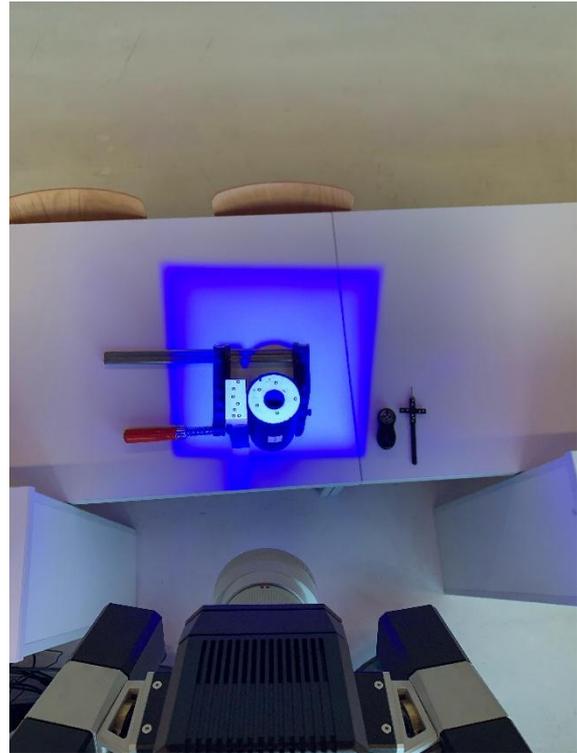


Abb. 49: Projektorbereich Koaxialitätsmessung [Eigene Darstellung]

Für die Modellierung der Rohrquerschnitte muss zunächst ein Bezugskordinatensystem im Projektorbereich aufgebaut werden, das durch spezifische Bezugspunkte definiert ist. Zusätzlich werden Messpunkte auf dem Probekörper angebracht. Es sollte ein Abstand von etwa 700 mm zwischen dem Messobjekt und der 3D-Kamera eingehalten werden, um eine optimale Modellierung zu gewährleisten. Des Weiteren muss das Messsystem vor dem Beginn der Aufnahme kalibriert werden, um die erforderliche Messgenauigkeit sicherzustellen [11].

Zur Bestimmung der Mittellinien werden der Stahlrohrinnendurchmesser sowie der PE-Außendurchmesser in der Software modelliert. Dies erfolgt durch das Abtasten mit dem GOM-Taster PM3 und einer gekoppelten Fernbedienung. Der Taster wird, wie in den Abbildungen 50 und 51 dargestellt, an einem beliebigen Punkt des PE-Außenmantels oder des Stahl-Innenrohrs positioniert, wobei gleichzeitig eine Aufnahme des Punktes durch Betätigen der Fernbedienung im Raum erfasst wird. Abhängig von der Größe des Prüfkörpers variiert die erforderliche Anzahl der abzutastenden Punkte, um eine zylinderförmige Modellierung zu ermöglichen.



Abb. 50: Abnahme der Messpunkte Stahlrohr [Eigene Darstellung]

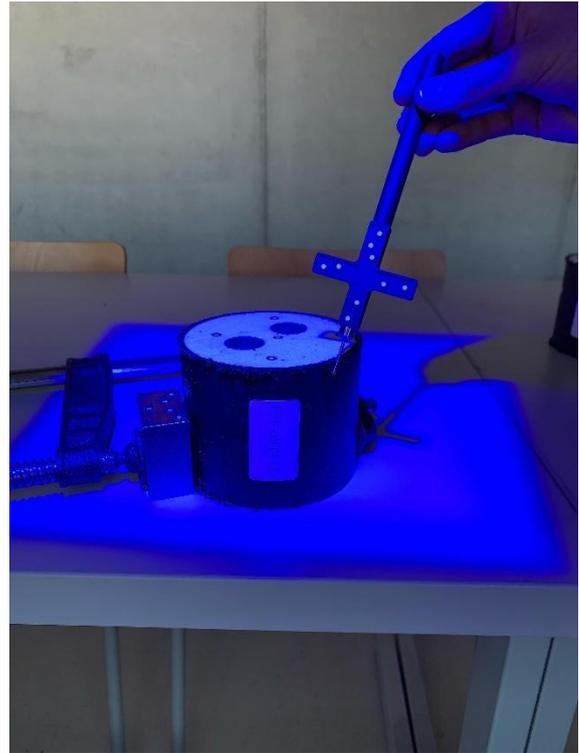


Abb. 51: Abnahme der Messpunkte PE-Ummantelung [Eigene Darstellung]

Basierend auf dem modellierten PE-Außendurchmesser und dem Stahlrohr-Innendurchmesser, können die zugehörigen Mittellinien innerhalb der Software präzise bestimmt werden. Zur Berechnung des Abstands zwischen den Mittellinien wird zunächst der Ursprungspunkt jeder Mittellinie generiert, der in den Abbildungen als Mittelpunkt gekennzeichnet ist.

Für Single-KMR-Probekörper wird der Koaxialitätsabstand zwischen den Mittellinien des Stahl-Mediumrohrs und der PE-Ummantelung über die Mittelpunkte konstruiert und berechnet. Da beim vorherigen Abtasten der Messpunkte Höhenabweichungen im Koordinatensystem auftreten können, wird die Koaxialitätsabweichung ausschließlich in der X-Y-Ebene berechnet.

Bei Twin-KMR-Probekörpern wird zunächst der Mittelpunkt zwischen den beiden Stahlrohr-Mittelpunkten bestimmt. Anschließend erfolgt die Berechnung der Koaxialitätsabweichung zwischen diesem Mittelpunkt und dem Mittelpunkt der PE-Ummantelung in der X-Y-Ebene.

3. Untersuchungen

Jeder Probekörper wird auf Koaxialität untersucht und die Ergebnisse werden durch eine Bildaufnahme der ARAMIS 3D-Kamera dokumentiert. Sämtliche Aufnahmen werden digital zur Verfügung gestellt. Nachfolgend wird für jede Rohrstange repräsentativ die Modellierung des Probekörpers mit der größten koaxialen Abweichung dargestellt.

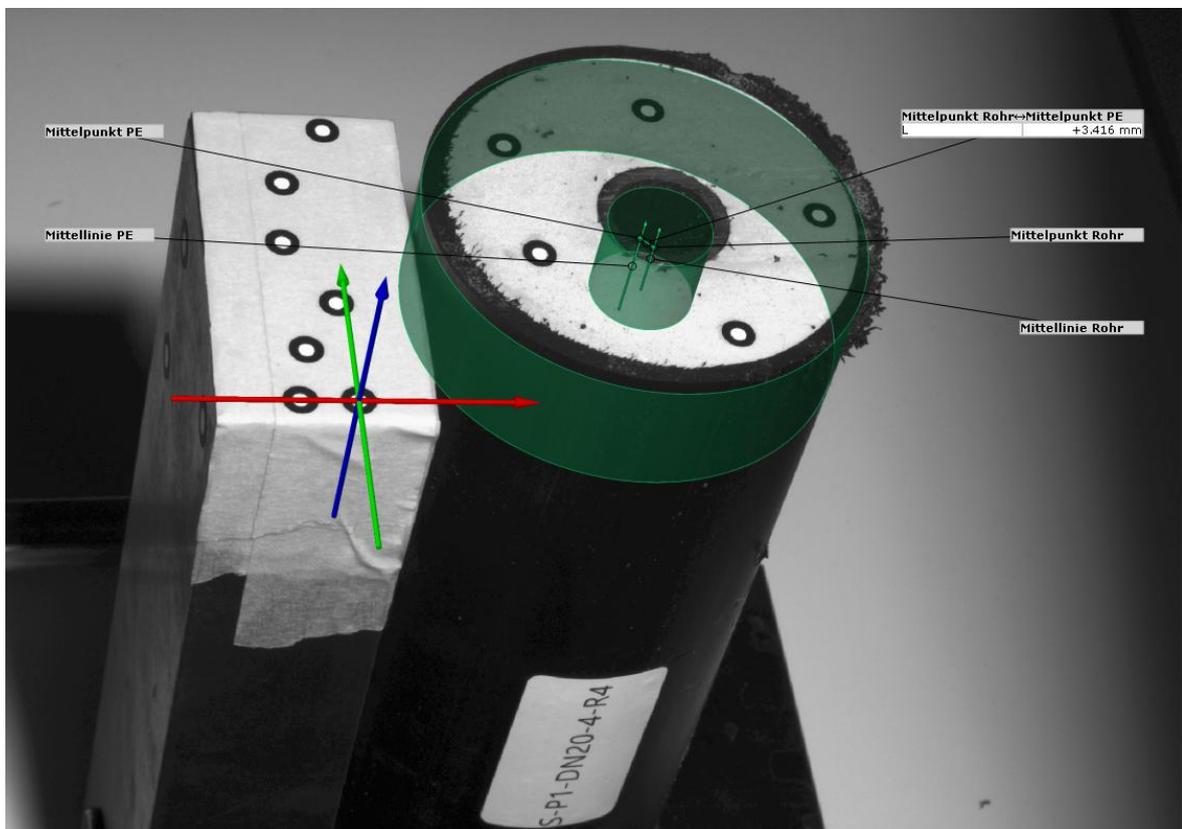


Abb. 52: Koaxialitätsabweichung S-P1-DN20-4-R4 [Eigene Darstellung]

3. Untersuchungen

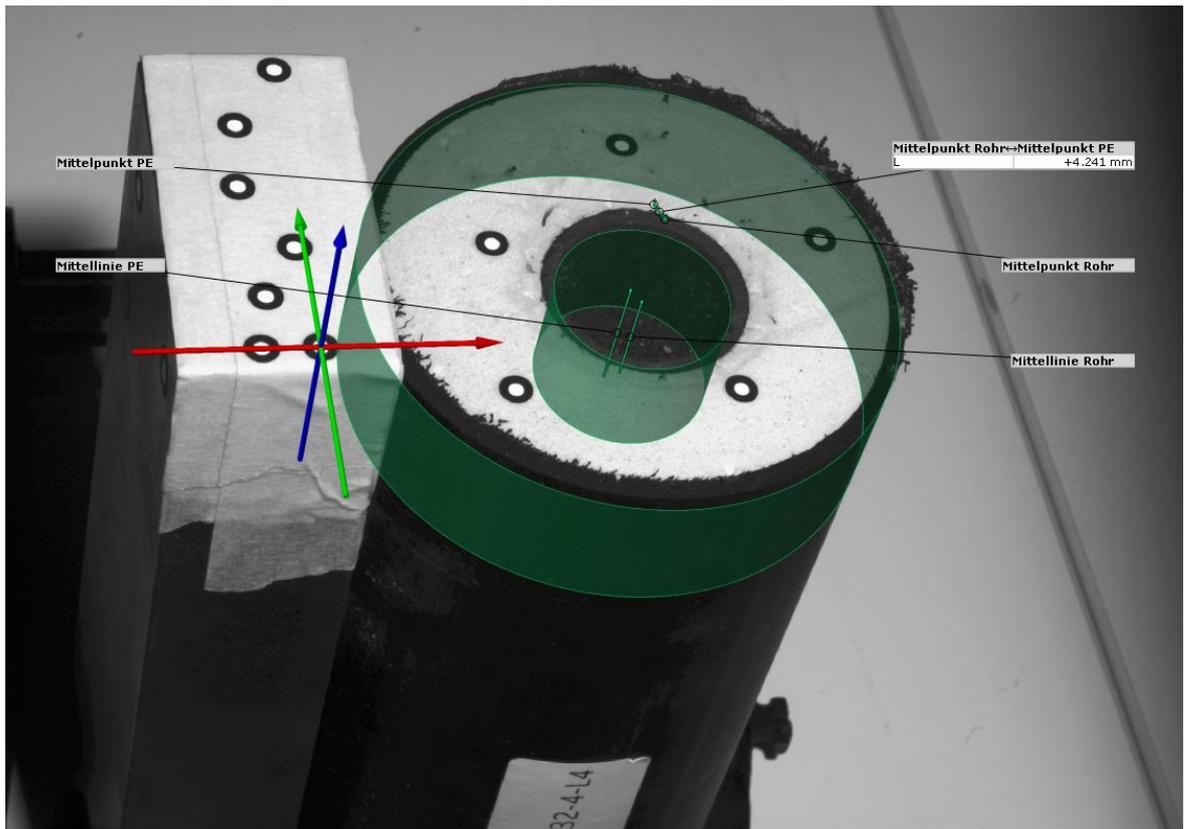


Abb. 53: Koaxialitätsabweichung S-P1-DN32-4-L4 [Eigene Darstellung]

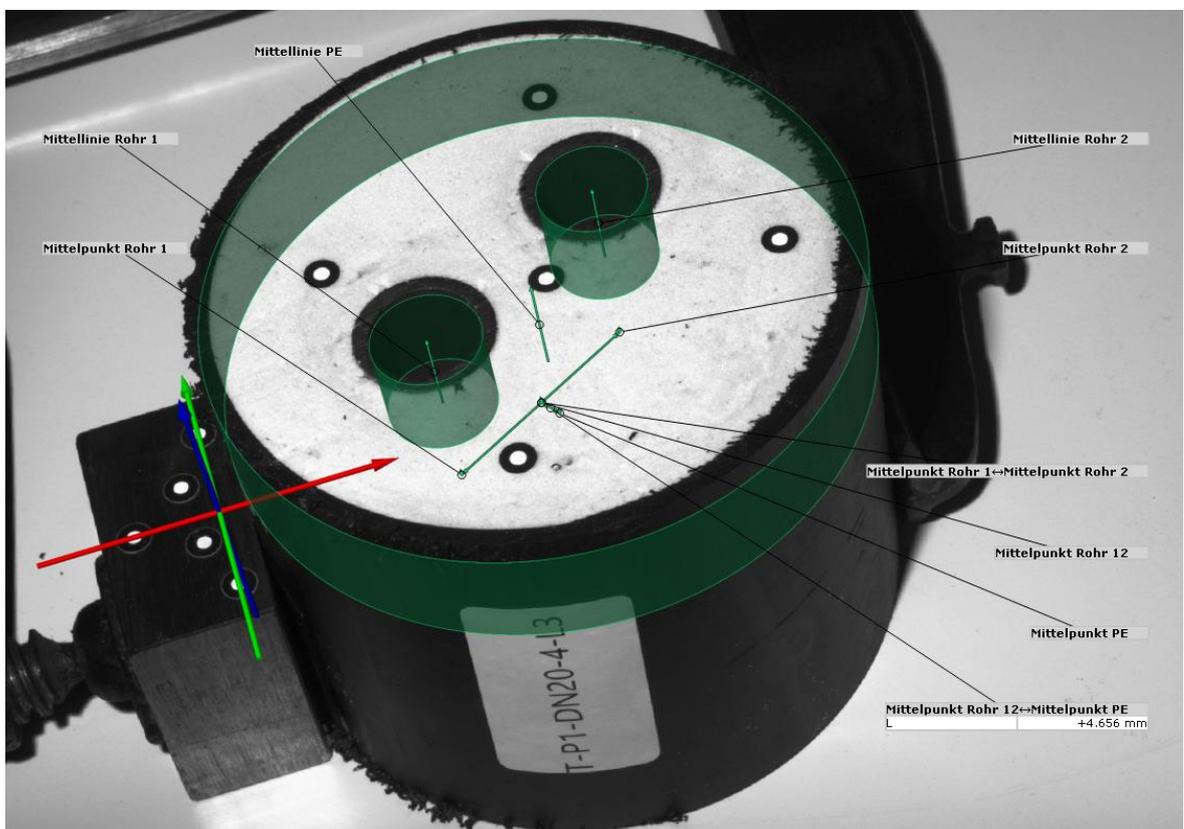


Abb. 54: Koaxialitätsabweichung T-P1-DN20-4-L3 [Eigene Darstellung]

