

Schlussbericht

zu IGF-Vorhaben Nr. 1 EWN

Thema

Entwicklung empirischer Berechnungsverfahren zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit und der Wärmeverluste von werkmäßig gedämmten Doppelrohrsystemen auf Grundlage messtechnischer Verfahren

Berichtszeitraum

01.12.2016 – 31.03.2019

Forschungsvereinigung

Fernwärme-Forschungsinstitut in Hannover e. V.

Forschungseinrichtung(en)

Forschungsstelle 1 von 2: Fernwärme-Forschungsinstitut in Hannover e. V. – FFI

Forschungsstelle 2 von 2: Leibniz Universität Hannover Institut für Geotechnik – IGtH

Hemmingen, 15.10.2019 (FFI)

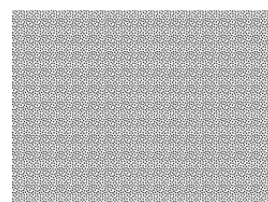
Dipl.-Ing. Jens Tödter (FFI)

Hannover, 15.10.2019 (IGtH)

Dipl.-Ing. Mandy Narten (IGtH)

Ort, Datum

Name und Unterschrift aller Projektleiterinnen und Projektleiter der
Forschungseinrichtung(en)



Gliederung

Dieser Schlussbericht besteht aus einem allgemeinen Teil und zwei Anlagen, die die Fachberichte der beiden Forschungsstellen FFI und IGtH enthalten.

Diese Version des Schlussberichts enthält den fachlichen Teil. Rein formale Teile des Schlussberichts sind in dieser Version nicht enthalten.

Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse

Der wissenschaftlich-technische Nutzen ergibt sich aus der Möglichkeit, die Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmung in Doppelrohren messtechnisch zu bestimmen und auf Basis dieser Messwerte die Wärmeverluste zu berechnen. Damit kann die Berechnung der Wärmeverluste bei der Wärmenetzplanung unabhängig von den bislang üblichen Herstellerangaben erfolgen. Die Herstellerangaben zu den Wärmeverlusten basieren auf bestimmten Annahmen für die unterschiedlichen relevanten Parameter. Mit zunehmender Abweichung der Parameter des Wärmenetzes von den Parametern der Herstellerangaben wird die Berechnung der Wärmeverluste basierend auf Herstellerangaben zunehmend schwieriger und ungenauer. Die Berechnung der Wärmeverluste bei der Wärmenetzplanung unabhängig von Herstellerangaben erlaubt eine effizientere Auslegung und einen effizienteren Betrieb des Wärmenetzes. Daraus ergeben sich Einsparpotentiale beim Primärenergiebedarf, was mit einer Reduktion der Umweltbelastung durch den Betrieb des Wärmenetzes einhergeht.

Der wirtschaftliche Nutzen für KMU ergibt sich aus einer effizienteren Auslegung und einem effizienteren Betrieb des Wärmenetzes. Daraus ergeben sich Kosteneinsparpotentiale sowohl in der Bauphase als auch im Betrieb des Wärmenetzes. Doppelrohre werden häufig in kleineren Wärmenetzen eingesetzt, die von oftmals vor Ort ansässigen KMU errichtet und betrieben werden, womit große Teile der Wertschöpfungskette in der Region verbleiben.

Während des Wärmenetzbaus kann die baubegleitende Qualitätssicherung auf das Merkmal "Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmung in Doppelrohren" ausgeweitet werden. Damit wird sichergestellt, dass Doppelrohre mit den Wärmeleitfähigkeiten der

Wärmedämmung verbaut werden, auf deren Basis die Berechnung der Wärmeverluste des Wärmenetzes beruht. Dadurch erhöht sich die Planungssicherheit für den Betrieb des Wärmenetzes.

Rohrhersteller können die Qualität hinsichtlich der Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmung ihrer Doppelrohre durch Messungen direkt an den produzierten Doppelrohren überwachen. Die Notwendigkeit der Produktion zusätzlicher Einzelrohre für diesen Zweck entfällt. Dies führt zu Kosteneinsparungen in der Produktion. Zudem werden Rohstoffe und Energie für die Produktion der zusätzlichen Einzelrohre eingespart, wodurch die Umweltbelastung durch die Produktion reduziert wird.

Entsprechende Vorschläge zu Änderungen in den Normen EN 15632-1:2009+A1:2014 und FprEN 15698-1:2019 werden eingereicht werden.

Liste der Veröffentlichungen:

- Schuchardt, G.-K., Kraft, S.: „Bestimmung der Wärmeverluste werkmäßig gedämmter Verbundmanteldoppelrohre“
EuroHeat&Power, 46. Jg (2017), Heft 12, S. 15-18
- Narten, M., Bagusche, O., Achmus, M.: „Temperaturverteilung und daraus resultierende Wärmeverluste in Doppelrohren“
EuroHeat&Power, 47. Jg (2018), Heft 1-2, S. 23-27
- Kraft, S.: „Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit von werkmäßig gedämmten Doppelrohren“
3R Fachzeitschrift für sichere und effiziente Rohrleitungssysteme, 09|2018, S. 82-86
- Kraft, S.: “Determination of thermal conductivity of pre-insulated twin pipes”
EuroHeat&Power, English Edition, I/2019, S. 26-30

Zielstellungen und Ergebnisse des Vorhabens

In diesem Forschungsvorhaben werden ein einfach einsetzbares Berechnungsverfahren mit zugehörigem praxistauglichem Messaufbau zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmung von werkmäßig gedämmten Doppelrohren sowie ein einfach einsetzbares Berechnungsverfahren zur Bestimmung der Wärmeverluste von werkmäßig gedämmten Doppelrohren entwickelt. Das Berechnungsverfahren mit zugehörigem Messaufbau zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmung von werkmäßig gedämmten Doppelrohren wird durch Messungen und FEM-Simulationen (FEM = Finite Elemente Methode, ein numerisches Verfahren) soweit abgesichert, dass es in die Normung eingebracht werden kann. Ziel ist die Aufnahme in die Normen EN 15698-1 für als Kunststoffmantelverbundrohre ausgeführte Doppelrohre und EN 15632-1 für flexible Doppelrohre. Das FFI führt sämtliche Messungen durch und entwickelt abschließend Berechnungsverfahren und Messaufbau zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmung von werkmäßig gedämmten Doppelrohren sowie ein Berechnungsverfahren zur Bestimmung der Wärmeverluste von werkmäßig gedämmten Doppelrohren. Das IGtH führt sämtliche FEM-Simulationen zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmung von werkmäßig gedämmten Doppelrohren sowie zur Bestimmung der Wärmeverluste von werkmäßig gedämmten Doppelrohren durch. Erst der Abgleich der aus den Messungen erhaltenen Werte mit den aus den FEM-Simulationen erhaltenen Werten ermöglichen die Entwicklung eines praxistauglichen Messaufbaus einerseits und die Verifizierung des entwickelten Berechnungsverfahrens zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmung von werkmäßig gedämmten Doppelrohren andererseits sowie die Verifizierung des entwickelten Berechnungsverfahrens zur Bestimmung der Wärmeverluste von werkmäßig gedämmten Doppelrohren. Mit Abschluss des Forschungsvorhabens stehen ein einfach einsetzbares Berechnungsverfahren mit zugehörigem praxistauglichem Messaufbau zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmung von werkmäßig gedämmten Doppelrohren sowie ein einfach einsetzbares Berechnungsverfahren zur Bestimmung der Wärmeverluste von werkmäßig gedämmten Doppelrohren zur Verfügung. Der Einbringung in die Normung steht von dieser Seite her nichts mehr entgegen.

Untersuchungen zum radialen Bettungsverhalten von Doppelrohren und zur Schubspannungsverteilung im Doppelrohr werden auf theoretischer Ebene durchgeführt. Das IGtH führt dazu FEM-Simulationen durch. In den meisten Fällen erfordern die FEM-Simulationen während der Modellbildung entsprechende Vereinfachungen und Idealisierungen der tatsächlichen Verhältnisse. Dies korreliert mit den aus den vom FFI durchgeführten Feldversuchen gewonnenen Erkenntnissen, dass sich ein Doppelrohr in einem realen Wärmenetz aufgrund der enormen Variabilität der verschiedenen Parameter nur sehr bedingt mathematisch erfassen lässt, und unterstreicht zudem die Notwendigkeit der Durchführung von

Messungen unter kontrollierten Bedingungen im Technikum. Die FEM-Simulationen zeigen, dass die von Einzelrohren her bekannten Mechanismen überwiegend nicht auf Doppelrohre übertragen werden können. Um die Ergebnisse der durchgeführten Berechnungen als Basis für ein modifiziertes Bemessungskonzept von Doppelrohren zu verwenden, sind weitere Forschungen inklusive der Durchführung von Messungen unerlässlich, wobei auch hier das Ziel zu verfolgen ist, die Ergebnisse dieser weiteren Forschung soweit möglich in die Normung einbringen zu können.

Anlagen

Anlage 1: Fachbericht des FFI (102 Seiten)

Anlage 2: Fachbericht des IGtH (168 Seiten)

Fernwärme-Forschungsinstitut
in Hannover e. V.
Max-von-Laue-Str. 23
30966 HEMMINGEN
DEUTSCHLAND

Tel. +49 511 94370 - 0
Fax +49 511 94370 - 470
E-Mail info@fernwaerme.de
Internet www.fernwaerme.de

**„Entwicklung empirischer Berechnungsverfahren zur
Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit und der Wärmeverluste
von werkmäßig gedämmten Doppelrohrsystemen auf
Grundlage messtechnischer Verfahren“**

Schlussbericht zum IGF Vorhaben Nr.: 1 EWN

erstellt von:

Dipl.-Ing. (FH) Sönke Kraft

Hemmingen, 12.09.2019

Der Bericht enthält 102 Seiten.

Urheberrechtlich geschützt.

Inhalt

1. Einleitung	5
2. Wirtschaftliche Relevanz für KMU	7
2.1 Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung	7
2.2 Wirtschaftliche Bedeutung der angestrebten Forschungsergebnisse für kleine und mittelständische Unternehmen (KMU)	10
3. Wissenschaftlich-technischer Ansatz	12
3.1 Stand der Forschung und Entwicklung	12
3.2 Arbeitshypothese	17
4. Lösungsweg	18
4.1 Bearbeitungsschritte	18
4.1.1 Entwicklung eines Berechnungsmodells	18
4.1.2 Untersuchung rohrinterner Temperaturfelder und resultierender Spannungsverhältnisse in Dämmung und Boden	19
4.1.3 Konzeptionelle Entwicklung der Technikumsversuche	19
4.1.4 Konzeptionelle Entwicklung der Messungen im Graben	21
5. Technikumsversuche	22
5.1 Messungen in der Klimakammer	22
5.1.1 Messaufbau	22
5.1.2 Durchführung der Messungen	25
5.1.3 Messwerte	28
5.2 Messungen im Graben	56
5.2.1 Messaufbau	56
5.2.2 Durchführung der Messungen	59
5.2.3 Messwerte	59
6. Entwicklung eines Berechnungsmodells	68
6.1 FEM	68

6.2	Multipolentwicklung	68
6.3	Berechnung der Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmung aus Messwerten	69
6.3.1	Multipolentwicklung	69
6.3.2	Temperatur des Außenmantels	70
6.3.3	Messaufbau und Berechnungen zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmung	71
6.4	Berechnung der Wärmeverluste von Doppelrohren	75
6.4.1	Berechnung mit der Multipolmethode	75
6.4.2	Den Gleichungen zugrunde liegende Annahmen	77
6.4.3	Mediumrohre aus Metall	77
6.4.4	Mediumrohre aus Polymer oder Mehrschichtverbund	77
6.5	Praktische Grenzen der Berechnung des Wärmeverlustes	79
7.	Auswertung der Technikumsversuche	81
7.1	Messungen in der Klimakammer	81
7.2	Messungen im Graben	83
8.	Feldversuche	85
8.1	Emmingen	85
8.1.1	Messaufbau	85
8.1.2	Durchführung der Messungen	91
8.1.3	Messwerte	91
8.2	Wald	96
8.2.1	Messaufbau	96
8.2.2	Durchführung der Messungen	98
8.2.3	Messwerte	99
9.	Vorschläge für die Normung	100
9.1	EN 15632-1:2009+A1:2014	100
9.2	FprEN 15698-1:2019	100

1. Einleitung

Ein verantwortungsvoller Umgang mit den der Menschheit zur Verfügung stehenden Ressourcen impliziert die fachliche Auseinandersetzung mit Wärmeverteilsystemen und deren Wärmeverlusten. Da es nicht möglich ist Wärmeverluste in einem Wärmeverteilsystem völlig zu vermeiden, ist das Wissen um die Größenordnung der Wärmeverluste wichtig. Bei der leitungsgebundenen Wärmeverteilung wird Heizwasser in einem Rohrleitungssystem von der Erzeugungseinheit zum Verbraucher gepumpt. Dabei wird der Vorlauf, hin zum Verbraucher, von dem Rücklauf, zurück zur Erzeugungsanlage, unterschieden. Vor- und Rücklauf werden im konventionellen Wärmenetz mit zwei getrennten Rohrleitungen meist nebeneinander im selben Graben geführt. Das dabei am meisten eingesetzte Rohrleitungssystem ist das Kunststoffmantelverbundrohr nach EN 253 [1]. Statistische Erhebungen des Fernwärmefachverbandes AGFW in Frankfurt zeigen, dass bei diesem Rohrsystem die Wärmeverluste in großen Netzen über das Jahr in einer Größenordnung von ca. 11 % liegen [2]. Deutlich höhere Verluste können bei kleinen Netzen auftreten [3]. Dabei sind die Wärmeverluste von den lokalen Randbedingungen abhängig und variieren in Abhängigkeit der Beschaffenheit der Wärmedämmung des Rohres, der Wärmeleitfähigkeit des Bettungsmaterials und den Temperaturänderungen im Mediumrohr. Sofern diese Randbedingungen festgestellt werden, existieren für das einzelne Rohr aufgrund der Zylindersymmetrie Berechnungsansätze, mit denen die Wärmeverluste eines Rohres unter den entsprechenden Bedingungen ermittelt werden können [4][5].

Hersteller von Rohrleitungssystemen für die Wärmeverteilungen produzieren neben Rohren mit einem Mediumrohr auch Rohre mit zwei und mehr Mediumrohren. Im Produktionsprozess werden zwei oder mehr Mediumrohre in einem Außenmantel aus Polyethylen positioniert. Anschließend wird der Zwischenraum mit einer Wärmedämmung ausgefüllt. Bei Verbundrohren wird als Wärmedämmung in der Regel Polyurethanschaum oder seltener Polyisocyanuratschaum eingesetzt, bei Nichtverbundrohren eine oder mehrere Lagen aus vernetztem oder unvernetztem Polyethylenschaum. Nachfolgend sollen nur Rohre mit zwei Mediumrohren, sogenannte Doppelrohre, betrachtet werden. Als Kunststoffmantelverbundrohre ausgeführte Doppelrohre sind in EN 15698 genormt [6]. Flexible werkmäßig gedämmte Doppelrohre sind in der EN 15632 genormt [7]. /Bild 1/ zeigt beispielhaft zwei Doppelrohre.



Bild 1 Doppelrohre, links Kunststoffmantelverbundrohr nach EN 15698, rechts flexibles Verbundrohr nach EN 15632

Der gesicherte Stand des Wissens wird verlassen, wenn die Wärmeverluste für Doppelrohre berechnet und angegeben werden sollen. Durch die Komplexität der Geometrie des Querschnitts im Vergleich zum Einzelrohr (Verlust der Zylindersymmetrie) lassen sich Wärmeverluste nicht mehr mit einfachen analytischen Berechnungsansätzen berechnen. Die Literaturrecherche zeigt, dass für die Einschätzung der Wärmeverluste von Doppelrohren auf die Finite-Elemente-Methode [8] sowie in jüngerer Zeit auch auf die Multipolmethode [9] zurückgegriffen wird. Die Ergebnisse sind bei diesen Untersuchungen von den jeweils verwendeten Eingangsparametern abhängig und nicht grundsätzlich allgemein übertragbar.

In diesem Forschungsvorhaben wird deshalb ein einfach einsetzbares empirisches Berechnungsverfahren zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit und der Wärmeverluste von werkmäßig gedämmten Doppelrohrsystemen auf Grundlage messtechnischer Verfahren entwickelt.

2. Wirtschaftliche Relevanz für KMU

2.1 Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung

Für die Auslegung von Fernwärmenetzen ist der Wärmeverlust der Rohrsysteme ein Kriterium, welches die möglichen Verlegelängen, das erforderliche Temperatur- und Druckniveau sowie den erforderlichen Wärmestrom mit bestimmt. Ausschlaggebend für den Wärmeverlust eines Rohrsystems bei vorgegebenen Betriebsparametern sind neben den Umgebungsbedingungen und der Verlegetiefe hauptsächlich die Rohrgeometrie und die Wärmeleitfähigkeit der im Rohrsystem enthaltenen Wärmedämmung. Für Rohrsysteme mit zwei Mediumrohren gibt es bislang kein Verfahren zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmung, da Ergebnisse für Einzelrohrsysteme nur bedingt auf Doppelrohrsysteme übertragbar sind. Dies ist insbesondere gültig, da im Doppelrohrsystem von einer über den Rohrquerschnitt inhomogenen (anisotropen) Qualität des Dämmschaumes auszugehen ist. Die Verwendung des Doppelrohrsystems ist folglich mit technischen Unsicherheiten im Bereich der Netzplanung und des Netzbaus sowie mit wirtschaftlichen Unsicherheiten bei der Berechnung der erforderlichen Primärenergienmengen für die Wärmeerzeugung behaftet.

Die wissenschaftlich-technische Problemstellung ergibt sich aus der konzeptionellen Entwicklung eines empirischen Berechnungsverfahrens, welches in einem ausreichenden Maße durch Messreihen kalibriert, überprüft und angepasst wurde. Weiterhin ist das Verfahren mit Feldmessmethoden unter in situ-Bedingungen zu evaluieren.

Um die wirtschaftliche Problemstellung in einem ersten Schritt adressieren zu können, werden im Rahmen einer Voruntersuchung die von Rohrherstellern in Produktkatalogen angegebenen Wärmeverluste für Einzelrohre und Doppelrohre zusammengestellt. In /Tabelle 1/ ist beispielhaft das Ergebnis eines Rohrherstellers für verschiedene Nennweiten angegeben.

Nennweite Medium- rohre	Doppelrohr, Dämmserie 1, Wärmeverlust [W·m ⁻¹]	Zwei Einzelrohre, Dämmserie 1, Wärmeverlust [W·m ⁻¹]	Reduktion Doppelrohr gegenüber zwei Einzelrohren [%]
DN 50	19,58	29,71	34,1
DN 100	26,24	38,08	31,1
DN 200	33,28	56,24	40,8

Tabelle 1 Herstellerangaben zu Wärmeverlusten von Kunststoffmantelverbundrohren

Im Vergleich zum Einzelrohr liegen die Wärmeverluste laut den Angaben eines Herstellers beim Doppelrohr niedriger. Demnach sind für das Doppelrohr niedrigere Wärmeverluste zu erwarten. Gleichzeitig wird von Fernwärmebetreibern, die Doppelrohre einsetzen, berichtet, dass Wärmeverluste mitunter deutlich höher sind als die Herstellerangaben. Die nachfolgende /Bild 2/ zeigt für sieben Bioenergiedörfer, deren Fernwärmenetze mit Doppelrohren ausgeführt sind, die Abweichungen der gemessenen Wärmeverluste im Vergleich zu den berechneten Wärmeverlusten bezogen auf die berechneten Wärmeverluste für die Jahre 2011 bis 2014 (Bioenergiedörfer Nr. 1... Nr. 5) bzw. die Jahre 2012 bis 2014 (Bioenergiedörfer Nr. 6 & Nr. 7).

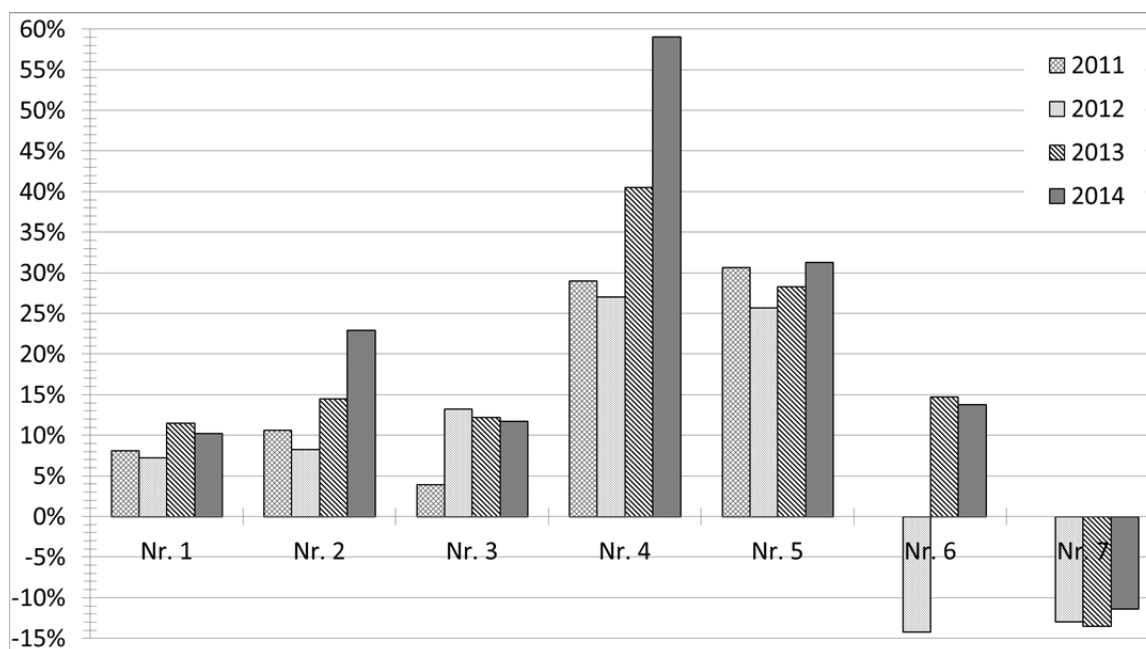


Bild 2 Abweichungen in [%] der gemessenen von den berechneten Wärmeverlusten in den Fernwärmenetzen von sieben Bioenergiedörfern (dem FFI zur Verfügung gestellte Betreiberdaten)

Aus wissenschaftlicher Sicht sind die Herstellerangaben zu den Wärmeverlusten auch deshalb zu hinterfragen, da diese eine Funktion der Betriebstemperatur sind und sich im Doppelrohr Vor- und Rücklauf gegenseitig beeinflussen. So erfolgt im Doppelrohr ein Wärmestrom vom Vorlauf durch die Wärmedämmung in den Rücklauf. Dadurch gehen wertvolle Exergieinhalte für die Wärmeversorgung verloren.

Für eine umfangreiche Verwendung des Doppelrohrsystems ist es daher erforderlich, ein wissenschaftlich abgesichertes Berechnungsverfahren für die Wärmeverluste von Doppelrohren zu entwickeln und dieses auf Normungsebene umzusetzen.

Doppelrohrsysteme sind im Vergleich zu Einzelrohrsystemen im Querschnitt nicht zylindersymmetrisch. Deshalb ist im Betrieb für das Doppelrohrsystem eine komplexe Temperaturverteilung zu erwarten. Gleiches gilt für die Verteilung der Schub- und Normalspannungen in der Wärmedämmung sowie die radiale Aufweitung des Außenmantels und die daraus resultierende Normalspannungserhöhung im Boden. Für mögliche Betriebszustände im Vorlauf und im Rücklauf der Doppelrohrsysteme sind sowohl die Temperaturverteilungen als auch die daraus resultierenden Spannungszustände zu untersuchen, um die erforderlichen Spannungsnachweise führen zu können. Damit wird eine Grundlage für die betriebssichere Auslegung von Doppelrohrsystemen in Wärmenetzen geschaffen.

Im Rahmen der Energiewende besteht die Notwendigkeit Wärmenetze kostengünstig auszubauen. Das Ziel der Bundesregierung den Anteil der Stromerzeugung aus Kraft-Wärme-Kopplung bis 2020 auf 25 % auszubauen [10] muss mit einem gleichzeitigen Ausbau der Energienetze einhergehen. Hierbei kann das Doppelrohr für die Wärmenetze eine Schlüsselrolle spielen, da Doppelrohrsysteme geringere Tiefbaukosten erfordern als die Nebeneinanderverlegung von Einzelrohren. Auf diesen Sachverhalt wird nachfolgend noch detailliert eingegangen. Zudem können Doppelrohre u. U. auch in Gebieten verlegt werden, in denen weder eine Nebeneinanderverlegung noch eine Übereinanderverlegung von zwei Einzelrohren mit vertretbarem Aufwand möglich ist.

Da sich wirtschaftliche Vorteile im Tiefbau teilweise mit hohen Kosten einer komplexeren Technik für die Doppelrohrverbindungen und –abzweige überlagern, ist Teil der wirtschaftlichen Problemstellung der Nachweis des Kostenvorteils der Doppelrohrverlegung, über den von einigen Fernwärmeversorgungsunternehmen berichtet wird.

2.2 Wirtschaftliche Bedeutung der angestrebten Forschungsergebnisse für kleine und mittelständische Unternehmen (KMU)

Das Doppelrohrsystem wird in skandinavischen Ländern oft eingesetzt und erfährt dort eine breitere Akzeptanz als dies in Deutschland der Fall ist. Dies scheint durch die in Skandinavien vorherrschenden Temperaturniveaus bedingt, die hier im Durchschnitt niedriger als in Deutschland liegen, womit den dadurch niedrigeren Wärmeverlusten eine geringere Bedeutung zukommt [11]. In Deutschland werden die Wärmeverluste eines Wärmeverteilnetzes mit unterschiedlichem Fokus diskutiert und sind auch bei der energetischen Bewertung von Gebäuden mit Fernwärme sowie bei der Berechnung des Primärenergiefaktors zu berücksichtigen. Der Markt ist in Deutschland deshalb für ein Rohr ohne zuverlässige Angabe der Wärmeverluste schwierig.

Durch ein wissenschaftlich abgesichertes Berechnungsverfahren für die Wärmeverluste von Doppelrohren wird Vertrauen für den Einsatz des Doppelrohrsystems aufgebaut. Die wirtschaftliche Bedeutung der angestrebten Forschungsergebnisse ergibt sich daher erstens für Hersteller von Doppelrohrsystemen, die den Absatz von Doppelrohrsystemen verbessern können. Zweitens ergeben sich für Fernwärmenetzbetreiber mehrere Vorteile. Einzelrohre gehen bei der Nebeneinanderverlegung von Vor- und Rücklauf einher mit intensiven Tiefbauarbeiten. Arbeitsraumbreiten für Verbindungsarbeiten und Abstände zwischen den Rohrleitungen nach DIN 4124 bzw. AGFW FW 401 Teil 12 sind einzuhalten [12][13], was zu Erdarbeiten für die hierfür erforderliche Kubatur führt. Erfahrungswerte von Stadtwerken zeigen, dass die Tiefbauarbeiten bei der offenen Verlegung ca. 60 % der Gesamtkosten ausmachen. Eine deutliche Reduktion dieser Tiefbaukosten lässt sich erreichen, wenn statt zwei Einzelrohren nur ein Doppelrohr zu verlegen ist. Die Grabenbreiten reduzieren sich deutlich. Bereits die einfache Betrachtung der Grabengeometrie zeigt im Vergleich zwischen der Nebeneinanderverlegung von

Einzelrohren und der Einzelverlegung von Doppelrohren eine Reduktion des Erdaushubs um rund 20 % bis 30 %. Dies zeigt /Bild 3/ für verschiedene Nenndurchmesser.

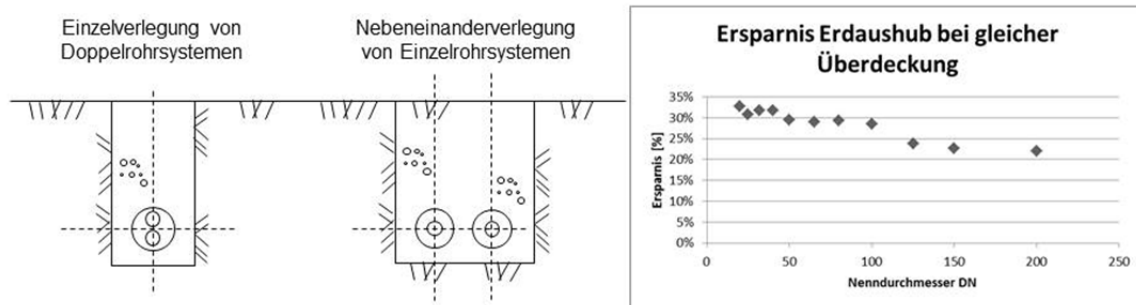


Bild 3 Erdaushub im Vergleich (aus der Geometrie abgeleitete Kubatur des Erdaushubs im Vergleich)

Zudem besteht die Möglichkeit, den Rohrgraben bei der Einzelverlegung von Doppelrohren außerhalb der Bereiche mit Verbindungen als „nicht betretbaren Graben“ nach DIN 4124 auszuführen, wodurch sich die Tiefbaukosten weiter reduzieren lassen. Weiterhin kann der Primärenergieeinsatz für die erforderliche Wärmeerzeugung in Wärmeverteilsystemen genauer kalkuliert werden, wenn die Wärmeverluste genau bekannt sind. Ferner ergeben sich Möglichkeiten bei dem Wissen um die Temperaturabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmung, die Betriebsweise der Wärmenetze gezielt zu steuern.

3. Wissenschaftlich-technischer Ansatz

3.1 Stand der Forschung und Entwicklung

EN 15698-1:2009 beschreibt Kunststoffmantelverbundrohre (KMR) mit zwei Mediumrohren und fordert zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmung eine Messung an einem KMR mit einem Mediumrohr gleicher Materialien [6]. Weiterhin enthält die EN 15632-1:2009+A1:2014 für werkmäßig gedämmte flexible Rohrsysteme (flexible Rohre) im Anhang A eine fehlerhafte Beschreibung einer Wärmeleitfähigkeitsbestimmung an Doppelrohren [7]. Zum einen wird auf das in der EN ISO 8497 [14] beschriebene Prüfverfahren verwiesen, das jedoch nur für zylindersymmetrisch aufgebaute Rohre, also Rohre mit einem Mediumrohr gilt. Zum anderen wird unterstellt, dass sich bei der Messung an Rohren mit zwei Mediumrohren über den gesamten Umfang des Außenmantels die gleiche Temperatur einstellt. Messungen an Doppelrohren zeigen jedoch, dass sich über den Umfang des Außenmantels unterschiedliche Temperaturen einstellen. Die nach EN ISO 8497 [14] an zylindersymmetrischen Probekörpern und EN 12667 [15] an plattenförmigen Probekörpern bestimmten Wärmeleitfähigkeiten des Materials der Wärmedämmung sind daher nicht sicher auf Doppelrohre übertragbar. Grund hierfür ist bei Verbundrohren die während des Schäumungsprozesses unterschiedliche Schaumentwicklung von Polyurethan- und Polyisocyanuratschäumen innerhalb unterschiedlicher Geometrien des für die Schaumentwicklung verfügbaren Hohlraumes.

So kommt es bei der exothermen Schaumentwicklung in Rohren mit metallischen Mediumrohren zu einer lokalen Abkühlung. Dies hat Einfluss auf die Schaumentwicklung und somit die Dämmwirkung des Schaums. Die unterschiedliche Schaumentwicklung hat so inhomogene thermische Eigenschaften der Wärmedämmung zur Folge.

/Bild 4/ zeigt ein KMR mit inhomogen entwickeltem Polyurethanschaum. Oberhalb der beiden Mediumrohre ist der Polyurethanschaum mit Ausnahme eines schmalen Bereiches am Außenmantel feinzelliger als unterhalb der beiden Mediumrohre. In diesem feinzelligen Bereich ist zudem eine größere Blase entstanden.

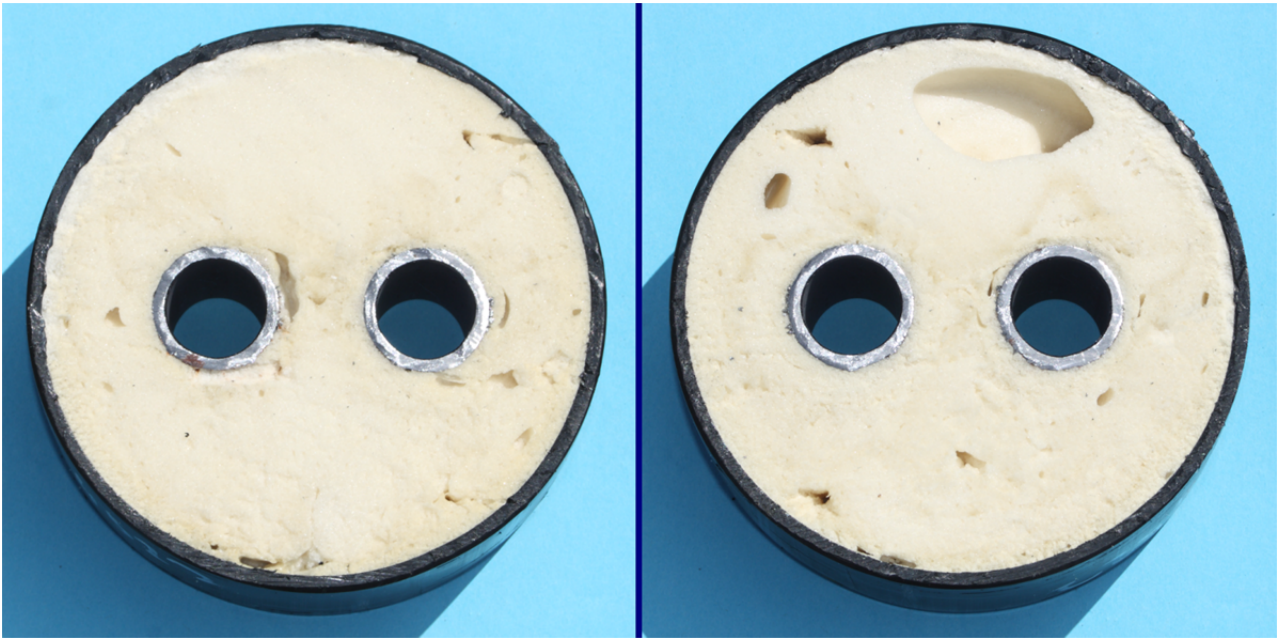


Bild 4 KMR mit inhomogen entwickeltem Polyurethanschaum

Demgegenüber werden bei flexiblen Rohren ohne Verbund flexible Platten aus Polyethylenschaum als Wärmedämmung eingesetzt. Auch hier ändern sich die thermischen Eigenschaften der Wärmedämmung durch den Einbau in das flexible Rohr, da die Platten an der zum Mediumrohr gewandten (Innen-) Seite gestaucht und an der zum Außenmantel gewandten (Außen-) Seite gestreckt werden. Zudem befindet sich innerhalb von flexiblen Doppelrohren ohne Verbund zwischen den beiden Mediumrohren ein sogenannter „Knochen“ aus semiflexiblem Polyethylenschaum. Die beiden Mediumrohre bilden zusammen mit dem Knochen einen zylinderförmigen Körper, der es ermöglicht, die Wärmedämmung in Form einer oder mehrerer Hohlzylinder in das Rohr einzubauen. /Bild 5/ zeigt ein flexibles Doppelrohr ohne Verbund.



Bild 5 flexibles Doppelrohr ohne Verbund

Bei allen Doppelrohrsystemen führt die komplexere Geometrie zu inhomogeneren Wärmedämmungen im Vergleich zu jeweils gleich aufgebauten Einzelrohrsystemen.

Die Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmung hängt weiterhin von der Betriebstemperatur bzw. der Temperatur des Wärmeträgermediums ab. Bisher wird hier z. B. bei der Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmung in Einzelrohren eine Mitteltemperatur von 50 °C zwischen Medienrohr Außenwand und Mantelrohrinnenwand zur Bestimmung der Wärmedämmung λ_{50} herangezogen. Da Anforderungen an Wärmenetze im Rahmen der Energiewende heute und auch zukünftig erfordern, dass Doppelrohre mit niedrigeren Temperaturen betrieben werden, sind deren Wärmeverluste jedoch für eine andere Mitteltemperatur zu bestimmen. Denkbar wäre z. B. die Verwendung einer Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmung λ_{40} .

Weiterhin ist neben den inhomogenen Eigenschaften sowie der temperaturabhängigen Wärmeleitfähigkeit des Dämmschaumes die Kontaktfläche des Rohrsystems mit dem umgebenden Erdreich zu beachten. Werden zwei Mediumrohre in einem Außenmantel als Doppelrohr zusammengefasst, wird diese Fläche im Vergleich zum Einzelrohr verringert. Der Wärmeübergang an das Erdreich wird somit verringert und die Wärmeverluste sinken. Bei der konkreten Berechnung des Wärmeverlustes sind dabei die Verlegetiefe, die

Wärmeleitfähigkeit des umgebenden Bodens und die Außentemperaturhistorie an der Geländeoberfläche zu berücksichtigen. /Bild 6/ verdeutlicht, dass in üblichen Verlegetiefen von Fernwärmeleitungen (ca. 0,8...1,5 m) die Bodentemperaturen saisonal stark veränderlich sind.

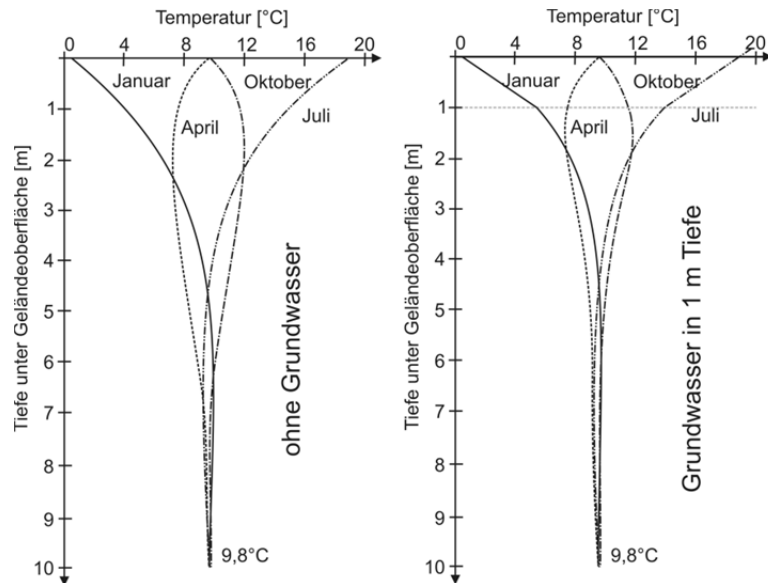


Bild 6 Bodentemperaturen in Abhängigkeit der Jahreszeit und der Tiefe unter Geländeoberkante nach Dahlem [16]

Abschließend hat die Wärmeleitfähigkeit des umgebenden Erdreiches einen wesentlichen Einfluss auf die sich im Rohr einstellende Temperaturverteilung im Rohrquerschnitt. /Bild 7/ zeigt die Bandbreite der Wärmeleitfähigkeit grobkörniger Böden. Der Wassergehalt und der Verdichtungsgrad bzw. die Trockendichte des Bodens stellen die beiden maßgebenden Einflussgrößen auf die Wärmeleitfähigkeit des Bodens dar. In erster Näherung nimmt die Wärmeleitfähigkeit mit abnehmendem Luftporenanteil des Bodens zu.

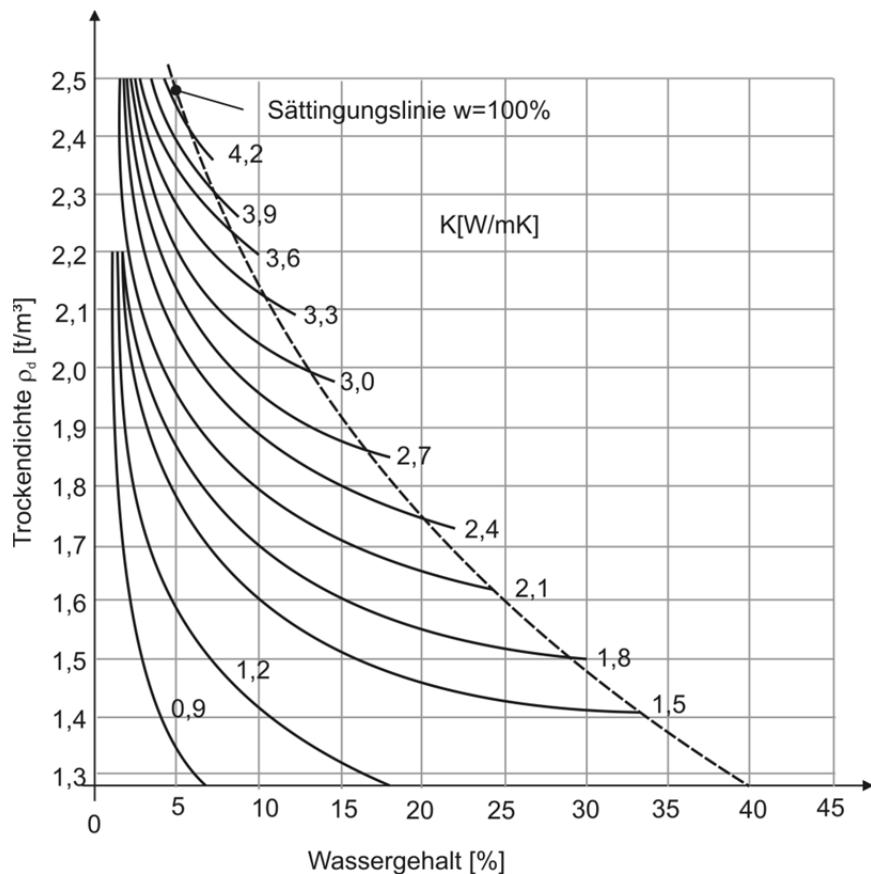


Bild 7 Wärmeleitfähigkeit von grobkörnigen Böden nach Jessberger [17]

Durch den nicht zylindersymmetrischen Aufbau der Doppelrohre und die daraus resultierende asymmetrische Temperaturverteilung entstehen komplexe Spannungsverhältnisse im Doppelrohrsystem.

Die axiale Scherfestigkeit von KMR-Doppelrohrsystemen wird nach EN 15698 [6] ermittelt, indem eine axiale Kraft auf ein Mediumrohr aufgebracht wird. Dabei wird der Probekörper auf dem Außenmantel aufgelagert. Die Randbedingungen für das Prüfverfahren stammen aus der EN 253 [1], die KMR-Einzelrohre beschreibt. Durch den Wegfall der Zylindersymmetrie in der Rohrachse ist davon auszugehen, dass sich wesentlich andere Spannungszustände im Doppelrohr-Probekörper einstellen als im Einzelrohrprobekörper. Weiterhin ist die Auflagerung des Außenmantels nicht vergleichbar mit den tatsächlichen Verlegebedingungen im Erdreich.

3.2 Arbeitshypothese

Die Arbeitshypothese wird wie folgt definiert: Durch die Entwicklung eines Verfahrens, mit dem die Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmung von Doppelrohrsystemen und der Wärmeverlust von Doppelrohrsystemen bei bestimmten Rohrgeometrien, Verlegebedingungen und Betriebsparametern mit einem für Wärmenetzplanung und Qualitätssicherung vertretbaren Aufwand messtechnisch bestimmt werden können, werden durch diese zusätzlichen Möglichkeiten für Wärmenetzplanung und Qualitätssicherung Vorbehalte gegenüber dem Einsatz von Doppelrohrsystemen abgebaut. Weiterhin trägt die Absicherung der Rohrstatik zum Abbau von Vorbehalten gegenüber dem Einsatz von Doppelrohrsystemen bei. Weitere Potentiale für den wirtschaftlichen Fernwärmeausbau, der im Rahmen der Energiewende erforderlich ist, werden erschlossen.

4. Lösungsweg

4.1 Bearbeitungsschritte

Doppelrohre werden in einem mathematischen Modell abgebildet. Dieses mathematische Modell wird durch numerische Untersuchungen mit der Finiten Elemente Methode (FEM), Technikumsversuche und Feldmessungen überprüft und ggf. angepasst. Diese iterative Vorgehensweise soll letztlich zu einem möglichst einfachen mathematischen Modell einerseits und einem minimierten messtechnischen Aufwand für die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmung und der Wärmeverluste andererseits führen.

Das in der EN ISO 8497 [14] beschriebene Verfahren mit Schutzheizungen, mit dem eine zylindersymmetrische Anordnung unendlicher Länge simuliert wird, wird auf Doppelrohre übertragen, um Doppelrohre unendlicher Länge zu simulieren. Durch diesen Versuchsaufbau erfolgt der Wärmeübergang ausschließlich in radialer Richtung, also nur noch zweidimensional, wodurch sich bereits eine Vereinfachung des mathematischen Modells ergibt.

In einem letzten Schritt werden die Ergebnisse aus den Berechnungen und den Technikumsversuchen in zwei Feldversuchen unter praxisrelevanten Bedingungen überprüft.

4.1.1 Entwicklung eines Berechnungsmodells

Sowohl für die Wärmeverluste als auch für die Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmung wird basierend auf Gleichungen für Einzelrohre ein analytisches halbempirisches Berechnungsmodell entwickelt. Vorhandene Gleichungen werden entsprechend weiterentwickelt und z. B. durch Geometriefaktoren ergänzt. Die Wärmeverluste von Doppelrohren werden somit im ersten Schritt in einem technisch physikalischen Modell erfasst. Das Berechnungsmodell wird über die Laufzeit des Projektes iterativ durch numerische Berechnungen und Messungen verbessert.

Insbesondere werden für Rohrsysteme mit polymeren Mediumrohren Laborversuchsergebnisse eines Herstellers zur Verfügung gestellt, die der Kalibration und weiteren Verbesserung des Berechnungsmodells dienen. Hierzu wird durch den Hersteller eine spezielle Versuchsreihe mit einem Messaufbau für Einzelrohre durchgeführt, die eine

statistisch abgesicherte Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit des Dämmmaterials Polyurethanschaum liefert. Da der gleiche Schaum auch in den zu prüfenden Doppelrohren verwendet wird, liefern die Untersuchungen eine wichtige Datengrundlage für das Projekt.

4.1.2 Untersuchung rohrinterner Temperaturfelder und resultierender Spannungsverhältnisse in Dämmung und Boden

Es werden zweidimensionale Modelle entwickelt, mit denen stationäre Temperaturfelder unter Berücksichtigung der o.g. Einflussgrößen numerisch ermittelt werden. Dabei werden Messungen im Graben dazu verwendet, Modelle exemplarisch zu kalibrieren und aktuelle Mitteltemperaturen in Doppelrohren zu ermitteln. Durch Parametervariationen sollen die Einflüsse aus Rohrquerschnittsgeometrie, Bodentemperatur, Außentemperaturhistorie an der Oberfläche, Verlegetiefe und Eigenschaften des Bettungsmaterials für unterschiedliche Betriebszustände untersucht und quantifiziert werden.

Weiterhin werden die Scher- und Normalspannungsverteilungen in Doppelrohren unter Betriebsbedingungen untersucht. Hierzu ist wie oben beschrieben geplant, das Doppelrohr zwei- und dreidimensional mit der Finite-Elemente-Methode abzubilden. Zunächst werden Modelle für unterschiedliche Rohrdimensionen mit Prüfergebnissen nach EN 15698 [6] kalibriert. Auf diese Weise können die Spannungszustände im Rohr unter den Prüfbedingungen bereits sichtbar gemacht werden und die Sicherheitsreserven zwischen der Prüfung im Labor und dem praktischen Betriebszustand bewertet werden. Im Anschluss wird in erweiterten Modellen die Interaktion mit dem Bettungsmaterial bei temperaturbedingter radialer Aufweitung berücksichtigt.

4.1.3 Konzeptionelle Entwicklung der Technikumsversuche

Ein Vorversuchsaufbau zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmung von Doppelrohren wird entwickelt und entsprechende Messungen werden mit diesem Versuchsaufbau durchgeführt. Diese Messungen werden in einer Klimakammer durchgeführt, in der die Bedingungen entsprechend EN ISO 8497 [14] eingestellt werden. Dadurch ist eine Vergleichbarkeit zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmung von Einzelrohren gegeben. Die erforderlichen Messgrößen werden auf Basis des FEM-Berechnungsmodells festgelegt und konzeptionell erfasst. Durch Vergleich

der Ergebnisse aus Berechnungen und Messungen werden der Versuchsaufbau zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmung von Doppelrohren sowie die Berechnungen zur messwertbasierten Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit optimiert. Ein erster Entwurf des Versuchsaufbaus ist in /Bild 8/ und /Bild 9/ dargestellt.

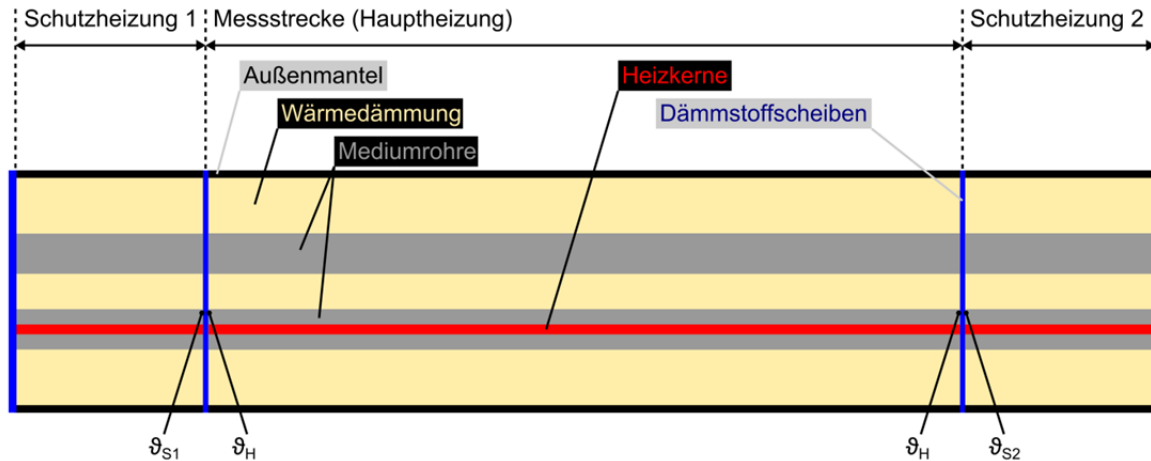


Bild 8 Entwurf des Messaufbaus im Längsschnitt (Klimakammer, Graben)

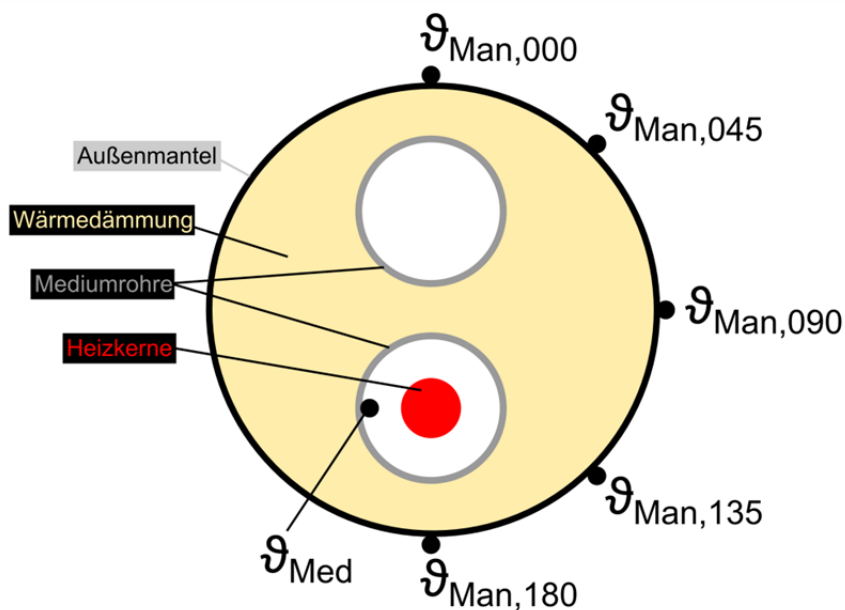


Bild 9 Entwurf des Messaufbaus im Querschnitt in der Klimakammer

4.1.4 Konzeptionelle Entwicklung der Messungen im Graben

Für zwei Messstellen werden ein Messkonzept und ein Konzept für die Auswertung der Messdaten erarbeitet. Dabei stehen Temperaturmessungen an den Mediumrohren und am Außenmantel des Rohres im Vordergrund. Darüber hinaus sind auch Temperaturmessungen im Bettungsmaterial geplant. Der Entwurf für einen Messquerschnitt im Graben ist in /Bild 10/ dargestellt.

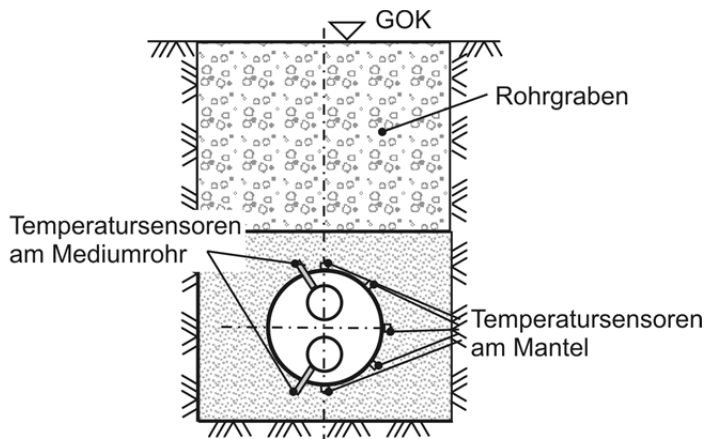


Bild 10 Entwurf des Messaufbaus im Querschnitt im Graben

5. Technikumsversuche

5.1 Messungen in der Klimakammer

5.1.1 Messaufbau

Die Entwicklung der Messapparatur erfolgt ausgehend von der in EN ISO 8497 [14] für zylindersymmetrische Rohre beschriebenen Messapparatur mit Schutzheizungen.

Nachfolgend ist der Messaufbau in axialer Richtung (Längsschnitt) in /Bild 11/ und radialer Richtung (Querschnitt) in /Bild 12/ dargestellt.

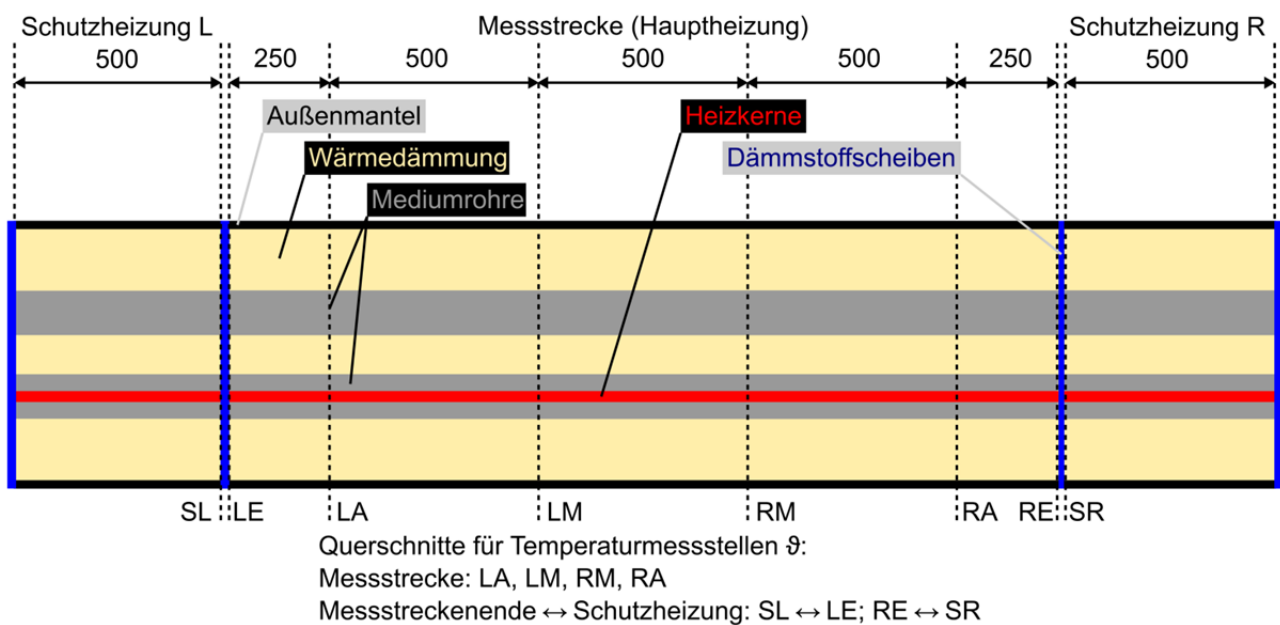


Bild 11 Messaufbau in axialer Richtung

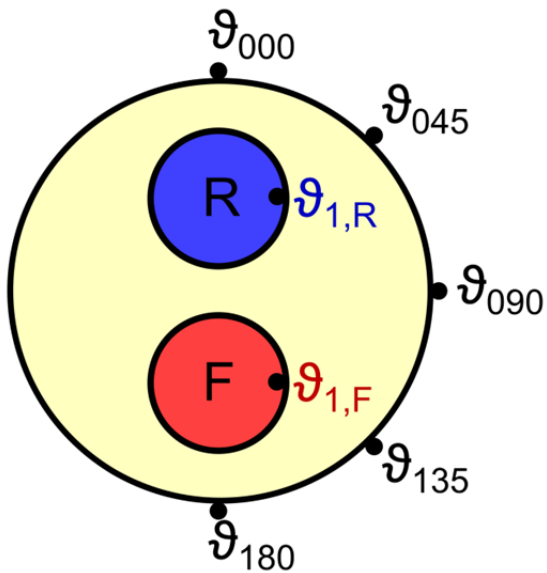


Bild 12 Messaufbau in radialer Richtung; ϑ = Temperaturmessstelle,
F = Vorlauf (engl.: flow line), R = Rücklauf (engl.: return line)

/Bild 13/ zeigt die Messapparatur im Einsatz in der Klimakammer. /Bild 14/ zeigt die Applikation der Temperatursensoren auf dem Außenmantel an einem Querschnitt.

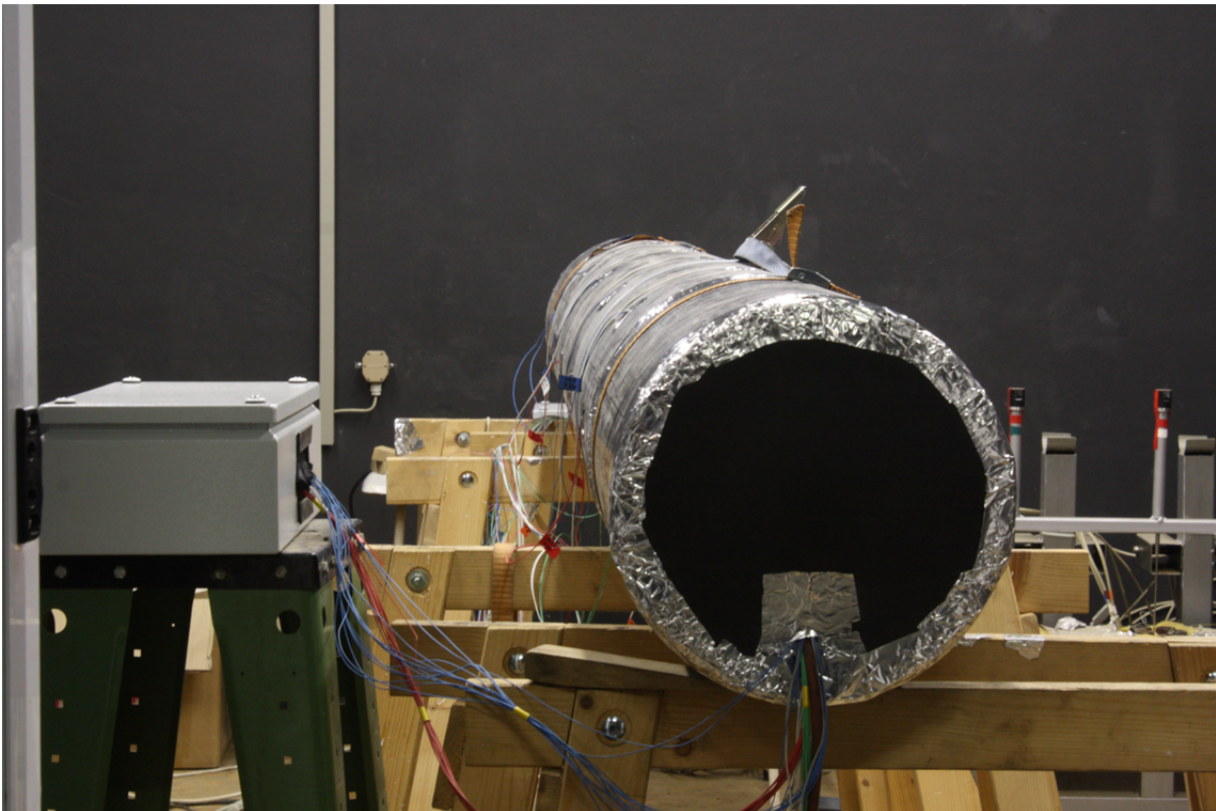


Bild 13 Messapparatur, Messung an einem Verbunddoppelrohr nach EN 15698-1 der Dimension DN 100+DN 100/315

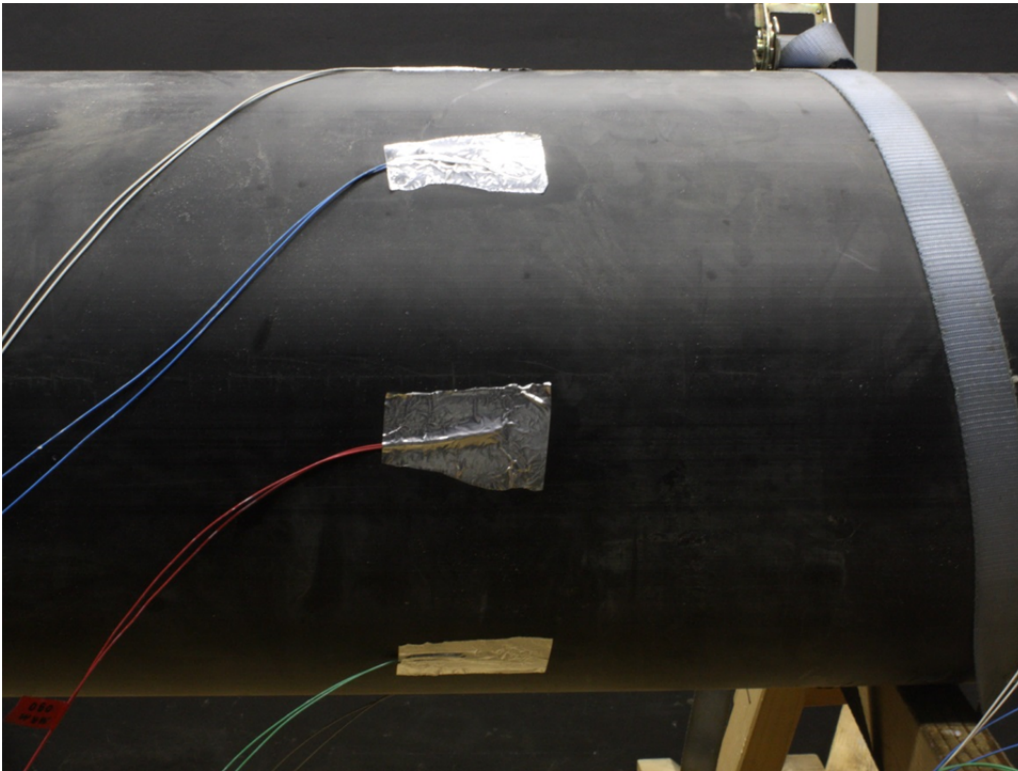


Bild 14 Messapparatur, Messung an einem Verbunddoppelrohr nach EN 15698-1 der Dimension DN 100+DN 100/315, Temperaturmessstellen auf dem Außenmantel

Mit den Schutzheizungen werden axiale Wärmeströme an den Enden der Messstrecke kompensiert, womit ein „Rohr unendlicher Länge“ simuliert wird. Dadurch entfällt eine Raumdimension für den Wärmestrom, da kein Wärmestrom in axialer Richtung fließt. Die einzelnen Messpunkte werden jeweils im thermisch stationären Zustand aufgenommen. Dadurch entfällt die Dimension Zeit. Diese Messbedingungen führen bei einem Einzelrohr bereits zu einem eindimensionalen Wärmestrom, der in radialer Richtung fließt, da bei Einzelrohren durch die Zylindersymmetrie für den Wärmestrom eine weitere Raumdimension entfällt. Bei Doppelrohren bleiben unter diesen Messbedingungen aufgrund der komplexeren Geometrie zwei Raumdimensionen für den Wärmestrom, der in radialer und tangentialer Richtung fließt, erhalten.

Die Beheizung erfolgt elektrisch mit Gleichstrom. Damit entspricht der Wärmestrom der in der Hauptheizung /Bild 11/ umgesetzten elektrischen Leistung. Beheizt wird nur das untere, in 6-Uhr-Position liegende Mediumrohr. Durch die Beheizung nur eines Mediumrohres ist das Anfahren der Messpunkte unkritisch. Der Messaufbau bleibt überschaubar. Die Beheizung beider Mediumrohre brächte messtechnisch keinen Vorteil.

Der Messaufbau wäre aufwendiger. Vor allem aber wäre das Anfahren der Messpunkte sehr problematisch, da eine Änderung der Leistungszufuhr für eine Heizung zur Einstellung einer Temperatur an der Innenwand des Mediumrohres, in dem sich diese Heizung befindet, auch zu einer Temperaturänderung an der Innenwand des anderen Mediumrohres führt. Dieses Problem kann regelungstechnisch nicht gelöst werden, da dabei die elektrische Leistung die Stellgröße wäre und somit ständigen Schwankungen unterläge, um den Istwert „Temperatur an der Mediumrohrinnenwand“ konstant zu halten. Die Aufnahme eines Messpunktes erfolgt im statischen, thermisch eingeschwungenen Zustand, der eine konstante elektrische Leistung impliziert.

5.1.2 Durchführung der Messungen

Insgesamt werden 27 Messungen durchgeführt. In der nachfolgenden /Tabelle 2/ sind die Doppelrohrtypen und Dimensionen aufgeführt, wobei Doppelrohre mit unterschiedlichen Dämmstärken (Dämmserie 1 = Standard; Dämmserie 2 = einfach verstärkt; Dämmserie 3 = zweifach verstärkt) bei gleicher Nennweite der Mediumrohre zu einer Dimension zusammengefasst sind. Aus jeder Rohrstange, wobei auch die flexiblen Verbundrohre als Stangenware vorliegen, wird ein Probekörper aus der Mitte entnommen.

Doppelrohrtyp	Dimension 1	Dimension 2	Dimension 3
KMR; <i>Hersteller 1</i>	DN 20+DN 20/125	DN 50+DN 50/200 DN 50+DN 50/225 DN 50+DN 50/250	DN 100+DN 100/315
KMR; <i>Hersteller 2</i>	DN 20+DN 20/125	DN 50+DN 50/200	DN 100+DN 100/315
flexibles Verbundrohr mit Mediumrohren aus Kupfer	28×1,2+28×1,2/110		
flexibles Verbundrohr mit Mediumrohren aus gewelltem rostfreiem Stahl	30×0,3+30×0,3/126		
flexibles Verbundrohr mit Mediumrohren aus Mehrschichtverbund	26×3,0+26×3,0/110		
flexibles Verbundrohr mit Mediumrohren aus vernetztem Polyethylen; <i>Schaumsystem 1</i>	25×2,3+25×2,3/91	63×5,8+63×5,8/182	
flexibles Verbundrohr mit Mediumrohren aus vernetztem Polyethylen; <i>Schaumsystem 2</i>	25×2,3+25×2,3/91 25×2,3+25×2,3/111 25×2,3+25×2,3/126		

Tabelle 2 in der Klimakammer gemessene Doppelrohre

Die nachfolgenden Bilder /Bild 15/, /Bild 16/, /Bild 17/, /Bild 18/, /Bild 19/ und /Bild 20/ zeigen die Stirnseiten im Lieferzustand einiger der in der Klimakammer gemessenen Doppelrohre.



Bild 15 KMR, Hersteller 1; v. l. n. r. DN 20+DN 20/125; DN 50+DN 50/200;
DN 50+DN 50/225; DN 50+DN 50/250; DN 100+DN 100/315

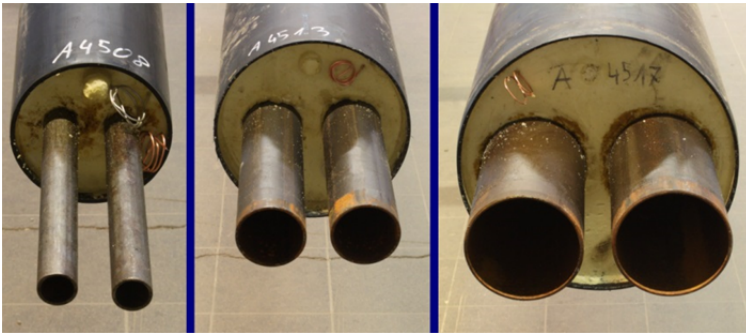


Bild 16 KMR, Hersteller 2; v. l. n. r. DN 20+DN 20/125; DN 50+DN 50/200;
DN 100+DN 100/315



Bild 17 flexibles Verbundrohr mit Mediumrohren aus Kupfer;
28×1,2+28×1,2/110



Bild 18 flexibles Verbundrohr mit Mediumrohren aus gewelltem rostfreiem Stahl;
30×0,3+30×0,3/126



Bild 19 flexibles Verbundrohr mit Mediumrohren aus Mehrschichtverbund;
26×3,0+26×3,0/110

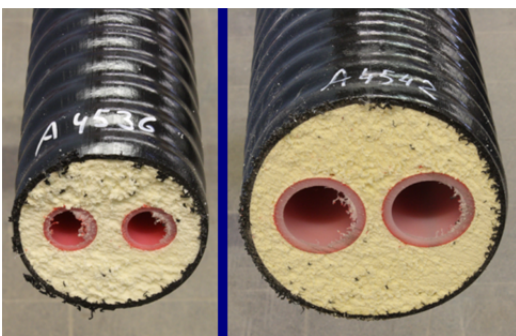


Bild 20 flexibles Verbundrohr mit Mediumrohren aus vernetztem Polyethylen,
Schaumsystem 1; v. l. n. r. 25×2,3+25×2,3/91; 63×5,8+63×5,8/182

5.1.3 Messwerte

Nachfolgend sind die aus den 27 Messungen erhaltenen Messwerte dargestellt. Diese Messwerte dienen der Rekalibrierung des FEM-Models.

In den nachfolgenden Diagrammen bedeuten:

$\vartheta_{1,F}$ = Temperatur der inneren Oberfläche des Vorlaufmediumrohres

ϑ_{xxx} = Temperatur der äußeren Oberfläche des Außenmantels, Position xxx° mit
 $xxx = \{000; 045; 090; 135; 180\}$, Positionen siehe /Bild 12/

