

Messung und Modellierung der effektiven Wärmeleitfähigkeit von Dämmstoffschüttungen für vakuumwärmegeämmte Warmwasserspeicher

Von der Fakultät Energie-, Verfahrens- und Biotechnik der Universität
Stuttgart zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von
Stephan Lang
aus Bad Boll

Hauptberichter: Apl. Prof. Dr.-Ing. Klaus Spindler
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Ulrich Nieken

Tag der mündlichen Prüfung: 22.02.2022

Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung
der Universität Stuttgart

2022

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand weitestgehend während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW) und am Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung (IGTE) der Universität Stuttgart.

Mein Dank gilt allen Personen und Institutionen, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Klaus Spindler danke ich sehr für die Betreuung dieser Arbeit, das mir entgegengebrachte Vertrauen und sein Engagement, das einen raschen und erfolgreichen Abschluss der Arbeit ermöglichte. Herrn Prof. Dr.-Ing. Ulrich Nieken danke ich für die kurzfristige Übernahme des Mitberichts und für seine wertvollen Anregungen.

Besonderer Dank gilt meinen Arbeitsgruppenleitern Dr.-Ing. Harald Drück und Dominik Bestenlehner für die gründliche Durchsicht meiner Dissertation und vor allem für die großzügig gewährten und nicht selbstverständlichen Freiheiten und Auszeiten, ohne die ich diese Arbeit nicht fristgerecht hätte fertigstellen können. Ebenso danke ich meinen vormaligen Arbeitsgruppenleitern Dr.-Ing. Dan Bauer und Dr.-Ing. Roman Marx für ihre Unterstützung und die gewährten Freiheiten bei der Erstellung dieser Arbeit sowie allen derzeitigen und ehemaligen Arbeitskollegen, die für eine sehr gute und angenehme Arbeitsatmosphäre, Spaß und guten fachlichen und persönlichen Austausch sorgten.

Allen Studenten, die ich im Rahmen ihrer studentischen Arbeiten betreuen durfte und die insbesondere beim Aufbau und diversen Überarbeitungen der Versuchsanlage und der Laborarbeit unterstützt haben, danke ich sehr herzlich für ihre Mithilfe.

Außerdem danke ich den Firmen Knauf Aquapanel und Nordisk Perlite für die kostenfreie Bereitstellung von Probenmaterial, dem Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik (IFK) der Universität Stuttgart für die Durchführung von Laserdiffraktometrie-Messungen, der Firma Netzsch für Vergleichsmessungen der effektiven Wärmeleitfähigkeit, der Firma Micromeritics für Quecksilberintrusions-Messungen, der Firma Quantachrome für Gaspyknometrie-Messungen und der Firma Bruker Optik für Versuche zu FTIR-Messungen.

Besonders herzlich danke ich meiner Familie und allen Menschen, die mich im privaten Bereich auch in schweren Zeiten unterstützt und mir Freude und Halt gegeben haben.

Stuttgart, März 2022

Stephan Lang

Kurzfassung

Das Ziel dieser Arbeit ist es, hinsichtlich Dämmwirkung und Kosten geeignete schüttfähige Wärmedämmstoffe für doppelwandige Warmwasserspeicher mit Vakuumwärmedämmung zu identifizieren und eine Vorhersage über die effektive Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit von Luftdruck und Temperatur treffen zu können. Zu diesem Zweck werden expandierte Perlite unterschiedlicher mittlerer Korngrößen und Mischungen aus expandierten Perliten und pyrogener Kieselsäure untersucht. Schwerpunkt der Untersuchungen ist die Ermittlung der effektiven Wärmeleitfähigkeit bei unterschiedlichen Luftdrücken und Temperaturen. Die effektive Wärmeleitfähigkeit wird in einer eigens entwickelten Versuchsanlage, nach einem stationären Messprinzip, bei Luftdrücken zwischen 0,001 mbar und Atmosphärendruck von (960 ± 20) mbar sowie bei Probenmitteltemperaturen zwischen -5 °C und 90 °C bestimmt. Die maximale relative Messunsicherheit der Versuchsanlage beträgt < 8 % bei den geringsten und < 3 % bei den höchsten gemessenen effektiven Wärmeleitfähigkeiten. Reine feinkörnige expandierte Perlite mit Dichten der Schüttungen ≥ 182 kg/m³ erreichen bei Luftdrücken $\leq 0,1$ mbar und allen gemessenen Probenmitteltemperaturen die geringsten effektiven Wärmeleitfähigkeiten. Bei einer Probenmitteltemperatur von 48 °C liegen diese bei $\leq 4,84$ mW/(m·K). Mischungen aus einem vergleichsweise grobkörnigen expandierten Perlit mit einer sehr feinkörnigen und feinporigen pyrogenen Kieselsäure können hingegen, bei technisch einfacher zu handhabenden Luftdrücken von > 1 mbar, z. T. geringere effektive Wärmeleitfähigkeiten erreichen als reine expandierte Perlite. Mischungen dieser Komponenten werden in dieser Arbeit erstmals in Form einer losen Schüttung bzgl. ihrer effektiven Wärmeleitfähigkeit untersucht. Bei einer Probenmitteltemperatur von 48 °C werden in diesem Luftdruckbereich effektive Wärmeleitfähigkeiten dieser Mischungen von $> 12,17$ mW/(m·K) gemessen. Anhand der gemessenen effektiven Wärmeleitfähigkeiten sowie weiterer Stoffeigenschaften, werden vollständig prädiktive analytische Modelle der effektiven Wärmeleitfähigkeit entwickelt. Das Modell für Mischungen gilt für ein ausgewähltes Stoffpaar, während das Modell für expandierte Perlite für beliebige ungemahlene expandierte Perlite verwendbar ist. Es handelt sich nach Kenntnis des Autors um das erste vollständig prädiktive analytische Modell der effektiven Wärmeleitfähigkeit für expandierte Perlite, welches auch die Kopplung von Gas- und Festkörperwärmeleitung berücksichtigt und für welches lediglich drei einfach und kostengünstig zu messende Größen bestimmt werden müssen. Diese Größen sind der volumengewichtet gemittelte Korndurchmesser, die mittlere Korndichte sowie die Dichte der Schüttung des expandierten Perlits. Aus den Messwerten der effektiven Wärmeleitfähigkeit wird ein Zusammenhang von volumengewichtet gemitteltem Korndurchmesser zur Kopplung von Gas- und Festkörperwärmeleitung deutlich, der für das Modell für expandierte Perlite verwendet wird. Mit den Modellen ist es nun möglich, ohne entsprechende Messungen, die effektive Wärmeleitfähigkeit von Mischungen aus einem expandierten Perlit und einer pyrogenen Kieselsäure sowie für beliebige ungemahlene expandierte Perlite, mit zufriedenstellender bis hoher Genauigkeit vorherzusagen.

Abstract

The objective of this work is identifying suitable thermal insulation materials for double-walled hot water stores with vacuum thermal insulation regarding effectiveness and costs and predicting their effective thermal conductivities dependent on air pressure and temperature. Therefore, perlites of different grain sizes and mixtures of expanded perlites and fumed silica are investigated. The main focus of these investigations is laid on measurements of the effective thermal conductivity at different air pressures and temperatures. These measurements are carried out in a self-made apparatus with a steady-state measuring principle at air pressures between 0.001 mbar and an atmospheric pressure of (960 ± 20) mbar as well as for mean sample temperatures between $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $90\text{ }^{\circ}\text{C}$. The maximum measuring uncertainty of the measuring apparatus is $< 8\%$ at the lowest and $< 3\%$ at the highest measured effective thermal conductivities. Pure fine-grained expanded perlites with bulk densities $\geq 182\text{ kg/m}^3$ have the lowest thermal conductivities for air pressures ≤ 0.1 mbar for all measured mean sample temperatures. At a mean sample temperature of $48\text{ }^{\circ}\text{C}$, these thermal conductivities are $\leq 4.84\text{ mW/(m}\cdot\text{K)}$. Mixtures of a comparably coarse-grained expanded perlite with very fine-grained and fine-pored fumed silica reach partially lower thermal conductivities than pure expanded perlites at air pressures > 1 mbar. In this work, effective thermal conductivities of these components in form of a loose filling are measured for the first time. At a mean sample temperature of $48\text{ }^{\circ}\text{C}$ and at air pressures > 1 mbar, these mixtures have thermal conductivities of $> 12.17\text{ mW/(m}\cdot\text{K)}$. Furthermore, completely predictive analytical models of the thermal conductivity are developed using measuring data of thermal conductivity and other material properties. Whereas the mixtures' model is only valid for one particular set of materials, the expanded perlites' model is valid for any kind of unground expanded perlites. To the best of the author's knowledge, it is the first analytical model suitable for expanded perlites, which can also predict the coupling of solid and gas thermal conductivity, with the knowledge of only three material properties, that can easily be measured. These material properties are the volume-weighted mean grain size, the mean grain density and the bulk density. The measuring data of the thermal conductivity show a correlation between the coupling of solid and gas thermal conductivity and the volume-weighted mean grain diameter of expanded perlites. This correlation is used for the predictive model. With the models developed within this work, effective thermal conductivities of mixtures from an expanded perlite and fumed silica and of pure unground expanded perlites can be calculated in satisfactory and partially high precision and accuracy, without respective measurements.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|------------|
| Vorwort | III |
| Kurzfassung | IV |
| Abstract | V |
| Nomenklatur | IX |
| 1 Einleitung und Motivation | 1 |
| 2 Grundlagen der Wärmetransportmechanismen in Dämmstoffschüttungen | 3 |
| 2.1 Gaswärmeleitung..... | 4 |
| 2.2 Festkörperwärmeleitung | 7 |
| 2.3 Kopplung von Gas- und Festkörperwärmeleitung (Kopplungseffekt)..... | 8 |
| 2.4 Wärmestrahlung..... | 9 |
| 2.5 Zusammenfassung der Auswirkungen der wichtigsten Einflussgrößen auf die Wärmetransportmechanismen..... | 10 |
| 3 Literaturübersicht | 11 |
| 3.1 Vakuumwärmedämmungen..... | 11 |
| 3.2 Vakuumwärmedämmstoffe..... | 13 |
| 3.3 Experimentelle Untersuchungen der effektiven Wärmeleitfähigkeit von Perliten, pyrogener Kieselsäure und deren Mischungen in Vakuumwärmedämmungen..... | 13 |
| 3.4 Analytische Modellierungen der effektiven Wärmeleitfähigkeit von Dämmstoffschüttungen..... | 14 |
| 3.4.1 Gesamtmodelle der effektiven Wärmeleitfähigkeit..... | 14 |
| 3.4.1 Modelle der Gaswärmeleitung..... | 16 |
| 3.4.2 Modelle der Festkörperwärmeleitung | 17 |
| 3.4.3 Modelle des Kopplungseffekts..... | 18 |
| 3.4.4 Modelle der Wärmestrahlung..... | 19 |
| 4 Zielsetzung der vorliegenden Arbeit | 21 |
| 5 Untersuchte Wärmedämmstoffe | 23 |
| 5.1 Expandierter Perlit | 23 |
| 5.1.1 Grobkörniger expandierter Perlit..... | 23 |
| 5.1.2 Expandierter Perlit mittlerer Körnung..... | 24 |
| 5.1.3 Feinkörniger expandierter Perlit..... | 25 |
| 5.1.4 Gemahlener expandierter Perlit..... | 26 |
| 5.1.5 Siebungen expandierter Perlite | 27 |
| 5.2 Pyrogene Kieselsäure..... | 27 |
| 5.2.1 Unbehandelte pyrogene Kieselsäure | 28 |

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 5.2.2 | Hydrophobierte pyrogene Kieselsäure..... | 29 |
| 5.3 | Mischungen | 30 |
| 6 | Charakterisierung der untersuchten Wärmedämmstoffe | 32 |
| 6.1 | Mittlerer Korndurchmesser expandierter Perlite..... | 32 |
| 6.2 | Reindichte und mittlere Korndichte expandierter Perlite | 34 |
| 6.3 | Anteil geschlossener Kornporen expandierter Perlite | 37 |
| 6.4 | Mittlere Kornporengröße expandierter Perlite..... | 37 |
| 6.5 | Mittlere Kornzwischenraum-Porengröße..... | 38 |
| 6.6 | Dichtespezifischer Extinktionskoeffizient und Festkörper-Wärmeleitfähigkeit..... | 41 |
| 7 | Versuchsanlage zur Messung der effektiven Wärmeleitfähigkeit..... | 47 |
| 7.1 | Gesamtaufbau der Versuchsanlage..... | 47 |
| 7.2 | Zylinderapparatur und Messprinzip | 48 |
| 7.3 | EMSR-Technik..... | 51 |
| 7.3.1 | Messwertaufnehmer..... | 51 |
| 7.3.2 | Temperaturmessung | 51 |
| 7.3.3 | Steuerung, Regelung und Messung der elektrischen Leistung | 54 |
| 7.3.4 | Luftdruckmessung..... | 55 |
| 7.4 | Vakuumtechnik..... | 55 |
| 7.5 | Messablauf..... | 56 |
| 7.6 | Messunsicherheitsbetrachtung | 61 |
| 7.6.1 | Digitalmultimeter..... | 62 |
| 7.6.2 | Luftdruckmessung..... | 62 |
| 7.6.3 | Probenmitteltemperatur | 63 |
| 7.6.4 | Effektive Wärmeleitfähigkeit..... | 64 |
| 7.7 | Vergleich von Messergebnissen mit anderen Messgeräten..... | 66 |
| 8 | Messergebnisse der effektiven Wärmeleitfähigkeit..... | 70 |
| 8.1 | Expandierte Perlite | 70 |
| 8.2 | Pyrogene Kieselsäuren..... | 77 |
| 8.3 | Mischungen aus expandiertem Perlit und pyrogener Kieselsäure | 79 |
| 9 | Vergleich von Kosten, Nutzen und Aufwand der Wärmedämmstoffe | 84 |
| 10 | Analytische Modellierung der effektiven Wärmeleitfähigkeit..... | 87 |
| 10.1 | Expandierte Perlite | 87 |
| 10.1.1 | Modellierung der Luftwärmeleitung..... | 87 |
| 10.1.2 | Modellierung der Festkörperwärmeleitung | 88 |
| 10.1.3 | Modellierung des Kopplungseffekts..... | 90 |

| | | |
|-----------|---|------------|
| 10.1.4 | Modellierung der Wärmestrahlung..... | 91 |
| 10.1.5 | Gesamtmodell der effektiven Wärmeleitfähigkeit | 92 |
| 10.1.6 | Validierung des Gesamtmodells..... | 96 |
| 10.1.7 | Sensitivitätsanalyse..... | 101 |
| 10.1.8 | Modellstudien | 105 |
| 10.2 | Pyrogene Kieselsäure..... | 107 |
| 10.2.1 | Modellierung der Luftwärmeleitung..... | 107 |
| 10.2.2 | Modellierung der Festkörperwärmeleitung | 109 |
| 10.2.3 | Modellierung des Kopplungseffekts | 109 |
| 10.2.4 | Modellierung der Wärmestrahlung..... | 109 |
| 10.2.5 | Gesamtmodell der effektiven Wärmeleitfähigkeit | 110 |
| 10.3 | Mischungen aus expandiertem Perlit und pyrogener Kieselsäure | 111 |
| 10.3.1 | Modellierung der Luftwärmeleitung..... | 111 |
| 10.3.2 | Modellierung der Festkörperwärmeleitung | 113 |
| 10.3.3 | Modellierung des Kopplungseffekts | 115 |
| 10.3.4 | Modellierung der Wärmestrahlung..... | 116 |
| 10.3.5 | Gesamtmodell der effektiven Wärmeleitfähigkeit | 116 |
| 10.3.6 | Validierung des Gesamtmodells..... | 116 |
| 10.3.7 | Sensitivitätsanalyse..... | 119 |
| 10.3.8 | Modellstudien | 123 |
| 11 | Zusammenfassung und Ausblick | 126 |
| 11.1 | Zusammenfassung..... | 126 |
| 11.2 | Ausblick | 129 |
| 12 | Literatur und Normen..... | 131 |
| 13 | Anhang..... | i |
| A1. | Messwerte zur Ermittlung der dichtespezifischen Extinktionskoeffizienten und Festkörper-Wärmeleitfähigkeiten..... | i |
| A2. | Einzelabmessungen des Heizzylinders..... | iii |
| A3. | Ergänzungen zur Messunsicherheitsbetrachtung | iv |
| A4. | Einfluss des Strahlungshemmers Siliziumkarbid auf die effektive Wärmeleitfähigkeit einer Mischung aus expandiertem Perlit und pyrogener Kieselsäure | viii |
| A5. | Einfluss einer vorherigen Evakuierung auf die effektive Wärmeleitfähigkeit bei Atmosphärendruck..... | ix |
| A6. | Kosten-Nutzen-Betrachtung der Wärmedämmstoffe | xii |
| A7. | Übereinstimmung der Modelle der effektiven Wärmeleitfähigkeit mit Messwerten | xv |

Nomenklatur

Lateinische Formelzeichen

| Symbol | Erläuterung | Einheit |
|--------------------|---|--------------------------------|
| A_i | Innenfläche eines Hohlzylinders | m^2 |
| A_M | Stoßquerschnitt der Gasmoleküle | m^2 |
| $A_{M,Luft}$ | Stoßquerschnitt der Luftmoleküle | m^2 |
| b | Dichteexponent | unbestimmt |
| b_{Str} | Steigung der Strahlungs-Wärmeleitfähigkeit mit der kubischen Probenmitteltemperatur | $W/(m \cdot K^4)$ |
| $b_{Str,HPKS}$ | Steigung der Strahlungs-Wärmeleitfähigkeit von hydrophobierter pyrogener Kieselsäure mit der kubischen Probenmitteltemperatur | $W/(m \cdot K^4)$ |
| $C_{e,PKS,1}$ | Konstante 1 zur Berechnung des ROSSELAND-Mittel des dichtespezifischen Extinktionskoeffizienten pyrogener Kieselsäure | $W \cdot m / (kg \cdot K^4)$ |
| $C_{e,PKS,2}$ | Konstante 2 zur Berechnung des ROSSELAND-Mittel des dichtespezifischen Extinktionskoeffizienten pyrogener Kieselsäure | $W / (m \cdot K^7)$ |
| $C_{e,PKS,3}$ | Konstante 3 zur Berechnung des ROSSELAND-Mittel des dichtespezifischen Extinktionskoeffizienten pyrogener Kieselsäure | $W / (m \cdot K^4)$ |
| $C_{FK,EP,1}$ | Konstante 1 zur Berechnung der Festkörper-Wärmeleitfähigkeit expandierter Perlite | $W \cdot m^2 / (kg \cdot K)$ |
| $C_{FK,EP,2}$ | Konstante 2 zur Berechnung der Festkörper-Wärmeleitfähigkeit expandierter Perlite | $W / (m \cdot K)$ |
| $C_{FK,GEP,Mix,1}$ | Konstante 1 zur Berechnung der Festkörper-Wärmeleitfähigkeit von grobkörnigem expandiertem Perlit in einer Mischung mit pyrogener Kieselsäure | - |
| $C_{FK,GEP,Mix,2}$ | Konstante 2 zur Berechnung der Festkörper-Wärmeleitfähigkeit von grobkörnigem expandiertem Perlit in einer Mischung mit pyrogener Kieselsäure | - |
| $C_{FK,GEP,Mix,3}$ | Konstante 3 zur Berechnung der Festkörper-Wärmeleitfähigkeit von grobkörnigem expandiertem Perlit in einer Mischung mit pyrogener Kieselsäure | - |
| $C_{FK,PKS,1}$ | Konstante 1 zur Berechnung der Festkörper-Wärmeleitfähigkeit pyrogener Kieselsäure | $W \cdot m^5 / (kg^2 \cdot K)$ |
| $C_{FK,PKS,2}$ | Konstante 2 zur Berechnung der Festkörper-Wärmeleitfähigkeit pyrogener Kieselsäure | $W \cdot m^2 / (kg \cdot K)$ |

Nomenklatur

| | | |
|-------------------|---|-----------------------|
| $C_{Gas,Zeng,1}$ | Konstante 1 zur Anpassung des Gas-Wärmeleitfähigkeits-Modells von ZENG | unbestimmt |
| $C_{Gas,Zeng,2}$ | Konstante 2 zur Anpassung des Gas-Wärmeleitfähigkeits-Modells von ZENG | unbestimmt |
| $C_{Kpl,EP,1}$ | Konstante 1 zur Berechnung der Korrekturfunktion für den Kopplungseffekt expandierter Perlite | - |
| $C_{Kpl,EP,2}$ | Konstante 2 zur Berechnung der Korrekturfunktion für den Kopplungseffekt expandierter Perlite | m |
| $C_{Kpl,Mix,1}$ | Konstante 1 zur Berechnung der Korrekturfunktion für den Kopplungseffekt einer Mischung aus expandiertem Perlit und pyrogener Kieselsäure | m ³ /kg |
| $C_{Kpl,Mix,2}$ | Konstante 2 zur Berechnung der Korrekturfunktion für den Kopplungseffekt einer Mischung aus expandiertem Perlit und pyrogener Kieselsäure | - |
| $C_{Luft,Kont,1}$ | Konstante 1 zur Berechnung der Luft-Wärmeleitfähigkeit im Bereich der Kontinuumsströmung | W/(m·K ³) |
| $C_{Luft,Kont,2}$ | Konstante 2 zur Berechnung der Luft-Wärmeleitfähigkeit im Bereich der Kontinuumsströmung | W/(m·K ²) |
| $C_{Luft,Kont,3}$ | Konstante 3 zur Berechnung der Luft-Wärmeleitfähigkeit im Bereich der Kontinuumsströmung | W/(m·K) |
| $C_{Luft,PKS,1}$ | Konstante 1 zur Berechnung der Luft-Wärmeleitfähigkeit pyrogener Kieselsäure | unbestimmt |
| $C_{Luft,PKS,2}$ | Konstante 2 zur Berechnung der Luft-Wärmeleitfähigkeit pyrogener Kieselsäure | unbestimmt |
| $C_{p,PKS,1}$ | Konstante 1 zur Berechnung der mittleren Porengröße pyrogener Kieselsäure | unbestimmt |
| $C_{p,PKS,2}$ | Konstante 2 zur Berechnung der mittleren Porengröße pyrogener Kieselsäure | unbestimmt |
| $C_{p,ZK}$ | Konstante zur Berechnung des mittleren Durchmessers der Kornzwischenraum-Poren | - |
| c_V | spezifische Wärmekapazität des Gases bei konstantem Volumen | J/(kg·K) |
| d | Dicke, Durchmesser | m |
| $d_{Fr,m,i}$ | arithmetischer Mittelwert der Durchmesser der Grenzkörner einer Siebfraktion i | m |
| d_K | mittlerer Korndurchmesser | m |
| $d_{K,i}$ | Durchmesser des Korn i | m |
| $d_{K,vm}$ | volumengewichtet gemittelter Korndurchmesser | m |

Nomenklatur

| | | |
|-----------------|--|--------------------|
| $d_{K,vm,DB}$ | volumengewichtet gemittelter DE BROUCKERE-Korndurchmesser | m |
| $d_{K,vm,Sieb}$ | volumengewichtet gemittelter Korndurchmesser einer Siebanalyse | m |
| d_m | mittlerer Abstand der das Gas einschließenden Wände | m |
| d_p | mittlerer Porendurchmesser | m |
| $d_{p,K}$ | mittlerer Durchmesser der Kornporen | m |
| $d_{p,K,GEP}$ | mittlerer Kornporendurchmesser von grobkörnigem expandiertem Perlit | m |
| $d_{p,PKS}$ | mittlerer Porendurchmesser pyrogener Kieselsäure | m |
| $d_{p,ZK}$ | mittleren Durchmesser der Kornzwischenraum-Poren | m |
| $d_{p,ZK,Ber}$ | berechneter mittleren Durchmesser der Kornzwischenraum-Poren | m |
| $d_{p,ZK,Fit}$ | durch Modellanpassung an Messwerte bestimmter Durchmesser der Kornzwischenraum-Poren | m |
| E | Extinktionskoeffizient | 1/m |
| e_R | ROSSELAND-Mittel des dichtespezifischen Extinktionskoeffizienten | m ² /kg |
| E_R | ROSSELAND-Mittel des Extinktionskoeffizienten | 1/m |
| $e_{R,GEP}$ | ROSSELAND-Mittel des dichtespezifischen Extinktionskoeffizienten grobkörnigen expandierten Perlits | m ² /kg |
| $e_{R,HPKS}$ | ROSSELAND-Mittel des dichtespezifischen Extinktionskoeffizienten hydrophobierter pyrogener Kieselsäure | m ² /kg |
| $e_{R,PKS}$ | ROSSELAND-Mittel des dichtespezifischen Extinktionskoeffizienten pyrogener Kieselsäure | m ² /kg |
| F | Skalierungsfaktor für das Kopplungseffekt-Modell von DEMHARTER und BEICKIRCHER | - |
| $f_{Gas,K}$ | Gasvolumenanteil innerhalb der Kornporen bezogen auf das Gesamtvolumen des Wärmedämmstoffs | - |
| $f_{Gas,ZK}$ | Gasvolumenanteil im Kornzwischenraum bezogen auf das Gesamtvolumen des Wärmedämmstoffs | - |
| $f_{K,GEP}$ | Volumenanteil der Körner grobkörnigen expandierten Perlits | - |
| $F_{KpL,EP}$ | Skalierungsfaktor für den Kopplungseffekt expandierter Perlite | - |
| $F_{KpL,Mix}$ | Skalierungsfaktor für den Kopplungseffekt einer Mischung aus expandiertem Perlit und pyrogener Kieselsäure | - |

Nomenklatur

| | | |
|----------------|--|-----------------------|
| $F_{Kpl,PKS}$ | Skalierungsfaktor für den Kopplungseffekt pyrogener Kieselsäure | - |
| $f_{ZK,GEP}$ | Volumenanteil des Kornzwischenraums von grobkörnigem expandiertem Perlit | - |
| $f_{\rho,GEP}$ | Relative Dichte von grobkörnigem expandiertem Perlit | - |
| g | Funktion, allgemein | unbestimmt |
| $g_{Kpl,EP}$ | Korrekturfunktion für den Kopplungseffekt expandierter Perlite | m |
| $G_{Kpl,EP}$ | Korrekturfaktor für die Modellierung des Kopplungseffekts expandierter Perlite | m |
| $g_{Kpl,Mix}$ | Skalierungsfunktion für den Kopplungseffekt einer Mischung aus expandiertem Perlit und pyrogener Kieselsäure | - |
| I | Messstrom | A |
| k | BOLTZMANN-Konstante | J/K |
| k_{eff} | effektiver Wärmedurchgangskoeffizient | W/(m ² ·K) |
| Kn | KNUDSEN-Zahl | - |
| l | Länge | m |
| $l_{m,Gas}$ | mittlere freie Weglänge der Gasmoleküle | m |
| $l_{m,Luft}$ | mittlere freie Weglänge der Luftmoleküle | m |
| l_{MB} | Länge des Messbereichs | m |
| m_{GEP} | Masse von grobkörnigem expandiertem Perlit | kg |
| \bar{m}_M | mittlere Masse der Gasmoleküle | kg |
| m_{PKS} | Masse pyrogener Kieselsäure | kg |
| m_{Probe} | Masse der Probe | kg |
| N | Anzahl | - |
| n_{eff} | effektiver Brechungsindex | - |
| p | Gasdruck | Pa |
| $p_{0,5}$ | Halbwertsdruck | Pa |
| p_{ext} | externer mechanischer Druck | Pa |
| p_{Luft} | Luftdruck | Pa |
| \dot{q} | Wärmestromdichte | W/m ² |
| \dot{Q} | Wärmestrom | W |
| \dot{Q}_{FK} | Wärmestrom durch die Festkörperphase | W |

Nomenklatur

| | | |
|------------------|---|------------|
| \dot{Q}_{Gas} | Wärmestrom durch die Gasphase | W |
| \dot{Q}_{ges} | Gesamt-Wärmestrom | W |
| \dot{Q}_{Kpl} | Wärmestrom durch die Kopplung der Gas- und Festkörperwärmeleitung | W |
| \dot{Q}_{Mess} | Wärmestrom durch den Messbereich | W |
| \dot{Q}_{Str} | Wärmestrom durch Strahlung | W |
| R^2 | Bestimmtheitsmaß | - |
| r_a | Außenradius | m |
| $r_{EHZ,i}$ | Innenradius des Edelstahlhohlzylinders | m |
| $r_{HZ,a}$ | Außenradius des Heizzylinders | m |
| r_i | Innenradius | m |
| $R_{K,EP}$ | Wärmewiderstand des Festkörper- und Luftanteils des porösen Perlit-Korns | m·K/W |
| $R_{Luft,ZK}$ | Wärmewiderstand der Luft im Kornzwischenraum | m·K/W |
| s_{FK} | anteilige Wegstrecke des Wärmestroms durch die beteiligte Festkörperphase bezogen auf die Gesamtstrecke | - |
| s_{Gas} | anteilige Wegstrecke des Wärmestroms durch die beteiligte Gasphase bezogen auf die Gesamtstrecke | - |
| S_{Probe} | Formkoeffizient der Probe | m |
| T | absolute Temperatur | K |
| T_1 | (Wand-)Temperatur 1 | K |
| T_2 | (Wand-)Temperatur 2 | K |
| T_{Probe} | Probenmitteltemperatur | K |
| T_{Str} | Strahlungsmitteltemperatur | K |
| U | Messspannung | V |
| $u_{I,0,1A}$ | Messunsicherheit der Gleichstrommessung zwischen 0 A und 0,1 A | A |
| $u_{I,1A}$ | Messunsicherheit der Gleichstrommessung zwischen 0 A und 1 A | A |
| $u_{U,10V}$ | Messunsicherheit der Gleichspannungsmessung zwischen 0 V und 10 V | V |
| u_y | Messunsicherheit von y | unbestimmt |
| $u_{\bar{y}}$ | Messunsicherheit von \bar{y} | unbestimmt |
| $u_{\bar{y},k}$ | kombinierte Messunsicherheit von \bar{y} | unbestimmt |

Nomenklatur

| | | |
|--------------------|--|------------|
| $u_{\bar{y},stat}$ | statistische Messunsicherheit von \bar{y} | unbestimmt |
| $u_{\bar{y},sys}$ | systematische Messunsicherheit von \bar{y} | unbestimmt |
| $u_{z,i}$ | Messunsicherheit von z_i | unbestimmt |
| V | Volumen | m^3 |
| $V_{Fr,i}$ | Volumen der Siebfraction i | m^3 |
| $V_{Füll,SG}$ | Füllvolumen des Schraubglases | m^3 |
| $V_{K,i}$ | Volumen des Korn i | m^3 |
| V_{Probe} | Probenvolumen | m^3 |
| V_W | Wasservolumen | m^3 |
| $V_{ZK,GEP}$ | Kornzwischenraum-Volumen von grobkörnigem expandiertem Perlit | m^3 |
| x_i | Abstände der Temperatursensoren an Heiz- und Edelstahlhohlzylinders in axialer Richtung zueinander (siehe Abbildung 7-9) | m |
| y | Messwert | unbestimmt |
| Y | E-Modul | Pa |
| \bar{y} | arithmetischer Mittelwert aus Einzelmesswerten | unbestimmt |
| y_i | Einzelmesswert i | unbestimmt |
| z_i | physikalische Messgröße i | unbestimmt |

Griechische Formelzeichen

| Symbol | Erläuterung | Einheit |
|--------------------|--|---------|
| α | Akkommodationskoeffizient | - |
| β_{Gas} | Gasabhängige Konstante | - |
| β_{Luft} | Gaskonstante für Luft | - |
| ΔT | Temperaturdifferenz | K |
| ΔT_{Probe} | Temperaturdifferenz an Probe | K |
| ΔT_{SHV} | gesamter Schutzheizungsversatz | K |
| $\Delta T_{SHV,1}$ | Schutzheizungsversatz zwischen Schutzheizung 1 und Messbereich | K |
| $\Delta T_{SHV,2}$ | Schutzheizungsversatz zwischen Schutzheizung 2 und Messbereich | K |
| ϑ | Temperatur | °C |

Nomenklatur

| | | |
|---------------------------------|--|---------|
| $\vartheta_{EHZ,MB}$ | flächengewichtete Mitteltemperatur im Messbereich des Edelstahlhohlzylinders | °C |
| $\vartheta_{EHZ,MB,i}$ | Temperaturen der einzelnen Temperatursensoren im Messbereich des Edelstahlhohlzylinders (siehe Abbildung 7-9) | °C |
| $\vartheta_{HZ,MB}$ | flächengewichtete Mitteltemperatur im Messbereich des Heizzylinders | °C |
| $\vartheta_{HZ,MB,i}$ | Temperaturen der einzelnen Temperatursensoren im Messbereich des Heizzylinders (siehe Abbildung 7-9) | °C |
| $\vartheta_{HZ,SHB,i}$ | Temperaturen der einzelnen Temperatursensoren in den Schutzheizungsbereichen des Heizzylinders (siehe Abbildung 7-9) | °C |
| ϑ_{Probe} | Probenmitteltemperatur | °C |
| $\vartheta_{Stecker}$ | Temperatur am Sub-D-Stecker der Zylinderapparatur | °C |
| ϑ_{wahr} | wahre Temperatur | °C |
| κ | Isentropenexponent | - |
| λ | Wärmeleitfähigkeit | W/(m·K) |
| λ_{eff} | effektive Wärmeleitfähigkeit | W/(m·K) |
| $\lambda_{eff,EP}$ | effektive Wärmeleitfähigkeit expandierter Perlite | W/(m·K) |
| $\lambda_{eff,p \rightarrow 0}$ | effektive Wärmeleitfähigkeit bei sehr geringen Gasdrücken | W/(m·K) |
| $\lambda_{eff,Kont}$ | effektive Wärmeleitfähigkeit mit Füllgas im Bereich der Kontinuumsströmung | W/(m·K) |
| $\lambda_{eff,Mix}$ | effektive Wärmeleitfähigkeit einer Mischung aus expandiertem Perlit und pyrogener Kieselsäure | W/(m·K) |
| $\lambda_{eff,PKS}$ | effektive Wärmeleitfähigkeit pyrogener Kieselsäure | W/(m·K) |
| λ_{FK} | Festkörper-Wärmeleitfähigkeit | W/(m·K) |
| $\lambda_{FK,0}$ | Wärmeleitfähigkeit des massiven Festkörpers | W/(m·K) |
| $\lambda_{FK,EP}$ | Festkörper-Wärmeleitfähigkeit expandierter Perlite | W/(m·K) |
| $\lambda_{FK,GEP,Mix}$ | Festkörper-Wärmeleitfähigkeit von grobkörnigem expandiertem Perlit in einer Mischung mit pyrogener Kieselsäure | W/(m·K) |
| $\lambda_{FK,GEP,rein}$ | Festkörper-Wärmeleitfähigkeit von reinem grobkörnigem expandiertem Perlit | W/(m·K) |
| $\lambda_{FK,Mix}$ | Festkörper-Wärmeleitfähigkeit einer Mischung aus expandiertem Perlit und pyrogener Kieselsäure | W/(m·K) |
| $\lambda_{FK,PKS}$ | Festkörper-Wärmeleitfähigkeit pyrogener Kieselsäure | W/(m·K) |
| λ_{Gas} | Gas-Wärmeleitfähigkeit | W/(m·K) |
| $\lambda_{Gas,Kont}$ | Gas-Wärmeleitfähigkeit im Bereich der Kontinuumsströmung | W/(m·K) |

Nomenklatur

| | | |
|------------------------|--|-------------------------------------|
| $\lambda_{Gas,ZK}$ | Gas-Wärmeleitfähigkeit im Kornzwischenraum | W/(m·K) |
| $\lambda_{K,EP}$ | Festkörper- und Luft-Wärmeleitfähigkeit eines expandierten Perlit-Schaumkorns | W/(m·K) |
| λ_{Kpl} | Kopplungseffekt-Wärmeleitfähigkeit | W/(m·K) |
| $\lambda_{Kpl,EP}$ | Kopplungseffekt-Wärmeleitfähigkeit expandierter Perlite | W/(m·K) |
| $\lambda_{Kpl,Kont}$ | Kopplungseffekt-Wärmeleitfähigkeit bei Kontinuumsströmung des Gases | W/(m·K) |
| $\lambda_{Kpl,Mix}$ | Kopplungseffekt-Wärmeleitfähigkeit einer Mischung aus expandiertem Perlit und pyrogener Kieselsäure | W/(m·K) |
| $\lambda_{Kpl,PKS}$ | Kopplungseffekt-Wärmeleitfähigkeit pyrogener Kieselsäure | W/(m·K) |
| $\lambda_{Luft,EP}$ | Luft-Wärmeleitfähigkeit expandierter Perlite | W/(m·K) |
| $\lambda_{Luft,K}$ | Luft-Wärmeleitfähigkeit im porösen Korn | W/(m·K) |
| $\lambda_{Luft,Kont}$ | Luft-Wärmeleitfähigkeit im Bereich der Kontinuumsströmung | W/(m·K) |
| $\lambda_{Luft,Mix}$ | Luft-Wärmeleitfähigkeit einer Mischung aus expandiertem Perlit und pyrogener Kieselsäure | W/(m·K) |
| $\lambda_{Luft,PKS}$ | Luft-Wärmeleitfähigkeit pyrogener Kieselsäure | W/(m·K) |
| $\lambda_{Luft,ZK}$ | Luft-Wärmeleitfähigkeit im Kornzwischenraum | W/(m·K) |
| $\lambda_{Sch,FK+Gas}$ | Festkörper- und Gas-Wärmeleitfähigkeit durch einen Schaum | W/(m·K) |
| λ_{Str} | Strahlungs-Wärmeleitfähigkeit | W/(m·K) |
| $\lambda_{Str,Mix}$ | Strahlungs-Wärmeleitfähigkeit einer Mischung aus expandiertem Perlit und pyrogener Kieselsäure | W/(m·K) |
| $\lambda_{Str,PKS}$ | Strahlungs-Wärmeleitfähigkeit pyrogener Kieselsäure | W/(m·K) |
| ν | Querkontraktionszahl | - |
| ρ | Dichte der Dämmstoffschüttung | kg/m ³ |
| ρ_0 | Dichte des massiven Festkörpers | kg/m ³ |
| ρ_{Gas} | Dichte des Gases | kg/m ³ |
| ρ_{GEP} | Dichte von grobkörnigem expandiertem Perlit | kg/m ³ |
| $\rho_{GEP,rein}$ | Dichte von reinem grobkörnigem expandiertem Perlit | kg/m ³ |
| ρ_K | mittlere Korndichte | kg/m ³ |
| $\rho_{K,GEP}$ | mittlere Korndichte von grobkörnigem expandiertem Perlit | kg/m ³ |
| $\rho_{PKS,ZK}$ | Dichte pyrogener Kieselsäure bezogen auf das Kornzwischenraum-Volumen von grobkörnigem expandiertem Perlit | kg/m ³ |
| σ | STEFAN-BOLTZMANN-Konstante | W/(m ² ·K ⁴) |

| | | |
|----------|-----------------------------|---|
| τ_0 | optische Dicke | - |
| Ψ | Porosität | - |
| Ψ_K | Porosität eines Schaumkorns | - |

Abkürzungen

Abkürzung Erläuterung

| | |
|-------|---|
| BET | BRUNAUER, EMMETT und TELLER |
| eff. | effektiv |
| EMSR | Elektro-, Mess-, Steuer- und Regelungs- |
| FEP | feinkörniger expandierter Perlit |
| FTIR | Fourier-Transformations-Infrarotspektroskopie |
| GemEP | gemahlener expandierter Perlit |
| GEP | grobkörniger expandierter Perlit |
| GFPA | glasfaserverstärktes Polyamid |
| HPKS | hydrophobierte pyrogene Kieselsäure |
| IES | Institut für Energiespeicherung der Universität Stuttgart |
| IGE | Institut für Gebäudeenergetik der Universität Stuttgart |
| IGTE | Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung der Universität Stuttgart |
| ITW | Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik der Universität Stuttgart |
| Mass. | Massen |
| MEP | mittelgrobkörniger expandierter Perlit |
| Poly. | Polynom |
| Pt100 | Platin-Widerstandsthermometer mit einem Nennwiderstand von 100 Ω |
| PTFE | Polytetrafluorethylen |
| sys. | systematisch |
| Temp. | Temperatur |
| UPKS | unbehandelte pyrogene Kieselsäure |
| VEP1 | Zur Validierung verwendeter expandierter Perlit 1 |
| VEP2 | Zur Validierung verwendeter expandierter Perlit 2 |

1 Einleitung und Motivation

Mit dem Ziel den Klimawandel zu verlangsamen, wurden global, EU-weit und deutschlandweit Abkommen, Gesetze und Verordnungen zur Reduktion von Treibhausgasemissionen auf den Weg gebracht, verabschiedet und werden laufend aktualisiert [1], [2], [3], [4], [5]. Thermische Energie für Warmwasser, Raum- und Prozesswärme hatte in Deutschland, mit 53,2 % im Jahr 2018, den größten Anteil am gesamten Endenergieverbrauch [6]. Daraus ergibt sich eine übergeordnete Bedeutung der Bereitstellung von Wärme aus erneuerbaren Quellen, wie es beispielsweise die Solarthermie ermöglicht. Für die meisten Anwendungsfälle der Solarthermie werden thermische Energiespeicher benötigt. Dafür werden zumeist Warmwasserspeicher verwendet. Diese dienen in jedem Fall der Kurzzeitspeicherung, können aber bei entsprechender Dimensionierung auch zur Langzeitspeicherung von thermischer Energie bis zu mehreren Monaten verwendet werden [7], [8], [9], [10], [11], [12], [13], [14]. Neben der Solarthermie werden Warmwasserspeicher u. a. auch für die Kraft-Wärme-Kopplung, beispielsweise zur Flexibilisierung des Betriebs von Heizkraftwerken, eingesetzt [15], [16]. Zudem können sie, insbesondere nach verstärkter Integration von fluktuierenden Energiequellen in Stromnetze, auch zur Speicherung von überschüssiger elektrischer Energie in Form von thermischer Energie genutzt werden („Power2Heat“). Die gespeicherte thermische Energie kann direkt genutzt, oder wieder in elektrische Energie umgewandelt werden [17], [18]. Um für alle genannten Anwendungsfälle thermische Energie in Form von fühlbarer Wärme effizient speichern zu können, bedarf es einer effektiven Wärmedämmung. Um einen Beitrag dazu zu leisten, wurde vom Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW)¹ der Universität Stuttgart gemeinsam mit der Firma Sirch Tankbau-Tankservice Speicherbau von Anfang 2013 bis Ende 2015 ein Projekt mit dem Titel und Ziel der „Entwicklung großvolumiger, preiswerter Warmwasserspeicher mit hocheffizienter Dämmung zur Außenaufstellung“ (Kurztitel: „StoEx“) durchgeführt [14]. Teile der vorliegenden Arbeit wurden im Rahmen dieses Projekts durchgeführt. Die Vorteile der Außenaufstellung großvolumiger Warmwasserspeicher liegen zum einen in dem dadurch eingesparten, wertvolleren Innenraum. Zum anderen können diese Speicher durch eine Außenaufstellung einfacher für Bestandsgebäude nachgerüstet werden. Zudem führen Wärmeverluste des Speichers bei Außenaufstellung nicht zu einer Überhitzung und damit einem höheren Kühlbedarf von Innenräumen im Sommer. Diesen Vorteilen steht eine im Jahresmittel üblicherweise geringere Umgebungstemperatur des Speichers gegenüber, welche zu höheren Wärmeverlusten führen kann. Ein Ziel des Projekts StoEx war daher die Entwicklung einer effektiven und kostengünstigen Wärmedämmung. Eine alleinige Erhöhung der Dämmdicke zur Steigerung der Dämmwirkung führt bei zylindrischen Körpern wie Warmwasserspeichern in Tankbauweise zu einer quadratisch dazu ansteigenden Erhöhung der wärmeübertragenden Oberfläche zur Umgebung. Diese Oberfläche ist direkt proportional zum

¹ Das ITW wurde im Juli 2018 mit dem Institut für Gebäudeenergetik (IGE) sowie dem Institut für Energiespeicherung (IES) zum Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung (IGTE) zusammengeführt.

Verlustwärmestrom. Dadurch sinkt die Effizienz der Wärmedämmung mit steigender Dämmdicke. Die Erhöhung der Dämmwirkung durch Verringerung der effektiven Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmung stellt eine bzgl. des Dämmvolumens effizientere Option dar, die im Projekt StoEx verfolgt wurde. Hauptaugenmerk wurde dabei auf die Weiterentwicklung der Technologie einer Vakuumwärmedämmung mit Wärmedämmstoffen im Zwischenraum eines doppelwandigen Stahltanks gelegt (siehe Kapitel 3.1). Ziel hierbei, sowie der vorliegenden Arbeit, war u. a. die Identifikation von möglichst kostengünstigen Wärmedämmstoffen, die eine sehr geringe effektive Wärmeleitfähigkeit bereits bei höheren, und damit technisch einfacher herzustellenden und aufrechtzuerhaltenden, Vakuumdrücken erzielen als bisher für die gleiche Technologie verwendete Wärmedämmstoffe. Gegenüber gängigen, belüfteten und trockenen Wärmedämmstoffen können durch die gewählte Dämmtechnologie um den Faktor 5 bis 10 geringere effektive Wärmeleitfähigkeiten erzielt werden [14], [19]. Ein weiterer Vorteil der Vakuumwärmedämmung für Außenanwendungen ist die Unabhängigkeit der Wärmedämmstoffe von der Witterung, bedingt durch den hermetischen Einschluss. In der Realität kommt es, insbesondere bei Außenanwendungen, häufig zu einer Durchfeuchtung belüfteter Wärmedämmstoffe, wodurch deren effektive Wärmeleitfähigkeiten signifikant ansteigen können [20].

In der vorliegenden Arbeit werden zunächst Grundlagen der Wärmetransportmechanismen in Dämmstoffschüttungen erläutert. Im Anschluss wird in einer Literaturübersicht auf die bisherigen Entwicklungen bzgl. Vakuumwärmedämmungen, auf bisher verwendete Vakuumwärmedämmstoffe und auf grundlegende Ansätze zur analytischen Modellierung der effektiven Wärmeleitfähigkeit von Schüttungen eingegangen, bevor die daraus folgende Aufgabenstellung der vorliegenden Arbeit formuliert wird. Nachfolgend werden die untersuchten Wärmedämmstoffe sowie Methoden und Ergebnisse der Bestimmung ihrer Stoffeigenschaften gezeigt, die für die analytische Modellierung der effektiven Wärmeleitfähigkeit, sowie für eine qualifizierte Analyse der Messergebnisse notwendig sind. Darauf folgend wird die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte und aufgebaute Versuchsanlage zur Messung der effektiven Wärmeleitfähigkeit beschrieben, bevor die damit erzeugten Messergebnisse gezeigt und diskutiert werden. Neben den thermischen Eigenschaften werden daraufhin auch Kosten und Handhabung der untersuchten Wärmedämmstoffe verglichen und diskutiert. Danach werden die entwickelten analytischen Modelle zur Vorhersage der effektiven Wärmeleitfähigkeit gezeigt, validiert und bzgl. ihrer Sensitivität bewertet. Zum Schluss wird die Arbeit zusammengefasst und in einem Ausblick werden mögliche, daran anschließende Forschungstätigkeiten vorgeschlagen.

2 Grundlagen der Wärmetransportmechanismen in Dämmstoffschüttungen

Der Wärmetransport durch Wärmeleitung in einem Medium kann mit dem FOURIER'schen Gesetz nach Gleichung (2-1) beschrieben werden.

$$\vec{q} = -\lambda \cdot \text{grad}(T) \quad (2-1)$$

Mit:

| | |
|-------------|--------------------------------------|
| \dot{q} : | Wärmestromdichte [W/m ²] |
| λ : | Wärmeleitfähigkeit [W/(m·K)] |
| T : | Temperatur [K] |

Poröse Körper wie Wärmedämmstoffe enthalten unterschiedliche Phasen, in welchen mehrere Wärmetransportmechanismen stattfinden. In diesem Fall wird anstatt der Wärmeleitfähigkeit als reine Stoffgröße eine effektive Wärmeleitfähigkeit λ_{eff} [W/(m·K)] verwendet, in welcher die auftretenden Wärmetransportmechanismen zusammengefasst sind.

Wärmedämmstoffe haben die Aufgabe, den Wärmetransport zwischen einem Körper und seiner Umgebung zu verringern. In konventionellen Wärmedämmungen wird dazu die vergleichsweise geringe Wärmeleitfähigkeit eines Gases, zumeist Luft, genutzt. Die Wärmedämmstoffe schließen diese Gase in ihren Poren ein, um Konvektion zu unterbinden. Handelt es sich um offenporige Wärmedämmstoffe, kann der Gasdruck durch Evakuieren verringert werden, um somit auch die Wärmeleitung über die Gasphase zu unterbinden. Zudem reduziert der Feststoffanteil der Wärmedämmstoffe den Wärmestrom über Strahlung. Um die Wärmeleitung über die Feststoffphase möglichst gering zu halten, besitzen diese eine hohe Porosität und eine geringe Wärmeleitfähigkeit des Feststoffanteils. Bei den in dieser Arbeit untersuchten Wärmedämmstoffen handelt es sich um Schüttungen, da diese vergleichsweise einfach in den Zwischenspalt eines doppelwandigen Behälters eingebracht werden können. In Abbildung 2-1 sind die Wärmetransportmechanismen in einer Schüttung anhand zweier kugelförmiger Schaumkörner dargestellt.

Der gesamte Wärmestrom \dot{Q}_{ges} [W] durch eine Dämmstoffschüttung setzt sich demnach zusammen aus den Wärmeströmen durch

- den Gasanteil \dot{Q}_{Gas} [W],
- den Festkörperanteil \dot{Q}_{FK} [W],
- die Kopplung von Gas- und Festkörperwärmeleitung \dot{Q}_{Kpl} [W],
- die Strahlung \dot{Q}_{str} [W].

Die einzelnen Wärmetransportmechanismen werden in den nachfolgenden Unterkapiteln beschrieben.

Gemäß HÄUßLER und SCHLEGEL [21] kann Konvektion in Poren mit Durchmessern kleiner als 5 mm vernachlässigt werden, da in diesem Fall der Strömungswiderstand zu hoch wird. Dies trifft für alle in dieser Arbeit untersuchten Wärmedämmstoffe zu. Die Kopplung von Strahlung und Wärmeleitung wird in dieser Arbeit vernachlässigt, was gemäß REISS [22] u. a. für sehr große optische Dicken (siehe Kapitel 3.4.4, Gleichung (3-16)) zulässig ist. Diese Voraussetzung wird in der vorliegenden Arbeit und für die vorgesehene Anwendung weitgehend erfüllt.

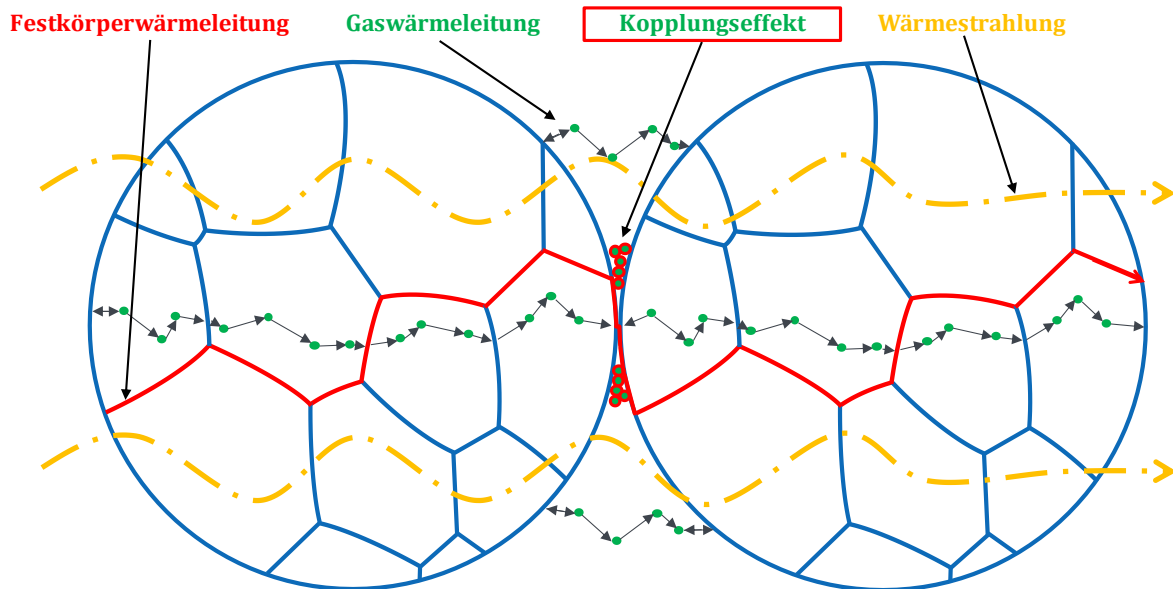


Abbildung 2-1: Wärmetransportmechanismen in einer Schüttung aus kugelförmigen Schaumkörnern

2.1 Gaswärmeleitung

Nach der kinetischen Gastheorie wird Wärme in Gasen über Stöße von Molekülen höherer kinetischer Energie zu Molekülen geringerer kinetischer Energie übertragen. In Abbildung 2-1 sind die Gasmoleküle als grüne Punkte dargestellt und die Bewegungsrichtungen, die zu Stößen mit den nächsten Gasmolekülen führen, mit grauen Pfeilen. In einer Schüttung aus porösen Körnern, wie Schaumkörnern, findet Gaswärmeleitung bei hinreichendem Gasdruck sowohl innerhalb der Kornporen als auch zwischen den Körnern statt. Die mittlere freie Weglänge $l_{m,Gas}$ [m], die ein Molekül zurücklegt, bevor es mit einem weiteren Molekül zusammenstößt, kann gemäß der kinetischen Gastheorie mit Gleichung (2-2) berechnet werden [23].

$$l_{m,Gas} = \frac{k \cdot T}{\sqrt{2} \cdot A_M \cdot p} \quad (2-2)$$

Mit:

k : BOLTZMANN-Konstante [J/K]

A_M : Stoßquerschnitt der Gasmoleküle [m²]

p : Gasdruck [Pa]

Eine einfache Berechnung der Wärmeleitfähigkeit ruhender Gase im Bereich der Kontinuumsströmung (Kontinuums-Wärmeleitfähigkeit) $\lambda_{Gas,Kont}$ [W/(m·K)] ergibt sich nach der kinetischen Gastheorie mit Gleichung (2-3) [23]:

$$\lambda_{Gas,Kont} = \frac{2}{3} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot k \cdot T}{\pi \cdot \bar{m}_M}} \cdot \rho_{Gas} \cdot l_{m,Gas} \cdot c_V \quad (2-3)$$

Mit:

\bar{m}_M : mittlere Masse der Gasmoleküle [kg]

ρ_{Gas} : Dichte des Gases [kg/m³]

c_V : spezifische Wärmekapazität des Gases bei konstantem Volumen [J/(kg·K)]

Die Gültigkeit von Gleichung (2-3) ist allerdings nur gegeben, wenn der Abstand der das Gas begrenzenden Wände sehr viel größer ist als die mittlere freie Weglänge der Gasmoleküle. In diesem Fall existieren sehr viel mehr Stöße der Gasmoleküle untereinander als mit den begrenzenden Wänden. Das Gas befindet sich damit im Bereich der Kontinuumsströmung [24]. Außerdem muss der Gasmoleküldurchmesser sehr viel kleiner sein als die mittlere freie Weglänge. In dieser Arbeit wird ausschließlich Luft bis maximal 1 bar Absolutdruck als Füllgas der Wärmedämmstoffe eingesetzt, für welche die letztgenannte Bedingung gegeben ist. Wenn wiederum sehr viel mehr Stöße der Gasmoleküle mit den Wänden als untereinander stattfinden, spricht man von freier Molekularströmung. Freie Molekularströmung findet statt, wenn die mittlere freie Weglänge der Gasmoleküle sehr viel größer ist als der Abstand der das Gas begrenzenden Wände. Dies kann sowohl durch Verringerung des Gasdrucks als auch durch den Einschluss des Gases in sehr kleine Spalte oder Poren erreicht werden. Im Bereich der freien Molekularströmung ist die Gas-Wärmeleitfähigkeit sehr gering. Eine Gasdruckabhängigkeit der Gas-Wärmeleitfähigkeit existiert nur im Bereich freier Molekularströmung sowie im Übergangsbereich zwischen Kontinuumsströmung und freier Molekularströmung. Im Bereich der Kontinuumsströmung ist die Gas-Wärmeleitfähigkeit unabhängig vom Gasdruck.

SMOLUCHOVSKI wies 1911 die Theorie eines Temperatursprungs zwischen Gas und Wand als Ursache für die Abhängigkeit der Gas-Wärmeleitfähigkeit vom Abstand der begrenzenden Wände und vom Gasdruck experimentell nach [25]. Im gleichen Jahr veröffentlichte auch KNUDSEN experimentelle Ergebnisse zur Gaswärmeleitung zwischen Oberflächen unterschiedlicher Abstände [26]. Nach ihm wurde die KNUDSEN-Zahl Kn [-] (siehe Gleichung (2-4)) benannt, die häufig zur Charakterisierung der oben beschriebenen Strömungsbereiche verwendet wird:

$$Kn = \frac{l_{m,Gas}}{d_m} \quad (2-4)$$

Mit:

d_m : mittlerer Abstand der das Gas einschließenden Wände [m]

Nach FROHN [27] gilt für Kontinuumsströmung ca. $Kn < 0,01$ und für freie Molekularströmung ca. $Kn > 10$. Den Bereich $0,01 < Kn < 10$ unterteilt FROHN in einen Übergangs- und einen Gleitströmungsbereich. In der vorliegenden Arbeit wird er als Übergangsbereich zusammengefasst.

Abbildung 2-2 zeigt den charakteristischen S-Kurven-Verlauf der Gas-Wärmeleitfähigkeit über dem logarithmisch aufgetragenen Gasdruck. Zudem sind darin die Strömungsbereiche gekennzeichnet. In Abbildung 2-3 ist beispielhaft die Abhängigkeit der auf deren Kontinuums-Wärmeleitfähigkeit bezogenen Luft-Wärmeleitfähigkeit vom Luftdruck und dem Abstand der begrenzenden Wände (Spaltweiten) dargestellt. Die Gas-Wärmeleitfähigkeiten wurden mit den Gleichungen (3-2) und (3-4) berechnet, die Kontinuums-Wärmeleitfähigkeit von Luft mit Gleichung (8-1). Diese und weitere analytische Modelle der Gas-Wärmeleitfähigkeit sind in Kapitel 3.4.1 beschrieben.

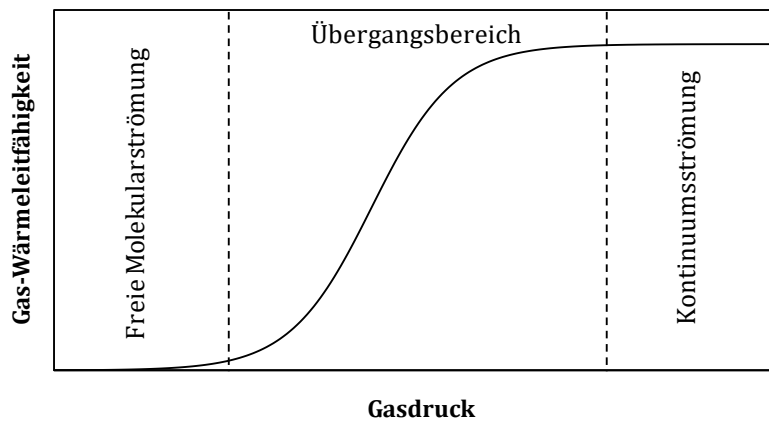


Abbildung 2-2: Strömungsbereiche, gezeigt an der Gas-Wärmeleitfähigkeit über dem logarithmisch aufgetragenen Gasdruck

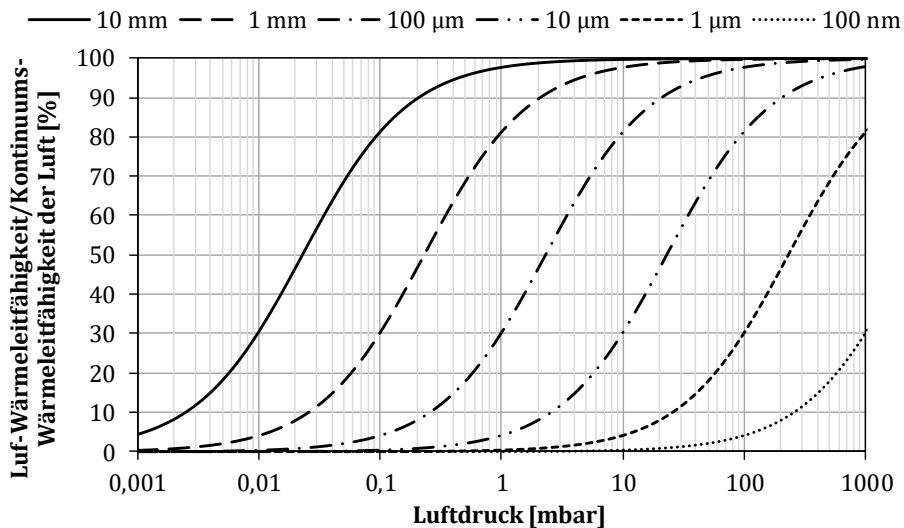


Abbildung 2-3: Auf die Kontinuums-Wärmeleitfähigkeit bezogene Luft-Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit vom Luftdruck für unterschiedliche Spaltweiten von 100 nm bis 10 mm

Die Wärmeleitfähigkeit eines eingeschlossenen Gases gleichbleibender Zusammensetzung erhöht sich mit steigender Temperatur und bis zum Erreichen der Kontinuumsströmung mit steigendem Gasdruck sowie mit steigender Spaltweite, die für poröse Stoffe gleichbedeutend mit einer mittleren Porengröße ist. Somit handelt es sich in diesem Bereich um keine rein material-spezifische Größe, weshalb sie als „Pseudo-Wärmeleitfähigkeit“ bezeichnet werden kann, vgl. [28]. Zudem existiert eine Abhängigkeit von der stofflichen Zusammensetzung und der Rauigkeit der Porenwand, die mit dem von KNUDSEN eingeführten Akkommodationskoeffizienten α [0...1] quantifiziert werden kann [26]. Danach kann es zu einem unvollständigen Energieaustausch zwischen Gasmolekülen und der Wand kommen. Nach [28], [29], [30] kann für den Akkommodationskoeffizient von Stickstoff und Luft zu technischen Oberflächen jedoch in guter Näherung der Wert 1, und damit vollständiger Energieaustausch, angenommen werden. Diese Annahme wird in dieser Arbeit übernommen.

2.2 Festkörperwärmeleitung

In Festkörpern findet Wärmeleitung über Gitterschwingungen der Atome statt. In Metallen wird Wärme zudem über frei bewegliche Elektronen übertragen. Diese sind bei den in dieser Arbeit betrachteten dielektrischen Feststoffen jedoch an ihre Atomkerne gebunden. Im Beispiel einer Schüttung aus Schaumkörnern, siehe Abbildung 2-1, wird Wärme innerhalb des Kornes über die dünnen Porenwände übertragen. Die Wärmeübertragung zu angrenzenden Körnern findet über die Kontaktstellen statt. Festkörper haben in der Regel eine größere Wärmeleitfähigkeit als ruhende Gase. Dennoch ist der Anteil der Festkörperwärmeleitung am Gesamtwärmetransport durch eine Dämmstoffschüttung bei Atmosphärendruck meist deutlich geringer als der Anteil der Gaswärmeleitung. Dies lässt sich durch den geringen Festkörperanteil der porösen Körner, die langen Wege über die Schaumstruktur und Kontaktwiderstände an den kleinen Kontaktflächen mit angrenzenden Körnern begründen. Diese Kontaktwiderstände werden bei hinreichend hohem Gasdruck allerdings durch einen Kopplungseffekt überbrückt, der im nachfolgenden Kapitel 2.3 beschrieben wird.

Die Festkörperwärmeleitung innerhalb einer hochporösen Dämmstoffschüttung steigt mit steigender Wärmeleitfähigkeit des massiven Feststoffs und mit sinkender Porosität. Solange die maximale Packungsdichte einer Schüttung nicht erreicht ist, lässt sich die Porosität durch Verdichtung erhöhen, beispielsweise durch Rütteln, wodurch auch die Dichte der Schüttung ansteigt. Je nach Stoffzusammensetzung und Temperaturbereich, kann die Wärmeleitfähigkeit eines massiven Festkörpers mit der Temperatur steigen oder sinken. Für expandierten Perlit konnte nach [19] keine Temperaturabhängigkeit nachgewiesen werden. Daher wird diese auch in der vorliegenden Arbeit vernachlässigt.

Analytische Modelle für die Festkörperwärmeleitung in porösen Schüttungen sind in Kapitel 3.4.2 aufgeführt. Für ausführlichere Grundlagen zur Wärmeleitung in Festkörpern sei beispielhaft auf [31], [32] verwiesen.

2.3 Kopplung von Gas- und Festkörperwärmeleitung (Kopplungseffekt)

Nahe den Berührstellen der Körner einer Schüttung oder auch von Fasern einer Faserwärmedämmung findet eine Kopplung der Wärmeleitung über den Festkörper mit der Wärmeleitung über das Gas statt, die im weiteren Verlauf als Kopplungseffekt bezeichnet wird. Das bedeutet, dass die einzelnen Wärmetransportmechanismen in Schüttungen nicht unabhängig voneinander sind. In Modellen der effektiven Wärmeleitfähigkeit, bei welchen der Wärmedämmstoff als eine Verschaltung paralleler Wärmewiderstände entsprechend der unterschiedlichen Wärmetransportmechanismen betrachtet wird, muss demnach ein Kopplungsterm hinzuaddiert werden, siehe Kapitel 3.4.1. SWIMM beschreibt den Kopplungseffekt als thermischen Kurzschluss eines Festkörperpfades über die Gasphase, der dann relevant wird, „wenn der thermische Widerstand zwischen zwei Punkten auf dem Festkörpergerüst auf direktem Weg durch das Gas geringer wird als auf dem gewundenen Festkörperpfad“ [30] (Seite 16). Nach dem gleichen Prinzip beschrieben bereits SCHWAB, FRICKE et al. und WIENER den Kopplungseffekt [33], [34], [35]. Nach REICHENAUER bedingt eine lokale Änderung des Temperaturgradienten rings um die Berührstellen von Körnern den Kopplungseffekt [36]. ZHAO et al. beschreiben den Kopplungseffekt damit, dass die Gasmoleküle um die Berührstelle zwischen zwei Körnern Quasi-Gitterschwingungen durchführen, sich also ähnlich wie ein Feststoff verhalten [37]. Der Kopplungseffekt ist in Abbildung 2-1 entsprechend dargestellt als eine Ansammlung von Gasmolekülen nahe der Kontaktstelle. Die rote Umrandung der in der Abbildung jeweils grün dargestellten Gasmoleküle symbolisiert den Zusammenhang zur Festkörperwärmeleitung, die in der Abbildung jeweils rot dargestellt ist.

Der Kopplungseffekt im Bereich der Kontinuumsströmung lässt sich für einen Wärmedämmstoff messtechnisch und rechnerisch gemäß Gleichung (2-5) als eine anteilige Kopplungseffekt-Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{Kpl,Kont}$ [W/(m·K)] gemäß dem Superpositionsprinzip (siehe Gleichung (3-1) und Kapitel 3.4.1) quantifizieren.

$$\lambda_{Kpl,Kont} = \lambda_{eff,Kont} - \lambda_{eff,p \rightarrow 0} - \lambda_{Gas,Kont} \quad (2-5)$$

Mit:

- $\lambda_{eff,Kont}$: effektive Wärmeleitfähigkeit des Wärmedämmstoffs mit Füllgas im Bereich der Kontinuumsströmung [W/(m·K)]
- $\lambda_{eff,p \rightarrow 0}$: effektive Wärmeleitfähigkeit des Wärmedämmstoffs mit Füllgas bei sehr geringem Gasdruck [W/(m·K)]

Dafür muss die effektive Wärmeleitfähigkeit des Stoffes im Bereich der Kontinuumsströmung des Füllgases und bei einem Gasdruck im Vakuum, bei welchem der Wärmetransport über das Gas vernachlässigbar ist, gemessen werden. Bei diesem Gasdruck setzt sich die gemessene effektive Wärmeleitfähigkeit lediglich aus Festkörperwärmeleitung und Wärmestrahlung zusammen. Die

Kontinuums-Wärmeleitfähigkeit des Gases $\lambda_{Gas,Kont}$ kann meist Literaturwerten entnommen werden.

Die Kopplungseffekt-Wärmeleitfähigkeit kann bis zu einem mehrfachen der Kontinuums-Wärmeleitfähigkeit des Gases betragen. REICHENAUER et al. haben für eine Schüttung aus massiven Glaskugeln mit einem Durchmesser von 2 mm den ca. siebenfachen Wert bestimmt [36].

Der Kopplungseffekt innerhalb einer Schüttung steigt mit steigender Wärmeleitfähigkeit der Körner und des Gases, welches die Körner umgibt. Da die Festkörperwärmeleitung unabhängig vom Gasdruck ist und deren Temperaturabhängigkeit vernachlässigt wird, sind die Temperatur- und Gasdruckabhängigkeit des Kopplungseffekts und der Gaswärmeleitung direkt proportional zueinander. Ist der Gasdruck hinreichend gering für eine Vernachlässigung der Gas-Wärmeleitfähigkeit, ist auch der Kopplungseffekt vernachlässigbar. Gemäß ZEHNER, BAUER und SCHLÜNDER hängt der Kopplungseffekt in Schüttungen außerdem mit der Form der Körner zusammen [38], [39], [40]. Begünstigt die Form der Körner größere Bereiche sehr geringen Abstands um die Berührstellen der Körner, erhöht sich demnach der Kopplungseffekt. Bzgl. Aerogelen, die aus dreidimensional vernetzten fadenförmigen Körnern bestehen, ebenso wie die in dieser Arbeit untersuchte pyrogene Kieselsäure, steigt der Kopplungseffekt mit sinkender Berührfläche der Körner, steigender Anzahl an Enden und der Stärke der Windung der Kornfäden [30]. Die Abhängigkeit des Kopplungseffekts von der mittleren Korngröße von expandiertem Perlit ist Gegenstand der Untersuchungen der vorliegenden Arbeit.

Analytische Modelle für den Kopplungseffekt, die der Literatur entnommen werden können, sind in Kapitel 3.4.3 aufgeführt.

2.4 Wärmestrahlung

Jeder Körper, der eine Temperatur größer 0 K besitzt, emittiert elektromagnetische Strahlung. Gegenüber einem Körper geringerer Temperatur kommt es zum Wärmetransport über Strahlung. Für den Wärmetransport ist kein Transportmedium notwendig. Das bedeutet, Wärme wird über Strahlung auch durch ein absolutes Vakuum transportiert. Für die in dieser Arbeit betrachteten Temperaturen, befinden sich die Wellenlängen der Strahlung im Infrarot-Bereich. Beim Durchgang durch ein feinporöses Medium, wie die in dieser Arbeit behandelten Dämmstoffschüttungen, kann Wärmestrahlung über Absorption, Reflexion und Streuung abgeschwächt werden. Diese Abschwächung der Strahlung wird als Extinktion bezeichnet und kann über den Extinktionskoeffizient E [1/m] quantifiziert werden. Neben Emissions-, Transmissions- und Reflexionsgrad des Festkörpers ist der Extinktionskoeffizient zudem abhängig von der Struktur des porösen Wärmedämmstoffs und steigt bei nichttransparenten Medien mit sinkender Porosität. Der Wärmetransport über Strahlung steigt mit der vierten Potenz der Temperatur und mit sinkendem Extinktionskoeffizient und damit mit steigender Porosität. Da die Extinktion von

Luft für die Anwendungsbereiche dieser Arbeit vernachlässigt werden kann, ist die Wärmestrahlung gasdruckunabhängig.

Für optisch dicke Wärmedämmstoffe mit Durchmessern der Feststoffstrukturen (Durchmesser massiver Körner oder Dicke von Stegen und Wänden in Schäumen) kleiner als die Wellenlänge der Strahlung, kann die Wärmestrahlung als Diffusionsprozess von Photonen betrachtet werden. Demnach kann eine anteilige Wärmeleitfähigkeit der Strahlung gebildet werden, vgl. Kapitel 3.4.4.

In Abbildung 2-1 ist die Wärmestrahlung über gelbe, wellenförmige Pfeile dargestellt. Detailliertere Beschreibungen des Wärmetransports über Strahlung finden sich beispielsweise in [22] und [41].

2.5 Zusammenfassung der Auswirkungen der wichtigsten Einflussgrößen auf die Wärmetransportmechanismen

In Tabelle 2-1 ist zusammenfassend aufgeführt, welche Größen sich verstärkend und welche sich abschwächend auf die unterschiedlichen Wärmetransportmechanismen auswirken. Die Angaben beziehen sich auf die in dieser Arbeit verwendeten hochporösen Dämmstoffschüttungen und auch auf z. T. getroffene vereinfachende Annahmen, die in den jeweiligen Unterkapiteln aufgeführt sind. Nach oben gerichtete Pfeile bedeuten eine Steigerung, nach unten gerichtete Pfeile eine Abschwächung der jeweiligen Größe. Ein waagerechter Strich bedeutet, dass keine Abhängigkeit besteht.

Tabelle 2-1: Auswirkung der Steigerung der wichtigsten Einflussgrößen auf die Wärmetransportmechanismen

| Einflussgröße | \dot{Q}_{Gas} | \dot{Q}_{FK} | \dot{Q}_{Kpl} | \dot{Q}_{Str} |
|--|-----------------|----------------|-----------------|-----------------|
| Temperatur ↑ | ↑ | - | ↑ | ↑ |
| Gasdruck ↑ | ↑ ¹⁾ | - | ↑ ¹⁾ | - |
| Porosität der Schüttung ↑ | ↑ | ↓ | ? ²⁾ | ↑ |
| Mittlere Porengröße ↑ | ↑ ¹⁾ | - | ↑ ¹⁾ | - |
| Wärmeleitfähigkeit des massiven Feststoffs ↑ | - | ↑ | ↑ | - |
| Extinktionskoeffizient ↑ | - | - | - | ↓ |

¹⁾ Gilt nicht im Bereich der Kontinuumsströmung

²⁾ Nicht eindeutig zu beantworten

3 Literaturübersicht

In diesem Kapitel werden die wichtigsten aus der Literatur bekannten Entwicklungen und Vorarbeiten zu denjenigen Themen vorgestellt, die für die vorliegende Arbeit am relevantesten sind. Neben dem Stand der Entwicklung von Vakuumwärmedämmungen und bisher verwendeten Vakuumwärmedämmstoffen sind dies die aus der Literatur bekannten Untersuchungen der effektiven Wärmeleitfähigkeit von Perliten und pyrogener Kieselsäure, sowie analytische Modellierungen der effektiven Wärmeleitfähigkeit von Dämmstoffschüttungen.