3. Untersuchungen

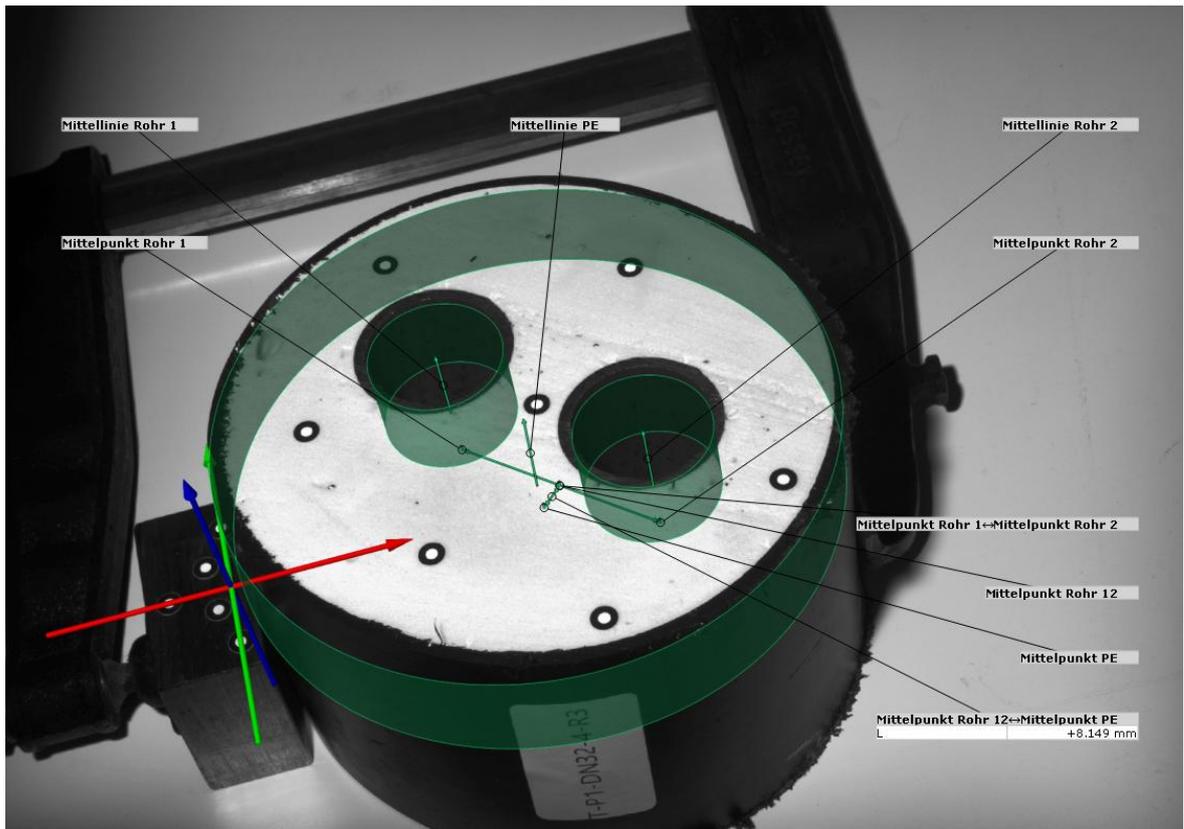


Abb. 55: Koaxialitätsabweichung T-P1-DN32-4-R3 [Eigene Darstellung]

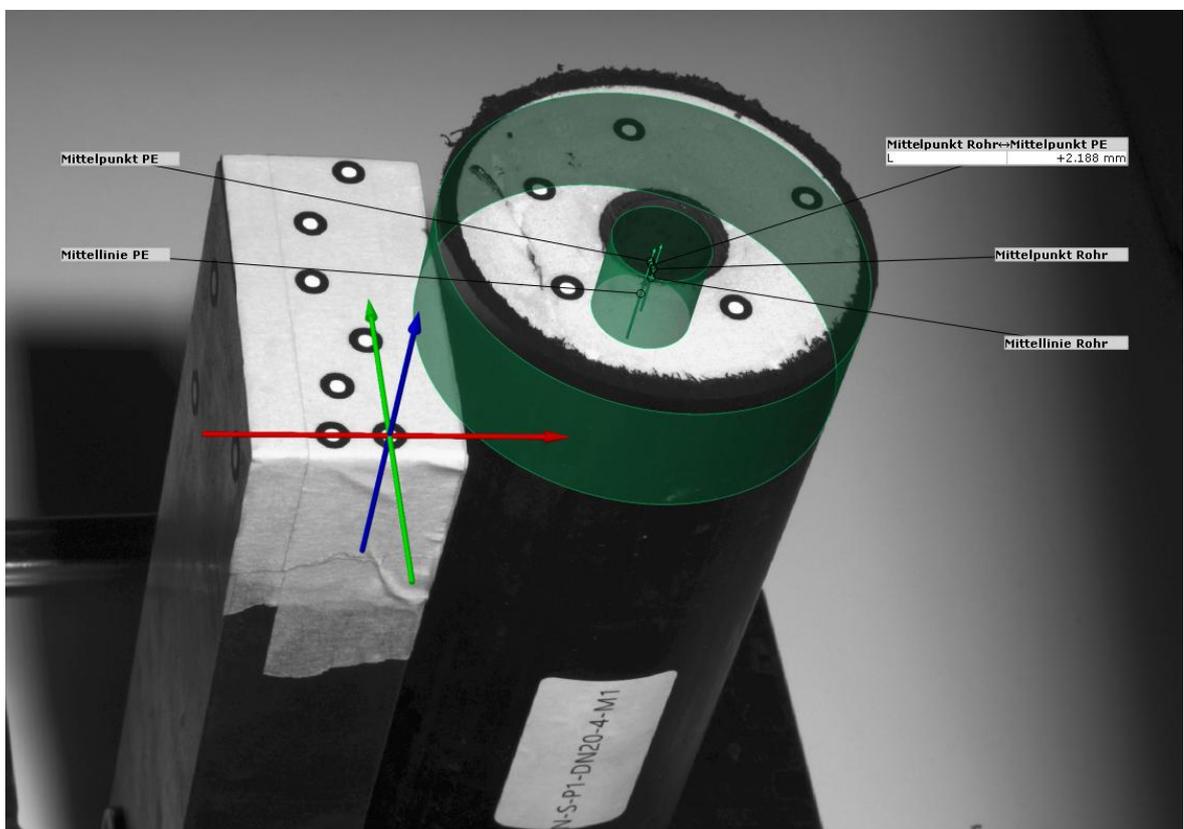


Abb. 56: Koaxialitätsabweichung N-S-P1-DN20-4-M1 [Eigene Darstellung]

3. Untersuchungen

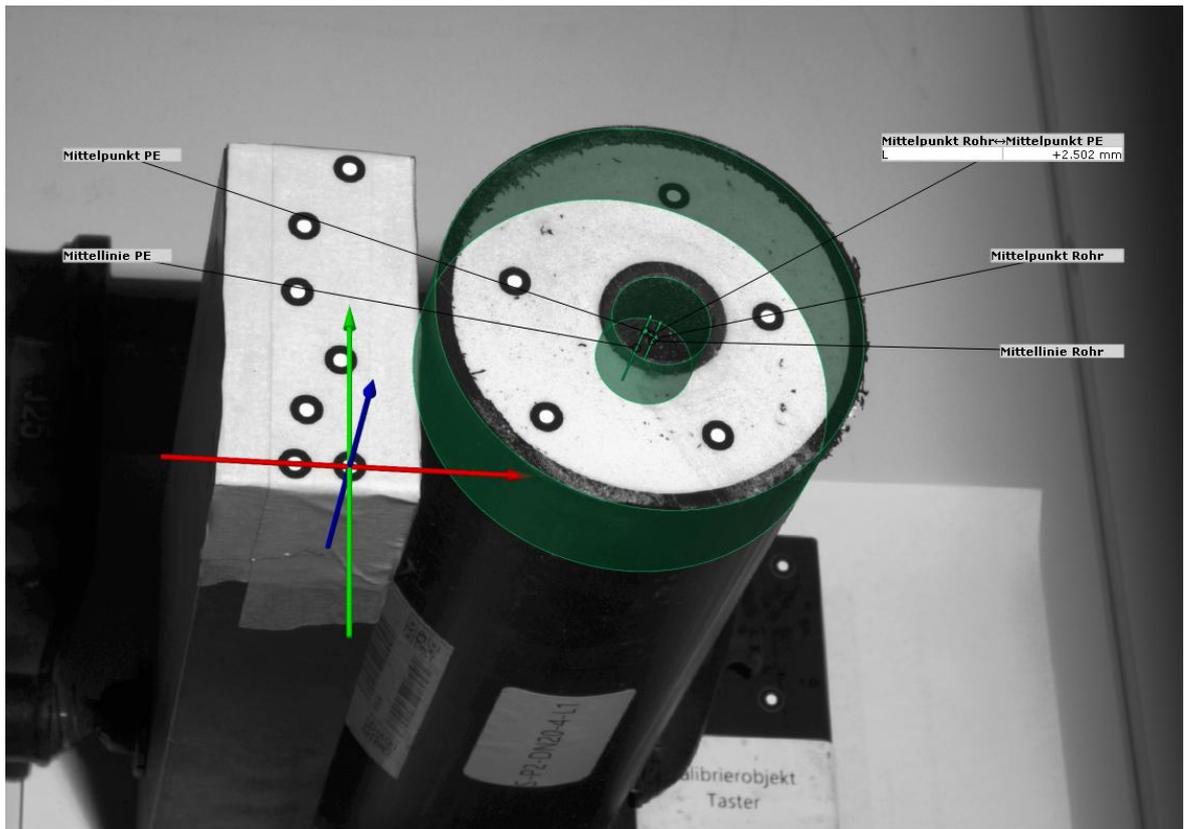


Abb. 57: Koaxialitätsabweichung S-P2-DN20-4-L1 [Eigene Darstellung]

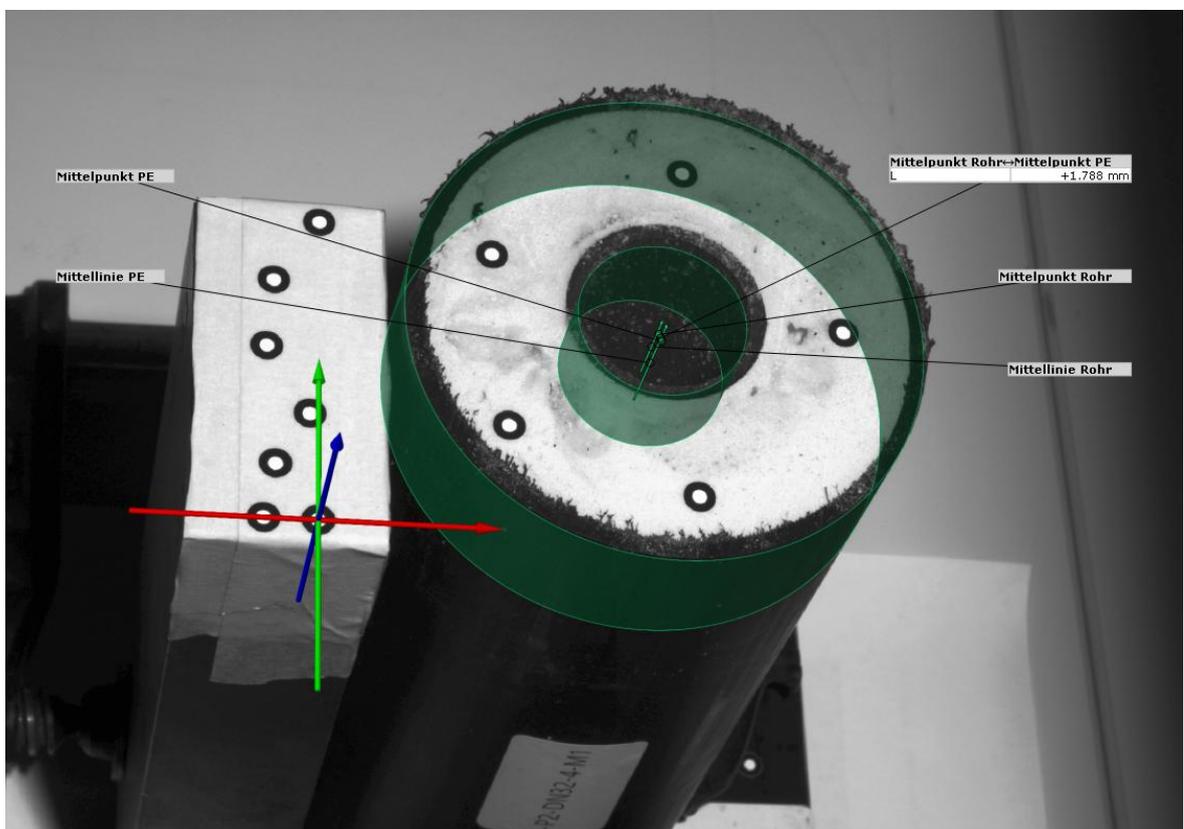


Abb. 58: Koaxialitätsabweichung S-P2-DN32-4-M1 [Eigene Darstellung]

3.3.3.2 Endergebnis der Koaxialitätsmessungen

Im ersten Teil der Analyse liefert die messtechnische Untersuchung der Koaxialitätsabweichungen die aussagekräftigsten Ergebnisse. Es zeigt sich, dass die Koaxialitätsabweichungen mit zunehmendem Außendurchmesser des KMRs innerhalb der gewählten Nennweiten tendenziell größer werden. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass bereits werkseitige Abweichungen der Koaxialität vorliegen können, wie die Messdaten des neuen KMR-Endstücks N-S-P1-DN20 bestätigen. Des Weiteren verstärken Verschiebungen des Stahl-Mediumrohrs sowie Deformationen des Verbunds infolge des Biegeknickens die werkseitigen Koaxialitätsabweichungen.

Vereinzelte Probekörper des Typs S-P1-DN20-4 zeigen geringe Überschreitungen der zulässigen Koaxialitätsabweichungen. Beim größeren Querschnitt des Typs S-P1-DN32-4 sind hingegen deutlichere Abweichungen feststellbar, die teils den zulässigen Grenzwert von 3,0 mm überschreiten. Besonders ausgeprägte Verformungen treten bei den Twin-Rohrstangen auf, wobei die größere Doppelrohr-Ausführung des Typs T-P1-DN32-4 noch stärkere Abweichungen von den normativen Vorgaben aufweist.

Auffällig ist zudem, dass die Koaxialitätsabweichungen der Probekörper auf einer Seite stets etwas höher ausfallen als auf der gegenüberliegenden. Bei den Knickversuchen ist keine explizite Definition von links und rechts vorgenommen worden. Es lässt sich kein Bezug zur Ausrichtung der Proben im Versuchsaufbau der Masterarbeit herstellen.

Nachfolgend sind die Messwerte der Koaxialitätsabweichungen für jeden Prüfkörper tabellarisch dargestellt. Die Messwerte sind analog zu den 3D-Bildaufnahmen auf die dritte Nachkommastelle angegeben, um einen direkten Bezug zu gewährleisten. Dabei ist zu beachten, dass das Messsystem eine durchschnittliche Genauigkeit von 0,0225 mm für die Stahlinnenrohre und 0,1720 mm für den PE-Außenmantel erreicht, wobei die Abweichungen mit zunehmendem Durchmesser steigen. Die Genauigkeitswerte jeder einzelnen Koaxialitätsmessung sind den digital bereitgestellten Dateien zu entnehmen.

3. Untersuchungen

Tabelle 9: Maßprüfung der Koaxialitätsabweichung [Eigene Darstellung]

Probennummer	Maße der Koaxialitätsabweichung		
	Gemessen	Prüfung der Koaxialität	
	Gemessene Koaxialitätsabweichung [mm]	maximal zulässige Koaxialitätsabweichung [mm]	eingehalten?
N= Neu ; S= Single ; T= Twin P1= Rohr 1 ; P2= Rohr 2 DN= Nennweite Stahlrohr [mm] 4= bestellte Rohrlänge [m] L= links ; M= mitte ; R= rechts			
S-P1-DN20-4-L1	1,112	3,0	ja
S-P1-DN20-4-L2	1,180	3,0	ja
S-P1-DN20-4-L3	1,115	3,0	ja
S-P1-DN20-4-L4	1,606	3,0	ja
S-P1-DN20-4-M1	1,292	3,0	ja
S-P1-DN20-4-R4	3,416	3,0	nein
S-P1-DN20-4-R3	3,205	3,0	nein
S-P1-DN20-4-R2	2,436	3,0	ja
S-P1-DN20-4-R1	1,296	3,0	ja
S-P1-DN32-4-L1	2,127	3,0	ja
S-P1-DN32-4-L2	2,725	3,0	ja
S-P1-DN32-4-L3	4,235	3,0	nein
S-P1-DN32-4-L4	4,241	3,0	nein
S-P1-DN32-4-M1	1,411	3,0	ja
S-P1-DN32-4-R4	1,032	3,0	ja
S-P1-DN32-4-R3	1,249	3,0	ja
S-P1-DN32-4-R2	1,136	3,0	ja
S-P1-DN32-4-R1	1,643	3,0	ja
T-P1-DN20-4-L1	3,669	3,0	nein
T-P1-DN20-4-L2	4,320	3,0	nein
T-P1-DN20-4-L3	4,656	3,0	nein
T-P1-DN20-4-R3	1,159	3,0	ja
T-P1-DN20-4-R2	1,343	3,0	ja
T-P1-DN20-4-R1	1,377	3,0	ja
T-P1-DN32-4-L1	4,605	3,0	nein
T-P1-DN32-4-L2	4,764	3,0	nein
T-P1-DN32-4-L3	2,890	3,0	ja
T-P1-DN32-4-R3	8,149	3,0	nein
T-P1-DN32-4-R2	6,987	3,0	nein
T-P1-DN32-4-R1	7,187	3,0	nein
N-S-P1-DN20-4-L1	2,018	3,0	ja
N-S-P1-DN20-4-M1	2,188	3,0	ja
N-S-P1-DN20-4-R1	1,345	3,0	ja
S-P2-DN20-4-L1	2,502	3,0	ja
S-P2-DN20-4-M1	2,041	3,0	ja
S-P2-DN20-4-R1	0,306	3,0	ja
S-P2-DN32-4-L1	0,992	3,0	ja
S-P2-DN32-4-M1	1,788	3,0	ja
S-P2-DN32-4-R1	1,518	3,0	ja

3.3.4 Zusammenfassung der visuellen und messtechnischen Ergebnisse

Die visuelle Untersuchung der Probekörper zeigt zunächst keine weitreichenden Ergebnisse, jedoch sind stellenweise Inhomogenitäten im PUR-Schaum erkennbar, die überwiegend produktionsbedingt sind. Darüber hinaus lässt sich bereits visuell erkennen, dass das Stahl-Mediumrohr teilweise von der Koaxialität zur PE-Ummantelung abweicht und die Querschnitte der Twin-KMR nicht mehr die typische Kreisform aufweisen.