ϑ_{amb} = Umgebungstemperatur

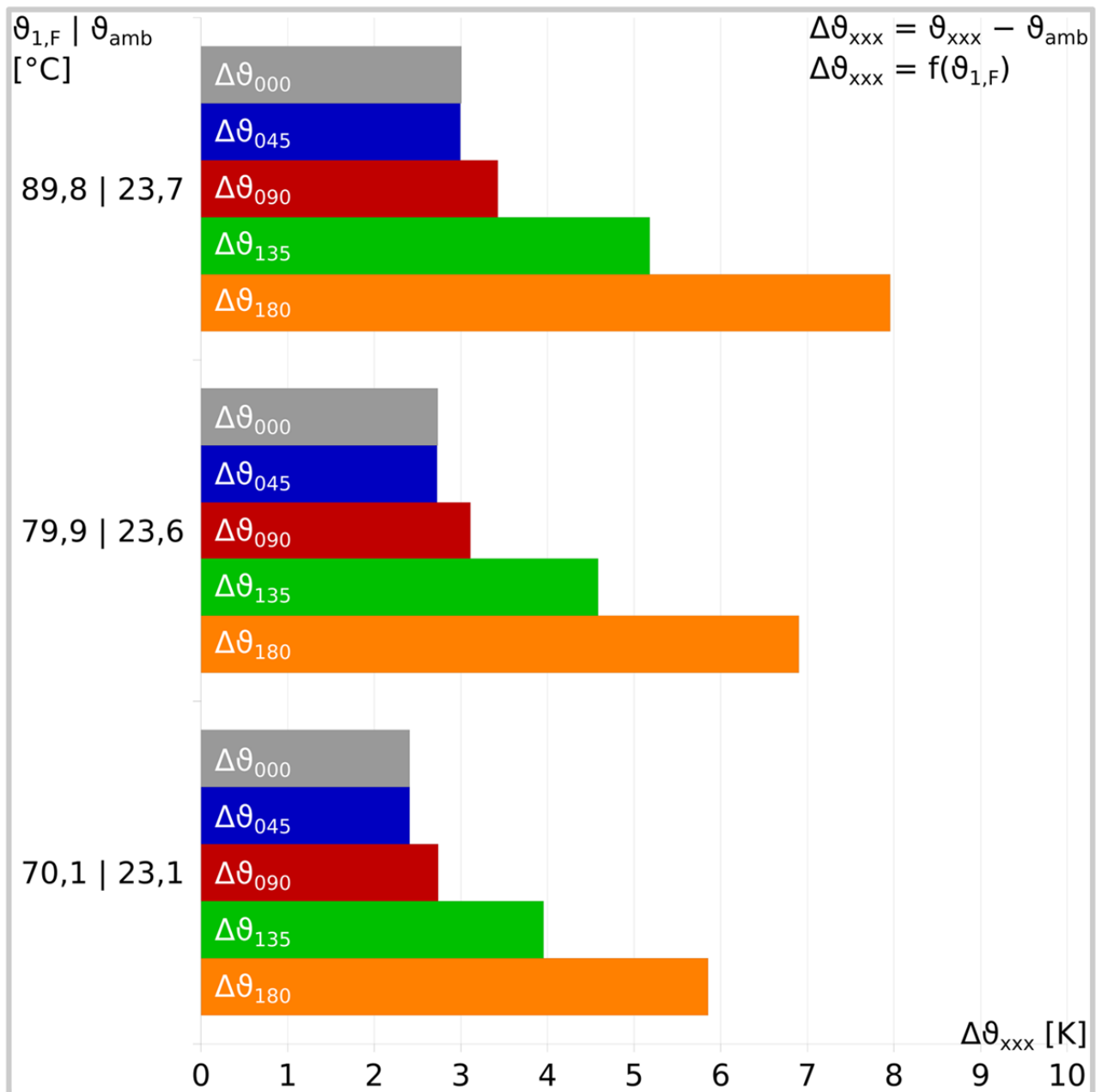


Bild 21 KMR; DN 20+DN 20/125; Dämmserie 1; *Hersteller 1*

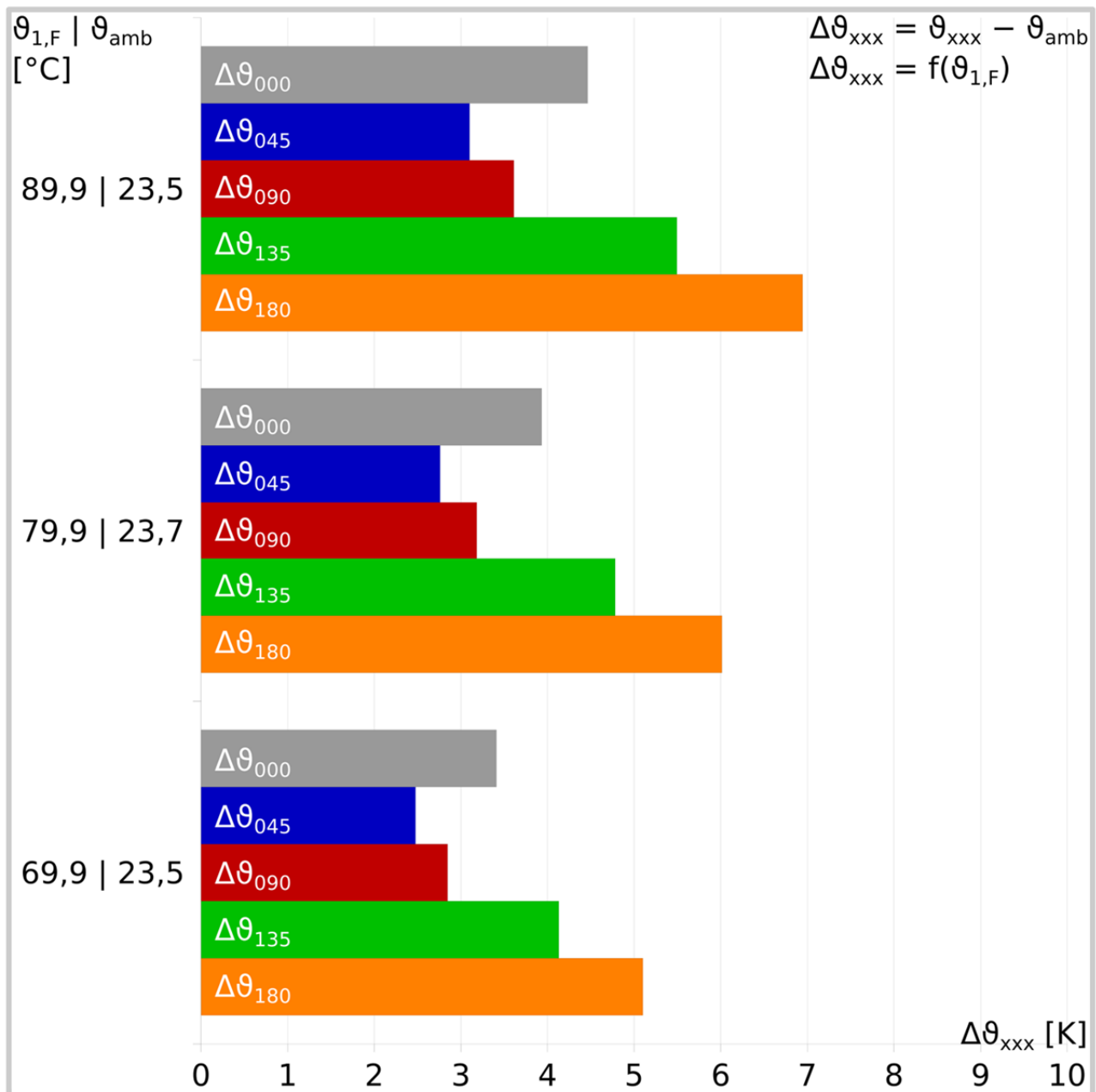


Bild 22 KMR; DN 20+DN 20/125; Dämmserie 1; *Hersteller 1*

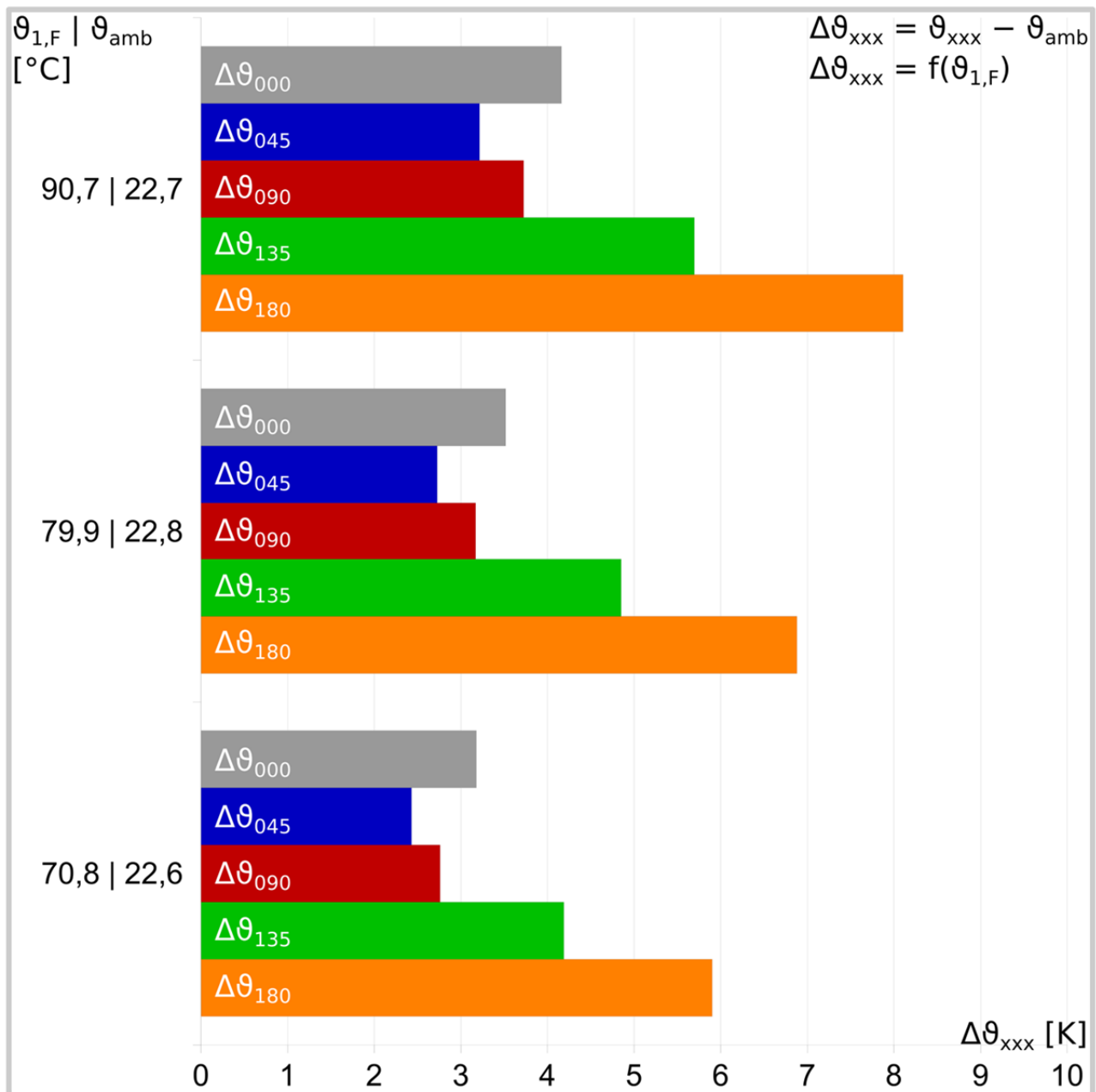


Bild 23 KMR; DN 50+DN 50/200; Dämmserie 1; *Hersteller 1*

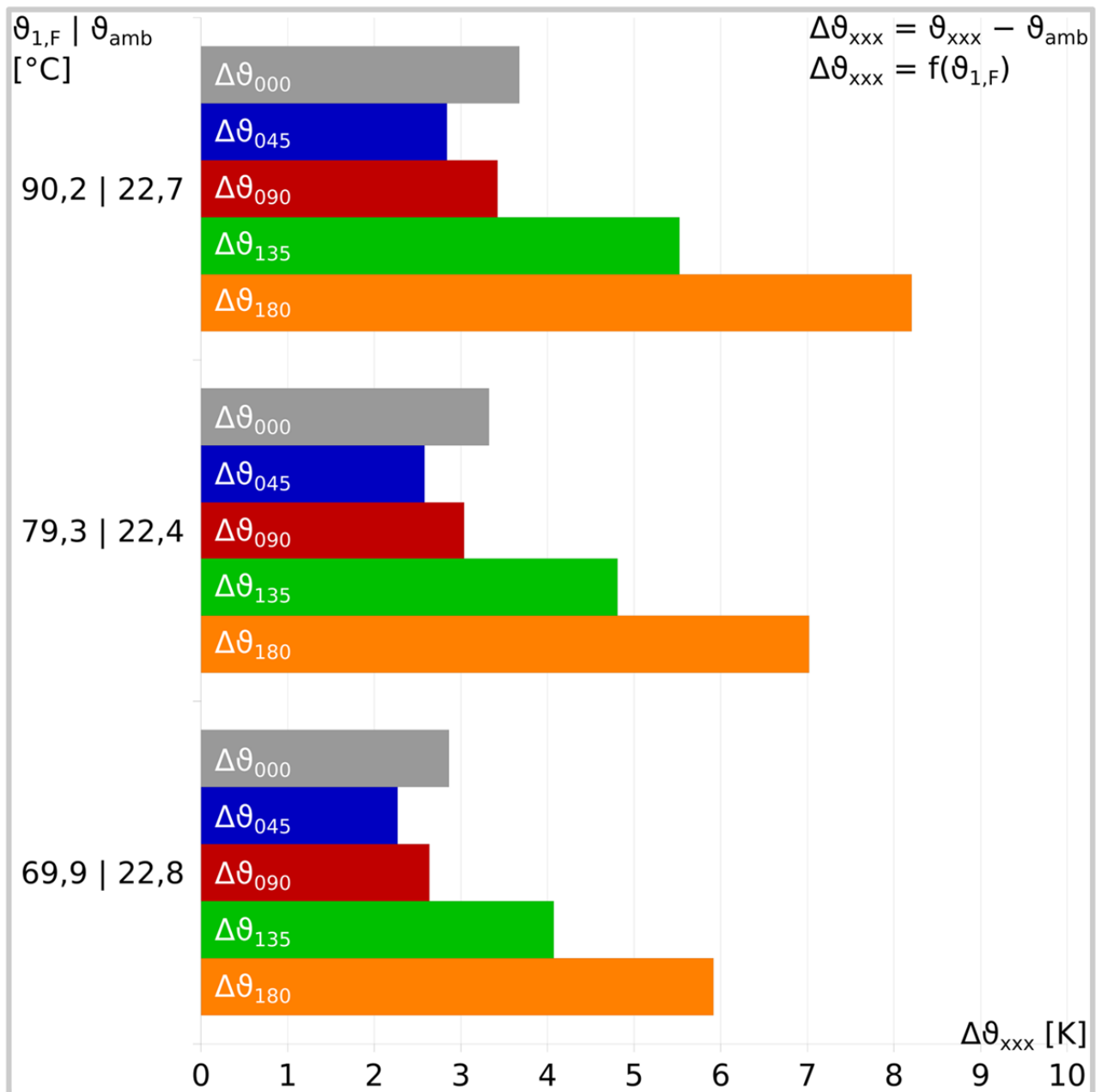


Bild 24 KMR; DN 50+DN 50/200; Dämmserie 1; *Hersteller 1*

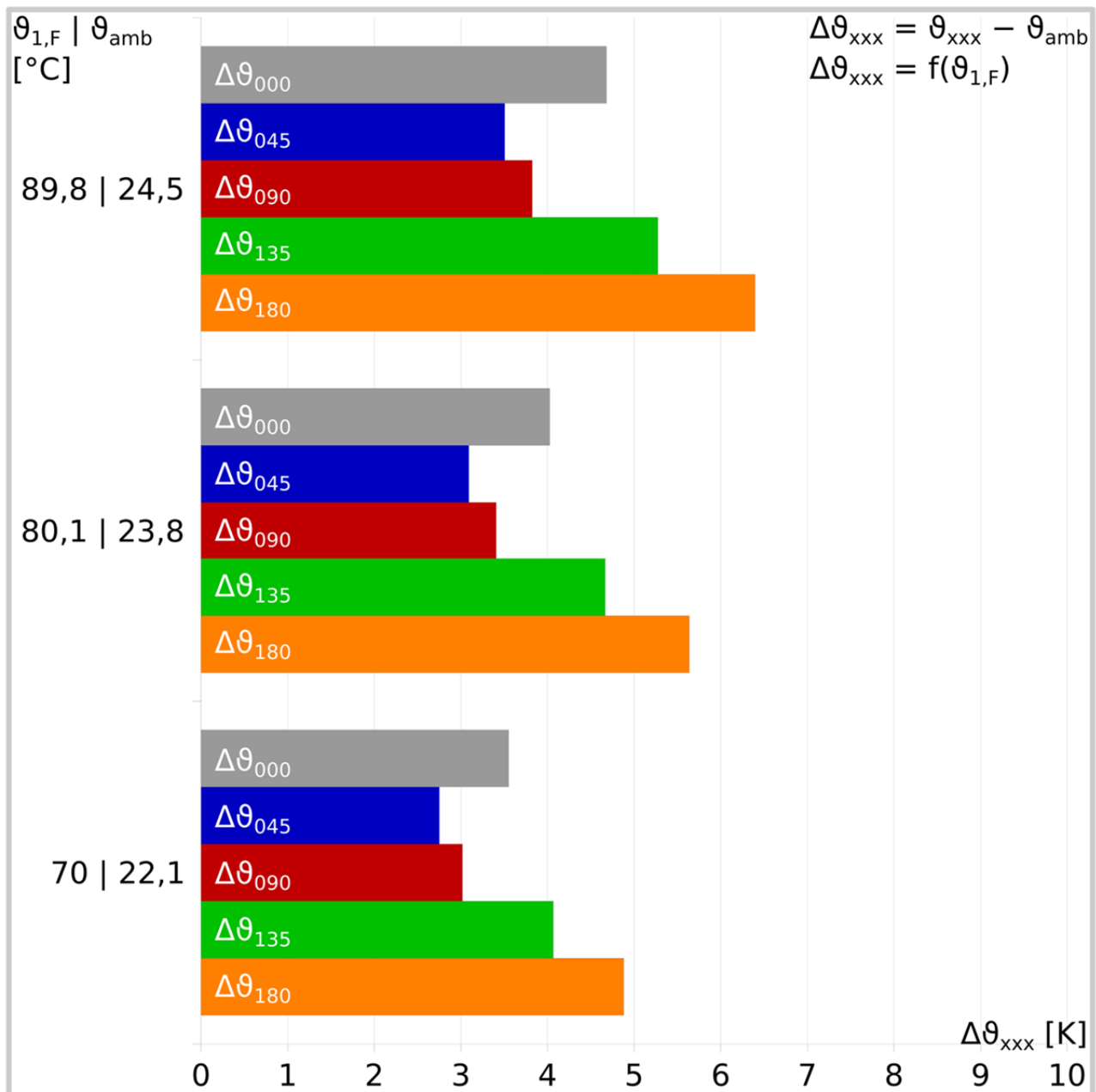


Bild 25 KMR; DN 50+DN 50/225; Dämmserie 2; *Hersteller 1*

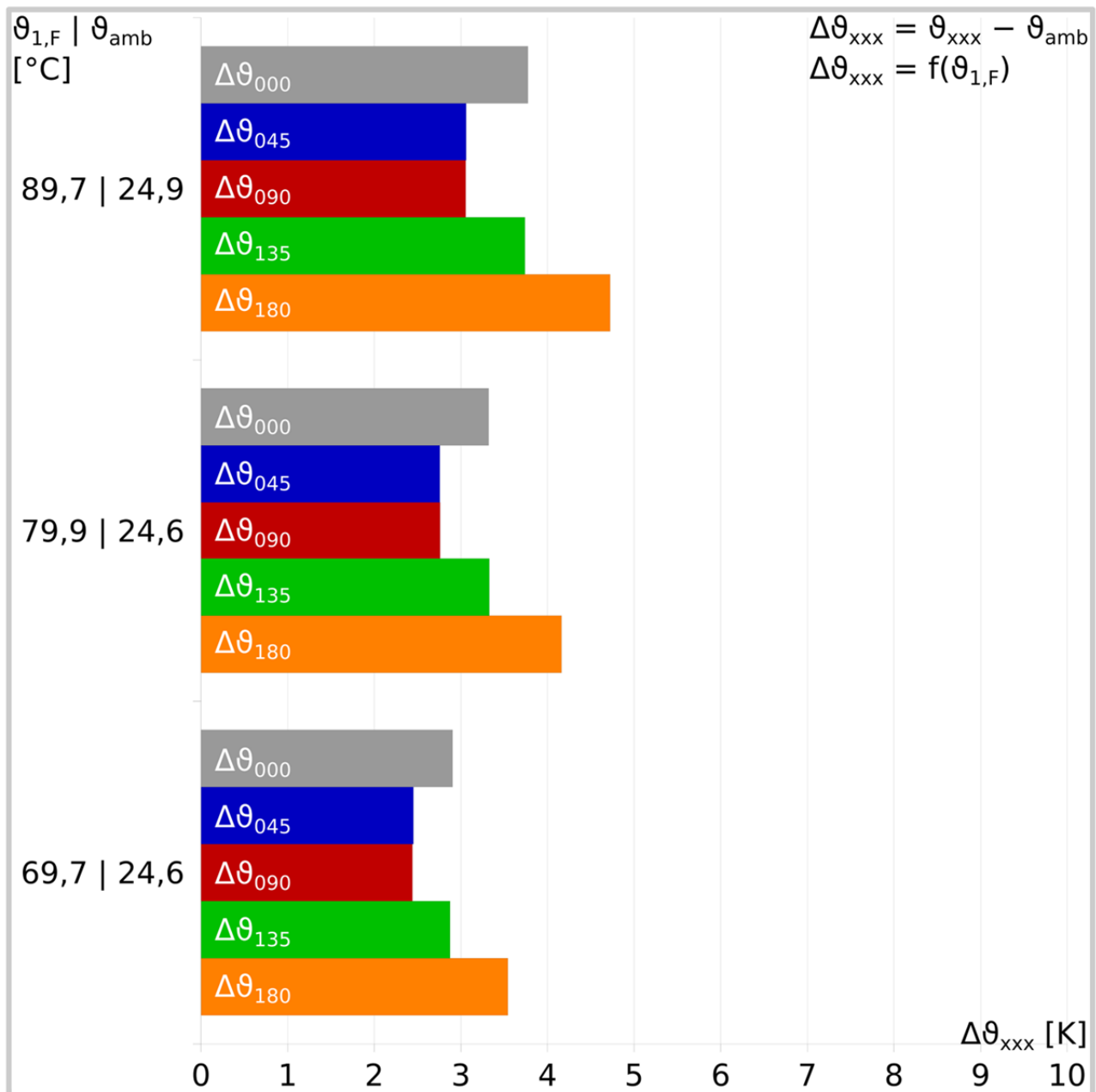


Bild 26 KMR; DN 50+DN 50/250; Dämmserie 3; *Hersteller 1*

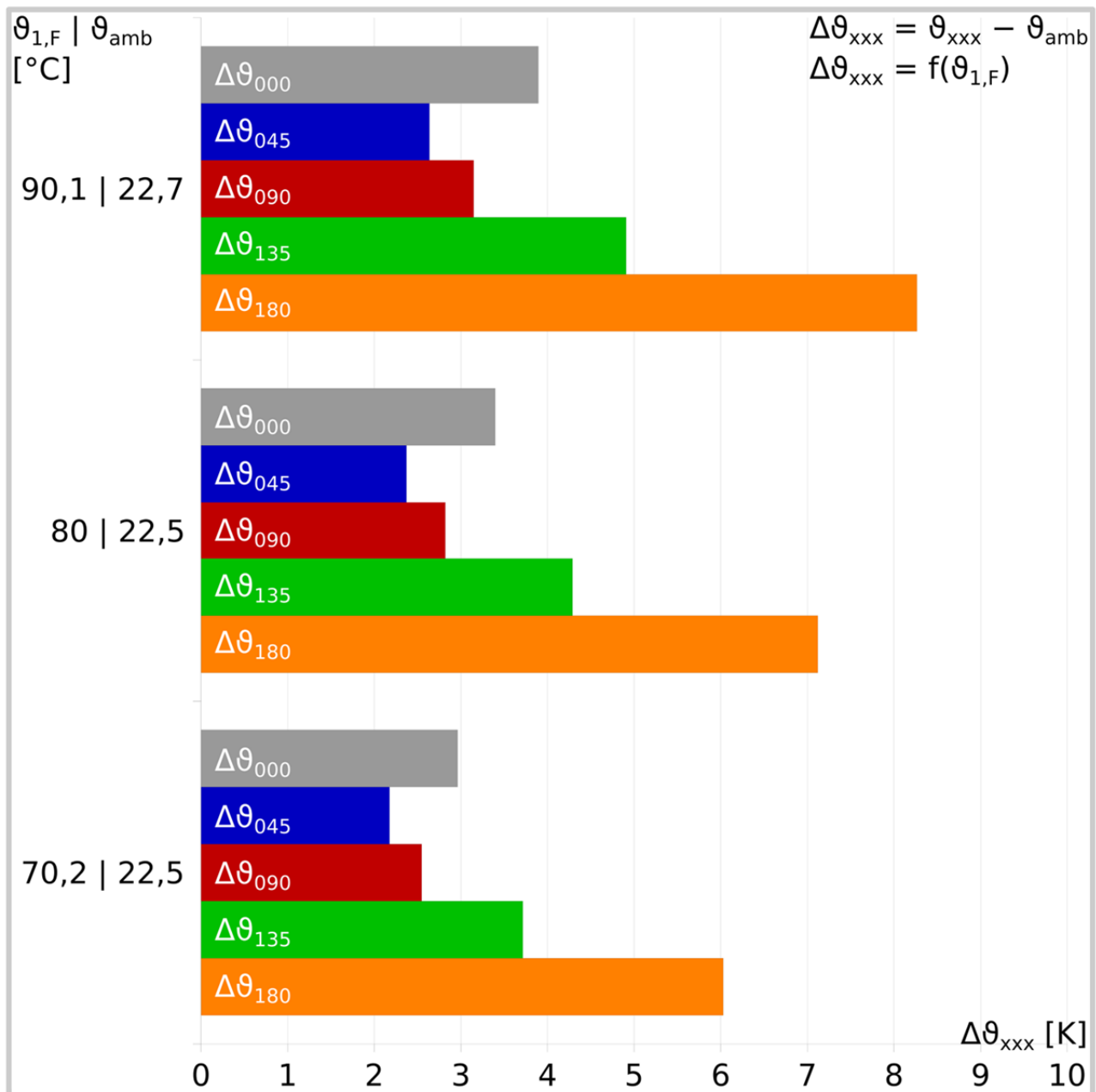


Bild 27 KMR; DN 100+DN 100/315; Dämmserie 1; *Hersteller 1*

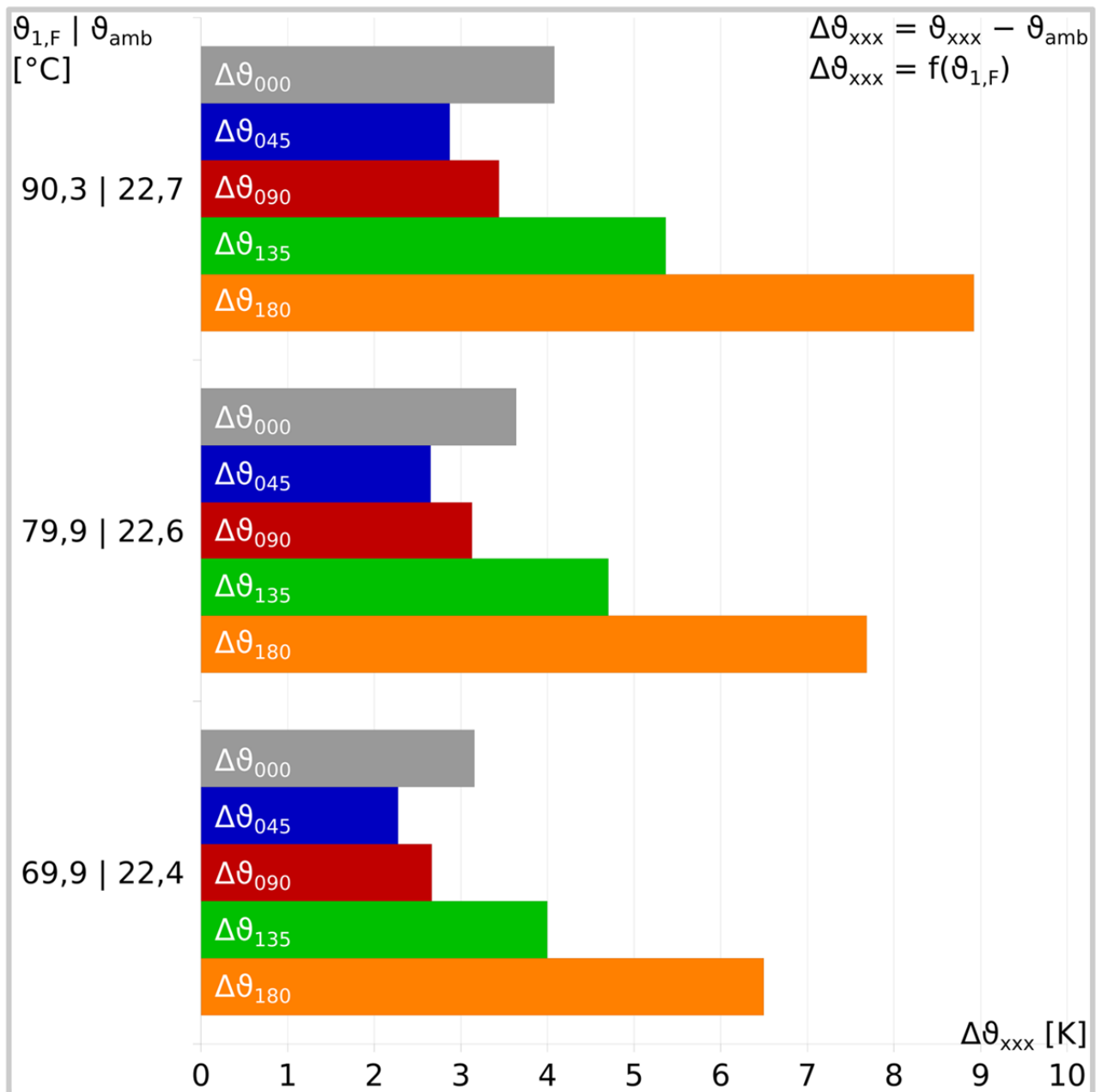


Bild 28 KMR; DN 100+DN 100/315; Dämmserie 1; *Hersteller 1*

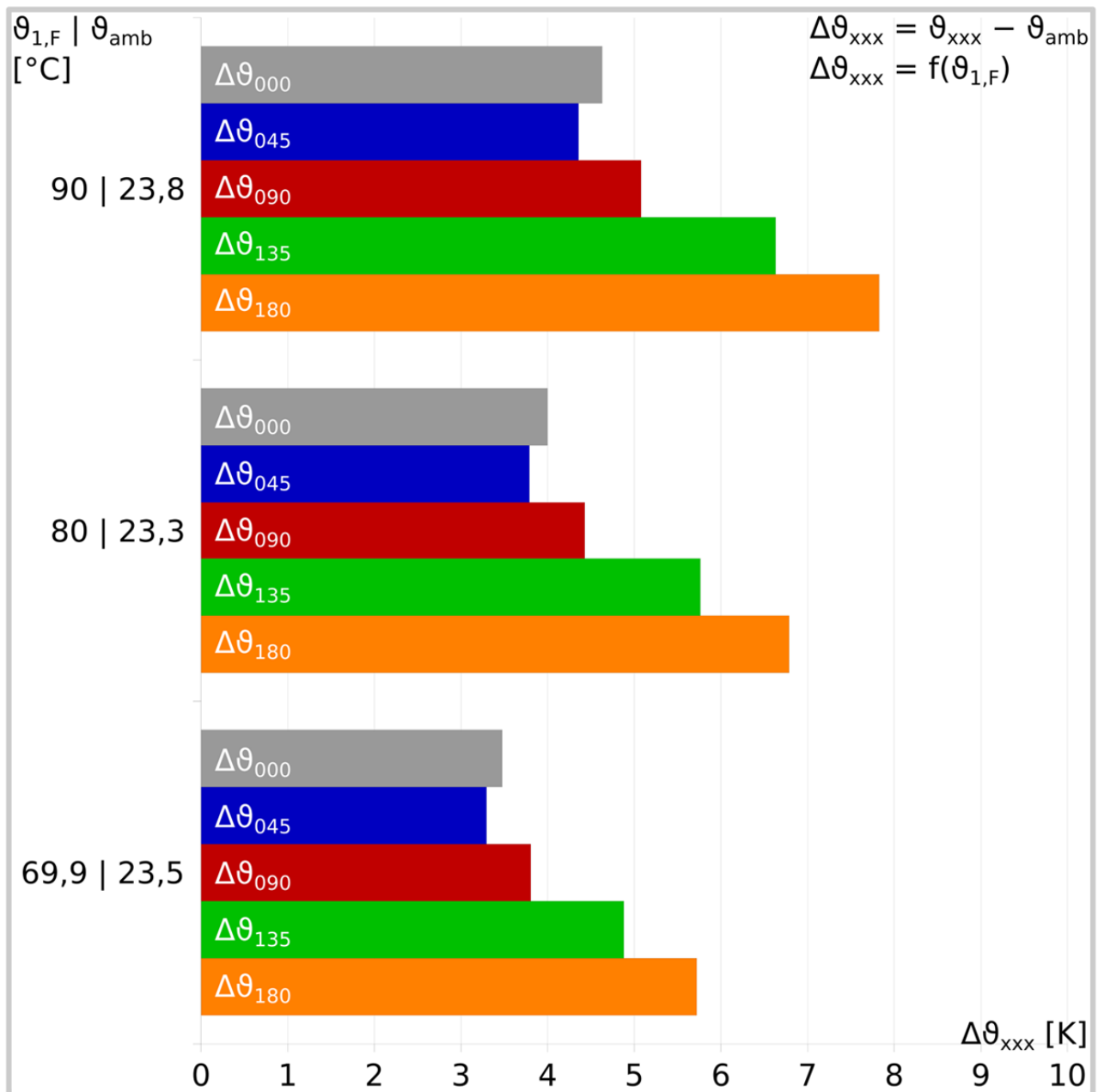


Bild 29 KMR; DN 20+DN 20/125; Dämmserie 1; *Hersteller 2*

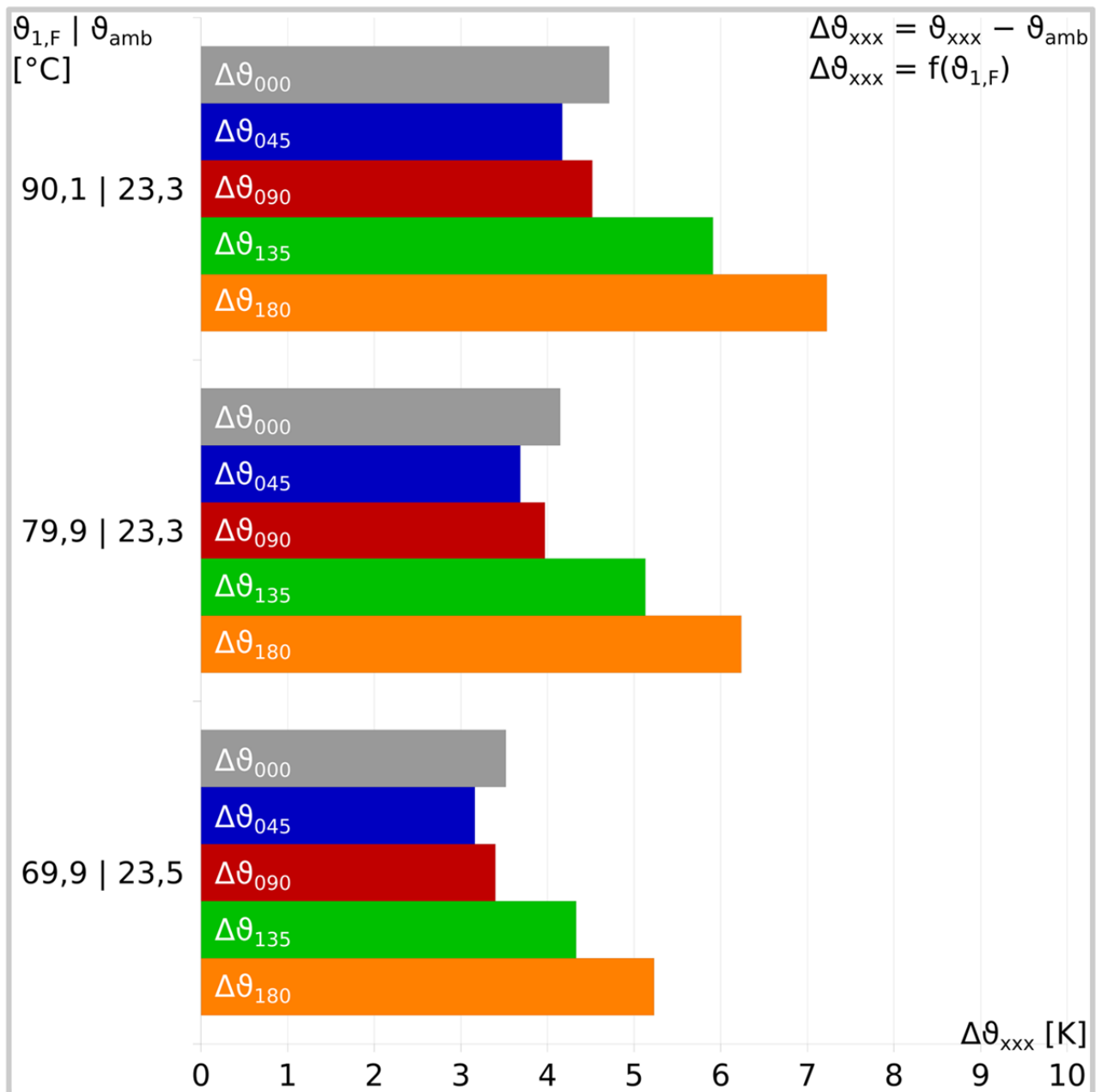


Bild 30 KMR; DN 20+DN 20/125; Dämmserie 1; *Hersteller 2*

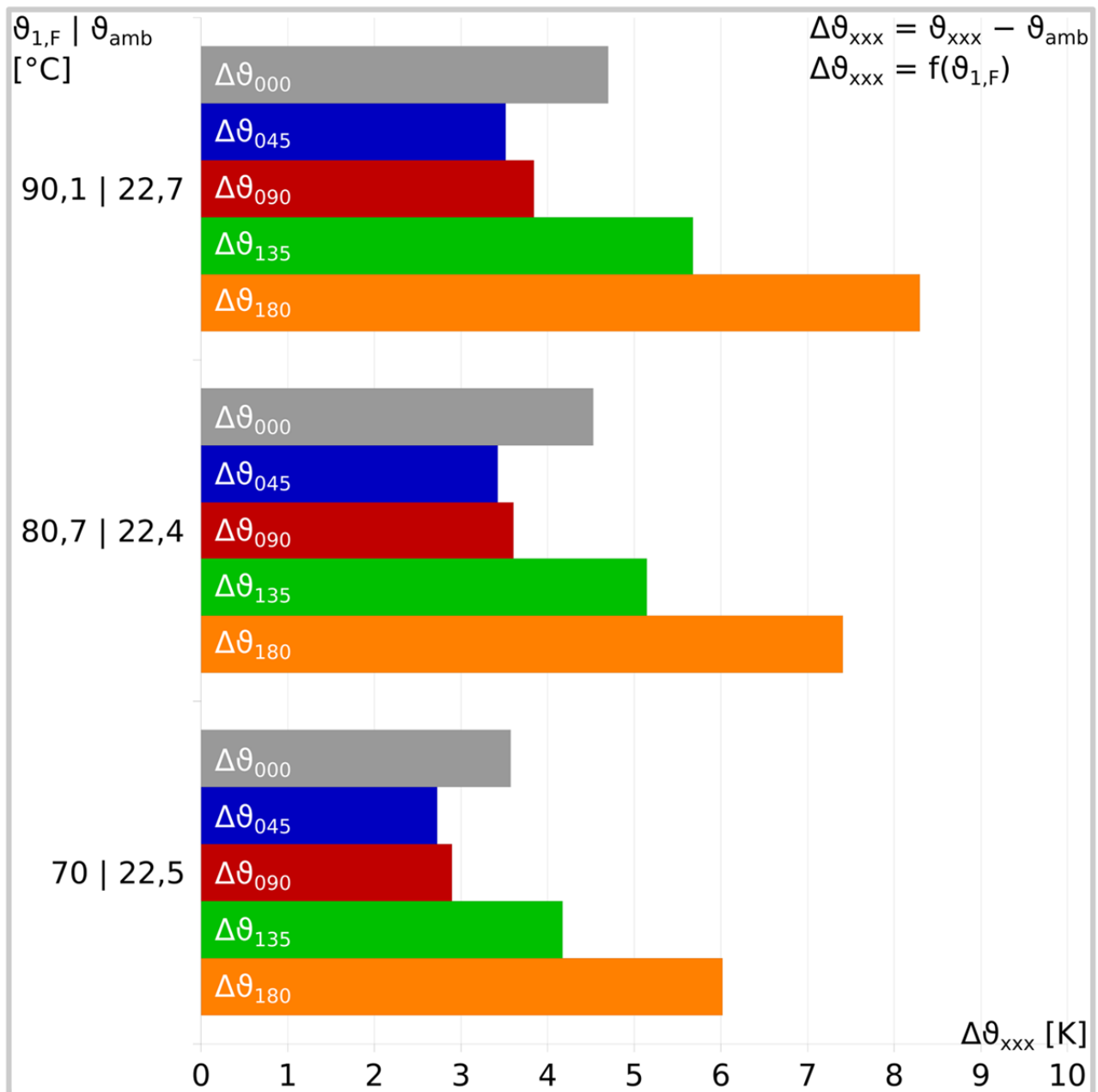


Bild 31 KMR; DN 50+DN 50/200; Dämmserie 1; *Hersteller 2*

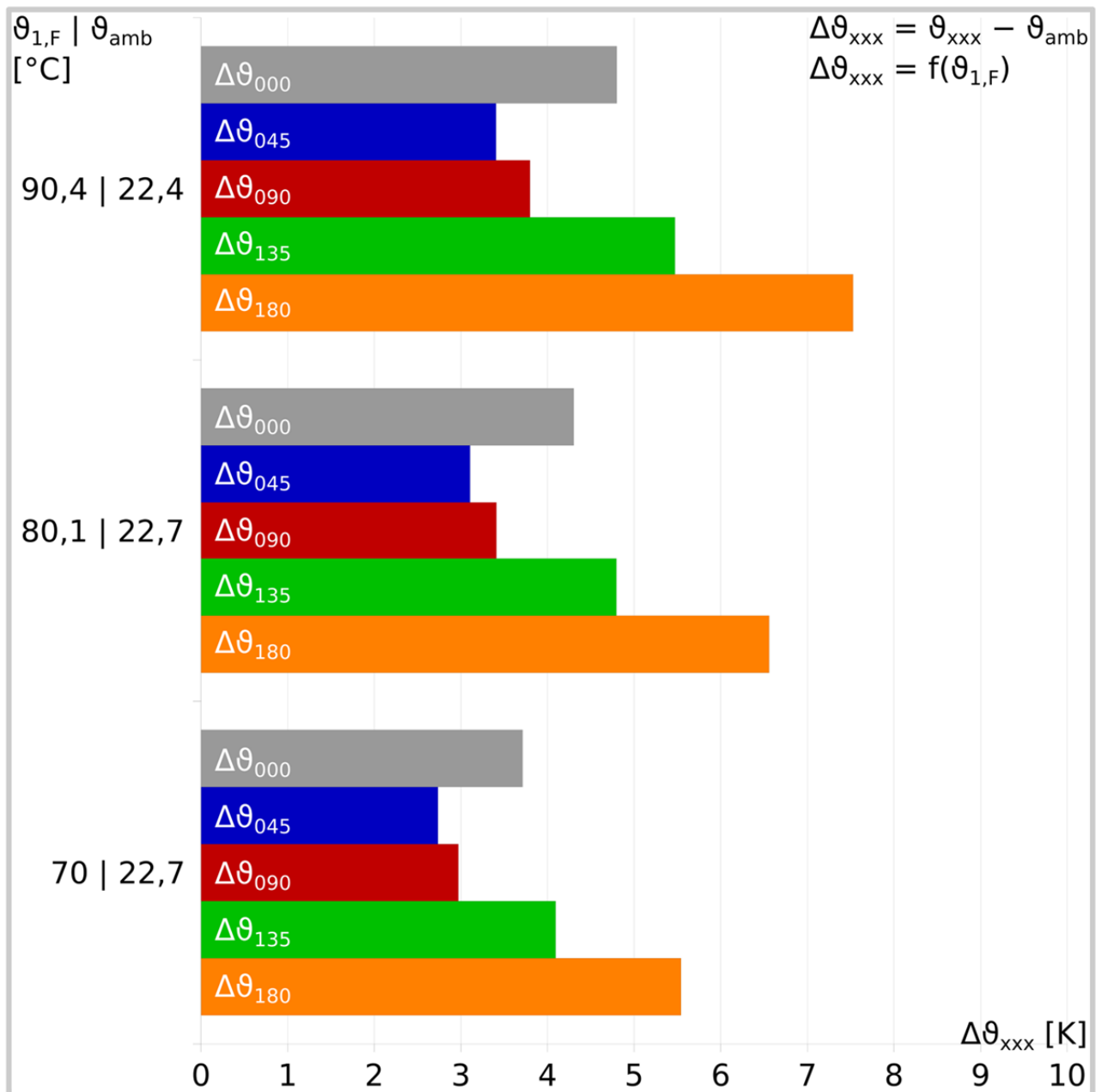


Bild 32 KMR; DN 50+DN 50/200; Dämmserie 1; *Hersteller 2*

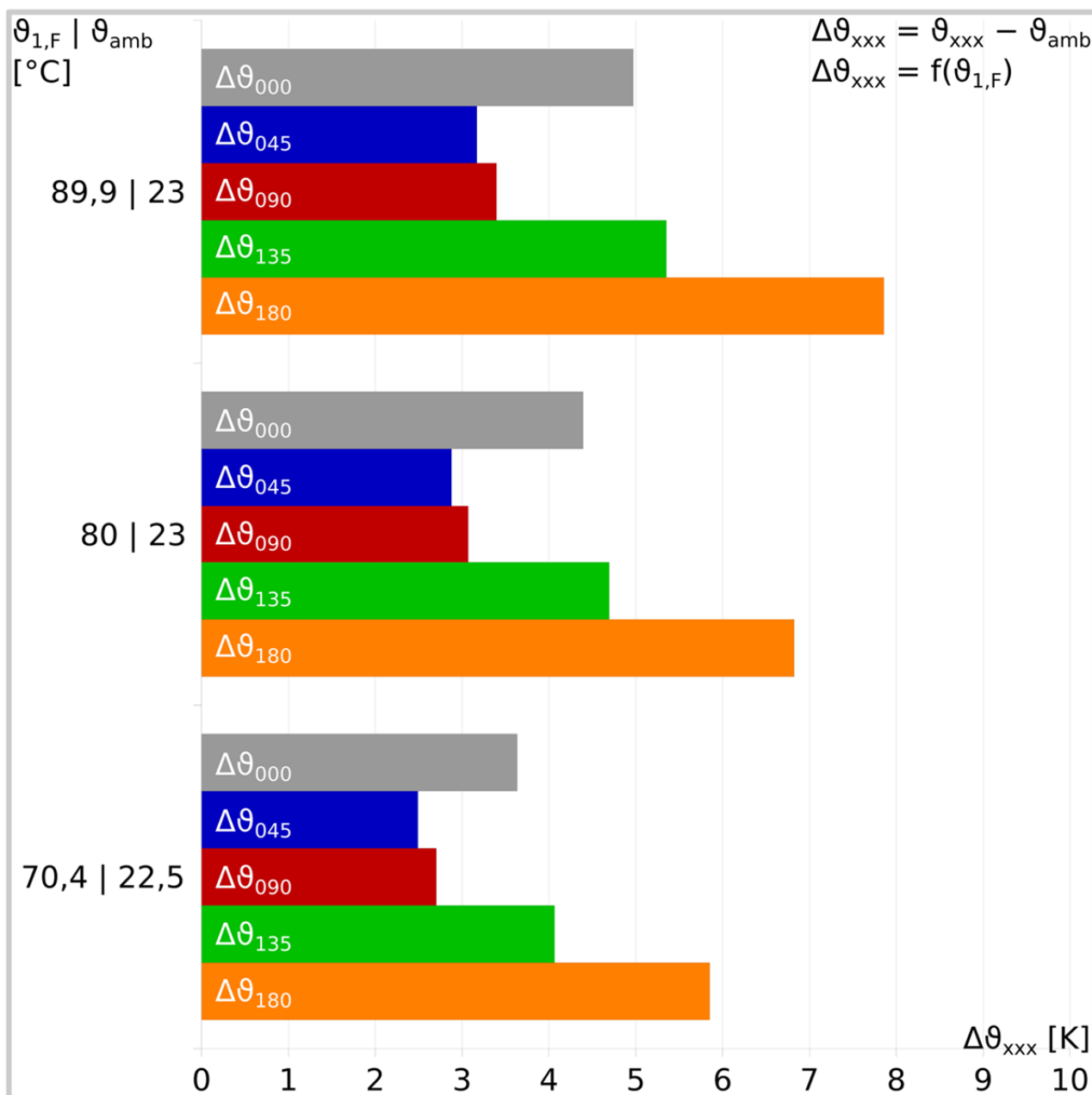


Bild 33 KMR; DN 100+DN 100/315; Dämmserie 1; *Hersteller 2*

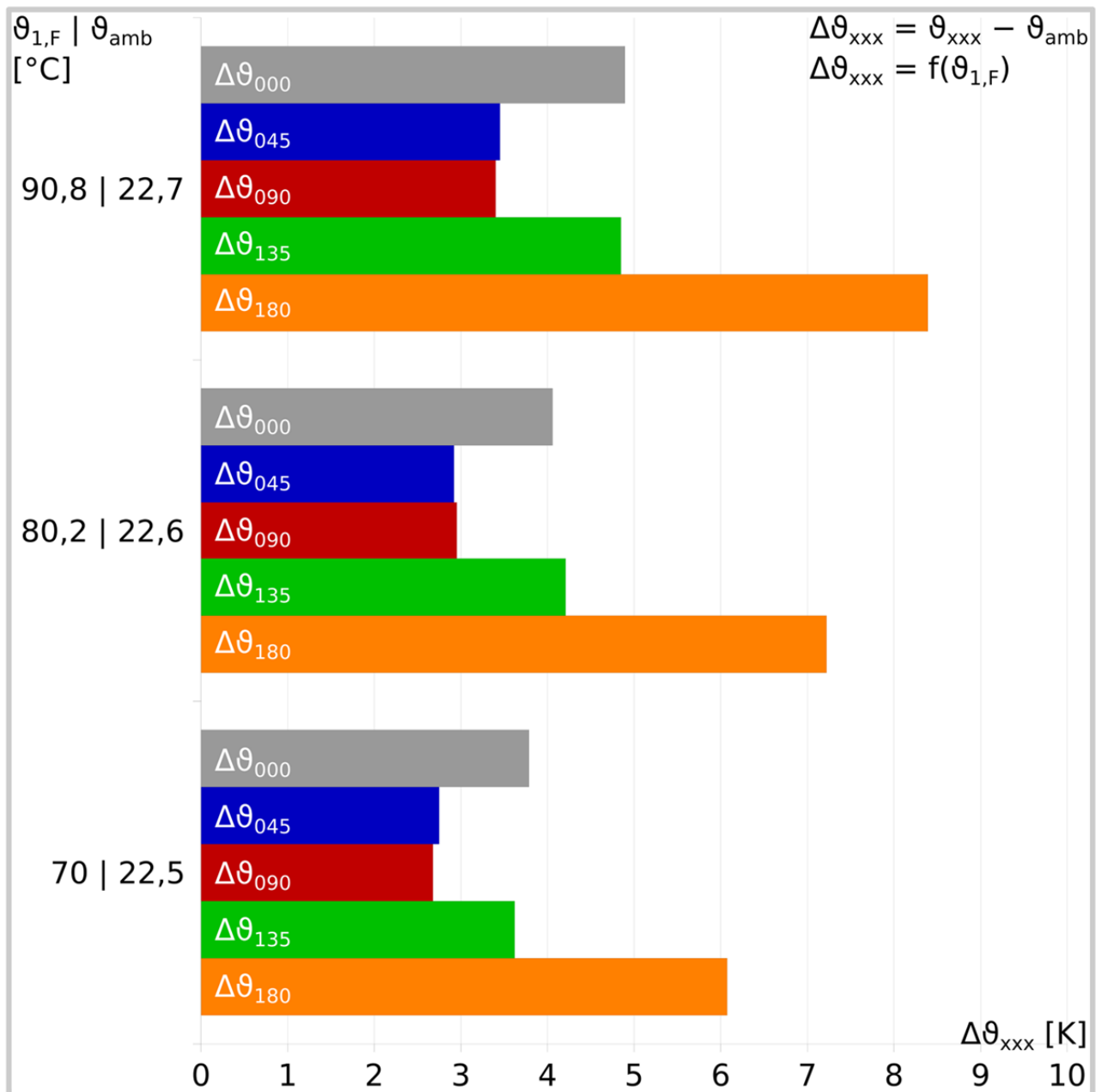


Bild 34 KMR; DN 100+DN 100/315; Dämmserie 1; *Hersteller 2*

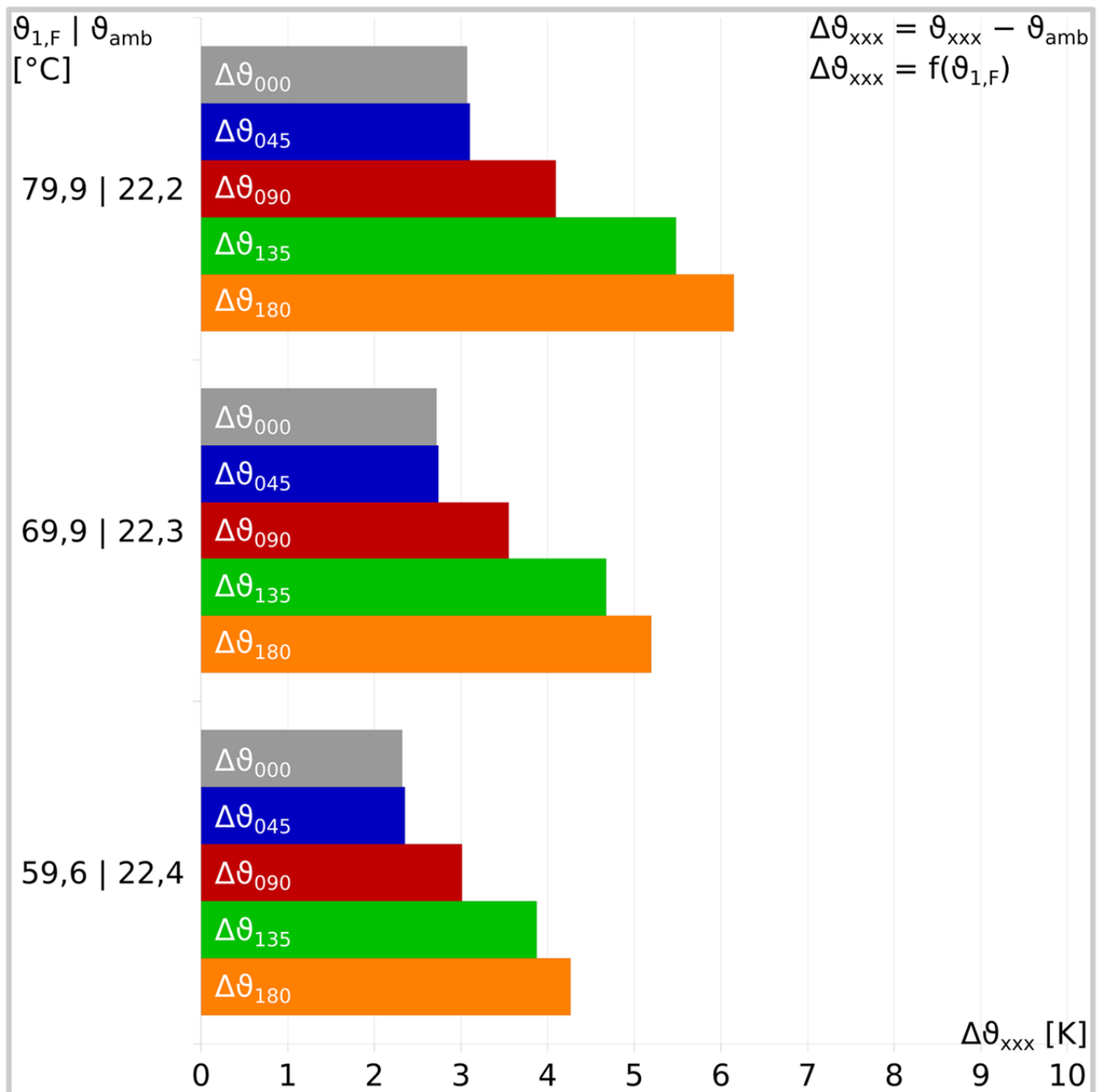


Bild 35 flexibles Verbundrohr mit Mediumrohren aus Kupfer; 28×1,2+28×1,2/110

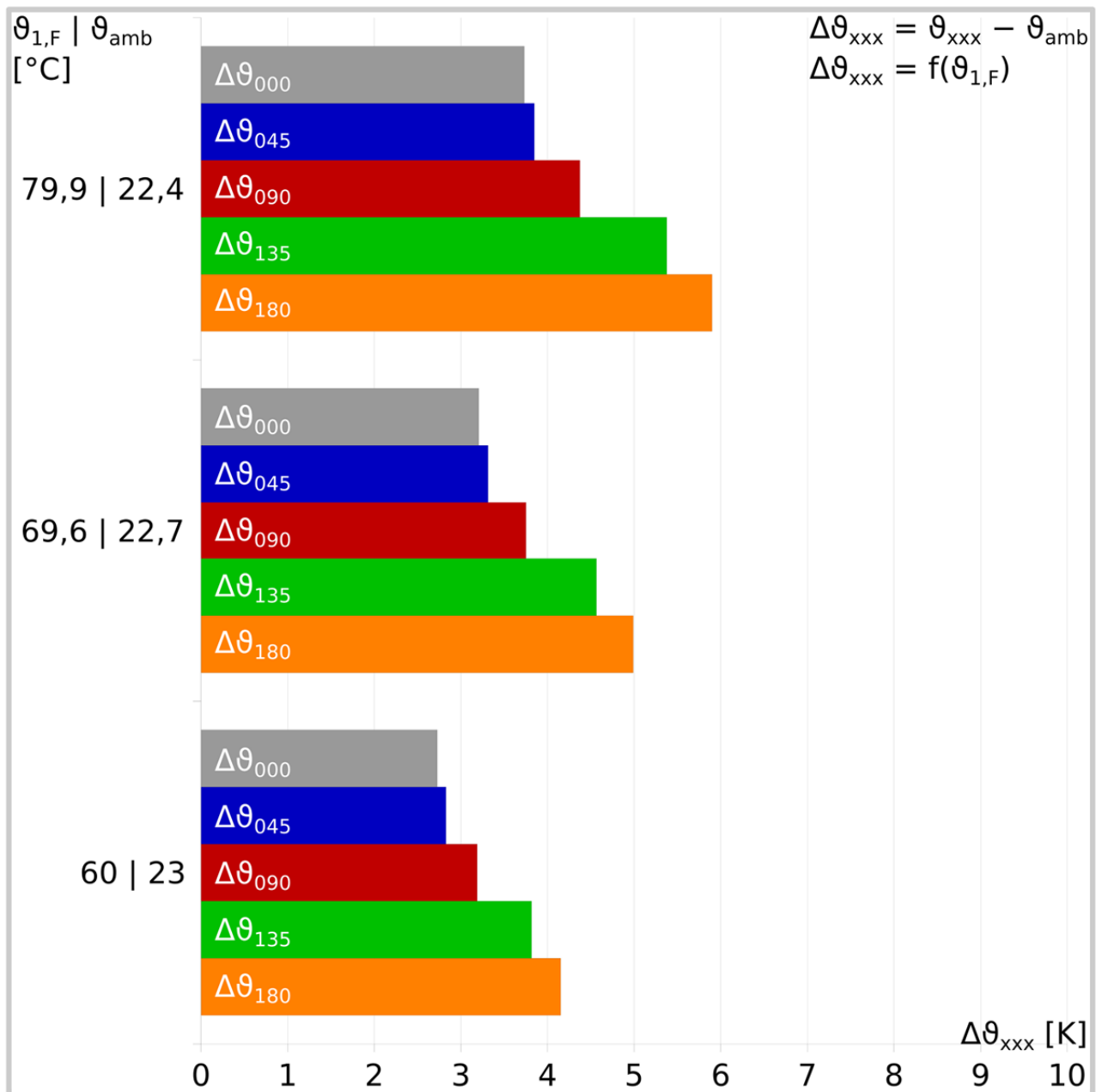


Bild 36 flexibles Verbundrohr mit Mediumrohren aus Kupfer; 28×1,2+28×1,2/110

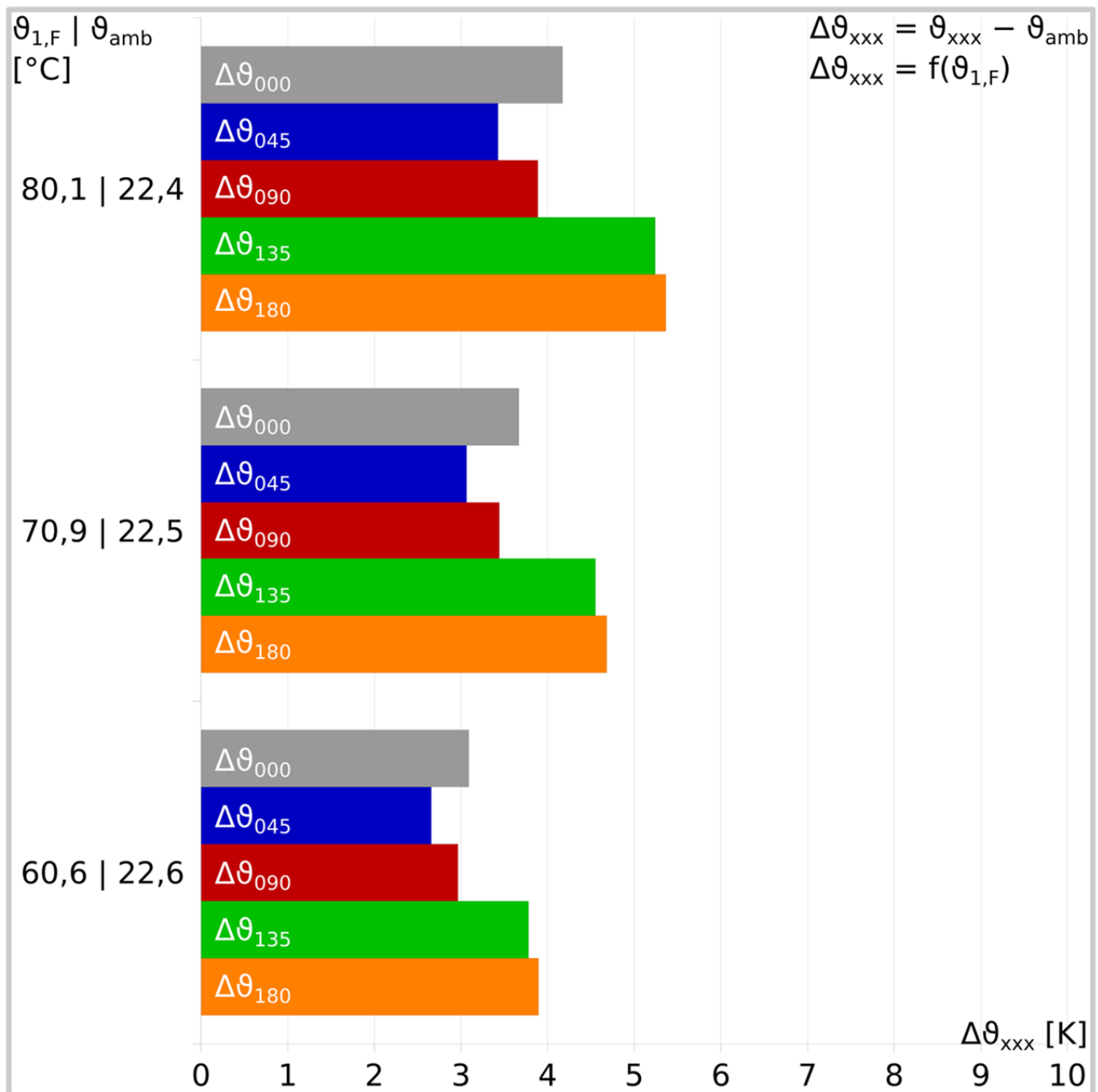


Bild 37 flexibles Verbundrohr mit Mediumrohren aus gewelltem rostfreiem Stahl;
30×0,3+30×0,3/126

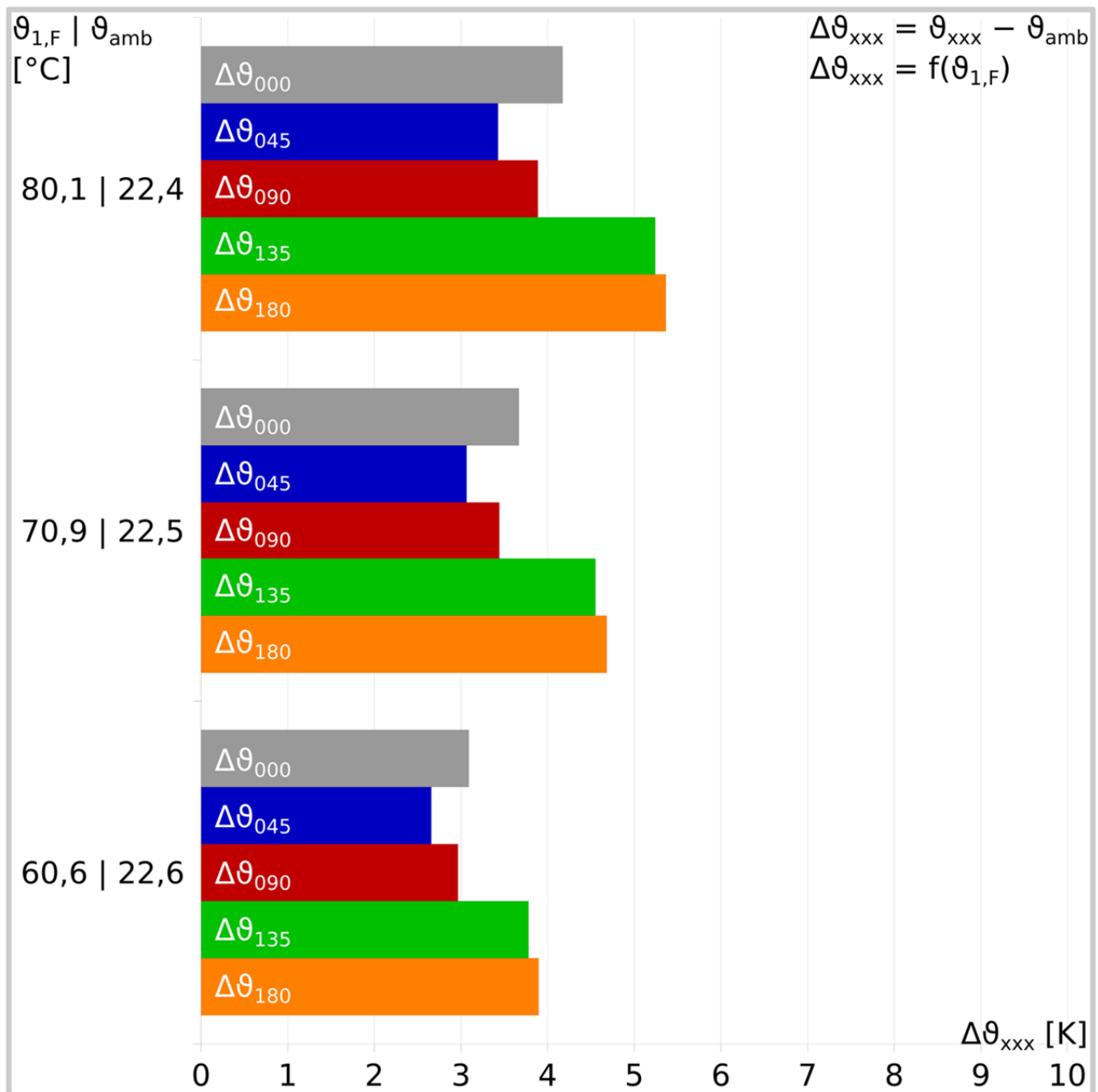


Bild 38 flexibles Verbundrohr mit Mediumrohren aus gewelltem rostfreiem Stahl;
30×0,3+30×0,3/126

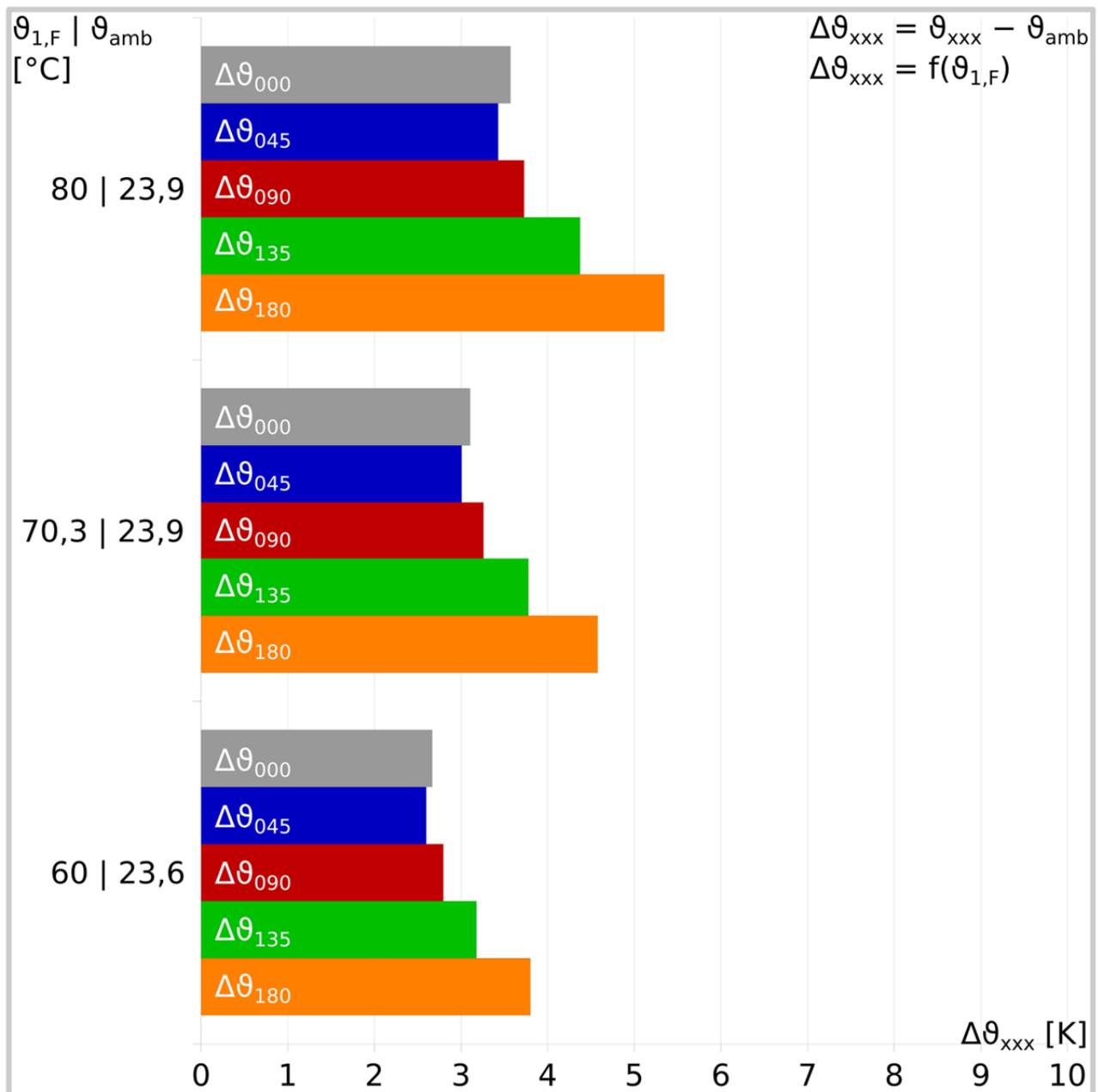


Bild 39 flexibles Verbundrohr mit Mediumrohren aus Mehrschichtverbund;
26×3,0+26×3,0/110

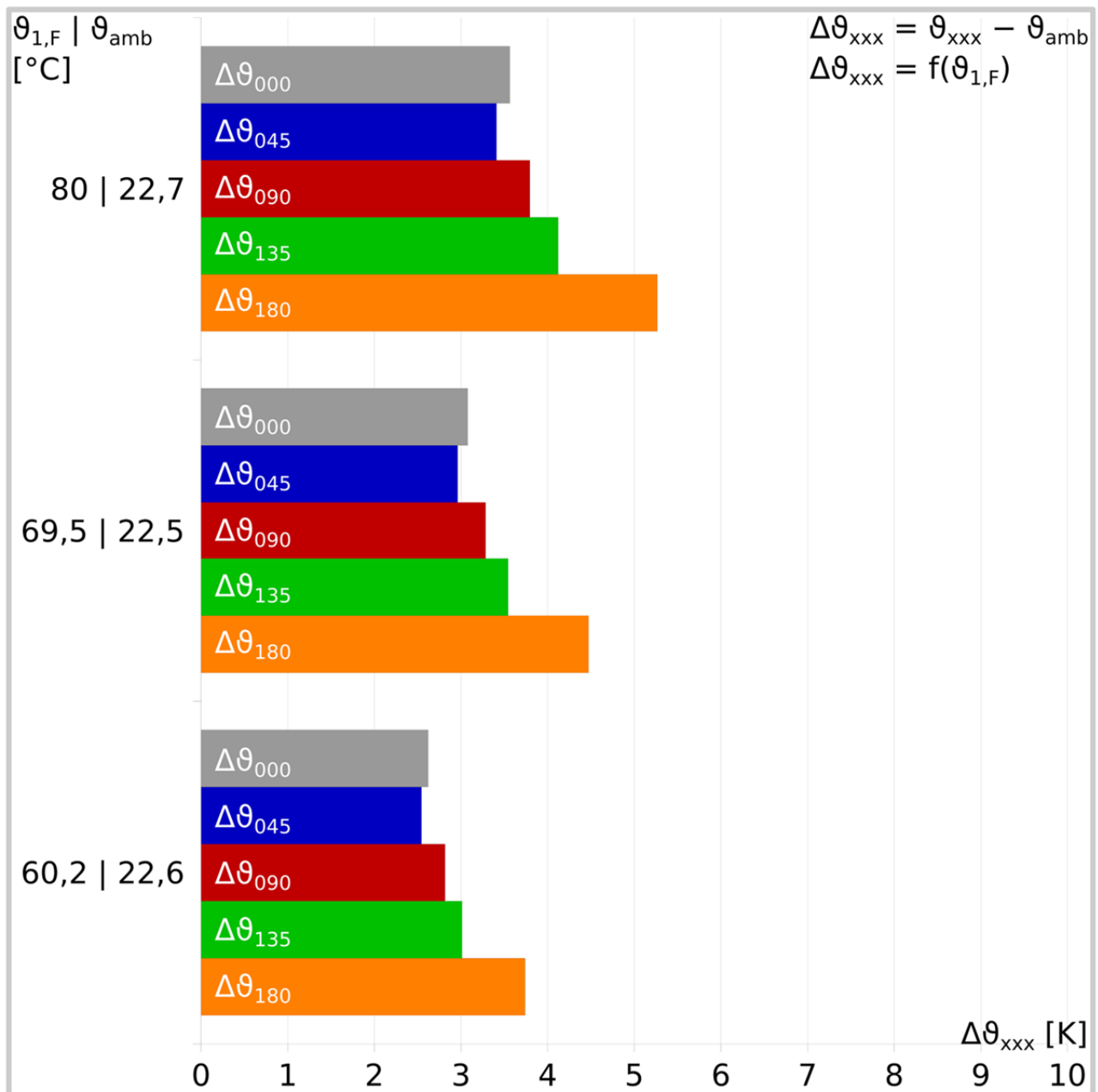


Bild 40 flexibles Verbundrohr mit Mediumrohren aus Mehrschichtverbund;
26×3,0+26×3,0/110

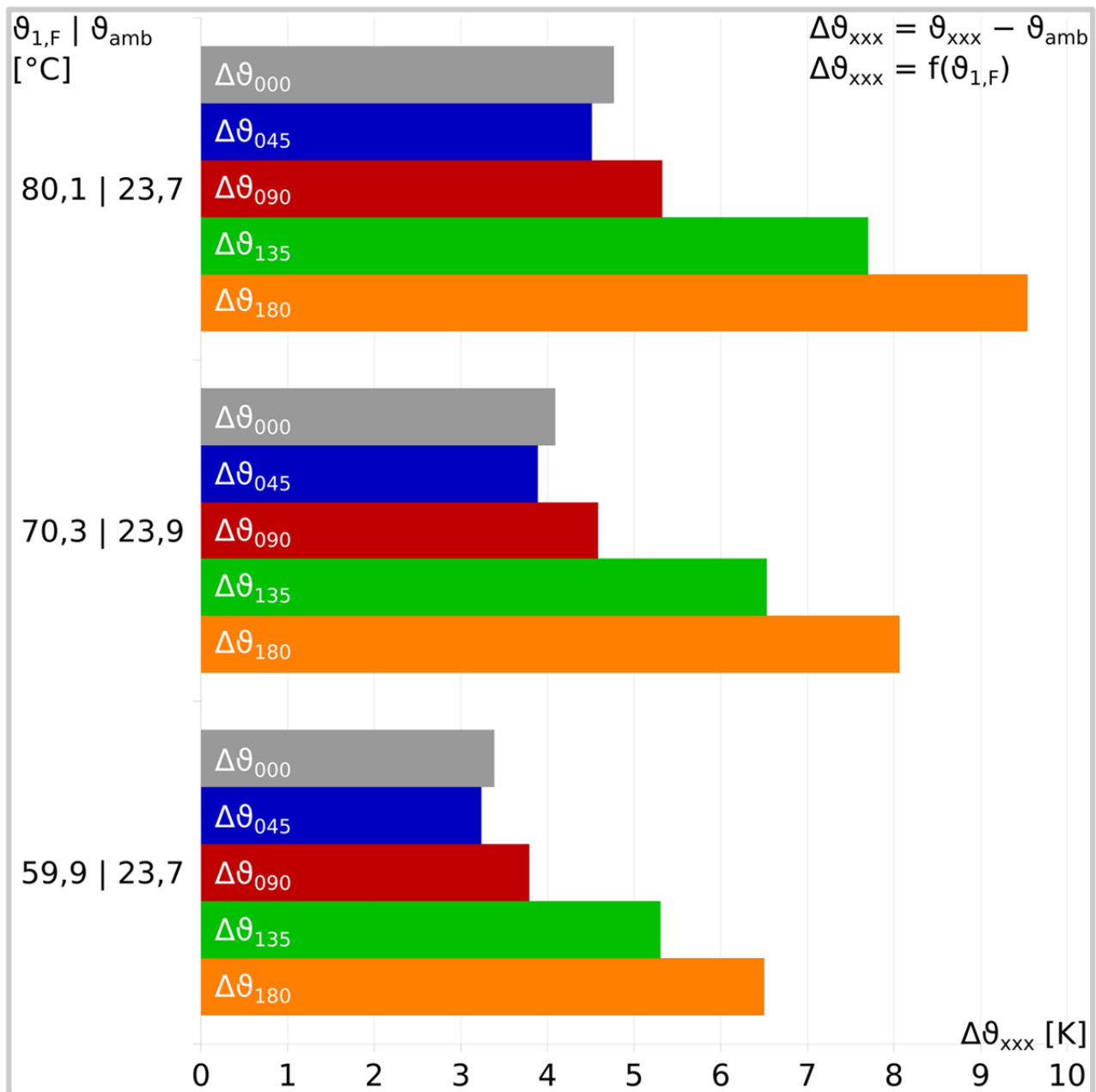


Bild 41 flexibles Verbundrohr mit Mediumrohren aus vernetztem Polyethylen; 25×2,3+25×2,3/91; Dämmserie 1; *Schaumsystem 1*

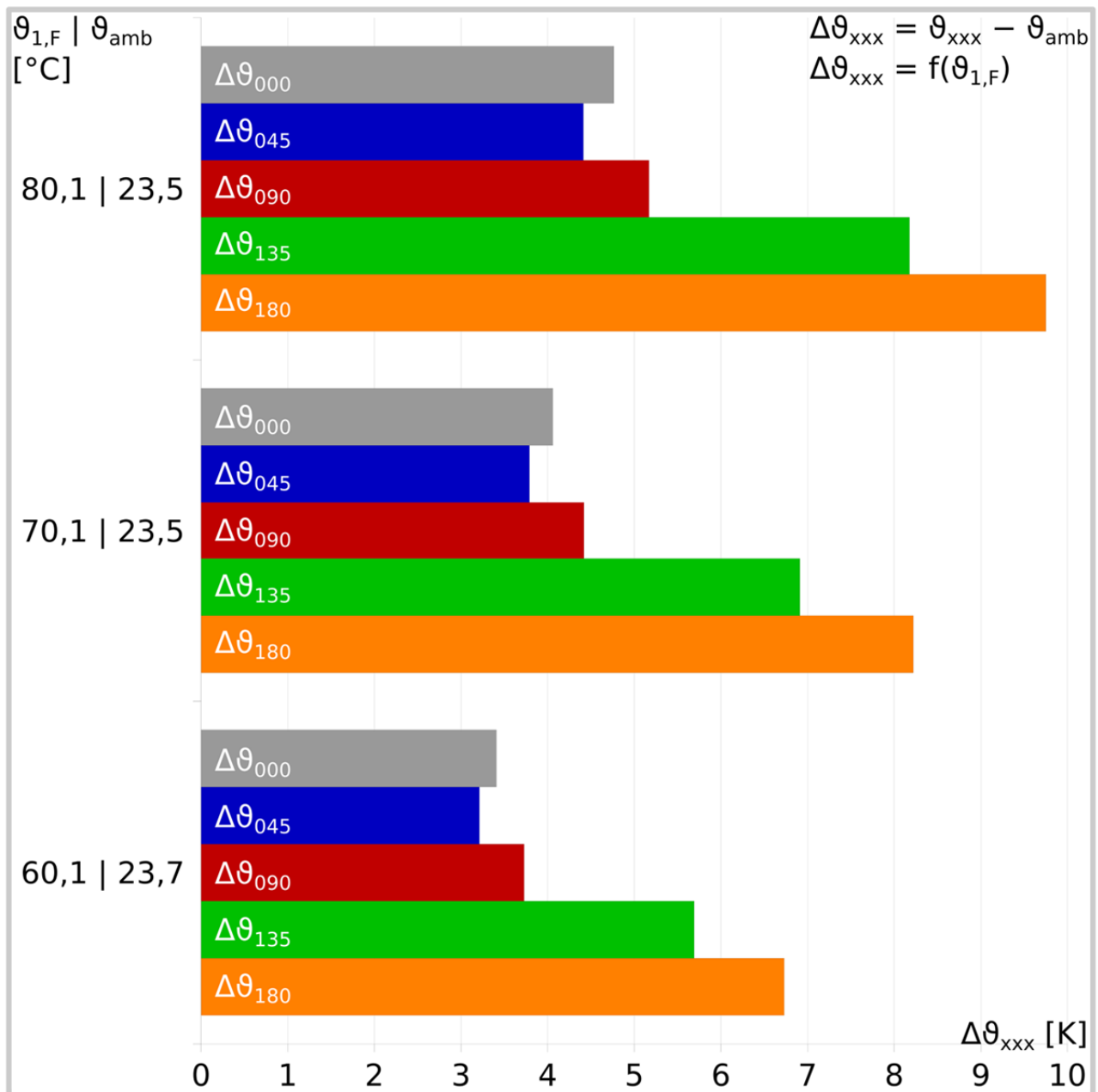


Bild 42 flexibles Verbundrohr mit Mediumrohren aus vernetztem Polyethylen; 25×2,3+25×2,3/91; Dämmserie 1; *Schaumsystem 1*

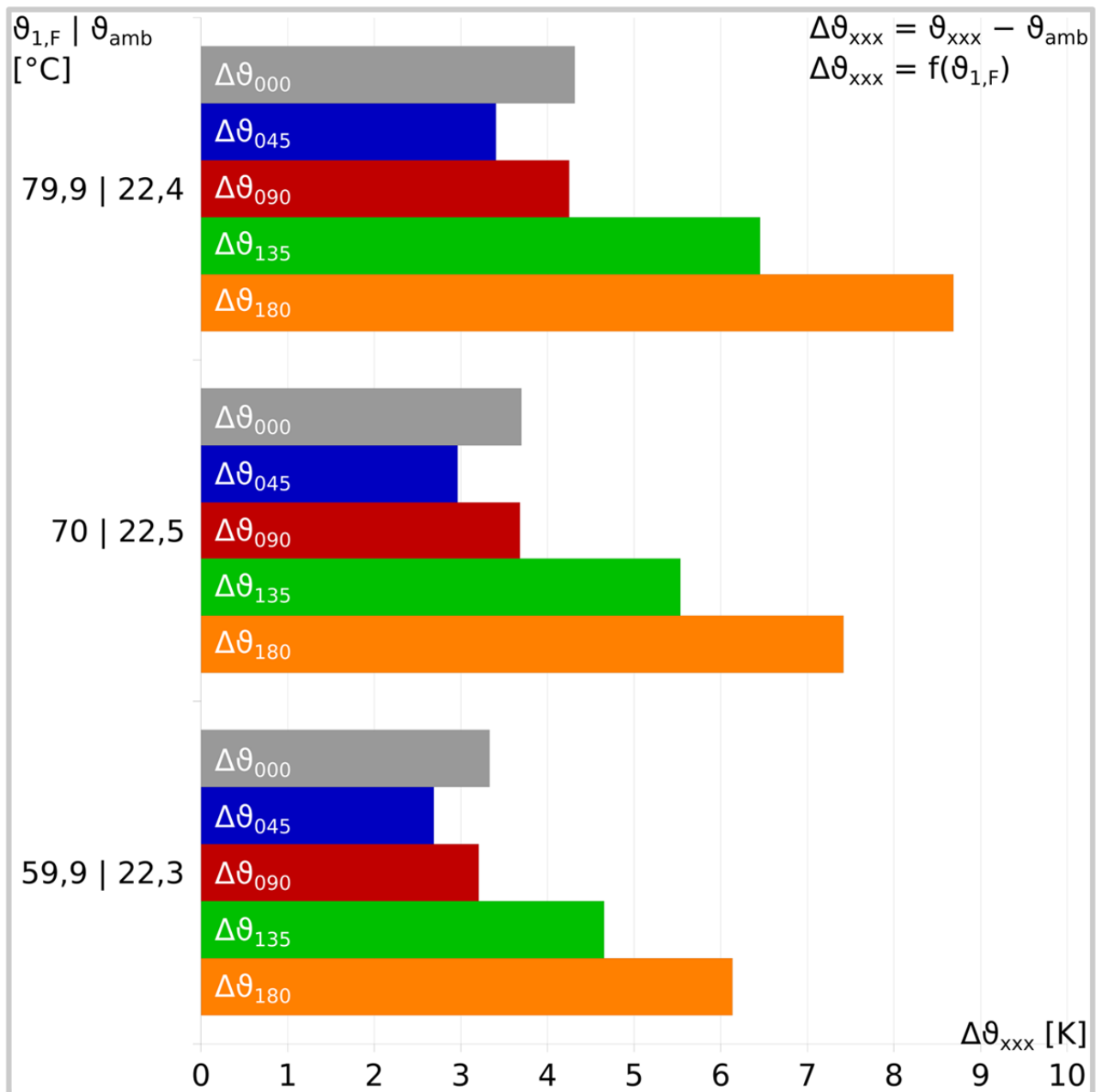


Bild 43 flexibles Verbundrohr mit Mediumrohren aus vernetztem Polyethylen; 63×5,8+63×5,8/182; Dämmserie 1; *Schaumsystem 1*

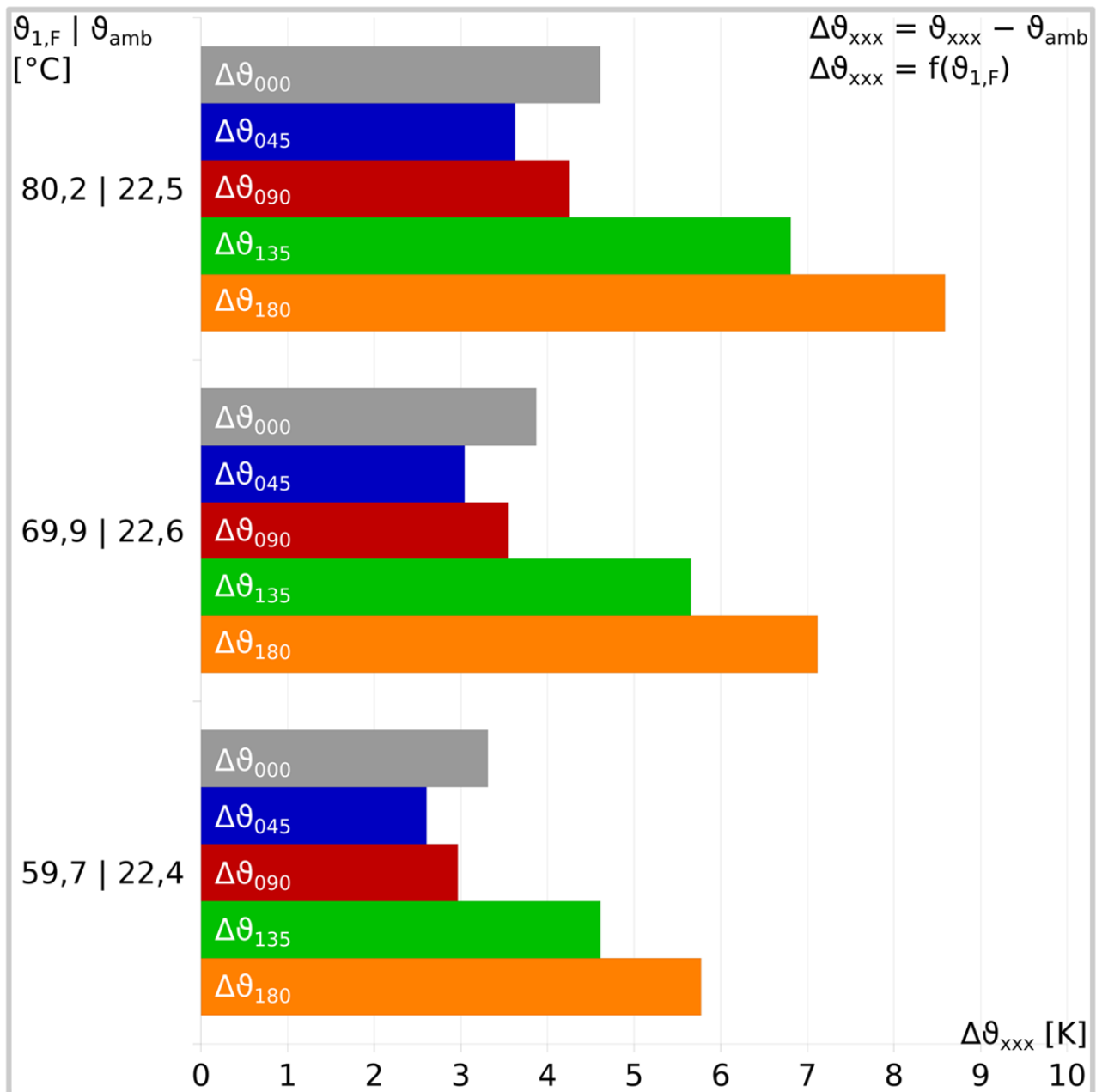


Bild 44 flexibles Verbundrohr mit Mediumrohren aus vernetztem Polyethylen; 63×5,8+63×5,8/182; Dämmserie 1; *Schaumsystem 1*

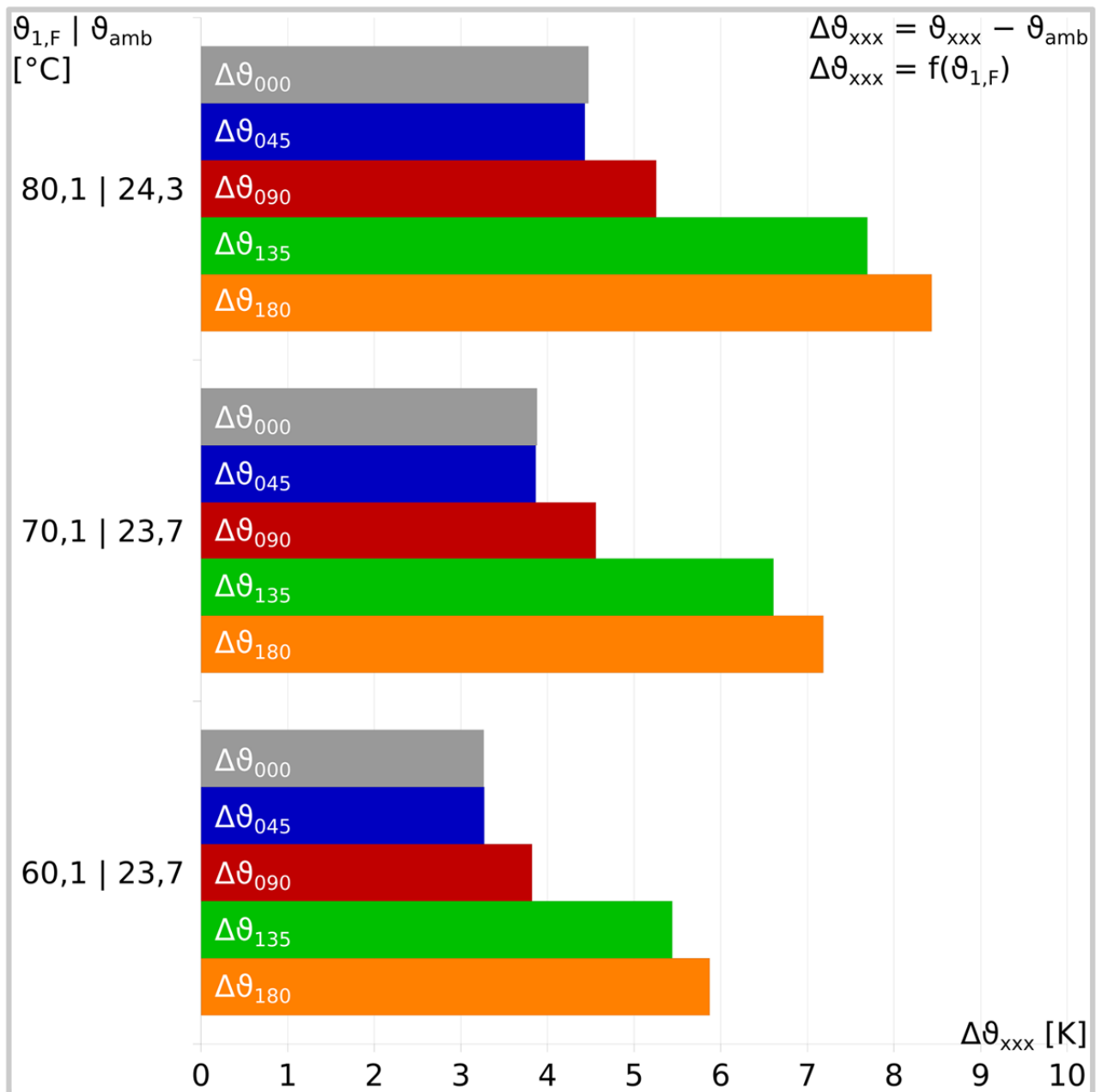


Bild 45 flexibles Verbundrohr mit Mediumrohren aus vernetztem Polyethylen; 25×2,3+25×2,3/91; Dämmserie 1; Schaumsystem 2

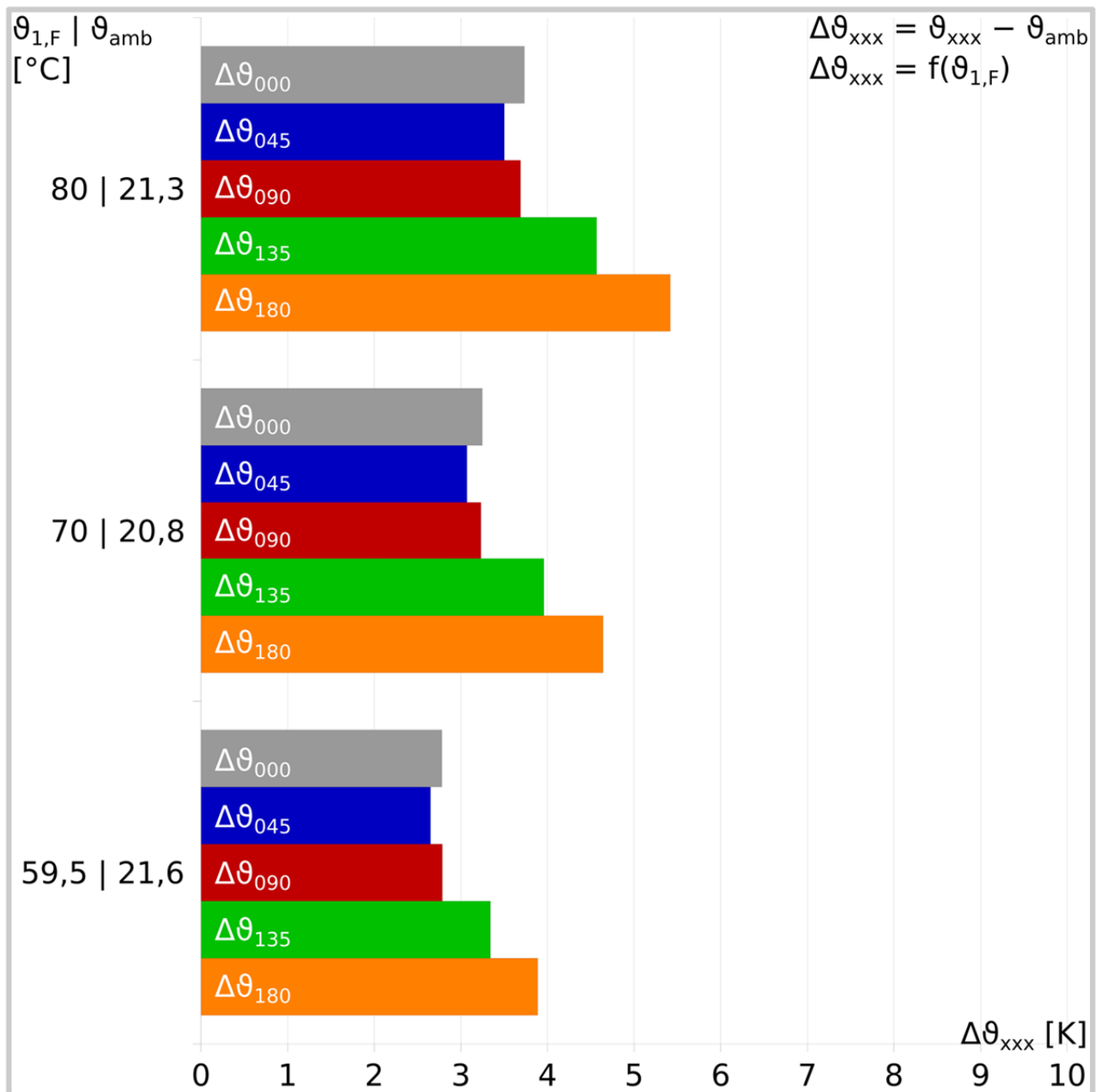


Bild 46 flexibles Verbundrohr mit Mediumrohren aus vernetztem Polyethylen; 25×2,3+25×2,3/111; Dämmserie 2; *Schaumsystem 2*

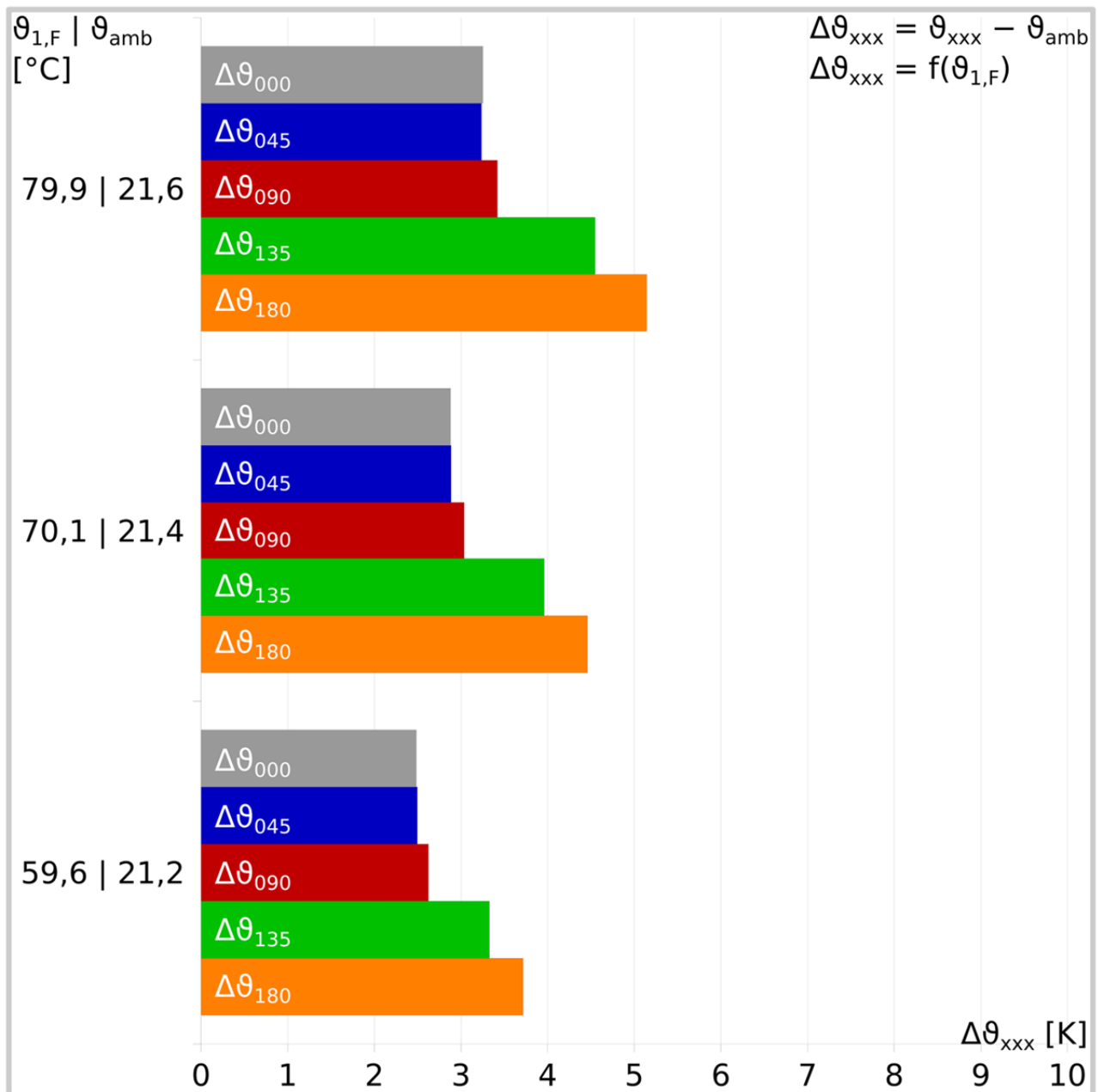


Bild 47 flexibles Verbundrohr mit Mediumrohren aus vernetztem Polyethylen; 25×2,3+25×2,3/126; Dämmserie 3; *Schaumsystem 2*

5.2 Messungen im Graben

5.2.1 Messaufbau

Der Graben befindet sich in einer Halle. Dadurch werden wetterbedingte Einflüsse minimiert. Insbesondere ist der Graben vor Sonneneinstrahlung, Wind und Niederschlag geschützt. Um reproduzierbare Messbedingungen zu schaffen wird als Erdreich ein Sand nach EN 489:2009 [18] verwendet. Der verwendete Sand hat die folgenden Werte:

- Restfeuchte = 0,41 %
- Schüttdichte = $1678 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
- Sieblinie: dargestellt in /Bild 48/
- Wärmeleitfähigkeit: dargestellt in /Tabelle 3/

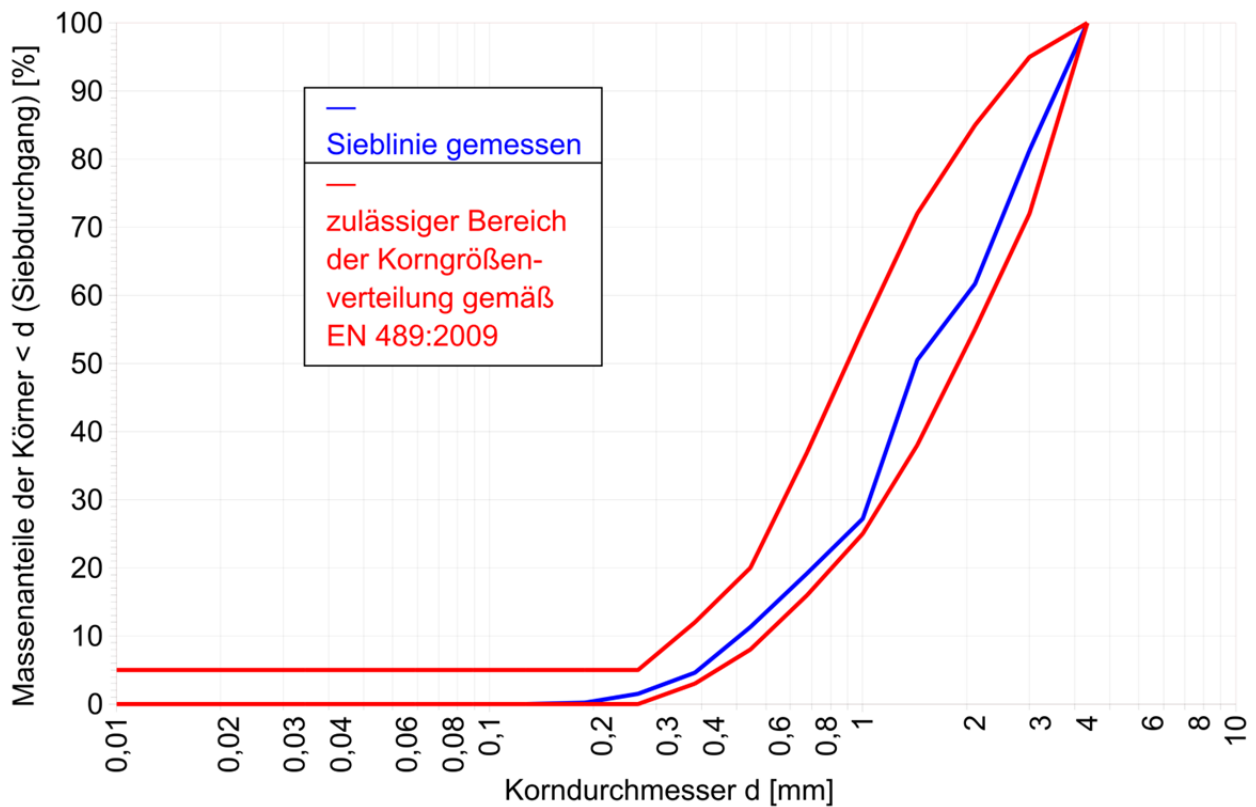


Bild 48 Sieblinie des verwendeten Sandes

ϑ_m [°C]	λ_m [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]
29,3	0,2101
34,9	0,2420
40,8	0,2614
52,5	0,2777
60,6	0,2876
66,4	0,2937
71,4	0,3071
85,5	0,3703

Tabelle 3 Wärmeleitfähigkeit λ_m des verwendeten Sandes als Funktion der Mitteltemperatur ϑ_m

Der Messaufbau ist in /Bild 49/ dargestellt. /Bild 50/ zeigt den Graben während einer Messung, /Bild 51/ nach einer Messung.

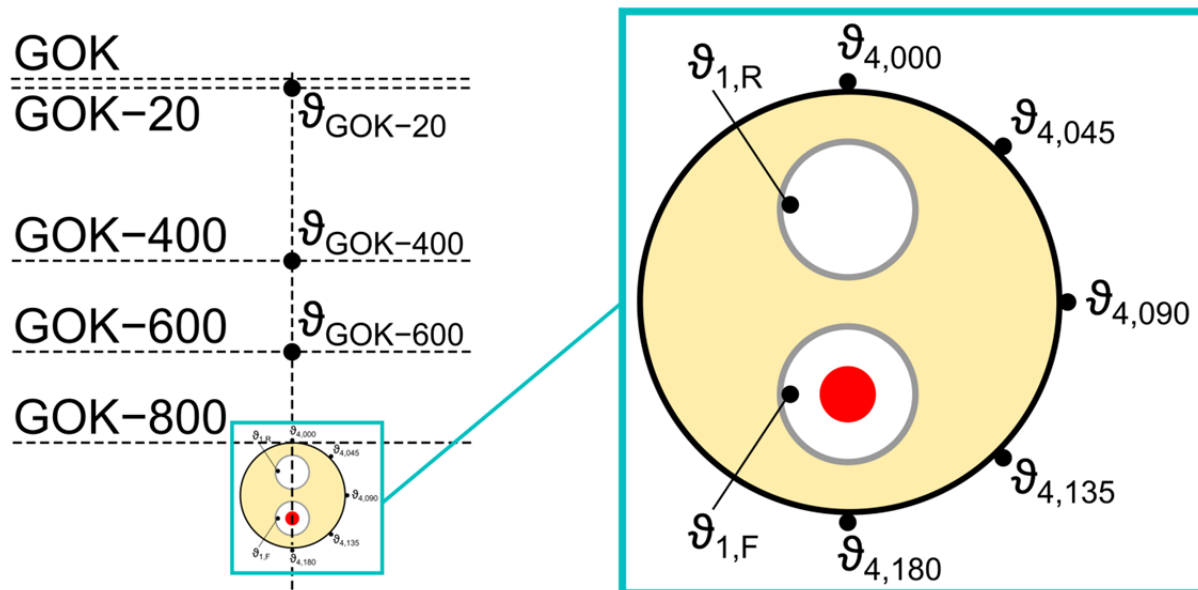


Bild 49 Messaufbau im Graben (GOK = Geländeoberkante)



Bild 50 Graben mit Überdeckung während einer Messung



Bild 51 Freilegung nach einer Messung, flexibles Verbundrohr mit Mediumrohren aus vernetztem Polyethylen, mit applizierten Sensoren auf dem Außenmantel

5.2.2 Durchführung der Messungen

Insgesamt werden vier Messungen mit den in /Tabelle 4/ aufgeführten Rohren im Graben durchgeführt.

Doppelrohrtyp	Dimension 1	Dimension 2	Dimension 3
KMR; <i>Hersteller 1</i>	DN 20+DN 20/125	DN 50+DN 50/200	DN 100+DN 100/315
flexibles Verbundrohr mit Mediumrohren aus vernetztem Polyethylen; <i>Schaumsystem 1</i>		63×5,8+63×5,8/182	

Tabelle 4 im Graben gemessene Doppelrohre

5.2.3 Messwerte

Nachfolgend sind die aus den vier Messungen erhaltenen Messwerte dargestellt. Diese Messwerte dienen der Rekalibrierung des FEM-Models.

In den nachfolgenden acht Diagrammen bedeuten:

- $\vartheta_{1,F}$ = Temperatur der inneren Oberfläche des Vorlaufmediumrohres, gemessener Wert (Istwert)
- ϑ_{xxx} = Temperatur der äußeren Oberfläche des Außenmantels, Position xxx° mit $xxx = \{000; 045; 090; 135; 180\}$, Positionen siehe /Bild 49/
- ϑ_{amb} = Umgebungstemperatur
- H = Tiefe unter GOK
- $\vartheta_{1,F,set}$ = Temperatur der inneren Oberfläche des Vorlaufmediumrohres, Sollwert

Die gestrichelten Linien in den Diagrammen /Bild 53/, /Bild 55/, /Bild 57/ und /Bild 59/ dienen nur der leichteren Auffindbarkeit der zu einer Messung gehörenden Messwerte. Diese Linien sind nicht als lineare Interpolationen zwischen den einzelnen Messwerten zu verstehen.

