

Internationaler Vergleich normativer Vorgaben im Fernwärmeleitungsbau

Studiengang: **Bauingenieurwesen**

Professur: **Technisches
Infrastrukturmanagement**

Abschlussarbeit: **Bachelorarbeit
zur Erlangung des
akademischen Grades
(B.Sc.)**

Erstprüfer: **Prof. Dr.-Ing. Ingo Weidlich**

Zweitprüferin: **Violeta Madan (M.Sc.)**

Verfasserin: **Elif Tosun**

Matrikelnummer: **6054181**

Mail: **elif.tosun@hcu-hamburg.de**

Abgabe: **04.08.2025**

Kurzfassung

Im Zuge der Energiewende in Deutschland wird ein Ausbau von klimaneutralen Wärmenetzen mit einem hohen Anteil an erneuerbaren Energien angestrebt und gefördert. Die Weiterentwicklung und Optimierung neuer sowie bestehender Fernwärmesysteme gewinnt daher zunehmend an Bedeutung. Die vorliegende Thesis untersucht die technische Umsetzbarkeit sowie die Effizienzpotenziale bei einer Integration chinesischer und koreanischer Einzelrohr-Verbundsysteme in europäische Fernwärmenetze. Ziel der Analyse ist es, mögliche technische Herausforderungen und Unterschiede in der Leistungsfähigkeit zu bewerten. Auf dieser Grundlage wird ermittelt, inwiefern der Import internationaler Fernwärmeleitungen einen ökonomischen und klimapolitischen Mehrwert für den zukünftigen Netzausbau bieten kann und ob eine Umsetzung in diesem Kontext sinnvoll erscheint.

Die Bewertung der Realisierbarkeit einer Integration internationaler Einzelrohr-Verbundsysteme in europäische Fernwärmenetze erfolgt auf Grundlage eines systematischen Vergleichs der normativen Vorgaben Chinas und Koreas mit den in der Europäischen Union gültigen DIN-Normen und weiteren Richtlinien.

Es werden ausschließlich nach DIN EN 253 genormte, direkt erdverlegte Kunststoffmantelrohrsysteme betrachtet. Diese bestehen aus einem Mediumrohr aus Stahl, einer Schicht aus Polyurethan-Hartschaumdämmung und einer äußeren Ummantelung aus Polyethylen. Der Vergleich erfolgt durch die Gegenüberstellung normativer Strukturierungen, Materialeigenschaften der Rohrkomponenten sowie betriebsrelevanter Parameter der Rohrsysteme.

Aus den identifizierten Differenzen lassen sich spezifische Herausforderungen im Hinblick auf Druck- und Wärmeverluste sowie auf die Ausführung der Verbindungstechniken bei einer Kombination der Rohrsysteme ableiten.

Im Rahmen der Analyse der Druckverluste infolge geometrischer Abweichungen wurden für die Verbindung chinesischer und koreanischer Rohrsysteme mit europäischen Leitungen lediglich vernachlässigbare Differenzen ermittelt.

Im Gegensatz dazu zeigen sich bezüglich der Wärmeverluste deutliche Unterschiede. Das chinesische Rohrsystem weist aufgrund geringerer Dämmstärke und ungünstigerer Wärmeleitfähigkeit erhöhte Wärmeverluste auf, wohingegen das koreanische System die besten thermischen Eigenschaften zeigt.

Geometrische Differenzen führen zudem zu Anpassungsbedarf bei Schweiß- und Muffenverbindungen. Dies betrifft insbesondere chinesisch-europäische Kombinationen, bei denen abweichende Außendurchmesser zu Problemen bei der Passgenauigkeit und Dichtheit der Muffenverbindungen führen können. Koreanische Leitungen zeigen hingegen eine weitgehende Übereinstimmung mit den europäischen Systemen, wodurch der technische Anpassungsaufwand bei der Verbindung geringer ausfällt.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die Konstruktion der Rohrverbindungen unter Berücksichtigung der geometrischen und werkstoffspezifischen Unterschiede der Rohrkomponenten individuell angepasst werden muss.

Die abschließende Bewertung der Realisierbarkeit einer Integration asiatischer Rohrsysteme in deutsche Fernwärmenetze kann nur unter Einbeziehung wirtschaftlicher und energetischer Faktoren erfolgen. Zwar ist durch den Import ein potenzieller Kostenvorteil hinsichtlich der Anschaffung zu erwarten, dieser kann jedoch durch erhöhte Wärmeverluste und den zusätzlichen konstruktiven Aufwand bei der Netzimplementierung langfristig zu einer Reduktion der Wirtschaftlichkeit und Effizienz führen.

Abstract

As part of Germany's energy transition, the expansion of climate-neutral district heating networks with a high share of renewable energy is being promoted and pursued. In this context, the further development and optimization of both new and existing district heating systems is gaining increasing importance.

This thesis investigates the technical feasibility and efficiency potential of integrating Chinese and Korean single-pipe composite systems into European district heating networks. The aim of the analysis is to assess potential technical challenges and differences in performance. On this basis, the study evaluates whether the import of international district heating pipes can offer economic and climate policy benefits for future network expansion and whether such implementation appears feasible.

The evaluation of the integration potential is based on a systematic comparison of the regulatory frameworks in China and Korea with the applicable DIN standards and other directives in the European Union. Only directly buried, pre-insulated plastic-jacket pipe systems standardized according to DIN EN 253 are considered. These consist of a steel service pipe, a layer of polyurethane (PUR) rigid foam insulation, and an outer polyethylene (PE) casing. The comparison focuses on regulatory structures, material properties of the pipe components, and operationally relevant parameters.

From the identified differences, specific challenges arise with regard to pressure and heat losses as well as to connection techniques when combining different pipe systems.

The analysis of pressure losses due to geometric deviations revealed only negligible differences for combinations involving Chinese and Korean systems with European pipes. In contrast, there are significant differences in heat losses: the Chinese system, due to its lower insulation thickness and less favorable thermal conductivity, exhibits higher heat losses, whereas the Korean system demonstrates superior thermal performance.

Geometrical differences also necessitate adjustments in welding and socket connections. This is particularly relevant for Chinese-European combinations, where differing outer diameters can lead to problems with fit and sealing. Korean systems, on the other hand, show high compatibility with European pipes, thus requiring fewer technical adaptations.

In conclusion, pipe connection designs must be individually adapted, taking into account geometrical and material-specific differences. The final evaluation of the integration feasibility of Asian pipe systems into German heating networks must include both economic and energy-related factors. While lower procurement costs through imports are possible, these may be offset by increased heat losses and additional structural adjustments, potentially reducing long-term efficiency and economic viability.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
1.1	Motivation.....	1
1.2	Theoretische Grundlagen.....	2
1.2.1	Aufbau der Einzelrohr-Verbundsysteme	2
1.2.2	Normen und Parameter	3
1.2.3	Materialien und Abmessungen	9
1.2.4	Werkstoffeigenschaften.....	22
1.2.5	Anforderungen an Installation und Betrieb	26
1.2.6	Hydraulische und wärmetechnische Grundlagen.....	30
1.2.7	Verbindungstechniken von Rohrsystemen	30
1.3	Zielsetzung und Methodik	33
2	Analyse technischer Herausforderungen bei der Kombination unterschiedlicher Rohrsysteme .	34
2.1	Hydraulischer Druckverlust.....	34
2.2	Wärmeverlust	45
2.3	Verbindungstechniken	49
2.3.1	Schweißverbindungen	49
2.3.2	Muffenverbindungen	51
3	Ergebnisse	53
3.1	Hydraulischer Druckverlust.....	53
3.2	Wärmeverlust	55
3.3	Verbindungstechniken	58
3.3.1	Schweißverbindungen	58
3.3.2	Muffenverbindungen	59
4	Fazit und Ausblick.....	62
4.1	Zusammenfassung der wichtigsten Erkenntnisse.....	62
4.2	Mögliche Entwicklungen und Herausforderungen	64
	Literaturverzeichnis	65

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2. 1: Plötzliche Erweiterung [Quelle: Eigene Darstellung]	34
Abbildung 2. 2: Plötzliche Verengung [Quelle: Eigene Darstellung]	35
Abbildung 2. 3: Lücken bedingt durch Abweichungen der Abmessungen [Quelle: Eigene Darstellung]	35
Abbildung 2. 4: Rohrverbindung mit kleinerem Querschnitt (international) [Quelle: Eigene Darstellung]	37
Abbildung 2. 5: Rohrverbindung mit größerem Querschnitt (international) [Quelle: Eigene Darstellung]	37
Abbildung 2. 6: Rohrverbindung mit gleichem Querschnitt (EU) [Quelle: Eigene Darstellung]	37
Abbildung 2. 7: Moody-Diagramm [Quelle: Jirka, Lang, 2009, S.21]	40
Abbildung 2. 8: Querschnitt Kunststoffmantelrohr [Quelle: Eigene Darstellung]	46
Abbildung 3. 1: Unregelmäßigkeit nach DIN EN ISO 5817 [Quelle: DIN EN ISO 5817:2023-07]	59
Abbildung 3. 2: Längsschnitt Verbindung Rohrsystem EU – Korea (KR) [Quelle: Eigene Darstellung]	60
Abbildung 3. 3: Längsschnitt Verbindung Rohrsystem EU – China (CN) [Quelle: Eigene Darstellung]	61

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht geltender Normen für Ausführung des Stahlmediumrohrs	4
Tabelle 2: Übersicht geltender Normen für die Ausführung der Dämmschicht	6
Tabelle 3: Übersicht geltender Normen für die Ausführung der Ummantelung	8
Tabelle 4: Technische Lieferbedingungen Stahlmediumrohr	10
Tabelle 5: Chemische Zusammensetzungen Stahlsorten	11
Tabelle 6: Technische Lieferbedingungen Dämmung	11
Tabelle 7: Technische Lieferbedingungen Ummantelung	12
Tabelle 8: Normen für Abmessung des Stahlmediumrohrs	13
Tabelle 9: Abmessungen Stahlmediumrohr [Maße in mm]	14
Tabelle 10: Übersicht Normen für die Abmessungen der Dämmschicht	15
Tabelle 11: Abmessungen Dämmschicht [Maße in mm]	16
Tabelle 12: Übersicht Normen für die Abmessungen der Ummantelung	18
Tabelle 13: Abmessungen Ummantelung [Maße in mm]	19
Tabelle 14: Maximaler Außendurchmesser der Ummantelung [Maße in mm]	22
Tabelle 15: Übersicht technische Eigenschaften der Stahlsorten für das Stahlmediumrohr	22
Tabelle 16: Übersicht technischer Eigenschaften der Dämmung	24
Tabelle 17: Übersicht technischer Eigenschaften der Ummantelung	25
Tabelle 18: Anforderungen Verlegung der Leitungen	27
Tabelle 19: Anforderungen Verbindung der Leitungen	28
Tabelle 20: Anforderungen an Betrieb der Leitungen	29
Tabelle 21: Ausgeführte Schweißverfahren für die Verbindung der Mediumrohre	31
Tabelle 22: Ausgeführte Muffenverbindungen	32
Tabelle 2. 1: Wärmeleitfähigkeiten der PUR-Hartschaumdämmung	45
Tabelle 2. 2: Abmessungen Innendurchmesser und Außendurchmesser Dämmung mit EU-Dämmserie 1 [Maße in mm]	47
Tabelle 2. 3: Abmessungen Innendurchmesser und Außendurchmesser Dämmung mit EU-Dämmserie 2 [Maße in mm]	47
Tabelle 2. 4: Mittlerer linearer Wärmeausdehnungskoeffizient zwischen 20 – 100 °C	50
Tabelle 3. 1: Druckverlustbeiwerte und Einzelwiderstände der Rohrkombinationen	54
Tabelle 3. 2: Wärmeverluste EU – Korea	55
Tabelle 3. 3: Wärmeverluste EU – China	56
Tabelle 3. 4: Wärmeverluste der Einzelrohr-Verbundsysteme	57

Nomenklatur

DN	Nennweite
d_o	Außendurchmesser Mediumrohr
t	Wanddicke
D_c	Nenn-Außendurchmesser Ummantelung
D_{max}	Maximaler Außendurchmesser Ummantelung
e_{min}	Mindestwanddicke Ummantelung
DS	Dämmserie
d_i	Innendurchmesser Dämmung
d_a	Außendurchmesser Dämmung
R_m	Zugfestigkeit
R_e	Streckgrenze
p_B	Maximal zulässiger Betriebsdruck
T_{max}	Maximal zulässige Betriebstemperatur
λ	Wärmeleitfähigkeit
ρ	Dichte
$f_{c,Nenn}$	Druckfestigkeit
τ	Scherfestigkeit
τ_{ax}	Axiale Scherfestigkeit
MFR	Schmelzfließrate
$\ddot{U}_H$	Überdeckungshöhe
ζ	Druckverlustbeiwert
A_1	Querschnittsfläche vor Erweiterung / Verengung
A_2	Querschnittsfläche nach Erweiterung / Verengung
v	Strömungsgeschwindigkeit
d	Innendurchmesser des Mediumrohrs
L	Länge der Leitung
d_{hyd}	Hydraulischer Durchmesser
ν	Kinematische Viskosität

Re	Reynoldszahl
k	Rauheitsgrad Rohrleitung
λ	Rohrreibungszahl
Δ	Gradient / Differenz
Δp_z	Druckverlust durch Einzelwiderstand
Δp	Druckverlust
λ_{50}	Wärmeleitfähigkeit bei einer Temperatur von 50 K
$\dot{Q}_v$	Wärmeverlust
K	Wärmeübertragungskoeffizient
T_i	Innentemperatur / Mediumtemperatur
T_a	Außentemperatur
λ_{iso}	Wärmeleitfähigkeit Isolation
ΔL	Längenausdehnung
α_T	Mittlerer linearer Wärmeausdehnungskoeffizient
ΔT	Temperaturdifferenz
KMR	Kunststoffmantelverbundrohr
PUR	Polyurethan-Hartschaum
PE	Polyethylen
HDPE	High-density Polyethylen (Hochfester Polyethylen)
ERW	Elektrisch widerstandsgeschweißt
SAW	Unterpulvergeschweißt

1 Einleitung

1.1 Motivation

Die Energieversorgung in Deutschland wird grundlegend umgebaut. Mit Einführung der Energiewende intendiert die Bundesregierung die Abkehr von nuklearen und fossilen Brennstoffen durch die Realisierung einer Energieversorgung aus nachhaltig nutzbaren, erneuerbaren sowie regenerativen Quellen. Die im Rahmen dieser angestrebten Wende eingeleiteten Maßnahmen konnten sich bereits auf die Stromerzeugung auswirken; mit einem Anteil von 59,4 % aus erneuerbaren Energiequellen im Jahr 2024 [1].

Während im Stromsektor Fortschritte bei der Energiewende verzeichnet werden konnten, sind für den Wärmesektor noch innovative Lösungen klimaneutraler Technologien auszuarbeiten und die Wärmeinfrastruktur ist zu optimieren. Als Anstoß für die zukünftige Umstrukturierung des Wärmenetzes dient der mit dem Gebäudeenergiegesetz (GEG) vorgesehene Betrieb neu installierter Heizungen mit einem Anteil von 65 % aus erneuerbaren Energien. Mit Unterstützung der Bundesregierung soll auf klimafreundliche Heizungen umgestiegen und der Verbrauch von fossilen Brennstoffen reduziert werden [2; vgl. §71, Abs.1 GEG [3]].

Ein zentrales Element der geförderten klimafreundlichen Wärmenetze ist die Fernwärme. Mit ihr ergibt sich die Möglichkeit, vor allem dicht besiedelte Gebiete mit klimaneutraler Wärme zu versorgen, indem auf erneuerbare Energiequellen sowie Abwärme zurückgegriffen wird. Ein Potenzial dafür zeigt sich in den bereits erfassten Daten zur Wärmeerzeugung für die Fernwärmenetze in Deutschland nach eingesetzten Energieträgern, mit einem Anteil von 31 % an klimaneutralen Quellen und erneuerbaren Energien [4].

Mit der zunehmenden Bedeutung der Wärmenetze für die zukünftige Wärmeversorgung in Deutschland, müssen die Netze entsprechend ausgebaut und optimiert werden. Es wird eine steigende Anzahl sowie Länge der Wärmenetze prognostiziert, was bereits in den vergangenen Jahren beobachtet wurde, mit insgesamt 4.184 Wärmenetzen und einer Gesamtrassenlänge von 35.383 km im Jahr 2022 [4].

Im Hinblick auf den geplanten Ausbau und die Entwicklung der Wärmenetze für die Zukunft entsteht die Herausforderung deutschlandweit eine qualitativ beständige, effiziente und insbesondere wirtschaftliche Wärmeversorgung aufzubauen.

Einen Hauptbestandteil dieser Netze stellen die Fernwärmeleitungen dar, welche in unterschiedlichen Ausführungen als Medium zum Transport der Wärme im Netz dienen. Ein Großteil der verlegten Fernwärmeleitungen bilden die dem starren Rohrsystem zugeordneten Kunststoffmantelverbundrohre (KMR), bestehend aus einem Stahlmediumrohr, einer thermischen Isolation (Dämmstoff) und einem Außenmantel aus Polyethylen (PE). Die überwiegend als Hauptleitungen für größere Fernwärmenetze eingebauten Rohrsysteme sind für hohe Temperaturen und Betriebsdrücke ausgelegt und aufgrund ihrer Bestandteile als die kostenintensivere Variante im Vergleich zu den flexiblen Verbundrohren zu betrachten. Für den Ausbau großer Netze ist es jedoch oftmals technisch nicht möglich ein kostengünstigeres System mit Verlegung flexibler Verbundrohre zu realisieren, weshalb andere Maßnahmen ergriffen werden müssen, um einen wirtschaftlichen Aus- sowie Neubau der insbesondere im Rahmen der Wärmewende vorgesehenen großen

Fernwärmenetze ermöglichen zu können.

In diesem Kontext wäre die Deckung der prognostizierten hohen Nachfrage von Verbundrohren durch Expansion auf den globalen Markt eine mögliche Lösung, um eine schnelle Bereitstellung einer größeren Menge von Rohren mit hoher Qualität gewährleisten zu können. Mit seinen hohen industriellen Kapazitäten und dem wachsenden Bausektor ist Asien als relevanter Importeur von Kunststoffmantelverbundrohren zu betrachten – insbesondere China, der weltweit führende Produzent und Importeur von Eisen und Stahl, mit stetig steigendem Fertigungsniveau durch Entwicklung modernster Herstellungstechnologien. Mit einem der größten Fernwärmenetze weltweit hat das Land nicht nur im Rahmen der Konstruktion einer großen Wärmeinfrastruktur technische Fortschritte geleistet, sondern ebenfalls durch die Errichtung neu entwickelter nuklearer Anlagen erste Projekte für die Realisierung einer umweltschonenderen Heizlösung ohne den Verbrauch von Kohle fertiggestellt [5].

Des Weiteren verfolgt Korea ähnliche Ziele und fördert den Ausbau der Kernenergie, um zukünftig auf fossile Brennstoffe verzichten zu können. Wie auch Deutschland verfolgt Korea das Ziel die Treibhausgasemissionen zu verhindern [6], was sich aufgrund der stark ausgebauten Industrie im Bereich Stahl, Halbleiter, Automobil sowie Petrochemie als eine große Herausforderung erweist. Um die angestrebte neue Energiepolitik in dem Land weiterentwickeln und durchsetzen zu können, führt das Land zudem mit Deutschland einen bilateralen Austausch im Energiebereich und betreibt seit 2019 im Rahmen der Koreanisch-Deutschen Energiepartnerschaft eine Zusammenarbeit, um gemeinsam die Herausforderungen im Kontext der Energiewende bewältigen zu können [7]. Eine Grundlage, welche außerdem einen möglichen Import von koreanischen Rohren nach Deutschland begünstigen würde.

1.2 Theoretische Grundlagen

Für das Verständnis des Vergleichs der internationalen Vorgaben der Einzelrohr-Verbundsysteme und die Ermittlung ihrer Gemeinsamkeiten und Unterschiede, ist es erforderlich, die technischen Grundlagen dieser Systeme zu erläutern. In den folgenden Abschnitten werden die relevanten Informationen zu dem generellen Aufbau des Systems mit seinen Einzelkomponenten und deren Funktionen sowie Eigenschaften zusammengefasst und zentrale Grundlagen der Hydraulik, Wärmetechnik sowie der Verbindungstechniken von Rohrsystemen aufgeführt. Des Weiteren werden grundlegende Begriffe sowie der Aufbau der Normung erläutert, auf denen der Vergleich zwischen der Europäischen Union (EU), China und Korea basiert.

1.2.1 Aufbau der Einzelrohr-Verbundsysteme

Die einem starren Verbundsystem zugeordneten Einzelrohr-Verbundsysteme bestehen in der Regel aus drei Komponenten, welche jeweils unterschiedliche Funktionen des Systems erfüllen: dem Mediumrohr aus Stahl, der Wärmedämmung und der schützenden Ummantelung aus Kunststoff.

Das Mediumrohr dient der Beförderung des thermischen Mediums, bei dem es sich um Wasser oder Dampf handeln kann. Das Rohr muss dementsprechend den thermischen sowie mechanischen Belastungen standhalten können.

Die wesentliche Aufgabe der Wärmedämmung besteht darin, die Effizienz des Wärmenetzes zu gewährleisten, indem Wärmeverluste während des Mediumtransports weitestgehend minimiert werden.

Die Kunststoffummantelung hat die Funktion, das Rohrsystem vor mechanischen sowie anderweitigen äußeren Einwirkungen zu schützen und einen langjährigen Betrieb der Leitungen sicherzustellen.

1.2.2 Normen und Parameter

Für die Planung, Ausführung und den Betrieb des Rohrleitungssystems sind umfangreiche Anforderungen und Vorgaben im Rahmen von nationalen sowie internationalen Normen gegeben. Die Normwerke können dabei entweder spezifizierte Richtlinien zur Auslegung von Einzelrohr-Verbundsystemen oder Normen für Anforderungen an die technische Ausführung im Zuge des Liefer- und Installationsprozesses umfassen.

In diesem Zusammenhang sind vor allem folgende technische Begriffe relevant:

- DN (Diameter Nominal / Nenndurchmesser): Nenndurchmesser eines Rohrsystems als dimensionslose Kennzahl für ein Referenzmaß
- D_o (Außendurchmesser): Außendurchmesser des Rohres in Millimeter. Eine maßliche Größe mit Angabe des tatsächlichen Durchmessers bis zur Außenkante des Rohres
- D_i (Innendurchmesser): Innendurchmesser des Rohres in Millimeter. Eine maßliche Größe mit Angabe des tatsächlichen Durchmessers bis zur Innenkante des Rohres. Er stellt die maßgebliche Größe für die hydraulische Berechnung und Ermittlung der Druckverluste dar
- p_B (Maximal zulässiger Betriebsdruck): Höchster statischer Druck in bar, unter dem das Rohrsystem – abhängig von Material, Dimensionierung und Temperatur – dauerhaft sicher betrieben werden darf
- T_{max} (Maximal zulässige Betriebstemperatur): Höchste Temperatur in Celsius, bei der das Rohrsystem materialabhängig betrieben werden darf

Die spezifischen Anforderungen und Standards für die Auslegung, Installation und Zusammensetzung der einzusetzenden Einzelrohr-Verbundsysteme sind in den jeweiligen Normen und Richtlinien vorgegeben. Für die Überprüfung, ob die in den Nationen China und Korea ausgeführten Rohrsysteme in die deutschen Wärmenetze integrierbar sind, müssen sämtliche Vorgaben zu den technischen Merkmalen der einzelnen Komponenten, den Abmessungen des Rohrsystems und den Qualitätsanforderungen der Materialien (im Rahmen der Prüfverfahren) den zugehörigen Normen entnommen und den in der EU geltenden normativen Festlegungen gegenübergestellt werden.

In dem folgenden Abschnitt werden die spezifischen Normen sowie Richtlinien für alle relevanten Vorgaben zu Einzelrohr-Verbundsystemen aus China, Korea und der EU aufgelistet und beschrieben.

In Tabelle 1 können die geltenden Normen für die Ausführung des Stahlrohrs als Bestandteil des Verbundsystems zur Gewährleistung des Medium Transports entnommen werden.

Mediumrohr

EU	China	Korea
DIN EN 253 Fernwärmerohre – Einzelrohr-Verbundsysteme für direkt erdverlegte Fernwärmenetze	GB/T 29047 Prefabricated directly buried insulating pipes and fittings with polyurethane foamed- plastics and high density polyethylene casing pipes	
DIN EN 13941-1 Fernwärmerohre - Auslegung und Installation von gedämmten Einzel- und Doppelrohr- Verbundsystemen für direkt erdverlegte Fernwärmenetze	GB/T 29046 Detection methods of technical specification for pre-insulated district heating pipes	
	GB/T 9711 Petroleum and natural gas industries - Steel pipe for pipeline transportation systems	
DIN EN 10216-2 Nahtlose Stahlrohre für Druckbeanspruchungen – Technische Lieferbedingungen	GB/T 8163 Seamless steel pipe for liquid service	KS D 3562 Carbon steel pipes for pressure service
DIN EN 10217-1 Geschweißte Stahlrohre für Druckbeanspruchungen – Technische Lieferbedingungen (elektrisch und unterpulvergeschweißt)	GB/T 3091 Welded steel pipes for low pressure liquid delivery	
DIN EN 10217-2 Geschweißte Stahlrohre für Druckbeanspruchungen – Technische Lieferbedingungen (elektrisch geschweißt)	(SY/T T5037 Submerged arc-welded steel pipe for common fluid service pipeline)	KS D 3583 Arc welded carbon steel pipes
AGFW FW 401 Kunststoffmantelrohre (KMR) als Verlegesystem in der Fernwärme		

Tabelle 1: Übersicht geltender Normen für Ausführung des Stahlmediumrohrs

Die Grundlage für die Anforderungen und Prüfverfahren von Einzelrohr-Verbundsystemen in der EU bildet die DIN EN 253 [8], welche zusätzlich die geltenden Vorgaben für das Mediumrohr aus Stahl bereitstellt. Die für die Herstellung des Mediumrohrs zulässigen Ausführungsweisen und Materialeigenschaften sind der DIN EN 13941-1 [9] zu entnehmen, die alle Vorgaben zusammenfasst und auf die relevanten Normen zur Einhaltung der technischen Lieferbedingungen der einzusetzenden nahtlosen sowie geschweißten Stahlrohre für Druckbeanspruchungen verweist (s.

Spalte 3-5). Die geschweißten Rohre sind nach DIN EN 10217-1 [10] und 10217-2 [11] auszuführen, da die in den Normen vorgegebenen Eigenschaften und Anforderungen der Verwendung von Rohren bei erhöhten Temperaturen angepasst und für die Verwendung im Fernwärmeleitungsbau in Verbindung mit Wärmetauschern geeignet sind.

Ähnlich zu der DIN EN 253 in Europa werden in China im Rahmen der Norm GB/T 29047 [12] die grundlegenden Anforderungen an das Verbundsystem aufgelistet und die dazugehörigen Normen für die Ausführung der einzusetzenden Stahlrohre vorgegeben. Die Norm GB/T 29046 [13] führt die auszuführenden Prüfverfahren für die vorisolierten Verbundsysteme auf, die erforderlich sind, um eine Qualitätssicherung der verlegten Rohrsysteme in seinen einzelnen Komponenten zu gewährleisten. Die technischen Lieferbedingungen sind entsprechend der europäischen Normung in Richtlinien für die Herstellung von nahtlosen, elektrischen sowie unterpulvergeschweißten Stahlrohren für Druckbeanspruchungen auf gegliedert. Die Entwicklung und Veröffentlichung der Guobiao (deutsch: „nationale Norm“) – kurz GB-Standards erfolgt durch die staatliche Behörde Standardization Administration of China (SAC) [14]. Es werden verpflichtende sowie empfohlene Normen von dem Normungsinstitut entwickelt; die empfohlenen Normen sind mit dem Buchstaben „T“ gekennzeichnet [14].

In der koreanischen Normung ist keine offizielle Richtlinie für die Ausführung von Einzelrohr-Verbundsystemen für Fernwärmenetze vorhanden, es gelten lediglich Vorgaben für die industrielle Standardisierung in Form der Korean Industrial Standards (KS). Diese werden von den koreanischen Normungsorganisationen Korean Agency for Technology and Standards (KATS) sowie der Korean Standards Association (KSA) entwickelt, um die konstante Sicherheit und Qualität unterschiedlicher Produkte und Dienstleistungen auf dem koreanischen Markt zu gewährleisten [15]. Gemäß der Herstellerdaten für die Qualitätsanforderungen des Stahlmediumrohrs des Kunststoffmantelverbundsystems ist die Ausführung von nahtlosen und geschweißten Rohren für Druckbeanspruchungen entsprechend der KS D Normen erforderlich [16]. Die Kennzeichnung „D“ definiert hierbei die zugehörige Kategorie des standardisierten Produkts; für die Stahlrohre erfolgt die Einordnung zur Kategorie D, dem Metallsektor [17].

Für jede Nation sind Vorgaben hinsichtlich der Eigenschaften, Zusammensetzung sowie der Anwendung des einzusetzenden Stahlmediumrohrs für das Verbundsystem im Rahmen mehrerer Normen gegeben. Bei dem Vergleich der verschiedenen Normen wird ersichtlich, dass ähnliche Richtlinien für die zulässigen Ausführungsweisen eines nahtlosen oder geschweißten Stahlrohrs für Druckbeanspruchungen in den jeweiligen Nationen maßgebend sind.

Für die Bestimmung der Anforderungen an die Eigenschaften der Dämmschicht sind die in Tabelle 2 aufgelisteten Normen der Nationen gültig.