Die weiterführenden Maßprüfungen machen deutlich, dass mit zunehmendem Außendurchmesser des KMRs die Abweichungen von den genormten Grenzwerten größer werden. Besonders auffällig ist die Verformung des PE-Außenmantels, wobei die Twin-Rohrquerschnitte eine Verkürzung des Durchmessers in senkrechter Richtung zur Mittelachse der Doppelrohre aufweisen. Im Hinblick auf die Stahl-Mediumrohre führen die axialen Belastungen zu keiner feststellbaren Veränderung der Abmessungen.

Im Einklang mit den Maßprüfungen mittels Messschieber lässt sich in der Untersuchung der Koaxialitätsabweichungen feststellen, dass die KMR mit zunehmendem Außenmanteldurchmesser größere Abweichungen von den festgelegten Grenzwerten aufweisen. Die Koaxialitätsprüfung mittels des 3D-Messsystems liefert aufschlussreiche Ergebnisse, die sowohl werkseitige Koaxialitätsabweichungen veranschaulichen als auch eine Zunahme dieser Abweichungen infolge der Durchbiegung aufzeigen.

Es fällt auf, dass bei der Maßprüfung sowie der Koaxialitätsprüfung in der Regel eine Seite des Rohrs stärker abweicht als die gegenüberliegende. Ein Vergleich der Messergebnisse der Abmessungen (PE- und Stahl-Außendurchmesser sowie Wanddicken) mit denen der Koaxialität zeigt keine konsistente Übereinstimmung oder Abhängigkeit in Bezug auf die jeweilige Rohrseite.

Zusammenfassend liefert der erste Teil der Untersuchungen differenzierte Erkenntnisse zum Materialverhalten von KMR im Zusammenhang mit Biegeknicken, die teils signifikante Verzerrungen der Rohrquerschnitte zur Folge haben. Ein eindeutiger Zusammenhang zwischen den Abmessungen und den Koaxialitätsabweichungen lässt sich nicht feststellen, was auf die komplexen Wechselwirkungen der verschiedenen Faktoren innerhalb einer Sandwich-Konstruktion des KMRs hinweist.

3.4 Scherfestigkeitsprüfung der Probekörper nach DIN EN 253

Im zweiten Abschnitt der Untersuchung wird die Scherfestigkeit geknickter Kunststoffmantelrohre gemäß DIN EN 253 [R4] unter Verwendung einer elektromechanischen Universalprüfmaschine im Labor der HafenCity Universität Hamburg bestimmt. Parallel dazu erfolgt die Erfassung der Relativverschiebung des Mediumrohrs im Bezug zum Verbund mittels des 3D-Messsystems, welches auch für die Knickversuche verwendet wurde. Ergänzend werden die ermittelten Scherspannungen der Schubverzerrung gegenübergestellt, welche aus dem Verhältnis des Scherwegs zur Dämmdicke abgeleitet wird.

3.4.1 Rahmenbedingungen der Scherfestigkeitsprüfung nach DIN EN 253

Die Probenentnahme aus den Rohrlängen erfolgt unter Berücksichtigung der Vorgaben gemäß DIN EN 253 [R4] und ist in Kapitel 3.2 dokumentiert. Das Prüfergebnis der Scherfestigkeit wird als Mittelwert aus drei Einzelmessungen bestimmt, sodass pro Single-KMR drei entnommene Probekörper vorliegen. Zur Prüfung wird auf das Stahl-Mediumrohr eine axiale Kraft mit einer Vorschubgeschwindigkeit von $v = 5 \text{ mm/min}$ aufgebracht, wobei die aufgezeichnete axiale Kraft kontinuierlich erfasst wird. Der Probekörper wird auf einem speziell angefertigten Führungsring aus Aluminium gelagert, während die Lagerung ausschließlich auf der PE-Ummantelung erfolgt. Ein Auszug der Prüfanordnung zur Bestimmung der axialen Scherfestigkeit gemäß DIN EN 253 [R4] ist auf der nächsten Seite in Abbildung 59 dargestellt.

3.4.1.1 Berechnung der Scherfestigkeit von KMR

Für die Berechnung der axialen Scherfestigkeit ist es erforderlich, die Länge des Probekörpers im Verbund sowie den Außendurchmesser des Stahl-Mediumrohrs zu bestimmen. Da sich die Rohrachse während der Prüfung in vertikaler Lage befindet, muss das Eigengewicht des Stahl-Mediumrohrs zur aufgebrachten axialen Kraft addiert und in der Berechnung der Scherfestigkeit berücksichtigt werden. Die Berechnung der axialen Scherfestigkeit erfolgt nach folgender Gleichung:

$$\tau_{ax} = \frac{F_{ax}}{L \times D_s \times \pi}$$

Dabei ist:

τ_{ax} die axiale Scherfestigkeit, in MPa;

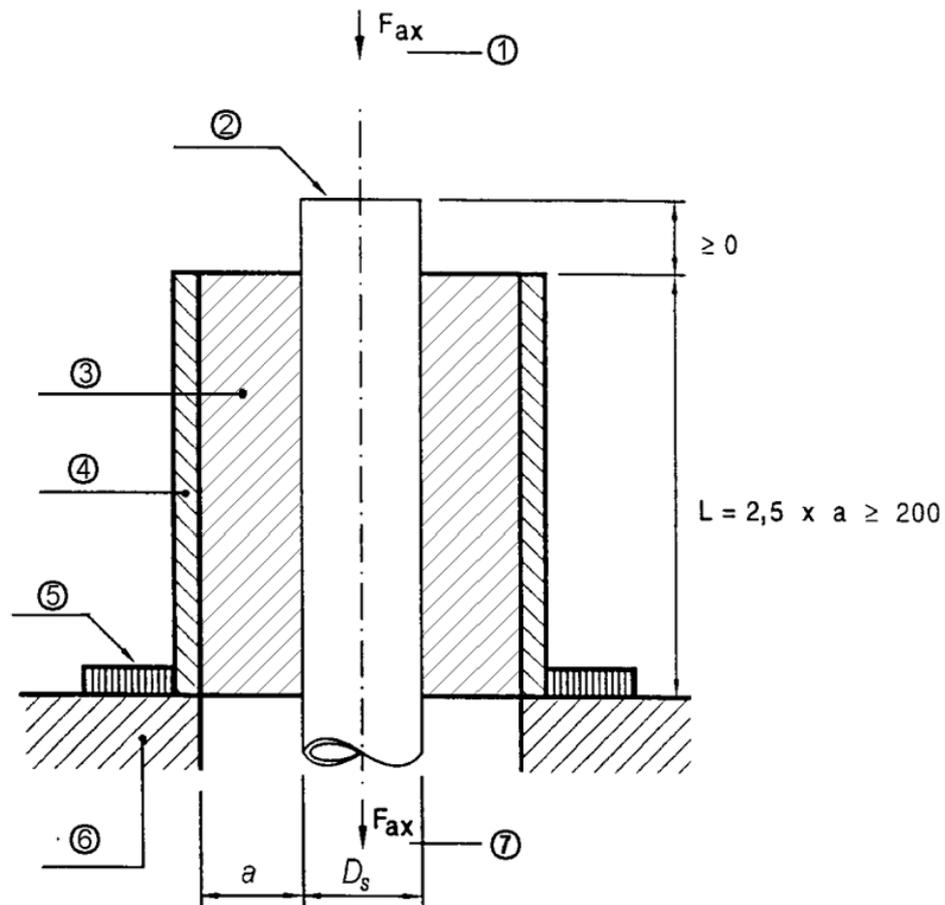
3. Untersuchungen

F_{ax} die axiale Kraft inkl. des Eigengewichts des Stahl-Mediumrohrs, in N;

L die Länge des Probekörpers im Verbund, in mm;

D_s der Außendurchmesser des Stahl-Mediumrohrs, in mm.

Maße in Millimeter



Legende

1 aufgebrachte Axialkraft

2 Stahl-Mediumrohr

3 Wärmedämmung aus PUR-Schaumstoff

4 Ummantelung

5 Führungsring

6 Grundplatte der Prüfmaschine

7 alternativ aufgebrachte Axialkraft

Abb. 59: Prüfanordnung Scherfestigkeit gemäß DIN EN 253, Bild 2 [R4, S. 25]

3.4.1.2 Mindestanforderung der Scherfestigkeit von KMR

Die Scherfestigkeit der untersuchten Probekörper bei Raumtemperatur muss gemäß DIN EN 253 [R4], Tabelle 6 mindestens $\tau_{ax} = 0,12$ MPa erfüllen.

Tabelle 10: Mindestscherfestigkeit gemäß DIN EN 253, Tab. 6 [R4, S. 17]

Prüftemperatur °C	Prüfabschnitt	τ_{ax} min. MPa	
		im nicht gealterten Zustand	im gealterten Zustand
23 ± 2	5.4.1.4	0,12	45 % des (tatsächlichen) Anfangswerts und 0,12
140 ± 2	5.4.1.5	0,08	0,08

3.4.2 Prüfungsablauf im Labor der HafenCity Universität Hamburg

Die vorgefertigten Probekörper werden mit GOM-Referenzpunkten versehen, um die Relativverschiebung zwischen dem Stahl-Mediumrohr und der PE-Ummantelung während des Prüfvorgangs präzise zu erfassen. Hierzu werden drei Messmarken in vertikaler Anordnung am Stahlrohr angebracht, die den Verschiebeweg des Mediumrohrs dokumentieren. Ergänzend werden umliegende Messmarken positioniert, um eine eindeutige 3D-Berechnung zu erhalten.

Dazu werden in derselben vertikalen Ausrichtung Messmarken auf die PE-Ummantelung aufgebracht. Die verwendete Software kann daraufhin den Relativverschiebungsabstand zwischen dem Stahl-Mediumrohr und dem Außenmantel des Verbunds ermitteln. Zusätzlich werden am unteren Bereich der PE-Ummantelung weitere Messmarken angebracht, um eine potenzielle Deformation der Ummantelung, beispielsweise durch Ausbeulen, zu identifizieren. Die exakte Länge sowie die Dämmdicke der Probekörper im Verbund werden vorab mithilfe eines Messschiebers durch jeweils drei Einzelmessungen bestimmt, wobei der arithmetische Mittelwert berechnet wird.

Nachfolgend ist exemplarisch ein Foto eines zur Prüfung vorbereiteten Probekörpers dargestellt. Jeder Probekörper wurde auf diese Weise dokumentiert und in den digital bereitgestellten Dateien hinterlegt.



Abb. 60: Probekörper mit Messmarken zur Scherfestigkeitsprüfung [Eigene Darstellung]

Die Übertragung der axialen Kraft erfolgt mittels der Universalprüfmaschine über eine Druckplatte und einer zwischengeschalteten Kraftmessdose, die den gesamten Kraftverlauf der Prüfung präzise dokumentiert. Der Probekörper wird durch einen Führungsring auf der PE-Ummantelung gelagert.

Die Krafteinleitung beginnt, sobald die Prüfmaschine durch ihre Verschiebung Kontakt mit dem Stahl-Mediumrohr herstellt. Um einen abrupten Kontakt der Druckplatte mit dem Stahl-Mediumrohr zu vermeiden, wird die Annäherung mit einer reduzierten Prüfgeschwindigkeit von $v = 1 \text{ mm/min}$ durchgeführt, bis eine vorgegebene Vorkraft von $F_0 = 100 \text{ N}$ erreicht ist. Überschreitet die aufgezeichnete Axialkraft diesen Wert, wird die Prüfgeschwindigkeit gemäß DIN EN 253 [R4] auf $v = 5 \text{ mm/min}$ erhöht und konstant gehalten.

Die Schubbewegung der Universalprüfmaschine wird so lange fortgesetzt, bis es zum Versagen des Verbunds zwischen dem Stahl-Mediumrohr und dem PUR-Hartschaum kommt.

Folgend sind einige Eindrücke vom Aufbau der Scherfestigkeitsprüfung dargestellt.



Abb. 61: Nahaufnahme der Prüfanzordnung [Eigene Darstellung]

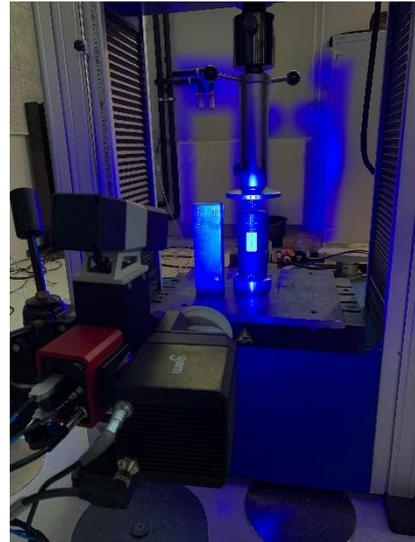


Abb. 62: Aufzeichnung mittels 3D-Kamera [Eigene Darstellung]

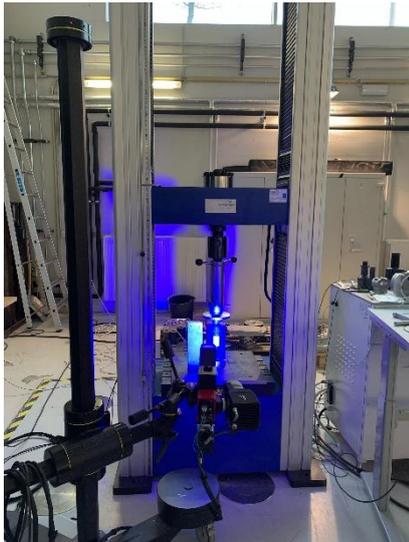


Abb. 63: Versuchsaufbau im Labor der HCU [Eigene Darstellung]



Abb. 64: Erfassung der Messdaten [Eigene Darstellung]

3.4.3 Ergänzende Maßbestimmungen zur Scherfestigkeitsprüfung

Im ersten Teil der Untersuchungen wurden bereits die Maße der Außendurchmesser und Wandstärken bestimmt. Zur Bestimmung der axialen Scherfestigkeit sowie der damit verbundenen Schubverzerrung sind zusätzliche geometrische Messungen an den Probekörpern erforderlich. Darüber hinaus ist auch das Eigengewicht des Stahl-Mediumrohrs aufgrund der vertikalen Lagerung zu berechnen.

3. Untersuchungen

Die Stahlsorte des Mediumrohrs ist P235GH, welche bei einer Temperatur von 20 °C eine Dichte von $\rho_s = 7,85 \text{ g/cm}^3$ aufweist [12]. Das Eigengewicht berechnet sich nach:

$$m = \left(\frac{\pi \times D_s^2}{4} - \frac{\pi \times (D_s - 2 \times t)^2}{4} \right) \times L_s \times \rho_s$$

Dabei ist:

- m die Masse des Stahl-Mediumrohrs, in g;
- D_s der Außendurchmesser des Stahl-Mediumrohrs, in cm;
- t die mittlere Wandstärke des Stahl-Mediumrohrs, in cm;
- L_s die Länge des Stahl-Mediumrohrs, in cm;
- ρ_s die Dichte des Stahl-Mediumrohrs bei 20°C Temperatur

Um das Eigengewicht in Gramm, in die durch die Prüfmaschine ausgeübte Axialkraft, in Newton einzubeziehen, wird die Masse des Stahl-Mediumrohrs unter Berücksichtigung der Erdbeschleunigung in die Gewichtskraft F_G umgerechnet. Der Umrechnungsfaktor von Gramm in Newton beträgt 0,00981 N/g und wird in den Auswertungstabellen zur Scherfestigkeit verwendet.