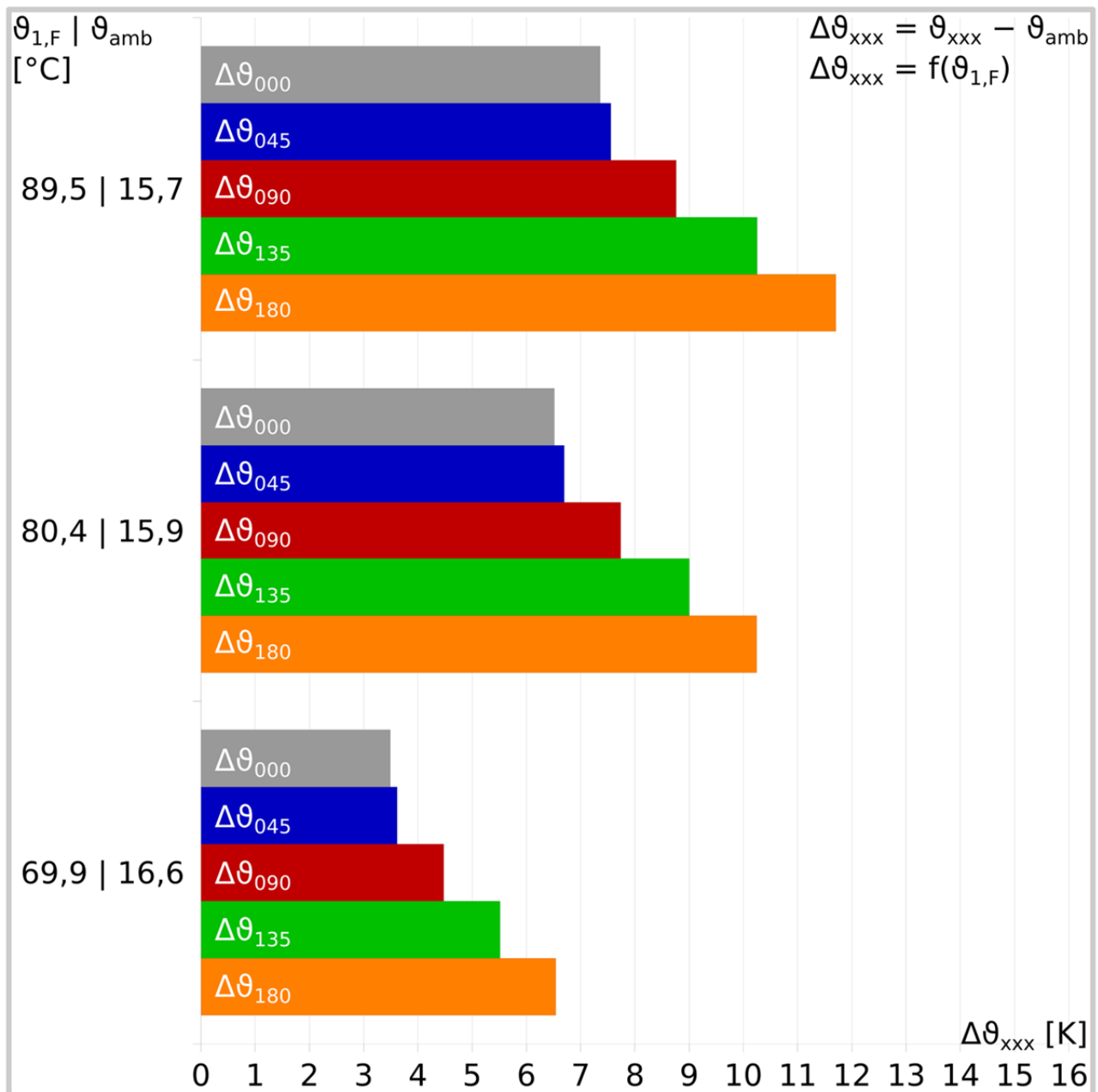


Bild 52 KMR; DN 20+DN 20/125; Dämmserie 1; *Hersteller 1*
Temperaturverteilung auf dem Außenmantel

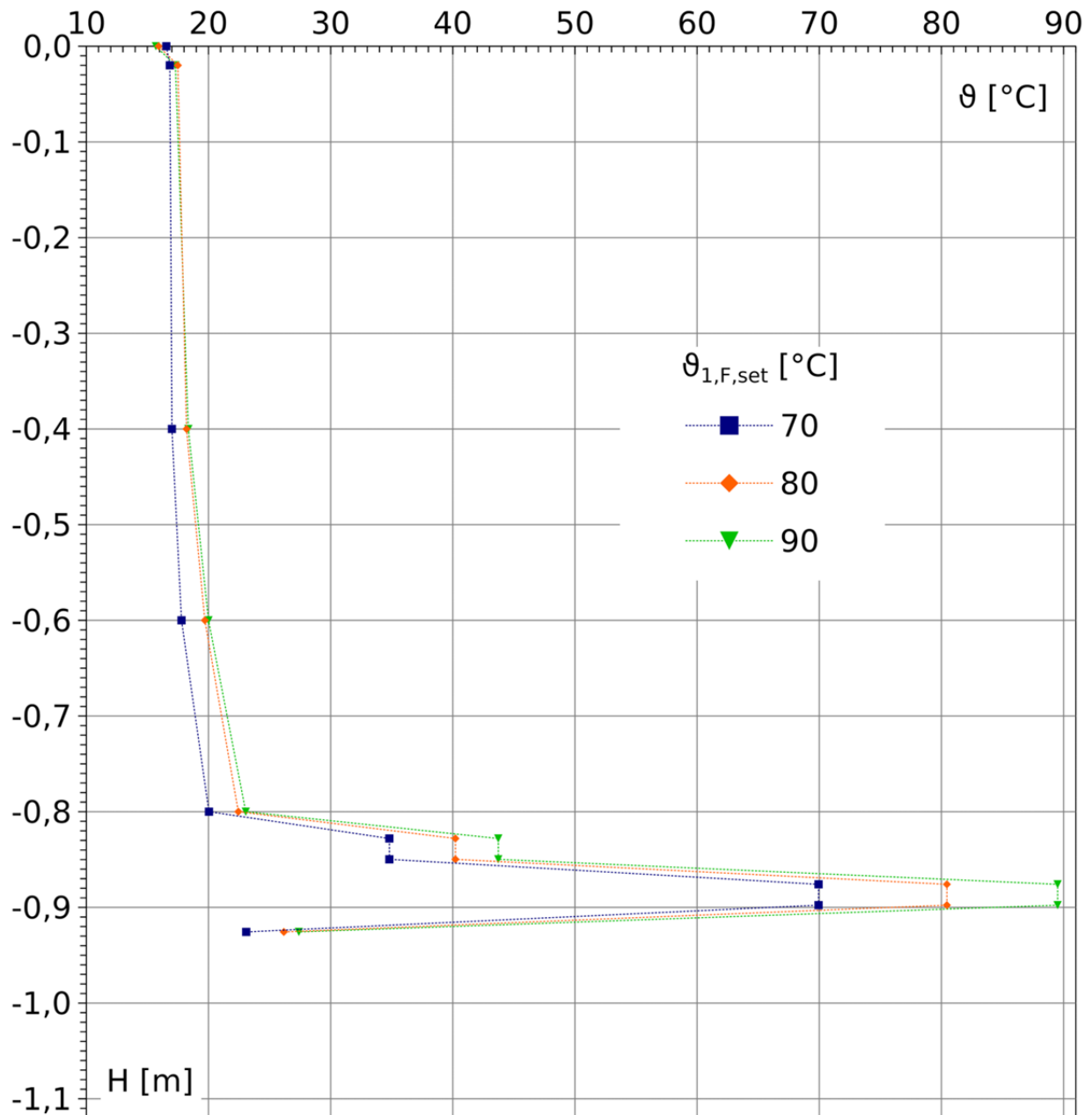


Bild 53 KMR; DN 20+DN 20/125; Dämmserie 1; *Hersteller 1*
Temperaturverteilung von Rohrsohle bis GOK senkrecht zur Rohrmittelache

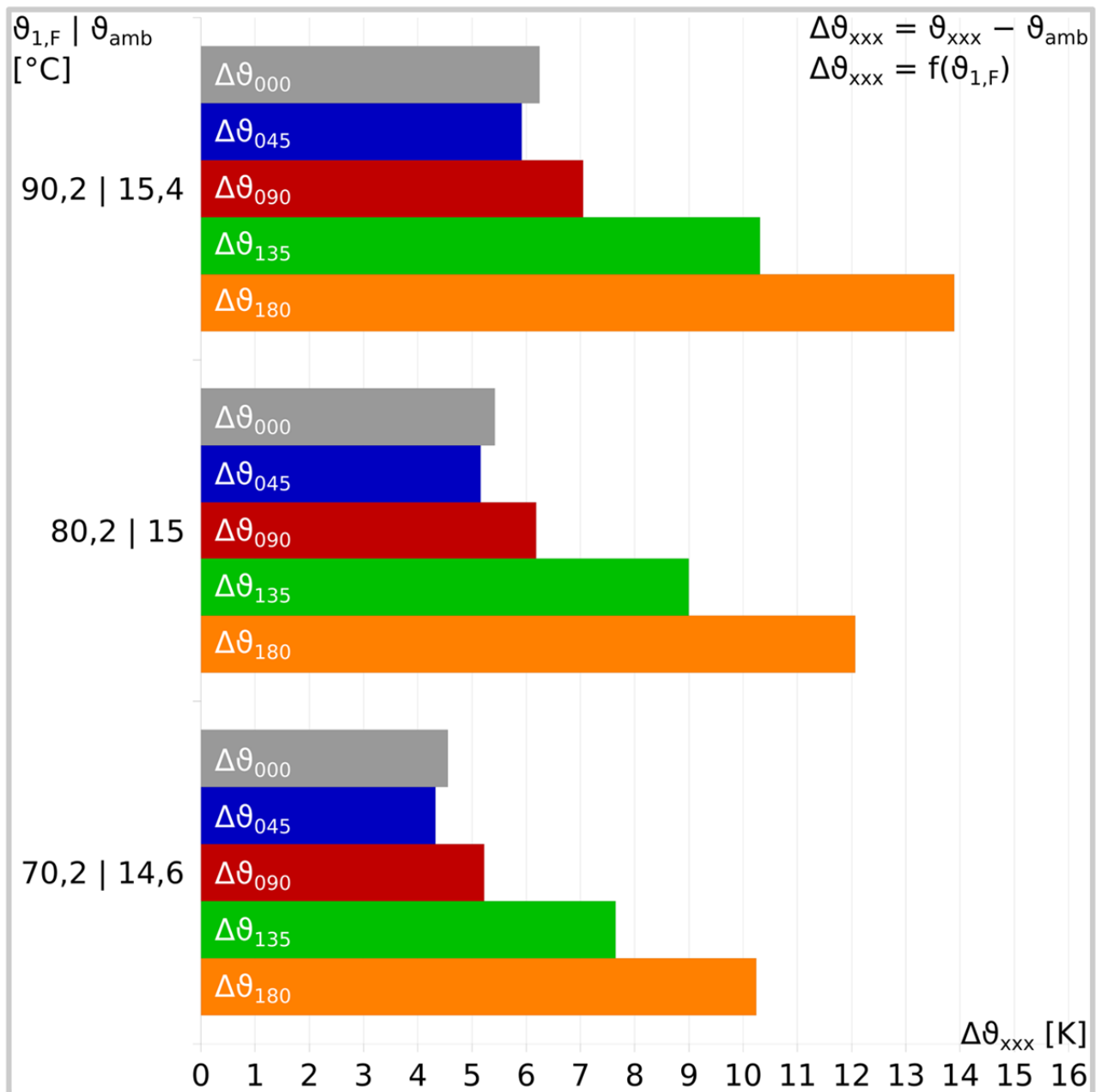


Bild 54 KMR; DN 50+DN 50/200; Dämmserie 1; *Hersteller 1*
Temperaturverteilung auf dem Außenmantel

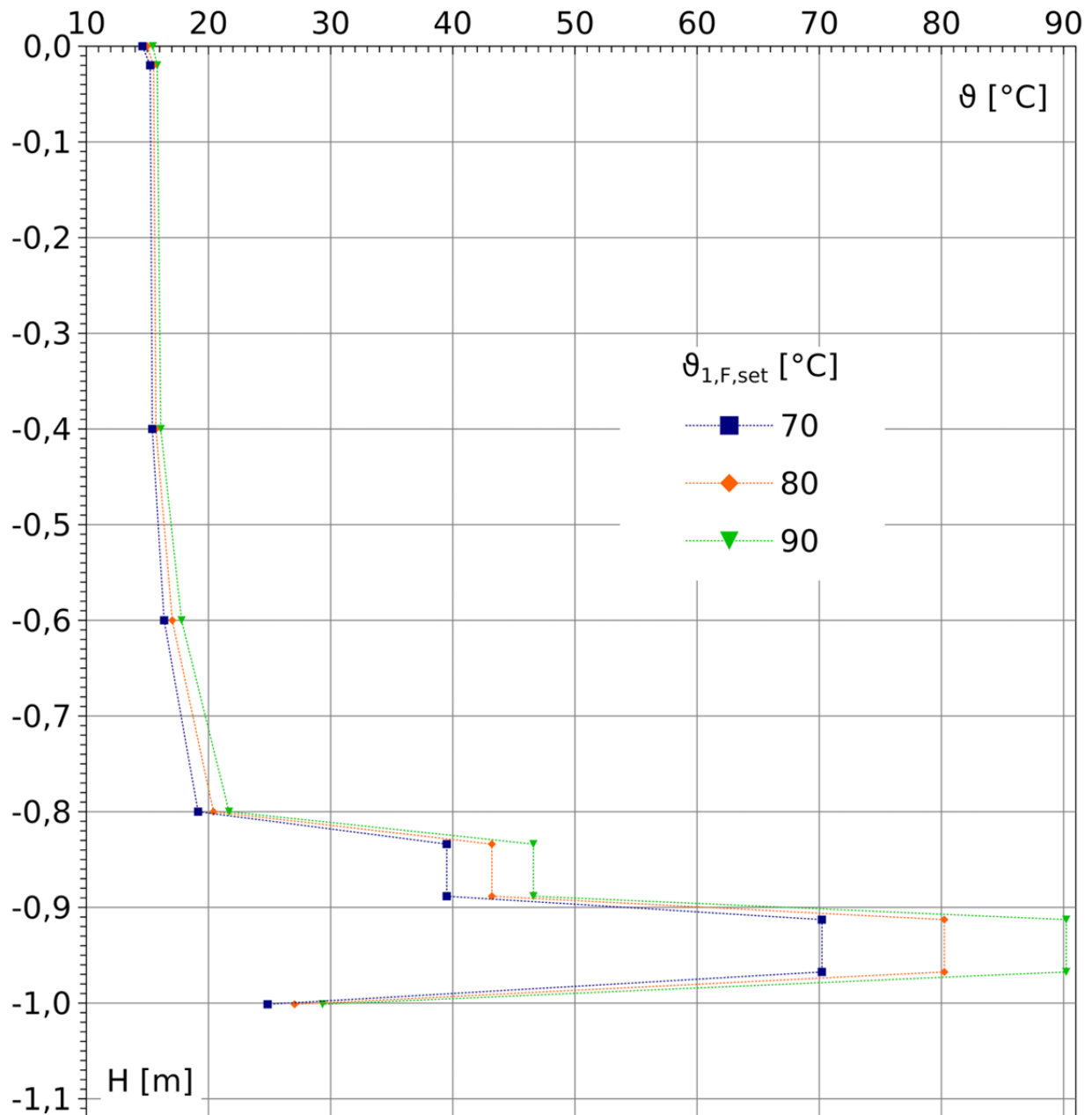


Bild 55 KMR; DN 50+DN 50/200; Dämmserie 1; *Hersteller 1*
Temperaturverteilung von Rohrsohle bis GOK senkrecht zur Rohrmittelache

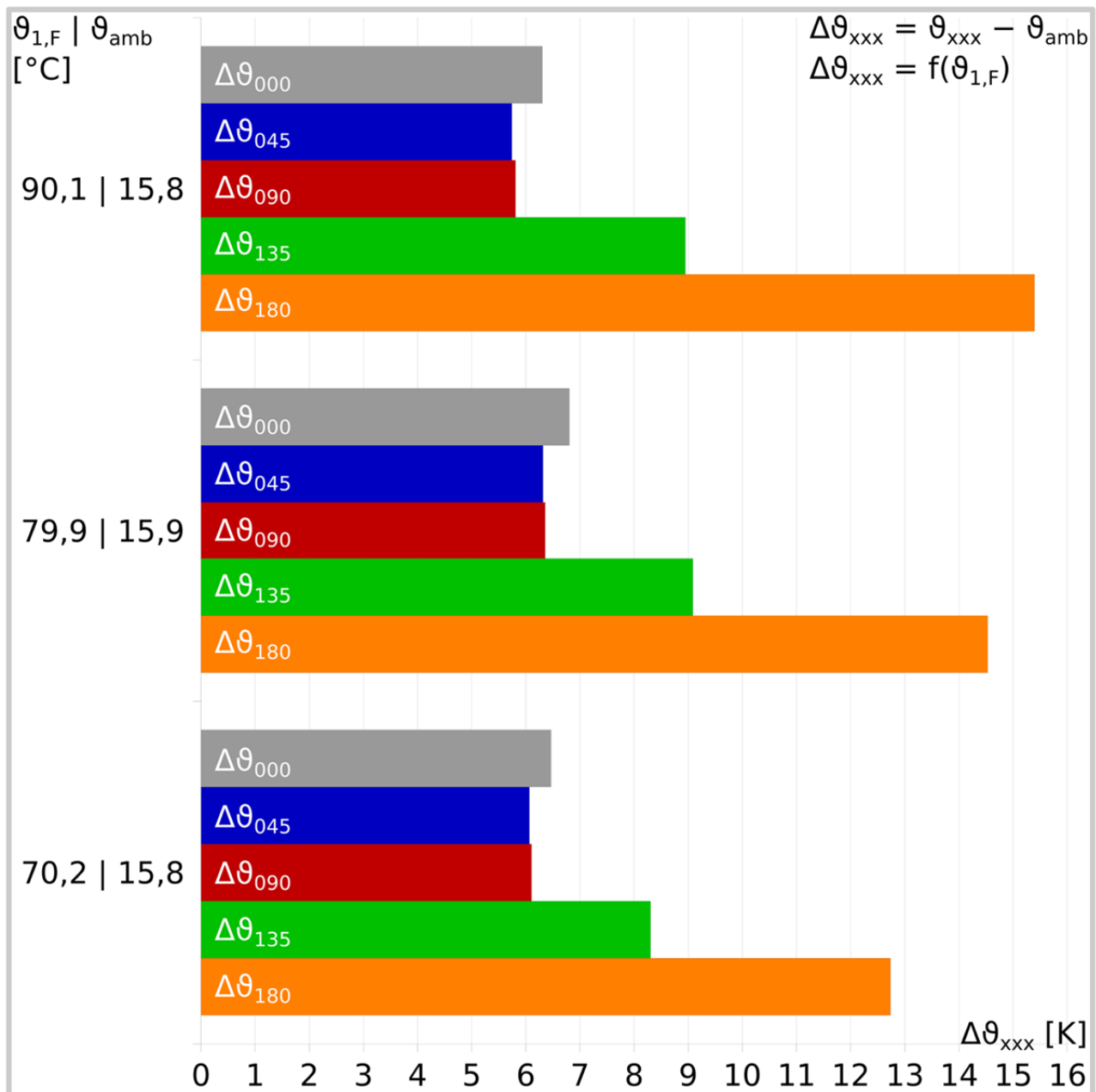


Bild 56 KMR; DN 100+DN 100/315; Dämmserie 1; *Hersteller 1*
Temperaturverteilung auf dem Außenmantel

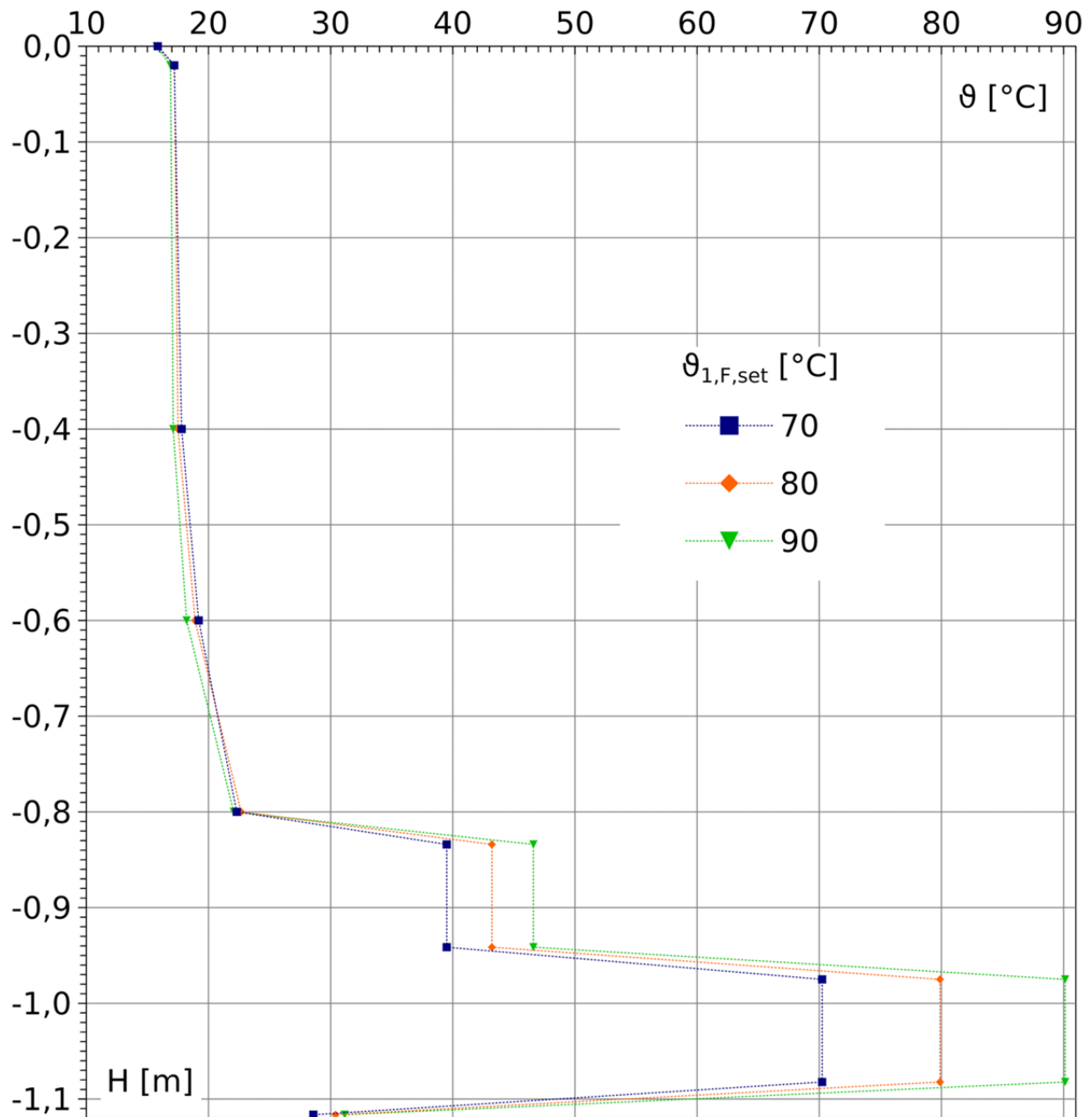


Bild 57 KMR; DN 100+DN 100/315; Dämmserie 1; *Hersteller 1*
Temperaturverteilung von Rohrsohle bis GOK senkrecht zur Rohrmittelache

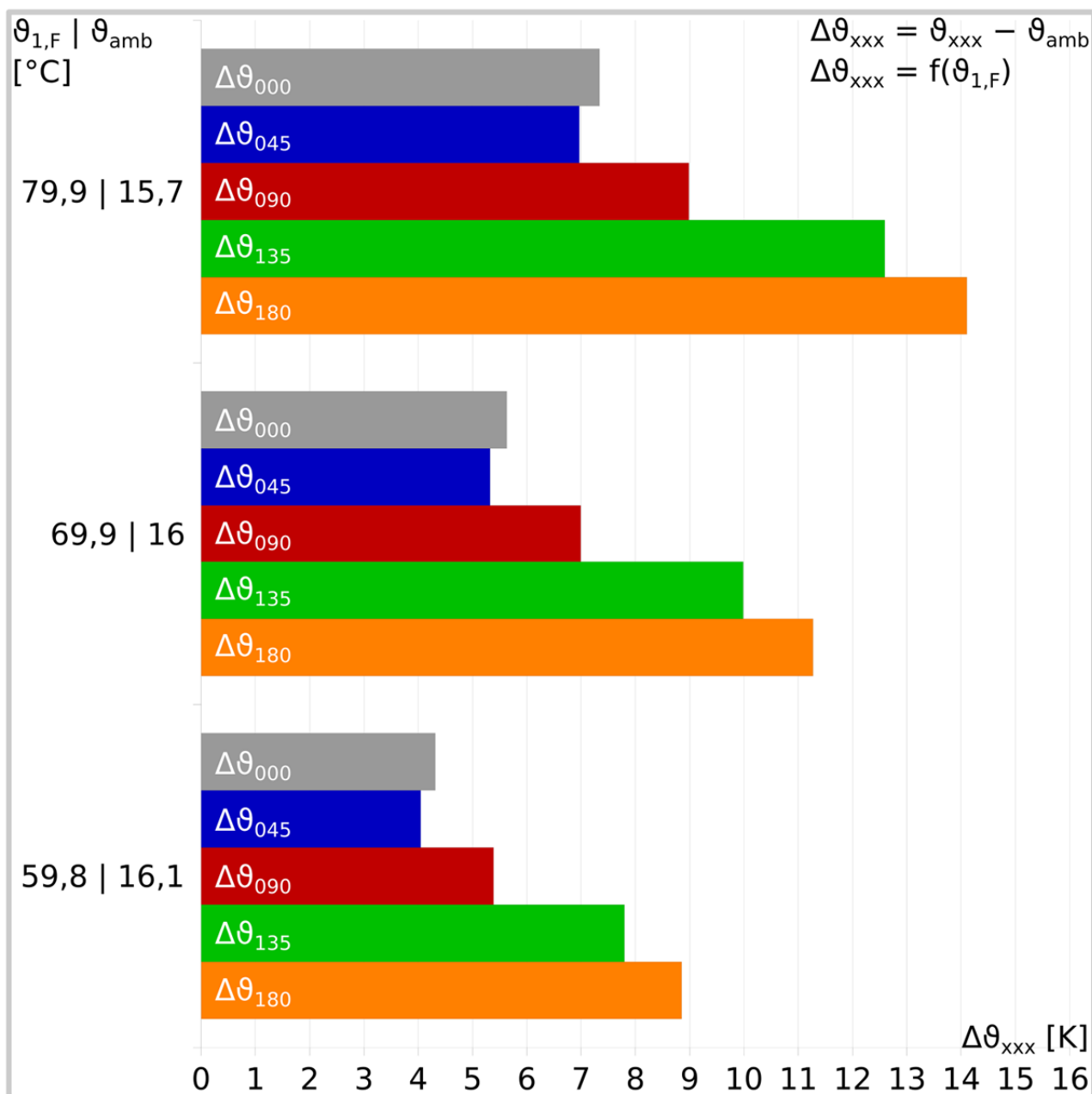


Bild 58 flexibles Verbundrohr mit Mediumrohren aus vernetztem Polyethylen; 63×5,8+63×5,8/182; Dämmserie 1; *Schaumsystem 1*
Temperaturverteilung auf dem Außenmantel

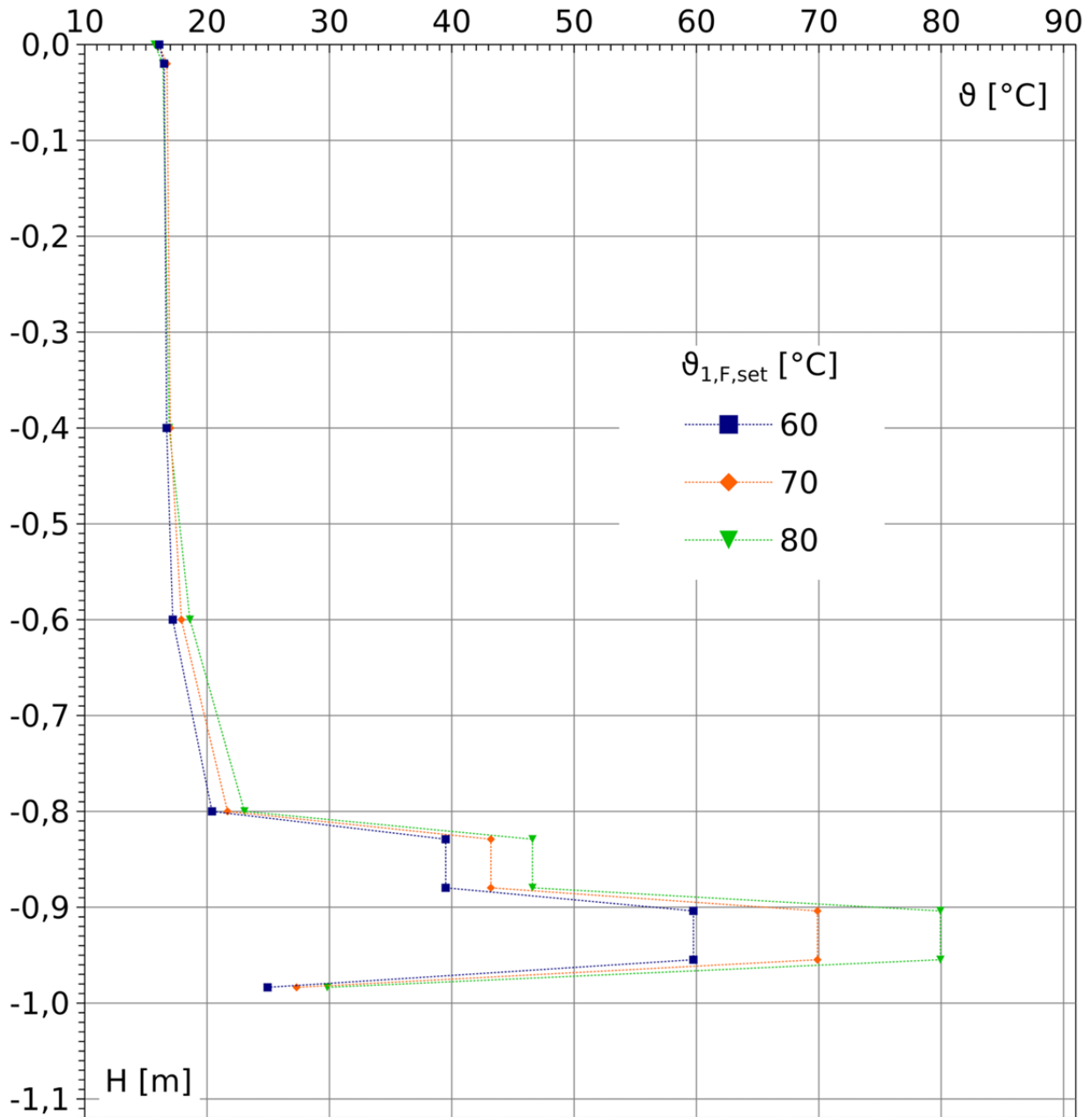


Bild 59 flexibles Verbundrohr mit Mediumrohren aus vernetztem Polyethylen; 63×5,8+63×5,8/182; Dämmserie 1; *Schaumsystem 1*
Temperaturverteilung von Rohrsohle bis GOK senkrecht zur Rohrmittelache

6. Entwicklung eines Berechnungsmodells

Bei Doppelrohren fließen aufgrund der komplexeren Geometrie radiale und tangential Wärmeströme, die nicht analytisch berechnet werden können, womit auch eine analytische Berechnung der Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmung nicht möglich ist.

6.1 FEM

Mittels FEM erfolgen entsprechende Berechnungen, die im Forschungsvorhaben dazu dienen, die erhaltenen Messwerte zu verifizieren. Allerdings ist die FEM als Standardverfahren für die Auswertung der Messungen ungeeignet. Dies liegt im hohen Aufwand der FEM begründet.

6.2 Multipolentwicklung

Eine andere Möglichkeit die thermischen Verhältnisse im Doppelrohr mathematisch zu beschreiben bietet die Multipolentwicklung. Bei der Multipolentwicklung handelt es sich um ein Näherungsverfahren (Taylor-Reihenentwicklung), das mit zunehmender Entwicklung (Monopol, Dipol, Quadrupol, Oktupol, ...) höhere Genauigkeiten bei gleichzeitig stark steigendem Rechenaufwand liefert, wobei die Berechnungen analytisch erfolgen. Für Doppelrohre wird mit der Multipolmethode die Rohrgeometrie in Form eines „Wärmeverlustfaktors“ abgebildet, der dann in die Gleichung zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmung eingesetzt wird. Für Doppelrohre liegt die Multipolentwicklung bis zum Dipol [19] vor. Obwohl es sich bei der Multipolentwicklung um ein mathematisches Modell handelt, ist die Multipolentwicklung bis zum Dipol für das Doppelrohr anschaulich. Das Doppelrohr als Ganzes bildet einen Monopol gegenüber der Umgebung. Die beiden bei der Messung und üblicherweise auch im Betrieb unterschiedlich temperierten Mediumrohre bilden einen Dipol. Anschaulich ist im Doppelrohr kein Quadrupol oder Multipol höherer Ordnung vorhanden.

6.3 Berechnung der Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmung aus Messwerten

6.3.1 Multipolentwicklung

Die vorliegende Multipolentwicklung bis zum Dipol [19] betrachtet nur die Wärmedämmung, die durch die äußeren Oberflächen der beiden Mediumrohre und die innere Oberfläche des Außenmantels begrenzt ist. Diese Oberflächen sind nicht zerstörungsfrei für die Applikation von Temperatursensoren zugänglich. Eine zerstörende Applikation würde zu nicht reproduzierbaren Messwertverfälschungen als Folge der bei der Applikation aufgetretenen Schäden führen. Da die Temperatursensoren zerstörungsfrei nur auf den inneren Oberflächen der beiden Mediumrohre und der äußeren Oberfläche des Außenmantels appliziert werden können, müssen für die Berechnungen die Geometrien und Wärmeleitfähigkeiten der beiden Mediumrohre und des Außenmantels einbezogen werden. Nachfolgend ist die Berechnung des „Wärmeverlustfaktors“ h_s dargestellt.

$$h_s^{-1} = \ln\left(\frac{r_3^2}{2 \cdot D \cdot r_{2,m}}\right) - \ln\left(\frac{r_3^4}{r_3^4 - D^4}\right) - \frac{\left(\frac{r_{2,m}}{2 \cdot D} + \frac{2 \cdot r_{2,m} \cdot D^3}{r_3^4 - D^4}\right)^2}{1 + \left(\frac{r_{2,m}}{2 \cdot D}\right)^2 - \left(\frac{2 \cdot r_{2,m} \cdot r_3^2 \cdot D}{r_3^4 - D^4}\right)^2}$$

Gleichung 1.1 Berechnung des Wärmeverlustfaktors h_s

$$D = \frac{r_{2,F} + L_P + r_{2,R}}{2}$$

Gleichung 1.2 Berechnung der Hilfsgröße C

$$r_{2,m} = \frac{r_{2,F} + r_{2,R}}{2}$$

Gleichung 1.3 Berechnung der Hilfsgröße $r_{2,m}$

Es bedeuten:

D = halber Abstand zwischen den beiden Mediumrohrmittelachsen [m]

h_s = Wärmeverlustfaktor zur Berechnung der Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmung []

L_p = Abstand zwischen den beiden Mediumrohren [m]

$r_{2,F}$ = Außenradius des Vorlaufmediumrohres [m]

$r_{2,R}$ = Außenradius des Rücklaufmediumrohres [m]

$r_{2,m}$ = Außenradius der Mediumrohre, Mittelwert [m]

r_3 = Innenradius des Außenmantels [m]

r_4 = Außenradius des Außenmantels [m]

Hinweis: Im Idealfall ist $r_{2,F} = r_{2,R}$.

6.3.2 Temperatur des Außenmantels

Ein weiteres Problem ergibt sich daraus, dass die analytische Berechnung der Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmung eine über den gesamten Umfang gleiche Temperatur des Außenmantels unterstellt, was in der Praxis /Bild 21...Bild 47/ nicht der Fall ist und durch die FEM-Berechnungen verifiziert wird.

Durch Vergleich von Messungen und FEM-Berechnungen ist es gelungen für die Temperatursensoren Positionen auf dem Außenmantel zu finden, die eine hinreichend genaue Berechnung einer mittleren Temperatur der äußeren Oberfläche des Außenmantels erlauben. Dafür sind nur drei Temperatursensoren in 12-Uhr-Position ($\vartheta_{4,000}$), 3-Uhr-Position ($\vartheta_{4,090}$) und 6-Uhr-Position ($\vartheta_{4,180}$) erforderlich, wobei der Temperatursensor in 3-Uhr-Position doppelt gewichtet wird. Diese Doppelgewichtung ist jedoch ungünstig, da dadurch auch eine Inhomogenität in der Wärmedämmung im Bereich dieses Temperatursensors doppelt gewichtet würde. Abhilfe schafft ein vierter Temperatursensor in 9-Uhr-Position ($\vartheta_{4,270}$).

6.3.3 Messaufbau und Berechnungen zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmung

Nachfolgend ist der Messaufbau in radialer /Bild 60/ und axialer /Bild 61/ Ansicht dargestellt.

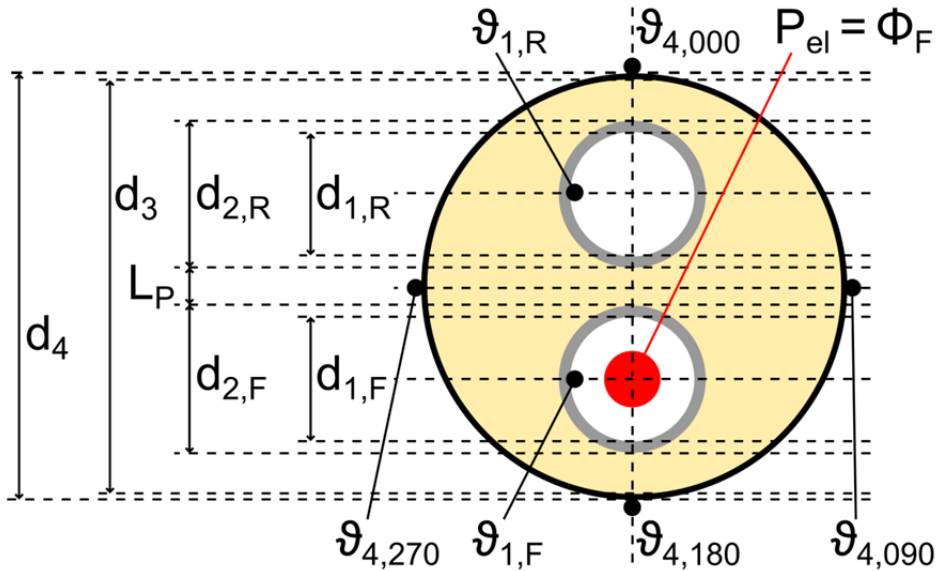


Bild 60 Messaufbau in radialer Ansicht (Definitionen & Einheiten siehe unter /Gleichung 3/)

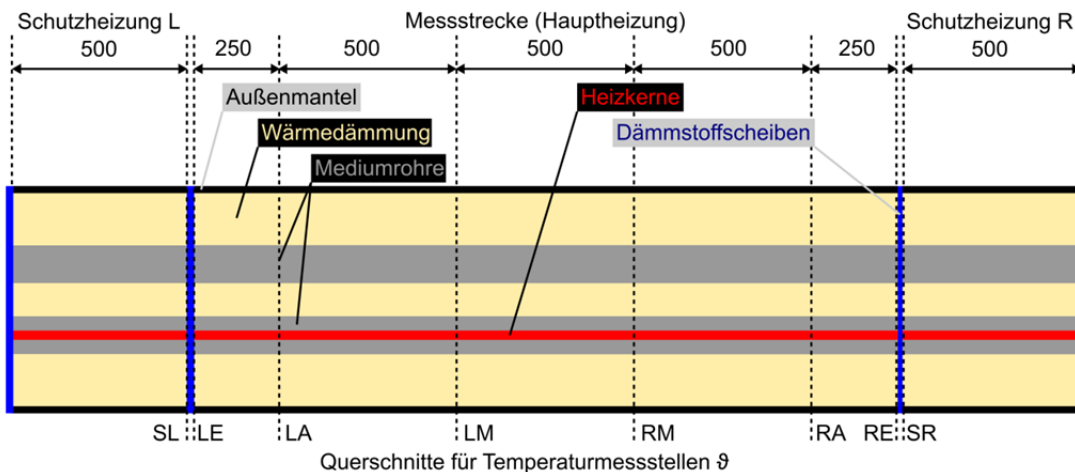


Bild 61 Messaufbau in axialer Ansicht

Die nachfolgenden Gleichungen /Gleichung 2.1/ und /Gleichung 3/ zeigen die Berechnungen der Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmung λ_1 und der zugehörigen Mitteltemperatur der Wärmedämmung $\vartheta_{l,m}$

$$\lambda_1 = \frac{(\Phi_F + \Phi_R) \cdot h_S^{-1}}{4 \cdot \pi \cdot L \cdot \left(\frac{\vartheta_{2,F} + \vartheta_{2,R}}{2} - \vartheta_{3,m} \right)}$$

mit unbeheiztem Rücklauf $\Phi_R = 0$ gilt

$$\lambda_1 = \frac{\Phi_F \cdot h_S^{-1}}{4 \cdot \pi \cdot L \cdot \left(\frac{\vartheta_{2,F} + \vartheta_{2,R}}{2} - \vartheta_{3,m} \right)}$$

Gleichung 2.1 Berechnung der Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmung

$$\vartheta_{2,F} = \vartheta_{1,F} - \frac{\Phi_F \cdot \ln \left(\frac{d_{2,F}}{d_{1,F}} \right)}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot \lambda_S}$$

Gleichung 2.2 Berechnung der Hilfsgröße $\vartheta_{2,F}$

$$\vartheta_{2,R} = \vartheta_{1,R} - \frac{\Phi_R \cdot \ln \left(\frac{d_{2,R}}{d_{1,R}} \right)}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot \lambda_S}$$

mit unbeheiztem Rücklauf $\Phi_R = 0$ gilt

$$\vartheta_{2,R} = \vartheta_{1,R}$$

Gleichung 2.3 Berechnung der Hilfsgröße $\vartheta_{2,R}$

$$\vartheta_{3,m} = \vartheta_{4,m} + \frac{\Phi \cdot \ln \left(\frac{d_4}{d_3} \right)}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot \lambda_C}$$

Gleichung 2.4 Berechnung der Hilfsgröße $\vartheta_{3,m}$

$$\vartheta_{4,m} = \frac{\vartheta_{4,000} + \vartheta_{4,090} + \vartheta_{4,180} + \vartheta_{4,270}}{4}$$

Gleichung 2.5 Berechnung der Hilfsgröße $\vartheta_{4,m}$

$$d_{2,m} = \frac{d_{2,F} + d_{2,R}}{2}$$

Gleichung 2.6 Berechnung der Hilfsgröße $d_{2,m}$

$$D = \frac{d_{2,m} + L_P}{2}$$

Gleichung 2.7 Berechnung der Hilfsgröße D

$$h_S^{-1} = \ln\left(\frac{d_3^2}{4 \cdot D \cdot d_{2,m}}\right) - \ln\left(\frac{d_3^4}{d_3^4 - 16 \cdot D^4}\right) - \frac{\left(\frac{d_{2,m}}{4 \cdot D} + \frac{16 \cdot d_{2,m} \cdot D^3}{d_3^4 - 16 \cdot D^4}\right)^2}{1 + \left(\frac{d_{2,m}}{4 \cdot D}\right)^2 - \left(\frac{4 \cdot d_{2,m} \cdot d_3^2 \cdot D}{d_3^4 - 16 \cdot D^4}\right)^2}$$

Gleichung 2.8 Berechnung des Wärmeverlustfaktors h_S unter Verwendung der Rohrdurchmesser an Stelle der Rohrradien

$$\vartheta_{l,m} = \frac{\vartheta_{2,F} + \vartheta_{3,m}}{2}$$

Gleichung 3 Berechnung der zugehörigen Mitteltemperatur der Wärmedämmung

Es bedeuten (/Gleichung 2.1/, /Gleichung 2.2/, /Gleichung 2.3/, /Gleichung 2.4/, /Gleichung 2.5/, /Gleichung 2.6/, /Gleichung 2.7/, /Gleichung 2.8/, /Gleichung 3/, /Bild 60/):

$d_{1,F}$ = Innendurchmesser des Vorlaufmediumrohres [m]

$d_{1,R}$ = Innendurchmesser des Vorlaufmediumrohres [m]

$d_{2,F}$ = Außendurchmesser des Vorlaufmediumrohres [m]

$d_{2,R}$ = Außendurchmesser des Vorlaufmediumrohres [m]

$d_{2,m}$ = Außendurchmesser der Mediumrohre, Mittelwert [m]

d_3 = Innendurchmesser des Außenmantels [m]

d_4 = Außendurchmesser des Außenmantels [m]

L_P = Abstand zwischen den beiden Mediumrohren [m]

D = halber Abstand zwischen den beiden Mediumrohrmittellachsen [m]

h_S = Wärmeverlustfaktor zur Berechnung der Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmung []

L = Länge der Messstrecke [m]

Φ_F = Wärmestrom vom Vorlauf ausgehend [W]

Φ_R = Wärmestrom vom Rücklauf ausgehend [W]

λ_C = Wärmeleitfähigkeit des Außenmantels [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]

λ_l = Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmung [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]

λ_S = Wärmeleitfähigkeit der Mediumrohre [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]

$\vartheta_{l,m}$ = Mitteltemperatur der Wärmedämmung [°C]

$\vartheta_{1,F}$ = Temperatur der inneren Oberfläche des Vorlaufmediumrohres [°C]

$\vartheta_{1,R}$ = Temperatur der inneren Oberfläche des Rücklaufmediumrohres [°C]

$\vartheta_{2,F}$ = Temperatur der äußeren Oberfläche des Vorlaufmediumrohres [°C]

$\vartheta_{2,R}$ = Temperatur der äußeren Oberfläche des Rücklaufmediumrohres [°C]

$\vartheta_{3,m}$ = mittlere Temperatur der inneren Oberfläche des Außenmantels [°C],

$\vartheta_{4,000}$ = Temperatur der äußeren Oberfläche des Außenmantels [°C],

Position 0° = 12-Uhr-Position

$\vartheta_{4,090}$ = Temperatur der äußeren Oberfläche des Außenmantels [°C],

Position 90° = 3-Uhr-Position

$\vartheta_{4,180}$ = Temperatur der äußeren Oberfläche des Außenmantels [°C],

Position 180° = 6-Uhr-Position

$\vartheta_{4,270}$ = Temperatur der äußeren Oberfläche des Außenmantels [°C],

Position 270° = 9-Uhr-Position

$\vartheta_{4,m}$ = mittlere Temperatur der äußeren Oberfläche des Außenmantels [°C],

Da die Multipolmethode ein Näherungsverfahren ist, enthalten Berechnungen mit den obigen Gleichungen eine relative Ungenauigkeit. Diese wird für Berechnungen mit den obigen Gleichungen mit < 0,1 % angegeben [19].

Bei Doppelrohren mit Mediumrohren aus Metall kann aufgrund der hohen Wärmeleitfähigkeiten der für die Mediumrohre verwendeten Metalle (Stahl, rostfreier Stahl, Kupfer) an Stelle der /Gleichung 2.2/ die Näherung $\vartheta_{2,F} = \vartheta_{1,F}$ verwendet werden. Bei der manuellen Berechnung der Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmung sinkt dadurch der Rechenaufwand geringfügig. Bei der mittlerweile üblichen EDV-gestützten Berechnung der Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmung bietet der Gebrauch dieser Näherung jedoch keinen Vorteil, da für Doppelrohre mit Mediumrohren aus Metall und Doppelrohre mit Mediumrohren aus Polymer oder Mehrschichtverbund unterschiedliche Gleichungen und damit einhergehend auch unterschiedliche Eingabemasken im Berechnungsprogramm verwendet werden müssen. Wird auf den Gebrauch dieser Näherung verzichtet, werden im Berechnungsprogramm für alle Doppelrohre unabhängig vom Material der

Mediumrohre dieselben Gleichungen und damit einhergehend auch dieselben Eingabemasken verwendet, wodurch der Programmieraufwand sinkt.

6.4 Berechnung der Wärmeverluste von Doppelrohren

6.4.1 Berechnung mit der Multipolmethode

Als Wärmeverlust wird die Wärmeabgabe des Doppelrohres an die Umgebung bezeichnet. Für Doppelrohre wird mit der Multipolmethode die Rohrgeometrie in Form eines „Wärmeverlustfaktors“ abgebildet, der dann in die Gleichung zur Bestimmung des Wärmeverlustes eingesetzt wird. Für Doppelrohre liegt die Multipolentwicklung bis zum Dipol [19][20] vor.

$$h_s^{-1} = 2 \cdot \frac{\lambda_i}{\lambda_g} \cdot \ln\left(\frac{4 \cdot Z_C}{d_3}\right) + \ln\left(\frac{d_3^2}{2 \cdot C \cdot d_2}\right) + \sigma \cdot \ln\left(\frac{d_3^4}{d_3^4 - C^4}\right) - \frac{\left(\frac{d_2}{2 \cdot C} - \frac{2 \cdot \sigma \cdot d_2 \cdot C^3}{d_3^4 - C^4}\right)^2}{1 + \left(\frac{d_2}{2 \cdot C}\right)^2 + \sigma \cdot \left(\frac{2 \cdot d_2 \cdot d_3^2 \cdot C}{d_3^4 - C^4}\right)^2}$$

Gleichung 4.1 Berechnung des Wärmeverlustfaktors h_s

$$C = d_2 + L_P$$

Gleichung 4.2 Berechnung der Hilfsgröße C

$$Z = H + \frac{d_4}{2}$$

Gleichung 4.3 Berechnung der Hilfsgröße Z

$$Z_C = H + \frac{d_4}{2} + R_o \cdot \lambda_g$$

Gleichung 4.4 Berechnung der Hilfsgröße Z_C

$$\sigma = \frac{\lambda_i - \lambda_g}{\lambda_i + \lambda_g}$$

Gleichung 4.5 Berechnung der Hilfsgröße σ

$$\vartheta_s = \frac{\vartheta_{1,F} + \vartheta_{1,R}}{2}$$

Gleichung 4.6 Berechnung der Hilfsgröße ϑ_s

$$q = \frac{(\vartheta_s - \vartheta_g) \cdot 4 \cdot \pi \cdot \lambda_i}{h_s^{-1}}$$

Gleichung 5 Berechnung des längenbezogener Wärmeverlustes q

Es bedeuten (/Gleichung 4.1/, /Gleichung 4.2/, /Gleichung 4.3/, /Gleichung 4.4/, /Gleichung 4.5/, /Gleichung 4.6/, /Gleichung 5/):

C = Abstand zwischen den Mittellinien der beiden Mediumrohre

d_2 = Außendurchmesser der Mediumrohre [m]

Bei Wärmeverlustberechnungen wird davon ausgegangen, dass beide Mediumrohre exakt gleiche Geometrien aufweisen.

d_3 = Innendurchmesser des Außenmantels [m]

d_4 = Außendurchmesser des Außenmantels [m]

H = „Verlegetiefe“, Abstand zwischen Rohrscheitel und Geländeoberkante [m]

h_s = Wärmeverlustfaktor zur Berechnung des Wärmeverlustes []

L_p = Abstand zwischen den beiden Mediumrohren [m]

R_o = Oberflächenübergangsdämmwert [$\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$], üblich ist $R_o = 0,0685 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ [7][20]

q = längenbezogener Wärmeverlust [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1}$]

Z = Abstand zwischen Rohrmittelachse und Geländeoberkante [m]

Z_c = korrigierter Wert der Tiefe Z mit Berücksichtigung von R_o

λ_i = Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmung [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]

λ_g = Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]

σ = Dämpfungsfaktor []

$\vartheta_{1,F}$ = Temperatur der inneren Oberfläche des Vorlaufmediumrohres [$^{\circ}\text{C}$]

$\vartheta_{1,R}$ = Temperatur der inneren Oberfläche des Rücklaufmediumrohres [$^{\circ}\text{C}$]

ϑ_g = Temperatur des vom Rohr thermisch unbeeinflussten Erdreichs in Tiefe Z [$^{\circ}\text{C}$]

ϑ_s = Mittelwert der Temperaturen der Mediumrohre [$^{\circ}\text{C}$]

Da die Multipolmethode ein Näherungsverfahren ist, enthalten Berechnungen mit den obigen Gleichungen eine relative Ungenauigkeit. Diese wird für Berechnungen mit den

obigen Gleichungen mit $< 1\%$ angegeben [19]. Zu diesem mathematisch bedingten Fehler kommen weitere praxisbedingte Ungenauigkeiten, auf die nachfolgend eingegangen wird.

6.4.2 Den Gleichungen zugrunde liegende Annahmen

/Gleichung 4.1/ ... /Gleichung 5/ nehmen eine unendlich hohe Wärmeleitfähigkeit für die Mediumrohre und den Außenmantel an. Aus dieser Annahme resultieren thermische Widerstände von Null für die Mediumrohre und den Außenmantel und damit einhergehend jeweils gleiche Temperaturen an der Innenwand und der Außenwand des Vorlaufmediumrohres, an der Innenwand und der Außenwand des Rücklaufmediumrohres sowie an der Innenwand und der Außenwand des Außenmantels. Diese Annahme basiert primär auf dem Umstand, dass die Wärmedämmung eine Wärmeleitfähigkeit aufweist, die gegenüber den übrigen im Doppelrohr eingesetzten Materialien um mindestens etwa eine Zehnerpotenz niedriger liegt, und dass die Wandstärken der Mediumrohre und des Außenmantels sehr viel kleiner als die minimale Wandstärke der Wärmedämmung sind. Unter diesen Annahmen ergeben sich im Gesamtsystem „Doppelrohr im Erdreich verlegt“ die größten Temperaturdifferenzen zwischen den Außenwänden der Mediumrohre und der Innenwand des Außenmantels. Die Temperaturdifferenz zwischen Innenwand des Außenmantels und Außenwand des Außenmantels fällt entsprechend gering aus, womit eine Vernachlässigung derselben zulässig erscheint.

6.4.3 Mediumrohre aus Metall

Bei Mediumrohren aus Metall fällt die Temperaturdifferenz zwischen der Innenwand des Mediumrohres und der Außenwand des Mediumrohres wegen der hohen Wärmeleitfähigkeiten der für die Mediumrohre verwendeten Metalle (Stahl, rostfreier Stahl, Kupfer) vernachlässigbar klein aus.

6.4.4 Mediumrohre aus Polymer oder Mehrschichtverbund

Problematisch ist die obige Annahme für Mediumrohre aus Polymer oder Mehrschichtverbund, bei denen in der Regel etwa $\frac{2}{3}$ der Wandstärke aus Polymeren gebildet wird. Mediumrohre aus Polymer und Mehrschichtverbund weisen deutlich größere Wandstärken auf als hydraulisch äquivalente Mediumrohre aus Metall, wobei dieser Effekt

bei größeren Rohrdimensionen und höherem zulässigen Betriebsdruck zunimmt /Tabelle 5/.

Nennweite	DN 15	DN 20	DN 25	DN 32	DN 40	DN 50
Material						
Stahl (in KMR)	21,3×2,0	26,9×2,0	33,7×2,3	42,4×2,6	48,3×2,6	60,3×2,9
gewellter rostfreier Stahl	16/20×0,25	22/25×0,3	30/34×0,3	39/44×0,4	48/55×0,5	60/66×0,5
Kupfer	18×1,0	22×1,0	28×1,2	35×1,5	42×1,5	54×2,0
vernetztes Polyethylen SDR 11	20×2,0	25×2,3	32×2,9	40×3,7	50×4,6	63×5,8
vernetztes Polyethylen SDR 7.4	20×2,8	28×4,0	32×4,4	40×5,5	50×6,9	63×8,7
Mehrschichtverbund	20×2,5	26×3,0	32×3,0	40×3,5	50×4,0	63×6,0

Tabelle 5 hydraulisch äquivalente Mediumrohre, Dimensionen angegeben in der Form Außendurchmesser×Wandstärke; SDR = Standard Dimension Ratio; SDR 11: 0,6 MPa @ 95 °C; SDR 7.4: 1,0 MPa @ 95 °C

Zu der im Vergleich zu Mediumrohren aus Metall größeren Wandstärke kommt die wesentlich geringere Wärmeleitfähigkeit der Mediumrohre aus Polymer und Mehrschichtverbund, die nur um etwa eine Zehnerpotenz über der Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmung liegt /Tabelle 6/.

Material	λ_{50} [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	¹ Wert gemäß EN 15632-1:2009+A1:2014
Kupfer ¹	384	² teilweise abweichende Herstellerangaben für vernetztes Polyethylen, Polyethylen hoher Dichte, Polyethylen niedriger Dichte und lineares Polyethylen niedriger Dichte
Aluminium	220	
Stahl ¹	50	
rostfreier Stahl ¹	15	
Polyethylen ^{1,2}	0,4	³ bei Einsatz in Doppelrohren, in Einzelrohren um bis zu 0,002 W·m ⁻¹ ·K ⁻¹ niedrigere Werte möglich; PUR/PIR mit Cyclopentan getrieben
Polybuten ¹	0,2	
PUR hart (in KMR) ³	0,026...0,029	
PUR/PIR semiflexibel ³	0,022...0,027	

Tabelle 6 Wärmeleitfähigkeiten von in Doppelrohren eingesetzten Materialien

In Summe führt dies dazu, dass die obige Annahme von thermischen Widerständen von Null und damit einhergehend gleichen Temperaturen an der Mediumrohrinnenwand und

der Mediumrohr Außenwand für Mediumrohre aus Polymer oder Mehrschichtverbund nicht zutrifft. Wird diese Annahme trotzdem verwendet, ergibt die Berechnung einen gegenüber der Realität höheren Wärmeverlust.

Bei Einzelrohren ergibt sich der thermische Widerstand des Rohres von der Innenwand des Mediumrohres bis zur Außenwand des Außenmantels aus einer Reihenschaltung der thermischen Widerstände des Mediumrohres, der Wärmedämmung und des Außenmantels. Aufgrund der Zylindersymmetrie sind der thermische Widerstand und damit die Wärmeleitfähigkeit des Rohres von der Innenwand des Mediumrohres bis zur Außenwand des Außenmantels, die für die Berechnung des Wärmeverlustes benötigt wird, analytisch berechenbar.

Bei der Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmung in Doppelrohren erfolgen die Berechnungen der Temperaturen an den Außenwänden der Mediumrohre nach /Gleichung 2.2/ und /Gleichung 2.3/. Dazu müssen neben den Geometrien und Wärmeleitfähigkeiten der Mediumrohre sowie den Temperaturen an den Innenwänden der Mediumrohre auch die von den Mediumrohren ausgehenden Wärmeströme bekannt sein. Anders als bei der Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmung in Doppelrohren sind die von den Mediumrohren ausgehenden Wärmeströme bei der Berechnung des Wärmeverlustes von Doppelrohren in der Regel nicht bekannt, womit sich eine analytisch unlösbare Gleichung mit zwei Unbekannten ergibt. Die Berechnungen der Temperaturen an den Außenwänden der Mediumrohre sind daher nur numerisch mit entsprechend hohem Rechenaufwand möglich.

6.5 Praktische Grenzen der Berechnung des Wärmeverlustes

Die Berechnung des Wärmeverlustes setzt einen statischen, thermisch eingeschwungenen Zustand voraus. In der Realität wird ein derartiger Zustand praktisch niemals erreicht, da sich die Umgebungsbedingungen (Temperatur, Sonneneinstrahlung, Wind, Niederschlag) ständig ändern. In vielen Wärmenetzen unterliegen zudem die Vorlauf- und die Rücklauftemperatur ständigen signifikanten Änderungen im Bereich mehrerer Kelvin.

Die Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs muss für den gesamten Trassenabschnitt, für den der Wärmeverlust berechnet werden soll, bekannt sein. Die Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs hängt von der Beschaffenheit des Erdreichs ab, die über den Trassenabschnitt Schwankungen unterliegen kann. Die Wärmeleitfähigkeit unterliegt tages- und jahreszeitlichen sowie wetterbedingten Schwankungen.

Der Oberflächenübergangsdämmwert muss für den gesamten Trassenabschnitt, für den der Wärmeverlust berechnet werden soll, bekannt sein. Der Oberflächenübergangsdämmwert hängt von der Beschaffenheit der Oberfläche ab, die im Verlauf des Trassenabschnitts variieren kann. Der Oberflächenübergangsdämmwert unterliegt tages- und jahreszeitlichen sowie wetterbedingten Schwankungen. Zur Berechnung des Wärmeverlustes wird der Oberflächenübergangsdämmwert üblicherweise mit $R_o = 0,0685 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ [7][20] angenommen, was für den Einzelfall eine Näherung unbekannter Genauigkeit darstellt.

Die Wärmeleitfähigkeiten der verschiedenen zu berücksichtigen Materialien sind selbst Funktionen der Temperatur, hängen also primär von Vorlauf- und Rücklauf-temperatur ab. Die Verwendung von Wärmeleitfähigkeiten λ_{50} für die verschiedenen zu berücksichtigen Materialien stellt für den Einzelfall eine Näherung unbekannter Genauigkeit dar.

7. Auswertung der Technikumsversuche

7.1 Messungen in der Klimakammer

Aus den aufgenommenen Messwerten der 27 Messungen wird mit den im vorhergehenden Kapitel dargestellten Gleichungen für jedes gemessene Doppelrohr die Wärmeleitfähigkeit λ_{50} bei einer Mitteltemperatur $\vartheta_{l,m} = 50\text{ °C}$ berechnet. Die Ergebnisse sind in /Tabelle 7/ dargestellt. Anders als bei Angaben der Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmung nach EN 253, EN 15698-1 oder EN 15632-1 mit auf Tausendstel gerundeten Werten erfolgen die Angaben der Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmung nachfolgend mit auf Zehntausendstel gerundeten Werten, wodurch die Werte jeweils drei signifikante Ziffern enthalten.

Doppelrohrtyp	Dimension	$\lambda_{50} [\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$	Messung
KMR; <i>Hersteller 1</i>	DN20+DN20/125	0,0267	/Bild 21/
	DN20+DN20/125	0,0266	/Bild 22/
	DN50+DN50/200	0,0262	/Bild 23/
	DN50+DN50/200	0,0259	/Bild 24/
	DN50+DN50/225	0,0279	/Bild 25/
	DN50+DN50/250	0,0270	/Bild 26/
	DN 100+DN 100/315	0,0261	/Bild 27/
	DN 100+DN 100/315	0,0271	/Bild 28/
KMR; <i>Hersteller 2</i>	DN20+DN20/125	0,0274	/Bild 29/
	DN20+DN20/125	0,0275	/Bild 30/
	DN50+DN50/200	0,0290	/Bild 31/
	DN50+DN50/200	0,0275	/Bild 32/
	DN 100+DN 100/315	0,0266	/Bild 33/
	DN 100+DN 100/315	0,0266	/Bild 34/
flexibles Verbundrohr mit Medium- rohren aus Kupfer	28×1,2+28×1,2/110	0,0226	/Bild 35/
	28×1,2+28×1,2/110	0,0230	/Bild 36/
flexibles Verbundrohr mit Medium- rohren aus gewelltem rostfreiem Stahl	30×0,3+30×0,3/126	0,0266	/Bild 37/
	30×0,3+30×0,3/126	0,0265	/Bild 38/
flexibles Verbundrohr mit Medium- rohren aus Mehrschichtverbund	26×3,0+26×3,0/110	0,0246	/Bild 39/
	26×3,0+26×3,0/110	0,0240	/Bild 40/
flexibles Verbundrohr mit Medium- rohren aus vernetztem Polyethylen; <i>Schaumsystem 1</i>	25×2,3+25×2,3/91	0,0265	/Bild 41/
	25×2,3+25×2,3/91	0,0265	/Bild 42/
	63×5,8+63×5,8/182	0,0260	/Bild 43/
	63×5,8+63×5,8/182	0,0254	/Bild 44/
flexibles Verbundrohr mit Medium- rohren aus vernetztem Polyethylen; <i>Schaumsystem 2</i>	25×2,3+25×2,3/91	0,0233	/Bild 45/
	25×2,3+25×2,3/111	0,0210	/Bild 46/
	25×2,3+25×2,3/126	0,0225	/Bild 47/

Tabelle 7 Wärmeleitfähigkeiten der Wärmedämmungen der 27 gemessenen Doppelrohre

7.2 Messungen im Graben

In der nachfolgenden /Tabelle 8/ sind die Wärmeverluste der vier im Graben gemessenen Doppelrohre dargestellt. Bei den Wärmeverlusten handelt es sich um gemessene Werte.

Doppelrohrtyp	Dimension	$\vartheta_{1,F}$ [°C]	ϑ_{amb} [°C]	q [W·m ⁻¹]	Messung
KMR; <i>Hersteller 1</i>	DN20+DN20/125	69,9	16,6	6,23	/Bild 52/ /Bild 53/
		80,4	15,9	7,52	
		89,5	15,7	8,80	
	DN50+DN50/200	70,2	14,6	8,70	/Bild 54/ /Bild 55/
		80,2	15,0	10,53	
		90,2	15,4	12,33	
	DN 100+DN 100/315	70,2	15,8	11,27	/Bild 56/ /Bild 57/
		79,9	15,9	13,69	
		90,1	15,8	16,98	
flexibles Verbundrohr mit Mediumrohren aus vernetztem Polyethylen; <i>Schaumsystem 1</i>	63×5,8+63×5,8/182	59,8	16,1	8,33	/Bild 58/ /Bild 59/
		69,9	16,0	10,45	
		79,9	15,7	12,53	

Tabelle 8 Wärmeverluste der vier gemessenen Doppelrohre im Graben

Die Diagramme /Bild 53/, /Bild 55/, /Bild 57/ und /Bild 59/ zeigen, dass die mit Abstand größten Temperaturdifferenzen über der Wärmedämmung anliegen, wobei hier allerdings die Wände der Mediumrohre und des Außenmantels gemäß der in Kapitel 6.5.2 erwähnten Näherung mit zur Wärmedämmung gerechnet werden. Daraus folgt, dass die Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs und der Oberflächenübergangsdämmwert bei der Berechnung des Wärmeverlustes nur untergeordnete Rollen spielen.

Da bei diesem Versuchsaufbau der Wärmestrom gemessen wird, können die Temperaturen an der Außenwand des Vorlaufmediumrohres mit /Gleichung 2.2/ und der Innenwand des Außenmantels mit /Gleichung 2.4/ berechnet werden /Tabelle 9/. Gemäß /Gleichung 2.3/ ist die Temperatur an der Außenwand des Rücklaufmediumrohres $\vartheta_{2,R}$ gleich der Temperatur an der Innenwand des Rücklaufmediumrohres $\vartheta_{1,R}$, da in diesem Versuchsaufbau der Rücklauf nicht beheizt wird.

Doppelrohrtyp	$\vartheta_{1,F}$ [°C]	$\vartheta_{2,F}$ [°C]	$\vartheta_{1,R}$ [°C]	$\vartheta_{3,m}$ [°C]	$\vartheta_{4,m}$ [°C]	ϑ_{amb} [°C]	Messung
Dimension							
KMR; <i>Hersteller 1</i>	69,9	69,9	34,8	21,4	21,3	16,6	/Bild 53/
DN20+DN20/125	80,4	80,4	40,2	24,1	24,0	15,9	
	89,5	89,5	43,7	25,0	24,8	15,7	
KMR; <i>Hersteller 1</i>	70,2	70,2	39,5	21,0	20,9	14,6	/Bild 55/
DN50+DN50/200	80,2	80,2	43,2	22,6	22,5	15,0	
	90,2	90,2	46,6	24,1	24,0	15,4	
KMR; <i>Hersteller 1</i>	70,2	70,2	39,5	23,8	23,7	15,8	/Bild 57/
DN 100+DN 100/315	79,9	79,9	43,2	24,5	24,4	15,9	
	90,1	90,1	46,6	24,2	24,1	15,8	
flexibles Verbundrohr mit Mediumrohren aus vernetztem Polyethylen; <i>Schaumsystem 1</i>	59,8	59,0	39,5	22,2	22,1	16,1	/Bild 59/
	69,9	69,1	43,2	23,9	23,8	16,0	
63×5,8+63×5,8/182	79,9	79,2	46,6	25,7	25,6	15,7	

Tabelle 9 Gemessene und berechnete Temperaturen an den Wänden der Mediumrohre und des Außenmantels; $\vartheta_{2,R}$ nicht angegeben, da $\vartheta_{2,R} = \vartheta_{1,R}$

8. Feldversuche

8.1 Emmingen

8.1.1 Messaufbau

Fernwärme- und Stromerzeuger ist ein Biomasse-Blockheizkraftwerk, das sich auf dem Gelände eines landwirtschaftlichen Betriebes außerhalb der Ortschaft Emmingen befindet. Die Ortschaft Emmingen ist an das Biomasse-Blockheizkraftwerk mit einem direkt erdverlegten Doppelrohr KMR DN 100+DN 100/355 angebunden. Der Messschacht ist ca. 960 m von der das Doppelrohr nach Emmingen speisenden Pumpe im Biomasse-Blockheizkraftwerk entfernt /Bild 62/. Verwendet wird der dem Biomasse-Blockheizkraftwerk näher liegende Messschacht. In dem Messschacht der Dimension DN 1000, durch den das Doppelrohr verläuft, und dem umgebenden Erdreich befinden sich die Temperaturmessstellen „Vorlauf Messschacht“, „Rücklauf Messschacht“ und „Außenmantel“ auf Tiefe Rohrmittelachse sowie „Erdreich Rohrnähe“ auf Tiefe Rohrmittelachse, ca. 100 mm entfernt vom Außenmantel und „Erdreich unbeeinflusst“ auf Tiefe Rohrmittelachse, ca. 500 mm entfernt von der Schachtwand, thermisch unbeeinflusst vom Rohr. Die Temperaturmessstellen „Vorlauf Messschacht“ und „Rücklauf Messschacht“ sind über in Vor- und Rücklaufmediumrohr eingeschweißte Tauchhülsen zugänglich. Die Temperaturmessstellen „Außenmantel“, „Erdreich Rohrnähe“ und „Erdreich unbeeinflusst“ sind von dem Messschacht ausgehend in das Erdreich eingebracht. Die Verlegetiefe des Doppelrohres im Bereich des Messschachts beträgt ca. 1,2 m. Die beiden nachfolgenden Bilder /Bild 63/ und /Bild 64/ zeigen die Lage der Temperaturmessstellen im Messschacht und dem umgebenden Erdreich.

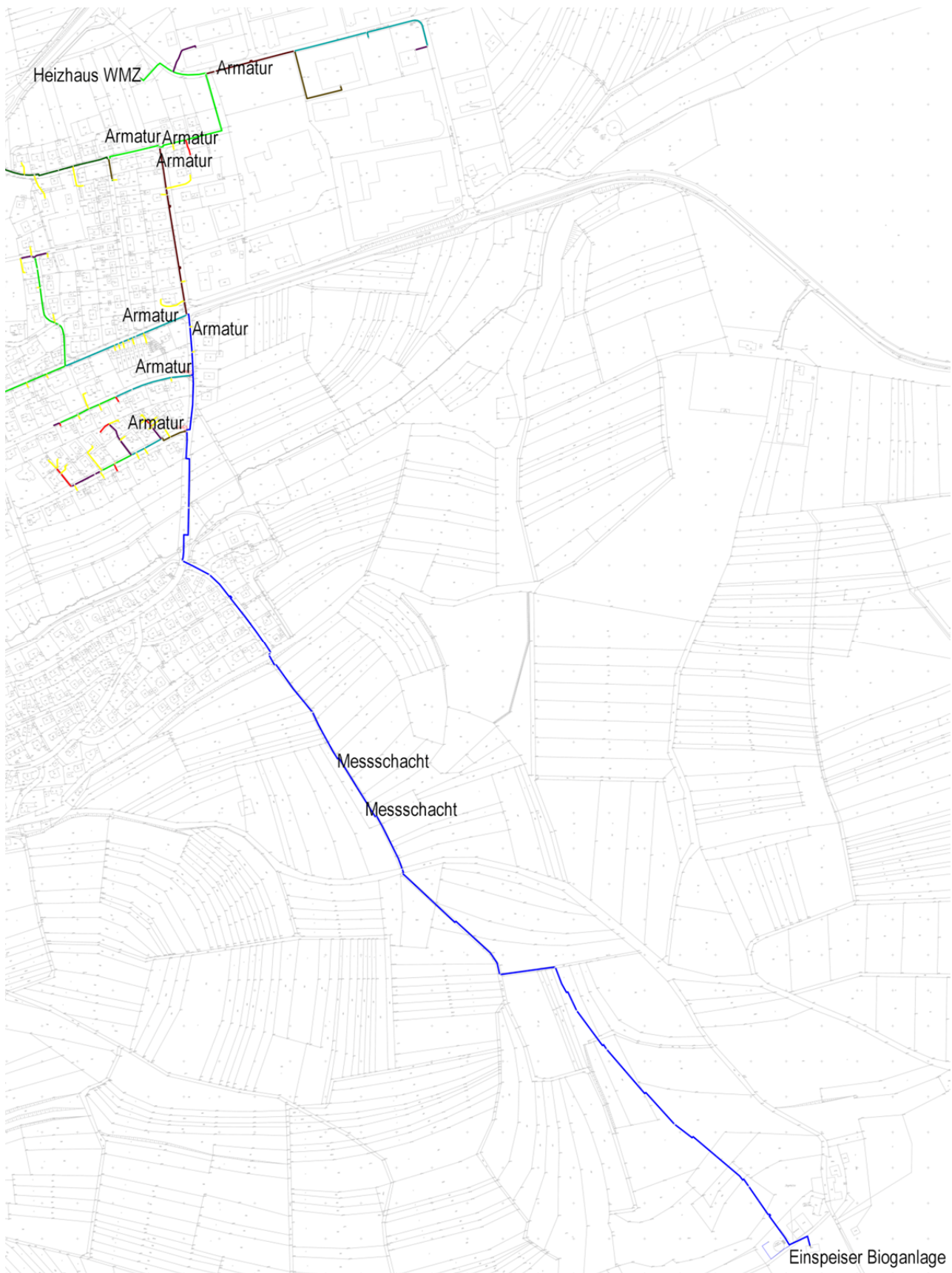


Bild 62 Wärmenetz Emmingen, Ausschnitt mit Biomasse-Blockheizkraftwerk („Einspeiser Biogasanlage“), Messschacht und einigen Hausanschlüssen
Bildquelle: solarcomplex AG

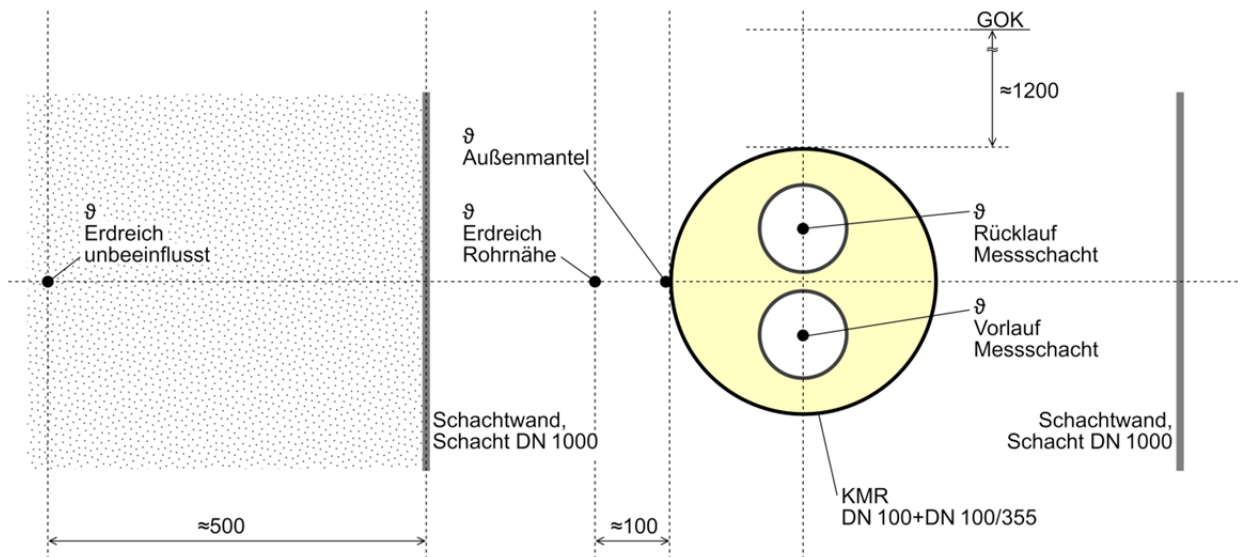


Bild 63 Temperaturmessstellen im Messschacht, Vorderansicht;
Zeichnung nicht maßstäblich

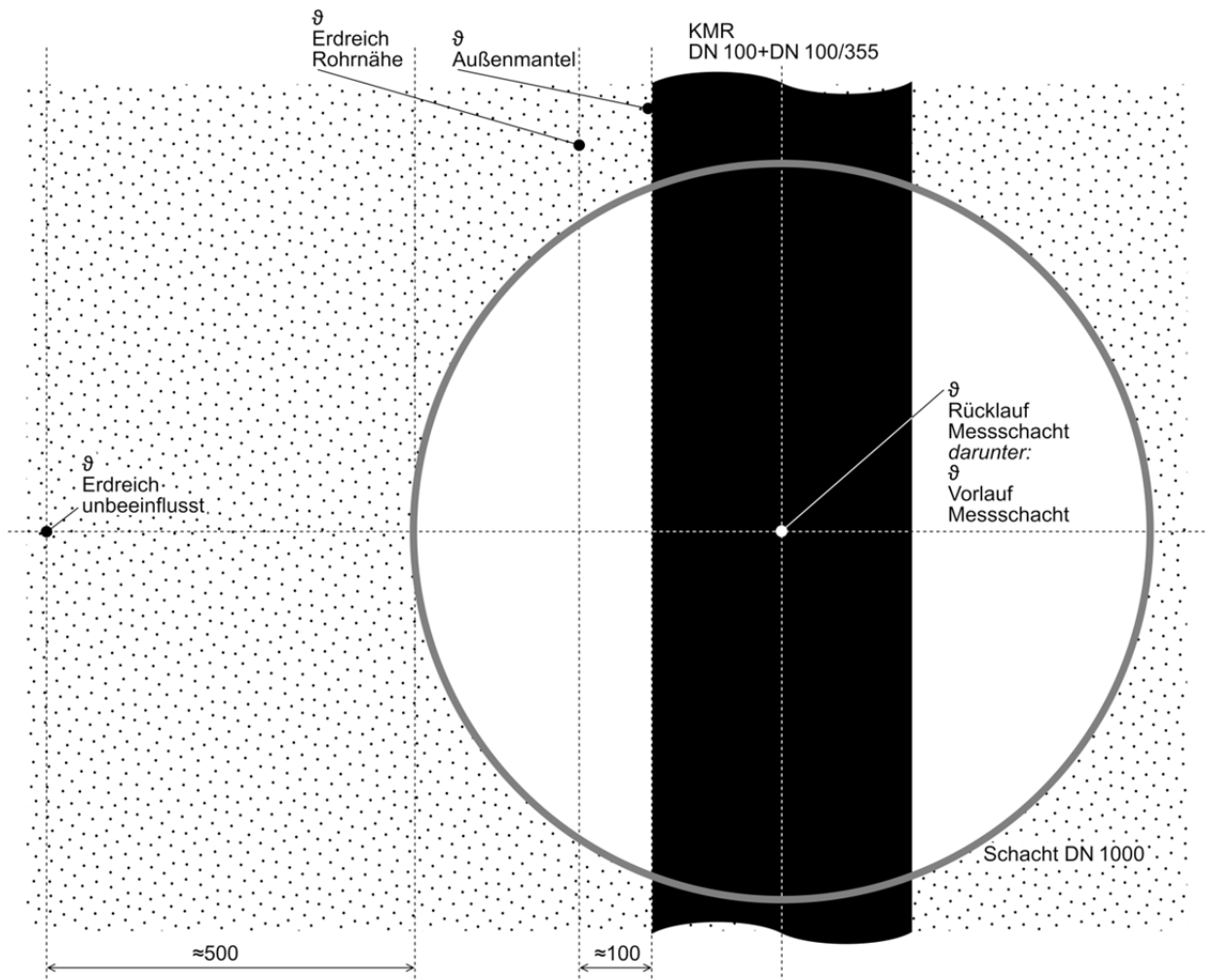


Bild 64 Temperaturmessstellen im Messschacht, Draufsicht (ohne Schachtdeckel); Zeichnung nicht maßstäblich

Die Temperaturmessstellen „Vorlauf BHKW“ und „Rücklauf BHKW“ befinden sich direkt am Biomasse-Blockheizkraftwerk und erfassen somit alle angeschlossenen Wärmekreisläufe. Die Temperaturmessstelle „Umgebung“ befindet sich vor direkter Sonneneinstrahlung geschützt in ca. 2 m Höhe im Freien auf dem Betriebsgelände des Biomasse-Blockheizkraftwerks. Die nachfolgenden Bilder /Bild 65/, /Bild 66/, /Bild 67/, /Bild 68/ und /Bild 69/ zeigen die Situation vor Ort am Ende der Feldmessung.



Bild 65 Messschacht, Schrank für Messtechnik, im Hintergrund speisendes Biomasse-Blockheizkraftwerk



Bild 66 speisendes Biomasse-Blockheizkraftwerk (Zoom-Aufnahme)



Bild 67 Schrank für Messtechnik, Messschacht, im Hintergrund Emmingen



Bild 68 Datenlogger und Akku im Schrank für Messtechnik



Bild 69 Messschacht, darin Doppelrohr KMR DN 100+DN 100/355

8.1.2 Durchführung der Messungen

Die Temperaturmessstellen „Vorlauf Messschacht“, „Rücklauf Messschacht“, „Außenmantel“, „Erdreich Rohrnähe“ und „Erdreich unbeeinflusst“ werden mit einem Datenlogger aufgezeichnet. Der Speicherzyklus liegt bei 2 min. Die Stromversorgung erfolgt über einen Akku im Datenlogger und einen zusätzlichen externen Akku. Die Speicherung der Messwerte erfolgt auf einem nichtflüchtigen Speichermedium. Aufgrund der Situation vor Ort erfolgt mit dem Datenlogger keine über den gesamten Zeitraum kontinuierliche Messung. Die Temperaturmessstellen „Vorlauf BHKW“, „Rücklauf BHKW“ und „Umgebung“ werden von der Steuerung des Biomasse-Blockheizkraftwerks aufgezeichnet. Der Speicherzyklus liegt bei 5 min. Die Speicherung der Messwerte erfolgt auf einem nichtflüchtigen Speichermedium.

8.1.3 Messwerte

Nachfolgend sind die Messwerte für einen Eistag /Bild 70/ und für einen Frosttag /Bild 71/ dargestellt.

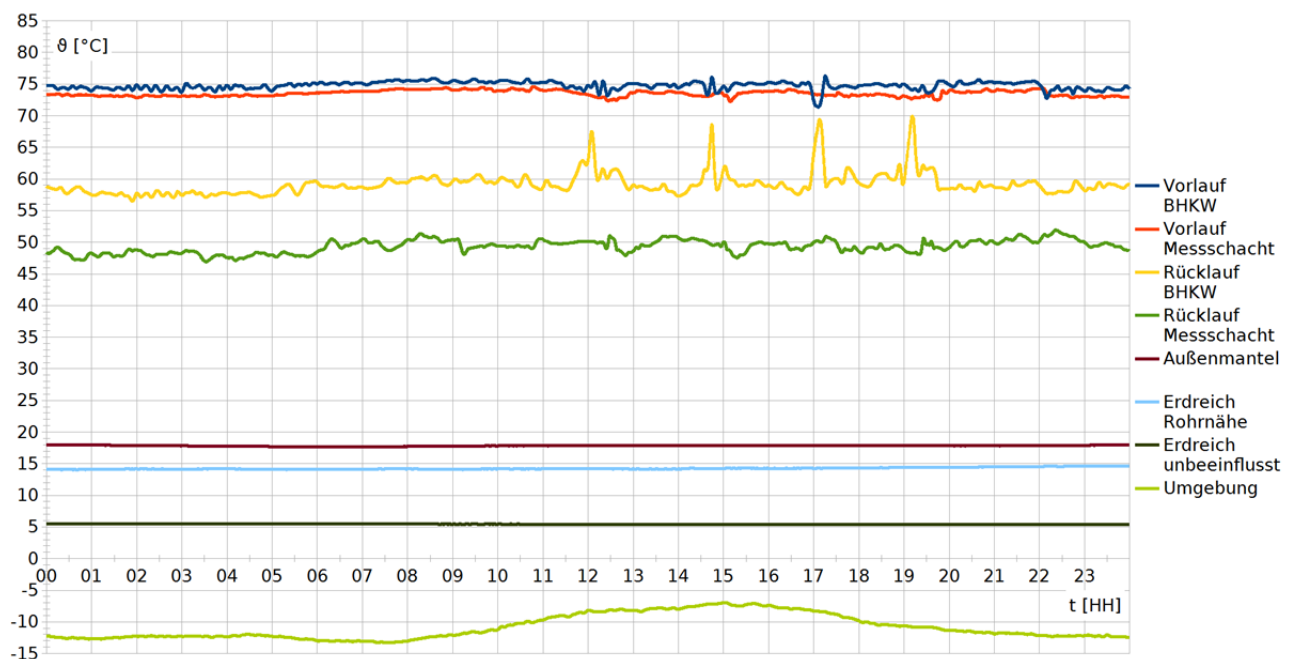


Bild 70 $\vartheta = f(t)$; Messung am 27.02.2018, einem Eistag

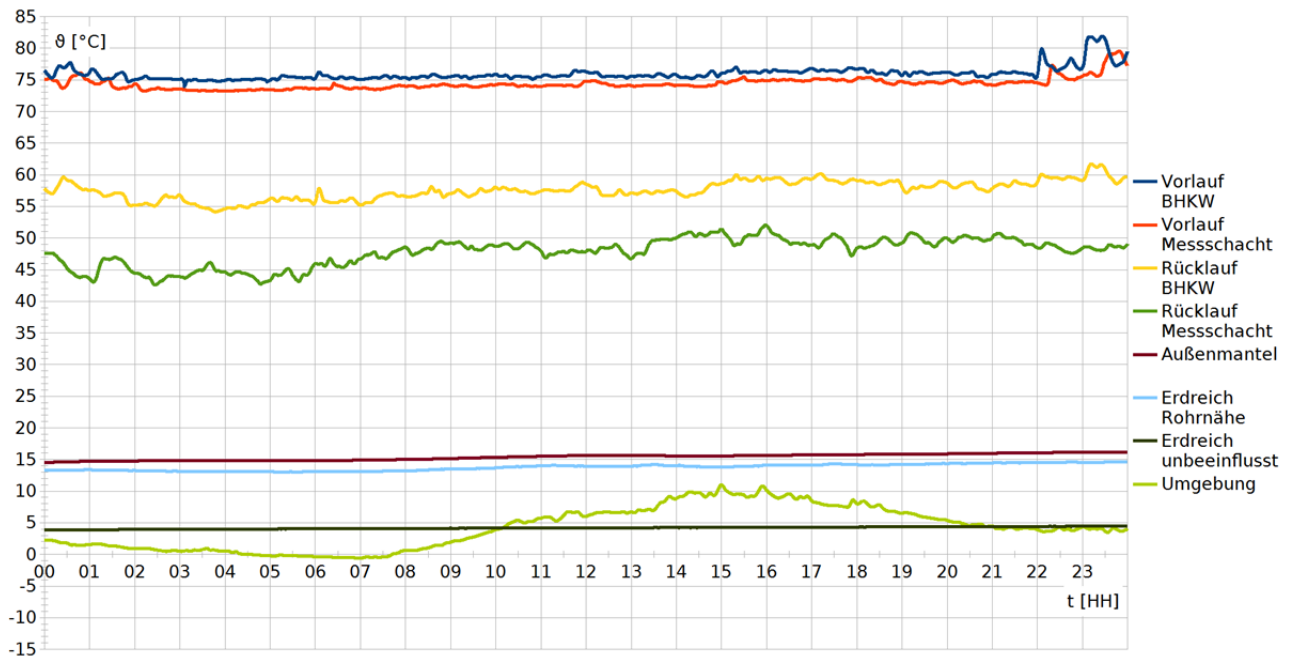


Bild 71 $\vartheta = f(t)$; Messung am 06.03.2018, einem Frosttag

Die Messungen zeigen, dass sich im laufenden Betrieb zu keinem Zeitpunkt im Vor- und Rücklauf weder am Biomasse-Blockheizkraftwerk noch im Doppelrohr im Bereich des Messschachtes thermisch eingeschwungene Zustände einstellen. Die Temperaturen im Vor- und Rücklaufmediumrohr ändern sich kontinuierlich in kurzen Zeitintervallen. Änderungen der Vorlauftemperatur am Biomasse-Blockheizkraftwerk erscheinen im Vorlauf im Bereich des Messschachtes zeitverzögert und mit geringeren Differenzen. Der Zeitverzug ergibt sich aus der Transportzeit des Mediums. Für die geringeren Differenzen der Änderungen sind die Wärmekapazitäten der Mediumrohre und vor allem der Wärmedämmung, in geringem Maße auch die Wärmekapazitäten des Außenmantels und des Erdreichs in Rohrnähe ursächlich, da sie eine Dämpfung der Änderungen der Vorlauftemperatur bewirken. Die Änderungen der Rücklauftemperatur sind vom Verhalten der Verbraucher abhängig, das im Rahmen dieser Messungen nicht erfasst wird. Die höhere Rücklauftemperatur direkt am Biomasse-Blockheizkraftwerk im Vergleich zur Rücklauftemperatur im Bereich des Messschachtes ist über die Erfassung aller angeschlossenen Wärmekreisläufe zu erklären. Die Rücklauftemperaturen der übrigen Wärmekreisläufe werden im Rahmen dieser Messungen nicht erfasst.

Die Speicherzyklen mit 2 min (Datenlogger) und 5 min (Biomasse-Blockheizkraftwerk) bilden die oben erwähnten dynamischen Temperaturänderungen nur unzureichend ab. Diese Temperaturänderungen haben keine Auswirkungen auf die Temperaturen am Außenmantel und in Rohrnähe. Tageszeitliche Änderungen der Umgebungstemperatur haben keine Auswirkungen auf die Temperatur des thermisch vom Rohr unbeeinflussten Erdreichs auf Rohrniveau. Auf diese Temperatur wirken sich nur die jahreszeitlichen Änderungen der Umgebungstemperatur aus.

Nachfolgend erfolgen für zwei Zeiträume Berechnungen des längenbezogenen Wärmeverlustes q des Doppelrohrs auf Basis der Messwerte. Für den unbekannten Oberflächenübergangsdämmwert wird die übliche Näherung mit $R_o = 0,0685 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ [7][20] verwendet. Die Überdeckungshöhe beträgt 1,2 m. Für das Doppelrohr liegen die in der folgenden Tabelle 10 angegebenen Werte vor:

Parameter	Wert
d_2	0,1143 m
d_3	0,3469 m
d_4	0,3594 m
L_P	0,0235 m
λ_I	$0,0260 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

Tabelle 10 Geometrie und Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmung des Doppelrohr KMR DN 100+DN 100/355

Die beiden Zeiträume sind so gewählt, dass während dieser Zeiträume die Temperaturen von Vor- und Rücklauf möglichst geringen Änderungen unterliegen. Die in der nachfolgenden Tabelle 11 angegebenen Temperaturen, die für die nachfolgenden Berechnungen verwendet werden, sind Mittelwerte gebildet aus den Messwerten über den jeweiligen Zeitraum.

Zeitraum	Temperatur	Wert
27.02.2018 06:00...07:00 MEZ	$\vartheta_{1,F}$	73,74 °C
	$\vartheta_{1,R}$	49,59°C
	ϑ_g	5,45°C
06.03.2018 15:00...16:00 MEZ	$\vartheta_{1,F}$	74,87°C
	$\vartheta_{1,R}$	50,27°C
	ϑ_g	4,26°C

Tabelle 11 Temperaturen von Vor- und Rücklauf und des vom Rohr thermisch unbeeinflussten Erdreichs in Tiefe Rohrmittelachse

Die unbekannte Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs wird als Parameter variiert. Der nachfolgend verwendete relative Wärmeverlust q_{rel} wird wie folgt berechnet:

$$q_{rel} = \left(\frac{q}{q(\lambda = 1,00)} - 1 \right) \cdot 100 \%$$

Gleichung 6 Berechnung des relativen Wärmeverlustes

Die Verwendung des längenbezogenen Wärmeverlustes bei einer Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs $\lambda_g = 1,0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ als Bezugswert für den relativen Wärmeverlust ergibt sich daraus, dass dieser Wert in der Norm EN 15632-1:2009 Anhang B.3 [7] als alleiniger Wert für die Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs verwendet wird, und im Normentwurf FprEN 13941-1:2018 [20] als einer von drei Werten (neben $1,6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ und $2,0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) verwendet wird.

$\lambda_g [\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$	$q [\text{W}\cdot\text{m}^{-1}]$	$q_{rel} [\%]$
0,75	13,87	-3,712
1,00	14,40	$\pm 0,000$
1,25	14,74	+2,369
1,60	15,06	+4,537
2,00	15,29	+6,144
2,50	15,48	+7,466
3,00	15,61	+8,367

Tabelle 12 27.02.2018 06:00...07:00 MEZ: längenbezogener Wärmeverlust und relativer Wärmeverlust in Abhängigkeit von der Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs

$\lambda_g [\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$	$q [\text{W}\cdot\text{m}^{-1}]$	$q_{rel} [\%]$
0,75	14,39	-3,712
1,00	14,94	$\pm 0,000$
1,25	15,29	+2,369
1,60	15,62	+4,537
2,00	15,86	+6,144
2,50	16,06	+7,466
3,00	16,19	+8,367

Tabelle 13 06.03.2018 15:00...16:00 MEZ: längenbezogener Wärmeverlust und relativer Wärmeverlust in Abhängigkeit von der Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs

Die relativen Wärmeverluste q_{rel} weisen unabhängig vom Zeitpunkt der Messung immer dieselben Werte auf, da sie nur von der Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs abhängen. Diese Abhängigkeit liegt in einem Bereich, der für Wirtschaftlichkeitsberechnungen relevant sein kann. Daher ist die Berechnung des längenbezogenen Wärmeverlustes unter Berücksichtigung der in Kapitel 6.5 genannten praktischen Grenzen nur bedingt geeignet. Für die Netzauslegung sind die Ergebnisse in der Regel ausreichend genau, für Wirtschaftlichkeitsberechnungen jedoch mitunter schon zu ungenau. Die Berechnung des längenbezogenen Wärmeverlustes ist hingegen gut geeignet für vergleichende Berechnungen etwa von zwei Einzelrohren gegenüber einem Doppelrohr oder von Rohren mit unterschiedlichen Dämmstärken.

8.2 Wald

8.2.1 Messaufbau

Fernwärme- und Stromerzeuger ist ein Biomasse-Blockheizkraftwerk, das sich auf dem Gelände eines landwirtschaftlichen Betriebes außerhalb der Ortschaft Wald befindet. Die Ortschaft Wald ist an das Biomasse-Blockheizkraftwerk mit einem direkt erdverlegten Doppelrohr KMR DN 80+DN 80/355 angebunden. Die Temperaturmessstellen befinden sich in einem Messschacht, der ca. 650 m von der die Leitung nach Wald speisenden Pumpe im Biomasse-Blockheizkraftwerk entfernt ist. Im Messschacht befindet sich eine Doppelarmatur für das Doppelrohr. Über deren Service-Anschlüsse sind Vor- und Rücklauftemperatur für Temperatursensoren zugänglich. Die Verlegetiefe des Doppelrohres im Bereich des Messschachts beträgt ca. 1,2 m. Die nachfolgenden Bilder /Bild 72/, /Bild 73/, /Bild 74/ und /Bild 75/ zeigen die Situation vor Ort am Ende der Feldmessung.



Bild 72 Messschacht, Schrank für Messtechnik, im Hintergrund Reischach und speisendes Biomasse-Blockheizkraftwerk (am rechten Bildrand)



Bild 73 speisendes Biomasse-Blockheizkraftwerk



Bild 74 Messschacht, Schrank für Messtechnik, Blick Richtung Ortschaft Wald (hinter dem Wald, durch den die Straße führt, gelegen)



Bild 75 Messschacht, darin Doppelarmatur für Doppelrohr KMR DN 80+DN 80/355

8.2.2 Durchführung der Messungen

Die Temperaturmessstellen „Vorlauf Messschacht“ und „Rücklauf Messschacht“ werden mit einem Datenlogger aufgezeichnet. Der Speicherzyklus liegt bei 2 min. Die Stromversorgung erfolgt über einen Akku im Datenlogger und einen zusätzlichen externen Akku. Die Speicherung der Messwerte erfolgt auf einem nichtflüchtigen Speichermedium. Aufgrund der Situation vor Ort erfolgt mit dem Datenlogger keine über den gesamten Zeitraum kontinuierliche Messung. Die Temperaturmessstellen „Vorlauf BHKW“, Rücklauf BHKW“ und „Umgebung“ werden von der Steuerung des Biomasse-Blockheizkraftwerks aufgezeichnet. Der Speicherzyklus liegt bei 5 min. Die Speicherung der Messwerte erfolgt auf einem nichtflüchtigen Speichermedium.

8.2.3 Messwerte

Nachfolgend sind die Messwerte für einen frostfreien Tag /Bild 76/ dargestellt.

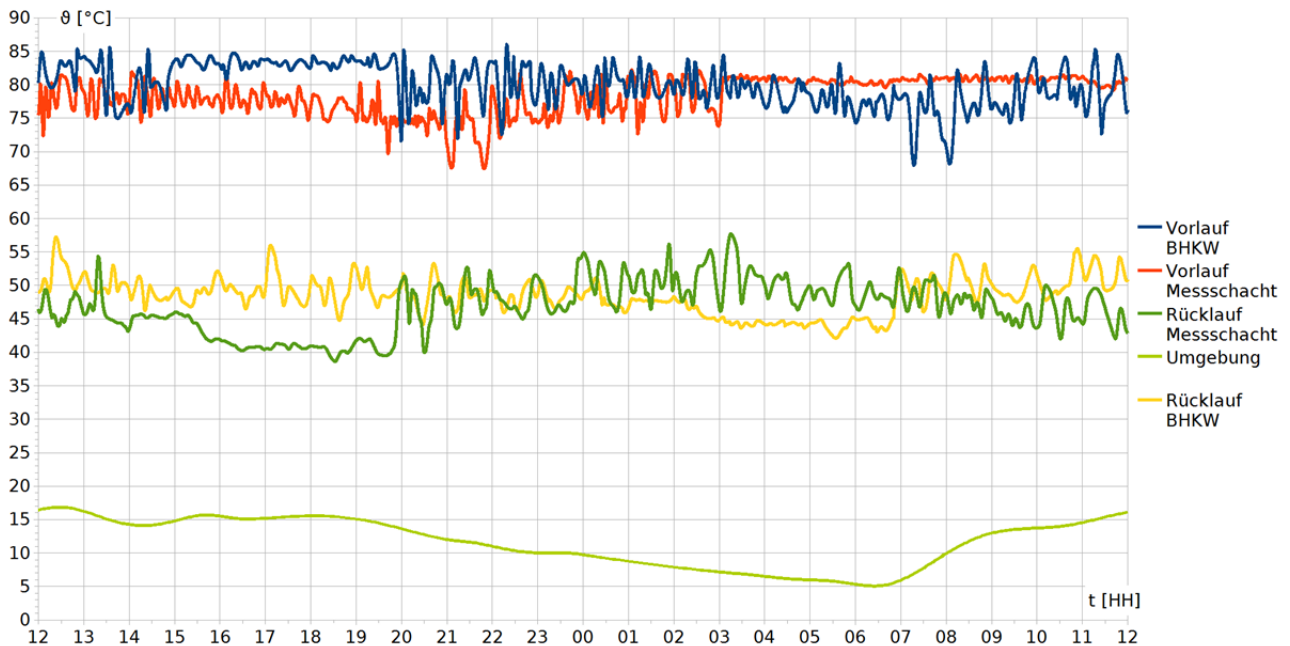


Bild 76 $\vartheta = f(t)$; Messung vom 13.04.2018 12:00 ... 14.04.2018 12:00, zwei frostfreien Tagen

Die Messungen zeigen, dass sich im laufenden Betrieb zu keinem Zeitpunkt im Vor- und Rücklauf weder am Biomasse-Blockheizkraftwerk noch im Doppelrohr im Bereich des Messschachtes thermisch eingeschwungene Zustände einstellen. Die Temperaturen im Vor- und Rücklaufmediumrohr ändern sich kontinuierlich in kurzen Zeitintervallen.