Dämmung

EU	China	Korea
DIN EN 253 Fernwärmerohre – Einzelrohr- Verbundsysteme für direkt erdverlegte Fernwärmenetze	GB/T 29047 Prefabricated directly buried insulating pipes and fittings with polyurethane foamed- plastics and high density polyethylene casing pipes	DIN EN 253 Fernwärmerohre – Einzelrohr- Verbundsysteme für direkt erdverlegte Fernwärmenetze
DIN EN 13941-1 Fernwärmerohre - Auslegung und Installation von gedämmten Einzel- und Doppelrohr- Verbundsystemen für direkt erdverlegte Fernwärmenetze	GB/T 29046 Detection methods of technical specification for pre-insulated district heating pipes	
DIN EN 448 Einzelrohr-Verbundsysteme für direkt erdverlegte Fernwärmenetze - Werkmäßig gefertigte Stahl- Absperrarmaturen für Stahl- Mediumrohre, Wärmedämmung aus Polyurethan und einer Ummantelung aus Polyethylen		DIN EN 448 Einzelrohr-Verbundsysteme für direkt erdverlegte Fernwärmenetze - Werkmäßig gefertigte Stahl- Absperrarmaturen für Stahl- Mediumrohre, Wärmedämmung aus Polyurethan und einer Ummantelung aus Polyethylen
DIN EN 489-1 Fernwärmerohre - Einzel- und Doppelrohr-Verbundsysteme für erdverlegte Fernwärmenetze - Teil 1: Mantelrohrverbindungen und Wärmedämmung nach EN 13941-1		DIN EN 489-1 Fernwärmerohre - Einzel- und Doppelrohr-Verbundsysteme für erdverlegte Fernwärmenetze - Teil 1: Mantelrohrverbindungen und Wärmedämmung nach EN 13941-1

Tabelle 2: Übersicht geltender Normen für die Ausführung der Dämmschicht

Im Gegenteil zu dem Stahlmediumrohr, sind keine gesonderten Normen für die Bestimmung der Materialeigenschaften und Zusammensetzung der Dämmung in der europäischen Normung vorhanden. Die technischen Details zur Ausführung der Dämmschicht können der DIN EN 253 entnommen werden, die sämtliche Vorgaben zu den einzelnen Rohrsystemkomponenten zusammenfasst. In der Norm DIN EN 448 [18] sind maßgebende Prüfanforderungen für die Ausführung der festgesetzten Prüfverfahren der einzelnen Komponenten eines werkmäßig hergestellten Verbundformstückes ausgeführt. Die DIN EN 489-1 [19] beinhaltet die Vorgaben für die Ausführung der Dämmschicht für die Verbindung zwischen angrenzenden werkseitig hergestellten Rohr- und/oder Formteil- und/oder Armaturenbaugruppen, wobei für die Bestimmung der Eigenschaften der Dämmung auf die DIN EN 253 verwiesen wird.

Die Normung in China wird in ähnlicher Weise umgesetzt. Die Anforderungen an die einzubauende Dämmschicht sind ebenfalls in der GB-Norm der Einzelrohr-Verbundsysteme und der dazugehörigen Richtlinie für die anzuwendenden Prüfverfahren gegeben und werden in keiner weiteren Richtlinie spezifiziert.

Für die Ausführung der Dämmschicht des Verbundsystems sind in Korea keine Normen im Rahmen der Korean Industrial Standards gegeben, was sich u.a. damit begründen lässt, dass für die Herstellung der Einzelrohr-Verbundsysteme keine eigene übergreifende Richtlinie von den koreanischen Normungsorganisationen entwickelt wurde. Gemäß Angaben der Hersteller richtet sich die Ausführung nach international anerkannten Normen, demnach sind die Vorgaben der DIN EN 253 für die Dämmschicht maßgebend [16].

Bei einem Vergleich der normativen Vorgaben für die Ausführung der Dämmschicht stellt sich heraus, dass in der europäischen Normung die Informationen für die Herstellung und den Einbau der Dämmschicht in unterschiedliche Richtlinien aufgegliedert sind. In China lassen sich diese Angaben aus zwei übergreifenden Normen entnehmen, während sich die koreanische Normung an die international verbreiteten Standards aus der EU orientiert.

Die Anforderungen an die Herstellung der Ummantelung des Einzelrohr-Verbundsystems werden in den in Tabelle 3 aufgeführten Normen der einzelnen Nationen vorgegeben.

Ummantelung

EU	China	Korea
DIN EN 253 Fernwärmerohre – Einzelrohr-Verbundsysteme für direkt erdverlegte Fernwärmenetze	GB/T 29047 Prefabricated directly buried insulating pipes and fittings with polyurethane foamed- plastics and high density polyethylene casing pipes	DIN EN 253 Fernwärmerohre – Einzelrohr- Verbundsysteme für direkt erdverlegte Fernwärmenetze
DIN EN 13941-1 Fernwärmerohre - Auslegung und Installation von gedämmten Einzel- und Doppelrohr- Verbundsystemen für direkt erdverlegte Fernwärmenetze	GB/T 29046 Detection methods of technical specification for pre-insulated district heating pipes	
DIN EN 448 Einzelrohr-Verbundsysteme für direkt erdverlegte Fernwärmenetze - Werkmäßig gefertigte Stahl- Absperrarmaturen für Stahl- Mediumrohre, Wärmedämmung aus Polyurethan und einer Ummantelung aus Polyethylen	GB/T 18475-2001 Thermoplastics materials for pipes and fittings for pressure applications - Classification and designation - Overall service (design) coefficient	DIN EN 448 Einzelrohr-Verbundsysteme für direkt erdverlegte Fernwärmenetze - Werkmäßig gefertigte Stahl- Absperrarmaturen für Stahl- Mediumrohre, Wärmedämmung aus Polyurethan und einer Ummantelung aus Polyethylen
DIN EN 489-1 Fernwärmerohre - Einzel- und Doppelrohr-Verbundsysteme für erdverlegte Fernwärmenetze - Teil 1: Mantelrohrverbindungen und Wärmedämmung nach EN 13941-1		DIN EN 489-1 Fernwärmerohre - Einzel- und Doppelrohr-Verbundsysteme für erdverlegte Fernwärmenetze - Teil 1: Mantelrohrverbindungen und Wärmedämmung nach EN 13941-1
DIN 8075 Rohre aus Polyethylen (PE) - PE 80, PE 100 - Allgemeine Güteanforderungen		
DIN EN ISO 1133-1 Kunststoffe - Bestimmung der Schmelze-Massefließrate (MFR) und der Schmelze- Volumenfließrate (MVR) von Thermoplasten - Teil 1: Allgemeines Prüfverfahren		

Tabelle 3: Übersicht geltender Normen für die Ausführung der Ummantelung

Im Rahmen der europäischen Normung sind die allgemein geltenden Normen DIN EN 253 und DIN EN 13941-1 für die Fernwärme auch für die Herstellung der Ummantelung gültig, während in der DIN EN 448 die maßgebenden Anforderungen zur Ausführung der Prüfverfahren der Mantelschicht festgelegt sind. Die DIN EN 489-1 ist für die Ummantelung im Rahmen der Qualitätsprüfung der Mantelrohrverbindung relevant. In der DIN 8075 [20] werden die allgemeinen Güteanforderungen der Mantelschicht aufgeführt; die DIN EN ISO 1133 [21] beschreibt das anzuwendende Verfahren zur Bestimmung des Schmelzindex von Thermoplasten.

In China gelten für die Mantelschicht die allgemeinen Anforderungen und Prüfverfahren nach GB/T 29047 sowie GB/T 29046. Die GB/T 18475-2001 [22] spezifiziert die Benennung und Klassifizierung des thermoplastischen Materials für die Ausführung von Druckrohren, weshalb sie auch bei der Herstellung der Mantelschicht des Einzelrohr-Verbundsystems zur Anwendung kommt.

Die koreanische Normung richtet sich bei der Ausführung der Ummantelung an die international geltenden Normen und Standards. Die Hersteller richten sich bei der Produktion, wie bei der Dämmschicht, an die DIN EN 253 sowie weitere maßgebliche europäischen Normen und können eine hohe Qualität und Zuverlässigkeit ihrer Verbundsysteme gewährleisten [16].

Die normativen Vorgaben zur Herstellung der Mantelschicht des Rohrsystems in der EU sind ähnlich aufgegliedert wie die Angaben und Anforderungen zur Dämmung. In China sind die übergreifenden Normen maßgebend, während die koreanischen Vorgaben sich, wie bei der Ausführung der Dämmschicht, an die europäischen Richtlinien halten.

Zusammenfassend kann die Aussage getroffen werden, dass in der EU ein umfassendes Regelwerk für die Planung, Herstellung und Installation von erdverlegten, vorisolierten Fernwärmerohrsystemen vorliegt und ebenfalls in der globalen Normierung, wie in den normativen Vorgaben aus Korea, als Standard für die Ausführung von Fernwärmeleitungen dient.

China besitzt für die Ausführung der Fernwärmenetze eigene fundierte Richtlinien, die – ähnlich wie in der europäischen Normung – in Anforderungen an die einzusetzenden Komponenten sowie in durchzuführenden Prüfverfahren zur Qualitätssicherung gegliedert sind.

1.2.3 Materialien und Abmessungen

1.2.3.1 Materialien

Ein Einzelrohr-Verbundsystem besteht aus mehreren Komponenten und lässt sich in zwei verschiedene Rohrsysteme unterteilen: dem starren und dem flexiblen Rohrsystem. In diesem Vergleich wird ausschließlich das starre Rohrsystem betrachtet, das sich aus folgenden Komponenten zusammensetzt: dem Stahlmediumrohr, der Dämmschicht und der Kunststoffummantelung.

In dem folgenden Abschnitt werden die normativ vorgegebenen einzusetzenden Materialien für die Ausführung der drei Komponenten in den jeweiligen Nationen aufgelistet und verglichen.

Zur ausführlichen Veranschaulichung der Gemeinsamkeiten und Unterschiede werden die nationalen Vorgaben jeweils einer Komponente in einem tabellarischen Vergleich gegenübergestellt.

1.2.3.1.1 Stahlmediumrohr

Die Tabelle 4 zeigt die aus den in Kapitel 1.2.2 gegebenen Vorgaben resultierenden zulässigen Materialien für die Ausführung des Stahlmediumrohres.

Mediumrohr

Rohrtyp	EU		China		Korea	
	Norm	Werkstoff	Norm	Werkstoff	Norm	Werkstoff
Nahtlos	DIN EN 10216-2	P235GH	GB/T 8613	20#	KS D 3562	SPPS 42
ERW	DIN EN 10217-2	P235GH	GB/T 3091	Q235B	KS D 3562	SPPS 42
SAW	DIN EN 10217-5	P235GH	GB/T 3091	Q235B	KS D 3583	SPW 41

Tabelle 4: Technische Lieferbedingungen Stahlmediumrohr

Die im Rahmen der europäischen Normung zugelassenen Mediumrohre werden in Form von nahtlos geschweißten, elektrisch widerstandsgeschweißten („Electric Resistance Welding“ (ERW), deutsch: „Elektrisch widerstandsgeschweißt“) oder unterpulvergeschweißten Rohren („Submerged Arc Welding“ (SAW), deutsch: „Unterpulverschweißen“) der Stahlgüte P235GH hergestellt. Charakterisiert wird der Stahl durch seine hohe Plastizität und Zähigkeit, besonders geeignet für Anwendungen mit hohen Temperaturen sowie Betriebsdrücken. Das „P“ steht für „Pressure“ (deutsch: „Druck“), die Zahl 235 gibt die Mindeststreckgrenze des Stahls in MPa an [23] und die Zusatzkennzeichen „GH“ definieren, dass der Stahl für Hochtemperatur-Anwendungen geeignet ist [24].

Die verschiedenen Herstellungen des Stahlrohres sind in den jeweiligen Normen vorgegeben, wobei die technischen Lieferbedingungen für nahtlose Rohre in der DIN EN 10216 [26] und für geschweißte Rohre in der DIN EN 10217 vorzufinden sind [25].

Die Aufteilung der Vorgaben zur Herstellung der nahtlosen und geschweißten Rohre wird in China ähnlich aufgegliedert; in die GB/T 8613 für nahtlose und GB/T 3091 für geschweißte Rohrprofile. Die Werkstoffbezeichnung wird in den Normen differenziert; „20#“ stellt die Bezeichnung des vorgegebenen Stahls nach der GB/T 8613 dar, wobei der Wert 20 den Kohlenstoffanteil von 0,17-0,23 % der Gesamtmasse vordefiniert [27]. Als Äquivalent zu dieser Norm wird die amerikanische Norm ASTM A53 B betrachtet [28]. Als Vergleich kann die äquivalente Norm des Werkstoffes P235GH herangezogen werden; die amerikanische Richtlinie ASTM A106 [29].

Für die geschweißten Rohre muss gemäß GB/T 3091 ein Stahl des Typs Q235B hergestellt werden. Der Buchstabe „Q“ steht für den Anfangsbuchstaben des Begriffes „Qu Fu Dian“ (deutsch: „Streckgrenze“), die Zahl 235 für die Streckgrenze für einen Stahl mit einer Stärke kleiner gleich 16 mm von 235 MPa. Die Streckgrenze nimmt für den Stahl mit zunehmender Wanddicke ab [30].

In Korea wird gemäß dem koreanischen Standard KS D 3562 der Werkstoff SPPS 42 für die Herstellung des Mediumrohres aus nahtlosem Stahl verwendet. Die Bezeichnung SPPS wird definiert zu „Steel Pipe for Pressure Service“ (deutsch: „Stahlrohr für Druckbeanspruchung“), die „42“ bezieht sich auf die Zugfestigkeit des Stahls mit 42,0 kgf/mm² ($\approx$ 412,0 MPa). Anders als in der Normung in der EU und China, sind die elektrisch widerstandsgeschweißten Rohre ebenfalls in der KS D 3562 als SPPS 42 aufgeführt. Für die unterpulverschweißten Rohre wird ein anderer Stahl mit der Kennzeichnung SPW 41 verwendet. Die Bezeichnung „SPW“ beschreibt die Verarbeitungsweise des Stahls mit „Steel Pipe Welded“ (deutsch: „Stahlrohr geschweißt“), die Zahl „400“ bezieht sich auf die Zugfestigkeit des Stahls mit 400 N/mm². Wie für die nahtlos verarbeiteten Rohre, ist die ASTM A53 B auch für die nach dem koreanischen Standard hergestellten Rohre als Äquivalent zu betrachten. Für die unterpulverschweißte Ausführung wird die Norm ASTM A53 A als Vergleich herangezogen.

In Tabelle 5 sind die Vorgaben zu den chemischen Zusammensetzungen der Materialien in Masseprozent der Stahlmediumrohre aufgelistet [31].

	C [%] max.	Si [%] min.	Mn [%] max.	P [%] max.	S [%] max.	Cr [%] max.	Cu [%] max.	Mo [%] max.	Ni [%] max.	V [%] max.
P235GH	0,16	0,35	1,2	0,025	0,01	0,3	0,3	0,08	0,3	0,02
20#	0,23	0,37	0,65	0,03	0,03	0,25	0,2		0,3	
Q235B	0,2	0,35	1,4	0,045	0,045	0,3	0,3		0,3	
SPPS 42	0,3	0,35	1	0,04	0,04					
SPW 41	0,25			0,04	0,04					

Tabelle 5: Chemische Zusammensetzungen Stahlsorten

Es wird deutlich, dass der in der EU eingesetzte Stahl P235GH die meisten Bestandteile und als einziger Stahl die Stoffe Molybdän und Vanadium enthält. Der unterpulververschweißte Stahl SPW 41, der in Korea für die Herstellung der Stahlrohre eingesetzt wird, besteht aus der Zusammensetzung mit den wenigsten Inhaltsstoffen. Alle Stahlsorten beinhalten die chemischen Komponenten Kohlenstoff, Phosphor und Schwefel. Mangan und Silicium sind bis auf den SPW 41 in jeder Stahlsorte vorhanden, wobei Mangan in diesen Ausführungen den prozentual höchsten Anteil der Zusammensetzung bildet.

1.2.3.1.2 Dämmung

Die Dämmschicht des Einzelrohr-Verbundsystems übernimmt eine für den Einsatz des Verbundsystems zentrale technische Funktion. Mit ihr wird nicht nur der Transport des Mediums für die Fernwärme mit minimiertem Wärmeverlust ermöglicht, sondern auch das Rohrsystem vor äußeren Einflüssen geschützt. Diese Eigenschaft ist vor allem in Bezug auf die Kraftübertragung im Verbund relevant, da die Dämmung hier zusätzlich eine mechanische Funktion übernimmt. Mit der vollflächigen Umschließung des Mediumrohrs dient sie als kraftübertragendes Füllmaterial zwischen dem Mediumrohr und der Ummantelung und kann bei äußeren Belastungen die Gewährleistung einer gleichmäßigen Verteilung der Kräfte unterstützen.

In der Tabelle 6 ist die einzusetzende Dämmung mit den dazugehörigen normativen Richtlinien der jeweiligen Nationen aufgeführt.

EU		China		Korea	
Norm	Material	Norm	Material	Norm	Material
DIN EN 253	Polyurethan-Hartschaum	GB/T 29047, GB/T 29046	Polyurethan-Hartschaum	DIN EN 253	Polyurethan-Hartschaum

Tabelle 6: Technische Lieferbedingungen Dämmung

Aus der Auswertung der vorliegenden Daten für die einzubauenden Materialien für die Dämmschicht wird ersichtlich, dass übergreifend das Material Polyurethan-Hartschaum (PUR) verwendet wird. In allen Nationen sind für den Einbau der Dämmung die Anforderungen an die Qualität und Ausführung in der übergeordneten Norm zur Herstellung der Einzelrohr-Verbundsysteme maßgebend. Wie bereits in Kapitel 1.2.2 ermittelt, richtet sich Korea bei der Produktion der Verbundrohrkomponenten Dämmung und Mantelrohr an die in der EU geltenden Richtlinien, weshalb die DIN EN 253 als Standard für die Ausführung der Dämmschicht vorgesehen ist ([32], [33]).

1.2.3.1.3 Ummantelung

Die Ummantelung des Einzelrohr-Verbundsystems ist ein zentrales Element des Rohrverbunds und übernimmt die relevantesten Funktionen, um einen langlebigen Betrieb der Leitungen gewährleisten zu können. Der aus Kunststoff angefertigte Mantel umschließt die PUR-Hartschaumdämmung sowie das innenliegende Stahlmediumrohr und dient als äußere Schutzschicht. In der Regel wird die Schicht aus Polyethylen (PE) hergestellt. Die wesentliche Funktion des Mantels ist der Schutz des Rohrsystems vor äußeren mechanischen Einwirkungen, Witterung sowie Korrosion in Abhängigkeit von Feuchtigkeit und anderen chemischen Einflüssen aus der Umgebung. Im Herstellungsprozess des Rohrsystems entsteht zudem eine kraftschlüssige Verbindung zwischen dem PE-Mantel und der Dämmung, die zu einer optimierten Stabilität des Gesamtsystems beiträgt.

In der Tabelle 7 werden die in den internationalen Normen festgesetzten Vorgaben für die Materialbestimmung der Kunststoffummantelung dargestellt.

EU		China		Korea	
Norm	Material	Norm	Material	Norm	Material
DIN EN 253	Hart-Polyethylen PE80	GB/T 29047, GB/T 29046	Hart-Polyethylen PE80	DIN EN 253	Hart-Polyethylen PE80

Tabelle 7: Technische Lieferbedingungen Ummantelung

Die Quellen, aus denen die Vorgaben für die Ausführung der Ummantelung resultieren, sind identisch mit den Richtlinien, die für die Materialauswahl der Dämmschicht maßgebend sind.

In der EU gilt es die Angaben der DIN EN 253 für die Herstellung des Mantels aus Polyethylen zu berücksichtigen. Der Mantel ist entsprechend den Anforderungen der Norm als PE80-Werkstoff zu klassifizieren. Diese Festsetzung lässt darauf schließen, dass im Rahmen der Konstruktion des Rohrsystems die Ummantelung mindestens aus einem Polyethylen mittlerer Dichte produziert werden muss. Mit seiner hohen chemischen Beständigkeit wird der Werkstoff oft als Hart-Polyethylen (PE-HD, HD für „high density“, deutsch: „hohe Dichte“) definiert. Genauere Angaben zu diesen Eigenschaften werden in Kapitel 1.2.4.3 aufgeführt. Des Weiteren zeichnet sich der Werkstoff durch seine Korrosionsbeständigkeit, seine leichte Schweißbarkeit und Flexibilität aus [34]. Die Ziffer „80“ bezieht sich bei dem Polyethylen auf den Zeitstand-Innendruck als Minimum Required Strength (MRS, deutsch: „Minimal erforderliche Kraft“) mit $8,0 \text{ N/mm}^2 (\cong 80 \text{ bar})$.

In der geltenden Norm GB/T 29046 für China ist die Ummantelung des Rohrsystem ebenfalls mindestens mit einem Polyethylen der Kategorie PE80 auszuführen.

Das koreanische Normungssystem richtet sich bei den Vorgaben zur Mantelschicht erneut an die in Europa geltenden Standards, weshalb der gemäß DIN EN 253 festgesetzte Werkstoff Polyethylen mit mindestens einer Klassifizierung als PE80 auszuführen ist [16].

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass sich viele Gemeinsamkeiten in den Vorgaben für die Auswahl der Materialien des Rohrsystems der EU, China und Korea zeigen. Die meisten Unterschiede sind für den Werkstoff des Stahlmediumrohrs vorhanden, bei dem die jeweiligen Werkstoffe in ihren chemischen Bestandteilen differenzieren.

Die normativen Vorgaben sind teilweise, wie der Vergleich zwischen Europa und Korea zeigt, identisch und dementsprechend gelten für die Auswahl und Anforderungen an die Komponenten dieselben Richtlinien. In China liegen im Rahmen der GB/T 29046 zwar eigene Vorgaben für die Bestandteile des Rohrsystems vor, dennoch ergeben sich bei dem Vergleich der Materialien mit denen der übrigen Nationen keine signifikanten Unterschiede.

Eine genaue Gegenüberstellung der technischen Eigenschaften der Komponenten des Rohrsystems in Abhängigkeit der geltenden internationalen normativen Vorgaben wird in Kapitel 1.2.4 aufgeführt.

1.2.3.2 Abmessungen

Entscheidend für die Ausführung eines Einzelrohr-Verbundsystems sind nicht nur Materialien, sondern gleichermaßen die Abmessungen der einzelnen Bestandteile und die Abstimmung dieser Maße untereinander. Auf diese Weise können die erforderliche Belastbarkeit und Flexibilität sowie optimierte Effizienz und Lebensdauer des Rohrsystems sichergestellt werden.

In jeder Nation werden alle Leitungen standardmäßig in den Längen 6 m und 12 m ([8], [16], [80]) hergestellt.

In den folgenden Abschnitten werden die geeigneten Abmessungen der einzelnen Komponenten Stahlmediumrohr, PUR-Dämmung und Ummantelung mit den dazugehörigen normativen Vorgaben einzeln aufgelistet und mit den international geltenden Angaben verglichen.

1.2.3.2.1 Stahlmediumrohr

Die Abmessungen des Stahlmediumrohrs sind als zentrales Funktionselement bei der Auslegung des Rohrsystems zu betrachten. Entscheidende Eigenschaften des Gesamtsystems, wie die hydraulische Leistungsfähigkeit und Druckbeständigkeit lassen sich anhand der Maße des Innenrohrs bestimmen. Die Dimensionierung der Rohre erfolgt in Abhängigkeit vom erforderlichen Betriebsdruck, der Strömungsgeschwindigkeit, der Mediumtemperatur sowie den zu erwartenden Belastungen im langjährigen Betrieb.

In Tabelle 8 sind die maßgebenden Normen für die Abmessungen des Stahlmediumrohres aufgelistet.

EU	China	Korea
Norm	Norm	Norm
DIN EN 253	Gem. Herstellerangaben	Gem. Herstellerangaben

Tabelle 8: Normen für Abmessung des Stahlmediumrohrs

Bei der Auswertung der vorliegenden Informationen über die geltenden Richtlinien für die Abmessungen des Mediumrohrs wird ersichtlich, dass ausschließlich in Europa Maße für die Ausführung des Rohres vorgegeben sind. In den Nationen China und Korea sind keine Angaben bezüglich der Abmessungen in den normativen Richtlinien vorhanden; es sind lediglich Maße in Abhängigkeit der anderen Komponentenabmessungen auf Herstellerseiten zu finden ([16], [33], [32], [35]).

Der Vergleich der Abmessungen des Stahlmediumrohres erfolgt anhand der aus der DIN EN 253 und den chinesischen sowie koreanischen Herstellerangaben entnommenen Werte ([35], [32]). Im Zuge des Vergleichs werden jeweils der Nenndurchmesser DN, der Außendurchmesser d_0 sowie die Wanddicke t als zu betrachtenden Werte genutzt. Bei den Werten der Wanddicke ist zu beachten, dass es sich bei den Angaben um Mindestwerte handelt, die für die Ausführung berücksichtigt werden müssen und deren Toleranzen den Vorgaben der DIN EN 10217-2 und DIN EN 10217-5 [36] entsprechen.

EU			China			Korea		
Nenndurchmesser DN	Außendurchmesser d ₀	Wanddicke t	Nenndurchmesser DN	Außendurchmesser d ₀	Wanddicke t	Nenndurchmesser DN	Außendurchmesser d ₀	Wanddicke t
15	21,3	2						
20	26,9	2				20	27,2	2,9
25	33,7	2,3	25	32	3	25	34	3,4
32	42,4	2,6	32	38	3	32	42,7	3,6
40	48,3	2,6	40	45	3,5	40	48,6	3,7
50	60,3	2,9	50	57	3,5	50	60,5	3,9
65	76,1	2,9	65	76	4	65	76,3	4,5
80	88,9	3,2	80	89	4	80	89,1	4,5
100	114,3	3,6	100	108	4	100	114,3	4,9
125	139,7	3,6	125	133	4,5	125	139,8	5,1
150	168,3	4	150	159	5	150	165,2	5,5
200	219,1	4,5	200	219	6	200	216,3	6,4
250	273	5	250	273	7	250	267,4	6,4
300	323,9	5,6	300	325	7	300	318,5	6,4
350	355,6	5,6	350	377	7	350	355,6	6,4
400	406,4	6,3	400	426	7	400	406,4	6,4
450	457	6,3	450	478	8	450	457,2	6,4
500	508	6,3	500	529	8	500	508	6,4
						550	558,8	9,5
600	610	7,1	600	630	8	600	609,6	9,5
						650	660,4	8,7
700	711	8	700	720	8	700	711,2	8,7
						750	762	8,7
800	813	8,8	800	820	10	800	812,8	9,5
						850	863,6	10,3
900	914	10	900	920	10	900	914,4	10,3
1000	1016	11	1000	1020	12	1000	1016	11,1
			1100	1120	12	1100	1117,6	11,1
1200	1219	12,5	1200	1220	12	1200	1219,2	11,1
			1400	1420	14			

Tabelle 9: Abmessungen Stahlmediumrohr [Maße in mm]

Die in der Tabelle 9 angegebenen Werte zeigen, dass die eingesetzten Durchmesser für die Fernwärmeleitungen sich in einem fast identischen Wertebereich von 15 – 1400 mm befinden, wobei die Ausführung mit dem kleinsten Nenndurchmesser der Rohre von 15 mm ausschließlich gemäß europäischer Normung und der größte Rohrdurchmesser mit DN 1400 nur im Rahmen der chinesischen Richtlinien aufgeführt wird. Bei detaillierter Betrachtung der Werte für die Nenn- und Außendurchmesser des Mediumrohrs wird ersichtlich, dass unterschiedliche Außendurchmesser für die Nenndurchmesser angegeben sind. Dies wird vor allem im Vergleich der europäischen mit den chinesischen Angaben deutlich, während für die Werte gemäß koreanischer Herstellerangaben weniger Abweichungen zu den Vorgaben der europäischen DIN vorhanden sind. Die stärkste Differenz der Rohraußendurchmesser zwischen den europäischen und chinesischen Werten ist bei dem DN 350

zu vermerken, mit einer Differenz der Außendurchmesser von -21,4 mm. Der Wert in Bezug auf den koreanischen Durchmesser fällt deutlich geringer aus. Dieser ergibt sich aus der Differenz der europäischen und koreanischen Außendurchmesser bei DN 250 und beträgt lediglich +5,6 mm. Die ermittelten Werte zeigen eine höhere Abweichung der in China angewendeten Abmessungen der Durchmesser des Mediumrohrs. Neben den Werten für die Außendurchmesser sind außerdem die dazugehörigen Wanddicken der Rohre für die jeweilige Nennweite gegeben. Dieser Wert ist ebenso wie die Maße des Außendurchmessers im Hinblick auf die Verbindung der unterschiedlichen Mediumrohre relevant und muss genauer betrachtet werden. Bei dem Vergleich der Werte wird deutlich, dass die Wanddicken sich ebenfalls in einem ähnlichen Wertebereich von 2 – 14 mm befinden, wobei die Wanddicke 2 mm ausschließlich für die gemäß europäischer Normung herzustellenden Rohre und die Dicke 14 mm nur für die den chinesischen Vorgaben entsprechenden Rohre auszuführen ist. Im Gegensatz zu den bisher verglichenen Werten sind für die Angaben der Wanddicken größere Unterschiede nicht nur bei dem Vergleich der europäischen Daten zu den chinesischen, sondern auch zu den koreanischen zu erkennen. Im Allgemeinen lässt sich jedoch feststellen, dass die Werte nicht so sehr differenzieren, wie die Werte der Außendurchmesser. Die höchste Differenz zwischen den Wanddicken gemäß europäischen und chinesischen Vorgaben ist mit -1,7 mm für das DN 450er und 500er Rohr zu verzeichnen, während die höchste Differenz der europäischen und koreanischen Abmessungen bei DN 600 mit -2,4 mm vorliegt. Die detaillierte Betrachtung der Werte zeigt, dass die gesamten Wanddicken aus den chinesischen sowie koreanischen Herstellerangaben größer als die in der europäischen DIN-Norm aufgeführten Maße sind.