3.1 Vakuumwärmedämmungen

Ca. 1892 erfand JAMES DEWAR einen doppelwandigen Glasbehälter mit evakuiertem Zwischenraum [42]. Im Jahr 1907 wurde dieses Prinzip mit verspiegelten Innenwänden von REINHOLD BURGER in Form einer Thermoskanne zum Patent angemeldet [43]. Durch die Evakuierung kann im Wandzwischenraum die Wärmeübertragung durch Konvektion und bei hinreichend geringem Luftdruck und Wandabstand auch die Wärmeübertragung durch Gaswärmeleitung verringert bis eliminiert werden. Durch eine infrarotreflektierende Schicht, oft aus Silber, kann zudem der Wärmetransport über Strahlung verringert werden. Auch Wände aus Edelstahl werden oft eingesetzt, deren Oberflächen im Wandzwischenraum zur höheren Infrarotreflexion poliert sind. Zur Aufrechterhaltung des Vakuums bedarf es einer gasdichten Verbindung von Innen- zu Außenwand, über welche Festkörperwärmeleitung stattfindet. In Abbildung 3-1 sind unterschiedliche Entwicklungsstufen von DEWAR-Gefäßen und Thermoskannen abgebildet.

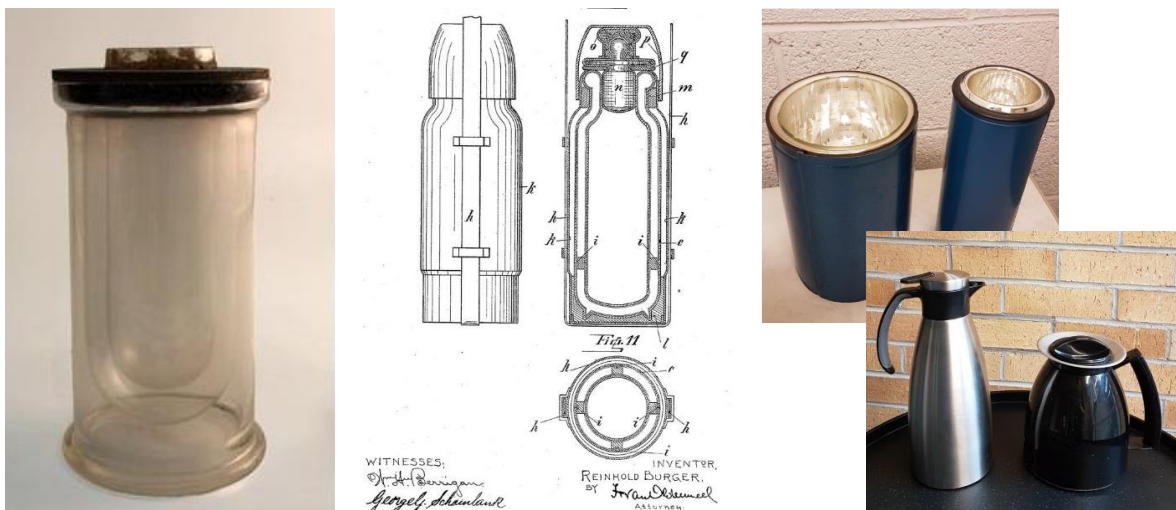


Abbildung 3-1: Links: Ein von JAMES DEWAR entwickeltes mehrwandiges Glasgefäß mit evakuiertem Wandzwischenraum [42]; Mitte: Funktionsskizze einer Thermoskanne aus dem ersten Patent von REINHOLD BURGER [43]; rechts: DEWAR-Gefäße (oben) und Thermoskannen (unten) heute.

Um den Wärmetransport über Strahlung weiter zu verringern, können mehrere Schichten infrarotreflektierender Folie orthogonal zur Wärmestromrichtung installiert werden, die in Abstand

gehalten werden müssen, um Wärmeleitung über die Folien zu verhindern. Diese Technologie der Multifolien-Dämmung wurde u. a. in doppelwandigen Tieftemperatur-Tanks verwendet.

Anfang der 1970er Jahre wurden verstärkt Vakuumwärmedämmungen mit porösen Wärmedämmstoffen entwickelt. Ein Beispiel dafür sind Vakuumdämmpaneele (meist bezeichnet als Vakuumisulationspaneele, VIP), bei welchen druckfeste, hochporöse und feinporige Platten als Wärmedämmstoffe zum Einsatz kommen, die von einer gasdichten Folie eingeschlossen werden. Die Funktionen der Wärmedämmstoffe sind die Verringerung der Wärmestrahlung durch Streuung und Absorption, sowie die Verringerung der Gaswärmeleitung bei möglichst hohen Vakuumdrücken durch die möglichst feinen Poren. Im Fall der Vakuumdämmpaneele haben die Wärmedämmstoffe zudem die Aufgabe den mechanischen Druck, resultierend aus dem Gas-Differenzdruck zur Umgebung, aufzunehmen.

Ein weiteres Beispiel für Vakuumwärmedämmungen mit porösen Wärmedämmstoffen sind doppelwandige Behälter. In diesem Fall, so wie im Fall der Thermoskanne, nehmen die aus Stahl gefertigten Wände den mechanischen Druck auf. Daher können Wärmedämmstoffe geringerer mechanischer Stabilität eingesetzt werden. Zunächst wurden diese doppelwandigen Behälter mit Vakuumwärmedämmung für Tieftemperaturanwendungen, wie zur Speicherung von Flüssiggasen, eingesetzt. Zu Beginn der 2010er Jahre wurde diese Technologie auch für Warmwasserspeicher adaptiert und auf den Markt gebracht [14], [19], siehe Abbildung 3-2.

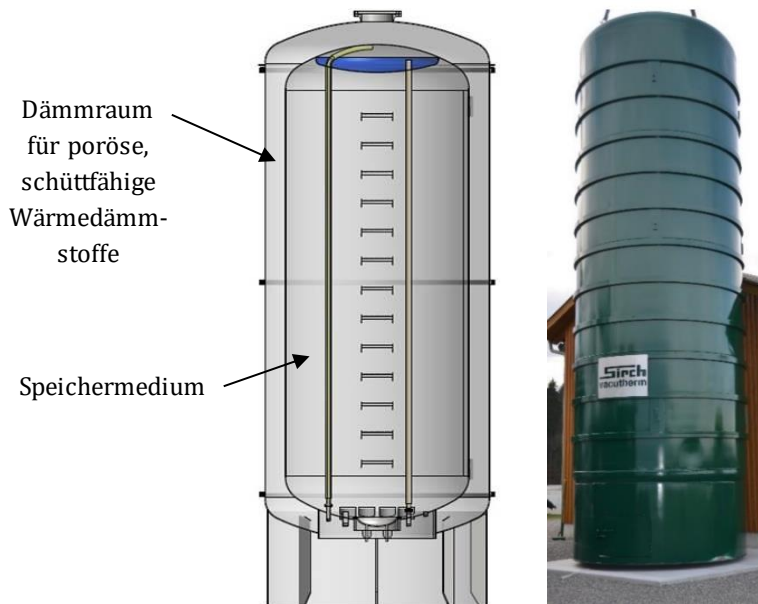


Abbildung 3-2: Doppelwandige Warmwasserspeicher mit Vakuumwärmedämmung [14], [44]

Die Wärmeverluste von Warmwasserspeichern mit Vakuumwärmedämmungen lassen sich gegenüber Warmwasserspeichern gleicher Größe mit belüfteter Wärmedämmung um den Faktor 5 bis 10 reduzieren [19]. In der vorliegenden Arbeit werden lose Dämmstoffschüttungen für die letztgenannte Vakuumwärmedämmtechnologie untersucht.

3.2 Vakuumwärmedämmstoffe

Im Allgemeinen werden Vakuumwärmedämmstoffe nach folgenden Hauptkriterien ausgewählt:

- hohe Porosität,
- Offenporigkeit,
- möglichst geringe mittlere Porengröße,
- ausgasungsarm im Vakuum,
- hohe Infrarot-Extinktion im Anwendungstemperaturbereich,
- möglichst hohe Verfügbarkeit,
- möglichst geringer Preis.

Die häufigste Art der technischen Vakuumwärmedämmung ist das Vakuumdämmpaneel. Als Vakuumwärmedämmstoff kommt in den meisten Fällen eine Mischung aus pyrogener Kieselsäure (siehe Kapitel 5.2), Kunststoff- oder Glasfasern und Strahlungshemmern, meist Siliziumkarbid (SiC), zum Einsatz. Darüber hinaus wurden in Vakuumdämmpaneelen u. a. bereits Glasfasern, Fällungskieselsäure, offeneporige Hartschäume, z. B. aus Polyurethan und Polystyrol, Silika-Aerogele, Perlite (siehe Kapitel 5.1) und Mischungen aus Perliten, pyrogener Kieselsäure und ggf. Strahlungshemmern verwendet [45], [46], [47], [48], [49], [50].

Für Vakuumdämmpaneele muss ein druckfester, formstabiler Körper als Vakuumwärmedämmstoff vorliegen, weshalb schüttfähige Stoffe wie pyrogene Kieselsäure zunächst zu Platten gepresst werden müssen. In Vakuumwärmedämmungen im Zwischenraum eines doppelwandigen Stahltanks können hingegen nichtformstabile Wärmedämmstoffe wie lose Schüttungen verwendet werden. Hier kommen zumeist Schüttungen aus expandierten Perliten zum Einsatz. Als Alternativen dazu gelten im Bereich von Tieftemperaturtanks vor allem Glasfasern, Mikro-Hohlglaskugeln und Silika-Aerogel-Granulat [51], [52], [53], [54]. Allerdings gibt es noch keine weite Verbreitung dieser alternativen Materialien in doppelwandigen Tanks, aufgrund der im Vergleich zu Perlit deutlich höheren Materialkosten. Nach Kenntnis des Autors kam in den kommerziell vermarkteten vakuumwärmedämmten Warmwasserspeichern bisher ausschließlich expandierter Perlit als Wärmedämmstoff zum Einsatz.

3.3 Experimentelle Untersuchungen der effektiven Wärmeleitfähigkeit von Perliten, pyrogener Kieselsäure und deren Mischungen in Vakuumwärmedämmungen

In der vorliegenden Arbeit werden Perlite, pyrogene Kieselsäure und Mischungen dieser Stoffe für den Einsatz in Vakuumwärmedämmungen untersucht. In diesem Kapitel werden daher zunächst bereits durchgeführte Untersuchungen zu diesen Stoffen aufgeführt.

Die meisten Untersuchungen der effektiven Wärmeleitfähigkeit von Perliten als lose Schüttung beschränken sich auf den Bereich zwischen Tief- und Umgebungstemperatur und bilden meist nur die Gasdruckabhängigkeit ab: [53], [55], [56], [57], [58], [59]. KAGANER untersuchte auch die Temperaturabhängigkeit von Perliten zwischen Tief- und Umgebungstemperatur, sowohl bei Atmosphärendruck, als auch im Vakuum, allerdings nicht für die jeweils gleichen Perlite [54]. Anfang der 1980er Jahre hat DEIMLING die effektive Wärmeleitfähigkeit von Perliten als lose Schüttung oberhalb der Umgebungstemperatur für den Gebrauch einer Vakuumwärmedämmung an Fernwärmerohren gemessen [60], [61]. Dabei wurden Perlite mit drei unterschiedlicher mittleren Korngrößen bei Variation des Gasdrucks und der Temperatur untersucht. Der Perlit Technoperl C1,5 der Firma Stauß Perlite wurde in [19], [62], [63], [64] für den Einsatz in einer Vakuumwärmedämmung für Warmwasserspeicher untersucht. Bei den Messungen der effektiven Wärmeleitfähigkeit wurden sowohl Gasdruck als auch Temperatur variiert. Perlite, verpresst zu Platten für Vakuumdämmpaneele, wurden in [34], [47], [48] untersucht.

Zur effektiven Wärmeleitfähigkeit von pyrogener Kieselsäure, gemischt mit dem Strahlungshemmer SiC und Fasern und verpresst zu formstabilen Platten, existieren zahlreiche Untersuchungen, da dies das am häufigsten verwendete Kernmaterial von Vakuumdämmpaneelen ist [33], [65], [66], [67]. Hingegen sind nur sehr wenige Untersuchungen zu losen Schüttungen dieser Mischung [65] oder reiner pyrogener Kieselsäure [68] veröffentlicht. Häufig fehlen zudem Temperaturangaben für die gemessenen effektiven Wärmeleitfähigkeiten.

Zu Mischungen aus Perliten und pyrogener Kieselsäure existieren sowohl ein Patent, als auch Untersuchungen der effektiven Wärmeleitfähigkeit [69], [70], [71]. Allerdings ausschließlich in Bezug auf ein Kernmaterial für Vakuumdämmpaneele und nicht als lose Schüttung.

3.4 Analytische Modellierungen der effektiven Wärmeleitfähigkeit von Dämmstoffschüttungen

3.4.1 Gesamtmodelle der effektiven Wärmeleitfähigkeit

Nach TSOTSAS und MARTIN [72] lassen sich die Grundstrukturen der Gesamtmodelle der effektiven Wärmeleitfähigkeit von Schüttungen in drei Modelltypen aufteilen, siehe Abbildung 3-3. Terme für den Wärmetransport über Strahlung und ggf. Konvektion können auf verschiedene Arten den jeweiligen Grundstrukturen hinzugefügt werden.

Für Modelltyp I muss das exakte Temperaturfeld in der Schüttung über die Lösung der Laplace-Gleichung für die Wärmeübertragung modelliert werden. Aufgrund der hohen Komplexität des Problems, gelingt dies nur für bestimmte Grenzfälle analytisch. Um die in der vorliegenden Arbeit behandelten Dämmstoffschüttungen hinreichend genau zu modellieren, wären numerische Lösungen erforderlich.

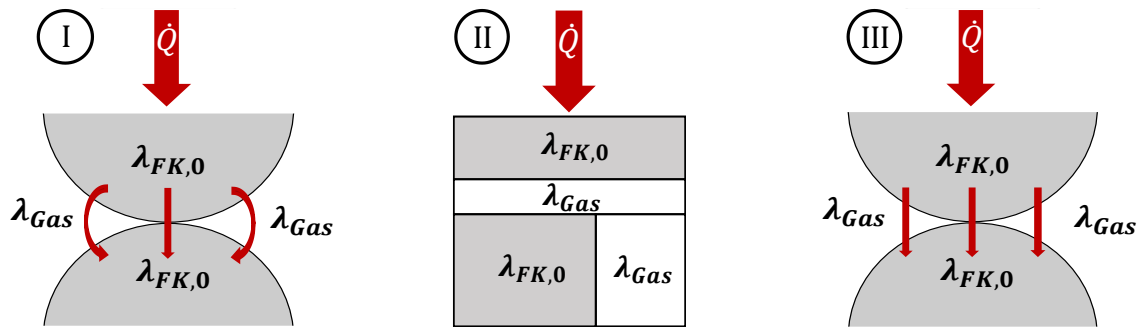


Abbildung 3-3: Grundstrukturen der Gesamtmodelle der effektiven Wärmeleitfähigkeit von Schüttungen. Links: Lösung der Laplace-Gleichung für das exakte Temperaturfeld innerhalb der Schüttung (Modelltyp I); Mitte: Modellierung der Schüttung als Verschaltung von seriellen und parallelen Widerständen (Modelltyp II); rechts: Einheitszelle für die vereinfachende Annahme paralleler Wärmestromlinien (Modelltyp III). $\lambda_{FK,0}$: Wärmeleitfähigkeit des massiven Festkörpers; λ_{Gas} : Gas-Wärmeleitfähigkeit

In Modelltyp III wird eine Einheitszelle aus zwei sich berührenden Halbkugeln und dem dazugehörigen Zwischenraum betrachtet, welche die gesamte Schüttung repräsentiert. Dabei wird vereinfachend von parallelen Wärmestromlinien oder parallelen Isothermen ausgegangen. Das heute gängigste Modell der Einheitszelle, welches sehr häufig für Schüttungen niedriger und mittlerer Porosität aus massiven Körnern verwendet wird, stammt von ZEHNER, BAUER und SCHLÜNDER [38], [39], [40]. Dieses Modell verwendet parallele Wärmestromlinien und korrigiert diese Vereinfachung durch einen von der Porosität der Einheitszelle abhängigen Verformungsparameter. Damit werden beispielsweise kugelförmige Körner als von der Kugelform abweichende Körner berechnet. Über einen zusätzlichen, empirisch zu bestimmenden, Formfaktor können Schüttungen aus Körnern, die tatsächlich von der Kugelform abweichen, abgebildet werden. Zudem ist ein sogenannter Abflachungskoeffizient vorhanden, mit dem die lokale Abflachung der Körner an der Berührstelle, aufgrund der Hertzchen Pressung, berücksichtigt werden kann. Damit kann letztlich auch die Abhängigkeit des Kopplungseffekts von der Form des Kornes berücksichtigt werden. Auch dieser Parameter muss für die jeweilige Schüttung empirisch ermittelt werden. Das Modell besitzt demnach keine vollständige Prädiktivität bzgl. beliebiger Schüttungen.

Für Modelltyp II wird die Schüttung als eine Verschaltung aus Wärmewiderständen, entsprechend der auftretenden Wärmetransportmechanismen, betrachtet. Die Verschaltung kann entweder seriell, parallel oder als eine Kombination dieser Verschaltungsarten modelliert werden.

Gängige Modelle des Modelltyp II stammen u. a. von KRISCHER, KAST und KRÖLL [73], [74]. Das gängigste Modell für hochporöse Dämmstoffschüttungen wie Vakuumwärmedämmungen ist das Superpositionsprinzip, was einer rein parallelen Verschaltung der Wärmewiderstände entspricht. Dahinter steht die Annahme, dass sämtliche Wärmetransportmechanismen unabhängig voneinander ablaufen. Wenn in der Realität jedoch signifikante Kopplungen der einzelnen Wärmetransportmechanismen auftreten, kann ein entsprechender Kopplungsterm als weiterer

paralleler Wärmewiderstand hinzugefügt werden. Dies ist in der vorliegenden Arbeit für die Kopplung aus Gas- und Festkörperwärmeleitung der Fall. Nach dem Superpositionsprinzip können die Kehrwerte der einzelnen Wärmewiderstände als anteilige Wärmeleitfähigkeiten zu einer effektiven Wärmeleitfähigkeit λ_{eff} [W/(m·K)] aufsummiert werden, siehe Gleichung (3-1).

$$\lambda_{eff} = \lambda_{Gas} + \lambda_{FK} + \lambda_{Kpl} + \lambda_{Str} \quad (3-1)$$

Mit:

- λ_{Gas} : Gas-Wärmeleitfähigkeit [W/(m·K)]
- λ_{FK} : Festkörper-Wärmeleitfähigkeit [W/(m·K)]
- λ_{Kpl} : Kopplungseffekt-Wärmeleitfähigkeit [W/(m·K)]
- λ_{Str} : Strahlungs-Wärmeleitfähigkeit [W/(m·K)]

Unterschiedliche Einzelmodelle der anteiligen Wärmeleitfähigkeiten, die in das Gesamtmodell nach dem Superpositionsprinzip eingesetzt werden können, sind in den nachfolgenden Kapiteln aufgeführt. Detailliertere Literaturübersichten der unterschiedlichen Gesamtmodelle finden sich neben [72] auch in [28] und [75].

3.4.1 Modelle der Gaswärmeleitung

Für die Modellierung der Gaswärmeleitung in Vakuumwärmedämmungen werden Modelle benötigt, welche neben der Temperaturabhängigkeit auch die Abhängigkeit von Gasdruck und Porengröße abbilden. In [76] sind die wichtigsten analytischen Modelle der Gaswärmeleitung aufgeführt, kategorisiert und miteinander verglichen. Ein weit verbreitetes und für zahlreiche unterschiedliche poröse Medien gut erprobtes Modell wurde von KAGANER [54] entwickelt und ist in Gleichung (3-2) dargestellt. Dieses Modell basiert auf der von SMOLUCHOWSKI experimentell nachgewiesenen Temperatursprung-Theorie [25].

$$\lambda_{Gas} = \frac{\lambda_{Gas,Kont}}{1 + 2 \cdot \beta_{Gas} \cdot Kn} = \frac{\lambda_{Gas,Kont}}{1 + 2 \cdot \beta_{Gas} \cdot l_{m,Gas}/d_p} \quad (3-2)$$

Mit:

- d_p : mittlerer Porendurchmesser [m]

Die gasabhängige Konstante β_{Gas} [-] wird von KAGANER gemäß Gleichung 3-3 berechnet:

$$\beta_{Gas} = \frac{9 \cdot \kappa - 5}{2 \cdot (\kappa + 1)} \cdot \frac{2 - \alpha}{\alpha} \quad (3-3)$$

Mit:

- κ : Isentropenexponent [-]
- α : Akkommodationskoeffizient [-]

Für β_{Gas} können unterschiedliche Berechnungen oder Tabellenwerte eingesetzt werden. SCHWAB verwendet beispielsweise die Berechnung gemäß Gleichung (3-4) [33]:

$$\beta_{Gas} = \frac{5 \cdot \pi}{32} \cdot \frac{9 \cdot \kappa - 5}{\kappa + 1} \cdot \frac{2 - \alpha}{\alpha} \quad (3-4)$$

Gleichung (3-2) wird auch oft gemäß Gleichung (3-5) umgestellt, wobei sich der Halbwertsdruck $p_{0,5}$ [Pa], bei welchem gilt: $\lambda_{Gas} = 0,5 \cdot \lambda_{Gas,Kont}$, aus Gleichung (2-2) und (3-2) zu Gleichung (3-6) berechnet.

$$\lambda_{Gas} = \frac{\lambda_{Gas,Kont}}{1 + p_{0,5}/p} \quad (3-5)$$

$$p_{0,5} = \beta_{Gas} \cdot \frac{k \cdot T}{\sqrt{2} \cdot A_M \cdot d_p} \quad (3-6)$$

In den Gleichungen (3-2) und (3-5) wird die Porengrößenverteilung des Wärmedämmstoffs, zusammengefasst in einem mittleren Porendurchmesser, abgebildet. Für poröse Medien mit einer weiten Porengrößenverteilung kann die Vereinfachung eines gemittelten Porendurchmessers allerdings unzureichend sein. Für diesen Fall kann das Modell von KAGANER beispielsweise nach dem Ansatz von REICHENAUER gemäß Gleichung (3-7) erweitert werden, um in einer Schüttung aus porösen Körnern sowohl einen mittleren Durchmesser der Kornporen $d_{p,K}$ [m] als auch einen mittleren Durchmesser der Kornzwischenraum-Poren $d_{p,ZK}$ [m] abzubilden [36]:

$$\lambda_{Gas} = f_{Gas,K} \cdot \frac{\lambda_{Gas,Kont}}{1 + 2 \cdot \beta_{Gas} \cdot l_{m,Gas}/d_{p,K}} + f_{Gas,ZK} \cdot \frac{\lambda_{Gas,Kont}}{1 + 2 \cdot \beta_{Gas} \cdot l_{m,Gas}/d_{p,ZK}} \quad (3-7)$$

Mit:

$f_{Gas,K}$: Gasvolumenanteil innerhalb der Kornporen bezogen auf das Gesamtvolumen des Wärmedämmstoffs [-]

$f_{Gas,ZK}$: Gasvolumenanteil im Kornzwischenraum bezogen auf das Gesamtvolumen des Wärmedämmstoffs [-]

Hierbei können beliebig viele Terme aufaddiert werden, um eine weitere Porengrößenverteilung abzubilden.

Zudem wurden empirische Modelle der Gaswärmeleitung entwickelt. Eines davon, das sich besonders für weite Porengrößenverteilungen eignet, ist das Modell von ZENG gemäß Zahlenwertgleichung (3-8) [77]:

$$\lambda_{Gas} = \frac{\lambda_{Gas,Kont}}{1 + C_{Gas,Zeng,1}/(d_p \cdot p^{C_{Gas,Zeng,2}})} \quad (3-8)$$

Darin sind $C_{Gas,Zeng,1}$ und $C_{Gas,Zeng,2}$ Konstanten, die sich verwenden lassen, um das Modell an Messwerte anzunähern.

3.4.2 Modelle der Festkörperwärmeleitung

Aufgrund der hohen Komplexität der Festkörperpfade durch reale polydisperse Schüttungen aus porösen Körnern und der schwer zu ermittelnden Kontaktwiderstände zwischen den Körnern,

gelingt die Vorhersage der zu erwartenden Festkörperwärmeleitung in solchen Medien meistens nicht exakt und zuverlässig. Existierende Modelle der Festkörperwärmeleitung von Schüttungen, beruhen entweder auf dem Prinzip der HERTZ'schen Pressung [78], durch welche die Kontaktfläche zwischen kugelförmigen Körnern anhand der mechanischen Eigenschaften des Feststoffs ermittelt werden soll, oder es handelt sich um empirische Modelle in Abhängigkeit von der Porosität oder Dichte der Schüttung und Anpassungsparametern. Die für beide Ansätze meist benötigte Wärmeleitfähigkeit des massiven Festkörpers $\lambda_{FK,0}$ [W/(m·K)] kann beispielsweise Literaturwerten entnommen werden. Ein häufig verwendetes Modell der Festkörper-Wärmeleitfähigkeit nach der HERTZschen Pressung wurde von KAGANER formuliert, siehe Gleichung (3-9) [54].

$$\lambda_{FK} = \lambda_{FK,0} \cdot 3,44 \cdot (1 - f_{Gas,ZK})^{4/3} \cdot \left(\frac{1 - \nu}{Y}\right)^{1/3} \cdot p_{ext}^{1/3} \quad (3-9)$$

Mit:

- ν : Querkontraktionszahl der Körner [-]
 Y : E-Modul der Körner [Pa]
 p_{ext} : externer mechanischer Druck [Pa]

Die meisten empirischen Modelle bilden die Proportionalität der Festkörper-Wärmeleitfähigkeit zur Dichte der Dämmstoffschüttung ρ [kg/m³] gemäß Formel (3-10) mit dem Dichteexponent b als Anpassungsparameter ab [34], [79].

$$\lambda_{FK} \sim \rho^b \quad (3-10)$$

Für Schäume gestaltet sich die Vorhersage der Festkörperwärmeleitung einfacher als für Schüttungen und es existieren dazu zahlreiche Modelle. Häufig wird das Modell von RUSSEL verwendet [80], das auch die Wärmeleitung über die Gasphase mit einschließt, siehe Gleichung (3-11). Darin ist Ψ [-] die Porosität des Schaums. Da in Schäumen keine signifikante Kopplung von Gas- und Festkörperwärmeleitung auftritt, kann die anteilige Festkörper-Wärmeleitfähigkeit nach dem Superpositionsprinzip gemäß Gleichung (3-12) durch Abzug der Gas-Wärmeleitfähigkeit λ_{Gas} berechnet werden.

$$\lambda_{Sch,FK+Gas} = \lambda_{FK,0} \cdot \frac{\Psi^{2/3} + (\lambda_{FK,0}/\lambda_{Gas}) \cdot (1 - \Psi^{2/3})}{\Psi^{2/3} - \Psi + (\lambda_{FK,0}/\lambda_{Gas}) \cdot (1 - \Psi^{2/3} + \Psi)} \quad (3-11)$$

$$\lambda_{FK} = \lambda_{Sch,FK+Gas} - \lambda_{Gas} \quad (3-12)$$

Mit:

- $\lambda_{Sch,FK+Gas}$: Festkörper- und Gas-Wärmeleitfähigkeit durch einen Schaum [W/(m·K)]

3.4.3 Modelle des Kopplungseffekts

In den meisten Modellen der Einheitszelle ist die Kopplung aus Gas- und Festkörperwärmeleitung implizit enthalten. Beim Superpositionsprinzip hingegen muss sie als separater Term des Kopplungseffekts definiert und hinzuaddiert werden.

Nach DEMHARTER und BEIKIRCHER lässt sich der Kopplungseffekt für expandierten Perlit aus der Serienschaltung der Wärmewiderstände des Festkörpers und des Gases gemäß Gleichung (3-13) modellieren [19], [62], [64]. Dabei ist s_{FK} [-] die anteilige Wegstrecke des Wärmestroms durch die beteiligte Festkörperphase bezogen auf die Gesamtstrecke und s_{Gas} [-] die anteilige Wegstrecke des Wärmestroms durch die beteiligte Gasphase bezogen auf die Gesamtstrecke, womit gilt: $s_{Gas} = 1 - s_{FK}$. Die Gas-Wärmeleitfähigkeit im Zwischenraum der Perlitkörner $\lambda_{Gas,ZK}$ [W/(m·K)] wird nach Gleichung (3-2) unter Verwendung des mittleren Durchmessers der Kornzwischenraum-Poren $d_{p,ZK}$ als mittlerer Porendurchmesser berechnet.

$$\lambda_{Kpl} = f_{Gas,ZK} \cdot \left[\frac{s_{FK}}{\lambda_{FK,0}} + \frac{s_{Gas}}{\lambda_{Gas,ZK}} \right]^{-1} \quad (3-13)$$

Für expandierte Perlite gilt $\lambda_{FK,0} \gg \lambda_{Gas,ZK}$. Außerdem lassen sich die Größen s_{Gas} und s_{FK} nicht geeignet messtechnisch erfassen. Daher verwenden DEMHARTER und BEICKIRCHER letztlich das vereinfachte Modell nach Gleichung (3-14), welches sich dementsprechend aus Gleichung (3-13) ergibt. Der darin enthaltene Skalierungsfaktor F [-] wird zur Anpassung an Messwerte variiert. Das gleiche Modell wird auch von SWIMM für Aerogele verwendet [30].

$$\lambda_{Kpl} = \lambda_{Gas,ZK} \cdot \left(\frac{f_{Gas,ZK}}{s_{Gas}} \right) = \lambda_{Gas,ZK} \cdot F \quad (3-14)$$

SWIMM verwendet zusätzlich, so wie auch PARZINGER und ZHAO, Einheitszellenmodelle zur Beschreibung des Kopplungseffekts, welche dann nach dem Superpositionsprinzip zu den übrigen Wärmetransportmechanismen hinzuaddiert werden [30], [37], [75], [81]. Auch das Modell von ZHAO muss durch einen freien Parameter an Messwerte angepasst werden, ebenso wie das Modell von SWIMM auf Basis einer kubischen Einheitszelle. Das von SWIMM entwickelte Modell auf Basis der Einheitszelle von ZEHNER, BAUER, SCHLÜNDER benötigt für kugelförmige, massive Körner keinen Anpassungsparameter. Für Aerogele bildet es experimentelle Daten allerdings nicht treffend ab. Für Kugelschüttungen zeigt es nach PARZINGER wiederum gute Übereinstimmungen mit Messwerten. Für das Modell wird die zylindrische Einheitszelle von SWIMM in 1000 Hohlzylinder aufgeteilt. Für jeden dieser Hohlzylinder muss die Gas-Festkörper-Kopplung aus seriellen Wärmewiderständen nach dem Prinzip von Gleichung (3-13) berechnet werden. Die Ergebnisse aus den einzelnen Hohlzylindern werden schließlich aufsummiert. Um dies mit möglichst geringem Aufwand zu bewerkstelligen, sind letztlich numerische Methoden notwendig.

3.4.4 Modelle der Wärmestrahlung

Die in der vorliegenden Arbeit untersuchten Wärmedämmstoffe sind weitestgehend optisch dick und die Festkörperstrukturen besitzen zu einem überwiegenden Anteil Durchmesser, die kleiner sind als die Wellenlänge der Strahlung. Somit kann Wärmestrahlung in diesen Stoffen als Diffusionsprozess von Photonen betrachtet werden. Nach ROSSELAND kann für den

Strahlungsanteil des gesamten Wärmestroms durch ein poröses Medium demnach auch eine anteilige Wärmeleitfähigkeit gemäß Gleichung (3-15) definiert werden [22], [82].

$$\lambda_{str} = \frac{16 \cdot \sigma \cdot n_{eff}^2}{3 \cdot e_R \cdot \rho} \cdot T_{Str}^3 \quad (3-15)$$

Mit:

σ : STEFAN-BOLTZMANN-Konstante [W/(m²·K⁴)]

n_{eff} : effektiver Brechungsindex [-]

T_{Str} : Strahlungsmitteltemperatur [K]

e_R : ROSSELAND-Mittel des dichtespezifischen Extinktionskoeffizienten [m²/kg]

Die ROSSELAND-Mittelung resultiert aus einer Integration des dichtespezifischen Extinktionskoeffizienten über der Wellenlänge. Im Folgenden wird e_R für eine bessere Lesbarkeit nur als dichtespezifischer Extinktionskoeffizient bezeichnet. Das Produkt aus e_R und ρ ist das ROSSELAND-Mittel des Extinktionskoeffizienten E_R [1/m], das im Folgenden als Extinktionskoeffizient bezeichnet wird. Für die Gültigkeit von Gleichung (3-15) wird die Temperaturunabhängigkeit von e_R und eine optische Dicke $\tau_0 > 15$ vorausgesetzt. Die optische Dicke τ_0 [-] ist mit der Dicke des Mediums d [m] gemäß Gleichung (3-16) definiert.

$$\tau_0 = d \cdot e_R \cdot \rho = d \cdot E_R \quad (3-16)$$

Der effektive Brechungsindex n_{eff} kann bei sehr hoher Porosität des Mediums in guter Näherung gleich 1 gesetzt werden [28]. Die kubische Strahlungsmitteltemperatur T_{Str}^3 berechnet sich für den Strahlungsaustausch zwischen zwei planparallelen Wänden mit den Wandtemperaturen T_1 [K] und T_2 [K] gemäß Gleichung (3-17).

$$T_{Str}^3 = \frac{T_1^4 - T_2^4}{4 \cdot (T_1 - T_2)} \quad (3-17)$$

Das ROSSELAND'sche Diffusionsmodell nach Gleichung (3-15) wird in den meisten Veröffentlichungen für die Modellierung der Wärmestrahlung in hochporösen Wärmedämmstoffen mit geringen Porengrößen verwendet und ist gut validiert.

4 Zielsetzung der vorliegenden Arbeit

Wie in Kapitel 3.1 beschrieben, wurden doppelwandige Warmwasserspeicher mit Vakuumwärmedämmung erst in den frühen 2010er Jahren, und damit kurz vor dem Beginn der Arbeiten zur vorliegenden Dissertation, entwickelt. Basis für diese Technologie waren die nahezu baugleichen Behälter für Tieftemperaturanwendungen. Wie auch in den meisten Fällen der Behälter für Tieftemperaturen, wurde für die kommerziell vermarkteten doppelwandigen Warmwasserspeicher bis dahin nach Kenntnis des Autors ausschließlich expandierter Perlit in Form einer losen Schüttung als Wärmedämmstoff eingesetzt, siehe Kapitel 3.2.

Das Hauptziel der vorliegenden Arbeit ist die Identifikation von möglichst kostengünstigen Wärmedämmstoffen, die sehr geringe effektive Wärmeleitfähigkeiten bereits bei höheren, und damit technisch einfacher herzustellenden, Vakuumdrücken erzielen als die bisher für die gleiche Technologie verwendeten Wärmedämmstoffe. Mit diesen Wärmedämmstoffen wäre damit auch eine längere Beständigkeit der Dämmwirkung bei ansteigendem Gasdruck, aufgrund von unvermeidlichen Leckagen, zu erwarten.

Aufgrund der geringen Materialkosten und der günstigen thermischen Eigenschaften im Vergleich zu Wärmedämmstoffen mit ähnlichen Kosten, bleibt expandierter Perlit die Basis der Untersuchungen der vorliegenden Arbeit. Es sollen zunächst Perlite unterschiedlicher Hersteller und mittlerer Korngrößen untersucht werden. Bereits DEIMLING untersuchte die effektive Wärmeleitfähigkeit von Perliten mit drei unterschiedlichen mittleren Korngrößen experimentell bei Variation des Vakuumdrucks und der Temperatur, allerdings lediglich bis zu einem minimalen Luftdruck von ca. 0,1 mbar [60]. Bei diesem Druck liegt noch ein signifikanter Anteil an Gaswärmeleitung und Kopplungseffekt vor, so das sich aus diesen Untersuchungen keine hinreichend genauen Erkenntnisse zum Kopplungseffekt ableiten lassen. In der vorliegenden Arbeit sollen Messungen bis $\leq 0,02$ mbar durchgeführt werden, um u. a. den Kopplungseffekt in Abhängigkeit von der mittleren Korngröße zu bestimmen. Zudem wird eine höhere Messgenauigkeit und Präzision im Vergleich zu den Untersuchungen von DEIMLING angestrebt. Zu diesem Zweck soll eine Versuchsanlage zur Messung der effektiven Wärmeleitfähigkeit entwickelt und aufgebaut werden.

Außerdem untersucht werden sollen Mischungen aus expandiertem Perlit und pyrogener Kieselsäure, die auf der einen Seite einen höheren Preis und eine geringere Infrarot-Extinktion besitzt, aber auf der anderen Seite den Wärmetransport über das Gas bereits bei höheren Vakuumdrücken unterbinden kann. Dabei soll das optimal Mischungsverhältnis hinsichtlich thermischer Eigenschaften und Kosten identifiziert werden. Diese Materialmischungen sollen im Rahmen der vorliegenden Arbeit erstmals in Form von losen Schüttungen untersucht werden.

Die Literaturrecherche hat ergeben, dass letztlich alle Gesamtmodelle der effektiven Wärmeleitfähigkeit, die für die in der vorliegenden Arbeit untersuchten Wärmedämmstoffe geeignet wären,

über Anpassungsparameter an Messwerte angeglichen werden müssen und damit nicht vollständig prädiktiv sind. Für prädiktive Teilmodelle werden wiederum häufig Stoffgrößen benötigt, die nur mit großem Messaufwand zu bestimmen sind. Ein weiteres Hauptziel der vorliegenden Arbeit ist daher die Entwicklung von einfachen und möglichst vollständig prädiktiven analytischen Modellen der effektiven Wärmeleitfähigkeit sowie der einzelnen Wärmetransportmechanismen von expandierten Perliten und deren Mischungen mit pyrogener Kieselsäure. Es soll damit für einen Hersteller von Vakuumwärmedämmungen möglich sein, den idealen Wärmedämmstoff für seine Anwendung zu identifizieren, ohne Messungen der effektiven Wärmeleitfähigkeit durchführen zu müssen. Dafür sollten so wenige und so einfach zu messende Dämmstoffgrößen wie möglich benötigt werden. Systematische Messungen der effektiven Wärmeleitfähigkeit sowie Dämmstoffuntersuchungen in der vorliegenden Arbeit sollen dazu dienen, Anpassungsparameter durch empirisch ermittelte Funktionen zu ersetzen, um eine vollständige Prädiktivität der analytischen Modelle zu erreichen.

5 Untersuchte Wärmedämmstoffe

In diesem Kapitel werden jeweils zunächst Herstellung und Eigenschaften von expandiertem Perlit und pyrogener Kieselsäure gezeigt, bevor die Herstellerangaben der konkret untersuchten Produkte und die grundlegenden Eigenschaften der daraus generierten Proben für die Messung der effektiven Wärmeleitfähigkeit genannt werden. Zudem werden die aus den expandierten Perlit hergestellten Siebungen sowie die Mischungen aus expandiertem Perlit und pyrogener Kieselsäure aufgeführt.

5.1 Expandierter Perlit

Rohperlit, der Ausgangsstoff für expandierten Perlit, ist verwitterter Obsidian vulkanischen Ursprungs. Bei der Verwitterung wird ca. 2 – 5 % Kristallwasser eingeschlossen. Zur Herstellung von expandiertem Perlit, wird der Rohperlit gemahlen und innerhalb kurzer Zeit auf über 900 °C erhitzt. Dabei erweicht das Gestein und das eingeschlossene Kristallwasser verdampft, wodurch kleine Poren entstehen und sich das Volumen der Körner um ca. den Faktor 20 erhöht. Der expandierte Perlit besteht danach aus weißen oder grauen Schaumkörnern (siehe Abbildung 5-1 und Abbildung 5-2) mit einer chemischen Zusammensetzung von:

- 71 – 75 % SiO₂,
- 12,5 – 18 % Al₂O₃,
- 4 – 5 % K₂O,
- 1 – 4 % Natrium- und Kalziumoxide,
- geringe Spuren von anderen Metalloxiden und Metallen.

Die Reindichte des massiven Feststoffs beträgt ca. 2200 – 2400 kg/m³ und die effektive Wärmeleitfähigkeit des massiven Feststoffs wird in unterschiedlichen Veröffentlichungen mit Werten zwischen 0,7 und 1,3 W/(m·K) angegeben. Expandierter Perlit wird, neben dem Einsatz als Wärmedämmstoff, beispielsweise auch als Leichtzuschlag für Putze und Mörtel, in der Agrikultur zur Auflockerung von Böden, zur Filterung von Flüssigkeiten, wie u. a. auch Bier, oder als abrasiver Stoff in Zahncremes verwendet. [20], [54], [60], [83], [84], [85], [86]

5.1.1 Grobkörniger expandierter Perlit

Der expandierte Perlit Technoperl C1,5 der Firma Stauß Perlite wird in der vorliegenden Arbeit als grobkörniger expandierter Perlit (GEP) bezeichnet. Dieses Material wird speziell für die Vakuumwärmedämmung, vorwiegend für Tieftemperaturanwendungen, hergestellt. Es wurde bereits in [19], [62], [64] untersucht und sowohl von der Firma Hummelsberger, als auch zeitweise von der Firma Sirch in vakuumwärmegedämmten Warmwasserspeichern eingesetzt. Es wurde in der vorliegenden Arbeit aufgrund der damit vorliegenden Vergleichswerte und aufgrund der geringen volumenbezogenen Materialkosten zur Untersuchung ausgewählt. Die

Herstellerangaben zu GEP sind in Tabelle 5-1 aufgeführt. Als Schüttdichte wird die Dichte einer losen, unverdichteten Schüttung bezeichnet.

Tabelle 5-1: Herstellerangaben zu grobkörnigem expandiertem Perlit (GEP) [87].

| | |
|------------------------------|--------------------------|
| Herstellerbezeichnung | Technoperl C1,5 |
| Korndurchmesser | ca. 0 – 2 mm |
| Schüttdichte | ca. 53 kg/m ³ |
| Preis | ca. 1 €/kg ¹⁾ |

¹⁾ Berechnet aus dem vom Hersteller angebotenen Preis von 70 €/m³ und der Dichte im Auslieferungszustand in 2,6 m³ BigBags von ca. 70 kg/m³. Alle in der vorliegenden Arbeit genannten Preise enthalten keine Umsatzsteuer

In Abbildung 5-1 sind eine Fotografie und eine Lichtmikroskop-Aufnahme von GEP dargestellt.

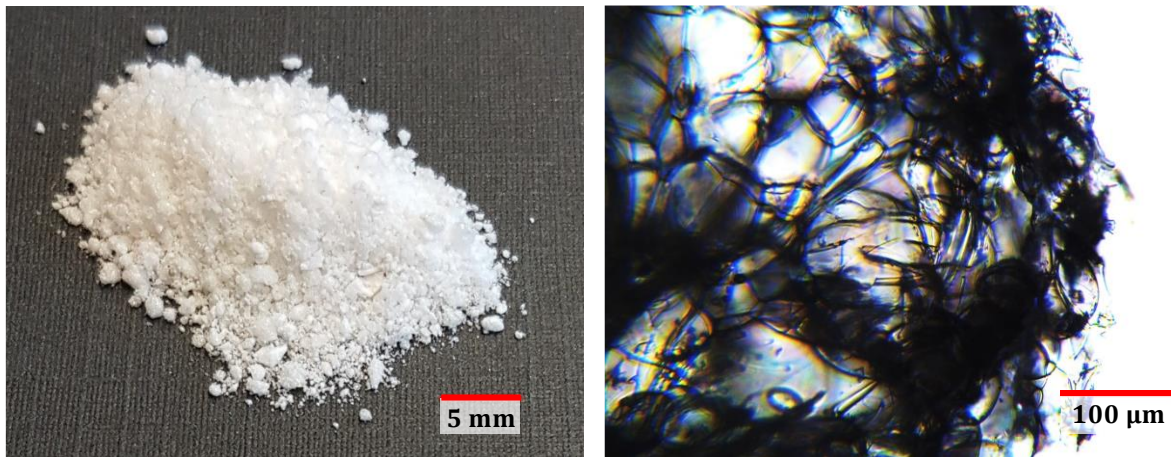


Abbildung 5-1: Grobkörniger expandierter Perlit (GEP). Links: Fotografie; rechts: Lichtmikroskop-Aufnahme (Durchlicht) eines Kornes

In der Fotografie ist die breite Korngrößenverteilung und in der Lichtmikroskop-Aufnahme die Schaumstruktur der Körner zu erkennen.

Für die Messungen der effektiven Wärmeleitfähigkeit in der vorliegenden Arbeit wurde durch Rütteln der Messapparatur, welche die Probe enthält, eine Dichte des GEP von 73 kg/m³ erreicht.

5.1.2 Expandierter Perlit mittlerer Körnung

Der expandierte Perlit Volite 500 der Firma Knauf Performance Materials wird in der vorliegenden Arbeit als mittelgrobkörniger expandierter Perlit (MEP) bezeichnet. Die Herstellerangaben zu MEP sind in Tabelle 5-2 aufgeführt.

Tabelle 5-2: Herstellerangaben zu mittelgrobkörnigem expandiertem Perlit (MEP) [88]

| | |
|------------------------------|---------------------------|
| Herstellerbezeichnung | Volite 500 |
| Korndurchmesser | ca. 0 – 0,5 mm |
| Schüttdichte | ca. 150 kg/m ³ |

MEP wurde nur zur Herstellung der Siebung mit dem Korngrößenbereich 0,2 – 0,5 mm verwendet, siehe Kapitel 5.1.5, da GEP in diesem Korngrößenbereich einen hohen Anteil massiver Körner besitzt. Für die Untersuchungen wurde von Knauf Performance Materials ein kostenfreies Muster bereitgestellt. Eine Preisauskunft wurde nicht gegeben und es sind keine Preislisten für dieses Material veröffentlicht.

5.1.3 Feinkörniger expandierter Perlit

Der expandierte Perlit Volite 200 der Firma Knauf Performance Materials wird in der vorliegenden Arbeit als feinkörniger expandierter Perlit (FEP) bezeichnet. Dieses Material wird vorwiegend als Leichtzuschlag in Leichtbeton, Mörtel und Putz eingesetzt. Es wurde allerdings auch zeitweise von der Firma Sirch in vakuumwärmegeämmten Warmwasserspeichern verwendet. FEP wurde aufgrund der durch die kleinen Körner zu erwartenden geringen mittleren Kornzwischenraum-Porengröße zur Untersuchung ausgewählt. Die Herstellerangaben zu FEP sind in Tabelle 5-3 aufgeführt.

Tabelle 5-3: Herstellerangaben zu feinkörnigem expandiertem Perlit (FEP) [89]

| | |
|------------------------------|-------------------------------|
| Herstellerbezeichnung | Volite 200 |
| Korndurchmesser | ca. 0 – 0,2 mm |
| Schüttdichte | $(140 \pm 20) \text{ kg/m}^3$ |
| Preis | 0,9 €/kg ¹⁾ |

¹⁾ Berechnet aus dem vom Hersteller angebotenen Preis von 126 €/m³ und einer Dichte im Auslieferungszustand von 140 kg/m³

In Abbildung 5-2 sind eine Fotografie und eine Lichtmikroskop-Aufnahme von FEP dargestellt. In der Lichtmikroskop-Aufnahme ist gut die Schaumstruktur der Körner zu erkennen.

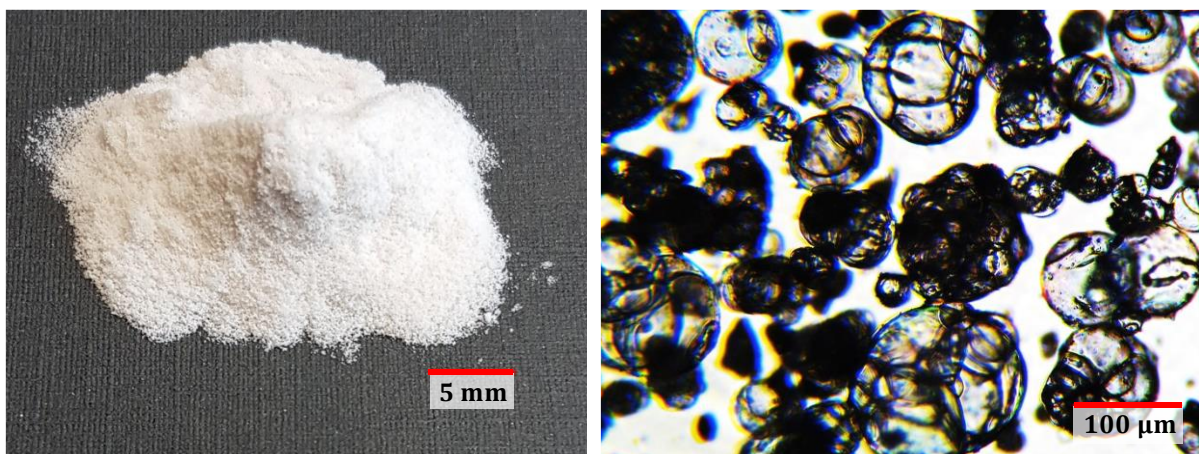


Abbildung 5-2: Feinkörniger expandierter Perlit (FEP). Links: Fotografie; rechts: Lichtmikroskop-Aufnahme (Durchlicht)

Für die Messungen der effektiven Wärmeleitfähigkeit in der vorliegenden Arbeit wurde durch Rütteln der Messapparatur, welche die Probe enthält, eine Dichte des FEP von 182 kg/m³ erreicht.

5.1.4 Gemahlener expandierter Perlit

Der expandierte Perlit Filterperlit D12 der Firma Knauf Performance Materials wird in der vorliegenden Arbeit als gemahlener expandierter Perlit (GemEP) bezeichnet. Er wird nach der Expansion gemahlen und vorwiegend als Filterhilfsmittel eingesetzt. Gemahlener Perlit eignet sich auch für den Einsatz in Vakuumdämmpaneelen, in welchen er komprimiert wird. Gegen den Einsatz in Vakuumwärmedämmungen als lose Schüttung spricht, dass er sich im Laufe der Zeit und durch Erschütterungen leichter nachverdichtet als ungemahlener Perlit, wodurch Hohlräume entstehen können, die als Wärmebrücken wirken. Die Herstellerangaben zu GemEP sind in Tabelle 5-4 aufgeführt.

Tabelle 5-4: Herstellerangaben zu gemahlenem expandiertem Perlit (GemEP) [90]

| | |
|------------------------------|----------------------------------|
| Herstellerbezeichnung | Filterperlit D12 |
| Korndurchmesser | ca. 0 – 45 μm |
| Schüttdichte | ca. $(82 \pm 16) \text{ kg/m}^3$ |

In Abbildung 5-3 sind eine Fotografie und eine Lichtmikroskop-Aufnahme von GEP dargestellt.

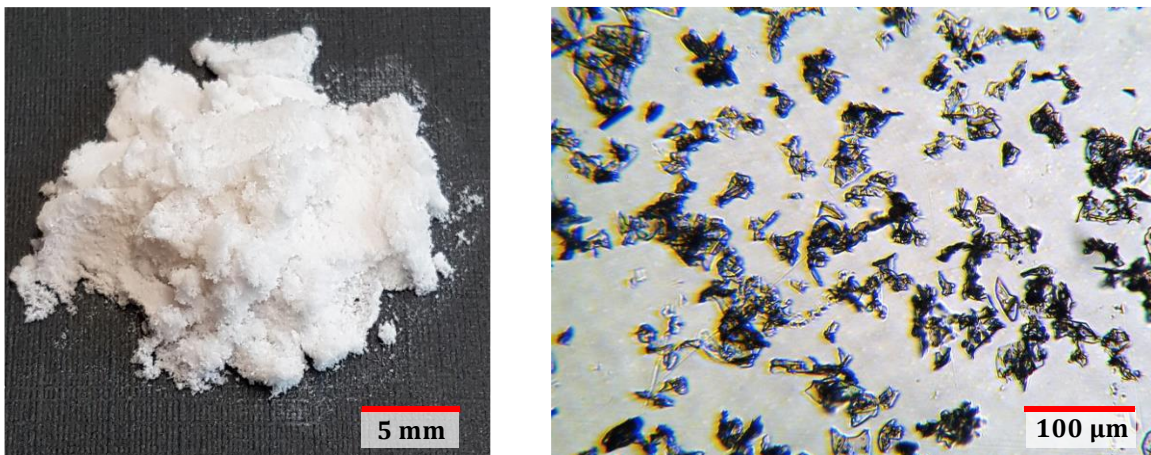


Abbildung 5-3: Gemahlener expandierter Perlit (GemEP). Links: Fotografie; rechts: Lichtmikroskop-Aufnahme

In der Lichtmikroskop-Aufnahme ist gut zu erkennen, dass durch das Mahlen nach der Expansion nur noch Schaumsplitter vorliegen und keine geschlossenen Zellen mehr.

GemEP wurde nur zur Messung der Reindichte von Perlit verwendet, siehe Kapitel 6.2. Für die Untersuchungen wurde von Knauf Performance Materials ebenfalls ein kostenfreies Muster bereitgestellt. Eine Preisauskunft wurde nicht gegeben und es sind keine Preislisten für dieses Material veröffentlicht.

5.1.5 Siebungen expandierter Perlite

Um den Effekt der mittleren Korngröße auf die effektive Wärmeleitfähigkeit, insbesondere auf den Kopplungseffekt, genauer bestimmen zu können, wurden aus den Materialien GEP, MEP und FEP die in Tabelle 5-5 dargestellten Siebungen hergestellt.

Tabelle 5-5: Untersuchte Siebungen expandierter Perlite

| Korndurchmesser | Ausgangsmaterial | Bezeichnung | Dichte der Probe |
|-----------------|------------------|--------------|-----------------------|
| 1 – 2 mm | GEP | GEP(1-2) | 52 kg/m ³ |
| 0,5 – 1 mm | GEP | GEP(0,5-1) | 48 kg/m ³ |
| 0,2 – 0,5 mm | MEP | MEP(0,2-0,5) | 90 kg/m ³ |
| 0,1 – 0,2 mm | FEP | FEP(0,1-0,2) | 79 kg/m ³ |
| 0 – 0,1 mm | FEP | FEP(0-0,1) | 258 kg/m ³ |

Zur Herstellung der Mischungen wurden Edelstahl-Analysesiebe mit quadratischen Maschen und Maschenweiten entsprechend der in Tabelle 5-5 aufgeführten Grenzkorndurchmesser verwendet. Die Herstellung der Siebungen erfolgte händisch.

5.2 Pyrogene Kieselsäure

Pyrogene Kieselsäure wird aus Chlorsilan (SiCl_4) durch Flammhydrolyse in einer Wasserstoff-Sauerstoff-Flamme hergestellt. Dabei entstehen, neben HCl als Nebenprodukt, kugelförmige Primärpartikel aus hochreinem amorphem SiO_2 mit Korndurchmessern von 5 – 50 nm, die in der Flamme zu fadenförmigen, dreidimensional vernetzten Aggregaten (Sekundärpartikeln) verschmelzen, die einen Korndurchmesser von 0,1 – 1 μm besitzen. Diese Aggregate verbinden sich durch Verschränkungen der Kettenarme zu Agglomeraten (Tertiärpartikeln) mit einer Korngröße von ca. 1 – 250 μm . Durch externen mechanischen Druck lassen sich darüber hinaus beliebig große Agglomerate bilden. In seiner unbehandelten Form ist pyrogene Kieselsäure hydrophil, ebenso wie expandierte Perlite. Durch Anbindung von Organo-Siliziumverbindungen an der Oberfläche, lässt sich die pyrogene Kieselsäure hydrophobieren. [91]

In Abbildung 5-4 links ist die Struktur eines Aggregats der pyrogenen Kieselsäure schematisch dargestellt. Rechts sind Rasterelektronenmikroskop-Aufnahmen zu sehen. In Abbildung 5-5 und Abbildung 5-6 sind Fotografien und Lichtmikroskop-Aufnahmen von pyrogener Kieselsäure abgebildet. Pyrogene Kieselsäure wird, neben der Verwendung als Kernmaterial von Vakuumdämmpaneelen, eingesetzt als Verdickungsmittel, u. a. für Farben, Lacke und Kunststoffe, als Rieselhilfsmittel für Pulver und Granulate, wie z. B. auch Speisesalz, und zur Erhöhung der Festigkeit von Lacken und Elastomeren, beispielsweise auch von Schuhsohlen oder Autoreifen [91], [92].

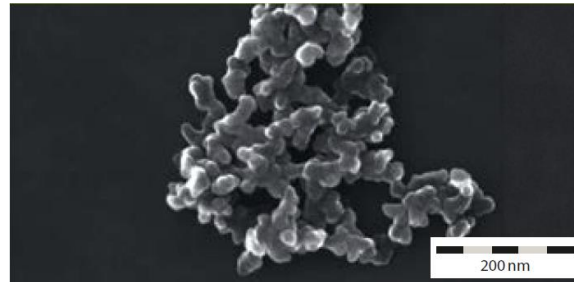
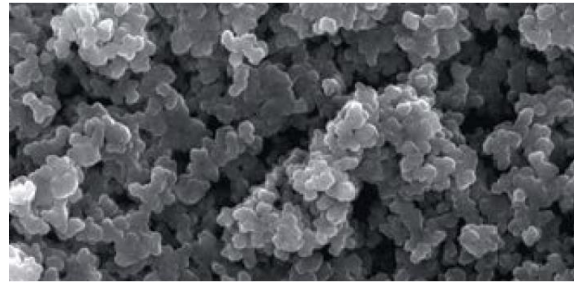
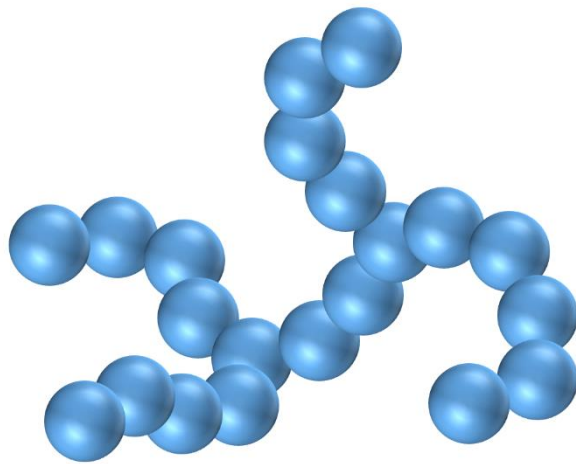


Abbildung 5-4: Struktur von pyrogener Kieselsäure. Links: schematische Darstellung der Struktur eines Aggregats. Rechts: Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme eines Agglomerats (oben) und eines Aggregats (unten) [92] in gleicher Vergrößerung

5.2.1 Unbehandelte pyrogene Kieselsäure

In der vorliegenden Arbeit wurde die unbehandelte pyrogene Kieselsäure (UPKS) HDK T30 der Firma Wacker Chemie untersucht. In Tabelle 5-6 sind die wichtigsten Herstellerangaben aufgeführt.

Tabelle 5-6: Herstellerangaben zur unbehandelten pyrogenen Kieselsäure (UPKS) [93], [94]

| | |
|---|-----------------------------|
| Herstellerbezeichnung | HDK T30 |
| Korndurchmesser Primärpartikel | 10 – 15 nm |
| Korndurchmesser Sekundärpartikel (Aggregat) | 100 – 150 nm |
| Korndurchmesser Tertiärpartikel (Agglomerat) | > 10 µm |
| Spezifische Oberfläche nach BET¹⁾ | 270 – 330 m ² /g |
| Schüttdichte | ca. 40 kg/m ³ |
| Preis | 4,5 €/kg |

¹⁾ Modell zur Bestimmung von massenspezifischen Oberflächen poröser Substanzen aus Messwerten der Gassorption; erstmals publiziert von BRUNAUER, EMMETT und TELLER [95]

In Abbildung 5-5 sind eine Fotografie und eine Lichtmikroskop-Aufnahme von UPKS dargestellt. In der Fotografie sind vergleichsweise große Agglomerate zu erkennen, die sich bei UPKS bereits bei geringem externen Druck bilden. In der Lichtmikroskop-Aufnahme ist lediglich die äußere Form der Agglomerate zu erkennen. Die feine Struktur der UPKS (vgl. Abbildung 5-4) lässt sich mit der Auflösung eines Lichtmikroskops jedoch nicht darstellen.

Für die Messungen der effektiven Wärmeleitfähigkeit in der vorliegenden Arbeit wurde durch Rütteln der Messapparatur eine Dichte der UPKS von 42 kg/m³ erreicht.

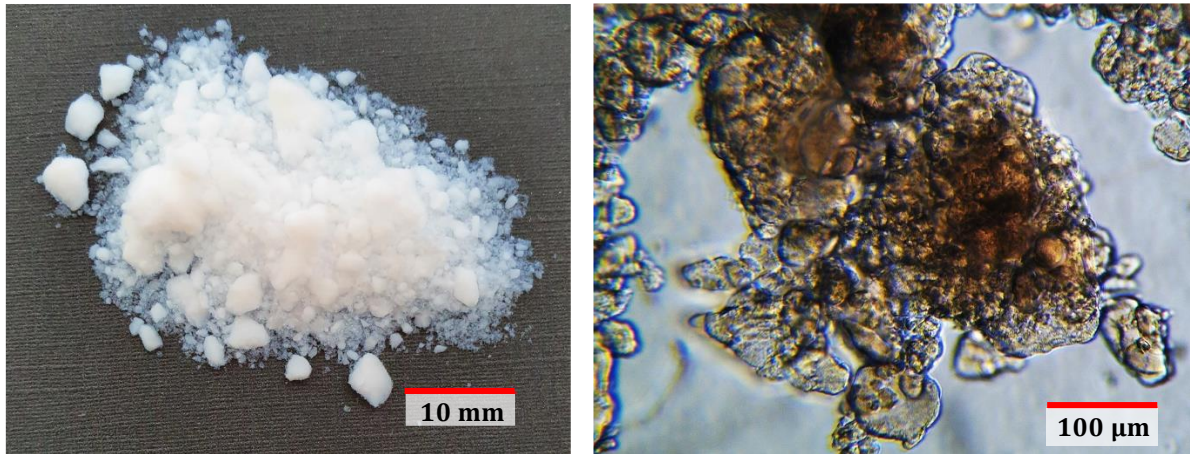


Abbildung 5-5: Unbehandelte pyrogene Kieselsäure (UPKS). Links: Fotografie; rechts: Lichtmikroskop-Aufnahme (Durchlicht)

5.2.2 Hydrophobierte pyrogene Kieselsäure

Zusätzlich zur unbehandelten pyrogenen Kieselsäure (UPKS) wurde die hydrophobierte Variante (HPKS) des gleichen Materials untersucht. In Tabelle 5-7 sind die wichtigsten Herstellerangaben aufgeführt. Bis auf den Preis sind die aufgeführten Herstellerangaben von HPKS gleich wie für UPKS. HPKS wurde verwendet, da sie weniger dazu neigt große Agglomerate zu bilden als UPKS. Daraus resultiert eine kleinere und reproduzierbarere Körnung der Tertiärpartikel. Dies ist insbesondere für die Mischungen mit GEP wichtig, bei welchen sich die feineren Körner der HPKS zwischen die gröberen Perlitkörner einlagern sollen. Ein weiterer Vorteil von HPKS gegenüber UPKS ist die geringere Evakuierungsdauer, da sich aufgrund der Hydrophobierung weniger Feuchtigkeit in der Struktur einlagert, die durch die Druckabsenkung sukzessive in die Gasphase übergeht. Demgegenüber steht der um den Faktor 1,8 höhere Preis gegenüber UPKS.

Tabelle 5-7: Herstellerangaben zur hydrophobierten pyrogenen Kieselsäure (HPKS) [93], [96]

| | |
|---|-----------------------------|
| Herstellerbezeichnung | HDK H30 |
| Korndurchmesser Primärpartikel | 10 - 15 nm |
| Korndurchmesser Sekundärpartikel (Aggregat) | 100 - 150 nm |
| Korndurchmesser Tertiärpartikel (Agglomerat) | > 10 µm |
| Spezifische Oberfläche nach BET | 270 - 330 m ² /g |
| Schüttdichte | ca. 40 kg/m ³ |
| Preis | 8 €/kg |

In Abbildung 5-6 sind eine Fotografie und eine Lichtmikroskop-Aufnahme von HPKS dargestellt. In beiden Aufnahmen ist die deutlich geringere Größe der Agglomerate der HPKS im Vergleich zu UPKS zu erkennen. Für die Messungen der effektiven Wärmeleitfähigkeit in der vorliegenden Arbeit wurde durch Rütteln der Messapparatur eine Dichte der HPKS von 44 kg/m³ erreicht.

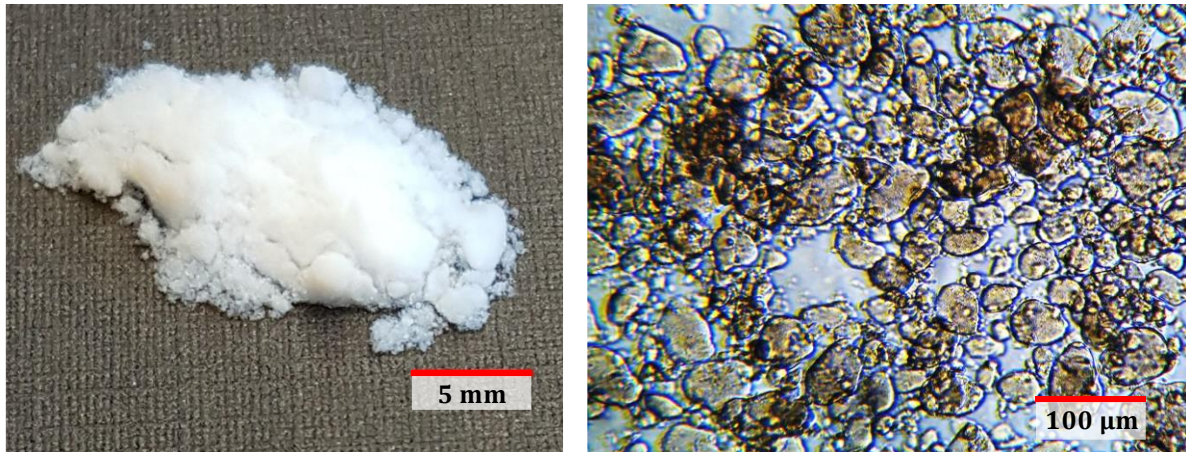


Abbildung 5-6: Hydrophobierte pyrogene Kieselsäure (HPKS). Links: Fotografie; rechts: Lichtmikroskop-Aufnahme (Durchlicht)

5.3 Mischungen

In der vorliegenden Arbeit wurden Mischungen aus GEP und HPKS untersucht. Mit diesem Ansatz sollen die Vorteile beider Wärmedämmstoffe kombiniert und die jeweiligen Nachteile ausgeglichen werden. Mit HPKS gelingt bereits bei höheren, und damit einfacher herzustellenden und aufrechtzuerhaltenden, Vakuumdrücken die Eliminierung der Gaswärmeleitung und des Kopplungseffekts. Zudem ist die anteilige Festkörperwärmeleitung geringer. GEP hat hingegen eine größere Infrarot-Extinktion und hemmt damit Wärmestrahlung effektiver. Zudem hat es einen deutlich geringeren Preis. Wenn die feinkörnigere HPKS die Zwischenräume der GEP-Körner und ggf. auch hinreichend weit geöffnete Poren der GEP-Körner ideal ausfüllt, ist zu erwarten, dass die effektive Wärmeleitfähigkeit bei einfach zu handhabenden Vakuumdrücken zwischen 1 mbar und 10 mbar geringer ist als die der jeweiligen einzelnen Wärmedämmstoffe. Ein Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, das optimale Mischungsverhältnis hinsichtlich thermischer Eigenschaften und Kosten zu identifizieren.

In Abbildung 5-7 ist die erwartete Struktur der Mischung schematisch, zweidimensional dargestellt.

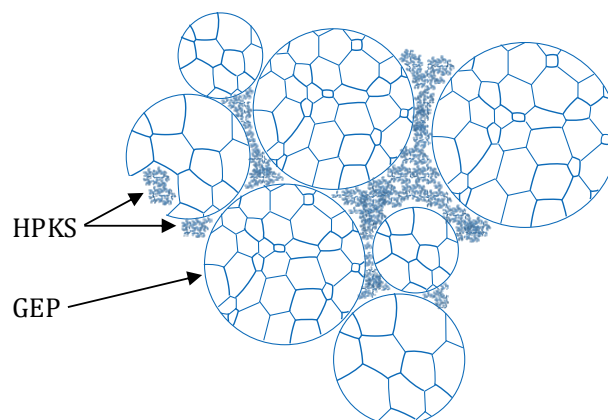


Abbildung 5-7: Schematische Struktur einer Mischung aus GEP und HPKS

In Tabelle 5-8 sind die untersuchten Mischungen mit ihren Anteilen in Massenprozent (Mass.-%) und die in der Messapparatur erreichten Dichten aufgeführt.

Tabelle 5-8: Untersuchte Mischungen aus GEP und HPKS

| Bezeichnung | Anteil GEP | Anteil HPKS | Dichte der Probe |
|--------------------|-------------------|--------------------|-------------------------|
| GEP-HPKS-90:10 | 90 Mass.-% | 10 Mass.-% | 104 kg/m ³ |
| GEP-HPKS-80:20 | 80 Mass.-% | 20 Mass.-% | 87 kg/m ³ |
| GEP-HPKS-70:30 | 70 Mass.-% | 30 Mass.-% | 83 kg/m ³ |
| GEP-HPKS-60:40 | 60 Mass.-% | 40 Mass.-% | 74 kg/m ³ |

6 Charakterisierung der untersuchten Wärmedämmstoffe

In diesem Kapitel werden Methoden und Ergebnisse der Ermittlung aller Stoffgrößen gezeigt, die für die vorliegende Arbeit relevant sind. Die Dämmstoffcharakterisierung dient u. a. der Einordnung der Messwerte, vor allem aber der Gewinnung von Stoffparametern für die analytische Modellierung der effektiven Wärmeleitfähigkeit, die in Kapitel 10 beschrieben wird.

6.1 Mittlerer Korndurchmesser expandierter Perlite

Die Kenntnis des mittleren Korndurchmessers dient zum einen der vereinfachten Bestimmung eines mittleren Durchmessers der Kornzwischenraum-Poren gemäß Kapitel 6.4. Zum anderen hat sich gezeigt, dass der Kopplungseffekt expandierter Perlite vom mittleren Korndurchmesser abhängt. Diese Größe geht daher in die Modellierung des Kopplungseffekts mit ein, siehe Kapitel 10.1.3. In bestimmten Korngrößenbereichen kann der mittlere Korndurchmesser auch Auswirkungen auf die Extinktion von Wärmestrahlung haben, was für die in der vorliegenden Arbeit behandelten Wärmedämmstoffe jedoch nicht von Relevanz ist. Für die Modellierung der effektiven Wärmeleitfähigkeit der pyrogenen Kieselsäuren ist der mittlere Korndurchmesser hingegen in der vorliegenden Arbeit nicht relevant, da ein anderer Modellansatz gewählt wurde. Daher wurde dieser für UPKS und HPKS nicht untersucht.

In den meisten Fällen wird als Korndurchmesser oder Korngröße der Durchmesser einer volumengleichen Kugel definiert. Auch in der vorliegenden Arbeit wird diese Definition verwendet, da die Perlitkörner einer Kugelform ähnlich sind. Ein mittlerer Korndurchmesser kann anhand unterschiedlicher Gewichtungen definiert sein. Für die in der vorliegenden Arbeit betrachteten Phänomene hat ein volumengewichtet gemittelter Korndurchmesser $d_{K,vm}$ [m] die größte Aussagekraft. Für Schüttungen, bei welchen für einen stark überwiegenden volumetrischen Anteil der Körner Durchmesser $> 100 \mu\text{m}$ erwartbar sind und bei welchen Korndurchmesser $> 2 \text{ mm}$ auftreten können, wird der volumengewichtet gemittelte Korndurchmesser meist über eine Siebanalyse des Materials bestimmt. Die Grenzkörner² jeder Siebfraction werden durch die Maschenweiten der Siebe definiert. Als mittlere Korndurchmesser der N Siebfractionen gelten die arithmetischen Mittelwerte der Grenzkörner $d_{Fr,m,i}$ [m]. Jeder Wert $d_{Fr,m,i}$ wird gemäß Gleichung (6-1) mit dem Volumen der entsprechenden Siebfraction $V_{Fr,i}$ [m³] multipliziert, durch die Summe aller N Siebfraction-Volumina geteilt und zum volumengewichtet gemittelten Korndurchmesser $d_{K,vm,Sieb}$ [m] aufsummiert. Grundlagen und Vorschriften zur Durchführung der Siebanalyse sind u. a. in DIN 66165 definiert.

$$d_{K,vm,Sieb} = \frac{\sum_{i=1}^N V_{Fr,i} \cdot d_{Fr,m,i}}{\sum_{i=1}^N V_{Fr,i}} \quad (6-1)$$

Für Schüttungen, bei welchen für einen stark überwiegenden volumetrischen Anteil der Körner Durchmesser $< 100 \mu\text{m}$ erwartbar sind und bei welchen keine Korndurchmesser $> 2 \text{ mm}$

² Körner mit dem größten und kleinsten Durchmesser einer Schüttung

auftreten, wird meist eine Laserdiffraktometrie zur Bestimmung der Korngrößenverteilung und mittlerer Korndurchmesser durchgeführt. Die Korndurchmesser $d_{K,i}$ werden bei dieser Messmethode über die Beugung eines Laserstrahls an den N Körnern bestimmt. Das Messprinzip wird u. a. in [97], [98] genauer beschrieben. Als volumengewichtet gemittelter Korndurchmesser kann aus dieser Messmethode der DE BROUCKERE-Durchmesser $d_{K,vm,DB}$ [m] gemäß Gleichung (6-2) bestimmt werden, worin $V_{K,i}$ [m³] die einzelnen Kornvolumina sind .

$$d_{K,vm,DB} = \frac{\sum_{i=1}^N V_{K,i} \cdot d_{K,i}}{\sum_{i=1}^N V_{K,i}} = \frac{\sum_{i=1}^N d_{K,i}^4}{\sum_{i=1}^N d_{K,i}^3} \quad (6-2)$$

Bei $d_{K,vm,DB}$ wird lediglich das Volumen der Körner berücksichtigt, während bei der Bestimmung von $d_{K,vm,Sieb}$ das gesamte Volumen der Schüttungen, mitsamt des Kornzwischenraums miteinbezogen wird. Daraus ergibt sich eine unbekannt systematische Abweichung der Größen $d_{K,vm,DB}$ und $d_{K,vm,Sieb}$. Zudem resultiert eine unbekannt Abweichung aus den unterschiedlichen Bestimmungen der einzelnen Korndurchmesser. Allerdings lässt sich das Messverfahren nicht für alle Schüttungen beliebig auswählen. Die Laserdiffraktometrie ist nach [99] nur bis zu einem maximalen Korndurchmesser von 2 mm möglich, wobei der optimale Messbereich zwischen 40 nm und 100 µm liegt. Trocken-Siebanalysen liefern wiederum nur für Korndurchmesser > 40 µm zuverlässige Ergebnisse [100]. Ein Ziel der Modellierung der effektiven Wärmeleitfähigkeit in der vorliegenden Arbeit ist zudem, lediglich Stoffgrößen zu benötigen, die möglichst einfach und kostengünstig zu bestimmen sind. Ideal ist es daher, auf Herstellerdaten zurückgreifen zu können, womit sich für den Anwender der Wärmedämmstoffe kein zusätzlicher Messaufwand ergibt. Die Herstellerdaten können jedoch nach unterschiedlichen Messmethoden ermittelt worden sein.