Die berechneten Scherspannungen werden anschließend der Schubverzerrung γ gegenübergestellt, um das Materialverhalten des PUR-Schaums im kraftschlüssigen Verbund zu veranschaulichen. Auf dieser Grundlage werden die Diagrammkurven in Kapitel 3.4.5 ermittelt. Die Schubverzerrung ergibt sich nach folgender Gleichung:

$$\gamma = \frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \approx \frac{\partial u_x}{\partial y} + 0 = \frac{u_x}{a}$$

Dabei ist:

- γ die Schubverzerrung, dimensionslos;
- ∂u_x die Verschiebung in x-Richtung;
- ∂u_y die Verschiebung in y-Richtung;
- $\frac{\partial u_x}{\partial y}$ die Änderung der Verschiebung in x-Richtung senkrecht zur y-Achse;
- $\frac{\partial u_y}{\partial x}$ die Änderung der Verschiebung in y-Richtung senkrecht zur x-Achse;
- u_x der Scherweg in axialer Richtung des Probekörpers, in mm;
- a die Dämmdicke des PUR-Hartschaums, in mm.

3. Untersuchungen

Alle zusätzlich relevanten Daten zur Auswertung der Scherfestigkeit und Schubverzerrung sind in der nachstehenden Tabelle zusammengefasst. Zur präzisen Bestimmung der Länge und Wanddicke der Probekörper werden jeweils drei Einzelmessungen in einem Abstand von etwa 120° durchgeführt und das arithmetische Mittel berechnet. Die detaillierten Einzelmesswerte sowie die Berechnung des Eigengewichts sind in den digital bereitgestellten Dateien enthalten.

Tabelle 11: Ergänzende Maße zur Scherfestigkeitsprüfung [Eigene Darstellung]

Probennummer	Ergänzende Maße der Probekörper		
	Gemessen		Berechnet
N= Neu ; S= Single ; T= Twin P1= Rohr 1 ; P2= Rohr 2 DN= Nennweite Stahlrohr [mm] 4= bestellte Rohrlänge [m] L= links ; M= mitte ; R= rechts	Dämmdicke des PUR a [mm]	Länge des Verbunds L [mm]	Gewicht des Mediumrohrs m [g]
S-P1-DN20-4-L4	28,9	203	458
S-P1-DN20-4-M1	28,5	204	455
S-P1-DN20-4-R4	28,6	205	454
S-P1-DN32-4-L4	31,4	204	764
S-P1-DN32-4-M1	31,5	204	762
S-P1-DN32-4-R4	31,2	203	769
N-S-P1-DN20-4-L1	28,3	204	454
N-S-P1-DN20-4-M1	28,5	203	445
N-S-P1-DN20-4-R1	28,4	204	453
S-P2-DN20-4-L1	28,4	204	436
S-P2-DN20-4-M1	28,3	204	442
S-P2-DN20-4-R1	28,4	204	446
S-P2-DN32-4-L1	31,1	204	749
S-P2-DN32-4-M1	31,3	203	758
S-P2-DN32-4-R1	31,2	203	758

3.4.4 Aufgetretene Probleme bei der Scherfestigkeitsprüfung

Im ersten Scherversuch (S-P1-DN20-4-L4) kommt eine Kraftmessdose mit einer maximalen Nennkraft von 10 kN zum Einsatz. Da der Probekörper dieser axialen Belastung standhält und kein Versagen des Verbunds auftritt, kann der Versuch nicht vollständig abgeschlossen werden. Der Auswertung zufolge wird die Mindestscherfestigkeit überschritten, sodass der Prüfkörper als bestanden gilt.

Für den zweiten Scherversuch (S-P1-DN20-4-M1) wird eine Kraftmessdose mit einer Nennkraft von 200 kN verwendet, wodurch der Versuch bis zum Versagen des Verbunds zwischen Mediumrohr und PUR durchgeführt wird. Beim Überschreiten der Vorkraft von $F_0 = 100 \text{ N}$ erfolgt kein Wechsel auf die höhere Prüfgeschwindigkeit von $v = 5 \text{ mm/min}$, sodass der gesamte Verschiebungsweg mit einer konstanten Geschwindigkeit von $v = 1 \text{ mm/min}$ verläuft. Dies hat keine signifikanten Auswirkungen auf die Prüfergebnisse, da der Verbund zwischen PUR und Stahlrohr lediglich mehr Zeit zur Verformung hat.

Alle weiteren Scherfestigkeitsversuche verlaufen ohne Komplikationen.

3.4.5 Ergebnisse der Scherfestigkeitsprüfung nach DIN EN 253

Die axiale Scherspannung τ_{ax} wird in Abhängigkeit der Schubverzerrung γ in Form von Diagrammkurven dargestellt. Anhand der maximalen Scherfestigkeit τ_{ax} der drei Probekörper eines KMRs wird überprüft, ob die Mindestscherfestigkeit von $\tau_{ax} = 0,12 \text{ MPa}$ eingehalten wird.

Der Versuch wird unter Verwendung des optischen 3D-Messsystems mit einer Frequenz von 5 Hz aufgezeichnet. Für jeden getesteten Probekörper werden Aufnahmen zum Zeitpunkt der maximal aufnehmbaren Axialkraft, kurz vor dem Versagen des Verbunds zwischen Mediumrohr und PUR, angefertigt. Die Bildaufnahmen zeigen die Relativverschiebung in Millimetern zum Zeitpunkt der maximalen Axialkraft.

Ergänzend sind die Richtungsverschiebungen der jeweiligen Messpunkte zum Zeitpunkt der Aufnahme durch Vektorpfeile visualisiert. Die oberen Messpunkte am Außenmantel verdeutlichen, dass die Einwirkung auf das Stahl-Mediumrohr zu einer Stauchung des gesamten Verbundsystems führt. Im unteren Bereich des Außenmantels sind Messmarken angebracht, um potenzielle Ausbeulungen zu erfassen. Im Folgenden werden die Bildaufnahmen und Scherfestigkeitsdiagramme der untersuchten Kunststoffmantelrohre dargestellt. Die Scherfestigkeitskurven zeigen den Verlauf bis zum endgültigen Bruch des Verbunds. Für jedes KMR werden drei Probekörper analysiert.

3. Untersuchungen

S-P1-DN20-4:

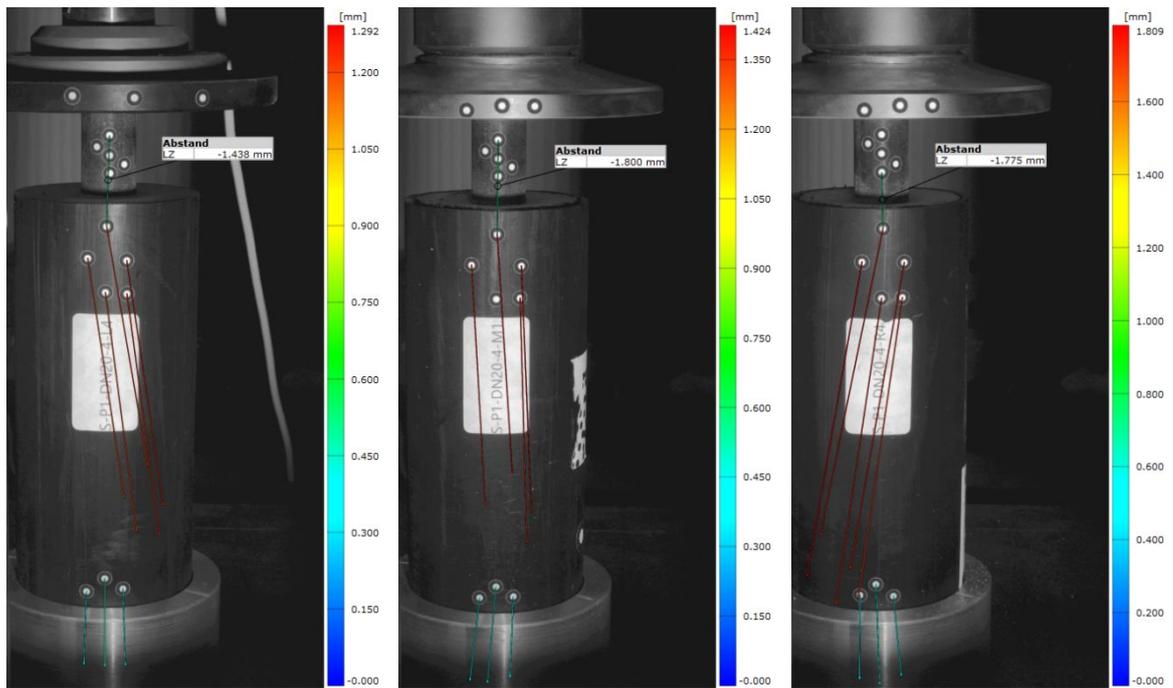


Abb. 65: S-P1-DN20-4-L4 [Eigene Darstellung]

Abb. 66: S-P1-DN20-4-M1 [Eigene Darstellung]

Abb. 67: S-P1-DN20-4-R4 [Eigene Darstellung]

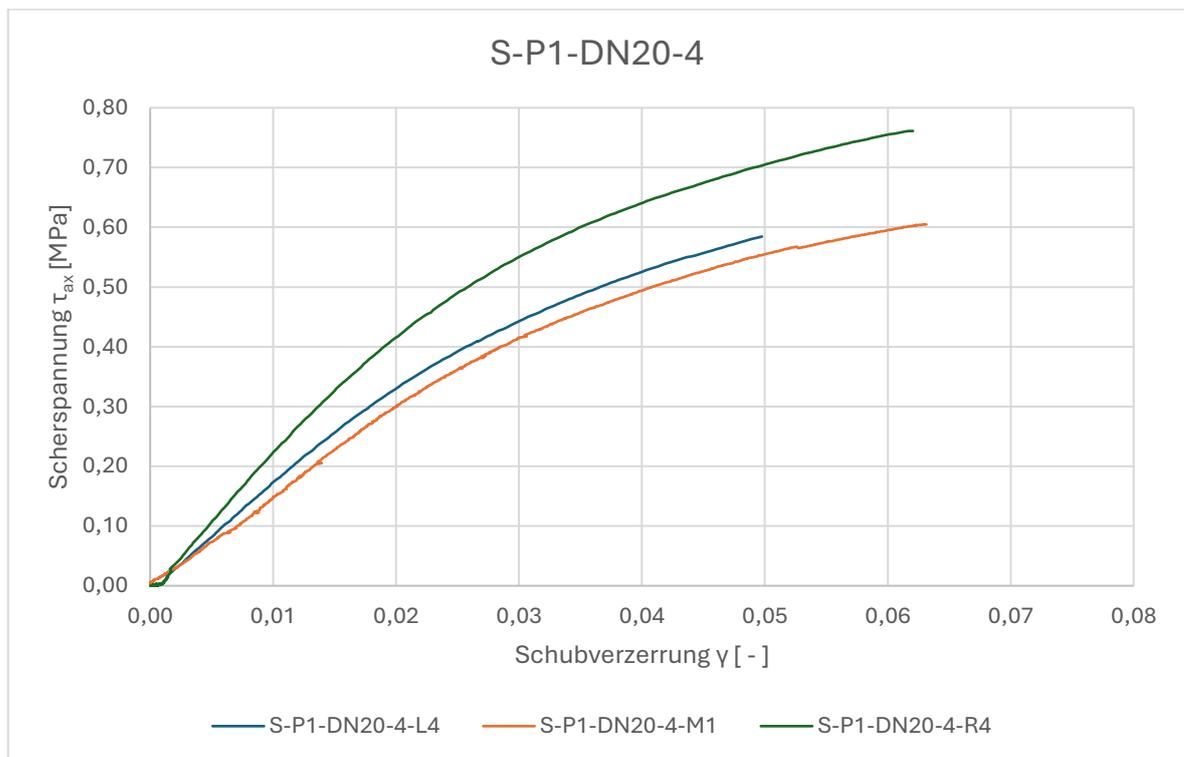


Abb. 68: Versuchsergebnisse S-P1-DN20-4 [Eigene Darstellung]

3. Untersuchungen

Die bis zu einer Axialkraft von $F_{ax} = 10$ kN ermittelte Scherspannung des linken Probekörpers beträgt $\tau_{ax} = 0,58$ MPa. Es ist zu berücksichtigen, dass der Versuch nicht vollständig abgeschlossen wird. Aufgrund des ähnlichen Spannungsverlaufs des mittleren Probekörpers, wäre ein vergleichbares Endergebnis für die maximal aufnehmbare Scherspannung zu erwarten. Die experimentell bestimmte Scherfestigkeit des mittleren Probekörpers beträgt $\tau_{ax} = 0,60$ MPa, während die des rechten Probekörpers bei $\tau_{ax} = 0,76$ MPa liegt. Da der Scherversuch des linken Probekörpers unvollständig bleibt, fließen nur die Messwerte der beiden abgeschlossenen Versuche in die Berechnung für den Typ S-P1-DN20-4 ein. Der resultierende Durchschnittswert für das KMR beträgt $\tau_{ax} = 0,68$ MPa.

Die Mindestscherfestigkeit von $\tau_{ax} = 0,12$ MPa gemäß DIN EN 253 [R4] ist erfüllt.

Die Relativverschiebung der einzelnen Proben liegt in vergleichbaren Bereichen. Der linke Probekörper weist aufgrund des unvollständigen Versuchablaufs einen kürzeren Scherweg auf. Das Verschiebungsvektorfeld zeigt, dass der PE-Mantel infolge der Krafteinwirkung nach unten gedrückt wird. Im unteren Bereich des Außenmantels lassen sich minimale Verschiebungen im Bereich von 0,3 bis 0,45 mm feststellen. Es ist zu berücksichtigen, dass der Probekörper nicht kraftschlüssig im Führungsring fixiert ist, wodurch ein gewisser Bewegungsspielraum innerhalb dieses Rings möglich ist. Visuell erkennbare Ausbeulungen sind weder während noch nach der Scherfestigkeitsprüfung sichtbar.

In Abbildung 71 zeigt die rechte Probe einen eindeutigen Bruch im PUR-Schaum infolge des Scherversuchs, während die anderen beiden Proben geringe Strukturveränderungen des PUR-Schaums am Stahlrohr aufweisen.



Abb. 69: S-P1-DN20-4-L4 geprüft
[Eigene Darstellung]



Abb. 70: S-P1-DN20-4-M1 geprüft



Abb. 71: S-P1-DN20-4-R4 geprüft

3. Untersuchungen

S-P1-DN32-4:

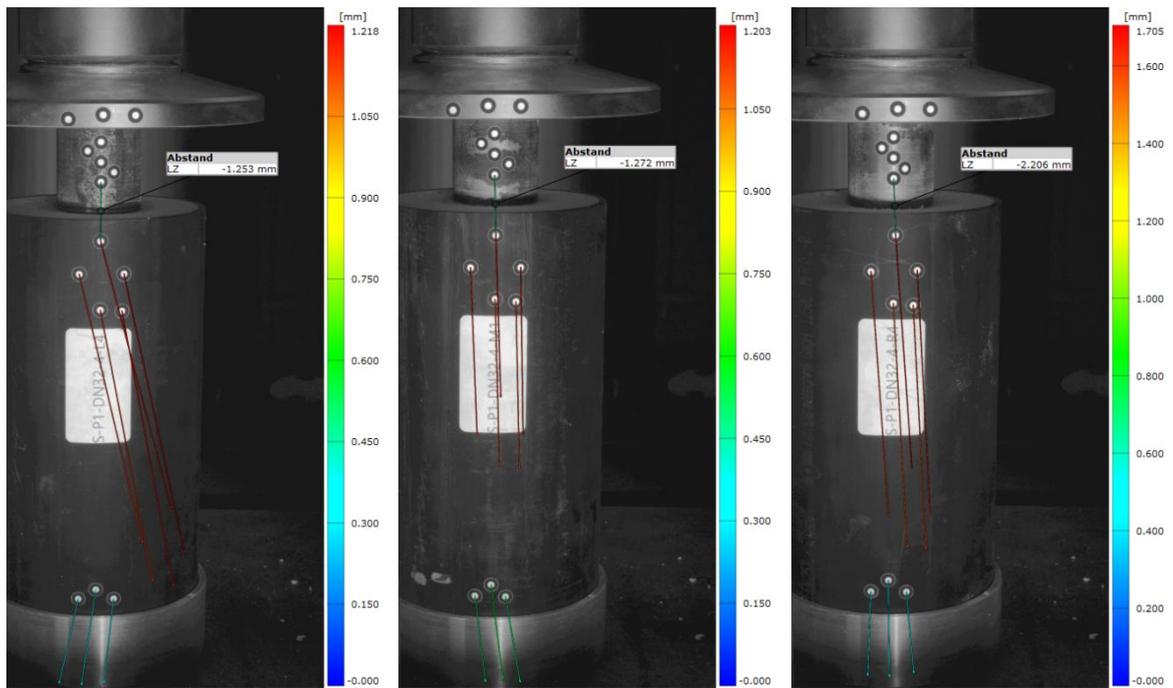


Abb. 72: S-P1-DN32-4-L4 [Eigene Darstellung]

Abb. 73: S-P1-DN32-4-M1 [Eigene Darstellung]

Abb. 74: S-P1-DN32-4-R4 [Eigene Darstellung]