Es lässt sich herausstellen, dass sich die Werte für die Abmessungen zwar in einem ungefähr ähnlichen Wertebereich befinden, sich aber einzeln betrachtet schwach bis stark voneinander unterscheiden. Dies ist vor allem in Bezug auf die Abmessungen der Außendurchmesser gemäß DIN EN 253 und chinesischer Herstellerinformationen zu erkennen. Diese Unterschiede sowie die zusätzlich ermittelten Abweichungen in den Wanddicken aus den angegebenen Daten lassen darauf schließen, dass sich im Rahmen einer Verbindung der verschiedenen Rohrquerschnitte mehrere mögliche Herausforderungen ergeben können und demnach eine geeignete Lösung zur Gewährleistung eines gesicherten Transports des Mediums zu entwickeln ist.

1.2.3.2.2 PUR-Dämmung

Die Abmessungen der Dämmschicht des Einzelrohr-Verbundsystems sind maßgebend für die thermische Leistung und Effizienz des gesamten Systems. Dabei variieren die auszuführenden Dämmdicken in Abhängigkeit von der Umgebung, der erforderlichen Mediumtemperatur und dem Wärmeschutz. Die Maße der Dämmschicht hängen zudem mit dem gewählten Nenndurchmesser des Mediumrohrs zusammen und sind in Normen sowie Herstellerangaben für den ausgewählten Durchmesser vorgegeben.

In Tabelle 10 werden die relevanten Normen für die Bestimmung der Abmessungen der Dämmschicht dargestellt.

EU	China	Korea
Norm	Norm	Norm
DIN EN 253, gem. Herstellerangaben	Gem. Herstellerangaben	Gem. Herstellerangaben

Tabelle 10: Übersicht Normen für die Abmessungen der Dämmschicht

Die normativen Vorgaben für die Bemessung der Dämmschichtdicke sind wie die des Mediumrohrs, ausschließlich im Rahmen der europäischen Richtlinien gegeben. Diese Angaben werden in Form von

vorgegeben Werten für den Außendurchmesser der Ummantelung für jeweils drei Wärmedämmserien in der DIN EN 253 aufgeführt. Im Rahmen des Vergleichs der Dämmstärken werden für die Ermittlung der europäischen Werte die Daten eines spezifischen Herstellers herangezogen, da die Schichtdicken je nach Hersteller in Abhängigkeit der genauen Bemessung der Bestandteile Mediumrohr und Ummantelung und deren Wandstärken variieren können.

In Tabelle 11 werden die relevanten Daten in Bezug auf die Abmessungen der Dämmschicht aufgelistet.

Nenn- durch- messer DN	EU						China		Korea	
	Nenn- Außendurc hmesser D _c	Dämm stärke 1	Nenn- Außendurc hmesser D _c	Dämm stärke 2	Nenn- Außendurc hmesser D _c	Dämmst ärke 3	Nenndu rchmess er D _c	Dämm stärke	Nenn- Außend urchmes ser D _c	Dämms tärke
15										
20	90	28,55	110	38,55	125	46,05			90	28,9
25	90	25,15	110	35,15	125	42,65	90	26	90	25,5
32	110	30,8	125	38,3	140	45,8	110	33	110	30,65
40	110	27,85	125	35,35	140	42,85	125	37	110	27,7
50	125	29,35	140	36,85	160	46,85	140	38,5	125	29,05
65	140	38,95	160	48,95	180	58,75	160	39	140	28,65
80	160	32,55	180	42,55	200	52,35	180	42,5	160	32,35
100	200	39,65	225	64,25	250	64,25	200	42,8	200	39,35
125	225	51,55	250	65,75	280	65,75	225	42,5	225	39,1
150	250	51,45	280	68,85	315	68,85	250	41,6	250	38,4
200	315	43,45	355	85,15	400	85,15	315	43,1	315	43,75
250	400	58,2	450	82,9	500	107,2	400	57,2	400	60
300	450	57,45	500	81,75	560	111,05	450	55,5	450	57,95
350	500	65,9	560	95,2	630	129,6	500	53,7	500	64,4
400	560	69,8	630	104,2	710	143,1	550	53,2	560	67
450	630	78,8	710	117,7	800	162,4	600	52,2	630	76,6
500	710	92,3	800	137	900	185,9	650	50,7	710	89,5
550									710	64,1
600	800	86	900	134,9	1000	183,8	760	53,9	800	82,7
650									850	82,3
700	900	84,4	1000	133,3	1100	182,5	850	53	900	79,4
750									950	79
800	1000	82,3	1100	131,5	1200	180,7	960	57	1000	76
850									1100	100,6
900	1100	81	1200	130,2			1054	53	1100	75,2
1000	1200	79,2					1155	52,5	1200	68,4
1100							1260	54	1300	65,7
1200							1380	63	1400	63,8
1400							1656	100		

Tabelle 11: Abmessungen Dämmschicht [Maße in mm]

Die in der Tabelle 11 aufgeführten Werte für die Abmessungen der Dämmschicht gemäß den internationalen Vorgaben weisen deutliche Unterschiede auf. Die größte Unterscheidung zeigt sich in der nach europäischer Norm DIN EN 253 bestimmten Ausführungsvariation von drei

unterschiedlichen Dämmserien. Diese Differenzierung wird in den Richtlinien festgelegt, um die unterschiedlichen und teilweise anspruchsvolleren technischen Anforderungen für das Wärmenetz erfüllen zu können. Zu diesen Anforderungen zählen bspw. die Vorlauftemperatur, welche bei höheren Werten ebenfalls die Ausführung einer erhöhten Dämmserie erfordert. Auch ökonomische Rahmenbedingungen bestimmen die Wahl der Dämmserie. Es wird demnach gewichtet, ob eine dickere Dämmung mit längerer Lebensdauer oder eine dünnere Dämmung mit kostentechnischen Vorteilen eingesetzt werden soll. Zudem werden in dichter strukturierten Wärmenetzen überwiegend die Dämmserie 1 bis 2 eingebaut, da in diesen Gebieten die Wärmeverluste geringer ausfallen können [37]. Jedoch ist bei kleineren Leitungsdimensionen auch der hohe spezifische Temperaturverlust relevant, da der Einsatz einer stärker bemessenen Dämmung diesem entgegenwirken und somit den Betrieb eines Netzes mit einer reduzierten Vorlauftemperatur ermöglichen kann [38]. Des Weiteren sind die Bedingungen vor Ort und für den Einsatz der Leitungen ebenfalls entscheidend für die Wahl der Dämmstärke. Faktoren wie eine niedrige Umgebungstemperatur, die Forderung einer langsamen Kühlung bei Betriebsunterbrechung oder fortwährend hohe Mediumtemperaturen erfordern den Ausbau einer stärkeren Dämmschicht und müssen in der Entwicklung des Netzes berücksichtigt werden. Es stellt sich somit heraus, dass im Rahmen der Planung und Realisierung eines Wärmenetzes viele technische Anforderungen entstehen können, die in Form von individualisierten Ausführungen der Leitungen gemäß den Vorgaben der europäischen Richtlinien erfüllt werden können. Werden im Vergleich dazu die Werte der geforderten Abmessungen gemäß dem chinesischen Herstellers Dalian Yidou Piping und des koreanischen Hersteller Pipetec Korea betrachtet wird deutlich, dass eine spezifizierte Dimensionierung der Dämmstärke in Abhängigkeit von den sich ergebenden Anforderungen für den Ausbau des jeweiligen Netzes nicht berücksichtigt wird.

Die Werte für die Dämmserien wurden aus den Angaben des Herstellers Brugg Pipes [39] bezogen und dienen als Beispiel für die Ausführung der drei Dämmserien gemäß DIN EN 253. Vergleicht man die Werte mit denen der anderen Nationen ist zu erkennen, dass die Werte der internationalen Hersteller ungefähr den Abmessungen der Dämmserie 1 des Herstellers Brugg Pipes entsprechen. Demnach ergibt sich, dass in dem internationalen Raum Einflussfaktoren wie Außentemperaturen, Wirtschaftlichkeit oder ökologische Faktoren wie die Verringerung der Betriebstemperatur zur Reduktion der CO₂-Emissionen nicht in die Entwicklung der Wärmenetze einbezogen werden. Werden die Dämmdicken der drei Nationen näher betrachtet wird deutlich, dass die Stärken der von dem chinesischen Hersteller angegebenen Abmessungen am niedrigsten sind. Dies kann man bspw. an den Werten für DN 1000 feststellen, für den gemäß Herstellerangaben aus Europa eine Dämmdicke der Dämmserie 1 von 79,2 mm und nach koreanischen Vorgaben eine Stärke von 68,4 mm angegeben ist, während die vorgesehene Dicke der Dämmung nach den chinesischen Angaben 52,5 mm beträgt. Ersichtlich wird dies auch durch die durchschnittliche Stärke der Dämmung für die gemeinsamen Nenndurchmesser der drei Nationen, mit einem Durchschnittswert von ca. 58 mm für die europäischen Angaben, einer durchschnittlichen Dicke von ca. 47 mm ermittelt aus den Werten des chinesischen Herstellers, sowie eine Stärke von ca. 54 mm errechnet aus den Abmessungen der koreanischen Daten.

Eine Gemeinsamkeit der gegebenen Abmessungen besteht darin, dass die Dämmdicke nicht linear zur Nennweite gewählt wird, es ist keine proportionale Steigung der Dämmdicke zu dem Nenndurchmesser vorhanden; sie nimmt bei einigen Durchmessern erneut ab oder bleibt gleich. Dies ist vor allem damit zu begründen, dass für die Bemessung der Dämmstärke technisch-wirtschaftliche Faktoren berücksichtigt werden, die in Abhängigkeit von der Betriebstemperatur, Fördervolumen und Transport- sowie Materialkosten berücksichtigt werden. Zudem erschweren zu große Dämmungen den Transport und die Verlegung der Leitungen und stellen Komplikationen bei der Lagerung vor Ort dar [40].

Neben den Werten für die Abmessung der Dämmstärken lassen sich ebenfalls unterschiedliche Nenn-Außendurchmesser zu den Nennweiten ablesen. Dies ist nicht nur zwischen den Werten der internationalen Angaben, sondern auch bei den Werten der drei Dämmserien vorhanden. Anhand dieser Werte kann ebenfalls die Wahl der Dämmstärke nachvollzogen werden. Als Beispiel zeigt ein Vergleich der Nenn-Außendurchmesser für das DN 500er Mediumrohr, dass gemäß den Angaben des chinesischen Herstellers ein Nenn-Außendurchmesser von 650 mm gegeben ist, während der Durchmesser nach europäischen und koreanischen Angaben 710 mm beträgt. Dies Begründet die deutlich geringere Dämmstärke der Dämmung nach chinesischen Angaben mit 50,7 mm im Vergleich zu den europäischen mit 92,3 mm und den koreanischen mit 89,5 mm.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass wesentliche Unterschiede in den Abmessungen der Dämmstärke sowie des Nenn-Außendurchmessers des Mantelrohrs in Bezug auf die Nennweite des Mediumrohrs vorhanden sind. Vor allem die Differenzierung gemäß DIN EN 253 in die Dämmserien 1 – 3 zeigt, dass im Rahmen der Entwicklung der Fernwärmenetze in Europa der Betrieb effizienter, wirtschaftlicher und nachhaltiger Netze angestrebt und dementsprechend kontinuierlich optimiert und an die gegebenen technischen Anforderungen angepasst wird.

1.2.3.2.3 Ummantelung

Die Abmessung des Mantelrohrs stellt eine zentrale Funktion für den Betrieb der Fernwärmeleitungen dar. Die Abdichtung aus Hart-Polyethylen umschließt die Dämmung und schützt das Rohrsystem vor mechanischen Einflüssen und Feuchtigkeitseintritt.

Die Außendurchmesser der Mantelrohre sind standardisiert und orientieren sich an den Dämmdicken. Die Abmessungen resultieren aus der Dimensionierung des Mediumrohrs und dazugehöriger Dämmung. Die genormten Nenn-Außendurchmesser ergeben sich demnach anhand des ausgewählten Nenndurchmessers des Mediumrohrs und im europäischen Normungssystem zusätzlich in Abhängigkeit der erforderlichen Dämmserie.

In der Tabelle 12 sind die normativen Vorgaben für die Abmessungen der Ummantelung dargestellt.

EU	China	Korea
Norm	Norm	Norm
DIN EN 253	GB/T 29047	Gem. Herstellerangaben

Tabelle 12: Übersicht Normen für die Abmessungen der Ummantelung

Die in der Tabelle 12 aufgelisteten Daten zeigen, dass die normativen Vorgaben der Europäischen Union und Korea identisch zu denen der zuvor genannten Komponenten gegeben sind. Für die Abmessungen der Ummantelung sind im Rahmen der chinesischen Norm GB/T 29047 für die Auslegung von Fernwärmeleitungen Werte für den Nenn-Außendurchmesser und die dazugehörige Mindestwanddicke vorhanden ([12], Tab. 4). Eine ähnliche Vorgabe ist auch in der DIN EN 253 dokumentiert ([8], Tab. 2).

Die Tabelle 13 enthält die gemäß DIN EN 253 und GB/T 29047 vorgegebenen Abmessungen sowie die anhand von koreanischen Herstellerangaben aufgeführten Daten für die Bemessung der Ummantelung.

EU		China		Korea	
Nenn- Außendurchmesser D_c	Mindestwand dicke e_{min}	Nenn- Außendurchmesser D_c	Mindestwand dicke e_{min}	Nenn- Außendurchm esser D_c	Mindestwand dicke e_{min}
90	3	75 ~ 180	3	90	2,5
110	3		3	110	3
125	3		3	125	3,2
140	3		3	140	3,2
160	3		3	160	3,2
180	3		3		
200	3,2	200	3,2	200	3,5
225	3,4	225	3,4	225	3,5
250	3,6	250	3,6	250	4
280	3,9	280	3,9		
315	4,1	315	4,1	315	5,6
355	4,5	355	4,5		
400	4,8	400	4,8	400	6,3
450	5,2	450	5,2	450	7,8
500	6	500	5,6	500	7,8
		560	6	560	9,8
		600	6,3		
630	6,6	630	6,6	630	9,8
		655	6,6		
710	7,2	710	7,2	710	11,5
		760	7,6		
800	7,9	800	7,9	800	12,5
		850	8,3	850	12,5
900	8,7	900	8,7	900	15
				950	15
		960	9,1		
1000	9,4	1000	9,4	1000	17,6
		1055	9,8		
1100	10,2	1100	10,2	1100	17,6
		1155	10,6		
1200	11	1200	11	1200	23,6
				1300	25,5
1400	12,5	1400	12,5	1400	26,6
		1500	13,4		
		1600	15		
		1700	16		
		1900	20		

Tabelle 13: Abmessungen Ummantelung [Maße in mm]

Betrachtet man die Werte aus Tabelle 13 wird deutlich, dass die Werte zwischen den Nationen weniger stark voneinander abweichen als bei den vorher verglichenen Komponenten des Rohrsystems. Die Abmessungen sowie die Mindestwanddicken der Ummantelung gemäß DIN EN 253 sowie GB/T 29047 sind identisch, es sind lediglich mehr Nennweiten in der chinesischen Norm

mitaufgeführt. Die Angaben des koreanischen Herstellers Pipetec Korea für die Bemessung der Wanddicke weichen von den übrigen Werten ab und sind im Durchschnitt höher. Das Ausmaß der großen Differenz zeigt die vorgegebene Mindestwanddicke $e_{\min}$ des Mantelrohrs für den Nenn-Außendurchmesser D_c 1400, wofür die Wanddicke $e_{\min} = 12,5$ mm gemäß europäischer und chinesischer Norm aufgeführt ist, während der Wert für $e_{\min}$ laut des koreanischen Herstellers mit $e_{\min} = 26,6$ mm mehr als verdoppelt wird.

Die chinesischen Angaben sind zwar identisch zu denen die gemäß DIN EN 253 in der europäischen Union festgesetzt sind, dennoch gibt es mehrere Faktoren, welche in Bezug auf die Abmessungen der Ummantelung mögliche Komplikationen darstellen. Nicht nur der große Unterschied der in Korea ausgeführten Wanddicken der Mantelrohre, sondern auch die abweichende Bestimmung der erforderlichen Nenn-Außendurchmesser für den gewählten Nenndurchmesser des Mediumrohrs (siehe Tabelle 11) stellen wesentliche Unterschiede in den Abmessungen des Gesamtrohrsystems dar.

Der Vergleich der geometrischen Auslegung der Einzelrohr-Verbundsystems der Europäischen Union, China und Korea hat verdeutlicht, dass deutliche Abweichungen der Vorgaben für Ausführung der einzelnen Komponenten bestehen. Dies ist vor allem auf den Ursprung der vorliegenden Daten zurückzuführen, da die Maße in der Europäischen Union im Rahmen des Normungssystems bestimmt sind, während für die übrigen Nationen größtenteils die Daten auf Angaben des Herstellers basieren, die keine vorgeschriebenen und verbindlichen Festsetzungen für die jeweilige Nation darstellen. Des Weiteren sind die herrschenden Anforderungen der jeweiligen Nationen unterschiedlich, was zusätzlich zu einer differierenden Priorisierung der Netzplanung in dem jeweiligen Land führt. Demnach kann bspw. das Klima oder die Wirtschafts- und Energiepolitik in Deutschland entscheidend dafür sein, dass im Zuge der Festsetzung der Dämmstärken ein dreistufiges Dämmkonzept entworfen wurde, um Wärmeverluste zu verringern oder den Betrieb mit niedrigerer Vorlauftemperatur ermöglichen zu können [41]. Dieser Faktor und weitere Anforderungen, welche im Rahmen der angestrebten Energiewende in Deutschland und Europa bestimmt sind, führen zu einer geplanten Umstellung und Anpassung des Netzes [42].

Im asiatischen Raum ist vor allem in sehr dicht bebauten Städten der Platzbedarf und Urbanisierungsgrad für die Auslegung des Wärmenetzes relevant und beeinflusst die Planung in einem höheren Ausmaß als im europäischen Raum ([43], [44]). Zudem wird die Entwicklung der Wärmenetze von abweichenden Faktoren beeinflusst. Während sich Korea nicht nur mit der normativen Regelung deutlich an den europäischen Standard orientiert, sondern ebenfalls in Form der Deutsch-Koreanischen Partnerschaft eine Zusammenarbeit für die Umsetzung der Energiewende führt [7], leitet China eigene Maßnahmen ein, um den Ausbau fossilfreier Wärmenetze umsetzen zu können [5]. Diese individuellen nationalen Ziele der Energiepolitik führen dazu, dass unterschiedliche technische Anforderungen für den bestehenden sowie zukünftigen Ausbau der Wärmenetze bestehen.

Im Anschluss kann die Aussage getroffen werden, dass sich in allen Abmessungen übergreifend deutliche Abweichungen zu erkennen sind. Maße der Kompatibilität von Nenn- und Außendurchmesser der Europäischen Union und Korea sowie die Mindestwanddicken der Ummantelung in den Angaben der europäischen und chinesischen Normung wurden identisch angegeben. Rohrdurchmesser, Wand- und Dämmdicken differieren teilweise stark, mit höheren Wanddicken des Mediumrohrs gemäß chinesischer und koreanischer Angaben, ähnlicher Dämmstärken der europäischen Dämmserie 1 und den koreanischen Werten aber vergleichsweise niedriger Dämmstärke der in China ausgeführten Dämmung und deutlich stärkerer Wanddicken des Mantelrohrs nach koreanischen Herstellerangaben im Vergleich zu den genormten europäischen sowie chinesischen Werten. Die teilweise über 20 mm abweichenden Differenzen der Außendurchmesser sowie bis zu 14 mm differierenden Werte der Wanddicken stellen technische

Herausforderungen dar und müssen für weitere Planungsverfahren berücksichtigt werden. Als weitere festgelegte Vorgaben gemäß den normativen Regelungen für die Fernwärmeleitung nach der europäischen Norm DIN EN 253 und der chinesischen Norm GB/T 29047-2021 sind die maximalen Außendurchmesser des Mantelrohrs im fertigen Zustand maßgebend. Ähnliche Angaben sind in den Informationen aus koreanischen Richtlinien und Herstellerangaben nicht vorhanden. Die Tabelle 14 stellt die Grenzabmessungen der Mantelrohre gegenüber.

EU		China	
Nenn- Außendurchmesser D_c	Maximaler Außendurchmesser D_{max}	Nenn- Außendurchmesser D_c	Maximaler Außendurchmesser D_{max}
		75	79
90	95	90	95
110	116	110	116
125	132	125	132
140	147	140	147
160	168	160	168
180	189	180	189
200	206	200	206
225	232	225	232
250	258	250	258
280	289	280	289
315	325	315	325
355	366	355	366
400	412	400	412
450	464	450	464
500	515	500	515
560	577	560	577
		600	618
630	649	630	649
		655	675
710	732	710	732
		760	783
800	824	800	824
		850	876
900	927	900	927
		960	989
1000	1030	1000	1030
		1055	1087
1100	1133	1100	1133
		1155	1190
1200	1236	1200	1236
1400	1442	1400	1442
		1500	1545
		1600	1648
		1700	1751
		1900	1957

Tabelle 14: Maximaler Außendurchmesser der Ummantelung [Maße in mm]

1.2.4 Werkstoffeigenschaften

Die spezifische Auswahl der Materialien und deren Eigenschaften erfolgt nach den Anforderungen bestimmter Normen für den optimalen Betrieb des Wärmenetzes.

Stahl zeichnet sich durch seine hohe Festigkeit aus und wird vor allem für den Einsatz in Bereichen dem flexiblen Rohrsystem bevorzugt, wo hohe mechanische sowie thermische Belastungen auftreten und keine Unregelmäßigkeit der Streckenverläufe vorhanden ist.

Die Dämmung muss bei hohen Betriebstemperaturen eine geringe Wärmeleitfähigkeit sowie eine gute Alterungsbeständigkeit aufweisen können. Ihre Materialeigenschaften und Abmessungen sind entscheidend für den Betrieb eines nachhaltigen sowie wirtschaftlichen Wärmenetzes.

Die Ummantelung ist mit einem Kunststoff hoher Festigkeit sowie chemischer Beständigkeit auszuführen, um das Rohrsystem vor mechanischen Beanspruchungen schützen und chemische Angriffe aus der Umgebung vermeiden zu können.

Im Rahmen des Vergleichs der Rohrsysteme sind nicht nur die Abmessungen und Materialien für die Beurteilung einer Kompatibilität relevant, sondern vor allem die geltenden technische Anforderungen an den die Eigenschaften der einzelnen Komponenten sowie an die Installation und den Betrieb des Rohrsystems.

In den folgenden Abschnitten werden die wesentlichen technischen Merkmale des Verbundsystems systematisch dargestellt.

1.2.4.1 Mediumrohr

Um einen sicheren Transport des Heizmediums gewährleisten zu können, muss das Stahlmediumrohr bestimmte technische sowie betriebliche Anforderungen erfüllen. Spezifische Merkmale, wie eine hohe mechanische Festigkeit, Temperaturbeständigkeit und gute Schweißbarkeit sind erforderlich, um einen langjährigen Betrieb der Leitungen sicherzustellen.

Die technischen Eigenschaften der Stahlmediumrohre sind in Tabelle 15 zusammengefasst.

	EU P235GH			China 20# Q235B		Korea SPPS 42 SPW	
Zugfestigkeit R_m [MPa]	360 - 500			410 - 530	370 - 500	472	400
Streckgrenze R_e [MPa]	Für Wanddicken T [mm]			T [mm]		≥ 245	≥ 225
	$T \leq 16$	$16 < T \leq 40$	$40 < T \leq 60$	≥ 245	$T \leq 16$		
	≥ 235	≥ 225	≥ 215		≥ 235		
Bruchdehnung [A%]	≥ 23			≥ 20	≥ 20	≥ 20	≥ 18
Max. zulässiger Betriebsdruck p_B [bar]	25			25	25	25	25
Max. zulässige Betriebstemperatur T_{max} [°C]	140			130	130	140	140

Tabelle 15: Übersicht technische Eigenschaften der Stahlsorten für das Stahlmediumrohr

Die Werte für die Zugfestigkeiten der jeweiligen Stahlsorten befinden sich im Bereich von 360 bis 530 MPa, während für drei Sorten die Festigkeit im Rahmen einer Spannweite festgesetzt wurde. Für die größte Zugfestigkeit ist der in China nahtlos hergestellte Stahl Klasse 20# ausgelegt, welcher im Vergleich zu den Spannweiten des P235GH und des Q235B höhere Werte aufweist. Insgesamt lässt sich daraus schließen, dass die Angaben zu den Zugfestigkeiten nicht stark differenzieren und sich auf einem ungefähr gleichen Niveau befinden.

Bei der Betrachtung der Vorgaben zu den Mindeststreckgrenzen wird deutlich, dass die Angaben zu dem Stahl P235GH und Q235B in Abhängigkeit von der Wanddicke gegeben sind und übereinstimmen. Aus den Informationen der definierten Mindeststreckgrenzen in Bezug auf die Wanddicke lässt sich daraus schließen, dass die dünnwandigen Stähle eine höhere Mindeststreckgrenze aufweisen, da sie im Herstellungsprozess schneller abkühlen und somit ein feinkörnigeres Gefüge erhalten sowie weniger Inhomogenitäten aufweisen.

Die höchste Mindeststreckgrenze weisen der in China produzierte Stahl Klasse 20# sowie der in Korea gefertigte Stahl SPPS 42 mit mindestens 245,0 MPa auf.

Die betrachteten Stahlsorten weisen Bruchdehnungen zwischen 18 % und 23 % auf; der höchste Wert ist dem in den europäischen Richtlinien vorgegebenen Werten zuzuordnen, während der niedrigste Wert für den Stahl SPW gegeben ist. Die Mehrzahl der Werte liegt bei 20 %, was auf ein relativ konstantes plastisches Verformungsverhalten der Werkstoffe schließen lässt.

Insgesamt kann die Aussage getroffen werden, dass sich die Werte in einem engen Bereich bewegen und damit auf eine gleichmäßige Qualität und einen einheitlichen Standard hinweisen.

Die Druck- und Temperaturbeständigkeit der Rohre ist in allen Fällen identisch. Dies ist vor allem darin zu begründen, dass sich insbesondere Korea bezüglich der technischen Anforderungen des Rohrsystems überwiegend an den europäischen Richtlinien orientiert. Gemäß GB/T 29047 und Angaben des Herstellers Dalian Yiduo Piping sind dieselben Werte für den Betrieb der in China ausgeführten Leitungen anzusetzen.

In der abschließenden Bewertung wird deutlich, dass die Stahlsorten eine mittlere bis erhöhte Festigkeit aufweisen und die Streckgrenzen sowie Vorgaben zu den Bruchdehnungen in einem ähnlichen Wertebereich liegen. Die mechanischen Eigenschaften der international eingesetzten Stahlsorten weisen auf einen duktilen Stahl hin, der mit durchschnittlicher Streckgrenze und hoher Zugfestigkeit die Merkmale eines Stahls besitzt, der im europäischen Raum für vielfältige technische Anwendungen im Bauwesen qualifiziert ist und verwendet wird.

1.2.4.2 Dämmung

Die Dämmung hat die zentrale Funktion der Wärmeisolierung, trägt aber auch zur Formstabilität und Alterungsbeständigkeit des Rohrsystems bei. Dementsprechend sind Eigenschaften wie die Wärmeleitfähigkeit und Festigkeit für die Ausführung der Dämmschicht relevant und müssen die technischen Anforderungen für den Betrieb des Rohrsystems erfüllen.

Tabelle 16 stellt die wesentlichen technischen Eigenschaften der Dämmung der ausgewählten Nationen gegenüber.

	EU	China	Korea
Wärmeleitfähigkeit λ [W/mK]	$\leq 0,029$	$\leq 0,033$	$\leq 0,028$
Kerndichte ρ [kg/m ³]	≥ 60	- Mediumrohr $\leq$ DN500: $\rho \geq 55$ - Mediumrohr $>$ DN500: $\rho \geq 60$	≥ 60
Geschlossene Zellen [%]	≥ 88	≥ 90	≥ 88
Wasseraufnahme Vol. [%]	≤ 10	≤ 10	≤ 10
Druckfestigkeit $f_{c,Nenn}$ [N/mm ²]	$\geq 0,3$	$\geq 0,3$	$\geq 0,3$
Scherfestigkeit τ [N/mm ²]	$> 0,12$ bei 23°C $> 0,08$ bei 140°C	$> 0,12$ bei 23°C $> 0,08$ bei 140°C	$\geq 0,2$

Tabelle 16: Übersicht technischer Eigenschaften der Dämmung

Die vorliegenden Eigenschaften der Dämmung von China, Korea und der EU zeigen einige Gemeinsamkeiten sowie Unterschiede auf. Die Werte für die Wärmeleitfähigkeit befinden sich ungefähr in einem Bereich, mit dem Höchstwert von $\lambda_{50} \leq 0,033$ W/mK gemäß der chinesischen Norm GB/T 29047-2021 für die werkmäßig gefertigten Einzelrohr-Verbundsysteme. Der niedrigste und energetisch effizienteste Wert mit $\lambda_{50} \leq 0,028$ W/mK für Korea basiert auf den Vorgaben der DIN EN ISO 8497 sowie der KS L 9016 gemäß Informationen des Herstellers Pipetec Korea.

Die weiteren Werte befinden sich ebenfalls in einem ähnlichen Wertebereich. Im Rahmen der chinesischen Normung wird lediglich die Mindestanforderung der Dichte der Dämmung für ein Rohrsystem mit einem Mediumrohr $\leq$ DN 500 auf $\rho \geq 55$ kg/m³ abgestuft. Die restlichen Eigenschaften stimmen, trotz verschiedener normativer Grundlagen mit den Vorgaben der in der EU geltenden DIN EN 253 überein. Übereinstimmungen sind ebenfalls bei den koreanischen Herstellerangaben vorhanden, was sich größtenteils darauf zurückführen lässt, dass die Ausführung der Rohrsysteme in Korea sich überwiegend nach den global geltenden Standards richtet; in diesem Fall nach den Richtlinien der DIN EN 253.