In Tabelle 6-1 sind die volumengewichtet gemittelten Korndurchmesser für alle Stoffe aufgeführt, für welche diese Größe in der vorliegenden Arbeit relevant ist.

Tabelle 6-1: Volumengewichtet gemittelte Korndurchmesser ungemahlener expandierter Perlite

| Probe | $d_{K,vm,Sieb}$ | Quelle | $d_{K,vm,DB}$ | Quelle |
|--------------|-----------------------------------|------------------|---------------------------------|---------------|
| GEP | 0,47 mm | Hersteller [101] | - | - |
| FEP | - | - | 0,091 mm | Eigenmessung |
| GEP(1-2) | 1,5 mm | Eigenmessung | - | - |
| GEP(0,5-1) | 0,75 mm | Eigenmessung | - | - |
| MEP(0,2-0,5) | 0,35 mm | Eigenmessung | 0,361 mm | Eigenmessung |
| FEP(0,1-0,2) | 0,15 mm | Eigenmessung | 0,139 mm | Eigenmessung |
| FEP(0-0,1) | 0,05 mm | Eigenmessung | 0,051 mm | Eigenmessung |

Für alle expandierten Perlite mit Korndurchmessern $\leq 0,5$ mm wurde eine Laserdiffraktometrie am Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik der Universität Stuttgart durchgeführt und gemäß Gleichung (6-2) ausgewertet. Dabei kam das Messgerät Mastersizer 3000 der Firma

Malvern Panalytical zum Einsatz. Für alle expandierten Perlite mit Korndurchmessern $> 0,5$ mm, sowie der vom Autor erstellten Siebungen, wurden Siebanalysen ausgewertet. Für GEP wurde die vom Hersteller Stauß Perlite durchgeführte Siebanalyse gemäß Gleichung (6-1) ausgewertet. Bei den Siebungen GEP(1-2), GEP(0,5-1), MEP(0,2-0,5), FEP(0,1-0,2) und FEP(0-0,1) handelt es sich um einzelne Siebfraktionen, weshalb $d_{K,vm,Sieb}$ aus dem arithmetische Mittel der Grenzkörner gebildet wird.

Für diejenigen Stoffe, für welche der volumengewichtet gemittelte Korndurchmesser sowohl mittels Siebanalyse als auch mittels Laserdiffraktometrie bestimmt wurde, resultieren nur geringe Abweichungen der Ergebnisse beider Methoden von < 8 %. Welche Methode zu höheren Werten führt hängt von der Korngrößenverteilung der Schüttungen ab und ist anhand dieser Stichprobe nicht eindeutig zu beantworten.

In Herstellerdatenblättern von expandierten Perliten ist es üblich, für Stoffe mit Korndurchmessern $\leq 0,5$ mm Ergebnisse einer Laserdiffraktometrie anzugeben und für Stoffe mit Korndurchmessern $> 0,5$ mm Ergebnisse einer Siebanalyse. Da für die in der vorliegenden Arbeit entwickelten analytischen Modelle der effektiven Wärmeleitfähigkeit soweit möglich auf Herstellerdaten zurückgegriffen werden soll, werden im Weiteren die dementsprechenden mittleren Korndurchmesser verwendet.

6.2 Reindichte und mittlere Korndichte expandierter Perlite

Als Reindichte wird die Dichte des massiven Festkörpers bezeichnet. Die mittlere Korndichte expandierter Perlite wird, in Kombination mit der Reindichte, zum einen zur Berechnung der effektiven Korn-Wärmeleitfähigkeit benötigt, die zur Modellierung des Kopplungseffekts verwendet wird, siehe Kapitel 10.1.3. Zum anderen wird damit der Kornzwischenraum-Volumenanteil berechnet, welcher sowohl für die Modellierung des Kopplungseffekts als auch zur Modellierung der Luft-Wärmeleitfähigkeit benötigt wird, siehe Kapitel 10.1.1. Des Weiteren lässt sich der Volumenanteil der Kornporen am Gesamtvolumen des expandierten Perlits bestimmen, welcher ebenfalls für die Modellierung der Luft-Wärmeleitfähigkeit benötigt wird.

Für die Modellierung der effektiven Wärmeleitfähigkeit von pyrogenen Kieselsäuren ist die mittlere Korndichte der Aggregate und Agglomerate hingegen in der vorliegenden Arbeit nicht relevant, da ein anderer Modellansatz gewählt wurde. Die Reindichte kann Literaturwerten entnommen werden. Daher beschränkt sich dieses Kapitel auf expandierte Perlite.

Die Reindichte expandierter Perlite kann anhand des Prinzips der Flüssigkeitsverdrängung mit dem gemahlten Perlit GemEP (siehe Kapitel 5.1.4) in der Messflüssigkeit Wasser bestimmt werden. GemEP besteht aus Schaumsplittern, deren Zwischenräume vollständig mit Wasser gefüllt werden können. Dadurch eignet sich dieses Material zur Bestimmung der Reindichte von expandiertem Perlit. Bei den ungemahlten Perliten wird zunächst davon ausgegangen, dass die Kornporen, aufgrund der kleinen Öffnungen und der großen Oberflächenspannung des Wassers,

innerhalb der Messdauer nicht von Wasser gefüllt werden. Unter dieser Voraussetzung kann nach dem gleichen Prinzip die mittlere Dichte poröser, ungemahlener Perlitkörner bestimmt werden.

In der vorliegenden Arbeit wurde zur Bestimmung der Reindichte sowie der mittleren Korndichten nach dem Prinzip der Flüssigkeitsverdrängung das in Abbildung 6-1 gezeigte Mess-equipment verwendet.



Abbildung 6-1: Messequipment für die Messung von mittlerer Korndichte und Reindichte von expandierten Perliten

Zunächst wird das Füllvolumen $V_{Füll,SG}$ [m³] und die Masse des Schraubglases bestimmt. Daraufhin wird die Probe des expandierten Perlits in das Glas gefüllt und die Probenmasse m_{Probe} [kg] mittels der Feinwaage AG285 der Firma Mettler Toledo gemessen. Im Anschluss wird der Deckel aufgeklebt und das Schraubglas mit Probe und Deckel erneut gewogen um die Masse von Deckel und Klebstoff zu ermitteln. Durch das Textil des Deckels kann das Wasser durch die Kanüle der Spritze eingebracht werden, während die verdrängte Luft entweichen kann und die Probe wiederum im Schraubglas verbleibt. Nachdem das Wasser sämtliche Zwischenräume der Perlitkörner gefüllt hat und das Schraubglas bis zum oberen Rand ausfüllt, wird die Anordnung erneut gewogen. Da die Dichte des Wassers in Abhängigkeit von der Wassertemperatur bekannt ist, kann aus den Wägungen das Volumen des Wassers V_W [m³] bestimmt werden und damit auch gemäß Gleichung (6-3) die mittlere Korndichte des gemahlener oder ungemahlener Perlits ρ_K [kg/m³].

$$\rho_K = \frac{m_{Probe}}{V_{Füll,SG} - V_W} \quad (6-3)$$

Es wurden jeweils mindestens drei Messungen für jeden Perlittyp durchgeführt, mindestens jedoch so viele wie benötigt wurden, um eine relative Standardabweichung < 15 % zu erreichen. Das Messverfahren lässt sich auch mit handelsüblichen Flüssigkeitspyknometern durchführen, die bereits für niedrige zweistellige Euro-Beträge erworben werden können.

Die Reindichte von GemEP wurde im arithmetischen Mittel zu 2391 kg/m³ bestimmt. Dieser Wert zeigt eine hohe Übereinstimmung mit Literaturwerten. In [54] wird eine Reindichte von 2400 kg/m³ angegeben und in [102] wird für Obsidian, das Ausgangsmaterial von Perlit, eine

Reindichte von 2394 kg/m^3 aufgeführt. Zudem wurde die Reindichte an GemEP von der Firma Micromeritics per Quecksilberintrusion bestimmt. Der hierbei ermittelte Wert von 2435 kg/m^3 liegt ebenfalls sehr nah am Wert, der sich aus der Messung mittels Flüssigkeitsverdrängung mit Wasser ergibt. Das Verfahren der Quecksilberintrusion wird beispielsweise in [103] beschrieben und ist u. a. nach ISO 15901-1 genormt.

Die mittleren Korndichten der ungemahlten expandierten Perlite sind in Tabelle 6-2 aufgeführt.

Tabelle 6-2: Mittlere Korndichten ungemahlener expandierter Perlite

| Probe | Mittlere Korndichte |
|--------------|----------------------------|
| GEP | 206 kg/m^3 |
| FEP | 296 kg/m^3 |
| GEP(1-2) | 125 kg/m^3 |
| GEP(0,5-1) | 137 kg/m^3 |
| MEP(0,2-0,5) | 190 kg/m^3 |
| FEP(0,1-0,2) | 140 kg/m^3 |
| FEP(0-0,1) | 327 kg/m^3 |

Die Unterschiede in den gemessenen mittleren Korndichten lassen sich auf verschiedene Ursachen zurückführen. Zum einen kann durch unterschiedliche Parameter im Herstellverfahren die Wandstärke der Perlit-Schaumkörner beeinflusst werden. Zum anderen existieren in den ausgelieferten Perliten unterschiedliche Anteile an massiven Körnern, die sich während des Herstellprozesses nicht aufblähen ließen. Das kann u. a. an einem unzureichenden Gehalt an Kristallwasser im Rohperlit liegen, aber auch daran, dass es sich um ein Fremdgestein ohne gebundenes Kristallwasser handelt, welches mitgefördert und verarbeitet wurde. Da sich die Schaumkörner gegenüber den ungeblähten, massiven Körnern um ca. den Faktor 20 im Volumen vergrößern, liegen die massiven Körner im unteren Bereich der Korngrößenverteilung. Das zeigt sich bei FEP, welches vollständig in die zwei Siebfraktionen FEP(0,1-0,2) und FEP(0-0,1) geteilt wurde. Die Siebung mit den kleineren Korndurchmessern FEP(0-0,1) weist mit 327 kg/m^3 eine deutlich höhere mittlere Korndichte auf als die Siebung mit den größeren Korndurchmessern FEP(0,1-0,2) mit 140 kg/m^3 . Bei den Ausgangsmaterialien GEP und MEP wurden die Siebungen, die sich im Bereich der massiven Körner befinden nicht verwendet, weshalb die übrigen Siebungen geringere mittlere Korndichten besitzen als ihre Ausgangsmaterialien. Auch kleine Schaumsplitter, die keine geschlossenen Zellen besitzen, und die sowohl im Herstellprozess, als auch durch einwirkende Kräfte bei Transport, Verarbeitung und durch Eigengewicht entstehen können, werden im Messverfahren als massive Körner erkannt. Auch diese befinden sich im unteren Bereich der Korngrößenverteilung und tragen zu den dort gemessenen höheren mittleren Korndichten bei. Zudem kommen systematische Messunsicherheiten unbekannter Größe durch möglicherweise eindringendes Wasser in hinreichend weit geöffnete Kornporen hinzu. Die deutlich geringere gemessene mittlere Dichte der Körner gegenüber der Reindichte

zeigt allerdings, dass der weit überwiegende Anteil der Kornporen innerhalb der Messdauer nicht mit Wasser gefüllt wird.

6.3 Anteil geschlossener Kornporen expandierter Perlite

Nach der Herstellung expandierter Perlite (siehe Kapitel 5.1) können geschlossene Kornporen verbleiben, die auch durch die Evakuierung nicht aufplatzen. Diese weisen eine im Detail unbekannte Gaszusammensetzung und einen unbekanntes Gasdruck auf. Es ist jedoch anhand des Mechanismus der Expansion davon auszugehen, dass diese zu einem großen Teil mit Wasserdampf gefüllt sind. Eine Evakuierung des expandierten Perlits hat keinen Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeit des Gases in geschlossen bleibenden Kornporen. Aus diesem Grund ist es für die Vorhersage der effektiven Wärmeleitfähigkeit von expandierten Perliten im Vakuum interessant, den Anteil geschlossen bleibender Poren nach einer Evakuierung zu ermitteln. Dieser Anteil könnte einen Einfluss auf die Gaswärmeleitung und den Kopplungseffekt haben.

Zur Bestimmung des Anteils geschlossener Kornporen von GEP und FEP wurden Gaspyknometer-Messungen mit dem Prüfgas Helium ausgewertet. Diese Messungen wurden von der Firma Quantachrome Instruments durchgeführt. Das Verfahren der Gaspyknometrie wird u. a. in [104], [105], sowie in DIN 66137-2 beschrieben.

Es konnte ein Volumenanteil an geschlossenen Kornporen von 6 % für GEP und von 21 % für FEP nachgewiesen werden. Es kann davon ausgegangen werden, dass die geschlossenen Kornporen annähernd gleichverteilt im Wärmedämmstoff vorliegen. Vor diesem Hintergrund und in Anbetracht der sehr geringen effektiven Wärmeleitfähigkeiten von FEP im Vakuum (siehe Kapitel 8.1), kann der Anteil an geschlossenen Kornporen offensichtlich vernachlässigt werden.

6.4 Mittlere Kornporengröße expandierter Perlite

Die mittlere Kornporengröße wird zur analytischen Modellierung der Luftwärmeleitung innerhalb der Kornporen expandierter Perlite benötigt. Sie geht sowohl in die Modellierung der gesamten Luftwärmeleitung als auch des Kopplungseffektes mit ein, siehe Kapitel 10.1.1 und 10.1.3.

Die mittlere Kornporengröße wurde anhand von Lichtmikroskop-Aufnahmen von GEP und FEP bestimmt. Die Lichtmikroskop-Aufnahmen wurden mit Hilfe des Bildbearbeitungsprogramms Gimp 2.10.12 in Schwarz-Weiß-Bilder umgewandelt. Beispielhafte Ergebnisse davon sind in Abbildung 6-2 an einer Aufnahme von FEP gezeigt. Mit Hilfe des Bildbearbeitungsprogramms ImageJ 1.52p konnten die Flächeninhalte der Poren in zweidimensionaler Darstellung bestimmt werden. Als Porendurchmesser wurde jeweils der Durchmesser eines flächengleichen Kreises definiert. Auf diese Weise wurden 154 Kornporen von GEP und 196 Poren von FEP ausgewertet, woraus jeweils ein volumengewichtet gemittelter Kornporendurchmesser gebildet wurde. Dazu wurden die einzelnen ermittelten Porendurchmesser als Durchmesser von sphärischen Porenvolumina angenommen.

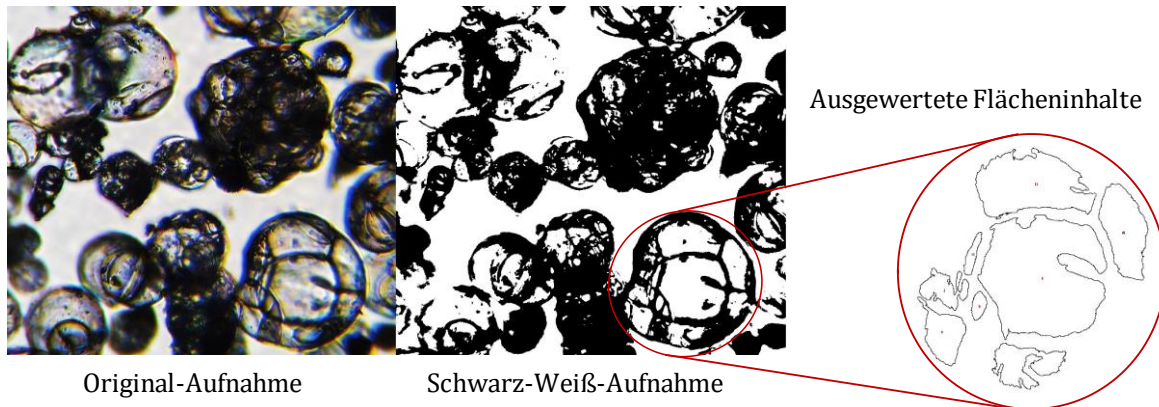


Abbildung 6-2: Lichtmikroskop-Aufnahme von FEP zur Auswertung der mittleren Kornporengröße

Daraus ergab sich ein volumengewichtet gemittelter Kornporendurchmesser von 44 μm für GEP und von 34 μm für FEP. Für die prädiktive analytische Modellierung der effektiven Wärmeleitfähigkeit wird für sämtliche expandierte Perlite der arithmetische Mittelwert dieser beiden Werte von $d_{p,K} = 39 \mu\text{m}$ verwendet.

6.5 Mittlere Kornzwischenraum-Porengröße

Die mittlere Kornzwischenraum-Porengröße wird zur Modellierung der Luftwärmeleitung und des Kopplungseffekts benötigt. In der Literatur [28], [54] ist folgende Beziehung zwischen dem berechneten mittleren Durchmesser der Kornzwischenraum-Poren $d_{p,ZK,Ber}$ [m], dem mittleren Korndurchmesser d_K [m] und dem Kornzwischenraum-Volumenanteil $f_{Gas,ZK}$ gegeben, die zur groben Abschätzung verwendet werden kann:

$$d_{p,ZK,Ber} = \frac{2}{3} \cdot \frac{d_K}{(1 - f_{Gas,ZK})} \quad (6-4)$$

Für d_K wurden die volumengewichtet gemittelten Korndurchmesser $d_{K,vm}$ aus Tabelle 6-1 eingesetzt. $f_{Gas,ZK}$ berechnet sich gemäß Gleichung (6-5) aus der mittleren Korndichte ρ_K und der Dichte der Dämmstoffschüttung ρ :

$$f_{Gas,ZK} = 1 - \frac{\rho_K}{\rho} \quad (6-5)$$

Es zeigte sich jedoch, dass bei Verwendung der in Gleichung (6-4) gegebenen Berechnung des mittleren Durchmessers der Kornzwischenraum-Poren große Abweichungen der analytischen Modelle der effektiven Wärmeleitfähigkeit zu den Messwerten resultieren. Diese Abweichungen können u. a. auf eine bei den expandierten Perliten auftretende breitere Korngrößenverteilung zurückzuführen sein, als für die grobe Abschätzung nach Gleichung (6-4) angenommen. Eine breitere Korngrößenverteilung führt zu geringeren mittleren Durchmessern der Kornzwischenraum-Poren, da sich kleinere Körner in den Zwischenräumen von größeren Körnern einlagern können.

In einem zweiten Schritt wurden daher die mittleren Durchmesser der Kornzwischenraum-Poren für alle in Tabelle 6-1 aufgeführten expandierten Perlite durch Anpassung der in den Kapiteln 10.1.1 und 10.1.3 aufgeführten analytischen Modelle der Luftwärmeleitung und des Kopplungseffekts an Messwerte ermittelt. Es wurden jeweils die Messwerte der effektiven Wärmeleitfähigkeit bei einer Probenmitteltemperatur von 48 °C in Abhängigkeit vom Luftdruck verwendet. Von diesen Messwerten wurde jeweils der Messwert beim niedrigsten Luftdruck abgezogen. Unter der Annahme, dass die Summe aus Luft- und Kopplungseffekt-Wärmeleitfähigkeit bei diesem Luftdruck zu vernachlässigen ist, setzt sich der Wärmestrom durch die expandierten Perlite bei diesem Messwert lediglich aus Strahlungs- und Festkörper-Wärmeleitfähigkeit zusammen, siehe Gleichung (3-1), welche beide unabhängig vom Luftdruck sind. Durch die Subtraktion dieses Messwertes von allen Messwerten verbleibt gemäß Gleichung (3-1) lediglich die Summe aus Luft- und Kopplungseffekt-Wärmeleitfähigkeit. Der mittlere Durchmesser der Kornzwischenraum-Poren wurde dann in 1 µm-Schritten an denjenigen Wert angepasst, bei welchem das Bestimmtheitsmaß R^2 [-] der Summe der Modelle der Luft- und Kopplungseffekts-Wärmeleitfähigkeit zu den Messwerten maximal ist. Gleichzeitig wird bei dieser Anpassung auch der empirische Korrekturfaktor für die Modellierung des Kopplungseffekts $G_{Kpl,EP}$ [m] angepasst, so dass der Messwert der Summe aus Luft- und Kopplungseffekt-Wärmeleitfähigkeit bei Atmosphärendruck erreicht wird, siehe Kapitel 10.1.3. Die Anpassung an Messwerte ist beispielhaft für FEP in Abbildung 6-3 dargestellt.

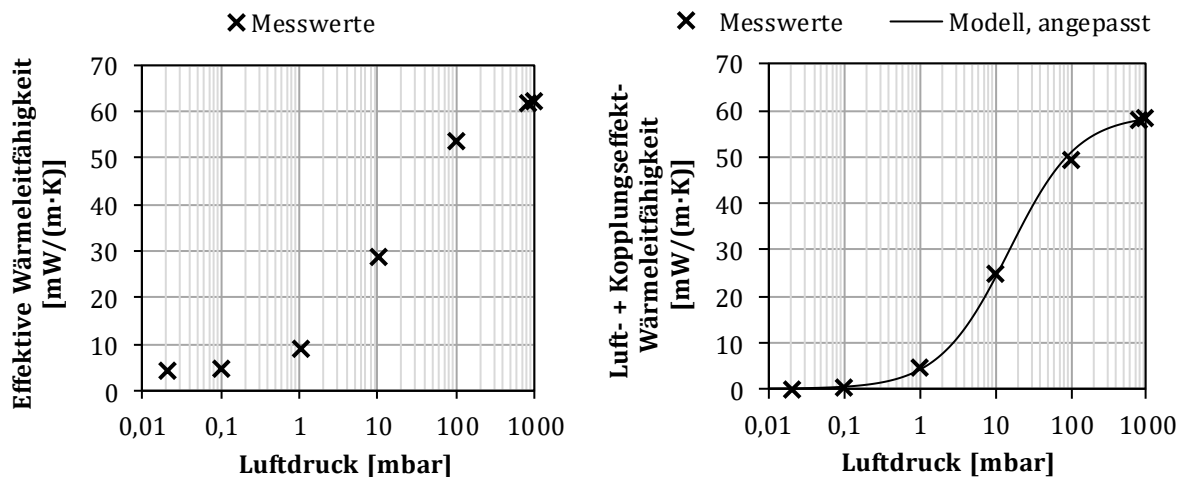


Abbildung 6-3: Bestimmung des mittleren Durchmessers der Kornzwischenraum-Poren durch Modellanpassung an Messwerte von FEP. Links: Messwerte der effektiven Wärmeleitfähigkeit; rechts: Modellanpassung an Messwerte der Summe aus Luft- und Kopplungseffekt-Wärmeleitfähigkeit

In Tabelle 6-3 sind die mittleren Durchmesser der Kornzwischenraum-Poren $d_{p,ZK,Ber}$ aus Gleichung (6-4) und aus der Modellanpassung an Messwerte $d_{p,ZK,Fit}$ [m] aufgeführt. Zudem ist der jeweilige Quotient $d_{p,ZK,Ber}/d_{p,ZK,Fit}$ angegeben.

Tabelle 6-3: Mittlere Durchmesser der Kornzwischenraum-Poren aus Gleichung (6-4) $d_{p,ZK,Ber}$ und aus Modellanpassungen an Messwerte $d_{p,ZK,Fit}$

| Probe | $d_{p,ZK,Ber}$ | $d_{p,ZK,Fit}$ | $d_{p,ZK,Ber}/d_{p,ZK,Fit}$ |
|--------------|--------------------|-------------------|-----------------------------|
| GEP | 884 μm | 70 μm | 12,63 |
| FEP | 99 μm | 10 μm | 9,9 |
| GEP(1-2) | 2404 μm | 204 μm | 11,78 |
| GEP(0,5-1) | 1427 μm | 130 μm | 10,98 |
| MEP(0,2-0,5) | 508 μm | 63 μm | 8,06 |
| FEP(0,1-0,2) | 164 μm | 16 μm | 10,26 |
| FEP(0-0,1) | 47 μm | 5 μm | 9,41 |

Es zeigt sich, dass die mittleren Durchmesser der Kornzwischenraum-Poren aus Gleichung (6-4) im arithmetischen Mittel um den Faktor 10,43 höher liegen als die durch die Modellanpassung ermittelten Werte. Die relative Standardabweichung dieses Mittelwerts liegt bei 13,5 %. Um eine einfache und vollständig prädiktive Modellierung zu ermöglichen, welche die Messwerte der effektiven Wärmeleitfähigkeit besser annähert, wird Gleichung (6-4) um die empirisch ermittelte Konstante $C_{p,ZK} = 10,43$ ergänzt zu Gleichung (6-6):

$$d_{p,ZK} = \frac{2}{3} \cdot \frac{d_{K,vm}}{C_{p,ZK} \cdot (1 - f_{Gas,ZK})} \quad (6-6)$$

Die damit ermittelten Werte $d_{p,ZK}$ sind in Tabelle 6-4 aufgeführt und den Werten aus der Modellanpassung gegenüber gestellt. Es resultieren relative Abweichungen von maximal ± 23 %, bezogen auf die Werte aus der Modellanpassung. Wie in der Sensitivitätsanalyse des analytischen Modells der effektiven Wärmeleitfähigkeit in Kapitel 10.1.7 deutlich wird, haben diese Abweichungen nur geringe Auswirkungen auf die modellierten effektiven Wärmeleitfähigkeiten.

Tabelle 6-4: Mittlere Durchmesser der Kornzwischenraum-Poren aus Gleichung (6-6) $d_{p,ZK}$ und aus Modellanpassungen an Messwerte $d_{p,ZK,Fit}$

| Probe | $d_{p,ZK}$ | $d_{p,ZK,Fit}$ | $(d_{p,ZK} - d_{p,ZK,Fit})/d_{p,ZK,Fit}$ |
|--------------|---------------------|-------------------|--|
| GEP | 84,8 μm | 70 μm | 21 % |
| FEP | 9,5 μm | 10 μm | -5 % |
| GEP(1-2) | 230,4 μm | 204 μm | 13 % |
| GEP(0,5-1) | 136,8 μm | 130 μm | 5 % |
| MEP(0,2-0,5) | 48,7 μm | 63 μm | -23 % |
| FEP(0,1-0,2) | 15,7 μm | 16 μm | -2 % |
| FEP(0-0,1) | 4,5 μm | 5 μm | -10 % |

6.6 Dichtespezifischer Extinktionskoeffizient und Festkörper-Wärmeleitfähigkeit

Zur Vorhersage des Anteils der Wärmestrahlung durch die in der vorliegenden Arbeit betrachteten Wärmedämmstoffe muss der dichtespezifische Extinktionskoeffizient e_R bekannt sein. Dieser wird hier anhand von Messwerten der effektiven Wärmeleitfähigkeit im Vakuum bestimmt. Dabei kann auch die Festkörper-Wärmeleitfähigkeit des Wärmedämmstoffs ermittelt werden. Wenn der Luftdruck hinreichend niedrig ist, um die Gas- und Kopplungseffekt-Wärmeleitfähigkeit zu vernachlässigen, setzt sich die effektive Wärmeleitfähigkeit nach dem Superpositionsprinzip gemäß Gleichung (6-7) aus der Festkörper- und Strahlungs-Wärmeleitfähigkeit zusammen.

$$\lambda_{eff,p \rightarrow 0} = \lambda_{FK} + \lambda_{Str} \quad (6-7)$$

Wird zur Beschreibung der Strahlungs-Wärmeleitfähigkeit der ROSSELAND'sche Diffusionsansatz aus Gleichung (3-15) verwendet und sowohl die Festkörper-Wärmeleitfähigkeit als auch der dichtespezifische Extinktionskoeffizient als temperaturunabhängig angenommen, so ergibt sich eine Geradengleichung der effektiven Wärmeleitfähigkeit als Funktion von der kubischen Strahlungsmitteltemperatur T_{Str}^3 , siehe Gleichung (6-8).

$$\lambda_{eff,p \rightarrow 0} = \lambda_{FK} + \frac{16 \cdot \sigma \cdot n_{eff}^2}{3 \cdot e_R \cdot \rho} \cdot T_{Str}^3 = \lambda_{FK} + b_{Str} \cdot T_{Str}^3 \quad (6-8)$$

Aufgrund der hohlzylindrischen Geometrie der Proben, wird für die Strahlungsmitteltemperatur die Probenmitteltemperatur aus Gleichung (7-6) in Kelvin, T_{Probe} , eingesetzt. Für den effektiven Brechungsindex n_{eff} wird, wie in Kapitel 3.4.4 beschrieben, der Wert 1 eingesetzt.

Werden Messwerte der effektiven Wärmeleitfähigkeit bei sehr geringen Luftdrücken über der kubischen Probenmitteltemperatur aufgetragen, können diese, bei hinreichend hoher optischer Dicke von $\tau_0 \geq 15$ und temperaturunabhängigem dichtespezifischen Extinktionskoeffizienten, durch die Methode der kleinsten Fehlerquadrate als Gerade angenähert werden. Da am absoluten Temperaturnullpunkt von 0 K keine Wärmestrahlung existiert, kann dort der Wert der Festkörper-Wärmeleitfähigkeit abgelesen werden. Der dichtespezifische Extinktionskoeffizient kann aus der Steigung der Geraden b_{Str} [$W/(m \cdot K^4)$] mittels Gleichung (6-9) berechnet werden. Dies ist beispielhaft für FEP in Abbildung 6-4 dargestellt und für die anderen Wärmedämmstoffe in Anhang A1. Die Ergebnisse sind in Tabelle 6-6 aufgeführt.

$$e_R = \frac{16 \cdot \sigma \cdot n_{eff}^2}{3 \cdot b_{Str} \cdot \rho} \quad (6-9)$$

Die beschriebene Methode ist die gängigste zur Bestimmung der Extinktionskoeffizienten von Vakuumwärmedämmstoffen und wird u. a. in [22], [28], [33], [47] beschrieben und angewendet.

In Abbildung 6-4 sind Messwerte von FEP bei einem Luftdruck von $(0,02 \pm 0,005)$ mbar dargestellt, von welchen, durch Berechnungen mittels der in Kapitel 10 aufgeführten Modelle, der

Restanteil von Luft- und Kopplungseffekt-Wärmeleitfähigkeit abgezogen wurde. Diese Restanteile wurden mit Hilfe der aus der Modellanpassung bestimmten Werte der mittleren Durchmesser der Kornzwischenraum-Poren und der Skalierungs- bzw. Korrekturfaktoren für den Kopplungseffekt sowie der gemessenen Luftdrücke bestimmt.

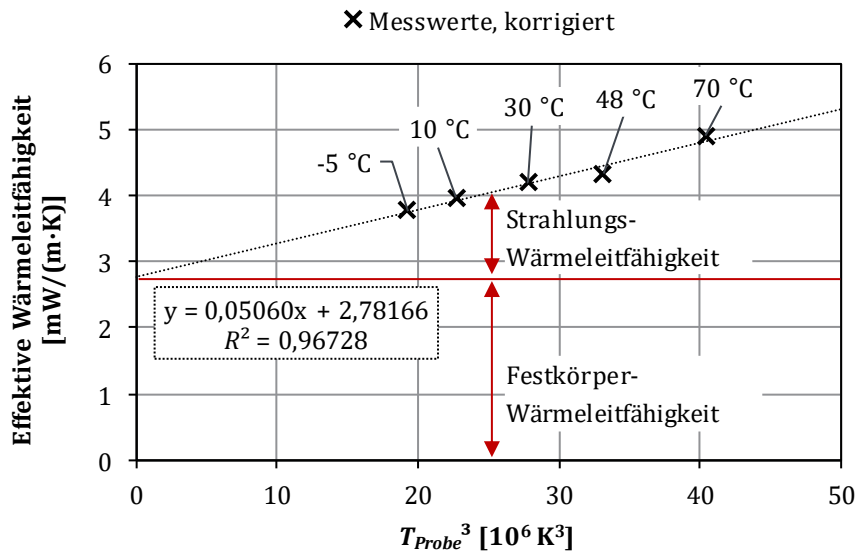


Abbildung 6-4: Ermittlung des dichtespezifischen Extinktionskoeffizienten und der Festkörper-Wärmeleitfähigkeit von FEP

Für pyrogene Kieselsäure folgen die Messwerte der effektiven Wärmeleitfähigkeit im Vakuum über der kubischen Probenmittlertemperatur allerdings keiner Geraden, sondern lassen sich besser durch ein Polynom zweiten Grades annähern, siehe Abbildung 6-6. Die Annäherung einer Geradengleichung hätte eine negative Festkörper-Wärmeleitfähigkeit ergeben, was physikalisch unmöglich ist. Dieses Verhalten kann sowohl bei einer optischen Dicke < 15 auftreten, als auch bei stark temperaturabhängigen Extinktionskoeffizienten. Beides wird für pyrogene Kieselsäure als möglich eingeschätzt. Die geringe optische Dicke macht sich bemerkbar durch die einerseits vergleichsweise hohen effektiven Wärmeleitfähigkeiten bei hohen Temperaturen im Vakuum und der gleichzeitig hohen Steigung der effektiven Wärmeleitfähigkeit über der Probenmittlertemperatur, die selbst bei Atmosphärendruck besser durch ein Polynom zweiten oder dritten Grades, als durch eine Gerade angenähert werden kann, siehe Kapitel 8.2. Ein stark temperaturabhängiger ROSSELAND-gemittelter Extinktionskoeffizient scheint realistisch aufgrund der starken Wellenlängenabhängigkeit des nicht ROSSELAND-gemittelten Extinktionskoeffizienten von reinem SiO_2 , die beispielsweise in [106] gezeigt wird.

Für pyrogene Kieselsäure wurden daher die Werte der Festkörper-Wärmeleitfähigkeit mit Hilfe von Daten aus [65] hergeleitet. Darin sind Festkörper-Wärmeleitfähigkeiten von pyrogener Kieselsäure in Mischung mit SiC als Strahlungshemmer bei unterschiedlichen Dichten aufgeführt. Entsprechende Daten für reine pyrogene Kieselsäure sind nicht verfügbar. Massives SiC hat eine deutlich höhere Wärmeleitfähigkeit als massives SiO_2 , weshalb für reine pyrogene Kieselsäure

noch geringere Werte erwartbar sind. Allerdings sind die Festkörper-Wärmeleitfähigkeiten der Mischung mit SiC bereits so gering, dass jegliche Abweichungen in Richtung niedrigerer Werte, die bei reiner pyrogener Kieselsäure zu erwarten sind, für die in der vorliegenden Arbeit betrachteten Temperaturen vernachlässigt werden können gegenüber dem deutlich höheren Anteil der Wärmestrahlung. Die Werte der Festkörper-Wärmeleitfähigkeit aus [65] sind in Abbildung 6-5 über der Dichte aufgetragen. Es wurde ein Polynom zweiten Grades an die Werte angenähert, welches die Bedingung erfüllt, dass bei einer Dichte von 0 kg/m^3 die Festkörper-Wärmeleitfähigkeit $0 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ beträgt. Dieses Polynom ist in Gleichung (6-10) definiert und wird zur Berechnung der Festkörper-Wärmeleitfähigkeit von pyrogener Kieselsäure $\lambda_{FK,PKS} [\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})]$ verwendet.

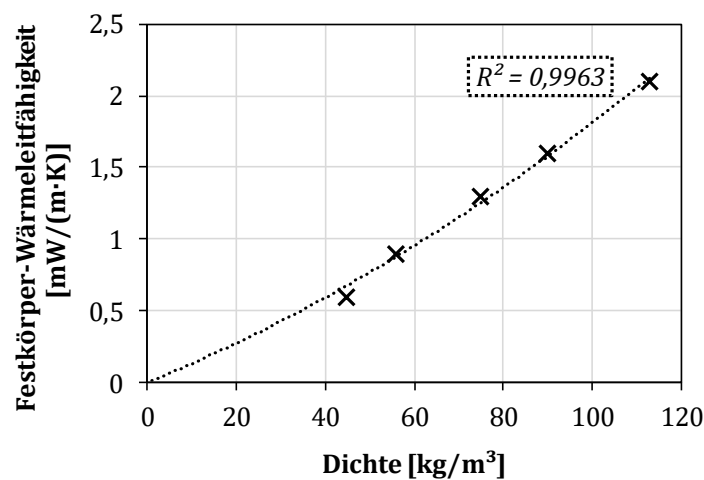


Abbildung 6-5: Festkörper-Wärmeleitfähigkeiten für pyrogene Kieselsäure, vermischt mit SiC, aufgetragen über der Dichte. Werte entnommen aus [65]. Polynom zweiten Grades durch den Ursprung an Werte angenähert durch den Autor, siehe Gleichung (6-10).

$$\lambda_{FK,PKS} = C_{FK,PKS,1} \cdot \rho^2 + C_{FK,PKS,2} \cdot \rho \quad (6-10)$$

Mit:

$$C_{FK,PKS,1} = 5,4856 \cdot 10^{-5} \text{ (mW}/(\text{m}\cdot\text{K})) \cdot (\text{m}^6/\text{kg}^2)$$

$$C_{FK,PKS,2} = 1,2613 \cdot 10^{-2} \text{ (mW}/(\text{m}\cdot\text{K})) \cdot (\text{m}^3/\text{kg})$$

Bei der Dichte von HPKS mit 44 kg/m^3 ergibt sich aus Gleichung (6-10) eine Festkörper-Wärmeleitfähigkeit von $0,66 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$. Zur Ermittlung des dichtespezifischen Extinktionskoeffizienten wird ein Polynom zweiten Grades an die gemessenen Werte der effektiven Wärmeleitfähigkeit über der kubischen Probenmitteltemperatur angenähert, welches bei 0 K^3 den oben genannten Wert der Festkörper-Wärmeleitfähigkeit annimmt, siehe Abbildung 6-6.

Aus der ersten Ableitung dieses Polynoms ergibt sich eine Geradengleichung $b_{Str,HPKS}(T_{Probe}^3)$ als Steigung. Eingesetzt in Gleichung (6-9), ergibt sich der in Abbildung 6-7 dargestellte temperaturabhängige dichtespezifische Extinktionskoeffizient für HPKS $e_{R,HPKS} [\text{m}^2/\text{kg}]$, der sich für HPKS und UPKS als $e_{R,PKS} [\text{m}^2/\text{kg}]$ gemäß Gleichung (6-11) und Tabelle 6-5 berechnen lässt.

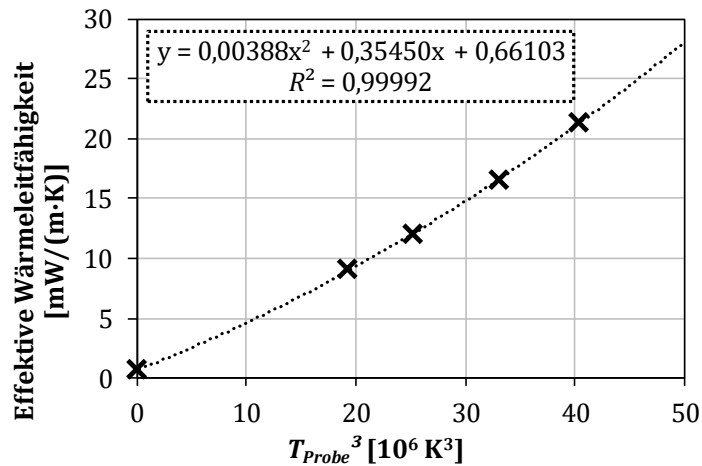


Abbildung 6-6: Ermittlung des dichtespezifischen Extinktionskoeffizienten von HPKS. Neben den Messwerten der effektiven Wärmeleitfähigkeit bei einem Luftdruck von $(0,02 \pm 0,005)$ mbar ist bei $T_{Probe}^3 = 0 K^3$ der aus Gleichung (6-10) ermittelte Wert der Festkörper-Wärmeleitfähigkeit aufgetragen

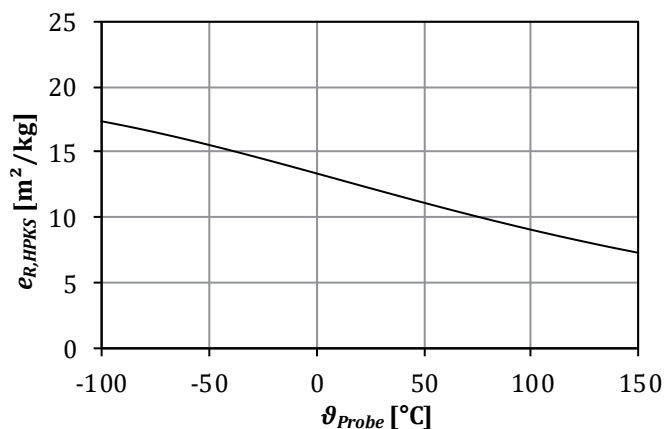


Abbildung 6-7: Dichtespezifischer Extinktionskoeffizient von HPKS

$$e_{R,PKS} = \frac{C_{e,PKS,1}}{C_{e,PKS,2} \cdot T_{Probe}^3 + C_{e,PKS,3}} \quad (6-11)$$

Tabelle 6-5: Konstanten in Gleichung (6-11)

| Konstanten | HPKS | UPKS |
|--|-------------------------|-------------------------|
| $C_{e,PKS,1} [W \cdot m / (kg \cdot K^4)]$ | $6,8727 \cdot 10^{-9}$ | $7,2000 \cdot 10^{-9}$ |
| $C_{e,PKS,2} [W / (m \cdot K^7)]$ | $7,7513 \cdot 10^{-18}$ | $8,6470 \cdot 10^{-18}$ |
| $C_{e,PKS,3} [W / (m \cdot K^4)]$ | $3,5450 \cdot 10^{-10}$ | $3,7338 \cdot 10^{-10}$ |

Die Ergebnisse der in der vorliegenden Arbeit ermittelten dichtespezifischen Extinktionskoeffizienten und Festkörper-Wärmeleitfähigkeiten sind in Tabelle 6-6 aufgeführt.

Tabelle 6-6: Dichtespezifische Extinktionskoeffizienten und Festkörper-Wärmeleitfähigkeiten

| Probe | e_R [m ² /kg] | λ_{FK} [mW/(m·K)] |
|----------------|----------------------------|---------------------------|
| GEP | 20,3 | 2,14 |
| FEP | 32,8 | 2,78 |
| GEP(0,5-1) | 23,5 | 2,22 |
| MEP(0,2-0,5) | 21,3 | 2,13 |
| FEP(0,1-0,2) | 36,1 | 2,16 |
| HPKS | Siehe Gleichung (6-11) | 0,66 |
| UPKS | Siehe Gleichung (6-11) | 0,63 |
| GEP-HPKS-90:10 | 18,8 | 2,36 |
| GEP-HPKS-80:20 | 21,5 | 2,32 |
| GEP-HPKS-70:30 | 15,6 | 1,63 |
| GEP-HPKS-60:40 | 14,0 | 0,7 |

Die dichtespezifischen Extinktionskoeffizienten der expandierten Perlite liegen zwischen 20,3 m²/kg und 36,1 m²/kg. Für GEP wurde in [64] durch Fourier-Transformations-Infrarot-Spektroskopie ein Wert von ca. 38 m²/kg bestimmt. In [47] wurde für einen gemahlenden expandierten Perlit durch analoges Vorgehen wie in der vorliegenden Arbeit ein Wert von ca. 22 m²/kg bestimmt.

Rohperlit ist ein Naturprodukt, das je nach Fördergebiet unterschiedliche chemische Zusammensetzungen hat. Dies macht sich auch in der unterschiedlichen Farbe verschiedener expandierter Perlite bemerkbar, die zwischen Weiß und hellem Grau liegen kann. Außerdem liegen unterschiedliche Anteile an massiven Körnern und Fremdmaterial vor, insbesondere im Vergleich der Siebungen zu den Ausgangsmaterialien. Dadurch lassen sich die stark abweichenden dichtespezifischen Extinktionskoeffizienten der expandierten Perlite in Tabelle 6-6 erklären. Der Unterschied der Werte von GEP aus der vorliegenden Arbeit und [64] könnte auf unterschiedliche Abbaugelände des Rohperlits und auf die Messunsicherheiten der unterschiedlichen Messverfahren zurückgeführt werden.

Für eine prädiktive Modellierung wird aus den Werten für die expandierten Perlite der arithmetische Mittelwert von 26,8 m²/kg verwendet. Dieser besitzt eine relative Standardabweichung von 24 %.

Bei den Mischungen aus GEP und HPKS zeigt sich die Tendenz eines steigenden dichtespezifischen Extinktionskoeffizienten mit steigenden Anteilen an GEP, was durch die Werte der Reinstoffe zu erklären ist. Eine Ausnahme bildet der geringere Wert der Mischung GEP-HPKS-90:10 im Vergleich zu GEP-HPKS-80:20, was vermutlich auf die Messunsicherheit bei der Messung der effektiven Wärmeleitfähigkeit zurückgeführt werden kann.

Die Festkörper-Wärmeleitfähigkeiten der Mischungen sinken mit steigendem Anteil an HPKS, was durch die geringeren Werte reiner HPKS gegenüber reinem GEP zu erklären ist. Die Festkörper-

Wärmeleitfähigkeit der Mischung GEP-HPKS-60:40 ist bereits nahe am Wert von reiner HPKS, was darauf hindeutet, dass die Körner des GEP nahezu vollständig in die HPKS eingebettet sind und direkte Kontakte über die GEP-Körner von dazwischenliegender HPKS zu großen Teilen unterbunden werden. Die Festkörper-Wärmeleitfähigkeiten der Mischungen GEP-HPKS-90:10 und GEP-HPKS-80:20 liegen wiederum leicht oberhalb jener von reinem GEP. Dies deutet darauf hin, dass der Festkörperpfad über die Körner des GEP nicht in signifikantem Maße unterbrochen ist und die HPKS in den Zwischenräumen der GEP-Körnern somit zu einer Erhöhung der Festkörper-Wärmeleitfähigkeit beiträgt.

Die Festkörper-Wärmeleitfähigkeiten expandierter Perlite werden zur Modellbildung in Kapitel 10.1.2 verwendet und dort diskutiert.

7 Versuchsanlage zur Messung der effektiven Wärmeleitfähigkeit

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde eine Versuchsanlage zur Messung der effektiven Wärmeleitfähigkeit von Dämmstoffschüttungen in Abhängigkeit von Temperatur und Luftdruck entwickelt und aufgebaut. Dieses Kapitel zeigt den Gesamtaufbau, die Einzelkomponenten, das Messprinzip, den Messablauf, eine Messunsicherheitsbetrachtung und Ergebnisse von Vergleichsmessungen mit anderen, kommerziell verfügbaren Messapparaturen.

7.1 Gesamtaufbau der Versuchsanlage

In Abbildung 7-1 ist der Gesamtaufbau der Versuchsanlage dargestellt. Die Probe befindet sich in der Messapparatur, die aufgrund des geometrischen Aufbaus Zylinderapparatur genannt wird. Diese wird in Kapitel 7.2 beschrieben. Die Zylinderapparatur befindet sich in einem Tiefkühlschrank, um Mess-Temperaturen unterhalb der Umgebungstemperatur einstellen zu können. Sie ist über Vakuumverbindungen und Ventile mit einer Vakuumpumpe verbunden, um den Luftdruck innerhalb der Probe einstellen zu können, siehe Kapitel 7.4. Die Elektro-, Mess-, Steuer- und Regelungstechnik (EMSR-Technik) der Versuchsanlage ist in Kapitel 7.3 beschrieben.

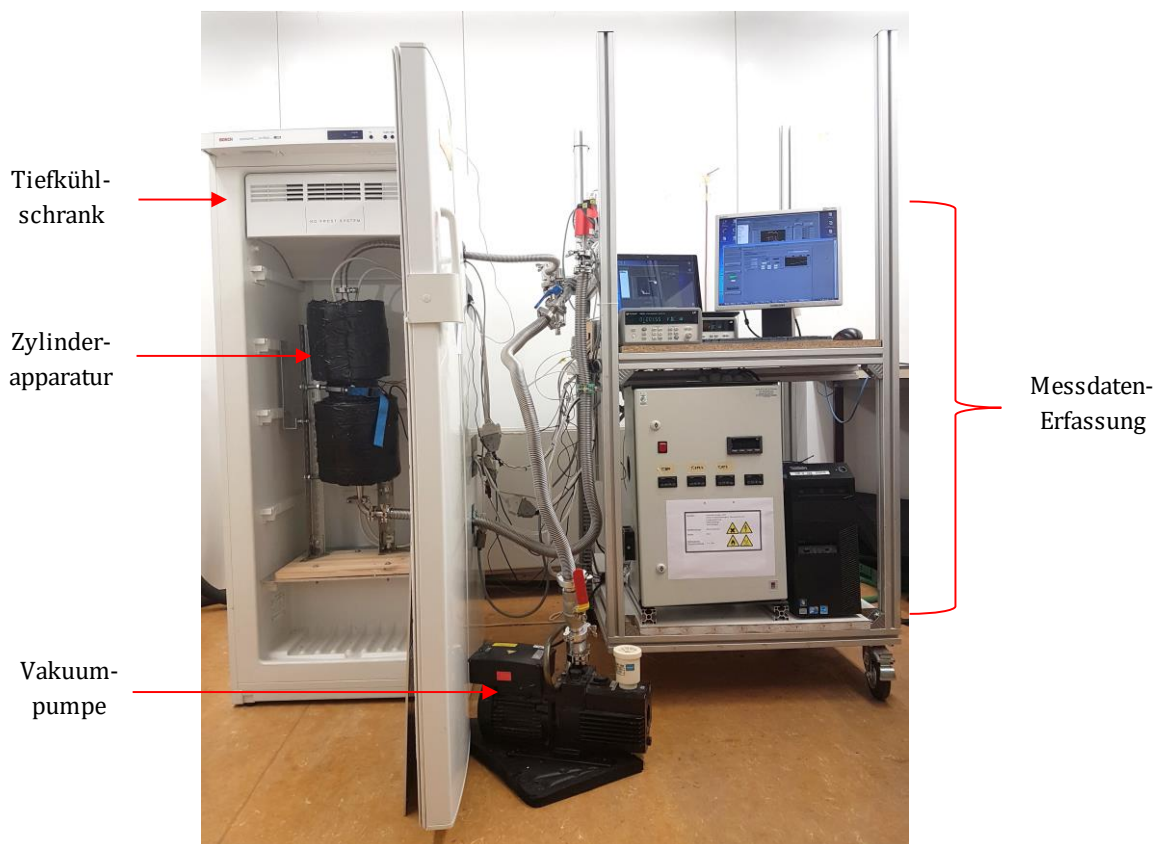


Abbildung 7-1: Versuchsanlage zur Messung der effektiven Wärmeleitfähigkeit

7.2 Zylinderapparatur und Messprinzip

In Abbildung 7-2 und Abbildung 7-3 ist die Zylinderapparatur dargestellt. Sie ist aufgebaut aus einem Edstahlhohlzylinder mit einer Länge von 420 mm und einem Innendurchmesser von 100 mm. Die Wandstärke des zylindrischen Teils beträgt 2 mm. Für den vakuumdichten Verschluss des Edstahlhohlzylinders werden DN100 ISO-CF Flanschdeckel verwendet. Diese Flanschdeckel verfügen über jeweils einen DN16 ISO-KF-Anschluss, um ein Vakuum anzulegen und zu messen, sowie über jeweils zwei 37-Pin-Sub-D-Durchführungen zum Anschluss von Mess- und Stromleitungen. Zudem sind als Filter an den Vakuumanschlüssen die Schalldämpfer M/S der Firma Norgren aus Polyethylen-Sintermaterial (Polyethylen-Sinter-Filter) angeschraubt, um den Austrag der Probe beim Evakuieren zu verhindern. Zur möglichst gleichmäßigen Temperierung des Edstahlhohlzylinders ist dieser von einem Heizkabel und einer Wärmedämmung aus Elastomerschaum umschlossen.

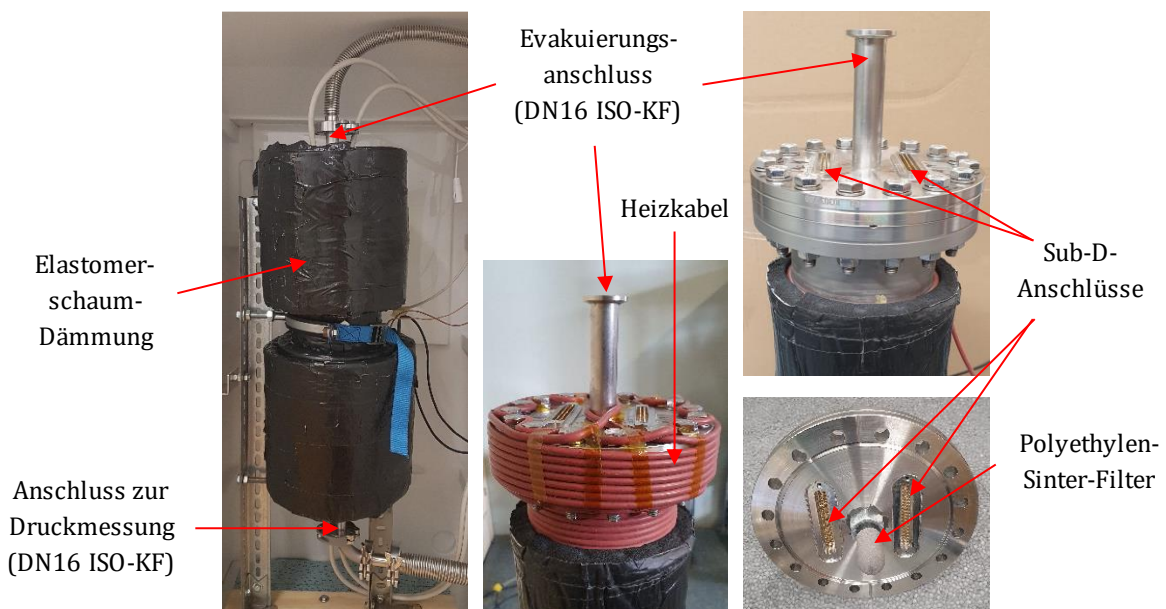


Abbildung 7-2: Zylinderapparatur. Links: in Elastomerschaum-Dämmung; Mitte: von Heizkabel umschlossen; rechts oben: ohne Heizkabel; rechts unten: DN100 ISO-CF Flanschdeckel

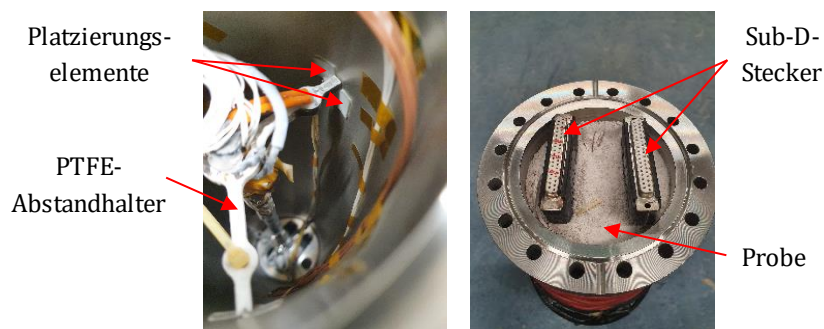


Abbildung 7-3: Zylinderapparatur. Links: Blick in geleerte Apparatur; rechts: mit Probe gefüllt

Im Edstahlhohlzylinder ist der Heizzyylinder durch zwei Abstandhalter aus Polytetrafluorethylen (PTFE) sowie selbstklebende Platzierungselemente innen am Edstahlhohlzylinder radial und

axial mittig installiert, siehe Abbildung 7-3 und Abbildung 7-4. Der Heizzyylinder ist aufgebaut aus drei Kupferhohlzylindern mit einem Außendurchmesser von jeweils 10 mm und einer Wandstärke von jeweils 1 mm. Kupfer wurde aufgrund seiner hohen Wärmeleitfähigkeit verwendet, die eine homogene Temperaturverteilung an der Oberfläche des Heizzyinders ermöglicht. Die Kupferhohlzylinder sind über Abstandhalter aus glasfaserverstärktem Polyamid (GFPA), die als Wärmewiderstände fungieren, mittels Epoxidharz miteinander zu einem Zylinder verbunden. Durch die Wärmewiderstände befindet sich zwischen dem mittleren und den äußeren Kupferhohlzylindern ein Abstand von jeweils 4 mm. In jedem Kupferhohlzylinder befindet sich jeweils eine Heizpatrone in Presspassung. Die Kabel der äußeren Heizpatronen werden jeweils am Ende aus dem Kupferhohlzylinder geführt. Zum Schutz der Kabel sind an den Enden Ringe aus GFPA angeklebt. Die Kabel der mittleren Heizpatrone werden durch einen der Wärmewiderstände und an einem der äußeren Kupferhohlzylinder nach außen geführt. Um Beeinflussungen der Stromleitungen auf die Messleitungen zu vermeiden, werden alle Stromleitungen durch einen eigenen Sub-D-Anschluss geführt. Das machte es notwendig die Stromleitungen einer der äußeren Heizpatronen durch den Messbereich zu führen, wie in Abbildung 7-4 zu erkennen ist. Die Gesamtlänge des Heizzyinders beträgt 302 mm. Der Heizzyylinder ohne Sensorik ist in Abbildung 7-4 Mitte, dargestellt. Die Hauptabmessungen sind in Abbildung 7-5 dargestellt und weitere Abmessungen der Zylinderapparatur sind Anhang A2 zu entnehmen. In Abbildung 7-4 rechts ist der vollständige Heizzyylinder mit Temperatursensoren und Temperatursicherungen (siehe Kapitel 7.3.3) dargestellt. Vor der Anbringung der Temperatursensoren wurde der Heizzyylinder zur elektrischen Isolierung außen mit einem schwarzen und einem transparenten Silikonharz-Lack beschichtet, um zu gewährleisten, dass es zu keinen Kurzschlüssen über die Sensorkabel kommen kann.

Die mittlere Heizpatrone des Heizzyinders wird Messheizung genannt, die äußeren Heizpatronen dienen als Schutzheizungen. Die Länge des Messbereichs wird von den jeweiligen Mitten der Wärmewiderstände eingeschlossen, die an den mittleren Kupferhohlzylinder angrenzen. Der Messbereich erstreckt sich radial von der Außenoberfläche des Heizzyinders bis zur Innenwand des Edelstahlhohlzylinders und wird in Abbildung 7-4 links violett dargestellt. Die seitlich angrenzenden Bereiche werden Schutzheizungsgebiete genannt und in Abbildung 7-4 links grün dargestellt.

Die Probe wird in die Zylinderapparatur gegeben und muss den Raum zwischen Heizzyylinder und Edelstahlhohlzylinder vollständig ausfüllen. Die Messung erfolgt in Anlehnung an EN ISO 8497:1996-09. Das stationäre Messprinzip ist in Abbildung 7-6 dargestellt. Grundlage der Messung ist das eindimensionale FOURIER'sche Gesetz der Wärmeleitung gemäß Gleichung (7-1) mit dem Wärmestrom durch den Messbereich \dot{Q}_{Mess} [W], dem Formkoeffizienten der Probe S_{Probe} [m] und der Temperaturdifferenz zwischen heißer und kalter Seite der Probe ΔT_{Probe} [K].

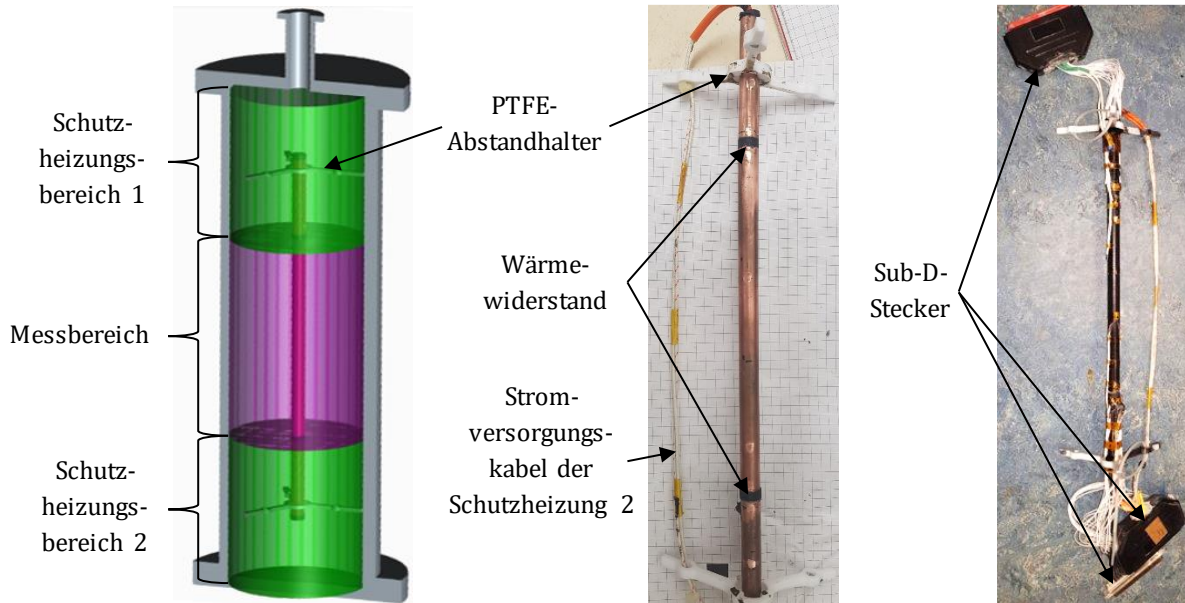


Abbildung 7-4: Heizzyylinder. Links: in halbtransparenter 3D-Darstellung der Zylinderapparatur (unmaßstäblich); Mitte: ohne Sensorik; rechts: mit Sensorik

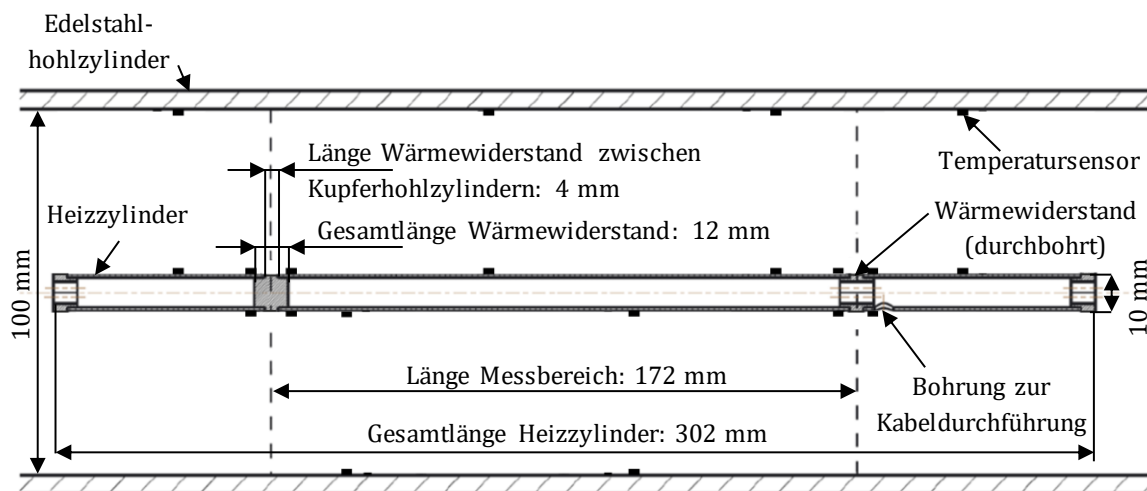


Abbildung 7-5: Hauptabmessungen des Heizzyinders

Um einen stationären Wärmestrom \dot{Q}_{Mess} zu erzeugen, wird durch Leistungsregelung der Messheizung und des Heizkabels eine konstante Temperaturdifferenz zwischen Heizzyylinder und Edelstahlhohlzylinder im Messbereich erzeugt, siehe Kapitel 7.3.3. Zur Sicherstellung eines rein eindimensionalen radialen Wärmestroms im Messbereich, müssen die Schutzheizungsgebiete auf die gleiche Temperatur wie die des Messbereichs geregelt werden. Der Formkoeffizient S_{Probe} berechnet sich aus der Geometrie der hohlzylindrischen Probe gemäß Gleichung (7-2). Der Wärmestrom entspricht der elektrischen Leistungsaufnahme der Messheizung und ΔT_{Probe} ist die Temperaturdifferenz zwischen Heiz- und Edelstahlhohlzylinder im Messbereich. Die Bestimmung der elektrischen Leistungsaufnahme und der örtlich gemittelten Temperaturen im Messbereich auf dem Heiz- und Edelstahlhohlzylinder wird im nachfolgenden Kapitel 7.3 beschrieben.

$$\dot{Q}_{Mess} = \lambda_{eff} \cdot S_{Probe} \cdot \Delta T_{Probe} \rightarrow \lambda_{eff} = \frac{\dot{Q}_{Mess}}{S_{Probe} \cdot \Delta T_{Probe}} \quad (7-1)$$

$$S_{Probe} = \frac{2 \cdot \pi \cdot l_{MB}}{\ln\left(\frac{r_{EHZ,i}}{r_{HZ,a}}\right)} \quad (7-2)$$

Mit:

l_{MB} : Länge des Messbereichs und der Probe = 172 mm

$r_{EHZ,i}$: Innenradius des Edelstahlhohlzylinders = Außenradius der Probe = 50 mm

$r_{HZ,a}$: Außenradius des Heizzylinders = Innenradius der Probe = 5 mm

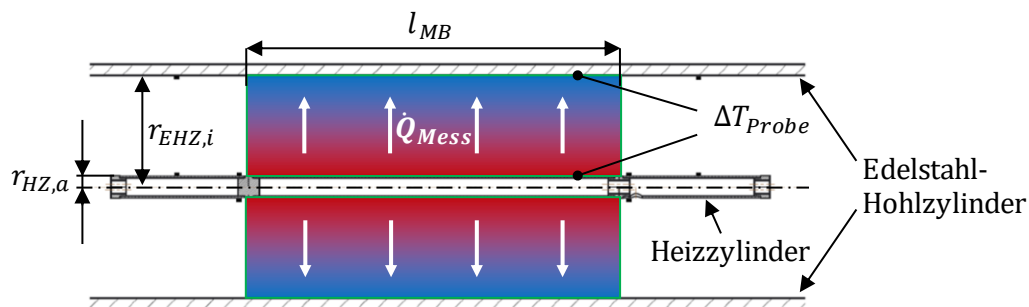


Abbildung 7-6: Messprinzip der Zylinderapparatur

7.3 EMSR-Technik

7.3.1 Messwertaufnehmer

Zur Bestimmung der effektiven Wärmeleitfähigkeit werden u. a. elektrische Widerstände, elektrische Spannung und elektrischer Strom gemessen. Diese analogen Signale werden vom Digitalmultimeter 34972A der Firma Keysight aufgenommen und in digitale Signale umgewandelt. Diese digitalen Signale werden an den Mess-PC weitergeleitet, wo sie von einem am IGTE, auf Basis der Software Labview, entwickelten Programm zur Messung, Steuerung und Regelung weiterverarbeitet werden. Das Programm stellt die Messwerte grafisch dar, speichert sie in Textdateien und verwendet sie zur Regelung der Heizleistungen der Heizelemente.

7.3.2 Temperaturmessung

Zur Temperaturmessung werden Pt100-Widerstands-Temperatursensoren verwendet (siehe Abbildung 7-7), die in 4-Leiter-Technik gemessen werden, um Einflüsse der Leitungswiderstände zu eliminieren. Das Funktions- und Messprinzip von Pt100-Temperatursensoren und der 4-Leiter-Messtechnik werden ausführlich u. a. in [107], [108] beschrieben. Der Platindraht, dessen Widerstand gemessen wird, ist in ein Keramikplättchen mit den Abmessungen 2 mm · 1,8 mm · 1 mm eingebettet. Die Messgenauigkeit der Pt100 wird in Kapitel 7.6 beschrieben.

Die blanken Leitungen der Pt100 für den Heizzyylinder wurden mit einem transparenten und einem schwarzen Silikonharz elektrisch isoliert. Das schwarze Silikonharz wurde zusätzlich

verwendet um den Erfolg der Isolierung sichtbar zu machen. Allerdings ist das schwarze Silikonharz, im Gegensatz zur transparenten Variante, nach dem Aushärten sehr spröde und platzte nach den zur Installation notwendigen Bewegungen der Anschlussleitungen an viele Stellen ab. Daher wurde auch der gesamte Heizzyylinder mit beiden Silikonharzen beschichtet um Kurzschlüsse der Leitungen über das Kupfer des Heizzyinders zu vermeiden. Die Pt100 für den Edelstahlhohlzylinder wurden mit einem Epoxidharz isoliert. Dieses muss in größerer Schichtdicke aufgetragen werden, wodurch es sich für den Einsatz am Heizzyylinder mit seinen kleineren Abmessungen weniger eignet. Aufgrund des festen und sichtbaren Halts des Epoxidharzes musste der Edelstahlhohlzylinder nicht beschichtet werden.

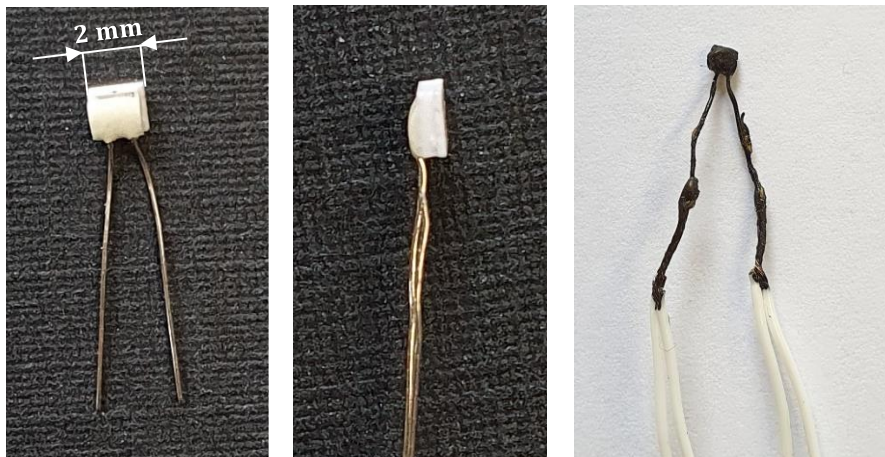


Abbildung 7-7: Pt100-Temperatursensoren. Links: Draufsicht; Mitte: Seitenansicht; rechts: verlötet für 4-Leiter-Schaltung und mit Silikonharz elektrisch isoliert

Um einen vollflächigen Kontakt der Pt100 mit dem Heizzyylinder zu gewährleisten, wurden die entsprechenden Bereiche auf dem Heizzyylinder durch Feilen abgeflacht, siehe Abbildung 7-8 links. Die Pt100 wurden sowohl am Edelstahlhohlzylinder als auch am Heizzyylinder durch Polyimid-Klebeband befestigt, siehe Abbildung 7-8 rechts.

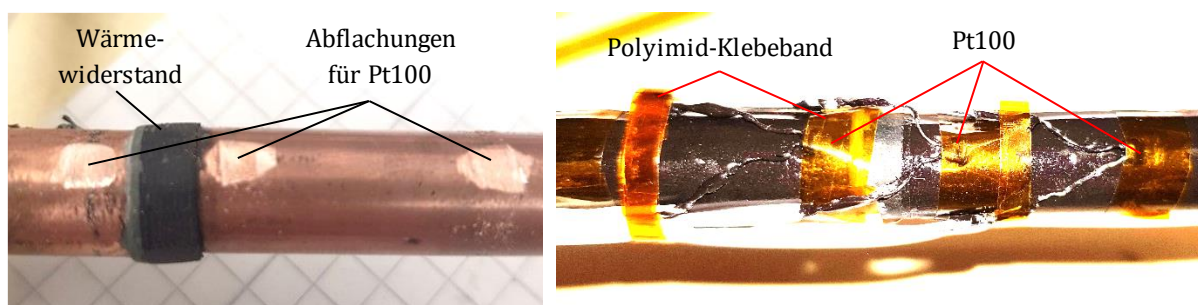


Abbildung 7-8: Detailaufnahmen des Heizzyinders. Links: Abflachungen für Pt100; rechts: Pt100 an beschichtetem Heizzyylinder

An der Zylinderapparatur sind insgesamt 23 Pt100 installiert. Davon 14 am Heizzyylinder, sechs am Edelstahlhohlzylinder, zwei an den Sub-D-Steckern im Inneren der Zylinderapparatur um axiale Wärmeströme abschätzen zu können und einer zur Messung der Umgebungstemperatur

der Zylinderapparatur. In Abbildung 7-9 ist die Positionierung der Pt100 an Heizzyylinder und Edelstahlhohlzylinder abgebildet. Die Pt100 am Edelstahlhohlzylinder befinden sich jeweils gegenüber eines Pt100 auf dem Heizzyylinder. An beiden Seiten der Ränder des Messbereichs befinden sich auf dem Heizzyylinder jeweils 4 Pt100 in einem Abstand von 12 mm, die zur möglichst genauen Regelung der Temperaturdifferenz zwischen Messbereich und Schutzheizungsbereich, dem sogenannten Schutzheizungsversatz, verwendet werden.