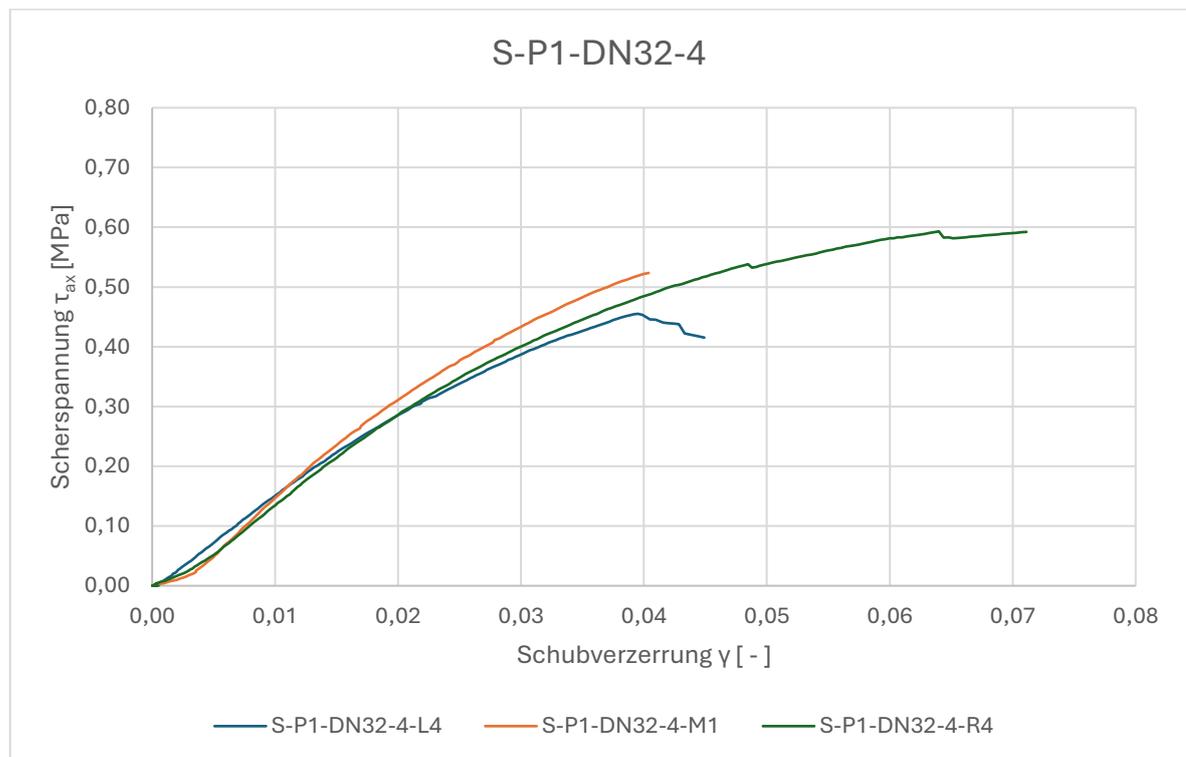


Abb. 75: Versuchsergebnisse S-P1-DN32-4 [Eigene Darstellung]

3. Untersuchungen

Die Scherfestigkeit bzw. maximal aufnehmbare Scherspannung des linken Probekörpers liegt bei $\tau_{ax} = 0,46$ MPa, die des Probekörpers aus der Mitte bei $\tau_{ax} = 0,52$ MPa und die des rechten Probekörpers bei $\tau_{ax} = 0,59$ MPa. Die Scherfestigkeiten der drei Probekörper ergeben einen Durchschnittswert für das KMR von $\tau_{ax} = 0,52$ MPa.

Die Mindestscherfestigkeit von $\tau_{ax} = 0,12$ MPa gemäß DIN EN 253 [R4] ist erfüllt.

Die Relativverschiebung zwischen Mediumrohr und Außenmantel ist für den linken und mittleren Probekörper ähnlich, während der rechte Probekörper eine größere Verschiebung zulässt. Dies führt dazu, dass in diesem Verbund höhere Axialkräfte kompensiert werden, bevor der Bruch des Verbunds eintritt. Die Verschiebung der Messpunkte, die durch farbliche Vektoren dargestellt wird, zeigt ein ähnliches Verhalten wie die Verschiebungen in der vorherigen Prüfung. Es lassen sich ebenfalls keine Ausbeulungen am Außenmantel der Probekörper feststellen.

Die Prüfung verursacht beim rechten Probekörper einen Bruch im PUR-Schaum, wie in Abbildung 78 dargestellt. Bei den beiden anderen Probekörpern sind nur leichte Unregelmäßigkeiten des PUR-Schaums am Mediumrohr erkennbar.



Abb. 76: S-P1-DN32-4-L4 geprüft
[Eigene Darstellung]



Abb. 77: S-P1-DN32-4-M1 geprüft
[Eigene Darstellung]



Abb. 78: S-P1-DN32-4-R4 geprüft
[Eigene Darstellung]

3. Untersuchungen

N-S-P1-DN20-4:

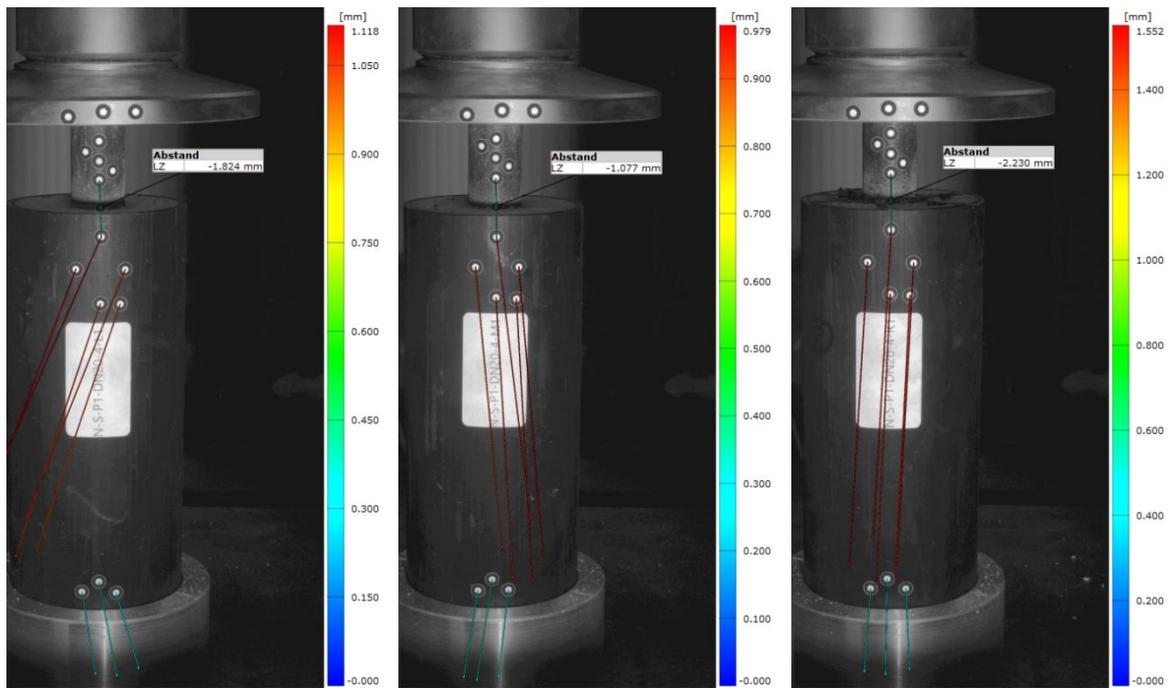


Abb. 79: N-S-P1-DN20-4-L1 [Eigene Darstellung]

Abb. 80: N-S-P1-DN20-4-M1 [Eigene Darstellung]

Abb. 81: N-S-P1-DN20-4-R1 [Eigene Darstellung]

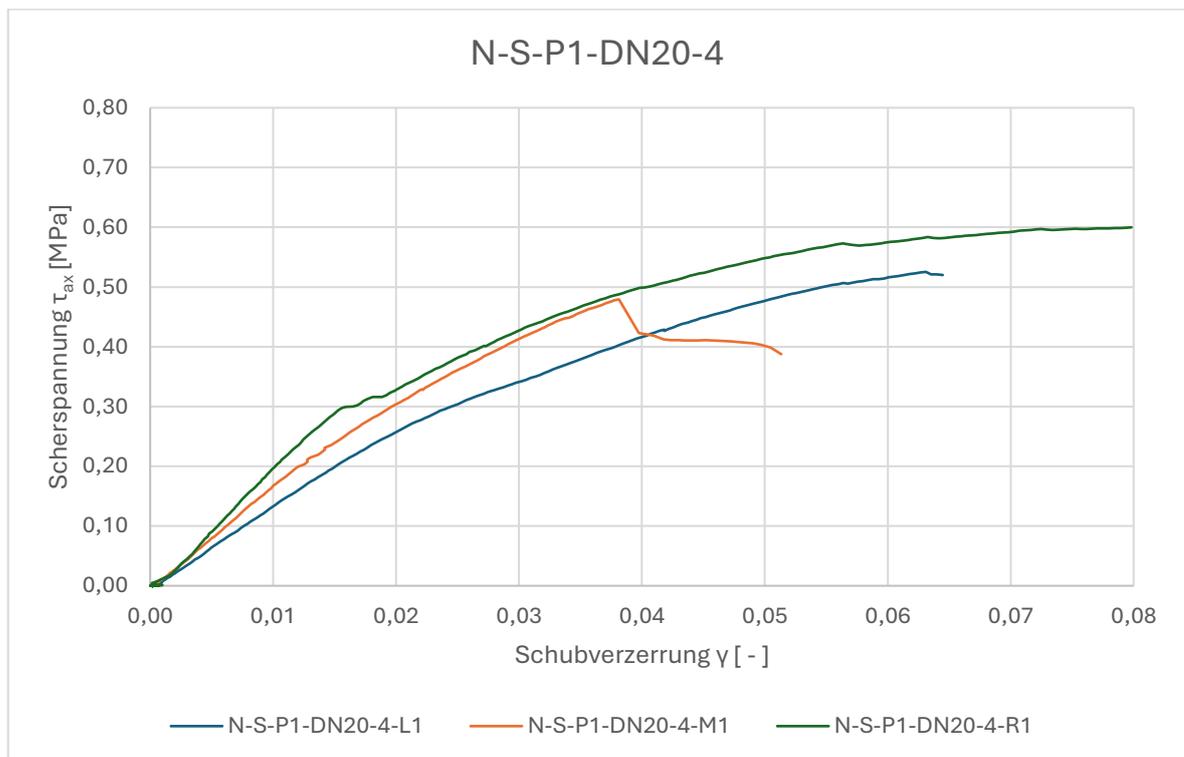


Abb. 82: Versuchsergebnisse N-S-P1-DN20-4 [Eigene Darstellung]

3. Untersuchungen

Die Scherfestigkeit bzw. maximal aufnehmbare Scherspannung des linken Probekörpers liegt bei $\tau_{ax} = 0,53$ MPa, die des Probekörpers aus der Mitte bei $\tau_{ax} = 0,48$ MPa und die des rechten Probekörpers bei $\tau_{ax} = 0,60$ MPa. Die Scherfestigkeiten der drei Probekörper ergeben einen Durchschnittswert für das KMR von $\tau_{ax} = 0,54$ MPa.

Die Mindestscherfestigkeit von $\tau_{ax} = 0,12$ MPa gemäß DIN EN 253 [R4] ist erfüllt.

Die Bildaufnahmen zeigen, dass die Relativverschiebung zwischen den einzelnen Probekörpern variiert. Der Probekörper aus der Mitte des Rohrstangenendstücks lässt deutlich weniger Verschiebung innerhalb des Verbunds zu, wobei der Verbund bei vergleichsweise niedrigerer Axialkraft versagt. Die durch das farbkodierte Verschiebungsvektorfeld erfassten Bewegungen der weiteren Messpunkte verhalten sich analog der vorherigen Prüfungen. In diesem Fall sind keine Ausbeulungen an den Probekörpern erkennbar.

Der linke Probekörper in Abbildung 83 verdeutlicht den Bruch des Verbunds zwischen PUR-Schaum und Stahl-Mediumrohr. Bei den übrigen Probekörpern lassen sich hingegen kleine Risse sowie Inhomogenitäten in der Zellstruktur rund um das Mediumrohr beobachten.



Abb. 83: N-S-P1-DN20-4-L1 geprüft
[Eigene Darstellung]



Abb. 84: N-S-P1-DN20-4-M1 geprüft
[Eigene Darstellung]



Abb. 85: N-S-P1-DN20-4-R1 geprüft
[Eigene Darstellung]

3. Untersuchungen

S-P2-DN20-4:

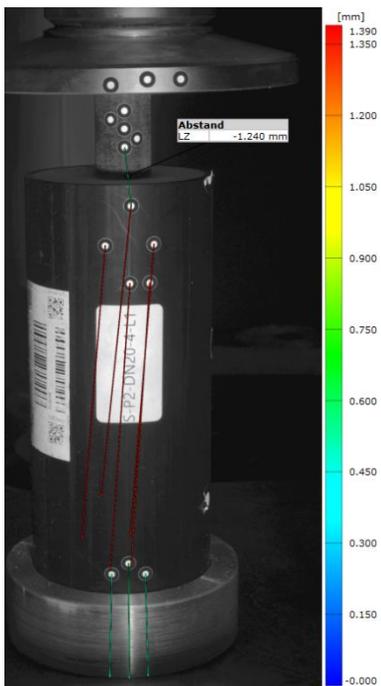


Abb. 86: S-P2-DN20-4-L1 [Eigene Darstellung]

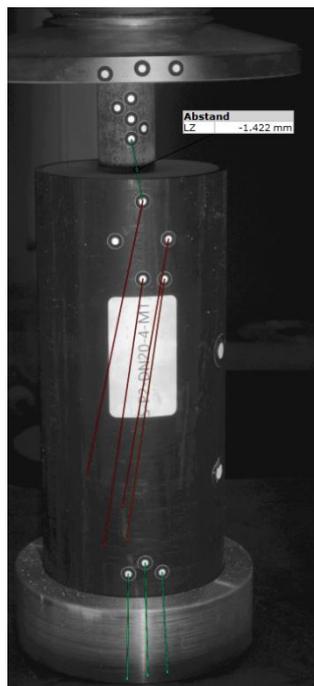


Abb. 87: S-P2-DN20-4-M1 [Eigene Darstellung]

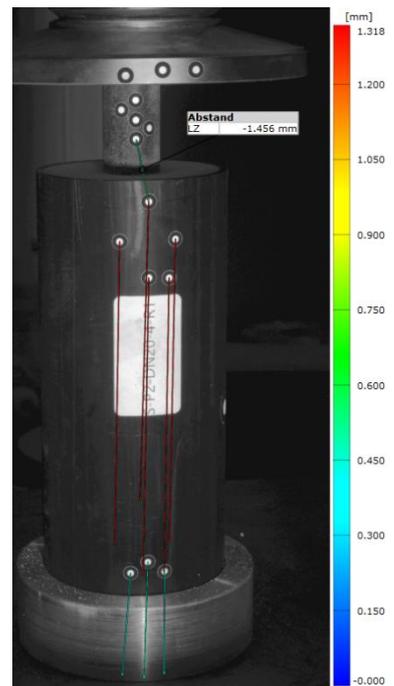


Abb. 88: S-P2-DN20-4-R1 [Eigene Darstellung]

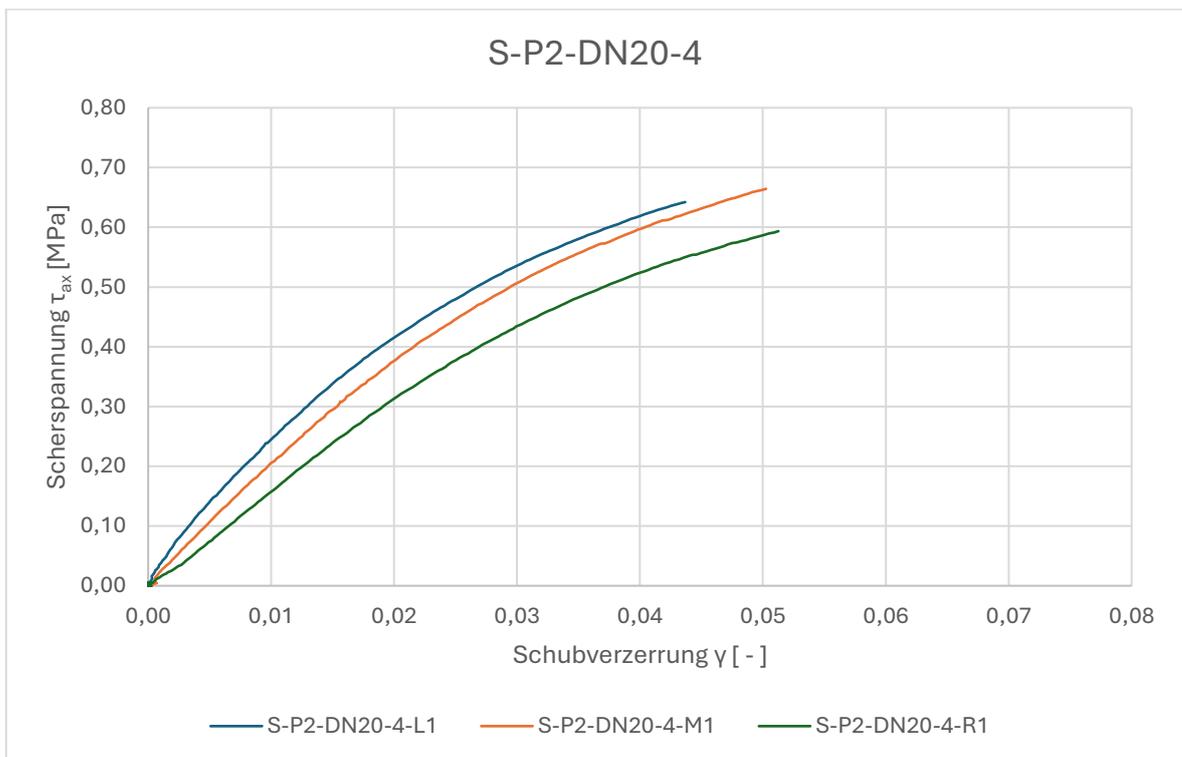


Abb. 89: Versuchsergebnisse S-P2-DN20-4 [Eigene Darstellung]

3. Untersuchungen

Die Scherfestigkeit bzw. maximal aufnehmbare Scherspannung des linken Probekörpers liegt bei $\tau_{ax} = 0,64$ MPa, die des Probekörpers aus der Mitte bei $\tau_{ax} = 0,67$ MPa und die des rechten Probekörpers bei $\tau_{ax} = 0,59$ MPa. Die Scherfestigkeiten der drei Probekörper ergeben einen Durchschnittswert für das KMR von $\tau_{ax} = 0,63$ MPa.