Zudem wird laut Angaben des Herstellers Pipetec Korea gemäß ISO 1922 eine höhere Mindestscherfestigkeit von $\tau \geq 0,2$ N/mm² angegeben; unabhängig von der Temperatur des Mediums, was auf eine höhere mechanische Stabilität des Materials schließen lässt.

Insgesamt lässt sich festhalten, dass für die drei Regionen ähnliche Leistungsanforderungen zur Ausführung robuster und leistungsfähiger Dämmstoffe mit hoher Wärme- und Alterungsbeständigkeit bestehen.

1.2.4.3 Ummantelung

Im Zuge der Fertigung des Mantelrohrs ist die Aufstellung hoher technischer Anforderungen und Standards maßgeblich, um einen kraftschlüssigen Verbund, den Schutz vor äußeren Einflüssen und eine langlebige Funktion des Rohrsystems sicherzustellen. Für den Betrieb der Fernwärmeleitungen geben unter anderem die Werte der Schmelzfließrate und Spannungsrissbeständigkeit eine Aussage darüber, ob der Werkstoff den Qualitätsanforderungen für die Ummantelung entspricht.

In der Tabelle 17 werden die maßgebenden technischen Eigenschaften der drei Gebiete aufgelistet.

	EU	China	Korea
Klassifizierung	PE 80	PE 80	PE 80
Dichte ρ [kg/m ³]	950	$940 < \rho \leq 960$	$940 \leq \rho \leq 970$
Rußgehalt [%]	Massenanteil 2-2,5	Massenanteil 2,5+-0,5	Massenanteil 2,4+-0,6
Schmelzfließrate MFR [g/10 min]	$0,2 < \text{MFR} \leq 1$	$0,2 < \text{MFR} \leq 1,4$	0,3 - 0,8
Streckspannung (Zugfestigkeit) R_m [N/mm ²]	23	≥ 19	≥ 17
Bruchdehnung [%]	≥ 350	≥ 450	> 500
Wärmebeständigkeit durch Sauerstoff-Induktionszeit (OIT) [min]	≥ 20 min bei 210 °C	≥ 20 min bei 210 °C	
Längenänderung nach Wärmebehandlung [%]	$\leq 3\%$	$\leq 3\%$	$\leq 3\%$
Spannungsrisssbeständigkeit [h]	≥ 300 h	≥ 300 h	> 200 h

Tabelle 17: Übersicht technischer Eigenschaften der Ummantelung

Bei der Auswertung der vorliegenden Informationen gemäß Tabelle 17 wird deutlich, dass ein einheitlicher Werkstoff für die Herstellung des Mantelrohrs verwendet wird. Unterschiede sind lediglich in den Werkstoffeigenschaften zu vermerken. Für jedes Rohr wird ein Hart-Polyethylen der Klassifizierung PE80 verwendet. Die Klassifizierung des Polyethylens richtet sich ebenfalls nach den Angaben zur Dichte des Stoffes, die sich für die drei Bereiche in einem Wertebereich von 950 – 970 kg/m³ befindet. Die Daten für die EU und Korea wurden jeweils von Herstellern bezogen ([46], [32]), während die Vorgabe der Dichte in China gemäß der Norm GB/T 29047 erfolgt. Die gegebenen Werte gemäß koreanischen Angaben können zudem dem Werkstoff der Klassifizierung PE100 zugeordnet werden [45]. Dennoch kann unter Betrachtung verschiedener Herstellerangaben ([16], [32], [33]) die Aussage getroffen werden, dass sich die Auswahl des Werkstoffes an den Vorgaben der DIN EN 253 richtet und mit einer Dichte $\rho \geq 940$ kg/m³ ein Polyethylen der Klasse PE80 oder PE100 ausgewählt werden kann.

Ein weiterer Parameter zur Bestimmung der relevanten Eigenschaften des Werkstoffs ist die Schmelzfließrate (MFR). Dieser Wert gibt Informationen zu den Fließeigenschaften des Kunststoffes an und ist abhängig von dem Molekulargewicht sowie der Viskosität. Diese Werte sind insbesondere in Bezug auf die Gewährleistung der Qualität und Verarbeitbarkeit von Kunststoffprodukten zu berücksichtigen. Eine niedrige MFR weist auf ein höheres Molekulargewicht und eine daraus resultierende bessere mechanische Festigkeit sowie Spannungsrisssbeständigkeit hin. Jedoch erfordert diese verminderte Fließfähigkeit des Kunststoffes erschwerte Verarbeitungsbedingungen, da der Stoff höher Druck- und Temperatureinstellungen benötigt, um sich verformen zu lassen und somit zu einem steigenden Energieverbrauch während des Herstellungsprozesses führt. Demnach lassen sich die gemäß europäischen [8] und koreanischen Angaben [16] verwendeten Polyethylene mit einer MFR von 0,2 – 1,0 g/10 min schwerer verarbeiten, als die chinesischen Werkstoffe, welche eine MFR von bis zu 1,4 g/10 min aufweisen dürfen. Dies impliziert auch, dass in China Kunststoffe verwendet werden, welche einfacher verarbeitet sind und vor allem komplizierte und dünnwandige Formen effektiver füllen, jedoch potenziell größere Schwankungen bei den mechanischen Eigenschaften zeigen können.

In den weiteren mechanischen Eigenschaften des Werkstoffes zeigen sich ebenfalls Abweichungen. Während in der EU eine höhere Zugfestigkeit von 23 N/mm^2 gemäß Herstellerangabe [gefordert wird, als in China ($\geq 19 \text{ N/mm}^2$) [35] und Korea ($> 17 \text{ N/mm}^2$) ([16], [32]), zeichnen sich die asiatischen Varianten durch eine höhere Bruchdehnung (bis $> 500 \%$) aus, was auf eine höhere Duktilität hinweist. Dabei ist zu erwähnen, dass im Rahmen der koreanischen Vorgaben keine genauen Informationen zu der Bruchdehnung gegeben sind und die ermittelten Daten ausschließlich auf den Angaben des Herstellers (Pipetec Korea) basieren, während zur Bruchdehnung für den in der EU und China eingesetzten Kunststoff gemäß den Normen DIN EN 253 und GB/T 29047 als Mindestwert vorgegeben ist. Vergleicht man die Vorgaben der EU mit den Informationen der Hersteller wird ersichtlich, dass auch diese Werte sich deutlich über dem geforderten Mindestwert befinden können mit Werten $> 600 \%$ [46].

Die Anforderungen an die Wärme-, Spannungsrisssbeständigkeit und Längenänderung nach Wärmeeinfluss sind auf einem weitgehend ähnlichen Niveau, wobei das in Korea verwendete Polyethylen eine geringere Spannungsrisssbeständigkeit ($> 200 \text{ h}$) aufweist und keine Informationen zu der Wärmebeständigkeit gemäß Richtlinie oder Herstellerangaben vorhanden sind.

Insgesamt lässt sich die Aussage treffen, dass alle Varianten die wesentlichen Anforderungen für die Gewährleistung einer dauerhaften, dichten und stabilen Umhüllung für das Rohrsystem erfüllen, indem die erforderlichen mechanischen und thermischen Eigenschaften aufweisen. Abweichungen der Werte sind teilweise auf die unterschiedliche Priorisierung der Produktionsflexibilität oder den Qualitätsanforderungen zurückzuführen.

Als abschließendes Fazit zeigt sich, dass für alle drei Gebiete die Komponenten Mediumrohr, Dämmung und Ummantelung die erforderlichen technischen Eigenschaften besitzen, um den sicheren und konstanten Betrieb der Fernwärmeleitung zu gewährleisten.

Für viele Eigenschaften befinden sich die Zahlen in einem annähernd gleichen Wertebereich, mit den höchsten Abweichungen der Werte gemäß koreanischen Angaben, was darauf zurückzuführen ist, dass diese Werte den Daten der Hersteller und nicht normativer Bestimmungen entnommen wurden und demnach meist über den Mindestanforderungen liegen.

1.2.5 Anforderungen an Installation und Betrieb

Die Installation und der Betrieb des Einzelrohr-Verbundsystems unterliegen weltweit unterschiedlichen technischen, klimatischen und regulatorischen Rahmenbedingungen. Diese Unterschiede wirken sich unmittelbar auf die Ausführung der Installation, Prüfung, Inbetriebnahme und Wartung der Fernwärmeleitungen aus. Während in der EU vor Allem normative Richtlinien die Auslegung und Prüfung der Wärmenetze bestimmen, sind für den asiatischen Raum insbesondere Einwirkungen der Urbanisierung in der Planung zu berücksichtigen.

In diesem Kapitel werden die jeweiligen Anforderungen an die Verlegung, Prüfverfahren sowie Betriebs- und Wartungskonzepte aufgeführt und gegenübergestellt.

1.2.5.1 Anforderungen an die Installation

Entsprechend der Planung und Bemessung des Netzes stellt ebenfalls die Installation der einzelnen Rohre eine große Herausforderung dar. Dabei können die Anforderungen an die Verlegung und Verdichtung der Leitungen differieren und werden an die gegebenen Bedingungen der jeweiligen Nation angepasst.

Die Tabelle 18 stellt die Anforderungen an die Verlegung der Fernwärmeleitungen für die jeweiligen Nationen dar.

	EU	China	Korea
Grabenmindestbreite [m]	$\geq 0,8$ → Tab. A.1 FW 401-12		
Mindestabstand Ummantelung - Grabensohle [m]	$\geq 0,4$	$\geq 0,5$	
Mindestabstand Ummantelung - Grabenwand [m]	$\geq 0,5$	$\geq 0,6$	
Abstand paralleler Ummantelungen [m]	0,15 - 0,3	0,25 - 0,4	
Überdeckung $\ddot{U}_H$ [m]	0,8 - 1,2	0,7 - 1,3	0,6 - 1,2
Mindestabstand Rohr - Andere unterirdische Strukturen [m]	parallele Leitungen $\geq 0,4$ überkreuzte Leitungen $\geq 0,2$	parallele Leitungen ≥ 1 überkreuzte Leitungen $\geq 0,15$	
Bettung	Sand, Kies	Mittlerer Sand, schluffiger Ton, sandiger Schluff	
Oberflächenbeschaffenheit bei Lieferung	Durch Handhaltung & Lagerung verursachte Kratzer $\leq 10\%$ der ursprünglichen Wanddicke der Ummantelung	Durch Handhaltung & Lagerung verursachte Kratzer $\leq 10\%$ der ursprünglichen Wanddicke der Ummantelung, Kratzertiefe ≤ 1 mm	

Tabelle 18: Anforderungen Verlegung der Leitungen

Bei der Auswertung der vorliegenden Daten aus der Tabelle wird ersichtlich, dass für die EU und China normative Regelungen zur Verlegung der Leitungen vorhanden sind, während in Korea keine spezifizierten Vorgaben bestehen oder nicht zugänglich sind, weshalb im Rahmen dieser Recherche nur die Informationen eines Praxisbeispiels bezogen wurden [47].

Ein zentraler Bestandteil der Verlegung der Leitungen stellen die Baugruben dar, deren Ausführung im europäischen sowie chinesischen Raum vorgegeben ist. Die Grabenbreite wird für beide Gebiete im berechnet und genau bemessen, wobei in der EU gemäß DIN 4124 [48] und DIN EN 13942-1 Mindestbreiten in Abhängigkeit des Außendurchmessers der Ummantelung sowie dem Einbau von Dehnungspolster festgesetzt sind.

Des Weiteren sind ähnliche Werte für die festgelegten Mindestabstände des Rohrmantels zur Baugrubenwand und -sohle vorhanden. Die Werte gemäß chinesischer Norm sind überwiegend höher, jedoch stellen diese Abweichungen keine signifikanten Differenzen dar.

Ein wesentlicher Unterschied liegt in den Vorgaben für den Mindestabstand des Rohres zu anderen unterirdischen Strukturen. Während in den Richtlinien der EU lediglich Mindestwerte für parallel sowie überkreuzt angeordnete Leitungen bestehen, sind gemäß Tabelle 4.1.2 der Norm CJJ/T 81-2013 [49] Mindestabstände in horizontaler sowie vertikaler Richtung der Fernwärmeleitung zu verschiedenen unterirdischen Strukturen jeweils einzeln vorgegeben.

Für die Vorgabe des Bettungsmaterials sind Überschneidungen vorhanden; für beide Gebiete ist der Einsatz von Sand geeignet.

Im Rahmen der Erstellung der Verbindungen sind folgende Anforderungen gestellt, welche in der Tabelle 19 aufgeführt sind.

	EU	China	Korea
Schweißnahtprüfung Durchstrahlungsprüfung / Ultraschalluntersuchung	Abhängig von der Projektklasse	Abhängig von Rohrdurchmesser, Temperatur und Druck	
Temperatur Aufschäumung Dämmung [°C]	Oberflächentemperatur Mediumrohr: 15 - 45	Mediumrohrtemperatur: ≤ 50 Umgebungstemperatur: 25 - 10	
Überstand Ummantelung [mm]	≥ 100	≥ 100	
Freie Enden Mediumrohr [mm]	150 - 250 mm Toleranz von ± 10 mm	150 - 250 mm Differenz der Längen ≤ 40 mm	
Ummantelungsenden	Sauber geschnitten Toleranz von $2,5^\circ$ rechtwinklig zur Rohrachse	Sauber geschnitten Toleranz von $2,5^\circ$ rechtwinklig zur Rohrachse	

Tabelle 19: Anforderungen Verbindung der Leitungen

Gemäß DIN EN 13941-2 sind mehrere Festlegungen für die Sichtprüfung sowie die zerstörungsfreie Prüfung der Schweißnähte gegeben. Die letztere wird ebenfalls in der chinesischen Norm CJJ/T 81 für die Prüfung angewandt. In beiden Gebieten erfolgt dieses Prüfverfahren in Form einer Durchstrahlungsprüfung oder Ultraschalluntersuchung, wobei die Ultraschalluntersuchung in China nicht priorisiert wird. Das Ausmaß der Prüfungen ist gemäß DIN EN 13941-2 abhängig von der Projektklasse gegeben, während in China die Ausführung und der Umfang der Prüfverfahren von dem Rohrdurchmesser, der Temperatur und dem Druck abhängen.

Für die Verbindung mit den Muffen sind im Rahmen chinesischer sowie koreanischer Richtlinien wenig bis keine Vorgaben vorhanden. Für den Vergleich dienen hier lediglich einige Angaben der Norm CJJ/T 81 bezüglich der Bedingungen für die Ausführung der Muffenverbindung der Leitungen. Anhand der Angaben ist zu erkennen, dass gemäß chinesischer Richtlinien eine strenge Eingrenzung der Temperaturen der Umgebung während des Aufschäumprozesses vorgegeben ist. Die festgelegte Umgebungstemperatur im Bereich von $10^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C}$ kann eine optimale Verarbeitung des Polyurethanschaums gewährleisten [50]. Für beide Gebiete ist die Höchsttemperatur des Mediumrohres annähernd gleichgesetzt; die in China zugelassene maximale Temperatur ist dabei mit 50°C um 5°C höher als in der DIN EN 13491-2 vorgegeben. Nach Festsetzungen der europäischen DIN soll eine Montage mit der in der Tabelle 19 angegebenen Temperierung des Mediumrohres eine Beeinflussung der Schaumeigenschaften verhindern, kann aber unter Einhaltung gesonderter Maßnahmen über- sowie unterschritten werden. Es sind demnach auch Montagen außerhalb des vorgegebenen Wertebereichs gemäß chinesischer Richtlinie möglich.

Im Zuge der Verbindung der Rohre sind in den Richtlinien der EU und China Werte für die Ausführung freier Enden der Stahlmediumrohre vorgegeben, um Schweißarbeiten zu ermöglichen. Die Vorgaben der jeweiligen Richtlinien sind identisch, mit 150 mm – 250 mm freigelegte Länge des Stahlrohrs. Gemäß DIN EN 253 wird eine Abweichung von ± 10 mm toleriert, während die Norm GB/T 29047 eine Begrenzung der Differenz der freigelegten Enden ≤ 40 mm festlegt.

Auch für die Ummantelungsenden sind in den Richtlinien beider Gebiete Vorgaben zur Ausführung gegeben. Gemäß DIN EN 253 sowie GB/T 29047 ist ein sauberer sowie rechtwinkliger Schnitt der Ummantelungsenden auf der Länge der Dämmstoffkante erforderlich.

1.2.5.2 Anforderungen an den Betrieb

Der Betrieb der Fernwärmeleitungen unterliegt je nach Region unterschiedlichen regulatorischen Anforderungen. Aspekte wie Betriebsdruck und -temperatur stellen maßgebende Einflussfaktoren auf die Lebensdauer des Rohrsystems dar. Zur Gewährleistung eines sicheren Betriebs werden im

Rahmen der normativen Vorgaben ausgewählte Prüfverfahren mit einzuhaltenden Mindestwerten vorgegeben.

Die Tabelle 20 stellt die betrieblichen Anforderungen der verlegten Rohrsysteme dar.

	EU	China	Korea
Max. zulässiger Betriebsdruck p_B [bar]	25	25	25
Max. zulässige Betriebstemperatur T_{max} [°C]	140	130	130
Nutzungsdauer	- Min. 30 Jahre für Dauerbetrieb (max. Temp. 120°C) & individuelle Zeitintervalle (max. Temp. 140°C) (Σ Individuelle Zeitintervalle ≤ 300 h/Jahr) - Min. 50 Jahre (Dauertemp. $< 115^\circ\text{C}$)	- Min. 30 Jahre für Dauerbetrieb (max Temp. 120°C) - Min. 50 Jahre (Dauertemp. 115°C) - Über 50 Jahre (Dauertemp. $< 115^\circ\text{C}$)	- Min. 30 Jahre für Dauerbetrieb (max. Temp. 120°C) & individuelle Zeitintervalle (max. Temp. 140°C) (Σ Individuelle Zeitintervalle ≤ 300 h/Jahr) - Min. 50 Jahre (Dauertemp. $< 115^\circ\text{C}$)
Axiale Scherfestigkeit τ_{ax} [MPa]	Nicht gealterter Zustand: - Prüftemp. 23+-2°C: 0,12 MPa - Prüftemp. 140+-2°C: 0,08 MPa Gealterter Zustand: - Prüftemp. 23+-2°C: 45% des Anfangswerts & 0,12 MPa - Prüftemp. 140+-2°C: 0,08 MPa	Nicht gealterter Zustand: - Prüftemp. 23+-2°C: 0,12 MPa - Prüftemp. 140+-2°C: 0,08 MPa Gealterter Zustand: - Prüftemp. 23+-2°C: 0,12 MPa - Prüftemp. 140+-2°C: 0,08 MPa	Nicht gealterter Zustand: - Prüftemp. 23+-2°C: 0,12 MPa - Prüftemp. 140+-2°C: 0,08 MPa Gealterter Zustand: - Prüftemp. 23+-2°C: 45% des Anfangswerts & 0,12 MPa - Prüftemp. 140+-2°C: 0,08 MPa
Stoßfestigkeit	Keine sichtbaren Risse bei Fallgewicht (3 kg) von 2 m Höhe bei -20°C	Keine sichtbaren Risse bei Fallgewicht (3 kg) von 2 m Höhe bei -20°C	Keine sichtbaren Risse bei Fallgewicht (3 kg) von 2 m Höhe bei -20°C
Oberflächenbeschaffenheit	Stauchung an Oberfläche des Verbundrohrsystems (Oberfläche im Anfangszustand) $\leq 15\%$ der Dämmdicke betragen	Stauchung an Oberfläche des Verbundrohrsystems $\leq 15\%$ der Dämmdicke betragen	Stauchung an Oberfläche des Verbundrohrsystems (Oberfläche im Anfangszustand) $\leq 15\%$ der Dämmdicke betragen

Tabelle 20: Anforderungen an Betrieb der Leitungen

Die Betriebsdrücke sowie -temperaturen sind maßgebend für die Bestimmung der Nutzungsdauer. Die Vorgaben der jeweiligen Gebiete für die Auslegungen der Dauer sind dabei ähnlich strukturiert. Relevant ist zudem die Angabe für die koreanischen Regulation, welche gemäß Herstellerangaben eine Mindestdauer von 50 Jahren vorgibt und als geltende Anforderungen für die Rohrsysteme die Angaben nach DIN EN 253, EN 448, EN 488 und EN 489 stellt [16]. Demnach werden die für die EU aufgelisteten Anforderungen für die koreanischen Angaben übernommen. Bezüglich der Temperatur soll eine Mindestnutzung von 30 Jahren bei einer maximalen Temperatur von 120°C mit zeitweisen Anstiegen auf 140°C gewährleistet werden. Die Zeitintervalle für den Anstieg sind gemäß DIN EN 253 vorgegeben. Die nach GB/T 29047 geltenden Anforderungen sind teilweise identisch, bis auf die zulässigen Überschreitungen der 120°C, welche in den Richtlinien nicht festgehalten sind. Es sind lediglich Angaben des Herstellers für zulässige Erhöhungen von 130°C – 140°C vorhanden und die

belegen, dass die Betriebstemperatur der in China verlegten Rohrsysteme den Richtwert von 120°C auch übersteigen kann ([35], [51]).

Die aufnehmbaren Scherkräfte sind für alle Gebiete in Form von Prüfverfahren zu bestimmen und müssen die Anforderungen gemäß der gestellten Mindestwerte der Richtlinien erfüllen. Ähnlich wie bei der Nutzungsdauer basieren die Mindestwerte und das Prüfverfahren auf den Festlegungen der jeweiligen Normen DIN EN 253 und GB/T 29047. Auch die Prüftemperatur sowie die zulässigen Mindestwerte sind identisch; der einzige Unterschied besteht in der Prüfung des gealterten Zustands, bei dem gemäß europäischer Richtlinie die Festigkeit mindestens 45% der Scherfestigkeit im nicht gealterten Zustand betragen muss. Es sind demnach kaum Unterscheidungen in den Anforderungen zur Scherfestigkeit vorhanden.

Auch die Anforderungen hinsichtlich der mittels Prüfverfahren ermittelten Stoßfestigkeit sowie der Oberflächenbeschaffenheit des Rohres sind für alle drei Gebiete gleich.

Als abschließende Zusammenfassung lässt sich sagen, dass für die in der EU, China und Korea verlegten Rohrsysteme viele Überschneidungen hinsichtlich der Anforderungen an den Betrieb für eine sichere und langfristige Nutzung der Fernwärmeleitungen von mindestens 30 bis über 50 Jahren gegeben sind. Begründet werden kann dies vor allem mit der vereinheitlichten Vorgabe der Anforderungen in der europaweiten, sowie chinesischen Normung.

1.2.6 Hydraulische und wärmetechnische Grundlagen

Für die Auslegung der Hydraulik des gesamten Leitungsnetzes ist die Berücksichtigung von hydraulischen Druckverlusten essenziell. Der Druckverlust Δp hängt dabei von der Strömungsgeschwindigkeit, dem Rohrrinnendurchmesser, dem Fließmedium und spezifischen Druckverlustbeiwerten ab [53].

Gleichzeitig ist die Ermittlung der während des Mediumtransports entstehenden Wärmeverluste für die Bewertung der Energieeffizienz des Gesamtsystems erforderlich. Maßgeblich für die Beurteilung ist der von den Materialeigenschaften und Abmessungen abhängige Wärmedurchgangskoeffizient. Spezifische Formeln für die Ermittlung der Wärmeverluste von Fernwärmeleitungen gemäß Vorgaben der EU sind in der DIN EN 13941-1 Anhang D [9] zu finden.

1.2.7 Verbindungstechniken von Rohrsystemen

Ein zentraler technischer Aspekt für die Ausführung von Wärmenetzen stellt die Verbindung der Rohrsysteme dar. Eine wichtige Funktion übernehmen hierbei die Schweißverbindungen der Stahlrohre. Diese Verbindungen müssen einen dichten und stabilen Transport des thermischen Mediums gewährleisten sowie die Beanspruchungen infolge Dehnungen, Innendruck und Erdlasten aufnehmen können [56]. Sie werden in Abhängigkeit der geforderten Abmessungen und Beanspruchungen, mit verschiedenen Schweißverfahren hergestellt.

Neben der Verbindung des Mediumrohrs ist zudem der Anschluss der Mantelrohre relevant, da dieser die Verbindung der Rohrsysteme miteinander bildet. Mittels Verbindungsmuffe kann eine kraftschlüssige, gas- und wasserdichte Mantelrohrverbindung hergestellt werden. Dabei werden in Abhängigkeit der vorhandenen technischen Anforderungen unterschiedliche Muffenkonstruktionen mit dazugehörigen Manschetten ausgeführt.

In den folgenden Abschnitten werden die ausgeführten Verbindungen im Rahmen der Realisierung eines Wärmenetzes in den Bereichen der jeweiligen Nationen beschrieben und verglichen.

1.2.7.1 Schweißverbindungen

Die Schweißverbindungen stellen eine elementare Verbindung zwischen den Rohrsystemen dar und erfordern hohe Qualitätsanforderungen sowie Prüfstandards, um einen dichten und sicheren Mediumtransport sicherstellen zu können. Sie werden für die Verbindung der Stahlmediumrohre hergestellt, um eine hohe mechanische Festigkeit, Dichtheit und Dauerhaftigkeit dieser Verbindung zu gewährleisten.

In der Tabelle 21 werden die ausgeführten Schweißverfahren in der EU, China und Korea aufgelistet.

EU	China	Korea
- Autogenschweißen mit Sauerstoff-Acetylenflamme - Lichtbogenhandschweißen - Schutzgasschweißen: - Wolfram-Inertgas-Schweißen (WIG) - Metall-Aktivgas-Schweißen (MAG)	- Lichtbogenhandschweißen - Schutzgasschweißen: - Wolfram-Inertgas-Schweißen (WIG) - Metall-Aktivgas-Schweißen (MAG) - Metall-Inertgas-Schweißen (MIG)	- Lichtbogenhandschweißen - Schutzgasschweißen: - Wolfram-Inertgas-Schweißen (WIG) - Metall-Aktivgas-Schweißen (MAG) - Metall-Inertgas-Schweißen (MIG)

Tabelle 21: Ausgeführte Schweißverfahren für die Verbindung der Mediumrohre

Bei dem Vergleich der durchgeführten Schweißverfahren in den jeweiligen Nationen wird ersichtlich, dass annähernd gleiche Prozesse für die Verbindung der Mediumrohre ausgeführt werden. Insbesondere Schweißverfahren wie das Lichtbogenhandschweißen, welches sich durch geringe Kosten, einfache Handhabung und hohe Güterwerte [54] optimal für die Verarbeitung von Material mit einer Dicke von bis zu 20 mm eignet, werden global ausgeführt. Ebenso findet das WIG-Verfahren, aufgrund seiner hohen Nahtqualität und den daraus resultierenden optimierten mechanischen Eigenschaften, häufige Anwendung für die Schweißverbindung der Rohre [55]. Das MAG- sowie MIG-Verfahren übertrifft jedoch die anderen Prozesse im Hinblick auf die Herstellung einer hochwertigen Nahtqualität mit erhöhter Geschwindigkeit. Dies stellt nicht nur in Bezug auf die Ökonomie der Herstellung, sondern auch auf die Qualität relevant, da der aus der hohen Geschwindigkeit resultierende geringere Wärmeeintrag im Bereich der Schweißnaht eine Qualitätsminderung des Materials infolge hoher Wärmeeinwirkung verhindert.

Generell ist hinzuzufügen, dass die Schutzgasschweißverfahren bei schlechten Witterungsverhältnissen aufgrund des einzusetzenden Schutzgases nicht ausgeführt werden können und dies bei der überwiegenden Verlegung von erdverlegten Fernwärmeleitungen im Freien berücksichtigt werden muss.

Für die Herstellung und Prüfung der Schweißnähte der Mediumrohre sind in der EU die Vorgaben des AGFW-Arbeitsblatt 446 [56] maßgebend, während Festlegungen zu den Schweißprozessen für den chinesischen Fernwärmeleitungsbau gemäß der Norm GB/T 29047 vorgegeben sind. Die Informationen für Korea basieren auf Angaben des Herstellers Pem Korea sowie literarischer Quellen [57].

1.2.7.2 Muffenverbindungen

Neben der klassischen Schweißverbindung ist die Konstruktion der Muffenverbindung ein weiteres Element, welches die Verbindungen der Rohrsysteme innerhalb eines Wärmenetzes gewährleistet. Sie stellt nach Verbindung der Mediumrohre den mechanischen sowie wärmetechnischen Verschluss der Ummantelung und Dämmung dar.

Die Ausführung der Muffenmontage kann in Form von verschiedenen Methoden, Materialien und Dichtungsweisen erfolgen und ist abhängig von den nationalen Qualitätsanforderungen. In den folgenden Abschnitten werden die in der EU, China und Korea eingesetzten Muffentypen verglichen.

1.2.7.3 Vergleich der Ausführungen

Der tabellarische Vergleich der ausgeführten Muffenverbindungen der jeweiligen Gebiete ist in Tabelle 22 dargestellt.

EU	China	Korea
- Schweißmuffen - Vernetzte Schrumpfmuffen - HDPE-Schrumpfmuffen	- Schweißmuffen - Vernetzte Schrumpfmuffen - HDPE-Schrumpfmuffen	- Schweißmuffen - HDPE-Schrumpfmuffen

Tabelle 22: Ausgeführte Muffenverbindungen

Die Auswertung der vorliegenden Daten zeigt, dass größtenteils gleiche Muffensysteme für die Verbindung der Rohre ausgeführt werden.

Die Schweißmuffen werden länderübergreifend eingebaut. Dabei ist zu unterscheiden in Muffen, die vor und nach der Verschweißung der Stahlmediumrohre zu montieren sind. Gemäß Angaben der Hersteller erfolgt der Schweißprozess der Muffen in Form von Elektroschweißmuffen, bei denen mittels Einschweißband aus elektrogalvanisiertem Netz eine Schweißverbindung zwischen dem Mantelrohr und der Muffe hergestellt wird ([58], [59], [16]). In der EU [58] sowie in China [59] werden sowohl offene als auch geschlossene Schweißmuffen verwendet, während in koreanischen Herstellerangaben die offenen Schweißmuffen aufgeführt sind [16].