9. Vorschläge für die Normung

9.1 EN 15632-1:2009+A1:2014

Anhang A dieser Norm beschreibt die messtechnische Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmung an Einzelrohren. Dieser Anhang ist um die messtechnische Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmung an Doppelrohren nach dem im Kapitel 6.3.3 dieses Berichts beschriebenen Verfahren zu ergänzen.

Anhang B dieser Norm beschreibt die Berechnung der Wärmeverluste von Einzel- und Doppelrohren. Die in Anhang B2.2 angegebenen Gleichungen sind durch die Gleichungen im Kapitel 6.4.1 dieses Berichts zu ersetzen.

9.2 FprEN 15698-1:2019

Dieser Normentwurf liegt bereits als „final draft“ vor und wird die aktuelle EN 15698-1:2009 zeitnah ersetzen (Stand: 09/2019). Daher wird nachfolgend auf die FprEN 15698-1:2019 [21] Bezug genommen.

Kapitel 5.5.3 dieser Norm fordert die messtechnische Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmung an einem Einzelrohr. Dieser Passus ist zu streichen und durch die messtechnische Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmung an Doppelrohren nach dem im Kapitel 6.3.3 dieses Berichts beschriebenen Verfahren zu ersetzen.

10. Literaturverzeichnis

- [1] EN 253, Fernwärmerohre - Werkmäßig gedämmte Verbundmantelrohrsysteme für direkt erdverlegte Fernwärmenetze - Verbund-Rohrsystem, bestehend aus Stahl-Mediumrohr, Polyurethan-Wärmedämmung und Außenmantel aus Polyethylen; Deutsche und Englische Fassung EN 253:2009+A2:2015
- [2] AGFW, statistischer Hauptbericht 2013, AGFW | Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e. V., 2014
- [3] Schuchardt G. K., "Wärmeverteilverluste von Wärmenetzen in-situ", Veröffentlichung im Rahmen der IAB Wissenschaftstage, Weimar, 2015
- [4] Franz G., Grigull U., „Heat Losses of Buried Pipes“, Wärme- und Stoffübertragung Bd. 2, S. 109-117, 1996
- [5] Franz G., Grigull U., „Wärmeverluste erdverlegter Rohrleitungen“, Wärme-, Klima- und Sanitärtechnik, Juli 1970
- [6] EN 15698, Werkmäßig gedämmte Verbundmanteldoppelrohre für direkt erdverlegte Fernwärmenetze - Teil 1: Verbund-Doppelrohrsystem bestehend aus zwei Stahl-Mediumrohren, Polyurethan-Wärmedämmung und einem Außenmantel aus Polyethylen; Deutsche und Englische Fassung EN 15698-1:2009
- [7] EN 15632, Fernwärmerohre - Werkmäßig gedämmte flexible Rohrsysteme – Teil 1: Klassifikation, allgemeine Anforderungen und Prüfungen; Deutsche Fassung EN 15632-1:2009+A1:2014
- [8] Dalla Rosa A., Svendsen S., „Steady state heat losses in pre-insulated pipes for low energy district heating“, The 12th International Symposium on District Heating and Cooling, September 5th to September 7th, 2010, Tallinn, Estland
- [9] EN 13941, "Design and installation of pre-insulated bonded pipe systems for district heating — Part 1: Design"; English version prEN 13941-1:2015
- [10] Gesetz für die Erhaltung, die Modernisierung und den Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung (Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz) KWKG 2002, Ausfertigungsdatum: 19.03.2002
- [11] Multifunktionale Fernwärmesysteme - LowEx Fernwärme, Multilevel District Heating, Heft 19, Aus Forschung und Entwicklung - Mitteilungen der Forschungsstelle und des Forschungsbeirates des AGFW, April 2012

- [12] DIN 4124, Baugruben und Gräben - Böschungen, Verbau, Arbeitsraumbreiten, 2012
- [13] AGFW-Arbeitsblatt FW401 – Teil 12, AGFW | Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e. V., 2007
- [14] EN ISO 8497, Wärmeschutz – Bestimmung der Wärmetransporteigenschaften im stationären Zustand von Wärmedämmungen für Rohrleitungen (ISO 8497:1994); Deutsche Fassung EN ISO 8497:1996
- [15] EN 12667, Wärmetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten - Bestimmung des Wärmedurchlasswiderstandes nach dem Verfahren mit dem Plattengerät und dem Wärmestrommessplatten-Gerät - Produkte mit hohem und mittlerem Wärmedurchlasswiderstand; Deutsche Fassung EN 12667:2001
- [16] Dahlem K.-H., 2000, "The effect of groundwater on the heat loss of building parts in contact with the ground", in German, Berichte aus Praxis und Forschung des Fachgebiets Bauphysik / Technische Gebäudeausrüstung / Baulicher Brandschutz, Band 1, Promotionsschrift
- [17] Jessberger, H.-L. (1990): Frost im Baugrund. In : Grundbautaschenbuch Teil 1, 4. Auflage, Abschnitt 1.13. Verlag W. Ernst & Sohn Berlin – München.
- [18] Fernwärmerohre – Werkmäßig gedämmte Verbundmantelrohrsysteme für direkt erdverlegte Fernwärmenetze – Rohrverbindungen für Stahlmediumrohre mit Polyurethan-Wärmedämmung und Außenmantel aus Polyethylen, Deutsche und Englische Fassung EN 489:2009
- [19] Wallentén, Petter: Steady-state heat loss from insulated pipes; Lund Institute of Technology, 1991
- [20] EN 13941, Fernwärmerohre – Auslegung und Installation von gedämmten Einzel- und Doppelrohr-Verbundsystemen für direkt erdverlegte Heizwasser-Fernwärmenetze – Teil 1: Auslegung, Deutsche Fassung FprEN 13941-1:2018
- [21] EN 15698, District heating pipes - Bonded twin pipe systems for directly buried hot water networks - Part 1: Factory made twin pipe assembly of steel service pipes, polyurethane thermal insulation and one casing of polyethylene, English Version FprEN 15698-1:2019



**„Entwicklung empirischer
Berechnungsverfahren zur Bestimmung der
Wärmeleitfähigkeit und der Wärmeverluste
von werkmäßig gedämmten
Doppelrohrsystemen auf Grundlage
messtechnischer Verfahren“**

Abschlussbericht

zum IGF Vorhaben Nr.:1 EWN

**erstellt von:
Dipl.-Ing. Mandy Narten & Dipl.-Ing. Oxana Bagusche**

Hannover, 18.09.2019

Leibniz Universität Hannover, Institut für Geotechnik (IGtH),
Appelstr. 9A, 30167 Hannover, <http://www.igth.uni-hannover.de>
Tel.: 0511 – 762 3370, Fax: 0511 – 762 5105, E-Mail: info@igth.uni-hannover.de

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	I
Abbildungsverzeichnis.....	III
Tabellenverzeichnis.....	IX
1. Einleitung.....	1
2. Beschreibung des Forschungsvorhabens	1
3. Ausgangspunkt und Lösungsweg.....	2
3.1 Ausgangspunkt - Stand des Wissens	2
3.2 Lösungsweg	3
4. Arbeitspaket 1.1 – Wärmeverteilung am Doppelrohrmantel	7
4.1 Einleitung	7
4.2 Theoretische Grundlagen – Stand des Wissens	7
4.3 Numerische Ermittlung der Manteltemperatur ungebetteter Doppelrohre	11
4.3.1 Versuchsaufbau innerhalb der Klimakammer	11
4.3.2 Numerisches Modell für die Klimakammer	11
4.3.3 Modellkalibrierung anhand der Versuche in der Klimakammer	18
4.3.4 Parameterstudie für die Klimakammer	21
4.3.5 Auswertung der Parameterstudie für die Klimakammer	21
4.3.6 Zusammenfassung Klimakammer	28
4.4 Numerische Ermittlung der Wärmeverluste gebetteter Doppelrohre	31
4.4.1 Versuchsaufbau Technikumsversuch am FFI	31
4.4.2 Numerisches Modell gebetteter Rohre	31
4.4.3 Modellkalibrierung anhand der FFI-Technikumsversuche	37
4.4.4 Parameterstudie der gebetteten Rohre	41
4.4.5 Auswertung der Parameterstudie der gebetteten Rohre	42
4.4.6 Zusammenfassung Bodenmodell	57
4.5 Zusammenfassung AP1.1	58
5. Arbeitspaket 1.2 – Radiale Bettungsspannungsverteilung in Doppelrohren	60
5.1 Einleitung	60
5.2 Theoretische Grundlagen – Stand des Wissens	61
5.3 Numerisches Modell	65
5.3.1 Allgemeines	65
5.3.2 Referenzmodell	65
5.3.3 Bodeneigenschaften	68
5.3.4 Materialeigenschaften des Rohrverbundsystems	69

5.3.5	Berechnungsschritte.....	70
5.3.6	Kalibrierung des FE-Modells	74
5.4	Parameterstudie	77
5.4.1	Allgemeines.....	77
5.4.2	Überdeckungshöhe	77
5.4.3	Betriebstemperatur	81
5.4.4	Rohrdimension	88
5.4.5	Lagerungsdichte.....	91
5.4.6	Wärmeleitfähigkeit des Bodens.....	94
5.4.7	Steifemodul des Bodens	97
5.4.8	Reibungswinkel des Bodens	99
5.4.9	Bodenwichte.....	101
5.4.10	Poissonzahl des Bodens	104
5.5	Zusammenfassung AP1.2	106
6.	Arbeitspaket 1.3 – Numerische Ermittlung der Schubspannungsverteilung in Doppelrohren infolge Betrieb.....	112
6.1	Einleitung	112
6.2	Numerische Modellierung.....	114
6.2.1	Einzelrohrmodell.....	114
6.2.1	Doppelrohrmodell	115
6.3	Ergebnisse der numerischen Modellierung	116
6.3.1	Einzelrohrmodell.....	116
6.3.2	Doppelrohrmodell	118
6.4	Zusammenfassung	121
7.	Zusammenfassung (AP1.1 bis AP1.3)	122
8.	Literaturverzeichnis	125
Anlage		127
Anlage 1:		128
Anlage 2:		139
Anlage 3:		146

Abbildungsverzeichnis

Seite

Abbildung 4-1: Erdverlegtes Einzelrohr [16]	7
Abbildung 4-2: Darstellung Doppelrohrsystem (nach [10], Anhang B)	9
Abbildung 4-3: Anordnung der Messpunkte am Doppelrohr mit Positionswinkel	11
Abbildung 4-4: Klimakammermodell aus PLAXIS 2D	12
Abbildung 4-5: 15-Knoten-Dreieck-Element (links); 12 Gauß-Punkte (rechts) [4]	12
Abbildung 4-6: Klimakammer - Phase 0 - Initialphase	14
Abbildung 4-7: Klimakammer - Phase 1 – Umgebungstemperatur aktiviert	15
Abbildung 4-8: Klimakammer - Phase 2 – Rohrmaterialien aktiviert.....	15
Abbildung 4-9: Klimakammer - Phase 3 – Vorlauftemperatur aktiviert	16
Abbildung 4-10: Temperaturverteilung (oben), Wärmestromverteilung (unten links), Wärmestromverteilung skaliert (unten rechts) für die Klimakammer.....	16
Abbildung 4-11: Verteilung der Temperatur aus der numerischen Simulation eines Doppelrohrsystems mit Mediumrohrdimension DN50 für $\vartheta_{VL} = 70, 80$ und 90 °C	17
Abbildung 4-12: beispielhafte Temperaturverteilung über den Rohrmantel (links) und Temperaturverteilung entlang des halben Rohrmantels (rechts)	18
Abbildung 4-13: Wärmestromverteilung über den Rohrmantel (links), Wärmestromverteilung entlang des halben Rohrmantels (rechts).....	18
Abbildung 4-14: Simulation des Wärmestroms anhand von Referenzversuchen des FFI.....	19
Abbildung 4-15: Wärmeverluste der Simulation und der Versuche im Vergleich	20
Abbildung 4-16: Klimakammer – KMR DN100 – Wärmeverlust (Beschriftung: Abweichung FEM/FFI [%])	22
Abbildung 4-17: Klimakammer – KMR DN50 – Wärmeverlust (Beschriftung: Abweichung FEM/FFI [%])	23
Abbildung 4-18: Klimakammer – KMR DN20 – Wärmeverlust (Beschriftung: Abweichung FEM/FFI [%])	23
Abbildung 4-19: Klimakammer – PMR63 – Wärmeverlust (Beschriftung: Abweichung FEM/FFI [%])	24
Abbildung 4-20: Klimakammer – KMR PMR25 – Wärmeverlust (Beschriftung: Abweichung FEM/FFI [%])	25
Abbildung 4-21: Klimakammer – Mehrschichtflexrohr – Wärmeverlust (Beschriftung: Abweichung FEM/FFI [%]).....	25

Abbildung 4-22: Klimakammer – Wellrohrflexrohr – Wärmeverlust (Beschriftung: Abweichung FEM/FFI [%])	26
Abbildung 4-23: Klimakammer – Kupferflexrohr – Wärmeverlust (Beschriftung: Abweichung FEM/FFI [%])	26
Abbildung 4-24: Klimakammer – KMR DN50 verstärkt – Wärmeverlust (Beschriftung: Abweichung FEM/FFI [%]).....	27
Abbildung 4-25: Bereich der Mitteltemperatur	28
Abbildung 4-26: Vernetzung Bodenmodell	32
Abbildung 4-27: Vernetzung im und am Rohr (links: Doppelrohrsystem; rechts: Einzelrohrsystem).....	32
Abbildung 4-28: Bodenmodell - Phase 0 - Initialphase (links: Gesamtmodell; rechts: Rohrbereich).....	33
Abbildung 4-29: Bodenmodell - Phase 1 - Umgebungstemperatur aktiviert (links: Gesamtmodell; rechts: Rohrbereich).....	34
Abbildung 4-30: Bodenmodell - Phase 2 - Rohrmaterialien und Boden aktiviert (links: Gesamtmodell; rechts: Rohrbereich).....	34
Abbildung 4-31: Bodenmodell - Phase 3 - Betriebstemperaturen aktiviert (links: Gesamtmodell; rechts: Rohrbereich).....	34
Abbildung 4-32: Temperatur- (links) und Wärmestromverteilung (rechts) für ein Doppelrohrsystem	35
Abbildung 4-33: Temperatur- (links) und Wärmestromverteilung (rechts) für ein Einzelrohrsystem.....	36
Abbildung 4-34: FE-Modell (links) und Temperaturverteilung in Rohrnähe (rechts).....	37
Abbildung 4-35: Vergleich der Temperaturen und des Wärmeverlustes am Rohraußenmantel	38
Abbildung 4-36: Wärmeverlust - Vergleich FFI und FEM für DN20	39
Abbildung 4-37: Wärmeverlust - Vergleich FFI und FEM für DN50	39
Abbildung 4-38: Wärmeverlust - Vergleich FFI und FEM für DN100	40
Abbildung 4-39: Wärmeverlust - Vergleich FFI und FEM für PMR63	41
Abbildung 4-40: Bodenmodell – Überdeckungshöhe absolut	43
Abbildung 4-41: Bodenmodell – Überdeckungshöhe prozentual	43
Abbildung 4-42: Bodenmodell – Übersicht Variation der Betriebstemperatur	45
Abbildung 4-43: Bodenmodell – Variation Rücklauftemperatur absolut.....	45
Abbildung 4-44: Bodenmodell – Variation Rücklauftemperatur prozentual	46
Abbildung 4-45: Bodenmodell – Variation Vorlauftemperatur absolut	47
Abbildung 4-46: Bodenmodell – Variation Vorlauftemperatur prozentual	47

Abbildung 4-47: Bodenmodell – Variation Temperaturbereich prozentual	48
Abbildung 4-48: Bodenmodell – Variation Temperaturbereich prozentual	49
Abbildung 4-49: Bodenmodell – Variation Rohrdimension Wärmeverlust	50
Abbildung 4-50: Bodenmodell – Variation Rohrdimension absolut.....	50
Abbildung 4-51: Bodenmodell – Variation Rohrdimension prozentual.....	51
Abbildung 4-52: Bodenmodell – Variation Rohrdimension, Durchflussfläche prozentual	52
Abbildung 4-53: Bodenmodell – Variation Wärmeleitfähigkeit prozentual	53
Abbildung 4-54: Bodenmodell – Variation Wärmeleitfähigkeit prozentual	54
Abbildung 4-55: Bodenmodell - Übersicht Variation der Umgebungstemperatur	55
Abbildung 4-56: Bodenmodell – Variation Umgebungstemperatur absolut	56
Abbildung 4-57: Bodenmodell – Variation Umgebungstemperatur prozentual	56
Abbildung 5-1: Resultierende radiale Bettungsspannung an einem erdverlegten Rohr [14]	61
Abbildung 5-2: Radiale Spannungsverteilung im Ausgangszustand [1]	62
Abbildung 5-3: Axialverschiebungen und Normalkräfte einer erdverlegten beanspruchten Rohrleitung [1]	63
Abbildung 5-4: Numerisches Modell eines Doppelrohrsystems in PLAXIS 2D.....	66
Abbildung 5-5: Numerisches Modell eines Einzelrohrsystems in PLAXIS 2D	67
Abbildung 5-6: Berechnungsschritt 1 – Die deaktivierten Temperaturrandbedingungen in grau; das aktivierte Interface in orange	71
Abbildung 5-7: Verschiebung (links) und totale Normalspannung (rechts) am Mantelrohr im Berechnungsschritt 1.....	71
Abbildung 5-8: Berechnungsschritt 2 – Die Temperaturrandbedingungen aktiviert.....	72
Abbildung 5-9: Ergebnisse der Konvergenzstudie zur Bestimmung der Zeitdauer bis zum Erreichen des stationären Wärmeflusses.....	73
Abbildung 5-10: Verschiebung (links) und totale Normalspannung (rechts) am Mantelrohr im Berechnungsschritt 2.....	73
Abbildung 5-11: Gesamtverschiebungen des KM-Rohres sowie des umliegenden Bodens im Berechnungsschritt 2.....	74
Abbildung 5-12: Wärmeflussverteilung im Vergleich der FE-Modelle der thermischen Berechnung aus AP 1.1 (links) und der thermo-mechanisch gekoppelten Berechnung aus AP 1.2 (rechts)	75
Abbildung 5-13: Temperaturverteilung im Vergleich der FE-Modelle der thermischen Berechnung aus AP 1.1 (links) und der thermo-mechanisch gekoppelten Berechnung aus AP 1.2 (rechts)	75

Abbildung 5-14: Vergleich der Temperaturverteilung an der Außenfläche des Mantelrohrs infolge der Erwärmung der Mediumrohre im thermischen (links) und thermo- mechanisch gekoppelten Modell (rechts).....	76
Abbildung 5-15: Vergleich mittlerer radialer Spannungen an Doppel- und Einzelrohren in Abhängigkeit der Überdeckungshöhe	79
Abbildung 5-16: Vergleich mobilisierbarer (links) und bezogener (rechts) Reibungskraft der Doppel- und Einzelrohrsysteme in Abhängigkeit der Überdeckungshöhe	80
Abbildung 5-17: Vergleich mittlerer radialer Bettungsspannungen an Doppel- und Einzelrohren in Abhängigkeit der Vorlauftemperatur	82
Abbildung 5-18: Vergleich mobilisierbarer (links) und bezogener (rechts) Reibungskraft der Doppel- und Einzelrohrsysteme in Abhängigkeit der Vorlauftemperatur.....	83
Abbildung 5-19: Vergleich mittlerer radialer Bettungsspannungen an Doppel- und Einzelrohren in Abhängigkeit der Rücklauftemperatur	84
Abbildung 5-20: Vergleich mobilisierbarer (links) und bezogener (rechts) Reibungskraft der Doppel- und Einzelrohrsysteme in Abhängigkeit der Rücklauftemperatur	85
Abbildung 5-21: Vergleich mittlerer radialer Bettungsspannungen an Doppel- und Einzelrohren in Abhängigkeit der Spreizbereichs	86
Abbildung 5-22: Vergleich mobilisierbarer (links) und bezogener (rechts) Reibungskraft der Doppel- und Einzelrohrsysteme in Abhängigkeit des Spreizbereichs	87
Abbildung 5-23: Vergleich mittlerer radialer Spannungen an Doppel- und Einzelrohrsystemen in Abhängigkeit unterschiedlicher Rohrdimensionen	89
Abbildung 5-24: Vergleich mobilisierbarer (links) und bezogener (rechts) Reibungskraft der Doppel- und Einzelrohrsysteme in Abhängigkeit der Rohrdimension	91
Abbildung 5-25: Vergleich mittlerer radialer Bettungsspannung an Doppel- und Einzelrohrsystemen in Abhängigkeit des Erddruckbeiwertes.....	92
Abbildung 5-26: Vergleich mobilisierbarer (links) und bezogener (rechts) Reibungskraft der Doppel- und Einzelrohrsysteme in Abhängigkeit des Erddruckbeiwertes	94
Abbildung 5-27: Vergleich mittlerer radialer Bettungsspannung an Doppel- und Einzelrohrsystemen in Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit des Bodens.....	95
Abbildung 5-28: Vergleich mobilisierbarer (links) und bezogener (rechts) Reibungskraft der Doppel- und Einzelrohrsysteme in Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit des Bodens	96
Abbildung 5-29: Vergleich mittlerer radialer Bettungsspannung an Doppel- und Einzelrohrsystemen in Abhängigkeit des Steifemoduls des Bodens.....	97

Abbildung 5-30: Vergleich mobilisierbarer (links) und bezogener (rechts) Reibungskraft der Doppel- und Einzelrohrsysteme in Abhängigkeit des Steifemoduls des Bodens	98
Abbildung 5-31: Vergleich mittlerer radialer Bettungsspannung an Doppel- und Einzelrohrsystemen in Abhängigkeit des Reibungswinkels des Bodens.....	100
Abbildung 5-32: Vergleich mobilisierbarer (links) und bezogener (rechts) Reibungskraft der Doppel- und Einzelrohrsysteme in Abhängigkeit des Reibungswinkels des Bodens	101
Abbildung 5-33: Vergleich mittlerer radialer Bettungsspannung an Doppel- und Einzelrohrsystemen in Abhängigkeit der Wichte des Bodens	102
Abbildung 5-34: Vergleich mobilisierbarer (links) und bezogener (rechts) Reibungskraft der Doppel- und Einzelrohrsysteme in Abhängigkeit der Wichte des Bodens.....	103
Abbildung 5-35: Vergleich mittlerer radialer Bettungsspannung an Doppel- und Einzelrohrsystemen in Abhängigkeit der Poissonzahl des Bodens.....	104
Abbildung 5-36: Vergleich mobilisierbarer (links) und bezogener (rechts) Reibungskraft der Doppel- und Einzelrohrsysteme in Abhängigkeit der Poissonzahl des Bodens	105
Abbildung 5-37: Prozentuale Änderung der mittleren radialen Bettungsspannung des Doppelrohrsystems in Abhängigkeit der untersuchten Parameter bezogen auf das Referenzmodell.....	107
Abbildung 5-38: Prozentuale Änderung der mittleren radialen Bettungsreaktionsspannung des Doppelrohrsystems in Abhängigkeit der untersuchten Parameter bezogen auf das Referenzmodell.....	109
Abbildung 6-1: Prüfanordnung für die Bestimmung der axialen Scherfestigkeit an einem Einzelrohrsystem [7].....	113
Abbildung 6-2: Prüfanordnung für die Bestimmung der axialen Scherfestigkeit an einem Doppelrohrsystem [10]	114
Abbildung 6-3: Finite-Elemente-Modell eines Einzelrohrsystems	115
Abbildung 6-4: Finite-Elemente-Modell eines Doppelrohrsystems	115
Abbildung 6-5: Vertikale Verschiebungen (U_3) infolge axialer Druckspannung (50 N/mm^2) an einem Einzelrohrmodell	117
Abbildung 6-6: Axiale Scherfestigkeit (σ_{13}) infolge axialer Druckspannung (50 N/mm^2) an einem Einzelrohrmodell.....	117
Abbildung 6-7: Axiale Scherfestigkeit (σ_{13}) in der Kontaktfuge zwischen Mediumrohr und Dämmschicht an einem Einzelrohrmodell	118

Abbildung 6-8: Vertikale Verschiebungen (U_3) infolge axialer Druckspannung (50 N/mm^2) an einem Doppelrohrmodell	119
Abbildung 6-9: Axiale Scherfestigkeit (σ_{13}) infolge axialer Druckspannung (50 N/mm^2) an einem Doppelrohrmodell	120
Abbildung 6-10: Axiale Scherfestigkeit (σ_{13}) in der Kontaktfuge zwischen Mediumrohr und Dämmschicht an einem Doppelrohrmodell.....	121

Tabellenverzeichnis

	Seite
Tabelle 3-1: Versuchsprogramm Technikum.....	5
Tabelle 4-1: Wärmeleitfähigkeit.....	14
Tabelle 4-2: Versuchsprogramm für die Klimakammer	21
Tabelle 4-3: Mitteltemperatur in der Klimakammer.....	30
Tabelle 4-4: Wärmeleitfähigkeit Bodens im Referenzmodell	33
Tabelle 4-5: Versuchsprogramm für das Bodenmodell	42
Tabelle 4-6: Überdeckungshöhe Abweichungen.....	44
Tabelle 4-7: Bodenmodell - Variation Rücklauftemperatur prozentual	46
Tabelle 4-8: Bodenmodell - Variation Vorlauftemperatur prozentual.....	48
Tabelle 4-9: Bodenmodell - Variation Temperaturbereich prozentual	49
Tabelle 4-10: Bodenmodell - Variation Rohrdimension prozentual	52
Tabelle 4-11: Bodenmodell - Variation Rohrdimension, Durchflussfläche prozentual ...	53
Tabelle 4-12: Bodenmodell - Variation Wärmeleitfähigkeit prozentual	54
Tabelle 4-13: Bodenmodell - Übersicht Variation der Umgebungstemperatur	55
Tabelle 4-14: Bodenmodell – Variation Umgebungstemperatur prozentual	57
Tabelle 5-1: Stoffparameter für die Modellierung des Bettungsmaterials	68
Tabelle 5-2: Stoffparameter für die Modellierung des KM-Rohrverbundsystems	70
Tabelle 1-3: Variationsbereiche der Parameterstudie	78
Tabelle 1-4: Prozentuale Abweichungen der Doppel- und Einzelrohrsysteme sowie vom Referenzmodell in Abhängigkeit der Überdeckungshöhe	80
Tabelle 1-5: Prozentuale Abweichungen mobilisierbarer und bezogener Reibungskraft der Doppel- und Einzelrohrsysteme in Abhängigkeit der Überdeckungshöhe	81
Tabelle 1-6: Prozentuale Abweichungen der Doppel- und Einzelrohrsysteme sowie vom Referenzmodell in Abhängigkeit der Vorlauftemperatur.....	83
Tabelle 1-7: Prozentuale Abweichungen mobilisierbarer und bezogener Reibungskraft der Doppel- und Einzelrohrsysteme in Abhängigkeit der Vorlauftemperatur	84

Tabelle 1-8: Prozentuale Abweichungen der Doppel- und Einzelrohrsysteme sowie vom Referenzmodell in Abhängigkeit der Rücklauftemperatur	85
Tabelle 1-9: Prozentuale Abweichungen mobilisierbarer und bezogener Reibungskraft der Doppel- und Einzelrohrsysteme in Abhängigkeit der Rücklauftemperatur	86
Tabelle 1-10: Prozentuale Abweichungen der Doppel- und Einzelrohrsysteme sowie vom Referenzmodell in Abhängigkeit des Temperaturbereichs	87
Tabelle 1-11: Prozentuale Abweichungen mobilisierbarer und bezogener Reibungskraft der Doppel- und Einzelrohrsysteme in Abhängigkeit des Temperaturbereichs	88
Tabelle 5-12: Abmessungen der Doppelrohrmodelle in PLAXIS 2D	88
Tabelle 5-13: Abmessungen der Einzelrohrmodelle in PLAXIS 2D	89
Tabelle 5-14: Prozentuale Abweichungen der Doppel- und Einzelrohrsysteme sowie vom Referenzmodell in Abhängigkeit der Rohrdimension.....	90
Tabelle 5-15: Prozentuale Abweichungen mobilisierbarer und bezogener Reibungskraft der Doppel- und Einzelrohrsysteme in Abhängigkeit der Rohrdimension	91
Tabelle 1-16: Prozentuale Abweichungen der Doppel- und Einzelrohrsysteme sowie vom Referenzmodell in Abhängigkeit des Erddruckbeiwertes	93
Tabelle 1-17: Prozentuale Abweichungen mobilisierbarer und bezogener Reibungskraft der Doppel- und Einzelrohrsysteme in Abhängigkeit des Erddruckbeiwertes	94
Tabelle 1-18: Prozentuale Abweichungen der Doppel- und Einzelrohrsysteme sowie vom Referenzmodell in Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit des Bodens	95
Tabelle 1-19: Prozentuale Abweichungen mobilisierbarer und bezogener Reibungskraft der Doppel- und Einzelrohrsysteme in Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit des Bodens.....	96
Tabelle 1-20: Prozentuale Abweichungen der Doppel- und Einzelrohrsysteme sowie vom Referenzmodell in Abhängigkeit des Steifemoduls des Bodens	98

Tabelle 1-21: Prozentuale Abweichungen mobilisierbarer und bezogener Reibungskraft der Doppel- und Einzelrohrsysteme in Abhängigkeit des Steifemoduls des Bodens	99
Tabelle 1-22: Prozentuale Abweichungen der Doppel- und Einzelrohrsysteme sowie vom Referenzmodell in Abhängigkeit des Reibungswinkels des Bodens	100
Tabelle 1-23: Prozentuale Abweichungen mobilisierbarer und bezogener Reibungskraft der Doppel- und Einzelrohrsysteme in Abhängigkeit des Reibungswinkels des Bodens	101
Tabelle 1-24: Prozentuale Abweichungen der Doppel- und Einzelrohrsysteme sowie vom Referenzmodell in Abhängigkeit der Wichte des Bodens.....	103
Tabelle 1-25: Prozentuale Abweichungen mobilisierbarer und bezogener Reibungskraft der Doppel- und Einzelrohrsysteme in Abhängigkeit der Wichte des Bodens.....	103
Tabelle 1-26: Prozentuale Abweichungen der Doppel- und Einzelrohrsysteme sowie vom Referenzmodell in Abhängigkeit der Poissonzahl des Bodens	105
Tabelle 1-27: Prozentuale Abweichungen mobilisierbarer und bezogener Reibungskraft der Doppel- und Einzelrohrsysteme in Abhängigkeit der Poissonzahl des Bodens.....	106

Schlussbericht zum Projekt

„Entwicklung empirischer Berechnungsverfahren zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit und der Wärmeverluste von werkmäßig gedämmten Doppelrohrsystemen auf Grundlage messtechnischer Verfahren“

1. Einleitung

In dem vorliegenden Bericht werden die Arbeiten und Ergebnisse des Institutes für Geotechnik der Leibniz Universität Hannover (IGtH) zum Projekt „Entwicklung empirischer Berechnungsverfahren zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit und der Wärmeverluste von werkmäßig gedämmten Doppelrohrsystemen auf Grundlage messtechnischer Verfahren“ dargestellt. Das Projekt wird in Zusammenarbeit mit dem Fernwärme-Forschungsinstitut e.V. (FFI) im Zeitraum 01.12.2016 – 31.03.2019 bearbeitet.

2. Beschreibung des Forschungsvorhabens

Im Bereich der Fernwärme ist das Verbundmanteldoppelrohr (im Folgenden als Doppelrohr oder DR bezeichnet), welches zwei Versorgungsleitungen (Vor- und Rücklauf) in einem Rohrsystem vereint (die herkömmliche Verlegeart sind zwei Einzelrohre, auch als ER gezeichnet), ein innovativer Ansatz, um den Ausbau der Netze zu vereinfachen und zu fördern. Die verminderten Kosten bezüglich des Grabenaushubs sowie die prognostizierte Verringerung der Wärmeverluste können die Kosteneffizienz der Fernwärmeleitungen enorm steigern.

Es bestehen allerdings auf Grund von fehlenden Untersuchungen und Erfahrungen oft noch starke Vorbehalte gegenüber der Nutzung von Doppelrohren. Diese beziehen sich vor allem auf das Tragverhalten mit eventuell starker Interaktion der beiden Rohre sowie auch auf die aufwendigeren und somit evtl. auch fehleranfälligeren Arbeiten an Verbindungen, Abzweigen und Armaturen. Hinzu kommt, dass die prognostizierten Einsparungen der Wärmeverluste noch nicht abgesichert messtechnisch erfasst werden können und somit keine verlässlichen Werte genannt werden können.

Die sogenannten Doppelrohrsysteme (Rohrsysteme mit 2 Mediumrohren innerhalb einer Rohrleitung) werden von den Herstellern der Wärmeverteilungssysteme als effizient und preiswert bezüglich deren Wärmeverluste sowie deren Einbaukosten im Vergleich zu den üblichen Einzelrohrsystemen bezeichnet. Jedoch lassen sich die Wärmeverluste dieser Rohrsysteme aufgrund der Komplexität ihrer Geometrie nicht mit einfachen analytischen Berechnungsansätzen ermitteln. Das bisher genutzte Messverfahren der thermischen Eigenschaften an Doppelrohren basiert auf dem Standardmessverfahren für Einzelrohrsysteme nach EN ISO 8497 und wird für Doppelrohre angepasst. Für die Einschätzung der Wärmeverluste wird auf die Finite-Elemente-Methode bzw. Multipolmethode zurückgegriffen, wobei die erzielten Ergebnisse von den Eingangsparametern abhängig und deshalb nicht allgemein übertragbar sind.

In diesem Forschungsvorhaben soll ein einfach einsetzbares empirisches Berechnungsverfahren zur Bestimmung der Wärmeverluste von werkmäßig gedämmten Doppelrohrsystemen auf Grundlage messtechnischer Verfahren entwickelt und auf Normungsebene umgesetzt werden. Da das Doppelrohrsystem in seinem Querschnitt nicht rotationssymmetrisch ist, sind komplexe Temperatur-, Schub- und Normalspannungsverteilungen in der Wärmedämmung zu erwarten. Gleiches gilt für die radiale Aufweitung des Außenmantels und die daraus resultierende Normalspannungserhöhung im Boden. Die Temperatur- sowie Spannungsverteilungen sollen im Rahmen dieses Vorhabens für mögliche Betriebszustände untersucht werden.

3. Ausgangspunkt und Lösungsweg

3.1 Ausgangspunkt - Stand des Wissens

Als Doppelrohrsysteme werden Rohre bezeichnet, welche zwei Mediumrohre (Vorlauf und Rücklauf) beinhalten. Das meist genutzte Doppelrohr ist das Kunststoffmantelrohr (KMR), dessen Mantel aus Polyethylen und dessen Mediumrohre aus Stahl bestehen. Der Zwischenraum wird mit Wärmedämmung, i.d.R. Polyurethanschaum, gefüllt. Bei anderen Rohrtypen werden jeweils andere Materialien für die Komponenten Mediumrohr, Mantelrohr oder Wärmedämmung eingesetzt. KMR-Doppelrohre sind in EN 15698 [10], flexible werkmäßig gedämmte Doppelrohre in EN 15632 [9] genormt.

Zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit von Doppelrohren fordert die EN 15698-1, welche KMR mit zwei Mediumrohren beschreibt, dass eine Messung an einem KMR gleicher Materialien mit nur einem Mediumrohr (einem Einzelrohr) durchgeführt werden soll. Dies stellt ein zylindersymmetrisch aufgebautes Rohrsystem dar, bei welchem sich gleichmäßig über den Umfang eine einheitliche Temperatur einstellt.

Wird allerdings der Aufbau eines Doppelrohrsystems betrachtet, so liegt dort zwar eine Achsensymmetrie, jedoch keine Zylindersymmetrie vor. Messungen an Doppelrohren zeigen daher einen ungleichmäßigen Temperaturverlauf über den Mantel. Somit können die nach EN ISO 8497 [11] an zylindersymmetrischen oder nach EN 12667 [8] an

plattenförmigen Probekörpern ermittelten Wärmeleitfähigkeiten nicht sicher auf Doppelrohrsysteme übertragen werden.

Neben der reinen Geometrie des Systems ist auch bei der Ausbreitung des Dämmmaterials im Inneren des Rohres durch die stark unterschiedliche Geometrie des Hohlraumes eine gleichmäßige Verteilung nicht unbedingt gegeben. Aus den ungleichmäßigen Dämbereichen resultieren daraufhin inhomogene thermische Eigenschaften.

Desweiteren ist Wärmeleitfähigkeit der Dämmung von den Betriebstemperaturen der Mediumrohre abhängig, welche im Doppelrohr verglichen mit dem Einzelrohr zu einer anderen Temperaturverteilung bzw. Mitteltemperatur in der Dämmung führen. Bisher wird auf Basis der Mitteltemperatur von 50 °C die Wärmeleitfähigkeit von λ_{50} zur Berechnung herangezogen. Weiterhin ist zu beachten, dass sich bei der Verlegung von Doppelrohrsystemen verglichen mit zwei Einzelrohren die Außenfläche, über welche der Wärmeübergang zum Erdreich möglich ist, verringert. Dies führt dementsprechend zu geringeren Wärmeverlusten.

Bezüglich des Erdreichs sind außerdem die Wärmeleitfähigkeit des Bodenmaterials sowie die saisonal sehr unterschiedlichen Temperaturen zu beachten, da diese ebenfalls einen wesentlichen Einfluss auf die Temperaturentwicklung des Rohrmantels und somit auch des Rohrquerschnitts haben. Die Wärmeleitfähigkeit des Bodens ist dabei maßgeblich abhängig vom Wassergehalt und dem Verdichtungsgrad bzw. der Trockendichte des anstehenden Bodens.

Werden die Spannungszustände betrachtet, so ist bei dem Doppelrohrsystem, welches einen achsensymmetrischen statt eines rotationssymmetrischen Aufbaus aufweist, mit einer weitaus komplexeren Spannungsverteilung im und um das Rohr herum als bei einem Einzelrohr zu rechnen.

Zur Berechnung der axialen Scherfestigkeit wird bei Doppelrohren nach EN 15698 [10] eine axiale Kraft auf ein Mediumrohr aufgebracht, wobei der Probekörper auf dem Außenmantel gelagert wird. Der Versuch beruht auf den Randbedingungen nach EN 253 [7], welche dort für KMR-Einzelrohre beschrieben werden. Es ist folglich auch hier mit deutlich unterschiedlichen Spannungszuständen der KMR-Einzel- und KMR-Doppelrohrsysteme zu rechnen.

3.2 Lösungsweg

Ziel des Projektes ist die Erstellung bzw. Erweiterung eines einfachen mathematischen Modells zur Abbildung von Doppelrohrsystemen. Die Grundlage dafür bildet ein zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmung und der Wärmeverluste erarbeiteter Versuchsaufbau mit minimalem messtechnischem Aufwand in Anlehnung an EN ISO 8497 [11]. Dieser wird mit Hilfe der numerischen Untersuchungen mit der Finite

Elemente Methode (FEM) entwickelt und durch Technikumsversuche und Feldversuche überprüft.

Im Folgenden werden die vom IGtH zu bearbeitenden Arbeitspakete dieses Forschungsprojekts dargestellt. Das erste Arbeitspaket wird thematisch noch weiter unterteilt.

- AP 1: Untersuchungen der zu erwartenden Temperaturfelder und der daraus resultierenden Spannungsverhältnisse in Dämmung und Boden
 - AP 1.1: Numerische Ermittlung der Wärmeverteilung am Doppelrohr
 - AP 1.2: Numerische Ermittlung der radialen Bettungsspannungsverteilung in Doppelrohren infolge Betrieb
 - AP 1.3: Numerische Ermittlung der Schubspannungsverteilung in Doppelrohren infolge Betrieb
- AP 2: Mitwirkung an der Entwicklung eines Berechnungsmodells
- AP 3: Wissenschaftliche Begleitung der Technikumsversuche
- AP 4: Gesamtauswertung der Ergebnisse und Erstellung des Abschlussberichts

Im Folgenden werden die einzelnen Schritte noch einmal dargestellt.

AP1: Untersuchung rohrinterner Temperaturfelder und resultierender Spannungsverhältnisse in Dämmung und Boden

Im Rahmen des Projektes werden zweidimensionale Finite Elemente Modelle mit dem Programm PLAXIS 2D [4] entwickelt, welche die stationären Temperaturfelder im Doppelrohr für den messtechnischen Versuchsstand nach EN ISO 8497 [11] sowie die Technikumsversuche abbilden können.

Dabei werden durch Parametervariationen bezüglich Rohrquerschnittsgeometrie, Bodentemperatur, Umgebungstemperatur Geländeoberkante, Verlegetiefe und Bettungsmaterial bei verschiedenen Betriebszuständen die Einflussgrößen festgelegt.

Untersucht werden zwei Modelle:

1. Klimakammermodell (Rohr im Luftraum)
2. Bodenmodell (Rohr im Boden)

Desweiteren werden Bettungsreaktionsspannungen infolge temperaturinduzierter Aufweitung an einem Doppelrohr numerisch dargestellt. Mit der Durchführung einer Parameterstudie unter Variation maßgebender Einflussgrößen werden die signifikanten Einflüsse auf die radiale Bettungsspannung ermittelt.

Abschließend werden zur Untersuchung der Schubspannungsverteilung im Doppelrohr unter Axialbelastung dreidimensionale Finite-Elemente-Modelle mit dem Programm ABAQUS [17] erstellt.

Alle Berechnungen an Doppelrohrmodellen werden mit äquivalenten Einzelrohrmodellen verglichen.

AP2: Entwicklung eines Berechnungsmodells

Basierend auf Berechnungsgleichungen für Einzelrohre soll ein analytisches halbempirisches Berechnungsmodell für die Wärmeverluste sowie die Wärmeleitfähigkeit des Dämmstoffes erstellt werden. Dabei sollen die bereits für Einzelrohre existierenden Gleichungen entsprechend weiterentwickelt und angepasst werden. Die Anpassungsgrundlage bilden hierbei die am FFI durchgeführten messtechnischen Versuche sowie die vom IGtH entsprechenden numerischen Simulationen.

AP3: Konzeptionelle Entwicklung der Technikumsversuche

Für Vorversuche zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit des Dämmstoffes sowie der Wärmeverluste in einer Klimakammer nach EN ISO 8497 [11] wird der Versuchsaufbau entsprechend für Doppelrohrsystem angepasst. Durch Überprüfung der Ergebnisse mittels Simulation ist eine Anpassung der Messstellen möglich und eine Optimierung des messtechnischen Aufbaus angestrebt.

Im weiteren Verlauf des Projektes wird entsprechend der Ergebnisse in den Vorversuchen der Erdkasten für die Technikumsversuche messtechnisch ausgestattet. Im Technikum wird das Rohr im Bettungsmaterial unter Betriebsbedingungen untersucht.

Die Technikumsversuche werden vom FFI durchgeführt.

In den Vorversuchen werden 5 verschiedene Rohrtypen sowie drei unterschiedliche Dimensionen unter Variation der Betriebsparameter (beheizter Vorlauf) in der Klimakammer untersucht.

Eine Übersicht der Technikumsversuche ist in Tabelle 3-1 gegeben.

Tabelle 3-1: Versuchsprogramm Technikum

	Klimakammer		Erdkasten	
Rohrtyp	Dimension 1	Dimension 2	Dimension 3	Dimension
KMR	2 x DN20	2 x DN50	2 x DN100	2 x DN20/ 2 x DN50/ 2 x DN100
PMR	2 x 25 x 2,3	2 x 63 x 5,8	-	2 x 63 x 5,8
Mehrschichtflexrohr	2 x 26 x 3,0	-	-	-
Wellrohrflexrohr	30 + 30/126	-	-	-
Kupferflexrohr	2 x 28 x 1,2			-

Im Erdkasten werden daraufhin drei verschiedene Rohrdimensionen eines gängigen Rohrtyps sowie ein weiterer Rohrtyp untersucht. Dabei werden wiederum die Betriebsbedingungen variiert.

AP4 Auswertung der Ergebnisse und Abschlussbericht

Es werden die Ergebnisse aus den Vorversuchen in der Klimakammer bezüglich der messtechnischen Daten und der FEM-Berechnungen ausgewertet. Ebenso werden die Technikumsversuche mit den numerischen Ergebnissen abgeglichen. Der Vergleich aus Vorversuchen und Technikumsversuchen gibt Hinweise auf die Übertragbarkeit der Laborversuche auf die Einbaubedingungen im Erdkasten.

Daraus können Ansätze erarbeitet werden, inwieweit das Berechnungsmodell für die Doppelrohre bezüglich der Einbeziehung des umgebenden Bodens angepasst werden muss.

Die FE-Berechnungen mit Hinblick auf die Spannungsverteilung durch radiale Aufweitung sollen das Rohrverhalten sowie den Unterschied zwischen Einzel- und Doppelrohr verdeutlichen.

Die dreidimensionale Modellierung der axialen Belastung an Doppelrohren dient zur besseren Einschätzung des Scherverhaltens.

Abschließend werden die Ergebnisse vergleichend gegenübergestellt und Ergebnisse bezüglich der Sensitivität verschiedener Parameter dargestellt.

4. Arbeitspaket 1.1 – Wärmeverteilung am Doppelrohrmantel

4.1 Einleitung

Aufgrund eines Temperaturunterschiedes zwischen Fernwärmeleitung und Umgebungstemperatur entstehen Wärmeverluste im Fernwärmenetz. Diese sind auf Grund der höheren Temperatur im Fernwärmerohr von diesem in Richtung Erdreich gerichtet.

Im Rahmen dieses Arbeitspaketes werden die externen Wärmeverluste von einem Doppelrohrsystem (vergleichsweise auch von Einzelrohren) an einem vorgegebenen FE-Modell unter Verwendung des Programms PLAXIS 2D [4] ermittelt. Als externe Wärmeverluste werden dabei die abgehenden Wärmeströme über die kreisförmige Manteloberfläche verstanden, die über den gesamten Umfang des Mantels wirken. Diese stellen den Wärmeverlust des Rohrsystems dar. Durch eine Parameterstudie mit Variation der maßgebenden Einflussgrößen wird die Abhängigkeit der verschiedenen Faktoren auf den externen Wärmeverlust untersucht.

Es werden dabei zuerst vom FFI durchgeführte Versuche an Einzelrohren in einer Klimakammer numerisch nachgebildet. Das numerische Modell wird mit den Ergebnissen aus den Versuchen kalibriert. Dieses Modell dient daraufhin als Grundlage für die Simulation von Einzel- und Doppelrohren im Boden.

4.2 Theoretische Grundlagen – Stand des Wissens

Für die Berechnung der Wärmeverluste für die Einzel- sowie Doppelrohre wird sich der Angaben aus der gängigen Literatur bzw. der Normen bedient.

Einzelrohr:

Zur analytischen Berechnung der Einzelrohre wird ein Ansatz aus der Literatur herangezogen, basierend auf der Wärmestromermittlung an einem mehrschichtigen Rohr (siehe Abbildung 4-1). Dies stellt ein zylindersymmetrisch aufgebautes Rohrsystem dar, bei welchem sich gleichmäßig über den Umfang eine einheitliche Temperatur einstellt.

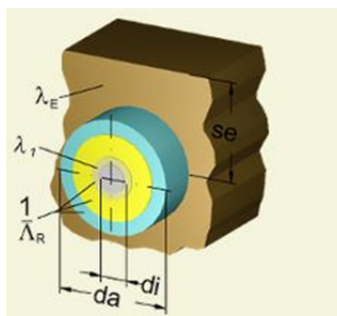


Abbildung 4-1: Erdverlegtes Einzelrohr [16]

Für ein Einzelrohr kann der Wärmeverlust bezogen auf 1 m Rohrlänge wie folgt berechnet werden [16]:

$$q_{gesamt,ER} = \frac{(\vartheta_i - \vartheta_{E0})}{\frac{1}{\Lambda_R} + \frac{1}{\Lambda_E}} \quad (4-1)$$

mit:

$q_{gesamt,ER}$	[W/m]	Wärmeverlust eines Einzelrohres;
ϑ_i	[°C]	Temperatur am Mediumrohr;
ϑ_{E0}	[°C]	Temperatur im Erdreich;
$1/\Lambda_R$	[(mK)/W]	Wärmedurchlasswiderstand der Rohrleitung;
$1/\Lambda_E$	[(mK)/W]	Wärmedurchlasswiderstand des Erdreichs.

Der Wärmedurchlasswiderstand $1/\Lambda_E$ setzt sich dabei entsprechend der folgenden Gleichung zusammen:

$$\frac{1}{\Lambda_E} = \frac{1}{2\pi\lambda_E} \operatorname{arccosh} \frac{2s_e}{d_a} \quad (4-2)$$

Für $s_e/d_i > 2$ gilt vereinfacht:

$$\frac{1}{\Lambda_E} = \frac{1}{2\pi\lambda_E} \ln \frac{4s_e}{d_a} \quad (4-3)$$

mit:

λ_E	[W/(mK)]	Wärmeleitfähigkeit Erdreich;
s_e	[m]	Verlegetiefe Rohrleitung;
d_a	[m]	Außendurchmesser Rohrleitung;
d_i	[m]	Innendurchmesser Rohrleitung.

$1/\Lambda_R$ beschreibt den Wärmedurchlasswiderstand der Rohrleitung und wird berechnet zu:

$$\frac{1}{\Lambda_R} = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{1}{\lambda_1} \ln \frac{d_{a,1}}{d_{i,1}} + \frac{1}{\lambda_2} \ln \frac{d_{a,2}}{2} + \dots + \frac{1}{\lambda_n} \ln \frac{d_{a,n}}{d_{i,n}} \right) \quad (4-4)$$

mit:

$d_{a,n}$	[m]	Außendurchmesser der Schicht;
$d_{i,n}$	[m]	Innendurchmesser der Schicht;
λ_n	[W/(mK)]	Wärmeleitfähigkeit der Schicht.

Doppelrohr:

Die Wärmeverluste des Doppelrohres werden nach dem Berechnungsansatz der DIN 15698-1 [10] ermittelt.

In Anhang B der DIN 15698-1 wird der Berechnungsansatz des Wärmeverlustes von werkmäßig gedämmten und direkt erdverlegten Fernwärmeverbundmanteldoppelrohren (siehe Abbildung 4-2) dargestellt.

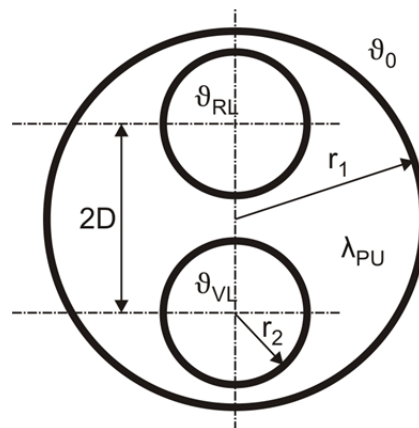


Abbildung 4-2: Darstellung Doppelrohrsystem (nach [10], Anhang B)

Der spezifische Wärmeverlust q_{gesamt} [W/m] pro Trassenmeter berechnet sich dabei aus der Wärmeleitfähigkeit der Dämmung sowie der Temperaturdifferenz zwischen der gemittelten Außentemperatur am Rohrmantel beider Rohre und der Außentemperatur. Die Wärmeleitfähigkeiten der Mantel- und Mediumrohre werden dabei vernachlässigt, da diese Materialien im Vergleich zur Dämmung eine sehr gute Wärmeleitung aufweisen und auf den Wärmestrom nur einen geringfügigen Einfluss haben. Außerdem ist ein Wärmeverlustfaktor zu berücksichtigen. Die Gleichung setzt sich wie folgt zusammen:

$$q_{gesamt,DR} = 4 \pi \lambda_{PU} h_s \left(\frac{\vartheta_{VL} + \vartheta_{RL}}{2} - \vartheta_0 \right) \quad (4-5)$$

mit:

$q_{gesamt,DR}$	[W/m]	Wärmeverlust eines Doppelrohres;
λ_{PU}	[W/(mK)]	Wärmeleitfähigkeit der Dämmung;
h_s	[-]	Wärmeverlustfaktor;
ϑ_{VL} und ϑ_{RL}	[°C]	Temperatur am Rücklauf bzw. Vorlauf;
ϑ_0	[°C]	Temperatur an der Außenseite der Ummantelung.

h_s ist dabei das Produkt aus dem Wärmedurchgangskoeffizienten und der Manteloberfläche und bezieht die Rohrstatik in die Gleichung mit ein.

$$h_s^{-1} = \ln\left(\frac{r_1^2}{2Dr_2}\right) - \ln\left(\frac{r_1^4}{r_1^4 - D^4}\right) - \frac{\left(\frac{r_2}{2D} + \frac{2r_2D^3}{r_1^4 - D^4}\right)^2}{1 + \left(\frac{r_2}{2D}\right)^2 - \left(\frac{2r_2r_1^2D}{r_1^4 - D^4}\right)^2} \quad (4-6)$$

mit:

r_1	[m]	Radius des Mantelrohres;
r_2	[m]	Radius des Mediumrohres;
D	[m]	halber Abstand zwischen den Rohrmitten.

4.3 Numerische Ermittlung der Manteltemperatur ungebetteter Doppelrohre

4.3.1 Versuchsaufbau innerhalb der Klimakammer

Der Versuchsaufbau nach EN ISO 8497 [11] für Einzelrohre wird seitens des FFI in Bezug auf die Doppelrohre entsprechend angepasst. Dabei wird im Doppelrohr nur der Vorlauf (das untere Mediumrohr) beheizt. Es werden die Temperaturen an der Außenfläche des Mantelrohres und an der Innenfläche des Mediumrohres sowie die Umgebungstemperatur und die benötigte elektrische Leistung für die entsprechende Wärmezufuhr gemessen. Da im Gegensatz zur Punktsymmetrie bei Einzelrohren nun eine Achsensymmetrie vorzufinden ist und an der Manteloberfläche des Doppelrohres ungleichmäßige Temperaturen erwartet werden, sind entlang des Mantels fünf Messstellen über eine Rohrhälfte verteilt angeordnet (siehe Abbildung 4-3). Des Weiteren wird der Versuch jeweils bei drei verschiedenen Vorlauftemperaturen durchgeführt.

Eine genaue Beschreibung sowie der Versuchsaufbau sind in [13] bzw. [15] zu finden.

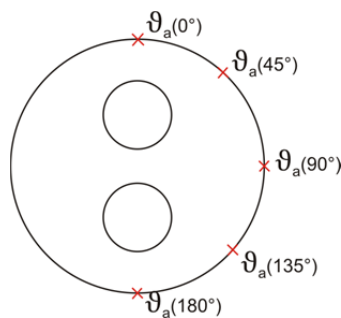


Abbildung 4-3: Anordnung der Messpunkte am Doppelrohr mit Positionswinkel

4.3.2 Numerisches Modell für die Klimakammer

Referenzmodell

Für die Berechnung des Wärmeverlustes wird ein numerisches Modell erstellt, welches die reinen Temperaturverteilungen innerhalb des Rohres darstellt. Dabei werden die jeweiligen Materialien des Rohres durch separierte Bereiche abgebildet, denen die jeweiligen Materialeigenschaften zugewiesen werden können (siehe Abbildung 4-4). Es wird der Laborversuch in einer Klimakammer nach EN ISO 8497 [11] für Doppelrohre modelliert. Dabei wird lediglich die untere Versorgungsleitung (Vorlaufleitung auch als VL bezeichnet) beheizt. Zur Nachbildung des Luftraums in der Klimakammer wird im Modell eine thermische Grenzschicht ausgebildet, welche die im Versuch vorhandene konstante Raumtemperatur abbildet. Gemessen wird dabei der Wärmestrom, welcher durch das Beheizen des Mediumrohres nach außen dringt und über die Mantelrohroberfläche an die Luft abgegeben wird.

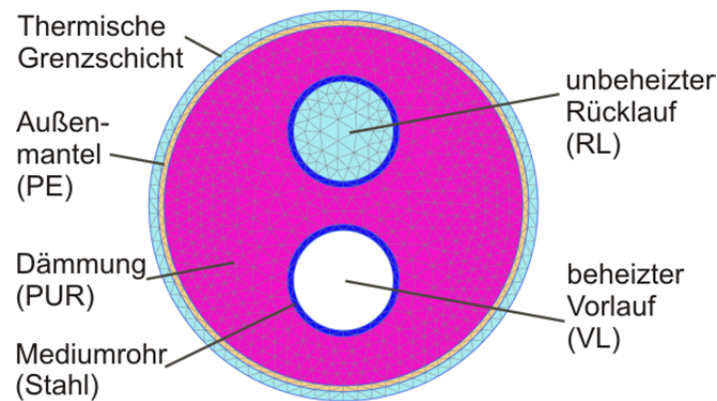


Abbildung 4-4: Klimakammermodell aus PLAXIS 2D

Das Klimakammermodell setzt sich aus mehreren „Tunnelementen“ zusammen, welche die Materialgrenzen der verschiedenen Bereiche (von außen nach innen: Luftraum außen, Mantelrohr, Dämmung, Mediumrohr & Luftraum innen) des Fernwärmerohres darstellen. Die Tunnel werden jeweils aus zwei Halbschalen konstruiert, welche sich in Rohrscheitel und -sohle berühren.

In der Finite-Elemente-Methode (FEM) wird der als Kontinuum angenommene Berechnungsbereich in eine endliche Anzahl an Elemente zerlegt und über Ansatzfunktionen, die die Variation einer unbekannten Größe innerhalb eines Elements beschreiben, das Gesamtverhalten dargestellt. [18]

Für die numerischen Berechnungen wird ein Modell im ebenen Verformungszustand („plane strain“) mit dem Programm PLAXIS 2D [4] erstellt. Dabei werden die einzelnen Bereiche, wie in Abbildung 4-5 dargestellt, in 15-Knoten-Dreieck-Elemente mit je 12 Gauß-Punkten angelegt.



Abbildung 4-5: 15-Knoten-Dreieck-Element (links); 12 Gauß-Punkte (rechts) [4]

Basismodell (KMR Doppelrohr DN50 in Klimakammer):

Knoten: 21.030
15-Knoten-Elemente: 1.402

Das numerische Modell der Doppelrohre wird unter Vernachlässigung der axialen Wärmeverluste q_{ax} sowie der transienten Einflüsse ($d/d_t \approx 0$) erstellt. Daraus ergibt sich, dass die Wärmeverluste q überwiegend in radialer Richtung gerichtet sind und in ihrer

Größenordnung von der tangentialen Position innerhalb der Doppelrohre abhängen: $q = q_{\text{rad}}(\varphi)$, wobei am Scheitel $\varphi = 0^\circ$, am Kämpfer $\varphi = 90^\circ$ und an der Sohle $\varphi = 180^\circ$. Des Weiteren führt die axiale Symmetrie des Modells dazu, dass die Verteilung der Wärmeverluste links und rechts der vertikalen Mittelachse identisch sind und somit $q_{\text{rad}}(\varphi) = q_{\text{rad}}(-\varphi)$ gilt. Das FE-Modell wird anhand der am FFI durchgeführten Versuche in der Klimakammer kalibriert.

Die Modellgröße variiert je nach Rohrgeometrie leicht. Der Außenring des Basismodells weist einen Gesamtradius von 10,5 cm (10,0 cm Mantelrohrradius + 0,5 cm Luftring) auf. Die Radien der weiteren Modelle liegen zwischen 5,05 cm und 15,75 cm und beinhalten ebenfalls jeweils den 0,5 cm großen Luftraum um den Mantel herum als thermische Grenzschicht.

Modellrandbedingungen für die Temperatur

Als Umgebungstemperatur des gesamten Modells wird für den Vergleich mit den Versuchen am FFI die jeweilige gemessene Temperatur in der Klimakammer, für die weiteren Berechnungen die Temperatur auf 23 °C, als Mittelwert der in der Klimakammer vorherrschenden Temperatur, festgelegt. Diese Temperatur wird als Randbedingung auf den Außenring des Modells aufgegeben. Eine weitere Temperaturrandbedingung ist am Innenrand des unteren Mediumrohres (VL) angebracht, welche das beheizte Rohr simuliert.

Die Temperatur im Vorlauf wird entsprechend des Versuchs etwa zwischen 60 °C und 90 °C variiert.

Materialeigenschaften

Für das Modell der Vorversuche in der Klimakammer sowie die Berechnung des reinen Wärmetransportes im Bodenmodell ist der maßgebende Parameter die Wärmeleitfähigkeit λ . Diese wird den jeweiligen Materialbereichen des Modells zugeordnet.

Für das Basismodell in der Klimakammer ist ein Kunststoffverbundmantelrohr (KM-Rohr) zu prüfen, welches in der Fernwärme momentan am häufigsten zum Einsatz kommt. Maßgeblich für die thermische Berechnung ist die Wärmeleitfähigkeit der verschiedenen Materialien.

Die maßgebenden Werte für die Materialien des Basismodells sind Tabelle 4-1 zu entnehmen.

Bei der Berechnung der Spannungszustände (AP1.2 und AP1.3) werden weitere Parameter zur Charakterisierung der Materialeigenschaften benötigt, welche dann in den entsprechenden Kapiteln dargestellt werden.

Tabelle 4-1: Wärmeleitfähigkeit

Material	λ [W/(mK)]
Luft	0,026
Mantelrohr (PE: Polyethylen)	0,4
Dämmung (PUR: Polyurethan Schaum)	0,027
Mediumrohr (Stahl P235)	55,2

Berechnungsschritte in PLAXIS

Berechnungsschritt 1

Der erste Berechnungsschritt dient der Berechnung des Primärspannungszustands des vollständigen Modells mit der Berechnungsfunktion „flow only“ (siehe Abbildung 4-6). Da es im aktuellen Modell nur um die reine Temperaturberechnung geht, erfolgt durch diesen Berechnungsschritt keine Veränderung der Temperaturen.

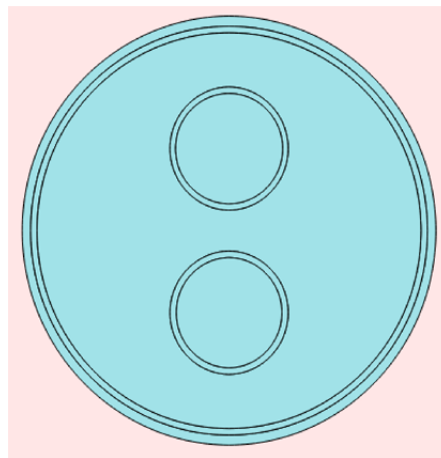


Abbildung 4-6: Klimakammer - Phase 0 - Initialphase

Berechnungsschritt 2

Im zweiten Berechnungsschritt wird die vorgegebene Temperatur in der Klimakammer als Umgebungstemperatur aufgegeben. Dies geschieht über eine Temperaturrandbedingung am Außenrand des Modells (siehe Abbildung 4-7), welcher den Rohrmantel mit einem Luftraum von 0,5 cm umschließt. Das Modell wird dadurch gleichmäßig auf die entsprechende Temperatur erwärmt. Diese und die folgenden Berechnungen werden mit der stationären Wärmefeldberechnung („Steady state thermal flow“) durchgeführt.

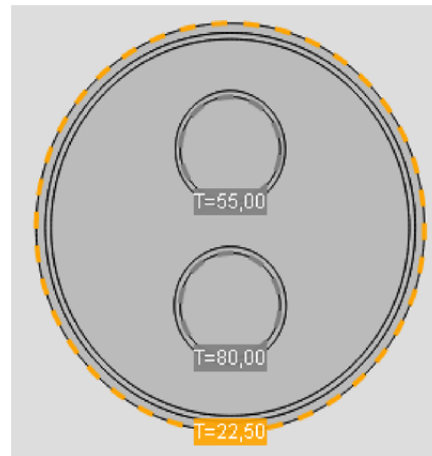


Abbildung 4-7: Klimakammer - Phase 1 – Umgebungstemperatur aktiviert

Berechnungsschritt 3

In diesem Schritt werden die Rohrmaterialien aktiviert. Für die Versuche in der Klimakammer wird der Vorlauf mit einer vorgegebenen Temperatur beheizt, der Rücklauf bleibt unbeheizt. Dies wird im Modell über eine Temperaturrandbedingung am Vorlauf und den Luftraum ohne jegliche Temperaturvorgabe im Rücklauf realisiert. Im Modell wird dabei der Bereich innerhalb des unteren Mediumrohres (VL) entfernt (siehe Abbildung 4-8), da dieser durch die vorgegebene Temperaturrandbedingung am unteren Mediumrohr für die Temperaturberechnung nicht relevant ist.

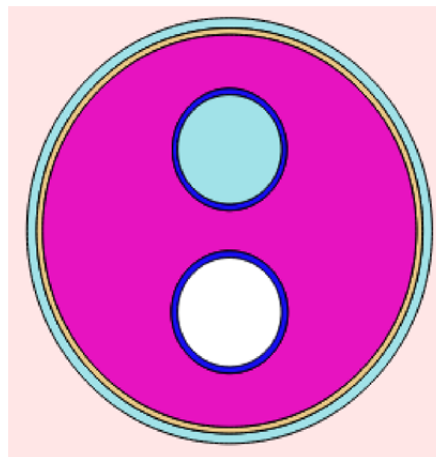


Abbildung 4-8: Klimakammer - Phase 2 – Rohrmaterialien aktiviert

Berechnungsschritt 4

Der letzte Berechnungsschritt dient nun der Aktivierung der Temperaturrandbedingung am unteren Mediumrohr (siehe Abbildung 4-9), dem beheizten Vorlauf (variiert im Bereich zwischen 60 °C und 90 °C). Dabei strömt die Wärme vom Mediumrohr nach außen, bis sich ein Gleichgewichtszustand einstellt. Die dadurch erhaltene Temperaturverteilung am Rohraußenmantel dient dann der Berechnung des Wärmeverlustes für das Rohrsystem.

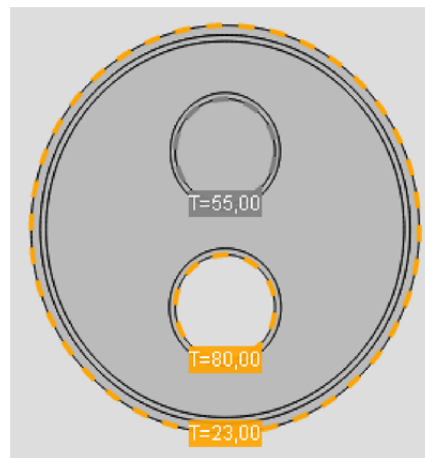


Abbildung 4-9: Klimakammer - Phase 3 – Vorlauftemperatur aktiviert

Berechnung des Wärmestroms

Nach der FE-Berechnung können die Temperatur- und Wärmestromverteilungen im gesamten Rohrsystem dargestellt werden. Ein Beispiel für die Ergebnisse des Klimakammerversuchs ist in Abbildung 4-10 zu sehen. Aufgrund des extrem hohen Wärmeflusses innerhalb des Stahls (links unten im oberen Mediumrohr zu sehen) wird der Wärmestrom noch einmal in einer anderen Skalierung dargestellt, um die Verteilung innerhalb der Dämmung sichtbar werden zu lassen.

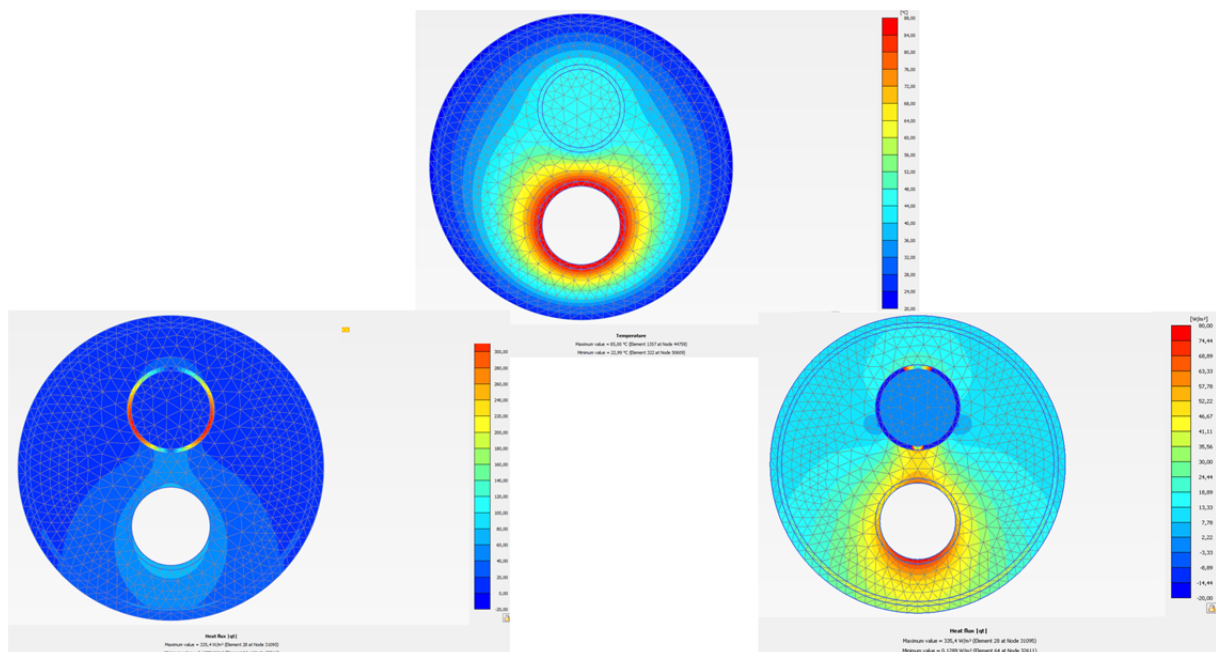


Abbildung 4-10: Temperaturverteilung (oben), Wärmestromverteilung (unten links), Wärmestromverteilung skaliert (unten rechts) für die Klimakammer

Jedes Versuchsrohr wird mit drei unterschiedlichen Mediumtemperaturen mit jeweils 10 K Differenz beheizt. Ein Beispiel dazu siehe Abbildung 4-11.

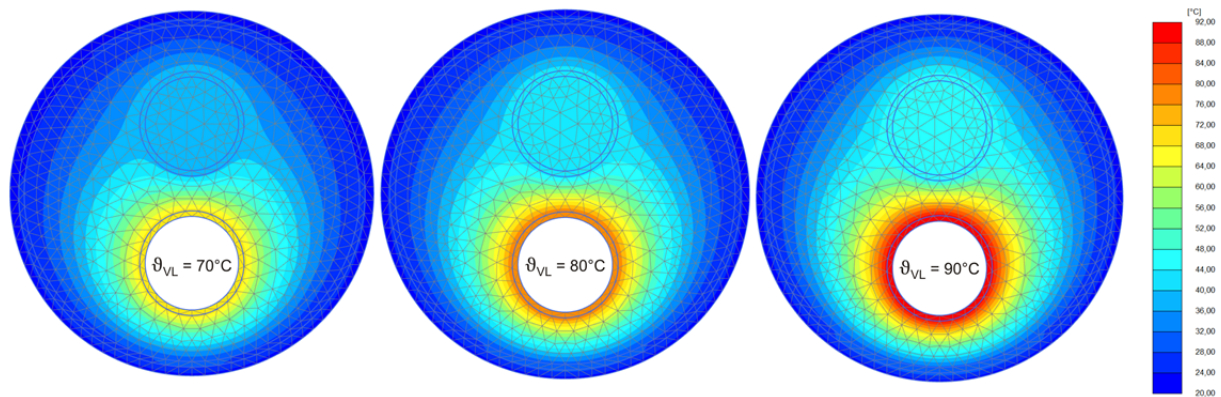


Abbildung 4-11: Verteilung der Temperatur aus der numerischen Simulation eines Doppelrohrsystems mit Mediumrohrdimension DN50 für $\vartheta_{VL} = 70, 80$ und 90°C

Zur weiteren Berechnung werden die Temperaturverteilung am Außenmantel sowie die Wärmestromverteilung am Außenring des Systems abgegriffen. Aus der Wärmestromverteilung wird mit Integration über den Ringdurchmesser der Wärmeverlust des Rohrsystems berechnet.

Dabei werden jeweils die Spannungspunkte auf dem Außendurchmesser ausgewählt, um die Temperatur am Außenmantel auszuwerten. Entsprechend werden die Spannungspunkte auf dem Ring des Doppelrohrsystems abgegriffen, um daraus den Wärmeverlust für 1 m Rohrsystem zu berechnen und eine entsprechende Verteilung darstellen zu können.

Ein Beispiel für eine Temperatur- bzw. Wärmestromverteilung soll für ein Doppelrohr mit zwei Mediumrohren DN50 mit einer Vorlauftemperatur von 85°C und einer Umgebungstemperatur von 23°C in Abbildung 4-12 einmal dargestellt werden.

In den Abbildungen sind die Werte für die Temperatur und den Wärmestrom jeweils einmal über den Rohrmantel verteilt und entlang des Rohres über den Positionswinkel abgewickelt (Scheitel: 0° , Kämpfer: 90° und Sohle: 180°) dargestellt.

Dabei ist eine Verlaufscharakteristik zu erkennen, die sich bei jedem Rohr in ähnlicher Weise widerspiegelt. Die größten Temperaturen und Wärmeströme sind am Rohrboden zu verzeichnen, da dort die beheizte Versorgungsleitung liegt und die Dämmstärke gering ist. Entsprechend geringe Werte hingegen zeigen sich im Bereich des Positionswinkels 45° , da dort die Dämmstärke am größten ist und die kühlere Rücklaufleitung die Werte beeinflusst.

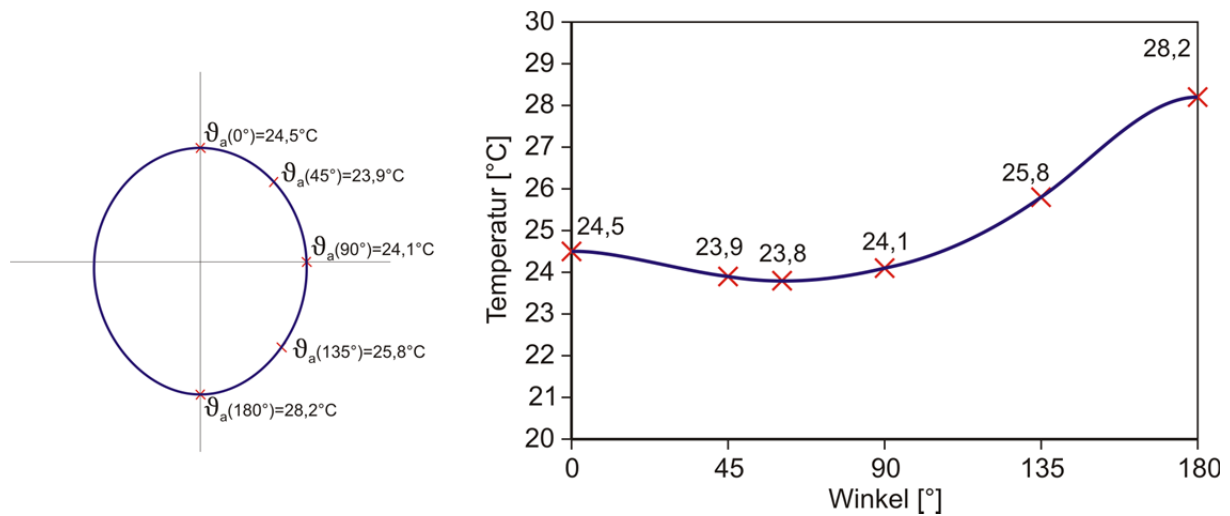


Abbildung 4-12: beispielhafte Temperaturverteilung über den Rohrmantel (links) und Temperaturverteilung entlang des halben Rohrmantels (rechts)

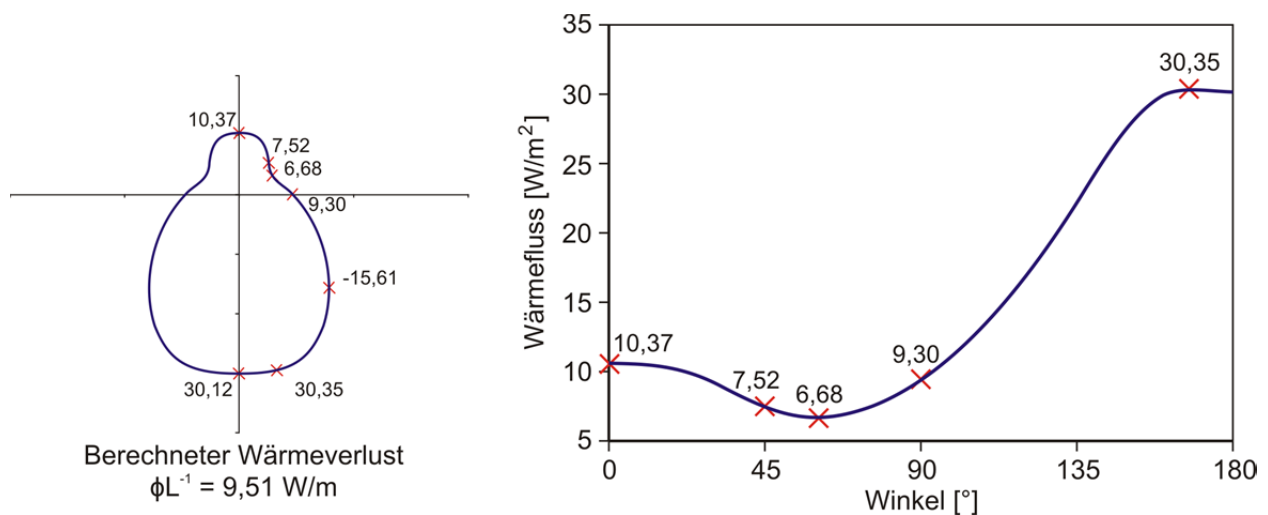


Abbildung 4-13: Wärmestromverteilung über den Rohrmantel (links), Wärmestromverteilung entlang des halben Rohrmantels (rechts)

4.3.3 Modellkalibrierung anhand der Versuche in der Klimakammer

Zur Überprüfung und zur Kalibrierung des FE-Modells ist ein Abgleich der Ergebnisse mit Versuchen aus der Klimakammer nötig.

Referenzversuche FFI

Vor der Durchführung der Vorversuche in der Klimakammer am FFI wird das numerische Modell bereits erstellt und mit Referenzversuchen, welche dem Archiv des FFI entstammen, überprüft. Als Modellparameter werden dabei die Herstellerangaben herangezogen. Die Temperatur sowie der Wärmestrom werden dabei direkt am Rohrmantel abgegriffen.

Dabei werden Doppelrohrsysteme mit zwei DN100 Mediumrohren und einer 1-fach und 2-fach verstärkten Dämmung als Referenzversuche herangezogen und numerisch nachgebildet. Das FE-Modell wird entsprechend der erhöhten Dämmschicht angepasst. Der Vorlauf wird dabei auf 55 °C bzw. 66 °C geheizt.

Aus den Ergebnissen (Abbildung 4-14) wird ersichtlich, dass die Dimension des ermittelten Wärmestroms aus der Simulation dem des Versuchs entspricht. Des Weiteren ist die Abnahme der Wärmeverluste mit steigender Dämmdicke in den Versuchen auch in der Simulation zu verzeichnen. Allerdings sind beide Versuche nicht direkt vergleichbar, da unterschiedliche Vorlauftemperaturen aufgebracht werden.

Nach dem ersten Abgleich von Referenzversuchen und Simulation scheint das Modell den Versuch gut abbilden zu können und für die weiteren Berechnungen geeignet zu sein.

Als erster Ausblick auf die Tendenz des Verhaltens des Rohrsystems bei Verstärkung der Dämmung wird außerdem ein Standard-Doppelrohrsystem ohne weitere Dämmverstärkung und ein 2-fach verstärktes System bei gleichbleibender Vorlauftemperatur im unteren Mediumrohr berechnet. Auch dieser direkte Vergleich anhand eines Systems zeigt die Tendenz, des sinkenden Wärmestroms bei steigender Dämmdicke.

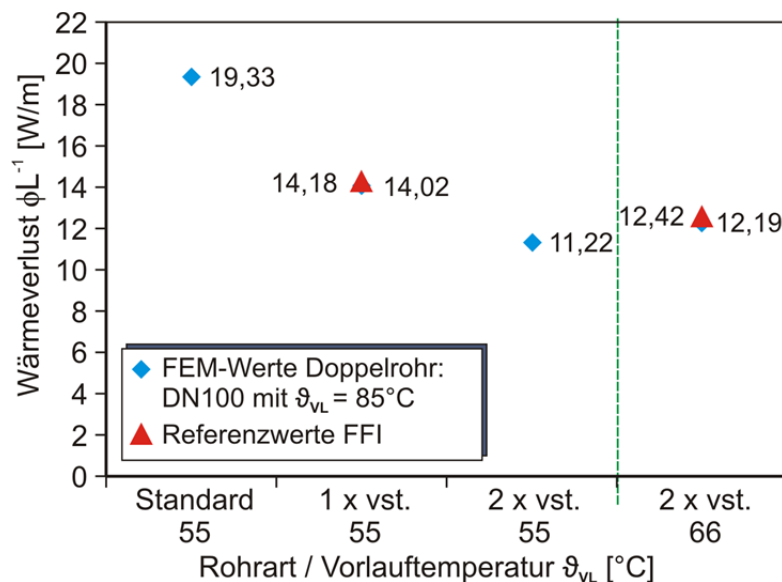


Abbildung 4-14: Simulation des Wärmestroms anhand von Referenzversuchen des FFI

Da diese Versuche im Fundus des FFI vorhanden waren und nicht zu diesem Projekt gehören, werden sie als erste Referenzwerte zur Bewertung des numerischen Modells herangezogen. Darauf aufbauend werden nun die Modelle weiter angepasst und mit den im Rahmen dieses Projektes durchgeführten Versuchen abgeglichen.

Modellanpassung

Die ersten Versuche in der Klimakammer, die im Rahmen dieses Projektes durchgeführt worden sind, sind Versuche am KMR-Doppelrohrsystem mit zwei Mediumrohren DN50. Für die Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit λ_{50} (Wärmeleitfähigkeit bei einer Materialtemperatur von 50 °C; wird als Standardwert für die Berechnungen herangezogen) werden in den Versuchen nach EN ISO 8497 [11] drei Versuche mit unterschiedlich beheizten Vorlaufrohren gefahren. Das Rücklaufrohr bleibt dabei unbeheizt und enthält Luft. Es werden in Anlehnung an die üblichen Werte bei Einzelrohren für KMR $\vartheta_{VL} = 70$ °C, 80 °C und 90 °C für die Vorlauftemperatur angesetzt. Bei polymeren Mediumrohren werden die Versuche bei $\vartheta_{VL} = 60$ °C, 70 °C und 80 °C durchgeführt, um λ_{50} berechnen zu können.

Der Vergleich der Simulationsergebnisse des Wärmeverlustes mit den Versuchsergebnissen zeigt, dass die Simulation den Wertebereich der Versuchswerte sowie die Entwicklung bei steigenden Temperaturen im Mediumrohr abbilden kann (Abbildung 4-15). Bei steigender Mediumtemperatur ist mit einem steigenden Wärmeverlust zu rechnen. Allerdings bestehen Differenzen bezüglich der Absolutwerte des Wärmeverlustes. Es sind dabei Abweichungen zwischen 7 % ($\vartheta_{RL} = 90$ °C) und 14 % ($\vartheta_{RL} = 70$ °C) zu verzeichnen. Diesen Differenzen ist nachgegangen worden und das Modell entsprechend angepasst und verbessert.

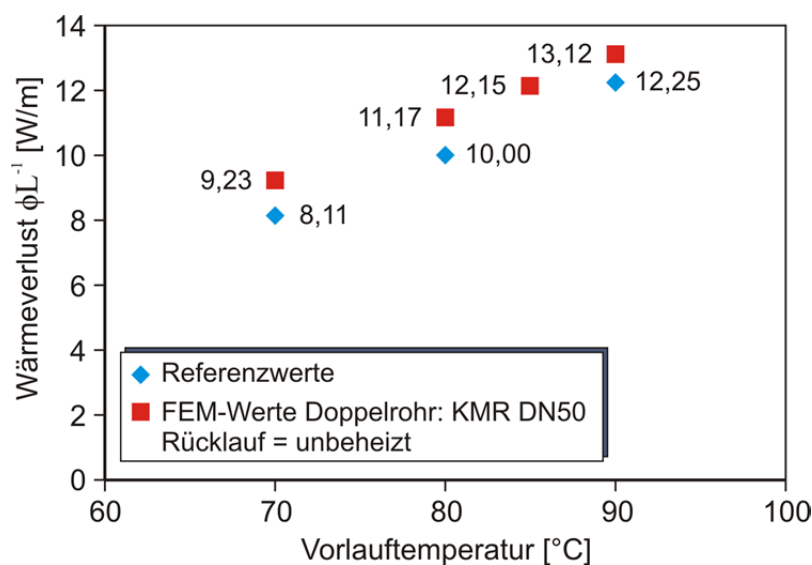


Abbildung 4-15: Wärmeverluste der Simulation und der Versuche im Vergleich

Zu beachten ist, dass am Rohrmantel leichte Differenzen bezüglich des Temperaturverlaufs zwischen Simulation und Versuchen zu erkennen sind. Ausschlaggebend dafür ist der Übergangsbereich zwischen Rohrmantel und Luftraum der Klimakammer.

Durch die Modellanpassung mittels der Erstellung eines Luftrings außerhalb des Rohrmantels wird im FE-Modell nun eine thermische Grenzschicht simuliert, welche das thermische Verhalten des Übergangsbereichs am Außenmantel des Rohres zur Luft besser abbildet. Dabei war die Dicke der Luftschicht in der Simulation vorerst zu variieren, um die maßgebende Dicke der Schicht zur realistischen Abbildung der thermischen Grenzschicht zu erhalten.

Bei der Untersuchung der Dicke der Grenzschicht wird für verschiedene Rohrdimensionen eine Variation zwischen 0 cm und 5 cm durchgeführt. Bei einer ausgebildeten Luftschicht von 0,5 cm können übereinstimmende Ergebnisse für die verschiedenen Rohrdimensionen mit den erhaltenen Werten aus den Versuchen am FFI bezüglich des Wärmeverlustes sowie der Temperaturverteilung am Mantel festgestellt werden. Entsprechend wird dieser Luftring für die Berechnungen genutzt.

4.3.4 Parameterstudie für die Klimakammer

In der Klimakammer werden unterschiedliche Rohrdimensionen und verschiedene Hersteller untersucht. Der Vorlauf wird dabei jeweils mit drei unterschiedlichen Temperaturen beheizt, welche sich jeweils um 10 K unterscheiden. Dabei werden $\vartheta_{VL} = 70\text{ °C}$, 80 °C und 90 °C für das KMR sowie $\vartheta_{VL} = 60\text{ °C}$, 70 °C und 80 °C für die anderen Rohrtypen genutzt.

Eine Übersicht der verschiedenen Variationen ist in Tabelle 4-2 gegeben.

Tabelle 4-2: Versuchsprogramm für die Klimakammer

Klimakammer			
Rohrtypen	Dimension 1	Dimension 2	Dimension 3
KMR	2 x DN20	2 x DN50	2 x DN100
PMR	2 x 25 x 2,3	2 x 63 x 5,8	-
Mehrschichtflexrohr	2 x 26 x 3,0	-	-
Wellrohrflexrohr	30 + 30/126	-	-
Kupferflexrohr	2 x 28 x 1,2	-	-

4.3.5 Auswertung der Parameterstudie für die Klimakammer

Im Folgenden werden die Versuche in der Klimakammer mit der Simulation durch PLAXIS 2D [4] verglichen. Dabei werden zuerst die unterschiedlichen Dimensionen des KM-Rohres, sowie des PM-Rohres dargestellt. Daraufhin folgen die Ergebnisse der weiteren Rohrtypen.

Des Weiteren sind verstärkte Rohre mit DN50 simuliert worden und die Ergebnisse gegenübergestellt. Dabei wird jeweils der Wärmeverlust der Simulation mit den Werten aus den Versuchen verglichen.

Um einschätzen zu können, wo die Mitteltemperatur auf dem Mantel abgegriffen werden kann bzw. mit welchem Berechnungsansatz sie realistisch abgeschätzt werden kann, wird außerdem die Mitteltemperatur und die jeweilige Position ermittelt.

Eine tabellarische Übersicht der Werte zu jedem Rohrtyp sowie eine Gesamtübersicht der Wärmeverluste ist in Anlage 1 zu finden.

KMR - DN100

Der Vergleich der Simulationsergebnisse mit den Werten der Versuche am FFI, hat ergeben, dass die Werte für den Wärmeverlust im Bereich von 0,5 % bis 10,6 % abweichen (siehe Beschriftung der Messpunkte in Abbildung 4-16). Dabei sind die Abweichungen für die höheren Vorlauftemperaturen stärker zu beobachten (bis zu 10,6 %) als für die niedrigeren Temperaturen (bis zu 6,2 %). Die Abweichungen der Temperaturen am Rohrmantel liegen bei etwa 0,2 K bis 2,2 K.

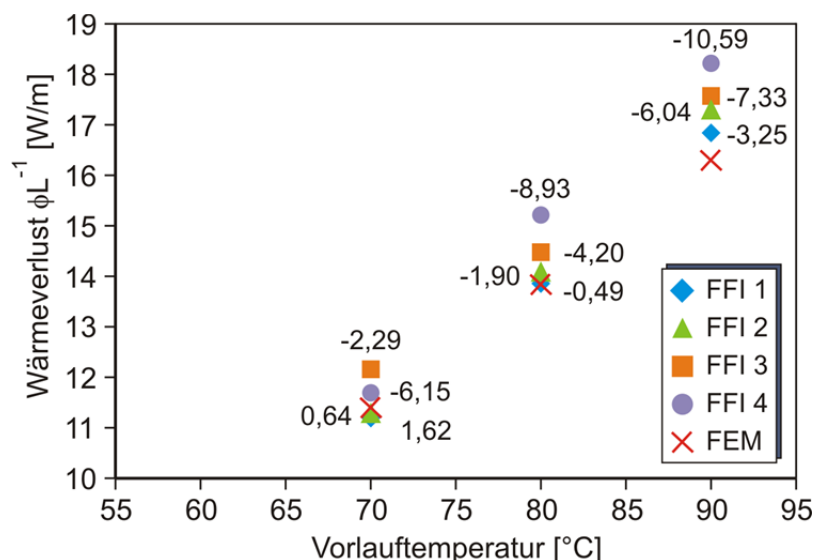


Abbildung 4-16: Klimakammer – KMR DN100 – Wärmeverlust
(Beschriftung: Abweichung FEM/FFI [%])

KMR – DN50

Für das KMR DN50 verhält es sich ähnlich. Die Abweichungen der Wärmeverluste liegen mit 0,6 % bis 15,6 % (siehe Abbildung 4-17) allerdings etwas höher als beim DN100. Die Temperaturabweichungen am Rohrmantel sind jedoch mit 0,00 K bis 2,14 K sehr ähnlich dem DN100.

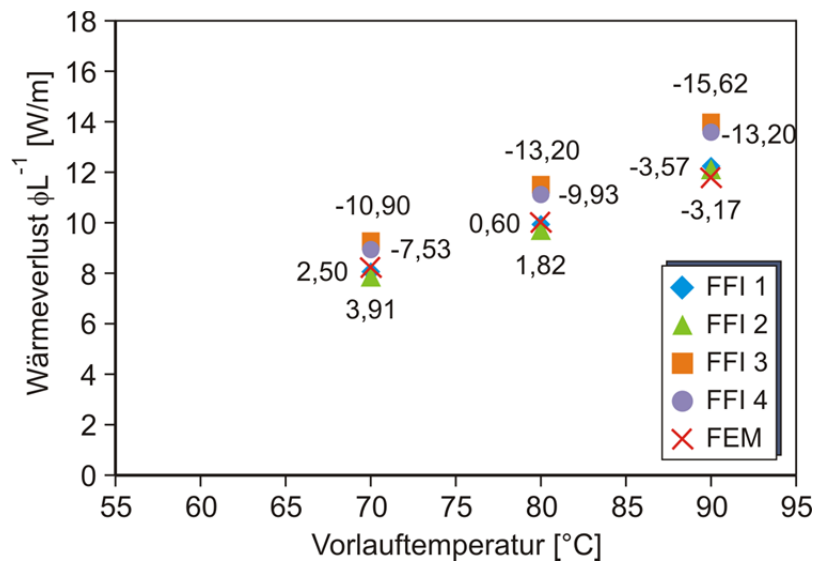


Abbildung 4-17: Klimakammer – KMR DN50 – Wärmeverlust
(Beschriftung: Abweichung FEM/FFI [%])

KMR - DN20

Der Vergleich für das KMR DN20 ergab Abweichungen beim Wärmeverlust von 1,4 % bis 16,3 % (siehe Abbildung 4-18). Die Manteltemperatur weicht um 0,06 K bis 2,58 K ab. Auch diese Werte sind ähnlich den Werten der vorigen getesteten Rohre.

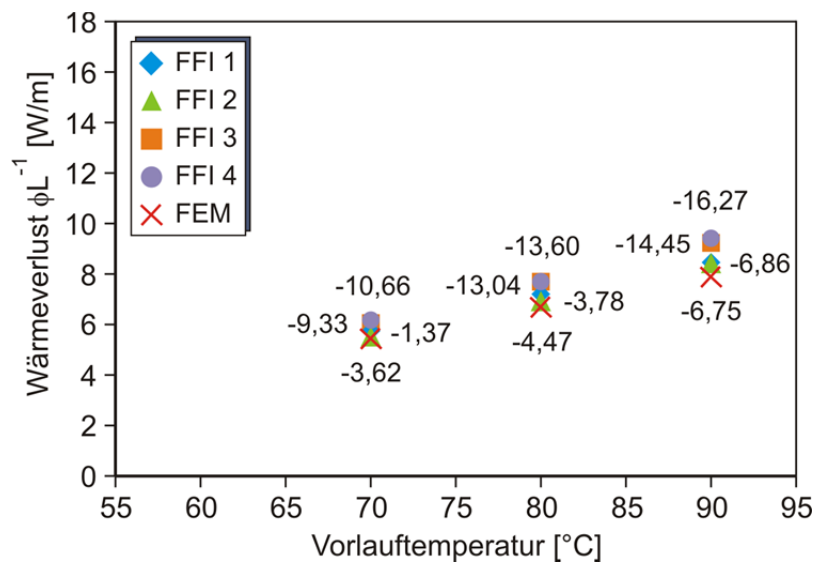


Abbildung 4-18: Klimakammer – KMR DN20 – Wärmeverlust
(Beschriftung: Abweichung FEM/FFI [%])

PMR63

Bei der Untersuchung der PMR63 können für den Wärmeverlust insgesamt meist größere Abweichungen zwischen den Versuchen am FFI und der Simulation festgestellt werden (10,2 % bis 15,0 %, siehe Abbildung 4-19). Jedoch befinden sich auch diese Werte im ähnlichen Wertebereich wie die Höchstwerte der KMR. Die Abweichungen der Manteltemperatur liegen mit 0,06 bis 1,96 K wiederum im gleichen Bereich wie die der KMR.