Die Mindestscherfestigkeit von $\tau_{ax} = 0,12$ MPa gemäß DIN EN 253 [R4] ist erfüllt.

In Reaktion auf die Axialkraft zeigt sich bei den unterschiedlichen Prüfkörpern ein ähnliches Verhalten in der Relativverschiebung. Das Vektorfeld zeigt hier ähnliche Messpunktverschiebungen wie die bisherigen Experimente und es sind weiterhin keine Ausbeulungen am Verbund sichtbar.

Der mittlere und rechte Probekörper aus den Abbildungen 91 und 92 zeigen keinerlei Veränderungen in der Struktur des Schaums um das Mediumrohr. Beim linken Probekörper sind minimale Risse im PUR-Schaum um das Stahlrohr herum erkennbar.



*Abb. 90: S-P2-DN20-4-L1 geprüft
[Eigene Darstellung]*



*Abb. 91: S-P2-DN20-4-M1 geprüft
[Eigene Darstellung]*



*Abb. 92: S-P2-DN20-4-R1 geprüft
[Eigene Darstellung]*

3. Untersuchungen

S-P2-DN32-4:

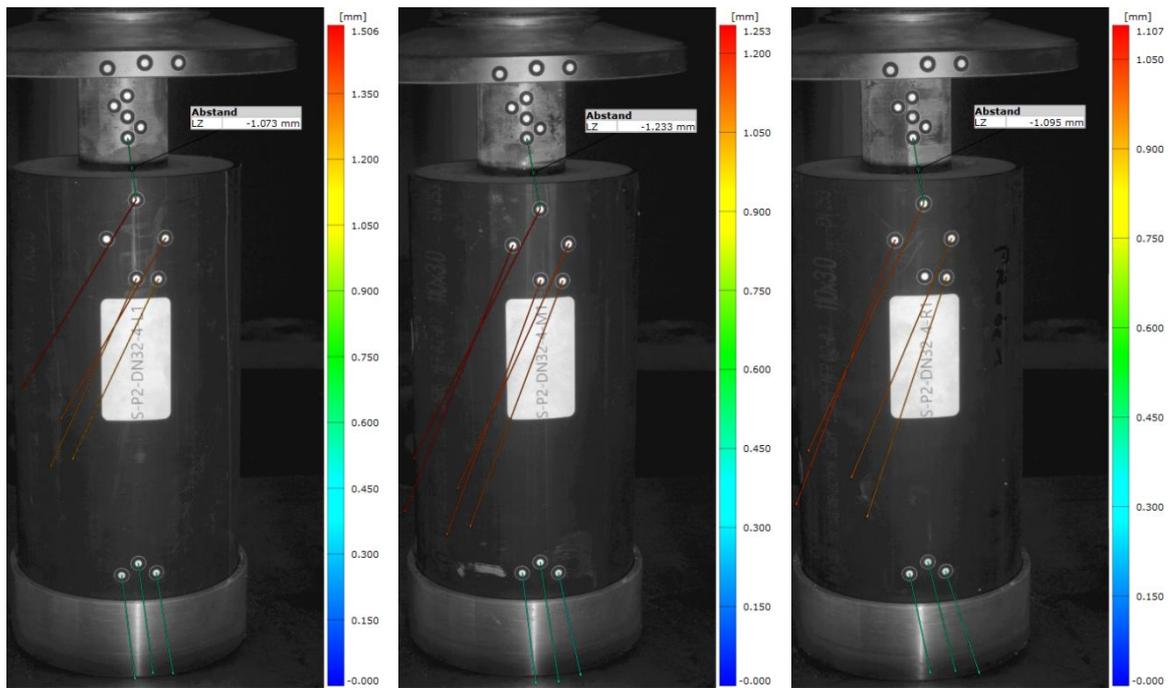


Abb. 93: S-P2-DN32-4-L1 [Eigene Darstellung]

Abb. 94: S-P2-DN32-4-M1 [Eigene Darstellung]

Abb. 95: S-P2-DN32-4-R1 [Eigene Darstellung]

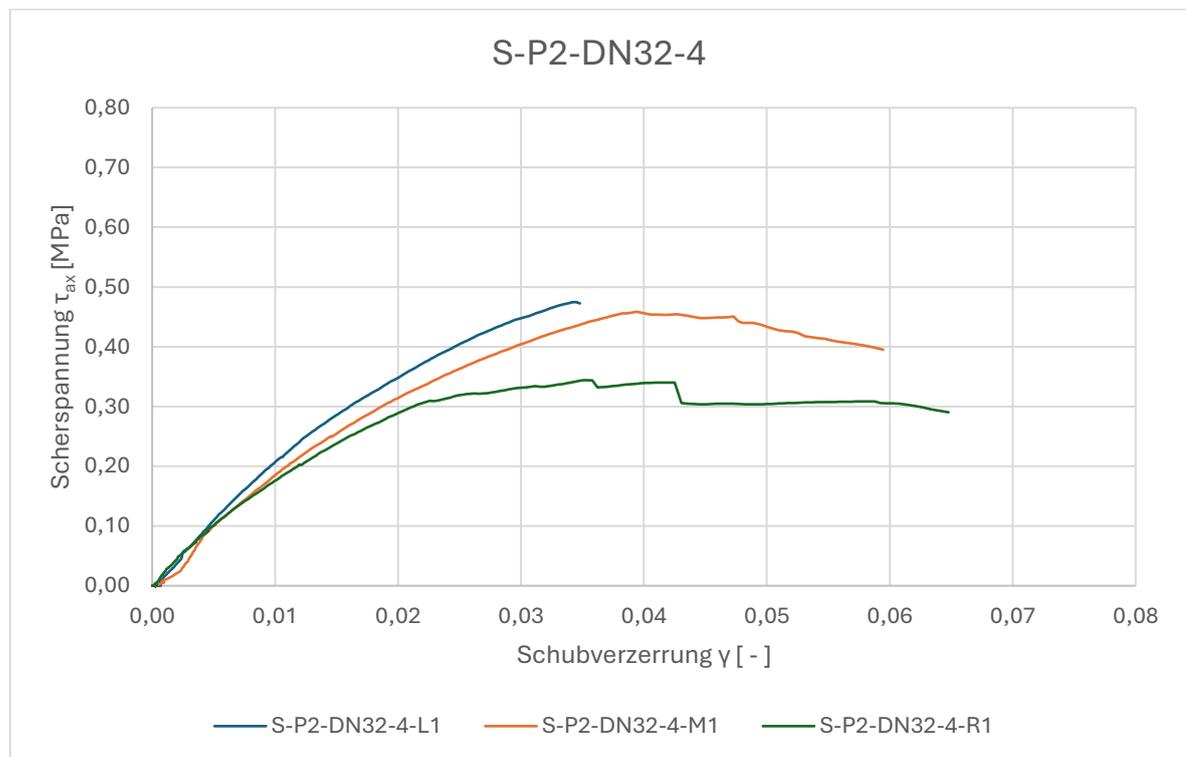


Abb. 96: Versuchsergebnisse S-P2-DN32-4 [Eigene Darstellung]

3. Untersuchungen

Die Scherfestigkeit bzw. maximal aufnehmbare Scherspannung des linken Probekörpers liegt bei $\tau_{ax} = 0,47$ MPa, die des Probekörpers aus der Mitte bei $\tau_{ax} = 0,46$ MPa und die des rechten Probekörpers bei $\tau_{ax} = 0,34$ MPa. Die Scherfestigkeiten der drei Probekörper ergeben einen Durchschnittswert für das KMR von $\tau_{ax} = 0,42$ MPa.

Die Mindestscherfestigkeit von $\tau_{ax} = 0,12$ MPa gemäß DIN EN 253 [R4] ist erfüllt.

Die aufgezeichnete Verschiebung zwischen Mediumrohr und Außenmantel ist bei diesem untersuchten KMR im Vergleich gering, zeigt jedoch ähnliche Werte untereinander. Darüber hinaus sind die maximal aufnehmbaren Axialkräfte vergleichsweise geringer. Das Ausmaß der Verschiebungen des PE-Mantels, dargestellt durch die farblich markierten Vektoren, bleibt unverändert und ein Ausbeulen am Außenmantel ist weiterhin nicht wahrnehmbar.

Der mittlere Probekörper weist in Abbildung 98 deutliche Risse im PUR auf. Die Zellstrukturen der beiden anderen Probekörper zeigen bereits zuvor vorhandene Inhomogenitäten oder verändern sich leicht an der äußersten Querschnittsstruktur durch das Begradigen mittels der Drehbank.



Abb. 97: S-P2-DN32-4-L1 geprüft
[Eigene Darstellung]

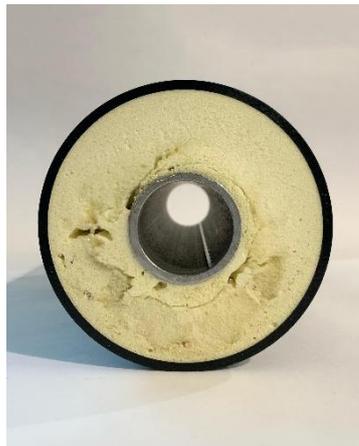


Abb. 98: S-P2-DN32-4-M1 geprüft
[Eigene Darstellung]



Abb. 99: S-P2-DN32-4-R1 geprüft
[Eigene Darstellung]

3.4.6 Analyse des Schubverhaltens im Anfangsverformungsbereich

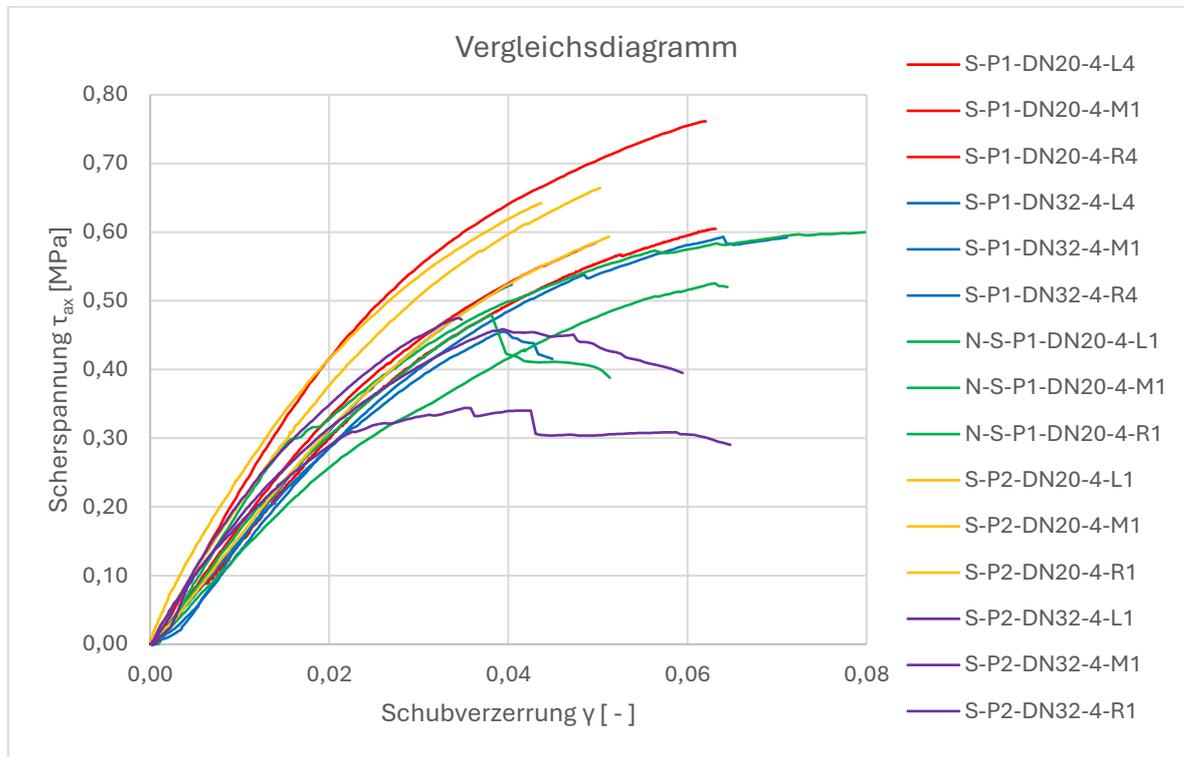


Abb. 100: Vergleichsdiagramm aller Probekörper [Eigene Darstellung]

Zusammenfassend ist in Abbildung 100 ein Vergleichsdiagramm aller untersuchten Probekörper abgebildet. Zur besseren Differenzierung erhalten Probekörper aus derselben Rohrstange jeweils eine einheitliche farbliche Kennzeichnung. Das dargestellte Scherspannung-Schubverzerrungs-Diagramm zeigt im Anfangsverformungsbereich ($\gamma = 0$ bis $0,015$) ein sehr ähnliches Verhalten der einzelnen Kurvenverläufe. Für diesen sehr linear verlaufenden Anfangsverformungsbereich kann der Schubmodul G als Tangentenmodul nach folgender Gleichung bestimmt werden:

$$G = \frac{\tau_{ax}}{\gamma}$$

Dabei ist:

- G der Schubmodul, in MPa;
- τ_{ax} die Scherspannung, in MPa;
- γ die Schubverzerrung, dimensionslos.

3. Untersuchungen

Basierend auf der Annahme eines linear abfallenden Schubspannungsverlaufs im PUR zwischen Stahl-Mediumrohr und PE-Ummantelung, ergibt sich am PE-Mantelrohr eine um den Faktor $D_s/(D_s + a)$ verminderte Schubspannung. Daraus lässt sich ein mittlerer Schubmodul G_m unter Anwendung der folgenden Gleichung bestimmen:

$$G_m = \frac{\tau_m}{\gamma} = \frac{\tau_{ax} \times \left(\frac{1}{2} + \frac{D_s}{2(D_s + a)} \right)}{\gamma}$$

Dabei ist:

- G_m der mittlere Schubmodul, in MPa;
- τ_m die mittlere Schubspannung, in MPa;
- γ die Schubverzerrung, dimensionslos;
- τ_{ax} die Schubspannung, in MPa;
- D_s der Außendurchmesser des Stahl-Mediumrohrs, in mm;
- a die Dämmdicke des PUR-Schaums, in mm.