Die Nutzung von vernetzten Schrumpfmuffen findet ebenfalls in mehreren Gebieten Anwendung. Die Vernetzung des Polyethylens wird angewendet, um die mechanischen, thermischen sowie chemischen Eigenschaften des Stoffes zu optimieren. Diese Bearbeitung des Kunststoffes wird vor Allem in der EU für die Herstellung von geschlossenen Schrumpfmuffen aber auch in China für die Produktion von offenen Schrumpfmuffen verwendet [60]. Im Allgemeinen lässt sich gemäß Angaben der chinesischen Händler erkennen, dass überwiegend offene Schrumpfmuffen für die Ausführung der Rohrverbindungen ausgeführt werden.

Es sind aber auch geschlossene Muffen aus HDPE in allen Nationen vertreten ([58], [59], [61]). Die Komponenten und Ausführung der geschlossenen Muffen variierten jedoch gemäß Angaben der verschiedenen Hersteller. Nach Richtlinien und Vorgaben der EU, größtenteils basierend auf dem Regelwerk der AFGW, sind im Rahmen der Muffenkonstruktion einer Muffe aus HDPE zusätzliche Dichtungsbänder erforderlich, während in den Beschreibungen der chinesischen und koreanischen Konstruktionsweise Dichtungsbänder nicht aufgeführt werden. Eine vollständige Ausschließung des Einbaus von abdichtenden Materialien während der Muffenmontage kann aber nicht angenommen werden, da die vorliegenden Informationen ausschließlich von den zur Verfügung stehenden Quellen einzelner Hersteller bezogen wurden und nicht auf verpflichtenden Normen und Richtlinien basieren. Zudem kann für die Muffenkonstruktion der koreanischen Wärmenetze die Wahrscheinlichkeit bestehen, dass grundlegende technische Anforderungen im Rahmen der europäischen Normung berücksichtigt werden, da sich die Nation für die normativen Regelungen der Konstruktion und Verlegung von Fernwärmeleitungen, wie bereits in vorherigen Kapiteln erwähnt, überwiegend an den europäischen Standards orientiert.

Die Dämmung der Muffenverbindung kann in zwei Varianten, gemäß Angaben europäischer Hersteller und dem AFGW-Regelwerk, durch Aufschäumung oder den Einbau von werkmäßig hergestellten Dämmelementen ausgeführt werden. Diese Optionen sind auch in den Informationen chinesischer Hersteller aufgeführt. Die Dämmung der Muffe für die Rohrverbindung in Korea, erfolgt anhand Angaben des Herstellers Odelya, durch Aufschäumung der Komponenten Polyol und Isocyanat.

Im Allgemeinen lässt sich zusammenfassen, dass gemäß den Richtlinien der EU und Deutschland, die Muffenkonstruktionen für die Verbindung der Rohrsysteme umfassend aufgeführt sind, hohe technische Standards erfüllen und mit den in Asien vertretenen Muffenkonstruktionen großenteils übereinstimmen. Als Herausforderung der Integration der chinesischen sowie koreanischen Leitungen ergibt sich demnach die Realisierung einer mechanisch festen und dichten Verbindung der Leitungen, in Bezug auf ihre differierenden geometrischen, chemischen sowie technischen Eigenschaften.

1.3 Zielsetzung und Methodik

Ziel dieser Arbeit ist der Vergleich internationaler Fernwärmeleitungen und die Untersuchung möglicher Herausforderungen für die Umsetzbarkeit eines Einbaus dieser Leitungen an bestehende Netze in Deutschland.

Es werden die in China und Korea ausgeführten Modelle der Einzel-Kunststoffmantelverbundrohre als internationaler Vergleich zu den für die europäischen Mitgliedsstaaten vereinheitlichten Rohren herangezogen.

Im Vergleich werden vorerst die zugrunde liegenden Normen der jeweiligen Nationen hervorgehoben und anschließend deren wesentliche Vorgaben für die Fernwärmeleitungen aufgezählt und gegenübergestellt. Diese Vorgaben beziehen sich nicht nur auf die Materialeigenschaften und Abmessungen der einzelnen Rohrbestandteile, sondern ebenfalls auf die qualitativen Anforderungen an die Komponenten des Verbundrohrsystems, die im Rahmen von durchzuführenden Prüfverfahren eingehalten werden müssen.

Anhand der vorliegenden Ergebnisse werden im weiteren Verlauf mögliche Problemstellungen (im hydraulischen sowie physikalischen Zusammenhang) bei der Verbindung der jeweiligen Leitungen aufgezählt und deren Einflüsse auf die Effizienz des gesamten Netzes untersucht. Dies erfolgt anhand beispielhafter Berechnungen der potenziellen Verluste in der Hydraulik sowie Wärme.

Zudem sollen die technischen Herausforderungen bei der Ausführung einer aus nicht einheitlichen Verbundrohren hergestellten Verbindung analysiert und mögliche Ausführungsvarianten untersucht werden.

Die für die Bewertung der Umsetzbarkeit und Effizienz relevanten ermittelten Daten wie die geometrische Kompatibilität, mögliche hydraulische sowie Wärmeverluste und Ausführung technischer Verbindungen, werden in einem abschließenden Ergebnis zusammenfassend dargestellt.

Anschließend werden im Fazit die vorliegenden Ergebnisse in Bezug auf eine Umsetzbarkeit von Wärmenetzen mit kombinierten Verbundrohrsystemen aus der EU, China und Korea bewertet; mit dem Verweis auf potenzielle Herausforderungen und mögliche Entwicklungen für die Zukunft.

2 Analyse technischer Herausforderungen bei der Kombination unterschiedlicher Rohrsysteme

Die Integration von Rohren mit abweichenden Abmessungen und Materialeigenschaften kann im Rahmen des Entwurfs eines Wärmenetzes Herausforderungen und Probleme erzeugen, die sich auf die Bemessung, Ausführung sowie den Betrieb auswirken können. Im Zuge der Fragestellung dieser Arbeit sollen in diesem Kapitel die zentralen technischen Herausforderungen bei der Kombination der in China und Korea standardisierten Rohrsysteme mit den gemäß EU-Richtlinien ausgeführten Fernwärmeleitungen analysiert werden. Besonders relevant sind in diesem Kontext Schnittstellenprobleme, die sich auf den Betrieb und die Effizienz des Rohrsystems auswirken können. Deren Ausmaß soll in den folgenden Abschnitten erfasst und daraufhin die Umsetzbarkeit eines kombinierten Netzes bewertet werden.

2.1 Hydraulischer Druckverlust

Die Verbindung verschiedener Rohrsysteme in einem Fernwärmenetz führt zwangsläufig zu mehreren Unterschieden der hydraulischen Eigenschaften der kombinierten Komponenten. Wie bereits in Kapitel 1.2.3 ermittelt, sind bezüglich der Materialauswahl sowie der Abmessungen der Stahlmediumrohre Differenzen vorhanden, die sich auf den Strömungswiderstand auswirken können. Insbesondere der Aspekt, dass erhöhte Abweichungen der Durchmesser sowie Wanddicken für die jeweiligen Nennweiten der EU, China und Korea vorliegen lässt darauf schließen, dass Druckverluste resultierend aus Querschnittsveränderungen entstehen können. In diesem Kapitel werden mögliche Druckverluste infolge Querschnittsänderungen ermittelt und technische Umsetzbarkeit der Verbindung von Mediumrohren unterschiedlicher Abmessungen bewertet.

Diese Bewertung ist besonders relevant, da die bereits erfassten Abmessungen der Durchmesser des Mediumrohres teilweise stark differenzieren und dementsprechend die Möglichkeit besteht, dass eine Verbindung der Rohre technisch nicht umsetzbar ist. Beim Vergleich der Werte gemäß Tabelle ist zu erkennen, dass große Abweichungen vorhanden sind, häufig in einem Wertebereich, der dazu führt, dass sich im Zuge der Verbindung der verschiedenen Rohre eine Aufkantung aufgrund einer plötzlichen Querschnittserweiterung oder -verengung bildet. Diese Veränderungen resultieren aus den unterschiedlichen Durchmessern sowie Wanddicken der zu kombinierende Rohre und müssen als Druckverluste infolge Querschnittsänderungen berücksichtigt werden.

Abbildung 2. 1 und Abbildung 2. 2 stellen die möglichen Querschnittsänderungen dar, die sich durch die Verbindung der nach chinesischen sowie koreanischen Vorgaben hergestellten Stahlmediumrohre mit den in der EU standardisierten Rohre ergeben.

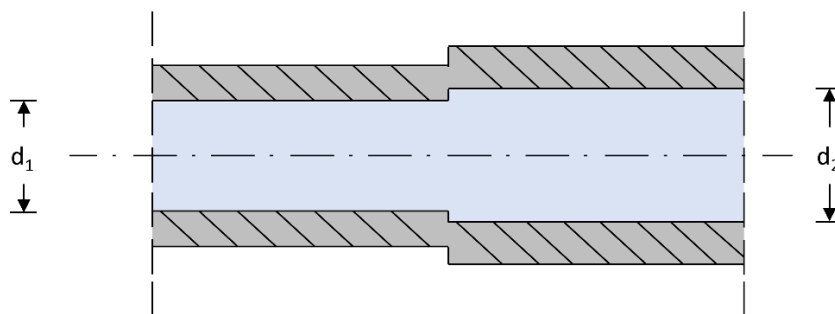


Abbildung 2. 1: Plötzliche Erweiterung [Quelle: Eigene Darstellung]

Eine plötzliche Erweiterung führt ebenfalls zu Druckverlusten, da durch die Erweiterung sowie die Vermischung der Strömung die Geschwindigkeit sinkt und sich in dem vergrößerten Bereich des Rohres Wirbel bilden. Das strömende Medium kann sich nach der Erweiterung nicht unmittelbar an die neue Geometrie anpassen, wodurch es zu einem Strömungsabriss, Verwirbelungen und Rückströmungen kommt. Der durch den Mischvorgang verursachte Druckverlust wird als Borda-Carnotscher Druckverlust bezeichnet ([52], [53]).

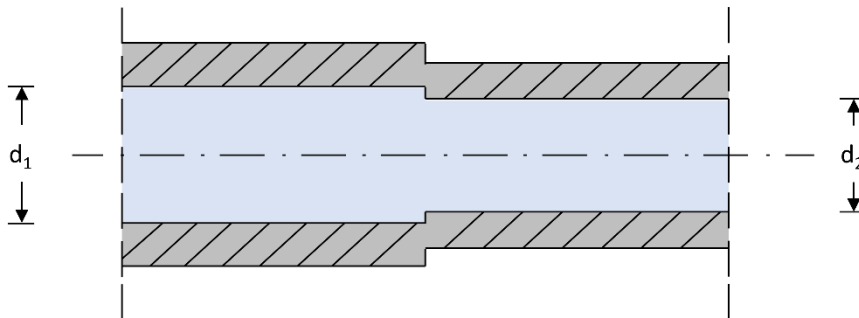


Abbildung 2. 2: Plötzliche Verengung [Quelle: Eigene Darstellung]

Bei einer plötzlichen Querschnittsverengung entsteht ein lokaler Druckverlust, der auf eine erhöhte Strömungsgeschwindigkeit und die damit verbunden Turbulenzen zurückzuführen ist. Die plötzliche Verringerung des Rohrquerschnitts führt zu einer beschleunigten Strömung, wodurch Turbulenzen entstehen. Infolgedessen entsteht ein erhöhter Energieverlust, der zu Druckverlusten im verengten Rohreinlauf führt [62].

Für beide Fälle werden in den folgenden Abschnitten die Verlustbeiwerte und der resultierende Druckverlust für die Kombination der Rohre EU – China und EU – Korea ermittelt und aufgelistet. Des Weiteren werden in diesem Zusammenhang die Nennweiten der Kombinationen bestimmt, welche im Rahmen der Verbindungsausführung nicht umsetzbar sind, da die Differenz zwischen den Abmessungen zu hoch und der Außendurchmesser d_o des kleineren bemessenen Rohres geringer als der Innendurchmesser d_i des größeren Rohres ist, siehe Abbildung 2. 3. Die Auswertung dazu folgt in der Ergebnisdarstellung.

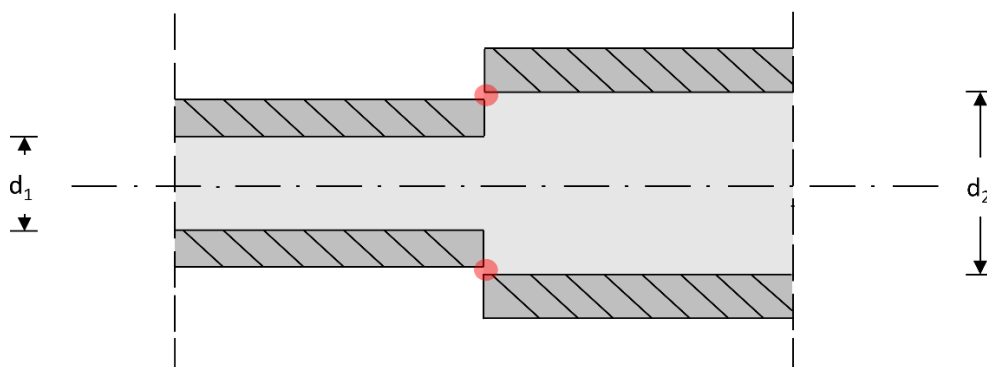


Abbildung 2. 3: Lücken bedingt durch Abweichungen der Abmessungen [Quelle: Eigene Darstellung]

Für die mathematische Formulierung der Druckverluste indiziert durch Querschnittsveränderungen bei der Verbindung unterschiedlicher Rohre muss vorerst, wie bei anderweitig entstehenden Druckverlusten, der Einzelwiderstand mittels Druckverlustbeiwert ζ bestimmt werden. Dieser wird in Abhängigkeit der Querschnittsflächen der zu kombinierende Rohre mit folgenden Formeln ermittelt [63]:

$$\zeta = \left(1 - \frac{A_1}{A_2}\right) \quad \text{Für Querschnittserweiterungen (Gl. 1)}$$

$$\zeta = 0,5 - 0,4 \cdot \left(\frac{A_2}{A_1}\right) - 0,1 \cdot \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2 \quad \text{Für Querschnittsverengungen (Gl. 2)}$$

Mit:

ζ = Druckverlustbeiwert

A_1 = Querschnittsfläche Rohr vor der Erweiterung / Verengung [m²]

A_2 = Querschnittsfläche Rohr nach der Erweiterung / Verengung [m²]

Der Druckverlust kann mit den aus Gleichung 1 oder 2 errechneten Druckverlustbeiwerten ermittelt werden. Weitere Parameter zur Berechnung des Verlustes sind die Strömungsgeschwindigkeit sowie die Dichte des Fluids. Um einen Vergleich der vorhandenen Druckverluste durchführen zu können, wird im Rahmen dieser Berechnungen ein konstanter Wert für die Strömungsgeschwindigkeit angenommen. Hierfür wird auf die von Herstellern angegebenen wirtschaftlichen Strömungsgeschwindigkeiten zurückgegriffen [46]. Der Druckverlust durch den Einzelwiderstand infolge Querschnittsveränderungen kann mit folgender Formel ermittelt werden [64]:

$$\Delta p_\zeta = \frac{\zeta \cdot \rho \cdot v^2}{2} \quad (\text{Gl. 3})$$

Mit:

ζ = Druckverlustbeiwert [-]

ρ = Dichte des Mediums [$\frac{kg}{m^3}$]

v = Strömungsgeschwindigkeit des Mediums [$\frac{m}{s}$]

Für die Berechnung werden die Parameter der Gleichung 3 mit $\rho = 1000,0 \text{ kg/m}^3$ für Wasser und der Geschwindigkeit nach Vorgaben aus der Praxis mit $v = 1,1 \text{ m/s}$ bestimmt [65]. Es werden für die gemäß Tabelle angegebenen Abmessungen des Mediumrohres die Einzelwiderstände ermittelt.

Um eine maßgebende Aussage über den Einfluss der Querschnittsveränderungen infolge der Kombination der Rohrquerschnitte aus China und Korea treffen zu können, muss ein Vergleich der Druckverluste an beispielhaften Verbindungen durchgeführt werden. Die eine Verbindung dient der Ermittlung der Druckverluste in einer Kombination eines chinesischen Rohrs mit zwei nach EU-Richtlinien standardisierten Rohrs, mit der anderen Verbindung werden die Verluste mit dem Einbau des koreanischen anstelle des chinesischen Rohrs berechnet. Als zusätzlicher Vergleich folgt die Ermittlung der Druckverluste über eine Verbindung gleicher Länge, welche ausschließlich mit den in der EU verlegten Leitungen hergestellt wird. Alle drei Kombinationsvarianten sind in den unteren Abbildungen dargestellt.

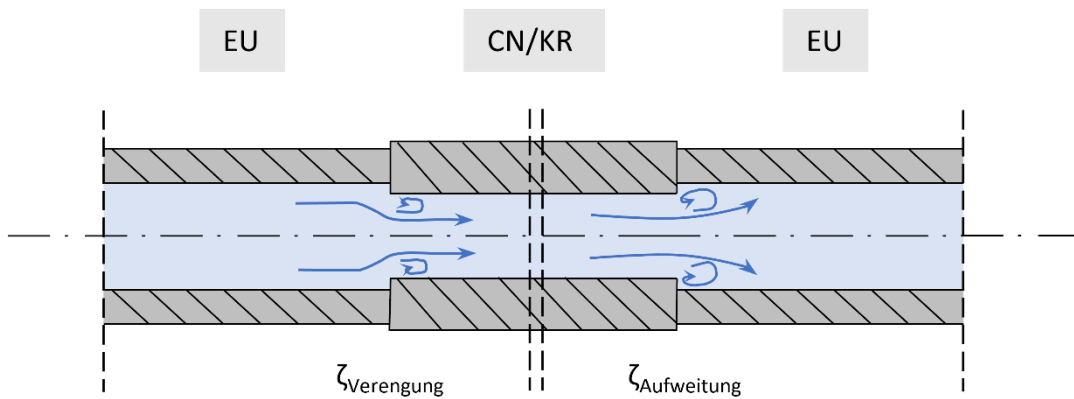


Abbildung 2. 4: Rohrverbindung mit kleinerem Querschnitt (international) [Quelle: Eigene Darstellung]

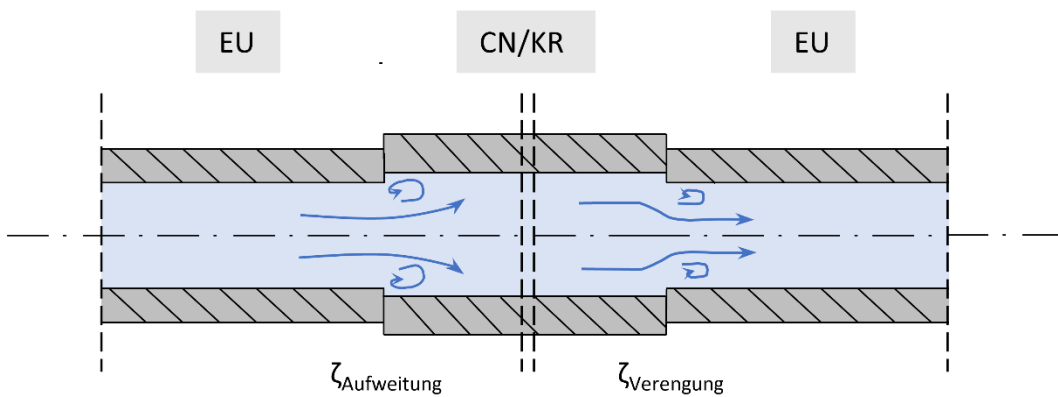


Abbildung 2. 5: Rohrverbindung mit größerem Querschnitt (international) [Quelle: Eigene Darstellung]

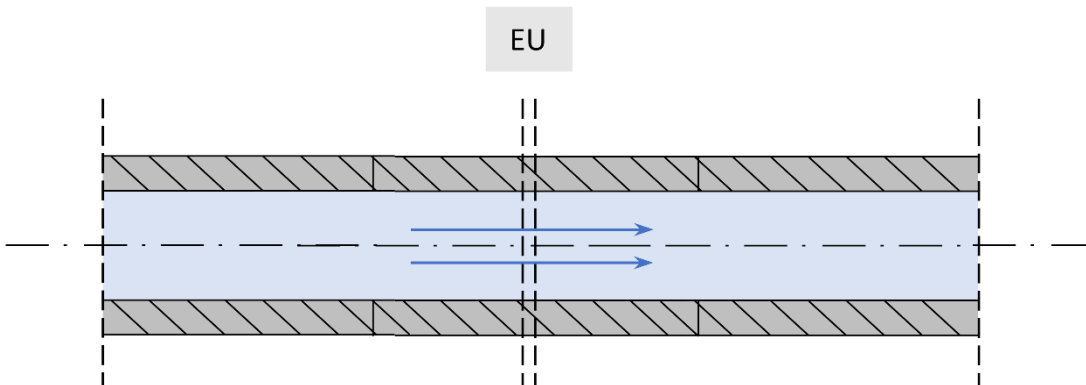


Abbildung 2. 6: Rohrverbindung mit gleichem Querschnitt (EU) [Quelle: Eigene Darstellung]

Für die Ermittlung des gesamten Druckverlustes über eine Verbindung von 3 Rohren à 6 m Länge der Reihe DN 80 werden die entstehenden Verluste mit der Gl.4 für die Druckverlustberechnung eines geraden Rohrabschnittes ermittelt und mit den nach Gl.1 und Gl.2 errechneten Einzelwiderständen addiert. Die Druckverlustberechnung erfolgt gemäß folgender Formel nach Darcy-Weisbach [64]:

$$\Delta p = \frac{\lambda \cdot L \cdot \rho \cdot v^2}{d \cdot 2} \quad (\text{Gl. 4})$$

Mit:

λ = Rohrreibungszahl [-]

L = Länge der Rohrleitung [m]

ρ = Dichte des Mediums [$\frac{kg}{m^3}$]

v = Strömungsgeschwindigkeit des Mediums [$\frac{m}{s}$]

d = Innendurchmesser der Rohrleitung [m]

Dabei sind für alle Parameter bis auf die Rohrreibungszahl λ die Werte vorgegeben. Für die Ermittlung der Rohrreibungszahl ist von der Reynoldszahl Re abhängig, welche unter anderem zu Unterscheidung des Strömungsverhältnisses in laminarer und turbulenter Strömung verwendet wird. Die Reynoldszahl wird mit folgender Gleichung ermittelt [64]:

$$Re = \frac{v \cdot d_{hyd}}{\nu} \quad (Gl. 5)$$

Mit:

v = Strömungsgeschwindigkeit des Mediums [$\frac{m}{s}$]

d_{hyd} = Hydraulischer Durchmesser der Rohrleitung [m]

ν = Kinematische Viskosität [$\frac{m}{s^2}$]

Für die Bestimmung des hydraulischen Durchmessers gilt: $d_{hyd} = d$. Die kinematische Viskosität ist mit $\nu = 1,31 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}^2$ vorgegeben. Für die entsprechende Nennweite kann dementsprechend die Reynoldszahl bestimmt werden. Als Durchmesser werden die Innendurchmesser der Rohre DN 80 verwendet. Demnach ergeben sich für die Reynoldszahl der Durchmesser Europa, China und Korea folgende Werte:

EU:

$$Re = \frac{1,1 \frac{m}{s} \cdot 0,0825 \text{ m}}{1,31 \cdot 10^{-6} \frac{m}{s^2}} = 69274,81 [-]$$

China:

$$Re = \frac{1,1 \frac{m}{s} \cdot 0,081 \text{ m}}{1,31 \cdot 10^{-6} \frac{m}{s^2}} = 68015,27 [-]$$

Korea:

$$Re = \frac{1,1 \frac{m}{s} \cdot 0,0801 \text{ m}}{1,31 \cdot 10^{-6} \frac{m}{s^2}} = 67259,54 [-]$$

Bis zu einer Reynoldszahl von $Re = 2300 [-]$ wird die Rohrströmung als laminar bezeichnet, ab einer Zahl $Re > 2300 [-]$ beginnen sich erste turbulente Strömungen auszubilden [64]. Betrachtet man die vorliegenden Ergebnisse wird ersichtlich, dass in allen Rohrdurchmesser eine turbulente Strömung erfolgt.

Für die Bestimmung der Rohrreibungszahl λ muss neben der Reynoldszahl die relative Rauheit nach Gleichung 6 berechnet werden [64]:

$$\varepsilon = \frac{k}{d_{hyd}} \quad (\text{Gl. 5})$$

Mit:

k = Rauheitsgrad [mm]

d_{hyd} = Hydraulischer Durchmesser [mm]

Für die drei Rohre ergeben sich folgende Werte:

EU:

$$\varepsilon = \frac{0,045 \text{ mm}}{82,5 \text{ mm}} = 0,00055$$

China:

$$\varepsilon = \frac{0,045 \text{ mm}}{81 \text{ mm}} = 0,00056$$

Korea:

$$\varepsilon = \frac{0,045 \text{ mm}}{80,1 \text{ mm}} = 0,00056$$

Mit den berechneten Werten kann die Ermittlung der Rohrreibungszahl anhand des Moody-Diagrammes nach Colebrook-White erfolgen [64].

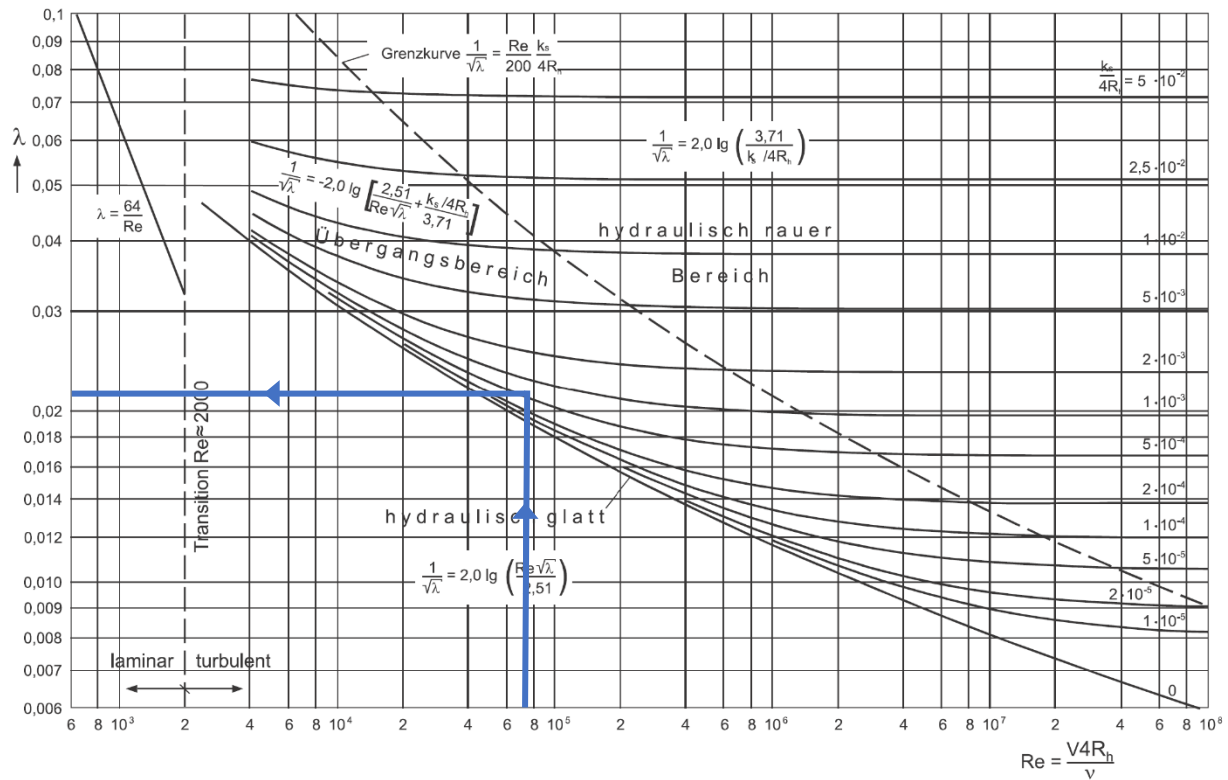


Abbildung 2. 7: Moody-Diagramm [Quelle: Jirka, Lang, 2009, S.21]

Mit den Angaben der Reynoldszahl auf der x-Achse und der k/D -Kurve nach Ermittlung der relativen Rauheit nach Gleichung 5, kann die Rohrreibungszahl λ an der y-Achse abgelesen werden. Es folgt eine Ablesung der Rohrreibungszahlen λ für alle drei Durchmesser mit $\lambda \approx 0,022$ [-].

Alternativ kann die Rohrreibungszahl berechnet werden. Für alle drei Durchmesser befinden sich die Rohre im Übergangsbereich. Demnach erfolgt die rechnerische Ermittlung der Rohrreibungszahl gemäß folgender Formel nach Prandtl-Colebrook [66]:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \cdot \log \left(\frac{2,51}{Re \cdot \sqrt{\lambda}} + \frac{k}{d_{hyd} \cdot 3,71} \right) \quad (Gl.6)$$

Für die ermittelten Werte der Durchmesser der europäischen, chinesischen und koreanischen Rohre werden folgende λ -Werte ermittelt:

EU:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \cdot \log \left(\frac{2,51}{69274,81 \cdot \sqrt{\lambda}} + \frac{4,5 \cdot 10^{-5} \text{ m}}{0,0825 \text{ m} \cdot 3,71} \right)$$

$$\lambda = 0,0216 \text{ [-]}$$

China:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \cdot \log \left(\frac{2,51}{68015,27 \cdot \sqrt{\lambda}} + \frac{4,5 \cdot 10^{-5} \text{ m}}{0,081 \text{ m} \cdot 3,71} \right)$$

$$\lambda = 0,0217 \text{ [-]}$$

Korea:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \cdot \log \left(\frac{2,51}{67259,54 \cdot \sqrt{\lambda}} + \frac{4,5 \cdot 10^{-5} \text{ m}}{0,0801 \text{ m} \cdot 3,71} \right)$$

$$\lambda = 0,0217 [-]$$

Die λ -Werte liegen bei der Ablesung anhand des Diagramms sowie bei der rechnerischen Ermittlung in einem ähnlichen Wertebereich.