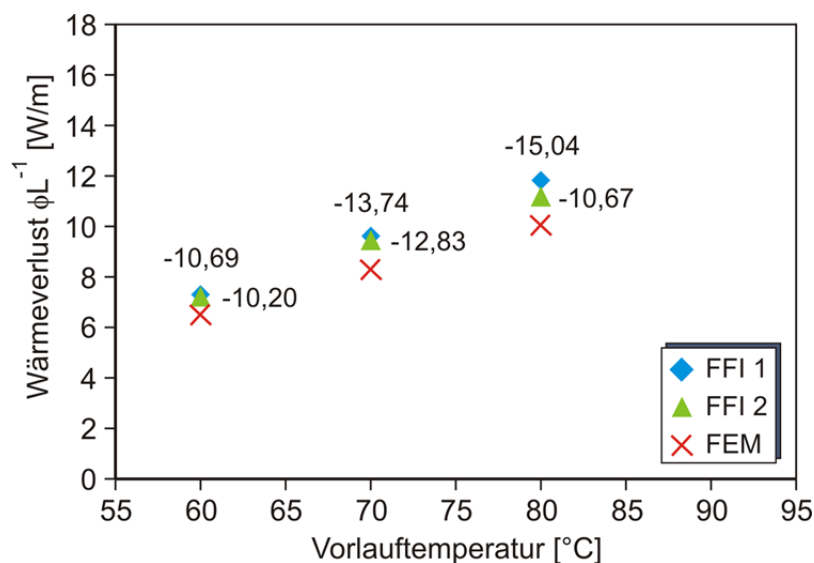


Abbildung 4-19: Klimakammer – PMR63 – Wärmeverlust
(Beschriftung: Abweichung FEM/FFI [%])

PMR25

Das kleinere PMR25 zeigt mit 9,7 % bis 17,0 % (siehe Abbildung 4-20) Abweichung des Wärmeverlustes ähnliche Werte wie das größere PMR und liegt somit ebenfalls im gleichen Wertebereich der bisher geprüften Rohre. Mit 0,29 K bis 2,74 K Abweichung der Manteltemperatur sind auch diese Werte den anderen sehr ähnlich.

Mehrschichtflexrohr

Bei der Untersuchung des Mehrschichtflexrohres fällt auf, dass dies eine sehr geringe Abweichung der Wärmeverluste von 0,5 % bis 4,1 % (siehe Abbildung 4-21) zwischen der Simulation und den Versuchen zeigt. Die Simulation bildet somit das Verhalten der Wärmeströme sehr gut ab. Die Manteltemperatur hingegen zeigt im Vergleich zu den anderen Rohrsystemen wieder einen ähnlichen Wertebereich von 0,16 K bis 2,25 K.

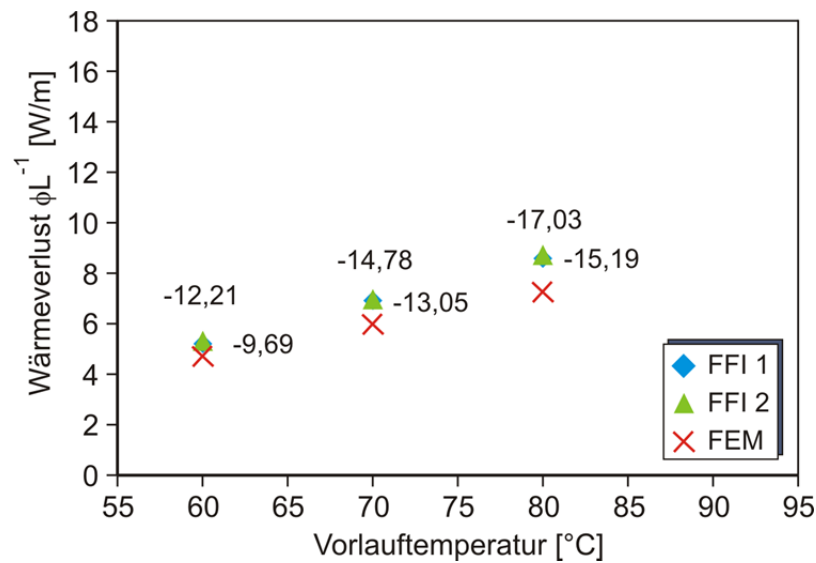


Abbildung 4-20: Klimakammer – KMR PMR25 – Wärmeverlust
(Beschriftung: Abweichung FEM/FFI [%])

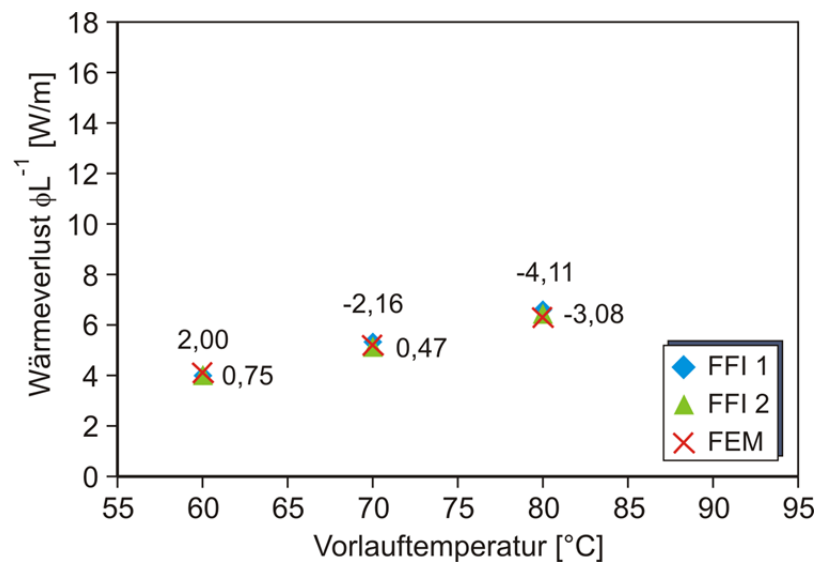


Abbildung 4-21: Klimakammer – Mehrschichtflexrohr – Wärmeverlust
(Beschriftung: Abweichung FEM/FFI [%])

Wellrohrflexrohr

Das Wellrohrflexrohr zeigt, ebenso wie das Mehrschichtflexrohr, kleinere Abweichungen im Gegensatz zum KMR oder PMR. Die Werte liegen bei 0,9 % bis 7,0 % (siehe Abbildung 4-22). Die Temperaturen liegen, ebenfalls wie bei dem vorherig geprüften Rohrtyp, ähnliche Werte (0,05 K bis 2,83 K) wie bei allen bisher geprüften Rohren.

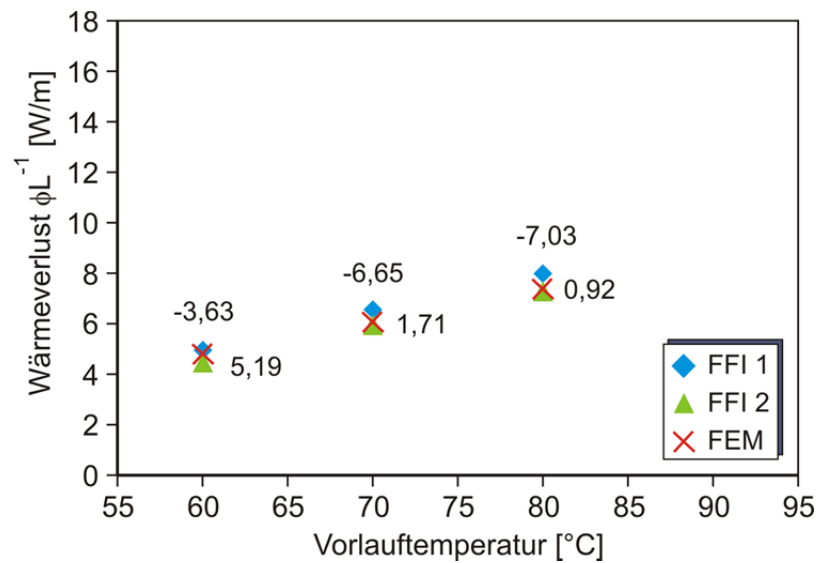


Abbildung 4-22: Klimakammer – Wellrohrflexrohr – Wärmeverlust
(Beschriftung: Abweichung FEM/FFI [%])

Kupferflexrohr

Auch für das Kupferflexrohr können geringere Werte von 0,4 % bis 6,1 % (siehe Abbildung 4-23) im Gegensatz zum KMR und PMR festgestellt werden. Aber auch hier ist der Wertebereich der Abweichungen der Manteltemperatur ähnlich geblieben (0,01 K bis 1,99 K).

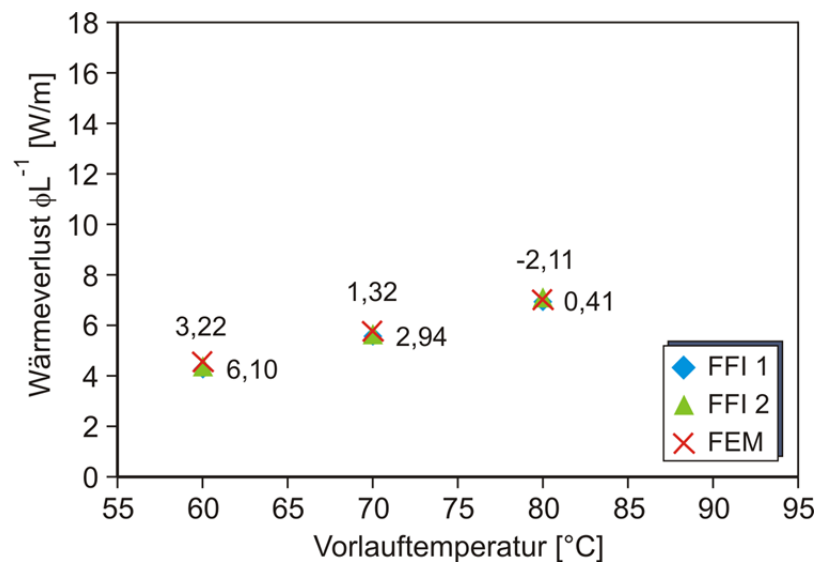


Abbildung 4-23: Klimakammer – Kupferflexrohr – Wärmeverlust
(Beschriftung: Abweichung FEM/FFI [%])

Verstärkte Rohre am Beispiel KMR DN50

Zusätzlich zu den vorigen Klimakammerversuchen werden noch Simulationen für verstärkte Rohre durchgeführt, um einen Anhaltswert dafür zu erhalten, inwieweit sich der Wärmeverlust dadurch verändern könnte. Es wird dabei das KMR DN50 1-fach, 2-fach sowie 3-fach verstärkt simuliert und die Werte verglichen.

Wird der Wärmeverlust eines verstärkten Doppelrohres mit dem eines Standard KMR DN50 verglichen, so ist für jede der drei gefahrenen Temperaturen eine deutliche Tendenz zu sehen. Die einfache Verstärkung bewirkt die stärkste Verringerung des Wärmeverlustes von etwa 23 % (siehe Abbildung 4-24). Eine weitere Verstärkung erwirkt eine weitere Verringerung von etwa 11 % und führt insgesamt zu einem um ca. 34 % kleineren Wärmeverlust. Bei einer 3-fachen Verstärkung kann dann nur noch eine Verringerung um etwa 8 % auf insgesamt etwa 42 % verzeichnet werden. Mit steigender Verstärkung sinkt somit der Effekt der Dämmung und der Wärmeverlust sinkt langsamer ab.

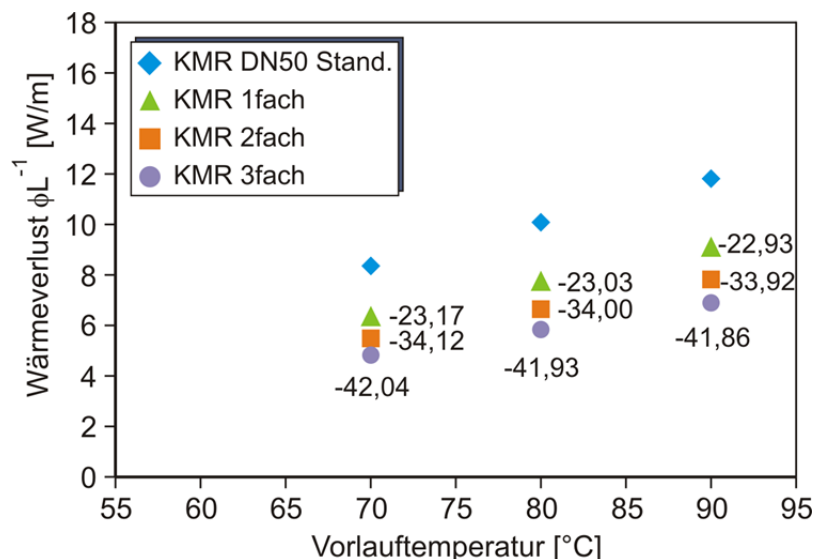


Abbildung 4-24: Klimakammer – KMR DN50 verstärkt – Wärmeverlust
(Beschriftung: Abweichung FEM/FFI [%])

Mitteltemperatur auf dem Mantel und Position

Zur Ermittlung der Mitteltemperatur wird für jede Simulation die Temperaturen über den Außenmantel des Doppelrohres abgegriffen und gemittelt. Danach wird die Position dieser Temperatur auf dem Mantel berechnet, um diese untereinander abgleichen zu können.

Die Mitteltemperaturen befinden sich im Bereich von 23,8 °C bis 27,9 °C. Die Mitteltemperatur befindet sich auf dem Mantel in einem Positionsbereich von 108 ° bis 126 ° (siehe Abbildung 4-25).

Da die Position stark vom Rohrdurchmesser und den Materialeigenschaften abhängig ist, variiert die Position zwischen 108 ° und 126 ° (siehe Tabelle 4-3) und wird daher nicht für einen vereinfachten Berechnungsansatz der Mitteltemperatur herangezogen.

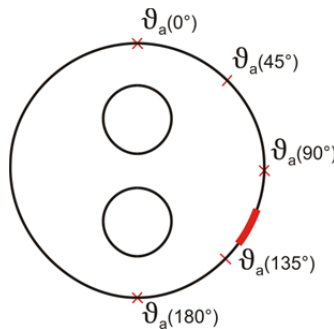


Abbildung 4-25: Bereich der Mitteltemperatur

Ein anderer Ansatz ist, die zuvor aus vielen Einzelpunkten berechnete Mitteltemperatur durch lediglich 4 bzw. 3 Punkte abbilden zu lassen. Dabei wird die mittlere Temperatur des Scheitels, der Sohle und der beiden Kämpfer ermittelt. Da der linke und rechte Kämpfer aufgrund der Symmetrie die gleichen Werte aufweisen, kann der Wert des Kämpfers zweifach gewertet werden, so dass eine Wertung von Scheitel, Kämpfer und Sohle von 1 : 2 : 1 zur Berechnung der Mitteltemperatur von Doppelrohren genutzt werden kann. Überprüft wird dies an allen Simulationen für die Klimakammer und die Differenz zwischen der genauen Berechnung der Mitteltemperatur über alle Einzelpunkte und der vereinfachten Berechnung beträgt zwischen 0,01 K und 0,53 K (siehe Tabelle 4-3) und ist somit relativ klein.

Als Ansatz für die Berechnung der Mitteltemperatur wird daher der folgende Ansatz vorgeschlagen:

$$\vartheta_{4,m} = \frac{(\vartheta_{\text{Scheitel}} + 2\vartheta_{\text{Kämpfer}} + \vartheta_{\text{Sohle}})}{4} \quad (4-7)$$

4.3.6 Zusammenfassung Klimakammer

Werden alle Untersuchungen gemeinsam betrachtet, so ergeben sich Abweichungen für den Wärmeverlust von etwa -17 % bis +6 % zwischen der Simulation und den Versuchen am FFI. Dabei schwanken die Werte bei größeren Rohrdimensionen meist weniger als bei kleineren. Die maximalen Abweichungen sind dabei für die größten Temperaturen zu verzeichnen. Allerdings können für die KMR und die PMR insgesamt größere Abweichungen festgestellt werden als für die anderen Rohrtypen. Die Abweichungen sind dabei damit zu erklären, dass für das Modell ein Referenzwert der Wärmeleitfähigkeit für jedes Material angesetzt wird, die tatsächlichen Werte jedoch davon abweichen können. Besonders ist dies beim PUR-Schaum möglich, da bei der Herstellung eine homogene

Materialverteilung im Rohr nicht immer gegeben ist und die absolute Wärmeleitfähigkeit aufgrund der Komplexität der Herstellung abweichen kann.

Die Abweichung der Manteltemperatur zwischen Simulation und Versuchen zeigt insgesamt einen vertretbaren Wertebereich von etwa 0,0 K bis 2,9 K und ist bei allen Versuchen ähnlich.

Für die Mitteltemperatur kann eine vereinfachte Berechnung entwickelt werden, welche lediglich die Temperaturmessung am Scheitel, der Sohle und dem Kämpfer beinhaltet und ausreichend genaue Werte liefert. Dabei werden die gemessenen Temperaturen gemittelt, wobei die Temperatur am Kämpfer doppelt gewertet wird (siehe Gleichung (4-7)).

Durch die Untersuchungen in der Klimakammer ist das Modell an die realen Gegebenheiten angepasst worden und liefert Werte in einem realistischen Wertebereich. Dies dient nun als Basis für die folgenden Untersuchungen der gebetteten Rohre.

Tabelle 4-3: Mitteltemperatur in der Klimakammer

Rohrtyp	Dimension	Temp. VL $\vartheta_{1,F,set}$ [°C]	Lage der Mitteltemp. [°]	FEM Mitteltemp. $\vartheta_{FEM,m}$ [°C]	1:2:1 Mitteltemp. $\vartheta_{4,m}$ [°C]	Differenz $\vartheta_{4,m} - \vartheta_{FEM,m}$ [K]
KMR	DN100	70	125,62	25,22	25,59	0,37
		80	125,62	25,69	26,14	0,45
		90	125,62	26,16	26,69	0,53
	DN50	70	119,00	25,02	25,19	0,18
		80	119,00	25,55	25,76	0,22
		90	119,00	25,81	26,05	0,24
	DN20	70	111,39	26,12	26,19	0,07
		80	111,39	26,69	26,77	0,09
		90	111,39	27,25	27,35	0,10
PMR	63	60	119,72	25,17	25,35	0,18
		70	119,72	25,76	25,99	0,23
		80	119,72	26,35	26,62	0,28
	25	60	113,16	26,04	26,16	0,11
		70	113,16	26,87	27,01	0,14
		80	113,16	27,69	27,86	0,17
Mehrschicht- flexrohr	26	60	111,65	25,22	25,26	0,04
		70	111,65	25,82	25,87	0,06
		80	111,65	26,42	26,49	0,07
Wellrohr- flexrohr	30	60	108,40	25,28	25,34	0,06
		70	108,40	25,90	25,98	0,07
		80	108,40	26,52	26,61	0,09
Kupfer- flexrohr	28	60	112,18	25,46	25,52	0,06
		70	112,18	26,12	26,20	0,08
		80	112,18	26,78	26,88	0,10
KMR DN50	1-fach	70	114,76	24,55	24,60	0,04
		80	114,76	24,88	24,94	0,05
		90	114,76	25,21	25,28	0,06
	2-fach	70	112,94	24,11	24,13	0,02
		80	112,94	24,35	24,37	0,02
		90	112,94	24,59	24,61	0,02
	3-fach	70	110,29	23,82	23,82	0,01
		80	110,29	23,99	24,00	0,01
		90	110,29	24,17	24,18	0,01

Min	108,40	23,82	23,82	0,01
Max	125,62	27,69	27,86	0,53

4.4 Numerische Ermittlung der Wärmeverluste gebetteter Doppelrohre

4.4.1 Versuchsaufbau Technikumsversuch am FFI

Am FFI sind zur Untersuchung des Wärmeverlustes gebetteter Doppelrohre einige Technikumsversuche in einem Versuchsgraben durchgeführt worden. Diese dienen als Referenzversuche zur Kalibrierung des numerischen Modells, mit welchem dann eine Parameterstudie an einem größeren Bodenmodell durchgeführt werden soll. Weiteres ist im Berichtsteil des FFI in diesem Abschlussbericht zu finden.

4.4.2 Numerisches Modell gebetteter Rohre

Referenzmodell

Für die Berechnungen der gebetteten Rohre wird ebenfalls ein Modell im ebenen Verformungszustand „plane strain“ mit dem Programm PLAXIS 2D [4] erstellt, welches aus 15-Knoten-Dreieck-Elementen mit je 12 Gauß-Punkten gebildet wird. Das Doppelrohr soll dabei mit dem Einzelrohrsystem, bestehend aus zwei nebeneinander liegenden Einzelrohren, verglichen werden. Als Basis für die Modelle dient das zuvor erstellte Modell der Klimakammer (ohne Luftrand) welches um den Bodenkörper erweitert bzw. entsprechend für zwei Einzelrohre neu erstellt wird.

Die Modelle werden mit einem sehr feinen Netz generiert, wobei der rohrnahe Bereich sowie das Netz im Inneren des Rohres jeweils noch verfeinert werden, um genauere Daten erhalten zu können. Mit wachsendem Abstand zum Rohr wird das Netz entsprechend größer. Die Vernetzung der Modelle ist in Abbildung 4-26 für das gesamte Modell und in Abbildung 4-27 für den rohrnahen Bereich zu sehen.

Anhand einer Konvergenzstudie werden die Modellabmessungen so definiert, dass ein Randeinfluss ausgeschlossen werden kann.

Die Modellbreite bzw. -höhe des Bodenmodells variiert je nach Parametervariation (Rohrgeometrie und Überdeckungshöhe) und beträgt für das Basismodell eines Doppelrohres mit zwei DN50 Mediumrohren und einer Überdeckungshöhe von 0,8 m 7 m x 4,15 m (Breite x Höhe).

Basismodell (gebettetes KMR Doppelrohr DN50):

Knoten:	166.541
15-Knoten-Elemente:	20.726

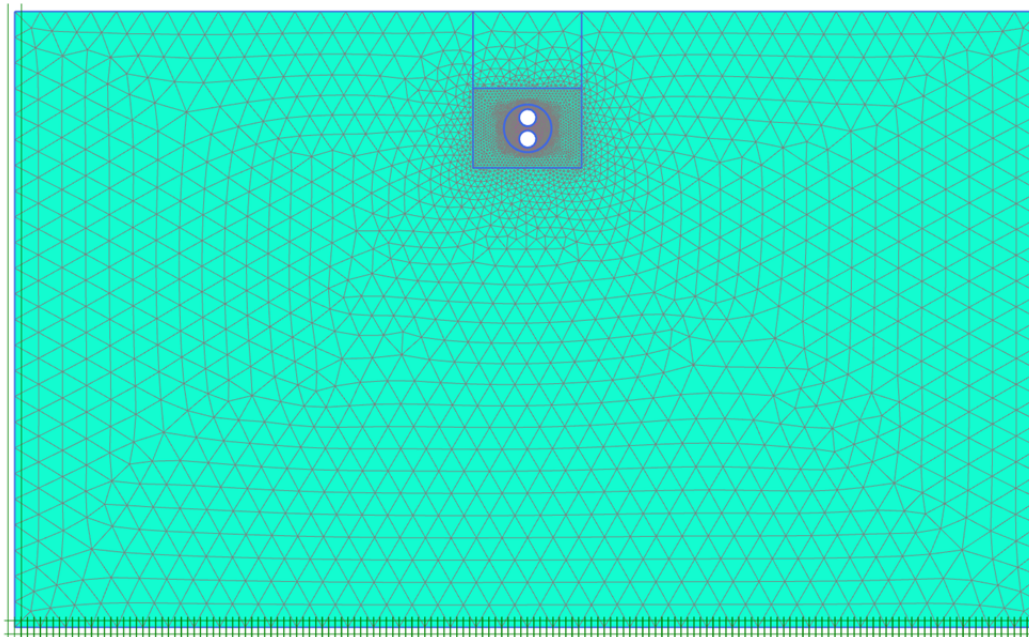


Abbildung 4-26: Vernetzung Bodenmodell

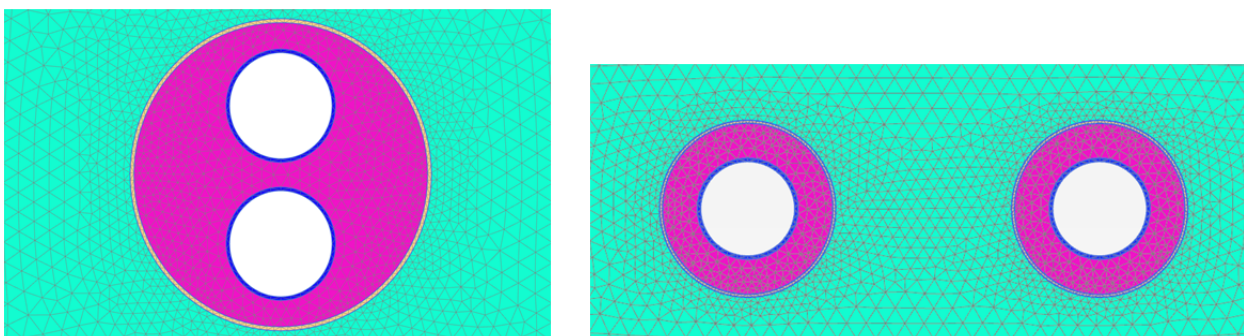


Abbildung 4-27: Vernetzung im und am Rohr (links: Doppelrohrsystem; rechts: Einzelrohrsystem)

Modellrandbedingungen für die Temperatur

Für das Bodenmodell wird eine Standardtemperatur von 10 °C gewählt. Diese wird in der Initialphase für das gesamte Modell angenommen. Dafür wird an jedem der vier Modellränder eine Temperaturrandbedingung modelliert. Im Zuge der Parameterstudie ist die Temperatur an der Geländeoberfläche variiert worden, woraufhin an beiden Seiten des Modells ein linearer Temperaturverlauf vorgegeben wird. Für die Variation der Betriebstemperaturen können die Temperaturrandbedingungen an den Innenseiten der beiden Mediumrohre des Vor- und Rücklaufs entsprechend angepasst werden.

Materialeigenschaften

Der entscheidende Parameter für die Wärmeverlustberechnungen ist auch im Bodenmodell die Wärmeleitfähigkeit der Stoffe.

Für die Materialeigenschaften werden die Werte aus den numerischen Untersuchungen in der Klimakammer übernommen und um die Werte für den umgebenden Boden ergänzt. Es wird ein erdfeuchter Sand gewählt mit der in Tabelle 4-4 folgenden Wärmeleitfähigkeit:

Tabelle 4-4: Wärmeleitfähigkeit Bodens im Referenzmodell

Material	λ [W/(mK)]
Boden	1,0

Berechnungsschritte in PLAXIS

Die Berechnung des Bodenmodells wird, wie die Klimakammermodelle auch, in die entsprechenden vier Berechnungsschritte unterteilt.

Berechnungsschritt 1

Der erste Berechnungsschritt ist die Initialphase, welche den Primärspannungszustand des Gesamtmodells als Bodenkörper erzeugt (siehe Abbildung 4-28). Temperaturen werden in dieser Phase jedoch nicht berücksichtigt.

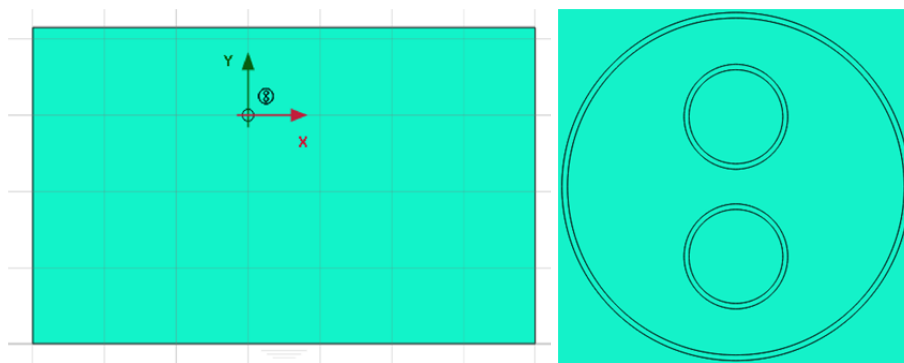


Abbildung 4-28: Bodenmodell - Phase 0 - Initialphase (links: Gesamtmodell; rechts: Rohrbereich)

Berechnungsschritt 2

Im zweiten Berechnungsschritt werden die Temperaturrandbedingungen an den vier Seiten des Modells mit 10 °C aktiviert (siehe Abbildung 4-29) und so dem gesamten Modell eine Temperatur von 10 °C zugewiesen.

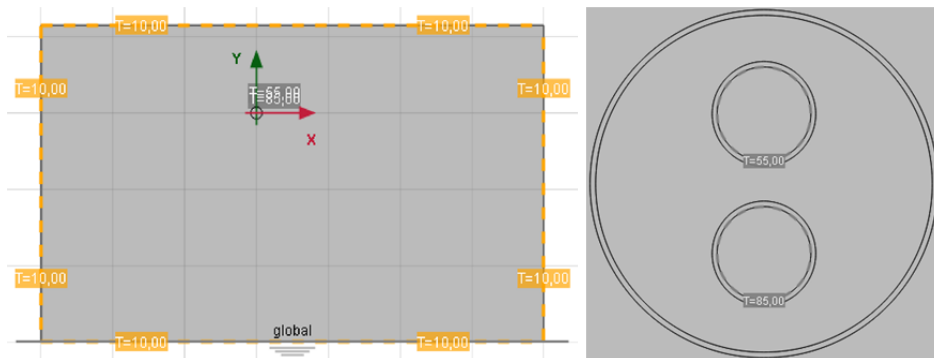


Abbildung 4-29: Bodenmodell - Phase 1 - Umgebungstemperatur aktiviert (links: Gesamtmodell; rechts: Rohrbereich)

Berechnungsschritt 3

Der dritte Berechnungsschritt aktiviert die Rohrmaterialien sowie den Boden (siehe Abbildung 4-30).

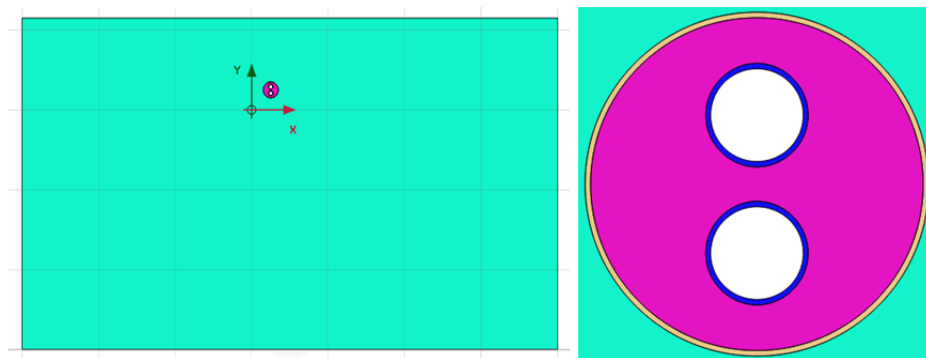


Abbildung 4-30: Bodenmodell - Phase 2 - Rohrmaterialien und Boden aktiviert (links: Gesamtmodell; rechts: Rohrbereich)

Berechnungsschritt 3

Im letzten Berechnungsschritt werden die beiden Temperaturreandbedingungen an den Mediumrohren als Temperaturen des Vor- und Rücklaufs aktiviert (siehe Abbildung 4-31).

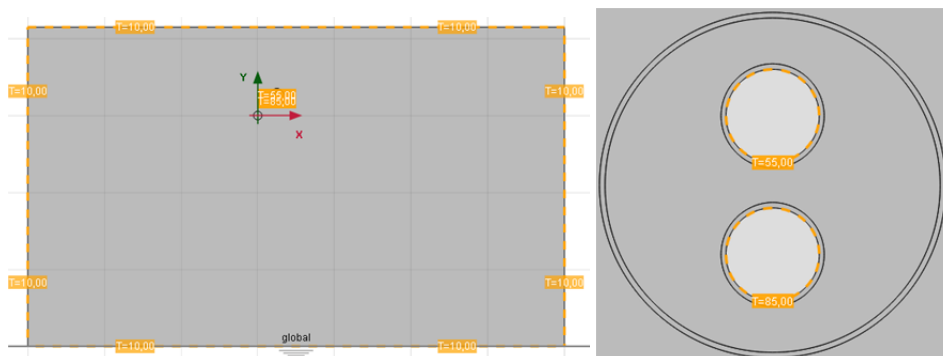


Abbildung 4-31: Bodenmodell - Phase 3 - Betriebstemperaturen aktiviert (links: Gesamtmodell; rechts: Rohrbereich)

Berechnung des Wärmestroms

Ein Beispiel für die Temperatur- (links) und Wärmestromverteilung (rechts) für das Bodenmodell des Doppelrohres sowie des Einzelrohres ist in Abbildung 4-32 bzw. Abbildung 4-33 zu sehen. Dabei werden beide Mediumrohre mit 85 °C (unten) bzw. 55 °C (oben) beheizt.

In Absprache mit dem FFI wird ein Referenzmodell festgelegt, in dem die einzelnen Parameter im Laufe der Studie variiert werden. Es handelt sich dabei um ein KMR DN50 mit den dargestellten Randbedingungen (VL/RL, ÜH usw. ...).

Referenzmodell – Doppelrohr:

KMR	DN50	Umgebungstemperatur	10 °C
Vorlauf (VL)	85 °C	Überdeckungshöhe	0,8 m
Rücklauf (RL)	55 °C	Wärmeleitfähigkeit des Bodens	1 W/m/K

Charakteristisch für die Verteilung des Doppelrohres ist dabei eine Wechselwirkung zwischen den beiden Mediumrohren. Ein Wärmetransport vom wärmeren zum kälteren Mediumrohr ist ersichtlich (siehe Abbildung 4-32). Außerdem gibt es Bereiche in denen kaum ein Wärmestrom festgestellt werden kann (unterer Seitenbereich des oberen Mediumrohres).

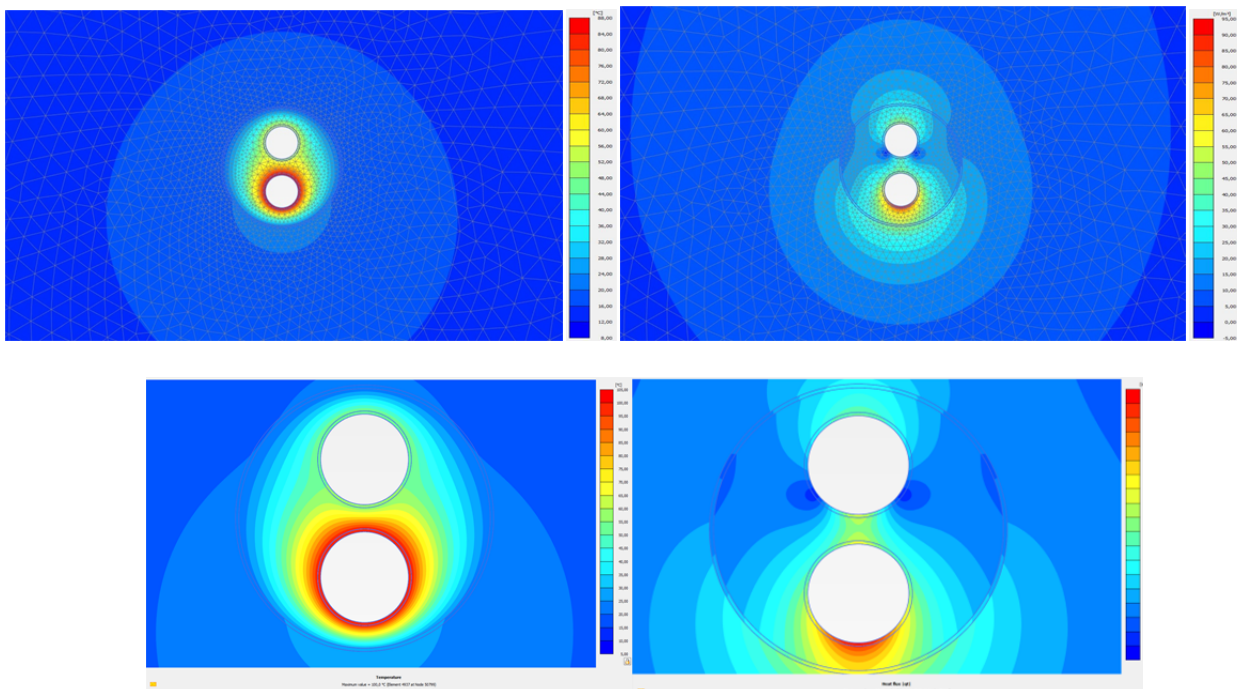


Abbildung 4-32: Temperatur- (links) und Wärmestromverteilung (rechts) für ein Doppelrohrsystem

Das äquivalente Einzelrohrsystem basiert auf der gleichen Durchflussmenge bzw. dem gleichen Mediumrohrquerschnitt des Vor- und Rücklaufs wie beim Doppelrohr. Die Randbedingungen sind ebenfalls entsprechend dem Doppelrohr-Modell gewählt. Die Wärmeleitfähigkeit des Bodens wird in Anlehnung an die Herstellerinformationen gewählt und der Abstand zwischen beiden Rohren beträgt 15 cm. Wie in Abbildung 4-33 zu erkennen ist, befindet sich der Vorlauf links und der Rücklauf rechts im System.

Referenzmodell – Einzelrohr:

KMR	DN50	Umgebungstemperatur	10 °C
Vorlauf (VL)	85 °C	Überdeckungshöhe	0,8 m
Rücklauf (RL)	55 °C	Wärmeleitfähigkeit des Bodens	1 W/m/K
Abstand zwischen VL/RL	0,15 m		

In der linken Abbildung ist erkennbar, dass die Temperaturen zwischen den Rohren im Bereich des Vorlaufs höher sind, wobei dies durch die höheren Temperaturen des Vorlaufs bedingt ist.

Die größten Wärmeströme sind daher auch an der Sohle des VL-Mediumrohres zu erkennen, was an der dünnen Dämmschicht in diesem Bereich liegt.

Auch für die Einzelrohre ist beim Wärmestrom eine Wechselwirkung der beiden Rohre erkennbar. Die Wärmeströme aus dem linken Vorlauf und dem rechten Rücklauf sind im Bereich dazwischen gegenläufig und heben sich an einer Stelle fast auf (siehe Abbildung 4-33).

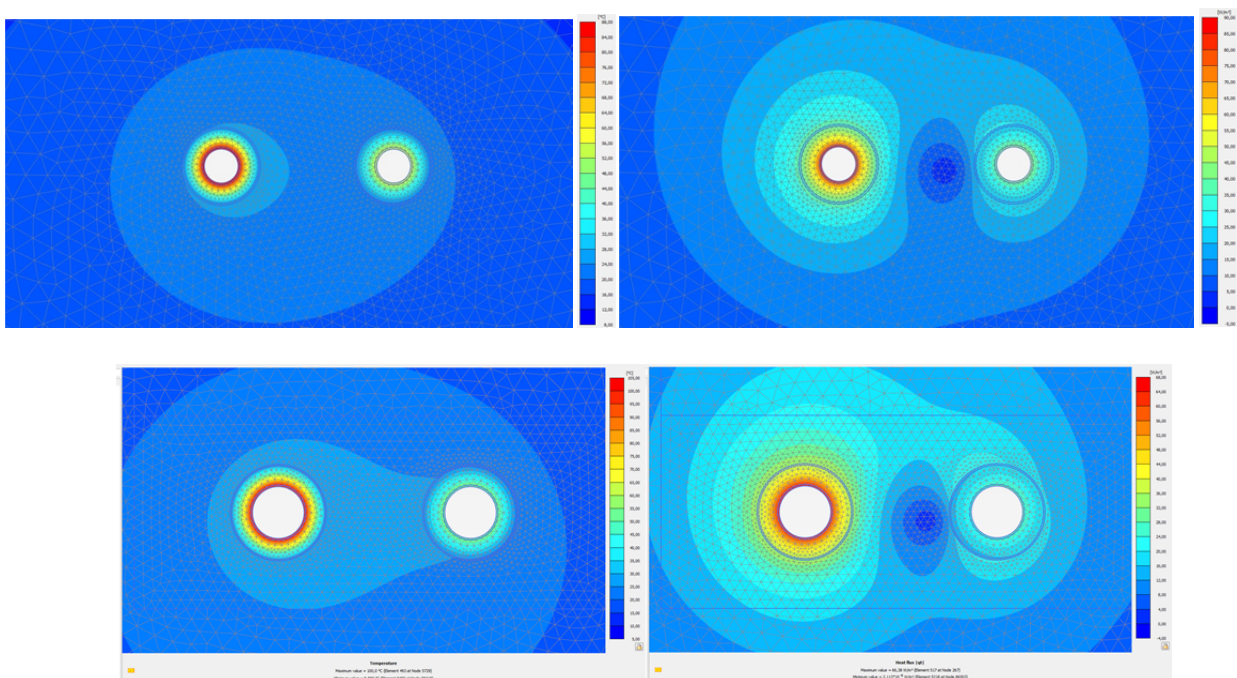


Abbildung 4-33: Temperatur- (links) und Wärmestromverteilung (rechts) für ein Einzelrohrsystem

Zur weiteren Berechnung werden die Temperaturverteilung am Außenmantel sowie die Wärmestromverteilung am Außenring des Systems abgegriffen. Aus der Wärmestromverteilung wird mit Integration über den Ringdurchmesser der Wärmeverlust des Rohrsystems berechnet. Soll im Vergleich ein Einzelrohrsystem berechnet werden, so sind beide Wärmeverluste der Einzelrohre zu berechnen und zu addieren, um sie mit dem Doppelrohr zu vergleichen.

4.4.3 Modellkalibrierung anhand der FFI-Technikumsversuche

Entsprechend der Versuche am FFI wird das numerische FE-Modell mit den folgenden Maßen erstellt:

Doppelrohr mit Mediumrohren:	DN20
Breite des Modells:	1,03 m
Höhe des Modells:	1,37 m
Überdeckungshöhe $\ddot{U}_H$:	0,8 m
Temperatur im Vorlauf:	variiert zwischen 60 °C und 90 °C

In Abbildung 4-34 ist das FE-Modell des Erdkastens (links) und ein Ausschnitt aus der Wärmeverteilung in Rohrnähe (rechts).

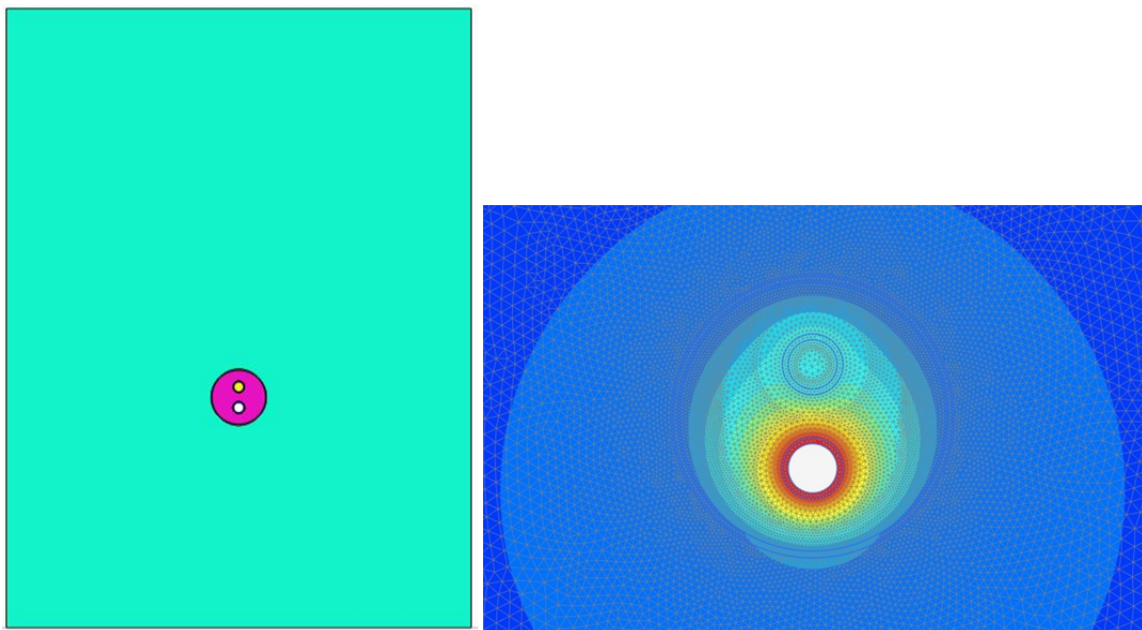


Abbildung 4-34: FE-Modell (links) und Temperaturverteilung in Rohrnähe (rechts)

Wie auch bei den Versuchen der Klimakammer werden nun die Ergebnisse der Erdkastenversuche mit Ergebnissen aus der entsprechenden Simulation des Versuchs verglichen. Dazu werden die Temperaturen am Rohrmantel sowie der Wärmeverlust des Rohrsystems verglichen (beispielhaft siehe Abbildung 4-35).

Für die Modellkalibrierung werden die Technikumsversuche des FFI nachgefahren. Dazu ist die Wärmeleitfähigkeit des umgebenden Bodens den Versuchen anzupassen. Für die

Versuche wird ein relativ trockener Sand genutzt, welcher eine deutlich kleinere Wärmeleitfähigkeit aufweist als der Sand in den Referenzversuchen. Die vergleichenden Berechnungen werden somit mit einer Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{\text{Boden}} = 0,5 \text{ W/(mK)}$ durchgeführt. Die Ergebnisse der simulierten Technikumsversuche liegen in einem guten Wertebereich und zeigen beim Wärmeverlust eine Differenz zu den Ergebnissen im Technikum von 4 %.

Verglichen werden die Werte für die Doppelrohrsysteme mit den Mediumrohren DN20, DN50, DN100 und PMR63. Dabei gelten für alle vier Systeme die folgenden Bedingungen:

Rücklauf: unbeheizt
 Überdeckungshöhe: 0,8 m
 Umgebungstemperatur: 16 °C
 Wärmeleitfähigkeit des Bodens: 0,5 W/(mK)

Die Wärmeleitfähigkeit des PUR-Schaums wird entsprechend der vorher am FFI durchgeführten Versuche zum eingesetzten PUR-Schaum gewählt und variiert daher je nach Versuch.

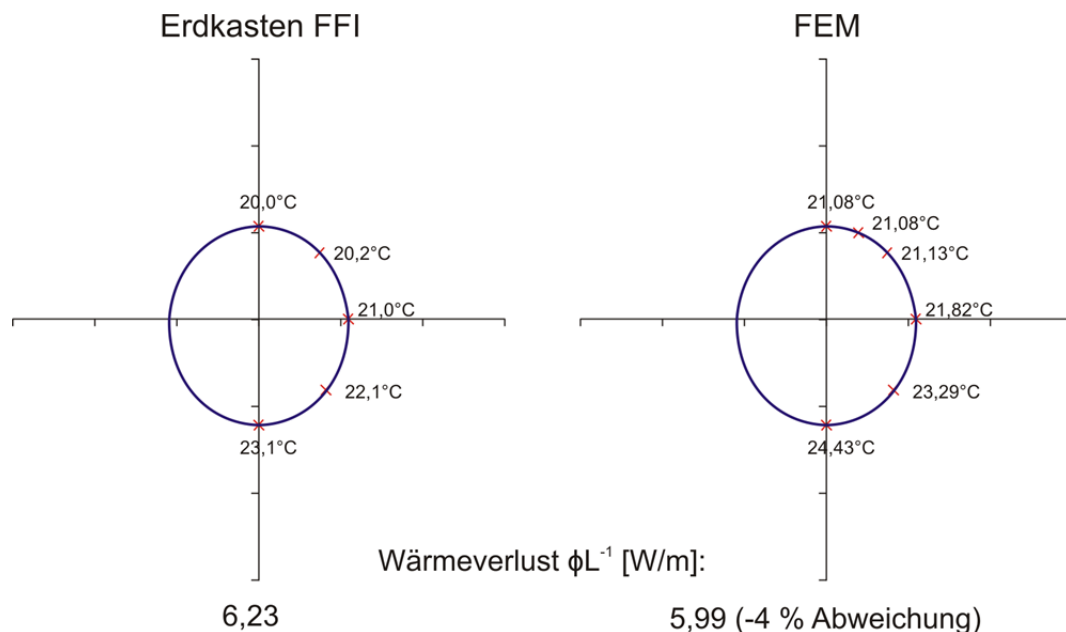


Abbildung 4-35: Vergleich der Temperaturen und des Wärmeverlustes am Rohraußenmantel

Versuchsreihe 1: DN20

Die Wärmeleitfähigkeit des PUR-Schaums wird mit 0,0266 W/(mK) gemessen.

Der Vergleich der Versuche mit der Simulation ergab für das Doppelrohr mit Mediumrohr DN20 bei einem beheizten Rücklauf mit 90 °C eine maximale Abweichung von etwa 6 % (siehe Abbildung 4-36) und zeigt daher schon eine gute Übereinstimmung. Bei 70 °C im Rücklauf beträgt die Abweichung etwa 3 %.

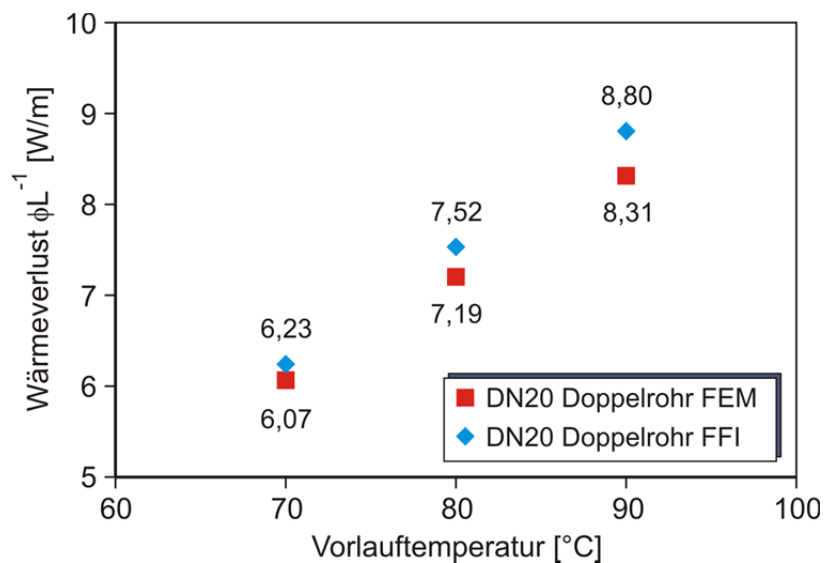


Abbildung 4-36: Wärmeverlust - Vergleich FFI und FEM für DN20

Versuchsreihe 2: DN50

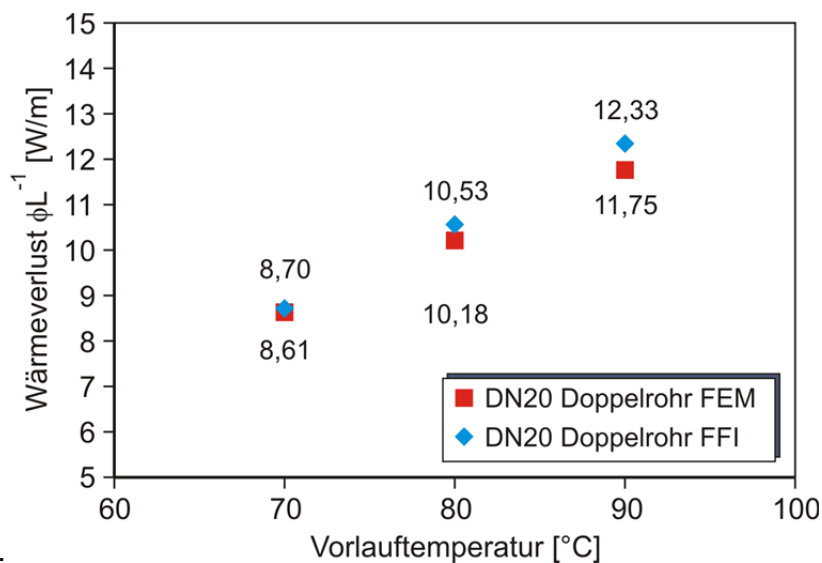


Abbildung 4-37: Wärmeverlust - Vergleich FFI und FEM für DN50

Die Wärmeleitfähigkeit des PUR-Schaums beträgt 0,0261 W/(mK).

Für das Doppelrohr mit Mediumrohr DN50 ist auch in diesem Fall eine Abweichung bei 90 °C im Rücklauf von etwa 5 % als Maximum zu verzeichnen (siehe Abbildung 4-37). Bei 70 °C ist die Abweichung nur noch mit etwa 1 % zu messen und zeigt daher schon eine gute Übereinstimmung.

Versuchsreihe 3: DN100

Die gemessene Wärmeleitfähigkeit des PUR-Schaums beträgt 0,0261 W/(mK).

Im Falle des DN100 ist auch in diesem Fall bei 90 °C im Rücklauf eine Abweichung von etwa 7 % als Maximum zu verzeichnen (siehe Abbildung 4-38). Für 80 °C ist sogar eine Übereinstimmung zu erkennen, bei der eine Abweichung nur in der zweiten Nachkommastelle zu erkennen ist. Die Simulation kann somit den Versuch bezüglich des Wärmeverlustes fast exakt nachbilden.

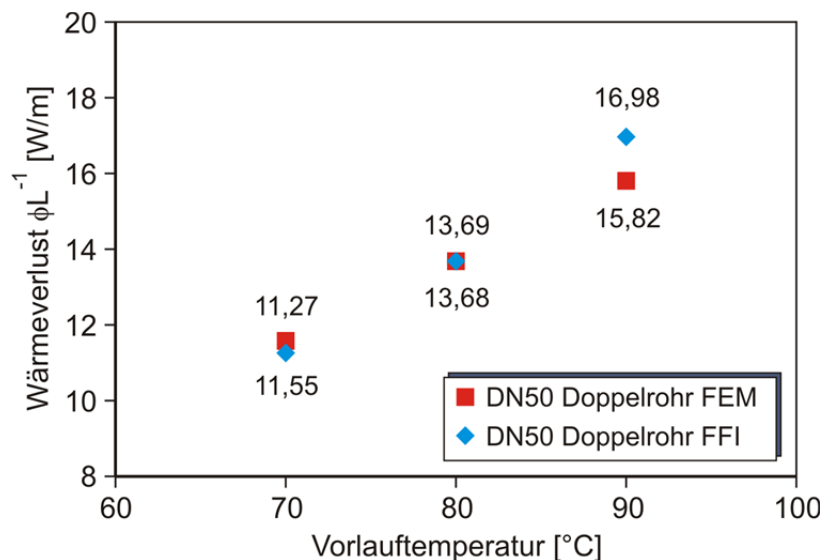


Abbildung 4-38: Wärmeverlust - Vergleich FFI und FEM für DN100

Versuchsreihe 4: PMR63

Als Vergleichsrohr zum DN50 wird noch das PMR63 untersucht.

Die Wärmeleitfähigkeit des Schaums für das PMR wird mit 0,0255 W/(mK) angegeben.

Die Abweichungen befinden sich im Bereich von 8 bis 12 % (siehe Abbildung 4-39). Auch bei diesem Rohrtyp ist die Abweichung für die größte Temperatur am größten.

Da die vier verglichenen Rohre insgesamt eine maximale Abweichung von 12 % aufweisen, kann das Modell die Versuche weitestgehend abbilden und wird für die Parameterstudie genutzt und ggf. weiter angepasst.

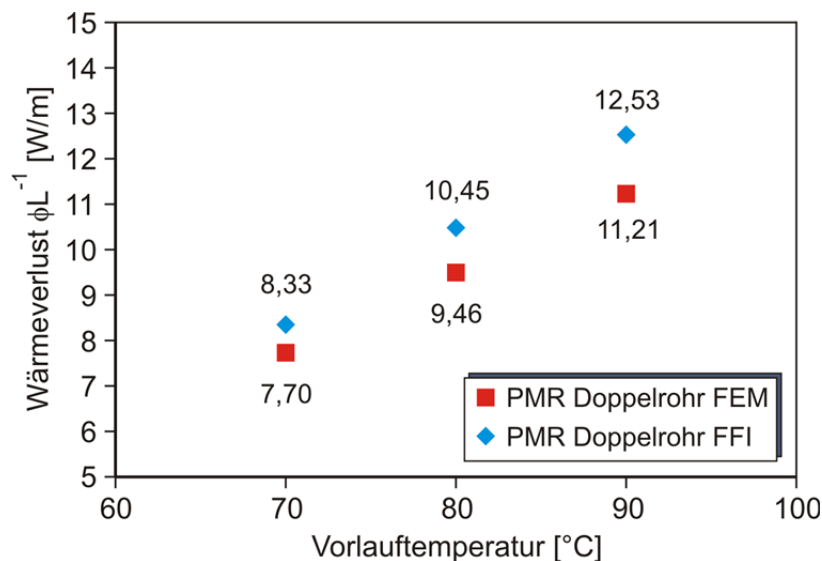


Abbildung 4-39: Wärmeverlust - Vergleich FFI und FEM für PMR63

4.4.4 Parameterstudie der gebetteten Rohre

Als Grundlage für die Parameterstudie dienen die numerischen Modelle, die die Technikumsversuche am FFI nachgestellt haben. Diese werden entsprechend angepasst und der Bodenbereich erweitert. In der Parameterstudie sollen nicht nur Doppelrohre untersucht werden, sondern auch die entsprechenden Einzelrohrsysteme. Beide Systeme werden daraufhin verglichen. Außerdem werden die Ergebnisse teilweise mit analytischen Ergebnissen verglichen, um auch diesen Vergleich darstellen zu können.

Durch Parametervariationen werden verschiedene Einflüsse aus Rohrquerschnittsgeometrie (verschiedene Rohrtypen und -dimensionen), Bodentemperatur (an der Geländeoberkante „GOK“ sowie 3 m unterhalb des Rohres „UK“), Verlegetiefe (Überdeckungshöhe des Rohres $\ddot{U}_H$) und Eigenschaften des Bettungsmaterials (Wärmeleitfähigkeit λ_{Boden}) für unterschiedliche Betriebszustände (Variation der Vorlauf- sowie der Rücklauf-temperatur; mit „VL“ und „RL“ bezeichnet) untersucht. Zur Variation der Rohrquerschnittsgeometrie werden Rohrsysteme unterschiedlicher Dimensionen modelliert. Dabei werden Doppelrohre verschiedener Hersteller mit unterschiedlichen Materialeigenschaften untersucht. Für die Betriebszustände werden unterschiedliche Kombinationen der Vor- und Rücklauf-temperatur überprüft.

Eine Übersicht der verschiedenen Variationen ist in Tabelle 4-5 gegeben.

Tabelle 4-5: Versuchsprogramm für das Bodenmodell

Parameter			Variationsbereich
Überdeckungshöhe	$\ddot{U}_H$	[m]	0,6; 0,8 ; 1,0; 1,2
Betriebstemperatur	$\vartheta_{VL/RL}$	[°C]	VL 85 – RL 55 /45/35; VL 65/75/ 85 /95/105/115 – RL 55 ; VL 35 – RL 65 ... VL 85 – RL 115
Rohrdimension			KMR DN20, 50 , 100; PMR 63x5,8
Wärmeleitfähigkeit	λ_{Boden}	[W/(mK)]	0,3; 0,5; 1,0 ; 1,3
Umgebungstemperatur	ϑ_{GOK}	[°C]	-10, 0, +10 , +20

4.4.5 Auswertung der Parameterstudie der gebetteten Rohre

In diesem Kapitel werden nun die Ergebnisse der Parameterstudie der gebetteten Doppelrohre dargestellt. Dabei werden jeweils die Ergebnisse der Doppel- und der Einzelrohrsysteme gegenübergestellt. Die Ergebnisse können in tabellarischer Form der Anlage 2 entnommen werden.

Überdeckungshöhe

Zunächst wird die Überdeckungshöhe des Modells variiert. Dabei wird ein Bereich zwischen 0,6 m und 1,2 m gewählt.

In der folgenden Abbildung sind absolute Werte der Wärmeverluste in Abhängigkeit der Überdeckungshöhe dargestellt. In rot sind die DR-Modelle dargestellt und in blau die ER. Die fettgedruckten Linien stammen aus den analytischen Berechnungen, die einzelnen Punkte aus den FEM-Berechnungen.

Der Wärmeverlust variiert für die Einzelrohre zwischen 22,02 W/m und 23,09 W/m und für die Doppelrohre zwischen 14,13 W/m und 14,53 W/m (siehe Abbildung 4-40). Das Doppelrohr zeigt gegenüber dem Einzelrohr einen um etwa 35 % geringeren Wärmeverlust. Eine Verdoppelung der Überdeckungshöhe von 0,6 m auf 1,2 m ergibt lediglich eine Gesamtabweichung der Wärmeverluste vom Referenzfall von 2,8 % für Doppelrohre und 4,7 % für Einzelrohre.

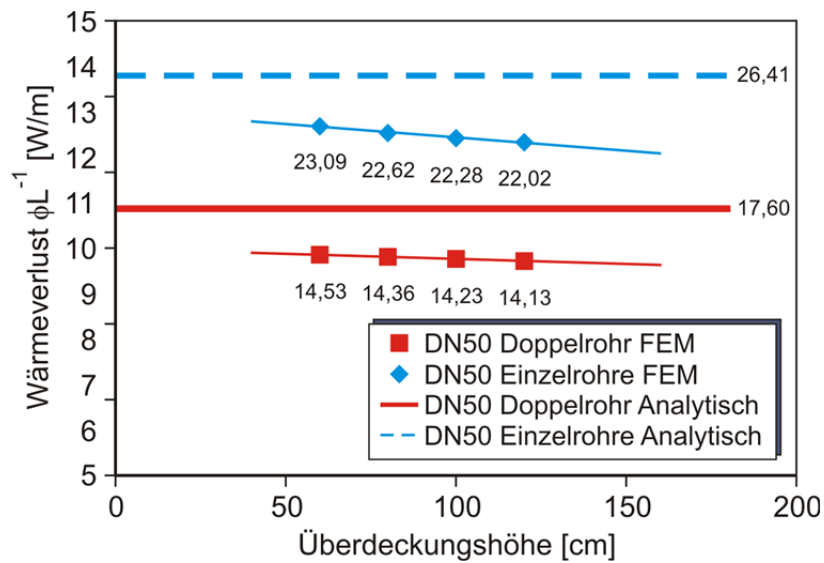


Abbildung 4-40: Bodenmodell – Überdeckungshöhe absolut

Zur besseren Einschätzung des Einflusses der Überdeckungshöhe sind in Abbildung 4-41 noch einmal die prozentualen Abweichungen der Wärmeverluste vom Referenzmodell in Abhängigkeit von der bezogenen Überdeckungshöhe in einem Diagramm sowie tabellarisch (Tabelle 4-6) dargestellt.

Darin ist zu erkennen, dass eine Reduzierung der Überdeckungshöhe um 25 % (entspricht 20 cm Überdeckung) eine Zunahme des Wärmeverlustes von 1,2 bzw. 2,1 % im Vergleich zum Referenzmodell bedeutet.

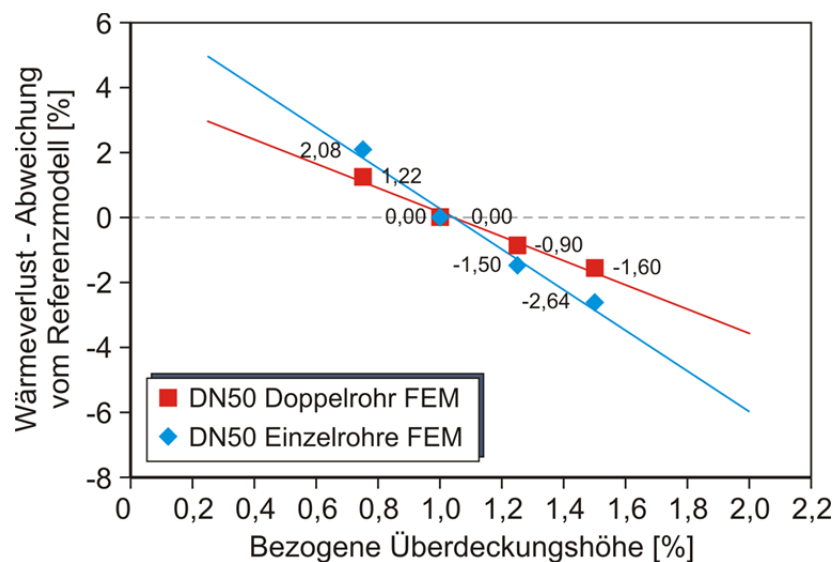


Abbildung 4-41: Bodenmodell – Überdeckungshöhe prozentual

Tabelle 4-6: Überdeckungshöhe Abweichungen

Änderung Überdeckung [%]	Änderung Wärmeverlust DR bzw. ER [%]
- 25	+ 1,2 bzw. 2,1
+ 25	- 0,9 bzw. - 1,5
+ 50	-1,6 bzw. -2,6

Da die Werte trotz deutlicher Erhöhung der Überdeckung nur eine geringe Änderung des Wärmeverlustes aufzeigen, ist kein signifikanter Einfluss der Überdeckungshöhe auf den Wärmeverlust zu erkennen.

Des Weiteren liegen im Vergleich der FE-Berechnungen mit den analytischen Werten die Ergebnisse der Simulation im Schnitt 15 % bis 20 % unterhalb der analytischen Werte, da der Berechnungsansatz das System stark vereinfacht.

Betriebstemperatur

Als zweites wird die Betriebstemperatur der Doppelrohre variiert. Dabei wird jeweils einmal nur der Rück- bzw. Vorlauf variiert und einmal der Temperaturbereich verschoben. Insgesamt werden dazu jeweils 13 Berechnungen für das Doppel- und Einzelrohr durchgeführt.

Die folgenden Temperaturbereiche werden untersucht:

Vorlauftemperatur (VL): 65 °C bis 115 °C

Rücklauftemperatur (RL): 35 °C bis 85 °C

Die Referenztemperaturen für den Vor- bzw. Rücklauf liegen bei 85 °C und 55 °C.

Eine Übersicht der untersuchten Betriebstemperaturen ist in Abbildung 4-42 zu finden.

Variation Rücklauftemperatur

Zuerst wird die Variation der Temperatur des Rücklaufs untersucht. Dabei wird die Referenztemperatur des Rücklaufs von 55 °C zweimal um je 10 K reduziert. Die Temperatur des Vorlaufs liegt bei 85 °C.

Die Wärmeverluste werden dabei jeweils um etwa 2 W/m (Einzelrohr) und 1,2 W/m (Doppelrohr) reduziert (siehe Abbildung 4-43). Die Ersparnis des Doppelrohres im

Vergleich zum Einzelrohr beträgt ca. 36,5 % und zeigt somit eine gute Übereinstimmung mit dem Wert aus der Untersuchung der Überdeckungshöhe.

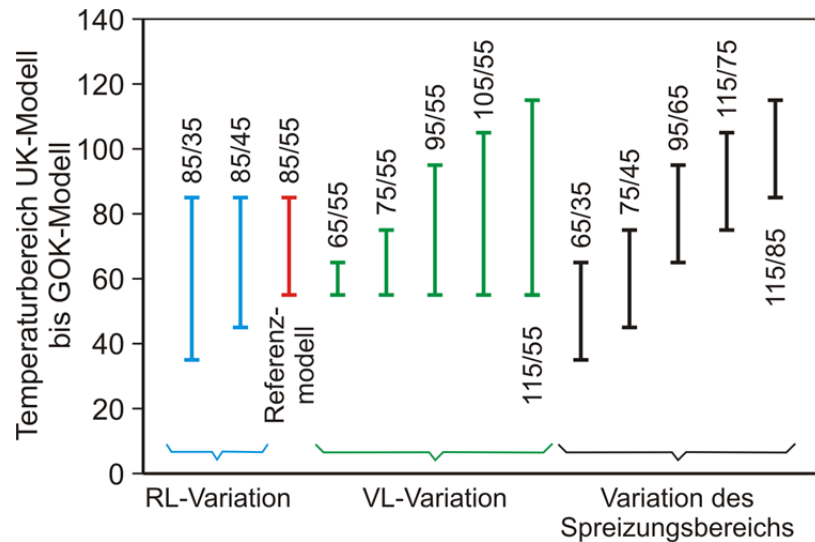


Abbildung 4-42: Bodenmodell - Übersicht Variation der Betriebstemperatur

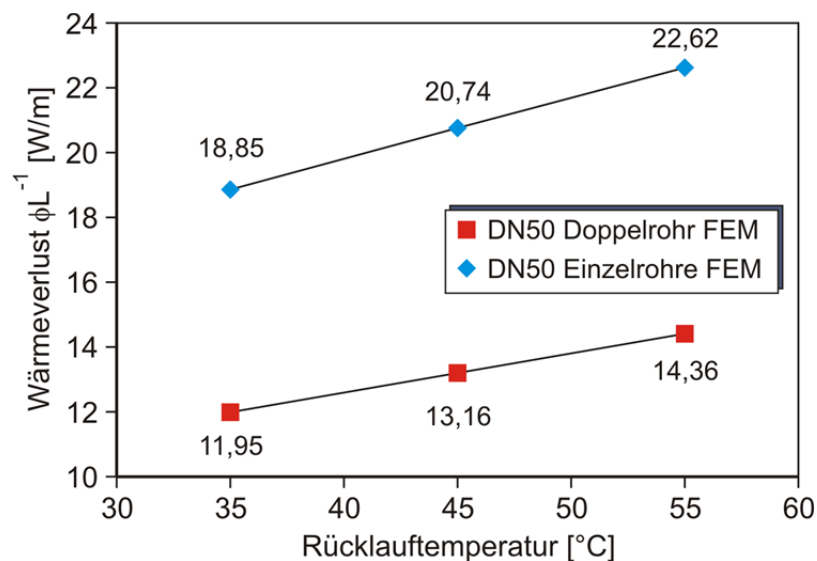


Abbildung 4-43: Bodenmodell – Variation Rücklauf Temperatur absolut

Um die prozentuale Änderung zu erhalten, werden die Werte bezüglich des Referenzmodelles normiert (siehe Abbildung 4-44) und die Ergebnisse tabellarisch aufgelistet (siehe Tabelle 4-7). Für die Doppelrohr- sowie die Einzelrohrsysteme liegen nun beide Graphen aufeinander und zeigen einen linearen Verlauf. Die Änderung des Wärmeverlustes in Abhängigkeit der Rücklauf Temperatur ist unabhängig davon, ob ein Einzelrohr- oder ein Doppelrohrsystem mit gleichem Mediumdurchfluss vorliegt. Eine Verringerung der Rücklauf Temperatur um 10 K zieht für beide Systeme eine Reduzierung des Wärmeverlustes um etwa 8,3 % nach sich. Entsprechend bewirkt eine Reduzierung um 20 K eine Verringerung des Wärmeverlustes um etwa 16,7 %. Die Verluste sinken mit Reduzierung der RL-Temperatur, da weniger Energie in das System eingebracht wird.

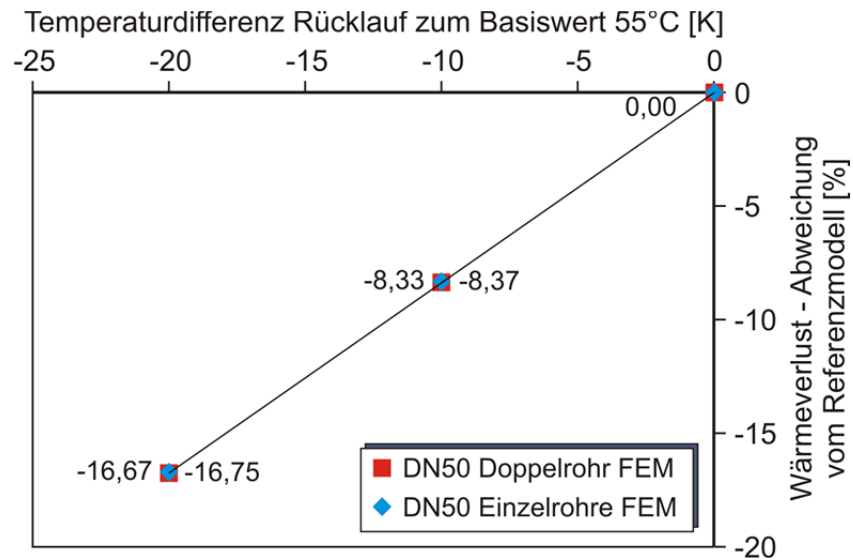


Abbildung 4-44: Bodenmodell – Variation Rücklauftemperatur prozentual

Tabelle 4-7: Bodenmodell - Variation Rücklauftemperatur prozentual

Änderung RL-Temperatur [K]	Änderung Wärmeverlust DR [%]
-10	- 8,4
-20	- 16,8
+ 50	-1,6 bzw. -2,6

Variation Vorlauftemperatur

Als nächstes wird die Vorlauftemperatur variiert. Die Referenztemperatur des Vorlaufs beträgt 85 °C und wird in mehreren Schritten um je 10 K reduziert. Die Temperatur des Rücklaufs beträgt dabei immer 55 °C.

Auch bei der Untersuchung des Vorlaufs werden dabei die Wärmeverluste um etwa 2 W/m (Einzelrohr) und 1,2 W/m (Doppelrohr) reduziert (siehe Abbildung 4-45). Das System zeigt somit für den Vorlauf das gleiche Verhalten wie für den Rücklauf. Ebenso zeigt der Vergleich zwischen Doppelrohr und Einzelrohr für das Doppelrohr einen um 36,5 % reduzierten Wärmeverlust.

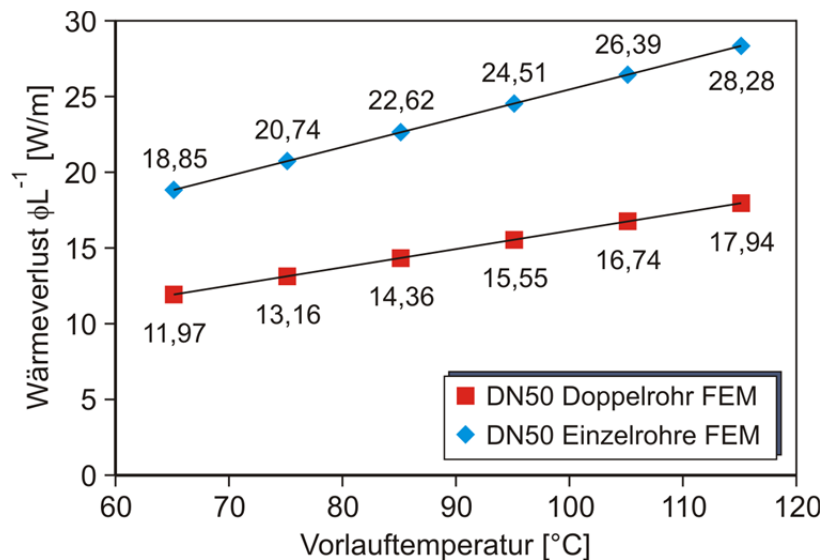


Abbildung 4-45: Bodenmodell – Variation Vorlauftemperatur absolut

Auch für den Vorlauf wird die prozentuale Änderung bezüglich des Referenzmodells berechnet (siehe Abbildung 4-46 bzw. Tabelle 4-8). Dabei wird ersichtlich, dass die Verläufe, wie bei der Variation des Rücklaufs auch für das Doppel- und Einzelrohrsystem aufeinander liegen und den gleichen Verlauf zeigen, wie bei der Variation des Rücklaufs. Eine Temperaturänderung um 10 K bewirkt eine Änderung des Wärmeverlustes um etwa 8,3 %.

Für die untersuchten Modelle ist es unerheblich, ob eine Temperaturänderung am Vor- oder Rücklauf stattfindet. Außerdem zeigt das System für das Doppelrohr sowie für das Einzelrohr die gleichen prozentualen Änderungen des Wärmeverlustes.

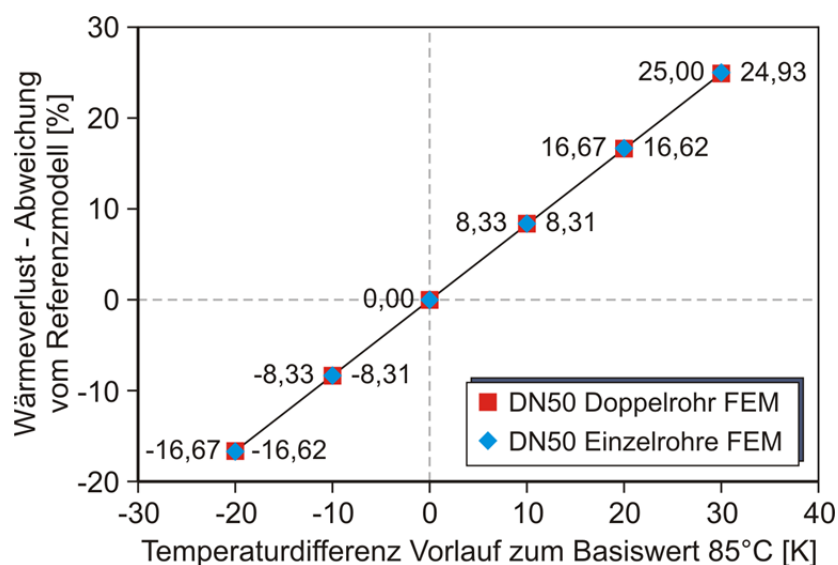


Abbildung 4-46: Bodenmodell – Variation Vorlauftemperatur prozentual

Tabelle 4-8: Bodenmodell - Variation Vorlauftemperatur prozentual

Änderung VL-Temperatur [K]	Änderung Wärmeverlust DR [%]
- 20	- 16,6
- 10	- 8,3
+ 10	+ 8,3
+ 20	+ 16,6
+ 30	+ 24,9

Variation Temperaturbereich

Bei dieser Untersuchung wird der gesamte Wertebereich verschoben. Es werden also der Vor- sowie der Rücklauf um jeweils 10 K erhöht bzw. reduziert. Die Temperaturen im Vorlauf liegen bei 65°C bis 115°C, die für den Rücklauf bei 35°C bis 85°C.

Die Wärmeverluste werden dabei für jede Bereichsverschiebung um 10 K jeweils um etwa 3,8 W/m (Einzelrohr) und 2,3 W/m (Doppelrohr) verändert (siehe Abbildung 4-47). Auch bei dieser Untersuchung beträgt der Unterschied zwischen Einzel- und Doppelrohr 36,5 %.

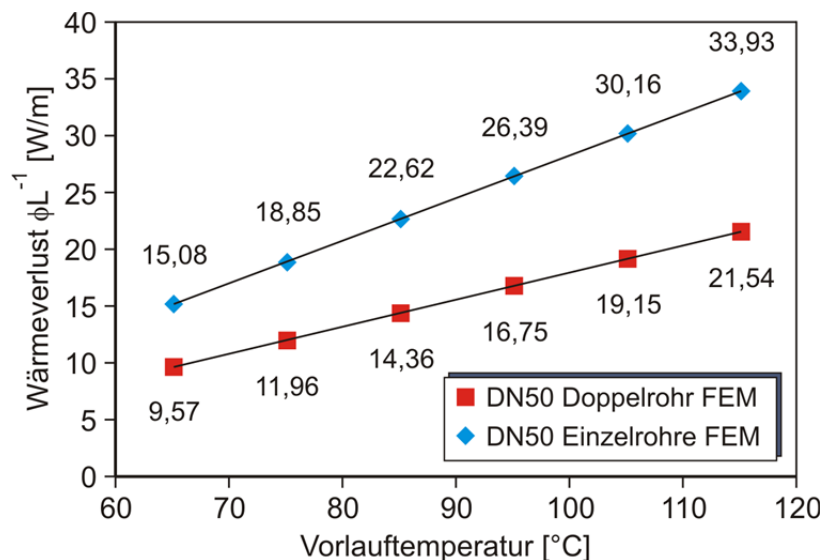


Abbildung 4-47: Bodenmodell – Variation Temperaturbereich prozentual

Die prozentuale Änderung bezüglich des Referenzmodells, die auch für diese Untersuchung berechnet wird, ist in Abbildung 4-48 bzw. Tabelle 4-9 dargestellt. Auch diese Verläufe sind linear und liegen für das Doppel- und das Einzelrohr aufeinander. Für eine Temperaturänderung von 10 K im Vorlauf und 10 K im Rücklauf ist eine Änderung des Wärmeverlustes von etwa 16,7 % zu verzeichnen.

Diese Untersuchungen zeigen, dass jede Veränderung des Systems um 10 K eine Änderung um 8,3 % erwirkt und die Änderung des Temperaturbereichs, welche zwei Temperaturänderungen von 10 K bedeutet, eine entsprechende doppelt so hohe Änderung nach sich zieht.

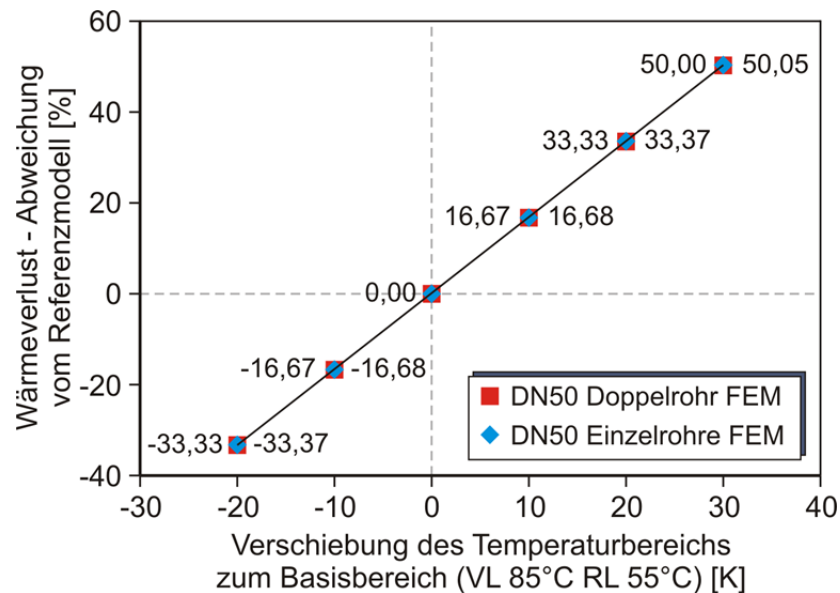


Abbildung 4-48: Bodenmodell – Variation Temperaturbereich prozentual

Tabelle 4-9: Bodenmodell - Variation Temperaturbereich prozentual

Änderung Temperaturbereich [K]	Änderung Wärmeverlust DR [%]
- 20	- 33,4
- 10	- 16,7
+ 10	+ 16,7
+ 20	+ 33,4
+ 30	+ 50,1

Rohrdimension

Dieser Abschnitt zeigt den Einfluss der Rohrgeometrie auf den Wärmeverlust. Dabei werden Doppelrohrsysteme mit den Mediumrohren KMR DN20, DN50 und DN100 sowie das dem KMR DN50 entsprechende PMR63 simuliert. In Abbildung 4-49 sind die Verläufe des Wärmestroms vergleichend für die vier Systeme dargestellt. Dabei ist stets der gleiche Verlauf mit unterschiedlicher Ausbreitung, je nach Rohrdimension, zu sehen. Der stärkste

Wärmestrom am Rohraußenmantel ist dabei aufgrund der verhältnismäßig dünnen Dämmung an der Sohle am größten System mit KMR DN100 zu erkennen. Die kleinsten Wärmeströme sind am Scheitel des kleinsten Rohres (mit KMR DN20) zu verzeichnen.

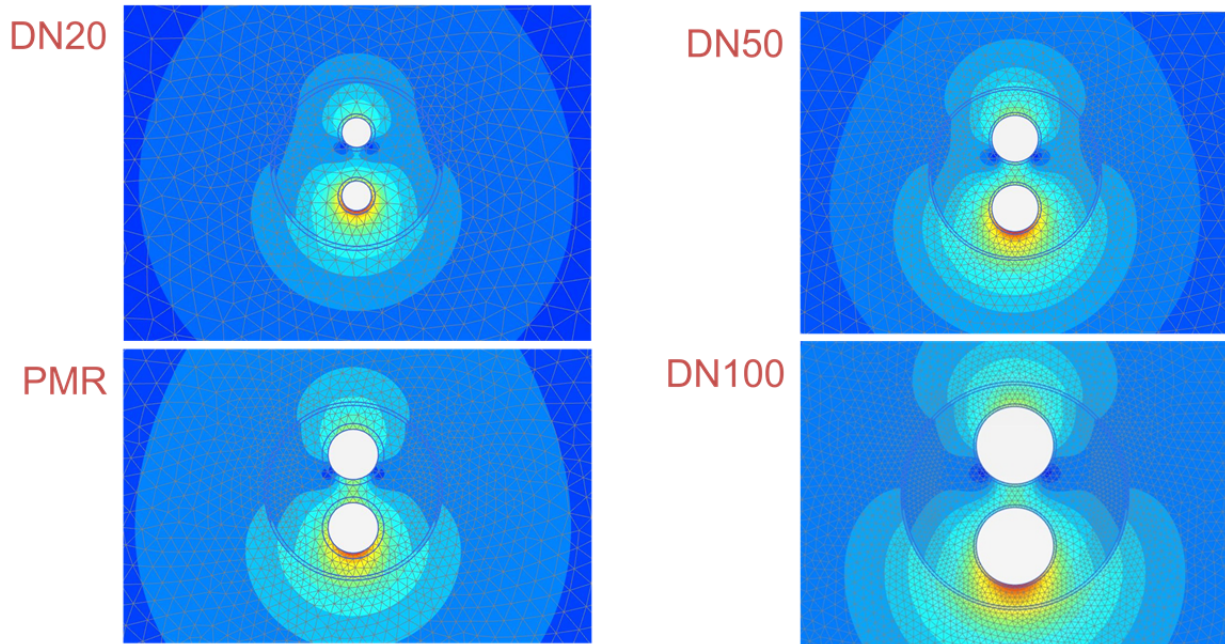


Abbildung 4-49: Bodenmodell – Variation Rohrdimension Wärmeverlust

Diese vier Systeme werden dann mit den ebenfalls simulierten zugehörigen Einzelrohrsystemen verglichen. Um diese Werte im Bezug zu den analytischen Werten betrachten zu können, werden auch diese Werte den Ergebnissen der Simulation gegenübergestellt (siehe Abbildung 4-50).

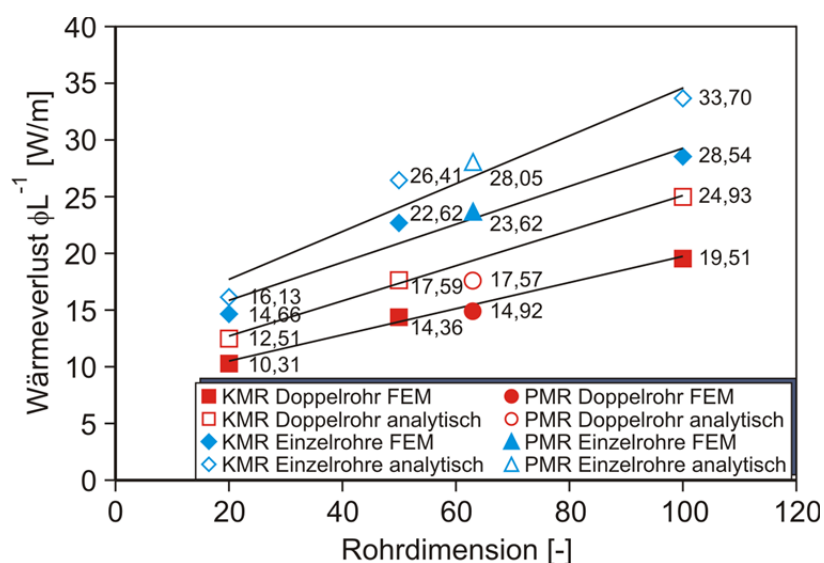


Abbildung 4-50: Bodenmodell – Variation Rohrdimension absolut

Dargestellt sind die absoluten Werte der Wärmeverluste in Abhängigkeit des Außendurchmessers des Mediumrohres als Rohrdimensionen. Es scheint für diesen

Wertebereich ein annähernd linearer Verlauf vorzuliegen. Bei der Betrachtung der absoluten Werte entsteht der Eindruck, dass das KMR DN20 mit 10,31 W/m deutlich weniger Wärmeverluste aufweist als das KMR DN100 mit 19,51 W/m und kleinere Rohre folglich zu einem kleineren Wärmeverlust führen. Dies ist, absolut betrachtet, richtig. Allerdings ist zu betrachten, dass das DN20 auch einen deutlich geringeren Mediumdurchfluss besitzt. Darauf wird später noch einmal genauer eingegangen.

Werden für die Simulation die Doppelrohre mit den Einzelrohren verglichen, so zeigt sich eine Differenz von etwa 30 % bis etwa 37 %. Die kleinsten Rohre weisen dabei auch die kleinsten Differenzen auf, jedoch zeigt die mittlere Rohrgröße die größten Abweichungen. Für die analytischen Werte ist dieser Trend ebenfalls zu sehen, wobei dort der Bereich mit etwa 22 % bis etwa 38 % noch größer ist. Die Werte für das PMR sind im Vergleich zum KMR in einem ähnlichen Wertebereich, wobei die Abweichungen beim Einzelrohr größer sind als beim Doppelrohr.

Werden die Werte nun noch einmal auf das Referenzmodell bezogen und dabei statt des Mediumrohrdurchmessers die Durchflussfläche als Bezugsgröße gewählt (siehe Abbildung 4-51), so ändert sich diese Aussage. Nun ist zu erkennen, dass eine Verkleinerung der Durchflussfläche auf 16 % (Änderung von DN50 auf DN20) eine Reduzierung des Wärmeverlustes von 30 % bis 40 % bewirkt, eine Vergrößerung der Durchflussfläche auf fast 400 % (Änderung von DN50 auf DN100) aber ebenfalls eine Änderung, in diesem Fall eine Zunahme, in diesem Wertebereich nach sich zieht. Diese Ergebnisse sind in Tabelle 4-10 auch noch einmal zusammengefasst. Dies soll nun noch einmal genauer untersucht werden.

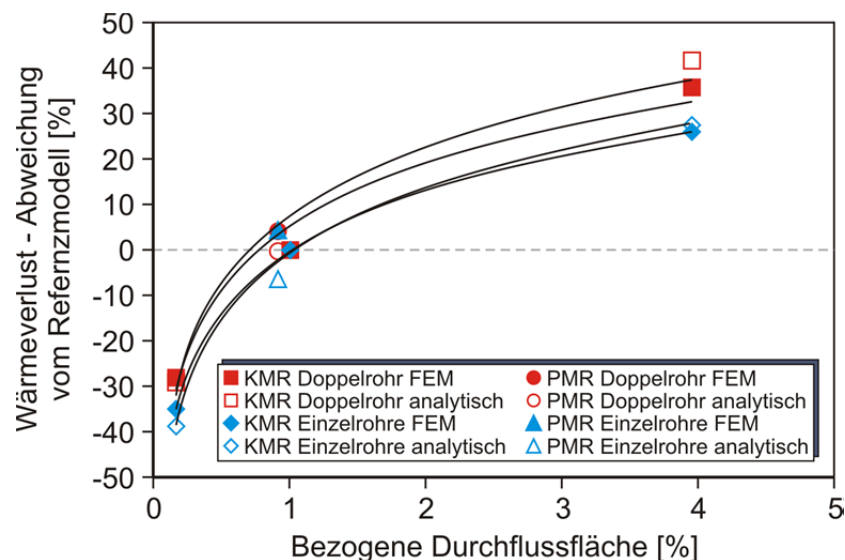


Abbildung 4-51: Bodenmodell – Variation Rohrdimension prozentual

Tabelle 4-10: Bodenmodell - Variation Rohrdimension prozentual

Änderung Rohrdimension	Änderung Wärmeverlust R bzw. ER [%]
DN50 → DN20 (Durchflussänderung auf 16%)	- 28 bzw. - 35
DN50 → DN100 (Durchflussänderung auf 400%)	+ 36 bzw. + 26

In Abbildung 4-52 werden der Wärmeverlust pro Durchflussfläche der Durchflussfläche der Mediumrohre gegenübergestellt. Der Wärmeverlust wird somit auf einen vergleichbaren Wert normiert und der Rohrdimension, hier die Durchflussfläche der Mediumrohre, gegenübergestellt.

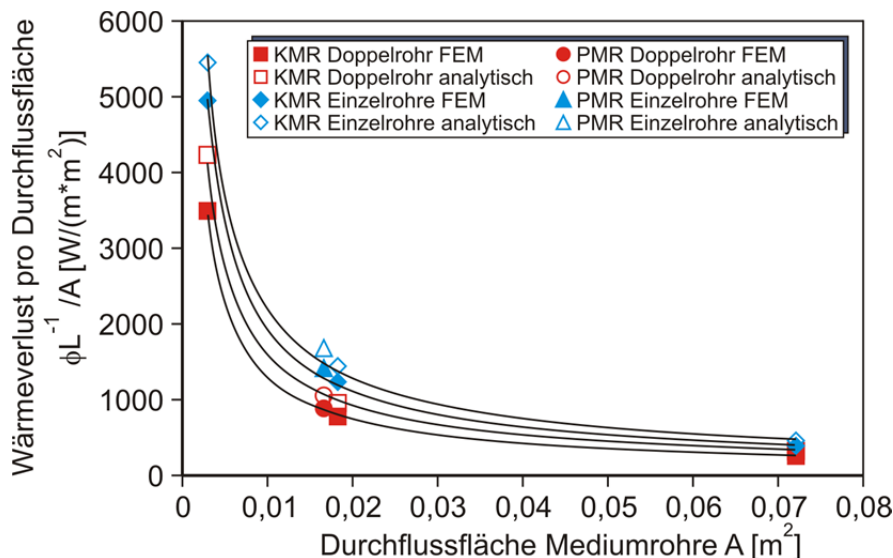


Abbildung 4-52: Bodenmodell – Variation Rohrdimension, Durchflussfläche prozentual

Es wird ersichtlich, dass sich die zu Anfang der Untersuchungen der Rohrdimension festgestellte Tendenz nicht bestätigt, wenn die Werte ins Verhältnis zur Rohrgeometrie gesetzt werden. Vielmehr ist nun zu erkennen, dass für kleinere Rohre ein viel höherer Wärmeverlust pro Durchflussfläche (etwa 3500 W/(m*m²) bis 5500 W/(m*m²)) zu verzeichnen ist als für größere Rohre (etwa 300 W/(m*m²) bis 500 W/(m*m²)). Der Wärmeverlust pro Durchflussfläche nimmt mit Steigerung der Durchflussfläche des Mediumrohres deutlich ab. Dieser Abfall ist besonders bei den kleineren Rohren deutlich zu erkennen und wirkt sich bei den größeren Rohren nur noch wenig aus.

Werden nun die verschiedenen Rohrsysteme betrachtet, so bewirkt eine Änderung von DN20 auf DN50 eine Reduzierung des Wärmeverlustes auf 1/4, eine Änderung von DN50 auf DN100 eine Reduzierung auf 1/3 und eine Änderung von DN20 auf DN100 insgesamt eine Reduzierung auf 1/10. Die Werte für die vergleichbaren KMR DN50 und PMR63 sind ähnlich. Diese Werte sind noch einmal in der folgenden Tabelle 4-11 zusammengestellt.