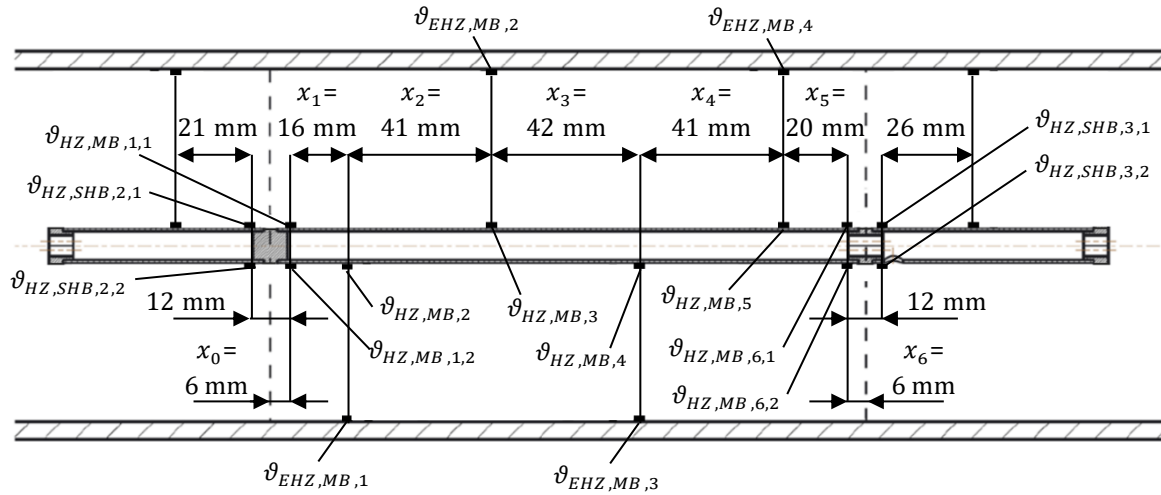


Abbildung 7-9: Positionen der Pt100-Temperatursensoren an Heizzyylinder und Edelstahlhohlzylinder

Zur Bestimmung der effektiven Wärmeleitfähigkeit sowie der Probenmitteltemperatur müssen die flächengewichteten Mitteltemperaturen des Heizzyinders $\vartheta_{HZ,MB}$ und des Edelstahlhohlzylinders $\vartheta_{EHZ,MB}$ im Messbereich gemäß Gleichungen (7-3) und (7-4) bestimmt werden. Aufgrund des konstanten Umfangs beider Elemente, kürzt sich dieser jeweils heraus und die Flächengewichtung entspricht einer Längengewichtung. Die Formelzeichen aus den Gleichungen (7-3) und (7-4) sowie auch aus den Gleichungen (7-8) und (7-9) sind in Abbildung 7-9 definiert.

$$\begin{aligned} \vartheta_{HZ,MB} = & \frac{1}{l_{MB}} \cdot \left[\left(x_0 + \frac{x_1}{2} \right) \cdot \frac{\vartheta_{HZ,MB,1,1} + \vartheta_{HZ,MB,1,2}}{2} + \frac{x_1 + x_2}{2} \cdot \vartheta_{HZ,MB,2} \right. \\ & + \frac{x_2 + x_3}{2} \cdot \vartheta_{HZ,MB,3} + \frac{x_3 + x_4}{2} \cdot \vartheta_{HZ,MB,4} + \frac{x_4 + x_5}{2} \cdot \vartheta_{HZ,MB,5} \\ & \left. + \left(\frac{x_5}{2} + x_6 \right) \cdot \frac{\vartheta_{HZ,MB,6,1} + \vartheta_{HZ,MB,6,2}}{2} \right] \end{aligned} \quad (7-3)$$

$$\begin{aligned} \vartheta_{EHZ,MB} = & \frac{1}{l_{MB}} \cdot \left[\left(x_0 + x_1 + \frac{x_2}{2} \right) \cdot \vartheta_{EHZ,MB,1} + \frac{x_2 + x_3}{2} \cdot \vartheta_{EHZ,MB,2} \right. \\ & \left. + \frac{x_3 + x_4}{2} \cdot \vartheta_{EHZ,MB,3} + \left(\frac{x_4}{2} + x_5 + x_6 \right) \cdot \vartheta_{EHZ,MB,4} \right] \end{aligned} \quad (7-4)$$

Die zur Bestimmung der effektiven Wärmeleitfähigkeit notwendige Temperaturdifferenz ΔT_{Probe} ist in Gleichung (7-5) definiert und die Berechnung der Probenmitteltemperatur für die dickwandige, hohlzylindrische Probe ϑ_{Probe} [°C] in Gleichung (7-6). In den Gleichung (7-7) – (7-9) wird die Berechnung des gesamten Schutzheizungsversatzes ΔT_{SHV} [K] aus den einzelnen Schutzheizungsversätzen $\Delta T_{SHV,1}$ [K] und $\Delta T_{SHV,2}$ [K] gezeigt.

$$\Delta T_{Probe} = \vartheta_{HZ,MB} - \vartheta_{EHZ,MB} \quad (7-5)$$

$$\vartheta_{Probe} = \vartheta_{EHZ,MB} + (\vartheta_{HZ,MB} - \vartheta_{EHZ,MB}) \cdot \left(\frac{1}{2 \cdot \ln(r_{EHZ,i}/r_{HZ,a})} - \frac{r_{HZ,a}^2}{r_{EHZ,i}^2 - r_{HZ,a}^2} \right) \quad (7-6)$$

$$\Delta T_{SHV} = \Delta T_{SHV,1} + \Delta T_{SHV,2} \quad (7-7)$$

$$\Delta T_{SHV,1} = \frac{\vartheta_{HZ,SHB,2,1} + \vartheta_{HZ,SHB,2,2}}{2} - \frac{\vartheta_{HZ,MB,1,1} + \vartheta_{HZ,MB,1,2}}{2} \quad (7-8)$$

$$\Delta T_{SHV,2} = \frac{\vartheta_{HZ,SHB,3,1} + \vartheta_{HZ,SHB,3,2}}{2} - \frac{\vartheta_{HZ,MB,6,1} + \vartheta_{HZ,MB,6,2}}{2} \quad (7-9)$$

7.3.3 Steuerung, Regelung und Messung der elektrischen Leistung

Die drei Heizpatronen und das Heizkabel werden elektrisch betrieben. Um eine hohe Regelgenauigkeit zu erreichen, wird die elektrische Leistungsversorgung über eine durch Filterung geglättete Pulsweitenmodulation mit einer maximalen elektrischen Gleichspannung von 24 V umgesetzt. Das Prinzip der Pulsweitenmodulation wird u. a. in [109] ausführlich beschrieben. Die Regelungen der elektrischen Ausgangsleistungen für die vier Heizelemente werden von softwareimplementierten PID-Reglern des Messprogramms durchgeführt. Das Prinzip der PID-Regelung wird u. a. in [110], [111] ausführlich beschrieben. Die Regelgrößen für die vier Heizelemente, welche durch die Regelung an die Sollwerte angepasst werden sollen, sind in Tabelle 7-1 aufgeführt. Der Sollwert für den Schutzheizungsversatz ist für die Messungen der effektiven Wärmeleitfähigkeit 0 K. Die Sollwerte für die Temperaturen im Messbereich sind abhängig von der gewünschten Probenmitteltemperatur ϑ_{Probe} und Temperaturdifferenz ΔT_{Probe} und können nach entsprechender Umformung mittels Gleichung (7-6) berechnet werden.

Tabelle 7-1: Regelgrößen der Heizelemente der Zylinderapparatur

| Heizelement | Regelgröße |
|-----------------|----------------------|
| Messheizung | $\vartheta_{HZ,MB}$ |
| Schutzheizung 1 | $\Delta T_{SHV,1}$ |
| Schutzheizung 2 | $\Delta T_{SHV,2}$ |
| Heizkabel | $\vartheta_{EHZ,MB}$ |

Zur Bestimmung der effektiven Wärmeleitfähigkeit gemäß Gleichung (7-1) wird die Kenntnis der elektrischen Leistungsaufnahme der Messheizung benötigt. Vom Digitalmultimeter 34972A der

Firma Keysight wird der elektrische Strom und die elektrische Spannung gemessen, mit welchen die Messheizung im stationären Zustand betrieben wird. Die Multiplikation dieser Größen miteinander ergibt die elektrische Leistungsaufnahme der Messheizung. Die elektrische Leistung wird von der Messheizung, und in geringem Maß von den Leitungen, vollständig in einen Wärmestrom umgewandelt.

Zur Sicherung gegen Übertemperaturen sind an den äußeren Rändern des Heizzylinders Bimetall-Temperaturschalter angebracht, die den Stromkreis bei einer Temperatur $> 135\text{ °C}$ solange öffnen, bis diese Temperatur wieder unterschritten wurde. Zusätzlich sind dort Schmelzsicherungen angebracht, die bei einer Temperatur $> 145\text{ °C}$ den Stromkreis dauerhaft unterbrechen. Ein weiterer Temperaturschalter, der den Stromkreis bei ca. 70 °C öffnet, ist in der Wärmedämmung angebracht, welche die Zylinderapparatur umgibt. Alle Temperatursicherungen sind in Reihe geschaltet und nicht in den Messkreis der elektrischen Leistung eingebunden. Diese Messung wird somit nicht durch den elektrischen Widerstand der Sicherungen und deren Leitungen beeinflusst.

7.3.4 Luftdruckmessung

Der Luftdruck in der Zylinderapparatur wird von zwei Drucksensoren nach dem kapazitiven Messprinzip gemessen. Das kapazitive Messprinzip wird u. a. in [24], [112] beschrieben. Der Drucksensor CMR 361 des Herstellers Pfeiffer Vacuum besitzt einen Messbereich von $0,1\text{ mbar} - 1100\text{ mbar}$ und der Drucksensor CMR 363 des gleichen Herstellers besitzt einen Messbereich von $0,001\text{ mbar} - 11\text{ mbar}$. Die Messunsicherheiten der Drucksensoren sind in Kapitel 7.6 aufgeführt. Zur Kontrolle wurde zeitweise zusätzlich der kapazitive Drucksensor Ceravac CTR 100 N der Firma Leybold mit dem Messbereich $0,0133 - 133\text{ mbar}$ eingesetzt. Dessen Messungen wurden jedoch nicht für die in der vorliegenden Arbeit dokumentierten Druckwerte verwendet.

7.4 Vakuumtechnik

In Abbildung 7-10 ist ein vereinfachtes Fließbild der Verschaltung der Vakuumkomponenten der Versuchsanlage dargestellt. Die wesentlichen Komponenten sind in Tabelle 7-2 aufgeführt.

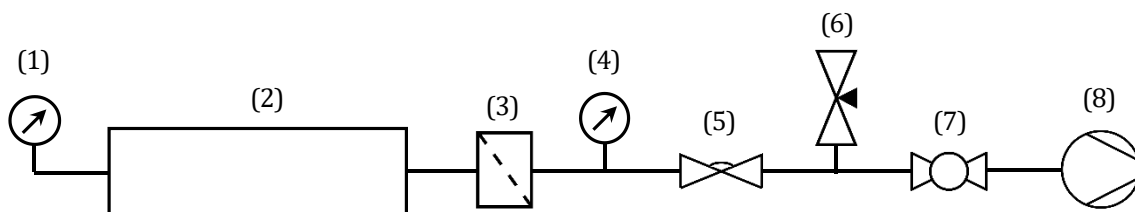


Abbildung 7-10: Vereinfachtes Fließbild der Vakuumkomponenten der Versuchsanlage zur Messung der effektiven Wärmeleitfähigkeit. Beschreibung der Komponenten siehe Tabelle 7-2

Zur Verbindung der Vakuumkomponenten werden Edelstahlwellschläuche, Zwischenstücke, T-Stücke, 90 °-Rohrbögen und Reduzierstücke verwendet, die über ISO-KF-Verbindungen miteinander verbunden sind. Letztere sind gemäß ISO 2861 und DIN 28403 genormt. Die Funktionsweisen der in Tabelle 7-2 benannten Komponenten sind u. a. in [24], [113] beschrieben.

Tabelle 7-2: Wesentliche Vakuumkomponenten der Versuchsanlage zur Messung der effektiven Wärmeleitfähigkeit. Nummerierung bezieht sich auf Abbildung 7-10

| Nr. | Komponente | Herstellerbezeichnung | Hersteller | Spezifikationen |
|-----|--------------------------|--|-----------------|---|
| (1) | Drucksensor | CMR 363 | Pfeiffer Vacuum | 0,001 – 11 mbar |
| (2) | Zylinderapparatur | Zylinderapparatur | Autor | siehe Kapitel 7.2 |
| (3) | Staubfilter | Amazon 5101 series junior cartridge filter | Amazon Filters | Abscheidung von Partikeln > 30 nm |
| (4) | Drucksensor | CMR 361 | Pfeiffer Vacuum | 0,1 – 1100 mbar |
| (5) | Membranventil | Membranventil | Pfeiffer Vacuum | DN16 |
| (6) | Nadelventil | LV10K | Edwards | DN10 |
| (7) | Kugelhahn | Kugelhahn | Pfeiffer Vacuum | DN25 |
| (8) | Drehschieber-Vakuumpumpe | GLD-040 | Ulvac | Enddruck ¹⁾ : $5 \cdot 10^{-4}$ mbar |

¹⁾ Als Enddruck wird der minimal erreichbare Druck bezeichnet

7.5 Messablauf

Zunächst muss die schüttfähige Probe in die Zylinderapparatur eingebracht werden. Dies geschieht über eine schwerkraftbetriebene Befüllung in die senkrecht aufgestellte Zylinderapparatur mittels einer kleinen Schaufel. Während und nach der Befüllung werden mittels eines Gummihammers regelmäßig Stöße über den oberen Flanschring eingebracht, die über das resultierende Rütteln zu einer Verdichtung der Probenschüttung führen. Dies hat u. a. den Zweck, große Hohlräume innerhalb der Probe zu verhindern. Darüber hinaus soll eine Dichte der Schüttung eingestellt werden, die auch für die Anwendung innerhalb eines großvolumigen, doppelwandigen Warmwasserspeichers realistisch ist. Die Stöße werden solange eingebracht, bis eine Fortsetzung zu keiner weiteren signifikanten Setzung der Schüttung mehr führt. Die resultierende Dichte der Probe wird bestimmt aus der Probenmasse m_{probe} [kg] geteilt durch das Probenvolumen, welches $V_{probe} = 3,0137 \text{ dm}^3$ beträgt. Um Hohlräumbildungen innerhalb des Messbereichs durch Setzungen der Schüttung auszuschließen, befindet sich die Zylinderapparatur während der Messung ebenfalls in senkrechter Position.

Nach dem Befüllen wird die Zylinderapparatur mit dem oberen DN100 ISO-CF-Flanschdeckel verschlossen und das Heizkabel sowie die Wärmedämmung werden angebracht. Daraufhin wird sie im Tiefkühlschrank befestigt, über die äußeren Sub-D-Stecker an die EMSR-Technik und über die ISO-KF-Verbindungen an die Vakuumtechnik angeschlossen.

Die Proben wurden jeweils gemäß der Messmatrix in Tabelle 7-3 vermessen. Für manche Proben wurden darüber hinaus einige Messpunkte hinzugefügt oder, wenn nötig, leicht abgeändert. Die Proben GEP(1-2) und FEP(0-0,1) (siehe Tabelle 5-5) wurden wiederum, abweichend von der Messmatrix in Tabelle 7-3, lediglich bei einer Probenmitteltemperatur von 48 °C gemessen, da hiermit ausschließlich der Einfluss der Korngröße auf den Kopplungseffekt untersucht werden sollte.

Tabelle 7-3: Messmatrix für eine Probe

| Messpunkt-Nr. | Luftdruck p_{Luft} [mbar] | Probenmitteltemperatur ϑ_{Probe} [°C] | Temperaturdifferenz ΔT_{Probe} [K] | Temp. am Heizzylinder $\vartheta_{HZ,MB}$ [°C] | Temp. am Edelstahlhohlzyl. $\vartheta_{EHZ,MB}$ [°C] |
|---------------|--------------------------------|--|---|---|---|
| 1 | 960 ± 20 ¹⁾ | 48 | 50 | 87,65 | 37,65 |
| 2 | 0 ²⁾ | 70 | 50 | 109,65 | 59,65 |
| 3 | 0,02 ± 0,005 | 70 | 50 | 109,65 | 59,65 |
| 4 | 0 ²⁾ | -5 | 50 | 34,65 | -15,35 |
| 5 | 0,02 ± 0,005 | -5 | 50 | 34,65 | -15,35 |
| 6 | 0,02 ± 0,005 | 20 | 50 | 59,65 | 9,65 |
| 7 | 0 ²⁾ | 48 | 50 | 87,65 | 37,65 |
| 8 | 0,02 ± 0,005 | 48 | 50 | 87,65 | 37,65 |
| 9 | 0,1 ± 0,005 | 48 | 50 | 87,65 | 37,65 |
| 10 | 1 | 48 | 50 | 87,65 | 37,65 |
| 11 | 10 | 48 | 50 | 87,65 | 37,65 |
| 12 | 100 ± 1 | 48 | 50 | 87,65 | 37,65 |
| 13 | 800 ± 2 | 48 | 50 | 87,65 | 37,65 |
| 14 | 960 ± 20 ¹⁾ | 48 | 50 | 87,65 | 37,65 |
| 15 | 960 ± 20 ¹⁾ | 0 | 50 | 39,65 | -10,35 |
| 16 | 960 ± 20 ¹⁾ | 20 | 50 | 59,65 | 9,65 |
| 17 | 960 ± 20 ¹⁾ | 70 | 50 | 109,65 | 59,65 |
| 18 | 960 ± 20 ¹⁾ | 90 | 50 | 129,65 | 79,65 |

¹⁾ Atmosphärendruck

²⁾ Der minimal mögliche Luftdruck wird angestrebt

Die Wahl der Temperaturdifferenz ΔT_{Probe} hat Einfluss auf die Messgenauigkeit und den messbaren Temperaturbereich. Je höher ΔT_{Probe} , desto höher der Wärmestrom in radialer Richtung und desto höher damit auch die minimale elektrische Leistung. Höhere elektrische Leistungen können mit geringerer Messunsicherheit gemessen werden als solche, die nahe am unteren Rand des Messbereichs des jeweiligen Messgeräts liegen. Zudem muss ein möglichst vollständig eindimensionaler, radialer Wärmestrom im Messbereich angestrebt werden, um anhand von Gleichung (7-1) exakte Ergebnisse zu errechnen. Geringe Temperaturdifferenzen zwischen Mess- und Schutzheizungsbereich, die zu axialen Wärmeströmen im Messbereich führen, lassen sich

jedoch trotz Schutzheizungen nicht vollständig verhindern. Je größer aber der Wärmestrom in radialer Richtung ist, verursacht durch eine größere Temperaturdifferenz ΔT_{probe} , desto geringer ist die Auswirkung dieser axialen Wärmeströme auf die gemessene effektive Wärmeleitfähigkeit, da die Schutzheizungsversätze, und damit die axialen Wärmeströme, bei steigender Temperaturdifferenz ΔT_{probe} nahezu gleich bleiben. Diese Gründe sprechen für eine möglichst große Temperaturdifferenz ΔT_{probe} . Für eine Begrenzung spricht allerdings, dass eine hohe Temperaturdifferenz ΔT_{probe} den Bereich der messbaren Probenmitteltemperaturen einschränkt. Der Bereich der Randtemperaturen an der Zylinderapparatur wird nach unten durch die im Tiefkühlschrank minimal einstellbare Temperatur von $(-26 \pm 1) \text{ }^\circ\text{C}$ ³ und nach oben durch die maximale Langzeit-Temperaturbeständigkeit der Materialien am und um den Heizzylinder von ca. $130 \text{ }^\circ\text{C}$ begrenzt. Bei $\Delta T_{probe} = 10 \text{ K}$ läge mit dieser Beschränkung beispielsweise die maximale Probenmitteltemperatur ϑ_{probe} nach Gleichung (7-6) bei $122 \text{ }^\circ\text{C}$, während bei $\Delta T_{probe} = 100 \text{ K}$ nur maximal $51 \text{ }^\circ\text{C}$ möglich wären.

In Probemessungen stellte sich auf Basis der oben genannten Einschränkungen eine Temperaturdifferenz der Probe von $\Delta T_{probe} = 50 \text{ K}$ als ein guter Kompromiss für sämtliche Proben und Messpunkte dar, weshalb dieser Wert für sämtliche Messungen der effektiven Wärmeleitfähigkeit mit der Zylinderapparatur gewählt wurde.

Für die Messungen mit Probenmitteltemperaturen $\vartheta_{probe} \geq 48 \text{ }^\circ\text{C}$ blieb der Tiefkühlschrank geöffnet und außer Betrieb und die Zylinderapparatur war einer Umgebungstemperatur von $(23 \pm 4) \text{ }^\circ\text{C}$ ausgesetzt. Für die Messung bei $\vartheta_{probe} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ wurde über den Tiefkühlschrank eine Umgebungstemperatur der Zylinderapparatur von $(-16 \pm 1) \text{ }^\circ\text{C}$ und bei $\vartheta_{probe} = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ und $\vartheta_{probe} = -5 \text{ }^\circ\text{C}$ von $(-26 \pm 1) \text{ }^\circ\text{C}$ eingestellt.

Die Probe wird zunächst bei Atmosphärendruck und einer Mitteltemperatur von $48 \text{ }^\circ\text{C}$ gemessen (Messpunkt 1). Die gleichen Messbedingungen werden bei Messpunkt 14 eingestellt. Vor Messpunkt 1 wurde die Probe für mehrere Wochen im Labor, bei witterungsbedingter relativer Luftfeuchtigkeit zwischen $20 \text{ } \%$ und $60 \text{ } \%$ und bei einer Umgebungstemperatur von $(23 \pm 4) \text{ }^\circ\text{C}$ gelagert. Vor Messpunkt 14 wurde die Probe zwischenzeitlich bei höheren Temperaturen evakuiert bis auf $< 0,02 \text{ mbar}$. Durch den Vergleich der Messwerte der Messpunkte 1 und 14 können somit Rückschlüsse auf den Einfluss der Feuchtebeladung der Probe auf die effektive Wärmeleitfähigkeit gezogen werden, siehe Anhang A5. Mit Ausnahme von Anhang A5 wurden alle in der vorliegenden Arbeit dargestellten Messwerte der effektiven Wärmeleitfähigkeit bei Atmosphärendruck nach der Evakuierung gemessen.

Bei Messpunkt 2 wird ein möglichst geringer Luftdruck bei einer Probenmitteltemperatur von $70 \text{ }^\circ\text{C}$ angestrebt. Um Luftdrücke von $\leq 0,02 \text{ mbar}$ bei dieser Probenmitteltemperatur erreichen

³ Durch den Wärmestrom vom Heizzylinder und die Wärmedämmung um die Zylinderapparatur, ist der Minimalwert der Edelstahlhohlzylindertemperatur stets um einige Kelvin höher als die Umgebungstemperatur. Je höher die effektive Wärmeleitfähigkeit der Probe, desto höher die notwendige Temperaturdifferenz zur Umgebung.

zu können, wird die Probe zuvor bei möglichst hohen Temperaturen von 129,65 °C am Heizzylinder und 89,65 °C am Edelstahlhohlzylinder bei laufender Vakuumpumpe und geschlossenem Nadelventil (siehe Abbildung 7-10) bis zu einem Luftdruck von ca. 0,1 mbar ausgeheizt. Dabei wird die an der Probe adsorbierte Feuchtigkeit zu möglichst großen Teilen entfernt. Feuchtigkeit gast bei sinkendem Vakuumdruck und steigender Temperatur stärker aus und führt damit zu einer Erhöhung des Luftdrucks. Beim Absenken der Temperatur sinkt der Luftdruck entsprechend stärker ab, als es eine Berechnung mit der Zustandsgleichung idealer Gase erwarten lässt. An Oberflächen gebundene Feuchtigkeit sowie ein hoher Strömungswiderstand wirken einer hohen Evakuierungsgeschwindigkeit und einem geringen erreichbaren Enddruck entgegen. Je nach mittlerer Korngröße und Feuchtigkeitsbeladung der Probe, dauert das Ausheizen in der für diese Arbeit verwendeten Versuchsanlage von einem Tag bis zu einer Woche.

Bei allen Luftdrücken $\leq 0,1$ mbar muss die Vakuumpumpe in Betrieb sein, um den durch Leckage und Ausgasungen bedingten Druckanstieg in der Zylinderapparatur⁴ von $\leq 0,058$ mbar/h auszugleichen und den gewünschten Luftdruck in der Zylinderapparatur hinreichend konstant zu halten. Um im Bereich $\leq 0,1$ mbar höhere Luftdrücke als den aktuell erreichbaren Enddruck einzustellen, wird das Nadelventil zur Umgebung so weit geöffnet, bis der gewünschte Luftdruck annähernd konstant erreicht werden kann. Der in Tabelle 7-3 angegebene Schwankungsbereich für den Zieldruck resultiert für Luftdrücke $\leq 0,1$ mbar aus Ungenauigkeiten und Schwankungen bei der hochsensiblen Einstellung durch das Nadelventil. Bei Zieldrücken zwischen 1 und 800 mbar wird die Zylinderapparatur zur Umgebung und zur Vakuumpumpe hin verschlossen. Bei Luftdrücken von 1 mbar und 10 mbar kommt es durch Leckage zu einem linearen Anstieg des Luftdrucks. Hierbei wird zur Ermittlung der effektiven Wärmeleitfähigkeit ein Zeitbereich ausgewertet, in welchem der arithmetisch gemittelte Luftdruck dem exakten Zielwert entspricht. Bei den Zieldrücken 100 mbar und 800 mbar wird die Leckage vom Einfluss der Schwankungen der Umgebungstemperatur auf den Luftdruck überlagert. Die resultierenden maximalen Schwankungen des Luftdrucks sind in Tabelle 7-3 angegeben. Bei Messungen bei Atmosphärendruck, wird die Zylinderapparatur über das vollständig geöffnete Nadelventil zur Umgebung hin geöffnet. Der entsprechende in Tabelle 7-3 angegebene Schwankungsbereich entspricht den Schwankungen des Atmosphärendrucks am Standort der Versuchsanlage.

Für die Messungen der effektiven Wärmeleitfähigkeit bei Variation des Luftdrucks wurde eine Probenmitteltemperatur von 48 °C gewählt. Die gleiche mittlere Dämmstofftemperatur würde sich bei einem großvolumigen Warmwasserspeicher mit geringer Dämmdicke im Vergleich zum Gesamtdurchmesser⁵ beispielsweise bei einer Außentemperatur von 10 °C und einer mittleren Wassertemperatur von 86 °C einstellen. Ursprünglich wurde die Probenmitteltemperatur von 48 °C gewählt, da sich dieser Wert an der IGTE-eigenen Zweiplattenapparatur ergab als ein Wert

⁴ Bilanzbereich der Druckanstiegsmessung zwischen den Komponenten (1) und (5) in Abbildung 7-10

⁵ Für diesen Fall kann die mittlere Dämmstofftemperatur in guter Näherung aus dem arithmetischen Mittel der Grenztemperaturen bestimmt werden

von 50 °C eingestellt wurde. Diese Messapparatur wurde u. a. zur Erzeugung von Referenzwerten verwendet, siehe Kapitel 7.7. Die Probenmitteltemperatur von 48 °C wurde also gewählt, um einen direkten Vergleich ohne Interpolationen zu ermöglichen. Zudem wurde eine Probenmitteltemperatur angestrebt, die bei einer Temperaturdifferenz von $\Delta T_{probe} = 50$ K einstellbar ist, ohne dass es einer Kühlung der Zylinderapparatur durch den Tiefkühlschrank bedarf. Für geringere Probenmitteltemperaturen wäre dies nicht für alle Proben der Fall gewesen.

Die Messungen wurden in Anlehnung an EN ISO 8497:1996-09 durchgeführt. Danach gilt ein Zustand dann als hinreichend stationär, wenn sich mindestens drei aufeinanderfolgende Zwischenwerte der effektiven Wärmeleitfähigkeit in einem gleichmäßigen zeitlichen Abstand von mindestens 30 Minuten um maximal 1 % vom arithmetischen Mittelwert der drei Zwischenwerte unterscheiden und diese Zwischenwerte keinen mit der Zeit einseitig an- oder absteigenden Trend aufweisen. Ein Zwischenwert wird aus dem arithmetischen Mittelwert der Einzelmesswerte innerhalb der vorangegangenen mindestens 30 Minuten gebildet. In der vorliegenden Arbeit wurde die Beobachtung gemacht, dass diese in EN ISO 8497:1996-09 beschriebenen Mindestanforderungen nicht für alle Messbedingungen ausreichend sind und sich nach Erreichen der Mindestanforderungen bei darüberhinausgehender Messdauer Abweichungen der Zwischenwerte von > 1 % ergeben können. Daher wurde zusätzlich zur Bedingung gemacht, dass sich bei Messungen im Vakuum keine der gemessenen Einzeltemperaturen in der Zylinderapparatur noch um mehr als 0,1 K/h verändern darf. Dies betrifft letztlich die Temperaturen in den Sub-D-Steckern an den Flanschdeckeln, die diese Bedingungen jeweils als Letztes erreichen. Die Mitteltemperaturen im Messbereich hingegen dürfen keinen mit der Zeit einseitig an- oder absteigenden Trend aufweisen. Außerdem wurde festgelegt, dass sich die Zwischenwerte der effektiven Wärmeleitfähigkeit auch untereinander um nicht mehr als 1 % unterscheiden dürfen, jeweils bezogen auf den geringeren Wert. Ein Zwischenwert wurde jeweils aus 100 Einzelmesswerten gemittelt, was einem Messzeitraum von (45 ± 5) Minuten entsprach. Der Messwert der effektiven Wärmeleitfähigkeit wurde jeweils aus dem arithmetischen Mittelwert der Zwischenwerte gebildet.

Eine Ausnahme von den oben genannten Vorgaben wurde bei den Messungen bei 1 und 10 mbar gemacht, bei welchen ein einseitiger Trend einer ansteigenden effektiven Wärmeleitfähigkeit, bedingt durch die Leckage der Zylinderapparatur, und Abweichungen > 1 % der Zwischenwerte zueinander toleriert wurde. Da bei diesen Messungen allerdings sämtliche Temperaturen in der Zylinderapparatur jeweils bereits seit mehreren Tagen stationär waren, ist davon auszugehen, dass der Trend tatsächlich alleine auf den Druckanstieg zurückzuführen ist. Bei diesen Messpunkten wurden für die Bildung des Messwerts der effektiven Wärmeleitfähigkeit mindestens 300 Einzelmesswerte in dem Zeitraum gemittelt, in welchem der Luftdruck exakt den gewünschten arithmetischen Mittelwert von 1 oder 10 mbar ergab.

7.6 Messunsicherheitsbetrachtung

Jeder Messwert y einer physikalischen Größe ist mit einer Messunsicherheit u_y behaftet. Zur Verringerung der Messunsicherheit wird der Messwert, wenn möglich, aus dem arithmetischen Mittelwert \bar{y} einer Messreihe aus Einzelmesswerten y_i mit der Anzahl N gebildet. Die Gesamt-Messunsicherheit kann in einen statistischen und einen systematischen Anteil eingeteilt werden. Statistische Messunsicherheiten $u_{\bar{y},stat}$ sind zufällige positive oder negative Abweichungen mehrerer Messwerte zueinander bei annähernd gleichen Messbedingungen. Sie können durch eine Standardabweichung des Mittelwerts \bar{y} einer Messreihe gemäß Gleichung (7-10) ermittelt werden und entsprechend als Standardunsicherheit bezeichnet werden. Systematische Messunsicherheiten $u_{\bar{y},sys}$ sind beispielsweise auf systematische Fehler im Messsystem zurückzuführen. Wenn die Größe der systematischen Messunsicherheit bekannt ist, hat die Messunsicherheit ein bestimmtes Vorzeichen und der Messwert kann entsprechend korrigiert werden. Bei unbekannt systematischen Messunsicherheiten, können diese abgeschätzt und, wie auch die statistischen Messunsicherheiten, durch einen Unsicherheitsbereich $\pm u_{\bar{y}}$ angegeben werden.

Wenn eine Messgröße y nicht direkt messbar ist, sondern aus mehreren physikalischen Messgrößen z_i mit ihren jeweiligen Messunsicherheiten $u_{z,i}$ errechnet werden muss, wie beispielsweise auch die effektive Wärmeleitfähigkeit, dann kann das GAUß'sche quadratische Fortpflanzungsgesetz gemäß Gleichung (7-11) zur Berechnung der kombinierten Messunsicherheit $u_{\bar{y},k}$ verwendet werden. Dafür wird die Berechnungsgleichung $g(z_i)$ für y eingesetzt. Aus statistischer und systematischer Messunsicherheit kann durch Addition der Beträge der Messunsicherheiten, oder ebenfalls durch Fortpflanzung gemäß Gleichung (7-11), eine Gesamt-Messunsicherheit gebildet werden. Eine relative Messunsicherheit wird gebildet, indem die Messunsicherheit durch den Messwert geteilt wird. [114], [115], [116]

$$u_{\bar{y},stat} = \sqrt{\frac{1}{N(N-1)} \cdot \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2} \quad (7-10)$$

$$u_{\bar{y},k} = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial g}{\partial z_i}\right)^2 \cdot u_{z,i}^2} \quad (7-11)$$

Die Messgröße, die von der Versuchsanlage primär bestimmt wird, ist die effektive Wärmeleitfähigkeit. Diese wird vor allem in Zusammenhang mit der Probenmitteltemperatur und dem Luftdruck innerhalb der Probe gebracht, die ebenfalls von der Versuchsanlage bestimmt werden. Die Messunsicherheit dieser drei Messgrößen wird im Folgenden betrachtet. Da zur Messung aller elektrischer Messsignale ein Digitalmultimeter verwendet wird, müssen zunächst dessen Messunsicherheiten betrachtet werden.

7.6.1 Digitalmultimeter

Die Messunsicherheiten des Digitalmultimeters 34972A gemäß dem Hersteller Keysight Technologies sind in Gleichung (7-12) für die Gleichspannungsmessung zwischen 0 und 10 V, in Gleichung (7-13) für die Gleichstrommessung zwischen 0 und 0,1 A und in Gleichung (7-14) für die Gleichstrommessung zwischen 0 und 1 A angegeben [117].

$$u_{U,10V} = 3,5 \cdot 10^{-5} \cdot U + 4 \cdot 10^{-5} \text{ V} \quad (7-12)$$

$$u_{I,0,1A} = 5 \cdot 10^{-4} \cdot I + 5 \cdot 10^{-6} \text{ A} \quad (7-13)$$

$$u_{I,1A} = 1 \cdot 10^{-3} \cdot I + 1 \cdot 10^{-4} \text{ A} \quad (7-14)$$

Mit der Messunsicherheit der Spannungsmessung $u_{U,10V}$ [V] und der Strommessung $u_{I,0,1A}$ [A] und $u_{I,1A}$ [A] sowie der Messspannung U [V] und dem Messstrom I [A].

7.6.2 Luftdruckmessung

Für alle Luftdrücke ≥ 100 mbar wurden die Messwerte des Drucksensors CMR 361 verwendet. Dieser weist laut Hersteller Pfeiffer Vacuum bei gleichbleibender Temperatur eine maximale relative Messunsicherheit von $\pm 0,2$ % bezogen auf den Messwert auf. Hinzu kommen maximal $\pm 0,01$ %/K und $\pm 0,05$ mbar/K bei Änderungen der Umgebungstemperatur des Drucksensors. Die maximale Änderung der Umgebungstemperatur des CMR 361 betrug 8 K, womit sich $\pm 0,08$ % und $\pm 0,4$ mbar ergeben. Je näher sich der Messwert am unteren Rand des Messbereichs befindet, desto höher wird die relative Messunsicherheit. Bezogen auf den niedrigsten verwerteten Messwert des CMR 361 von 100 mbar bedeutet dies insgesamt eine maximale absolute Messunsicherheit von $\pm 0,68$ mbar und damit eine maximale relative Messunsicherheit von $\pm 0,68$ % des Drucksensors. Für die Druckmessung wird ein Ausgangssignal des Sensors von 1 bis 10 V ausgewertet. Durch den Spannungsabfall über die Messleitung ergibt sich ein zusätzlicher systematischer Messfehler von ca. $-0,4$ %. Dieser wird der Messunsicherheit mit $\pm 0,4$ % zugeschlagen. Auf eine Korrektur wird verzichtet. Für das Digitalmultimeter muss gemäß Kapitel 7.6.1 eine auf die minimale Messspannung von 1,8 V bei 100 mbar bezogene relative Messunsicherheit von $\pm 0,006$ % hinzugefügt werden. Die maximale relative Gesamt-Messunsicherheit der Druckmessung mit dem CMR 361 beträgt somit bei 100 mbar $\pm 1,086$ %, gerundet auf $\pm 1,1$ %. [118], [119]

Alle Luftdrücke ≤ 11 mbar wurden vom Drucksensor CMR 363 gemessen. Dieser weist laut Hersteller Pfeiffer Vacuum ebenfalls eine Messunsicherheit von $\pm 0,2$ % auf den Messwert auf. Hier kommen Messunsicherheiten bei einer Temperaturänderung von 8 K von $\pm 0,08$ % und $\pm 0,004$ mbar hinzu. Mit dem CMR 363 wurden teilweise bis an den unteren Rand des Messbereichs von 0,001 mbar Messwerte aufgenommen und verwertet, wo sich besonders hohe relative Messunsicherheiten einstellen. So ergibt sich bei 0,001 mbar eine maximale absolute Messunsicherheit des Drucksensors von $\pm 0,0040028$ mbar, was einer maximalen relativen Messunsicherheit von $\pm 400,28$ % entspricht. Bei 0,02 mbar betragen die maximalen Messunsicherheiten $\pm 0,004056$ mbar, bzw. $\pm 20,28$ % und bei 10 mbar $\pm 0,032$ mbar, bzw. $\pm 0,32$ %.

Bezogen auf eine minimale Messspannung von 1,0008 V bei 0,001 mbar muss jeweils eine maximale relative Messunsicherheit durch das Digitalmultimeter von $\pm 0,0085\%$ gemäß Kapitel 7.6.1 hinzugefügt werden, sowie $\pm 0,4\%$ für den Spannungsabfall über die Messleitung.

Statistische Messunsicherheiten, die an Stichproben von jeweils 300 Einzelmesswerten gemäß Gleichung (7-10) ausgewertet wurden, betragen lediglich $< 0,5\%$ der übrigen Messunsicherheiten und werden daher vernachlässigt. Die Gesamt-Messunsicherheiten der Druckmessung an allen relevanten Messdrücken sind in Tabelle 13-2 im Anhang A3 aufgeführt.

7.6.3 Probenmitteltemperatur

Die Probenmitteltemperatur wird gemäß Gleichung (7-6) über die Pt100 an Heizzylinder und Edelstahlhohlzylinder im Messbereich bestimmt. Die Pt100 auf dem Heizzylinder und Edelstahlhohlzylinder wurden mit der gesamten Messkette kalibriert. Somit sind die Messunsicherheiten des Digitalmultimeters in den verbleibenden Abweichungen bereits enthalten. Der arithmetische Mittelwert der Standardabweichungen der einzelnen Pt100 bzgl. des Kalibriernormals beträgt nach der Kalibrierung $\pm 0,051\text{ K}$ für den Heizzylinder und $\pm 0,3\text{ K}$ für den Edelstahlhohlzylinder. Als Messunsicherheit bei der Längenmessung mit dem Messschieber werden in Anlehnung an [116] $\pm 0,05\text{ mm}$ angenommen. Diese Werte gelten als systematische Messunsicherheiten.

Zur Bestimmung statistischer Messunsicherheiten wurden Messungen des Probenmaterials FEP(0-0,1) (vgl. Tabelle 5-5) ausgewertet. Dieses Material weist bei Atmosphärendruck die höchsten und im Vakuum die niedrigsten gemessenen effektiven Wärmeleitfähigkeiten aller untersuchten Proben auf. Somit kann damit der gesamte Bereich der gemessenen effektiven Wärmeleitfähigkeiten abgedeckt werden. Ausgewertet wurden die jeweils 300 Einzelmesswerte der Messwerte bei einem Luftdruck von 0,012 mbar und bei Atmosphärendruck. Als Probenmitteltemperatur wurde jeweils der meistgemessene Wert von 48 °C gewählt. Die gemessenen Werte der effektiven Wärmeleitfähigkeit betragen $74,84\text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ bei Atmosphärendruck und $3,55\text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ bei 0,012 mbar.

Die anhand der Gleichungen (7-10) und (7-11) mit den Gleichungen (7-3), (7-4) und (7-6) bestimmten kombinierten statistischen Messunsicherheiten der Probenmitteltemperatur betragen $4,5\cdot 10^{-5}\text{ K}$ bei $74,84\text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ und $3,6\cdot 10^{-5}\text{ K}$ bei $3,55\text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$. Diese geringen Werte sind auf die hohe Anzahl an Messwerten und die hervorragende Regelgenauigkeit der Versuchsanlage zurückzuführen.

Mit den oben genannten einzelnen systematischen Messunsicherheiten und den Gleichungen (7-3), (7-4), (7-6) und (7-11) wurde eine kombinierte systematische Messunsicherheit der Probenmitteltemperatur von $\pm 0,12\text{ K}$ bestimmt. Gegengüber diesem bereits aufgerundeten Wert, können die statistischen Messunsicherheiten vernachlässigt werden und er wird als Gesamt-Messunsicherheit der Probenmitteltemperatur angenommen.

7.6.4 Effektive Wärmeleitfähigkeit

Die statistischen Messunsicherheiten der effektiven Wärmeleitfähigkeit wurden anhand der in Kapitel 7.6.3 spezifizierten Messungen des Probenmaterials FEP(0–0,1) (vgl. Tabelle 5-5) bestimmt. Da der in der Berechnungsgleichung (7-1) enthaltene Formkoeffizient S_{Probe} nicht aus einem Mittelwert von Wiederholungsmessungen stammt und somit dessen Messunsicherheit nicht statistischer Natur ist, wurde hierbei keine Fortpflanzung der Messunsicherheiten vorgenommen. Stattdessen wurden die im Messprogramm berechneten effektiven Wärmeleitfähigkeiten direkt anhand von Gleichung (7-10) ausgewertet.

Es ergab sich daraus eine statistische Messunsicherheit von 0,03 mW/(m·K) bzw. 0,04 % bei einer gemessenen effektiven Wärmeleitfähigkeit von 74,84 mW/(m·K) und von 0,008 mW/(m·K) bzw. 0,2 % bei einer gemessenen effektiven Wärmeleitfähigkeit von 3,55 mW/(m·K).

Für die Bestimmung der systematischen Messunsicherheiten wurde eine Fortpflanzung anhand Gleichung (7-11) mit der Berechnungsgleichung der effektiven Wärmeleitfähigkeit (7-1) durchgeführt.

Der Wärmestrom im Messbereich \dot{Q}_{Mess} ergibt sich aus der Multiplikation der gemessenen Spannung und Stromstärke der Messheizung. Für \dot{Q}_{Mess} wurde bei einer gemessenen effektiven Wärmeleitfähigkeit von 74,84 mW/(m·K) eine kombinierte systematische Messunsicherheit von $\pm 2,7$ mW bzw. $\pm 0,16$ % unter Verwendung der Gleichungen (7-11), (7-12) und (7-14) ermittelt. Bei einer gemessenen effektiven Wärmeleitfähigkeit von 3,55 mW/(m·K) wurde aus den Gleichungen (7-11), (7-12) und (7-13) eine kombinierte systematische Messunsicherheit von $\pm 0,05$ mW bzw. $\pm 0,06$ % bestimmt.

Für den Formkoeffizienten S_{Probe} wurde anhand der in Kapitel 7.6.3 angegebenen systematischen Messunsicherheit der Längenmessung von $\pm 0,05$ mm und anhand der Gleichungen (7-2) und (7-11) eine kombinierte systematische Messunsicherheit von $\pm 2,05$ mm bzw. $\pm 0,44$ % errechnet. Diese Werte gelten unabhängig vom Messpunkt der effektiven Wärmeleitfähigkeit.

Für die Temperaturdifferenz der Probe ΔT_{Probe} wurde anhand der in Kapitel 7.6.3 angegebenen systematischen Messunsicherheit der Pt100 und anhand der Gleichungen (7-5) und (7-11) eine kombinierte systematische Messunsicherheit von $\pm 0,15$ K bzw. $\pm 0,3$ % errechnet. Da in allen Messungen die gleiche Temperaturdifferenz der Probe eingestellt war, können auch diese Messunsicherheiten als unabhängig vom Messpunkt der effektiven Wärmeleitfähigkeit angenommen werden.

Die kombinierte systematische Messunsicherheit der effektiven Wärmeleitfähigkeit λ_{eff} wurde anhand der Gleichungen (7-1) und (7-11), sowie der oben angegebenen systematischen Messunsicherheiten, bei einer gemessenen effektiven Wärmeleitfähigkeit von 74,84 mW/(m·K) zu $\pm 0,45$ mW/(m·K) bzw. $\pm 0,6$ % und bei einer gemessenen effektiven Wärmeleitfähigkeit von 3,55 mW/(m·K) zu $\pm 0,02$ mW/(m·K) bzw. $\pm 0,5$ % bestimmt.

Zusätzliche systematische Messunsicherheiten resultieren aus dem Leitungswiderstand bei der Messung der elektrischen Leistung der Messheizung, Instationaritäten, dem Schutzheizungsversatz und axialen Wärmeströmen über die Kabel innerhalb der Zylinderapparatur. Die resultierenden Werte sind in Tabelle 7-4 angegeben und deren Bestimmungsmethoden werden in Anhang A3 beschrieben. Wenn die absoluten Werte sämtlicher Messunsicherheiten der effektiven Wärmeleitfähigkeiten addiert werden, ergibt sich bei einer gemessenen effektiven Wärmeleitfähigkeit von $74,84 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ eine maximale Gesamt-Messunsicherheit von $\pm 1,68 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$, bzw. $\pm 2,3 \%$. Bei einer gemessenen effektiven Wärmeleitfähigkeit von $3,55 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ergibt sich eine maximale Gesamt-Messunsicherheit von $\pm 0,27 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$, bzw. $\pm 7,6 \%$. Als vereinfachte und sehr konservative Schätzung, kann eine maximale relative Messunsicherheit der Versuchsanlage von $\pm 8 \%$ für alle Messwerte der effektiven Wärmeleitfähigkeit angenommen werden.

Tabelle 7-4: Messunsicherheiten der effektiven Wärmeleitfähigkeit

| Ursache und Art der Messunsicherheit | Bei $\lambda_{eff} = 74,84 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ | | Bei $\lambda_{eff} = 3,55 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ | |
|--|---|--------------------------------|---|--------------------------------|
| | Wert | Rel. % | Wert | Rel. % |
| Statistische Messunsicherheiten | $\pm 0,03 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ | $\pm 0,04 \%$ | $\pm 0,008 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ | $\pm 0,2 \%$ |
| Fortpflanzung der sys. Messunsicherheiten der einzelnen Messgrößen | $\pm 0,45 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ | $\pm 0,6 \%$ | $\pm 0,02 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ | $\pm 0,5 \%$ |
| Leitungswiderstand bei der Leistungsmessung | $\pm 0,75 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ | $\pm 1 \%$ | $\pm 0,04 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ | $\pm 1 \%$ |
| Instationaritäten | $\pm 0,37 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ | $\pm 0,5 \%$ | $\pm 0,07 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ | $\pm 2 \%$ |
| Schutzheizungsversatz | $\pm 0,04 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ | $\pm 0,1 \%$ | $\pm 0,02 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ | $\pm 0,5 \%$ |
| Axiale Wärmeströme über Kabel in Zylinderapparatur | $\pm 0,04 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ | $\pm 0,1 \%$ | $\pm 0,11 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ | $\pm 3,2 \%$ |
| Summe | $\pm 1,68 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ | $\pm 2,3 \%$ | $\pm 0,27 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ | $\pm 7,6 \%$ |

Um die Auswirkungen eventueller Änderungen der Versuchsanlage mit der Zeit, beispielsweise durch Alterung oder durch das Rütteln der Zylinderapparatur zur Verdichtung der Proben, abschätzen zu können, wurde die effektive Wärmeleitfähigkeit von GEP sieben Monate nach der ersten Messung anhand der gleichen Probe mit der gleichen Dichte und annähernd gleichen Umgebungsbedingungen erneut gemessen. Zwischen der ersten Messung und der Wiederholungsmessung von GEP wurden fünf unterschiedliche Proben in die Zylinderapparatur gefüllt und vermessen. Bei beide Messungen von GEP wurden jeweils sämtliche Messpunkte aus Tabelle 7-3 aufgenommen. Die betragsmäßig größte absolute Abweichung zwischen den beiden Messungen beträgt hierbei $0,19 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ bei einem Luftdruck von 1 mbar und einer Probenmitteltemperatur von $48 \text{ }^\circ\text{C}$. Die betragsmäßig größte relative Messabweichung zwischen den beiden

Messungen beträgt 1,4 % bei einem Luftdruck von $(0,02 \pm 0,005)$ mbar und einer Probenmitteltemperatur von -5 °C, bezogen auf die erste Messung. Die betragsmäßige mittlere Abweichung zwischen den beiden Messungen beträgt absolut $0,07$ mW/(m·K) und relativ 0,5 %, bezogen auf die erste Messung. Die Reproduzierbarkeit der Messwerte aus dieser Versuchsanlage kann bzgl. dieser Stichprobe als sehr gut bewertet werden. Die Messwerte der beiden Messungen sind in Anhang A3 in Abbildung 13-6 dargestellt. Mit Ausnahme von Anhang A3 werden in der vorliegenden Arbeit ausschließlich die Messwerte von GEP aus der ersten Messung gezeigt.

7.7 Vergleich von Messergebnissen mit anderen Messgeräten

Um die Plausibilität der Messergebnisse der effektiven Wärmeleitfähigkeit aus der Zylinderapparatur einschätzen zu können, wurden Vergleichsmessungen mit kommerziell verfügbaren Messapparaturen durchgeführt. Als Proben wurden FEP und UPKS ausgewählt. Diese wiesen bei sämtlichen Messungen die jeweils gleichen Probenichten auf.

Als Messapparatur für Vergleichswerte bei unterschiedlichen Temperaturen bei Atmosphärendruck stand die Zweiplattenapparatur TLP 900 H der Firma Taurus Instruments am IGTE der Universität Stuttgart zur Verfügung. Diese besitzt in ihrer überarbeiteten Form eine maximale Messunsicherheit von ± 3 %. Die Messungen wurden in Anlehnung an DIN EN 12664:2001 durchgeführt.

Für Messungen bei unterschiedlichen Luftdrücken und Temperaturen wurden von der Firma Netzsch Messungen der oben genannten Proben mit der evakuierbaren Zweiplattenapparatur GHP 456 Titan durchgeführt. Für die GHP 456 Titan wird eine maximale Messunsicherheit von ± 5 % angegeben [120], [121].

In Abbildung 7-11 sind Messergebnisse der effektiven Wärmeleitfähigkeit von FEP und UPKS bei einer Probenmitteltemperatur von 48 °C abgebildet, die mit der Zylinderapparatur und der GHP 456 Titan ermittelt wurden. Für die Zylinderapparatur wird konservativ eine maximale Messunsicherheit von ± 8 % angenommen. Die Messunsicherheiten aller Messapparaturen sind in dieser und den nachfolgenden Abbildungen dieses Kapitels anhand von Fehlerbalken gekennzeichnet. Es zeigt sich eine außerordentlich hohe Übereinstimmung der Messwerte beider Messapparaturen. Die maximale absolute Messabweichung der Messwerte beträgt $0,97$ mW/(m·K) und die maximale relative Messabweichung ist $4,9$ %. Damit liegen sämtliche Messpunkte deutlich innerhalb der addierten Messunsicherheiten.

In Abbildung 7-12 sind Messergebnisse von FEP bei Atmosphärendruck und unterschiedlichen Probenmitteltemperaturen aller drei Messapparaturen aufgeführt. Zur besseren Vergleichbarkeit ist eine Ausgleichsgerade der Zylinderapparatur-Werte aufgeführt. Auch hier sind außerordentlich hohe Übereinstimmungen aller Messwerte zu erkennen, die ebenfalls allesamt innerhalb der addierten Messunsicherheiten liegen. Die Steigung der Werte aus der TLP 900 H ist hier leicht erhöht im Vergleich zu den Messwerten der übrigen Messapparaturen.

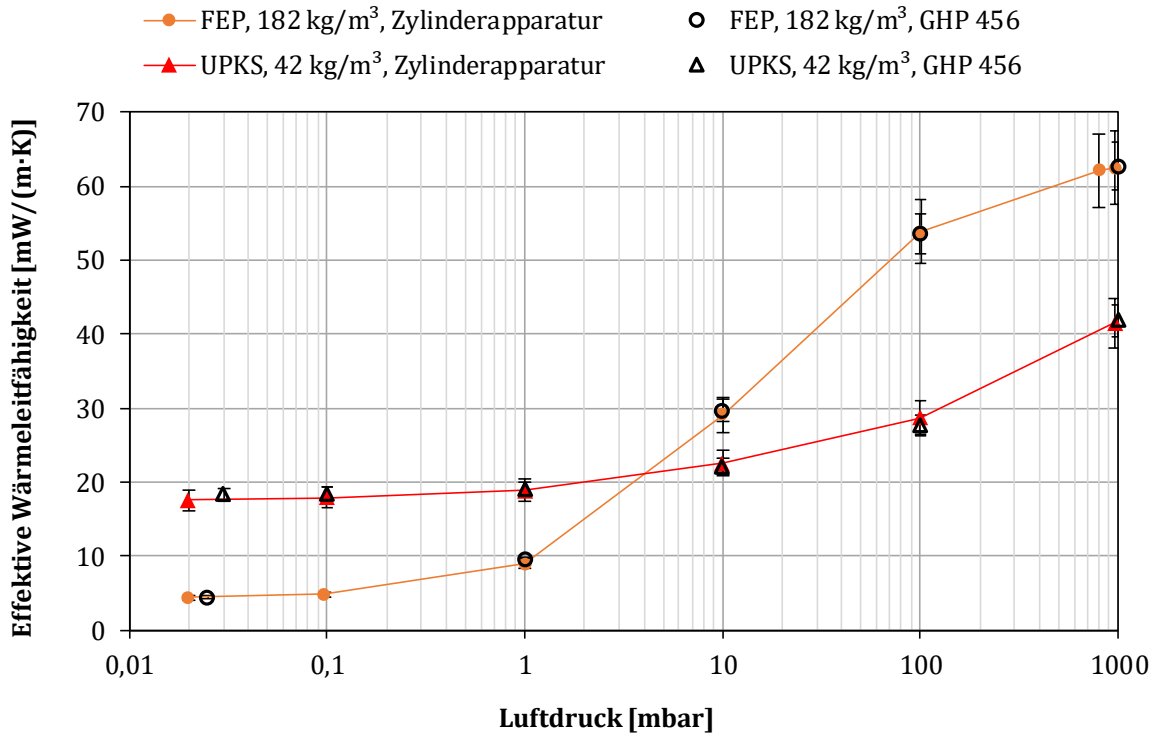


Abbildung 7-11: Vergleich von Messergebnissen der Zylinderapparat und der evakuierbaren Zweiplattenapparat GHP 456 Titan der Firma Netzsch. Aufgenommen jeweils bei der gleichen Probenichte (siehe Legende) und Probenmitteltemperatur von 48 °C. Verbindungslinien zwischen den Messpunkten dienen der besseren Übersichtlichkeit und der Veranschaulichung des Verlaufs

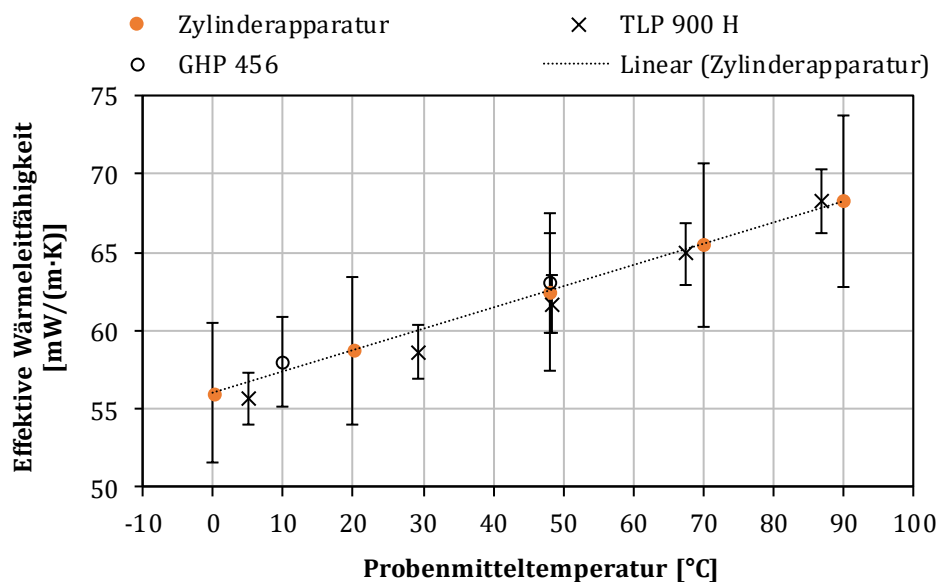


Abbildung 7-12: Vergleich der Messergebnisse von FEP mit einer Dichte von 182 kg/m³ aus der Zylinderapparat, der Zweiplattenapparat des IGTE TLP 900 H und der evakuierbaren Zweiplattenapparat GHP 456 Titan der Firma Netzsch bei Atmosphärendruck

In Abbildung 7-13 sind Messergebnisse von UPKS bei Atmosphärendruck und unterschiedlichen Probenmitteltemperaturen aller drei Messapparaturen aufgeführt. Hier wurde, zur besseren Vergleichbarkeit, eine polynomische Ausgleichskurve zweiten Grades an die Messwerte der

Zylinderapparatur angenähert. Während die Messwerte der Zylinderapparatur und der GHP 456 Titan im Bereich der addierten Messunsicherheit liegen, weisen die Messwerte der TLP 900 H ebenfalls eine höhere Steigung aus als die der übrigen Werte, woraus z. T. Abweichungen resultieren, die leicht außerhalb der addierten Messunsicherheiten liegen.

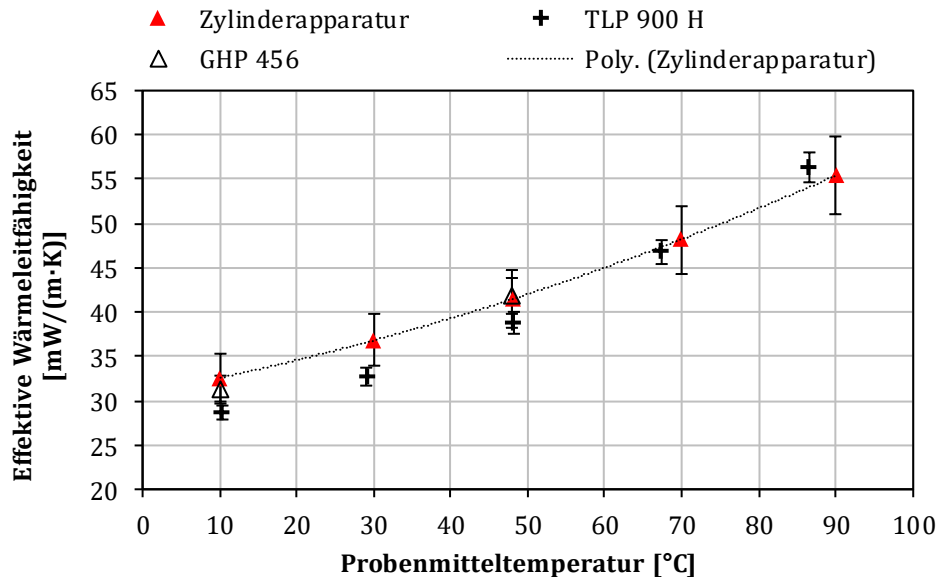


Abbildung 7-13: Vergleich der Messergebnisse von UPKS mit einer Dichte von 42 kg/m^3 aus der Zylinderapparatur, der Zweiplattenapparatur des IGTE TLP 900 H und der evakuierbaren Zweiplattenapparatur GHP 456 Titan der Firma Netzsch bei Atmosphärendruck

In Abbildung 7-14 sind Messergebnisse von FEP bei einem Luftdruck von $(0,02 \pm 0,005) \text{ mbar}$ und unterschiedlichen Probenmitteltemperaturen aus der Zylinderapparatur und der GHP 456 Titan von Netzsch aufgeführt. Hier wurde, zur besseren Vergleichbarkeit, ebenfalls eine polynomische Ausgleichskurve zweiten Grades an die Messwerte der Zylinderapparatur angenähert. Hierbei existiert eine Abweichung der Messwerte bei einer Probenmitteltemperatur von 10 °C von 16% bezogen auf den Messwert der Zylinderapparatur. Diese Abweichung liegt außerhalb der addierten Messunsicherheiten. Würde aus den Messwerten der GHP 456 Titan gemäß der Methodik aus Kapitel 6.6 der dichtespezifische Extinktionskoeffizient und die anteilige Festkörper-Wärmeleitfähigkeit bestimmt werden, ergäbe sich eine negative Festkörper-Wärmeleitfähigkeit und ein deutlich geringerer dichtespezifischer Extinktionskoeffizient, als bisher in der Literatur für expandierten Perlit angegeben wurde. Da sich aus den Messwerten der Zylinderapparatur gemäß Kapitel 6.6 plausible Werte des dichtespezifischen Extinktionskoeffizienten und der anteiligen Festkörper-Wärmeleitfähigkeit ergeben, wird der Messwert der GHP 456 Titan bei einer Probenmitteltemperatur von 10 °C als zu gering eingeschätzt.

Analog kann die Messabweichung der Messwerte von UPKS bei einem Luftdruck von $(0,02 \pm 0,01) \text{ mbar}$ und einer Probenmitteltemperatur von 10 °C in Abbildung 7-15 bewertet werden. Auch hier ergibt sich eine Abweichung außerhalb der addierten Messunsicherheiten, die hier 20% beträgt, bezogen auf den Messwert der Zylinderapparatur.

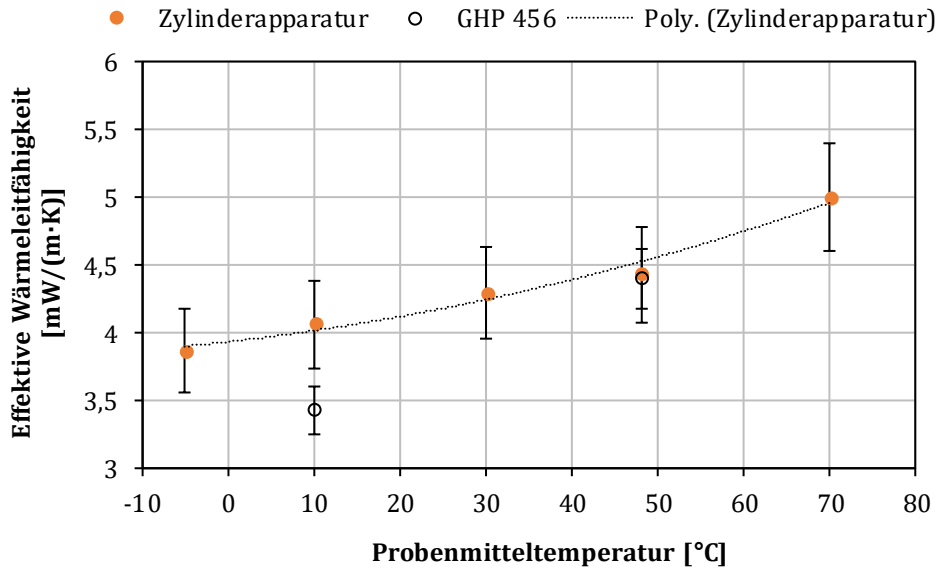


Abbildung 7-14: Vergleich der Messergebnisse von FEP mit einer Dichte von 182 kg/m^3 aus der Zylinderapparatur und der evakuierbaren Zweiplattenapparatur GHP 456 Titan der Firma Netzsch bei einem Luftdruck von $(0,02 \pm 0,005) \text{ mbar}$

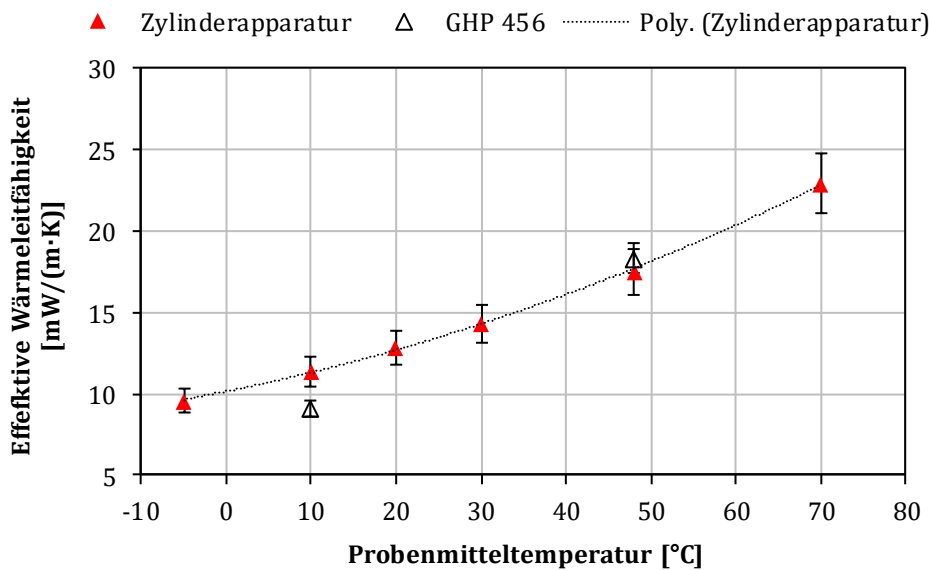


Abbildung 7-15: Vergleich der Messergebnisse von UPKS mit einer Dichte von 42 kg/m^3 aus der Zylinderapparatur und der evakuierbaren Zweiplattenapparatur GHP 456 Titan der Firma Netzsch bei einem Luftdruck von $(0,02 \pm 0,01) \text{ mbar}$

Nach einer Auswertung von PARZINGER zu Ringversuchen bei der Messung der effektiven Wärmeleitfähigkeit mit den jeweils gleichen Materialien an unterschiedlichen Prüfinstituten und Messapparaturen, ergeben sich Standardabweichung der Messergebnisse zueinander von bis zu $\pm 20 \%$ [75]. Somit können die Abweichungen sämtlicher Vergleichsmesswerte der vorliegenden Arbeit als marktüblich eingestuft werden. Die Abweichungen bei einer Probenmitteltemperatur von 48 °C sind im Vergleich dazu außerordentlich gering.

8 Messergebnisse der effektiven Wärmeleitfähigkeit

In diesem Kapitel werden die Messergebnisse der effektiven Wärmeleitfähigkeit expandierter Perlite, pyrogener Kieselsäuren und Mischungen von GEP und HPKS gezeigt und diskutiert. Der Einfluss von Feuchtigkeit auf die effektive Wärmeleitfähigkeit bei Atmosphärendruck anhand von Messungen vor und nach der Evakuierung der jeweiligen Probe wird in Anhang A5 gezeigt.

8.1 Expandierte Perlite

In Abbildung 8-1 ist die effektive Wärmeleitfähigkeit der expandierten Perlite (siehe Kapitel 5.1) bei einer Probenmitteltemperatur von 48 °C über dem logarithmisch skalierten Luftdruck aufgetragen. Für eine bessere Übersicht und Vergleichbarkeit sind hier und in den folgenden Diagrammen in Kapitel 8 keine Fehlerbalken dargestellt und die Messpunkte einer Messreihe über Geraden verbunden. In der Legende ist neben der Bezeichnung die jeweilige Dichte der Probe aufgeführt.

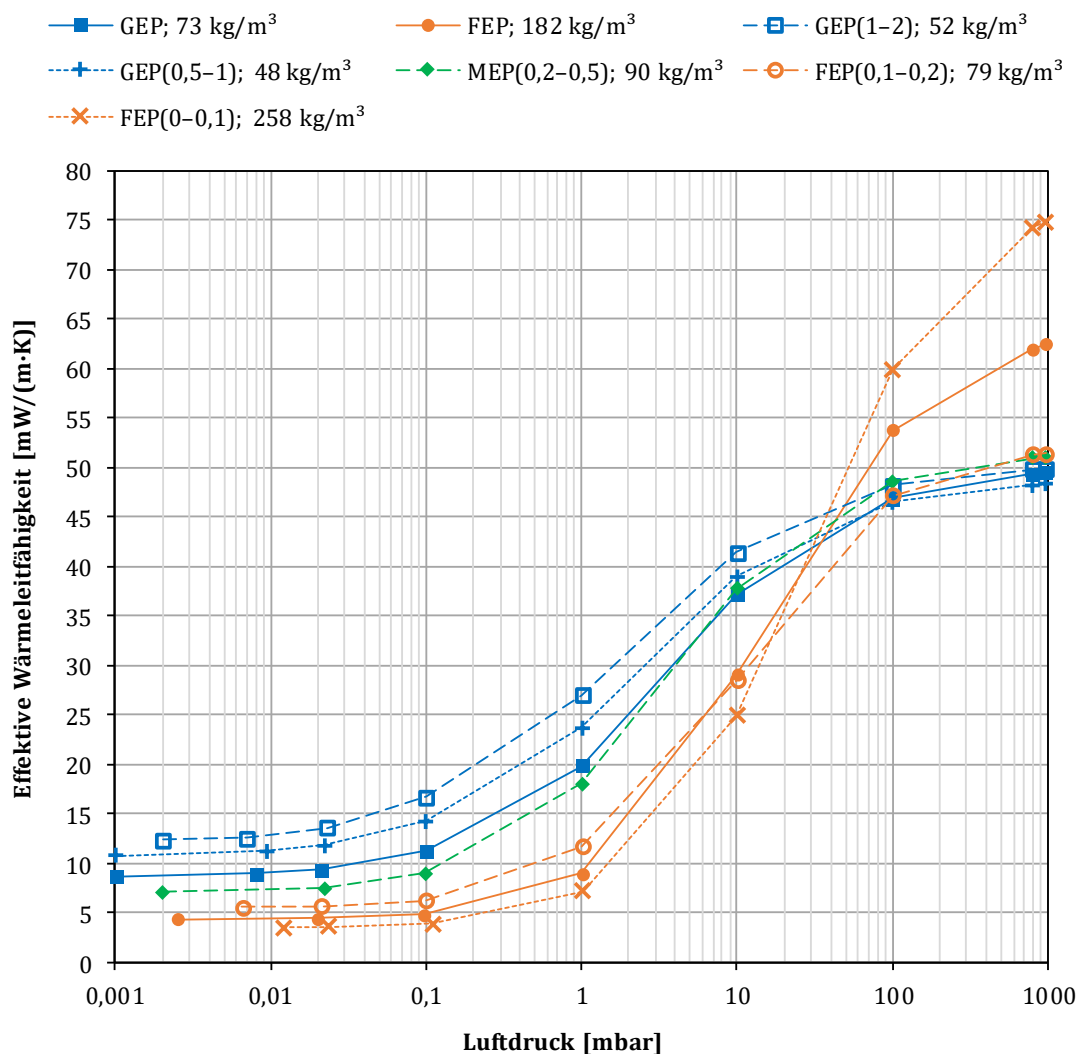


Abbildung 8-1: Effektive Wärmeleitfähigkeit expandierter Perlite über dem Luftdruck bei einer Probenmitteltemperatur von 48 °C

Für alle im Folgenden dargestellten Messpunkte, die bei 0,001 mbar aufgetragen sind, wurden Luftdrücke $\leq 0,001$ mbar gemessen. Da bei 0,001 mbar allerdings die untere Grenze des Messbereichs des Drucksensors liegt und die Messunsicherheit bei diesem Druck bei > 400 % liegt, vgl. Kapitel 7.6.2, wurde vereinfachend ein Luftdruck von 0,001 mbar angenommen.

Zwischen den Messpunkten beim geringsten und denjenigen mit dem nächsthöheren Luftdruck lässt sich ein annähernd waagerechter Verlauf der Verbindungsgeraden erkennen. Dies zeigt, dass an diesen Messpunkten die beiden luftdruckabhängigen Wärmetransportmechanismen Luftwärmeleitung und Kopplungseffekt vernachlässigbar klein sind. Es tritt dort also lediglich Strahlung und Festkörperwärmeleitung in signifikantem Maß auf. Die expandierten Perlite mit den höchsten Dichten weisen in diesem Bereich deutlich geringere effektive Wärmeleitfähigkeiten auf als diejenigen mit den geringsten Dichten. Dies zeigt, dass die Dichte bei einer Probenmitteltemperatur von 48 °C bis zu einem Wert von 258 kg/m³ höhere Auswirkungen auf die Wärmestrahlung als auf die Festkörperwärmeleitung hat. Bei gleicher Reindichte, die hier angenommen werden kann, bedeutet eine niedrigere Dichte eine höhere Porosität. Und wie in Tabelle 2-1 gezeigt, sinkt mit steigender Porosität der Anteil der Festkörperwärmeleitung am gesamten Wärmestrom durch eine Dämmstoffschüttung, während der Anteil der Wärmestrahlung ansteigt. Dass MEP(0,2–0,5), trotz einer mit 90 kg/m³ höheren Dichte, eine höhere effektive Wärmeleitfähigkeit besitzt als FEP(0,1–0,2) mit einer Dichte von 79 kg/m³, kann mit dem deutlich geringeren dichtespezifischen Extinktionskoeffizienten e_R des MEP(0,2–0,5) von 21,3 m²/kg gegenüber FEP(0,1–0,2) mit 36,1 m²/kg begründet werden. Damit ergibt sich ein geringerer Extinktionskoeffizient E_R . Die gleiche Ursache kann vermutet werden für die höhere effektive Wärmeleitfähigkeit von GEP(1–2) gegenüber GEP(0,5–1), trotz der leicht höheren Dichte von GEP(1–2). Für GEP(1–2) wurde allerdings der dichtespezifische Extinktionskoeffizient nicht bestimmt. GEP(1–2) stammt aus einer anderen Charge als GEP und die übrigen Siebungen, wodurch sich ein vermutlich geringerer dichtespezifischer Extinktionskoeffizient erklären ließe. Die höhere Dichte gegenüber GEP(0,5–1), trotz größerem mittleren Korndurchmesser und geringerer mittlerer Korndichte (vgl. Tabelle 6-2), könnte auf eine geringere Rauigkeit der Körner zurückzuführen sein, wodurch sich diese kompakter anordnen können. Möglich ist auch, dass die Korndichte von GEP(0,5–1) durch einen hohen Anteil hinreichend weit geöffneter Kornporen überbestimmt wurde, durch welche während der entsprechenden Messung Wasser eindringen konnte, vgl. Kapitel 6.2. Die Extinktionskoeffizienten derjenigen expandierten Perlite, für welche diese bestimmt wurden, sind in Tabelle 8-1 aufgeführt. Die Werte entsprechen dem Produkt der dichtespezifischen Extinktionskoeffizienten aus Tabelle 6-6 multipliziert mit den in der Legende von Abbildung 8-1 angegebenen Dichten.