Tabelle 12: Ergebnistabelle Schubmodul und mittlerer Schubmodul [Eigene Darstellung]

Probennummer	Ergebnistabelle	
	Schubmodul G [MPa]	mittlerer Schubmodul G _m [MPa]
N= Neu ; S= Single ; T= Twin P1= Rohr 1 ; P2= Rohr 2 DN= Nennweite Stahlrohr [mm] 4= bestellte Rohrlänge [m] L= links ; M= mitte ; R= rechts		
S-P1-DN20-4-L4	17,10	12,66
S-P1-DN20-4-M1	15,20	11,27
S-P1-DN20-4-R4	21,77	16,15
S-P1-DN32-4-L4	14,89	11,72
S-P1-DN32-4-M1	15,71	12,36
S-P1-DN32-4-R4	14,28	11,25
N-S-P1-DN20-4-L1	13,25	9,85
N-S-P1-DN20-4-M1	15,96	11,84
N-S-P1-DN20-4-R1	19,24	14,29
S-P2-DN20-4-L1	22,59	16,77
S-P2-DN20-4-M1	19,80	14,70
S-P2-DN20-4-R1	15,91	11,81
S-P2-DN32-4-L1	19,10	15,06
S-P2-DN32-4-M1	17,02	13,41
S-P2-DN32-4-R1	15,89	12,53

Die Einzelwerte der Schubmoduln sowie mittleren Schubmoduln sind Tabelle 12 zu entnehmen. Die mittleren Schubmoduln der Probekörper fallen entsprechend geringer aus. Für die Prüfkörper der knickbelasteten DN20-Rohrstangen liegt der Schubmodul im Bereich von $G = 15,20$ bis $22,59$ MPa. Die belasteten DN32-Rohrstangen mit größerer Nennweite weisen im Mittel ein weniger steifes Verhalten auf, mit einem Bereich von $G = 14,28$ bis $19,10$ MPa. Während die Probekörper der unbelasteten DN20-Rohrstange vergleichbare Ergebnisse mit Schubmoduln zwischen $G = 13,25$ bis $19,24$ MPa zeigen.

Auffällig ist die teils deutliche Streuung der Schubmoduln innerhalb einzelner Rohrstangen. Im Gegensatz dazu weisen Schubmoduln aus vergleichbaren Untersuchungen innerhalb eines Rohrtyps eine deutlich geringere Varianz auf [13, S. 47].

Auch innerhalb der unbelasteten Rohrstange ab Werk zeigen sich ausgeprägte Schwankungen des Schubmoduls. Da die Schaumdichte des PUR einen maßgeblichen Einfluss auf die Steifigkeit bzw. den Schubmodul hat [14], erscheint eine durch den Herstellungsprozess bedingte Inhomogenität des Schaums als plausible Ursache, da diese zu lokalen Dichteunterschieden führen kann.

Trotz der beobachteten Streuungen lässt sich aus den Ergebnissen ableiten, dass der PUR-Schaum im Bereich kleiner Verzerrungen unter Erstbelastung ein reproduzierbares linear-elastisches Verhalten zeigt.

Bei größeren Verformungen ($\gamma > 0,020$) hingegen divergieren die Scherspannungswerte der unterschiedlichen Probekörper signifikant. Die Abweichungen resultieren vermutlich aus unterschiedlichen Versagensmechanismen innerhalb der jeweiligen Zellstruktur des Materials. Darüber hinaus beeinflussen die unterschiedlich gewählten Nennweiten die Messergebnisse, da diese wiederum die Kontaktfläche zwischen Stahl-Mediumrohr und PUR-Schaum sowie die Dämmdicke verändern.

3.4.7 Zusammenfassung der Ergebnisse der Scherfestigkeitsuntersuchung

Es ist zunächst festzuhalten, dass alle untersuchten Probekörper die gemäß DIN EN 253 [R4] definierten Mindestanforderungen an die Scherfestigkeit bei Raumtemperatur erfüllen.

Im Hinblick auf die Scherfestigkeit der Rohrstangen unterschiedlicher Nennweiten zeigt die Versuchsreihe, dass die Probekörper mit einer kleineren Nennweite DN 20 höhere Scherfestigkeiten aufweisen als die KMR mit einer größeren Stahlrohr-Nennweite DN 32.

Ein Vergleich der knickbelasteten DN20-Probekörper mit den unbelasteten DN20-Probekörpern ergibt, dass die Scherfestigkeit der vorbelasteten Rohrstangen die der neuen Rohrstange ab Werk im Durchschnitt um etwa 0,10 MPa übertrifft. Dieses Ergebnis widerspricht der werkstofftechnischen Erwartung, da unversehrte Rohrstangen in der Regel höhere mechanische Eigenschaften aufweisen als Probekörper, die infolge Knickbelastung vorgeschädigt wurden. Der Befund des unbelasteten Rohrstücks stellt einen ungewöhnlichen Einzelfall dar. Zudem handelt es sich bei der untersuchten Rohrstange um ein Endstück eines neuen KMRs, während gemäß DIN EN 253 [R4] die Probekörper an festgelegten Stellen entnommen werden, die sich auf die gesamte ab Werk gefertigte Rohrlänge beziehen.

Weiterhin lassen sich bei Probekörpern desselben KMRs unterschiedliche Scherfestigkeiten und daraus resultierende divergierende Kurvenverläufe feststellen. Eine potenzielle Ursache hierfür könnte in einem variierenden Bruchverhalten liegen, das durch mikromechanische Unterschiede innerhalb der Zellstruktur bedingt ist. Darüber hinaus spielen auch produktionstechnische Faktoren bei der Herstellung des PUR-Schaums eine wesentliche Rolle.

Es zeigt sich, dass die Prüfergebnisse innerhalb einer Rohrstange auf der einen Seite signifikant höher ausfallen als auf der gegenüberliegenden Seite. Diese Unterschiede lassen sich keiner spezifischen Seite (links oder rechts) eindeutig zuordnen, da sie je nach Probe variieren.

Ferner zeigt sich im Anfangsverformungsbereich ($\gamma = 0$ bis 0,015) der Diagrammkurven aller Probekörper ein nahezu lineares Verhalten. Dies ermöglicht es, das mechanische Verhalten des PUR-Schaums bei geringen Verzerrungen unter Erstbelastung durch ein linear-elastisches Federmodell zu beschreiben.

4. Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurden einzelne Probekörper aus Kunststoffmantelrohren analysiert, die zuvor im Labor der HafenCity Universität Hamburg unter axialer Knickbelastung bis zum Versagen beansprucht wurden. Die durchgeführten Biegeknickversuche simulieren die behinderte Temperaturexpansion von eingebauten Fernwärmeleitungen, wodurch Axialkräfte entlang der Rohrachse entstehen, die potenziell zum Versagen des Systems führen.

Anhand differenzierter Versuchsreihen an den entnommenen Querschnitten wurde untersucht, ob visuelle Schäden an den Zellstrukturen des PUR-Schaums im Verbund auftreten und ob eine Degradation der Verbundscherfestigkeit der KMR infolge der Knickbelastung feststellbar ist.

Die erste Untersuchungsreihe, bestehend aus visueller Inspektion und Maßprüfung der Probekörper, zeigt keine Rissbildung im PUR-Hartschaum. Ursächlich hierfür ist die feinporig vernetzte Zellstruktur, welche mechanische Einwirkungen insbesondere im Bereich geringer Verzerrungen lokal absorbieren und gleichmäßig verteilen kann. Lediglich vereinzelte Inhomogenitäten treten auf, die größtenteils produktionsbedingt sind.

Auffällig ist, dass mit zunehmendem Außendurchmesser der Rohre die Verformungen innerhalb des Verbunds ausgeprägter sind und einzelne belastete Probekörper die Maßanforderungen gemäß DIN EN 253 [R4] nicht erfüllen. Besonders bei Twin-KMR sind signifikante Deformationen des PE-Außenmantels erkennbar. Präzise 3D-Messverfahren zeigen deutliche Koaxialitätsabweichungen des Stahl-Mediumrohrs innerhalb des PUR-Schaums, die auf fertigungstechnische Toleranzen sowie mögliche Verschiebungen im Verbund infolge der Knickbelastung zurückzuführen sind.

Die zweite Untersuchungsreihe zur Verbundscherfestigkeit zeigt, dass sämtliche untersuchten Probekörper, sowohl der belasteten als auch der unbelasteten KMR, die Mindestscherfestigkeit von $\tau_{ax} = 0,12$ MPa gemäß DIN EN 253 [R4] erfüllen. Eine kritische Degradation der Verbundscherfestigkeit, die die Mindestanforderungen der Norm unterschreitet, ist im Rahmen dieser Untersuchungen nicht festzustellen.

Ein Vergleich der belasteten Single-DN20-Rohrstangen mit der unbelasteten Referenzprobe desselben Typs zeigt, dass die geknickten KMR dieser Versuchsreihe unerwartet höhere Scherfestigkeiten aufweisen. Diese Beobachtung widerspricht den grundlegenden werkstofftechnischen Erwartungen. Eine vorgeschädigte Rohrleitung sollte mechanisch

nicht leistungsfähiger sein als eine fabrikneue Rohrstange desselben Typs. Ein solches Ergebnis ist ingenieurtechnisch nicht plausibel und lässt sich vermutlich auf werksseitige Unregelmäßigkeiten oder externe Einflüsse wie Transport, Lagerung oder Alterungsprozesse zurückführen.

Insgesamt kann auf Basis der vorliegenden Untersuchungen weder bestätigt noch ausgeschlossen werden, dass das Ausknicken der Rohrleitung zu einer Degradation der Verbundscherfestigkeit führt, da hierfür eine umfassendere statistische Absicherung durch den Vergleich belasteter und unbelasteter Rohrstangen erforderlich ist.

5. Ausblick

Basierend auf den Versuchsreihen dieser Arbeit sind weiterführende Untersuchungen zur Verbundscherfestigkeit erforderlich, um die Auswirkungen des Knickversagens eines Rohrleitungssystems umfassend zu bewerten. Hierfür bieten sich zusätzliche experimentelle Versuchsreihen mit einer größeren Anzahl an Proben unterschiedlicher Nennweiten an, wobei sowohl vorbelastete als auch unbelastete Proben gegenübergestellt und statistisch ausgewertet werden. Dies würde eine präzisere Erfassung potenzieller Degradationen der Verbundscherfestigkeit ermöglichen.

Darüber hinaus kann durch eine erweiterte Auswahl an KMR-Nennweiten das Verhalten der Scherfestigkeiten in Abhängigkeit der Querschnittsabmessungen detaillierter untersucht werden.

Angesichts der begrenzten Stichprobengröße der Scherfestigkeitsuntersuchung anhand einzelner Probekörper wäre die Entwicklung und Validierung numerischer Simulationsmodelle ein möglicher Ansatz, um die beobachteten Auswirkungen des Biegeknickens zu quantifizieren und auf reale Anwendungsfälle in Fernwärmesystemen zu übertragen.

Verwendete Regelwerke, Normen und Gesetze

[R1] Bundesrepublik Deutschland, "Gebäudeenergiegesetz vom 8. August 2020 (BGBl. I S. 1728), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 16. Oktober 2023 (BGBl. 2023 I Nr. 280) geändert worden ist", [Online]. Verfügbar: <https://www.gesetze-im-internet.de/geg/GEG.pdf>. [Zugriff: 02. Februar 2025].

[R2] Bundesrepublik Deutschland, "Wärmeplanungsgesetz vom 20. Dezember 2023 (BGBl. 2023 I Nr. 394)", [Online]. Verfügbar: <https://www.gesetze-im-internet.de/wpg/WPG.pdf>. [Zugriff: 02. Februar 2025].

[R3] AGFW-Regelwerk, *FW 401 Teil 10: Kunststoffmantelrohre (KMR) als Verlegesystem der Fernwärme - Grundlagen der rohrstatischen Auslegung*, AGFW e.V., Frankfurt am Main, 2022, S. 90-94.

[R4] DIN EN 253:2024-10, "Fernwärmerohre - Einzelrohr-Verbundsysteme für direkt erdverlegte Fernwärmenetze - Werkmäßig gefertigte Verbundrohrsysteme, bestehend aus Stahl-Mediumrohr, einer Wärmedämmung aus Polyurethan und einer Ummantelung aus Polyethylen", Berlin: Beuth Verlag, 2024.

[R5] DIN EN 10216-2:2025-02, "Nahtlose Stahlrohre für Druckbeanspruchungen - Technische Lieferbedingungen - Teil 2: Rohre aus unlegierten und legierten Stählen mit festgelegten Eigenschaften bei erhöhten Temperaturen", Berlin: Beuth Verlag, 2025.

[R6] DIN EN 10217-2:2019-08, "Geschweißte Stahlrohre für Druckbeanspruchungen - Technische Lieferbedingungen - Teil 2: Elektrisch geschweißte Rohre aus unlegierten und legierten Stählen mit festgelegten Eigenschaften bei erhöhten Temperaturen", Berlin: Beuth Verlag, 2019.

[R7] DIN EN 10217-5:2019-08, "Geschweißte Stahlrohre für Druckbeanspruchungen - Technische Lieferbedingungen - Teil 5: Unterpulvergeschweißte Rohre aus unlegierten und legierten Stählen mit festgelegten Eigenschaften bei erhöhten Temperaturen", Berlin: Beuth Verlag, 2019.

[R8] DIN EN 13941-1:2022-06, "Fernwärmerohre - Auslegung und Installation von gedämmten Einzel- und Doppelrohr-Verbundsystemen für direkt erdverlegte Fernwärmenetze - Teil 1: Auslegung", Berlin: Beuth Verlag, 2022.

[R9] DIN EN 489-1:2022-08, "Fernwärmerohre - Einzel- und Doppelrohr-Verbundsysteme für erdverlegte Fernwärmenetze - Teil 1: Mantelrohrverbindungen und Wärmedämmung für Fernwärmenetze nach EN 13941-1", Berlin: Beuth Verlag, 2022.

[R10] DIN EN 14419:2020-03, "Fernwärmerohre - Einzel- und Doppelrohr-Verbundsysteme für erdverlegte Fernwärmenetze – Überwachungssysteme", Berlin: Beuth Verlag, 2020.

[R11] DIN EN 448:2020-03, "Fernwärmerohre - Einzelrohr-Verbundsysteme für direkt erdverlegte Fernwärmenetze - Werkmäßig gefertigte Verbundformstücke, bestehend aus Stahl-Mediumrohren, einer Wärmedämmung aus Polyurethan und einer Ummantelung aus Polyethylen", Berlin: Beuth Verlag, 2020.

[R12] DIN EN 488:2020-03, "Fernwärmerohre - Einzelrohr-Verbundsysteme für direkt erdverlegte Fernwärmenetze - Werkmäßig gefertigte Stahl-Absperrarmaturen für Stahl-Mediumrohre, Wärmedämmung aus Polyurethan und einer Ummantelung aus Polyethylen", Berlin: Beuth Verlag, 2020.

[R13] DIN EN 13480-3:2024-12, "Metallische industrielle Rohrleitungen - Teil 3: Konstruktion und Berechnung", Berlin: Beuth Verlag, 2024.

[R14] AGFW-Regelwerk, *FW 401: Kunststoffmantelrohre (KMR) als Verlegesystem der Fernwärme*, AGFW e.V., Frankfurt am Main, 2021.

[R15] AGFW-Regelwerk, *FW 401 Teil 11: Kunststoffmantelrohre (KMR) als Verlegesystem der Fernwärme – Diagramme und Tabellen zur rohrstatischen Bemessung*, AGFW e.V., Frankfurt am Main, 2021, S. 169-199.

[R16] DIN 4124:2012-01, "Baugruben und Gräben - Böschungen, Verbau, Arbeitsraumbreiten", Berlin: Beuth Verlag, 2012.

[R17] DIN EN ISO 3126:2005-05, "Kunststoff-Rohrleitungssysteme - Rohrleitungsteile aus Kunststoffen - Bestimmung der Maße", Berlin: Beuth Verlag, 2005.

Literaturverzeichnis

- [1] United Nations Environment Programme, *Global Status Report for Buildings and Construction 2023: Beyond Foundations: Mainstreaming Sustainable Solutions to Cut Emissions from the Buildings Sector*, Nairobi, 2024. [Online]. Verfügbar: https://globalabc.org/sites/default/files/2024-11/global_status_report_buildings_construction_2023.pdf. [Zugriff: 02. Februar 2025].
- [2] AGFW - Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e.V., *AGFW-Hauptbericht 2023*, Frankfurt am Main, Dezember 2024.
- [3] I.Weidlich, "Mantelrohrsysteme in der Wärmeverteilung", in *Rohrleitungen 1: Grundlagen, Rohrwerkstoffe, Rohrherstellung, Komponenten*, H.-B. Horlacher und U. Helbig, Hrsg., 3. Auflage. Berlin: Springer Vieweg, 2024, S. 533-552.
- [4] I.Weidlich, "Bauteile zur Kompensation von Temperaturdehnungen", in *Rohrleitungen 1: Grundlagen, Rohrwerkstoffe, Rohrherstellung, Komponenten*, H.-B. Horlacher und U. Helbig, Hrsg., 3. Auflage. Berlin: Springer Vieweg, 2024, S. 633-639.
- [5] AG Energiebilanzen e.V., *Auswertungstabellen zur Energiebilanz Deutschland: Daten für die Jahre von 1990 bis 2023*, Berlin: AGEBA, 2024.
- [6] P. Konstantin und M. Konstantin, *Praxisbuch der Fernwärme- und Fernkälteversorgung: Systeme, Netzaufbauvarianten, Kraft-Wärme und Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung, Kostenstrukturen und Preisbildung*, 3. Auflage. Berlin: Springer Vieweg, 2024.
- [7] L. Vorspel und H. Kuhlmann, "Wärmenetze für eine nachhaltigere Wärmeversorgung", Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung IFAM. [Online]. Verfügbar: <https://www.ifam.fraunhofer.de/de/magazin/waermenetze-nachhaltigere-waermeversorgung.html>. [Zugriff: 28. Februar 2025].
- [8] A. Huber, "Stabilitätsprobleme", in *Technische Mechanik 2 - Elastostatik*, A. Huber, Hrsg., 1. Auflage. Berlin: Springer Vieweg, 2023, S. 415-455.
- [9] S. Muminovic, "Das Hookesche Gesetz", in *Kanonische Experimente der Physik: Fachliche Grundlagen und historischer Kontext*, P. Heering, Hrsg., 1. Auflage. Berlin: Springer Vieweg, 2022, S. 9-34.
- [10] A. Albert, *Schneider Bautabellen für Ingenieure*, A. Albert, Hrsg., 25. Auflage. Köln: Reguvis Fachmedien, 2022, Kap. 4A, S. 4.51.