Tabelle 4-11: Bodenmodell - Variation Rohrdimension, Durchflussfläche prozentual

Änderung Rohrdimension	Änderung bezogener Wärmeverlust auf
DN20 → DN50	1/4
DN50 → DN100	1/3
DN20 → DN100	1/10
DN50 / PMR63	ähnlich

Desweiteren ist erkennbar, dass Einzelrohre einen höheren auf die Durchflussfläche bezogenen Wärmeverlust aufweisen als Doppelrohre. Dieser Unterschied ist für kleinere Rohre deutlich stärker als für größere.

Ebenso verhalten sich auch die analytischen Werte, wobei diese im Vergleich zur Simulation höher liegen.

Wärmeleitfähigkeit des Bodens

Im Folgenden wird der Einfluss des Bodens auf die Wärmeverluste untersucht. Dabei wird als maßgebliche Größe die Wärmeleitfähigkeit λ_{Boden} verändert. Sie wird in einem Bereich von 0,3 W/(mK) bis 1,3 W/(mK) variiert, wobei der Wert 1,0 W/(mK) als Referenzwert gewählt wird. Dazu werden wiederum Doppel- und Einzelrohrsysteme untersucht und verglichen (siehe Abbildung 4-53).

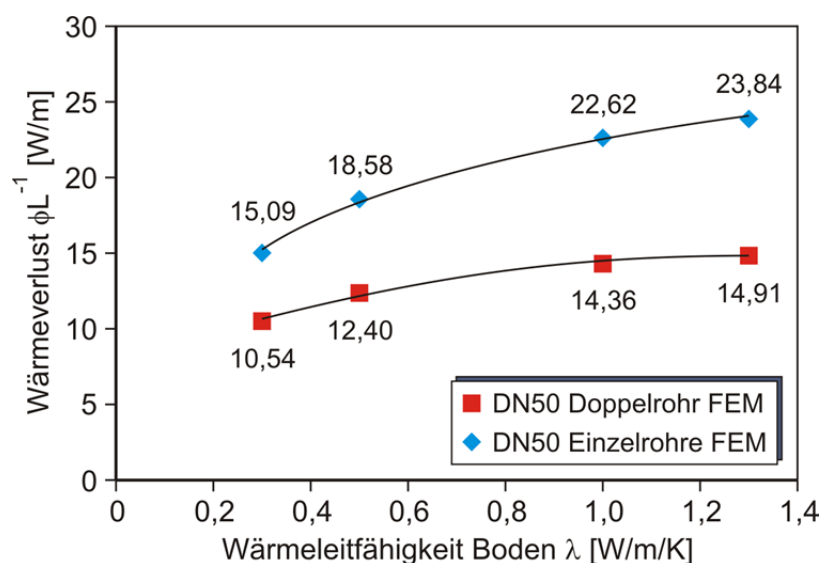


Abbildung 4-53: Bodenmodell – Variation Wärmeleitfähigkeit prozentual

Für beide Rohrsysteme ist mit steigender Wärmeleitfähigkeit eine Steigerung der Wärmeverluste zu erkennen. Da eine gesteigerte Wärmeleitfähigkeit zu einem stärkeren Wärmestrom durch dieses Medium, in diesem Modell der Boden, führt, ist die ein logischer Zusammenhang. Desweiteren ist zu erkennen, dass die Wärmeverluste, wie bei vorherigen Untersuchungen auch, für Einzelrohre höher sind als für Doppelrohre. Die Differenz beträgt für $\lambda_{\text{Boden}} = 0,3 \text{ W/(mK)}$ etwa 30 % und für $\lambda_{\text{Boden}} = 1,3 \text{ W/(mK)}$ etwa 38 % und steigt somit leicht mit steigender Wärmeleitfähigkeit des Bodens.

Werden die Werte der Wärmeverluste und der Wärmeleitfähigkeit nun auf das Referenzmodell bezogen, dann entsteht folgender Trend (siehe Abbildung 4-54). Eine Veränderung von λ_{Boden} auf 30 % bewirkt auch eine Abnahme des Wärmeverlustes um etwa 30 %. Eine Zunahme um 30 % bewirkt jedoch nur eine Zunahme des Wärmeverlustes um etwa 4 % bis 5 %.

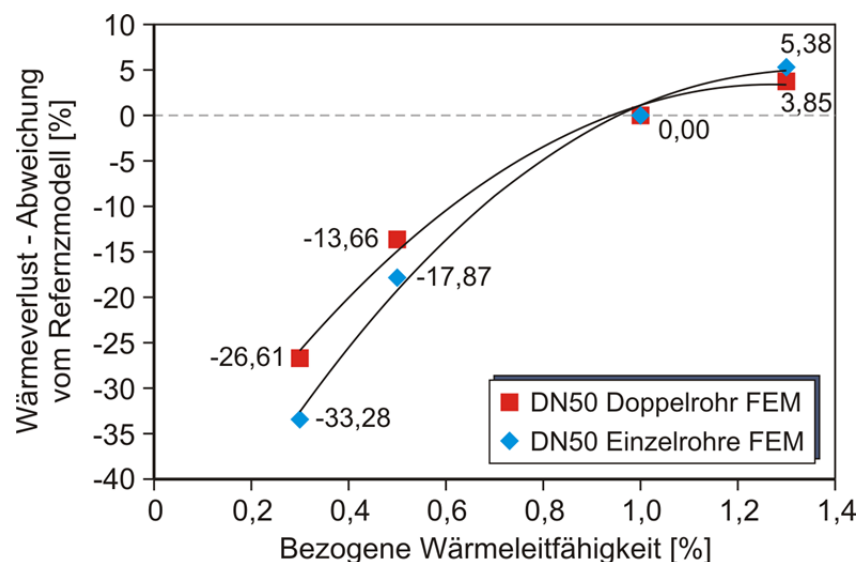


Abbildung 4-54: Bodenmodell – Variation Wärmeleitfähigkeit prozentual

Tabelle 4-12: Bodenmodell - Variation Wärmeleitfähigkeit prozentual

Änderung λ_{Boden} [%]	Änderung Wärmeverlust [%]
+ 30	+ 3,9
- 50	- 13,7
- 70	- 26,6

Die Trendlinie scheint annähernd logarithmisch zu verlaufen, dies sollte jedoch durch weitere Untersuchungen von Extremwerten bestätigt werden, um eine abgesicherte Aussage treffen zu können.

Umgebungstemperatur im Boden

Der nächste untersuchte Parameter ist die Umgebungstemperatur im Boden. Dabei werden die Temperatur an der Geländeoberkante, kurz GOK, variiert. Als Referenzmodell wird der Boden mit einer Temperatur von 10 °C angenommen. Die Temperatur an der GOK wird in einem Bereich von -10 °C bis +20 °C untersucht. Die untersuchten Varianten bzw. der Temperaturbereich der jeweiligen Untersuchung sind in der folgenden Tabelle 4-13 bzw. der folgenden Abbildung 4-55 dargestellt. Auch hier werden jeweils das Einzel- und Doppelrohr betrachtet.

Tabelle 4-13: Bodenmodell - Übersicht Variation der Umgebungstemperatur

	Fall 1	Fall 2	Fall 3	Fall 4
	Extremfall II	Winter	Herbst	Sommer
Temperatur an GOK [°C]	-10	0	10	20
Temperatur an Modellunterkante (UK) [°C]	10	10	10	10
Differenz [K]	20	10	0	10

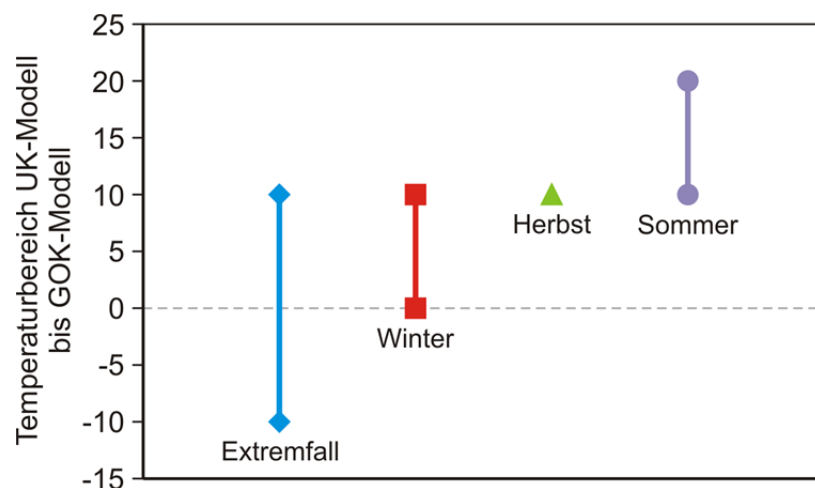


Abbildung 4-55: Bodenmodell - Übersicht Variation der Umgebungstemperatur

In der folgenden Abbildung sind das Doppelrohrsystem rot und das Einzelrohrsystem blau dargestellt. Je niedriger die Temperatur an der GOK, desto größer sind die Wärmeverluste, da die Differenz zwischen den Temperaturen des Rohres und denen des Bodens größer werden und somit die Wärmeströme ansteigen. Die Wärmeverluste der

Doppelrohre sind insgesamt kleiner (12,5 W/m bis 18,1 W/m) als beim äquivalenten Einzelrohrsystem (19,7 W/m bis 28,6 W/m) (siehe Abbildung 4-56). Der Verlauf ist für beide Systeme linear und die Steigung nahezu gleich. Die Differenz beider Verläufe beträgt in allen Punkten etwa 36,5 %, wie bei vorigen Untersuchungen bereits festgestellt.

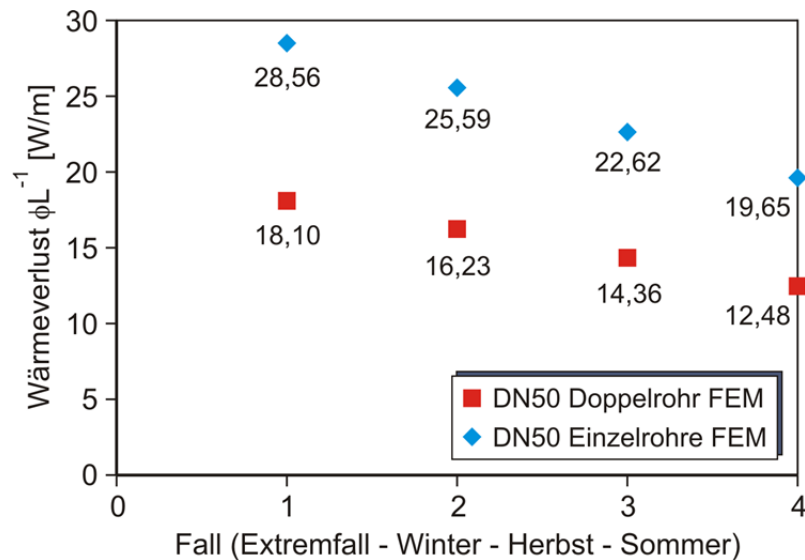


Abbildung 4-56: Bodenmodell – Variation Umgebungstemperatur absolut

Um die prozentuale Änderung der Wärmeverluste pro 10 K Temperaturänderung zu erhalten, werden die Werte auf das Referenzsystem bezogen. Dies wird in der folgenden Abbildung 4-57 dargestellt. Beide Verläufe sind identisch. Bei einer Reduzierung bzw. Steigerung der Temperatur an der GOK um 10 K bzw. 20 K steigen bzw. sinken die Wärmeverluste bei Doppelrohren und Einzelrohren um etwa 13 % bzw. 26 % im Vergleich zum Referenzmodell. Diese Ergebnisse sind in Tabelle 4-14 noch einmal zusammengefasst.

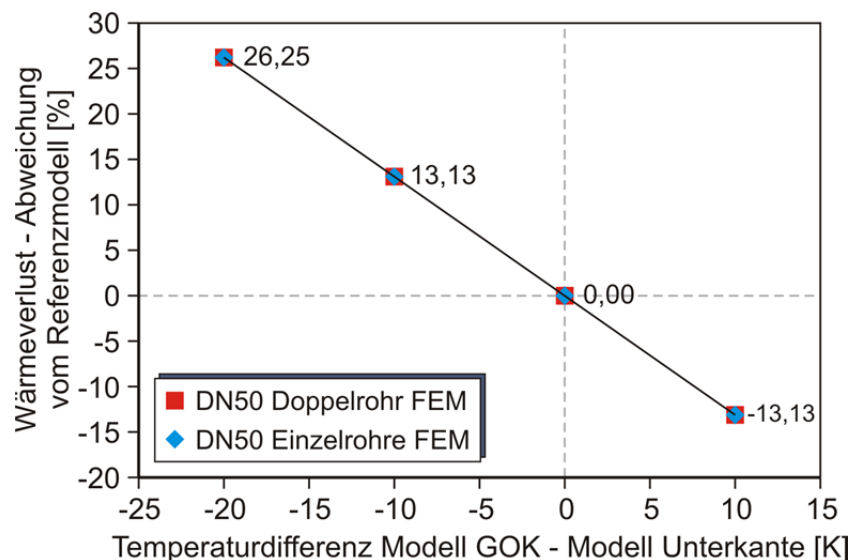


Abbildung 4-57: Bodenmodell – Variation Umgebungstemperatur prozentual

Tabelle 4-14: Bodenmodell – Variation Umgebungstemperatur prozentual

Änderung Temperatur-differenz GOK [K]	Änderung Wärmeverlust DR bzw. ER [%]
- 20	+ 26
- 10	+ 13
+ 10	- 13

4.4.6 Zusammenfassung Bodenmodell

Abschließend sollen alle Ergebnisse aus der Untersuchung des Bodenmodells noch einmal zusammengetragen werden.

Werden **alle Untersuchungen** insgesamt betrachtet, so wird festgestellt, dass die Wärmeverluste für Doppelrohre in der Regel 35 % bis 37 % niedriger sind als für die entsprechenden Einzelrohrsysteme. Lediglich bei der Variation der Rohrdimension und der Wärmeleitfähigkeit des Bodens werden im gesamten Untersuchungsbereich der jeweiligen Parameter Differenzen von 30 % bis 38 % festgestellt. Daher kann die Aussage getroffen werden, dass die Doppelrohre im Vergleich zu den Einzelrohren überwiegend zu einer Einsparung der Wärmeverluste von etwa 36 % führen. Lediglich bei sehr kleinen Rohren (DN20) oder einer sehr geringen Wärmeleitfähigkeit von 0,3 W/(mK) können die Werte geringer (minimal 30 %) ausfallen.

Die Berechnungen zur Variation der **Überdeckungshöhe** in einem Bereich von 0,6 m bis 1,2 m ergibt, dass auch bei einer Erhöhung der Überdeckung um 25 % (entspricht 20 cm) lediglich eine Änderung des Wärmeverlustes von 1,2 % (DR) bzw. 2,1 % (ER) festzustellen ist. Somit zeigt dieser Parameter keinen ausschlaggebenden Einfluss auf den Wärmeverlust. Desweiteren werden für die Simulationsergebnisse gegenüber den analytischen Berechnungen ein um 15-20 % geringerer Wert der Wärmeverluste ermittelt. Der Berechnungsansatz liegt daher auf der sicheren Seite.

Für die Untersuchung der **Betriebstemperatur** werden die Temperaturen der Vor- bzw. Rücklaufleitung zwischen 65 °C und 115 °C bzw. 35 °C und 85 °C variiert. Es werden jeweils nur die Temperaturen des Vor- oder Rücklaufs verändert sowie der gesamte Temperaturbereich verschoben. Für alle Variationen ist dabei eine Änderung des Wärmeverlustes von 8,3 % bei einer Änderung um 10 K an einer Leitung vorzufinden. Da der Einfluss linear ist, erfolgt bei einer Änderung um 20 K entsprechend eine doppelt so ausgeprägte Änderung. Ebenso verhält es sich bei einer Verschiebung des Temperaturbereichs um 10 K, da dies die Änderung beider Leitungen voraussetzt.

Werden die **Rohrdimensionen** betrachtet, so wird dafür als Bezugsgröße der Mediumrohrdurchfluss gewählt, um die Werte besser vergleichen zu können. Untersucht werden drei KMR mit den Mediumrohrnennweiten DN20, DN50 und DN100. Außerdem wird entsprechend dem DN50 auch ein PMR63 untersucht. Absolut wird mit steigender Rohrgröße auch ein steigender Wärmeverlust festgestellt. Eine Verkleinerung der Durchflussfläche auf 16 % (DN50 auf DN20) bewirkt dabei eine Verringerung des Wärmeverlustes um 30 bis 40 %, eine Vergrößerung des Durchflusses auf 400 % (DN50 auf DN100) jedoch ebenfalls nur eine Erhöhung in diesem Bereich. Es ist daher ein nichtlinearer Verlauf festzustellen.

Bei Bezug des Wärmeverlustes auf die Durchflussmenge zeigt die Tendenz jedoch etwas anderes. Kleinere Rohre besitzen pro Durchflussfläche einen deutlich höheren Wärmeverlust (etwa $3500 \text{ W}/(\text{m}^3\cdot\text{m}^2)$ bis $5500 \text{ W}/(\text{m}^3\cdot\text{m}^2)$) als größere Rohre (etwa $300 \text{ W}/(\text{m}^3\cdot\text{m}^2)$ bis $500 \text{ W}/(\text{m}^3\cdot\text{m}^2)$). Außerdem zeigen Einzelrohre einen höheren Wärmeverlust pro Durchflussfläche als Doppelrohre, wobei diese Differenz mit steigender Rohrgröße abnimmt. Auch beim Vergleich mit der analytischen Berechnung werden für diese höhere Werte als für die Simulation festgestellt.

Die **Wärmeleitfähigkeit des Bodens** λ_{Boden} zeigt bei einer Steigerung auch eine Erhöhung des Wärmeverlustes. Allerdings ist dieses Verhalten nicht linear, sondern scheint annähernd logarithmisch zu verlaufen. Bei einer Verringerung von λ_{Boden} um 30 % nimmt der Wärmeverlust ebenfalls um etwa 30 % ab, eine entsprechende Steigerung zieht allerdings lediglich eine Zunahme von 5 % nach sich. Dieser Trend sollte durch weitere Untersuchungen noch weiter quantifiziert werden.

Bei Variation der **Umgebungstemperatur im Boden** wird die Temperatur an der Geländeoberkante im Bereich von -20°C bis $+10^\circ\text{C}$ untersucht. Wie auch bei den Betriebstemperaturen ist hier für beide Systeme ein linearer Verlauf zu erkennen. Eine Reduzierung bzw. Steigerung der Temperatur an der GOK um 10 K bewirkt dabei eine Steigerung bzw. Reduzierung der Wärmeverluste um 13 %.

4.5 Zusammenfassung AP1.1

Der erste Teil des Arbeitspaketes beinhaltete die Nachrechnung der Versuche in der Klimakammer, um ein geeignetes FE-Modell erstellen zu können und eine Aussage bezüglich der Mitteltemperatur des Rohrmantels treffen zu können. Durch die Untersuchungen in der Klimakammer kann das Modell an die realen Gegebenheiten angepasst werden und liefert Werte in einem realistischen Wertebereich. Dies dient als Basis für die folgenden Untersuchungen der gebetteten Rohre und zur Entwicklung eines Berechnungsansatzes für die Mitteltemperatur.

Mit Hilfe der Berechnungen an ungebetteten Doppelrohren werden für die Mitteltemperatur des Außenmantels eine vereinfachte Berechnungsweise entwickelt, für welche lediglich die Temperaturmessung am Scheitel, der Sohle und dem Kämpfer benötigt wird und

ausreichend genaue Werte liefert. Dabei werden die gemessenen Temperaturen gemittelt, wobei die Temperatur am Kämpfer aufgrund der Achsensymmetrie doppelt gewertet wird. Siehe dazu hier noch einmal die Gleichung (4-7) aus Kapitel 4.3.5.

$$\vartheta_{4,m} = \frac{(\vartheta_{\text{Scheitel}} + 2\vartheta_{\text{Kämpfer}} + \vartheta_{\text{Sohle}})}{4}$$

Durch diesen Berechnungsansatz kann die messtechnische Erfassung der Temperaturen am Rohrmantel an Doppelrohren erleichtert werden und ermöglicht die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmung des Doppelrohres.

Der zweite Teil des Arbeitspaketes stellt das Bodenmodell dar, welches den Einfluss verschiedener Parameter auf ein gebettetes Rohr (Doppel- sowie Einzelrohr) untersucht.

Bei den untersuchten Parametern ist die Überdeckungshöhe aufgrund ihrer minimalen Änderungsrate des Wärmeverlustes zu vernachlässigen. Für die Betriebstemperatur sowie die Umgebungstemperatur kann ein eindeutiger und linearer Zusammenhang zwischen Temperaturänderung und Änderung des Wärmeverlustes festgestellt werden, welcher auch genauer quantifiziert werden kann (Betriebstemperatur: $\Delta\vartheta_{\text{VL/RL}} = \pm 10 \text{ K} \rightarrow \Delta\Phi \text{ L}^{-1} = \pm 8,3 \%$; Umgebungstemperatur: $\Delta\vartheta_{\text{GOK}} = \pm 10 \text{ K} \rightarrow \Delta\Phi \text{ L}^{-1} = \pm 13 \%$). Die Rohrdimension sowie die Wärmeleitfähigkeit zeigen keinen linearen Zusammenhang und sind somit genauer zu betrachten. Jedoch ist bei beiden Untersuchungen in dem gewählten Wertebereich maximal eine Änderung des Wärmeverlustes bis 40 % für die Extremwerte zu verzeichnen. Bei der Untersuchung der Rohrdimensionen können für die kleineren Rohre deutlich höhere und stärker streuende Werte für den Wärmeverlust pro Durchflussfläche festgestellt werden als für die größeren Rohre. Bei Einzelrohren liegen die Werte ebenfalls über denen der Doppelrohre. Für die Wärmeleitfähigkeit des Bodens gilt, dass die Werte des Wärmestroms für geringe λ_{Boden} deutlich empfindlicher auf Änderungen reagieren als höhere Werte. Um die Rohrdimensionen sowie den Einfluss der Wärmeleitfähigkeit genauer quantifizieren zu können, sind jedoch noch weitere Untersuchungen nötig.

Mit Hilfe dieses Modells wird dabei festgestellt, dass die Doppelrohrsysteme einen deutlich geringeren Wärmeverlust (bis 38 %) aufweisen als die Einzelrohrsysteme. Beide Systeme zeigen außerdem gegenüber den analytischen Berechnungen jeweils einen um 15 % (ER) bzw. 20 % (DR) niedrigeren Wert für den Wärmeverlust. Die analytischen Ansätze liegen somit auf der sicheren Seite.

5. Arbeitspaket 1.2 – Radiale Bettungsspannungsverteilung in Doppelrohren

5.1 Einleitung

Während des Betriebes eines Fernwärmenetzes erwärmt sich die Rohrleitung. Die Erwärmung führt zu Temperaturdehnungen der Rohrmaterialien und einhergehend zu einer radialen Aufweitung des Rohres. Diese temperaturinduzierte Aufweitung verursacht Bettungsreaktionsspannungen und beeinflusst daher die resultierende Verteilung und Größe der Bettungsspannung in der Kontaktfuge zwischen Boden und Rohraußenmantel und damit auch die von der Bettungsspannung abhängige Reibungskraft. Untersuchungen zur Bettungsspannung von Fernwärmeleitungen als Einzelrohrsystem sind schon mehrfach durchgeführt worden und in der derzeitigen Literatur dargestellt. Die Größe und Verteilung der resultierenden Bettungsspannung von Fernwärmeleitungen als Doppelrohrsystem sind derzeit jedoch noch nicht ausreichend untersucht.

Im Rahmen dieses Arbeitspakets soll die Größe und Verteilung der radialen Bettungsspannung an Doppelrohrsystemen infolge temperaturinduzierter Aufweitung untersucht werden. Die Berechnung der Bettungsspannung erfolgt durch das Programm PLAXIS 2D [4] mit einem zweidimensionalen Finite-Element-Modell. Mit Durchführung einer Parameterstudie unter Variation maßgebender Einflussgrößen werden die signifikanten Einflüsse auf die radiale Bettungsspannung ermittelt.

Der Widerstand des Bodens gegen die unter Temperaturbelastung induzierte Aufweitung bzw. Verschiebung der Rohrleitung wird in einen Bettungs- und einen Reibungswiderstand unterteilt. Es wird dabei der Reibungswiderstand in axialer Richtung des Rohres betrachtet, dessen mobilisierbare Kraft sich durch Integration der Bettungsspannung über die Mantelfläche des Rohres multipliziert mit dem Reibungskoeffizienten berechnen lässt. Mit diesem Ansatz wird die mobilisierbare Reibungskraft sowohl an Doppel- als auch an Einzelrohrsystemen berechnet.

Um einen Einstieg in das Thema der radialen Bettungsspannungsverteilung an Fernwärmeleitungen zu geben, wird zunächst auf die notwendigen Grundlagen eingegangen. Anschließend wird ein numerisches Modell entwickelt, das die Wechselwirkung zwischen KM-Rohr und Boden berücksichtigen soll. Mit diesem Berechnungsmodell soll exemplarisch dargestellt werden, wie sich die temperaturinduzierte Aufweitung des Rohres auf die radiale Bettungsspannungsverteilung im Betrieb auswirkt. An diesem numerischen Modell werden durch eine Parameterstudie grundsätzliche Erkenntnisse zur Größe der radialen Bettungsspannung abgeleitet. Es wird untersucht, ob und in welchem Maße die Faktoren einen Einfluss auf die Größe der radialen Bettungsspannung haben.

5.2 Theoretische Grundlagen – Stand des Wissens

Verformungen an den Fernwärmeleitungen treten während des Betriebes sowohl in radialer Richtung, also quer zur Rohrachse, als auch in axialer Richtung, also entlang der Längsachse des Rohres, auf.

Der radiale Bettungswiderstand resultiert zum einen aus den Spannungen infolge der auf das Rohr wirkenden Auflast im Ausgangszustand, den sogenannten Primärspannungen, und zum anderen aus den Bettungsreaktionsspannungen, die aufgrund der temperaturbedingten radialen Aufweitung der Rohre entstehen (siehe Abbildung 5-1). Als Ausgangszustand oder Primärspannungszustand wird der Zustand unmittelbar nach dem Einbringen der Rohrleitungen in den Boden vor ihrer Inbetriebnahme bezeichnet, den sogenannten Primärspannungszustand. Zur Vereinfachung wird davon ausgegangen, dass sowohl die Spannungen im Ausgangszustand als auch die zusätzlichen Reaktionsspannungen, welche infolge radialer Aufweitung im Betrieb entstehen, senkrecht zur Rohrmantelfläche gerichtet sind.

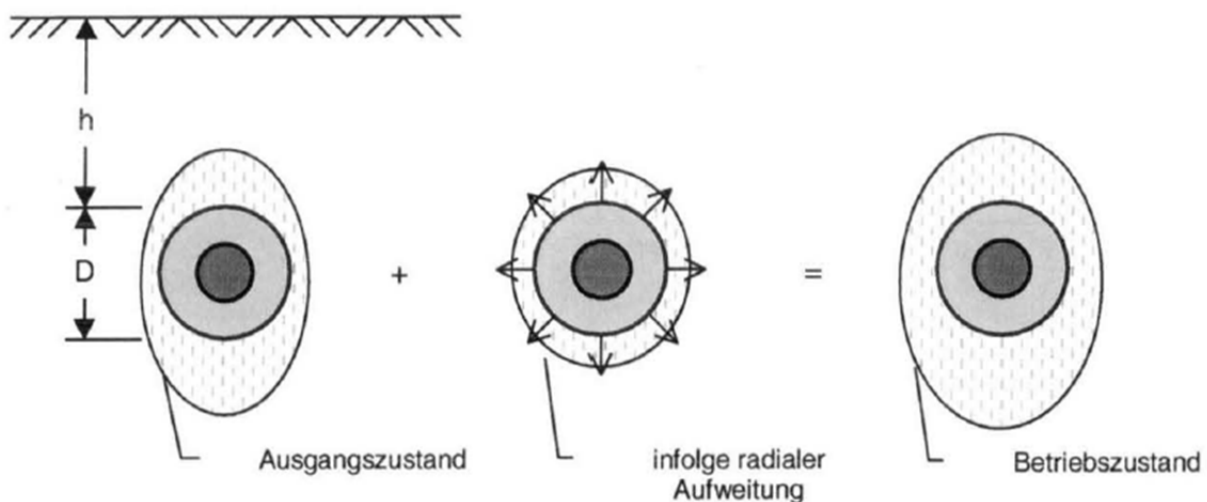


Abbildung 5-1: Resultierende radiale Bettungsspannung an einem erdverlegten Rohr [14]

Der aktuelle Wissenstand hinsichtlich der Berechnung der Bettungsspannung von Einzelrohren basiert hauptsächlich auf experimentellen und numerischen Untersuchungen, die sich auf monotone Belastungsvorgänge beschränken.

Der Ansatz für die Berechnung der Primärspannungen basiert auf Grundlage einer stofflichen Modellierung des Bettungsmaterials von ACHMUS [1]. Dieser Ansatz des Primärspannungszustandes wird der Berechnung der Radialspannung im Ausgangszustand zugrunde gelegt (siehe Abbildung 5-2). Nach dem definierten Primärspannungszustand entsprechen die vertikalen Spannungen σ_v am Scheitel und an der Sohle des Rohres der geostatischen Auflastspannung in der jeweiligen Tiefe unter Geländeoberkante. Die horizontalen Spannungen σ_h an den Kämpfern ergeben sich aus

der Multiplikation der Auflastspannung auf mittlerer Höhe des Rohres (Kämpferhöhe) mit einem Erddruckbeiwert K .

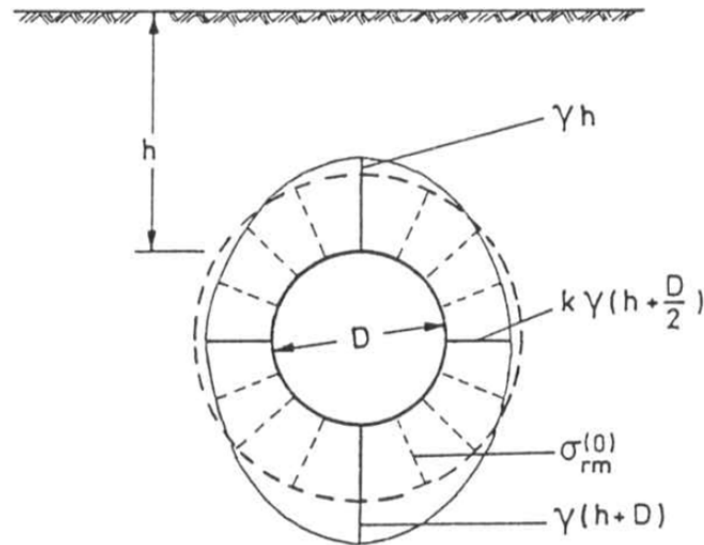


Abbildung 5-2: Radiale Spannungsverteilung im Ausgangszustand [1]

Die mittlere Radialspannung im Ausgangszustand $\sigma_{rm}^{(0)}$ ergibt sich damit zu:

$$\sigma_{rm}^{(0)} = \frac{1 + K}{2} \gamma \left(h + \frac{D}{2} \right) \quad (5-1)$$

mit:

$\sigma_{rm}^{(0)}$	[kN/m ²]	Mittlere radiale Bettungsspannung im Ausgangszustand;
D	[m]	Außendurchmesser des Rohres;
K	[-]	Erddruckbeiwert;
γ	[kN/m ³]	Wichte des Bettungsmaterials;
h	[m]	Überdeckungshöhe.

Die Größe und Verteilung der Bettungsspannung der Doppelrohrsysteme ist derzeit noch nicht ausreichend untersucht.

Durch die axiale Ausdehnung und Verschiebung der Leitung werden Reibungskräfte mobilisiert, die dieser Verformung entgegen wirken. Bei erdverlegten Fernwärmeleitungen ist der Erddruck auf das Rohr bzw. die radiale Bettungsspannung ein wichtiger Parameter für deren Auslegung, da der Erddruck die mobilisierbare Reibungskraft beeinflusst. Je höher die Bettungsspannung ist, desto stärker ist der Kontakt zwischen dem Rohr und dem Bettungsmaterial und dementsprechend höher sind die Reibungskräfte. Aus der Abbildung 5-3 ist zu erkennen, dass sich die Normaldruckkraft, die infolge der Temperaturbelastung induziert wird, mit zunehmendem Abstand vom freien Ende einer geraden Rohrleitung erhöht. Ab einer gewissen Leitungslänge bildet sich ein sogenannter Haftbereich aus, in dem sich die Dehnungskraft und Reibungskraft im Gleichgewicht befinden und es somit zu keinen Axialverschiebungen kommt. Im Gleitbereich ist die

Dehnungskraft größer als die Reibungskraft, wodurch es zu einer Verschiebung des Rohres im Erdreich in Richtung der Dehnzonen kommt. Aus diesem Grund ist die Größe der Reibungskraft ein wichtiger Parameter bei der Auslegung einer Fernwärmeleitung.

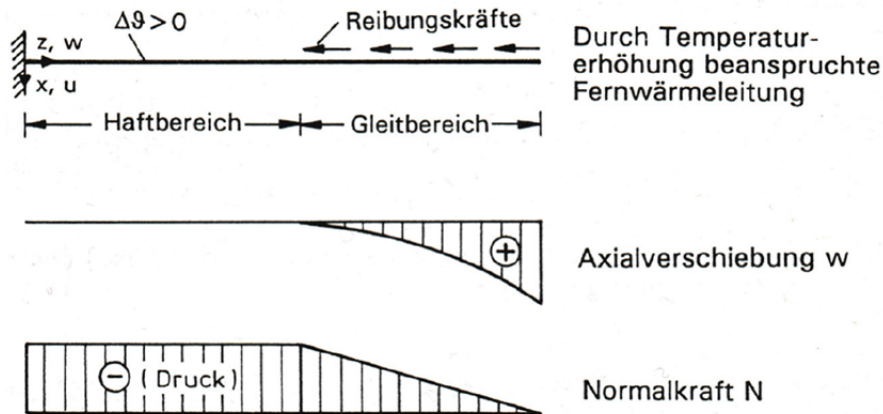


Abbildung 5-3: Axialverschiebungen und Normalkräfte einer erdverlegten beanspruchten Rohrleitung [1]

Die mobilisierbare Reibungskraft lässt sich durch die Integration der Bettungsspannungsverteilung über den Rohrumfang und Multiplikation mit einem Reibbeiwert ermitteln. Somit spielt die Bettungsspannung in der Kontaktfuge zwischen dem Rohr und dem Bettungsmaterial bei der Berechnung der Reibungskraft die entscheidende Rolle.

Die Gleichung zur Ermittlung der mobilisierbaren Reibungskraft über den Rohrumfang setzt sich wie folgt zusammen:

$$F_R = \mu \pi D \sigma_{rm} \quad (5-2)$$

mit:

F_R	[kN/m]	Reibungskraft;
D	[m]	Außendurchmesser des Rohres;
σ_{rm}	[kN/m ²]	Mittlere radiale Bettungsspannung;
μ	[-]	Reibungsbeiwert.

Der Reibungsbeiwert μ hängt seinerseits vom Wandreibungswinkel δ ab:

$$\mu = \tan(\delta) \quad (5-3)$$

Nach Auswertung verschiedener Untersuchungsergebnisse aus der Literatur und durchgeführten Laborversuchen für die Größe des Wandreibungswinkels δ zwischen dem Boden und dem Rohrmantel gibt ACHMUS [1] eine Bandbreite von $20^\circ \leq \delta \leq 27^\circ$ an.

Dabei ist die obere Grenze Böden mit hoher Lagerungsdichte und die untere Grenze sehr locker gelagerten Böden zuzuordnen. Die genannten Werte für δ beziehen sich auf nichtbindige Böden mit vorwiegend runder Kornform. Für den Reibungskoeffizienten μ ergibt sich unter Verwendung des COULOMBSchen Reibungsgesetzes in Gleichung (5-3) der Wertebereich $0,36 \leq \mu \leq 0,51$ nach ACHMUS [1].

5.3 Numerisches Modell

5.3.1 Allgemeines

Aufbauend auf der Darstellung der theoretischen Berechnungsansätze werden numerische Berechnungen durchgeführt. Diese werden mit dem Ziel durchgeführt, aussagekräftige Einblicke hinsichtlich der Bettungsspannungsverteilung in der Kontaktfuge zwischen der Fernwärmeleitung und dem umgebenden Bettungsmaterial an einem erdverlegten radial aufgeweiteten Doppelrohr zu geben. Die Berechnung der Spannung erfolgt an einem numerisch entwickelten Modell mit der Methode der finiten Elemente.

Unter der Voraussetzung, dass der Querschnitt in einer unendlich ausgedehnten geraden Strecke liegt und längs der Rohrachse generell gleichmäßige Verschiebungen vorliegen, kann ein ebener Verformungszustand angenommen werden und die Modellierung des Finite-Elemente-Modells zweidimensional erfolgen. Das Modell besteht im Wesentlichen aus dem Rohrverbundsystem und dem umgebenden Boden und basiert auf dem im Arbeitspaket 1.1 (AP1.1) verwendeten 2D FE-Modell. Der entscheidende Unterschied zum FE-Modell aus dem AP1.1 besteht in der Verwendung der thermo-mechanisch gekoppelten Berechnungen statt der ausschließlich thermischen Untersuchungen zuvor.

Die Berechnungen der radialen Bettungsspannungen infolge temperaturbedingter radialer Aufweitung erfolgen auch in diesem Arbeitspaket mit Hilfe des Programms PLAXIS 2D [4], jedoch mit der aktuelleren Version 2018. Das Finite-Elemente-Programm ist speziell für die Bearbeitung geotechnischer Probleme entwickelt und verifiziert worden. Die Software ermöglicht die Berechnung zweidimensionaler Probleme mit frei definierbaren geometrischen Randbedingungen und unterschiedlichen Boden- und Werkstoffeigenschaften. [4]

Die Berechnungen der radialen Bettungsspannungen werden an einem stationären Fall durchgeführt. Die Fernwärmeleitung wird dabei einmalig auf die gewählte Betriebstemperatur erwärmt, bis es zu keinen Veränderungen der Wärmeverteilung mehr im Modell kommt.

5.3.2 Referenzmodell

Im Folgenden werden jeweils für das Doppelrohrsystem (DR) und das Einzelrohrsystem (ER) die gewählten Referenzmodelle beschrieben. Die Geometrien der Referenzmodelle setzen sich aus einem Rechteck mit mehreren „Tunnelementen“ zusammen (siehe Abbildung 5-4). Die Tunnel werden mit zwei Schalen erzeugt, sodass ein Tunnel am Rohrscheitel und an der -sohle einen Start- und Endpunkt hat. Das Rechteck bildet den Ausschnitt des Erdreichs ab und die Tunnel erzeugen das Rohrverbundsystem. Die Abmessungen des Rechtecks des DR sind 6,5 m in der Breite (x-Richtung) und 4,15 m in der Höhe (y-Richtung). Der Rohrmittelpunkt des Doppelrohrsystems liegt in x-Richtung in der Mitte und in y-Richtung 0,9 m unterhalb der oberen Modellkante. Damit ergeben sich

eine Überdeckungshöhe von 0,8 m und eine Höhe von 3,15 m unterhalb der Rohrsohle. Die Abmessungen des ER weichen geometriebedingt von dem DR ab. Der Bodenausschnitt vom ER hat eine Breite von 6,7 m und eine Höhe von 4,075 m. Die Rohrleitungen für den Vor- und Rücklauf liegen parallel in gleicher Tiefe unter der oberen Modellkante, es ergibt sich ebenfalls eine Überdeckung von 0,8 m (siehe Abbildung 5-5).

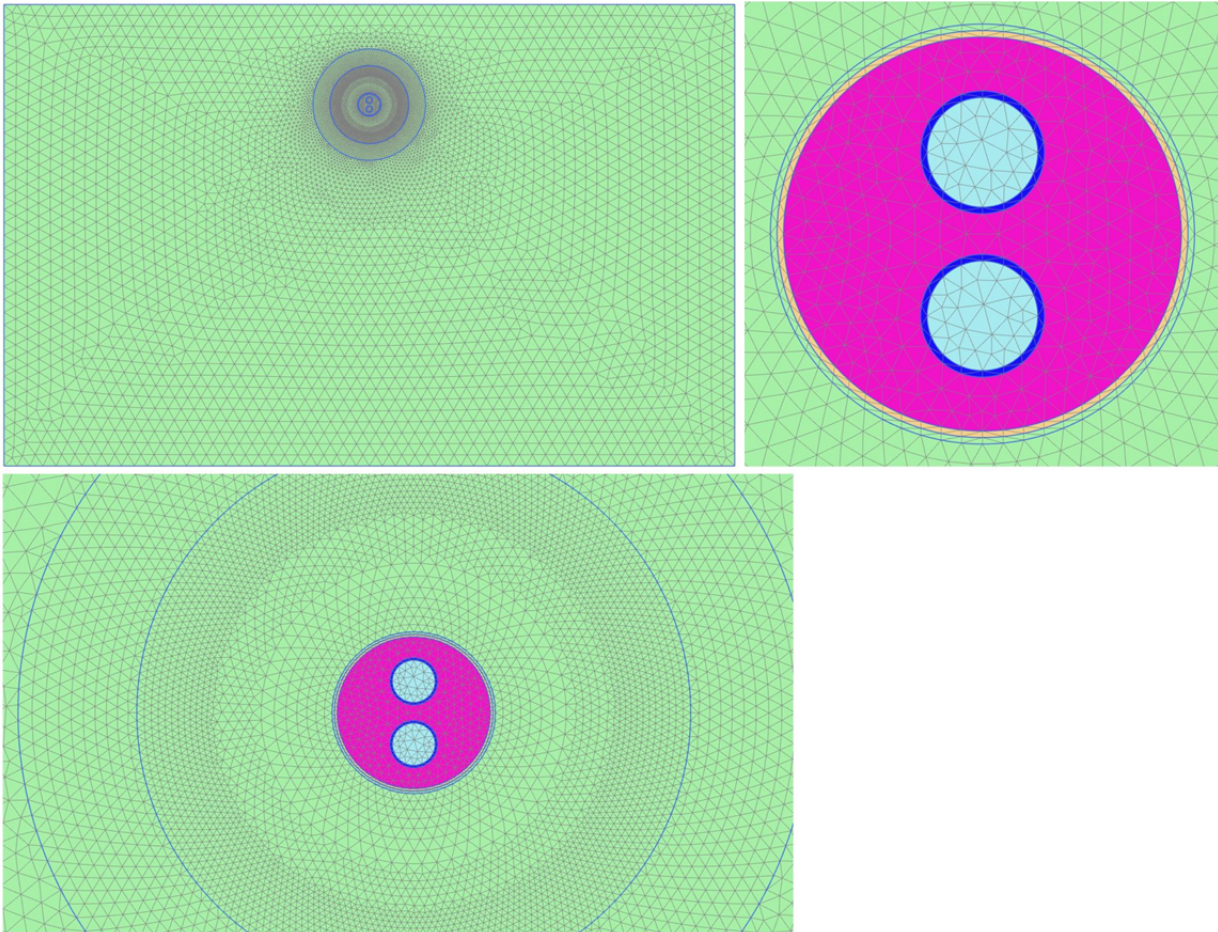


Abbildung 5-4: Numerisches Modell eines Doppelrohrsystems in PLAXIS 2D

Die Abmessungen der Tunnel entsprechen sowohl im DR- als auch im ER-System der Rohrdimension DN50 eines KM-Rohres. In der Doppelrohrausführung beträgt der Außendurchmesser des Mantelrohres $D_{DR} = 200$ mm. Der Außendurchmesser des Mantelrohres im Einzelrohrsystem beträgt $D_{ER} = 125$ mm. Die Größe des Mediumrohres ist in beiden Ausführungen identisch, der Außendurchmesser des Mediumrohres ergibt sich jeweils zu $d = 60,3$ mm. Die Mediumrohre im Doppelrohrsystem sind übereinander innerhalb des Mantelrohres angeordnet. Die Vorlaufleitung liegt dabei unterhalb der Rücklaufleitung. Im Einzelrohrsystem liegen die Leitungen parallel nebeneinander, die Vorlaufleitung ist in diesem Modell links von der Rücklaufleitung angeordnet.

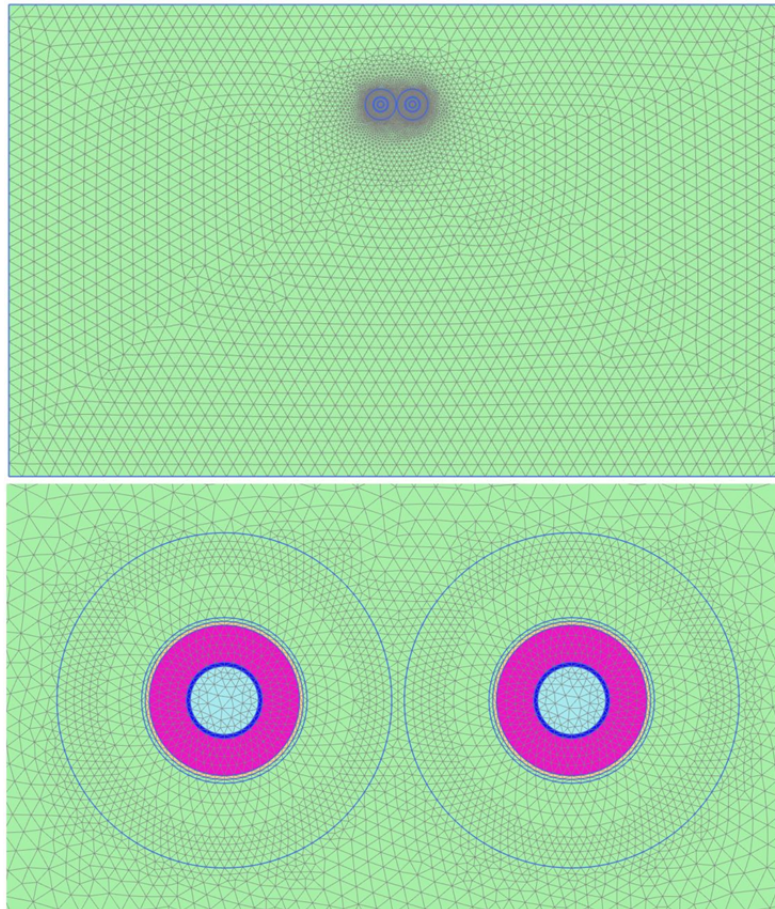


Abbildung 5-5: Numerisches Modell eines Einzelrohrsystems in PLAXIS 2D

Das FE-Modell ist unter der Annahme eines ebenen Dehnungszustandes (plane strain) aufgebaut. In PLAXIS 2D [4] werden die berechneten Kräfte aus einer ebenen Dehnungsanalyse über eine bestimmte Länge senkrecht zum Querschnitt (z-Richtung) dargestellt [4]. Druckspannungen und -kräfte, einschließlich Porendrücke, werden im „Output“ negativ angegeben, wohingegen Zugspannungen und -kräfte als positive Werte ausgegeben werden.

Mit abnehmendem Abstand zur Fernwärmeleitung sollte die Netzfeinheit des Modells steigen, da sich im Nahbereich der Rohrleitung größere Spannungen und Verschiebungen ergeben. Dazu werden um die Rohrleitung zusätzliche Tunnel implementiert, die die Bereiche mit höherer Netzfeinheit abgrenzen. Im Doppelrohrsystem hat der äußere Ring einen Abstand von 0,4 m zum Außenmantel des Rohres. Im Abstand von 0,25 m zum KM-Rohraußenmantel wird die Netzfeinheit weiter erhöht (siehe Abbildung 5-4). Im Einzelrohrsystem wird jeweils um die Vorlauf- und Rücklaufleitung ein Ring zur Netzverfeinerung im Abstand von 0,07 m modelliert (siehe Abbildung 5-5). Die vertikal ausgerichteten Außenflächen des Modells sind in horizontaler Richtung fest gelagert. Die unten liegende horizontale Außenfläche ist sowohl in horizontaler als auch in vertikaler Richtung fixiert. Die Geländeoberkante ist frei verschiebbar.

Die Umgebungstemperatur des gesamten Modells wird auf 10 °C festgelegt. Zusätzlich werden im Modell Temperaturrandbedingungen an den Modellrändern sowie an der Innenfläche der Mediumrohre erstellt. Die Temperaturrandbedingungen an den Modellrändern werden ebenfalls auf 10 °C gesetzt. Die Temperaturen in den Mediumrohren betragen 85 °C im Vorlauf- und 55 °C im Rücklaufrohr.

Zur Darstellung der Berechnungsergebnisse der Interaktion zwischen Bauwerk und Boden wird ein sogenanntes Interface implementiert. Das Interface wird dabei an der Außenfläche des Rohrmantels modelliert. Interface-Elemente bestehen aus Knotenpaaren, d.h. zwei Knoten an jeder Seite, Bodenseite und Rohrquerschnittseite. Bei der Verwendung von 15-Knoten-Elementen werden die Schnittstellenelemente durch 5 Knotenpaare definiert. [4] Im „Output“ werden die Verteilungen der Verschiebungen infolge der Temperaturbelastung und die dazugehörigen effektiven und totalen Normalspannungen angegeben.

Das Doppelrohrmodell besteht aus 18.840 15-Knoten-Elementen mit 151.337 Knoten, während das Einzelrohrmodell 13.480 15-Knoten-Elemente mit 108.641 Knoten aufweist.

5.3.3 Bodeneigenschaften

Im Rahmen der numerischen Modellierung wird ein nichtbindiger homogener Erdstoff als Verfüllmaterial um das Fernwärmerohr sowie für den umliegenden Boden verwendet. Hierbei handelt es sich um einen locker bis mitteldicht gelagerten Sand mit den Stoffparametern, die in Tabelle 5-1 zusammengefasst sind.

Tabelle 5-1: Stoffparameter für die Modellierung des Bettungsmaterials

Stoffparameter			Wert
Korndichte	ρ_s	[kg/m ³]	2600
Reibungswinkel	φ'	[°]	33
Poissonzahl	ν	[-]	0,35
Steifemodul	E	[N/m ²]	$25 \cdot 10^6$
Wichte	γ	[N/m ³]	17000
Wärmeleitfähigkeit	λ_s	[W/m/K]	1
Spez. Wärmekapazität	c_s	[J/kg/°C]	860
Ausdehnungskoeffizient	α_s	[K ⁻¹]	0

Zur Beschreibung der mechanischen Eigenschaften des Bodens hinsichtlich seines Spannungs- und Dehnungsverhaltens muss ein geeignetes Stoffgesetz gewählt werden.

In der Bodenmechanik können je nach gegebener Situation und Aufgabenstellung unterschiedliche Stoffgesetze geeignet sein. Für die gegebene Aufgabe wird für die Beschreibung des Bodenverhaltens das linear-elastische ideal plastische Stoffgesetz nach Mohr-Coulomb herangezogen.

Der in dem Modell diskretisierte homogene Boden wird als entwässert angenommen, es werden keine Porenwasserüberdrücke erzeugt. Der Ausdehnungskoeffizient ist mit null angesetzt, um die Spannung nur infolge der radialen Hohlraumaufweitung zu berechnen und nicht die zusätzliche Aufweitung des Bodens mit zu berücksichtigen.

5.3.4 Materialeigenschaften des Rohrverbundsystems

Das Kunststoffverbundmantelrohr (KM-Rohr) ist heutzutage das meist verlegte Fernwärmerohr und wird daher für die numerischen Ermittlungen der radialen Bettungsspannungsverteilung verwendet. Die Materialien des KM-Rohres werden einzeln modelliert. Zur Beschreibung der Werkstoffeigenschaften des KM-Rohres wird sowohl für das Mediumrohr, die Dämmung als auch für das Mantelrohr ein linear-elastisches Stoffgesetz zugrunde gelegt. Dieses linear-elastische Materialverhalten lässt sich durch das Hookesche Gesetz abbilden. Das Hookesche Gesetz ($\sigma = E \cdot \epsilon$) beschreibt den Zusammenhang von Spannung und Dehnung im linear-elastischen Bereich von Festkörpern.

Für die im Rahmen dieses Arbeitspaketes durchgeführten numerischen Berechnungen werden bei der Modellierung des KM-Rohres die in der Tabelle 5-2 aufgeführten Materialien und Stoffparameter verwendet.

Das Mantel- und Mediumrohr weisen ein nicht poröses Verhalten auf. Der Hohlraum des Mediumrohres ist mit einem linear elastischen Material gefüllt, dessen Gewicht und Elastizitätsmodul dem des Wassers entspricht, um die Ballastierung zu berücksichtigen. Der Ausdehnungskoeffizient des Transportmediums wird auf null gesetzt, da das Medium grundsätzlich eine Strömungsgeschwindigkeit aufweist und sich somit in die axiale Richtung frei ausdehnen kann.

Tabelle 5-2: Stoffparameter für die Modellierung des KM-Rohrverbundsystems

			Mediumrohr	Dämmung	Mantelrohr	Transportmedium
			P235 (Stahl)	PUR	HDPE	Wasser
Dichte	ρ	[kg/m ³]	7850	70	950	981
Poissonzahl	ν	[-]	0,3	0,4	0,46	0,25
E-Modul	E	[N/m ²]	$2,118 \cdot 10^{11}$	$1,7 \cdot 10^7$	$1 \cdot 10^9$	$2 \cdot 10^{11}$
Wichte	γ	[N/m ³]	78500	700	9500	9810
Wärmeleitfähigkeit	λ_s	[W/m/K]	55,2	0,027	0,4	1200
Spezifische Wärmekapazität	c_s	[J/kg/°C]	460	1400	1900	4200
Ausdehnungskoeffizient	α_s	[K ⁻¹]	$11,3 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-4}$	0

5.3.5 Berechnungsschritte

Berechnungsschritt 1

Im ersten Schritt wird im Gesamtmodell der Primärspannungszustand infolge reiner Erddruckbelastung durch den anliegenden Boden erzeugt. Somit erfährt die Rohrleitung lediglich die Spannungen aus dem Erdruchedruck. Die Temperatur im gesamten Modell entspricht der vorgegebenen Umgebungstemperatur von 10 °C. Die Temperaturrendbedingungen an den Modellrändern sowie in den Mediumrohren sind in dieser Phase noch deaktiviert und haben somit keinen Einfluss auf die Ergebnisse dieses Berechnungsschrittes. In der Abbildung 5-6 sind die inaktiven Temperaturrendbedingungen am Beispiel des DR-Modells grau dargestellt. Das Interface am Rohrmantel ist jedoch bereits in diesem Schritt aktiviert, damit die Ergebnisse des Primärspannungszustandes am Rohr bereits in dieser Phase abgebildet werden können. Das aktive Interface ist in der Abbildung 5-6 in orange gezeichnet.

Die Ergebnisse der Verschiebungen sowie der Normalspannungen am Mantel des Doppelrohres sind in Abbildung 5-7 gezeigt. In dieser Phase liegen die Verschiebungen im gesamten System noch bei null. Die Primärspannung am Mantel entspricht der Spannung

im Ausgangszustand und kann mit dem im Kapitel 5.2 beschriebenen analytischen Berechnungsansatz nachvollzogen werden.

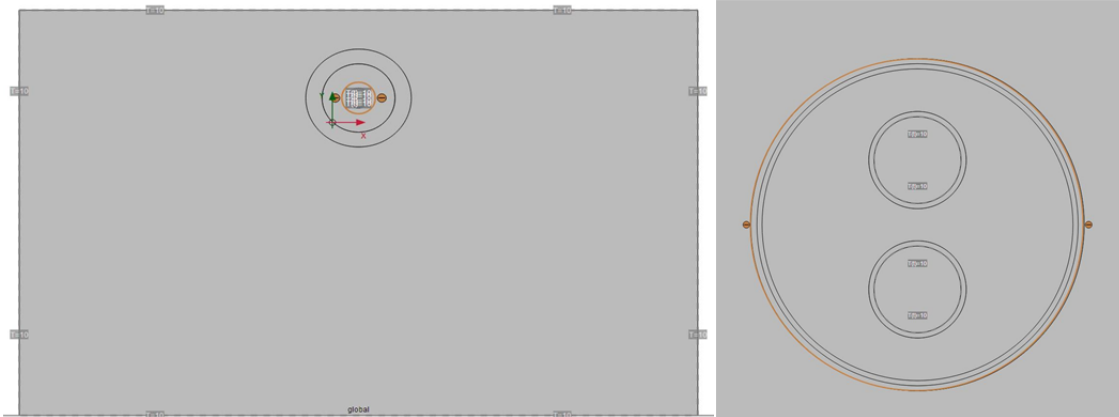


Abbildung 5-6: Berechnungsschritt 1 – Die deaktivierten Temperaturrandbedingungen in grau; das aktivierte Interface in orange

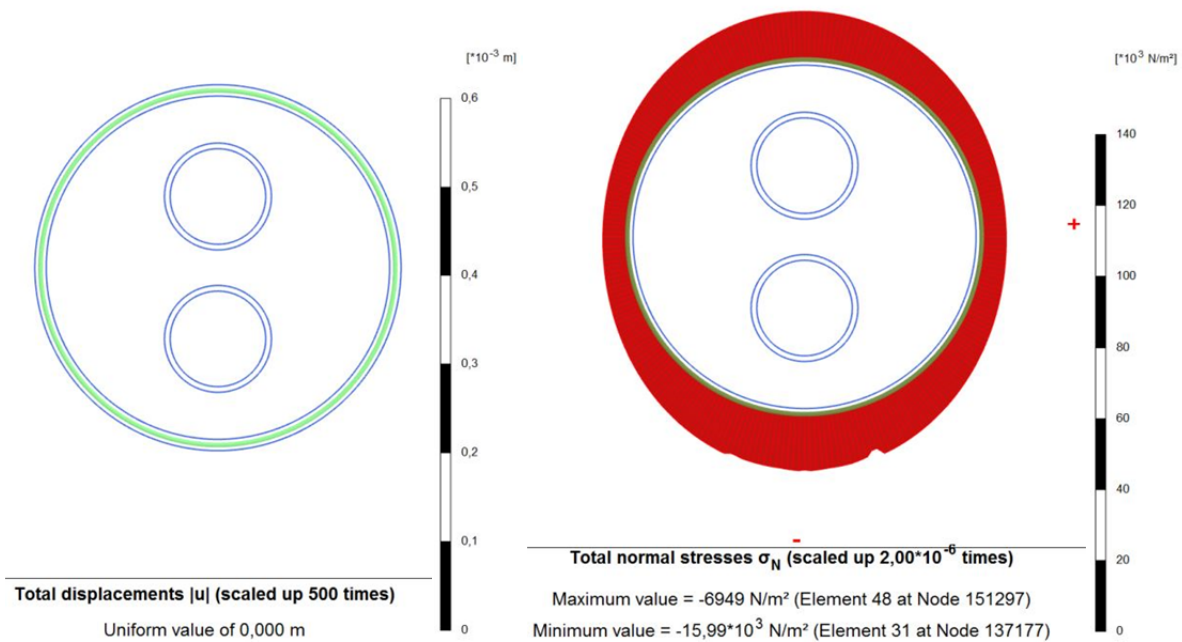


Abbildung 5-7: Verschiebung (links) und totale Normalspannung (rechts) am Mantelrohr im Berechnungsschritt 1

Berechnungsschritt 2

Im zweiten Berechnungsschritt werden die Temperaturrandbedingungen an den Mediumrohren aktiviert (siehe Abbildung 5-8). Dabei wird die Mediumtemperatur in einer bestimmten Zeit von 10 °C aus der vorherigen Berechnungsphase auf 85 °C im Vorlauf und 55 °C im Rücklauf erhöht. Die Temperaturrandbedingungen an den Modellrändern

werden ebenfalls aktiviert um die Temperatur an diesen Stellen der Umgebungstemperatur von 10 °C anzupassen.

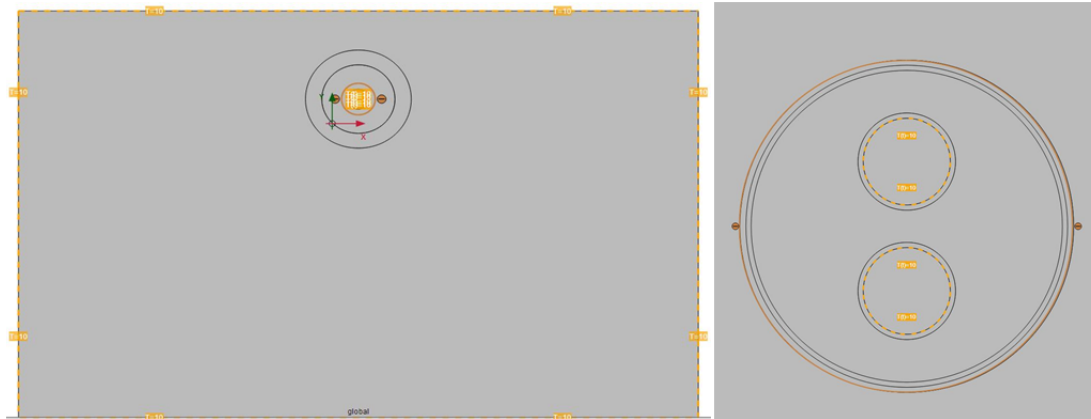


Abbildung 5-8: Berechnungsschritt 2 – Die Temperaturrandbedingungen aktiviert

Die thermo-mechanisch gekoppelte Berechnung läuft hierbei in zwei Rechenvorgängen ab. Zunächst wird der Wärmefluss im stationären Zustand erreicht und im Anschluss die daraus resultierende Aufweitung der Materialien ermittelt.

Um die Erwärmung der Mediumrohre zu simulieren, muss, anders als im FE-Modell aus dem AP1.1, an den Temperaturrandbedingungen eine Zeitfunktion definiert werden. Diese wird mit Hilfe einer harmonischen Sinusfunktion beschrieben, deren Amplitude die gewünschte Temperaturerhöhung darstellt. Ausgehend von der bereits vorhandenen Mediumtemperatur von 10 °C (siehe Berechnungsschritt 1) betragen die Amplituden der Zeitfunktionen am Vorlauf bzw. Rücklauf somit $\Delta\vartheta_{VL} = 75 \text{ K}$ bzw. $\Delta\vartheta_{RL} = 45 \text{ K}$. Da jedoch die Zeitdauer bis zum Erreichen des stationären Wärmeflusses nicht bekannt ist, wird eine Konvergenzstudie durchgeführt. Dabei wird die Periodendauer der Zeitfunktion schrittweise erhöht und der entsprechende Wärmeverlust ΦL^{-1} errechnet. Die Ergebnisse sind in der Abbildung 5-9 aufgeführt. Diese werden dabei mit dem Ergebnis des entsprechend kalibrierten FE-Modells aus AP1.1 verglichen, bei dem die Wärmeverluste im stationären Zustand bei ca. 14,36 W/m liegen. Die Studie hat ergeben, dass die Wärmeverluste im gekoppelten FE-Modell ab einer Zeitdauer von ca. 10.000 h bis zum Erreichen der Amplitude kaum Unterschiede aufweisen und bei 20.000 h exakt dem FE-Modell aus AP1.1 entsprechen. Für die Berechnungen im stationären Zustand wird somit die letztere Zeitspanne sowohl beim Vor- als auch beim Rücklauf angesetzt.

Die Erwärmung der Mediumrohre bringt eine Ausdehnung der Rohrmaterialien mit sich, was zu einer Aufweitung des KM-Rohres führt. Diese Aufweitung verursacht eine entsprechende Erhöhung des radialen Bettungswiderstandes in der Kontaktfuge zwischen dem Rohrmantel und dem umliegenden Boden. Die Ergebnisse des zweiten Berechnungsschrittes sind in Abbildung 5-10 aufgeführt.

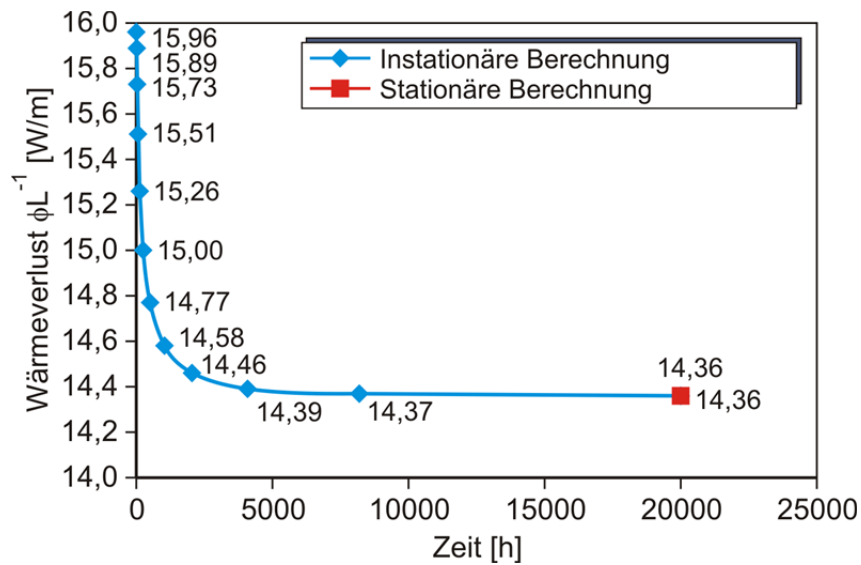


Abbildung 5-9: Ergebnisse der Konvergenzstudie zur Bestimmung der Zeitdauer bis zum Erreichen des stationären Wärmeflusses

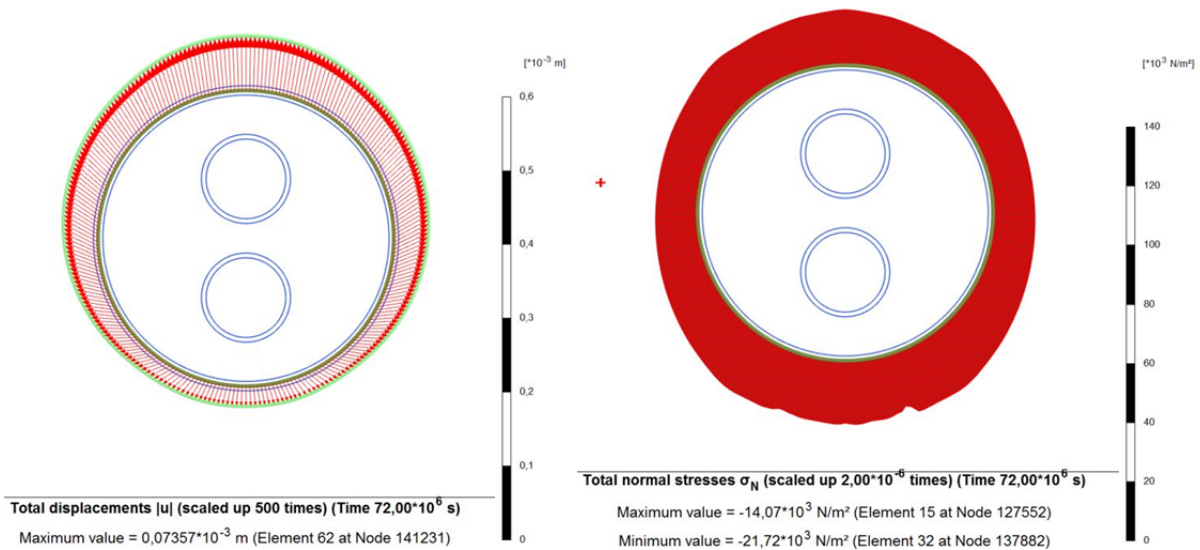


Abbildung 5-10: Verschiebung (links) und totale Normalspannung (rechts) am Mantelrohr im Berechnungsschritt 2

In der Abbildung 5-11 sind die Gesamtverschiebungen des KM-Rohres sowie des umliegenden Bodens infolge der Erwärmung der Mediumrohre im zweiten Berechnungsschritt am Beispiel des Doppelrohres dargestellt.

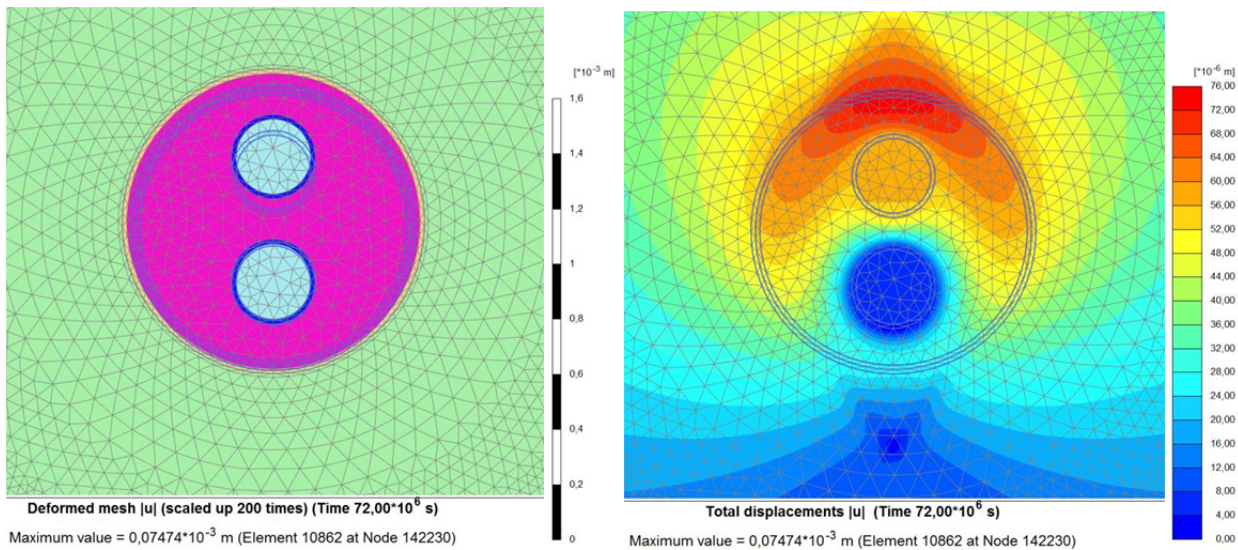


Abbildung 5-11: Gesamtverschiebungen des KM-Rohres sowie des umliegenden Bodens im Berechnungsschritt 2

Es ist deutlich zu erkennen, dass die Verschiebungen im Bereich des Rohrscheitels am größten sind und zur Sohle hin abnehmen. Dieses Verhalten lässt sich durch den steigenden Bodenwiderstand mit zunehmender Bodentiefe erklären. Das Rohr weicht somit in Richtung des geringeren Widerstands, also nach oben, aus. Die Verschiebungen liegen dabei bei maximal 0,07 mm.

5.3.6 Kalibrierung des FE-Modells

Bevor an dem erstellten numerischen Referenzmodell eine Parameterstudie geführt werden kann, soll das FE-Modell einer Kalibrierung unterzogen werden. Aufgrund der fehlenden Datengrundlage bezüglich der temperaturbedingten Aufweitungen am Doppelrohr kann jedoch nur der thermische Teil der Berechnung geprüft werden. Dafür wird das im Arbeitspaket 1.1 erstellte und kalibrierte FE-Modell herangezogen und dessen Temperatur- sowie Wärmeflussverteilung mit denen des thermo-mechanisch gekoppelten Modells verglichen.

Der Vergleich der Wärmeflussverteilung beider Modelle ist in der Abbildung 5-12 dargestellt.

Anhand der Abbildung lässt sich eine nahezu identische Wärmeflussverteilung infolge Erwärmung der Mediumrohre in beiden FE-Modellen erkennen. Die ermittelten Wärmeverluste Φ_{L-1} betragen 14,357 W/m in dem thermischen (AP1.1) und 14,364 W/m in dem thermo-mechanisch gekoppelten Modell (AP1.2), was eine Abweichung von 0,05 % bedeutet.

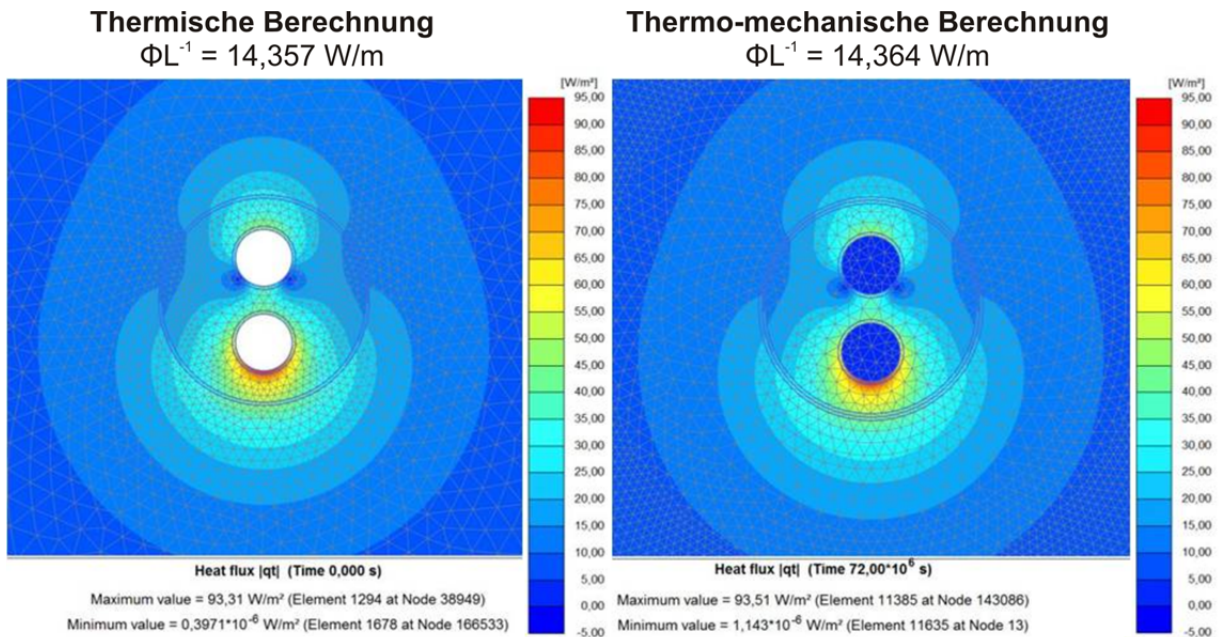


Abbildung 5-12: Wärmeflussverteilung im Vergleich der FE-Modelle der thermischen Berechnung aus AP 1.1 (links) und der thermo-mechanisch gekoppelten Berechnung aus AP 1.2 (rechts)

Ein ähnliches Verhalten ist bei der Betrachtung der Temperaturverteilung nach Lastaufbringung durch die Erwärmung der Mediumrohre in beiden Modellen zu sehen (siehe Abbildung 5-13).

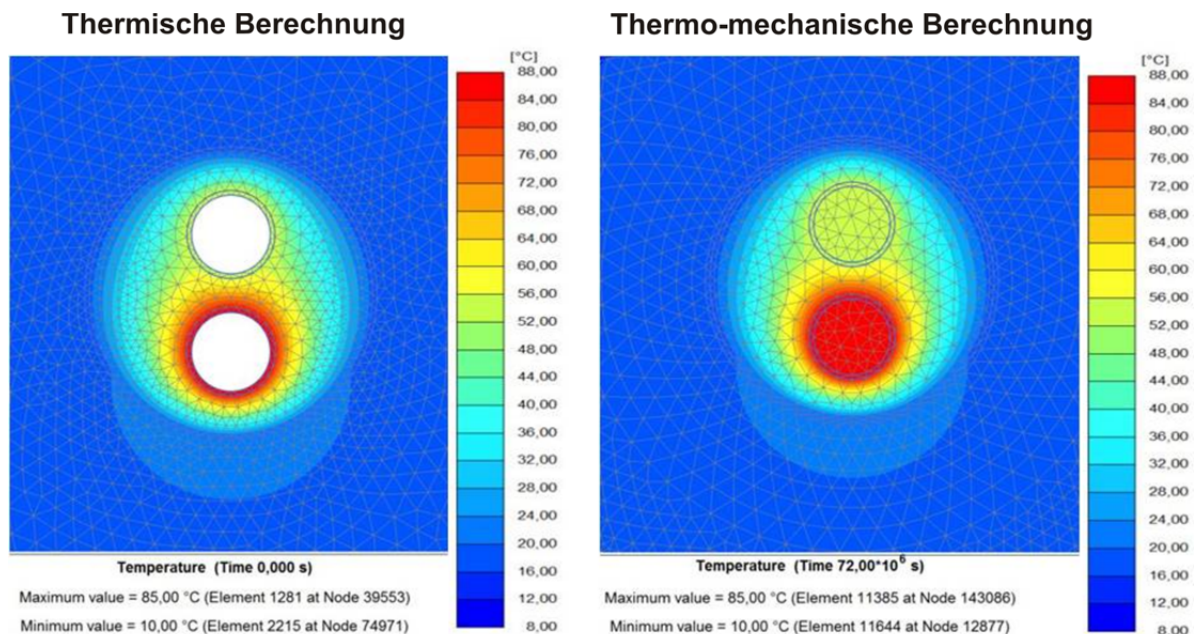


Abbildung 5-13: Temperaturverteilung im Vergleich der FE-Modelle der thermischen Berechnung aus AP 1.1 (links) und der thermo-mechanisch gekoppelten Berechnung aus AP 1.2 (rechts)

Bei der Betrachtung der Temperaturverteilung an der Außenfläche des Mantelrohrs in beiden FE-Modellen lassen sich Abweichungen im Bereich zwischen 0,02 und 0,08 % feststellen (siehe Abbildung 5-14).

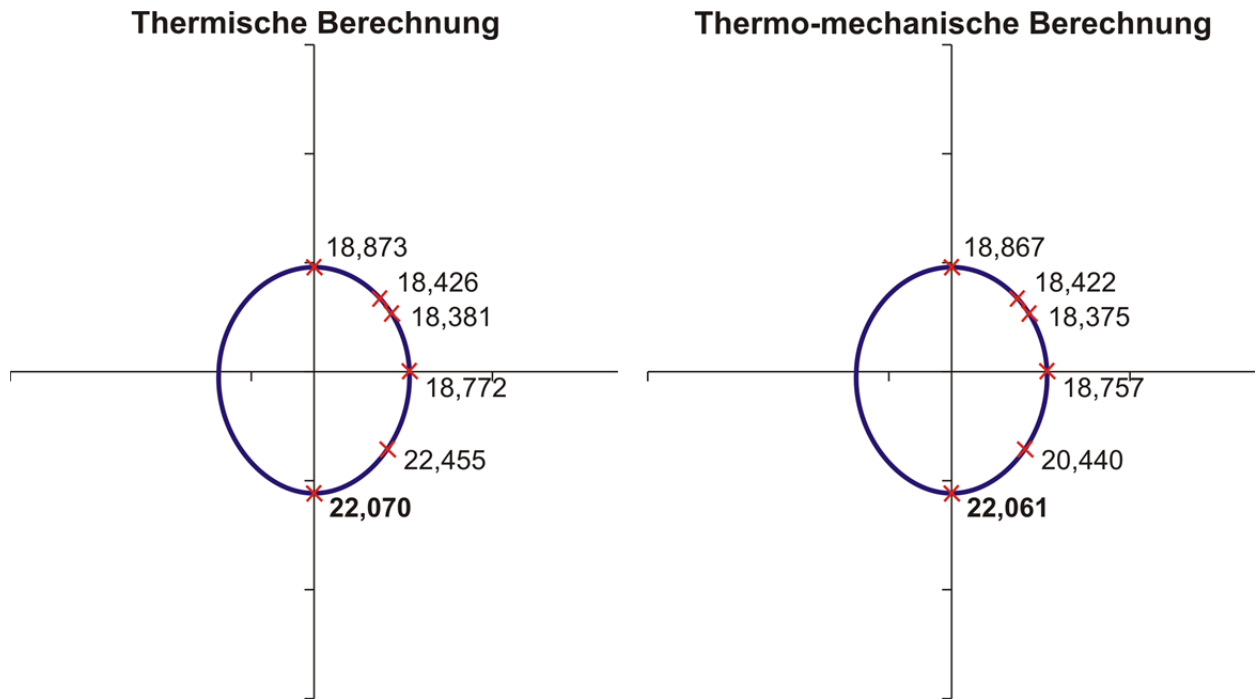


Abbildung 5-14: Vergleich der Temperaturverteilung an der Außenfläche des Mantelrohrs infolge der Erwärmung der Mediumrohre im thermischen (links) und thermo-mechanisch gekoppelten Modell (rechts).

Diese geringen Abweichungen sowohl im Bereich des Wärmeflusses als auch der Temperaturverteilung in den betrachteten Referenzmodellen lassen auf eine hohe Übereinstimmung beider Modelle hinsichtlich ihrer thermischen Berechnungen schließen. Die ermittelte Aufweitung infolge dieser Temperaturverteilung im gekoppelten Modell lässt sich dadurch jedoch nicht verifizieren. Zur Bestätigung der temperaturbedingten Verschiebungen am Doppelrohr fehlen an dieser Stelle praktische Erfahrungswerte.

5.4 Parameterstudie

5.4.1 Allgemeines

Aufgrund einer Vielzahl an Kombinationen von Betriebstemperaturen in den Rohrleitungen, Materialkennwerten oder Umgebungsbedingungen existieren entsprechend viele Möglichkeiten unterschiedlicher Modellvarianten und Parameterkombinationen für die Berechnung der radialen Bettungsspannung und Reibungskraft in der Kontaktfuge zwischen Fernwärmeleitung und dem umgebenden Boden.

In Form einer Parameterstudie werden die Einflüsse der maßgebenden Größen auf die radiale Bettungsspannungsverteilung von Fernwärmerohrleitungen in Doppel- und Einzelrohrsystemen infolge temperaturbedingter Aufweitung erfasst und interpretiert. Im Rahmen dieser Parameterstudie werden Berechnungsreihen gebildet, bei denen jeweils ein Parameter des Referenzmodells variiert wird, während die übrigen Parameter konstant bleiben.

Ausgangspunkt der Parameterstudie ist die Betrachtung eines KM-Rohres der Nennweite DN50. Dieses sogenannte Referenzmodell ist im Abschnitt 5.3.2 beschrieben. Die Parametervariationen werden sowohl für ein Doppelrohrsystem als auch für ein Einzelrohrsystem durchgeführt und miteinander verglichen. Die Berechnungsreihen sind in der Tabelle 5-3 zusammengefasst. Die fett gedruckten Werte in der Tabelle stellen die im Referenzmodell verwendeten Ausgangswerte dar.

5.4.2 Überdeckungshöhe

Anhand von numerischen und experimentellen Untersuchungen der Bettungsspannung und der mobilisierbaren Reibungskraft an einem Einzelrohr stellte ACHMUS [1] fest, dass die Überdeckungshöhe einen signifikanten Einfluss auf die Größe der mittleren radialen Bettungsspannung σ_{rm} hat. Um den Einfluss der Überdeckungshöhe auf die Größe der mittleren radialen Bettungsspannung σ_{rm} von Fernwärmeleitungen am Doppelrohrsystem zu untersuchen werden numerische Berechnungen durchgeführt.

Als Überdeckungshöhe wird die lotrechte Entfernung von der Oberkante des Rohrscheitels bis zur Geländeoberkante bezeichnet. Im Rahmen von Leitungsbaumaßnahmen wird die Tiefenlage der Rohrleitung häufig durch äußere Randbedingungen, wie beispielsweise vorhandene Bauwerke, maximal ausführbare Gradienten oder die Lage von Start- und Zielanschlüssen, bestimmt. Zusätzliche Randbedingungen gibt die Natur mit ihrer Geologie und der Lage des Grundwasserspiegels an.

Tabelle 5-3: Variationsbereiche der Parameterstudie

Abschnitt	Parameter	Variationsbereich
5.4.2	Überdeckungshöhe $\ddot{U}_H$ [m]	0,6; 0,8 ; 1,0; 1,2
5.4.3	Betriebstemperatur $\vartheta_{VL/RL}$ [°C]	VL 85 – RL 55 /45/35; VL 65/ 85 /105/125 – RL 55 VL/RL 65/35; 85/55 ; 105/75
5.4.4	Rohrdimension	KMR DN20, 50 , 100, 200
5.4.5	Lagerungsdichte/ Erddruckbeiwert K_0 [-]	0,4554 ; 0,5; 0,7; 0,9
5.4.6	Wärmeleitfähigkeit λ_{Boden} [W/m/K]	0,3; 0,5; 1,0 ; 1,3
5.4.7	Steifemodul E_{Boden} [MN/m²]	5; 15; 25 ; 35; 45; 55
5.4.8	Reibungswinkel φ'_{Boden} [°]	15; 20; 25; 33 ; 35; 40
5.4.9	Wichte γ_{Boden} [kN/m³]	17 ; 19; 21
5.4.10	Poissonzahl ν_{Boden} [-]	0,25; 0,35 ; 0,45

Das Regelwerk der Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall [3] gibt an, dass die Überdeckungshöhe einen wesentlichen Einfluss auf das Verformungsverhalten und die Bettungsreaktionen der Rohrleitungen hat. Bei niedrigen oder mittleren Verlegetiefen reicht der Einflussbereich bis an die Geländeoberkante. Fernwärmeleitungen werden in der Regel oberflächennah verlegt. Das Regelwerk der AGFW [2] empfiehlt eine Mindestüberdeckung von 0,6 m. Im Bereich von Straßen wird eine Mindestüberdeckung von 0,8 m als sinnvoll angenommen. Bei geringeren Überdeckungshöhen sind besondere Überlegungen und Nachweise zu führen. Hinsichtlich des Einflusses der Überdeckung auf die radiale Bettungsspannung werden im Rahmen der Parameterstudie Berechnungen mit unterschiedlichen Überdeckungshöhen von 0,6 m bis 1,2 m durchgeführt.

Für die Parametervariation der Überdeckungshöhe werden beispielhaft die Primärspannungen, die infolge radialer Aufweitung induzierte Bettungsreaktionsspannungen und die resultierende Bettungsspannung dargestellt. Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden in den anderen Parametervariationen nur die Ergebnisse der mittleren radialen Bettungsspannung σ_{rm} dargestellt und verglichen.

In Abbildung 5-15 sind die Ergebnisse der mittleren radialen Spannungen am Rohrmantel in den einzelnen Phasen für die untersuchten Überdeckungshöhen dargestellt. Es lässt sich erkennen, dass die mittleren radialen Primärspannungen σ_{rm}^0 , die vor der Temperaturbelastung herrschen, am DR minimal größer als am ER sind und mit steigender Überdeckungshöhe zunehmen. Ursachen hierfür sind zum einen die Erhöhung des Gesamtgewichts des direkt über der Leitung anstehenden Bodenkörpers sowie die Vergrößerung des Bereichs, in dem Lastumlagerungen möglich sind. Die mittleren radialen Bettungsreaktionsspannungen $\Delta\sigma_{rm}$ infolge der radialen Aufweitung sind am DR um ca. 20 % geringer als am ER. Für beide Verbundsysteme sind die Bettungsreaktionsspannungen geringer als die Primärspannungen σ_{rm}^0 und zeigen eine geringe Abhängigkeit von der Überdeckungshöhe auf. Die mittlere radiale Bettungsspannung σ_{rm} ergibt sich aus der Summe von σ_{rm}^0 und $\Delta\sigma_{rm}$. Somit ergibt sich für σ_{rm} ebenfalls eine steigende Tendenz der Kurve mit zunehmender Überdeckungshöhe. Werden die mittleren Bettungsspannungen am Einzelrohr mit denen eines Doppelrohrs für $\bar{U}_H = 0,8$ m verglichen, ergibt sich am Doppelrohrsystem eine um 6,3 % geringere Bettungsspannung als am Einzelrohrsystem.

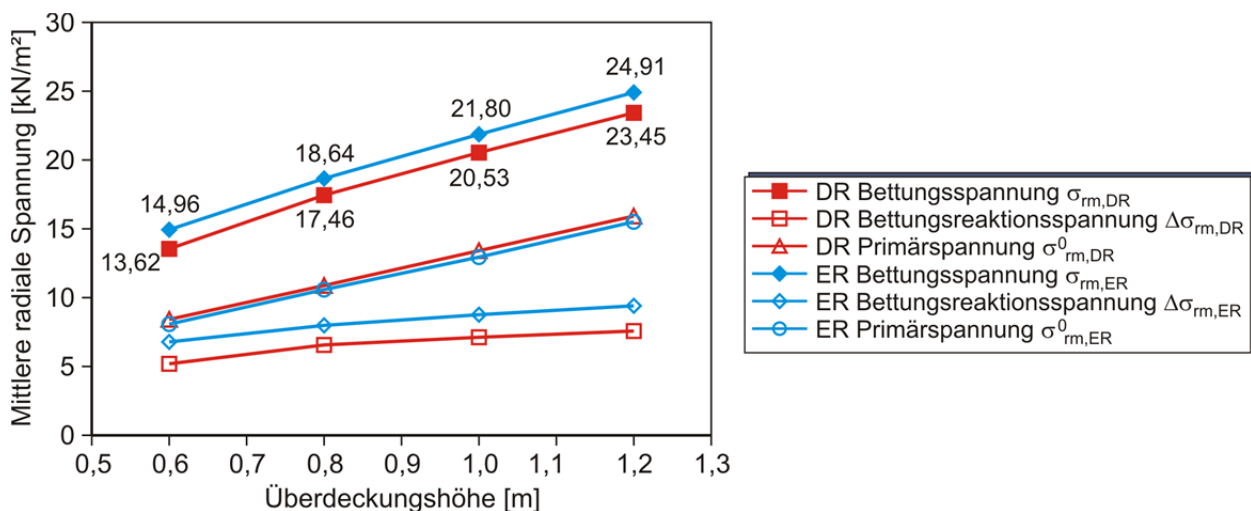


Abbildung 5-15: Vergleich mittlerer radialer Spannungen an Doppel- und Einzelrohren in Abhängigkeit der Überdeckungshöhe

Um eine Aussage zu der Einflussstärke der Überdeckungshöhe auf die Größe der mittleren radialen Bettungsspannung σ_{rm} zu machen, sind in Tabelle 5-4 die Abweichungen der Bettungsspannung σ_{rm} in Abhängigkeit der Überdeckungshöhe $\bar{U}_H$ bezogen auf das Doppelrohr-Referenzmodell angegeben. Bei einer Steigerung der Überdeckungshöhe am DR um 50 % ergibt sich aus den numerischen Berechnungen in eine um 34,3 % höhere mittlere radiale Bettungsspannung in Bezug auf das Referenzmodell mit einer Überdeckungshöhe von 0,8 m. Wird die Überdeckungshöhe am DR um 25 % verringert, reduziert sich die mittlere radiale Bettungsspannung des Referenzmodells um 22,0 %.

Tabelle 5-4: Prozentuale Abweichungen der Doppel- und Einzelrohrsysteme sowie vom Referenzmodell in Abhängigkeit der Überdeckungshöhe

Abweichungen Doppel-/Einzelrohrsystem [%]

		Überdeckungshöhe [m]			
		0,6	0,8	1,0	1,2
Bettungsspannung	σ_{rm}	9,0	6,3	5,8	5,8
Bettungsreaktionsspannung	$\Delta\sigma_{rm}$	23,4	17,8	18,7	19,4
Primärspannung	σ_{rm}^0	3,1	2,3	2,9	2,4

Abweichungen vom Referenzmodell (DR) [%]

Änderung der Überdeckungshöhe	-25	0	25	50
Änderung der Bettungsspannung (DR)	-22,0	0	17,6	34,3

In der Abbildung 5-16 (links) ist die mobilisierbare Reibungskraft F_R am DR und ER in Abhängigkeit der Überdeckungshöhe dargestellt. Die resultierende Reibungskraft ist nach Gleichung (5-2) basierend auf den Ergebnissen von σ_{rm} berechnet worden. Es ergibt sich mit steigender Überdeckungshöhe eine zunehmende Größe der Reibungskraft. In der Gegenüberstellung der Rohrsysteme ist die Reibungskraft am DR um 45,7 % größer als F_R am ER mit einer Überdeckungshöhe von 0,6 m. Bei einer Überdeckungshöhe von 1,2 m beträgt die Abweichung von F_R zwischen DR und ER 50,6 % (siehe Tabelle 5-5).

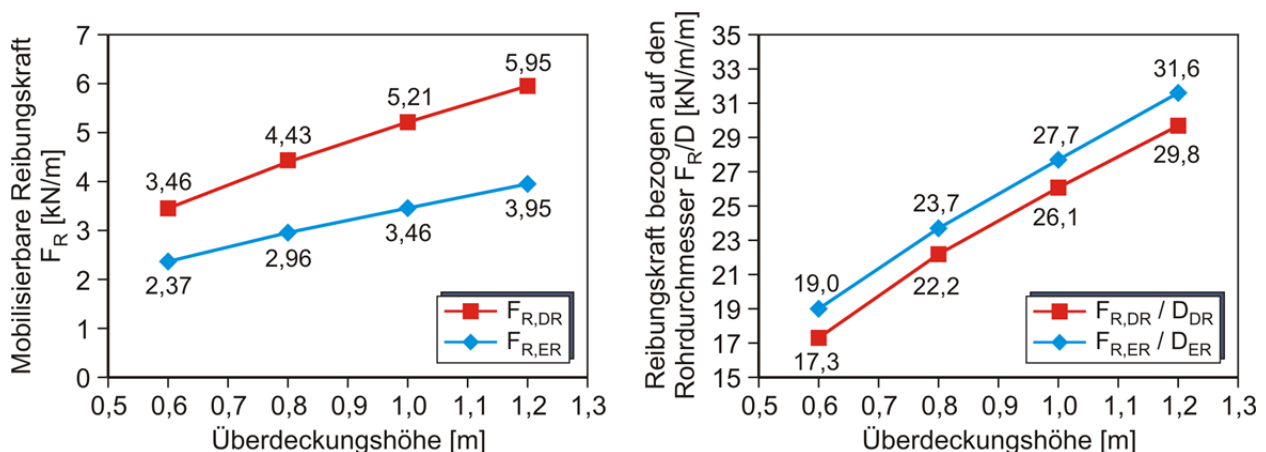


Abbildung 5-16: Vergleich mobilisierbarer (links) und bezogener (rechts) Reibungskraft der Doppel- und Einzelrohrsysteme in Abhängigkeit der Überdeckungshöhe

Die Tatsache, dass die mobilisierbare Reibungskraft beim DR-System trotz der geringeren mittleren radialen Bettungsspannung höher als beim ER-System ausfällt, lässt sich durch den deutlich größeren Außendurchmesser des Mantelrohres beim DR begründen. Dieser

geht ebenfalls wie die Bettungsspannung direkt proportional in die Berechnung der Reibungskraft ein. Wird die Reibungskraft auf den jeweiligen Außendurchmesser des Mantels bezogen, ergibt sich ein Verhalten, welches dem der Bettungsspannung entspricht (siehe Abbildung 5-16, rechts).

Tabelle 5-5: Prozentuale Abweichungen mobilisierbarer und bezogener Reibungskraft der Doppel- und Einzelrohrsysteme in Abhängigkeit der Überdeckungshöhe

Abweichungen Doppel-/Einzelrohrsystem [%]

	Überdeckungshöhe [m]			
	0,6	0,8	1,0	1,2
Mobilisierbare Reibungskraft F_R	45,7	49,9	50,7	50,6
Bezogene Reibungskraft F_R / D	9,0	6,3	5,8	5,8

5.4.3 Betriebstemperatur

Übliche Betriebstemperaturen für den Vorlauf in einem mit Warmwasser betriebenen Fernwärmenetz gehen bis rund 120 °C mit gelegentlich auftretenden Spitzentemperaturen bis 140 °C. In der Rücklaufleitung wird das Wasser bei deutlich geringeren Temperaturen transportiert.