Mit den ermittelten Werten kann die Berechnung des gesamten Druckverlustes der beispielhaften Rohrverbindungen für die Nennweite DN 80 erfolgen.

Der gesamte Druckverlust ergibt sich demnach gemäß folgender Berechnung:

$$\Delta p = \underbrace{\left(\frac{\lambda \cdot L \cdot \rho \cdot v^2}{d \cdot 2} \right) \cdot 2}_{\Delta p \text{ (EU)}} + \underbrace{\sum \zeta_i \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2}}_{\zeta_{\text{Aufweitung, Verengung}}} + \underbrace{\left(\frac{\lambda \cdot L \cdot \rho \cdot v^2}{d \cdot 2} \right)}_{\Delta p \text{ (CN/KR)}} \quad (\text{Gl. 7})$$

Die Verluste der Rohrabschnitte der EU werden gemäß den aufgeführten Varianten in den Abbildungen jeweils für den Anfang und das Ende der Rohrverbindung berechnet. Für das mittlere Rohrstück werden die chinesischen und koreanischen Rohre verwendet. Als Vergleich der mit diesen Kombinationen ermittelten Verluste wird eine weitere Berechnung für die Rohrverbindung über dieselbe Länge ausschließlich mit Rohren der EU ausgeführt (siehe Abbildung 2. 6). Diese Druckverlustberechnung erfolgt gemäß folgender Formel, welche lediglich die Druckverluste eines geraden Rohrabschnittes ermittelt.

$$\Delta p = \underbrace{\frac{\lambda \cdot L_{\text{Ges}} \cdot \rho \cdot v^2}{d \cdot 2}}_{\Delta p \text{ (EU)}} \quad (\text{Gl. 8})$$

Der Querschnitt für diese Verbindung bleibt konstant, deshalb ist keine Berücksichtigung von Einzelwiderständen infolge Querschnittserweiterungen oder -verengung erforderlich.

Bei dem Vergleich der drei Innendurchmesser für die Nennweite DN 80 wird ersichtlich, dass das Rohr nach Vorgaben der EU den größten Innendurchmesser aufweist. Demnach entsteht bei der chinesischen sowie koreanischen Rohrverbindung eine Strömung gemäß Abbildung 2. 4. Es folgen die Ermittlungen der Druckverluste für die Kombinationen der Nennweite DN 80 wie folgt:

EU-CN-EU:

Druckverlustbeiwerte nach Gleichung 1 und 2:

$$\begin{aligned}\zeta &= 0,5 - 0,4 \cdot \left(\frac{A_2}{A_1}\right) - 0,1 \cdot \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2 \\ &= 0,5 - 0,4 \cdot \left(\frac{\left(\frac{\pi \cdot (0,081 \text{ m})^2}{4}\right)}{\left(\frac{\pi \cdot (0,0825 \text{ m})^2}{4}\right)}\right) - 0,1 \cdot \left(\left(\frac{\left(\frac{\pi \cdot (0,081 \text{ m})^2}{4}\right)}{\left(\frac{\pi \cdot (0,0825 \text{ m})^2}{4}\right)}\right)\right)^2 \\ &= 0,0215\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\zeta &= \left(1 - \frac{A_1}{A_2}\right) \\ &= \left(1 - \frac{\left(\frac{\pi \cdot (0,081 \text{ m})^2}{4}\right)}{\left(\frac{\pi \cdot (0,0825 \text{ m})^2}{4}\right)}\right)^2 \\ &= 0,0013\end{aligned}$$

Gesamter Druckverlust der Verbindung EU-CN-EU mit Rohren à 6 m (Gl. 7):

$$\begin{aligned}\Delta p &= \left(\frac{0,0216 \cdot 6 \text{ m} \cdot 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot \left(1,1 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{0,0825 \text{ m} \cdot 2}\right) \cdot 2 \\ &+ (0,0013 + 0,0215) \cdot \frac{1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot \left(1,1 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{2} \\ &+ \left(\frac{0,0217 \cdot 6 \text{ m} \cdot 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot \left(1,1 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{0,081 \text{ m} \cdot 2}\right) \\ &= 2887,07 \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}^2} = 2887,07 \text{ Pa} = 0,029 \text{ bar}\end{aligned}$$

Spezifischer Druckabfall:

$$\frac{\Delta p}{L_{\text{Ges}}} = \frac{2887,07 \text{ Pa}}{18 \text{ m}} = 160,39 \frac{\text{Pa}}{\text{m}}$$

EU-KR-EU:

Druckverlustbeiwerte nach Gleichung 1 und 2:

$$\begin{aligned}\zeta &= 0,5 - 0,4 \cdot \left(\frac{A_2}{A_1}\right) - 0,1 \cdot \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2 \\ &= 0,5 - 0,4 \cdot \left(\frac{\left(\frac{\pi \cdot (0,0801 \text{ m})^2}{4}\right)}{\left(\frac{\pi \cdot (0,0825 \text{ m})^2}{4}\right)}\right) - 0,1 \cdot \left(\frac{\left(\frac{\pi \cdot (0,0801 \text{ m})^2}{4}\right)}{\left(\frac{\pi \cdot (0,0825 \text{ m})^2}{4}\right)}\right)^2 \\ &= 0,0341\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\zeta &= \left(1 - \frac{A_1}{A_2}\right) \\ &= \left(1 - \frac{\left(\frac{\pi \cdot (0,0801 \text{ m})^2}{4}\right)}{\left(\frac{\pi \cdot (0,0825 \text{ m})^2}{4}\right)}\right)^2 \\ &= 0,00329\end{aligned}$$

Gesamter Druckverlust der Verbindung EU-KR-EU mit Rohren à 6 m (Gl. 7):

$$\begin{aligned}\Delta p &= \left(\frac{0,0216 \cdot 6 \text{ m} \cdot 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot \left(1,1 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{0,0825 \text{ m} \cdot 2}\right) \cdot 2 \\ &+ (0,00329 + 0,0341) \cdot \frac{1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot \left(1,1 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{2} \\ &+ \left(\frac{0,0217 \cdot 6 \text{ m} \cdot 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot \left(1,1 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{0,0801 \text{ m} \cdot 2}\right) \\ &= 2906,81 \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}^2} = 2906,81 \text{ Pa} = 0,0291 \text{ bar}\end{aligned}$$

Spezifischer Druckabfall:

$$\frac{\Delta p}{L_{\text{Ges}}} = \frac{2906,81 \text{ Pa}}{18 \text{ m}} = 161,49 \frac{\text{Pa}}{\text{m}}$$

EU – Gesamte Länge:

Gesamter Druckverlust der Verbindung EU-EU-EU mit Rohren à 6 m (Gl. 7):

$$\Delta p = \left(\frac{0,0216 \cdot 6 \text{ m} \cdot 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot \left(1,1 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{0,0825 \text{ m} \cdot 2} \right) \cdot 3$$

$$= 2851,2 \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}^2} = 2851,2 \text{ Pa} = 0,0285 \text{ bar}$$

Spezifischer Druckabfall:

$$\frac{\Delta p}{L_{\text{Ges}}} = \frac{2851,2 \text{ Pa}}{18 \text{ m}} = 158,4 \frac{\text{Pa}}{\text{m}}$$

Als abschließenden Vergleich der bestehenden Druckverluste durch die Verbindung der chinesischen und koreanischen Rohre mit den in der EU verlegten Rohre, wird die prozentuale Differenz der Verluste ermittelt:

EU-CN:

$$\Delta_{\text{rel}} = \frac{2887,07 \text{ Pa} - 2851,2 \text{ Pa}}{2851,2 \text{ Pa}} \cdot 100 = 1,26 \%$$

EU-KR:

$$\Delta_{\text{rel}} = \frac{2906,81 \text{ Pa} - 2851,2 \text{ Pa}}{2851,2 \text{ Pa}} \cdot 100 = 1,95 \%$$

Anhand der berechneten Werte ist zu erkennen, dass Druckverluste infolge der Rohrverbindung mit chinesischen und koreanischen Rohren vorhanden sind, diese aber mit ca. 1,3 – 2,0 % für die Nennweite DN 80 sehr gering ausfallen. Des Weiteren wird bei dem Vergleich der errechneten spezifischen Druckabfälle mit den als Maximalwert angegebenen Werten von 250 – 300 Pa/m deutlich [67], dass sich alle Druckverluste in einem zulässigen Wertebereich befinden. Es ist jedoch anzumerken, dass diese Berechnungen ausschließlich für die Nennweite DN 80 durchgeführt wurden und die Druckverluste für andere Durchmesser höher ausfallen können.

Als Vergleich können die Werte eines Nenndurchmesser DN 40 betrachtet werden, bei dem die Druckverlustbeiwerte und gemäß Tabelle 3. 1 höher ausfallen. Für diese Nennweite betragen die spezifischen Druckverluste:

EU-CN-EU:

Spez. Druckverlust = 381,26 Pa/m

EU-KR-EU:

Spez. Druckverlust = 364,03 Pa/m

EU – Gesamt:

Spez. Druckverlust = 355,14 Pa/m

→ Prozentualer Anstieg mit chinesischem Rohr: 7,36 %

→ Prozentualer Anstieg mit koreanischem Rohr: 2,50 %

Der Wertebereich für den Anstieg des Druckverlustes zwischen 2,5 – 7,4 % ist höher als für die berechnete Nennweite DN 80. Betrachtet man die ermittelten Einzelwiderstände wird ersichtlich, dass es sich bei den mit DN 40 berechneten Druckverlusten um Höchstwerte handelt. Es kann demnach bereits anhand der Einzelwiderstände ungefähr bestimmt werden, welche Querschnitte für eine Verbindung geeignet sind. Eine ausgeführte Auswertung folgt in Kapitel 3.1.

2.2 Wärmeverlust

Der Wärmeverlust stellt bei der Kombination unterschiedlicher Rohrsysteme einen wesentlichen Aspekt in der Energieeffizienz dar und hängt entscheidend von der Dimensionierung und Qualität der Wärmedämmung ab. Bei dem Übergang eines gemäß der DIN EN 253 standardisierten Verbundsystems zu einem Rohrsystem nach chinesischer oder koreanischer Ausführung können aufgrund der abweichenden Dämmabmessungen, sowie Wärmedurchgangskoeffizienten inhomogene Wärmeschutzwirkungen und konstruktiv bedingte Wärmebrücken auftreten. Um eine Aussage über die Effizienz dieser Systemkopplung treffen zu können, folgt die Analyse der thermischen Auswirkungen unterschiedlicher Dämmstärken und Ausführungen.

Als ausschlaggebender Parameter zur Beurteilung der thermischen Effizienz der Leitung dient die Wärmeleitfähigkeit λ ; eine materialabhängige Kennzahl, welche angibt, wie gut ein Material Wärme leitet. Für die Ausführung der Dämmschicht werden Materialien eingesetzt, deren Wärmeleitfähigkeit niedriger ist, um eine effektive Wärmedämmung gewährleisten und Wärmeverluste reduzieren zu können. Diese Zielsetzungen sind vor Allem im Hinblick auf die angestrebte Wärmewende relevant, da mit steigenden Preisen für fossile Energieträger und der vergleichbar begrenzten Verfügbarkeit erneuerbarer Energiequellen, der Verlust der ins Netz eingespeisten Wärme mit stetig steigenden Kosten aufgrund der teureren Stromerzeugung verbunden ist (Deutsche Umwelthilfe duh, pdf). Demnach ist es im Rahmen der zukünftigen Wärmenetzauslegung essenziell die Effizienz des Wärmetransports sowie die Reduktion dabei entstehender Wärmeverluste sicherzustellen.

Gemäß der in Tabelle 6 und Tabelle 16 angegebenen Information wird ersichtlich, dass für die Ausführung der Einzelrohr-Verbundsysteme der EU, China und Korea der gleiche Werkstoff Polyurethan-Hartschaum verwendet wird, welcher in allen drei Gebieten ähnliche Eigenschaften aufweist. Für den ersten Vergleich im Rahmen der thermischen Leistung der jeweiligen Rohre werden die Wärmeleitfähigkeiten der Dämmungen gegenübergestellt:

	EU	China	Korea
Wärmeleitfähigkeit PUR λ_{50} [W/mK]	0,027	0,029	0,024

Tabelle 2. 1: Wärmeleitfähigkeiten der PUR-Hartschaumdämmung

Die Werte entsprechen den Angaben der Hersteller, deren Produkte auf dem jeweiligen Markt angeboten werden ([46], [68], [69]), wobei erwähnenswert ist, dass die Werte herstellerabhängig differieren können. Für den Vergleich wurden die angegebenen Wärmeleitfähigkeiten des Polyurethan-Hartschaums bei gleicher Temperatur von 50°C ermittelt.

Anhand dieser repräsentativen Werte lässt sich erkennen, dass die in Korea ausgeführte Dämmung hervorragende Dämmeigenschaften besitzt, während die in China produzierten Dämmungen die höchste Wärmeleitfähigkeit aufweisen, was sich teilweise mit den gemäß GB/T 29047-2021 bestimmten Mindestwert $\lambda \leq 0,033 \text{ W/mK}$ begründen lässt, welcher größer ist, als der nach EU- und koreanischen Standards festgelegte Wert.

Für die ausführliche Gegenüberstellung und Bewertung der Wärmeverluste bei Kombination der chinesischen sowie koreanischen Rohre mit den in der EU standardisierten Rohrsystemen, erfolgt die Berechnung des Wärmestroms für die Ermittlung der entstehenden Wärmeverluste eines Hohlzylinders mit folgender Formel [70, 71]:

$$\dot{Q}_v = K \cdot \pi \cdot d_i \cdot L \cdot (T_i - T_a) = \frac{2 \cdot \lambda_{iso} \cdot \pi \cdot L \cdot (T_i - T_a)}{\ln \frac{d_a}{d_i}} \quad (\text{Gl. 9})$$

Mit:

$\dot{Q}_v$ = Wärmeverlust [W]

K = Wärmeübertragungskoeffizient $\left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \right]$

d_i = Innendurchmesser der Dämmung [m]

d_a = Außendurchmesser der Dämmung [m]

L = Länge der Leitung [m]

T_i = Innentemperatur / Mediumtemperatur [K]

T_a = Außentemperatur [K]

λ_{iso} = Wärmeleitfähigkeit Isolation $\left[\frac{\text{W}}{\text{mK}} \right]$

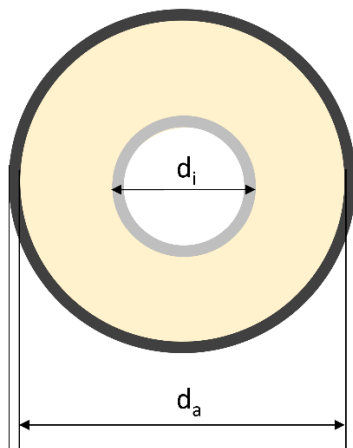


Abbildung 2. 8: Querschnitt Kunststoffmantelrohr [Quelle: Eigene Darstellung]

Für eine vergleichbare Veranschaulichung der berechneten Ergebnisse, werden die folgenden Parameter mit einheitlichen Werten bestimmt:

$$L = 1 \text{ m}$$

$$T_i = 80 \text{ °C}$$

$$T_a = 10 \text{ °C}$$

Die Abmessungen der Innen- und Außendurchmesser werden wie in Kapitel für die Nennweite DN 80 der jeweiligen internationalen Rohre in der Rechnung berücksichtigt. Demnach ergeben sich die Durchmesser zu:

	EU		China		Korea	
Nenndurchmesser DN	Innendurchmesser d_i	Außendurchmesser d_a	Innendurchmesser d_i	Außendurchmesser d_a	Innendurchmesser d_i	Außendurchmesser d_a
80	88,9	154	89	174	89,1	153,6

Tabelle 2. 2: Abmessungen Innendurchmesser und Außendurchmesser Dämmung mit EU-Dämmserie 1 [Maße in mm]

Bei Betrachtung der vorliegenden Abmessungen wird ersichtlich, dass die für die Nennweite DN 80 für die Rohre gemäß den Angaben der EU und Korea ein Nenn-Außendurchmesser D_c von 160 mm maßgebend ist, während die Rohre des chinesischen Herstellers Dalian Yiduo Piping für diese Nennweite einen Nenn-Außendurchmesser von 180 mm vorsehen. Daraus lässt sich schließen, dass die Ausführung nach chinesischen Angaben mit der nach EU-Richtlinien standardisierten Variante des Rohrsystems der Dämmstärke 2 korrespondieren würde. Für diese Dämmserie ist der Nenn-Außendurchmesser $D_c = 180 \text{ mm}$ maßgebend und würde den chinesischen Angaben entsprechen (siehe Tabelle 2. 3).

	EU		China		Korea	
Nenndurchmesser DN	Innendurchmesser d_i	Außendurchmesser d_a	Innendurchmesser d_i	Außendurchmesser d_a	Innendurchmesser d_i	Außendurchmesser d_a
80	88,9	174	89	174	89,1	153,6

Tabelle 2. 3: Abmessungen Innendurchmesser und Außendurchmesser Dämmung mit EU-Dämmserie 2 [Maße in mm]

Gemäß den Abmessungen des Rohrsystems nach Dämmserie 2 ist zu erkennen, dass die Maße mit denen des chinesischen Rohrs bis auf 0,1 mm Abweichung übereinstimmen.

Es folgt demnach der Vergleich der Verluste für das in der EU verlegte Rohr der Dämmserie 1 mit dem Rohrsystem aus China und Korea, sowie ein zusätzlicher Vergleich mit der Dämmserie 2 und dem gemäß chinesischen Angaben ausgeführten Rohr. Die Ermittlung der Verluste erfolgt über die Berechnung mit Gleichung 9 und den oben aufgeführten Angaben.

EU:

Dämmserie 1:

$$\begin{aligned}\dot{Q}_v &= \frac{2 \cdot \lambda_{iso} \cdot \pi \cdot L \cdot (T_i - T_a)}{\ln \frac{d_a}{d_i}} \\ &= \frac{2 \cdot 0,027 \frac{W}{mK} \cdot \pi \cdot 1 m \cdot (80 K - 10 K)}{\ln \frac{0,154}{0,0889}} \\ &= 21,613 \frac{W}{m}\end{aligned}$$

Dämmserie 2:

$$\begin{aligned}\dot{Q}_v &= \frac{2 \cdot \lambda_{iso} \cdot \pi \cdot L \cdot (T_i - T_a)}{\ln \frac{d_a}{d_i}} \\ &= \frac{2 \cdot 0,027 \frac{W}{mK} \cdot \pi \cdot 1 m \cdot (80 K - 10 K)}{\ln \frac{0,174}{0,0889}} \\ &= 17,683 \frac{W}{m}\end{aligned}$$

China:

$$\begin{aligned}\dot{Q}_v &= \frac{2 \cdot \lambda_{iso} \cdot \pi \cdot L \cdot (T_i - T_a)}{\ln \frac{d_a}{d_i}} \\ &= \frac{2 \cdot 0,029 \frac{W}{mK} \cdot \pi \cdot 1 m \cdot (80 K - 10 K)}{\ln \frac{0,174}{0,089}} \\ &= 19,025 \frac{W}{m}\end{aligned}$$

Korea:

$$\begin{aligned}\dot{Q}_v &= \frac{2 \cdot \lambda_{iso} \cdot \pi \cdot L \cdot (T_i - T_a)}{\ln \frac{d_a}{d_i}} \\ &= \frac{2 \cdot 0,024 \frac{W}{mK} \cdot \pi \cdot 1 m \cdot (80 K - 10 K)}{\ln \frac{0,1536}{0,0891}} \\ &= 19,383 \frac{W}{m}\end{aligned}$$

Anhand der berechneten Ergebnisse lässt sich erkennen, dass Abweichungen der Wärmeverluste vorhanden sind. Betrachtet man die vorher gesammelten Informationen bezüglich der Unterschiede in den Abmessungen und der Zuordnung der in der EU geltenden Dämmserien zu den entsprechenden Nenn-Außendurchmessern, lassen sich die Abweichungen der Werte zwischen Dämmserie 1 und Korea geringer als zu den chinesischen Abmessungen. Diese Werte sind jedoch in einem ähnlichen Wertebereich des Wärmeverlustes der Dämmserie 2, gemäß den vorher ermittelten Abmessungen.

Im Allgemeinen lässt sich zusammenfassen, dass das europäische Rohrsystem der Dämmstärke 2 mit der Nennweite DN 80 die geringsten Wärmeverluste aufweist, größtenteils bedingt durch die Wärmeleitfähigkeit des Dämmmaterials, sowie der Rohrgeometrie. Eine genaue Aussage kann aufgrund der abweichenden Abmessungen der Rohrdurchmesser nicht getroffen werden.

Eine ausführliche Gegenüberstellung der berechneten Werte wird in Kapitel 3.2 aufgeführt und der Einfluss der Parameter auf die Verluste ermittelt.

2.3 Verbindungstechniken

Die Wahl und Ausführung geeigneter Verbindungstechniken ist von zentraler Bedeutung für die Gewährleistung der Betriebssicherheit, Wartung und Langlebigkeit des Einzelrohr-Verbundsystems. Maßgebend für die Verbindungstechniken sind insbesondere die Richtlinien und Vorgaben der jeweiligen Nationen.

In diesem Kapitel folgt die Analyse zur Beurteilung, ob eine Verbindung der internationalen Rohre nach den in der EU standardisierten Verbindungstechniken realisierbar ist und die Beschreibung möglicher Ausführungsvarianten.

2.3.1 Schweißverbindungen

Im Zuge der Erstellung der Schweißverbindung zwischen den unterschiedlichen Mediumrohren können spezifische technische Herausforderungen entstehen; resultierend aus verschiedenen Faktoren, welche in den folgenden Abschnitten erläutert werden.

2.3.1.1 Werkstoffunterschiede

Ein wesentlicher Unterschied bei der Kombination verschiedener Stahlrohre für den Mediumtransport liegt in der differierenden chemischen Zusammensetzung der in den Nationen verwendeten Stahlsorten, wie bereits in Tabelle 5 dargestellt.

Dabei haben insbesondere die Abweichungen der Gehalte von Kohlenstoff, Phosphor sowie Schwefel einen Einfluss auf das Schweißverhalten des Stahls.

Alle drei Komponenten sind in den in Asien hergestellten Rohren in höheren Anteilen vorhanden und führen zu einer Erschwerung des Schweißprozesses. Kohlenstoff beeinflusst mit seinem Anteil die Festigkeit sowie Härte des Stahls und demnach auch die Schweißbarkeit. Aus diesem Grund wird nach Vorgaben der EU der P235GH Stahl mit einem Kohlenstoffgehalt von $C = 0,16 \%$ (s. Tabelle 5) verwendet, um den Schweißprozess bei der Installation der Fernwärmeleitungen zu erleichtern und beschleunigen. Dieser Wert wird von den Rohren nach chinesischen sowie koreanischen Angaben mit Anteilen von $0,2 - 0,3 \%$ übertroffen. Die mit steigendem Kohlenstoffgehalt verringerte Duktilität des Stahls führt zudem dazu, dass eine mögliche Bildung von Austenit nach dem Schweißprozess eine Rissbildung infolge innerer Spannungen verursachen kann [72].

Auch die Stoffe Schwefel (S) und Phosphor (P) sind in vergleichsweise höheren Mengen in den in Asien hergestellten Rohren vertreten und führen, aufgrund von Erhöhung von Festigkeit und Härte sowie Minderung der Duktilität dazu, dass der Stahl spröder ist [72].

Diese Unterschiede müssen beim Schweißprozess berücksichtigt werden, da sonst die Stabilität und Haltbarkeit der Verbindung gefährdet sein könnte.

Neben der mechanischen Verträglichkeit der verschiedenen Stähle ist auch der thermische Längenausdehnungskoeffizient zu berücksichtigen. Der Ausdehnungskoeffizient ist maßgebend für die Ermittlung der Ausdehnung des Stahls bei Erwärmung. Bereits geringe Differenzen des Wertes können bei thermisch belasteten Schweißverbindungen von Materialspannungen, Rissbildungen bis zu Schädigungen des Verbundes führen.

Betrachtet man beispielhaft die Wärmeausdehnungskoeffizienten der Stahlsorten nach europäischen, chinesischen sowie koreanischen Vorgaben, kann eine präzisere Beurteilung des Dehnungsverhaltens getroffen werden. Die Ausdehnungskoeffizienten sind in Tabelle 2. 4 aufgelistet.

	EU P235GH	China Q235B	Korea SPPS 42
Mittlerer linearer Wärmeausdehnungskoeffizient $\alpha_T [10^{-6}/K]$	12,5	11,1	12,5

Tabelle 2. 4: Mittlerer linearer Wärmeausdehnungskoeffizient zwischen 20 – 100 °C

Aus den Werten wird ersichtlich, dass für die europäische sowie koreanische Stahlsorte der gleiche Koeffizient gegeben ist ([73], [74]), während der nach chinesischen Angaben vorliegende Werte geringer ausfällt [75].

Um eine abschließende Aussage über die Ausdehnung des Stahls in Bezug auf die ermittelten Koeffizienten treffen zu können, wird im Folgenden die Dehnung bei Erwärmung eines Stahlrohrs von 12 m Länge berechnet.

Die Längenausdehnung wird mit folgender Formel ermittelt [76]:

$$\Delta L = L \cdot \alpha_T \cdot \Delta T \quad (Gl.10)$$

Mit:

L = Rohrlänge [mm]

α_T = Lineare Wärmeausdehnungskoeffizient $\left[\frac{10^{-6}}{K}\right]$

ΔT = Temperaturdifferenz [K]

Für die verschiedenen Stahlrohre ergeben sich somit folgende Längenausdehnungen:

EU → P235GH:

$$\Delta L = 12\,000\,mm \cdot 12,5 \cdot \frac{10^{-6}}{K} \cdot (100\,K - 20\,K) = 12\,mm$$

China → Q235B:

$$\Delta L = 12\,000\,mm \cdot 11,1 \cdot \frac{10^{-6}}{K} \cdot (100\,K - 20\,K) = 10,66\,mm$$

Korea → SPPS 40:

$$\Delta L = 12\,000\,mm \cdot 12,5 \cdot \frac{10^{-6}}{K} \cdot (100\,K - 20\,K) = 12\,mm$$

Anhand der Ergebnisse lässt sich erkennen, dass die Längenausdehnung für das europäische sowie koreanische Rohr identisch ist, was sich mit dem gleichen Wärmeausdehnungskoeffizienten des Werkstoffes begründen lässt. Vergleicht man allerdings die Werte des europäischen mit dem chinesischen Stahl wird deutlich, dass eine Abweichung vorliegt. Die Differenz beträgt gemäß folgender Rechnung:

$$\Delta L_{Diff} = 12,0 \text{ mm} - 10,66 \text{ mm} = 1,34 \text{ mm}$$

$$\Delta L_{Diff} = \frac{1,34 \text{ mm}}{12 \text{ m}} = 0,11 \frac{\text{mm}}{\text{m}}$$

Demnach dehnt sich der europäische Stahl in Folge Erwärmung auf einer Länge von 12 m insgesamt 1,34 mm mehr aus, als der chinesische Stahl. Dies entspricht einer erhöhten Ausdehnung des europäischen Stahls von 0,11 mm/m.

Diese Abweichung kann zu Spannungen an der Schweißverbindung führen und damit mögliche Risse in der Naht verursachen und sollte in der Planung der Verbindung von Stahlrohrelementen unterschiedlicher Werkstoffe, wie der Stahl Q235B, berücksichtigt werden.

2.3.1.2 Wandstärkenabweichungen

Nach den ermittelten Angaben in Tabelle 9 ist zu erkennen, dass unterschiedliche Wandstärken der Mediumrohre des gleichen Nenndurchmessers vorhanden sind, mit einer maximalen Abweichung von 2,4 mm. Diese Differenzen müssen in der Ausführung des Schweißverfahrens in Form von Anpassungen der Fasen berücksichtigt werden. Des Weiteren sind die Schweißparameter, wie Stromstärke, Spannung und Schweißgeschwindigkeit so anzupassen, dass kein Rohr während des Prozesses geschädigt oder nicht ausreichend verschweißt wird [77].

2.3.2 Muffenverbindungen

Die Muffenverbindung stellt eine technisch anspruchsvolle Konstruktion dar und muss die mechanische Stabilität, Effizienz sowie Dichtigkeit des Wärmenetzes gewährleisten. Im Zuge der Kombination verschiedener Rohrsysteme, welche Abweichungen in Abmessungen und Werkstoffeigenschaften aufweisen, müssen mögliche Problemstellen und Herausforderungen für die Muffenverbindung ermittelt und in der Auslegung des Netzes berücksichtigt werden. In den folgenden Abschnitten werden potenzielle Probleme und Erschwernisse im Rahmen der Konstruktion der Muffenverbindung aufgeführt.

2.3.2.1 Geometrische Inkompatibilität

Um eine Analyse möglicher Problemstellen im Hinblick auf die Geometrie der verschiedenen Rohrsysteme durchführen zu können, müssen die vorliegenden Abmessungen verglichen werden.

Ein grundlegendes Maß für die Herstellung einer dichten Verbindung zwischen zwei Rohren ist der Außendurchmesser D_c der einzelnen Rohrsysteme. Um auf Kompatibilität bezüglich dieser Abmessungen prüfen zu können, werden die Werte der Tabelle 11 betrachtet. Anhand dieser Werte ist zu erkennen, dass die Außendurchmesser D_c für die Nennweiten größtenteils übereinstimmen, mit einigen Abweichungen der Maße gemäß chinesischer Herstellervorgaben. Diesbezüglich ist jedoch zu beachten, dass die herstellerspezifischen Maße von den gemäß nationaler Norm GB/T 29047 gegebenen Werten variieren und herstellerabhängig ausgewählt werden. Demnach ist das Vorliegen einer Abweichung der Außendurchmesser und ihr Ausmaß teilweise abhängig von dem chinesischen Hersteller, der die Rohrsysteme zur Verfügung stellt.