- [11] GOM mbH, *ARAMIS Benutzerhandbuch Hardware - ARAMIS 3D Camera*, Braunschweig, 2016.
- [12] thyssenkrupp Schulte GmbH, *Werkstoffdatenblatt: Unlegierter warmfester Stahl P235GH - 1.0345*, Essen, 2019.
- [13] I. Weidlich und M. Illguth, "Bestimmung der axialen Scherfestigkeit - Überprüfung geometrischer Vorgaben für Prüfkörper nach EN 253", in *EuroHeat&Power*, 47. Jg, Heft 4-5, Offenbach am Main: VDE Verlag, 2018, S. 45-49.
- [14] J.S. Huang und L.J. Gibson, "Creep of polymer foams", in *Journal of Materials Science*, Vol. 26, Springer, 1991, S. 637-647.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Ablauf der experimentellen Untersuchungen [Eigene Darstellung]	4
Abb. 2: Funktionsschema einer KWK-Anlage mit angeschlossenem Fernwärmenetz [Eigene Darstellung]	6
Abb. 3: Querschnitt eines Kunststoffmantelrohrs [Eigene Darstellung]	9
Abb. 4: U-Bogen im Fernwärmesystem: Bauvorhaben HH, Anckelmannsplatz [Eigene Darstellung]	10
Abb. 5: 90°-Bogen mit Dehnpolstern: Bauvorhaben HH, Haferweg Spange Grindel [Eigene Darstellung]	11
Abb. 6: Typen von Einmalkompensatoren gemäß DIN EN 13941-1, Bild 26 [R8, S. 77]..	12
Abb. 7: Verlegekonzept bei Freilegung des KMRs [Eigene Darstellung]	15
Abb. 8: Verlegekonzept bei zu geringer Überdeckung des KMRs [Eigene Darstellung]....	17
Abb. 9: Baugrube neben KMR mit Verbau nach DIN 4124 [Eigene Darstellung].....	19
Abb. 10: Baugrube neben KMR ohne Verbau [Eigene Darstellung].....	20
Abb. 11: Euler Knickfälle gemäß SBT 25, Kapitel 4A [10, S. 4.51].....	23
Abb. 12: Kompensation temperaturinduzierter Längenänderungen im U-Bogen [Eigene Darstellung]	24
Abb. 13: Statisches KMR-Belastungssystem infolge behinderter Temperaturdehnung [Eigene Darstellung]	24
Abb. 14: Biegeknickversuch des S-P1-DN20-4 [Eigene Darstellung].....	27
Abb. 15: Biegeknickversuch des S-P1-DN32-4 [Eigene Darstellung].....	27
Abb. 16: Biegeknickversuch des S-P2-DN20-4 [Eigene Darstellung].....	28
Abb. 17: Biegeknickversuch des S-P2-DN32-4 [Eigene Darstellung].....	28
Abb. 18: Biegeknickversuch des T-P1-DN20-4 [Eigene Darstellung].....	29
Abb. 19: Biegeknickversuch des T-P1-DN32-4 [Eigene Darstellung].....	29
Abb. 20: Aufbau Bandsägemaschine [Eigene Darstellung].....	32
Abb. 21: Rechtwinkligkeit [Eigene Darstellung]	32

Abb. 22: ungekürzter Verbund [Eigene Darstellung]	33
Abb. 23: gekürzter Verbund [Eigene Darstellung]	33
Abb. 24: Position und Bezeichnung der Probekörper [Eigene Darstellung]	34
Abb. 25: Frontansicht [Eigene Darstellung]	35
Abb. 26: Rechtes Schnittufer [Eigene Darstellung].....	35
Abb. 27: Linkes Schnittufer [Eigene Darstellung]	35
Abb. 28: S-P1-DN20-4-L3-RS [Eigene Darstellung].....	36
Abb. 29: S-P1-DN20-4-L3-LS [Eigene Darstellung]	36
Abb. 30: S-P1-DN20-4-R3-RS [Eigene Darstellung].....	36
Abb. 31: S-P1-DN32-4-L1-RS [Eigene Darstellung].....	37
Abb. 32: S-P1-DN32-4-L3-RS [Eigene Darstellung].....	37
Abb. 33: T-P1-DN20-4-L3-RS [Eigene Darstellung]	37
Abb. 34: T-P1-DN20-4-L3-LS [Eigene Darstellung]	37
Abb. 35: T-P1-DN32-4-R3-LS [Eigene Darstellung]	38
Abb. 36: T-P1-DN32-4-L3-LS [Eigene Darstellung]	38
Abb. 37: N-S-P1-DN20-4-R1-LS [Eigene Darstellung].....	39
Abb. 38: N-S-P1-DN20-4-L1-LS [Eigene Darstellung].....	39
Abb. 39: S-P2-DN20-4-L1-LS [Eigene Darstellung]	39
Abb. 40: S-P2-DN20-4-M1-RS [Eigene Darstellung].....	39
Abb. 41: S-P2-DN32-4-M1-RS [Eigene Darstellung].....	40
Abb. 42: S-P2-DN32-4-R1-LS [Eigene Darstellung].....	40
Abb. 43: S-P2-DN32-4-M1-LS [Eigene Darstellung]	40
Abb. 44: PE-Durchmesser [Eigene Darstellung]	41
Abb. 45: PE-Wanddicke [Eigene Darstellung]	41
Abb. 46: S-Durchmesser [Eigene Darstellung]	41
Abb. 47: Stahl-Wanddicke [Eigene Darstellung].....	41

Abb. 48: Aufbau Koaxialitätsmessung [Eigene Darstellung].....	52
Abb. 49: Projektorbereich Koaxialitätsmessung [Eigene Darstellung]	52
Abb. 50: Abnahme der Messpunkte Stahlrohr [Eigene Darstellung]	53
Abb. 51: Abnahme der Messpunkte PE-Ummantelung [Eigene Darstellung]	53
Abb. 52: Koaxialitätsabweichung S-P1-DN20-4-R4 [Eigene Darstellung]	54
Abb. 53: Koaxialitätsabweichung S-P1-DN32-4-L4 [Eigene Darstellung]	55
Abb. 54: Koaxialitätsabweichung T-P1-DN20-4-L3 [Eigene Darstellung].....	55
Abb. 55: Koaxialitätsabweichung T-P1-DN32-4-R3 [Eigene Darstellung]	56
Abb. 56: Koaxialitätsabweichung N-S-P1-DN20-4-M1 [Eigene Darstellung]	56
Abb. 57: Koaxialitätsabweichung S-P2-DN20-4-L1 [Eigene Darstellung]	57
Abb. 58: Koaxialitätsabweichung S-P2-DN32-4-M1 [Eigene Darstellung]	57
Abb. 59: Prüfanordnung Scherfestigkeit gemäß DIN EN 253, Bild 2 [R4, S. 25].....	62
Abb. 60: Probekörper mit Messmarken zur Scherfestigkeitsprüfung [Eigene Darstellung]	64
Abb. 61: Nahaufnahme der Prüfanordnung [Eigene Darstellung]	65
Abb. 62: Aufzeichnung mittels 3D-Kamera [Eigene Darstellung].....	65
Abb. 63: Versuchsaufbau im Labor der HCU [Eigene Darstellung]	65
Abb. 64: Erfassung der Messdaten [Eigene Darstellung].....	65
Abb. 65: S-P1-DN20-4-L4 [Eigene Darstellung]	69
Abb. 66: S-P1-DN20-4-M1 [Eigene Darstellung]	69
Abb. 67: S-P1-DN20-4-R4 [Eigene Darstellung].....	69
Abb. 68: Versuchsergebnisse S-P1-DN20-4 [Eigene Darstellung].....	69
Abb. 69: S-P1-DN20-4-L4 geprüft [Eigene Darstellung]	70
Abb. 70: S-P1-DN20-4-M1 geprüft [Eigene Darstellung]	70
Abb. 71: S-P1-DN20-4-R4 geprüft [Eigene Darstellung]	70
Abb. 72: S-P1-DN32-4-L4 [Eigene Darstellung]	71
Abb. 73: S-P1-DN32-4-M1 [Eigene Darstellung].....	71

Abb. 74: S-P1-DN32-4-R4 [Eigene Darstellung].....	71
Abb. 75: Versuchsergebnisse S-P1-DN32-4 [Eigene Darstellung].....	71
Abb. 76: S-P1-DN32-4-L4 geprüft [Eigene Darstellung]	72
Abb. 77: S-P1-DN32-4-M1 geprüft [Eigene Darstellung]	72
Abb. 78: S-P1-DN32-4-R4 geprüft [Eigene Darstellung]	72
Abb. 79: N-S-P1-DN20-4-L1 [Eigene Darstellung].....	73
Abb. 80: N-S-P1-DN20-4-M1 [Eigene Darstellung].....	73
Abb. 81: N-S-P1-DN20-4-R1 [Eigene Darstellung].....	73
Abb. 82: Versuchsergebnisse N-S-P1-DN20-4 [Eigene Darstellung]	73
Abb. 83: N-S-P1-DN20-4-L1 geprüft [Eigene Darstellung]	74
Abb. 84: N-S-P1-DN20-4-M1 geprüft [Eigene Darstellung]	74
Abb. 85: N-S-P1-DN20-4-R1 geprüft [Eigene Darstellung]	74
Abb. 86: S-P2-DN20-4-L1 [Eigene Darstellung]	75
Abb. 87: S-P2-DN20-4-M1 [Eigene Darstellung]	75
Abb. 88: S-P2-DN20-4-R1 [Eigene Darstellung].....	75
Abb. 89: Versuchsergebnisse S-P2-DN20-4 [Eigene Darstellung].....	75
Abb. 90: S-P2-DN20-4-L1 geprüft [Eigene Darstellung]	76
Abb. 91: S-P2-DN20-4-M1 geprüft [Eigene Darstellung]	76
Abb. 92: S-P2-DN20-4-R1 geprüft [Eigene Darstellung]	76
Abb. 93: S-P2-DN32-4-L1 [Eigene Darstellung]	77
Abb. 94: S-P2-DN32-4-M1 [Eigene Darstellung]	77
Abb. 95: S-P2-DN32-4-R1 [Eigene Darstellung].....	77
Abb. 96: Versuchsergebnisse S-P2-DN32-4 [Eigene Darstellung].....	77
Abb. 97: S-P2-DN32-4-L1 geprüft [Eigene Darstellung]	78
Abb. 98: S-P2-DN32-4-M1 geprüft [Eigene Darstellung]	78
Abb. 99: S-P2-DN32-4-R1 geprüft [Eigene Darstellung]	78

Abb. 100: Vergleichsdiagramm aller Probekörper [Eigene Darstellung] 79

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Mindestscherfestigkeit gemäß DIN EN 253, Tab. 6 [R4, S. 17].....	13
Tabelle 2: Stahl-Mediumrohr Grenzabmaße gemäß DIN EN 10216-2, Tab. 9 [R5, S. 33].	41
Tabelle 3: Maßprüfung Stahl-Mediumrohr Außendurchmesser [Eigene Darstellung].....	43
Tabelle 4: Maßprüfung Stahl-Mediumrohr Wanddicke [Eigene Darstellung].....	44
Tabelle 5: Maße der PE-Ummantelung gemäß DIN EN 253, Tab. 4 [R4, S. 16].....	46
Tabelle 6: Maßprüfung PE-Mantel Außendurchmesser [Eigene Darstellung]	47
Tabelle 7: Maßprüfung PE-Mantel Wanddicke [Eigene Darstellung]	49
Tabelle 8: Koaxialitätsabweichung gemäß DIN EN 253, Tab. 5 [R4, S. 16]	51
Tabelle 9: Maßprüfung der Koaxialitätsabweichung [Eigene Darstellung]	59
Tabelle 10: Mindestscherfestigkeit gemäß DIN EN 253, Tab. 6 [R4, S. 17].....	63
Tabelle 11: Ergänzende Maße zur Scherfestigkeitsprüfung [Eigene Darstellung]	67
Tabelle 12: Ergebnistabelle Schubmodul und mittlerer Schubmodul [Eigene Darstellung]	80

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

Abkürzungen

AGFW	Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e. V.
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
DN	Nennweite (Innendurchmesser-Nennmaß des Stahl-Mediumrohrs)
EKO	Einmalkompensator
EN	Europäische Norm
FW	Fernwärme
GEG	Gebäudeenergiegesetz
ISO	Internationale Organisation für Normung
KMR	Kunststoffmantelrohr
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
LS	linkes Schnittufer
MDI	Diphenylmethan-Diisocyanat
N	Neu
PE	Polyethylen
PE-HD	Polyethylen hoher Dichte
PIR	Polyisocyanurat
PUR	Polyurethan
P1/P2	Rohr 1 / Rohr 2
RS	rechtes Schnittufer
S	Single KMR
T	Twin KMR
WPG	Wärmeplanungsgesetz
4	bestellte Rohrlänge (in Metern)

Lateinische Buchstaben

a	Dämmdicke des PUR-Hartschaums [mm]
D	tatsächlicher Außendurchmesser der PE-Ummantelung [mm]
D_c	Nenn-Außendurchmesser der PE-Ummantelung [mm]
D_{max}	maximaler Außendurchmesser der PE-Ummantelung [mm]
D_{min}	Mindestaußendurchmesser der PE-Ummantelung [mm]
D_s	tatsächlicher Außendurchmesser des Stahl-Mediumrohrs [mm]
d_0	genormter Außendurchmesser des Stahl-Mediumrohrs [mm]
e	tatsächliche Wanddicke der PE-Ummantelung [mm]
EA	Dehnsteifigkeit des Stabs [kN]
EI	Biegesteifigkeit des Stabs [kNm ²]
e_{min}	Mindestwanddicke der PE-Ummantelung [mm]
F_{ax}	axiale Kraft inkl. des Eigengewichts des Stahl-Mediumrohrs [N]
F_G	Gewichtskraft des Stahl-Mediumrohrs [N]
F_0	festgelegte Vorkraft zur Prüfungsgeschwindigkeitsanpassung [N]
G	Schubmodul [MPa]
G_m	mittlerer Schubmodul [MPa]
L	Länge des Probekörpers im Verbund [mm]
L_s	Länge des Stahl-Mediumrohrs [cm]
m	Masse des Stahl-Mediumrohrs [g]
N	axiale Druckkraft [kN]
N_{ki}	kritische Knicklast [kN]
R_{eT}	temperaturabhängige Streckgrenze des Stahlwerkstoffs [MPa]
s_k	Knicklänge des Stabs [m]
t	tatsächliche Wanddicke des Stahl-Mediumrohrs [mm]
t_{max}	maximal zulässige Wanddicke des Stahl-Mediumrohrs [mm]

t_{min}	Mindestwanddicke des Stahl-Mediumrohrs [mm]
ΔT	Temperaturdifferenz [°C]
u_x	Scherweg in axialer Richtung des Probekörpers [mm]
∂u_x	Verschiebung in x-Richtung [mm]
∂u_y	Verschiebung in y-Richtung [mm]
$\frac{\partial u_x}{\partial y}$	Änderung der Verschiebung in x-Richtung senkrecht zur y-Achse [-]
$\frac{\partial u_y}{\partial x}$	Änderung der Verschiebung in y-Richtung senkrecht zur x-Achse [-]
v	Vorschubgeschwindigkeit der Prüfmaschine [mm/min]

Griechische Buchstaben

ρ_{PEHD}	Dichte von Polyethylen hoher Dichte [g/cm ³]
ρ_s	Dichte des Stahl-Mediumrohrs bei 20°C Temperatur [g/cm ³]
τ_{ax}	axiale Scherfestigkeit [MPa]
$\tau_{PUR,zul}$	zulässige axiale Scherspannung im PUR-Schaum [MPa]
τ_m	mittlere Schubspannung [MPa]
γ	Schubverzerrung [-]
μ	Reibungskoeffizient [-]
φ'	effektiver innere Reibungswinkel des Bodens [°]
σ_{ax}	axiale Spannung aus behinderter Temperaturdehnung [MPa]