Ein steilerer Anstieg der effektiven Wärmeleitfähigkeit vom minimal gemessenen Luftdruck bis 1 mbar ist auf eine höhere mittlere Porengröße zurückzuführen, siehe Kapitel 2.1 und Tabelle 2-1. Da sich die mittleren Kornporengrößen expandierter Perlite gemäß Kapitel 6.4 nicht stark

unterscheiden, ist vorrangig die mittlere Kornzwischenraum-Porengröße relevant, die entsprechend Kapitel 6.5 anhand der hier gezeigten Messwerte bestimmt wurde und die im Allgemeinen mit zunehmendem mittleren Korndurchmesser ansteigt.

Tabelle 8-1: Extinktionskoeffizienten expandierter Perlite

| Probe | E_R [1/m] |
|--------------|-------------|
| GEP | 1483 |
| FEP | 5970 |
| GEP(0,5-1) | 1129 |
| MEP(0,2-0,5) | 1918 |
| FEP(0,1-0,2) | 2851 |

Zwischen 1 mbar und 100 mbar ist wiederum für die expandierten Perlite mit geringerem mittleren Korndurchmesser (siehe Tabelle 6-1) ein steilerer Anstieg der effektiven Wärmeleitfähigkeit mit dem Luftdruck zu verzeichnen. Auch die Differenzen der gemessenen effektiven Wärmeleitfähigkeiten zwischen Atmosphärendruck von (960 ± 20) mbar und dem niedrigsten gemessenen Luftdruck steigen mit sinkendem mittleren Korndurchmesser, siehe Abbildung 8-2. Diese Differenzen sind die jeweilige Summe aus Luft- und Kopplungseffekt-Wärmeleitfähigkeit.

Anhand von Gleichung (10-2) kann die Luft-Wärmeleitfähigkeit jedes expandierten Perlits berechnet werden. Für GEP und die daraus gewonnenen Siebungen wurde als mittlerer Kornporendurchmesser der in Kapitel 6.4 ermittelte Wert von $44 \mu\text{m}$ eingesetzt und für FEP und die daraus gewonnen Siebungen entsprechend $34 \mu\text{m}$. Der arithmetische Mittelwert aus diesen Werten von $39 \mu\text{m}$ wurde als mittlerer Kornporendurchmesser von MEP(0,2-0,5) eingesetzt. Als mittlerer Durchmesser der Kornzwischenraum-Poren wurden die Werte $d_{p,ZK,Fit}$ aus Tabelle 6-4 in Kapitel 6.5 verwendet. Werden die somit berechneten Luft-Wärmeleitfähigkeiten von den Werten aus Abbildung 8-2 bei Atmosphärendruck abgezogen, ergeben sich die jeweiligen Kopplungseffekt-Wärmeleitfähigkeiten bei Atmosphärendruck. Diese sind in Abbildung 8-3 über dem volumengewichtet gemittelten Korndurchmesser (siehe Kapitel 6.1) aufgetragen. Es zeigt sich darin deutlich der Anstieg des Kopplungseffekts expandierter Perlite mit sinkendem mittleren Korndurchmesser. Der Kopplungseffekt tritt an den Berührstellen der Körner auf. Je kleiner der mittlere Korndurchmesser, desto mehr Körner finden auf der gleichen Länge in Wärmestromrichtung Platz und desto mehr Berührstellen können auftreten. Dadurch lässt sich dieser Zusammenhang erklären. Die annähernd gleichen Werte des Kopplungseffekts für GEP(0,5-1) und GEP(1-2) lassen sich mit der oben beschriebenen Vermutung einer kompakteren Anordnung der Körner des GEP(1-2) im Vergleich zu GEP(0,5-1) erklären. Dadurch käme es zu einer größeren Anzahl an Kontaktstellen je Korn und somit wäre auch eine annähernd gleiche absolute Anzahl an Kontaktstellen in Wärmestromrichtung möglich.

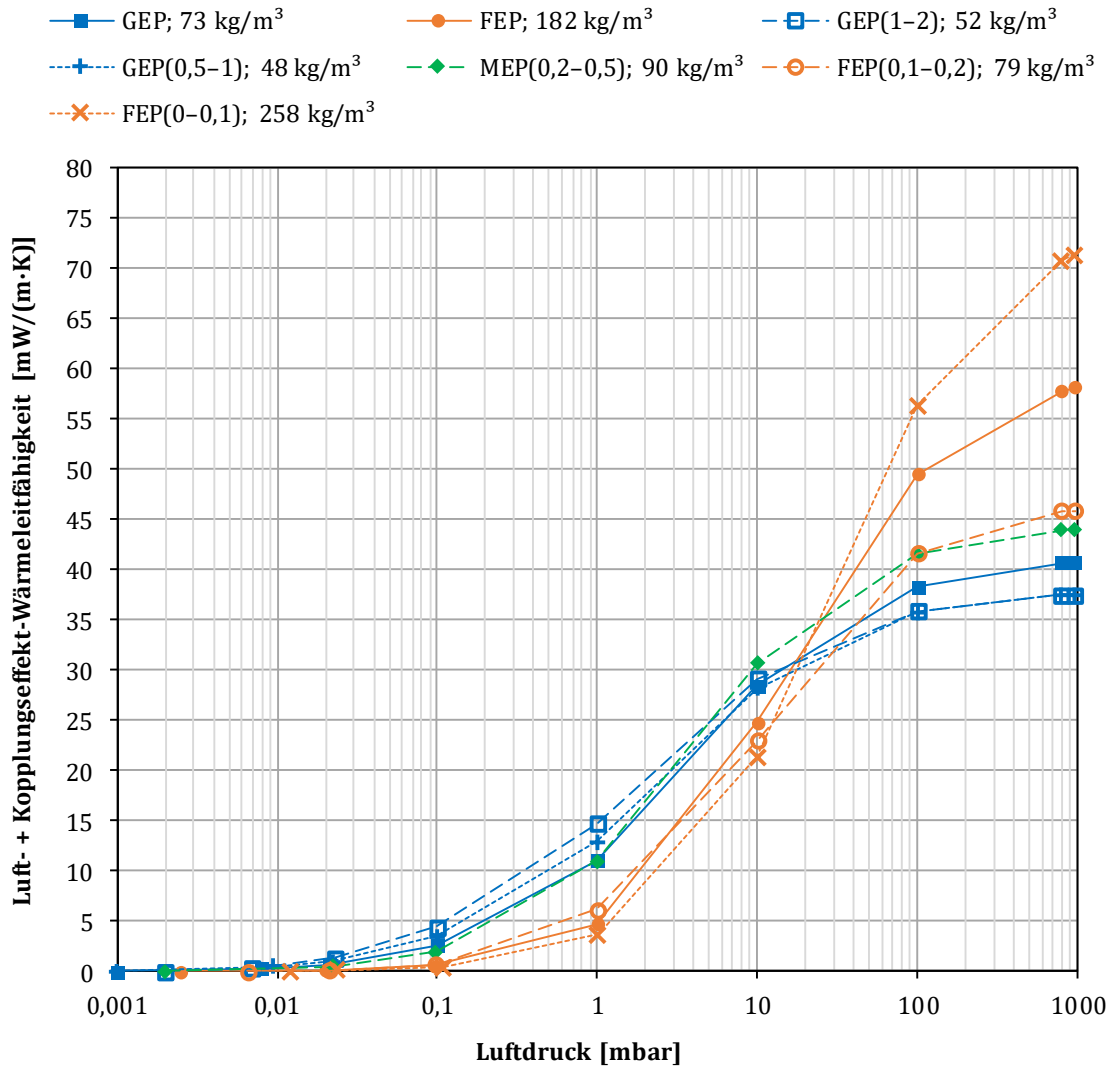


Abbildung 8-2: Summe aus Luft- und Kopplungseffekt-Wärmeleitfähigkeit expandierter Perlite über dem Luftdruck bei einer Probenmitteltemperatur von 48 °C

Je größer die mittlere Porengröße ist, bei desto geringeren Luftdrücken kann wiederum Kontinuums-Wärmeleitfähigkeit der Luft erreicht werden, vgl. Abbildung 2-2 und Abbildung 2-3. Der vergleichsweise steile Anstieg der Messwerte der expandierten Perlite mit den kleineren Kornzwischenraum-Poren zwischen (800 ± 2) mbar und Atmosphärendruck in Abbildung 8-1 und Abbildung 8-2 zeigt, dass bei Atmosphärendruck noch keine Kontinuumsströmung erreicht ist. Bei den expandierten Perliten mit den größten Kornzwischenraum-Poren scheint bei Atmosphärendruck hingegen annähernd Kontinuumsströmung vorzuherrschen.

In Abbildung 8-4 sind die Messwerte der effektiven Wärmeleitfähigkeit expandierter Perlite bei Luftdrücken $\leq 0,025$ mbar über der Probenmitteltemperatur aufgetragen. Für diejenigen expandierten Perlite, für welche Luftdrücke $\leq 0,01$ mbar bei einer Probenmitteltemperatur von 70 °C erreicht werden konnten, wurde die effektive Wärmeleitfähigkeit zwischen 0,001 und 0,01 mbar ausgewertet. Dies war für die Stoffe GEP und GEP(0,5-1) der Fall. Für die übrigen expandierten Perlite wurde die effektive Wärmeleitfähigkeit bei $(0,02 \pm 0,005)$ mbar

ausgewertet. GEP(1-2) und FEP(0-0,1) wurden im Vakuum ausschließlich bei einer Probenmitteltemperatur von 48 °C vermessen, da diese Stoffe lediglich zur Untersuchung der Abhängigkeit des Kopplungseffekts von der mittleren Korngröße verwendet wurden.

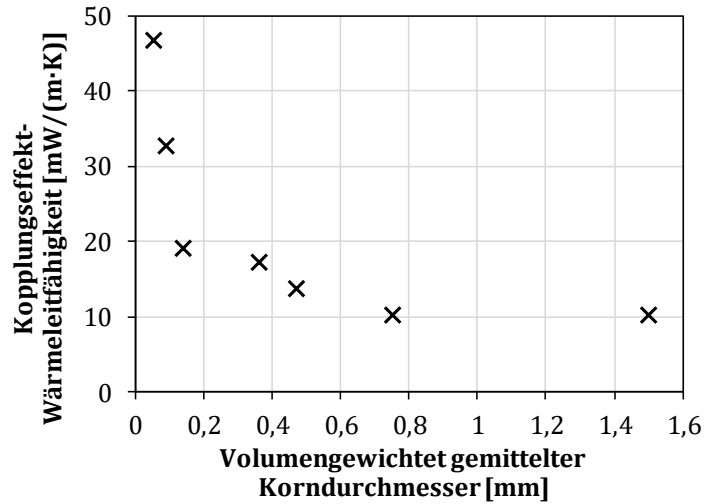


Abbildung 8-3: Kopplungseffekt-Wärmeleitfähigkeiten expandierter Perlite bei Atmosphärendruck und einer Probenmitteltemperatur von 48 °C über dem volumengewichtet gemittelten Korndurchmesser

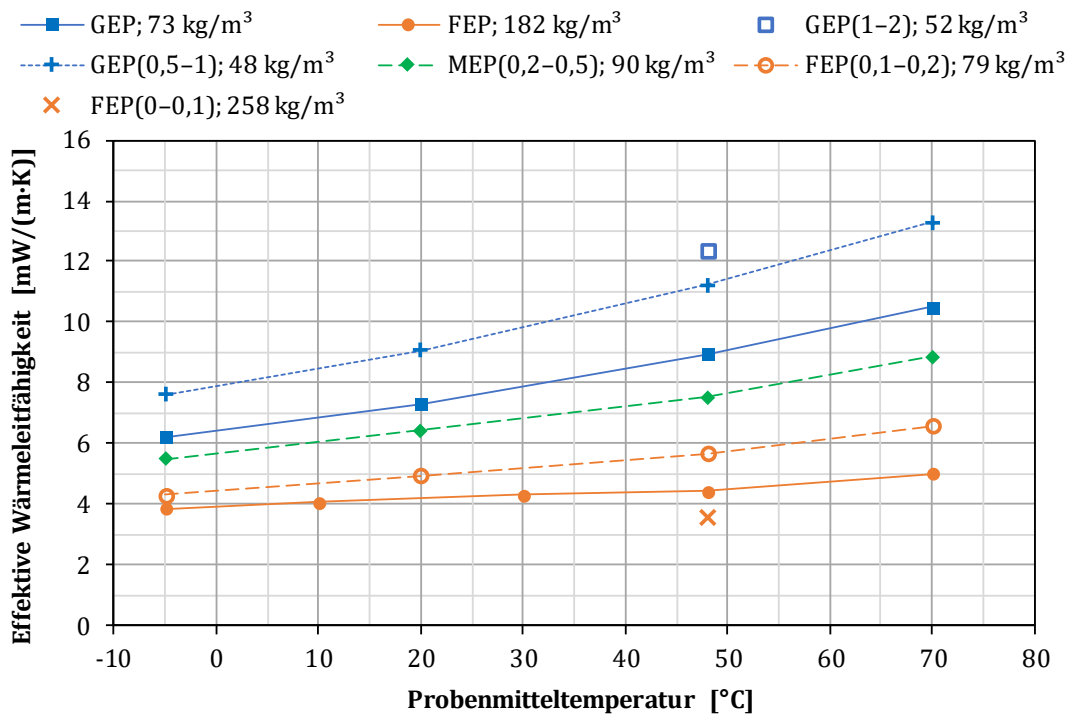


Abbildung 8-4: Effektive Wärmeleitfähigkeit expandierter Perlite über der Probenmitteltemperatur bei einem Luftdruck $\leq 0,025$ mbar

Die Messpunkte in Abbildung 8-4 sind über Geraden verbunden, um den Verlauf über der Temperatur deutlicher sichtbar zu machen. Dadurch zeigt sich, dass die Steigung mit zunehmender Probenmitteltemperatur zunimmt. Die Steigung ist zum überwiegenden Anteil auf

die Strahlungs-Wärmeleitfähigkeit zurückzuführen, in welche, gemäß dem ROSSELAND'schen Diffusionsansatz in Gleichung (3-15), die Temperatur mit der dritten Potenz eingeht. Dies erklärt die zunehmende Steigung. Eine höhere Steigung bei gleicher Temperatur bedeutet eine geringere Extinktion, vgl. Tabelle 8-1, und damit einen größeren Anteil an Wärmestrahlung. Die in Abbildung 8-4 aufgeführten expandierten Perlite mit den höheren Steigungen besitzen im Bereich der gemessenen Probenmitteltemperaturen auch die absolut höheren effektiven Wärmeleitfähigkeiten. Dies bestätigt, dass die Unterschiede in der effektiven Wärmeleitfähigkeit vorwiegend aus dem Wärmetransport über Wärmestrahlung resultieren.

Die in Abbildung 8-4 dargestellten Messwerte der effektiven Wärmeleitfähigkeit sind, mit Ausnahme von FEP(0-0,1) und GEP(1-2), in Abbildung 13-1 in Anhang A1 über der kubischen Probenmitteltemperatur aufgetragen. Die Methodik zur Auswertung und Ergebnisse der dichte-spezifischen Extinktionskoeffizienten und der Festkörper-Wärmeleitfähigkeiten aus diesen Messwerten ist in Kapitel 6.6 beschrieben.

Abbildung 8-5 zeigt die effektiven Wärmeleitfähigkeiten der expandierten Perlite bei Atmosphärendruck von (960 ± 20) mbar über der Probenmitteltemperatur. Auch hier sind die Messpunkte einer Probe über Geraden verbunden, um den Verlauf über der Temperatur deutlicher sichtbar zu machen.

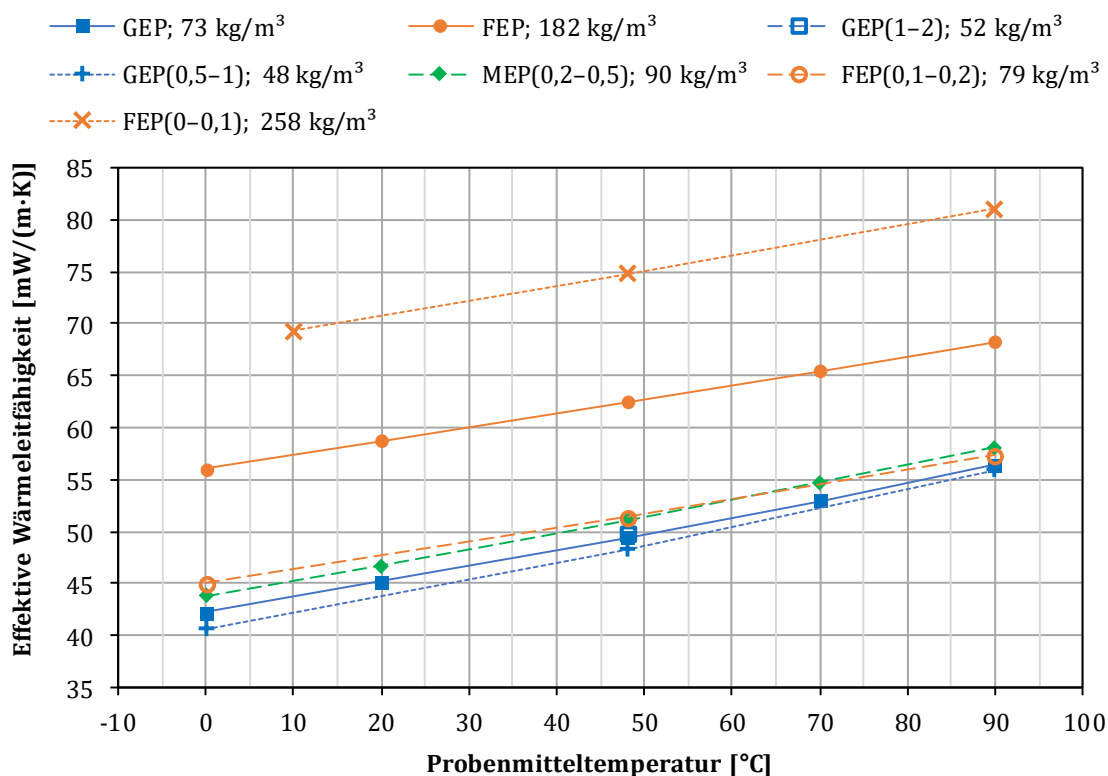


Abbildung 8-5: Effektive Wärmeleitfähigkeit expandierter Perlite über der Probenmitteltemperatur bei Atmosphärendruck von (960 ± 20) mbar

Für FEP(0-0,1) konnte, aufgrund der hohen effektiven Wärmeleitfähigkeit bei Atmosphärendruck, eine Probenmitteltemperatur von 0 °C nicht erreicht werden, da die Temperatur am Edelhohlzylinder, trotz der Kühlung durch den Tiefkühlschrank, die notwendige Temperatur von -15,35 °C überschritt. Daher wurde anstatt dessen eine Probenmitteltemperatur von 10 °C gewählt.

Im Gegensatz zu Abbildung 8-4 steigen die effektiven Wärmeleitfähigkeiten annähernd linear mit der Temperatur. Dies ist damit zu begründen, dass für die expandierten Perlite bei Atmosphärendruck der Anteil der Luftwärmeleitung und des Kopplungseffektes gegenüber der Wärmestrahlung dominieren, wohingegen in Abbildung 8-4 bei einem Luftdruck $\leq 0,025$ mbar die Luftwärmeleitung und der Kopplungseffekt zu vernachlässigen sind. Die Luft-Wärmeleitfähigkeit im Bereich der Kontinuumsströmung, die auch in den Kopplungseffekt mit eingeht, steigt im Temperaturbereich der Wärmeleitfähigkeits-Messungen annähernd linear mit der Temperatur, wie in Abbildung 8-6 zu sehen ist. Genau genommen besitzt sie, entgegengesetzt zur Wärmestrahlung, eine leicht abnehmende Steigung. Die Werte der Luft-Wärmeleitfähigkeit bei Kontinuumsströmung $\lambda_{Luft,Kont}$ [W/(m·K)] sind [28] entnommen und können über das Polynom zweiten Grades in Gleichung (8-1) angenähert werden.

Im Allgemeinen steigt die effektive Wärmeleitfähigkeit mit steigendem Luftdruck stärker mit der Temperatur, was auf die steigende Luft- und Kopplungseffekt-Wärmeleitfähigkeit mit der Temperatur und dem Luftdruck zurückzuführen ist. Dies ist beim Vergleich von Abbildung 8-4 mit Abbildung 8-5 zu erkennen. Die Steigungen der effektiven Wärmeleitfähigkeiten der unterschiedlichen expandierten Perlite mit der Temperatur bei Atmosphärendruck unterscheiden sich wiederum nur geringfügig. Zwar steigt der Anteil der Wärmestrahlung bei den grobkörnigeren Perliten stärker, dafür ist der Kopplungseffekt bei den feinkörnigeren Perliten höher und damit auch dessen Steigung mit der Temperatur. Diese entgegelaufenden Effekte führen zu den geringen Unterschieden der Steigungen.

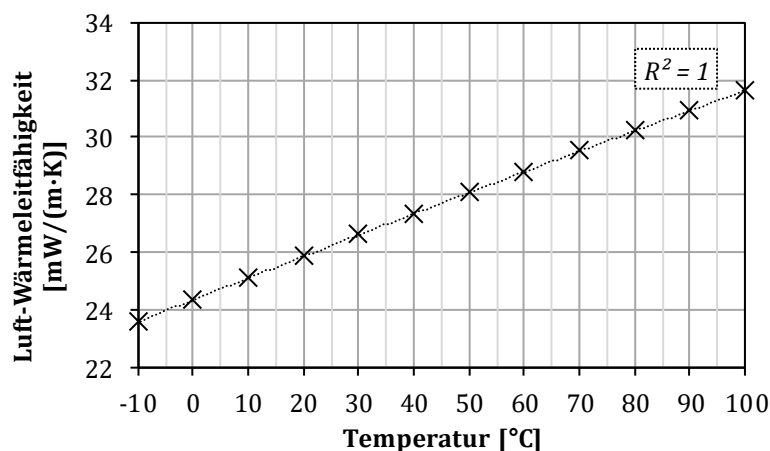


Abbildung 8-6: Wärmeleitfähigkeit ruhender Luft im Bereich der Kontinuumsströmung über der Temperatur, angenähert über das Polynom zweiten Grades in Gleichung (8-1). Daten entnommen aus [28]

$$\lambda_{Luft,Kont} = C_{Luft,Kont,1} \cdot \vartheta^2 + C_{Luft,Kont,2} \cdot \vartheta + C_{Luft,Kont,3} \quad (8-1)$$

Mit:

$$C_{Luft,Kont,1} = -3,4786 \cdot 10^{-5} \text{ [mW/(m} \cdot \text{K}^3\text{)]}$$

$$C_{Luft,Kont,2} = 7,6348 \cdot 10^{-2} \text{ [mW/(m} \cdot \text{K}^2\text{)]}$$

$$C_{Luft,Kont,3} = 24,3454 \text{ [mW/(m} \cdot \text{K)]}$$

8.2 Pyrogene Kieselsäuren

Die effektiven Wärmeleitfähigkeiten von UPKS und HPKS (siehe Kapitel 5.2) sind in Abbildung 8-7 bei einer Probenmitteltemperatur von 48 °C über dem Luftdruck aufgetragen. Die Verbindungsgeraden zwischen den Messpunkten dienen der deutlicheren Sichtbarkeit der Verläufe über dem Luftdruck. In der Legende sind neben den Probenbezeichnungen die jeweiligen Dichten aufgeführt. Für HPKS stellt sich eine geringfügig höhere Dichte ein als für UPKS. Dies kann zum einen damit begründet werden, dass sich zwischen den größeren Agglomeraten der UPKS größere Hohlräume bilden. Zum anderen besitzt HPKS eine größere Fließfähigkeit, die ein Füllen der Hohlräume zwischen den kleineren Agglomeraten in stärkerem Maße ermöglicht.

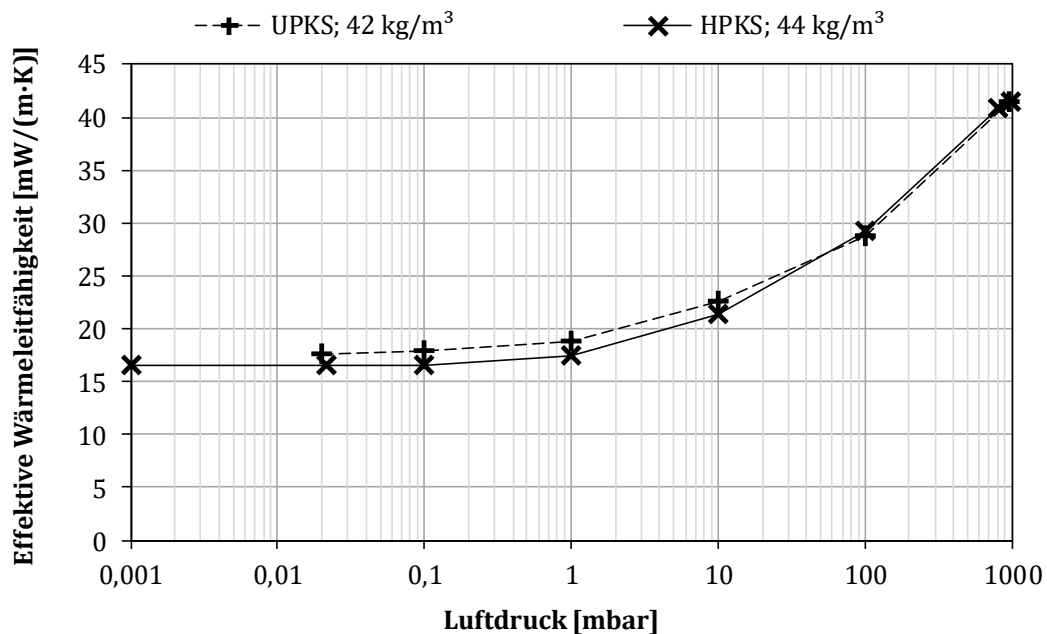


Abbildung 8-7: Effektive Wärmeleitfähigkeit pyrogener Kieselsäuren über dem Luftdruck bei einer Probenmitteltemperatur von 48 °C

Die effektiven Wärmeleitfähigkeiten der pyrogenen Kieselsäuren bei den jeweils geringsten gemessenen Luftdrücken sind hoch im Vergleich zu den expandierten Perliten. Dies ist auf die geringen dichtespezifischen Extinktionskoeffizienten (siehe Kapitel 6.6) und auf die geringen Dichten zurückzuführen, woraus ein hoher Anteil an Wärmestrahlung resultiert. Die geringere

Dichte von UPKS im Vergleich zu HPKS führt dadurch zu den höheren effektiven Wärmeleitfähigkeiten bei niedrigen Luftdrücken. Aufgrund des geringen dichtetespezifischen Extinktionskoeffizienten von pyrogener Kieselsäure wird diese in Vakuumdämmpaneelen meist mit einem Strahlungshemmer wie SiC vermischt. Als Reinstoff ist pyrogene Kieselsäure aufgrund der hohen effektiven Wärmeleitfähigkeit im Vakuum nicht geeignet für die Vakuumwärmedämmung eines Warmwasserspeichers.

Während bei UPKS die effektive Wärmeleitfähigkeit bei Luftdrücken $\leq 0,1$ mbar noch leicht sinkt, ist dies für HPKS nicht zu erkennen. Dies könnte auf die oben angenommenen Hohlräume zwischen den größeren Agglomeraten der UPKS zurückzuführen sein. Bei höheren Luftdrücken gleichen sich die effektiven Wärmeleitfähigkeiten an, da hierbei die Luftwärmeleitung den größeren Einfluss gegenüber der Strahlung gewinnt und diese bei diesen Luftdrücken in beiden Stoffen als annähernd gleich angenommen werden kann. Zudem führt möglicherweise die höhere Dichte von HPKS zu einem größeren Kopplungseffekt aufgrund der damit einhergehenden höheren Anzahl an Kontaktstellen zwischen den Körnern.

Aufgrund der sehr kleinen mittleren Porengrößen der pyrogenen Kieselsäuren ist bis zum Atmosphärendruck noch keine deutliche Abflachung der Kurven in Richtung der Kontinuumsströmung zu erkennen, vgl. Abbildung 2-2 und Abbildung 2-3. Kontinuumsströmung wird in den pyrogenen Kieselsäuren demnach erst bei Luftdrücken deutlich oberhalb des Atmosphärendrucks erreicht.

In Abbildung 8-8 ist die effektive Wärmeleitfähigkeit der pyrogenen Kieselsäuren UPKS und HPKS über der Temperatur aufgetragen; sowohl bei $(0,02 \pm 0,005)$ mbar (links) also auch bei Atmosphärendruck (rechts).

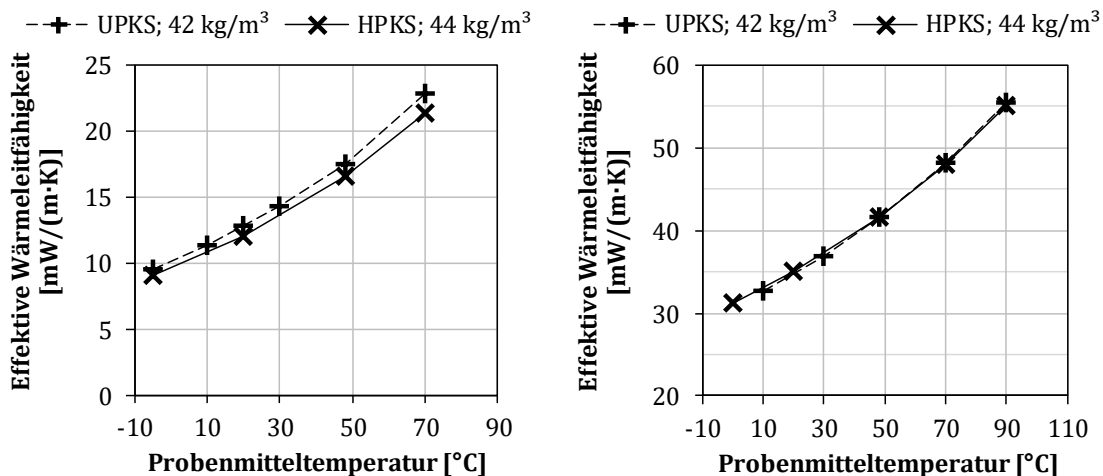


Abbildung 8-8: Effektive Wärmeleitfähigkeit pyrogener Kieselsäuren über der Probenmitteltemperatur. Links: bei einem Luftdruck von $(0,02 \pm 0,005)$ mbar; rechts bei Atmosphärendruck von (960 ± 20) mbar

Der steile Anstieg der effektiven Wärmeleitfähigkeit mit der Temperatur im Vakuum bestätigt die geringe Extinktion und den hohen Anteil an Wärmestrahlung. Im Gegensatz zu den expandierten Perliten, ist selbst bei Atmosphärendruck eine zunehmende Steigung der effektiven Wärmeleitfähigkeit mit der Temperatur zu erkennen. Dies ist neben dem hohen Anteil der Wärmestrahlung auch mit dem vergleichsweise geringen Anteil der Luftwärmeleitung und des Kopplungseffekts zu erklären. Wie bereits in Kapitel 8.1 gezeigt, wirkt die leicht abnehmende Steigung der Luft-Wärmeleitfähigkeit der zunehmenden Steigung der Wärmestrahlung mit steigender Temperatur entgegen. Die höheren Werte der UPKS bei höheren Temperaturen im Vergleich zu HPKS, insbesondere im Vakuum, bestätigen die geringere Extinktion durch die geringere Dichte. Ein Einfluss der Hydrophobierung auf die effektive Wärmeleitfähigkeit ist nicht erkennbar.

8.3 Mischungen aus expandiertem Perlit und pyrogener Kieselsäure

In Abbildung 8-9 ist die effektive Wärmeleitfähigkeit von GEP, HPKS, sowie von aus diesen Stoffen erzeugten Mischungen, bei einer Probenmitteltemperatur von 48 °C über dem Luftdruck aufgetragen. Für eine bessere Übersicht und Vergleichbarkeit sind die Messpunkte einer Messreihe über Geraden verbunden. In der Legende ist neben der Bezeichnung die jeweilige Dichte der Probe aufgeführt. Die Mischungen sind in Kapitel 5.3 beschrieben.

Die Dichte jeder Mischung ist größer als die des reinen GEP. Dies ist u. a. dadurch zu begründen, dass sich HPKS in die Zwischenräume der GEP-Körner setzt und auch ein Eindringen der HPKS in offene Poren der GEP-Körner möglich ist. Außerdem könnte HPKS als Rieselhilfe für GEP dienen, indem es die Reibung zwischen den GEP-Körnern verringert, wodurch sich diese kompakter anordnen können.

Wie in den vorangegangenen Kapiteln 8.1 und 8.2 erläutert, ist die höhere effektive Wärmeleitfähigkeit von HPKS gegenüber GEP bei den geringsten gemessenen Luftdrücken auf die deutlich höhere Extinktion der Wärmestrahlung von GEP zurückzuführen, siehe Tabelle 8-2, wohingegen die Festkörper-Wärmeleitfähigkeiten bei diesen Stoffen und bei einer Probenmitteltemperatur von 48 °C einen untergeordneten Einfluss haben, vgl. Tabelle 6-6. Luft- und Kopplungseffekt-Wärmeleitfähigkeit sind bei den niedrigsten gemessenen Luftdrücken vernachlässigbar klein, wie an den nahezu gleich großen effektiven Wärmeleitfähigkeiten bei den nächsthöheren Luftdrücken zu erkennen ist. Während die Mischung GEP-HPKS-60:40 mit einem Massenanteil von 40 % HPKS und einer Dichte von 79 kg/m³ eine leicht höhere effektive Wärmeleitfähigkeit beim niedrigsten gemessenen Luftdruck aufweist als GEP, sind die effektiven Wärmeleitfähigkeiten der übrigen Mischungen bei den niedrigsten gemessenen Luftdrücken leicht niedriger als die von GEP. Dies entspricht den in Tabelle 8-2 aufgeführten Extinktionskoeffizienten E_R der Proben, mit Ausnahme der Mischung GEP-HPKS-70:30. Der Extinktionskoeffizient von GEP liegt um lediglich den Faktor 1,14 höher als der von GEP-HPKS-70:30, wohingegen die Festkörper-Wärmeleitfähigkeit von GEP um den Faktor 1,3 höher ist, vgl. Tabelle 6-6. Aufgrund der ähnlichen Extinktionskoeffizienten

führt hier die geringere Festkörper-Wärmeleitfähigkeit zu den geringeren effektiven Wärmeleitfähigkeiten von GEP-HPKS-70:30 gegenüber GEP. Die Extinktionskoeffizienten aus Tabelle 8-2 resultieren aus der Multiplikation der dichtespezifischen Extinktionskoeffizienten aus Tabelle 6-6 mit den Dichten in der Legende von Abbildung 8-9.

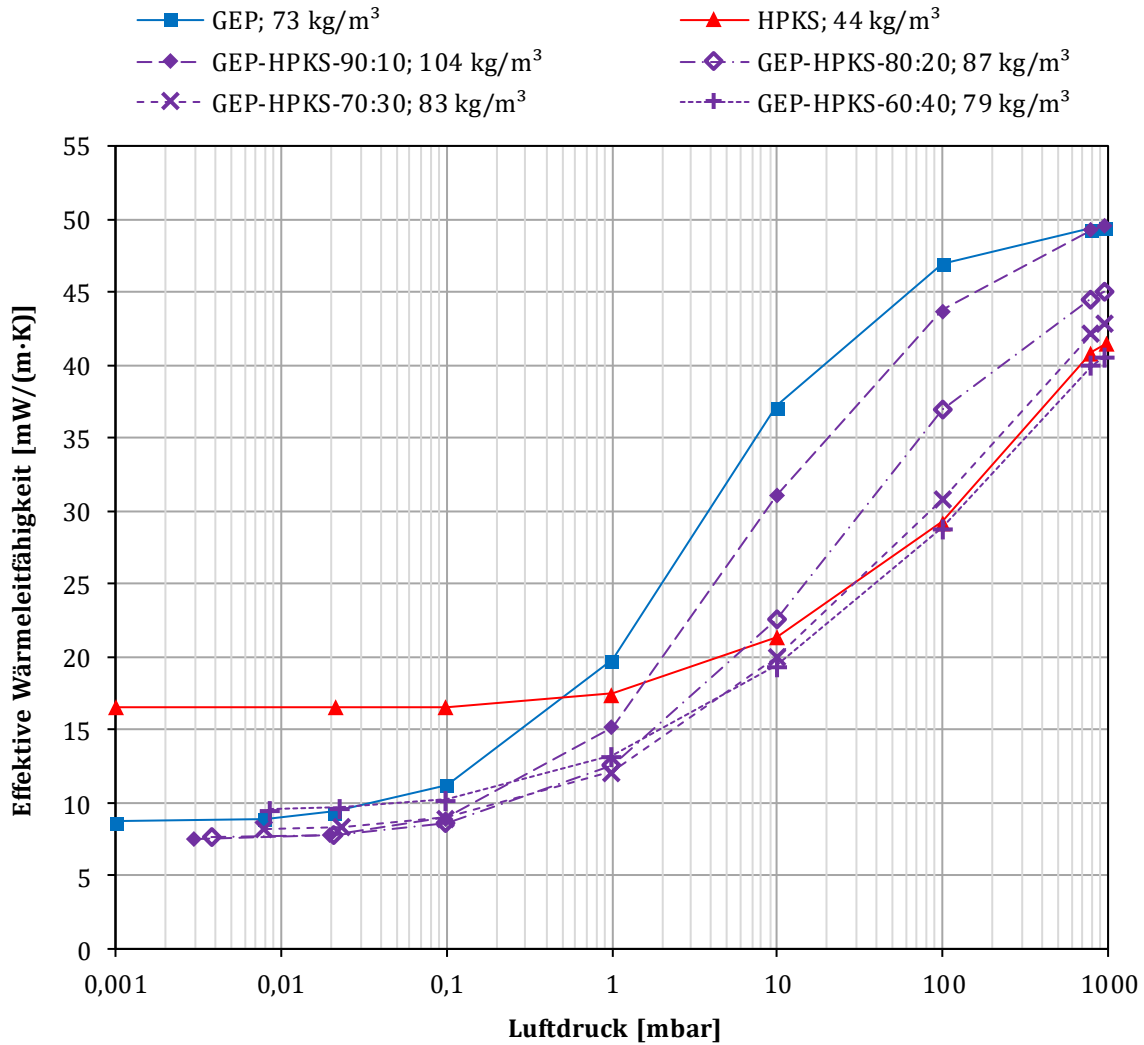


Abbildung 8-9: Effektive Wärmeleitfähigkeit von GEP, HPKS sowie deren Mischungen über dem Luftdruck bei einer Probenmitteltemperatur von 48 °C

Tabelle 8-2: Extinktionskoeffizienten von GEP, HPKS und Mischungen aus diesen Stoffen

| Probe | E_R [1/m] |
|----------------|-------------------|
| GEP | 1482 |
| HPKS | 495 ¹⁾ |
| GEP-HPKS-90:10 | 1955 |
| GEP-HPKS-80:20 | 1871 |
| GEP-HPKS-70:30 | 1295 |
| GEP-HPKS-60:40 | 1106 |

¹⁾ Für eine Probenmitteltemperatur von 48 °C

Reine expandierte Perlite mit einer Dichte von 79 kg/m^3 bis 258 kg/m^3 ermöglichen allerdings bei Luftdrücken $< 0,1 \text{ mbar}$ geringere effektive Wärmeleitfähigkeiten als die in der vorliegenden Arbeit untersuchten Mischungen aus GEP und HPKS. Durch Beimischung von SiC lässt sich, durch die damit einhergehende Erhöhung der Extinktion, die effektive Wärmeleitfähigkeit im Vakuum jedoch deutlich verringern, wie in Anhang A4 am Beispiel von GEP-HPKS-80:20 gezeigt wird.

Insbesondere bei Luftdrücken zwischen 1 mbar und 10 mbar können die Mischungen GEP-HPKS-70:30 und GEP-HPKS-60:40 allerdings teilweise geringere effektive Wärmeleitfähigkeiten erreichen als alle übrigen untersuchten Reinstoffe. Damit kann die in Kapitel 5.3 erläuterte Motivation für die Untersuchung dieser Mischungen bestätigt werden. Der Luftdruckbereich zwischen 1 mbar und 10 mbar ist technisch deutlich einfacher zu erreichen und über einen langen Zeitraum aufrecht zu erhalten als Luftdrücke $< 1 \text{ mbar}$. Daher sind möglichst kostengünstige Wärmedämmstoffe, die in diesem Bereich möglichst geringe effektive Wärmeleitfähigkeiten erzielen von großer Bedeutung. Um allerdings möglichst geringe effektive Wärmeleitfähigkeiten in diesem Luftdruck-Bereich zu erzielen ist die Beimischung von einem Strahlungshemmer wie SiC notwendig. Bzgl. der Ermittlung des idealen Mischungsverhältnisses von Strahlungshemmern zum übrigen Wärmedämmstoff aus expandiertem Perlit und pyrogener Kieselsäure in loser Schüttung existiert noch weiterer Forschungsbedarf. Für Luftdrücke $< 0,1 \text{ mbar}$ weisen reine expandierte Perlite hoher Dichte allerdings bei einer Probenmitteltemperatur von $48 \text{ }^\circ\text{C}$ geringere effektive Wärmeleitfähigkeiten auf als die übrigen in der vorliegenden Arbeit untersuchten Wärmedämmstoffe. Auch eine Beimischung von HPKS zu expandierten Perliten feinerer Körnung wie FEP ist zudem denkbar und könnte Gegenstand zukünftiger Untersuchungen werden. Die Kosten der Wärmedämmstoffe werden im nachfolgenden Kapitel 9 gezeigt und diskutiert.

Am Verlauf der effektiven Wärmeleitfähigkeiten der in Abbildung 8-9 dargestellten Mischungen und Reinstoffe über dem Luftdruck ist zu erkennen, dass sich die charakteristische S-Kurve mit steigendem Anteil an HPKS in Richtung größerer Luftdrücke verschiebt. Dies ist mit der sinkenden mittleren Porengröße mit steigendem Anteil an HPKS zu erklären, vgl. Abbildung 2-3, und entspricht damit dem erwarteten Verhalten.

In Abbildung 8-10 sind die Messwerte der effektiven Wärmeleitfähigkeit von GEP, HPKS und Mischungen dieser Stoffe bei einem Luftdruck von $(0,02 \pm 0,005) \text{ mbar}$ über der Probenmitteltemperatur aufgetragen.

Bei den Mischungen, existieren zum Teil deutlich unterschiedliche Festkörper-Wärmeleitfähigkeiten (vgl. Tabelle 6-6). Diese wirken sich im Temperaturbereich zwischen $-5 \text{ }^\circ\text{C}$ und $70 \text{ }^\circ\text{C}$ demnach auch signifikant auf die effektive Wärmeleitfähigkeit aus. So weist GEP-HPKS-60:40 für Probenmitteltemperaturen $\geq 48 \text{ }^\circ\text{C}$ aufgrund der geringeren Extinktion eine höhere effektive Wärmeleitfähigkeit als GEP auf, wohingegen sie für Probenmitteltemperaturen $\leq 20 \text{ }^\circ\text{C}$ aufgrund der geringeren Festkörper-Wärmeleitfähigkeit darunter liegt. Die effektive Wärmeleitfähigkeit

von GEP-HPKS-70:30 ist für Probenmitteltemperaturen $\geq 20\text{ °C}$ höher als die von GEP-HPKS-80:20 und GEP-HPKS-90:10, wohingegen sie bei einer Probenmitteltemperatur von -5 °C darunter liegt, was ebenfalls durch die im Vergleich geringere Extinktion und Festkörper-Wärmeleitfähigkeit von GEP-HPKS-70:30 zu erklären ist. Je nach Anwendungstemperaturbereich, können demnach unterschiedliche Wärmedämmstoffe thermisch von Vorteil sein. Die effektiven Wärmeleitfähigkeiten von GEP-HPKS-80:20 und GEP-HPKS-90:10 sind bei einem Luftdruck von $(0,02 \pm 0,005)\text{ mbar}$ im betrachteten Temperaturbereich hingegen nahezu deckungsgleich, woraus sich die sehr ähnlichen Werte der Extinktionskoeffizienten und der Festkörper-Wärmeleitfähigkeiten ergeben, die anhand dieser Messwerte ermittelt wurden, wie in Kapitel 6.6 beschrieben wird.

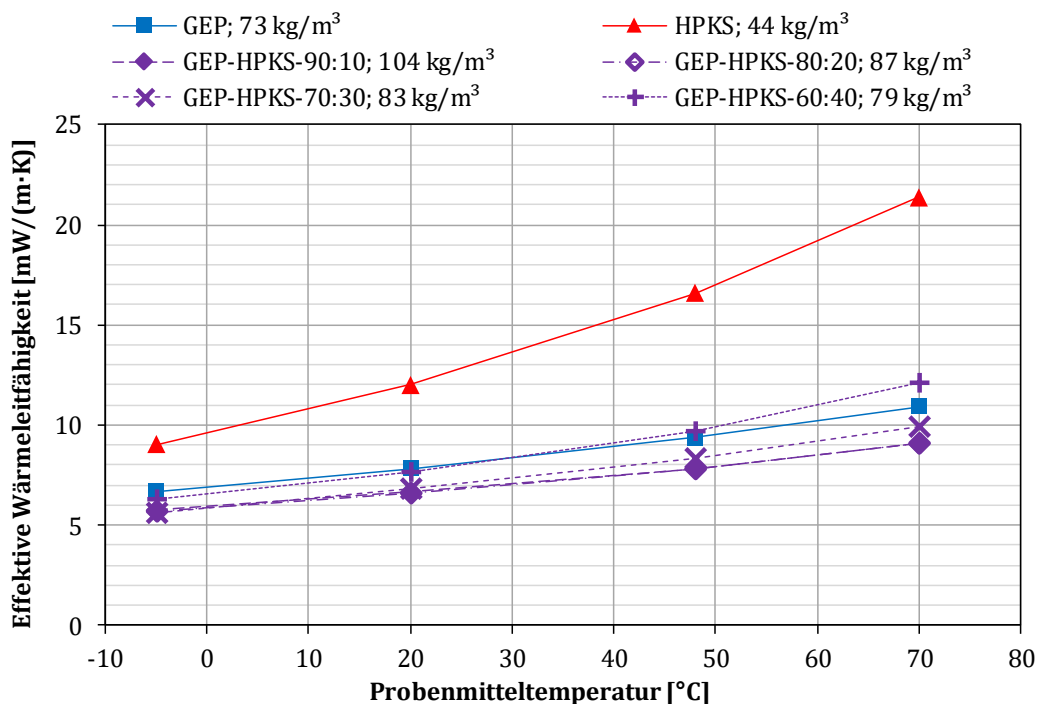


Abbildung 8-10: Effektive Wärmeleitfähigkeit von GEP, HPKS sowie deren Mischungen über der Probenmitteltemperatur bei einem Luftdruck von $(0,02 \pm 0,005)\text{ mbar}$

Abbildung 8-11 zeigt die effektiven Wärmeleitfähigkeiten von GEP, HPKS und deren Mischungen bei Atmosphärendruck von $(960 \pm 20)\text{ mbar}$ über der Probenmitteltemperatur.

Die Steigungen der effektiven Wärmeleitfähigkeiten von GEP und den Mischungen mit der Probenmitteltemperatur sind im betrachteten Temperaturbereich ähnlich und nahezu linear. Bei den Mischungen ist bereits bei Atmosphärendruck die Luft-Wärmeleitfähigkeit deutlich reduziert gegenüber der Kontinuums-Wärmeleitfähigkeit, wie in Abbildung 8-9 an den vergleichsweise hohen Differenzen der effektiven Wärmeleitfähigkeiten zwischen $(800 \pm 2)\text{ mbar}$ und Atmosphärendruck zu erkennen ist. Bei diesen Mischungen trägt die Luft-Wärmeleitfähigkeit, und damit auch die Kopplungseffekt-Wärmeleitfähigkeit, demnach auch weniger zum Anstieg der effektiven Wärmeleitfähigkeit mit der Temperatur bei. Während allerdings die Luft- und

Kopplungseffekt-Wärmeleitfähigkeit bei Atmosphärendruck mit steigendem Anteil an HPKS sinken, steigt damit der Anteil der Wärmestrahlung. Es kommt also zu ausgleichenden Effekten, die zu einer ähnlichen Steigung bei diesen Wärmedämmstoffen führen. Bei reiner HPKS hingegen macht sich der hohe Anteil der Wärmestrahlung gegenüber der Luft-Wärmeleitfähigkeit in einer deutlich höheren Steigung gegenüber den übrigen Wärmedämmstoffen bemerkbar, die mit zunehmender Temperatur deutlich sichtbar ansteigt.

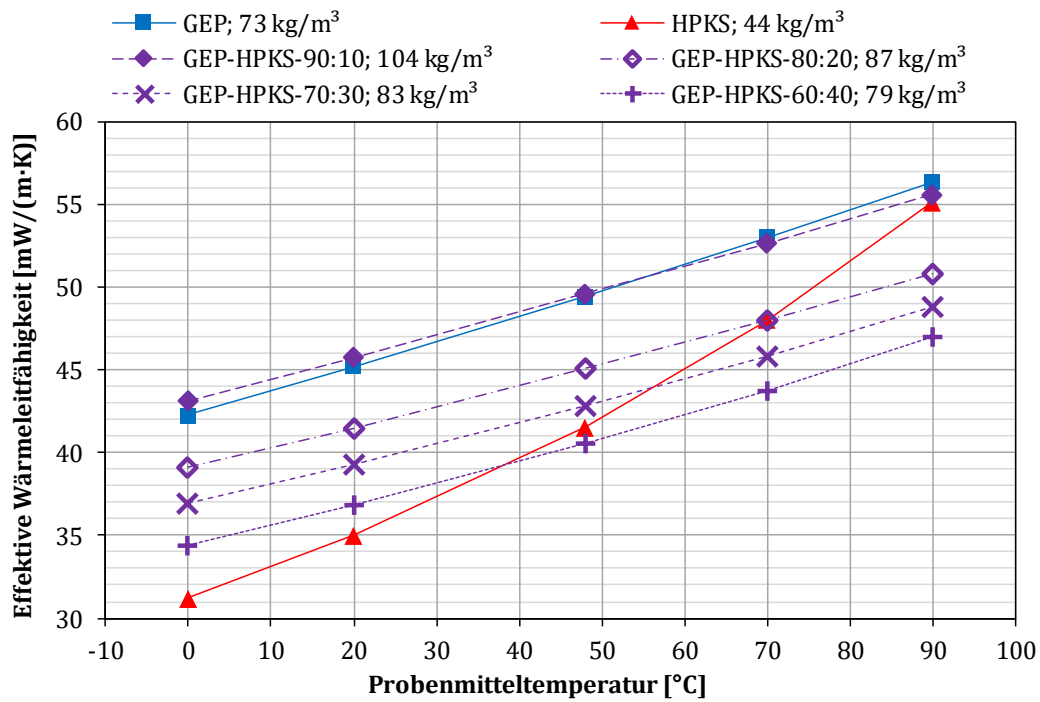


Abbildung 8-11: Effektive Wärmeleitfähigkeit von GEP, HPKS und deren Mischungen über der Probenmitteltemperatur bei Atmosphärendruck von (960 ± 20) mbar

9 Vergleich von Kosten, Nutzen und Aufwand der Wärmedämmstoffe

Neben den thermischen Eigenschaften, die im vorangegangenen Kapitel 8 gezeigt werden, sind für den Anwender der Wärmedämmstoffe auch die Kosten von hoher Bedeutung bei der Entscheidung für einen Wärmedämmstoff in einer Vakuumwärmedämmung. In Abbildung 9-1 links sind die reinen volumenbezogenen Dämmstoffkosten der in der vorliegenden Arbeit detailliert untersuchten kommerziell verfügbaren Wärmedämmstoffe, mit Ausnahme von UPKS, und Mischungen aus GEP und HPKS aufgetragen. Die Kosten wurden berechnet mit den in Kapitel 5 gezeigten massenbezogenen Kosten multipliziert mit der in der vorliegenden Arbeit erreichten Dichte der Probe bei der Messung der effektiven Wärmeleitfähigkeit, sowie ggf. dem Massenanteil des Wärmedämmstoffs in einer Mischung. Rechts in Abbildung 9-1 sind die volumenbezogenen Dämmstoffkosten von UPKS anstelle von HPKS aufgeführt, sowie Mischungen aus GEP und UPKS, unter der Annahme, dass sich die gleichen Dichten einstellen wie bei Mischungen mit HPKS.

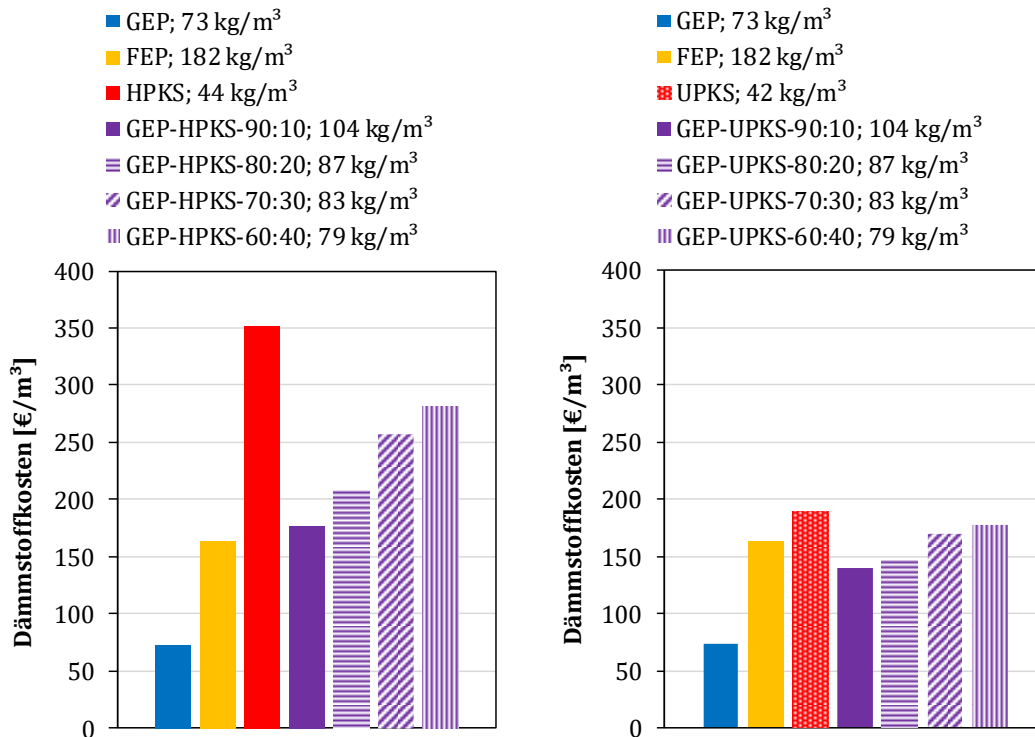


Abbildung 9-1: Volumenbezogene Dämmstoffkosten für die kommerziell verfügbaren Wärmedämmstoffe und Mischungen aus GEP und pyrogener Kieselsäure. Links: mit HPKS; rechts: mit UPKS. Dämmstoffkosten enthalten keine Umsatzsteuer

Während sich die massenbezogenen Kosten von FEP mit 0,9 €/kg kaum von jenen des GEP mit 1 €/kg unterscheiden liegen die volumenbezogenen Kosten aufgrund der höheren Dichte mit 164 €/m³ um den Faktor 2,25 höher als die des GEP mit 73 €/m³. Allerdings ist mit FEP bei einer Probenmitteltemperatur von 48 °C beim jeweils geringsten gemessenen Luftdruck eine mit

4,33 mW/(m·K) ca. halb so große effektive Wärmeleitfähigkeit möglich als mit GEP und 8,73 mW/(m·K).

Gemäß den Erfahrungen aus dem Forschungsprojekt StoEx kann die Evakuierung des Dämmraums eines Warmwasserspeichers auf Luftdrücke $< 0,1$ mbar jedoch mehrere Wochen in Anspruch nehmen [14]. Je kleiner die mittlere Korngröße des expandierten Perlits, desto höher ist im Allgemeinen die Evakuierungsdauer. Dies ist zum einen damit zu begründen, dass eine geringere mittlere Korngröße zu einer geringeren Kornzwischenraum-Porengröße führt und diese wiederum zu einem höheren Strömungswiderstand. Zum anderen führt sie zu einer größeren Oberfläche, an welcher Feuchtigkeit gebunden ist, die während der Evakuierung ausgasen kann. Diese Ausgasungen sind meist der Hauptgrund für eine hohe Evakuierungsdauer. Die Evakuierung lässt sich beispielsweise durch Wärmezufuhr zum Wärmedämmstoff beschleunigen, was allerdings wiederum höhere Energiekosten und einen höheren Aufwand verursacht. Somit existieren neben den reinen Dämmstoffkosten weitere Gründe für den Anwender, einen grobkörnigeren expandierten Perlit einem feinkörnigeren vorzuziehen, trotz der höheren effektiven Wärmeleitfähigkeiten.

HPKS hat, trotz der vergleichsweise geringen Dichte, mit 352 €/m^3 die höchsten volumenbezogenen Dämmstoffkosten. Zudem ist die effektive Wärmeleitfähigkeit bei einer Probenmitteltemperatur von 48 °C und beim geringsten gemessenen Luftdruck deutlich höher als die aller übrigen in der vorliegenden Arbeit untersuchten Wärmedämmstoffe, mit Ausnahme von UPKS. Bei Luftdrücken ≥ 10 mbar liegt die effektive Wärmeleitfähigkeit wiederum niedriger als die der expandierten Perlite GEP und FEP. Bei einem Einsatz als Reinstoff wäre allerdings UPKS mit nahezu gleichen thermischen Eigenschaften, aber Dämmstoffkosten von 189 €/m^3 deutlich kostengünstiger. HPKS hat allerdings den Vorteil aufgrund der Hydrophobierung weniger Feuchtigkeit aufzunehmen und sich damit schneller Evakuieren zu lassen als UPKS. Außerdem bildet sie kleinere Agglomerate als UPKS und eignet sich damit im Ausgangszustand besser für die Herstellung von Mischungen mit expandierten Perliten, da sich die kleineren Agglomerate zu größeren Anteilen in den Zwischenräumen oder sogar in den Kornporen der Perlitkörner anlagern können. Aus diesem Grund wurde es in der vorliegenden Arbeit für die Mischungen mit GEP ausgewählt. Die zum Teil mehrere Zentimeter großen UPKS-Agglomerate müssten hingegen vor oder während des Mischens zerkleinert werden, was einen höheren Aufwand und damit auch höhere Kosten für den Hersteller der Warmwasserspeicher mit sich bringen würde. Es ist damit nicht ohne konkrete dahingehende Untersuchungen festzustellen, ob der Einsatz von UPKS in Mischungen mit GEP für den Anwender Kostenvorteile bietet. Zudem bleiben die effektiven Wärmeleitfähigkeiten von Mischungen expandierter Perlite wie GEP mit unzerkleinerter UPKS zu untersuchen. Hierbei ist allerdings eine Reproduzierbarkeit kaum zu gewährleisten, da sich, je nach Verpackung der UPKS und anschließender Verarbeitung, Agglomerate stark unterschiedlicher Größe bilden können.

Die Dämmstoffkosten von Mischungen aus GEP und UPKS liegen gemeinsam mit FEP in einem vergleichsweise engen Bereich von 140 €/m^3 bis 178 €/m^3 . Die Dämmstoffkosten von Mischungen aus GEP und HPKS sind mit 177 €/m^3 bis 281 €/m^3 höher als die der reinen expandierten Perlite, jedoch geringer als die von reiner HPKS. Vorteile bzgl. der Dämmwirkungen ergeben sich gegenüber den expandierten Perliten insbesondere bei Luftdrücken $> 1 \text{ mbar}$. Für Luftdrücke $\leq 1 \text{ mbar}$ ist die effektive Wärmeleitfähigkeit von FEP bei einer Probenmitteltemperatur von 48 °C geringer.

Die effektiven Wärmeleitfähigkeiten der Mischungen GEP-HPKS-60:40, GEP-HPKS-70:30, GEP-HPKS-80:20 sowie reiner pyrogener Kieselsäure sind bei einer Probenmitteltemperatur von 48 °C und einem Luftdruck von 10 mbar zwar geringer als die der expandierten Perlite, allerdings liegen diese mit Werten zwischen $19,36 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ und $22,64 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ bereits bei ca. der Hälfte der effektiven Wärmeleitfähigkeit konventioneller, belüfteter Wärmedämmungen aus Mineralwolle oder Polyesterfaservlies. Zudem existieren bei der Technologie doppelwandiger Warmwasserspeicher signifikante Wärmebrücken an der notwendigen Verbindung zwischen Innen- und Außenwand [14]. Die Herstellkosten eines doppelwandigen vakuumwärmegeprägten Warmwasserspeichers sind jedoch signifikant höher als die eines konventionell wärmegeprägten Warmwasserspeichers [14]. Außerdem liegen bereits die Dämmstoffkosten der Mischungen von GEP mit der günstigeren UPKS um ca. den Faktor 2 bis 3 höher als die konventioneller Wärmedämmstoffe. Zudem ist mit der Herstellung von Mischungen mit der sehr staubintensiven pyrogenen Kieselsäure ein erheblicher zusätzlicher Aufwand verbunden. Damit wird die Wirtschaftlichkeit der deutlich teureren Speichertechnologie für den Anwender des Warmwasserspeichers schwer erreichbar. Daher ist, trotz des höheren Zeit- und Energieaufwandes, eine Evakuierung auf Luftdrücke $\leq 0,1 \text{ mbar}$ empfehlenswert, wo FEP bei einer Probenmitteltemperatur von 48 °C effektive Wärmeleitfähigkeiten erreicht, die mit $\leq 4,84 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ lediglich ca. 10 % der effektiven Wärmeleitfähigkeit konventioneller, belüfteter Wärmedämmstoffe betragen. Alternativ kann der Einsatz von Strahlungshemmern wie SiC zur Verringerung der effektiven Wärmeleitfähigkeit von Mischungen aus Perlit und pyrogener Kieselsäure in Betracht gezogen werden.

Um den Nutzen in die Kostenbetrachtung zu integrieren, wird in Anhang A6 anhand einer Berechnung gezeigt, welche Dämmdicke und welche entsprechenden Dämmstoffkosten, abhängig vom Wärmedämmstoff, notwendig sind, um einen beispielhaften Wärmedurchgangskoeffizienten von $0,15 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ zu erreichen.

Eine vergleichende Wirtschaftlichkeitsbetrachtung des Autors von konventionell- und vakuumwärmegeprägten Warmwasserspeichern auf Basis einer Simulationsstudie für unterschiedliche Anwendungsfälle und Speichervolumina findet sich in [14].

10 Analytische Modellierung der effektiven Wärmeleitfähigkeit

Das Ziel der analytischen Modellierung der effektiven Wärmeleitfähigkeit ist es, einem Hersteller und Anwender von Vakuumwärmedämmungen zu ermöglichen, den idealen Wärmedämmstoff für seine Anwendung zu identifizieren, ohne Messungen der effektiven Wärmeleitfähigkeit durchführen zu müssen. Dafür sind einfache und möglichst vollständig prädiktive analytische Modelle notwendig, für welche so wenige und so einfach zu messende Dämmstoffgrößen wie möglich benötigt werden. Zudem soll eine möglichst hohe Übereinstimmung der Modelle mit Messwerten erreicht werden. Die systematischen Messungen der effektiven Wärmeleitfähigkeit sowie Dämmstoffuntersuchungen dienen u. a. dazu, Anpassungsparameter durch empirisch ermittelte Funktionen ersetzen zu können, um vollständige Prädiktivität der analytischen Modelle zu erreichen.

In diesem Kapitel werden die analytischen Modelle der effektiven Wärmeleitfähigkeit für expandierte Perlite, pyrogene Kieselsäure und Mischungen aus GEP und HPKS gezeigt und diskutiert. Für das Gesamtmodell wird jeweils das Superpositionsprinzip nach Gleichung (3-1) verwendet, wonach der Wärmedämmstoff als eine parallele Verschaltung von Wärmewiderständen, entsprechend der einzelnen Wärmetransportmechanismen, betrachtet wird. Zunächst werden die Modelle der einzelnen Wärmetransportmechanismen gezeigt, daraufhin wird das Gesamtmodell mit Messwerten verglichen und eine Validierung des Gesamtmodells mit Stoffen, die nicht für die Modellbildung verwendet wurden, vorgenommen. Anschließend wird, mit Ausnahme des Modells für pyrogene Kieselsäuren, die Sensitivität der Gesamtmodelle bzgl. der wichtigsten Parameter dargestellt und diskutiert und es werden beispielhafte Modellstudien vorgestellt.

Als Gas in der Wärmedämmung wird im Folgenden Luft angenommen. Die Modelle lassen sich allerdings auch für andere Gase anpassen, indem die entsprechenden gasabhängigen Parameter ermittelt und eingesetzt werden.

10.1 Expandierte Perlite

Auf reine expandierte Perlite wurde bei der Modellierung der effektiven Wärmeleitfähigkeit der größte Fokus gelegt, da diese in Einfachheit der Anwendung, Kosten und Wärmedämmwirkung gegenüber den in der vorliegenden Arbeit untersuchten Mischungen nach derzeitigem Kenntnisstand weitgehend als vorteilhaft eingeschätzt werden, siehe Kapitel 9.

10.1.1 Modellierung der Luftwärmeleitung

Zur Modellierung der Luft-Wärmeleitfähigkeit expandierter Perlite $\lambda_{Luft,EP}$ [W/(m·K)] wird das in Gleichung (3-7) gezeigte Modell von REICHENAUER verwendet, das auf dem sehr gut validierten

Modell von KAGANER basiert, siehe Gleichung (3-2) und Kapitel 3.4.1. Als Kontinuums-Wärmeleitfähigkeit wird für Luft Gleichung (8-1) verwendet. Die gasabhängige Konstante wird mittels Gleichung (3-4) berechnet und beträgt für Luft $\beta_{Luft} = 1,554$. $f_{Gas,ZK}$ wird gemäß Gleichung (6-5) und $f_{Gas,K}$ gemäß der folgenden Gleichung (10-1) bestimmt, wobei ρ_0 [kg/m³] die Reindichte des massiven Perlits ist, für welche der selbst bestimmte Wert von 2391 kg/m³ eingesetzt wird.

$$f_{Gas,K} = (1 - f_{Gas,ZK}) \cdot \left(1 - \frac{\rho_K}{\rho_0}\right) \quad (10-1)$$

Die mittlere freie Weglänge von Luft $l_{m,Luft}$ [m] wird gemäß Gleichung (2-2) berechnet. In [122] wird der Stoßquerschnitt von Stickstoffmolekülen mit $4,3 \cdot 10^{-19}$ m² und von Sauerstoffmolekülen mit $4 \cdot 10^{-19}$ m² angegeben. Unter der vereinfachenden Annahme einer Luftzusammensetzung von 79 Volumen-% Stickstoff und 21 Volumen-% Sauerstoff, wird ein Stoßquerschnitt der Luft $A_{M,Luft}$ von $0,79 \cdot 4,3 \cdot 10^{-19}$ m² + $0,21 \cdot 4 \cdot 10^{-19}$ m² = $4,237 \cdot 10^{-19}$ m² berechnet und verwendet.

Als mittlerer Kornporendurchmesser $d_{p,K}$ wird gemäß Kapitel 6.4 der Wert 39 µm verwendet. Zur Bestimmung des mittleren Durchmessers der Kornzwischenraum-Poren $d_{p,ZK}$ wird Gleichung (6-6) verwendet.

Das für expandierte Perlite in Luft verwendete Modell ist in Gleichung (10-2) dargestellt.

$$\lambda_{Luft,EP} = f_{Gas,K} \cdot \frac{\lambda_{Luft,Kont}}{1 + 2 \cdot \beta_{Luft} \cdot l_{m,Luft} / d_{p,K}} + f_{Gas,ZK} \cdot \frac{\lambda_{Luft,Kont}}{1 + 2 \cdot \beta_{Luft} \cdot l_{m,Luft} / d_{p,ZK}} \quad (10-2)$$

10.1.2 Modellierung der Festkörperwärmeleitung

Aufgrund der in Kapitel 3.4.2 beschriebenen Schwierigkeiten bei Modellen der Festkörperwärmeleitung von Schaumkorn-Schüttungen, die auf physikalischen Kenngrößen beruhen, wird in der vorliegenden Arbeit ein rein empirisches Modell entwickelt, basierend auf den Ergebnissen der Festkörper-Wärmeleitfähigkeit aus Kapitel 6.6.

In Abbildung 10-1 sind die Festkörper-Wärmeleitfähigkeiten expandierter Perlite aus Tabelle 6-6 über der Dichte, sowie eine Regressionsgerade nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate aufgetragen.

Ein Anstieg der Festkörper-Wärmeleitfähigkeit mit der Dichte der Probe ist zu erwarten, da mit höherer Dichte, und damit geringerer Porosität, ein größeres Festkörper-Volumen zur Verfügung steht, über welches Wärmeleitung stattfinden kann. Zwischen 48 kg/m³ und 90 kg/m³ ist allerdings eine leicht abnehmende Festkörper-Wärmeleitfähigkeit mit der Dichte zu erkennen, was mit Messunsicherheiten erklärt werden kann. Die Bestimmung der Festkörper-Wärmeleitfähigkeit ist durch die Extrapolation bis auf 0 K (siehe Kapitel 6.6), sensitiv bzgl. Messunsicherheiten bei der Messung der effektiven Wärmeleitfähigkeit. Der Anstieg der

Regressionsgeraden resultiert aus der deutlich höheren Festkörper-Wärmeleitfähigkeit von FEP mit einer Dichte von 182 kg/m^3 .

Die Regressionsgerade aus Abbildung 10-1 ist in Gleichung (10-3) definiert und wird zur prädiktiven Modellierung der Festkörper-Wärmeleitfähigkeit expandierter Perlite $\lambda_{FK,EP}$ [mW/(m·K)] verwendet. Bei einer Dichte von 0 kg/m^3 muss die Festkörper-Wärmeleitfähigkeit 0 mW/(m·K) betragen, da in diesem Fall kein Festkörper zur Leitung von Wärme vorhanden ist. Eine Extrapolation der in Abbildung 10-1 gezeigten Regressionsgeraden bis 0 kg/m^3 wäre daher physikalisch nicht sinnvoll. Das in Gleichung (10-3) gezeigte Modell wird demnach auf eine minimale Dichte von 48 kg/m^3 beschränkt.

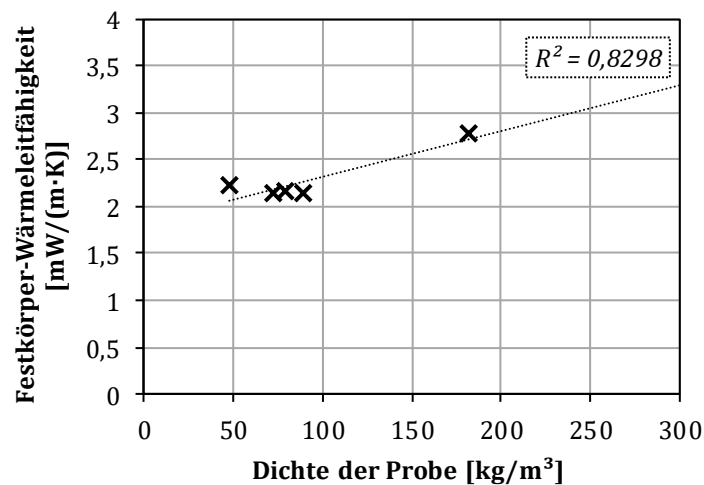


Abbildung 10-1: Festkörper-Wärmeleitfähigkeiten expandierter Perlite über der Dichte der Probe und Regressionsgerade, siehe Gleichung (10-3)

$$\lambda_{FK,EP} = C_{FK,EP,1} \cdot \rho + C_{FK,EP,2} \quad (10-3)$$

Mit:

$$C_{FK,EP,1} = 4,9483 \cdot 10^{-3} \text{ (mW/(m·K))} \cdot \text{m}^3/\text{kg}$$

$$C_{FK,EP,2} = 1,8197 \text{ mW/(m·K)}$$

Auch in [19] wird ein linearer Anstieg der Festkörper-Wärmeleitfähigkeit mit der Dichte für Dichten $\geq 55 \text{ kg/m}^3$ ermittelt. Grundlage dafür sind Messungen mit GEP unterschiedlicher Dichte. Dabei wird unterschieden, ob die höheren Dichten durch kompaktere Anordnung der Körner durch Rütteln erreicht wurde, oder durch externen Druck, welcher zu Kornzerstörungen führen kann. Bei einer Variation der Dichte durch Rütteln wird bei einer Dichte von 55 kg/m^3 eine Festkörper-Wärmeleitfähigkeit von $2,5 \text{ mW/(m·K)}$, bei 68 kg/m^3 von $3,4 \text{ mW/(m·K)}$ und bei 92 kg/m^3 von $5,1 \text{ mW/(m·K)}$ berichtet. Somit ergeben sich, selbst bei geringeren Dichten als der in der vorliegenden Arbeit für GEP erreichten 73 kg/m^3 , deutlich höhere Festkörper-Wärmeleitfähigkeiten als die vom Autor gemessenen $2,14 \text{ mW/(m·K)}$. Bei einer linearen Extrapolation der Werte aus [19] bis zur Dichte von FEP mit 182 kg/m^3 , ergäbe sich eine Festkörper-Wärmeleitfähigkeit von $11,4 \text{ mW/(m·K)}$, welche die gemessene effektive Wärmeleitfähigkeit von FEP beim

niedrigsten gemessenen Luftdruck um mehr als den Faktor 2 übersteigt, obwohl darin noch zusätzlich Wärmestrahlung enthalten ist. Dies lässt zumindest eine Extrapolation der Werte aus [19] zur Bestimmung der Festkörper-Wärmeleitfähigkeit anderer expandierter Perlite als GEP als ungeeignet erscheinen. Bei Verwendung der Festkörper-Wärmeleitfähigkeiten, bei welchen die unterschiedlichen Dichten durch externen Druck erzeugt wurden, ergäben sich bei Dichten $> 55 \text{ kg/m}^3$ noch weitaus höhere Werte.