Anhand der Tabelle 13 mit Angabe der Nenn-Außendurchmesser D_c zeigt sich, dass die aus den nationalen Normen der DIN EN 253 und GB/T 29047 entnommen Werte der Außendurchmesser D_c übereinstimmen.

Werden im Hinblick darauf die maximalen Außendurchmesser D_{max} gemäß Tabelle 14 verglichen, wird ersichtlich, dass eine einheitliche Auslegung der Außendurchmesser der Rohrsysteme seitens normativer Vorgaben der EU und China durchgeführt wurde.

Demnach kann abschließend die Aussage getroffen werden, dass es trotz gleicher Vorgaben zu einer Differenz der Außendurchmesser zwischen den nach EU-Standards ausgeführten Rohrsystem und der chinesischen Leitung kommen kann, da gemäß Angaben chinesischer Hersteller variierende Außendurchmesser angeboten werden.

Diese Unterschiede können sich als potenzielle Problemstellen bei der Muffenverbindung der Rohre erweisen. Werden die Abweichungen der Außendurchmesser betrachtet ist zu erkennen, dass für einige Nennweiten der Außendurchmesser D_c des chinesischen Rohrs kleiner sind; bspw. bei DN 500 mit den, gemäß Vorgaben der EU, gegebenen Wert $D_c = 710$ mm (Korea $D_c = 710$ mm) und dem Wert nach chinesischen Herstellerangaben mit $D_c = 650$ mm.

In diesem Fall kann sich die Muffenkonstruktion als Problem erweisen, da sie bei regulärer Montage nicht fest genug an dem kleineren Rohr anliegen kann. Dies könnte zu möglichen Undichtigkeiten und verringerter mechanischer Stabilität sowie Wärmeverlusten des Rohrsystems führen.

Für Nennweiten, bei denen ein geringerer Außendurchmesser der chinesischen Rohre vorhanden ist, müsste die Planung und Ausführung der Muffenkonstruktion angepasst werden, um Folgen durch Eindringen von Feuchtigkeit, Instabilität der Muffenverbindung und unzureichende Wärmeisolierung zu verhindern.

Des Weiteren müssen die geometrischen Verhältnisse zwischen dem Mediumrohr, der Dämmung und dem Mantelrohr bei gleichem Außendurchmesser berücksichtigt werden. Abweichende Abmessungen und Dämmstärken führen zu einer veränderten Verteilung der drei Komponenten in dem Querschnitt des chinesischen sowie koreanischen Rohrs. Dies ist insbesondere relevant im Hinblick auf die Dämmschicht, welche in dem Rohrsystem den kraftschlüssigen Verbund zwischen Mediumrohr und Mantel gewährleistet. Abweichungen in der Geometrie des Verbundquerschnittes implizieren demnach eine Beeinflussung der statischen Belastbarkeit der Muffenverbindung.

Ein reduzierter Dämmquerschnitt infolge eines größeren Mediumrohrs kann dementsprechend weniger durch die Erwärmung der Rohrleitung auftretende Kräfte aufnehmen, was in der Planung der Muffenkonstruktion zu berücksichtigen ist. Zudem können Mediumrohre mit größeren Abmessungen und Wanddicken sowie differierenden Materialeigenschaften auch eine höhere Belastung für die Dämmung der Muffe darstellen. Diese Faktoren sind bei der Konstruktion der in der EU eingesetzten Muffentypen zu beachten und gegebenenfalls anzupassen.

3 Ergebnisse

In dem vorangegangenen Kapitel wurden die wesentlichen Informationen zu der Ausführung der Kunststoffmantelverbundrohre in der EU, China und Korea wiedergegeben und basierend darauf mögliche technische Herausforderungen bei der Kombination der Rohrsysteme analysiert. Das folgende Kapitel fasst die zentralen Erkenntnisse dieser Analyse zusammen und bewertet ihre Auswirkungen auf die Realisierung der Integration internationaler Rohrsysteme in das europäische Wärmenetz.

3.1 Hydraulischer Druckverlust

In Kapitel wurden die entstehenden hydraulischen Druckverluste bei der Ausführung der Rohrkombinationen der in Europa verlegten Rohrsysteme mit den chinesischen und koreanischen Leitungen analysiert. Der Schwerpunkt wurde auf die Verluste infolge von Querschnittsaufweitung sowie -verengung gesetzt und ein Vergleich des entstehenden Gesamtdruckverlustes beispielhaft für die Nennweite DN 80 für die Verbindungen mit chinesischem und koreanischem Rohr durchgeführt.

Um einen gesamten Überblick über die vorliegenden Einzelwiderstände der einzelnen Nennweiten bei dem Anschluss des europäischen Rohrs an das chinesische / koreanische Rohr sowie umgekehrt erhalten zu können, sind die ermittelten Druckverluste und berechneten Einzelwiderstände in Tabelle 3. 1 zu betrachten.

Tabelle 3. 1:

Nenn- durchmesser r DN	Übergang Rohr EU → Rohr CN / KR				Übergang Rohr CN / KR → Rohr EU			
	EU - CN	EU - KR	EU - CN	EU - KR	CN - EU	KR - EU	CN - EU	KR - EU
	Verlust beiwert ζ	Verlust beiwert ζ	Einzelwider- stand Δp [Pa]	Einzelwider- stand Δp [Pa]	Verlust beiwert ζ	Verlust beiwert ζ	Einzelwider- stand Δp [Pa]	Einzelwider- stand Δp [Pa]
15								
20								
25	0,12	0,07	70,76	44,89	0,04	0,02	24,62	9,65
32	0,15	0,05	90,30	31,94	0,07	0,01	40,91	4,83
40	0,13	0,05	77,83	30,85	0,05	0,01	29,99	4,50
50	0,09	0,04	55,95	23,33	0,03	0,00	15,16	2,55
65	0,04	0,05	23,11	29,90	0,00	0,01	2,51	4,22
80	0,02	0,03	13,00	20,61	0,00	0,00	0,79	1,99
100	0,08	0,03	45,54	17,27	0,02	0,00	9,94	1,39
125	0,07	0,03	44,15	15,60	0,02	0,00	9,33	1,13
150	Nicht möglich	0,04		26,76	Nicht möglich	0,01		3,37
200	0,02	0,04	10,58	22,22	0,00	0,00	0,52	2,31
250	0,02	0,04	10,90	22,58	0,00	0,00	0,55	2,39
300	0,01	0,03	3,93	15,95	0,00	0,00	0,07	1,19
350	Nicht möglich	0,01		3,36	Nicht möglich	0,00		0,05
400	Nicht möglich	0,00		0,37	Nicht möglich	0,00		0,00
450	Nicht möglich	$d_i =$ konst.			Nicht möglich	$d_i =$ konst.		
500	Nicht möglich	0,00		0,29	Nicht möglich	0,00		0,00
550								
600	Nicht möglich	0,01		6,29	Nicht möglich	0,00		0,18
650								
700	0,00	0,00	0,39	1,25	0,02	0,00	9,18	0,01
750								
800	0,00	0,00	0,08	1,46	0,01	0,00	4,15	0,01
850								
900	0,00	0,00	0,11	0,16	0,01	0,00	4,81	0,00
1000	0,00	0,00	0,01	0,15	0,00	0,00	1,46	0,00
1100								
1200	0,00	0,00	0,01	0,02	0,00	0,00	1,21	1,82
1400								

Tabelle 3. 1: Druckverlustbeiwerte und Einzelwiderstände der Rohrkombinationen

In der Tabelle sind die Werte für die Querschnittsveränderungen bei der Verbindung eines europäischen und einem chinesischen / koreanischen Rohres sowie bei der Kombination eines

chinesischen / koreanischen Rohres mit einem europäischen dargestellt. Die Beiwerte und Widerstände, welche aus Querschnittsverengungen resultieren sind rot und die Zahlen die infolge Aufweitungen ermittelt wurden blau gekennzeichnet. Für die Fälle gemäß Abbildung 2. 3 liegt die Anmerkung „Nicht möglich“ vor, da diese Verbindungen aufgrund der zu hohen Abweichungen der Abmessungen nicht realisierbar sind. Betrachtet man diese vermerkten Zellen wird ersichtlich, dass es sich bei den nicht umsetzbaren Verbindungen ausschließlich um Kombinationen des europäischen und chinesischen Rohrsystems handelt. Für die Verbindung mit koreanischen Rohren liegt diese Problematik nicht vor.

Die Bezeichnung „ $d_i = \text{konst.}$ “ ist für die Nenndurchmesser gegeben, bei denen die Innendurchmesser identisch sind und infolgedessen keine Druckverluste durch Querschnittsveränderungen zu berücksichtigen sind.

Die maximalen Einzelwiderstände der Verbindungen sind mit dem chinesischen Rohr für den Nenndurchmesser DN 32 mit $\Delta p = 90,30 \text{ Pa}$ und mit dem koreanischen Rohr für die Nennweite DN 25 mit $\Delta p = 44,89 \text{ Pa}$ gegeben. Daraus kann geschlossen werden, dass die geometrischen Abweichungen für diese Nennweiten am stärksten sind und die Druckverluste dementsprechend hoch ausfallen. Werden die größeren Nenndurchmesser betrachtet ist zu erkennen, dass die berechneten Einzelwiderstände gering sind und überwiegend höhere Werte für die kleineren Nennweiten DN 25 – DN 125 vorliegen.

Für eine genaue Beurteilung, wie stark sich die Einzelwiderstände auf den Gesamtdruckverlust der Leitungen auswirken, müssen maßgebende Faktoren wie bestimmte Fließgeschwindigkeit, der Rohrreibungsbeiwert und Reibungsverluste infolge weiterer Einzelwiderstände für die geplanten Leitungen berücksichtigt werden.

Anhand der vorliegenden Ergebnisse kann abschließend die Aussage getroffen werden, dass sich vor Allem die niedrigen Werte der größeren Nenndurchmesser günstig auf die Bilanz des Gesamtdruckverlustes der Rohrverbindung auswirken, da der Druckverlust infolge Einzelwiderstände bei größeren Rohrdimensionen ausgeprägter vorliegt, als bei den kleineren Nennweiten.

3.2 Wärmeverlust

In dem Kapitel wurden die relevanten Einflussfaktoren auf den Wärmeverlust ermittelt und die grundlegenden Parameter für die Berechnung der Verluste bestimmt. Die beispielhafte Berechnung der Wärmeverluste dient zur Abschätzung der Auswirkungen der verschiedenen Faktoren auf den Wärmestrom im Verbundsystem.

Die Ergebnisse der ermittelten Wärmeverluste für ein 1 m langes Rohr der Nennweite DN 80 sind in den nachfolgenden Tabellen gegenübergestellt.

EU Dämmserie 1		Korea	
Wärmeleitfähigkeit $\lambda \text{ [W/mK]}$	Wärmeverlust $\dot{Q}_v \text{ [W/m]}$	Wärmeleitfähigkeit λ [W/mK]	Wärmeverlust $\dot{Q}_v \text{ [W/m]}$
0,027	21,613	0,024	19,383

Tabelle 3. 2: Wärmeverluste EU – Korea

EU		China	
Dämmserie 2			
Wärmeleitfähigkeit λ [W/mK]	Wärmeverlust $\dot{Q}_v$ [W/m]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/mK]	Wärmeverlust $\dot{Q}_v$ [W/m]
0,027	17,683	0,029	19,025

Tabelle 3. 3: Wärmeverluste EU – China

Wie bereits in Kapitel 2.2 angemerkt, sind gemäß Tabelle 2. 3 die für die chinesische Dämmstärke angegebenen Abmessungen denen der EU – Dämmserie 2 zuzuordnen, da diese größer dimensioniert sind. Die Abmessungen der Dämmung nach koreanischen Angaben befinden sich hingegen in einem ähnlichen Wertebereich der EU – Dämmserie 1, weshalb ein Vergleich mit den der Serie zugehörigen Werten sinnvoll ist.

Anhand der Ergebnisse lässt sich erkennen, dass die Wärmeleitfähigkeit einen maßgebenden Einfluss auf den Wärmeverlust in dem Rohrsystem hat. Belegt wird dies durch den niedrigeren Wärmeverlust des koreanischen Rohrs im Vergleich zu dem europäischen Rohr der Dämmserie 1 mit einer Verbesserung von 10,3 %, ebenso wie bei der Gegenüberstellung der Werte von Dämmserie 2 mit dem chinesischen Rohrsystem, dessen Wärmeleitfähigkeit am höchsten ist und sich ein Mehrverlust von 7,6 % ergibt. Demnach würde sich bei der Kombination von chinesischen Rohrsystemen bei 1.000 m Leitungslänge eine Verlustleistung von 1,34 kW und bei den koreanischen Systemen eine Einsparung von 2,23 kW ergeben.

Werden die Dämmstärken nach Tabelle 11 betrachtet wird auffällig, dass diese stark variieren und sich nicht immer, wie in der Beispielrechnung zu DN 80, in einem annähernd gleichen Wertebereich befinden. Insbesondere die überwiegend geringe Dämmstärke der chinesischen Rohrsysteme ab der Nennweite DN 400 im Vergleich zu den anderen Nationen stellt eine potenzielle Schwachstelle in Bezug auf die thermische Leistungsfähigkeit eines kombinierten Systems dar.

Um eine Bewertung der Wärmeverluste bezüglich dieser großen Abweichungen treffen und die Effizienz der Nutzung der verschiedenen Rohrdurchmesser abschätzen zu können, sind die einzelnen Wärmeverluste in Tabelle 3. 4 wiedergegeben.

Tabelle 3. 4:

Nenn- durchmesser DN	EU		China	Korea	EU		China	Korea
	DS 1	DS 2			DS 1	DS 2		
	da/di	da/di	da/di	da/di	Wärmever- lust $\dot{Q}_v$ [W/m]	Wärmever- lust $\dot{Q}_v$ [W/m]	Wärmever- lust $\dot{Q}_v$ [W/m]	Wärmever- lust $\dot{Q}_v$ [W/m]
15								
20	3,123	3,866		3,125	10,429	8,782		9,264
25	2,493	3,086	2,625	2,500	13,002	10,538	13,216	11,520
32	2,453	2,807	2,737	2,436	13,235	11,507	12,669	11,858
40	2,153	2,464	2,644	2,140	15,484	13,170	13,116	13,875
50	1,973	2,222	2,351	1,960	17,469	14,872	14,922	15,682
65	1,761	2,024	2,026	1,751	20,989	16,847	18,061	18,844
80	1,732	1,957	1,955	1,724	21,613	17,683	19,025	19,383
100	1,694	1,907	1,793	1,689	22,535	18,392	21,853	20,150
125	1,560	1,734	1,639	1,559	26,686	21,581	25,812	23,759
150	1,439	1,611	1,523	1,465	32,623	24,890	30,307	27,649
200	1,397	1,574	1,394	1,405	35,549	26,189	38,430	31,073
250	1,419	1,601	1,419	1,449	33,931	25,217	36,444	28,474
300	1,350	1,498	1,342	1,364	39,590	29,385	43,411	34,013
350	1,364	1,528	1,285	1,362	38,214	28,029	50,884	34,149
400	1,337	1,513	1,250	1,330	40,929	28,687	57,208	37,041
450	1,345	1,515	1,218	1,335	40,095	28,592	64,566	36,526
500	1,363	1,539	1,192	1,352	38,311	27,529	72,733	34,970
550				1,229				51,107
600	1,282	1,442	1,171	1,271	47,808	32,425	80,751	43,971
650				1,249				47,434
700	1,237	1,375	1,147	1,223	55,746	37,293	92,868	52,376
750				1,207				56,020
800	1,202	1,323	1,139	1,187	64,410	42,370	97,985	61,573
850				1,233				50,402
900	1,177	1,285	1,115	1,164	72,776	47,372	116,964	69,321
1000	1,156		1,103	1,135	81,964		130,178	83,563
1100			1,096	1,118			138,552	94,960
1200			1,103	1,105			129,772	106,049
1400			1,141				96,797	

Tabelle 3. 4: Wärmeverluste der Einzelrohr-Verbundsysteme

Betrachtet man die Ergebnisse der Tabelle wird ersichtlich, dass die Wärmeverluste des chinesischen Rohrsystems im Vergleich zu dem europäischen Rohrsystem größtenteils höher ausfallen. Die rot gekennzeichneten Werte sind die Ergebnisse, dessen Bezugswerte für den Vergleich die Ergebnisse der Dämmserie 2 des europäischen Rohrsystems darstellen. Zu erkennen ist zudem die steigende Abweichung der Werte der EU und China bei Erhöhung des Nenndurchmessers, begründet in dem abnehmenden Verhältnis von d_a/d_i . In Bezug auf die Werte der Tabelle 11, ist der verringerte Quotient aus Außen- und Innendurchmesser der Dämmung zurückzuführen auf die vergleichsweise dünne Dämmschicht und dem daraus resultierenden gesteigerten Anteil des Innendurchmessers d_i . Demnach erweist sich das in der EU ausgeführte Rohrsystem als thermisch effizienter im Vergleich zu

dem chinesischen, basierend auf die Geometrie des Rohrs, sowie der Wärmeleitfähigkeit der Dämmung.

Für den Vergleich mit den in Korea hergestellten Verbundrohrsystemen werden die ermittelten Verluste ausschließlich mit denen der Dämmserie 1 gegenübergestellt. Betrachtet man die Verluste in Bezug auf die dazugehörigen Verhältnisse d_a/d_i wird kenntlich, dass trotz den geringfügig höheren Werten des Quotienten der europäischen Rohrsysteme, was eine Begünstigung der Verluste bewirkt, die Wärmeverluste der in Korea ausgeführten Rohre geringer ausfallen. Dies hebt hervor, dass es sich bei dem wesentlichen Parameter, welcher den Wärmeverlust von Rohrsystemen mit ungefähr ähnlichen Abmessungen bestimmt, um die Wärmeleitfähigkeit handelt. Die niedrigeren Verluste des koreanischen Rohrsystem im Vergleich zu der Dämmserie 1 geben dies wieder. Bei Betrachtung der Werte für die höheren Nennweiten ist aber zudem zu erkennen, dass der Einfluss des Quotienten aus d_a/d_i nicht zu vernachlässigen ist. Beispielhaft dargestellt bei dem Nenndurchmesser DN 1000, bei dem der Quotient des koreanischen Rohrs mit $d_a/d_i = 1,135$ im Vergleich zu dem Wert der Dämmserie 1 mit $d_a/d_i = 1,156$ geringer ausfällt und sich diese Differenz ebenfalls auf die Wärmeverluste auswirkt. Der Verlust für diese Nennweite ist für die Dämmserie 1 mit $\dot{Q}_v = 81,964 \text{ W}$ geringer als für das koreanische Rohrsystem mit $\dot{Q}_v = 83,563 \text{ W}$, trotz der niedrigeren Wärmeleitfähigkeit. Diese Werte implizieren, dass nicht nur die Wärmeleitfähigkeit, sondern auch die Stärke der Dämmung im Verhältnis zu den Abmessungen dem Mantel und dem inneren Mediumrohr einen zentralen Einfluss auf die Wärmeverluste in dem Rohrsystem haben. Bestätigt wird diese Aussagen auch anhand der Betrachtung der ermittelten Werte für die Dämmserie 2, welche die geringsten Verluste aufweisen, großenteils zu begründen in dem hohen Anteil der Dämmschicht in Relation zu den anderen Komponenten des Rohrsystems.

3.3 Verbindungstechniken

3.3.1 Schweißverbindungen

Im Rahmen der technischen Analyse der bestehenden Herausforderungen bei der Herstellung der Schweißverbindungen in Kapitel 2.3.1 wurde deutlich, dass die Kombination der Rohrsysteme aus der EU, China und Korea spezifische Maßnahmen erfordert, um eine betriebssichere und langfristige Verbindung der Mediumrohre gewährleisten zu können. Diesbezüglich relevant sind insbesondere die unterschiedlichen Werkstoffeigenschaften, welche sich auf die thermische Ausdehnung der Rohre auswirken, sowie der Kantenversatz, welcher gesonderte Anforderungen an die Verschweißung der Rohrenden stellt.

Die ermittelten Differenzen der Ausdehnungskoeffizienten der Stähle, welche sich auf die thermische Ausdehnung des Werkstoffes unter Einwirkung von Erwärmung auswirken, führen zu ungleichen Längenausdehnungen der Mediumrohre und damit zu Spannungen an der Verbindung, welche in potenzielle Risse der Schweißnaht resultieren können.

Belegt wird diese Differenz der Ausdehnung der unterschiedlichen Werkstoffe, anhand der beispielhaft berechneten Abweichung der thermischen Ausdehnung der Stahlsorte aus China zu denen der EU und Korea mit einem Wert von $\Delta L_{\text{Diff}} = 0,11 \text{ mm/m}$. Bezüglich dieser Werte gilt zu beachten, dass die im Zuge der Rechnung genutzten Ausdehnungskoeffizienten herstellerabhängig variieren und dementsprechend die ermittelten Differenzen der Ausdehnung unterschiedlich ausfallen können.

Für die Minimierung der thermischen Expansionseffekte des Stahls sind demzufolge die erforderlichen Maßnahmen im Rahmen des Schweißprozesses durchzuführen, um die Stabilität der Naht gewährleisten zu können.

Diese Maßnahmen können vorbereitenden Arbeiten, wie das Vorheizen zur Reduzierung des Temperaturgradienten beinhalten, sowie die Wahl präziser Schweißtechniken, wie das Lichtbogenschweißen, um die Erhitzung des Materials während des Schweißvorganges besser kontrollieren zu können. Die Förderung einer langsamen Abkühlung nach Abschluss der Schweißung könnte ebenfalls für die Reduktion der Spannungen im Material begünstigen und sich positiv auf die Stabilität der Schweißnaht auswirken.

Zusätzlich gilt es, die auftretenden potenziellen Komplikationen durch die Ausbildung der Nahtverbindung bei dem Kantenversatz der Leitungen zu beachten.

Werden die ermittelten Abmessungen der Mediumrohre gemäß Tabelle 9 betrachtet ist zu erkennen, dass diese für die jeweiligen Nationen stark voneinander abweichen, sowohl für den Innen- als auch den Außendurchmesser. Die in Form eines Kantenversatzes auszuführenden Rohrverbindungen sind nach DIN EN ISO 5817 [78] der Unregelmäßigkeit Nummer 5072 „Kantenversatz bei Rohren“ zuzuordnen und die Grenzwerte für die Bewertungsgruppen zu beachten, siehe Abbildung 3. 1.

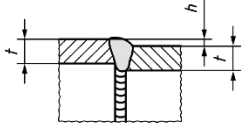
Nr.	Ordnungs-Nr. nach ISO 6520-1	Unregelmäßigkeit Benennung	Bemerkungen	t mm	Grenzwerte für Unregelmäßigkeiten bei Bewertungsgruppen		
					D	C	B
	5072	Kantenversatz bei Rohren	 Gilt für Rohre und Hohlprofile mit Umfangsschweißungen	$\geq 0,5$	$h \leq 0,5 t$, aber max. 4 mm	$h \leq 0,5 t$, aber max. 3 mm	$h \leq 0,5 t$, aber max. 2 mm

Abbildung 3. 1: Unregelmäßigkeit nach DIN EN ISO 5817 [Quelle: DIN EN ISO 5817:2023-07]

Für Rohrwanddicken über 4 mm ist für den Versatz eine Schweißnahtvorbereitung in Form von Anfasungen oder Abschleifen durchzuführen [79].

3.3.2 Muffenverbindungen

In dem Kapitel 2.3.2 wurden die grundlegenden Herausforderungen in der Konstruktion der Muffenverbindungen für die unterschiedlichen Rohrsysteme aus China und Korea mit dem in der EU verlegten Leitungen aufgezählt und erläutert. Den wesentlichen Grund für die Entstehung von Problemstellen bei der Ausführung der Verbindungen, bilden die geometrischen Abweichungen der Rohrsysteme untereinander. Diese Unterschiede resultieren zum einen aus den kleineren Außendurchmessern der chinesischen Leitungen, den abweichenden Maßen und Wandstärken des Mediumrohrs sowie den variierenden Stärken der Ummantelung.

Werden die ermittelten Ergebnisse der Abmessungen aus Kapitel 1.2.3.2 für die einzelnen Komponenten betrachtet ist zu erkennen, dass zwischen den Rohrsystemen der EU und Korea geringe bis keine Abweichungen der Abmessungen vorhanden sind. Die vorhandenen Differenzen begrenzen sich auf die Wandstärken der Rohre und die dementsprechend angepasste Dämmschichtdicke. Die Außendurchmesser der Medium- sowie Mantelrohre bleiben unverändert, was sich im Rahmen der Konstruktion der Muffenverbindung als vorteilhaft erweist. Der Abbildung 3. 2 können die im Zuge der Ausführung der Muffenverbindung relevanten Abmessungen und dazugehörige Differenzen zwischen dem in der EU verlegten Rohrsystem und der koreanischen Leitung entnommen werden.

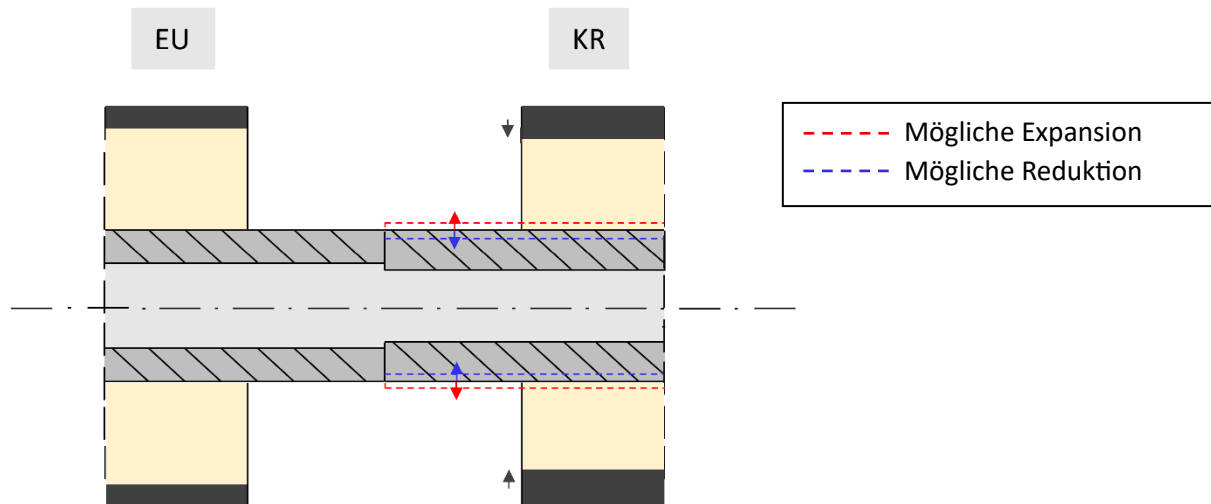


Abbildung 3. 2: Längsschnitt Verbindung Rohrsystem EU – Korea (KR) [Quelle: Eigene Darstellung]

Anhand der Darstellung in Abbildung 3. 2 kann man erkennen, dass die beide Rohre in einer Geraden fluchten und die Unterschiede in den Abmessungen ausschließlich in den größeren Außendurchmesser des Mediumrohres d_0 sowie in den Wandstärken des Mantelrohres bestehen.

In der Grafik sind die höheren Wandstärken hervorgehoben, deren Differenz zu den Wanddicken des europäischen Rohrsystems mit der nächstgrößeren Nennweite steigt und sich für Nennaußendurchmesser D_c 1400 auf maximal $\Delta = 14,1$ mm beläuft (siehe Tabelle 13). Die roten Linien kennzeichnen sind in Bezug auf das Mediumrohr die teilweise größeren Außendurchmesser des Rohres, während die blauen Linien verdeutlichen, dass für einige Nennweiten der Außendurchmesser des Stahlrohres geringer ausfällt im Vergleich zu dem des europäischen Rohrsystems.

Es sind demzufolge keine zentralen Faktoren vorhanden, welche eine Verbindung mittels Schweiß- und Schrumpfmuffen verhindern würden. Infolge der variierenden Abmessungen ist zu beachten, dass die Dämmung in Form von werkmäßig vorgefertigten Dämmschalen aufgrund der differierenden Außendurchmesser des Mediumrohres für die Konstruktion der Muffenverbindung nicht realisierbar ist.

Im Zuge der Verbindung des chinesischen Rohrsystems mit dem europäischen ist der bereits in Kapitel 2.3.2.1 festgestellte kleinere Nenn-Außendurchmesser D_c einiger Nennweiten des chinesischen Verbundrohrsystems ein zentraler Aspekt, welcher in der Planung und Ausführung der Muffenkonstruktion berücksichtigt werden muss. Zudem weisen die Mediumrohrdurchmesser, wie im Vergleich zu den Rohren aus Korea, Abweichungen auf. Die Unterschiede in den Abmessungen des chinesischen Einzelrohr-Verbundsystems im Vergleich zu den in der EU verlegten Fernwärmeleitungen sind in Abbildung 3. 3 wiedergegeben.