Die Betriebstemperaturen werden im numerischen Modell an der Innenseite des Mediumrohres über eine harmonische Zeitfunktion erzeugt. Der Einfluss des erhöhten Innendrucks infolge temperaturbedingter Ausdehnung des Transportmediums wird nicht berücksichtigt. In der Realität hat das Transportmedium grundsätzlich eine Strömungsgeschwindigkeit und dehnt sich daher im Wesentlichen in die axiale Richtung des Rohres aus.

Zur Untersuchung des Einflusses der Betriebstemperaturen auf die radialen Bettungsspannungen wird sowohl die Vorlauf- als auch die Rücklauftemperatur im Rohrverbundsystem variiert. Zusätzlich werden noch die Extremwertkombinationen mit einem Spreizbereich von $\Delta\vartheta = 30$ K berechnet.

Variation der Vorlauftemperatur

Hinsichtlich des Einflusses der Betriebstemperatur werden Berechnungen ausgewertet, bei denen die Temperaturen der Vorlauf- und Rücklaufleitung variiert werden. Die Abbildung 5-17 zeigt den Vergleich der mittleren radialen Bettungsspannung σ_{rm} am Doppel- und Einzelrohrsystem unter Variation der Vorlauftemperatur ϑ_{VL} . Die Rücklauftemperatur ϑ_{RL} wird während der Berechnungen konstant auf 55 °C gehalten.

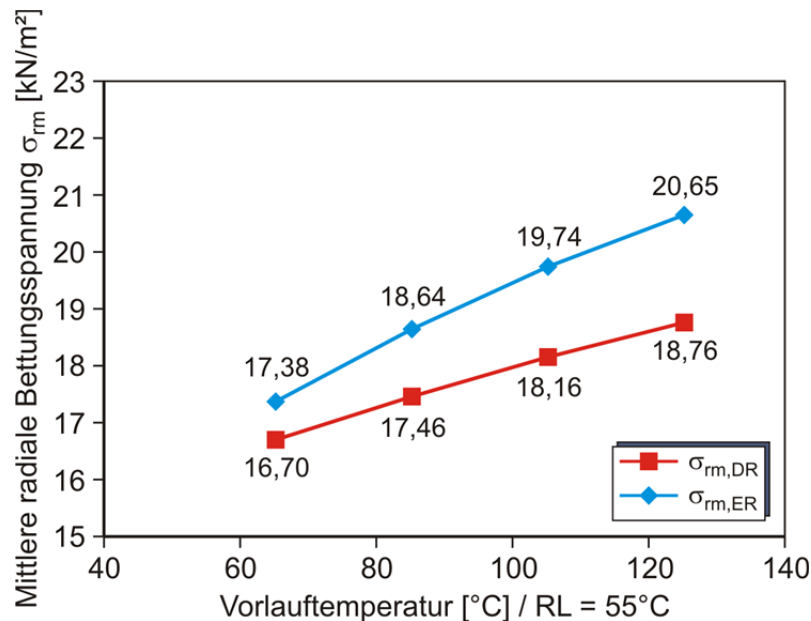


Abbildung 5-17: Vergleich mittlerer radialer Bettungsspannungen an Doppel- und Einzelrohren in Abhängigkeit der Vorlauftemperatur

Sowohl die Bettungsspannung als auch die mobilisierbare Reibungskraft erhöhen sich annähernd linear mit steigender Betriebstemperatur, wie in den Abbildung 5-17 und Abbildung 5-18 zu erkennen ist.

Aus dem Vergleich der Rohrsysteme lässt sich anhand der Abbildung 5-17 erkennen, dass σ_{rm} am Einzelrohrsystem für den gesamten Untersuchungsrahmen von ϑ_{VL} größer als σ_{rm} am Doppelrohrsystem ist. Beträgt die Vorlauftemperatur in dem Doppelrohrsystem $\vartheta_{VL} = 125$ °C, ist σ_{rm} um 9,2 % geringer als σ_{rm} am ER. Dabei kann eine leichte Zunahme der Abweichungen zwischen den DR- und ER-Systemen mit steigender Vorlauftemperatur bzw. mit steigendem Spreizbereich beobachtet werden.

Die Tabelle 5-6 zeigt die Änderung der mittleren radialen Bettungsspannung σ_{rm} am Doppelrohr zum gewählten Referenzmodell in Abhängigkeit der Vorlauftemperatur. Die Reduzierung der Vorlauftemperatur um 23,5 % ergibt eine um 4,4 % geringere Bettungsspannung. Wird die Vorlauftemperatur um 47,1 % erhöht, beträgt die Abweichung der Bettungsspannung zum Referenzmodell 7,4 %. Somit ist ein deutlich geringerer Einfluss der Vorlauftemperatur auf die Entwicklung der Bettungsspannung im Vergleich zur Überdeckungshöhe zu beobachten.

Tabelle 5-6: Prozentuale Abweichungen der Doppel- und Einzelrohrsysteme sowie vom Referenzmodell in Abhängigkeit der Vorlauftemperatur

Abweichungen Doppel-/Einzelrohrsystem [%]

	Vorlauftemperatur [°C] (RL = 55 °C)			
	65	85	105	125
Bettungsspannung σ_{rm}	4,0	6,3	8,0	9,2

Abweichungen vom Referenzmodell (DR) [%]

Änderung der VL-Temperatur	-23,5	0	23,5	47,1
Änderung der Bettungsspannung (DR)	-4,4	0	4,0	7,4

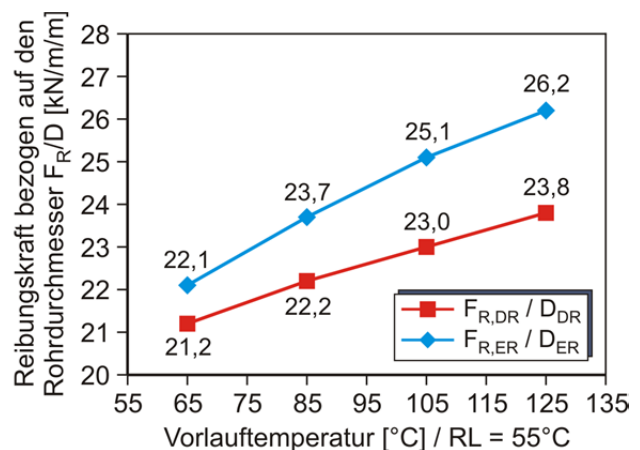
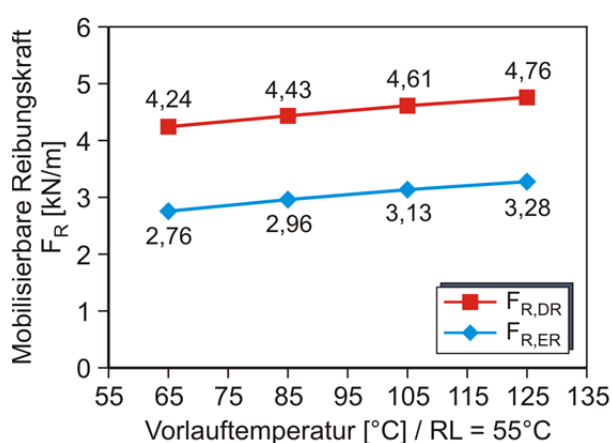


Abbildung 5-18: Vergleich mobilisierbarer (links) und bezogener (rechts) Reibungskraft der Doppel- und Einzelrohrsysteme in Abhängigkeit der Vorlauftemperatur

Die Ergebnisse mobilisierbarer und bezogener Reibungskraft F_R an Doppel- und Einzelrohrsystemen in Abhängigkeit der Mediumtemperatur des Vorlaufs ϑ_{VL} sind in der Abbildung 5-18 dargestellt. Bei Betrachtung der Temperaturkombination $\vartheta_{VL}/\vartheta_{RL} = 85/55$ °C, entsprechend dem Referenzmodell, erhöht sich F_R am DR um ca. 50 % in Bezug auf F_R am ER (siehe Tabelle 5-7).

Tabelle 5-7: Prozentuale Abweichungen mobilisierbarer und bezogener Reibungskraft der Doppel- und Einzelrohrsysteme in Abhängigkeit der Vorlauftemperatur

Abweichungen Doppel-/Einzelrohrsystem [%]

		Vorlauftemperatur [°C] (RL = 55 °C)			
		65	85	105	125
Mobilisierbare Reibungskraft	F_R	53,7	49,9	47,2	45,4
Bezogene Reibungskraft	F_R / D	4,0	6,3	8,0	9,2

Variation der Rücklauftemperatur

Die Variation der Rücklauftemperatur führt zu gleichen Ergebnissen wie die Variation der Vorlauftemperatur. Auch hier lässt sich eine leichte Tendenz zunehmender Abweichungen zwischen den Doppel- und Einzelrohrsystemen mit steigender Spreizung feststellen, der Einfluss der Temperaturvariation in dem untersuchten Bereich ist jedoch nicht signifikant.

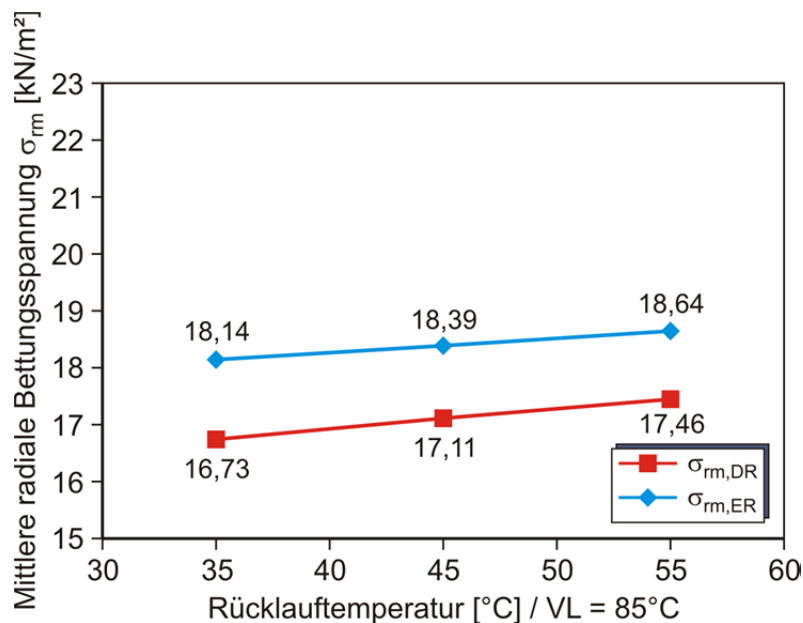


Abbildung 5-19: Vergleich mittlerer radialer Bettungsspannungen an Doppel- und Einzelrohren in Abhängigkeit der Rücklauftemperatur

Um den Einfluss der Mediumtemperatur im Rücklauf ϑ_{RL} auf die Größe der radialen Bettungsspannungsverteilung vom Doppelrohrsystem zu betrachten, sind in der Tabelle 5-8 die prozentualen Abweichungen der Bettungsspannung zum Referenzmodell angegeben. Beispielhaft ergaben die Berechnungen für eine um 36,4 % reduzierte Rücklauftemperatur eine um 4,2 % verringerte Bettungsspannung am DR.

Tabelle 5-8: Prozentuale Abweichungen der Doppel- und Einzelrohrsysteme sowie vom Referenzmodell in Abhängigkeit der Rücklauftemperatur

Abweichungen Doppel-/Einzelrohrsystem [%]

	Rücklauftemperatur [°C] (VL = 85°C)		
	35	45	55
Bettungsspannung σ_{rm}	7,8	7,0	6,3

Abweichungen vom Referenzmodell (DR) [%]

Änderung der RL-Temperatur	-36,4	-18,2	0
Änderung der Bettungsspannung (DR)	-4,2	-2,0	0

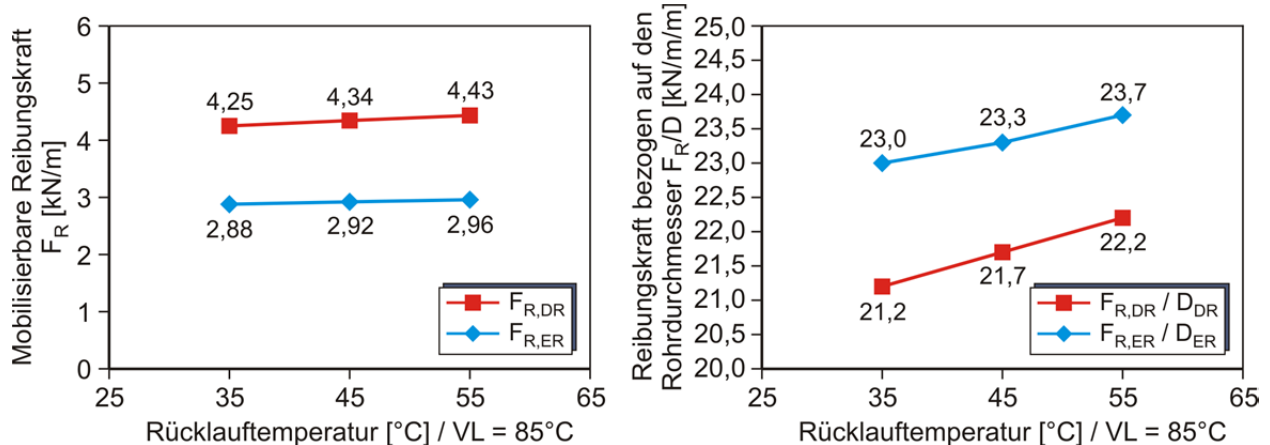


Abbildung 5-20: Vergleich mobilisierbarer (links) und bezogener (rechts) Reibungskraft der Doppel- und Einzelrohrsysteme in Abhängigkeit der Rücklauftemperatur

Die Reibungskraft verhält sich während der Variation der Rücklauftemperatur ebenso wie bei der oben beschriebenen Variation der Vorlauftemperatur (siehe Abbildung 5-20). Anhand der Tabelle 5-9 ist erkennbar, dass die Abweichungen der Reibungskraft zwischen den DR- und ER-Systemen hierbei ebenfalls im gleichen Bereich wie bei der Variation der VL-Temperatur liegen.

Tabelle 5-9: Prozentuale Abweichungen mobilisierbarer und bezogener Reibungskraft der Doppel- und Einzelrohrsysteme in Abhängigkeit der Rücklaufftemperatur

Abweichungen Doppel-/Einzelrohrsystem [%]

	Rücklaufftemperatur [°C] (VL = 85 °C)		
	35	45	55
Mobilisierbare Reibungskraft F_R	47,5	48,8	49,9
Bezogene Reibungskraft F_R / D	7,8	7,0	6,3

Variation des Temperaturbereichs

Die Abbildung 5-21 zeigt die Ergebnisse der ermittelten mittleren radialen Bettungsspannungen σ_{rm} für die untersuchten minimalen und maximalen Temperaturkombinationen der Vor- und Rücklauffleitung. Die Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf ist konstant auf $\Delta\vartheta = 30$ K gesetzt.

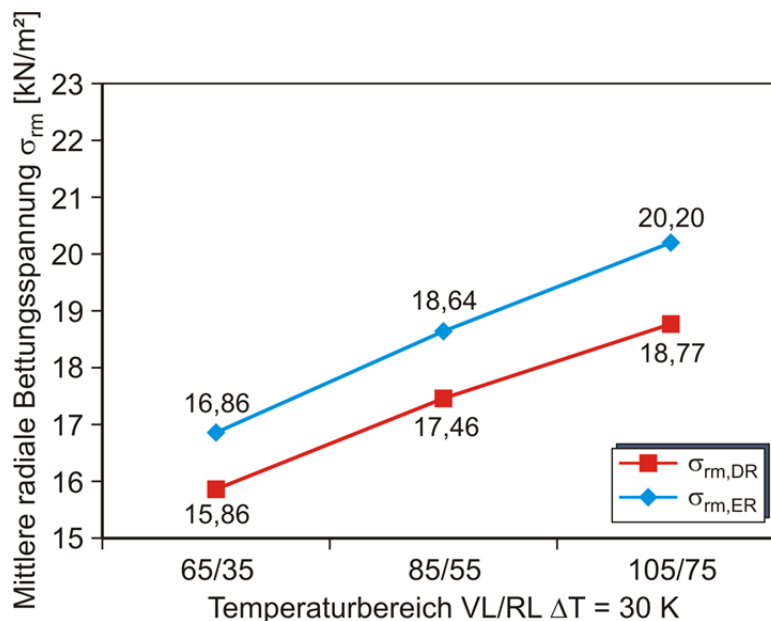


Abbildung 5-21: Vergleich mittlerer radialer Bettungsspannungen an Doppel- und Einzelrohren in Abhängigkeit der Spreizbereichs

Die Auswertung der Ergebnisse der Bettungsspannung und der Reibungskraft mit Betrachtung der Extremwertkombinationen entspricht etwa den in Abhängigkeit der Vorlaufftemperatur aufgeführten Beobachtungen.

Um eine Aussage zu der Einflussstärke der Ergebnisse unter kombinierter Variation der Vor- und Rücklaufftemperatur mit konstanter Temperaturdifferenz von 30 K auf die Größe der mittleren radialen Bettungsspannung σ_{rm} zu machen, ist in der Tabelle 5-10 die

Abweichung von σ_{rm} in Abhängigkeit der Mediumtemperaturen des Vor- und Rücklaufs bezogen auf das Doppelrohr-Referenzmodell dargestellt. Es werden zwei Spreizbereiche mit jeweils einer Reduzierung und einer Erhöhung von ϑ_{VL} und ϑ_{RL} um 20 K in Bezug auf die Betriebstemperaturen von $\vartheta_{VL} = 85^\circ\text{C}$ und $\vartheta_{RL} = 55^\circ\text{C}$ untersucht. Werden die Betriebstemperaturen verringert, nimmt die mittlere Bettungsspannung um 9,1 % ab. Bei Erhöhung der Temperaturen um die oben genannte Änderung ergibt sich eine um 7,5 % höhere mittlere Bettungsspannung.

Tabelle 5-10: Prozentuale Abweichungen der Doppel- und Einzelrohrsysteme sowie vom Referenzmodell in Abhängigkeit des Temperaturbereichs

Abweichungen Doppel-/Einzelrohrsystem [%]

	Temperaturbereich VL/RL		
	65/35	85/55	105/75
Bettungsspannung σ_{rm}	5,9	6,3	7,1

Abweichungen vom Referenzmodell (DR)

Änderung des Temperaturbereichs [K]	-20,0	0	20,0
Änderung der Bettungsspannung (DR) [%]	-9,1	0	7,5

In der Abbildung 5-22 und der darauf folgenden Tabelle 5-11 bestätigt sich das bereits vorher beschriebene Verhalten der Reibungskraft bezüglich der Variation der Betriebstemperatur an DR- und ER-Systemen.

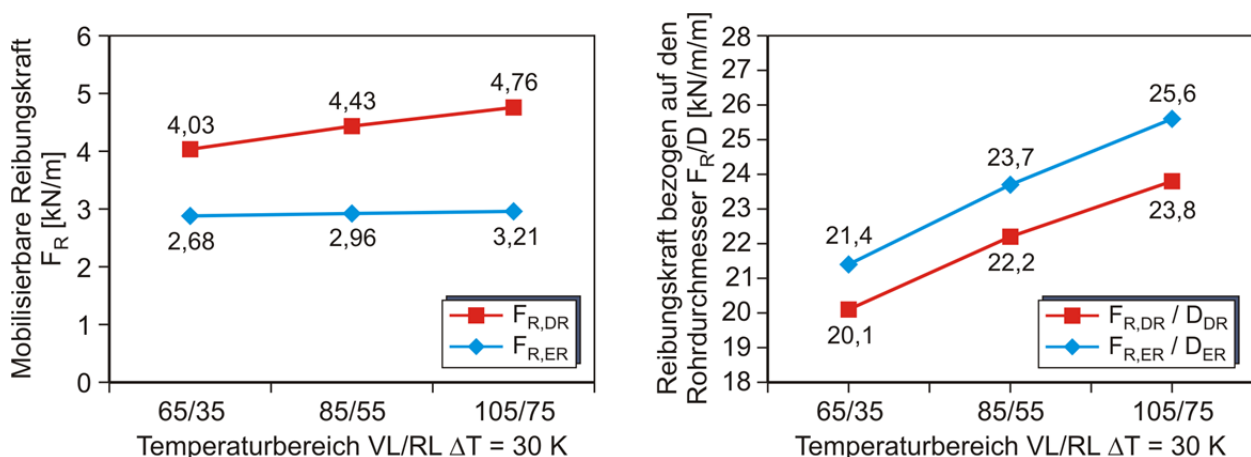


Abbildung 5-22: Vergleich mobilisierbarer (links) und bezogener (rechts) Reibungskraft der Doppel- und Einzelrohrsysteme in Abhängigkeit des Spreizbereichs

Tabelle 5-11: Prozentuale Abweichungen mobilisierbarer und bezogener Reibungskraft der Doppel- und Einzelrohrsysteme in Abhängigkeit des Temperaturbereichs

Abweichungen Doppel-/Einzelrohrsystem [%]

	Temperaturbereich VL/RL $\Delta T = 30 \text{ K}$		
	65/35	85/55	105/75
Mobilisierbare Reibungskraft F_R	50,5	49,9	48,6
Bezogene Reibungskraft F_R / D	5,9	6,3	7,1

5.4.4 Rohrdimension

Die nachfolgenden zugrunde gelegten Parameter für ein KM-Rohr entsprechen dem Stand der Normung. Die DIN EN 253 [7] legt den Rohrdurchmesser und die Wanddicken in Abhängigkeit von der Nennweite sowie den Betriebsdruck fest. Die Abmessungen der hier verwendeten Modelle für die Parameterstudie weichen teilweise von den Minimalwerten der DIN EN 253 ab. Die Wandstärken des Mediumrohres werden bei den Nennweiten DN20 und DN50 jeweils dicker ausgeführt. Um den Einfluss der Dimensionen (DN) von Kunststoffverbundmantelrohren auf die radiale Bettungsspannung zu betrachten, werden Berechnungen für Leitungen DN20, DN50, DN100 und DN200 durchgeführt.

In der Tabelle 5-12 sind die Abmessungen der unterschiedlichen Rohrdimensionen des Kunststoffverbundmantelrohrs als Doppelrohrsystem angegeben. Die Querschnittsflächenausnutzung des Mediumrohres ist bezogen auf die Fläche des gesamten Rohres, d.h. die Fläche der Mediumrohre in einem DN20 Rohr betragen 9,3 % der Gesamtfläche des Doppelrohres. Mit wachsendem Außenrohrdurchmessers steigt die Flächenausnutzung der Mediumrohre an.

Tabelle 5-12: Abmessungen der Doppelrohrmodelle in PLAXIS 2D

Rohr- dimension	Mediumrohr		Mantelrohr		Querschnitts- flächenausnutzung des Mediumrohres [%]
	Außen- durchmesser d [mm]	Wand- stärke s [mm]	Außen- durchmesser D [mm]	Wand- stärke s [mm]	
DN20	2 · 26,9	2,6	125	3,0	9,3
DN50	2 · 60,3	3,2	200	3,2	18,2
DN100	2 · 114,3	3,6	315	4,1	26,3
DN200	2 · 219,1	4,5	560	6,0	30,6

Die Tabelle 5-13 stellt die Abmessungen der untersuchten Rohrdimensionen für das Einzelrohrsystem dar. Es werden jeweils der Durchmesser und die Wandstärke des Medium- und Mantelrohres sowie der horizontale Abstand zwischen der Vor- und Rücklaufleitung angegeben.

Tabelle 5-13: Abmessungen der Einzelrohrmodelle in PLAXIS 2D

Rohr- dimension	Mediumrohr		Mantelrohr		Abstand zwischen dem Vor-/ Rücklauf-rohr [mm]
	Außen- durchmesser d [mm]	Wand- stärke s [mm]	Außen- durchmesser D [mm]	Wand- stärke s [mm]	
DN20	26,9	2,6	90	3,0	150
DN50	60,3	3,2	125	3,0	150
DN100	114,3	3,6	200	3,2	200
DN200	219,1	4,5	315	4,1	200

Die Abbildung 5-23 zeigt die Ergebnisse der ermittelten mittleren radialen Bettungsspannungen für die untersuchten Rohrdimensionen. Es ist zu erkennen, dass die am Einzelverbundrohr wirkenden radialen Bettungsspannungen größer als die des Doppelverbundrohres sind. Dieses Verhalten spiegelt sich in der Auswertung der numerischen Ergebnisse anderer untersuchter Parameter wider.

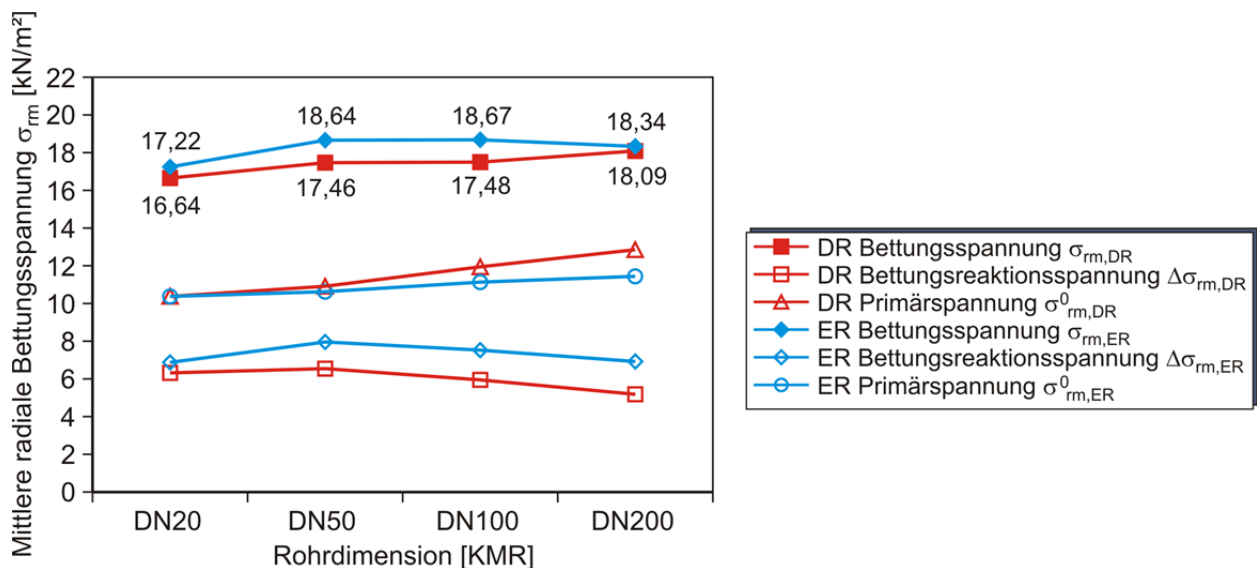


Abbildung 5-23: Vergleich mittlerer radialer Spannungen an Doppel- und Einzelrohrsystemen in Abhängigkeit unterschiedlicher Rohrdimensionen

Aus der Gegenüberstellung der untersuchten Rohrsysteme ergibt sich am DR Referenzmodell DN50 eine um 6,3 % geringere mittlere radiale Bettungsspannung als beim Einzelrohr. Eine eindeutige Tendenz der Entwicklung der Bettungsspannung mit zunehmendem Rohrdurchmesser ist nicht erkennbar. Auffällig an den Ergebnissen der Bettungsspannung in Abhängigkeit der unterschiedlichen Rohrdimensionen ist, dass die Spannung an den Systemen DN50 und DN100 annähernd gleiche Werte aufweist. Am Doppelrohr mit der Dimension DN200 steigt σ_{rm} , im Gegensatz dazu sinkt σ_{rm} am Einzelrohrsystem. Diese ungleichförmige Entwicklung des Graphen resultiert aus der Antiproportionalität der Durchmesser und Flächen unter den einzelnen Rohrdimensionen (siehe Tabelle 5-12).

Um eine Aussage zu der Einflussstärke der Rohrdimension auf die radiale Bettungsspannung zu machen ist in der Tabelle 5-14 die Abweichung von σ_{rm} in Abhängigkeit der Rohrdimension bezogen auf das Referenzmodell dargestellt. Bei einer Rohrdimension von DN100 beträgt die Änderung 0,1 % in Bezug auf ein DN50 Rohr. Die prozentuale Änderung eines DN200 zum DN50 berechnet sich zu 3,6 %. Bei einer Rohrdimension von DN20 verringert sich σ_{rm} um 4,7 % in Bezug auf ein DN50 Rohr.

Tabelle 5-14: Prozentuale Abweichungen der Doppel- und Einzelrohrsysteme sowie vom Referenzmodell in Abhängigkeit der Rohrdimension

Abweichungen Doppel-/Einzelrohrsystem [%]

		Rohrdimension (KMR)			
		DN20	DN50	DN100	DN200
Bettungsspannung	σ_{rm}	3,4	6,3	6,4	1,4
Bettungsreaktionsspannung	$\Delta\sigma_{rm}$	8,0	17,8	20,9	24,0
Primärspannung	σ_{rm}^0	0,3	-2,3	-7,2	-12,5

Abweichungen vom Referenzmodell (DR) [%]

Änderung der Bettungsspannung (DR)	-4,7	0,0	0,1	3,6
------------------------------------	------	-----	-----	-----

Wird die mobilisierbare Reibungskraft nach Gleichung (5-2) berechnet, ergibt sich eine höhere Reibungskraft am Doppelrohrsystem. Dieses Ergebnis ist in jeder Parametervariation wiederzuerkennen. Für die Berechnung der Reibungskraft werden die Bettungsspannungen, ein Reibkraftbeiwert und der Durchmesser des Rohrsystems berücksichtigt. Aufgrund des größeren Außendurchmessers des Doppelrohrsystems ist seine mobilisierbare Reibungskraft höher als die vom ER. Die Abbildung 5-24 zeigt beispielhaft die auf den Mantelrohraußendurchmesser bezogene Reibungskraft. In dieser Betrachtungsweise ergeben sich für die Bettungsspannung und Reibungskraft deckungsgleiche Verläufe. In der Gegenüberstellung der Rohrsysteme ergibt sich in diesem Fall eine größere auf den Rohrdurchmesser bezogene Reibungskraft am Einzelrohr.

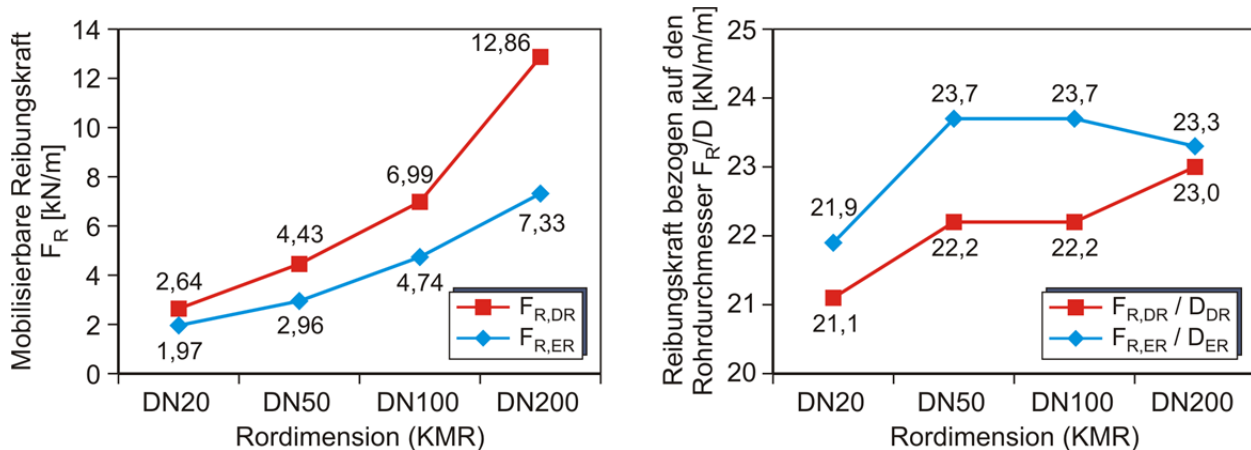


Abbildung 5-24: Vergleich mobilisierbarer (links) und bezogener (rechts) Reibungskraft der Doppel- und Einzelrohrsysteme in Abhängigkeit der Rohrdimension

Die prozentualen Abweichungen der Reibungskraft der DR-Systeme bezogen auf die Einzelrohre sind in der Tabelle 5-15 aufgeführt.

Tabelle 5-15: Prozentuale Abweichungen mobilisierbarer und bezogener Reibungskraft der Doppel- und Einzelrohrsysteme in Abhängigkeit der Rohrdimension

Abweichungen Doppel-/Einzelrohrsystem [%]

	Rohrdimension (KMR)			
	DN 20	DN 50	DN 100	DN 200
Mobilisierbare Reibungskraft F_R	34,2	49,9	47,5	75,3
Bezogene Reibungskraft F_R / D	3,5	6,3	6,3	1,4

Aufgrund der geringen Abweichungen sowie der unregelmäßigen Kurvenverläufe lässt sich kein Einfluss der Rohrdimension auf die Entwicklung der radialen Bettungsspannung feststellen. Die Erhöhung der mobilisierbaren Reibungskraft mit der steigenden Rohrdimension steht in diesem Fall eindeutig mit dem größeren Rohrdurchmesser im Zusammenhang.

5.4.5 Lagerungsdichte

Nach der ZTVE StB 94/97 wird eine dichte Lagerung des Bettungsmaterials für Fernwärmeleitungen gefordert, um Setzungen an der Oberfläche möglichst gering zu halten [12]. Diese Forderung ist in der Praxis gerade in den Bereichen direkt neben und über der Rohrleitung schwer zu realisieren. Im Rahmen dieser Parameterstudie werden daher Untersuchungen für lockere bis dichte Lagerungsformen durchgeführt.

In der Berechnung von σ_{rm} in Abhängigkeit der Lagerungsdichte wird der Erddruckkoeffizient K_0 variiert. Die Erddruckkoeffizienten für die Berechnungsreihen sind in

Anlehnung an ACHMUS [1] gewählt worden. Für lockere bis mitteldichte Lagerung wird $K = 0,5$ angenommen. Ein Boden mit mitteldichter bis dichter Lagerung hat einen Erddruckbeiwert von $K = 0,7$. Für dichte bis sehr dichte Lagerung wird ein Erddruckbeiwert von $K = 0,9$ angenommen. In dem Referenzmodell entspricht einem inneren Reibungswinkel des Bettungsmaterials von $\varphi'_{\text{Boden}} = 33^\circ$ ein Erdruchdruckbeiwert von $K_0 = 0,4554$. Um ausschließlich den Einfluss der mittleren radialen Bettungsspannung in Abhängigkeit der Lagerungsdichte zu berechnen wird hier jedoch nur der Erddruckkoeffizient K_0 verändert und der Reibungswinkel φ'_{Boden} konstant gehalten.

Die Untersuchungen von ACHMUS [1] zur mittleren radialen Bettungsspannung und mobilisierbaren Reibungskraft einer Fernwärmeleitung am Einzelrohrsystem ergaben, dass die Lagerungsdichte des Bodens einen signifikanten Einfluss auf die Größe der mittleren radialen Bettungsspannung hat. Im Rahmen dieses Abschnitts wird gezeigt, welchen Einfluss die Lagerungsdichte auf die Größe der mittleren radialen Bettungsspannung σ_{rm} einer Fernwärmeleitung am Doppelrohrsystem hat. Es werden Berechnungen für lockere, mitteldichte und dichte Lagerungsformen durchgeführt.

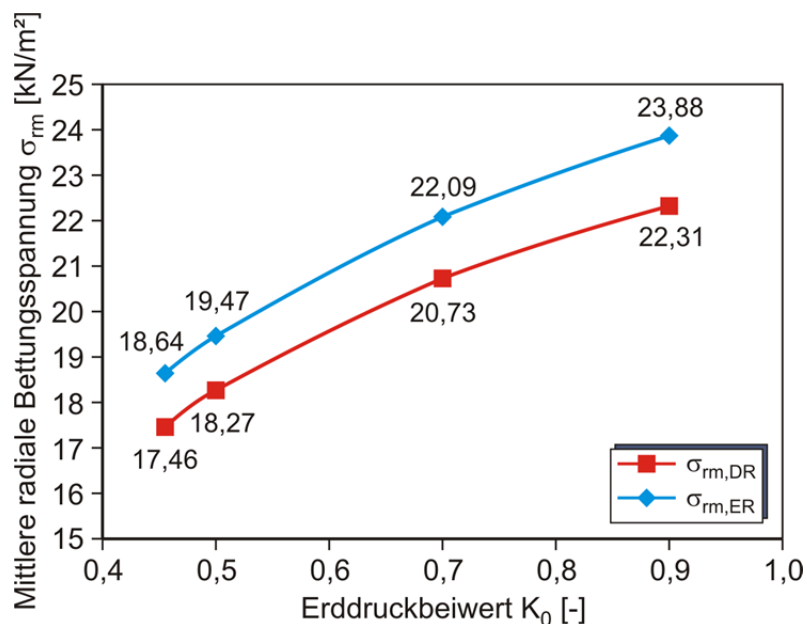


Abbildung 5-25: Vergleich mittlerer radialer Bettungsspannung an Doppel- und Einzelrohrsystemen in Abhängigkeit des Erddruckbeiwertes

In Abbildung 5-25 und Abbildung 5-26 sind die Berechnungsergebnisse wiedergegeben, die den Einfluss der Lagerungsdichte des umgebenden Bodens auf die Größe der mittleren radialen Bettungsspannung σ_{rm} und der mobilisierbaren Reibungskraft FR verdeutlichen. Es zeigt sich, dass mit steigenden Erddruckkoeffizienten K_0 sowohl σ_{rm} als auch K_0 am Doppel- und Einzelrohrsystem ansteigen. Wird die Abweichung der berechneten Spannungen im Bezug vom DR und ER betrachtet ergibt sich für $K_0 = 0,4554$ eine um rund 6,3 % geringere mittlere Bettungsspannung am DR als am ER. Diese

prozentuale Abweichung lässt sich auf die weiteren untersuchten Erddruckkoeffizienten übertragen (siehe Tabelle 5-16).

Tabelle 5-16: Prozentuale Abweichungen der Doppel- und Einzelrohrsysteme sowie vom Referenzmodell in Abhängigkeit des Erddruckbeiwertes

Abweichungen Doppel-/Einzelrohrsystem [%]

	Erddruckbeiwert K_0 [-]			
	0,4554	0,5	0,7	0,9
Bettungsspannung σ_{rm}	6,3	6,2	6,2	6,5

Abweichungen vom Referenzmodell (DR) [%]

Änderung des Erddruckbeiwertes	0	9,8	53,7	97,6
Änderung der Bettungsspannung (DR)	0	4,6	18,7	27,8

Um eine Aussage zu der Einflussstärke der Lagerungsdichte auf die Größe der mittleren radialen Bettungsspannung σ_{rm} zu machen, ist in der Tabelle 5-16 die Abweichung von σ_{rm} in Abhängigkeit des Erddruckkoeffizienten K_0 bezogen auf das Doppelrohr-Referenzmodell dargestellt. Bei einer Erhöhung von K_0 um 53,7 %, entsprechend einer mitteldicht bis dichten Lagerungsform, erhöht sich σ_{rm} am DR um 18,7 %. Bei einer weiteren Verdichtung des Bodens bis zu einem um 97,6 % erhöhten K_0 -Wert nimmt σ_{rm} am DR um 27,8 % zu.

Die Variation der Lagerungsdichte von locker bis sehr dicht zeigt einen deutlichen Einfluss auf die Änderung der Bettungsspannung der Fernwärmeleitungen. Je dichter der Boden gelagert ist, desto steifer reagiert er bei einer Rohraufweitung und entsprechend höher fallen die Bettungsspannungen aus.

Die Abbildung 5-26 (links) zeigt die mobilisierbare Reibungskraft für ein Doppel- und Einzelrohrsystem. Die Erhöhung der mobilisierbaren Reibungskraft des DR-Systems bezogen auf das ER beträgt rund 50 % für alle untersuchten Erddruckkoeffizienten (siehe Tabelle 5-17).

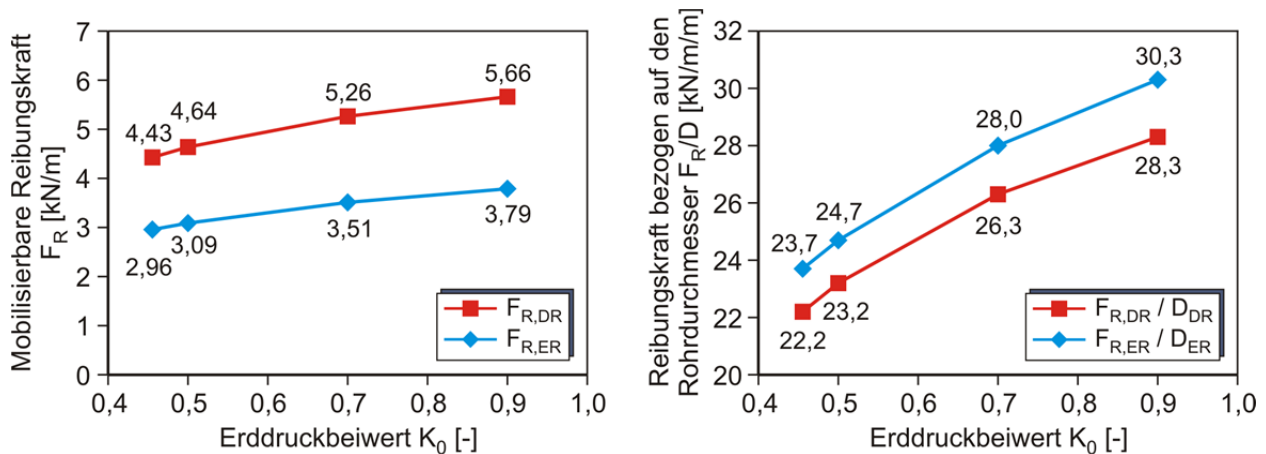


Abbildung 5-26: Vergleich mobilisierbarer (links) und bezogener (rechts) Reibungskraft der Doppel- und Einzelrohrsysteme in Abhängigkeit des Erddruckbeiwertes

Tabelle 5-17: Prozentuale Abweichungen mobilisierbarer und bezogener Reibungskraft der Doppel- und Einzelrohrsysteme in Abhängigkeit des Erddruckbeiwertes

Abweichungen Doppel-/Einzelrohrsystem [%]

		Erddruckbeiwert K_0 [-]			
		0,4554	0,5	0,7	0,9
Mobilisierbare Reibungskraft	F_R	49,9	50,1	50,1	49,5
Bezogene Reibungskraft	F_R / D	6,3	6,2	6,2	6,5

5.4.6 Wärmeleitfähigkeit des Bodens

Durch den Temperaturunterschied des erdverlegten KM-Rohres und dem umgebenden Boden kommt es zu einem Energieausgleich. Eine wichtige Kenngröße zur Beschreibung der Wärmeausbreitung im Boden ist seine Wärmeleitfähigkeit λ . Ein trockener Sand weist eine niedrige Wärmeleitfähigkeit auf und ein vollgesättigter Sand eine hohe Wärmeleitfähigkeit. Daraus lässt sich erkennen, dass die Wärmeleitfähigkeit einer Bodenart abhängig von dem Wassergehalt ist. Eine hohe Wärmeleitfähigkeit bedeutet, dass die Wärme schneller abgeleitet wird und der Temperaturunterschied über eine Strecke geringer ausfällt [5].

In den Abbildung 5-27 und Abbildung 5-28 sind die Ergebnisse der mittleren radialen Bettungsspannung σ_{rm} und der mobilisierbaren Reibungskraft F_R jeweils an DR und ER in Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit des Bodens dargestellt. Es lässt sich erkennen, dass sich mit zunehmender Wärmeleitfähigkeit des Bodens sowohl die radiale Bettungsspannung als auch die mobilisierbare Reibungskraft verringern. Des Weiteren zeigen die Verläufe der Graphen einen nicht linearen Verlauf.

Im Vergleich der Rohrsysteme entspricht das Verhalten annähernd den aufgeführten Untersuchungen zur Variation der Überdeckungshöhe, d.h. die Bettungsspannung am Einzelrohrsystem ist größer als die am Doppelrohrsystem und bei Betrachtung der mobilisierbaren Reibungskraft genau umgekehrt. Die Größe der Bettungsspannung am DR bei einer Wärmeleitfähigkeit von 0,3 W/(mK) ist um 10,9 % geringer als am ER (siehe Tabelle 5-18). Die aus dieser Beziehung resultierende Reibungskraft ist am DR um 42,5 % höher als am ER (siehe Tabelle 5-18).

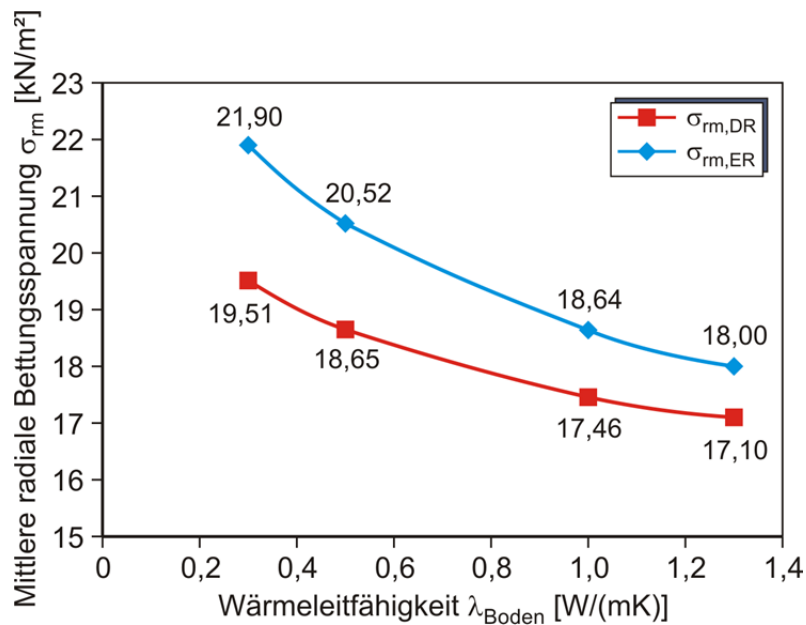


Abbildung 5-27: Vergleich mittlerer radialer Bettungsspannung an Doppel- und Einzelrohrsystemen in Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit des Bodens

Tabelle 5-18: Prozentuale Abweichungen der Doppel- und Einzelrohrsysteme sowie vom Referenzmodell in Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit des Bodens

Abweichungen Doppel-/Einzelrohrsystem [%]

	Wärmeleitfähigkeit λ_{Boden} [W/(mK)]			
	0,3	0,5	1,0	1,3
Bettungsspannung σ_{rm}	10,9	9,1	6,3	5,0

Abweichungen vom Referenzmodell (DR) [%]

Änderung der Wärmeleitfähigkeit	-70	-50	0	30
Änderung der Bettungsspannung (DR)	11,7	6,8	0	-2,1

Die Abweichungen der mittleren radialen Bettungsspannung am DR in Bezug auf das Referenzmodell sind in der Tabelle 5-18 zusammengefasst. Wird ein Boden mit einer um 30 % erhöhten Wärmeleitfähigkeit verwendet, verringern sich die Bettungsspannungen am Rohraußenmantel um 2,1 %. Eine Erhöhung der Bettungsspannung um 11,7 % ergibt sich bei einer Verringerung der Wärmeleitfähigkeit um 70 %.

Der Einfluss der Wärmeleitfähigkeit des Bodens fällt im untersuchten Bereich gering aus. Die Tendenz der sinkenden radialen Bettungsspannungen und der Reibungskräfte bei einer steigenden Wärmeleitfähigkeit lässt sich durch die schnellere Ableitung der Wärme in den umliegenden Boden und somit die geringere Manteltemperatur am Rohr begründen. Die geringeren Temperaturen am Mantelrohr führen zu entsprechend geringen Rohraufweitungen und somit zu geringeren radialen Bettungsspannungen sowie mobilisierbaren Reibungskräften.

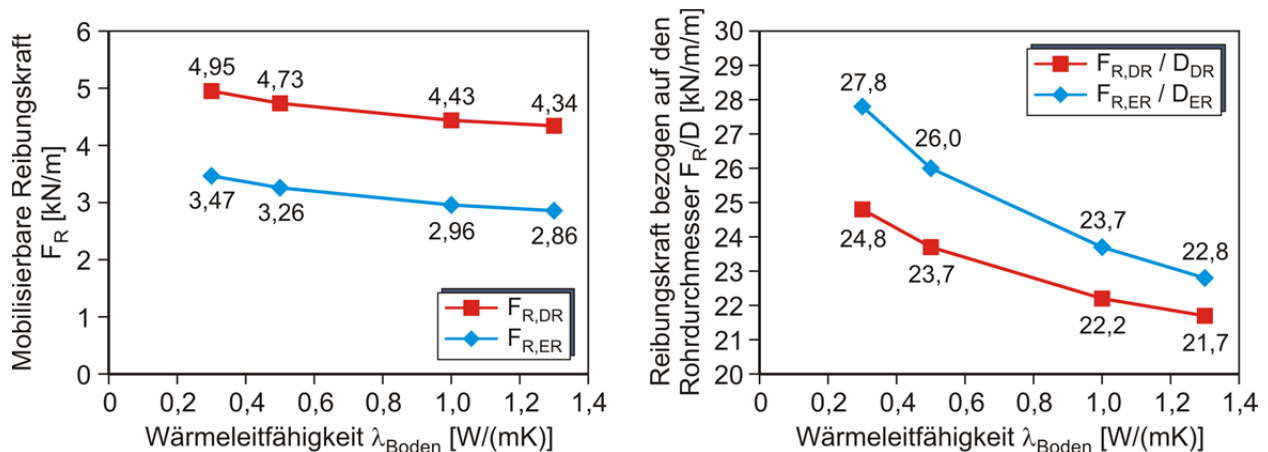


Abbildung 5-28: Vergleich mobilisierbarer (links) und bezogener (rechts) Reibungskraft der Doppel- und Einzelrohrsysteme in Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit des Bodens

Tabelle 5-19: Prozentuale Abweichungen mobilisierbarer und bezogener Reibungskraft der Doppel- und Einzelrohrsysteme in Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit des Bodens

Abweichungen Doppel-/Einzelrohrsystem [%]

		Wärmeleitfähigkeit λ_{Boden} [W/(mK)]			
		0,3	0,5	1,0	1,3
Mobilisierbare Reibungskraft	F_R	42,5	45,4	49,9	52,0
Bezogene Reibungskraft	F_R / D	10,9	9,1	6,3	5,0

5.4.7 Steifemodul des Bodens

In der Regel wird die Verformbarkeit des Bodens durch einen sogenannten Steifemodul charakterisiert. Der Steifemodul E beschreibt das Verhältnis zwischen Spannungsdifferenz $\Delta\sigma$ und der dazugehörigen Verformung $\Delta\varepsilon$ aus dem linear elastischen Bereich der Spannungs-Verformungs-Kurve. Der Steifemodul E dient als Maß der Steifigkeit des Bodens unter vertikaler Belastung. Ein hoher E -Modul beschreibt einen Boden, der seiner elastischen Verformung einen großen Widerstand entgegensetzt. Der Steifemodul variiert in einer sehr großen Bandbreite und ist außer von der Bodenart selbst insbesondere vom jeweiligen Spannungszustand und der Belastungsgeschichte abhängig [5]. Zur Durchführung der Parameterstudie werden für den Steifemodul Berechnungen mit Werten zwischen 5 MN/m^2 und 55 MN/m^2 verwendet.

Die Abbildung 5-29 und Abbildung 5-30 zeigen die Berechnungsergebnisse der mittleren radialen Bettungsspannungen σ_{rm} und der mobilisierbaren Reibungskräfte FR jeweils am Doppel- und Einzelrohrsystem. Aus der Abbildung 5-29 ist zu erkennen, dass die mittleren radialen Bettungsspannungen σ_{rm} mit zunehmendem E -Modul nicht linear steigen. Bei einem Steifemodul von $E_{\text{Boden}} = 5 \text{ MN/m}^2$ sind die Bettungsspannungen an den Doppel- und Einzelrohrsystemen annähernd gleich groß. Allerdings nimmt σ_{rm} mit größer werdendem E -Modul am Einzelrohrsystem stärker zu als am Doppelrohrsystem.

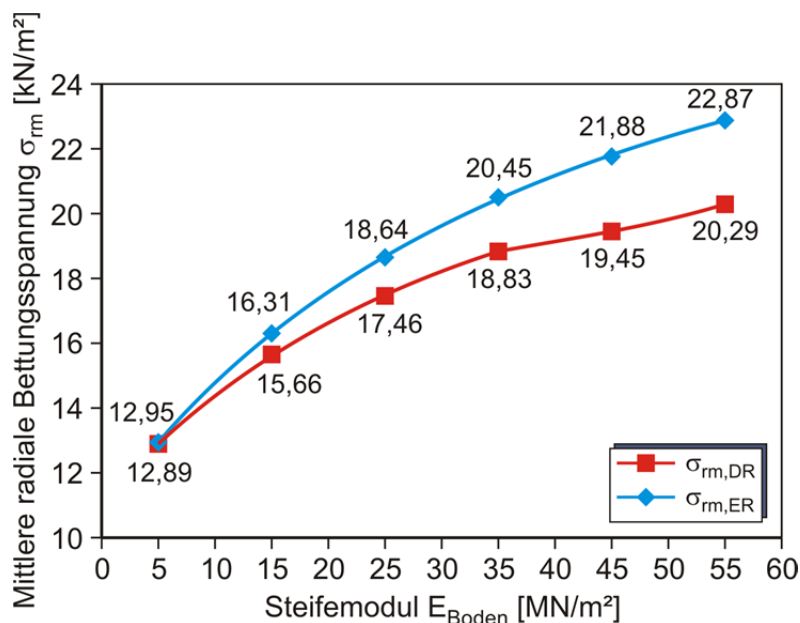


Abbildung 5-29: Vergleich mittlerer radialer Bettungsspannung an Doppel- und Einzelrohrsystemen in Abhängigkeit des Steifemoduls des Bodens

Um eine Aussage zu der Einflussstärke des Steifemoduls auf die Größe der mittleren radialen Bettungsspannung σ_{rm} zu machen, sind in der Tabelle 5-20 die Abweichungen von σ_{rm} in Abhängigkeit des E-Moduls E_{Boden} bezogen auf das Doppelrohr-Referenzmodell dargestellt. Die Tabelle zeigt, dass eine Reduzierung des E-Moduls um 80 % eine Reduzierung der mittleren radialen Bettungsspannungen am Doppelrohr um 26,2 % zur Folge hat. Wird der E-Modul um 80 % erhöht, steigt σ_{rm} am DR um 11,4 % im Bezug auf das Referenzmodell an.

Bei Betrachtung der mobilisierbaren Reibungskraft eines Doppel- und Einzelrohrsystems steigt F_R mit größer werdendem E-Modul an.

Tabelle 5-20: Prozentuale Abweichungen der Doppel- und Einzelrohrsysteme sowie vom Referenzmodell in Abhängigkeit des Steifemoduls des Bodens

Abweichungen Doppel-/Einzelrohrsystem [%]

	Steifemodul E_{Boden} [MN/m ²]					
	5	15	25	35	45	55
Bettungsspannung σ_{rm}	0,5	4,0	6,3	7,9	11,1	11,3

Abweichungen vom Referenzmodell (DR) [%]

Änderung des Steifemoduls	-80,0	-40,0	0	40,0	80,0	120,0
Änderung der Bettungsspannung (DR)	-26,2	-10,3	0	7,8	11,4	16,2

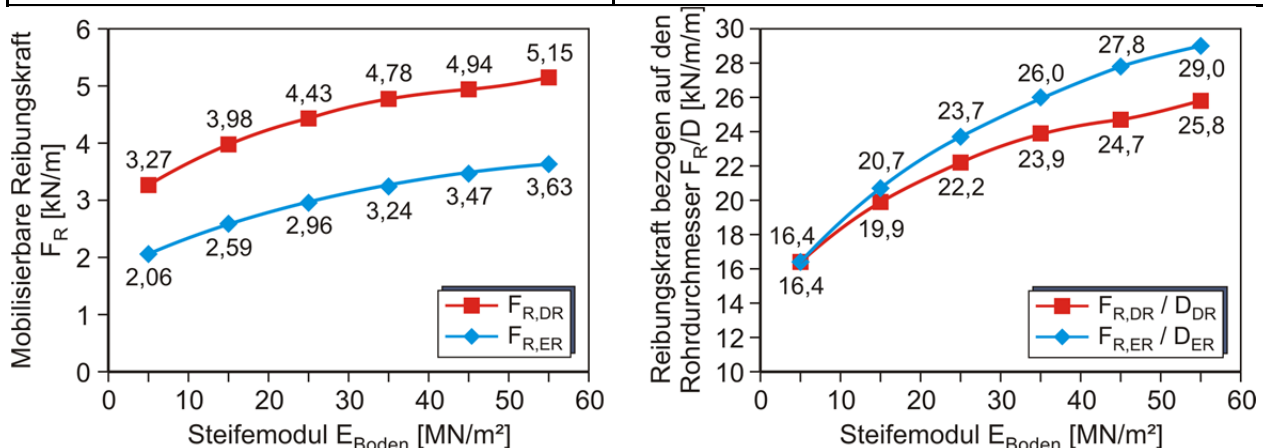


Abbildung 5-30: Vergleich mobilisierbarer (links) und bezogener (rechts) Reibungskraft der Doppel- und Einzelrohrsysteme in Abhängigkeit des Steifemoduls des Bodens

Anhand der Tabelle 5-21 ist zu sehen, dass die Abweichungen der mobilisierbaren Reibungskraft zwischen DR und ER mit steigendem Steifemodul abnehmen. Bei einem E-Modul des Bodens von $E_{Boden} = 5$ MN/m² ist F_R am DR um 59,2 % größer als am ER und

bei $E_{\text{Boden}} = 55 \text{ MN/m}^2$ beträgt die Abweichung nur noch lediglich 42,0 %. Dieses Verhalten ist entgegengesetzt zu dem der Bettungsspannung sowie der bezogenen Reibungskraft.

Tabelle 5-21: Prozentuale Abweichungen mobilisierbarer und bezogener Reibungskraft der Doppel- und Einzelrohrsysteme in Abhängigkeit des Steifemoduls des Bodens

Abweichungen Doppel-/Einzelrohrsystem [%]

	Steifemodul E_{Boden} [MN/m ²]					
	5	15	25	35	45	55
Mobilisierbare Reibungskraft F_R	59,2	53,6	49,9	47,3	42,2	42,0
Bezogene Reibungskraft F_R / D	0,5	4,0	6,3	7,9	11,1	11,3

5.4.8 Reibungswinkel des Bodens

Der innere Reibungswinkel φ' eines Bodens bestimmt den Scherwiderstand, der in einer Gleitfläche in Abhängigkeit von der auf die Scherfläche wirkenden Normalspannung mobilisiert werden kann, ohne zu versagen. Der Winkel bei körnigem Material verändert sich mit der Dichte, Kornzusammensetzung, Drainage-Bedingungen, Spannung- und Belastungsgeschichte. Je stärker die Eigenschaften ausgeprägt sind, desto größer wird der Reibungswinkel und desto höher ist die Belastbarkeit des Bodens [5].

Für Sande und Kiese liegt der Reibungswinkel anhand der Erfahrungswerte zwischen 30° und 40°. Die Empfehlungen des Arbeitskreises „Baugruben“ (EAB) geben für einen Kies oder Sand mit einer lockeren Lagerung die Reibungswinkel von 30° bis 32,5° an. Bei einer mitteldichten Lagerung liegen die Erfahrungswerte im Bereich von 32,5° bis 37,5° und bei einer dichten Lagerung zwischen 35° und 40°. Die Reibungswinkel unter 30° weisen Anteile von Ton oder Schluff auf. Böden mit einem Reibungswinkel zwischen 15° und 25° teilt die EAB einem ausgeprägt plastischen Ton zu [6]. Im Rahmen der Parameterstudie werden Berechnungen zum Reibungswinkel von 15° bis 40° durchgeführt.

Die Abbildung 5-31 und Abbildung 5-32 zeigen die errechneten Werte für die Bettungsspannungen und für die Reibungskraft jeweils am Doppel- und Einzelrohrsystem in Abhängigkeit des Reibungswinkels des Bodens. In der Berechnung der Bettungsspannung wird der K_0 -Wert konstant gehalten ($K_0 = 0,4554$) um ausschließlich den Einfluss des Reibungswinkels auf die Bettungsspannungen zu ermitteln. Höhere Reibungswinkel führen zu einer größeren Scherfestigkeit und damit zu größeren Bettungsspannungen. In dem Vergleich der Rohrsysteme ergibt sich bei einem $\varphi'_{\text{Boden}} = 20^\circ$ am DR eine um 4,8 % geringere Bettungsspannung als am ER. Bei dem maximalen Reibungswinkel von $\varphi'_{\text{Boden}} = 40^\circ$ errechnet sich am ER ebenfalls eine höhere Bettungsspannung, die Differenz zwischen den Systemen beträgt 6,0 % (siehe Tabelle 5-22).

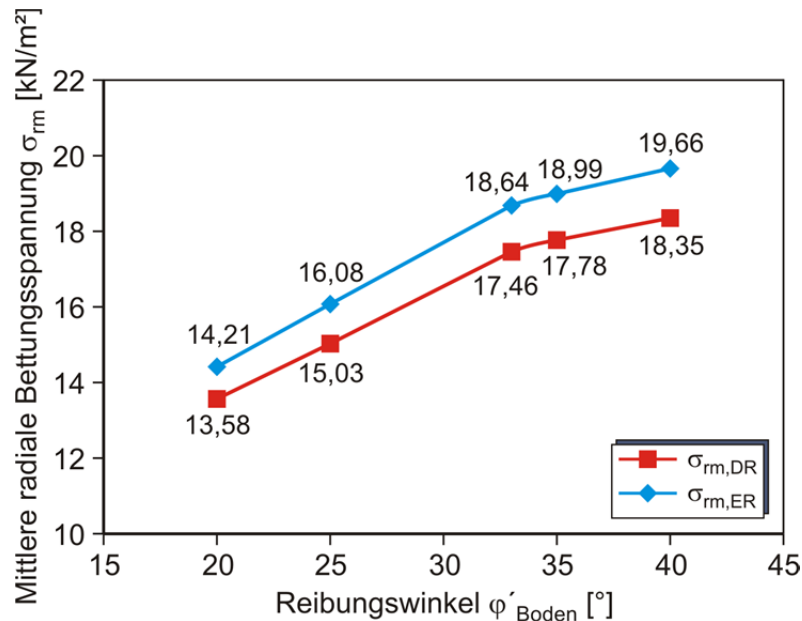


Abbildung 5-31: Vergleich mittlerer radialer Bettungsspannung an Doppel- und Einzelrohrsystemen in Abhängigkeit des Reibungswinkels des Bodens

Die prozentualen Abweichungen der mittleren radialen Bettungsspannungen durch Variieren des Reibungswinkels des Bodens vom Referenzmodell des Doppelrohrsystems sind in der Tabelle 5-22 angegeben. Bei einer Reduzierung des Reibungswinkels um 39,4 % verringert sich die radiale Bettungsspannung um 22,2 %. Wird der Reibungswinkel um 21,2 % erhöht, berechnet sich am Doppelrohrsystem eine um 5,1 % höhere Bettungsspannung. Anhand des Kurvenverlaufs in der Abbildung 5-31 sowie der in der Tabelle 5-23 dargestellten Abweichungen vom Referenzmodell ist somit zu erkennen, dass der Einfluss des Reibungswinkels auf die radiale Bettungsspannung im Bereich nichtbindiger Böden, also ab ca. $\phi'_{\text{Boden}} = 30^\circ$, relativ gering ausfällt, während bindige Böden hingegen bei geringeren Reibungswinkeln stärkerem Einfluss ausgesetzt sind.

Tabelle 5-22: Prozentuale Abweichungen der Doppel- und Einzelrohrsysteme sowie vom Referenzmodell in Abhängigkeit des Reibungswinkels des Bodens

Abweichungen Doppel-/Einzelrohrsystem [%]

	Reibungswinkel ϕ'_{Boden} [°]				
	20	25	33	35	40
Bettungsspannung σ_{rm}	4,8	5,5	6,3	6,5	6,0

Abweichungen vom Referenzmodell (DR) [%]

Änderung des Reibungswinkels	-39,4	-24,2	0,0	6,1	21,2
Änderung der Bettungsspannung (DR)	-22,2	-13,9	0,0	1,8	5,1

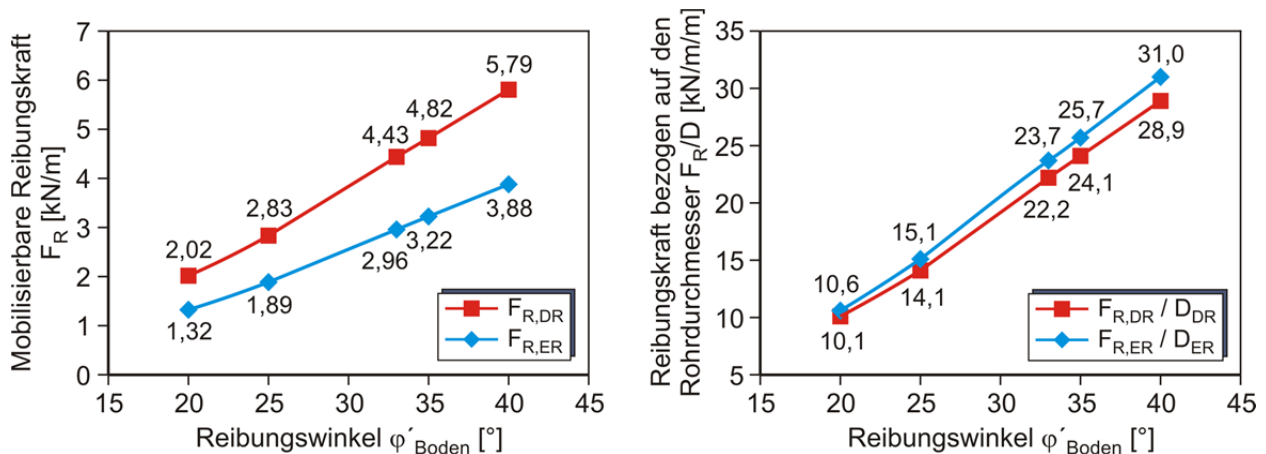


Abbildung 5-32: Vergleich mobilisierbarer (links) und bezogener (rechts) Reibungskraft der Doppel- und Einzelrohrsysteme in Abhängigkeit des Reibungswinkels des Bodens

Im Vergleich der mobilisierbaren Reibungskräfte am Doppel- und Einzelrohrsystem ergibt sich am DR insgesamt eine um ca. 50 % höhere Reibungskraft bezogen auf das ER (siehe Abbildung 5-32, links und Tabelle 5-23).

Tabelle 5-23: Prozentuale Abweichungen mobilisierbarer und bezogener Reibungskraft der Doppel- und Einzelrohrsysteme in Abhängigkeit des Reibungswinkels des Bodens

Abweichungen Doppel-/Einzelrohrsystem [%]

	Reibungswinkel φ'_{Boden} [°]				
	20	25	33	35	40
Mobilisierbare Reibungskraft F_R	52,9	49,5	49,9	49,9	49,3
Bezogene Reibungskraft F_R / D	4,5	6,5	6,3	6,3	6,7

5.4.9 Bodenwichte

Die Bodenwichte ist die auf das Volumen bezogene Eigenlast eines Bodenkörpers. Diese spielt bei der Ermittlung von Erdlasten und Spannungsverteilungen im Boden als eine der maßgebenden Bodenkenngößen eine wichtige Rolle.

Die für die Parameterstudie gewählten Wichten von $\gamma_{\text{Boden}} = 17 \text{ kN/m}^3$, 19 kN/m^3 und 21 kN/m^3 werden in der EAB als Erfahrungswerte für nichtbindige, erdfeuchte Böden wie Kiese und Sande angegeben. Die EAB gibt an, dass mit größer werdender Wichte die Lagerungsdichte ebenfalls steigt. Somit ergibt sich für einen nichtbindigen Boden mit einer Wichte von $\gamma_{\text{Boden}} = 17 \text{ kN/m}^3$ eine lockere Lagerung, für $\gamma_{\text{Boden}} = 19 \text{ kN/m}^3$ eine mitteldichte Lagerung und für $\gamma_{\text{Boden}} = 21 \text{ kN/m}^3$ eine dichte Lagerung [6].

In der Abbildung 5-33 sind die Berechnungsergebnisse der mittleren radialen Bettungsspannungen am Doppel- und Einzelrohrsystem in Abhängigkeit der Bodenwichte dargestellt. Daran ist zu sehen, dass die radiale Bettungsspannung mit höher werdender Wichte des Bodens näherungsweise linear ansteigt. Im Durchschnitt sind die Bettungsspannungen am DR dabei um ca. 6,0 % niedriger als am äquivalenten Einzelrohrsystem (siehe Tabelle 5-24).

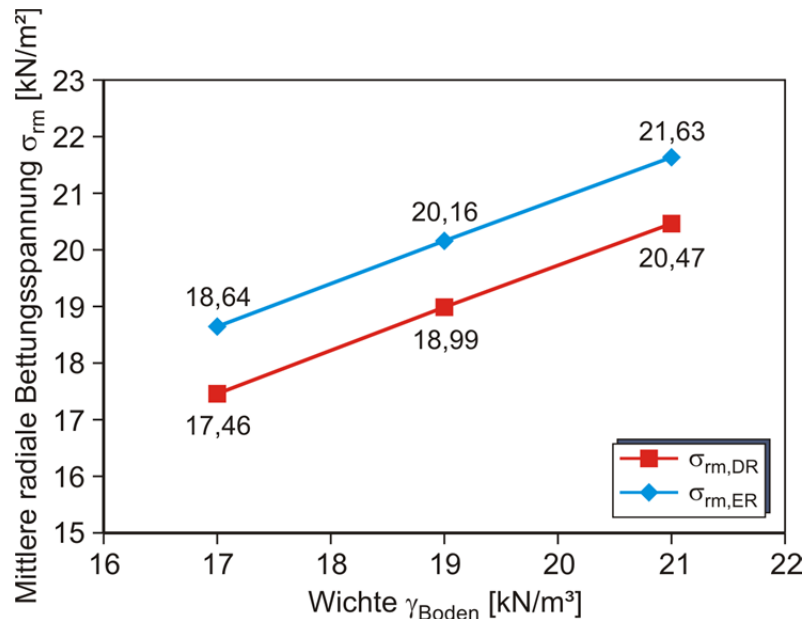


Abbildung 5-33: Vergleich mittlerer radialer Bettungsspannung an Doppel- und Einzelrohrsystemen in Abhängigkeit der Wichte des Bodens

Um den Einfluss der Wichte des Bodens γ_{Boden} auf die Größe der mittleren radialen Bettungsspannungsverteilung vom Doppelrohrsystem zu betrachten, sind in der Tabelle 5-24 die Änderungen der Bettungsspannung im Bezug auf das Referenzmodell angegeben. Die Erhöhung von γ_{Boden} um 23,5 % ergibt eine um 17,2 % höhere mittlere radiale Bettungsspannung.

In der Abbildung 5-34 ist die resultierende Reibungskraft FR für das Doppel- und Einzelrohrsystem in Abhängigkeit der Wichte dargestellt. Die linear steigende radiale Bettungsspannung führt zu ebenfalls steigender Reibungskraft an beiden Rohrsystemen.

Im Vergleich der beiden Rohrsysteme ergibt sich am Doppelrohr eine im Durchschnitt um ca. 50 % höhere mobilisierbare Reibungskraft als am Einzelrohr (siehe Tabelle 5-25).

Tabelle 5-24: Prozentuale Abweichungen der Doppel- und Einzelrohrsysteme sowie vom Referenzmodell in Abhängigkeit der Wichte des Bodens

Abweichungen Doppel-/Einzelrohrsystem [%]

	Wichte γ_{Boden} [kN/m ³]		
	17	19	21
Bettungsspannung σ_{rm}	6,3	5,8	5,4

Abweichungen vom Referenzmodell (DR) [%]

Änderung der Wichte	0	11,8	23,5
Änderung der Bettungsspannung (DR)	0	8,7	17,2

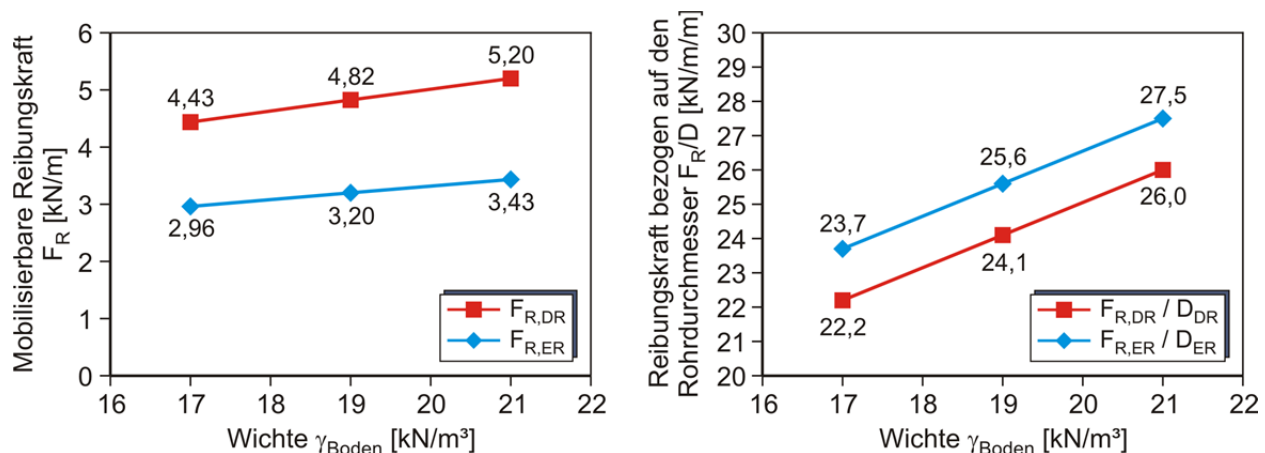


Abbildung 5-34: Vergleich mobilisierbarer (links) und bezogener (rechts) Reibungskraft der Doppel- und Einzelrohrsysteme in Abhängigkeit der Wichte des Bodens

Tabelle 5-25: Prozentuale Abweichungen mobilisierbarer und bezogener Reibungskraft der Doppel- und Einzelrohrsysteme in Abhängigkeit der Wichte des Bodens

Abweichungen Doppel-/Einzelrohrsystem [%]

	Wichte γ_{Boden} [kN/m ³]		
	17	19	21
Mobilisierbare Reibungskraft F_R	49,9	50,7	51,4
Bezogene Reibungskraft F_R/D	6,3	5,8	5,4

5.4.10 Poissonzahl des Bodens

Die Poissonzahl ν , auch Querdehnzahl genannt, beschreibt das Verhältnis der Änderung der vertikalen Längsverformung (Stauchung) und der horizontalen Querverformung (Querdehnung) eines Körpers. Die Größenordnung der Poissonzahl liegt im Bereich zwischen 0 und 0,5. Behält ein Körper bei einer Zugbelastung ein konstantes Volumen, so entspricht dieses Verhalten einer Querdehnzahl ν von 0,5. Liegt der ν -Wert zwischen 0 und 0,5, bedeutet es eine Volumenzunahme des Körpers infolge einer Dehnung. In der Regel liegt der Wert für dichte und mineralisch verfestigte Böden zwischen 0,25 und 0,4 [5]. Im Rahmen dieser Parameterstudie wird die radiale Bettungsspannung für $\nu_{\text{Boden}} = 0,25, 0,35$ und $0,45$ berechnet.

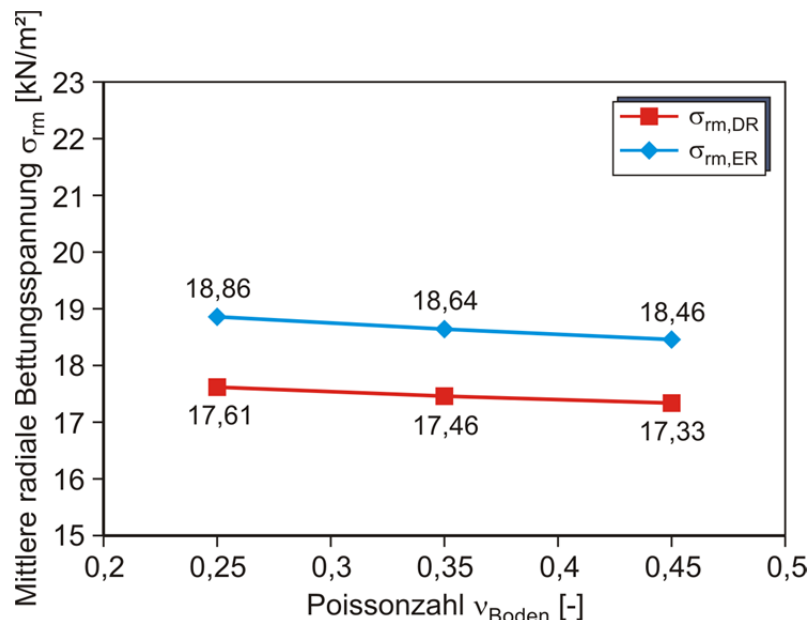


Abbildung 5-35: Vergleich mittlerer radialer Bettungsspannung an Doppel- und Einzelrohrsystemen in Abhängigkeit der Poissonzahl des Bodens

In der Abbildung 5-35 sind die numerisch ermittelten Ergebnisse der mittleren radialen Bettungsspannung σ_{rm} in Abhängigkeit der Poissonzahl ν_{Boden} dargestellt. Der Vergleich der beiden Rohrsysteme zeigt am Doppelrohr eine um durchschnittlich 6,3 % geringere radiale Bettungsspannung als am Einzelrohr. Dabei ist außerdem ersichtlich, dass die mittlere radiale Bettungsspannung mit steigender Poissonzahl des Bodens eine linear sinkende Tendenz aufweist.

Der Einfluss der Änderung von ν_{Boden} auf die radiale Bettungsspannung ist anhand der Abweichungen vom Referenzmodell am Beispiel des Doppelrohres in der Tabelle 5-26 dargestellt. Die Erhöhung von ν_{Boden} um 28,6 % ergibt eine Zunahme der mittleren Bettungsspannung am DR von 0,8 %. Aus der Herabsetzung von ν_{Boden} um 28,6 % resultiert eine Senkung von σ_{rm} um 0,9 %. Angesichts dieser Ergebnisse lässt sich somit

kein signifikanter Einfluss der Poissonzahl auf die Entwicklung der radialen Bettungsspannung an einer Rohrleitung feststellen.

Die mobilisierbare und die bezogene Reibungskraft F_R sind in Abhängigkeit der Poissonzahl in der Abbildung 5-36 dargestellt. Die Ergebnisse für F_R weisen ein annähernd gleiches Verhalten auf wie die Ergebnisse für die mittlere radiale Bettungsspannung.

Tabelle 5-26: Prozentuale Abweichungen der Doppel- und Einzelrohrsysteme sowie vom Referenzmodell in Abhängigkeit der Poissonzahl des Bodens

Abweichungen Doppel-/Einzelrohrsystem [%]

	Poissonzahl ν_{Boden} [-]		
	0,25	0,35	0,45
Bettungsspannung σ_{rm}	6,6	6,3	6,1

Abweichungen vom Referenzmodell (DR) [%]

Änderung der Poissonzahl	-28,6	0	28,6
Änderung der Bettungsspannung (DR)	0,9	0	-0,8

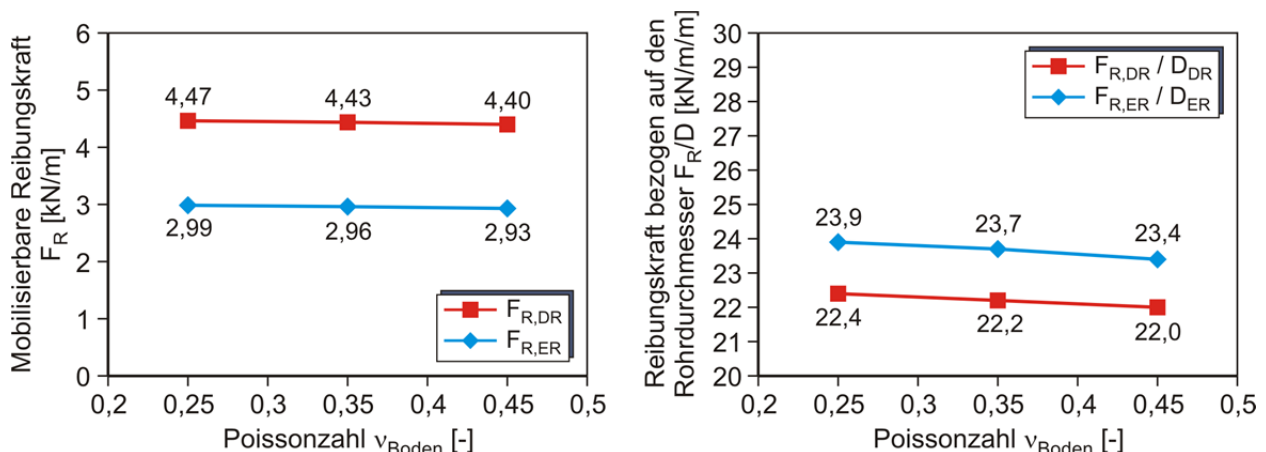


Abbildung 5-36: Vergleich mobilisierbarer (links) und bezogener (rechts) Reibungskraft der Doppel- und Einzelrohrsysteme in Abhängigkeit der Poissonzahl des Bodens

Die Abweichungen der mobilisierbaren Reibungskraft zwischen den Doppel- und Einzelrohrsystemen betragen rund 50 % im Bezug auf das Einzelrohrsystem (siehe Tabelle 5-27).

Tabelle 5-27: Prozentuale Abweichungen mobilisierbarer und bezogener Reibungskraft der Doppel- und Einzelrohrsysteme in Abhängigkeit der Poissonzahl des Bodens

Abweichungen Doppel-/Einzelrohrsystem [%]

	Poissonzahl ν_{Boden} [-]		
	0,25	0,35	0,45
Mobilisierbare Reibungskraft F_R	49,4	49,9	50,2
Bezogene Reibungskraft F_R / D	6,6	6,3	6,1

5.5 Zusammenfassung AP1.2

Die Parameterstudie wird mit dem Ziel durchgeführt, die maßgebenden Einflussgrößen auf die radialen Bettungsspannungen infolge temperaturbedingter radialer Aufweitung von Fernwärmeleitungen als Doppelrohrsystem zu bestimmen. Die Berechnungen erfolgten mit einem in PLAXIS 2D [4] implementierten zweidimensionalen Finite-Element-Modell.

Zusammenfassend ist zu erkennen, dass die Bettungsspannungen des Einzelrohrsystems im Vergleich des Doppel- und Einzelrohrsystems in jeder Berechnungsreihe einen höheren Wert aufzeigen. Dies lässt sich abschließend anhand der unterschiedlichen Temperaturverteilungen der Rohrsysteme erklären.

Nach dem Erwärmen des Doppelrohrmodells in PLAXIS 2D [4] auf 85 °C im Vorlauf und 55 °C im Rücklauf beträgt die maximale Temperatur am Rohrmantel $\vartheta_{\text{max,DR}} = 22,0$ °C, die minimale Temperatur $\vartheta_{\text{min,DR}} = 18,4$ °C und die mittlere Temperatur errechnet sich zu $\vartheta_{\text{m,DR}} = 19,5$ °C. Die Temperatur des Mantelrohrs steigt von den 10 °C Umgebungstemperatur um $\Delta\vartheta = 9,5$ K.

Die gleiche Erwärmung des äquivalenten Einzelrohrsystems führt zu einer maximalen Temperatur von $\vartheta_{\text{max,ER}} = 25,6$ °C, einer minimalen Temperatur von $\vartheta_{\text{min,ER}} = 23,8$ °C und einer mittleren Temperatur von $\vartheta_{\text{m,ER}} = 24,6$ °C am Außenmantel der Vorlaufleitung. Die Mantelrohrtemperatur der Vorlaufleitung erhöht sich somit von den 10 °C Umgebungstemperatur um 14,6 K.

Aus den numerischen Untersuchungen geht hervor, dass die Mantelrohrtemperaturzunahme einer Fernwärmeleitung die Verschiebungen des Rohres und damit einhergehend die Bettungsspannungen in der Kontaktfuge beeinflussen.

Um Aussagen zu der Stärke der Einflussgrößen zu machen, werden die Berechnungsergebnisse auf das Referenzmodell bezogen. In der Abbildung 5-37 ist die bezogene Änderung der mittleren radialen Bettungsspannungen σ_{rm} über die bezogene Änderung des variierenden Parameters dargestellt. Es lässt sich erkennen, dass die

Änderungen der Lagerungsdichte und der Bodenparameter wie Reibungswinkel, Steifemodul und Wärmeleitfähigkeit ein nicht lineares Verhalten zu der Änderung von σ_{rm} aufweisen. Die Kurven der Überdeckungshöhe, der Betriebstemperaturen, der Wichte und der Poissonzahl des Bodens zeigen annähernd ein lineares Verhalten auf.

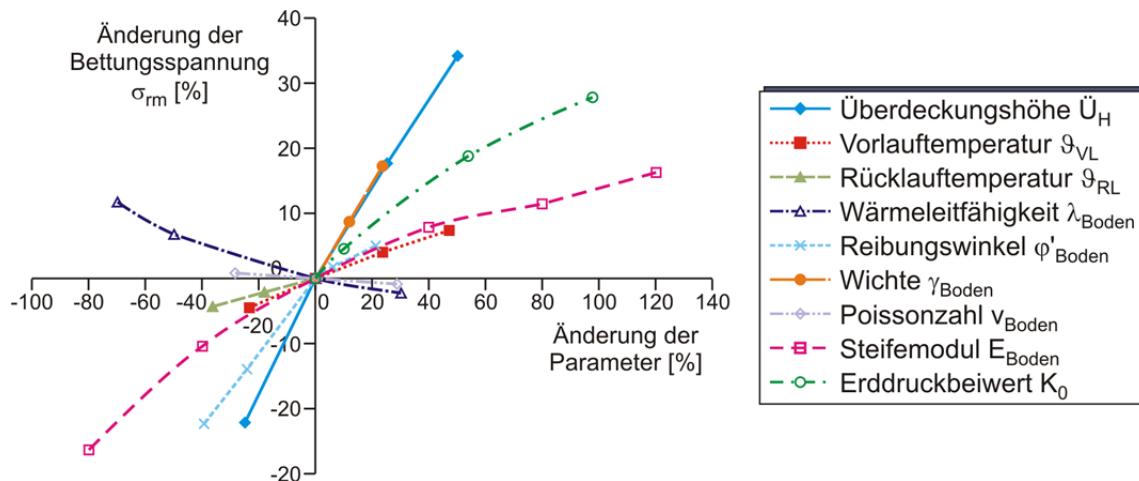


Abbildung 5-37: Prozentuale Änderung der mittleren radialen Bettungsspannung des Doppelrohrsystems in Abhängigkeit der untersuchten Parameter bezogen auf das Referenzmodell

Für einen direkten Vergleich der Einflussgrößen wird jeder Parameter um 30 % im Bezug auf das Referenzmodell erhöht. Die zugehörige mittlere Bettungsspannung wird über die Kurvenfunktionen inter- bzw. extrapoliert. In der Tabelle 5-28 sind die Größen und prozentualen Änderungen der Einflussparameter und die Änderung der mittleren radialen Bettungsspannung σ_{rm} zusammengefasst dargestellt.

Es wird deutlich, dass die Größe der mittleren radialen Bettungsspannung eines Doppelrohrsystems $\sigma_{rm,DR}$ sowohl von der Lagerungsdichte, der Überdeckungshöhe als auch von der Wichte des umgebenden Bodens stark beeinflusst wird. Untersuchungen der mittleren radialen Bettungsspannungen an einer KM-Einzelrohrleitung von ACHMUS [1] ergaben ebenfalls eine Abhängigkeit der Größe der mittleren Bettungsspannungen sowohl von der Lagerungsdichte als auch von der Überdeckungshöhe. Die Poissonzahl, Wärmeleitfähigkeit des Bodens und die Mediumtemperatur haben einen vernachlässigbar kleinen Einfluss auf die Verteilung der Bettungsspannung eines Doppelrohrsystems.

Die Untersuchung der mittleren radialen Bettungsspannung in Abhängigkeit der Rohrdimensionen ergab, dass diese keinen signifikanten Einfluss auf die Spannungsverteilung haben (siehe Tabelle 5-28).

Tabelle 5-28: Änderung der Bettungsspannung infolge einer prozentualen Erhöhung der Parameter um 30%

Abweichung zum Referenzmodell				
Untersuchte Parameter			Erhöhung des Parameters [%]	Änderung der Bettungsspannung σ_{rm} [%]
Überdeckungshöhe	$\ddot{U}_H$ [m]	1,04	30	20,9
Vorlauftemperatur	ϑ_{VL} [°C]	110,5	30	5,3
Rücklauftemperatur	ϑ_{RL} [°C]	71,5	30	1,8
Wärmeleitfähigkeit	λ_{Boden} [W/(mK)]	1,3	30	-2,1
Reibungswinkel	φ_{Boden} [°]	42,9	30	7,2
Wichte	γ_{Boden} [kN/m³]	22,1	30	22,0
Poissonzahl	ν_{Boden} [-]	0,46	30	0,8
E-Modul	E_{Boden} [MN/m²]	32,5	30	6,1
Erddruckbeiwert	K_0 [-]	0,59	30	12,3

In der Abbildung 5-38 ist die Änderung der mittleren radialen Bettungsreaktionsspannungen $\Delta\sigma_{rm}$ über die Änderung des variierenden Parameters jeweils bezogen auf das Referenzmodell dargestellt. Diese Betrachtung der Veränderungen der Einflussfaktoren auf die verursachten Reaktionsspannungen ist für die Untersuchungen der Bettungsspannung von Fernwärmeleitungen im Betrieb von Bedeutung.

Es lässt sich erkennen, dass für die durch radiale Aufweitung des Rohres verursachten radialen Bettungsreaktionsspannungen andere Parameter einen signifikanten Einfluss auf die Größe haben, als bei der Betrachtung der totalen mittleren radialen Bettungsspannung. Der Grund für die unterschiedlichen maßgebenden Parameter besteht darin, dass die oben genannten Einflussparameter überwiegend die Bettungsspannungen im Primärspannungszustand beeinflussen.

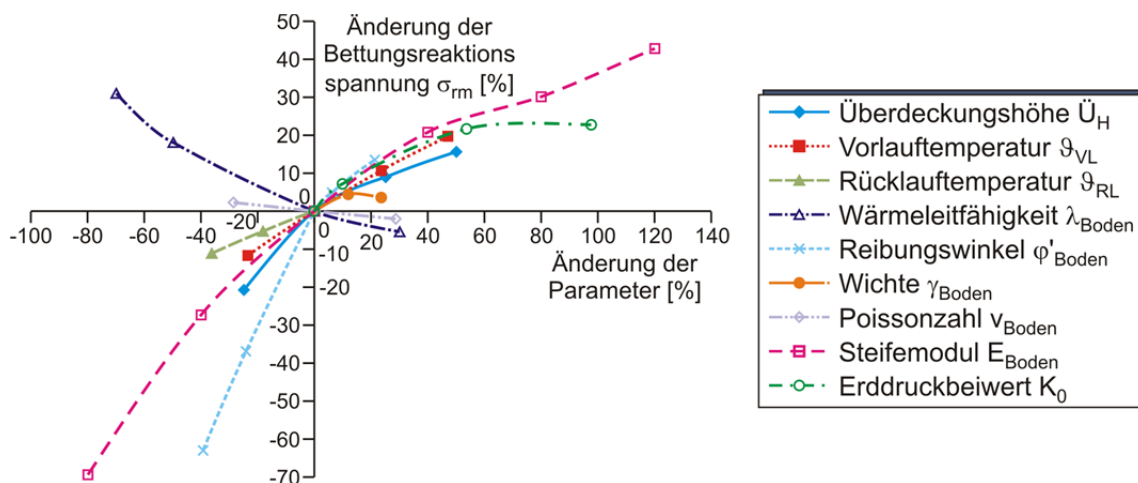


Abbildung 5-38: Prozentuale Änderung der mittleren radialen Bettungsreaktionsspannung des Doppelrohrsystems in Abhängigkeit der untersuchten Parameter bezogen auf das Referenzmodell

Die Berechnung der mobilisierbaren Reibungskraft wird in Abhängigkeit der numerisch ermittelten Bettungsspannung durchgeführt. Die Ergebnisse der resultierenden Reibungskraft am Doppelrohr werden den am Einzelrohr wirkenden Kräften gegenübergestellt. Es zeigte sich, dass die mobilisierbare Reibungskraft an einem Doppelrohrsystem rund 50 % größer als an einem Einzelrohrsystem ist. Für einen Vergleich der numerischen Ergebnisse mit den dargestellten analytischen Berechnungsansätzen wird die Reibungskraft nach dem Ansatz von ACHMUS [1] berechnet. Die nach Gleichung (5-1) ermittelte Reibungskraft am Einzelrohrsystem für ein KM-Rohr, verlegt in einem locker bis mitteldicht gelagerten Sand ($D_r = 0,3$), beträgt $F_{R,ER} = 2,12 \text{ kN/m}$. Dabei werden die Parameter des ER-Referenzmodells (siehe Kapitel 5.3) angesetzt. Die numerisch berechnete mobilisierbare Reibungskraft beträgt $F_{R,ER,FEM} = 2,93 \text{ kN/m}$. Der analytische Berechnungsansatz beruht auf Untersuchungen an einem einzeln verlegten Rohr. Im numerischen Modell wird der Einfluss der zusätzlichen Wärmequelle aus dem Rücklauf berücksichtigt. Aus diesem Grund zeigen die Ergebnisse der mobilisierbaren Reibungskraft am Einzelrohrsystem eine zufriedenstellende Übereinstimmung. Auf den Vergleich der Reibungskraft am Doppelrohrsystem wird hier verzichtet, da die analytische Berechnung der Bettungsspannung von ACHMUS [1] auf Grundlage eines Einzelrohrsystems entwickelt werden.

Die Ergebnisse aus den numerischen Berechnungen sind im Anhang aufgelistet.

Bewertung der Ergebnisse

In den meisten Fällen erfordern numerische Untersuchungen während der Modellbildung entsprechende Vereinfachungen und Idealisierungen der tatsächlichen Verhältnisse.

Die dargestellten Ergebnisse der mittleren Bettungsspannung gelten für ein in einem homogenen Sandboden verlegtes Rohr. In der Praxis wird eine Sandbettung nur innerhalb

des Verlegegrabens eingebracht. Somit kann in der Realität nicht von homogenen Bodenverhältnissen ausgegangen werden.