In [54] werden für expandierte Perlite bis zu einer Dichte von 400 kg/m^3 wiederum Festkörper-Wärmeleitfähigkeiten $< 1 \text{ mW/(m}\cdot\text{K)}$ angegeben. Die Messwerte der vorliegenden Arbeit befinden sich also im Bereich der Literaturwerte. Die großen Unterschiede der Literaturwerte zeigen jedoch wie hoch die Unsicherheit bei der Bestimmung der Festkörper-Wärmeleitfähigkeit von Schüttungen aus porösen Körnern im Allgemeinen ist.

10.1.3 Modellierung des Kopplungseffekts

Zur Modellierung der Kopplung von Luft- und Festkörperwärmeleitung, des sogenannten Kopplungseffekts, wird ein neuartiges Modell entwickelt, das auf der entdeckten Korrelation zwischen der Größe der Kopplungseffekt-Wärmeleitfähigkeit und des mittleren Korndurchmessers basiert, siehe Abbildung 8-3. Zunächst wird, ähnlich wie in [19], [30], [62], [64], der Kopplungseffekt als eine Reihenschaltung von Wärmewiderständen betrachtet, siehe Kapitel 3.4.3. Abweichend von [19], [30], [62], [64] wird allerdings anstatt des Wärmewiderstandes des massiven Festkörpers, der Wärmewiderstand des Festkörper- und Luftanteils des porösen Perlit-Korns $R_{K,EP}$ [$\text{m}\cdot\text{K/W}$] verwendet und seriell mit dem Wärmewiderstand der umgebenden Luft $R_{Luft,ZK}$ [$\text{m}\cdot\text{K/W}$] verschaltet. Der Kehrwert der Reihenschaltung der oben genannten Wärmewiderstände wird mit einem Skalierungsfaktor $F_{Kpl,EP}$ [-] multipliziert, der aus dem Quotienten aus einer empirisch ermittelten Korrekturfunktion $g_{Kpl,EP}(d_{K,vm})$ [m] und dem volumengewichtet gemittelten Korndurchmesser $d_{K,vm}$ besteht.

Das Modell der Kopplungseffekt-Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{Kpl,EP}$ [$\text{W/(m}\cdot\text{K)}$] ist in Gleichung (10-4) aufgeführt. Die darin enthaltene Festkörper- und Luft-Wärmeleitfähigkeit des expandierten Perlit-Korns $\lambda_{K,EP}$ [$\text{W/(m}\cdot\text{K)}$] wird mittels Gleichung (3-11) berechnet, wobei sich die Porosität des Schaumkorns Ψ_K [-] nach Gleichung (10-5) bestimmen lässt. Als Wärmeleitfähigkeit des massiven Festkörpers $\lambda_{FK,0}$ wird für Perlit mit $1 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ der arithmetische Mittelwert der in Kapitel 5.1 angegebenen Literaturwerte eingesetzt. Die Luft-Wärmeleitfähigkeiten $\lambda_{Luft,ZK}$ und $\lambda_{Luft,K}$ werden jeweils nach Gleichung (3-2) mit Gleichung (3-4), Gleichung (2-2), Gleichung (8-1), $\beta_{Luft} = 1,554$, $A_{M,Luft} = 4,237 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2$ und den jeweiligen Porendurchmessern $d_{p,ZK}$ und $d_{p,K}$ bestimmt, die auch in Kapitel 10.1.1 beschrieben werden.

$$\lambda_{Kpl,EP} = (R_{K,EP} + R_{Luft,ZK})^{-1} \cdot F_{Kpl,EP} = \left[\frac{1}{\lambda_{K,EP}} + \frac{1}{\lambda_{Luft,ZK}} \right]^{-1} \cdot \frac{g_{Kpl,EP}}{d_{K,vm}} \quad (10-4)$$

$$\Psi_K = 1 - \frac{\rho_K}{\rho_0} \quad (10-5)$$

Die Korrekturfunktion $g_{Kpl,EP}$ wird aus den Korrekturfaktoren $G_{Kpl,EP}$ [m] bestimmt, siehe Abbildung 10-2. Die Korrekturfaktoren werden, wie in Kapitel 6.5 beschrieben, durch Anpassung an den jeweiligen Messwert der Summe aus Luft- und Kopplungseffekt-Wärmeleitfähigkeit bei Atmosphärendruck und einer Probenmitteltemperatur von 48 °C ermittelt. Wie in Abbildung 10-2 zu erkennen ist, steigen die Korrekturfaktoren annähernd linear mit steigendem volumengewichtet gemittelten Korndurchmesser. Das Bestimmtheitsmaß der Regressionsgerade beträgt 0,9869. Diese Gerade kann daher in guter Näherung als Korrekturfunktion $g_{Kpl,EP}$ verwendet werden und ist in Gleichung (10-6) definiert.

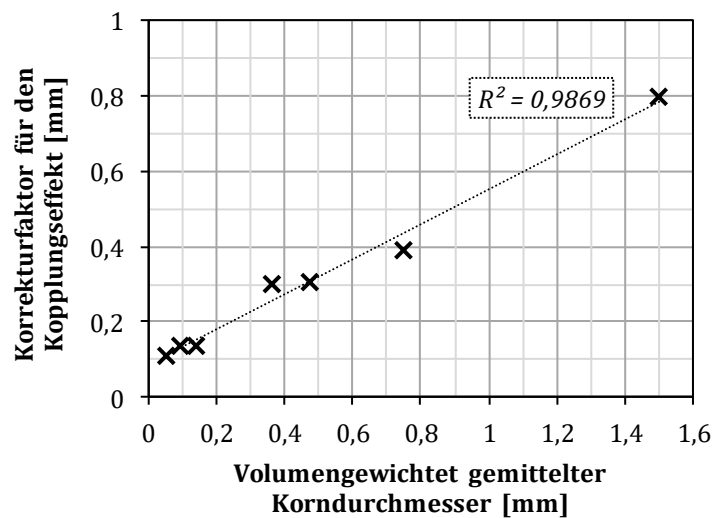


Abbildung 10-2: Korrekturfaktoren des Kopplungseffekts expandierter Perlite über dem volumengewichtet gemittelten Korndurchmesser und lineare Regression zur empirischen Bestimmung der Korrekturfunktion $g_{Kpl,EP}$ nach Gleichung (10-6)

$$g_{Kpl,EP} = C_{Kpl,EP,1} \cdot d_{K,vm} [mm] + C_{Kpl,EP,2} \quad (10-6)$$

Mit:

$$C_{Kpl,EP,1} = 4,6436 \cdot 10^{-1}$$

$$C_{Kpl,EP,2} = 8,7352 \cdot 10^{-2} \text{ mm}$$

10.1.4 Modellierung der Wärmestrahlung

Zur Modellierung der Wärmestrahlung wird der gut validierte ROSSELAND'sche Diffusionsansatz aus Gleichung (3-15) gewählt. Für die Strahlungsmitteltemperatur T_{Str} wird aufgrund der dickwandigen, hohlzylindrischen Geometrie der Probe die Probenmitteltemperatur aus Gleichung (7-6) in Kelvin, T_{Probe} , eingesetzt. Der effektive Brechungsindex n_{eff} wird gemäß Kapitel 3.4.4 mit 1 angenommen und kann dementsprechend entfallen. Der Aufwand zur Bestimmung des dichtespezifischen Extinktionskoeffizienten e_R wird als hoch eingeschätzt. Daher

wird, für eine einfache und prädiktive Modellierung, der in der vorliegenden Arbeit bestimmte Mittelwert von $26,8 \text{ m}^2/\text{kg}$ verwendet. Das vereinfachte Modell ist in Gleichung (10-7) aufgeführt.

$$\lambda_{Str} = \frac{16 \cdot \sigma}{3 \cdot e_R \cdot \rho} \cdot T_{Probe}^3 \quad (10-7)$$

10.1.5 Gesamtmodell der effektiven Wärmeleitfähigkeit

Das Gesamtmodell der effektiven Wärmeleitfähigkeit expandierter Perlite in Luft $\lambda_{eff,EP}$ [W/(m·K)] ist in Gleichung (10-8) aufgeführt.

$$\lambda_{eff,EP} = \lambda_{Luft,EP} + \lambda_{FK,EP} + \lambda_{Kpl,EP} + \lambda_{Str} \quad (10-8)$$

Das Ziel einer vollständigen Prädiktivität bzgl. anderer ungemahlener expandierter Perlite wird damit vollständig erreicht. Es ist nach Kenntnis des Autors das erste Modell der effektiven Wärmeleitfähigkeit, das für Schüttungen aus porösen Körnern wie expandierte Perlite ein einfaches analytisches Modell für den Kopplungseffekt enthält, welches nicht im Nachhinein an Messwerte angepasst werden muss. Die einzigen zu bestimmenden Größen sind der volumengewichtet gemittelte Korndurchmesser $d_{K,vm}$, die mittlere Korndichte ρ_K sowie die Dichte der Schüttung ρ . Diese drei Größen gehen in die Modelle der Luftwärmeleitung und des Kopplungseffekts mit ein. Der volumengewichtet gemittelte Korndurchmesser wird meist bereits vom Hersteller angegeben oder kann beim Hersteller angefragt werden. Die mittlere Korndichte lässt sich sehr einfach mit Hilfe eines Flüssigkeitspyknometers bestimmen, welches bereits für ca. 20 € kommerziell verfügbar ist, vgl. Kapitel 6.2. Die Dichte der Schüttung wird aus der Dämmstoffmasse und dem Dämmvolumen bestimmt. Damit gilt auch das Ziel erreicht, nur wenige und einfach zu messende Dämmstoffgrößen zu benötigen.

Übereinstimmung des Anpassungsmodells mit Messwerten der effektiven Wärmeleitfähigkeit von GEP und FEP

Bei dem hier „Anpassungsmodell“ genannten Gesamtmodell der effektiven Wärmeleitfähigkeit wurden, abweichend vom oben vorgestellten Modell, die per Anpassung an Messwerte bestimmten mittleren Durchmesser der Kornzwischenraum-Poren $d_{p,ZK,Fit}$ aus Tabelle 6-4, die auf die gleiche Weise ermittelten Korrekturfaktoren für den Kopplungseffekt $G_{Kpl,EP}$ aus Abbildung 10-2, die dichtespezifischen Extinktionskoeffizienten e_R und Festkörper-Wärmeleitfähigkeiten $\lambda_{FK,EP}$ aus Tabelle 6-6 und die jeweils mikroskopisch für GEP und FEP bestimmten volumengewichtet gemittelten Kornporendurchmesser $d_{p,K}$ aus Kapitel 6.4 verwendet. Es handelt sich damit also um kein vollständig prädiktives Modell. Dieses Anpassungsmodell wird verwendet, um die Übereinstimmung des Verlaufs der effektiven Wärmeleitfähigkeit über dem Luftdruck und der Temperatur mit Messwerten unter idealen Bedingungen bewerten zu können. Zudem sollen anhand des Anpassungsmodells die modellierten Anteile der einzelnen Wärme-

transportmechanismen an der effektiven Wärmeleitfähigkeit gezeigt werden. Für diese Untersuchungen wurden die Stoffe GEP und FEP ausgewählt, da dies die einzigen für die Modellierung verwendeten expandierten Perlite sind, die in dieser Form kommerziell verfügbar sind und da nur für diese Stoffe die Kornporengrößen bestimmt wurden.

Da die Messwerte von GEP und FEP für die Modellierung mitverwendet wurden, kann damit hingegen keine Validierung des vollständig prädiktiven Modells erfolgen. Die Validierung des vollständig prädiktiven Gesamtmodells wird im nachfolgenden Kapitel 10.1.6 anhand von Messwerten der effektiven Wärmeleitfähigkeit von expandierten Perliten eines anderen Herstellers durchgeführt.

In Abbildung 10-3 bis Abbildung 10-6 sind die gemessenen effektiven Wärmeleitfähigkeiten von GEP und FEP über dem Luftdruck bei einer Probenmitteltemperatur von 48 °C und über der Probenmitteltemperatur bei einem Luftdruck von $(0,02 \pm 0,005)$ mbar und bei Atmosphärendruck von (960 ± 20) mbar sowie die entsprechenden an die Messwerte angepassten Modelle gezeigt. Das Anpassungsmodell der effektiven Wärmeleitfähigkeit ist jeweils als durchgezogene Linie dargestellt und in der Legende entsprechend Gleichung (10-8) als Summe aller Wärmetransportmechanismen aufgeführt. Zusätzlich sind die Einzelmodelle additiv dargestellt. Durch die additive Darstellung soll der Bezug zu den Messwerten verdeutlicht werden.

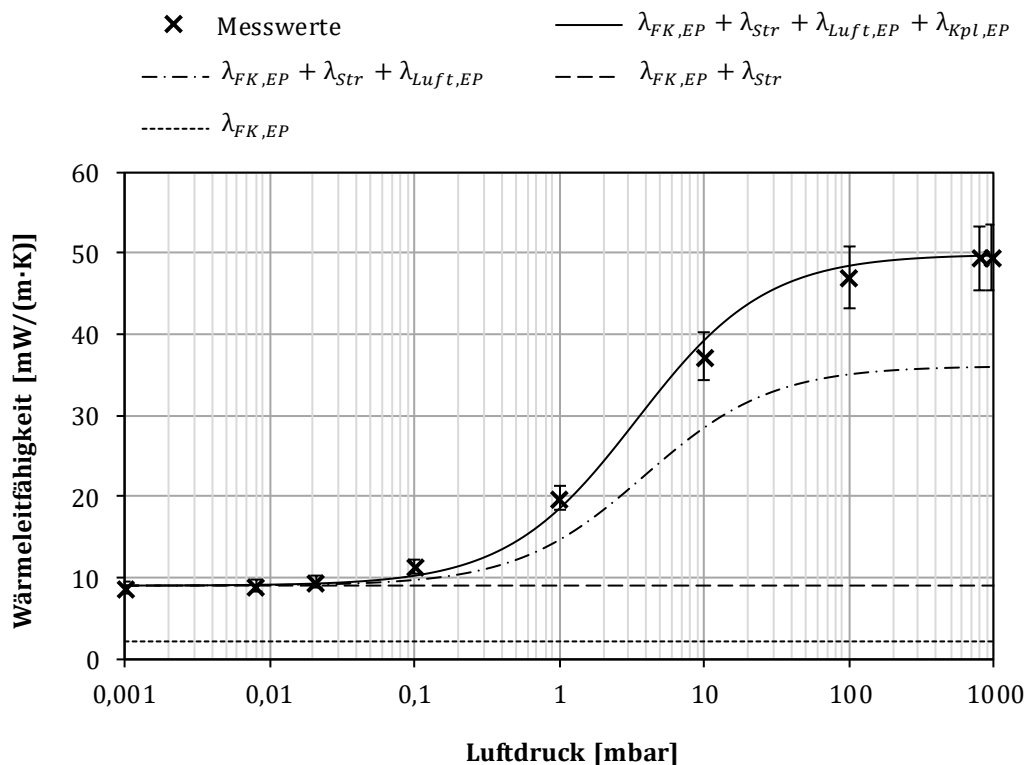


Abbildung 10-3: Prüfung der Übereinstimmung des Anpassungsmodells mit Messwerten der effektiven Wärmeleitfähigkeit von GEP über dem Luftdruck bei einer Probenmitteltemperatur von 48 °C

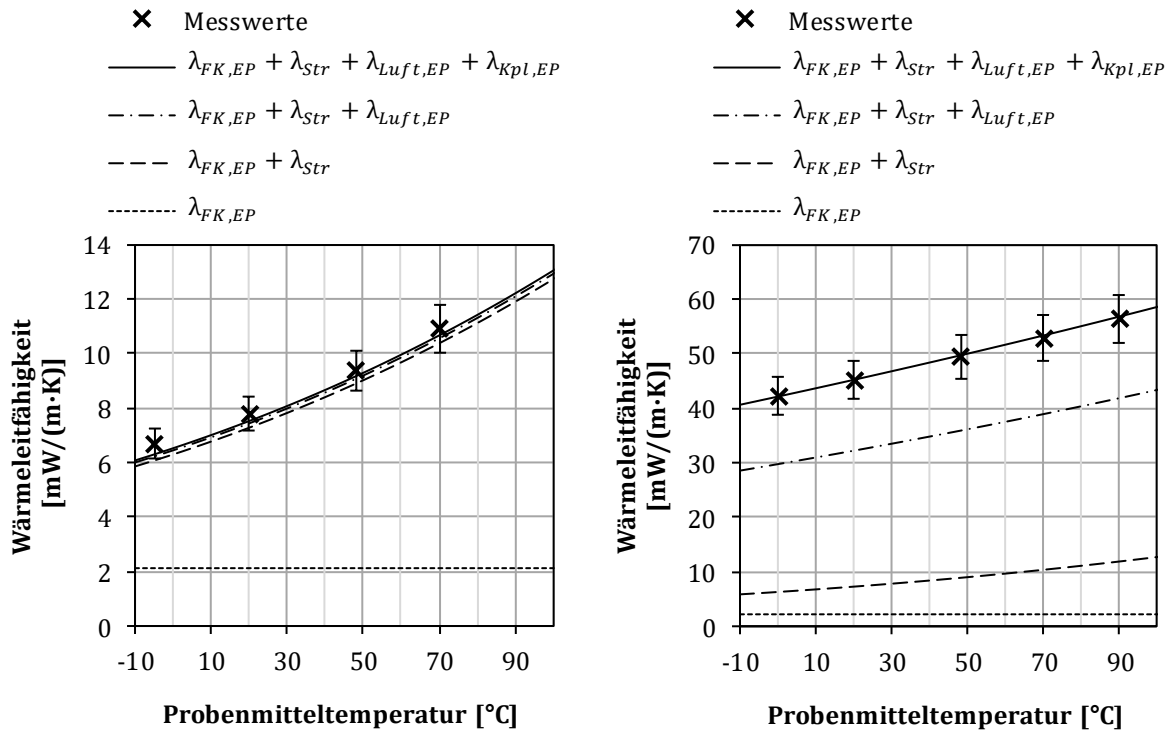


Abbildung 10-4: Prüfung der Übereinstimmung des Anpassungsmodells mit Messwerten der effektiven Wärmeleitfähigkeit von GEP über der Probenmitteltemperatur. Links: bei einem Luftdruck von (0,02 ± 0,005) mbar; rechts: bei Atmosphärendruck von (960 ± 20) mbar

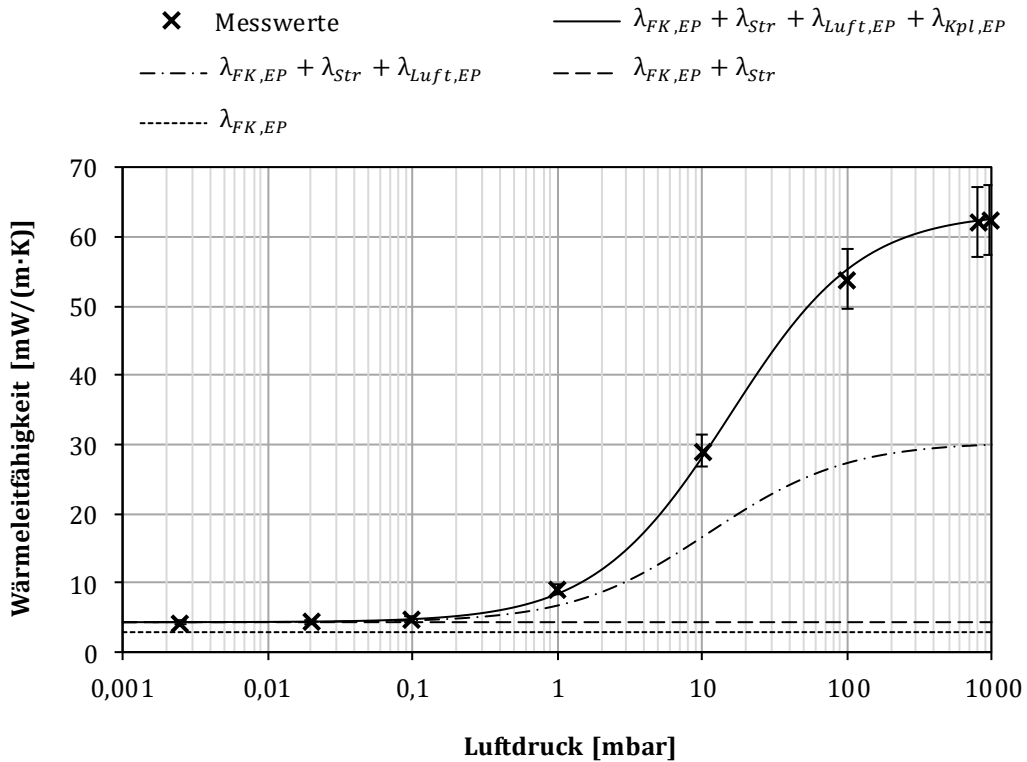


Abbildung 10-5: Prüfung der Übereinstimmung des Anpassungsmodells mit Messwerten der effektiven Wärmeleitfähigkeit von FEP über dem Luftdruck bei einer Probenmitteltemperatur von 48 °C

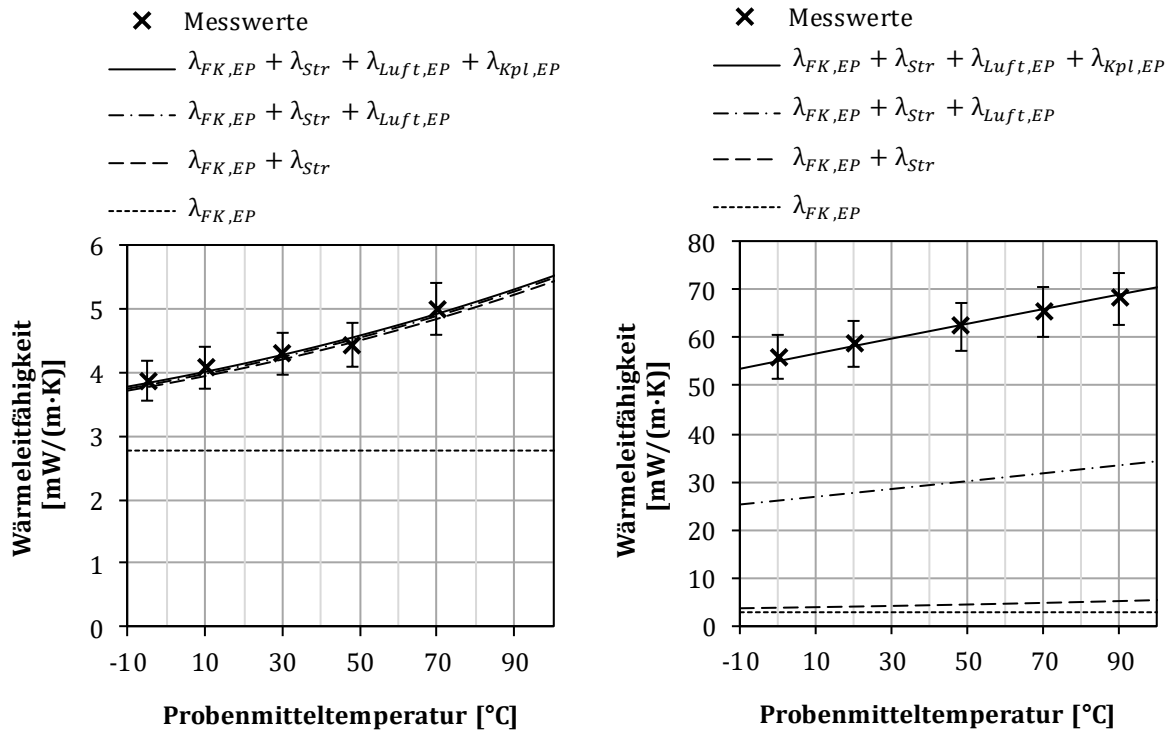


Abbildung 10-6: Prüfung der Übereinstimmung des Anpassungsmodells mit Messwerten der effektiven Wärmeleitfähigkeit von FEP über der Probenmitteltemperatur. Links: bei einem Luftdruck von $(0,02 \pm 0,005)$ mbar; rechts: bei Atmosphärendruck von (960 ± 20) mbar

Der Verlauf der Messwerte der effektiven Wärmeleitfähigkeit von GEP und FEP über dem Luftdruck und über der Temperatur wird vom Anpassungsmodell in großer Näherung nachgebildet. Der Anstieg des Anpassungsmodells über dem Luftdruck ist allerdings jeweils leicht steiler als der Anstieg der Messwerte. Dies ist vermutlich auf die weite Porengrößenverteilung in den expandierten Perliten zurückzuführen, die nur annähernd durch die zwei gemittelten Porengrößen der Kornporen und der Kornzwischenraum-Poren im Modell abgebildet werden kann. Auch der Anstieg der Modellkurven über der Probenmitteltemperatur bei Atmosphärendruck ist leicht steiler als der Anstieg der Messwerte. Dies ist vermutlich zum größten Anteil darauf zurückzuführen, dass das Kopplungseffekt-Modell den enthaltenen Anteil der Luftwärmeleitung leicht überbewertet. Da es durch die Anpassung an Messwerte bei nur einer Probenmitteltemperatur entwickelt wurde, kann es somit zu einer leicht überhöhten Steigung beitragen. Diese Vermutung wird dadurch gestützt, dass die überhöhte Steigung mit steigendem Kopplungseffekt zunimmt, die Überhöhung im gezeigten Vergleich für FEP also dementsprechend stärker ausgeprägt ist als für GEP. Dies führt jedoch im gemessenen Temperaturbereich zu einer maximalen absoluten Abweichung von betragsmäßig lediglich $1,46 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$. Dies entspricht für das betroffene FEP(0-0,1) bei Atmosphärendruck und einer Probenmitteltemperatur von 10 °C lediglich $2,1 \%$, bezogen auf den Messwert, was auch die maximale relative Abweichung bei allen untersuchten expandierten Perliten ist. Daher wird diese leichte Überbewertung als tolerierbar bewertet.

Aufgrund der geringeren Dichte, existiert bei GEP ein höherer Anteil an Wärmestrahlung und ein geringerer Anteil an Festkörperwärmeleitung als bei FEP. Beim Vergleich von Abbildung 10-3 mit Abbildung 10-5 zeigt sich auch der deutlich höhere Kopplungseffekt von FEP gegenüber GEP in der Differenz der Modellkurven $\lambda_{FK,EP} + \lambda_{Str} + \lambda_{Luft,EP} + \lambda_{Kpl,EP}$ und $\lambda_{FK,EP} + \lambda_{Str} + \lambda_{Luft,EP}$.

In Abbildung 10-4 links und Abbildung 10-6 links ist sichtbar, dass bei einem Luftdruck von $(0,02 \pm 0,005)$ mbar jeweils noch ein geringer Anteil an Luftwärmeleitung und Kopplungseffekt existiert. Aufgrund der größeren Poren ist dieser für GEP um ca. den Faktor 2 größer als für FEP. In Abbildung 10-4 rechts und Abbildung 10-6 rechts zeigt sich, dass die Wärmestrahlung bei GEP in deutlich größerem Maß zur Steigung der effektiven Wärmeleitfähigkeit mit der Probenmittlertemperatur beiträgt als bei FEP, bei welcher die Steigung zum deutlich größeren Teil auf die Luftwärmeleitung und den Kopplungseffekt zurückzuführen ist.

10.1.6 Validierung des Gesamtmodells

Zur Validierung des vollständig prädiktiven Gesamtmodells wurden Messwerte der effektiven Wärmeleitfähigkeit der expandierten Perlite Cryo 0015 (VEP1) und Fillocell 150 (VEP2) des Herstellers Nordisk Perlite verwendet. Die wesentlichen Stoffdaten dieser expandierten Perlite sind in Tabelle 10-1 und Tabelle 10-2 aufgeführt. Die Messungen der effektiven Wärmeleitfähigkeit wurden in der in Kapitel 7 beschriebenen Versuchsanlage durchgeführt. Für VEP1 hat sich in der Zylinderapparatur eine Dichte von 79 kg/m^3 eingestellt und für VEP2 eine Dichte von 194 kg/m^3 .

Tabelle 10-1: Stoffgrößen des expandierten Perlits Cryo 0015 (VEP1)

| Stoffgröße | Wert | Messverfahren | Quelle |
|--|----------------------|-------------------------|--------------------------------|
| Korndurchmesser | 0 – 1,5 mm | unbekannt | Hersteller [123] |
| Volumengewichtet gemittelter Korndurchmesser | 0,36 mm | Siebanalyse | Hersteller [123] |
| Mittlere Korndichte | 391 kg/m^3 | Flüssigkeitsverdrängung | Eigenmessung, vgl. Kapitel 6.2 |

Tabelle 10-2: Stoffgrößen des expandierten Perlits Fillocell 150 (VEP2)

| Stoffgröße | Wert | Messverfahren | Quelle |
|--|----------------------|-------------------------|--------------------------------|
| Korndurchmesser | 0 – 0,15 mm | unbekannt | Hersteller [124] |
| Volumengewichtet gemittelter Korndurchmesser | 0,064 mm | Laserdiffraktometrie | Hersteller [124] |
| Mittlere Korndichte | 414 kg/m^3 | Flüssigkeitsverdrängung | Eigenmessung, vgl. Kapitel 6.2 |

Es fällt auf, dass die mittleren Korndichten deutlich größer sind, als die aller übrigen expandierten Perlite die in der vorliegenden Arbeit untersucht wurden und insbesondere auch gegenüber denjenigen mit ähnlichen Probendichten und mittleren Korndurchmessern. MEP(0,2–0,5), mit einem nahezu gleichen mittleren Korndurchmesser wie VEP1 von 0,35 mm, besitzt eine deutlich

geringere mittlere Korndichte von lediglich 190 kg/m^3 trotz einer mit 90 kg/m^3 höheren Probedichte als VEP1. Und FEP(0-0,1), welches mit $0,05 \text{ mm}$ einen geringfügig kleineren mittleren Korndurchmesser als VEP2 besitzt, hat mit 327 kg/m^3 eine geringere mittlere Korndichte als VEP2 trotz einer höheren Probedichte von 258 kg/m^3 . Die Abweichungen sind u. a. auf einen deutlich höheren Anteil an Kornfragmenten und Körnern mit großen Porenöffnungen an der Oberfläche von VEP1 und VEP2 zurückzuführen. Dies führt zu einer Überbestimmung der mittleren Korndichte mittels der Messmethode durch Flüssigkeitsverdrängung, da die Messflüssigkeit zu größeren Anteilen in die Poren eindringen kann, siehe Kapitel 6.2. Das machte sich insbesondere durch einen höheren Anteil an absinkenden Körnern innerhalb der Messflüssigkeit bemerkbar.

In Abbildung 10-7 sind die Messwerte der effektiven Wärmeleitfähigkeit von VEP1 und VEP2 gemeinsam mit den jeweiligen vollständig prädiktiven Modellen über dem Luftdruck dargestellt und in Abbildung 10-8 über der Probenmitteltemperatur.

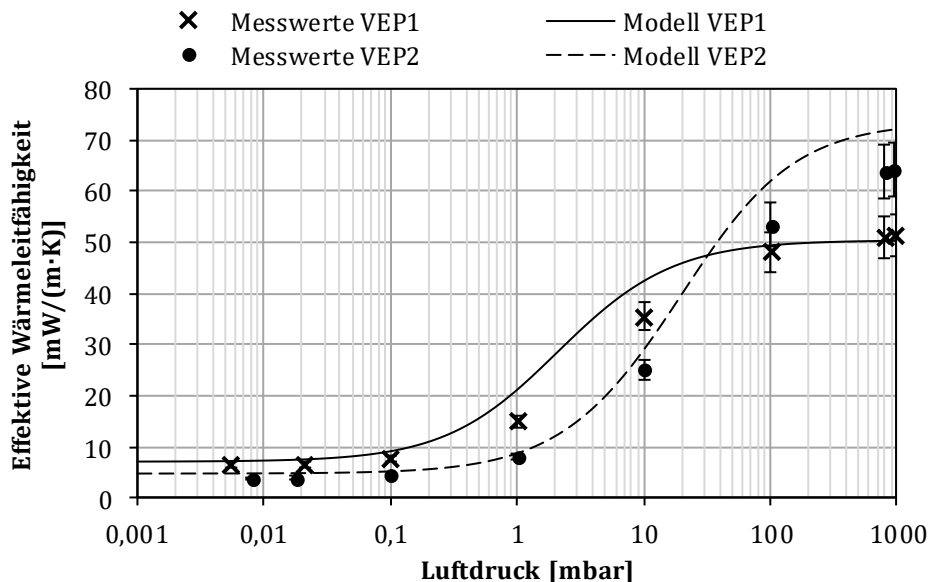


Abbildung 10-7: Validierung des vollständig prädiktiven Modells der effektiven Wärmeleitfähigkeit anhand der Messwerte von VEP1 und VEP2 über dem Luftdruck bei einer Probenmitteltemperatur von $48 \text{ }^\circ\text{C}$

Sowohl bei VEP1 als auch bei VEP2 zeigt sich in Abbildung 10-7 und Abbildung 10-8 links, dass die Ergebnisse des Modells die Messwerte bei Luftdrücken $\leq 0,025 \text{ mbar}$ leicht übersteigen. Dies ist zum Großteil auf eine Überbewertung der Wärmestrahlung im Modell zurückzuführen. Diese resultiert daraus, dass der für die Modellierung verwendete Mittelwert des dichtespezifischen Extinktionskoeffizienten mit $26,8 \text{ m}^2/\text{kg}$ niedriger ist als die aus den Messwerten, gemäß der Methodik aus Kapitel 6.6, ermittelten Werte von $29,5 \text{ m}^2/\text{kg}$ für VEP1 und $37,9 \text{ m}^2/\text{kg}$ für VEP2. Die Strahlungs-Wärmeleitfähigkeiten des vollständig prädiktiven Modells liegen bei einer Probenmitteltemperatur von $48 \text{ }^\circ\text{C}$ mit $4,728 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ für VEP1 und $1,935 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ für VEP2 um $0,43 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ und $0,573 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ höher als die Strahlungs-Wärmeleitfähigkeiten des

Anpassungsmodells, bei welchem die gemäß Kapitel 6.6 ermittelten Werte der dichtespezifischen Extinktionskoeffizienten eingesetzt werden.

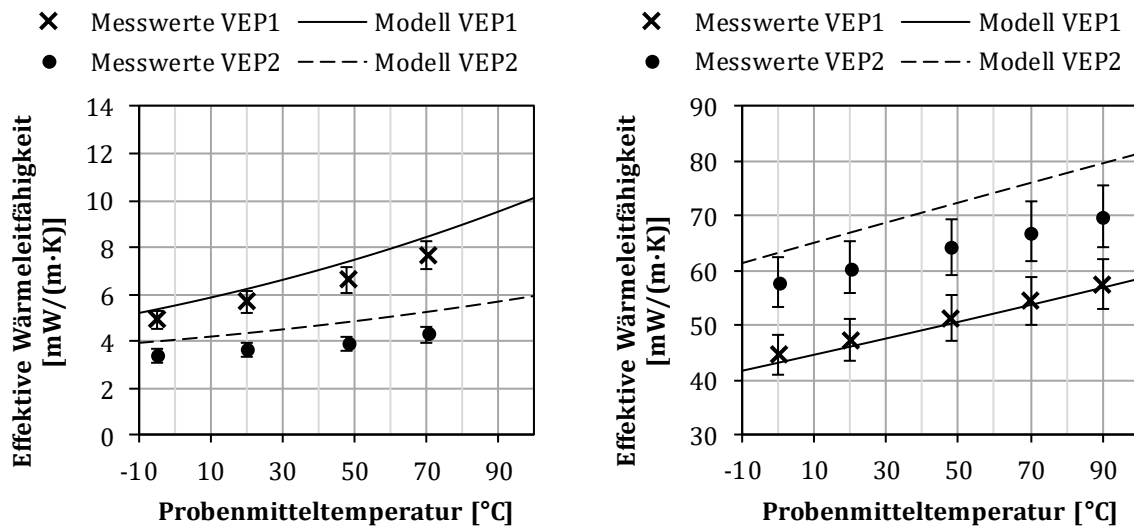


Abbildung 10-8: Validierung des vollständig prädiktiven Modells der effektiven Wärmeleitfähigkeit anhand der Messwerte von VEP1 und VEP2 über der Probenmitteltemperatur. Links: bei einem Luftdruck von $(0,02 \pm 0,005)$ mbar; rechts: bei Atmosphärendruck von (960 ± 20) mbar

Die Festkörper-Wärmeleitfähigkeit des Modells von VEP1 stimmt mit $2,210 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ hingegen sehr gut mit dem gemäß Kapitel 6.6 bestimmten Wert von $2,205 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ überein. Bei VEP2 übersteigt die Festkörper-Wärmeleitfähigkeit des Modells mit $2,784 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ den gemäß Kapitel 6.6 bestimmten Wert von $2,498 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ um $0,286 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$, was ebenfalls zur Überbestimmung des Modells beiträgt. Die Summe aus Luft- und Kopplungseffekt-Wärmeleitfähigkeit liegt bei Luftdrücken $\leq 0,025$ mbar für VEP1 bei $\leq 0,184 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ und für VEP2 bei $\leq 0,078 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ für alle gemessenen Probenmitteltemperaturen.

Bei Betrachtung von Abbildung 10-7 fällt auf, dass die effektive Wärmeleitfähigkeit des Modells von VEP1 bereits bei niedrigeren Luftdrücken ansteigt als die Messwerte. Dies ist auf eine starke Überbestimmung des mittleren Durchmessers der Kornzwischenraum-Poren zurückzuführen, der im vollständig prädiktiven Modell bei $114 \mu\text{m}$ liegt, was den aus der Anpassung der Messwerte gemäß Kapitel 6.5 ermittelte Wert von $42 \mu\text{m}$ um den Faktor 2,7 übersteigt. Die Überbestimmung der Kornzwischenraum-Porengröße resultiert aus der starken Überbestimmung der Korndichte, die in Gleichung (6-6) zur prädiktiven Bestimmung der Kornzwischenraum-Porengröße eingeht.

Dass die Werte des vollständig prädiktiven Modells trotz einer Überbestimmung der Wärmestrahlung leicht unterhalb der Messwerte von VEP1 bei Atmosphärendruck liegen, ist auf eine im Vergleich zum Anpassungsmodell geringere Kopplungseffekt-Wärmeleitfähigkeit zurückzuführen. Diese liegt mit $16,51 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ um $1,5 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ niedriger als die des Anpassungsmodells mit $18,01 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$. Der oben genannte Unterschied des mittleren Durchmessers der Kornzwischenraum-Poren zwischen Modell und Messwerten von VEP1 ist bei Atmosphärendruck vernachlässigbar, da sich die Luft bei diesem Luftdruck bereits annähernd im Bereich der

Kontinuumsströmung befindet. Dies zeigt sich am geringen Unterschied zwischen den Messwerten bei (800 ± 2) mbar und Atmosphärendruck. Im Bereich der Kontinuumsströmung ist die Luft-Wärmeleitfähigkeit unabhängig vom Abstand der die Luft einschließenden Wände.

Bei VEP2 macht sich in Abbildung 10-7 für Luftdrücke > 1 mbar eine zunehmende Überhöhung des Modells gegenüber den Messwerten bemerkbar. Diese ist auf eine Überbewertung des Kopplungseffekts zurückzuführen, die neben Modellungenauigkeiten auf einen seitens des Herstellers zu gering bewerteten mittleren Korndurchmesser zurückzuführen sein könnte⁶. Je geringer der mittlere Korndurchmesser, desto stärker ist die Sensitivität des Kopplungseffekt-Modells bzgl. dieser Größe. Dieser Zusammenhang wird auch in der Sensitivitätsanalyse im nachfolgenden Kapitel 10.1.7 gezeigt. Die Kopplungseffekt-Wärmeleitfähigkeit des vollständig prädiktiven Modells ist bei Atmosphärendruck für VEP2 mit $42,15 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ um $6,91 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ höher als die des Anpassungsmodells mit $35,24 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$.

Wie bei GEP und FEP, macht sich auch bei VEP1 und VEP2 eine leicht überhöhte Steigung des Verlaufs der effektiven Wärmeleitfähigkeit über der Probenmitteltemperatur bei Atmosphärendruck bemerkbar, siehe Abbildung 10-8 rechts. Dies kann, entsprechend dem vorangegangenen Kapitel 10.1.5, auf das Modell des Kopplungseffekts zurückgeführt werden. Auch hier ist dieser Effekt ausgeprägter bei dem feinkörnigeren VEP2, welches bei Atmosphärendruck einen höheren Kopplungseffekt besitzt als VEP1, wodurch dieser Zusammenhang bestätigt wird.

Die betragsmäßig größte absolute Abweichung des Modells zu den Messwerten von VEP1 bei einer Probenmitteltemperatur von 48 °C ist bei einem Luftdruck von 10 mbar mit $6,89 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ zu verzeichnen und die betragsmäßig größte relative Abweichung bei 1 mbar mit 40,6 %, bezogen auf den Messwert. Die betragsmäßige mittlere relative Abweichung des Modells zu den Messwerten von VEP1 beträgt 13,4 %. Bei VEP2 und einer Probenmitteltemperatur von 48 °C liegt die betragsmäßig größte absolute Abweichung bei einem Luftdruck von (800 ± 2) mbar mit $7,89 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ vor und die betragsmäßig größte relative Abweichung bei 0,008 mbar mit 23,1 %, bezogen auf den Messwert. Die betragsmäßige mittlere relative Abweichung des Modells zu den Messwerten von VEP2 beträgt 13,9 %.

Bei einem Luftdruck von $(0,02 \pm 0,005)$ mbar liegt die betragsmäßig größte absolute Abweichung des Modells zu den Messwerten von VEP1 bei einer Probenmitteltemperatur von 70 °C mit $0,77 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ vor und die betragsmäßig größte relative Abweichung bei einer Probenmitteltemperatur von 48 °C mit 11,2 %, bezogen auf den Messwert. Die betragsmäßige mittlere relative Abweichung des Modells zu den Messwerten von VEP1 beträgt hier 9,9 %. Das Modell von VEP2 verzeichnet beim gleichen Luftdruck die betragsmäßig größte absolute Abweichung zu den Messwerten ebenfalls bei einer Probenmitteltemperatur von 70 °C mit $0,95 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ und die betragsmäßig größte relative Abweichung bei einer Probenmitteltemperatur von 48 °C mit

⁶ Bei den Herstellerangaben handelt es sich oft um charakteristische Werte von anderen als den jeweils ausgelieferten Chargen.

22,9 %, bezogen auf den Messwert. Die betragsmäßige mittlere relative Abweichung des Modells zu den Messwerten von VEP2 beträgt bei diesem Luftdruck 20,4 %.

Bei Atmosphärendruck verzeichnet das Modell bei VEP1 seine betragsmäßig größte absolute und relative Abweichung bei einer Probenmitteltemperatur von 0 °C mit 1,42 mW/(m·K) und 3,2 %, bezogen auf den Messwert, während die betragsmäßige mittlere relative Abweichung des Modells zu den Messwerten von VEP1 hier 1,9 % beträgt. Das Modell von VEP2 weist bei Atmosphärendruck die betragsmäßig größte absolute Abweichung zu den Messwerten bei einer Probenmitteltemperatur von 90 °C mit 9,75 mW/(m·K) auf und die betragsmäßig größte relative Abweichung bei der gleichen Probenmitteltemperatur mit 14 %, bezogen auf den Messwert. Die betragsmäßige mittlere relative Abweichung des Modells zu den Messwerten von VEP2 beträgt bei Atmosphärendruck 7,7 %

Für eine hohe Genauigkeit der Vorhersage der effektiven Wärmeleitfähigkeit im Luftdruckbereich < 1 mbar, ist vor allem eine möglichst genaue Kenntnis des dichtespezifischen Extinktionskoeffizienten entscheidend. Die Bestimmung dieser Größe kann beispielsweise durch eine sogenannte Fourier-Transformations-Infrarotspektroskopie (FTIR-Analyse) erfolgen, die allerdings für die expandierten Perlite kein Standardverfahren ist und demnach ebenfalls mit hohen Messunsicherheiten und Kosten verbunden ist. Aber auch der verwendete Mittelwert reicht meist aus für eine gute Vorhersage.

Für den Luftdruckbereich zwischen 0,1 mbar und 100 mbar ist vor allem eine genaue Kenntnis der mittleren Korndichte entscheidend für eine genaue Vorhersage der effektiven Wärmeleitfähigkeit expandierter Perlite. Die mittlere Korndichte wird für die Berechnung der mittleren Kornzwischenraum-Porengröße verwendet, die in diesem Luftdruckbereich einen großen Einfluss hat. Es zeigt sich am Beispiel von VEP1, dass expandierte Perlite mit weit geöffneten Poren, wodurch es beispielsweise bei Kornzerstörungen und den entsprechenden Kornfragmenten kommen kann, weniger geeignet sind für die Bestimmung der mittleren Korndichte durch Flüssigkeitsverdrängung gemäß Kapitel 6.2. Die Abweichungen der Kornzwischenraum-Porengröße aus der Modellanpassung und aus der Berechnung gemäß Gleichung (6-6) ist jedoch für alle anderen in der vorliegenden Arbeit untersuchten ungemahlene expandierte Perlite deutlich geringer als für VEP1, siehe Tabelle 6-4. Dies deutet darauf hin, dass VEP1 diesbezüglich nicht repräsentativ ist. Die Auswahl von VEP1 als Validierungsprobe half allerdings, auf diese Problematik aufmerksam zu machen.

Insbesondere im Luftdruckbereich ≥ 10 mbar und für feinkörnige expandierte Perlite ist vor allem eine genaue Kenntnis des volumengewichtet gemittelten Korndurchmessers wichtig für eine hohe Genauigkeit der Vorhersage des Modells. In diesem Bereich hat der Kopplungseffekt einen großen Einfluss, dessen Modell stark vom volumengewichtet gemittelten Korndurchmesser abhängt.

Mit dem im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelten Gesamtmodell der effektiven Wärmeleitfähigkeit ist insgesamt eine gute Vorhersage und Übereinstimmung mit Messwerten

erreichbar. Insbesondere vor dem Hintergrund, dass es sich um ein vollständig prädiktives Modell handelt, das mit nur drei vergleichsweise einfach zu messenden Größen auskommt: der Dichte der Schüttung, der mittleren Korndichte und dem volumengewichtet gemittelten Korndurchmesser. Mit einem höheren Messaufwand, z. B. durch eine Eigenmessung des volumengewichtet gemittelten Korndurchmessers anhand der konkreten Probe anstelle der Verwendung von ggf. gemittelten Herstellerdaten, lässt sich die Genauigkeit der Vorhersage weiter erhöhen.

Um genauer zu bewerten, welche Größen das Modell am stärksten beeinflussen, werden im folgenden Kapitel die Ergebnisse einer Sensitivitätsanalyse gezeigt. In Anhang A7 werden die Übereinstimmungen des vollständig prädiktiven Modells mit Messwerten der für die Modellierung verwendeten expandierten Perlite gezeigt.

10.1.7 Sensitivitätsanalyse

In der Sensitivitätsanalyse wird der Einfluss von Änderungen der wichtigsten Parameter auf die Änderung der modellierten effektiven Wärmeleitfähigkeit betrachtet. Dadurch kann zum einen die Robustheit des Modells bewertet werden. Zum anderen kann die notwendige Messgenauigkeit und Präzision bzgl. der Parameterbestimmung ermittelt werden um treffende Vorhersagen der effektiven Wärmeleitfähigkeit zu erhalten. Die betrachteten Parameter sind:

- der dichtespezifische Extinktionskoeffizient e_R ,
- die mittlere Korndichte ρ_K ,
- der volumengewichtet gemittelte Korndurchmesser $d_{K,vm}$,
- der mittlere Durchmesser der Kornzwischenraum-Poren $d_{p,ZK}$.

Die Sensitivitätsanalyse wurde auf Basis des Anpassungsmodells von GEP und FEP erstellt, siehe Kapitel 10.1.5. Die oben beschriebenen Parameter wurden jeweils vom Faktor 0,1 bis 3 variiert. Da der Einfluss aller behandelten Parameter auf die anteilige Änderung der modellierten effektiven Wärmeleitfähigkeit bei unterschiedlichen Luftdrücken unterschiedlich stark ausgeprägt ist, wurden Luftdrücke von 0,01 mbar, 1 mbar und 1000 mbar betrachtet. Als Probenmittlertemperatur wurde jeweils 48 °C gewählt. Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse sind in Abbildung 10-9, Abbildung 10-10 und Abbildung 10-11 dargestellt.

Eine maximale Abweichung der modellierten effektiven Wärmeleitfähigkeit von $\pm 20\%$ vom Messwert kann für das vollständig prädiktive Modell, in Anbetracht der wenigen und einfach zu messenden benötigten Stoffgrößen, als sehr gut bewertet werden. Daher sind die Grenzen dieses Bereichs als gepunktete rote Linien in den jeweiligen Diagrammen dargestellt. Die mittlere Korndichte ρ_K ist für GEP erst ab einem Faktor der Änderung des Parameters von $\geq 0,36$ und für FEP von $\geq 0,62$ dargestellt. Bei kleineren mittleren Korndichten würde diese die Dichte der jeweiligen Probe unterschreiten, was zum physikalisch unmöglichen Zustand eines negativen anteiligen Kornzwischenraum-Volumenanteils $f_{Gas,ZK}$ führen würde.

Bei einem Luftdruck von 0,01 mbar hat die Änderung des dichtespezifischen Extinktionskoeffizienten e_R den dominierenden Einfluss, siehe Abbildung 10-9. Bei diesem Luftdruck dominieren die Wärmestrahlung und Festkörperwärmeleitung den Gesamtwärmestrom durch GEP und FEP. Die mittlere Korndichte ρ_K , der volumengewichtet gemittelte Korndurchmesser $d_{K,vm}$ und der mittlere Durchmesser der Kornzwischenraum-Poren $d_{p,ZK}$ haben im Modell hingegen den stärksten Einfluss auf die Luftwärmeleitung und den Kopplungseffekt. Dementsprechend ist der Einfluss dieser Parameter auf die Änderung der modellierten effektiven Wärmeleitfähigkeit mit maximal dem Faktor 1,036 bzw. +3,6 % für GEP und maximal dem Faktor 1,008 bzw. +0,8 % für FEP, jeweils bei einer Änderung der mittlere Korndichte ρ_K um den Faktor 3, sehr gering. Um eine maximale Abweichung der effektiven Wärmeleitfähigkeit von $\pm 20\%$ zu gewährleisten, muss der gewählte oder gemessene dichtespezifische Extinktionskoeffizient e_R für GEP im Bereich vom Faktor 0,79 bis 1,36 des anhand der Messwerte gemäß Kapitel 6.6 bestimmten Wertes liegen. Für FEP liegt dieser Bereich zwischen dem Faktor 0,66 und 2,16. Je kleiner dieser Bereich, desto sensibler ist das Modell bzgl. dieses Parameters. GEP ist demnach, aufgrund der geringeren Dichte von 73 kg/m^3 , sensibler auf eine Abweichung des dichtespezifischen Extinktionskoeffizienten e_R als FEP mit einer Dichte von 182 kg/m^3 . Alle Bereiche der Faktoren der Änderung der Parameter, bei welchen sich eine betragsmäßige Abweichung der modellierten effektiven Wärmeleitfähigkeit von $\leq 20\%$ einstellt und die sich im dargestellten Bereich zwischen dem Faktor 0,1 und 3 befinden, sind in Tabelle 10-3 für GEP und in Tabelle 10-4 für FEP aufgeführt. Grenzwerte, die sich außerhalb des dargestellten Bereichs vom Faktor 0,1 bis 3 befinden, werden in diesen Tabellen durch waagerechte Striche gekennzeichnet.

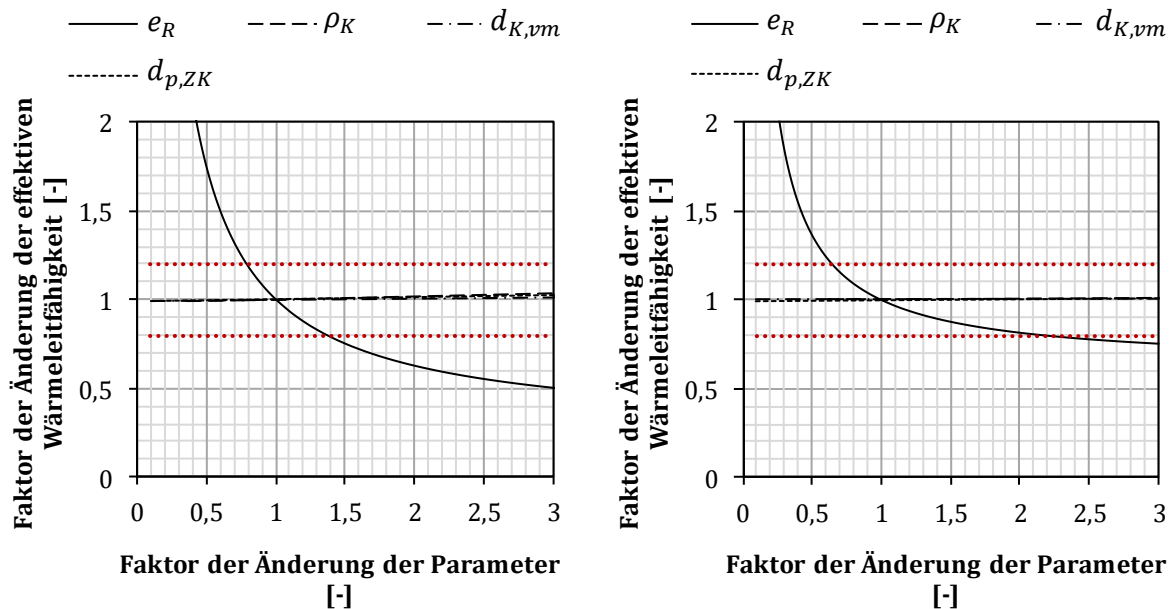


Abbildung 10-9: Sensitivitätsanalyse des Gesamtmodells der effektiven Wärmeleitfähigkeit auf Basis der Daten von GEP (links) und FEP (rechts) bei einem Luftdruck von 0,01 mbar. Die roten gepunkteten Linien markieren eine Änderung der effektiven Wärmeleitfähigkeit von $\pm 20\%$.

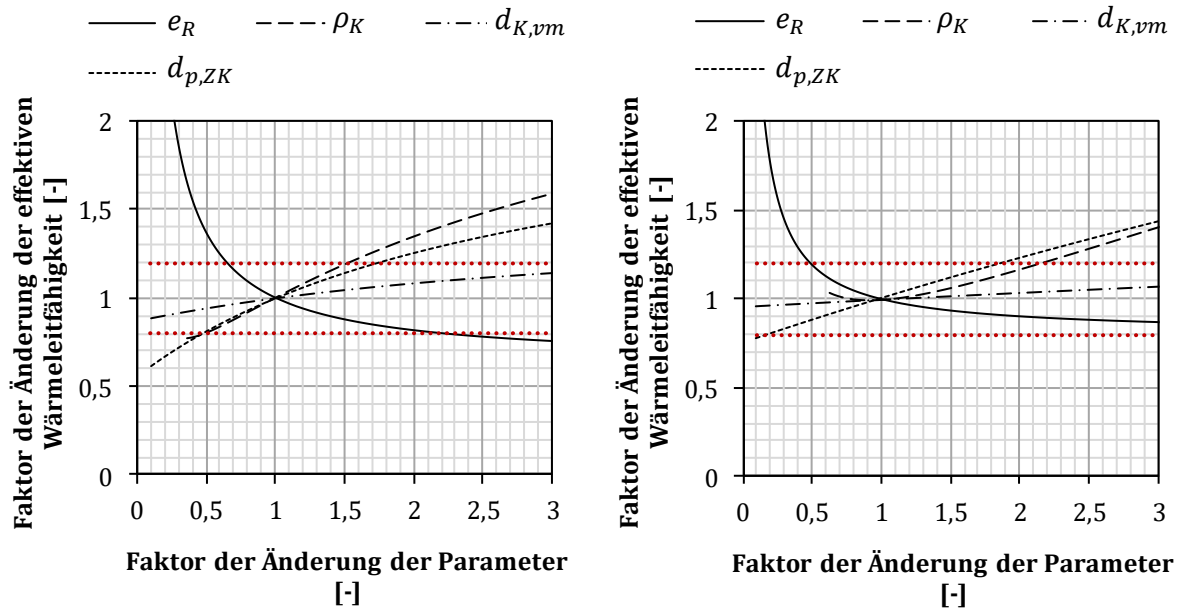


Abbildung 10-10: Sensitivitätsanalyse des Gesamtmodells der effektiven Wärmeleitfähigkeit auf Basis der Daten von GEP (links) und FEP (rechts) bei einem Luftdruck von 1 mbar. Die roten gepunkteten Linien markieren eine Änderung der effektiven Wärmeleitfähigkeit von $\pm 20\%$.

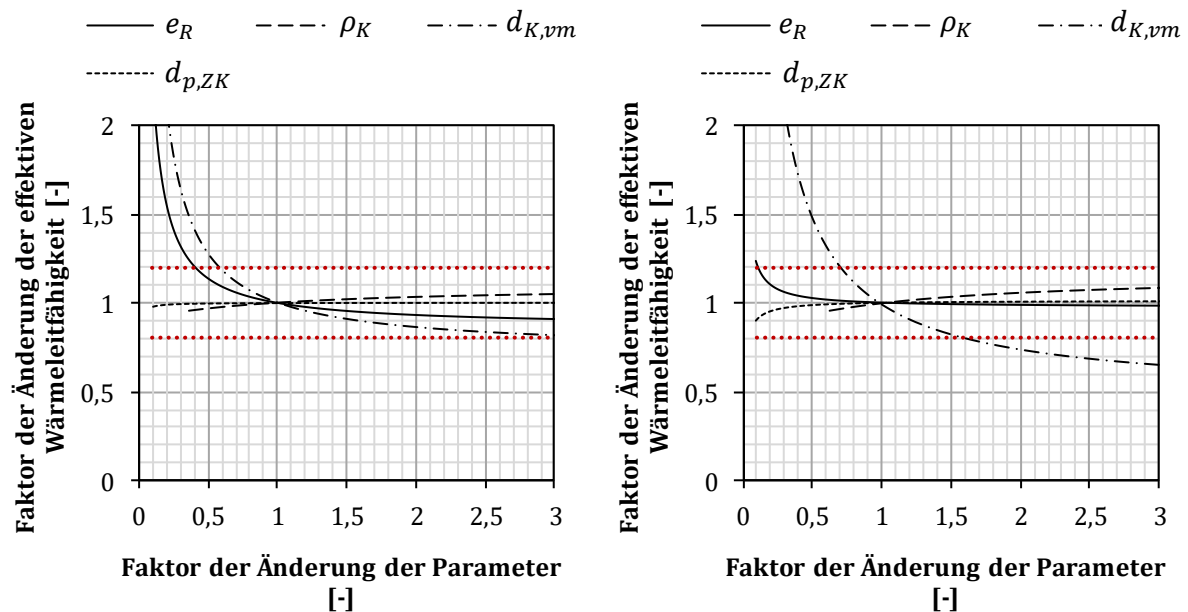


Abbildung 10-11: Sensitivitätsanalyse des Gesamtmodells der effektiven Wärmeleitfähigkeit auf Basis der Daten von GEP (links) und FEP (rechts) bei einem Luftdruck von 1000 mbar. Die roten gepunkteten Linien markieren eine Änderung der effektiven Wärmeleitfähigkeit von $\pm 20\%$.

Mit steigendem Luftdruck nimmt der Einfluss einer Abweichung des dichtespezifischen Extinktionskoeffizienten e_R auf die relative Änderung der modellierten effektiven Wärmeleitfähigkeit ab, da die Luftwärmeleitung und der Kopplungseffekt an Einfluss gewinnen. Bei einem Luftdruck von 1 mbar hat eine Abweichung der mittleren Korndichte ρ_K einen hohen Einfluss auf die modellierte effektive Wärmeleitfähigkeit, siehe Abbildung 10-10 sowie Tabelle 10-3 und

Tabelle 10-4. Wie bereits in Kapitel 10.1.6 diskutiert, hat die mittlere Korndichte großen Einfluss auf die Berechnung des mittleren Durchmessers der Kornzwischenraum-Poren, die bei einem Luftdruck von 1 mbar einen sehr großen relativen Einfluss auf die Luftwärmeleitung und den Kopplungseffekt und somit auf die effektive Wärmeleitfähigkeit besitzt. Dies gilt insbesondere für vergleichsweise grobkörnige expandierte Perlite wie GEP und VEP1, bei welchen der Anteil der Luftwärmeleitung und des Kopplungseffekts bei einem Luftdruck von 1 mbar höher ist als für feinkörnigere. Dementsprechend ist auch der Einfluss einer Abweichung des mittleren Durchmessers der Kornzwischenraum-Poren $d_{p,ZK}$ ähnlich stark wie der Einfluss der mittleren Korndichte. Und entsprechend ist der Einfluss beider Parameter bei FEP geringer als bei GEP. Auch der volumengewichtet gemittelte Korndurchmesser $d_{K,vm}$ geht in die Berechnung des mittleren Durchmessers der Kornzwischenraum-Poren ein und wirkt sich bei einem Luftdruck von 1 mbar bei einer Erhöhung steigend auf die modellierte effektive Wärmeleitfähigkeit aus.

Tabelle 10-3: Bereiche der Faktoren der Änderung der Parameter für eine betragsmäßige Änderung der modellierten effektiven Wärmeleitfähigkeit von $\leq 20\%$ bei GEP

| Luftdruck | 0,01 mbar | | 1 mbar | | 1000 mbar | |
|---|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|
| | $\geq -20\%$ | $\leq 20\%$ | $\geq -20\%$ | $\leq 20\%$ | $\geq -20\%$ | $\leq 20\%$ |
| Änderung der modellierten eff. Wärmeleitfähigkeit | $\geq -20\%$ | $\leq 20\%$ | $\geq -20\%$ | $\leq 20\%$ | $\geq -20\%$ | $\leq 20\%$ |
| Faktor Änderung e_R | $\leq 1,36$ | $\geq 0,79$ | $\leq 2,19$ | $\geq 0,65$ | - | $\geq 0,41$ |
| Faktor Änderung ρ_K | - | - | $\geq 0,5$ | $\leq 1,53$ | - | - |
| Faktor Änderung $d_{K,vm}$ | - | - | - | - | - | $\geq 0,58$ |
| Faktor Änderung $d_{p,ZK}$ | - | - | $\geq 0,47$ | $\leq 1,74$ | - | - |

Tabelle 10-4: Bereiche der Faktoren der Änderung der Parameter für eine betragsmäßige Änderung der modellierten effektiven Wärmeleitfähigkeit von $\leq 20\%$ bei FEP

| Luftdruck | 0,01 mbar | | 1 mbar | | 1000 mbar | |
|---|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|
| | $\geq -20\%$ | $\leq 20\%$ | $\geq -20\%$ | $\leq 20\%$ | $\geq -20\%$ | $\leq 20\%$ |
| Änderung der modellierten eff. Wärmeleitfähigkeit | $\geq -20\%$ | $\leq 20\%$ | $\geq -20\%$ | $\leq 20\%$ | $\geq -20\%$ | $\leq 20\%$ |
| Faktor Änderung e_R | $\leq 2,16$ | $\geq 0,66$ | - | $\geq 0,5$ | - | $\geq 0,12$ |
| Faktor Änderung ρ_K | - | - | - | $\leq 2,12$ | - | - |
| Faktor Änderung $d_{K,vm}$ | - | - | - | - | $\leq 1,64$ | $\geq 0,72$ |
| Faktor Änderung $d_{p,ZK}$ | - | - | $\geq 0,2$ | $\leq 1,87$ | - | - |

Bei einem Luftdruck von 1000 mbar hingegen hat der mittlere Durchmesser der Kornzwischenraum-Poren $d_{p,ZK}$ auf die effektive Wärmeleitfähigkeit der betrachteten expandierten Perlite nur geringen Einfluss, siehe Abbildung 10-11. Hier hat der Kopplungseffekt großen Anteil am Gesamtwärmestrom durch die expandierten Perlite. Der Kopplungseffekt – und damit auch die effektive Wärmeleitfähigkeit bei diesem Luftdruck – ist wiederum sehr sensitiv bzgl. des volumengewichtet

gemittelten Korndurchmessers $d_{K,vm}$. Daher ändert sich bei der Steigung der entsprechenden Kurven in Abbildung 10-11 das Vorzeichen gegenüber Abbildung 10-9 und Abbildung 10-10. Je kleiner der volumengewichtet gemittelte Korndurchmesser, desto größer der Kopplungseffekt. Auch die mittlere Korndichte ρ_K geht, über die Berechnung der Korn-Wärmeleitfähigkeit, in das Modell des Kopplungseffekts mit ein und erhöht bei Steigerung demnach die modellierte effektive Wärmeleitfähigkeit; allerdings in vergleichsweise geringem Maß. Da FEP, aufgrund des geringeren volumengewichtet gemittelten Korndurchmessers $d_{K,vm}$, einen höheren Kopplungseffekt aufweist, ist die Sensitivität des Modells bei FEP bzgl. dieses Parameters und der mittleren Korndichte ρ_K höher als bei GEP.

10.1.8 Modellstudien

Neben der Möglichkeit mit dem vollständig prädiktiven Modell Vorhersagen der effektiven Wärmeleitfähigkeit von expandierten Perliten allein anhand von einfach zu messenden Stoffgrößen zu machen, lässt sich auch zwischen gemessenen Werten der effektiven Wärmeleitfähigkeit interpolieren und auch über Messwerte hinaus extrapolieren. Eine höhere Genauigkeit wird dabei durch das Anpassungsmodell erreicht, für welches Parameter des Modells aus den Messwerten der effektiven Wärmeleitfähigkeit bestimmt werden können, siehe Kapitel 10.1.5. In Abbildung 10-12 sind beispielhaft für GEP und FEP die effektiven Wärmeleitfähigkeiten anhand des Anpassungsmodells für unterschiedliche Probenmitteltemperaturen über dem Luftdruck aufgetragen.

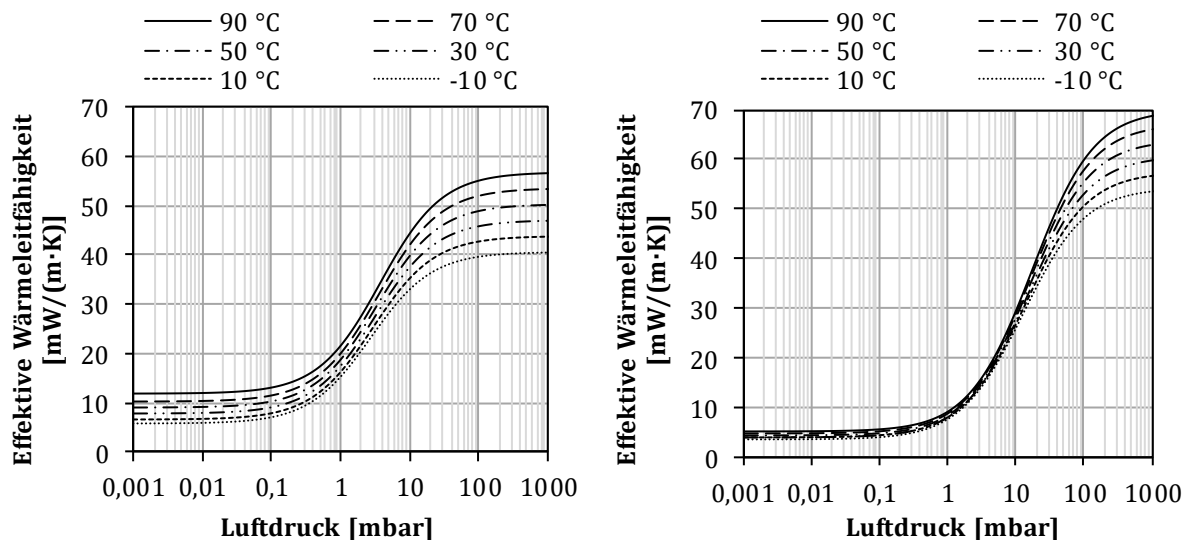


Abbildung 10-12: Verlauf der effektiven Wärmeleitfähigkeit von GEP (links) und FEP (rechts) über dem Luftdruck für unterschiedliche Probenmitteltemperaturen, berechnet mit dem Anpassungsmodell

Zudem lässt sich anhand des Modells vorhersagen, bei welcher Dichte des expandierten Perlits, abhängig von der Probenmitteltemperatur und bei sehr geringen Luftdrücken die geringste effektive Wärmeleitfähigkeit erreicht werden kann. Das Ergebnis dieser Studien ist in

Abbildung 10-13 für drei verschiedene dichtetpezifische Extinktionskoeffizienten dargestellt. Die in der vorliegenden Arbeit gemessenen und in der Literatur angegebenen dichtetpezifischen Extinktionskoeffizienten befinden sich im Bereich zwischen $20 \text{ m}^2/\text{kg}$ und $40 \text{ m}^2/\text{kg}$. Daher wurden diese Grenzwerte verwendet. Zudem wurde der Mittelwert aus den in der vorliegenden Arbeit untersuchten expandierten Perliten von $26,8 \text{ m}^2/\text{kg}$ verwendet.

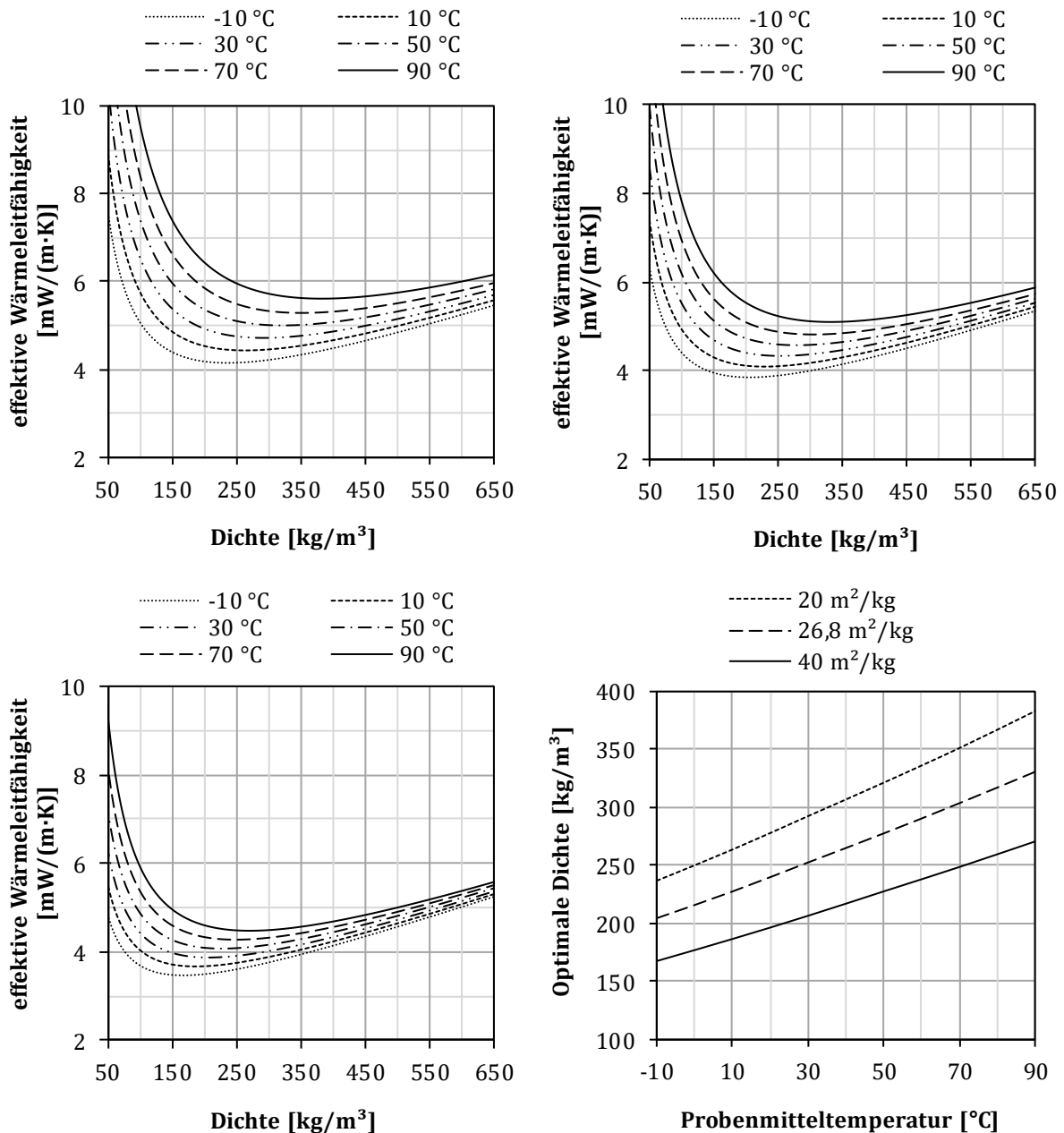


Abbildung 10-13: Studie zur Bestimmung der optimalen Dichte expandierter Perlite zur Erreichung der minimalen effektiven Wärmeleitfähigkeit bei sehr geringen Luftdrücken und bei unterschiedlichen Probenmitteltemperaturen, berechnet mit dem Anpassungsmodell. Dichtetpezifische Extinktionskoeffizienten: $20 \text{ m}^2/\text{kg}$ (oben links); $26,8 \text{ m}^2/\text{kg}$ (oben rechts); $40 \text{ m}^2/\text{kg}$ (unten links). Unten rechts ist die optimale Dichte über der Probenmitteltemperatur für die in der Legende genannten dichtetpezifischen Extinktionskoeffizienten aufgetragen.