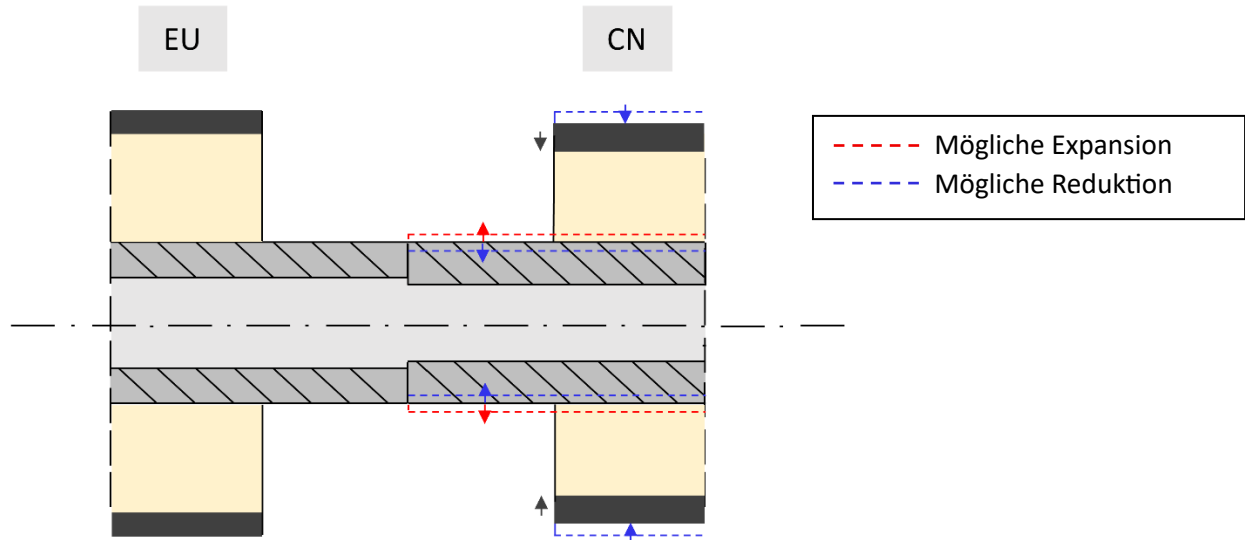


Abbildung 3. 3: Längsschnitt Verbindung Rohrsystem EU – China (CN) [Quelle: Eigene Darstellung]

Wird die Darstellung des Mediumrohrs betrachtet ist zu erkennen, dass die Abmessungen ähnlich wie die des koreanischen Rohrsystems variieren. Die Mediumrohre weisen ebenfalls eine stärkere Wanddicke im Vergleich zu den europäischen auf. Die Abweichungen der Wandstärken der Ummantelung fallen bei Betrachtung der Verbindung des koreanischen Rohrsystems mit dem der EU geringer aus, mit einer maximalen Differenz von $\Delta = 2,2 \text{ mm}$.

Die in der Abbildung kenntlich gemachte Reduktion des Mantelaußendurchmessers des chinesischen Rohres stellt die vorliegende Problematik im Hinblick auf die Erstellung der Muffenverbindung grafisch dar. Damit eine dichte und stabile Verbindung der Rohre ausgeführt werden kann, müssen die geometrischen Inkompatibilitäten aufgrund der Reduktion des Nenn-Außendurchmesser D_c , berücksichtigt und dementsprechend die Ausführung der Kunststoffmuffe angepasst werden.

4 Fazit und Ausblick

Basierend auf den vorangegangenen ermittelten Informationen der KMR-Systeme aus der EU, China und Korea sowie der Ausarbeitung der normativen, konstruktiven sowie betrieblichen Gemeinsamkeiten und Unterschiede und den daraus resultierenden technischen Herausforderungen, kann eine Einschätzung für die Umsetzbarkeit der Integration internationaler Rohrsysteme in das europäische Wärmenetz erfolgen.

Dieses Kapitel dient der Zusammenfassung der aus den theoretischen Grundlagen sowie der Analyse gewonnenen Erkenntnisse und gibt diesbezüglich einen Ausblick auf die potenzielle Entwicklung sowie die entstehenden Herausforderungen, welche bei der Planung und Ausführung des integrierten Wärmenetzes in Zukunft zu berücksichtigen sind.

4.1 Zusammenfassung der wichtigsten Erkenntnisse

Der Vergleich der ermittelten Daten hat gezeigt, dass zwischen den geometrischen Auslegungen, Materialeigenschaften und technischen Anforderungen der einzelnen Komponenten des Rohrsystems Unterschiede vorliegen, die berücksichtigt werden müssen, um einen dauerhaften, sicheren und effektiven Betrieb des Wärmenetzes gewährleisten zu können.

Zu den wesentlichen Unterschieden zählen die abweichenden Abmessungen und Stärken der jeweiligen Komponenten sowie die verschiedenen chemischen und technischen Eigenschaften, basierend auf der Nutzung unterschiedlicher Materialien. Die Verwendung nicht einheitlicher Werkstoffe ist größtenteils auf die differierenden normativen Vorgaben zurückzuführen. Im Rahmen dieser Normen sind zwar verschiedene Werkstoffe vorgegeben, dennoch sind die Anforderungen an die einzelnen Komponenten des Einzelrohr-Verbundsystems weitgehend gleich. Zu erkennen ist dies bei der Gegenüberstellung der maßgebenden Normen für die Auslegung von Kunststoffmantelverbundsystemen – der europäischen Norm DIN EN 253 und der chinesischen Norm GB/T 29074 –, deren betriebliche Anforderungen überwiegend identisch sind. Gleiches gilt für die Auslegung der koreanischen Rohrsysteme, deren normativen Regelungen hauptsächlich auf den Grundlagen der maßgebenden europäischen Normen basieren.

Bei dem Vergleich der geometrischen Abmessungen der Komponenten wird deutlich, dass wesentliche Unterschiede in der Dimensionierung und Stärke der Materialien vorliegen. Es handelt sich um unregelmäßige Abweichungen, die für jede Nennweite und Rohrkomponente unterschiedlich hoch ausfallen. Demnach ist der technische Anspruch der Umsetzbarkeit eines gemischten Wärmenetzes davon abhängig, welche Nenndurchmesser der Fernwärmeleitungen miteinander kombiniert werden müssen.

Werden die technischen Eigenschaften der einzelnen Komponenten gegenübergestellt, ist zu erkennen, dass sich die Angaben für die zu vergleichenden Eigenschaften überwiegend in einem ähnlichen Wertebereich befinden und keine auffälligen Abweichungen vorliegen. Diese geringfügigen Differenzen können allerdings bereits die Umsetzbarkeit sowie Effizienz des Wärmenetzes beeinflussen.

Die vorliegenden Abweichungen in Abmessungen und Materialeigenschaften der Komponenten führen zu den zentralen technischen Herausforderungen bei der Umsetzung eines kombinierten Wärmenetzes.

Im Hinblick auf die Verbindung von Rohrsystemen mit unterschiedlich dimensionierten Mediumrohren und differierenden Dämmeigenschaften ist vor allem die Effizienz des Netzes in Bezug auf die Druck- und thermische Leistung beeinträchtigt. Diesbezüglich kann anhand der berechneten Verluste eingeschätzt werden, ob und wie stark sich diese Systemunterschiede negativ auf den

Gesamtwirkungsgrad und die Wirtschaftlichkeit des Netzes auswirken. Bei der Gegenüberstellung der ermittelten Druckverluste ist zu erkennen, dass die geometrischen Veränderungen geringfügig höhere Verluste verursachen und demnach ein niedriger Energieaufwand benötigt wird, um diese Verluste zu überwinden. Eine genaue Aussage über die Auswirkung der Druckverluste kann allerdings nur in Abhängigkeit von der vorliegenden Größe des Wärmenetzes erfolgen.

Für die Bewertung der thermischen Effizienz kann anhand des Vergleichs der Wärmeverluste die Aussage getroffen werden, dass die Auslegung der chinesischen sowie koreanischen Rohrsysteme zu unterschiedlichen Auswirkungen auf den Energiebedarf des Netzes führen.

Die chinesischen Rohrsysteme weisen größere normative sowie geometrische Differenzen auf, die im Hinblick auf die entstehenden Wärmeverluste zu einem erhöhten Energieverbrauch und höheren Betriebskosten resultieren. Zurückzuführen ist dies auf die normativ festgelegte höhere Wärmeleitfähigkeit sowie die geringe bemessene Dämmschicht der Verbundrohrsysteme. Diese Abweichung resultiert nicht nur in der Beeinträchtigung der Wirtschaftlichkeit und Effizienz des Netzes, sondern bedarf aufgrund der geometrischen Inkompatibilität, gesonderte Maßnahmen während der Planung und Konstruktion der Verbindung der Rohrsysteme. Im Rahmen der wirtschaftlichen Bewertung sind diese Aspekte, die in langfristige Mehrkosten resultieren, zu berücksichtigen und mit einem möglichen Kostenvorteil durch verringerte Anschaffungskosten abzuwägen.

Im Vergleich dazu besitzt das koreanische Verbundsystem Dämmeigenschaften, die zu einer überwiegend positiven Beeinflussung des Energieverbrauchs durch Verringerung der entstehenden Wärmeverluste führen. Dieser Effekt ist größtenteils bedingt durch die niedrigere Wärmeleitfähigkeit der Dämmung und den ähnlichen Abmessungen im Vergleich zu dem Rohrsystem der EU. Demnach kann bei den in Korea ausgeführten Kunststoffmantelrohren von einem Verbund mit einer hochwertigen Dämmung ausgegangen werden, deren verbesserte Isolationswirkung einen positiven Effekt auf die Energiebilanz des Wärmenetzes ausüben würde. Eine Integration koreanischer Systeme könnte sich in diesem Kontext als wirtschaftlich vorteilhaft erweisen, insbesondere wenn sich bereits zusätzliche Kostenvorteile in der Anschaffung bestehen und die Einzelrohr-Verbundsysteme optimalen Dämmeigenschaften angeboten werden.

Die Abweichungen des Materials und der Abmessungen wirken sich zudem unmittelbar auf die Verbindungsqualität der Rohrsysteme aus – sowohl auf die Schweißverbindungen als auch auf die Muffenverbindungen. Das aus den Werkstoffeigenschaften resultierende differierende Verhalten des Stahls bei Erwärmung sowie verschiedene Wanddicken beeinflussen maßgebend die Nahtqualität und die damit verbundene Rissbeständigkeit.

Bei Muffenverbindungen entstehen geometrisch bedingte Passprobleme und Abdichtungsrisiken, bedingt durch die unterschiedlichen Außendurchmesser bei den chinesischen Rohrsystemen, die im Zuge der Konstruktion der Verbindung berücksichtigt werden müssen.

Insgesamt zeigt sich, dass eine direkte Integration der Rohrsysteme aus China und Korea ohne technische Anpassungen zu funktionalen und betriebstechnischen Problemen führen kann. Insbesondere das in China ausgeführte Verbundsystem weist Unterschiede in Werkstoffeigenschaften und -abmessungen auf, die sich negativ auf den Betrieb und die Effizienz des Wärmenetzes auswirken und zu einer mit hohem Aufwand verbundenen Planung und Konstruktion der Verbindungspunkte führen können. In Bezug auf den Einbau koreanischer Fernwärmeleitungen sind bessere Bedingungen gegeben, die eine Steigerung der Wirtschaftlichkeit des Wärmenetzes begünstigen könnten. Für beide Ausführungsvarianten sind jedoch die von dem Hersteller abhängenden maßgebenden Werkstoffeigenschaften und -abmessungen sorgfältig zu überprüfen, mit dem gegebenen System

abzustimmen und mechanisch stabile und dichte Verbindungselemente zu konstruieren, um einen dauerhaften und sicheren Betrieb des Wärmenetzes gewährleisten zu können.

4.2 Mögliche Entwicklungen und Herausforderungen

Im Zuge der europäischen Energiewende und der angestrebten Dekarbonisierung des Wärmesektors ist die Nachfrage nach effizienten und nachhaltigen Lösungen für den Ausbau und Betrieb von Wärmenetzen gestiegen. In diesem Kontext kann ein Netz aus kombinierten Rohrsystemen einen potenziellen Lösungsansatz darstellen, die allerdings mit hohen technischen Herausforderungen verbunden sein können.

Für eine optimale Einbindung internationaler Leitungen müssten die Standards für die Ausführung der Verbindungen, insbesondere in Bezug auf geometrische Abweichungen, angepasst und weiterentwickelt werden. Neue einheitliche Verbindungslösungen, deren Herstellungs- und Montagekosten sowie -aufwand nicht erheblich von den vorhandenen Systemen abweichen, würden den Einsatz unterschiedlich bemessener Verbundsysteme im Wärmenetz begünstigen.

In der Analyse hat sich herausgestellt, dass bereits geringe Unterschiede im Wärmeverlust bei langen Netzstrecken zu signifikanten Energieverlusten führen können. Demnach muss im Hinblick auf die Integration internationaler Kunststoffmantelrohre nicht nur ein potenzieller Kostenvorteil durch den Import der Leitungen, sondern auch die Wirtschaftlichkeit im Hinblick auf den Energieverbrauch der einzubauenden Rohrsysteme berücksichtigt werden.

In diesem Kontext sind insbesondere die steigenden Energiepreise und die Dekarbonisierung in Form von Umstellung auf erneuerbare Energien im Rahmen der Wärmewende relevant. Diese Maßnahmen führen dazu, dass die Effizienz des Wärmetransports zunehmend an Bedeutung gewinnt und dementsprechend Rohrsysteme, deren Verluste über dem Durchschnitt liegen, im wirtschaftlichen sowie klimapolitischen Interesse nicht bevorzugt werden.

Demnach kann die Integration chinesischer sowie koreanischer Verbundrohrsysteme sich als innovative Möglichkeit zur Optimierung der Wärmenetze erweisen, vorausgesetzt, die Unterschiede in Qualität und Effizienz des Systems werden durch die entsprechende weiterentwickelte Planung und Konstruktion ausgeglichen.

Literaturverzeichnis

- [1] Statistisches Bundesamt Destatis, Pressemitteilung Nr. 091 vom 12. März 2025, Abgerufen am 07.05.25, von https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2025/03/PD25_091_43312.html
- [2] Bundesregierung, Neues Gebäudeenergiegesetz, Abgerufen am 07.05.25, von <https://www.bundesregierung.de/breg-de/aktuelles/neues-gebaeudeenergiegesetz-2184942>
- [3] Bundesministerium der Justiz und Verbraucherschutz (2024). „Gesetz zur Einsparung von Energie und zur Nutzung erneuerbarer Energien zur Wärme- und Kälteerzeugung in Gebäuden“, Abgerufen am 07.05.25, von https://www.gesetze-im-internet.de/geg/___71.html
- [4] AGFW (2023). „AGFW Hauptbericht 2023“, Abgerufen am 08.05.25, von <https://www.agfw.de>
- [5] Nuklearforum Schweiz (2022). „China: Nukleares Fernwärme-Projekt nimmt im Nordosten des Landes noch 2022 den Betrieb auf“, Abgerufen am 08.05.25, von <https://www.nuklearforum.ch/de/news/china-nukleares-fernwaerme-projekt-nimmt-im-nordosten-des-landes-noch-2022-den-betrieb-auf/>
- [6] Korea.net. „Das südkoreanische Gesetz zur Klimaneutralität tritt am 25. März in Kraft“ vom 23.03.2022, Abgerufen am 15.05.25, von <https://german.korea.net/NewsFocus/Policies/view?articleId=212231>
- [7] AHK Korea, Beitrag „Koreanisch-Deutsche Energiepartnerschaft“, Abgerufen am 29.05.25, von <https://korea.ahk.de/de/main-navigation/schwerpunkte/energie-umwelt/koreanisch-deutsche-energiepartnerschaft>
- [8] DIN EN 253: 2019 + A1: 2023 Fernwärmerohre – Einzelrohr-Verbundsysteme für direkt erdverlegte Fernwärmenetze – Werkmäßig gefertigte Verbundrohrsysteme, bestehend aus Stahl-Mediumrohr, einer Wärmedämmung aus Polyurethan und einer Ummantelung aus Polyethylen, Beuth-Verlag Berlin (2024)
- [9] DIN EN 13941-1: 2021 Fernwärmerohre – Auslegung und Installation von gedämmten Einzel- und Doppelrohr-Verbundsystemen für direkt erdverlegte Fernwärmenetze – Teil 1: Auslegung, Beuth-Verlag Berlin (2021)
- [10] DIN EN 10217-1: 2019-08 Geschweißte Stahlrohre für Druckbeanspruchungen - Technische Lieferbedingungen - Teil 1: Elektrisch geschweißte und unterpulvergeschweißte Rohre aus unlegierten Stählen mit festgelegten Eigenschaften bei Raumtemperatur, Beuth-Verlag Berlin (2019)
- [11] 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
- [12] GB/T 29047-2021 Prefabricated directly buried insulating pipes and fittings with polyurethane foamed-plastics and high density polyethylene casing pipes, SAC (2022)
- [13] GB/T 29046-2023 Detection methods of technical specification for pre-insulated district heating pipes, SAC (2024)
- [14] China Certification. „GB Standards and Norms for China“, Abgerufen am 31.05.25, von <https://www.china-certification.com/en/gb-standards/>

[15] Standardsportal.org. „Resources: Find and Purchase Korean Industrial Standards (KS)“, Abgerufen am 31.05.25, von https://www.standardsportal.org/usa_kr/e/resources/purchase_KS.aspx

[16] Pem Korea. „Pre-Insulated Pipe Sytstem“, Abgerufen am 31.05.25, von http://www.pemkorea.com/catalog/30_20150415/30.pdf

[17] Korean Agency for Technology and Standards. „Korean Industrial Standards“, Abgerufen am 31.05.25, von <https://www.kats.go.kr/en/content.do?cmsid=405>

[18] 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, Beuth Verlag (2020)

[19] 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, Beuth-Verlag Berlin (2022)

[20] DIN 8075: 2018-08 Rohre aus Polyethylen (PE) - PE 80, PE 100 - Allgemeine Güteanforderungen, Prüfungen, Beuth-Verlag Berlin (2018)

[21] DIN EN ISO 1133-1: 2022-10 Kunststoffe - Bestimmung der Schmelze-Massefließrate (MFR) und der Schmelze-Volumenfließrate (MVR) von Thermoplasten - Teil 1: Allgemeines Prüfverfahren (ISO 1133-1:2022), Beuth-Verlag Berlin (2022)

[22] GB/T 18475-2001 Thermoplastics materials for pipes and fittings for pressure applications - Classification and designation - Overall service (design) coefficient, SAC (2002)

[23] Livalco Stål AB. „Nahtlose Rohre“, Abgerufen am 21.06.25, von <https://livalco.se/de/produktausfuhrung/nahtlose-rohre/>

[24] Salzgitter AG. „Bedeutung der Stahlsortenbezeichnung für ausgewählte Stähle“, Abgerufen am 21.06.25, von <https://www.salgitter-ag.com/de/newsroom/pressemeldungen/details/bedeutung-der-stahlsortenbezeichnung-fuer-ausgewaehlte-staehle-aus-dem-lieferprogramm-der-salgitter-flachstahl-20784.html>

[25] rff Rohr Flansch Fitting. „Rohre DIN EN“, Abgerufen am 21.06.25, von <https://www.rff.de>

[26] 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, Beuth-Verlag Berlin (2025)

[27] Boto Steel. „GB/T 8163 Grade 20 Steel Pipe Specification“, Abgerufen am 22.06.25, von <https://www.botosteelpipes.com/wp-content/uploads/GB-T-8163-Grade-20-Steel-Pipe-Specification-1.pdf>

[28] Tianjin Tianyingtai Steel Pipe. „ASTM A 53 GR B Steel Pipe SS400“, Abgerufen am 30.06.25, von <https://www.tytsteelpipes.com/steel-pipe/astm-a-53-gr-b-steel-pipe-ss400.html>

[29] Thyssenkrupp. „Werkstoffdatenblatt“, Abgerufen am 21.06.25, von <https://api-b2b.thyssenkrupp-schulte.de/medias/P235GH-1.0345-04.2019.pdf>

[30] Wanzhi Steel. Abgerufen am 26.06.25, von <https://wanzhi-steel.com/de/product/q235-steel/>

[31] Tirlor W. (2016) „Internationaler Stahlvergleich“, 2. Auflage, Beuth-Verlag Berlin, ISBN 978-3-410-26238-1

- [32] Pipetec Korea (2020). „Catalogue“. Produktkatalog Pipetec Korea, Seoul, Korea
- [33] Daejoo ENT.. Abgerufen am 27.06.25, von http://m.daejooent.co.kr/business/dpipe_quality.htm
- [34] Luoyang Dema Import and Export. „Was ist der Unterschied zwischen PE 80 und PE 100?“, Abgerufen am 30.06.25, von <https://de.polychemers.com/news/what-is-the-difference-between-pe-80-and-pe-78276393.html>
- [35] Dalian Yiduo Piping. „Piping Brochure“, Abgerufen am 30.06.25, von <http://en.ydgd.com/down/show-443.html>
- [36] 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, Beuth-Verlag Berlin (2019)
- [37] Institut für Energie- und Umweltforschung (2017). „Wärmenetzsysteme 4.0 Endbericht – Kurzstudie zur Umsetzung der Maßnahme „Modellvorhaben erneuerbare Energien in hocheffizienten Niedertemperaturwärmenetzen“, Abgerufen am 30.06.25, von <https://www.ifeu.de/fileadmin/uploads/W%C3%A4rmenetze-4.0-Endbericht-final.pdf>
- [38] AGFW (2009). „Wirtschaftliche Dämmung von KMR“, Abgerufen am 30.06.25, von <https://www.agfw.de>
- [39] Brugg Pipes (2020). „PREMANT-Fernwärmeleitung“, abgerufen am 21.06.25, von https://www.bruggpipes.com/fileadmin/user_upload/downloads/produkte/01-nah-und-fernwaerme/premant/dokumentation/brugg-rohrsysteme-premant-katalog_de.pdf
- [40] Isover (2020). „Neue Fernwärmeleitung: Wo es auf maximale Wärmedämmung ankommt“, Abgerufen am 02.07.25, von <https://www.isover-technische-isolierung.de>
- [41] Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (2025). „Modellvorhaben Wärmenetzsysteme 4.0“, Version 2.2, S. 16
- [42] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. „Grüne Wärme: der Bund fördert den Umbau von Wärmenetzen zur treibhausgasneutralen kommunalen Wärmeinfrastruktur“, Abgerufen am 02.06.25, von <https://www.energiewechsel.de/KAENEF/Redaktion/DE/Foerderprogramme/bew.html>
- [43] Usman M., Kim YK. (2022). „Pipe Insulation Evaluation for Low-Temperature District Heating Implementation in South Korea“, Front. Energy Res. 9:793557. doi: 10.3389/fenrg.2021.793557
- [44] Zhang, L., Zhang, Q., Yang, X., & Hooman, K. (2022). „Thermo-Economic Assessment on Insulation Conditions of the Buried Heating Pipeline for District Heating“, Heat Transfer Engineering, 44 (2023)(13), 1140-1156. <https://doi.org/10.1080/01457632.2022.2119923>
- [45] MCM Systeme. „Unterschied zwischen PE-HD (PE 100), PE-MD (PE 80) und PE-LD (PE 63)“, Abgerufen am 15.06.25, von <https://www.mcm-systeme.de/Unterschied-zwischen-PE-HD-PE-100-PE-MD-PE-80-und-PE-LD-PE-63>
- [46] Isoplus (2011). „IP Planungshandbuch“, Abgerufen am 10.06.25, von https://www.isoplus.group/fileadmin/products/IP_Planungshandbuch_DE.pdf
- [47] Seoul Solution (2017). „Integrated Energy Supply Program“, Abgerufen am 21.06.25, von <https://www.seoulsolution.kr/en/content/integrated-energy-supply-program>
- [48] DIN 4124: 2012-01 Baugruben und Gräben - Böschungen, Verbau, Arbeitsraumbreiten, Beuth-Verlag Berlin (2012)

- [49] CJJ/T 81-2013 *Technical Specification for Directly Buried Hot-water Heating Pipeline in City*, SAC (2014)
- [50] Soudal. „PU-Schäume und -Schaum-Pistolen“, Abgerufen am 25.06.25, von <https://www.soudal.de/pro/pu-schaume-und-schaum-pistolen>
- [51] Tangshan Xingbang Pipeline Engineering Equipment. „Heating and Cooling Pipelines“, Abgerufen am 02.06.25, von <https://www.xingbanginsulatedpipe.com/Content/upload/pdf/202339549/Heating-and-cooling-pipelines.pdf>
- [52] Sigloch H. (2022). „Technische Fluidmechanik“, 11. Auflage, Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, ISBN 978-3-662-64629-8
- [53] Fluidon. „Diskrete Druckverluste bei inkompressibler Strömung“, Abgerufen am 13.07.25, von <https://fluidon.com/engineering/druckschwingungsanalyse/wissensdatenbank/diskrete-druckverluste>
- [54] Linde Gas. „Elektrodenschweißen (Lichtbogenhandschweißen)“, Abgerufen am 22.07.25, von <https://www.linde-gas.de/shop/de/de-ig/elektrodenschweissen>
- [55] Messer. „MIG + MAG Schweißen“, Abgerufen am 22.07.25, von <https://blog.messer.at/mig-mag-schweissen-abgrenzung-anderen-schweissverfahren>
- [56] AGFW. „Schweißen und Prüfen von Fernwärme-Leitungen nach AGFW FW 446 und FW 602“, Abgerufen am 14.07.25, von <https://www.agfw.de>
- [57] Song MJ, Lee KH, Lee JS, Kim H, Kim WC, Lee SY. „Evaluation of Crack Formation in Heat Pipe-Welded Joints“ *Materials* (Basel). 2025 Apr 29;18(9):2028. doi: 10.3390/ma18092028. PMID: 40363534; PMCID: PMC12072908.
- [58] Logstor (2022). „Product Catalogue“, Abgerufen am 24.07.25, von <https://www.logstor.com>
- [59] Qingdao Huashida Machinery. Abgerufen am 24.07.25, von <https://www.pipecoatingline.com/supplier-4779997-electric-fusion-tape>
- [60] Qingdao Huashida Machinery. Abgerufen am 24.07.25, von <https://www.hsdanticorrosion.com/buried-pipeline-field-joint-heat-shrinkable-sleeve.html>
- [61] Odelya. Abgerufen am 24.07.25, von <https://odelya.com/new/odelya-pre-insulated-bonded-1/19>
- [62] Stichlmair, J. (2019). L1.7 „Druckverlust bei der Durchströmung von Lochplatten“, In: Stephan, P., Kabelac, S., Kind, M., Mewes, D., Schaber, K., Wetzel, T. (eds) *VDI-Wärmeatlas*. Springer Reference Technik(). Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-52989-8_80
- [63] Bauformeln.de. „Verlustbeiwerte für Querschnittsänderungen“, Abgerufen am 10.05.25, von <https://www.bauformeln.de/wasserbau/rohrhydraulik/oertliche-hydraulische-verlustbeiwerte/verlustbeiwerte-fuer-querschnittsaenderungen>
- [64] Zanke U. (2013). „Hydraulik für den Wasserbau“, 3. Auflage, Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, ISBN 978-3-642-05488-4
- [65] Weidlich, I. (2022). „Wärmetechnische Auslegung von Fernwärme- und Heißwasserleitungen“, In: Horlacher, HB., Helbig, U. (eds) *Rohrleitungen*. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-45027-3_51-2
- [66] Preser F. (2013). „Klausurtrainer - Hydromechanik für Bauingenieure“, 2. Auflage, Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, ISBN 978-3-8348-2496-7

- [67] Energie Schweiz (2021). „Planungshandbuch Fernwärme“, Abgerufen am 23.07.25, von https://www.verenum.ch/Dokumente/PHB-FW_V1.3.pdf
- [68] Shandong Donghong. Abgerufen am 23.07.25, von <https://www.xinfabaowen.com/products/buried-pre.html>
- [69] Korea Urethane. Abgerufen am 23.07.25, von <https://www.koure.co.kr/eng/product2.html>
- [70] Kopitz J., Polifke W. (2009). „Wärmeübertragung – Grundlagen, analytische und numerische Methoden“, 2. Auflage, Pearson Studium, München, ISBN 978-3-8273-7349-6
- [71] Windisch H. (2017). „Thermodynamik: ein Lehrbuch für Ingenieure“, 6. Auflage, De Gruyter Oldenbourg, München, Wien, ISBN 978-3-11-053357-6
- [72] Yena Engineering. „Einfluss von Legierungselementen auf Stahl“, Abgerufen am 24.07.25, von <https://yenaengineering.nl/de/einfluss-von-legierungselementen-auf-stahl/>
- [73] Richter F.. „Die physikalischen Eigenschaften der Stähle „Das 100 - Stähle - Programm“ Teil I: Tafeln und Bilder“, Abgerufen am 24.07.25, von https://www.tugraz.at/fileadmin/user_upload/Institute/IEP/Thermophysics_Group/Files/Staehle-Richter.pdf
- [74] Thyssenkrupp. „Werkstoffdatenblatt“, Abgerufen am 24.07.25, von <https://rx8forum.de/wcf/index.php?file-download/22450/>
- [75] Thyssenkrupp. „Werkstoffdatenblatt“, Abgerufen am 24.07.25, von <https://api-b2b.thyssenkrupp-schulte.de/medias/P235-TR2-1.0255-04.2017.pdf>
- [76] Richard H., Sander M. (2015). „Technische Mechanik. Festigkeitslehre“, Springer Vieweg, Wiesbaden, ISBN 978-3-658-09307-5
- [77] Yena Engineering. „Wie führt man das Schweißen von Rohren durch? – Mit Beispielen“, Abgerufen am 24.07.25, von <https://yenaengineering.nl/de/wie-fuehrt-man-das-schweissen-von-rohren-durch-mit-beispielen/>
- [78] DIN EN ISO 5817: 2023-07 Schweißen - Schmelzschweißverbindungen an Stahl, Nickel, Titan und deren Legierungen (ohne Strahlschweißen) - Bewertungsgruppen von Unregelmäßigkeiten (ISO 5817:2023), Beuth-Verlag Berlin (2023)
- [79] Aweldi. „Rohrschweißen“, Abgerufen am 25.07.25, von <https://www.aweldi.de/rohrschweissen/>
- [80] Linhui. „Pre-insulated Steel Pipes For Heat Networks“, Abgerufen am 20.05.25, von <https://www.lksteelpipe.com/pre-insulated-steel-pipes-for-heat-networks>



Dieses Dokument steht unter folgender Creative Commons-Lizenz: <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>.
Diese Lizenz erlaubt unter Voraussetzung der Namensnennung des Urhebers die Bearbeitung, Vervielfältigung und Verbreitung des Materials in jedem Format oder Medium für beliebige Zwecke, sogar kommerziell.