Bei der Beschreibung der Interaktion zwischen Boden und Fernwärmeleitung ist zu beachten, dass der betrachtete Spannungszustand in der Regel nicht aus einem klar definierten Belastungszustand resultiert, sondern über wechselhafte Folgen von Erst-, Ent- und Wiederbelastung entsteht. Eine rechnerische Erfassung solcher Vorgänge wird in dieser Studie nicht berücksichtigt, sodass die numerischen Berechnungen der Bettungsspannung auf monotone Belastungsvorgänge beschränkt sind.

Weitere enthaltene Vereinfachungen bei der Ermittlung der radialen Bettungsspannungsverteilung infolge Aufweitung sind zum einen die Vernachlässigung der gleichzeitig auftretenden Bodenbeanspruchung in axialer Richtung und zum anderen die Vernachlässigung der Ausdehnung des Bodens.

Die dargestellten Ergebnisse für das Einzelrohrsystem sind an der Vorlaufleitung berechnet worden. Da in der Praxis die radiale Aufweitung des Vorlaufrohres durch das danebenliegende Rücklaufrohr beeinflusst wird, werden in dem Modell für das Einzelrohrsystem zwei Rohrleitungen, eine Vorlauf- und eine Rücklaufleitung modelliert.

Die vorgestellten Berechnungsmodelle werden mit dem Ziel entwickelt, Einflüsse der Überdeckungshöhe, der Rohrdimension, den Betriebstemperaturen, verschiedenen Bodenkennwerten und der Lagerungsdichte des Bodens auf die Größe und Verteilung der radialen Bettungsspannung in der Kontaktfuge zum Boden qualitativ zu untersuchen. Die Ergebnisse zeigen, dass die Lagerungsdichte, Überdeckungshöhe und Wichte des umgebenden Bodens die Größe der mittleren radialen Bettungsspannung entscheidend beeinflussen. Diese drei Parameter beeinflussen ebenfalls die Primärspannungsverteilung. Bei Betrachtung der radialen Bettungsreaktionsspannungen wird deutlich, dass diese im Wesentlichen von dem Reibungswinkel, der Lagerungsdichte und dem Steifemodul des Bodens abhängig ist.

Auffällig an den Ergebnissen ist, dass die temperaturbedingten Verschiebungen an dem DR-Referenzmodell unter 1 mm liegen. Die von dieser kleinen Verschiebung verursachten Bettungsreaktionsspannungen zeigen einen Wert auf, der 60 % der Primärspannungen beträgt.

Um eine quantitative Zuverlässigkeit der Berechnungsergebnisse zu geben, empfiehlt es sich experimentelle Untersuchungen für einen Vergleich mit den Berechnungsergebnissen durchzuführen.

Ausblick

Wird das numerische Modell um weitere Berechnungsschritte erweitert, können zusätzliche Einflussgrößen wie z.B. die Temperaturverteilung innerhalb des Bodens oder Temperaturen an der Geländeoberfläche untersucht werden.

Für die hier durchgeführten Berechnungen wird nur die Belastung aus der radialen Aufweitung berücksichtigt. Diese Betrachtung entspricht nicht den tatsächlichen Bewegungen einer Fernwärmeleitung unter Temperaturbelastung. Ein weiterer Ansatzpunkt für zukünftige Forschungsarbeit ist die Berücksichtigung einer Kombination der Widerstandskomponenten des Bodens im Betrieb. Dieses sollte besonders an und in der Nähe von Kurvenabschnitten berücksichtigt werden, da dort die Verschiebungen sowohl in axiale, radiale als auch laterale Richtung gleichzeitig auftreten können.

Um die Berechnungsergebnisse der hier durchgeführten Berechnungen als Basis für ein modifiziertes Bemessungskonzept von Doppelrohrsystemen zu verwenden, ist eine Durchführung weiterer Forschungen und experimenteller Versuche unerlässlich.

6. Arbeitspaket 1.3 – Numerische Ermittlung der Schubspannungsverteilung in Doppelrohren infolge Betrieb

6.1 Einleitung

Für den Betrieb einer Fernwärmeleitung ist nicht nur die radiale Aufweitung von Bedeutung, sondern ebenfalls das axiale Verhalten der Materialien während des Betriebs. Ein besonderes Augenmerk liegt dabei auf der Scherfestigkeit des Schaums. Dieser wird in der Kontaktfuge zwischen Mediumrohr und Dämmung durch die axialen Belastungen maximal beansprucht.

In diesem Abschnitt wird die Scherfestigkeit zwischen Mediumrohr, Dämmung und Mantel genauer untersucht. Für Einzelrohre ist die Prüfung der Scherfestigkeit nach DIN EN 253 [7] üblich. Dementsprechend orientiert sich die Norm zur Prüfung der Doppelrohre, DIN EN 15698-1 [10], stark daran. Für die Einzelrohre wird das Mediumrohr bei der Prüfung axial belastet. Daran orientiert wird beim Doppelrohr ebenfalls jeweils ein Mediumrohr des Doppelrohres axial belastet und die dabei aufgebrachte Kraft bemessen. Die Berechnung der Scherfestigkeit erfolgt dann mit Hilfe des gleichen Berechnungsansatzes. Allerdings ist ein Einzelrohr ein rotationssymmetrischer Körper wohingegen ein Doppelrohr lediglich achsensymmetrisch ist. Es ist also zu überprüfen, ob dieser Ansatz der Realität entspricht, da damit zu rechnen ist, dass das zweite Mediumrohr sowie die nicht vorhandene Rotationssymmetrie einen Einfluss auf die Ergebnisse haben und die berechneten Werte somit nicht den realen Scherfestigkeiten entsprechen. Es wird davon ausgegangen, dass im Versuch für die Belastung eines Mediumrohres im Doppelrohr der Schaum nicht die gleiche Beanspruchung erfährt wie bei der Belastung des Mediumrohres im Einzelrohr.

Experimentelle Untersuchungen

Im Falle eines Einzelrohrsystems wird die Axialkraft auf das Stahlmediumrohr aufgebracht. Beim Doppelrohrsystem erfolgt die Belastung nacheinander, einzeln auf jedes Rohr. Dabei beträgt die Geschwindigkeit der Prüfmaschine 5 mm/min. Während des Vorschubs wird die Axialkraft aufgezeichnet und kann anschließend mit folgender Gleichung in die Scherspannung umgerechnet werden:

$$\tau_{ax} = \frac{F_{ax}}{\pi L D_s} \quad (6-1)$$

mit:

τ_{ax}	[N/mm ²]	axiale Schubspannung;
F_{ax}	[N]	axiale Kraft;
L	[m]	Länge des Probekörpers (200 mm);
D_s	[mm]	Rohraußendurchmesser.

Für beide Rohrsysteme wird dabei die gleiche Formel verwendet, obwohl bei einem Doppelrohr nicht von einem rotationssymmetrischen Modell ausgegangen werden kann.

Im Folgenden werden die Ergebnisse der numerischen Nachrechnung der experimentellen Prüfung der Scherfestigkeit zwischen Mediumrohr, Dämmung und Mantel von Einzel- und Doppelrohren (nach DIN EN 15698 [10]) für Fernwärmesysteme unter Axialbelastung vorgestellt. Zunächst wird das Modell eines Einzelrohres unter vertikaler axialer Belastung (siehe Abbildung 6-1) erstellt und untersucht. Im Anschluss erfolgt die Modellierung eines zweiten Modells für ein Doppelrohr mit gleichen Lastbedingungen (siehe Abbildung 6-2).

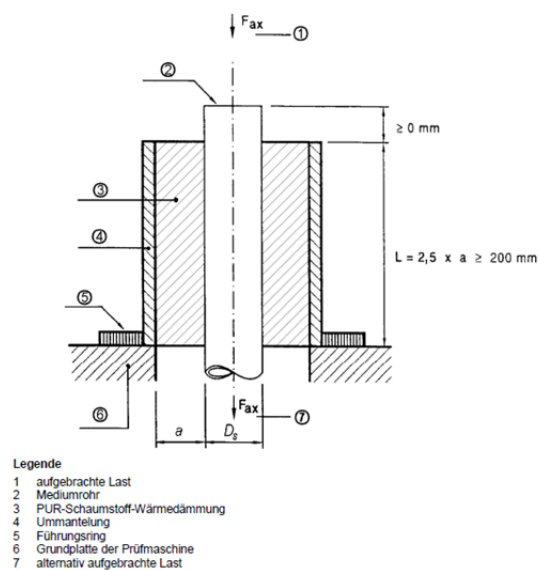


Bild 2 — Prüfanordnung für die axiale Scherprüfung

Abbildung 6-1: Prüfanordnung für die Bestimmung der axialen Scherfestigkeit an einem Einzelrohrsystem [7]

Auf das Stahlrohr mit einem Außendurchmesser von $D_s = 60,3 \text{ mm}$ wird zunächst eine Spannung in vertikaler Richtung von 50 N/mm^2 aufgebracht. Nach Gleichung (6-1) lässt sich die axiale Schubspannung von $0,69 \text{ N/mm}^2$ errechnen. Diese Prüfung kann sowohl in vertikaler als auch an horizontaler Lage des Rohres durchgeführt werden (vgl. Abbildung 6-1 und Abbildung 6-2). Das Ergebnis einer solchen Prüfung entspricht einem Durchschnittswert aus drei Messungen an jedem Rohr.

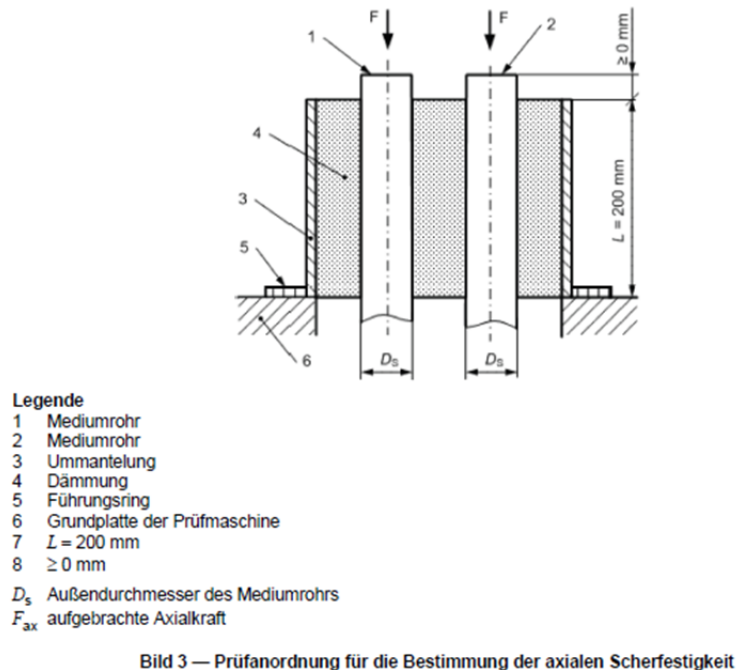


Abbildung 6-2: Prüfanordnung für die Bestimmung der axialen Scherfestigkeit an einem Doppelrohrsystem [10]

6.2 Numerische Modellierung

6.2.1 Einzelrohrmodell

Zur Untersuchung des Verhaltens eines Fernwärmerohres im Scherfestigkeitsversuch wird ein dreidimensionales Finite-Elemente-Modell mit dem Programm ABAQUS [17] erstellt. Wie in der Abbildung 6-3 links dargestellt, besteht das Modell aus einem Stahlrohr (grau) mit einem Durchmesser von $D = 60,3 \text{ mm}$ und einer Wandstärke von $2,9 \text{ mm}$, welches in der Dämmschicht (hier grün) mit einer Dicke von $29,15 \text{ mm}$ gebettet ist. Die rote Außenschicht stellt die HDPE-Ummantelung des Rohres dar und hat eine Stärke von $3,2 \text{ mm}$.

Unter Ausnutzung der vorliegenden Symmetrie, wird nur die Hälfte des Systems im Modell abgebildet. Bei den verwendeten Elementen handelt es sich um 8-Knoten-Elemente (C3D8), welche insbesondere im Bereich des Stahlrohres feiner vernetzt werden, um eine höhere Rechengenauigkeit zu erzielen (vgl. Abbildung 6-3, rechts). Das Stahlrohr mit einer Länge von 200 mm , auf welches die axiale Belastung aufgebracht wird, wird zu beiden Seiten hin um 10 mm verlängert. Auf diese Weise kann eine optimale Lasteinleitung gewährleistet werden. Weitere Randbedingungen werden an den unteren Knoten des HDPE-Materials festgesetzt. Die genannten Knoten werden dabei in allen drei Richtungen (X, Y, Z) fixiert.

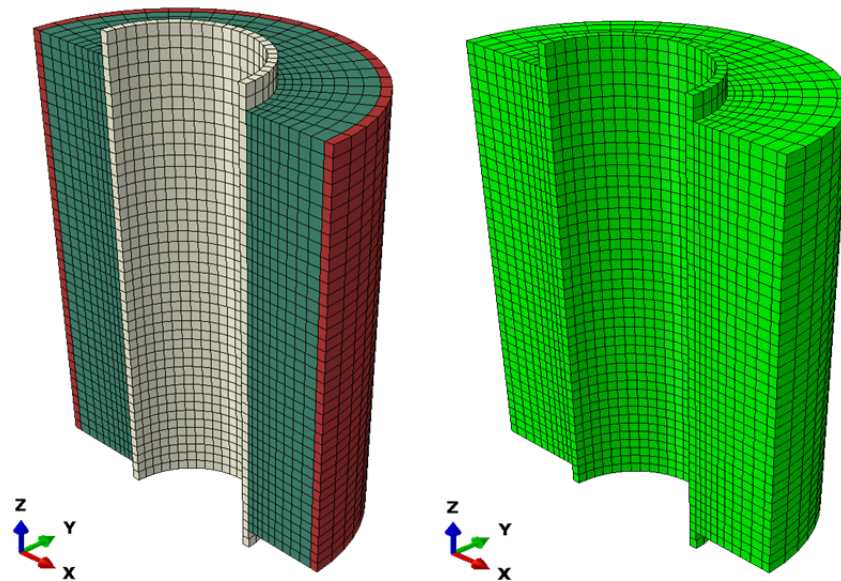


Abbildung 6-3: Finite-Elemente-Modell eines Einzelrohrsystems

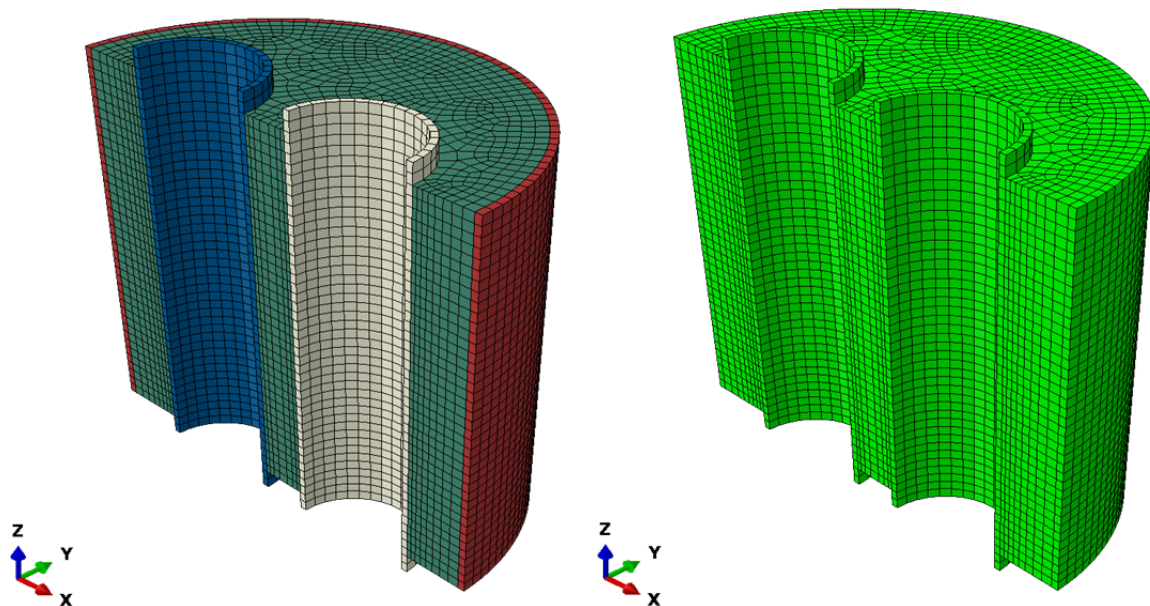


Abbildung 6-4: Finite-Elemente-Modell eines Doppelrohrsystems

6.2.1 Doppelrohrmodell

Für das Doppelrohr wird ein weiteres Modell erstellt. Die Abbildung 6-4 (links) veranschaulicht die einzelnen Komponenten dieses Modells. Die Belastung wird lediglich auf eines der beiden Stahlrohre (in blau dargestellt) aufgebracht, während das zweite Stahlrohr unbelastet bleibt. Beide Rohre sind in einer Isolierschicht (Dämmmaterial in grün dargestellt) eingebettet, welche von einem HDPE-Mantel (rot) abgeschlossen wird. Wie bereits bei dem Einzelrohrmodell wird auch hier aus Symmetriegründen lediglich eine

Hälfte des Systems modelliert. Auch für dieses Modell werden 8-Knoten-Elemente (C3D8) verwendet, deren Diskretisierung im Bereich der Stahlrohre verfeinert wird (vgl. Abbildung 6-4, rechts). Die Längen der Rohre sowie die Randbedingungen der Knoten für das Doppelrohr sind mit denen des Einzelrohres identisch.

Bei dem numerischen Modell wird ein linear-elastisches Materialverhalten der einzelnen Komponenten angenommen. Die nachfolgende Tabelle 6-1 veranschaulicht die wichtigsten Materialeigenschaften, die bei der Modellierung in Ansatz gebracht werden.

Tabelle 6-1: Materialparameter

	ρ [kg/m ³]	E [kN/m ²]	ν [-]
Mediumrohr	7,85	$2,1 \cdot 10^8$	0.30
Dämmung	0,07	$1,7 \cdot 10^4$	0.40
Mantelrohr	0,95	$1,0 \cdot 10^6$	0.46

6.3 Ergebnisse der numerischen Modellierung

6.3.1 Einzelrohrmodell

Die numerische Modellierung wird in einem Schritt durchgeführt. In diesem Schritt wird auf das Stahlrohr eine vertikale Druckspannung von 50 N/mm² aufgebracht. Die folgende Abbildung 6-5 zeigt die vertikale Verschiebung (U₃) des Rohres infolge der aufgetragenen Druckspannung auf das Stahlrohr. Das Stahlrohr verschiebt sich hier um etwa 3,5 mm abwärts. Dabei treten radialsymmetrische Verformungen rund um das Stahlrohr auf.

Um die Schubspannung im Dämmstoff zu berechnen und mit den Erfahrungswerten nach EN 253 [7] zu vergleichen, wird ein neues zylindrisches Koordinatensystem erstellt und die Spannungskomponente (σ_{13}) berechnet. Der entsprechende Spannungsverlauf ist in der Abbildung 6-6 dargestellt. Die Schubspannungsverteilung variiert in vertikaler Richtung von 1,0 N/mm² bis 0,40 N/mm², wobei sie aufgrund der Symmetrie in radialer Richtung konstant bleibt.

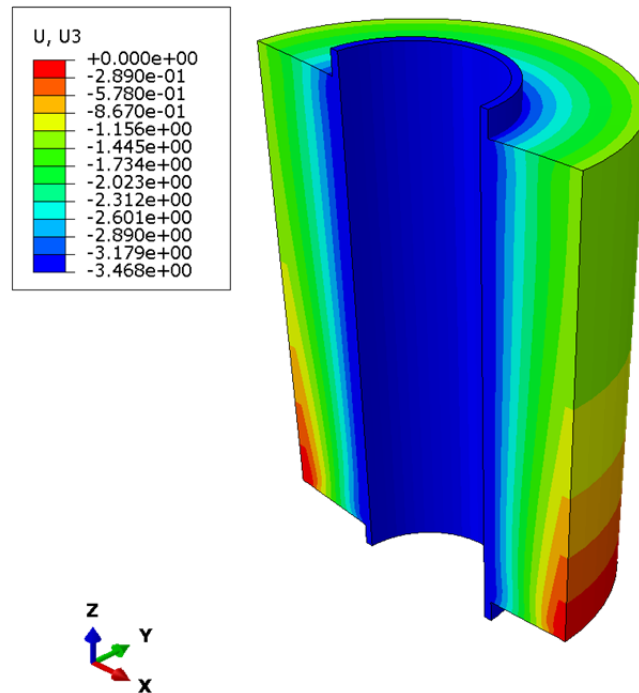


Abbildung 6-5: Vertikale Verschiebungen (U_3) infolge axialer Druckspannung (50 N/mm^2) an einem Einzelrohrmodell

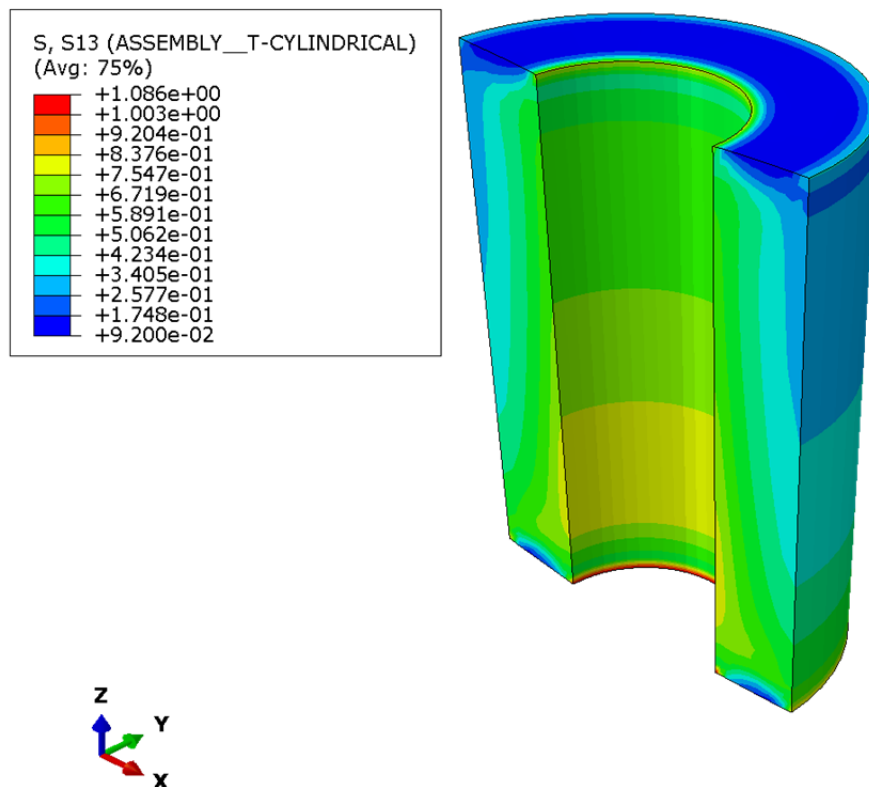


Abbildung 6-6: Axiale Scherfestigkeit (σ_{13}) infolge axialer Druckspannung (50 N/mm^2) an einem Einzelrohrmodell

Die Schubspannungsverteilung zwischen dem Stahlrohr und dem Dämmmaterial entlang eines vertikalen Schnitts in deren Kontaktfuge ist in der Abbildung 6-7 dargestellt. Die numerischen Ergebnisse aus der FE-Modellierung werden hier mit den Werten der EN 253 [7] ($\tau_{ax} = 0,69 \text{ N/mm}^2$) verglichen.

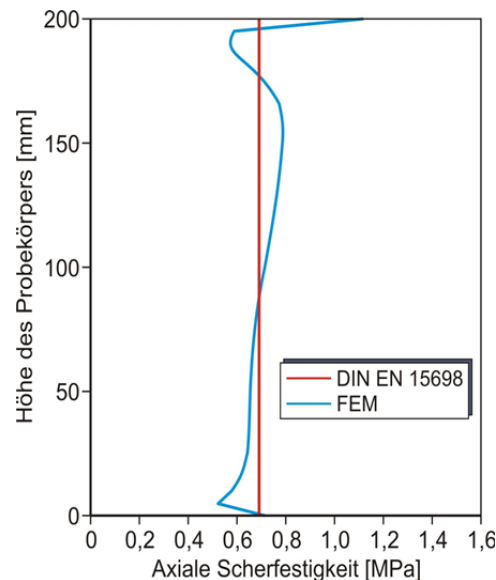


Abbildung 6-7: Axiale Scherfestigkeit (σ_{13}) in der Kontaktfuge zwischen Mediumrohr und Dämmschicht an einem Einzelrohrmodell

Abbildung 5-27 zeigt die Variation der Schubspannung aus der numerischen Modellierung über die Höhe der Probe. Sie variiert zwischen $0,50 \text{ N/mm}^2$ und $0,80 \text{ N/mm}^2$, was in etwa dem nach Gleichung (6-1) aus EN 253 [7] berechneten Durchschnittswert entspricht. Somit zeigt sich, dass die nach EN 253 [7] berechnete mittlere Spannung eine gute Näherung der tatsächlichen Spannungsverteilung entlang der Dämmschicht liefert. Die Schubspannungsverteilung ist rotationssymmetrisch, aber wegen der begrenzten Probenlänge in Längsrichtung variabel. An den Rändern sind die Spitzen numerisch bedingt. Tatsächlich tritt ein Maximalwert von rund $0,8 \text{ MPa}$ (statt des in der Gleichung (6-1) verwendeten Mittelwerts von $0,68 \text{ MPa}$) auf. Die Auswertung ist insofern auf der sicheren Seite.

6.3.2 Doppelrohrmodell

Die numerische Berechnung wird auch bei dem Doppelrohr in nur einem Schritt durchgeführt. In diesem Schritt wird auf das linke Mediumrohr eine vertikale Druckspannung von 50 N/mm^2 aufgebracht. Die folgende Abbildung 6-8 zeigt die vertikale Verschiebung (U_3) infolge der vertikalen Spannung auf das Stahlrohr. Das belastete Mediumrohr verschiebt sich hier um etwa $4,0 \text{ mm}$ nach unten, was einem etwas höheren maximalen Verschiebungswert entspricht, als bei dem zuvor untersuchten Einzelrohrsystem (vgl. Abbildung 6-5) ermittelt worden ist. Dieses Ergebnis resultiert aus der Tatsache, dass das Doppelrohrsystem flexibler ist und die Randbedingungen auf dem

Mantelrohr definiert werden, welches im Falle des Doppelrohrsystems größer im Vergleich zum Einzelrohr ist.

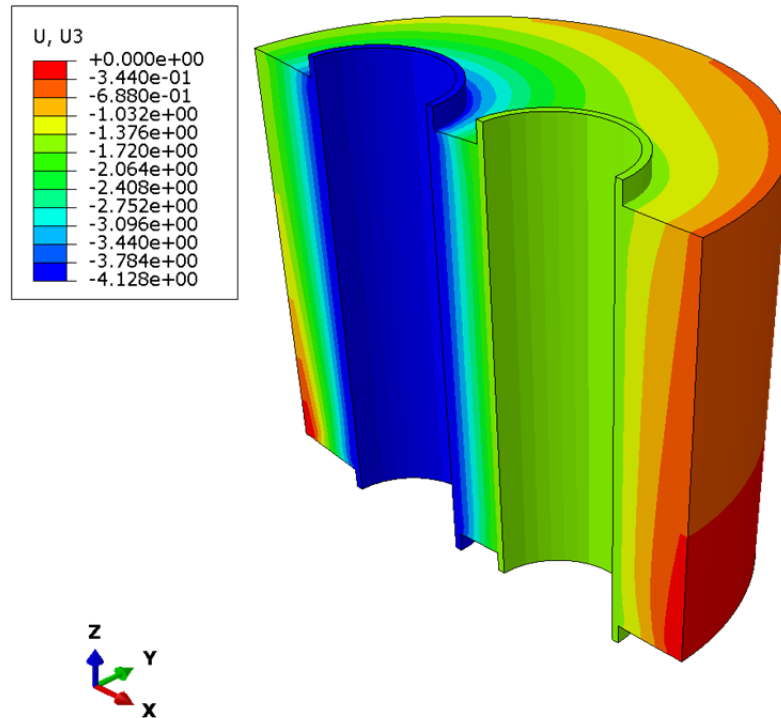


Abbildung 6-8: Vertikale Verschiebungen (U_3) infolge axialer Druckspannung (50 N/mm^2) an einem Doppelrohrmodell

Obwohl die Belastung nur auf ein Rohr ausgeübt wird, bewegt sich das zweite, unbelastete Rohr, aufgrund des vollständigen Verbunds der Dämmschicht mit beiden Stahlrohren ebenfalls abwärts. Der Durchschnittswert der vertikalen Abwärtsverschiebung des unbelasteten Rohres liegt bei 1,50 mm.

Um die Schubspannung im Dämmstoff zu berechnen und mit den Erfahrungswerten nach DIN EN 15698-1 [10] zu vergleichen, wird in der Mitte des linken Stahlrohres ein neues zylindrisches Koordinatensystem definiert und die Spannungskomponente (σ_{13}) berechnet (siehe Abbildung 6-9).

Die Schubspannungsverteilung variiert hier sowohl in vertikaler als auch in radialer Richtung, da sich das Modell im Belastungsfall, anders als beim Einzelrohr, nicht mehr symmetrisch verhält. Die Schubspannung um das linke Mediumrohr variiert von ca. $0,42 \text{ N/mm}^2$ bis $1,20 \text{ N/mm}^2$.

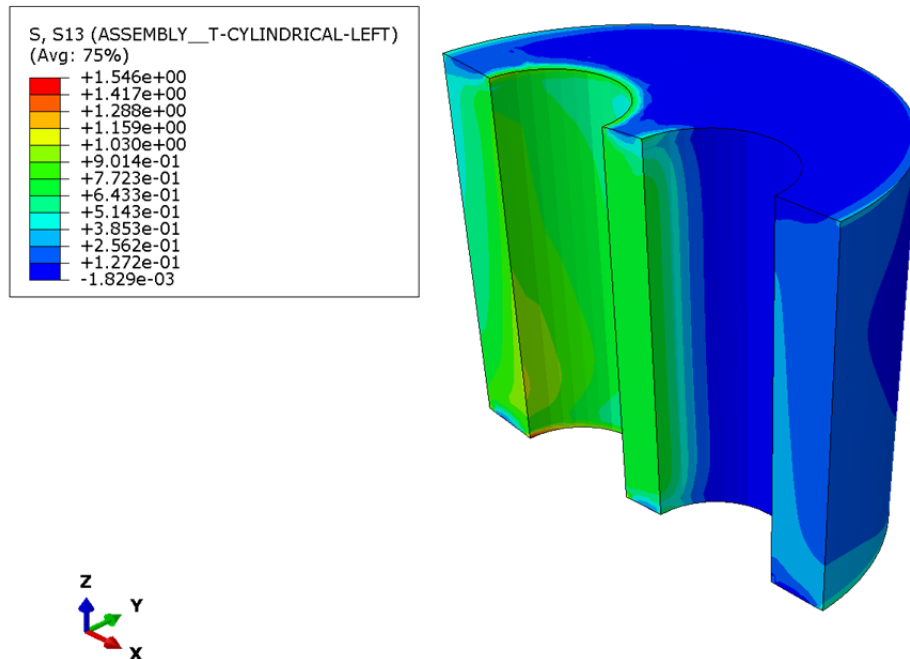


Abbildung 6-9: Axiale Scherfestigkeit (σ_{13}) infolge axialer Druckspannung (50 N/mm^2) an einem Doppelrohrmodell

Um einen Vergleich der berechneten Schubspannungsverteilung mit den nach Gleichung (6-1) erhaltenen Ergebnissen zu ermöglichen, werden verschiedene vertikale Schnitte (siehe Abbildung 6-10) in Abhängigkeit des von der horizontalen Achse gemessenen Radialwinkels gewählt und die Schubspannungen entlang dieser Schnitte dargestellt. Aufgrund der asymmetrischen Randbedingungen am belasteten Mediumrohr in dem Doppelrohrmodell kommt es zu unterschiedlichen Schubspannungsverteilungen entlang der vertikalen Schnitte.

Basierend auf diesen Ergebnissen wird ersichtlich, dass die Schubspannungsermittlung nach DIN EN 15698-1 [10] eine angemessene Verteilung ergibt, die nahezu gleich oder höher ist als die Schubspannung aus der numerischen Modellierung. Nur in zwei vertikalen Schnitten (Winkel 90° und 135°) liegt die gemäß numerischer Berechnung ermittelte Schubspannungsverteilung höher als der analytische Wert. Der Maximalwert der Schubspannung am Doppelrohr ist (bei gleicher Axialkraft) größer als beim Einzelrohr (nämlich rund $1,05 \text{ MPa}$ statt $0,8 \text{ MPa}$). Für ein Doppelrohr ist daher die Testauswertung nach Gleichung (6-1) noch konservativer.

Nach vorliegenden Ergebnissen kann die empirische Gleichung für Einzelrohrsysteme als ausreichend genau angesehen werden. Doppelrohrsysteme betreffend sollten allerdings weitere Untersuchungen und Modifikationen angestrebt werden, um genauere Scherfestigkeitswerte in den Dämmschichten ermitteln zu können. Anhand der durchgeführten Versuche kann jedoch die Aussage getroffen werden, dass beim Doppelrohr lokal bis zu rund 25 % höhere Belastungen des Schaums auftreten.

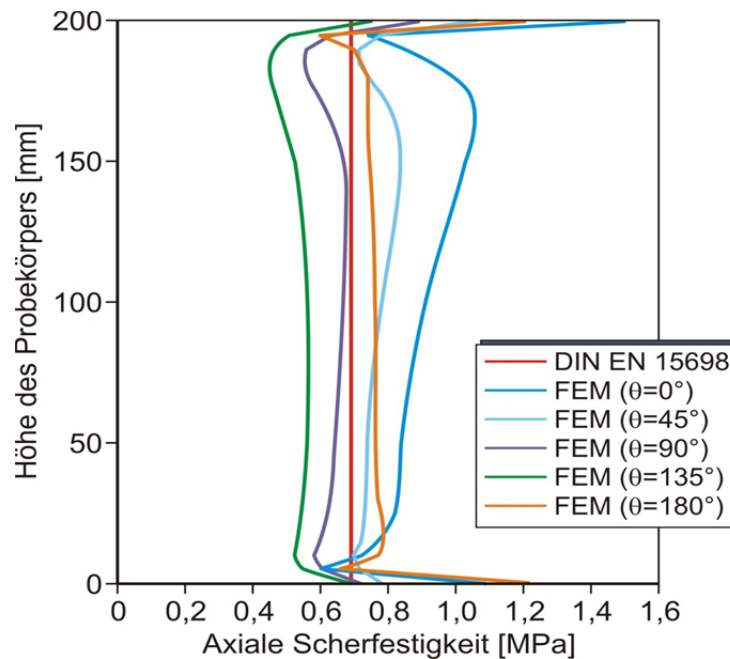


Abbildung 6-10: Axiale Scherfestigkeit (σ_{13}) in der Kontaktfuge zwischen Mediumrohr und Dämmschicht an einem Doppelrohrmodell

6.4 Zusammenfassung

Die numerischen Untersuchungen werden zuerst für ein einzelnes Rohr unter vertikaler Axialbelastung und danach für ein anderes Modell, ein Doppelrohr unter denselben Belastungsbedingungen, durchgeführt.

Für das erste Modell wird die vertikale Verschiebung nach dem Aufbringen einer vertikalen Spannung auf das Stahlrohr dargestellt und die Scherspannung zwischen dem Stahlrohr und dem Dämmmaterial entlang eines zentralen vertikalen Pfades durch die Dämmschicht ausgewertet und mit EN-Werten verglichen. Für das Einzelrohr zeigen die Ergebnisse, dass lokal die Beanspruchung etwas (ca. 15 %) größer als der in der Auswertung angenommene Mittelwert ist.

Das gleiche Verfahren wird für das zweite Modell übernommen. Für Doppelrohre ist die Auswertung nach Gleichung (6-1) noch ungünstiger, sodass für den gleichen Schaum beim Test an Doppelrohren geringere Festigkeiten ermittelt werden würden.

7. Zusammenfassung (AP1.1 bis AP1.3)

Die Aufgabe des IGtH im Rahmen dieses Projektes bestand darin die Temperaturfelder sowie die Spannungszustände für ein Doppelrohr zu untersuchen. Die Untersuchungen können in drei Arbeitspakete (AP) unterteilt werden. Es werden Untersuchungen zur Wärmeverteilung am Doppelrohrmantel (AP1.1), zum radialen Bettungsverhalten von Doppelrohren (AP1.2) und zur Schubspannungsverteilung im Doppelrohr (AP1.3) durchgeführt. Abschließend sollen die wichtigsten Erkenntnisse der drei Teilbereiche noch einmal zusammengetragen werden.

Im ersten Arbeitspaket (**AP1.1: Wärmeverteilung am Doppelrohrmantel**) wird ein Doppelrohr ohne Bettung in einer Klimakammer untersucht. Es werden vom FFI Versuche in der Klimakammer durchgeführt und diese daraufhin numerisch simuliert. Es findet somit eine Kalibrierung anhand realer Versuche statt. Dieses Modell dient als Basismodell für die Berechnungen im zweiten Teil des Arbeitspaketes, dem gebetteten Rohr. Desweiteren wird die Mitteltemperatur am Rohrmantel untersucht und daraus ein vereinfachter Berechnungsansatz entwickelt (siehe folgend noch einmal die Gleichung (4-7) aus Kapitel 4.3.5).

$$\vartheta_{4,m} = \frac{(\vartheta_{\text{Scheitel}} + 2\vartheta_{\text{Kämpfer}} + \vartheta_{\text{Sohle}})}{4}$$

Dabei gehen lediglich die Temperaturen an der Sohle, dem Kämpfer und dem Scheitel ein. Dieser Ansatz dient der einfacheren messtechnischen Erfassung der Mitteltemperatur am Rohrmantel.

Der zweite Teil des Arbeitspaketes untersucht die gebetteten Rohre. Dabei wird auch dieses Modell mit Technikumsversuchen des FFI kalibriert. Es werden danach Doppel- und Einzelrohre gegenübergestellt und verschiedene Einflussparameter untersucht. Die Überdeckungshöhe hat dabei nur einen geringen Einfluss auf den Wärmeverlust der Rohre. Dahingegen sind die Temperatureinflüsse aus Vorlauf-, Rücklauf- und Umgebungstemperatur an der GOK deutlich erheblicher und es kann ein direkter Zusammenhang herausgearbeitet werden.

Betriebstemperatur:	$\Delta\vartheta_{\text{VL/RL}} = \pm 10 \text{ K}$	$\rightarrow$	$\Delta\Phi \text{L}^{-1} = \pm 8,3 \text{ \%}$;
Umgebungstemperatur:	$\Delta\vartheta_{\text{GOK}} = \pm 10 \text{ K}$	$\rightarrow$	$\Delta\Phi \text{L}^{-1} = \pm 13 \text{ \%}$

Die Wärmeleitfähigkeit sowie die Rohrdimension zeigen ebenfalls einen starken Einfluss auf die Wärmeverluste, wohingegen dort kein eindeutiger Zusammenhang quantifiziert werden kann und weitere Untersuchungen dazu notwendig sind. Es ist allerdings festzustellen, dass die Empfindlichkeit bezüglich Änderungen des Wärmeverlustes mit Verringerung der Wärmeleitfähigkeit zunimmt. Außerdem sind für kleinere

Rohrdimensionen, welche insgesamt einen größeren Wärmeverlust pro Durchflussfläche des Mediumrohres aufweisen, größere Streuungen der Ergebnisse zu verzeichnen. Insgesamt werden für die untersuchten Extremwerte maximale Abweichungen vom Referenzmodell von 40 % festgestellt. Für die Doppelrohrsysteme ist ein deutlich geringerer Wärmeverlust (bis 38 %) gegenüber den Einzelrohrsystemen zu verzeichnen. Die Systeme zeigen außerdem gegenüber den analytischen Berechnungen jeweils einen um 15 % (ER) bzw. 20 % (DR) reduzierten Wärmeverlust. Dies zeigt, dass die analytischen Berechnungsansätze den Wärmeverlust, auf der sicheren Seite liegend, höher berechnen als der reale Wert zu erwarten ist.

Zusammenfassend ist zu erkennen, dass die **radialen Bettungsspannungen (AP1.2)** des Einzelrohrsystems im Vergleich des Doppel- und Einzelrohrsystems in jeder Berechnungsreihe einen höheren Wert aufzeigen. Dies lässt sich abschließend anhand der unterschiedlichen Temperaturverteilungen der Rohrsysteme erklären. Aus den numerischen Untersuchungen geht hervor, dass die Mantelrohrtemperaturzunahme einer Fernwärmeleitung die Verschiebungen des Rohres und damit einhergehend die Bettungsspannungen in der Kontaktfuge beeinflussen.

Die Parameterstudie wird mit dem Ziel durchgeführt, die maßgebenden Einflussgrößen auf die radialen Bettungsspannungen infolge temperaturbedingter radialer Aufweitung von Fernwärmeleitungen als Doppelrohrsystem zu bestimmen. Es wird deutlich, dass die Größe der mittleren radialen Bettungsspannung eines Doppelrohrsystems sowohl von der Lagerungsdichte, der Überdeckungshöhe als auch von der Wichte des umgebenden Bodens stark beeinflusst wird. Die Poissonzahl, Wärmeleitfähigkeit des Bodens und die Mediumtemperatur haben einen vernachlässigbar kleinen Einfluss auf die Verteilung der Bettungsspannung eines Doppelrohrsystems. Die Untersuchung der mittleren radialen Bettungsspannung in Abhängigkeit der Rohrdimensionen ergab, dass diese keinen signifikanten Einfluss auf die Spannungsverteilung haben.

Bei Betrachtung der mittleren radialen Bettungsreaktionsspannungen bezogen auf das Referenzmodell lässt sich erkennen, dass für die durch radiale Aufweitung des Rohres verursachten radialen Bettungsreaktionsspannungen andere Parameter einen signifikanten Einfluss auf die Größe haben, als bei der Betrachtung der totalen mittleren radialen Bettungsspannung. Der Grund für die unterschiedlichen maßgebenden Parameter besteht darin, dass die oben genannten Einflussparameter überwiegend die Bettungsspannungen im Primärspannungszustand beeinflussen. Die Berechnungsergebnisse der Bettungsreaktionsspannung in Abhängigkeit des Reibungswinkels, des Elastizitätsmoduls und der Lagerungsdichte des umgebenden Bodens zeigen dabei die maßgebenden Änderungen in Bezug auf das Referenzmodell auf. Keinen signifikanten Einfluss auf die Reaktionsspannungen hat die Poissonzahl des Bodens.

Die Ergebnisse der resultierenden Reibungskraft am Doppelrohr werden den am Einzelrohr wirkenden Kräften gegenübergestellt. Es zeigte sich, dass die mobilisierbare Reibungskraft an einem Doppelrohrsystem rund 50 % größer als an einem Einzelrohrsystem ist.

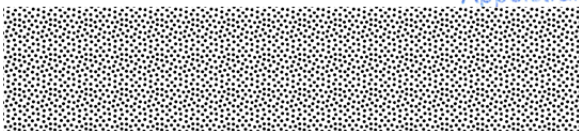
Um eine quantitative Zuverlässigkeit der Berechnungsergebnisse zu geben, empfiehlt es sich experimentelle Untersuchungen für einen Vergleich mit den Berechnungsergebnissen durchzuführen.

Die numerischen Untersuchungen der **Schubspannungsverteilung am Doppelrohr (AP1.3)** werden für ein Einzel- sowie ein Doppelrohr unter denselben Belastungsbedingungen, vertikale Axialbelastung eines Mediumrohres, durchgeführt.

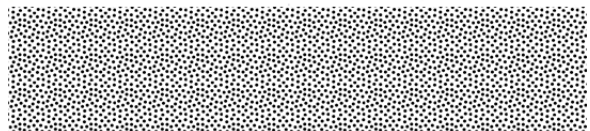
Für das Einzelrohr wird im numerischen Modell die Scherspannung zwischen dem Stahlrohr und dem Dämmmaterial entlang eines zentralen vertikalen Pfades durch die Dämmschicht ausgewertet und mit EN-Werten verglichen. Dabei liegen die Ergebnisse der Simulation lokal ca. 15 %) höher als der in der Auswertung angenommene Mittelwert.

Wird für das Doppelrohr ebenso verfahren, so ist die Auswertung nach Gleichung (2-1) gegenüber den Ergebnissen aus der Simulation noch ungünstiger, sodass für den gleichen Schaum beim Test an Doppelrohren geringere Festigkeiten ermittelt werden würden.

11
6.2
12.4.4
Leibniz
Universität
Hannover
Institut für Geotechnik (IGtH)
Prof. Dr.-Ing. M. Achmus
Appelstraße 9A • D-30167 Hannover



(Univ.-Prof. Dr.-Ing. M. Achmus)



(Dipl.-Ing. M. Narten)

8. Literaturverzeichnis

- [1] ACHMUS, M.: Zur Berechnung der Beanspruchungen und Verschiebungen erdverlegter Fernwärmeleitungen. Mitteilungen des Instituts für Grundbau, Bodenmechanik und Energiewasserbau, Leibniz Universität Hannover, Heft 41, 1995
- [2] AGFW (ARBEITSGEMEINSCHAFT FÜR WÄRME UND HEIZKRAFTWIRTSCHAFT E.V.): Verlegung und Statik von Kunststoffmantelrohren (KMR) für Fernwärmenetze - Systembeschreibung (AGFW-Regelwerk Arbeitsblatt FW 401 - Teil 2), Frankfurt am Main: AGFW, 2017
- [3] ATV-DVWK (DEUTSCHE VEREINIGUNG FÜR WASSERWIRTSCHAFT, ABWASSER UND ABFALL): Statische Berechnung von Abwasserkanälen und -leitungen (3. Ausg.), Hennef: GFA-Gesellschaft zur Förderung der Abwassertechnik e. V., 2000
- [4] BRINKGREVE, KUMARSWAMY, SWOLFS & FORIA: PLAXIS 2D 2018, Reference Manual, Netherlands: Plaxis bv., 2018
- [5] DACHROTH, W.: Handbuch der Baugeologie und Gentechnik, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2017
- [6] DGGT (DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR GEOTECHNIK E.V.): Empfehlungen des Arbeitskreises "Baugruben" EAB (5. ergänzte und erweiterte Auflage Ausg.), Berlin: Ernst & Sohn, 2012
- [7] EN 253:2013-05: Fernwärmerohre - Werkmäßig gedämmte Verbundmantelrohrsysteme für direkt erdverlegte Fernwärmenetze - Verbund-Rohrsystem, bestehend aus Stahl-Mediumrohr, Polyurethan-Wärmedämmung und Außenmantel aus Polyethylen, Deutsche Fassung EN 253:2009+A1:2013, Beuth Verlag (Hrsg.), Berlin
- [8] EN 12667:2001-05: Wärmetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten - Bestimmung des Wärmedurchlasswiderstandes nach dem Verfahren mit dem Plattengerät und dem Wärmestrommessplatten-Gerät - Produkte mit hohem und mittlerem Wärmedurchlasswiderstand, Deutsche Fassung EN 12667:2001, Beuth Verlag (Hrsg.), Berlin
- [9] EN 15632:2015-03: Fernwärmerohre - Werkmäßig gedämmte flexible Rohrsysteme Teil 1 - Klassifikation, allgemeine Anforderungen und Prüfungen, Deutsche Fassung EN 15632-1:2009+A1:2014, Beuth Verlag (Hrsg.), Berlin
- [10] EN 15698:2009-07: Werkmäßig gedämmte Verbundmanteldoppelrohre für direkt erdverlegte Fernwärmenetze Teil 1 - Verbund-Doppelrohrsystem bestehend aus zwei Stahl-Mediumrohren, Polyurethan-Wärmedämmung und einem Außenmantel, Deutsche und Englische Fassung EN 15698:2009, Beuth Verlag (Hrsg.), Berlin

- [11] EN ISO 8497:1996-09: Wärmeschutz - Bestimmung der Wärmetransporteigenschaften im stationären Zustand von Wärmedämmungen für Rohrleitungen (ISO 8497:1994); Deutsche Fassung EN ISO 8497:1996, Beuth Verlag (Hrsg.), Berlin
- [12] FGSV (FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRAßEN- UND VERKEHRSWESEN, ARBEITSGRUPPE ERD- UND GRUNDBAU): Zusätzliche technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau - ZTVE-StB 94/97, Köln: FGSV, 2007
- [13] KRAFT, S.: „Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit von werkmäßig gedämmten Doppelrohren“ 3R Fachzeitschrift für sichere und effiziente Rohrleitungssysteme, 09/2018, S. 82-86
- [14] SALVETER, G.: Validierung numerischer Verfahren zur Berechnung des Interaktionsverhaltens Fernwärmeleitung & Baugrund, Institut für Geotechnik, Leibniz Universität Hannover, Heft 52, 2000
- [15] SCHUCHARDT, Georg K.: Bestimmung der Wärmeverluste werkmäßig gedämmter Verbundmantelrohre; in: EuroHeat & Power, Heft 12/2017, S. 15-18
- [16] SCHWEIZER-FN:
https://www.schweizer-fn.de/waerme/waermeleitung/waermeleitung.php#ws_wand, 02.05.2018
- [17] SIMULIA, User's Manual, Abaqus2017, Providence, RI, USA, 2018
- [18] WITT, K. J. (Hrsg.): Grundbau-Taschenbuch: Teil 1 -Geotechnische Grundlagen, 7. Aufl., Berlin: Ernst & Sohn, 2010

Anlage

Anlage 1:

KMR – DN100

Q-Abweichungen in % FFI bezogen auf FEM → 0,6 bis 15,6 %

ϕL^{-1} [W/m]	FFI 1	FFI 2	FFI 3	FFI 4	FEM	Abweichung in %			
T_{VL}	4515	4516	4530	4531		4515	4516	4530	4531
70	11,24	11,35	12,17	11,69	11,42	1,620	0,635	6,145	-2,292
80	13,92	14,12	14,46	15,21	13,85	-0,486	1,896	4,202	-8,926
85									
90	16,83	17,33	17,57	18,21	16,28	-3,253	6,044	7,327	10,584

Temp-Abweichungen $\Delta T = T_{FFI} - T_{FEM} \rightarrow 0,19$ bis $2,18$ K

	4515	4516	4530	4531
FFI-FEM				
70	0,53	0,58	1,11	1,34
	0,72	0,67	0,94	1,27
	1,00	0,96	1,06	1,10
	0,50	0,63	0,76	0,38
	-0,63	-0,31	-0,90	-0,61
80	0,55	0,89	2,03	1,27
	0,70	1,09	1,69	1,31
	1,03	1,45	1,77	1,22
	0,48	1,00	1,37	0,46
	-0,86	-0,19	-0,68	-0,70
90	0,78	0,97	2,18	1,82
	0,91	1,15	1,76	1,76
	1,28	1,58	1,85	1,58
	0,67	1,13	1,44	0,65
	-0,88	-0,22	-0,97	-0,72
Max	1,28	1,58	2,18	1,82
Min	-0,88	-0,31	-0,97	-0,72

KMR - DN50

Q-Abweichungen in % FFI bezogen auf FEM → 0,6 bis 15,6 %

ϕL^{-1} [W/m]	FFI 1	FFI 2	FFI 3	FFI 4	FEM	ΔQ	ΔQ	ΔQ	Abweichun g in %
T_{VL}	4509	4510	4524	4525					4509 4510 4524 4525
70	8,11	8,00	9,33	8,99	8,31	0,2	-	1,0	2,500 3,910 10,90 3 -7,533
80	10,0	9,88	11,5	11,1	10,0	0,0	-	1,5	0,600 1,822 13,20 1 -9,937
85					10,9				
90	12,2	12,2	14,0	13,6	11,8	0,4	12,2	2,1	-3,568 3,173 - 15,62 13,20 2 4

Temp-Abweichungen $\Delta T = T_{FFI} - T_{FEM} \rightarrow 0,00$ bis 2,14 K

	4509	4510	4524	4525
FFI-FEM				
70	1,34	1,24	1,64	1,98
	1,14	1,24	1,44	1,61
	1,34	1,34	1,34	1,64
	1,00	1,10	0,90	1,03
	0,30	0,50	0,40	0,07
80	1,42	0,82	2,02	2,14
	1,36	0,86	1,66	1,68
	1,51	1,01	1,61	1,74
	1,11	0,71	1,01	1,02
	0,20	0,00	0,40	-0,12
90	1,51	1,11	2,11	1,96
	1,47	1,17	1,77	1,43
	1,72	1,38	1,78	1,53
	1,21	1,01	1,11	0,74
	0,20	0,30	0,40	-0,62
Max	1,72	1,38	2,11	2,14
Min	0,20	0,00	0,40	-0,62

KMR – DN20

Q-Abweichungen in % FFI bezogen auf FEM → 1,4 bis 16,3 %

ϕL^{-1} [W/m]	FFI 1	FFI 2	FFI 3	FFI 4	FEM	Abweichung in %			
T_{VL}	4506	4507	4521	4522		4506	4507	4521	4522
70	5,71	5,58	6,07	6,16	5,50	-3,616	1,370	-9,332	10,657
80	7,00	6,95	7,69	7,74	6,69	-4,470	3,783	13,042	13,603
85					7,28				
90	8,44	8,45	9,20	9,40	7,87	-6,746	6,856	14,449	16,270

Temp-Abweichungen $\Delta T = T_{FFI} - T_{FEM} \rightarrow 0,06$ bis 2,58 K

	4506	4507	4521	4522
FFI-FEM				
70	0,32	1,71	1,75	1,86
	0,51	0,96	1,76	1,68
	0,41	0,91	1,84	1,50
	0,06	0,62	1,35	0,86
	0,30	-0,07	0,52	0,09
80	0,77	2,07	1,74	1,85
	0,99	1,13	1,75	1,62
	0,86	1,03	1,88	1,39
	0,43	0,73	1,31	0,64
	0,72	-0,06	0,31	-0,27
90	0,79	2,03	2,47	2,04
	1,05	0,94	2,46	1,77
	0,87	0,84	2,58	1,50
	0,38	0,48	1,89	0,65
	0,78	-0,45	0,70	-0,41
Max	1,05	2,07	2,58	2,04
Min	0,06	-0,45	0,31	-0,41

PMR63

Q-Abweichungen in % FFI bezogen auf FEM → 10,2 bis 15,0 %

ϕL^{-1} [W/m]	FFI 1 FFI 2		FEM ΔQ		Abweichung in %	
T_{VL}	4541	4542			4541	4542
60	7,33	7,29	6,55	0,78 0,74	-10,689	10,198
70	9,64	9,54	8,32	1,32 1,22	-13,736	12,832
80	11,87	11,29	10,09	1,78 1,20	-15,036	10,671

Temp-Abweichungen $\Delta T = T_{FFI} - T_{FEM} \rightarrow 0,06$ bis $1,96$ K

	4541	4542
60	1,23	1,29
	0,91	0,90
	1,19	1,03
	1,09	1,13
	0,06	-0,22
70	1,44	1,66
	1,10	1,23
	1,52	1,44
	1,42	1,59
	0,10	-0,15
80	1,57	1,96
	1,15	1,47
	1,63	1,73
	1,46	1,91
	-0,18	-0,19
Max	1,63	1,96
Min	-0,18	-0,22

PMR25

Q-Abweichungen in % FFI bezogen auf FEM → 9,7 bis 17,0 %

ϕL^{-1} [W/m]	FFI 1	FFI 2	FEM	Abweichungen in %	
T_{VL}	4533	4534		4533	4534
60	5,23	5,38	4,72	-9,688	-12,206
70	6,90	7,04	6,00	13,045	-14,775
80	8,58	8,77	7,28	15,193	-17,030

Temp-Abweichungen $\Delta T = T_{FFI} - T_{FEM} \rightarrow 0,29$ bis $2,74$ K

	4533	4534
60	2,27	2,31
	2,28	2,26
	2,28	2,23
	1,82	2,22
	0,76	1,00
70	2,74	2,26
	2,74	2,19
	2,74	2,12
	2,18	2,11
	0,83	0,54
80	2,65	2,54
	2,63	2,42
	2,60	2,34
	1,94	2,30
	0,29	0,39
Max	2,74	2,54
Min	0,29	0,39

Mehrschichtflexrohr

Q-Abweichungen in % FFI bezogen auf FEM → 0,5 bis 4,1 %

ϕL^{-1} [W/m]	FFI 1	FFI 2	FEM	ΔQ	ΔQ	ΔQ	Abweichung in %	
T_{VL}	4562	4563					4562	4563
60	4,04	4,09	4,12	0,08	-1,14	-	2,000	0,753
70	5,35	5,21	5,23	0,12	-1,14	-	2,159	0,471
80	6,62	6,55	6,35			-	4,105	3,080
90			7,46					

Temp-Abweichungen $\Delta T = T_{FFI} - T_{FEM} \rightarrow 0,16$ bis $2,25$ K

	4562	4563
60	1,87	0,74
	1,90	0,76
	1,73	0,67
	0,88	-0,37
	0,28	-0,86
70	2,15	0,73
	2,17	0,74
	1,96	0,60
	0,91	-0,71
	0,16	-1,33
80	2,24	1,04
	2,25	1,03
	1,99	0,86
	0,73	-0,72
	-0,18	-1,45
	2,25	1,04
	-0,18	-1,45

Wellrohrflexrohr

Q-Abweichungen in % FFI bezogen auf FEM → 0,9 bis 7,0 %

ϕL^{-1} [W/m]	FFI 1	FFI 2	FEM	ΔQ	ΔQ	ΔQ	Abweichung in %
T_{VL}	4710	4711					4710 4711
60	5,01	4,59	4,83	0,18	-1,54		-3,630 5,188
70	6,57	6,03	6,13	0,44	-1,41		-6,651 1,709
80	8,00	7,37	7,44				-7,026 0,922

Temp-Abweichungen $\Delta T = T_{FFI} - T_{FEM} \rightarrow 0,05$ bis 2,83 K

	4710	4711
60	1,11	1,70
	1,00	1,13
	0,86	0,85
	0,11	0,15
	-1,30	-1,41
70	1,42	1,92
	1,28	1,14
	1,09	0,77
	0,16	-0,05
	-1,62	-2,05
80	1,74	2,02
	1,56	1,06
	1,31	0,61
	0,18	-0,37
	-1,98	-2,83
	1,74	2,02
	-1,98	-2,83

Kupferflexrohr

Q-Abweichungen in % FFI bezogen auf FEM → 0,4 bis 6,1 %

ϕL^{-1} [W/m]	FFI 1	FFI 2	FEM	ΔQ	ΔQ	ΔQ	Abweichung in %
T_{VL}	4556	4558					4556 4558
60	4,30	4,42	4,56	-0,26	-1,38		6,100 3,220
70	5,63	5,72	5,80	-0,17	-1,31		2,937 1,318
80	7,00	7,18	7,03				0,406 2,111
90			8,26				-

Temp-Abweichungen $\Delta T = T_{FFI} - T_{FEM} \rightarrow 0,01$ bis 1,99 K

	4556	4558
60	-0,08	0,96
	0,24	1,35
	0,61	1,43
	0,05	0,63
	-1,08	-0,56
70	-0,21	0,67
	0,18	1,15
	0,64	1,23
	-0,05	0,23
	-1,47	-1,28
80	-0,48	0,37
	-0,01	0,93
	0,55	1,03
	-0,26	-0,17
	-1,94	-1,99
	0,64	1,43
	-1,94	-1,99

DN50 1-fach, 2-fach & 3-fach verstärkt

ϕL^{-1} [W/m]	KMR DN50 Stand.	KMR 1fach	KMR 2fach	KMR 3fach
T_{VL}				
70	8,31	6,39	5,48	4,82
80	10,06	7,75	6,64	5,84
90	11,81	9,10	7,81	6,87

		FEM DN50			
		Stand.	FFI 1fach	FFI 2fach	FFI 3fach
		◇	Δ	□	○
Tumgebung -					
->		22,5	23	23	23
70		DN50 St. 70	DN50 1fach	DN50 2fach	DN50 3fach
		70	70	70	70
	0	24,5	24,2	23,9	23,7
	45	23,9	24,0	23,8	23,6
	90	24,1	24,2	23,9	23,7
	135	25,8	25,0	24,4	24,0
	180	28,2	25,8	24,8	24,2
80		DN50 St. 80	DN50 1fach	DN50 2fach	DN50 3fach
		80	80	80	80
	0	24,9	24,5	24,1	23,8
	45	24,1	24,2	24,0	23,8
	90	24,4	24,4	24,1	23,9
	135	26,5	25,4	24,7	24,2
	180	29,4	26,4	25,2	24,5
90		DN50 St. 90	DN50 1fach	DN50 2fach	DN50 3fach
		90	90	90	90
	0	25,3	24,8	24,3	24,0
	45	24,4	24,5	24,2	23,9
	90	24,7	24,7	24,3	24,0
	135	27,2	25,8	25,0	24,4
	180	30,6	27,0	25,6	24,7

Gesamtübersicht Wärmeverlust

Rohrtyp	Dimen- sion	Temp. VL	Wärme- verlust FEM	Wärme- verlust FFI1	Wärme- verlust FFI2	Wärme- verlust FFI3	Wärme- verlust FFI4
		$\vartheta_{1,F,set}$ [°C]	$\phi_{FEM}L^{-1}$ [W/m]	$\phi_{FFI1}L^{-1}$ [W/m]	$\phi_{FFI2}L^{-1}$ [W/m]	$\phi_{FFI3}L^{-1}$ [W/m]	$\phi_{FFI4}L^{-1}$ [W/m]
KMR	DN100	70	11,42	11,24	11,35	12,17	11,69
		80	13,85	13,92	14,12	14,46	15,21
		90	16,28	16,83	17,33	17,57	18,21
	DN50	70	8,31	8,11	8,00	9,33	8,99
		80	10,06	10,00	9,88	11,59	11,17
		90	11,81	12,25	12,20	14,00	13,61
	DN20	70	5,50	5,71	5,58	6,07	6,16
		80	6,69	7,00	6,95	7,69	7,74
		90	7,87	8,44	8,45	9,20	9,40
PMR	63	60	6,55	7,33	7,29		
		70	8,32	9,64	9,54		
		80	10,09	11,87	11,29		
	25	60	4,72	5,23	5,38		
		70	6,00	6,90	7,04		
		80	7,28	8,58	8,77		
Mehrschicht- flexrohr	26	60	4,12	4,04	4,09		
		70	5,23	5,35	5,21		
		80	6,35	6,62	6,55		
Wellrohr- flexrohr	30	60	4,83	5,01	4,59		
		70	6,13	6,57	6,03		
		80	7,44	8,00	7,37		
Kupfer- flexrohr	28	60	4,56	4,30	4,42		
		70	5,80	5,63	5,72		
		80	7,03	7,00	7,18		
KMR DN50	1-fach verst.	70	6,39				
		80	7,75				
		90	9,10				
	2-fach verst.	70	5,48				
		80	6,64				
		90	7,81				
	3-fach verst.	70	4,82				
		80	5,84				
		90	6,87				
			4,12	4,04	4,09	6,07	6,16
			16,28	16,83	17,33	17,57	18,21

Gesamtübersicht bezogener Wärmeverlust

Rohrtyp	Dimen- sion	Temp. VL	bezogene Wärmeverlust FEM auf FFI						
		$\vartheta_{1,F,set}$	$\frac{\phi_{FFI1}L^{-1}}{\phi_{FEM}L^{-1}}$	$\frac{\phi_{FFI1}L^{-1}}{\phi_{FEM}L^{-1}}$	$\frac{\phi_{FFI1}L^{-1}}{\phi_{FEM}L^{-1}}$	$\frac{\phi_{FFI1}L^{-1}}{\phi_{FEM}L^{-1}}$	MIN	MAX	MIN absolut
		[°C]	[%]	[%]	[%]	[%]			
KMR	DN100	70	1,60	0,62	-6,16	-2,31	-10,60	1,60	0,50
		80	-0,50	-1,91	-4,22	-8,94			
		90	-3,27	-6,06	-7,34	-10,60			
	DN50	70	2,47	3,88	-10,93	-7,56	-15,64	3,88	0,60
		80	0,60	1,82	-13,20	-9,94			
		90	-3,59	-3,20	-15,64	-13,23			
	DN20	70	-3,68	-1,43	-9,39	-10,71	-16,28	-1,43	1,43
		80	-4,43	-3,74	-13,00	-13,57			
		90	-6,75	-6,86	-14,46	-16,28			
PMR	63	60	-10,64	-10,15			-15,00	-10,15	10,15
		70	-13,69	-12,79					
		80	-15,00	-10,63					
	25	60	-9,75	-12,27			-16,99	-9,75	9,75
		70	-13,04	-14,77					
		80	-15,15	-16,99					
Mehrschicht- flexrohr	26	60	1,98	0,73			-4,08	1,98	0,38
		70	-2,24	0,38					
		80	-4,08	-3,05					
Wellrohr- flexrohr	30	60	-3,59	5,23			-7,00	5,23	0,95
		70	-6,70	1,66					
		80	-7,00	0,95					
Kupfer- flexrohr	28	60	6,05	3,17			-2,09	6,05	0,43
		70	3,02	1,40					
		80	0,43	-2,09					
KMR DN50	1-fach	70							
		80							
		90							
	2-fach	70							
		80							
		90							
	3-fach	70							
		80							
		90							
			-15,15	-16,99	-15,64	-16,28	-16,99	-10,15	0,38
			6,05	5,23	-4,22	-2,31	-2,09	6,05	10,15

Anlage 2:

Überdeckungshöhe

ϕL^{-1} [W/m]	DN50 Doppelrohr FEM	Abweichung [°C]	Abweichung [%]	Bezogene Überdeckungs- höhe
Überdeckungshöhe h [cm]	[W/m]			[1]
60	14,53	0,18	1,22	0,75
80	14,36	0,00	0,00	1,00
100	14,23	-0,13	-0,90	1,25
120	14,13	-0,23	-1,60	1,50

Überdeckungshöhe in cm -->	60	80	100	120
ϑ Boden -->	10	10	10	10
Position am Rohrmantel [°]				
Temperatur am Rohrmantel [°C]				
0	18,16	18,87	19,39	19,78
45	17,74	18,43	18,94	19,32
90	18,15	18,77	19,24	19,60
135	19,87	20,45	20,84	21,18
180	21,57	22,07	22,45	22,75
ϑ_M [°C] 1:2:1	19,01	19,62	20,08	20,43
ϑ_M [°C] Mittelwert	19,10	19,72	20,17	20,53
Abweichung in °C				
0	-0,72	0,00	0,52	0,91
45	-0,69	0,00	0,51	0,89
90	-0,62	0,00	0,47	0,82
135	-0,59	0,00	0,38	0,73
180	-0,50	0,00	0,38	0,68
Abweichung [°C] 1:2:1	-0,61	0,00	0,46	0,81
Abweichung [°C] Mittelwert	-0,62	0,00	0,45	0,81
Abweichung in %				
0	-3,79	0,0	2,73	4,83
45	-3,75	0,00	2,76	4,83
90	-3,29	0,00	2,49	4,39
135	-2,86	0,00	1,87	3,55
180	-2,29	0,00	1,73	3,08
Abweichung[%] 1:2:1	-3,16	0,00	2,36	4,17
Abweichung [%] Mittelwert	-3,20	0,00	2,32	4,13

Betriebstemperatur - RL-Variation

ϕL^{-1} [W/m]

Betriebstemperatur	85 - 35	85 - 45	85 - 55
VL	85	85	85
RL	35	45	55
FEM [W/m]	11,95	13,16	14,36
Abweichung [W/m]	-2,40	-1,20	0,00
Abweichung [%]	-16,75	-8,37	0,00
Tempdifferenz [1]	-20	-10	0
	Basismodell		Basismodell

Betriebstemperatur	85 - 35	85 - 45	85 - 55
ϑ Boden -->	10	10	10
Position am Rohrmantel [°]			
Temperatur am Rohrmantel [°C]			
0	16,33	17,60	18,87
45	16,36	17,39	18,43
90	17,34	18,06	18,77
135	19,44	19,95	20,45
180	21,20	21,63	22,07
ϑ_M [°C] 1:2:1	18,05	18,84	19,62
ϑ_M [°C] Mittelwert	18,13	18,93	19,72
Abweichung in °C			
0	-2,54	-1,27	0,00
45	-2,07	-1,03	0,00
90	-1,43	-0,72	0,00
135	-1,02	-0,51	0,00
180	-0,87	-0,44	0,00
Abweichung [°C] 1:2:1	-1,57	-0,78	0,00
Abweichung [°C] Mittelwert	-1,59	-0,79	0,00
Abweichung in %			
0	-13,46	-6,73	0,0
45	-11,21	-5,60	0,00
90	-7,63	-3,82	0,00
135	-4,97	-2,49	0,00
180	-3,94	-1,97	0,00
Abweichung[%] 1:2:1	-8,17	-4,08	0,00
Abweichung [%] Mittelwert	-8,24	-4,12	0,00

Betriebstemperatur - RL-Variation

ϕL^{-1} [W/m]

Betriebstemperatur	85 - 55	65 - 55	75 - 55	95 - 55	105 - 55	115 - 55
VL	85	65	75	95	105	115
RL	55	55	55	55	55	55
FEM [W/m]	14,36	11,97	13,16	15,55	16,74	17,94
Abweichung [W/m]	0,00	-2,39	-1,19	1,19	2,39	3,58
Abweichung [%]	0,00	-16,62	-8,31	8,31	16,62	24,93
Tempdifferenz [1]	0	-20	-10	10	20	30
	Basismodell			VL variiert		

Betriebstemperatur	85 - 55	65 - 55	75 - 55	95 - 55	105 - 55	115 - 55
$\vartheta_{\text{Boden}} \rightarrow$	10	10	10	10	10	10
Position am Rohrmantel [°]						
Temperatur am Rohrmantel [°C]						
0	18,87	18,03	18,45	19,29	19,72	20,14
45	18,43	17,42	17,92	18,93	19,43	19,94
90	18,77	17,29	18,03	19,51	20,25	20,99
135	20,45	18,28	19,37	21,54	22,63	23,72
180	22,07	19,37	20,72	23,42	24,77	26,11
ϑ_M [°C] 1:2:1	19,62	18,00	18,81	20,43	21,25	22,06
ϑ_M [°C] Mittelwert	19,72	18,08	18,90	20,54	21,36	22,18
Abweichung in °C						
0	0,00	-0,84	-0,42	0,42	0,84	1,26
45	0,00	-1,01	-0,50	0,50	1,01	1,51
90	0,00	-1,48	-0,74	0,74	1,48	2,22
135	0,00	-2,18	-1,09	1,09	2,18	3,27
180	0,00	-2,70	-1,35	1,35	2,70	4,04
Abweichung [°C] 1:2:1	0,00	-1,62	-0,81	0,81	1,62	2,44
Abweichung [°C] Mittelwert	0,00	-1,64	-0,82	0,82	1,64	2,46
Abweichung in %						
0	0,0	-4,46	-2,23	2,23	4,46	6,69
45	0,00	-5,47	-2,73	2,73	5,47	8,20
90	0,00	-7,88	-3,94	3,94	7,88	11,82
135	0,00	-10,65	-5,32	5,32	10,65	15,97
180	0,00	-12,22	-6,11	6,11	12,22	18,33
Abweichung [%] 1:2:1	0,00	-8,11	-4,06	4,06	8,11	12,17
Abweichung [%] Mittelwert	0,00	-8,14	-4,07	4,07	8,14	12,20

Betriebstemperatur – Temperaturbereich

ϕL^{-1} [W/m]

Betriebstemperatur	85 - 55	65 - 35	75 - 45	95 - 65	105 - 75	115 - 85
VL	85	65	75	95	105	115
RL	55	35	45	65	75	85
FEM [W/m]	14,36	9,57	11,96	16,75	19,15	21,54
Abweichung [W/m]	0,00	-4,79	-2,40	2,40	4,79	7,19
Abweichung [%]	0,00	-33,37	-16,68	16,68	33,37	50,05
Tempdifferenz [1]	0	-20	-10	10	20	30
		VL-RL-Differenz				
Basismodell		30K				

Betriebstemperatur	85 - 55	65 - 35	75 - 45	95 - 65	105 - 75	115 - 85
$\vartheta_{\text{Boden}} \rightarrow$	10	10	10	10	10	10

Position am Rohrmantel [°]

**Temperatur am
Rohrmantel [°C]**

0	18,87	15,49	17,18	20,56	22,26	23,95
45	18,43	15,35	16,89	19,96	21,50	23,04
90	18,77	15,86	17,32	20,23	21,68	23,14
135	20,45	17,26	18,86	22,05	23,65	25,25
180	22,07	18,50	20,29	23,85	25,64	27,42

ϑ_M [°C] 1:2:1

ϑ_M [°C] Mittelwert

Abweichung in °C

0	0,00	-3,38	-1,69	1,69	3,38	5,07
45	0,00	-3,07	-1,54	1,54	3,07	4,61
90	0,00	-2,91	-1,46	1,46	2,91	4,37
135	0,00	-3,19	-1,60	1,60	3,19	4,79
180	0,00	-3,57	-1,78	1,78	3,57	5,35

Abweichung [°C] 1:2:1

Abweichung [°C] Mittelwert

Abweichung in %

0	0,0	-17,92	-8,96	8,96	17,92	26,88
45	0,00	-16,68	-8,34	8,34	16,68	25,02
90	0,00	-15,51	-7,76	7,76	15,51	23,27
135	0,00	-15,62	-7,81	7,81	15,62	23,43
180	0,00	-16,16	-8,08	8,08	16,16	24,24

Abweichung[%] 1:2:1

Abweichung [%] Mittelwert

0,00	-16,28	-8,14	8,14	16,28	24,42
0,00	-16,38	-8,19	8,19	16,38	24,57

Rohrdimension

ϕL^{-1} [W/m]	KMR Doppelrohr FEM	Abweichung [°C]	Abweichung [%]	Bezogene Rohrdimension [1]
Rohrdimension DN	[W/m]			
20	10,31	-4,05	-28,19	0,40
50	14,36	0,00	0,00	1,00
100	19,51	5,15	35,87	2,00
63	14,92	0,56	3,93	1,26

Rohrdimension DN	20	50	63	100
$\vartheta_{\text{Boden}} \rightarrow$	10	10	10	10
Position am Rohrmantel [°]				
Temperatur am Rohrmantel [°C]				
0	17,38	18,87	20,45	19,64
45	17,21	18,43	19,39	19,01
90	17,47	18,77	19,82	19,29
135	18,45	20,45	22,48	21,09
180	19,33	22,07	25,49	23,12
ϑ_M [°C] 1:2:1	17,91	19,62	21,40	20,33
ϑ_M [°C] Mittelwert	17,97	19,72	21,53	20,43
Abweichung in °C				
0	-1,49	0,00	1,58	0,77
45	-1,22	0,00	0,96	0,58
90	-1,30	0,00	1,05	0,51
135	-2,00	0,00	2,02	0,64
180	-2,74	0,00	3,42	1,05
Abweichung [°C] 1:2:1	-1,71	0,00	1,77	0,71
Abweichung [°C] Mittelwert	-1,75	0,00	1,81	0,71
Abweichung in %				
0	-7,90	0,0	8,35	4,09
45	-6,62	0,00	5,23	3,15
90	-6,94	0,00	5,60	2,74
135	-9,80	0,00	9,88	3,12
180	-12,40	0,00	15,50	4,74
Abweichung[%] 1:2:1	-8,55	0,00	8,76	3,58
Abweichung [%] Mittelwert	-8,73	0,00	8,91	3,57

Wärmeleitfähigkeit des Bodens

ϕL^{-1} [W/m]	FEM	Abweichung	Abweichung	Bezogene Wärmeleit- fähigkeit
Lambda	[W/m]	[°C]	[%]	[1]
1,3	14,91	0,55	3,85	1,30
1	14,36	0,00	0,00	1,00
0,5	12,40	-1,96	-13,66	0,50
0,3	10,54	-3,82	-26,61	0,30

Lambda	1,3	1,0	0,5	0,3
$\vartheta_{\text{Boden}} \rightarrow$	10	10	10	10
Position am Rohrmantel [°]				
Temperatur am Rohrmantel [°C]				
0	17,13	18,87	24,95	30,56
45	16,76	18,43	24,33	29,92
90	17,02	18,77	25,05	31,11
135	18,37	20,45	27,90	35,05
180	19,68	22,07	30,52	38,51
ϑ_M [°C] 1:2:1	17,71	19,62	26,39	32,82
ϑ_M [°C] Mittelwert	17,79	19,72	26,55	33,03
Abweichung in °C				
0	-1,74	0,00	6,07	11,69
45	-1,67	0,00	5,91	11,50
90	-1,75	0,00	6,28	12,34
135	-2,09	0,00	7,44	14,59
180	-2,39	0,00	8,45	16,44
Abweichung [°C] 1:2:1	-1,91	0,00	6,77	13,20
Abweichung [°C] Mittelwert	-1,93	0,00	6,83	13,31
Abweichung in %				
0	-9,21	0,0	32,18	61,95
45	-9,06	0,00	32,05	62,39
90	-9,34	0,00	33,43	65,73
135	-10,19	0,00	36,39	71,35
180	-10,82	0,00	38,28	74,48
Abweichung[%] 1:2:1	-9,68	0,00	34,33	66,97
Abweichung [%] Mittelwert	-9,73	0,00	34,47	67,18

Umgebungstemperatur im Boden

ϕL^{-1} [W/m]	DN50 Doppelrohr FEM	Abweichung	Abweichung	Temperatur-- differenz
Überdeckungshöhe h [cm]	[W/m]	[W/M]	[%]	[K]
Extremfall O-10 bis U10	18,10	3,75	26,10	-20,00
Winter O0 bis U10	16,23	1,87	13,05	-10,00
Herbst O10 bis U10	14,36	0,00	0,00	0,00
Sommer O20 bis U10	12,48	-1,87	-13,05	10,00

Überdeckungshöhe in cm -- >	Extremfall O-10 bis U10	Winter O0 bis U10	Herbst O&U10	Sommer O20 bis U10
ϑ Boden -->	10	10	10	10
Position am Rohrmantel [°] Temperatur am Rohrmantel [°C]				
0	5,02	11,95	18,87	25,80
45	4,56	11,50	18,43	25,36
90	5,39	12,08	18,77	25,46
135	7,92	14,19	20,45	26,72
180	10,07	16,07	22,07	28,07
ϑ_M [°C] 1:2:1	6,47	13,05	19,62	26,20
ϑ_M [°C] Mittelwert	6,59	13,16	19,72	26,28
Abweichung in °C				
0	-13,86	-6,93	0,00	6,93
45	-13,86	-6,93	0,00	6,93
90	-13,38	-6,69	0,00	6,69
135	-12,54	-6,27	0,00	6,27
180	-12,00	-6,00	0,00	6,00
Abweichung [°C] 1:2:1	-13,15	-6,58	0,00	6,58
Abweichung [°C] Mittelwert	-13,13	-6,56	0,00	6,56
Abweichung in %				
0	-73,41	-36,71	0,0	36,71
45	-75,23	-37,61	0,00	37,61
90	-71,27	-35,63	0,00	35,63
135	-61,29	-30,64	0,00	30,64
180	-54,37	-27,18	0,00	27,18
Abweichung[%] 1:2:1	-67,58	-33,79	0,00	33,79
Abweichung [%] Mittelwert	-67,11	-33,56	0,00	33,56

Anlage 3:

Berechnungsergebnisse Überdeckungshöhe

Doppelrohrsystem

			Überdeckungshöhe $\ddot{U}_H$ [m]			
			0,6	0,8	1,0	1,2
Bettungsspannung	σ_{rm}	[kN/m ²]	13,62	17,46	20,53	23,45
Bettungsreaktionsspannung	$\Delta\sigma_{rm}$	[kN/m ²]	5,22	6,58	7,17	7,61
Primärspannung	σ^0_{rm}	[kN/m ²]	8,40	10,88	13,36	15,89
Reibungskraft	F_R	[kN/m]	3,46	4,43	5,21	5,95

Einzelrohrsystem

Bettungsspannung	σ_{rm}	[kN/m ²]	14,96	18,64	21,80	24,91
Bettungsreaktionsspannung	$\Delta\sigma_{rm}$	[kN/m ²]	6,81	8,01	8,82	9,44
Primärspannung	σ^0_{rm}	[kN/m ²]	8,15	10,63	12,99	15,47
Reibungskraft	F_R	[kN/m]	2,37	2,96	3,46	3,95

Abweichungen DR-/ER-System

Bettungsspannung	σ_{rm}	[%]	9,0	6,3	5,8	5,8
Bettungsreaktionsspannung	$\Delta\sigma_{rm}$	[%]	23,4	17,8	18,7	19,4
Primärspannung	σ^0_{rm}	[%]	-3,1	-2,3	-2,9	-2,4
Reibungskraft	F_R	[%]	-45,7	-49,9	-50,7	-50,6

Berechnungsergebnisse Betriebstemperatur

Vorlauftemperatur

Doppelrohrsystem

			Vorlauftemperatur [°C] (RL = 55 °C)			
			65	85	105	125
Bettungsspannung	σ_{rm}	[kN/m ²]	16,70	17,46	18,16	18,76
Bettungsreaktionsspannung	$\Delta\sigma_{rm}$	[kN/m ²]	5,82	6,58	7,28	7,88
Primärspannung	σ_{rm}^0	[kN/m ²]	10,88	10,88	10,88	10,88
Reibungskraft	F_R	[kN/m]	4,24	4,43	4,61	4,76

Einzelrohrsystem

Bettungsspannung	σ_{rm}	[kN/m ²]	17,38	18,64	19,74	20,65
Bettungsreaktionsspannung	$\Delta\sigma_{rm}$	[kN/m ²]	6,75	8,01	9,11	10,02
Primärspannung	σ_{rm}^0	[kN/m ²]	10,63	10,63	10,63	10,63
Reibungskraft	F_R	[kN/m]	2,76	2,96	3,13	3,28

Abweichungen DR-/ER-System

Bettungsspannung	σ_{rm}	[%]	4,0	6,3	8,0	9,2
Bettungsreaktionsspannung	$\Delta\sigma_{rm}$	[%]	13,8	17,8	20,1	21,3
Primärspannung	σ_{rm}^0	[%]	-2,3	-2,3	-2,3	-2,3
Reibungskraft	F_R	[%]	-53,7	-49,9	-47,2	-45,4

Rücklauftemperatur

Doppelrohrsystem

			Rücklauftemperatur [°C] (VL = 85 °C)		
			35	45	55
Bettungsspannung	σ_{rm}	[kN/m ²]	16,73	17,11	17,46
Bettungsreaktionsspannung	$\Delta\sigma_{rm}$	[kN/m ²]	5,85	6,23	6,58
Primärspannung	σ_{rm}^0	[kN/m ²]	10,88	10,88	10,88
Reibungskraft	F_R	[kN/m]	4,25	4,34	4,43

Einzelrohrsystem

Bettungsspannung	σ_{rm}	[kN/m ²]	18,14	18,39	18,64
Bettungsreaktionsspannung	$\Delta\sigma_{rm}$	[kN/m ²]	7,51	7,76	8,01
Primärspannung	σ_{rm}^0	[kN/m ²]	10,63	10,63	10,63
Reibungskraft	F_R	[kN/m]	2,88	2,92	2,96

Abweichungen DR-/ER-System

Bettungsspannung	σ_{rm}	[%]	7,8	7,0	6,3
Bettungsreaktionsspannung	$\Delta\sigma_{rm}$	[%]	22,1	19,7	17,8
Primärspannung	σ_{rm}^0	[%]	-2,3	-2,3	-2,3
Reibungskraft	F_R	[%]	-47,5	-48,8	-49,9

Temperaturbereich

Doppelrohrsystem

			Temperaturbereich [°C] VL/RL		
			65/35	85/55	105/75
Bettungsspannung	σ_{rm}	[kN/m ²]	15,86	17,46	18,77
Bettungsreaktionsspannung	$\Delta\sigma_{rm}$	[kN/m ²]	4,99	6,58	7,89
Primärspannung	σ_{rm}^0	[kN/m ²]	10,88	10,88	10,88
Reibungskraft	F_R	[kN/m]	4,03	4,43	4,76

Einzelrohrsystem

Bettungsspannung	σ_{rm}	[kN/m ²]	16,86	18,64	20,20
Bettungsreaktionsspannung	$\Delta\sigma_{rm}$	[kN/m ²]	6,24	8,01	9,57
Primärspannung	σ_{rm}^0	[kN/m ²]	10,63	10,63	10,63
Reibungskraft	F_R	[kN/m]	2,68	2,96	3,21

Abweichungen DR-/ER-System

Bettungsspannung	σ_{rm}	[%]	5,9	6,3	7,1
Bettungsreaktionsspannung	$\Delta\sigma_{rm}$	[%]	20,0	17,8	17,6
Primärspannung	σ_{rm}^0	[%]	-2,3	-2,3	-2,3
Reibungskraft	F_R	[%]	-50,5	-49,9	-48,6

Berechnungsergebnisse Rohrdimension

Doppelrohrsystem

			Rohrdimension (KMR)			
			DN20	DN50	DN100	DN200
Bettungsspannung	σ_{rm}	[kN/m ²]	16,64	17,46	17,48	18,09
Bettungsreaktionsspannung	$\Delta\sigma_{rm}$	[kN/m ²]	6,31	6,58	5,98	5,25
Primärspannung	σ^0_{rm}	[kN/m ²]	10,33	10,88	11,91	12,83
Reibungskraft	F_R	[kN/m]	2,64	4,43	6,99	12,86

Einzelrohrsystem

Bettungsspannung	σ_{rm}	[kN/m ²]	17,22	18,64	18,67	18,34
Bettungsreaktionsspannung	$\Delta\sigma_{rm}$	[kN/m ²]	6,86	8,01	7,56	6,92
Primärspannung	σ^0_{rm}	[kN/m ²]	10,36	10,63	11,11	11,40
Reibungskraft	F_R	[kN/m]	1,97	2,96	4,74	7,33

Abweichungen DR-/ER-System

Bettungsspannung	σ_{rm}	[%]	3,4	6,3	6,4	1,4
Bettungsreaktionsspannung	$\Delta\sigma_{rm}$	[%]	8,0	17,8	20,9	24,0
Primärspannung	σ^0_{rm}	[%]	0,3	-2,3	-7,2	-12,5
Reibungskraft	F_R	[%]	-34,2	-49,9	-47,5	-75,3

Berechnungsergebnisse Lagerungsdichte

Doppelrohrsystem

			Erddruckbeiwert K_0 [-]			
			0,4554	0,5	0,7	0,9
Bettungsspannung	σ_{rm}	[kN/m ²]	17,46	18,27	20,73	22,31
Bettungsreaktionsspannung	$\Delta\sigma_{rm}$	[kN/m ²]	6,58	7,06	8,01	8,09
Primärspannung	σ_{rm}^0	[kN/m ²]	10,88	11,21	12,72	14,23
Reibungskraft	F_R	[kN/m]	4,43	4,64	5,26	5,66

Einzelrohrsystem

Bettungsspannung	σ_{rm}	[kN/m ²]	18,64	19,47	22,09	23,88
Bettungsreaktionsspannung	$\Delta\sigma_{rm}$	[kN/m ²]	8,01	8,52	9,70	10,03
Primärspannung	σ_{rm}^0	[kN/m ²]	10,63	10,95	12,40	13,84
Reibungskraft	F_R	[kN/m]	2,96	3,09	3,51	3,79

Abweichungen DR-/ER-System

Bettungsspannung	σ_{rm}	[%]	6,3	6,2	6,2	6,5
Bettungsreaktionsspannung	$\Delta\sigma_{rm}$	[%]	17,8	17,2	17,4	19,4
Primärspannung	σ_{rm}^0	[%]	-2,3	-2,4	-2,6	-2,8
Reibungskraft	F_R	[%]	-49,9	-50,1	-50,1	-49,5

Berechnungsergebnisse Wärmeleitfähigkeit

Doppelrohrsystem

			Wärmeleitfähigkeit λ_{Boden} [W/(mK)]			
			0,3	0,5	1,0	1,3
Bettungsspannung	σ_{rm}	[kN/m ²]	19,51	18,65	17,46	17,10
Bettungsreaktionsspannung	$\Delta\sigma_{\text{rm}}$	[kN/m ²]	8,63	7,77	6,58	6,22
Primärspannung	σ_{rm}^0	[kN/m ²]	10,88	10,88	10,88	10,88
Reibungskraft	F_{R}	[kN/m]	4,95	4,73	4,43	4,34

Einzelrohrsystem

Bettungsspannung	σ_{rm}	[kN/m ²]	21,90	20,52	18,64	18,00
Bettungsreaktionsspannung	$\Delta\sigma_{\text{rm}}$	[kN/m ²]	11,27	9,89	8,01	7,37
Primärspannung	σ_{rm}^0	[kN/m ²]	10,63	10,63	10,63	10,63
Reibungskraft	F_{R}	[kN/m]	3,47	3,26	2,96	2,86

Abweichungen DR-/ER-System

Bettungsspannung	σ_{rm}	[%]	10,9	9,1	6,3	5,0
Bettungsreaktionsspannung	$\Delta\sigma_{\text{rm}}$	[%]	23,4	21,4	17,8	15,6
Primärspannung	σ_{rm}^0	[%]	-2,3	-2,3	-2,3	-2,3
Reibungskraft	F_{R}	[%]	-42,5	-45,4	-49,9	-52,0

Berechnungsergebnisse Steifemodul

Doppelrohrsystem

			Steifemodul E_{Boden} [MN/m ²]					
			5	15	25	35	45	55
Bettungsspannung	σ_{rm}	[kN/m ²]	12,89	15,66	17,46	18,83	19,45	20,29
Bettungsreaktionsspannung	$\Delta\sigma_{\text{rm}}$	[kN/m ²]	2,01	4,78	6,58	7,95	8,57	9,42
Primärspannung	σ_{rm}^0	[kN/m ²]	10,88	10,88	10,88	10,88	10,88	10,88
Reibungskraft	F_{R}	[kN/m]	3,27	3,98	4,43	4,78	4,94	5,15

Einzelrohrsystem

Bettungsspannung	σ_{rm}	[kN/m ²]	12,95	16,31	18,64	20,45	21,88	22,87
Bettungsreaktionsspannung	$\Delta\sigma_{\text{rm}}$	[kN/m ²]	2,32	5,69	8,01	9,82	11,25	12,25
Primärspannung	σ_{rm}^0	[kN/m ²]	10,63	10,63	10,63	10,63	10,63	10,63
Reibungskraft	F_{R}	[kN/m]	2,06	2,59	2,96	3,24	3,47	3,63

Abweichungen DR-/ER-System

Bettungsspannung	σ_{rm}	[%]	0,5	4,0	6,3	7,9	11,1	11,3
Bettungsreaktionsspannung	$\Delta\sigma_{\text{rm}}$	[%]	13,4	15,8	17,8	19,0	23,8	23,1
Primärspannung	σ_{rm}^0	[%]	-2,3	-2,3	-2,3	-2,3	-2,3	-2,3
Reibungskraft	F_{R}	[%]	-59,2	-53,6	-49,9	-47,3	-42,2	-42,0

Berechnungsergebnisse Reibungswinkel

Doppelrohrsystem

			Reibungswinkel φ_{Boden} [°]				
			20	25	33	35	40
Bettungsspannung	σ_{rm}	[kN/m ²]	13,58	15,03	17,46	17,78	18,35
Bettungsreaktionsspannung	$\Delta\sigma_{\text{rm}}$	[kN/m ²]	2,44	4,15	6,58	6,91	7,47
Primärspannung	σ_{rm}^0	[kN/m ²]	11,14	10,88	10,88	10,88	10,88
Reibungskraft	F_{R}	[kN/m]	2,02	2,83	4,43	4,82	5,79

Einzelrohrsystem

Bettungsspannung	σ_{rm}	[kN/m ²]	14,21	16,08	18,64	18,99	19,66
Bettungsreaktionsspannung	$\Delta\sigma_{\text{rm}}$	[kN/m ²]	3,33	5,45	8,01	8,36	9,03
Primärspannung	σ_{rm}^0	[kN/m ²]	10,88	10,63	10,63	10,63	10,63
Reibungskraft	F_{R}	[kN/m]	1,32	1,89	2,96	3,22	3,88

Abweichungen DR-/ER-System

Bettungsspannung	σ_{rm}	[%]	4,5	6,5	6,3	6,3	6,7
Bettungsreaktionsspannung	$\Delta\sigma_{\text{rm}}$	[%]	26,8	23,8	17,8	17,4	17,3
Primärspannung	σ_{rm}^0	[%]	-2,4	-2,3	-2,3	-2,3	-2,3
Reibungskraft	F_{R}	[%]	-52,9	-49,5	-49,9	-49,9	-49,3

Berechnungsergebnisse Bodenwichte

Doppelrohrsystem

			Wichte γ_{Boden} [kN/m ³]		
			17	19	21
Bettungsspannung	σ_{rm}	[kN/m ²]	17,46	18,99	20,47
Bettungsreaktionsspannung	$\Delta\sigma_{\text{rm}}$	[kN/m ²]	6,58	6,87	7,12
Primärspannung	σ_{rm}^0	[kN/m ²]	10,88	12,11	13,35
Reibungskraft	F_{R}	[kN/m]	4,43	4,82	5,20

Einzelrohrsystem

Bettungsspannung	σ_{rm}	[kN/m ²]	18,64	20,16	21,63
Bettungsreaktionsspannung	$\Delta\sigma_{\text{rm}}$	[kN/m ²]	8,01	8,33	8,61
Primärspannung	σ_{rm}^0	[kN/m ²]	10,63	11,83	13,02
Reibungskraft	F_{R}	[kN/m]	2,96	3,20	3,43

Abweichungen DR-/ER-System

Bettungsspannung	σ_{rm}	[%]	6,3	5,8	5,4
Bettungsreaktionsspannung	$\Delta\sigma_{\text{rm}}$	[%]	17,8	17,5	17,3
Primärspannung	σ_{rm}^0	[%]	-2,3	-2,4	-2,5
Reibungskraft	F_{R}	[%]	-49,9	-50,7	-51,4

Berechnungsergebnisse Poissonzahl

Doppelrohrsystem

			Poissonzahl ν_{Boden} [-]		
			0,25	0,35	0,45
Bettungsspannung	σ_{rm}	[kN/m ²]	17,61	17,46	17,33
Bettungsreaktionsspannung	$\Delta\sigma_{\text{rm}}$	[kN/m ²]	6,73	6,58	6,45
Primärspannung	σ_{rm}^0	[kN/m ²]	10,88	10,88	10,88
Reibungskraft	F_{R}	[kN/m]	4,47	4,43	4,40

Einzelrohrsystem

Bettungsspannung	σ_{rm}	[kN/m ²]	18,86	18,64	18,46
Bettungsreaktionsspannung	$\Delta\sigma_{\text{rm}}$	[kN/m ²]	8,23	8,01	7,83
Primärspannung	σ_{rm}^0	[kN/m ²]	10,63	10,63	10,63
Reibungskraft	F_{R}	[kN/m]	2,99	2,96	2,93

Abweichungen DR-/ER-System

Bettungsspannung	σ_{rm}	[%]	6,6	6,3	6,1
Bettungsreaktionsspannung	$\Delta\sigma_{\text{rm}}$	[%]	18,2	17,8	17,6
Primärspannung	σ_{rm}^0	[%]	-2,3	-2,3	-2,3
Reibungskraft	F_{R}	[%]	-49,4	-49,9	-50,2