Die effektive Wärmeleitfähigkeit in Abbildung 10-13 setzt sich lediglich aus der Festkörper- und Strahlungs-Wärmeleitfähigkeit zusammen. Eine Erhöhung der Dichte erhöht die Festkörperwärmeleitung und senkt die Wärmestrahlung. Demnach existiert ein Minimum der effektiven Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit von der Dichte. Die Wärmestrahlung steigt mit der Probenmitteltemperatur. Daher steigt die optimale Dichte, bei welcher die effektive Wärmeleitfähigkeit minimal wird, mit steigender Probenmitteltemperatur. Da die Wärmestrahlung mit steigendem Extinktionskoeffizienten sinkt, steigt die optimale Dichte mit sinkendem dichtespezifischen Extinktionskoeffizienten. Rechts unten in Abbildung 10-13 ist die optimale Dichte als Funktion von der Probenmitteltemperatur für die oben genannten dichtespezifischen Extinktionskoeffizienten aufgetragen. Daraus lässt sich für den Hersteller und Anwender eines vakuumwärmedämmten Warmwasserspeichers ablesen, welcher expandierte Perlit für die jeweilige Anwendung thermisch optimal ist, wenn ein hinreichend tiefes Vakuum erreicht werden kann. Wenn beispielsweise eine relevante Mitteltemperatur der Wärmedämmung von 50 °C erwartet wird, dann wäre ein expandierter Perlit mit einer Dichte zwischen 227 kg/m³ und 321 kg/m³ thermisch optimal.

10.2 Pyrogene Kieselsäure

Aufgrund seiner geringen Infrarot-Extinktion wird pyrogene Kieselsäure nicht als Reinstoff für Vakuumwärmedämmungen von Warmwasserspeichern in Erwägung gezogen. In der vorliegenden Arbeit werden jedoch beispielhaft Mischungen von HPKS mit GEP untersucht. Für die Modellierung dieser Mischungen wird ein Einzelmodell der effektiven Wärmeleitfähigkeit von HPKS benötigt. Aufgrund der oben beschriebenen Einschränkungen wurde auf eine systematische Untersuchung unterschiedlicher pyrogener Kieselsäuren verzichtet und kein vollständig prädiktives Modell für beliebige andere pyrogene Kieselsäuren erstellt. Im Folgenden wird demnach ein Modell vorgestellt, welches sich möglichst gut an die Messwerte der effektiven Wärmeleitfähigkeit von HPKS anpasst, sich jedoch auch für prädiktive Inter- und Extrapolationen für unterschiedliche Mitteltemperaturen und Luftdrücke eignet. Aufgrund der großen Ähnlichkeit der Stoffe und ihrer effektiven Wärmeleitfähigkeiten, wird das Modell auch für reine UPKS als geeignet angenommen.

10.2.1 Modellierung der Luftwärmeleitung

Es stellte sich heraus, dass das Modell der Gas-Wärmeleitfähigkeit von KAGANER (siehe Gleichung (3-2)) keine treffende Annäherung an die Messwerte von HPKS bietet. Daher wurde das in Gleichung (3-8) aufgeführte Anpassungsmodell von ZENG verwendet, welches für die in der vorliegenden Arbeit verwendeten pyrogenen Kieselsäuren in Luft in der Zahlenwertgleichung (10-9) dargestellt wird.

$$\lambda_{Luft,PKS} = \frac{\lambda_{Luft,Kont}}{1 + C_{Luft,PKS,1}/(d_{p,PKS} [\mu m] \cdot (p_{Luft} [Pa])^{C_{Luft,PKS,2}})} \quad (10-9)$$

Mit:

$$C_{Luft,PKS,1} = 1650$$

$$C_{Luft,PKS,2} = 0,7$$

Die oben definierten Parameter des Modells $C_{Luft,PKS,1}$ und $C_{Luft,PKS,2}$ wurden durch Modell-anpassung an die Messwerte der Summe der Luft-Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{Luft,PKS}$ [W/(m·K)] und der Kopplungseffekt-Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{Kpl,PKS}$ [W/(m·K)] von HPKS bei einer Probenmitteltemperatur von 48 °C bestimmt, vgl. Kapitel 6.5. Dabei wurde ebenfalls der Skalierungsfaktor für das Modell des Kopplungseffekts $F_{Kpl,PKS}$ [-] bestimmt, siehe Kapitel 10.2.3. Für den mittleren Porendurchmesser $d_{p,PKS}$ wurde der Wert 2 μm eingesetzt, da bei Verwendung des Luft-Wärmeleitfähigkeitsmodells von KAGANER damit die beste Anpassung an die Messwerte gelang. Eine prädiktive Ermittlung des mittleren Porendurchmessers $d_{p,PKS}$ in Abhängigkeit von der Dichte ist mit Gleichung (10-18) möglich. Die Kontinuums-Wärmeleitfähigkeit von Luft $\lambda_{Luft,Kont}$ wird gemäß Gleichung (8-1) bestimmt.

Die Anpassung des Modells der Luft- und Kopplungseffekt-Wärmeleitfähigkeit an die Messwerte ist in Abbildung 10-14 links gezeigt für das Luft-Wärmeleitfähigkeitsmodell von KAGANER und rechts für das Luft-Wärmeleitfähigkeitsmodell von ZENG. Zur Berechnung des Kopplungseffekts wurde das in Kapitel 10.2.3 beschriebene Modell verwendet, wobei die beste Anpassung im Fall des Luft-Wärmeleitfähigkeitsmodells von KAGANER bei einer Kopplungseffekt-Wärmeleitfähigkeit von 0 W/(m·K) erreicht und demnach verwendet wurde.

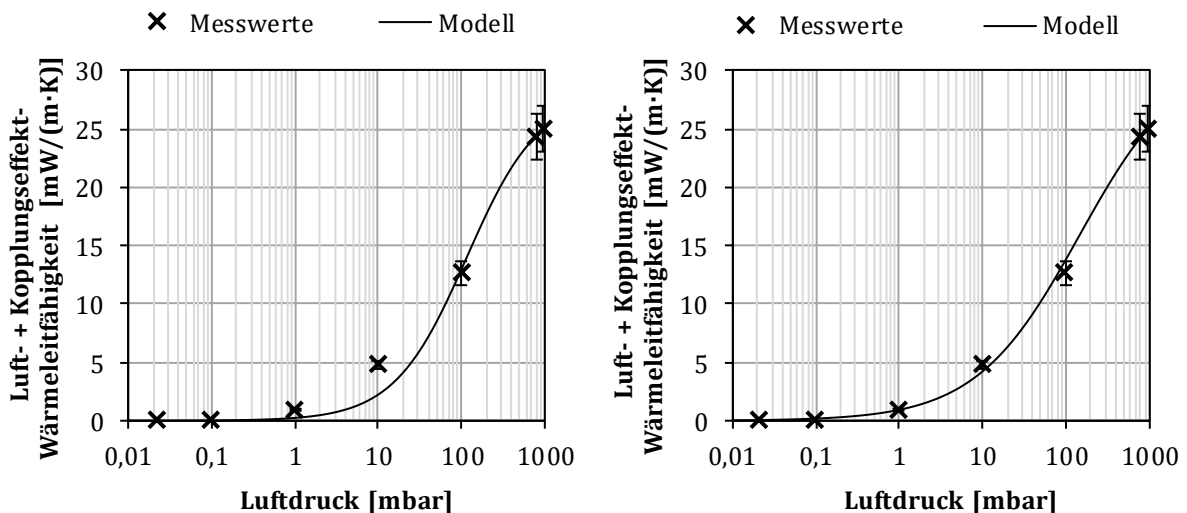


Abbildung 10-14: Modell und Messwerte der Summe aus Luft- und Kopplungseffekt-Wärmeleitfähigkeit von HPKS. Links: mit Luft-Wärmeleitfähigkeitsmodell von KAGANER, rechts: mit Luft-Wärmeleitfähigkeitsmodell von ZENG

Es ist zu erkennen, dass das Luft-Wärmeleitfähigkeitsmodell von KAGANER den flacheren Verlauf der Messwerte über dem Luftdruck nicht abbilden kann. Der flachere Verlauf der Messwerte kommt vermutlich durch eine breite Porengrößenverteilung zustande, die durch eine mittlere Porengröße nicht hinreichend berücksichtigt werden kann. Dadurch kommt es zu einer starken Unterbestimmung der Messwerte bei Luftdrücken von 1 mbar und 10 mbar. Das Luft-Wärmeleitfähigkeitsmodell von ZENG bildet den Verlauf der Messwerte hingegen deutlich treffender ab, da sich auch flachere Verläufe über dem Luftdruck einstellen lassen.

10.2.2 Modellierung der Festkörperwärmeleitung

Die Festkörper-Wärmeleitfähigkeit pyrogener Kieselsäuren $\lambda_{FK,PKS}$ [W/(m·K)] wird gemäß Gleichung (10-10) ermittelt, vgl. Kapitel 6.6, Gleichung (6-10) und Abbildung 6-5.

$$\lambda_{FK,PKS} = C_{FK,PKS,1} \cdot \rho^2 + C_{FK,PKS,2} \cdot \rho \quad (10-10)$$

Mit:

$$C_{FK,PKS,1} = 5,4856 \cdot 10^{-5} \text{ (mW/(m·K))} \cdot \text{m}^6/\text{kg}^2$$

$$C_{FK,PKS,2} = 1,2613 \cdot 10^{-2} \text{ (mW/(m·K))} \cdot \text{m}^3/\text{kg}$$

Bei der Dichte der Probe reiner HPKS von $\rho = 44 \text{ kg/m}^3$ stellt sich damit eine Festkörper-Wärmeleitfähigkeit von 0,661 mW/(m·K) ein, vgl. Kapitel 6.6 und Tabelle 6-6.

10.2.3 Modellierung des Kopplungseffekts

Die Kopplungseffekt-Wärmeleitfähigkeit für die pyrogenen Kieselsäuren $\lambda_{Kpl,PKS}$ wird gemäß des vereinfachten Modells von DEMHARTER und BEICKIRCHER aus Gleichung (3-14) berechnet, welches, angepasst für pyrogene Kieselsäuren in Luft, in Gleichung (10-11) aufgeführt ist.

$$\lambda_{Kpl,PKS} = F_{Kpl,PKS} \cdot \lambda_{Luft,PKS} \quad (10-11)$$

Der Skalierungsfaktor $F_{Kpl,PKS}$ wird für HPKS durch Anpassung an Messwerte (vgl. Kapitel 6.5, 10.2.1 und Abbildung 10-14 rechts) zu 0,13 bestimmt.

10.2.4 Modellierung der Wärmestrahlung

Die Strahlungs-Wärmeleitfähigkeit pyrogener Kieselsäuren $\lambda_{Str,PKS}$ [W/(m·K)] wird mit dem ROSSELAND'schen Diffusionsansatz gemäß Gleichung (3-15) modelliert, die nachfolgend in Gleichung (10-12) für pyrogene Kieselsäuren dargestellt ist.

$$\lambda_{Str,PKS} = \frac{16 \cdot \sigma}{3 \cdot e_{R,PKS}(T_{Probe}) \cdot \rho} \cdot T_{Probe}^3 \quad (10-12)$$

Für die Bestimmung des dichtespezifischen, temperaturabhängigen Extinktionskoeffizienten $e_{R,PKS}(T_{Probe})$ wird Gleichung (6-11) verwendet.

10.2.5 Gesamtmodell der effektiven Wärmeleitfähigkeit

Das Gesamtmodell der effektiven Wärmeleitfähigkeit für pyrogene Kieselsäure $\lambda_{eff,PKS}$ [W/(m·K)] ist in Gleichung (10-13) definiert.

$$\lambda_{eff,PKS} = \lambda_{Luft,PKS} + \lambda_{FK,PKS} + \lambda_{Kpl,PKS} + \lambda_{Str,PKS} \quad (10-13)$$

Es handelt sich hierbei nicht um ein vollständig prädiktives Modell bzgl. beliebiger Arten pyrogener Kieselsäure. Vielmehr dient es als Basis für die in Kapitel 10.3 gezeigte Modellierung der Mischungen aus HPKS und GEP.

Übereinstimmung mit Messwerten der effektiven Wärmeleitfähigkeit von HPKS

In Abbildung 10-15 und Abbildung 10-16 wird die Übereinstimmung des Modells mit Messwerten der effektiven Wärmeleitfähigkeit von HPKS gezeigt. Zudem sind die einzelnen Wärmetransportmechanismen additiv mit dargestellt. In Abbildung 13-11 in Anhang A7 wird die Übereinstimmung des Modells mit Messwerten von UPKS gezeigt.

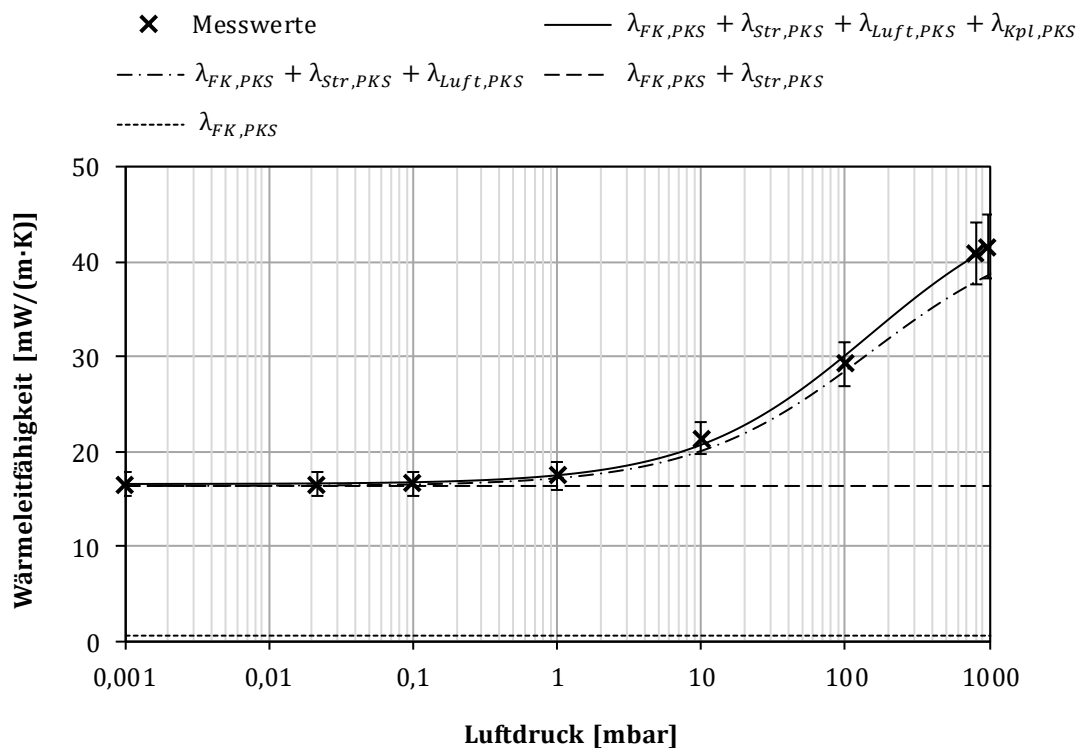


Abbildung 10-15: Prüfung der Übereinstimmung des Modells mit Messwerten der effektiven Wärmeleitfähigkeit von HPKS über dem Luftdruck bei einer Probenmitteltemperatur von 48 °C

Auch aufgrund der Anpassung des Modells an die Messwerte ist die Übereinstimmung sowohl über dem Luftdruck als auch über der Probenmitteltemperatur sehr gut. Es zeigt sich, dass die Wärmestrahlung bei Luftdrücken ≤ 10 mbar stark dominiert, was auf die geringe Extinktion zurückzuführen ist. Die Festkörper-Wärmeleitfähigkeit ist aufgrund der sehr hohen Porosität und aufgrund der stark verzweigten Struktur (siehe Abbildung 5-4) sehr gering. Aufgrund der geringen mittleren Porengröße beträgt die Luft-Wärmeleitfähigkeit bei Atmosphärendruck und

einer Probenmitteltemperatur von 48 °C lediglich 79 % der Kontinuums-Wärmeleitfähigkeit und ist damit geringer als die der expandierten Perlite. Auch der Kopplungseffekt ist bei Atmosphärendruck im Vergleich zu den expandierten Perliten gering. Dies kann, neben der geringeren Luft-Wärmeleitfähigkeit, vor allem auf die sehr geringe Festkörper-Wärmeleitfähigkeit zurückgeführt werden. Aufgrund der Anpassung des Modells an die Messwerte über drei Anpassungsparameter $C_{Luft,PKS,1}$, $C_{Luft,PKS,2}$ und $F_{Kpl,PKS}$ ist der hierdurch bestimmte Wert der Kopplungseffekt-Wärmeleitfähigkeit allerdings mit einer großen Unsicherheit verbunden.

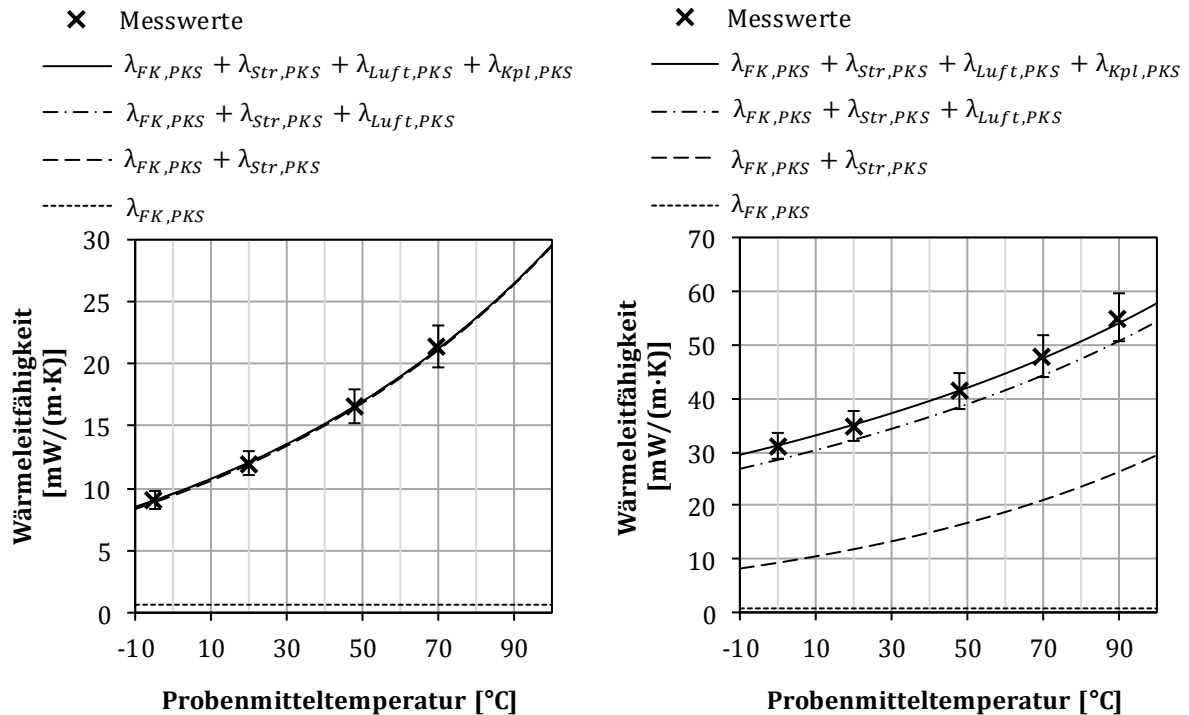


Abbildung 10-16: Prüfung der Übereinstimmung des Modells mit Messwerten der effektiven Wärmeleitfähigkeit von HPKS über der Probenmitteltemperatur. Links: bei einem Luftdruck von $(0,02 \pm 0,005)$ mbar; rechts: bei Atmosphärendruck von (960 ± 20) mbar

10.3 Mischungen aus expandiertem Perlit und pyrogener Kieselsäure

Das hier beschriebene Modell der effektiven Wärmeleitfähigkeit bezieht sich auf Mischungen aus GEP und HPKS. Unter der Voraussetzung hinreichender Dispergierung kann auch UPKS anstelle von HPKS eingesetzt werden. Das Ziel besteht darin, ein vollständig prädiktives Modell bzgl. unterschiedlicher Mischungsverhältnisse aus diesen Komponenten zu generieren. Auch das Modell der Mischungen kann für beliebige Füllgase angepasst werden. Im Folgenden wird jedoch der Fall von Luft als Füllgas betrachtet.

10.3.1 Modellierung der Luftwärmeleitung

Die Luft-Wärmeleitfähigkeit der Mischungen $\lambda_{Luft,Mix}$ [W/(m·K)] wird nach Gleichung (10-14) bestimmt.

$$\lambda_{Luft,Mix} = f_{K,GEP} \cdot \frac{\lambda_{Luft,Kont}}{1 + 2 \cdot \beta_{Luft} \cdot \frac{l_{m,Luft}}{d_{p,K,GEP}}} + f_{ZK,GEP} \cdot \lambda_{Luft,PKS} \quad (10-14)$$

Darin ist $f_{K,GEP}$ [-] der Volumenanteil der GEP-Körner, der mit Gleichung (10-15) berechnet wird.

$$f_{K,GEP} = \frac{\rho_{K,GEP}}{\rho_{GEP}} \quad (10-15)$$

$\rho_{K,GEP}$ [kg/m³] ist die mittlere Korndichte von GEP und ρ_{GEP} die Dichte von GEP, berechnet aus der Masse von GEP in der Probe m_{GEP} [kg], bezogen auf das Gesamtvolumen der Probe V_{Probe} .

Der mit $f_{K,GEP}$ multiplizierte Term entspricht dem Modell der Luft-Wärmeleitfähigkeit von KAGANER nach Gleichung (3-2), bei welcher für den gasabhängigen Faktor $\beta_{Luft} = 1,554$ eingesetzt wird und zur Berechnung der mittleren freien Weglänge von Luft $l_{m,Luft}$ gemäß Gleichung (2-2) der Stoßquerschnitt $A_{M,Luft} = 4,237 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2$ verwendet wird, vgl. Kapitel 10.1.1. $d_{p,K,GEP}$ [m] ist der mittlere Kornporendurchmesser von GEP mit 44 μm und die Kontinuums-Wärmeleitfähigkeit von Luft $\lambda_{Luft,Kont}$ wird mit Gleichung (8-1) bestimmt.

$f_{ZK,GEP}$ [-] ist der Volumenanteil des Kornzwischenraums der GEP-Körner, der aus $1 - f_{K,GEP}$ resultiert. Dieser Volumenanteil wird vollständig der pyrogenen Kieselsäure zugeordnet. $\lambda_{Luft,PKS}$ wird gemäß Zahlenwertgleichung (10-9) berechnet. Die Werte der Größen $C_{Luft,PKS,1}$ mit 1650 und von $C_{Luft,PKS,2}$ mit 0,7 bleiben darin unverändert und wurden gemäß der Beschreibung in Kapitel 10.2.1 ermittelt. Für den mittleren Porendurchmesser von pyrogener Kieselsäure $d_{p,PKS}$ wird eine empirisch ermittelte Funktion $d_{p,PKS}(\rho_{PKS,ZK})$, abhängig von der Dichte pyrogener Kieselsäure $\rho_{PKS,ZK}$ [kg/m³] bezogen auf das Kornzwischenraum-Volumen von GEP $V_{ZK,GEP}$ [m³], eingesetzt. $\rho_{PKS,ZK}$ wird mit der Masse der pyrogenen Kieselsäure m_{PKS} [kg] nach Gleichung (10-16) und $V_{ZK,GEP}$ nach Gleichung (10-17) bestimmt.

$$\rho_{PKS,ZK} = \frac{m_{PKS}}{V_{ZK,GEP}} \quad (10-16)$$

$$V_{ZK,GEP} = V_{Probe} \cdot f_{ZK,GEP} \quad (10-17)$$

Die mittleren Porendurchmesser von pyrogener Kieselsäure $d_{p,PKS}$ innerhalb der Mischung werden zunächst für jede Mischung aus Tabelle 5-8 empirisch ermittelt über Anpassung an Messwerte, vgl. Kapitel 6.5. Werden diese mittleren Porendurchmesser $d_{p,PKS}$ über der Dichte pyrogener Kieselsäure im Kornzwischenraum der GEP-Körner $\rho_{PKS,ZK}$ aufgetragen, so lässt sich eine Potenzfunktion mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,9904 an die Werte annähern, siehe Abbildung 10-17. Diese Potenzfunktion ist in Zahlenwertgleichung (10-18) dargestellt und wird zur prädiktiven Bestimmung des mittleren Porendurchmessers der pyrogenen Kieselsäure $d_{p,PKS}$ verwendet. Der Geltungsbereich von Gleichung (10-18) liegt bei $\rho_{PKS,ZK} \geq 8 \text{ kg/m}^3$, da für kleinere Dichten $\rho_{PKS,ZK}$ die mittlere Kornzwischenraum-Porengröße von GEP überschritten werden könnte, was physikalisch unmöglich ist.

$$d_{p,PKS} [\mu m] = C_{p,PKS,1} \cdot \left(\rho_{PKS,ZK} \left[\frac{kg}{m^3} \right] \right)^{C_{p,PKS,2}} \quad (10-18)$$

Mit:

$$C_{p,PKS,1} = 2224$$

$$C_{p,PKS,2} = -1,78549$$

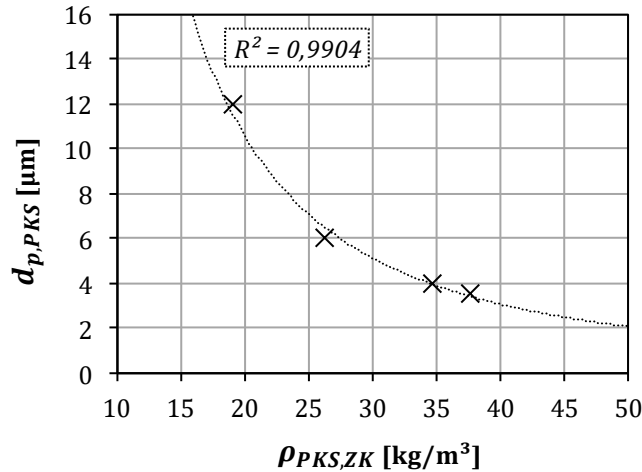


Abbildung 10-17: Mittlerer Porendurchmesser $d_{p,PKS}$ über der Dichte pyrogener Kieselsäure im Kornzwischenraum der GEP-Körner $\rho_{PKS,ZK}$ und an Messwerte angepasste Potenzfunktion, siehe Gleichung (10-18)

10.3.2 Modellierung der Festkörperwärmeleitung

Zur Modellierung der Festkörper-Wärmeleitfähigkeit von Mischungen aus GEP und pyrogener Kieselsäure $\lambda_{FK,Mix} [W/(m \cdot K)]$ wird die nachfolgende Gleichung (10-19) verwendet. $\lambda_{FK,PKS}$ wird mittels Gleichung (10-10) berechnet, wobei die auf das gesamte Probenvolumen V_{Probe} bezogene Dichte $\rho_{PKS} [kg/m^3]$ eingesetzt wird.

$$\lambda_{FK,Mix} = \lambda_{FK,GEP,Mix} + \lambda_{FK,PKS} \quad (10-19)$$

Für GEP kann nicht $\lambda_{FK,EP}$ aus Gleichung (10-3) eingesetzt werden, da sich pyrogene Kieselsäure zwischen die Kontaktstellen der Körner anlagern kann, wodurch andere Festkörperpfade und damit andere Festkörper-Wärmeleitfähigkeiten entstehen können als bei reinen expandierten Perliten. Die in Gleichung (10-19) verwendete Festkörper-Wärmeleitfähigkeit von GEP in der Mischung $\lambda_{FK,GEP,Mix} [W/(m \cdot K)]$ wird anhand der gemäß Kapitel 6.6 ermittelten Festkörper-Wärmeleitfähigkeiten der Mischungen aus Tabelle 6-6 bestimmt und ist in Gleichung (10-20) definiert. Zunächst werden von den Festkörper-Wärmeleitfähigkeiten der Mischungen, die mittels Gleichung (10-10) berechneten Festkörper-Wärmeleitfähigkeiten von HPKS abgezogen, woraus sich die jeweiligen Festkörper-Wärmeleitfähigkeit von GEP in der Mischung $\lambda_{FK,GEP,Mix}$ ergeben. Diese sind in Abbildung 10-18 über der relativen Dichte von GEP $f_{\rho,GEP} [-]$ aufgetragen. Die relative Dichte $f_{\rho,GEP}$ berechnet sich aus den jeweiligen Dichten von GEP in der Mischung ρ_{GEP} geteilt durch die Dichte von reinem GEP mit $73 kg/m^3$. Für $f_{\rho,GEP} < 1$ wird davon

ausgegangen, dass sich pyrogene Kieselsäure zwischen den Berührstellen der GEP-Körnern ansammeln konnte, wodurch sich die Festkörper-Wärmeleitfähigkeit gegenüber $\lambda_{FK,EP}$ aus Gleichung (10-3) verringert. Dieses Phänomen sorgt für einen steilen Abfall der Festkörper-Wärmeleitfähigkeit für $f_{\rho,GEP} < 0,95$, wie in Abbildung 10-18 zu erkennen ist. Offensichtlich muss bei $\rho_{GEP} = 0 \text{ kg/m}^3$, und damit bei $f_{\rho,GEP} = 0$, gelten: $\lambda_{FK,GEP,Mix} = 0 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$. Dieser Punkt ist daher ebenfalls in Abbildung 10-18 aufgetragen. Für $f_{\rho,GEP} < 1$ ergibt sich damit ein S-Kurvenförmiger Verlauf, ähnlich dem der Gas-Wärmeleitfähigkeit über dem Gasdruck. Die Punkte von $\lambda_{FK,GEP,Mix}$ für $0 < f_{\rho,GEP} < 1$ wurden daher mit einer Kurve, basierend auf der Struktur des Anpassungsmodells der Gas-Wärmeleitfähigkeit von ZENG aus Gleichung (3-8) und Gleichung (10-9), angepasst, siehe Abbildung 10-18 und Gleichung (10-20). Für $f_{\rho,GEP} \geq 1$ wird davon ausgegangen, dass die Festkörper-Wärmeleitfähigkeit von GEP nicht von der pyrogenen Kieselsäure beeinflusst wird. Für diesen Bereich wird daher ein linearer Anstieg von $\lambda_{FK,GEP,Mix}$ über $f_{\rho,GEP}$ angenommen, mit der gleichen Steigung wie für $\lambda_{FK,EP}$ in Gleichung (10-3), siehe Abbildung 10-18 und Gleichung (10-20).

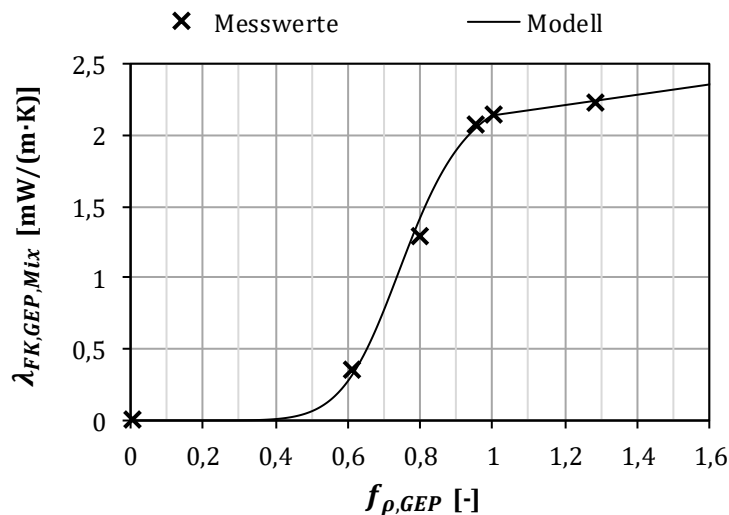


Abbildung 10-18: Anpassung des Modells der Festkörper-Wärmeleitfähigkeit von GEP in der Mischung $\lambda_{FK,GEP,Mix}$ aus Gleichung (10-20) über der relativen Dichte von GEP $f_{\rho,GEP}$ an Messwerte

$$\lambda_{FK,GEP,Mix} = \begin{cases} \frac{C_{FK,GEP,Mix,1} \cdot \lambda_{FK,GEP,rein}}{1 + C_{FK,GEP,Mix,2}/f_{\rho,GEP} C_{FK,GEP,Mix,3}}; & \text{für } 0 < f_{\rho,GEP} < 1 \\ \lambda_{FK,GEP,rein} + C_{FK,GEP,Mix,4} \cdot (f_{\rho,GEP} - 1) \cdot \rho_{GEP,rein}; & \text{für } f_{\rho,GEP} \geq 1 \end{cases} \quad (10-20)$$

Mit:

$\lambda_{FK,GEP,rein}$: Festkörper-Wärmeleitfähigkeit von reinem GEP mit $2,14 \text{ mW/(m}\cdot\text{K)}$

$$C_{FK,GEP,Mix,1} = 1,1$$

$$C_{FK,GEP,Mix,2} = 0,1$$

$$C_{FK,GEP,Mix,3} = 8,5$$

$$C_{FK,GEP,Mix,4} = C_{FK,EP,1} = 4,9483 \cdot 10^{-3} \text{ (mW/(m}\cdot\text{K))}\cdot\text{(m}^3\text{/kg)}$$

$\rho_{GEP, rein}$: Dichte von reinem GEP mit 73 kg/m^3

10.3.3 Modellierung des Kopplungseffekts

Das Modell der Kopplungseffekt-Wärmeleitfähigkeit für die Mischungen aus GEP und pyrogener Kieselsäure $\lambda_{Kpl, Mix}$ [W/(m·K)] ist in Gleichung (10-21) definiert. Als Basis dient das vereinfachte Modell von DEMHARTER und BEIKIRCHER aus Gleichung (3-14).

$$\lambda_{Kpl, Mix} = g_{Kpl, Mix} \cdot \lambda_{Luft, PKS} \quad (10-21)$$

Zur Bestimmung der prädiktiven Skalierungsfunktion $g_{Kpl, Mix}$ [-], werden die Skalierungsfaktoren $F_{Kpl, Mix}$ [-] für jede in Tabelle 5-8 aufgeführte Mischung durch Anpassung an Messwerte entsprechend Kapitel 6.5 bestimmt und über der Dichte von GEP, bezogen auf das gesamte Probenvolumen, ρ_{GEP} aufgetragen. Zudem ist der Skalierungsfaktor $F_{Kpl, Mix}$ für reinen GEP mit aufgeführt, der durch Anpassung der Gleichungen (10-14) und (10-21) an Messwerte generiert wurde, wobei jeweils $\lambda_{Luft, PKS}$ durch den zweiten Summanden aus Gleichung (10-2) ersetzt wurde. Wie in Abbildung 10-19 zu erkennen ist, ergibt sich daraus ein annähernd linearer Verlauf, der sich durch das hohe Bestimmtheitsmaß einer linearen Regression an die Skalierungsfaktoren von $R^2 = 0,9748$ zeigt. Diese in Gleichung (10-22) definierte Regressionsgerade wird daher als Skalierungsfunktion $g_{Kpl, Mix}$ verwendet. Der Geltungsbereich von Gleichung (10-22) wird auf $30 \text{ kg/m}^3 \leq \rho_{GEP} \leq 120 \text{ kg/m}^3$ beschränkt, da eine weitere Extrapolation der Regressionsgeraden als zu unsicher eingeschätzt wird.

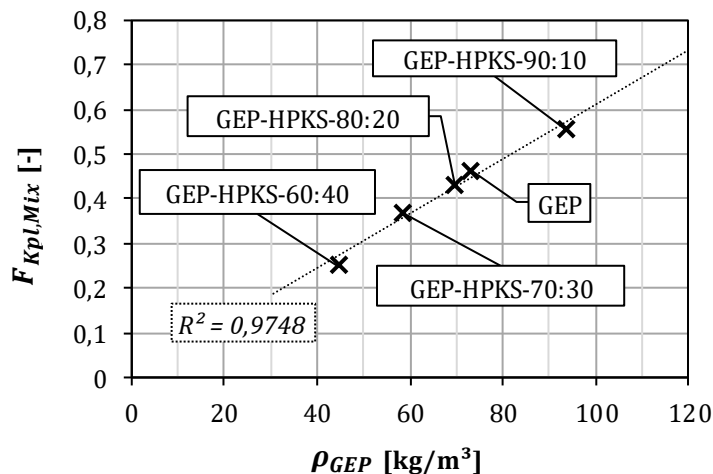


Abbildung 10-19: Skalierungsfaktoren des Kopplungseffekts $F_{Kpl, Mix}$ über der Dichte von GEP ρ_{GEP} und lineare Regression zur empirischen Bestimmung der Skalierungsfunktion $g_{Kpl, Mix}$

$$g_{Kpl, Mix} = C_{Kpl, Mix, 1} \cdot \rho_{GEP} + C_{Kpl, Mix, 2} \quad (10-22)$$

Mit:

$$C_{Kpl, Mix, 1} = 6,1229 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$C_{Kpl, Mix, 2} = -8,8255 \cdot 10^{-4}$$

10.3.4 Modellierung der Wärmestrahlung

Auch zur Modellierung der Strahlungs-Wärmeleitfähigkeit von Mischungen aus GEP und pyrogener Kieselsäure $\lambda_{Str,Mix}$ [W/(m·K)] wird auf den ROSSELAND'schen Diffusionsansatz zurückgegriffen. Hierbei setzt sich der Extinktionskoeffizient allerdings aus der Summe der Produkte der dichtetpezifischen Extinktionskoeffizienten von GEP $e_{R,GEP}$ [m²/kg] und von pyrogener Kieselsäure $e_{R,PKS}$ mit den jeweiligen, auf das Gesamtvolumen der Probe bezogenen, Dichten ρ_{GEP} und ρ_{PKS} zusammen, siehe Gleichung (10-23). Die dichtetpezifischen Extinktionskoeffizienten sind Tabelle 6-6 zu entnehmen.

$$\lambda_{Str,Mix} = \frac{16 \cdot \sigma}{3 \cdot (e_{R,GEP} \cdot \rho_{GEP} + e_{R,PKS} \cdot \rho_{PKS})} \cdot T_{Probe}^3 \quad (10-23)$$

10.3.5 Gesamtmodell der effektiven Wärmeleitfähigkeit

Das Gesamtmodell der effektiven Wärmeleitfähigkeit von Mischungen aus GEP und den pyrogenen Kieselsäuren HPKS oder UPKS in Luft $\lambda_{eff,Mix}$ [W/(m·K)] ist in Gleichung (10-24) aufgeführt.

$$\lambda_{eff,Mix} = \lambda_{Luft,Mix} + \lambda_{FK,Mix} + \lambda_{Kpl,Mix} + \lambda_{Str,Mix} \quad (10-24)$$

Das Modell ist nur für die Mischungen aus den oben genannten Wärmedämmstoffen in den Bereichen $30 \text{ kg/m}^3 \leq \rho_{GEP} \leq 120 \text{ kg/m}^3$ und $\rho_{PKS,ZK} \geq 8 \text{ kg/m}^3$ konzipiert (siehe Kapitel 10.3.1 und 10.3.3), liefert für diese jedoch vollständige Prädiktivität. Alle notwendigen Stoffgrößen wurden bereits in der vorliegenden Arbeit bestimmt. Die in der vorliegenden Arbeit erreichten Gesamtdichten der Mischungen aus Tabelle 5-8 und Interpolationen daraus können in erster Näherung zur Vorhersage verwendet werden. Für eine genauere Vorhersage empfiehlt es sich aber, die effektive Wärmeleitfähigkeit anhand der im Anwendungsfall erreichten Gesamtdichte und den sich daraus ergebenden Einzeldichten der Komponenten nachzukalkulieren.

Die Übereinstimmungen der vollständig prädiktiven Gesamtmodelle der effektiven Wärmeleitfähigkeit mit Messwerten der Mischungen aus Tabelle 5-8 sind in Abbildung 13-12 in Anhang A7 dargestellt. Im nachfolgenden Kapitel wird eine Validierung des Gesamtmodells vorgenommen.

10.3.6 Validierung des Gesamtmodells

Die Validierung des Gesamtmodells wurde anhand einer Mischung aus 85 Mass.-% GEP und 15 Mass.-% HPKS vorgenommen, welche nicht zur Erstellung des Modells verwendet wurde. Diese Mischung wird entsprechend der in Kapitel 5.3 eingeführten Nomenklatur mit GEP-HPKS-85:15 bezeichnet und besitzt eine Dichte von 93 kg/m^3 .

In Abbildung 10-20 sind die Messwerte der effektiven Wärmeleitfähigkeit von GEP-HPKS-85:15 gemeinsam mit den Ergebnissen des vollständig prädiktiven Modells über dem Luftdruck dargestellt und in Abbildung 10-21 über der Probenmitteltemperatur.

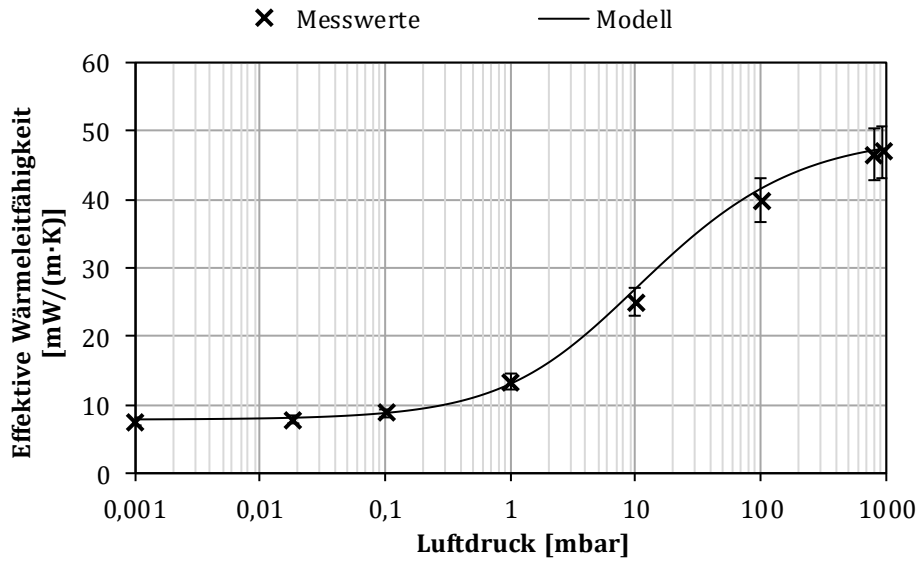


Abbildung 10-20: Validierung des vollständig prädiktiven Modells der effektiven Wärmeleitfähigkeit anhand der Messwerte von GEP-HPKS-85:15 über dem Luftdruck bei einer Probenmitteltemperatur von 48 °C

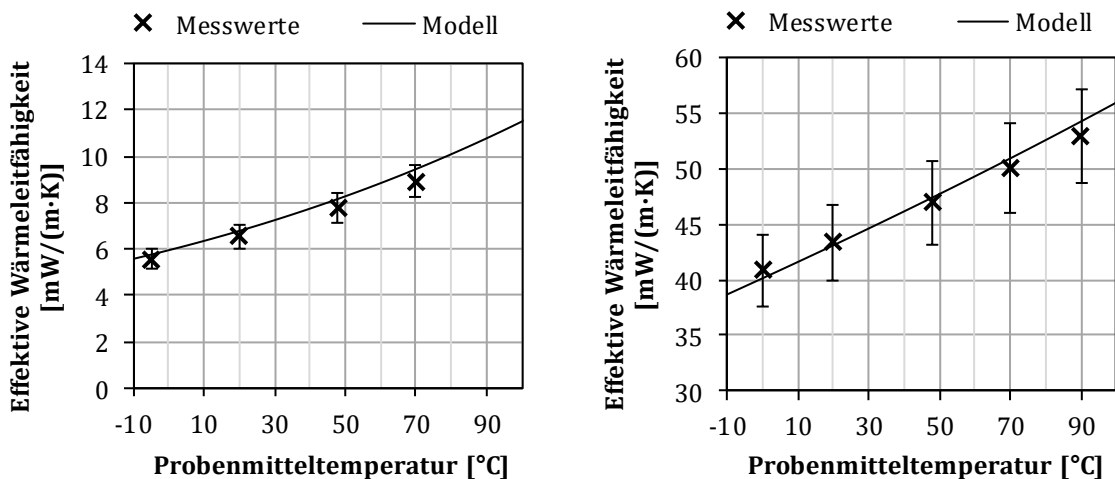


Abbildung 10-21: Validierung des vollständig prädiktiven Modells der effektiven Wärmeleitfähigkeit anhand der Messwerte von GEP-HPKS-85:15 über der Probenmitteltemperatur. Links: bei einem Luftdruck von $(0,02 \pm 0,005)$ mbar; rechts: bei Atmosphärendruck von (960 ± 20) mbar

Das Modell zeigt dabei eine sehr gute Übereinstimmung mit den Messwerten. Die Messwerte bei Luftdrücken $\leq 0,025$ mbar werden bei allen gemessenen Probenmitteltemperaturen nur geringfügig überschritten. Die Festkörper-Wärmeleitfähigkeit des Modells liegt mit $2,358 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ um nur $0,023 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ unter dem aus den Messwerten gemäß Kapitel 6.6 ermittelten Wert von $2,380 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$. Dies sind lediglich 1 % bezogen auf den aus den Messwerten ermittelten Wert. Der Extinktionskoeffizient aus dem Modell der Strahlungs-Wärmeleitfähigkeit liegt mit 1807 1/m um 6,8 % unterhalb des aus den Messwerten der Mischung gemäß der Methodik aus Kapitel 6.6 ermittelten Extinktionskoeffizienten, welcher 1938 1/m beträgt. Damit lässt sich die leicht höhere Strahlungs-Wärmeleitfähigkeit des Modells erklären, die bei einer Probenmitteltemperatur von

48 °C mit 5,544 mW/(m·K) um 0,374 mW/(m·K) höher liegt als bei der Verwendung des Extinktionskoeffizienten aus den Messwerten. Die höheren Strahlungs-Wärmeleitfähigkeiten begründen auch die leicht höheren effektiven Wärmeleitfähigkeiten des Modells gegenüber allen Messwerten bei Luftdrücken $\leq 0,025$ mbar. Die Extinktionskoeffizienten des additiven Ansatzes aus dem Modell der Strahlungs-Wärmeleitfähigkeit weichen bei allen untersuchten Mischungen aus GEP und HPKS um betragsmäßig maximal 19,8 % und im arithmetischen Mittel um nur 8,9 % von den aus den Messwerten der Mischung gemäß Kapitel 6.6 ermittelten Extinktionskoeffizienten ab, jeweils bezogen auf die Extinktionskoeffizienten aus den Messwerten. Dies wird als Bestätigung dieses additiven Ansatzes gewertet.

Zwischen 1 mbar und 100 mbar ist der Anstieg der Luft- und Kopplungseffekt-Wärmeleitfähigkeit des Modells über dem Luftdruck leicht steiler als der Anstieg der Messwerte. Aus diesem Grund werden die Messwerte bei 10 und (100 ± 1) mbar vom Modell leicht überschätzt. Bei Atmosphärendruck und einer Probenmitteltemperatur von 48 °C übersteigt das Modell den Messwert der effektiven Wärmeleitfähigkeit um lediglich 0,420 mW/(m·K), was 0,9 % bezogen auf den Messwert entspricht. Ebenso wie beim Gesamtmodell für die expandierten Perlite, existiert eine leichte Überhöhung der Steigung der effektiven Wärmeleitfähigkeit des Modells über der Probenmitteltemperatur bei Atmosphärendruck gegenüber den Messwerten. Auch hier wird eine Überbewertung der Luft-Wärmeleitfähigkeit im Modell des Kopplungseffekts als Ursache angenommen.

Die betragsmäßig größte absolute und relative Abweichung des Modells zu den Messwerten bei einer Probenmitteltemperatur von 48 °C ist für GEP-HPKS-85:15 bei einem Luftdruck von 10 mbar mit 1,954 mW/(m·K) und 7,2 %, bezogen auf den Messwert, zu verzeichnen. Die betragsmäßige mittlere relative Abweichung des Modells zu den Messwerten von GEP-HPKS-85:15 bei einer Probenmitteltemperatur von 48 °C beträgt 3,2 %.

Bei einem Luftdruck von $(0,02 \pm 0,005)$ mbar liegt die betragsmäßig größte absolute und relative Abweichung des Modells zu den Messwerten von GEP-HPKS-85:15 bei einer Probenmitteltemperatur von 70 °C vor mit 0,56 mW/(m·K) und 6,2 %, bezogen auf den Messwert. Die betragsmäßige mittlere relative Abweichung beträgt hier 4,9 %.

Bei Atmosphärendruck verzeichnet das Modell für GEP-HPKS-85:15 seine betragsmäßig größte absolute und relative Abweichung bei einer Probenmitteltemperatur von 90 °C mit 1,31 mW/(m·K) und 2,5 %, bezogen auf den Messwert. Die betragsmäßige mittlere relative Abweichung des Modells zu den Messwerten von GEP-HPKS-85:15 beträgt bei Atmosphärendruck 1,5 %.

Das Modell bietet somit sehr treffende Vorhersagen der effektiven Wärmeleitfähigkeit von Mischungen aus GEP und HPKS in allen untersuchten Luftdruck- und Temperaturbereichen.

10.3.7 Sensitivitätsanalyse

In dieser Sensitivitätsanalyse wird der Einfluss von Änderungen derjenigen Parameter auf die Änderung der modellierten effektiven Wärmeleitfähigkeit betrachtet, die als am kritischsten eingeschätzt werden. Diese sind:

- die Gesamtdichte der Mischung ρ ,
- der mittlere Porendurchmesser innerhalb der pyrogenen Kieselsäure $d_{p,PKS}$,
- die Skalierungsfunktion für den Kopplungseffekt $g_{Kpl,Mix}$.

Die Gesamtdichte ρ könnte bei neuen Mischungen aus GEP und HPKS oder ggf. UPKS variieren. Dies kann sich beispielsweise aus einer abweichenden Schütthöhe der Mischung, Art der Verdichtung oder Korndichte von GEP ergeben. Beim Einsatz von UPKS anstelle von HPKS kann sich bei unzureichender Dispergierung, aufgrund der üblicherweise größeren Agglomerate, neben einer abweichenden Gesamtdichte auch ein abweichender mittlerer Porendurchmesser innerhalb der pyrogenen Kieselsäure $d_{p,PKS}$ ergeben. Die Auswirkungen einer Veränderung dieser Größe wird in der Sensitivitätsanalyse separat betrachtet, um die Auswirkungen von Ungenauigkeiten der empirisch ermittelten Gleichung (10-18) zur Berechnung von $d_{p,PKS}$ bewerten zu können. Aus unterschiedlichen Gesamtdichten können auch unterschiedlich große Kopplungseffekte resultieren. Aber auch Ungenauigkeiten der empirisch ermittelten Skalierungsfunktion für den Kopplungseffekt $g_{Kpl,Mix}$ können zu einer Abweichung der modellierten effektiven Wärmeleitfähigkeit führen. Daher wird auch die Sensitivität des Gesamtmodells bzgl. dieser Größe betrachtet.

Die Sensitivität des Gesamtmodells wird auf Basis der Parameter von GEP-HPKS-90:10 und GEP-HPKS-60:40 bei Luftdrücken von 1 mbar und 10 mbar bewertet, die so weit wie möglich anhand der Messwerte ermittelt wurden. Damit werden die Mischungen mit dem größten und dem kleinsten Anteil an GEP betrachtet sowie die Grenzen des Luftdruckbereichs, für welchen die Mischungen konzipiert wurden. Die Mitteltemperatur der Mischungen beträgt jeweils 48 °C.

Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse sind in Abbildung 10-22 für einen Luftdruck von 1 mbar und in Abbildung 10-23 für einen Luftdruck von 10 mbar dargestellt. Die einzelnen Parameter wurden, soweit möglich, jeweils zwischen dem Faktor 0,1 und 3 variiert. Auf der Ordinate kann die Auswirkung der jeweiligen Variation auf die modellierte effektive Wärmeleitfähigkeit abgelesen werden. Analog zu Kapitel 10.1.7 sind die Grenzen einer Abweichung der modellierten effektiven Wärmeleitfähigkeit von $\pm 20\%$ als rote, gepunktete Linien aufgetragen.

Bei GEP-HPKS-90:10 ist die Variation der Gesamtdichte der Mischung ρ eingeschränkt auf den Bereich der Änderung des Parameters vom Faktor 0,58 bis 2,2. Für Faktoren $< 0,58$ ergäben sich Dichten der pyrogenen Kieselsäure $\rho_{PKS,ZK} < 8 \text{ kg/m}^3$, für welche der mittlere Porendurchmesser innerhalb der pyrogenen Kieselsäure $d_{p,PKS}$ höhere Werte annehmen könnte als der mittlere

Porendurchmesser des GEP-Zwischenraums, was unmöglich ist, siehe Kapitel 10.3.1. Faktoren $> 2,2$ würden zu Volumenanteilen von GEP $> 100\%$ führen, was ebenfalls unmöglich ist. Bereits für Faktoren $> 1,3$ gilt $\rho_{GEP} > 120 \text{ kg/m}^3$, womit der Gültigkeitsbereich des Modells des Kopplungseffekts überschritten wird. Dies führt allerdings lediglich zu höheren Unsicherheiten des Modells, weshalb diese Überschreitung des Gültigkeitsbereichs in der Sensitivitätsanalyse toleriert wird.

Bei GEP-HPKS-60:40 ist die Variation der Gesamtdichte der Mischung ρ eingeschränkt auf Faktoren der Änderung des Parameters $> 0,25$, um Dichten der pyrogenen Kieselsäure $\rho_{PKS,ZK} < 8 \text{ kg/m}^3$ zu verhindern. Der Gültigkeitsbereich des Kopplungseffekt-Modells wird für Faktoren der Änderung des Parameters $< 0,68$ und $> 2,7$ überschritten, was jedoch ebenfalls für diese Sensitivitätsanalyse toleriert wird.

Das Gesamtmodell der effektiven Wärmeleitfähigkeit ist bei Luftdrücken von 1 mbar und 10 mbar vergleichsweise robust bzgl. Änderungen des mittleren Porendurchmessers innerhalb der pyrogenen Kieselsäure $d_{p,PKS}$ und der Skalierungsfunktion für den Kopplungseffekt $g_{Kpl,Mix}$. Die Grenzwerte der Faktoren der Änderung der Parameter, bei welchen Abweichungen der modellierten effektiven Wärmeleitfähigkeit von $\pm 20\%$ erreicht werden, sind in Tabelle 10-5 und Tabelle 10-6 aufgeführt. Diese Parameter haben überwiegend Einfluss auf die Luft- und Kopplungseffekt-Wärmeleitfähigkeit, weshalb die Auswirkung der Änderungen im betrachteten Bereich mit steigendem Luftdruck und steigendem Anteil an GEP zunimmt.

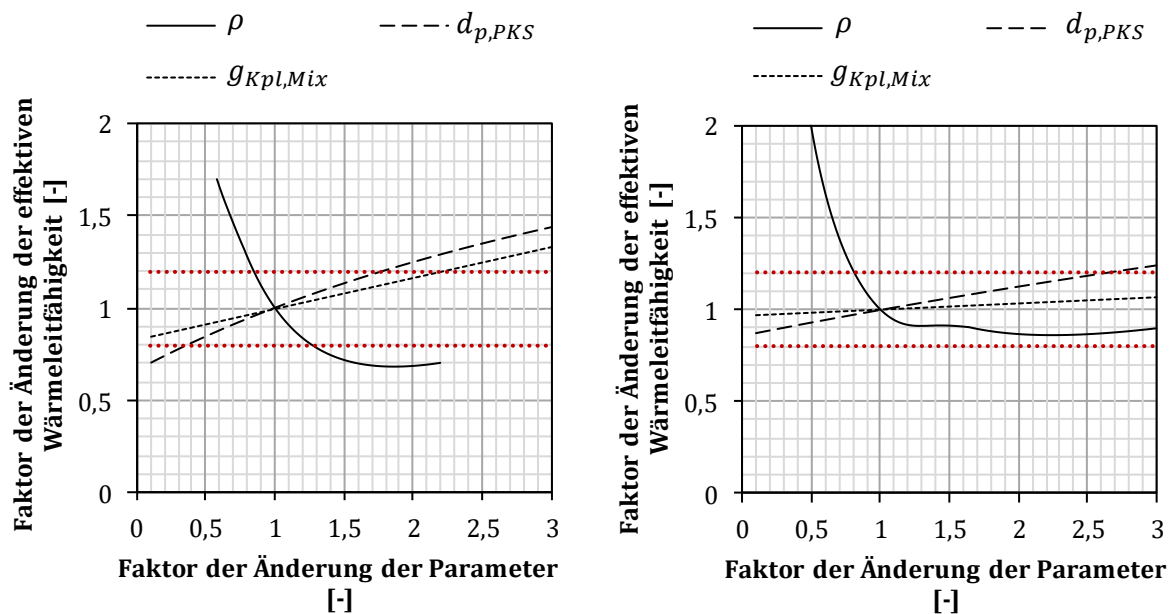


Abbildung 10-22: Sensitivitätsanalyse des Gesamtmodells der effektiven Wärmeleitfähigkeit auf Basis der Daten von GEP-HPKS-90:10 (links) und GEP-HPKS-60:40 (rechts) bei einem Luftdruck von 1 mbar. Die roten gepunkteten Linien markieren eine Änderung der effektiven Wärmeleitfähigkeit von $\pm 20\%$.

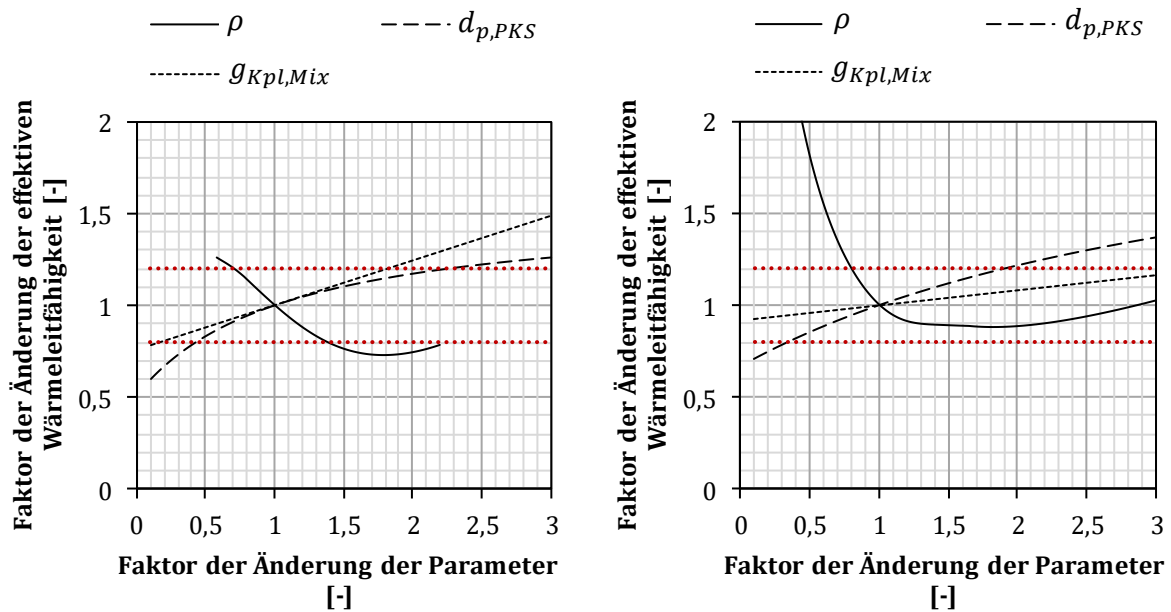


Abbildung 10-23: Sensitivitätsanalyse des Gesamtmodells der effektiven Wärmeleitfähigkeit auf Basis der Daten von GEP-HPKS-90:10 (links) und GEP-HPKS-60:40 (rechts) bei einem Luftdruck von 10 mbar. Die roten gepunkteten Linien markieren eine Änderung der effektiven Wärmeleitfähigkeit von $\pm 20\%$.

Tabelle 10-5: Faktoren der Änderung der Parameter für eine betragsmäßige Änderung der modellierten effektiven Wärmeleitfähigkeit von $\leq 20\%$ bei GEP-HPKS-90:10

| Luftdruck | 1 mbar | | 10 mbar | |
|-------------------------------|---|--------------|-------------|--------------|
| | Änderung der modellierten effektiven Wärmeleitfähigkeit | $\geq -20\%$ | $\leq 20\%$ | $\geq -20\%$ |
| Faktor Änderung ρ | $\leq 1,26$ | $\geq 0,85$ | $\leq 1,37$ | $\geq 0,71$ |
| Faktor Änderung $d_{p,PKS}$ | $\geq 0,37$ | $\leq 1,78$ | $\geq 0,43$ | $\leq 2,26$ |
| Faktor Änderung $g_{Kpl,Mix}$ | - | $\leq 2,19$ | $\geq 0,18$ | $\leq 1,82$ |

Tabelle 10-6: Faktoren der Änderung der Parameter für eine betragsmäßige Änderung der modellierten effektiven Wärmeleitfähigkeit von $\leq 20\%$ bei GEP-HPKS-60:40

| Luftdruck | 1 mbar | | 10 mbar | |
|-------------------------------|---|--------------|-------------|--------------|
| | Änderung der modellierten effektiven Wärmeleitfähigkeit | $\geq -20\%$ | $\leq 20\%$ | $\geq -20\%$ |
| Faktor Änderung ρ | - | $\geq 0,82$ | - | $\geq 0,8$ |
| Faktor Änderung $d_{p,PKS}$ | - | $\leq 2,64$ | $\geq 0,35$ | $\leq 1,89$ |
| Faktor Änderung $g_{Kpl,Mix}$ | - | - | - | - |

Die Auswirkungen einer Änderung der Gesamtdichte ρ auf die modellierten effektiven Wärmeleitfähigkeiten von GEP-HPKS-90:10 und GEP-HPKS-60:40 bei Luftdrücken von 1 mbar und 10 mbar sind in den meisten Bereichen größer als eine Änderung von $d_{p,PKS}$ und $g_{Kpl,Mix}$, siehe

Abbildung 10-22, Abbildung 10-23, Tabelle 10-5 und Tabelle 10-6. Eine Änderung der Gesamtdichte hat auf alle Wärmetransportmechanismen signifikante Auswirkungen. Dies ist in Abbildung 10-24 für einen Luftdruck von 1 mbar und in Abbildung 10-25 für einen Luftdruck von 10 mbar gezeigt.

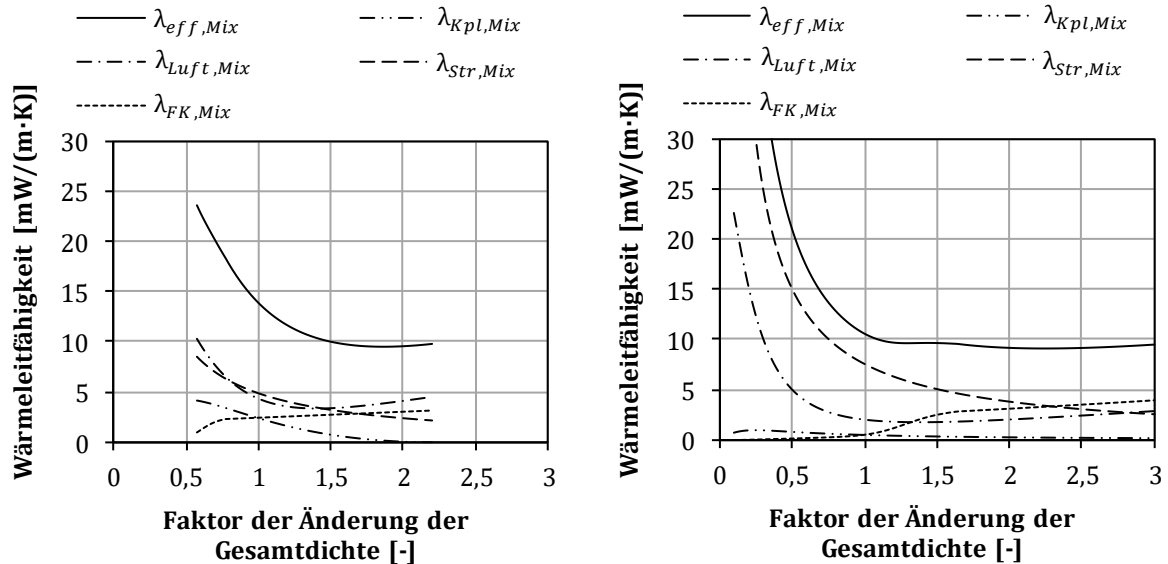


Abbildung 10-24: Änderung der modellierten Wärmeleitfähigkeiten der einzelnen Wärmetransportmechanismen sowie der modellierten effektiven Wärmeleitfähigkeit von GEP-HPKS-90:10 (links) und GEP-HPKS-60:40 (rechts) mit dem Faktor der Änderung der Gesamtdichte bei einem Luftdruck von 1 mbar.

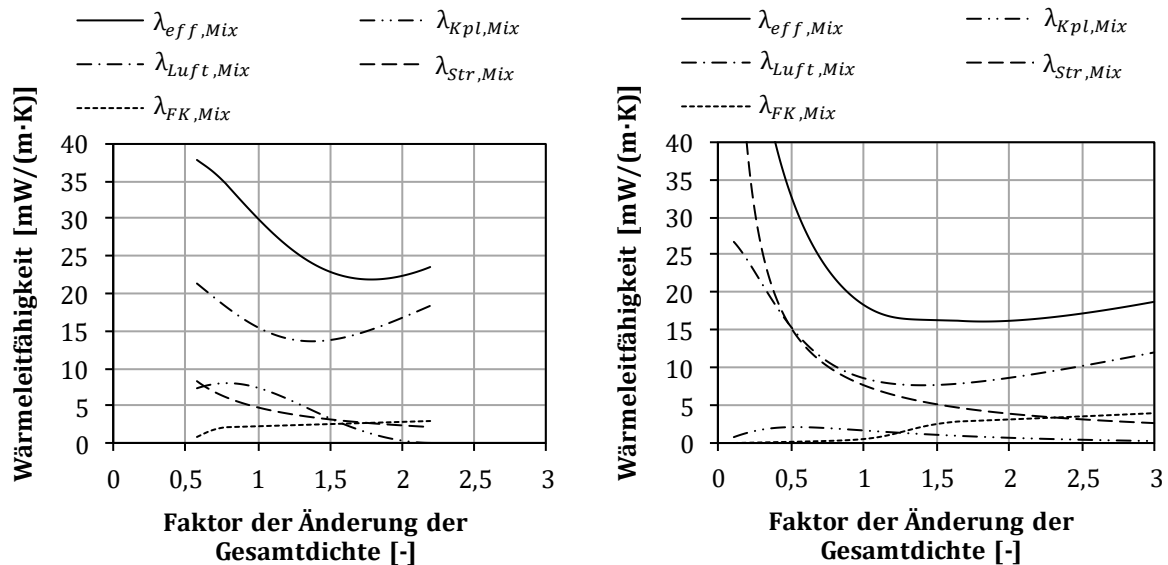


Abbildung 10-25: Änderung der modellierten Wärmeleitfähigkeiten der einzelnen Wärmetransportmechanismen sowie der modellierten effektiven Wärmeleitfähigkeit von GEP-HPKS-90:10 (links) und GEP-HPKS-60:40 (rechts) mit dem Faktor der Änderung der Gesamtdichte bei einem Luftdruck von 10 mbar.

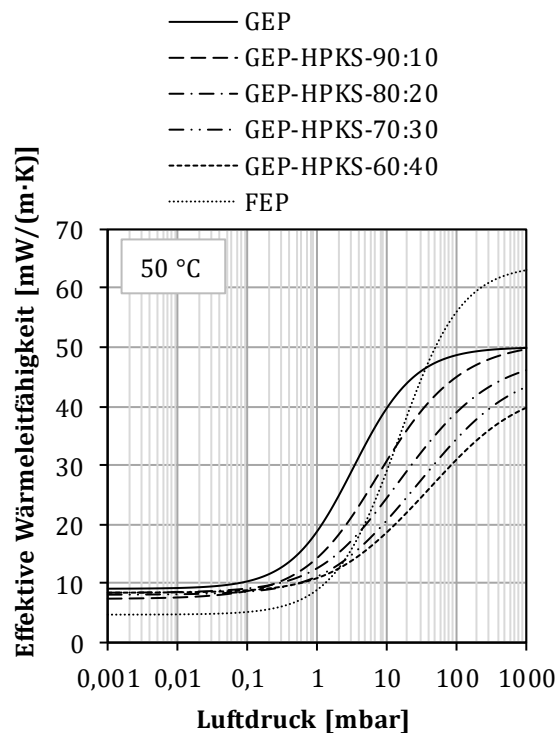
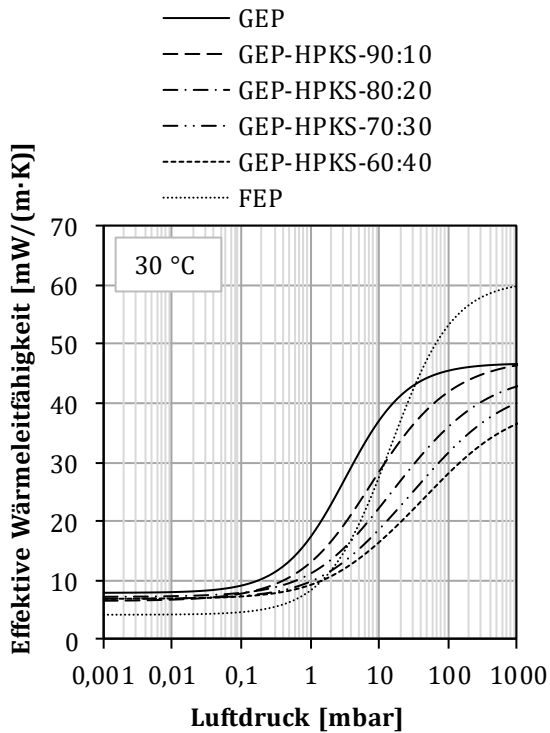
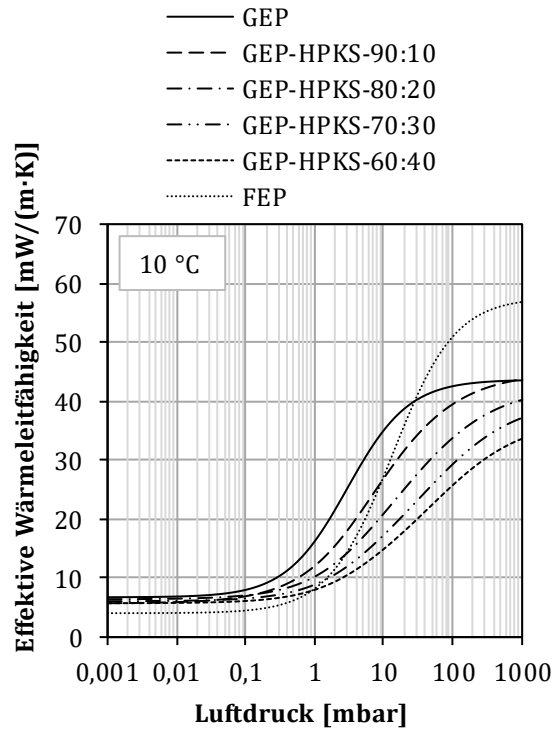
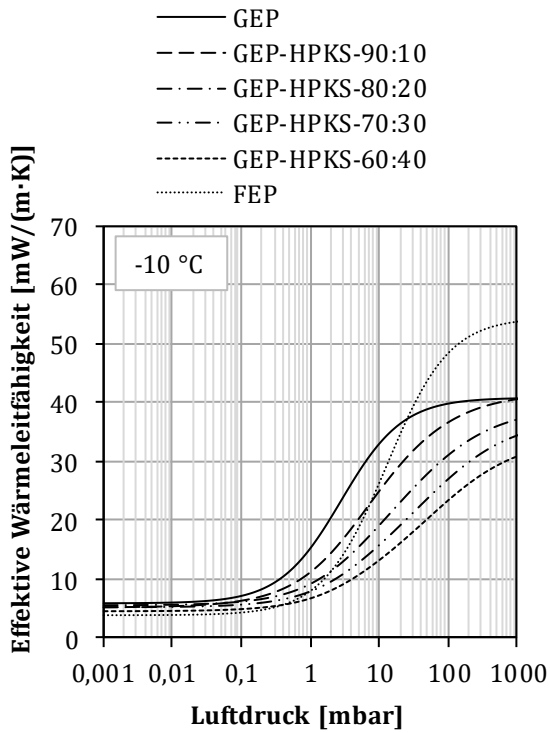
Die Festkörper-Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{FK,Mix}$ steigt jeweils mit steigender Gesamtdichte entsprechend des in Abbildung 10-18 gezeigten Verlaufs und die Strahlungs-Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{Str,Mix}$ sinkt jeweils mit steigender Gesamtdichte, aufgrund der damit abnehmenden Extinktion der Wärmestrahlung. Die Luft-Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{Luft,Mix}$ sinkt zunächst mit steigender Gesamtdichte, da sich damit die Dichte der pyrogenen Kieselsäure im GEP-Zwischenraum $\rho_{PKS,ZK}$ erhöht und damit deren mittlerer Porendurchmesser $d_{p,PKS}$ sinkt. Mit weiter steigender Gesamtdichte steigt die Luft-Wärmeleitfähigkeit wieder an, da sich dadurch der Volumenanteil der GEP-Körner erhöht, welche einen größeren mittleren Porendurchmesser besitzen. Am Minimum der Kurven ist der geringste volumengewichtet gemittelte Porendurchmesser der Mischung erreicht. Jedoch findet der Anstieg der Luft-Wärmeleitfähigkeit meist bei einer Gesamtdichte statt, bei welcher gilt $\rho_{GEP} > 120 \text{ kg/m}^3$, womit der Gültigkeitsbereich des Modells des Kopplungseffekts überschritten wird. Die Kopplungseffekt-Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{Kpl,Mix}$ steigt jeweils zunächst mit steigender Gesamtdichte, da sich damit die Skalierungsfunktion für den Kopplungseffekt $g_{Kpl,Mix}$ erhöht. Mit weiter steigender Gesamtdichte verringert sich die Kopplungseffekt-Wärmeleitfähigkeit, aufgrund der stark sinkenden Luft-Wärmeleitfähigkeit im mit HPKS gefüllten GEP-Zwischenraum $\lambda_{Luft,PKS}$. Die Verläufe der einzelnen Wärmeleitfähigkeiten erklären den Verlauf der effektiven Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{eff,Mix}$ über dem Faktor der Änderung der Gesamtdichte in Abbildung 10-22, Abbildung 10-23, Abbildung 10-24 und Abbildung 10-25, da sich $\lambda_{eff,Mix}$ additiv aus den einzelnen Wärmeleitfähigkeiten zusammensetzt.

10.3.8 Modellstudien

Mit Hilfe der Gesamtmodelle der effektiven Wärmeleitfähigkeit für Mischungen aus GEP und HPKS sowie für expandierte Perlite lassen sich nun auch die voraussichtlichen effektiven Wärmeleitfähigkeiten bei Luftdrücken und Probenmitteltemperaturen berechnen und vergleichen, die nicht vermessen wurden. Die Ergebnisse einer solchen Studie sind in Abbildung 10-26 dargestellt, in welcher die modellierten effektiven Wärmeleitfähigkeiten sämtlicher Mischungen aus GEP und HPKS, außer der Validierungsmischung GEP-HPKS-85:15, sowie GEP und FEP für Probenmitteltemperaturen zwischen -10 °C und 90 °C über dem Luftdruck aufgetragen sind. Für die expandierten Perlite wurde jeweils das Anpassungsmodell verwendet und für das Gesamtmodell der Mischungen wurden jeweils, soweit wie möglich, die anhand der Messwerte ermittelten Parameter verwendet.

Erwartungsgemäß steigen sämtliche effektive Wärmeleitfähigkeiten mit steigender Probenmitteltemperatur. Aufgrund der unterschiedlich hohen Extinktionskoeffizienten und mittleren Porengrößen wirkt sich die Änderung der Probenmitteltemperatur jedoch unterschiedlich stark auf die effektive Wärmeleitfähigkeit der unterschiedlichen Wärmedämmstoffe aus. Besonderer Fokus soll bei der Studie auf die Fragestellung gelegt werden, bei welcher Probenmittel-

temperatur und welchem Luftdruck Mischungen aus GEP und HPKS niedrigere effektive Wärmeleitfähigkeiten erreichen können als ein expandierter Perlit hoher Dichte wie FEP. Während bei einer Probenmitteltemperatur von 90 °C die Mischung GEP-HPKS-60:40 für Luftdrücke > 4 mbar geringere effektive Wärmeleitfähigkeiten aufweist als FEP, gilt dies bei einer Probenmitteltemperatur von -10 °C bereits bei Luftdrücken > 0,5 mbar.



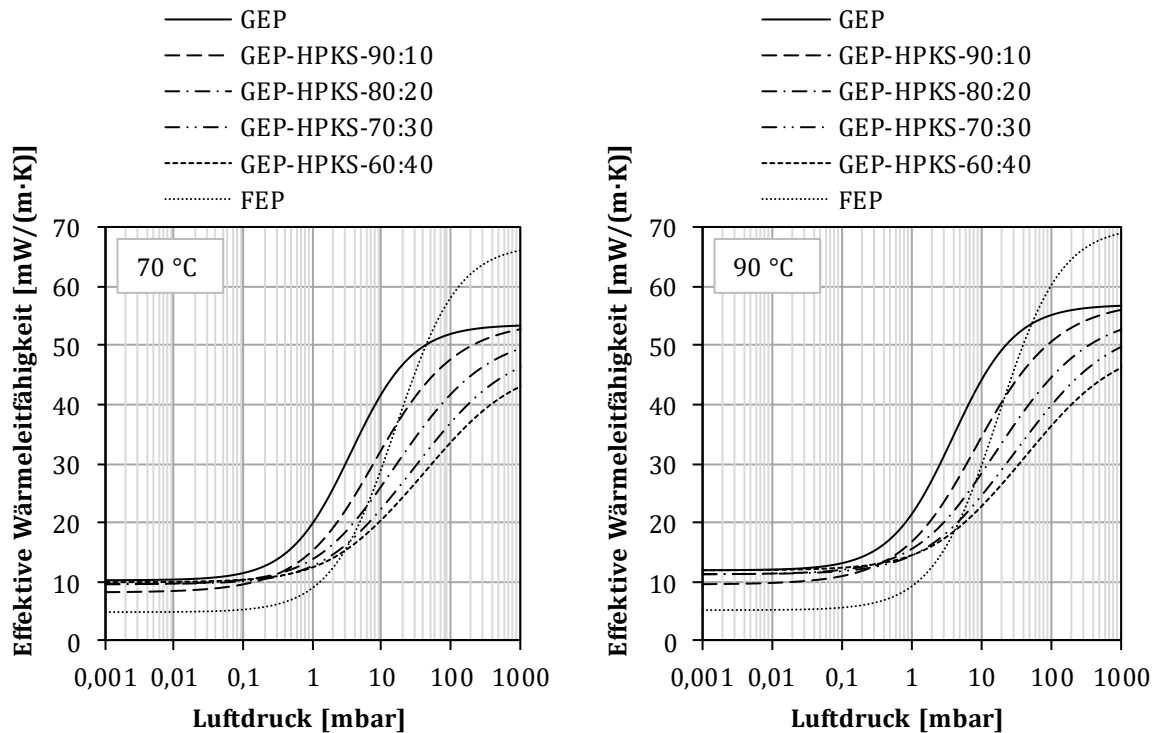


Abbildung 10-26: Modellierte effektive Wärmeleitfähigkeiten von GEP, FEP und Mischungen aus GEP und HPKS über dem Luftdruck bei einer Probenmitteltemperatur von -10 °C (oben links); 10 °C (oben rechts); 30 °C (Mitte links); 50 °C (Mitte rechts); 70 °C (unten links) und 90 °C (unten rechts)

Die Mischungen sind demnach, aufgrund der vergleichsweise geringen Extinktionskoeffizienten und Festkörper-Wärmeleitfähigkeiten, besonders für niedrige Mitteltemperaturen eine Alternative zu expandierten Perliten hoher Dichte wie FEP, wenn auf die aufwendige Evakuierung auf Luftdrücke < 1 mbar verzichtet werden soll.

Zur Absenkung der effektiven Wärmeleitfähigkeit der Mischungen kann eine Beimischung von Strahlungshemmern beitragen, wie das Beispiel der Beimischung von 15 Massen-% SiC zu der Mischung GEP-HPKS-80:20 in Anhang A4 zeigt. Damit könnten die Mischungen, insbesondere bei höheren Mitteltemperaturen, über größere Druckbereiche geringere effektive Wärmeleitfähigkeiten erreichen als reine expandierte Perlite hoher Dichte. Für die Bewertung der Kosten und des Aufwandes der Varianten wird auf Kapitel 9 verwiesen.

11 Zusammenfassung und Ausblick

11.1 Zusammenfassung

Das übergeordnete Ziel der vorliegenden Arbeit war die Weiterentwicklung von Vakuumwärmedämmungen für doppelwandige Warmwasserspeicher, bei welchen lose Schüttungen als Wärmedämmstoffe zum Einsatz kommen. Entscheidende Bedeutung liegt dabei auf der Wahl des Wärmedämmstoffs. Neben den Kosten ist vor allem die effektive Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit von Luftdruck und Temperatur entscheidend für die Auswahl des Wärmedämmstoffs. Von besonderer Relevanz sind Wärmedämmstoffe, die bei möglichst hohen Vakuumdrücken möglichst geringe effektive Wärmeleitfähigkeiten aufweisen. Damit ließe sich zum einen die hohe Effektivität der Wärmedämmung über einen längeren Zeitraum aufrechterhalten, da unvermeidliche Leckagen zu einem Luftdruckanstieg innerhalb des Dämmraums mit der Zeit führen. Zum anderen ließe sich der Aufwand für die Evakuierung deutlich reduzieren, wenn höhere Vakuumdrücke für eine sehr geringe effektive Wärmeleitfähigkeit ausreichen.

Die Literaturrecherche hat ergeben, dass bisher ausschließlich expandierte Perlite für die Vakuumwärmedämmung in kommerziell verfügbaren doppelwandigen Warmwasserspeichern zum Einsatz kommen. Neben expandierten Perliten unterschiedlicher mittlerer Korngrößen, sollten in der vorliegenden Arbeit auch Mischungen aus expandierten Perliten und pyrogener Kieselsäure untersucht werden. Letztere kann die gasabhängigen Wärmetransportmechanismen bereits bei höheren Vakuumdrücken unterbinden, wohingegen expandierte Perlite einen geringeren Preis und eine höhere dichtespezifische Extinktion gegenüber Wärmestrahlung besitzen. Mischungen dieser Komponenten wurden nach Kenntnis des Autors bisher noch nicht als lose Schüttungen bzgl. ihrer effektiven Wärmeleitfähigkeit untersucht.

Zudem zeigte die Literaturrecherche, dass zu Beginn der vorliegenden Arbeit kein vollständig prädiktives Modell der effektiven Wärmeleitfähigkeit für expandierte Perlite existierte, welches auf einfach messbaren Stoffgrößen basiert. Ein weiteres Ziel der Arbeit war daher, ein solches Modell zu entwickeln. Auch für die Mischungen aus expandierten Perliten und pyrogener Kieselsäure sollte ein Modell der effektiven Wärmeleitfähigkeit entwickelt werden, welches möglichst prädiktiv ist und auf möglichst wenigen und einfach zu messenden Stoffgrößen beruht, da nach Kenntnis des Autors auch ein solches Modell bisher nicht existierte. Alle Modelle sollten zudem möglichst hohe Übereinstimmungen mit Messwerten erreichen.

In der vorliegenden Arbeit wurden unterschiedliche expandierte Perlite beschafft und auch Siebungen daraus erstellt, um einen möglichst großen Bereich der mittleren Korngrößen und Dichten abzudecken. Zudem wurde eine unbehandelte und eine hydrophobierte pyrogene Kieselsäure beschafft. Die expandierten Perlite wurden zunächst bzgl. ihres mittleren Korndurchmessers, ihrer Rein- und Korndichte, ihres Anteils geschlossener Poren, der mittleren Porengröße innerhalb und außerhalb der Körner, ihres dichtespezifischen Extinktionskoeffizienten und ihrer

Festkörper-Wärmeleitfähigkeit untersucht. Die pyrogenen Kieselsäuren und deren Mischungen mit expandiertem Perlit wurden bzgl. ihrer mittleren Porengröße, des dichtespezifischen Extinktionskoeffizienten und der Festkörper-Wärmeleitfähigkeit untersucht. Damit liegt nun eine Datenbasis vor, die u. a. für die Modellierung der effektiven Wärmeleitfähigkeit dieser Stoffe genutzt werden kann.

Für die Messungen der effektiven Wärmeleitfähigkeit der Dämmstoffschüttungen bei unterschiedlichen Luftdrücken und Mitteltemperaturen wurde eine Versuchsanlage entwickelt und aufgebaut. Die Messwerte aus dieser Versuchsanlage zeigten sehr hohe Übereinstimmungen mit Messwerten aus kommerziell verfügbaren Messapparaturen. Die Messunsicherheit auf den Messwert der effektiven Wärmeleitfähigkeit wurde bei Atmosphärendruck zu maximal $\pm 1,68 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$, bzw. $\pm 2,3 \%$ und bei einem Luftdruck von $< 0,02 \text{ mbar}$ zu maximal $0,27 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$, bzw. $\pm 7,6 \%$ bestimmt.

Mittels dieser Versuchsanlage wurden zum einen die effektiven Wärmeleitfähigkeiten der expandierten Perlite bei Luftdrücken von $< 0,02 \text{ mbar}$ bis Atmosphärendruck von $(960 \pm 20) \text{ mbar}$ und bei Mitteltemperaturen zwischen -5 °C und 90 °C gemessen. Somit steht erstmals eine systematische Untersuchung der expandierten Perlite zur Verfügung, anhand welcher u. a. die Einflüsse des mittleren Korndurchmessers und der mittleren Korndichte auf die unterschiedlichen Wärmetransportmechanismen bewertet werden können. Zudem können anhand der Messwerte die einzelnen Wärmetransportmechanismen modellgestützt ermittelt und empirische Funktionen für die prädiktive Modellierung der effektiven Wärmeleitfähigkeit abgeleitet werden.

Zum anderen wurden die effektiven Wärmeleitfähigkeiten, sowohl von reinen pyrogenen Kieselsäuren in unbehandeltem und hydrophobiertem Zustand, als auch Mischungen eines vergleichsweise grobkörnigen Perlits mit der hydrophobierten pyrogenen Kieselsäure in den oben genannten Luftdruck- und Temperaturbereichen gemessen. Auch hieraus konnten empirische Funktionen für die Modellierung der effektiven Wärmeleitfähigkeit abgeleitet werden.

Neben den thermischen Eigenschaften wurden auch die Kosten und der Aufwand des Einsatzes der unterschiedlichen Wärmedämmstoffe und Mischungen bewertet. Bzgl. Dämmstoffkosten und Dämmwirkung sind expandierte Perlite für Luftdrücke $\leq 1 \text{ mbar}$ von Vorteil, während bei Luftdrücken $> 1 \text{ mbar}$ Mischungen aus grobkörnigem expandiertem Perlit und unbehandelter pyrogener Kieselsäure z. T. bessere Ergebnisse erzielen können. Allerdings ist mit der Herstellung der Mischungen ein zusätzlicher Aufwand verbunden, der sich in zusätzlichen Kosten niederschlagen wird. Zudem sind mit den in der vorliegenden Arbeit betrachteten Wärmedämmstoffen für Luftdrücke $< 1 \text{ mbar}$ deutlich geringere effektive Wärmeleitfähigkeiten zu erreichen, weshalb auf Basis der Dämmstoffkosten, Dämmwirkung sowie der benötigten Dämmdicke, reine expandierte Perlite hoher Dichte von Vorteil sind, wenn sich diese Luftdrücke erreichen und für einen hinreichend langen Zeitraum aufrechterhalten lassen.

Als allgemeiner Ansatz für die Modellierung der effektiven Wärmeleitfähigkeit aller Wärmedämmstoffe wurde das Superpositionsprinzip gewählt. Dabei werden die in den untersuchten Wärmedämmstoffen auftretenden Wärmetransportmechanismen Luftwärmeleitung, Festkörperwärmeleitung, die Kopplung aus Luft- und Festkörperwärmeleitung (Kopplungseffekt) und Wärmestrahlung als parallele Wärmewiderstände definiert. Daher können die Kehrwerte dieser Wärmewiderstände als Wärmeleitfähigkeiten zu einer effektiven Wärmeleitfähigkeit aufaddiert werden.

Für die analytische Modellierung der effektiven Wärmeleitfähigkeit expandierter Perlite konnte teilweise auf bereits existierende Modelle einzelner Wärmetransportmechanismen als Basis zurückgegriffen werden, wobei jeweils die im Rahmen der Arbeit ermittelten Stoffdaten eingingen. Mit Hilfe der Stoffwerte und Messungen der effektiven Wärmeleitfähigkeit konnte so u. a. eine prädiktive Funktion der mittleren Porengröße zwischen den Perlit-Körnern abgeleitet werden. Das prädiktive Modell der Festkörper-Wärmeleitfähigkeit wurde vollständig auf Basis der Messwerte gebildet. Für den Kopplungseffekt wurde ein neuartiges und prädiktives Modell entwickelt, welches ebenfalls aus Messwerten abgeleitet wurde und die Abhängigkeit des Kopplungseffekts vom volumengewichtet gemittelten Korndurchmesser abbildet. Für das vollständig prädiktive Modell der effektiven Wärmeleitfähigkeit expandierter Perlite müssen vorab lediglich dieser volumengewichtet gemittelte Korndurchmesser, die mittlere Korndichte sowie die Dichte der Schüttung ermittelt werden. Diese Größen sind einfach und kostengünstig bestimmbar, zumal der volumengewichtet gemittelte Korndurchmesser meist vom Hersteller angegeben wird. Bei präziser Kenntnis der Stoffgrößen ist die Übereinstimmung des Modells mit Messwerten sehr hoch. Abweichungen können bei geringen Luftdrücken und geringen Dichten besonders durch abweichende dichtespezifische Extinktionskoeffizienten entstehen. Bei Luftdrücken von 1 mbar ist das Modell besonders sensitiv bzgl. Abweichungen der mittleren Porengröße zwischen den Perlitkörnern und der mittleren Korndichte, da letztere u. a. in die Berechnung der mittleren Porengröße zwischen den Perlitkörnern eingeht. Bei Luftdrücken nahe 1000 mbar ist das Modell insbesondere sensitiv bzgl. des volumengewichtet gemittelten Korndurchmessers, der das Modell des Kopplungseffekts stark beeinflusst. Das Modell und die Methoden zur Bestimmung der Stoffparameter sind besonders gut geeignet für expandierte Perlite mit vollständig erhaltenen Körnern und nicht geeignet für gemahlene Perlite. Die gesetzten Ziele wurden mit dem entwickelten analytischen Modell der effektiven Wärmeleitfähigkeit vollständig erreicht. Damit steht beispielsweise dem Anwender oder Hersteller von doppelwandigen, vakuumwärmegeprägten Warmwasserspeichern ein Werkzeug zur Verfügung, um die effektive Wärmeleitfähigkeit von expandierten Perliten über einen großen Luftdruck- und Temperaturbereich, ohne entsprechende Messungen, vergleichsweise einfach vorherzusagen.

Mit Hilfe des neu entwickelten Modells lässt sich u. a. auch diejenige Dichte expandierter Perlite bestimmen, bei welcher die effektive Wärmeleitfähigkeit bei sehr geringen Luftdrücken am geringsten ist. Diese optimale Dichte ist temperaturabhängig und liegt beispielsweise bei einer

Mitteltemperatur der Wärmedämmung von 50 °C und einem dichtespezifischen Extinktionskoeffizienten von 26,8 m²/kg bei 277 kg/m³. Der Wert 26,8 m²/kg entspricht dem arithmetischen Mittel der in der vorliegenden Arbeit ermittelten dichtespezifischen Extinktionskoeffizienten expandierter Perlite.

Auch für die analytische Modellierung der effektiven Wärmeleitfähigkeit von Mischungen aus expandiertem Perlit und pyrogener Kieselsäure konnte ein vollständig prädiktives Modell entwickelt werden, allerdings nur für den konkret verwendeten expandierten Perlit zusammen mit einer der untersuchten pyrogenen Kieselsäuren. Alle dafür notwendigen Stoffgrößen wurden in der vorliegenden Arbeit bestimmt. Für Mischungen aus diesen Stoffen liefert es eine sehr hohe Übereinstimmung mit Messwerten bei allen untersuchten Luftdrücken und Mitteltemperaturen. Somit gilt auch das oben benannte Ziel bzgl. der Entwicklung eines Modells der effektiven Wärmeleitfähigkeit für Mischungen aus expandierten Perliten und pyrogener Kieselsäure als erreicht. Größere Abweichungen des Modells zu Messwerten können sich insbesondere dann ergeben, wenn sich die Dichten der Dämmstoffschüttungen stark von denjenigen unterscheiden, die in der vorliegenden Arbeit für die Mischungen erreicht wurden.

Mit diesem Modell können Hersteller oder Anwender von doppelwandigen vakuumwärmegeprägten Warmwasserspeichern nun beispielsweise berechnen, bei welchem Mischungsverhältnis für die Anwendungstemperatur und den angestrebten Luftdruck die geringste effektive Wärmeleitfähigkeit erreicht werden kann. Auch ein Vergleich der effektiven Wärmeleitfähigkeiten der Mischungen mit reinen expandierten Perliten oder pyrogenen Kieselsäuren ist nun für einen weiten Luftdruck- und Temperaturbereich möglich.

11.2 Ausblick

Die Unsicherheiten des neu entwickelten Modells zur Berechnung der effektiven Wärmeleitfähigkeit expandierter Perlite könnten durch den Einbezug von Messwerten weiterer Stoffe zur Bestimmung der enthaltenen empirischen Funktionen verringert werden. Auch der Einfluss einer Variation der Verdichtung der Schüttung, insbesondere auf den Kopplungseffekt, könnte in Zukunft untersucht werden. Zudem hat sich gezeigt, dass die Methode der Flüssigkeitsverdrängung zur Bestimmung der mittleren Korndichte bei expandierten Perliten mit einem großen Anteil an gebrochenen Körnern zu einer starken Überbestimmung dieser Stoffgröße führt. Dies kann zu vergleichsweise hohen Abweichungen des Modells zu den Messwerten der effektiven Wärmeleitfähigkeiten führen. Um das Modell auch für solche expandierten Perlite anwendbar zu machen, muss eine möglichst einfache und kostengünstige alternative Methode zur Bestimmung der mittleren Korndichte identifiziert werden. Für gemahlene expandierte Perlite ist das Modell nicht geeignet. Diese neigen stärker zu Setzungen als ungemahlene Perlite, weshalb sie in der vorliegenden Arbeit nicht berücksichtigt wurden. Für gemahlene Perlite müsste u. a. ein neuer Modellansatz bzgl. des Kopplungseffekts entwickelt werden.

Das Modell der effektiven Wärmeleitfähigkeit von Mischungen aus expandiertem Perlit und pyrogener Kieselsäure ist bisher nur für einen Perlittyp und zwei pyrogene Kieselsäuren gültig. Für eine Erweiterung der enthaltenen empirischen Funktionen auf beliebige Typen der beiden Stoffe, müssten weiterer Mischungen bzgl. ihrer effektiven Wärmeleitfähigkeiten bei unterschiedlichen Luftdrücken und Mitteltemperaturen systematisch vermessen werden. Auch eine Übertragbarkeit der Messergebnisse der Mischungen des expandierten Perlits mit der hydrophobierten pyrogenen Kieselsäure auf Mischungen mit dem unbehandelten Typ wurde bisher, aufgrund der sehr ähnlichen effektiven Wärmeleitfähigkeiten der Reinstoffe, lediglich angenommen, jedoch nicht validiert.

Zur Absenkung der effektiven Wärmeleitfähigkeit der oben genannten Mischungen hat sich der Einsatz des Strahlungshemmers SiC in einem Beispiel als sehr effektiv gezeigt. Daher könnten in Zukunft systematische Untersuchungen zum idealen Strahlungshemmer und Mischungsverhältnis in Abhängigkeit von der Mitteltemperatur anhand von Messungen der effektiven Wärmeleitfähigkeit durchgeführt werden. Auch die Erweiterung des Modells auf die Beimischung von Strahlungshemmern wäre dann möglich.

Um in Mischungen mit expandierten Perliten kostengünstigere unbehandelte pyrogene Kieselsäuren reproduzierbar einsetzen zu können, bedarf es kostengünstiger Methoden, um große Agglomerate zu verkleinern oder deren Bildung zu verhindern. Auch die Auswirkung der Agglomeratgrößen auf die luftdruckabhängige effektive Wärmeleitfähigkeit von Mischungen mit expandierten Perliten könnte untersucht werden. Zudem sind für einen einfachen Herstellungsprozess einfache, kostengünstige und staubarme Methoden zur Mischung von Wärmedämmstoffen zu identifizieren.

Wenn Luftdrücke $< 0,1$ mbar erreicht und über einen langen Zeitraum gehalten werden können, bieten feinkörnige expandierte Perlite hoher Dichte sehr geringe effektive Wärmeleitfähigkeiten. Dabei entfielen der Aufwand der Herstellung von Mischungen. Allerdings erhöht sich der Aufwand für die Evakuierung gegenüber den Mischungen, die, insbesondere nach Beimischung von Strahlungshemmern, bereits bei Luftdrücken zwischen 1 mbar und 10 mbar vergleichsweise geringe effektive Wärmeleitfähigkeiten erreichen können. Um die Evakuierung zu beschleunigen, werden derzeit vom IGTE der Universität Stuttgart gemeinsam mit der Firma Sirch Tankbau-Tankservice Speicherbau im Rahmen des Forschungsprojekts StoEx2⁷ geeignete Methoden untersucht.

⁷ Vollständiger Titel des Verbundprojekts: "Weiterentwicklung, Prüfung und Demonstration großvolumiger, preiswerter Warmwasserspeicher mit hocheffizienter Wärmedämmung zur Außenaufstellung"; Projektlaufzeit: 01.10.2019 – 30.09.2022.

12 Literatur und Normen

Literatur

- [1] United Nations - Framework Convention on Climate Change, „Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change: Kyoto-Protokoll“, 10. Dez. 1997.
- [2] European Commission, „Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council establishing the framework for achieving climate neutrality and amending Regulation (EU) 2018/1999 (European Climate Law): Green Deal“, 4. März 2020.
- [3] Bundestag BRD, „Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz – EEG) sowie zur Änderung des Energiewirtschaftsgesetzes und des Mineralölsteuergesetzes: EEG“, 31. März 2000.
- [4] Bundestag BRD, „Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung - EnEV)“, 16. Nov. 2001.
- [5] Bundestag BRD, „Gesetz zur Förderung Erneuerbarer Energien im Wärmebereich (Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz - EEWärmeG)“, 7. Aug. 2008.
- [6] AG Energiebilanzen e.V., „Anwendungsbilanzen zur Energiebilanz Deutschland: Endenergieverbrauch nach Energieträgern und Anwendungszwecken“, AG Energiebilanzen e.V., Berlin, Nov. 2019.
- [7] M. Schmuck, „Wirtschaftliche Umsetzbarkeit saisonaler Wärmespeicher“. Dissertation, Technische Universität Dresden, Dresden, 2016.
- [8] M. Benner, B. Mahler, D. Mangold, T. Schmidt, M. Schulz, H. Seiwald, „Forschungsbericht zum BMBF-Vorhaben Solar unterstützte Nahwärmeversorgung mit und ohne Langzeit-Wärmespeicher: (September 1994 bis Oktober 1998)“, Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik, Universität Stuttgart, Stuttgart, 1999.
- [9] M. Benner et al., „Forschungsbericht zum BMBF/BMWA-Vorhaben Solar unterstützte Nahwärmeversorgung mit und ohne Langzeit-Wärmespeicher: (November 1998 bis Januar 2003)“, Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik, Universität Stuttgart, Stuttgart, 2003.
- [10] M. Bodmann, D. Mangold, J. Nußbicker, S. Raab, A. Schenke, T. Schmidt, „Forschungsbericht zum BMWA/BMU-Vorhaben Solar unterstützte Nahwärme und Langzeit-Wärmespeicher: (Februar 2003 bis Mai 2005)“, Solar- und Wärmetechnik Stuttgart (SWT), Stuttgart, 2005.
- [11] D. Bauer et al., „Forschungsbericht zum BMU-Vorhaben Solar unterstützte Nahwärme und Langzeit-Wärmespeicher: (Juni 2005 bis Juli 2008)“, Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik, Universität Stuttgart, Stuttgart, 2008.

-
- [12] D. Bauer, R. Marx, J. Nußbicker-Lux, F. Ochs, H. Drück, W. Heidemann, „Forschungsbericht zum BMU-Vorhaben Solarthermie2000plus: Wissenschaftlich-technische Begleitung des Förderprogramms Solarthermie2000plus zu solar unterstützter Nahwärme und Langzeit-Wärmespeicherung: (August 2008 bis September 2012)“, Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik, Universität Stuttgart, Stuttgart, 2013.
- [13] T. Leukefeld, „Alles dreht sich um die Sonne: Vier Komponenten für eine hohe solare Deckung“, *EnEV aktuell*, Nr. 2, S. 10–13, 2013.
- [14] M. Gerschitzka, S. Lang, M. Rieder, M. Sirch, R. Marx, D. Bauer, H. Drück, „Abschlussbericht zum BMWI-Forschungsprojekt Entwicklung großvolumiger, preiswerter Warmwasserspeicher mit hocheffizienter Dämmung zur Außenaufstellung: Förderkennzeichen 0325992A+B“. Laufzeit des Forschungsprojekts: 01.01.2013-31.12.2015, Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik, Universität Stuttgart, Stuttgart, 2016.
- [15] EnergieAgentur.NRW GmbH, „Kraft-Wärme-Kopplung in der Praxis: Beispiele zum wirtschaftlichen und ökologischen Einsatz“, Düsseldorf, Sep. 2016.
- [16] A. C. Christidis, „Thermische Speicher zur Optimierung des Betriebs von Heizkraftwerken in der Fernwärmeversorgung“. Dissertation, Technische Universität Berlin, Berlin, 2019.
- [17] A. Bloess, W.-P. Schill und A. Zerrahn, „Power-to-heat for renewable energy integration: A review of technologies, modeling approaches, and flexibility potentials“, *Applied Energy*, Jg. 212, S. 1611–1626, 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2017.12.073.
- [18] O. Dumont, G. F. Frate, A. Pillai, S. Lecompte, M. de paepe und V. Lemort, „Carnot battery technology: A state-of-the-art review“, *Journal of Energy Storage*, Jg. 32, 2020, Art. no. 101756, doi: 10.1016/j.est.2020.101756.
- [19] T. Beikircher, F. Buttinger, M. Demharter, F. Herzog, M. Konrad, M. Reuß, „Abschlussbericht Superisolierter Heißwasser-Langzeitwärmespeicher: Fkz: 0325964A“, ZAE Bayern, Garching, 2013.
- [20] F. Ochs, W. Heidemann und H. Müller-Steinhagen, „Effective thermal conductivity of moistened insulation materials as a function of temperature“, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Jg. 51, S. 539–552, 2008, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2007.05.005.
- [21] K. Häußler und E. Schlegel, *Calciumsilicat-Wärmedämmstoffe*, 1. Aufl. Freiberg: Techn. Univ. Bergakad.; Akad. Buchh., 1995.
- [22] H. Reiss, „Strahlungstransport in dispersen nicht-transparenten Medien“. Habilitationsschrift, Zentrales Forschungslabor der Brown, Boveri & Cie AG, Heidelberg, 1985.
- [23] E. H. Kennard, *Kinetic theory of gases*. New York und London: McGraw-Hill Book Co., 1938.
- [24] K. Jousten, Hg., *Handbuch Vakuumtechnik*, 12. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2018.
-

-
- [25] M. v. Smoluchowski, „Zur Theorie der Wärmeleitung in verdünnten Gasen und der dabei auftretenden Druckkräfte“, *Annalen der Physik*, Jg. 340, Nr. 10, S. 983–1004, 1911, doi: 10.1002/andp.19113401008.
- [26] M. Knudsen, „Die molekulare Wärmeleitung der Gase und der Akkommodationskoeffizient“, *Annalen der Physik*, Jg. 339, Nr. 4, S. 593–656, 1911, doi: 10.1002/andp.19113390402.
- [27] A. Frohn, *Einführung in die kinetische Gastheorie: Studienbuch für Studierende d. Ingenieurwiss., d. Physik u.d. physikal. Chemie*, 2. Aufl. Wiesbaden: Aula-Verl., 1988.
- [28] VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen, Hg., *VDI-Wärmeatlas*, 11. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag GmbH, 2013.
- [29] N. Wakao und D. Vortmeyer, „Pressure dependency of effective thermal conductivity of packed beds“, *Chemical Engineering Science*, Jg. 26, S. 1753–1765, 1971, doi: 10.1016/0009-2509(71)86063-3.
- [30] K. Schwimm, „Experimentelle und theoretische Untersuchungen zur gasdruckabhängigen Wärmeleitfähigkeit von porösen Materialien“. Dissertation, Julius-Maximilians-Universität Würzburg, Würzburg, 2016.
- [31] C. Kittel, *Einführung in die Festkörperphysik*, 13. Aufl. München, Wien: Oldenbourg, 2002.
- [32] G. P. Srivastava, „Lattice Thermal Conduction Mechanism in Solids“ in *High Thermal Conductivity Materials*, S. L. Shindé und J. S. Goela, Hg., New York, NY, USA: Springer Science+Business Media Inc, 2006, S. 1–35, doi: 10.1007/0-387-25100-6_1.
- [33] H. Schwab, „Vakuumisolationspaneele-Gas- und Feuchteintrag sowie Feuchte- und Wärmetransport“. Dissertation, Julius-Maximilians-Universität Würzburg, Würzburg, 2004.
- [34] J. Fricke, H. Schwab und U. Heinemann, „Vacuum Insulation Panels – Exciting Thermal Properties and Most Challenging Applications“, *International Journal of Thermophysics*, Jg. 27, Nr. 4, S. 1123–1139, 2006, doi: 10.1007/s10765-006-0106-6.
- [35] M. Wiener, „Synthese und Charakterisierung Sol-Gel-basierter Kohlenstoff-Materialien für die Hochtemperatur-Wärmedämmung“. Dissertation, Universität Würzburg, Würzburg, 2010.
- [36] G. Reichenauer, U. Heinemann und H.-P. Ebert, „Relationship between pore size and the gas pressure dependence of the gaseous thermal conductivity“, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, Jg. 300, S. 204–210, 2007, doi: 10.1016/j.colsurfa.2007.01.020.
- [37] J.-J. Zhao, Y.-Y. Duan, X.-D. Wang und B.-X. Wang, „Effects of solid–gas coupling and pore and particle microstructures on the effective gaseous thermal conductivity in aerogels“, *Journal of Nanoparticle Research*, Jg. 14, 2012, Art. no. 1024, doi: 10.1007/s11051-012-1024-0.
-

-
- [38] P. Zehner und E. U. Schlünder, „Wärmeleitfähigkeit von Schüttungen bei mäßigen Temperaturen“, *Chemie Ingenieur Technik*, Jg. 42, Nr. 14, S. 933–941, 1970, doi: 10.1002/cite.330421408.
- [39] P. Zehner und E. U. Schlünder, „Einfluß der Wärmestrahlung und des Druckes auf den Wärmetransport in nicht durchströmten Schüttungen“, *Chemie Ingenieur Technik*, Jg. 44, Nr. 23, S. 1303–1308, 1972, doi: 10.1002/cite.330442305.
- [40] R. Bauer und E. U. Schlünder, „Effective radial thermal conductivity of packings in gas flow. Part II. Thermal conductivity of packing fraction without gas flow“, *International Chemical Engineering*, Jg. 18, S. 189–204, 1978.
- [41] H. D. Baehr und K. Stephan, *Wärme- und Stoffübertragung*, 10. Aufl. Berlin: Springer Vieweg, 2019.
- [42] British Broadcasting Corporation und Faraday Museum, *Dewar vacuum flask*. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.bbc.co.uk/ahistoryoftheworld/objects/ueq9AH6iTwqox0tmEW3fFg> (Zugriff am: 17. Februar 2021).
- [43] R. Burger, „Double walled vessel with a space for vacuum between the walls,“ U.S. patent US872795A. USA, Dez 3, 1907.
- [44] Sirch Tankbau-Tankservice, „Sirch - Vacutherm(R): Steckbrief“, Kaufbeuren, 2019.
- [45] M. Erb et al., „Vacuum Insulation Panels: Study on VIP-components and Panels for Service Life Prediction of VIP in Building Applications (Subtask A)“. High Performance Thermal Insulation IEA/ECBCS Annex 39, Bern, Schweiz, Sep. 2005.
- [46] W. Sorge, „Vakuumdämmung im Bauwesen: Block II Grundlagen der VIP-Technologie“. Nürnberg, Aug. 2009.
- [47] R. Caps et al., „Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben Entwicklung hochdichter Hüllsysteme zum Einsatz preiswerter Füllmaterialien in Vakuumisolationspaneelen für das Bauwesen: HOSYMA“, va-Q-tec AG, Würzburg, 2010.
- [48] R. Caps und J. Fricke, „Thermal Conductivity of Opacified Powder Filler Materials for Vacuum Insulations“, *International Journal of Thermophysics*, Jg. 21, Nr. 2, S. 445–452, 2000, doi: 10.1023/A:1006691731253.
- [49] J. Fricke, „Von der thermischen Isolation zur Vakuumsuperisolation“, *Physik in unserer Zeit*, Jg. 15, Nr. 2, S. 42–50, 1984.
- [50] C. Sprengard und M. H. Spitzner, „Forschungsbericht Optimierung der energetischen Eigenschaften und der Wirtschaftlichkeit von VIP-Paneelen durch die optimale Kombination von Kieselsäure-, Mineralfaser- und EPS-Dämmstoff“, Forschungsinstitut für Wärmeschutz e.V. München, Gräfeling, 31. Jan. 2011.
- [51] J. E. Fesmire, S. D. Augustynowicz, Z. F. Nagy, S. J. Sojourner und D. L. Morris, „Vibration and Thermal Cycling Effects on Bulk-fill Insulation Materials for Cryogenic Tanks“, *AIP Conference Proceedings*, Jg. 823, Nr. 1, S. 1359–1366, 2006, Art. no. 1359, doi: 10.1063/1.2202556.
-

-
- [52] L. Edward und L. Filip, „Influence of vacuum level on insulation thermal performance for LNG cryogenic road tankers“, *MATEC Web of Conferences*, Jg. 240, 2018, Art. no. 01019, doi: 10.1051/mateconf/201824001019.
- [53] R. M. Buil und D. V. Hernando, „Comparison of Heat Insulations for Cryogenic Tankers Using Analytical and Numerical Analysis“, *Advances in Mechanical Engineering*, Jg. 5, 2013, Art. no. 421681, doi: 10.1155/2013/421681.
- [54] M. G. Kaganer, *Thermal insulation in cryogenic engineering*. Jerusalem: Israel Program for Scientific Translations Ltd., 1969.
- [55] H.S. Kim, S. Jeong und S.H. Jeong, „Experimental research about thermal insulation performance of various powder insulation methods“, *Progress in Superconductivity and Cryogenics / Journal of the Korea Institute of Applied Superconductivity and Cryogenics*, Jg. 12, Nr. 3, 2010.
- [56] L. Jin, J. Park, C. Lee und S. Jeong, „Prediction of the Effective Thermal Conductivity of Powder Insulation“, *Physics Procedia*, Jg. 67, S. 970–975, 2015, doi: 10.1016/j.phpro.2015.06.164.
- [57] J. P. Sass, J. E. Fesmire, Z. F. Nagy, S. J. Sojourner, D. L. Morris und S. D. Augustynowicz, „Thermal performance comparison of glass microsphere and perlite insulation systems for liquid hydrogen storage tanks“, *AIP Conference Proceedings*, Jg. 985, S. 1375–1382, 2008, doi: 10.1063/1.2908497.
- [58] J. E. Fesmire, S. D. Augustynowicz, S. Rouanet, „Aerogel beads as cryogenic thermal insulation system“, *AIP Conference Proceedings*, Jg. 613, S. 1541–1548, 2002, doi: 10.1063/1.1472188.
- [59] B. E. Scholtens, J. E. Fesmire, J. P. Sass, S. D. Augustynowicz und K. W. Heckle, „Cryogenic Thermal Performance Testing of Bulk-Fill and Aerogel Insulation Materials“, *Advances in Cryogenic Engineering*, Jg. 985, S. 152–159, 2008, doi: 10.1063/1.2908517.
- [60] A. Deimling, „Wärmedämmung von Vakuum-Stahlmantel-Fernheizrohren“. Dissertation, Universität Dortmund, Dortmund, 1983.
- [61] A. Deimling, A. Steiff, P.-M. Weinspach, „Vakuum-Wärmedämmung bei Stahlmantel-Fernheizrohren“, *Wärme- und Stoffübertragung*, Jg. 18, 129-140, 1984.
- [62] M. Demharter, „Heat Transport in Evacuated Perlite Powder Insulations and Its Application in Long-Term Hot Water Storages“. Masterarbeit, ZAE Bayern, TU München, Garching, 2011.
- [63] T. Beikircher, „Vakuumsuperisolation (VSI): Stand der Forschung und Entwicklung zu höchsteffizienter Dämmung und Wärmespeicherung im Gebäudebereich sowie in der energieeffizienten Industrie“. Karlsruhe, 29. März 2017.
- [64] T. Beikircher und M. Demharter, „Heat Transport in Evacuated Perlite Powders for Super-Insulated Long-Term Storages up to 300 °C“, *Journal of Heat Transfer*, Jg. 135, Nr. 5, 2013, Art. no. 051301, doi: 10.1115/1.4023351.
-

-
- [65] J. Kim und T.-H. Song, „Vacuum insulation properties of glass wool and opacified fumed silica under variable pressing load and vacuum level“, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Jg. 64, S. 783–791, 2013, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.05.012.
- [66] M. Davraz, H. C. Bayrakçi und Y. Yusufoglu, „The Effect of Fiber, Opacifier Ratios and Compression Pressure on the Thermal Conductivity of Fumed Silica Based Vacuum Insulation Panels“, *Arabian Journal for Science and Engineering*, Jg. 41, Nr. 11, S. 4263–4272, 2016, doi: 10.1007/s13369-016-2031-8.
- [67] A. Berge, „Assessment of novel applications for nano-porous thermal insulation in district heating pipes and building walls“. Dissertation, Chalmers University of Technology, Göteborg, Schweden, 2016.
- [68] B. Chang, L. Zhong und M. Akinc, „Low cost composites for vacuum insulation core material“, *Vacuum*, Jg. 131, S. 120–126, 2016, doi: 10.1016/j.vacuum.2016.05.027.
- [69] J. Hiemeyer und R. Caps, „Verfahren zur Herstellung eines folienumhüllten Vakuumdämmkörpers,“ DE-Patent DE102005045726A1. Deutschland, Apr 5, 2007.
- [70] M. Alam, H. Singh, S. Brunner und C. Naziris, „Experimental characterisation and evaluation of the thermo-physical properties of expanded perlite—Fumed silica composite for effective vacuum insulation panel (VIP) core“, *Energy and Buildings*, Jg. 69, S. 442–450, 2014, doi: 10.1016/j.enbuild.2013.11.027.
- [71] M. Alam, „Development of vacuum insulation panel with low cost core material“. Dissertation, Brunel University London, London, 2015.
- [72] E. Tsotsas und H. Martin, „Thermal conductivity of packed beds: A review“, *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, Jg. 22, Nr. 1, S. 19–37, 1987, doi: 10.1016/0255-2701(87)80025-9.
- [73] O. Krischer und K. Kröll, *Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1956.
- [74] O. Krischer, W. Kast und K. Kröll, *Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik*, 3. Aufl. Berlin: Springer-Verlag, 1992.
- [75] S. Parzinger, „Analytische Modellierung der temperatur- und gasdruckabhängigen effektiven Wärmeleitfähigkeit von Pulvern“. Dissertation, Technische Universität München, München, 2014.
- [76] K. Raed, „Investigation of Knudsen and gas-atmosphere effects on effective thermal conductivity of porous media“. Dissertation, Technische Universität Bergakademie Freiberg, Freiberg, 2013.
- [77] S. Q. Zeng, A. J. Hunt, W. Cao und R. Greif, „Pore Size Distribution and Apparent Gas Thermal Conductivity of Silica Aerogel“, *Journal of Heat Transfer*, Jg. 116, Nr. 3, S. 756–759, 1994, doi: 10.1115/1.2910933.
- [78] H. Hertz, „Ueber die Berührung fester elastischer Körper“, *Journal für die reine und angewandte Mathematik*, Jg. 92, S. 156–171, 1882.
-

-
- [79] X. Lu, O. Nilsson, J. Fricke und R. W. Pekala, „Thermal and electrical conductivity of monolithic carbon aerogels“, *Journal of Applied Physics*, Jg. 73, Nr. 2, S. 581–584, 1993, doi: 10.1063/1.353367.
- [80] H. W. Russell, „Principles of heat flow in porous insulators“, *Journal of the American Ceramic Society*, Jg. 18, S. 1–5, 1935, doi: 10.1111/j.1151-2916.1935.tb19340.x.
- [81] K. Swimm, G. Reichenauer, S. Vidi und H.-P. Ebert, „Gas Pressure Dependence of the Heat Transport in Porous Solids with Pores Smaller than 10 μm “, *International Journal of Thermophysics*, Jg. 30, Nr. 4, S. 1329–1342, 2009, doi: 10.1007/s10765-009-0617-z.
- [82] S. Rosseland, *Astrophysik auf Atomtheoretischer Grundlage*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1931.
- [83] A. C. Meisinger, „Mineral Facts and Problems: 1980 Edition“, United States Government Printing Office Bulletin 671, 1980.
- [84] A. G. Celik, A. M. Kilic, G. O. Cakal, „Expanded perlite aggregate characterization for use as a lightweight construction raw material“, *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, Jg. 49, Nr. 2, S. 685–700, 2013, doi: 10.5277/PPMP130227.
- [85] T. Dunham, „Studies of Obsidian as a Material for Making Astronomical Mirrors“, Office of Naval Research, New York, 1955.
- [86] Perlite Institute, *Perlite Institute - A Worldwide Association of Perlite Professionals*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.perlite.org/> (Zugriff am: 30. Januar 2021).
- [87] Stauß Perlite GmbH, „Datenblatt "Technoperl(R)““, 12. Sep. 2005.
- [88] Knauf Aquapanel GmbH, „Bereichert Ihr Produkt: Der brillante Leichtzuschlag, made in Germany“, Dortmund, 4. Feb. 2017.
- [89] Knauf Aquapanel GmbH, „Volite 200: Vorläufiges Technisches Merkblatt“, Dortmund, Apr. 2013.
- [90] Knauf Aquapanel GmbH, „Filterperlit D12: Technisches Merkblatt“, Dortmund, 2007.
- [91] Wacker Chemie AG, „HDK(R): Da steckt mehr drin als man denkt: HDK® – Pyrogene Kieselsäure“, München, Aug. 2010.
- [92] Evonik Industries AG, BL Silica, „Technical Overview: AEROSIL® - Pyrogene Kieselsäure“, Hanau-Wolfgang, März 2017.
- [93] R. Blieninger Anwendungstechnik Wacker Chemie AG, "Stoffdaten und Angebot", E-Mail, Mai. 2013.
- [94] Wacker Chemie AG, „Technical data sheet for HDK® T30“, München, 28. Feb. 2012.
- [95] S. Brunauer, P. H. Emmett und E. Teller, „Adsorption of Gases in Multimolecular Layers“, *Journal of the American Chemical Society*, Jg. 60, Nr. 2, S. 309–319, 1938, doi: 10.1021/ja01269a023.
- [96] Wacker Chemie AG, „HDK® H30 Pyrogene Kieselsäure: Synthetische, hydrophobe, amorphe, flammenhydrolytisch hergestellte Kieselsäure.“, München, 20. Okt. 2020.
-

-
- [97] R. H. Müller und R. Schuhmann, *Teilchengrößenmessung in der Laborpraxis: Kurzes Lehrbuch mit Einführung in die Theorie: Photonenkorrelationsspektroskopie (PCS) - Laserdiffraktometrie (LD) - Coulter-Messprinzip (CM) und Meßbeispielen aus dem Schwerpunktbereich der Koaleszenzuntersuchungen: - Turbidimetrie vs. Coulter-Counter-Assay*. Stuttgart: WVG Wiss. Verl.-Ges, 1996.
- [98] G. Crolly, „Grundlagen der Laserstreuung – eine Einführung“, www.analytik-news.de, Ober-Ramstadt, 23. Juni 2016.
- [99] D. Moog, „Messung der Partikelgrößenverteilung von Pulvern mit statischer Laserbeugungsanalyse: Partikelanalyse von Pulvermischungen des Größenbereichs oberhalb 1µm, sowie von pulverförmigen Reinsubstanzen unterhalb 1µm mit erweitertem optischem Modell“, www.analytik-news.de, Ober-Ramstadt, 28. Apr. 2016.
- [100] M. Lucka, „Siebanalyse – unterschiedliche Siebmethoden für vielfältige Anwendungen“, www.analytik-news.de, Ober-Ramstadt, 24. Aug. 2017.
- [101] Stauß Perlite GmbH, „Typische Siebanalyse Technoperl“, St. Pölten, Österreich, 2005.
- [102] J. E. Ericson, A. Makishima, J. D. Mackenzie und R. Berger, „Chemical and physical properties of obsidian: a naturally occurring glass“, *Journal of Non-Crystalline Solids*, Jg. 17, Nr. 1, S. 129–142, 1975, doi: 10.1016/0022-3093(75)90120-9.
- [103] K. Rübner, T. Fritz und F. Jacobs, „Ringversuch zur Quecksilberporosimetrie an Zementmörtel“, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin, Forschungsbericht 250, Nov. 2001.
- [104] D. Klank, „Gaspyknometrie zur Bestimmung von Feststoffdichten und anderer Parameter“ in *Produktgestaltung in der Partikeltechnologie, Band 3: 3. Symposium Partikeltechnologie, 21. - 23. Juni 2006, Fraunhofer ICT, Pfinztal*, U. Teipel, Hg., Stuttgart: Fraunhofer IRB-Verl., 2006, S. 509–522.
- [105] C. Reichenbach, „Dichtebestimmung poröser und pulverförmiger Festkörper“, *Quantachrome Partikelwelt*, Jg. 16, S. 23–27, 2015.
- [106] H.-P. Ebert, „Funktionsmaterialien für Wärmedämmung“, *Symposium „Tendenzen in der Materialentwicklung und die Bedeutung von Wärmetransporteigenschaften“*, 22. März 2007.
- [107] K. Irrgang, „Zur Temperaturmessung elektrischer Berührungsthermometer“. Habilitationsschrift, TU Bergakademie Freiberg, Freiberg, 2004.
- [108] F. Bernhard, Hg., *Technische Temperaturmessung: Physikalische und meßtechnische Grundlagen, Sensoren und Meßverfahren, Meßfehler und Kalibrierung*. Berlin: Springer-Verlag, 2004.
- [109] B. Choi, *Pulsewidth modulated DC-to-DC power conversion: Circuits, dynamics, and control designs*. Hoboken, N. J., USA: Wiley IEEE Press, 2013.
- [110] H. Bernstein, *Regelungstechnik: Theorie und Praxis mit WinFACT und Multisim*, 2. Aufl. Aachen: Elektor-Verlag, 2012.
-

- [111] T. Beier und P. Wurl, *Regelungstechnik: Basiswissen, Grundlagen, Beispiele*, 2. Aufl. München: Carl Hanser Verlag, 2015.
- [112] VACOM Vakuum Komponenten & Messtechnik GmbH, „Die kleine Fibel der Vakuum-Druckmessung“, Jena, 2011.
- [113] W. Umrath, „Grundlagen der Vakuumtechnik“, Leybold GmbH, Köln 00.200.02 Kat.-Nr. 199 90, 2016.
- [114] *Uncertainty of measurement — Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995)*, ISO/IEC GUIDE 98-3:2008, ISO IEC, 2008.
- [115] T. Mühl, *Elektrische Messtechnik: Grundlagen, Messverfahren, Anwendungen*, 6. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2020.
- [116] T. Bornath und G. Walter, *Messunsicherheiten – Anwendungen: Für das Physikalische Praktikum*, 1. Aufl. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2020.
- [117] *Keysight 34970A/34972A Messdatenerfassungs-/ Schaltsystem: Benutzerhandbuch*, 4. Aufl. Loveland, CO, USA: Keysight Technologies, Inc, 2014.
- [118] Pfeiffer Vacuum GmbH, „CMR 361, 1000 hPa F.S., DN 16 ISO-KF: Datenblatt“, Göttingen, 2021.
- [119] Pfeiffer Vacuum GmbH, „CMR 363, 10 hPa F.S., DN 16 ISO-KF: Datenblatt“, Göttingen, 2021.
- [120] NETZSCH Applikationslabor, "Wärmeleitfähigkeit von 2 Materialien", Prüfbericht 5772-U-17 (nicht veröffentlicht), 2017.
- [121] NETZSCH-Gerätebau GmbH, „Guarded Hot Plate GHP 456 Titan® und GHP 456 HT Titan®: Methode, Technik, Applikationen“, Selb, 2021.
- [122] P. W. Atkins, J. de Paula und R. Ludwig, *Kurzlehrbuch physikalische Chemie*, 4. Aufl. Weinheim: Wiley-VCH, 2008.
- [123] C. Vader Nordisk Perlite, "Siebanalyse Cryo 0015", E-Mail, Dez. 2020.
- [124] R. Lorentzen Nordisk Perlite, "Stoffdaten Fillocell 150", E-Mail, Nov. 2020.
- [125] S. Lang, M. Gerschitzka, D. Bauer und H. Drück, „Thermal Conductivity of Vacuum Insulation Materials for Thermal Energy Stores in Solar Thermal Systems“, *Energy Procedia*, Jg. 91, S. 172–181, 2016, doi: 10.1016/j.egypro.2016.06.196.
- [126] F. Ochs, „Abschlussbericht zum Vorhaben Weiterentwicklung der Erdbecken-Wärmespeichertechnologie“, Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik, Universität Stuttgart, Stuttgart, 2008.
- [127] D. Bauer, H. Drück, S. Lang, R. Marx, T. Plaz, „Forschungsbericht zum BMWi-Vorhaben Weiterentwicklung innovativer Technologien zur solaren Nahwärme und saisonalen Wärmespeicherung: Akronym „WinterSun““, Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik, Universität Stuttgart, Stuttgart, 2016.

Normen

- DIN 28403 Vakuumentchnik; Schnellverbindungen; Kleinflansch-Verbindungen
- DIN 66137-2 Bestimmung der Dichte fester Stoffe - Teil 2: Gaspyknometrie
- DIN 66165 Partikelgrößenanalyse - Siebanalyse
- DIN EN 12664 Wärmetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten -
Bestimmung des Wärmedurchlasswiderstandes nach dem Verfahren mit dem
Plattengerät und dem Wärmestrommessplatten-Gerät - Trockene und feuchte
Produkte mit mittlerem und niedrigem Wärmedurchlasswiderstand
- DIN EN 60751 Industrielle Platin-Widerstandsthermometer und Platin-Temperatursensoren
- EN ISO 8497 Wärmeschutz - Bestimmung der Wärmetransporteigenschaften im stationären
Zustand von Wärmedämmungen für Rohrleitungen
- ISO 15901-1 Bewertung der Porengrößenverteilung und Porosität von Feststoffen mittels
Quecksilberporosimetrie und Gasadsorption - Teil 1: Quecksilberporosimetrie
- ISO 2861 Vakuumentchnik - Abmessungen von Kleinflansch-Schnellverbindungen

13 Anhang

A1. Messwerte zur Ermittlung der dichtetpezifischen Extinktionskoeffizienten und Festkörper-Wärmeleitfähigkeiten

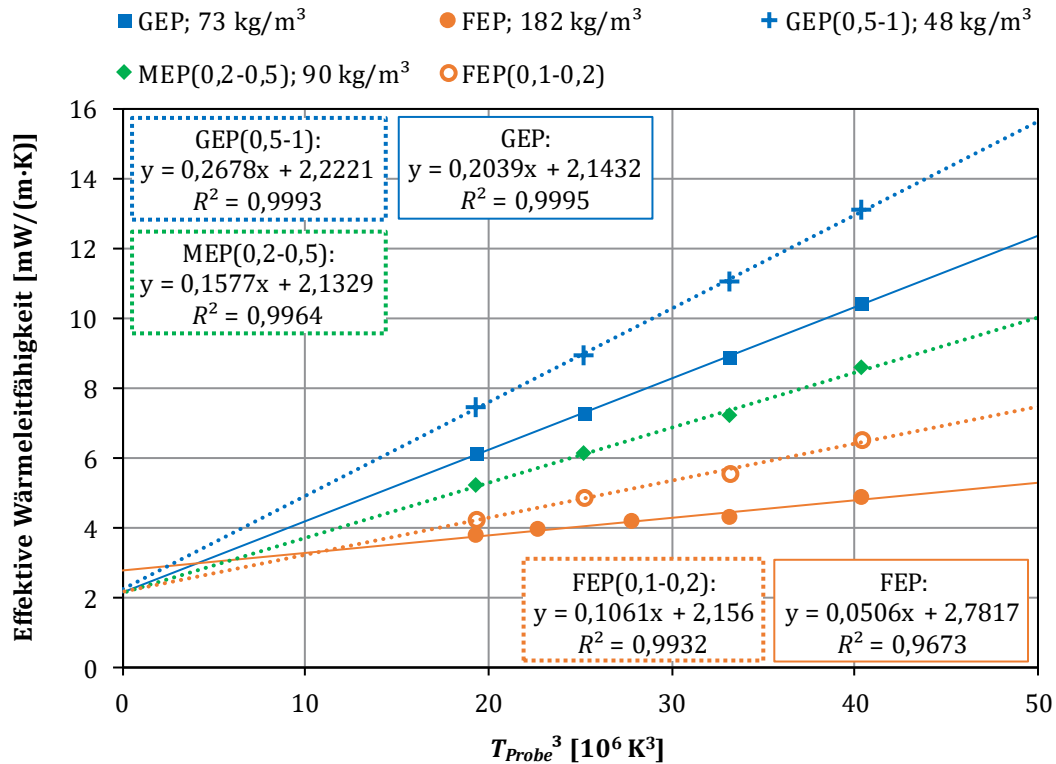


Abbildung 13-1: Messwerte zur Ermittlung der dichtetpezifischen Extinktionskoeffizienten und Festkörper-Wärmeleitfähigkeiten expandierter Perlite

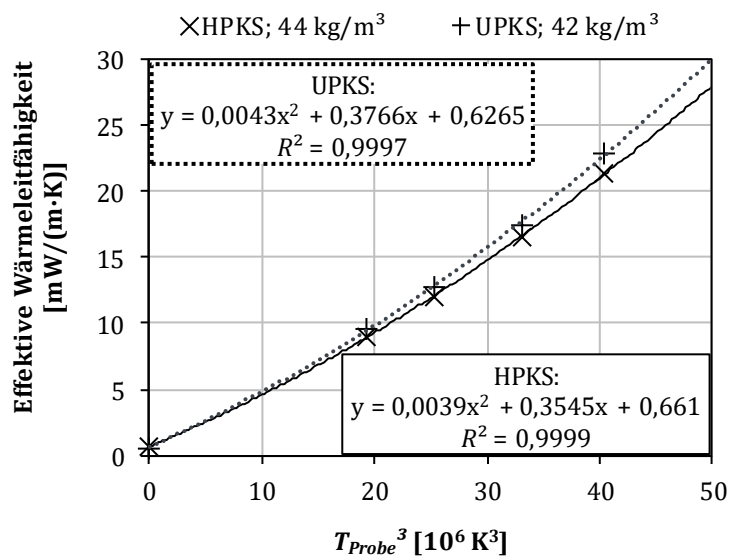


Abbildung 13-2: Messwerte zur Ermittlung der dichtetpezifischen Extinktionskoeffizienten pyrogener Kieselsäuren

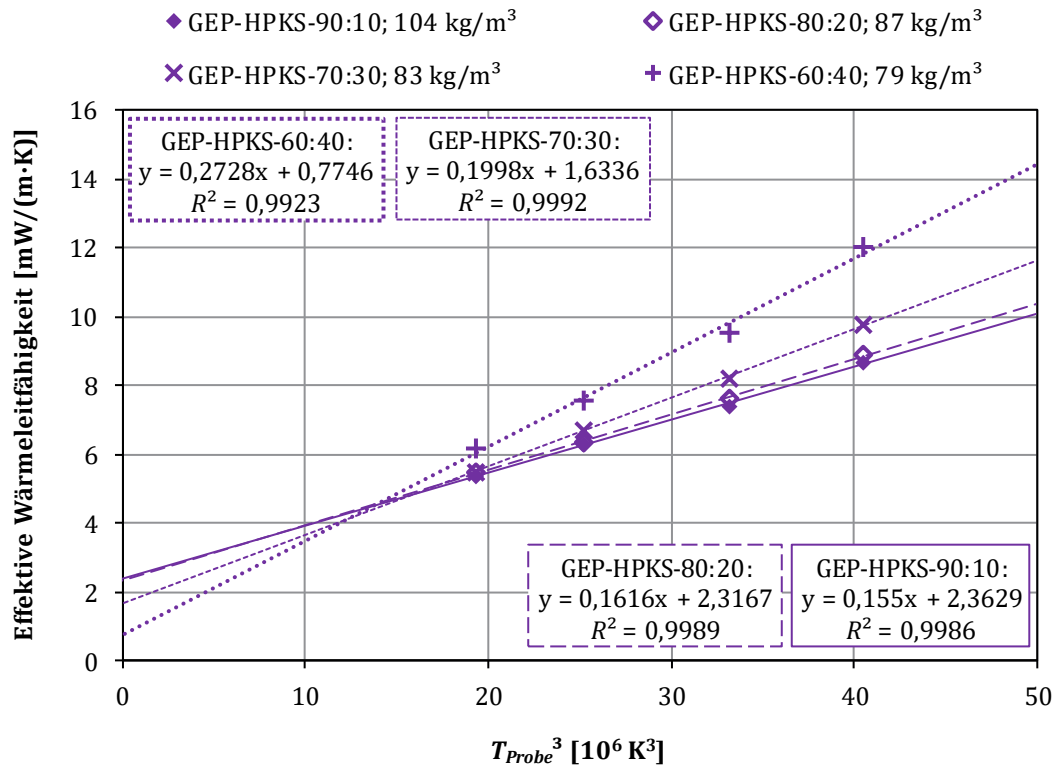


Abbildung 13-3: Messwerte zur Ermittlung der dichtetpezifischen Extinktionskoeffizienten und Festkörper-Wärmeleitfähigkeiten von Mischungen aus GEP und HPKS

A2. Einzelabmessungen des Heizzylinders

Tabelle 13-1: Einzelabmessungen des Heizzylinders

| Bezeichnung | Abmessung |
|---|------------------|
| Innenlänge Edelstahlhohlzylinder | 420 mm |
| Innendurchmesser Edelstahlhohlzylinder | 100 mm |
| Wandstärke Edelstahlhohlzylinder | 2 mm |
| Gesamtlänge Heizzylinder | 302 mm |
| Länge Messbereich | 172 mm |
| Länge Kupferhohlzylinder im Messbereich | 168 mm |
| Länge Kupferhohlzylinder in Schutzheizungsbereich1 | 58 mm |
| Länge Kupferhohlzylinder in Schutzheizungsbereich2 | 66 mm |
| Wandstärke Kupferhohlzylinder | 1 mm |
| Gesamtlänge Wärmewiderstände | 12 mm |
| Abstand zwischen Kupferhohlzylindern | 4 mm |
| Länge Heizpatrone im Messbereich (Messheizung) | 160 mm |
| Länge Heizpatronen in den Schutzheizungsbereichen (Schutzheizungen) | 50 mm |
| Durchmesser der Heizpatronen | 8,01 mm |

A3. Ergänzungen zur Messunsicherheitsbetrachtung

Luftdruckmessung

Tabelle 13-2: Messunsicherheiten der relevantesten gemessenen Luftdrücke

| Luftdruck | Messunsicherheiten | |
|------------|--------------------|---------------|
| 0,001 mbar | $\pm 0,0040$ mbar | $\pm 400,7$ % |
| 0,02 mbar | $\pm 0,0041$ mbar | $\pm 20,7$ % |
| 0,1 mbar | $\pm 0,0047$ mbar | $\pm 4,7$ % |
| 1 mbar | $\pm 0,0108$ mbar | $\pm 1,1$ % |
| 10 mbar | $\pm 0,0720$ mbar | $\pm 0,7$ % |
| 100 mbar | $\pm 1,1$ mbar | $\pm 1,1$ % |
| 800 mbar | $\pm 5,8$ mbar | $\pm 0,7$ % |
| 960 mbar | $\pm 6,9$ mbar | $\pm 0,7$ % |

Effektive Wärmeleitfähigkeit

Der Leitungswiderstand bei der Messung der elektrischen Leistung der Messheizung führt zu einem Spannungsabfall. Dieser wurde bestimmt durch den Abgleich des gemessenen Leitungswiderstands mit Messwerten der Spannung und Stromstärke an 20 Messpunkten. Es resultierte eine prozentuale Abweichung bzgl. der gemessenen Leistung von $-1,01$ % im arithmetischen Mittel mit einer Standardabweichung von $\pm 0,03$ %. Die maximale Abweichung betrug $1,04$ %. Es wird auf eine Korrektur der Messwerte verzichtet und entsprechend eine systematische Messunsicherheit von ± 1 % aufgeschlagen.

Um die Messunsicherheit durch verbleibende Instationaritäten zu bewerten, wurden einzelne Messpunkte bis zu 24 Stunden nach Zustandekommen der in Kapitel 7.5 beschriebenen minimalen Anforderungen bzgl. der Stationarität ein zweites Mal ausgewertet. Dabei stellten sich bei Messwerten < 10 mW/(m·K) betragsmäßige maximale Abweichungen der ausgewerteten effektiven Wärmeleitfähigkeit von < 2 % ein. Bei Messwerten > 50 mW/(m·K) wurden betragsmäßige maximale Abweichungen von $< 0,5$ % gemessen.

Um systematische Messunsicherheiten resultierend aus dem Schutzheizungsversatz zu bestimmen, wurden Messungen des Probenmaterials FEP(0-0,1) (vgl. Tabelle 5-5) bei einem Luftdruck von 0,012 mbar und bei Atmosphärendruck bei einer Probenmitteltemperatur von jeweils 48 °C ausgewertet. Die gemessenen Werte der effektiven Wärmeleitfähigkeit bei einem gemessenen Schutzheizungsversatz von 0 K betrugen $74,84$ mW/(m·K) bei Atmosphärendruck und $3,55$ mW/(m·K) bei 0,012 mbar. Bei diesen beiden Messpunkten wurde der Schutzheizungsversatz zwischen -1 K und 1 K variiert, siehe Abbildung 13-4.

Aus der Steigung der Ausgleichsgeraden lässt sich die Sensitivität der effektiven Wärmeleitfähigkeit bzgl. des Schutzheizungsversatzes bei Atmosphärendruck zu $-1,3638$ mW/(m·K²) und

bei 0,012 mbar zu $-0,5338 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K}^2)$ ablesen. Der maximale Schutzheizungsversatz ergibt sich aus den maximalen Abweichungen derjenigen Pt100, die an der Messung des Schutzheizungsversatzes beteiligt sind zu $\pm 0,03 \text{ K}$. Durch die Multiplikation der Sensitivitäten mit der maximalen Abweichung des Schutzheizungsversatzes ergibt sich eine maximale Messunsicherheit von $\pm 0,041 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ bei Atmosphärendruck und von $\pm 0,016 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ bei 0,012 mbar. Bezogen auf die Messwerte der effektiven Wärmeleitfähigkeit bei einem gemessenen Schutzheizungsversatz von 0 K ergeben sich maximale relative Messunsicherheiten von aufgerundet $\pm 0,1 \%$ bei Atmosphärendruck und $\pm 0,5 \%$ bei 0,012 mbar.

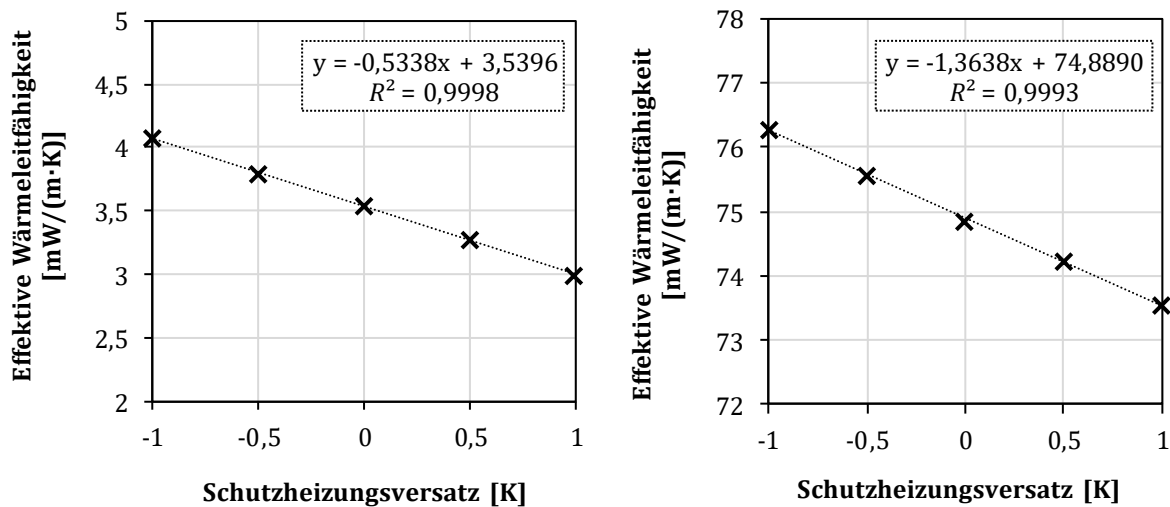


Abbildung 13-4: Einfluss des Schutzheizungsversatzes auf die bei 48 °C gemessene effektive Wärmeleitfähigkeit von FEP(0-0,1). Links: bei 0,012 mbar; rechts: bei Atmosphärendruck

Um axiale Wärmeströme über die Kabel im Messbereich der Zylinderapparatur zu verringern, werden diese möglichst eng an den Schutzheizungsbereichen von Heizzylinder und Edelstahlhohlzylinder geführt. Dennoch können verbleibende axiale Wärmeströme durch den Messbereich auch über diese Kabel nicht ausgeschlossen werden. Zudem verlaufen die Kabel einer der Schutzheizungen in Abstand zu den zylindrischen Wandoberflächen durch den gesamten Messbereich der Probe, geführt durch die PTFE-Abstandhalter. Um den Einfluss der axialen Wärmeströme auf die gemessene effektive Wärmeleitfähigkeit zu ermitteln wurde die Umgebungstemperatur bei den oben genannten Messpunkten des Probenmaterials FEP(0-0,1) bei einem Schutzheizungsversatz von 0 K durch den Einsatz des Tiefkühlschranks und eines Heizlüfters variiert. Mit der Umgebungstemperatur ändern sich die Temperaturen, die in den Sub-D-Steckern an den Durchführungen der Flanschdeckel innerhalb der Zylinderapparatur gemessen werden. Die Temperaturmessungen der Umgebung der Zylinderapparatur und in den Sub-D-Steckern erfolgten mit Pt100 der Genauigkeitsklasse AA. Diese weisen gemäß DIN EN 60751:2009-05 eine Messunsicherheit bzgl. des wahren Wertes $\vartheta_{\text{wahr}} [^{\circ}\text{C}]$ von $\pm(0,1 + 0,0017 \cdot |\vartheta_{\text{wahr}}|)$ K auf. In Abbildung 13-5 sind die gemessenen effektiven Wärmeleitfähigkeiten über der Temperaturdifferenz zwischen der flächengewichteten Mitteltemperatur des Edelstahlhohlzylinders im

Messbereich $\vartheta_{EHZ,MB}$ und dem arithmetischen Mittel der Temperaturen in den Sub-D-Steckern $\vartheta_{Stecker}$ [°C] und aufgetragen. Zudem sind die jeweiligen Ausgleichgeraden dargestellt und angegeben.

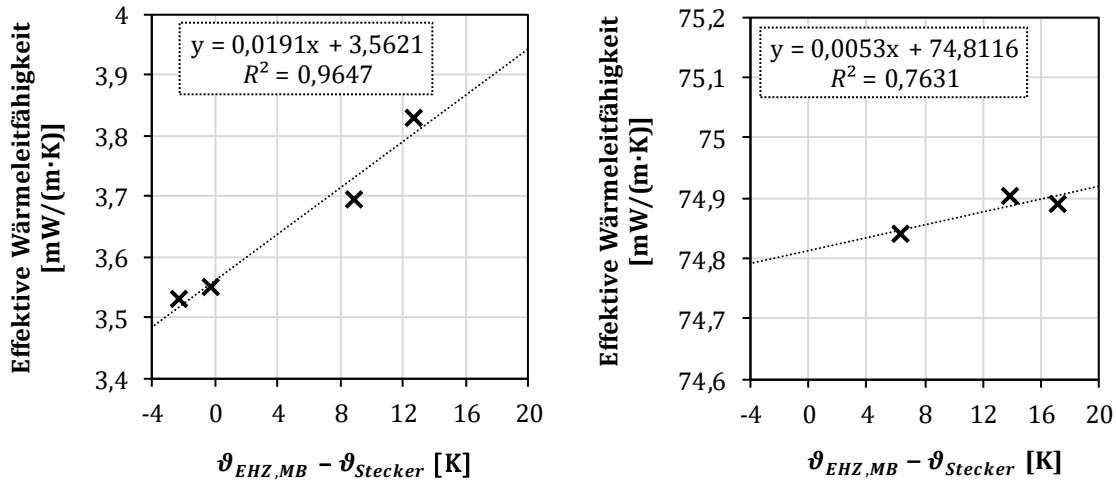


Abbildung 13-5: Einfluss der Temperaturdifferenz zwischen dem Edelstahlhohlzylinder im Messbereich und den Sub-D-Steckern innerhalb der Zylinderapparatur auf die bei 48 °C gemessene effektive Wärmeleitfähigkeit von FEP(0–0,1). Links: bei 0,012 mbar; rechts: bei Atmosphärendruck

Die Temperaturdifferenz zwischen Messbereich der Zylinderapparatur und den Sub-D-Steckern repräsentiert qualitativ die axialen Wärmeströme innerhalb der Zylinderapparatur. Da die Kabel allerdings unterschiedliche und nicht hinreichend örtlich aufgelöst messbare Temperaturen innerhalb des Messbereiches aufweisen, lässt sich nicht eindeutig aussagen, für welche Temperaturdifferenz $\vartheta_{EHZ,MB} - \vartheta_{Stecker}$ axiale Wärmeströme über die Kabel vernachlässigt werden können. Daher kann keine Korrektur angewendet werden. Anstatt dessen wird eine maximale Messunsicherheit definiert, die die unterschiedlichen Messbedingungen der Messungen zueinander berücksichtigt. Im realen Messbetrieb unterscheiden sich die Temperaturdifferenzen $\vartheta_{EHZ,MB} - \vartheta_{Stecker}$ aller durchgeführten Messungen aufgerundet um maximal 6 K bei Messungen bei $\leq 0,025$ mbar und um maximal 12 K bei Atmosphärendruck. Aus der Multiplikation dieser Maximalwerte mit den Steigungen der entsprechenden Ausgleichgeraden aus Abbildung 13-5 ergibt sich eine maximale Messunsicherheit von $\pm 0,064$ mW/(m·K) bzw. $\pm 0,1$ % bei Atmosphärendruck und einem Messwert von 74,84 mW/(m·K). Bei 0,012 mbar und einem Messwert von 3,55 mW/(m·K) ergibt sich eine maximale Messunsicherheit von $\pm 0,115$ mW/(m·K) bzw. $\pm 3,2$ %.

Reproduzierbarkeit der Messung der effektiven Wärmeleitfähigkeit

In Abbildung 13-6 ist der Vergleich zweier Messungen der gleichen Probe von GEP in einem Abstand von sieben Monaten dargestellt. Anhand dieser Stichprobe wird die Reproduzierbarkeit der Messung der effektiven Wärmeleitfähigkeit mit der Zeit betrachtet. Die Ergebnisse werden in Kapitel 7.6.4 ausgewertet und diskutiert.

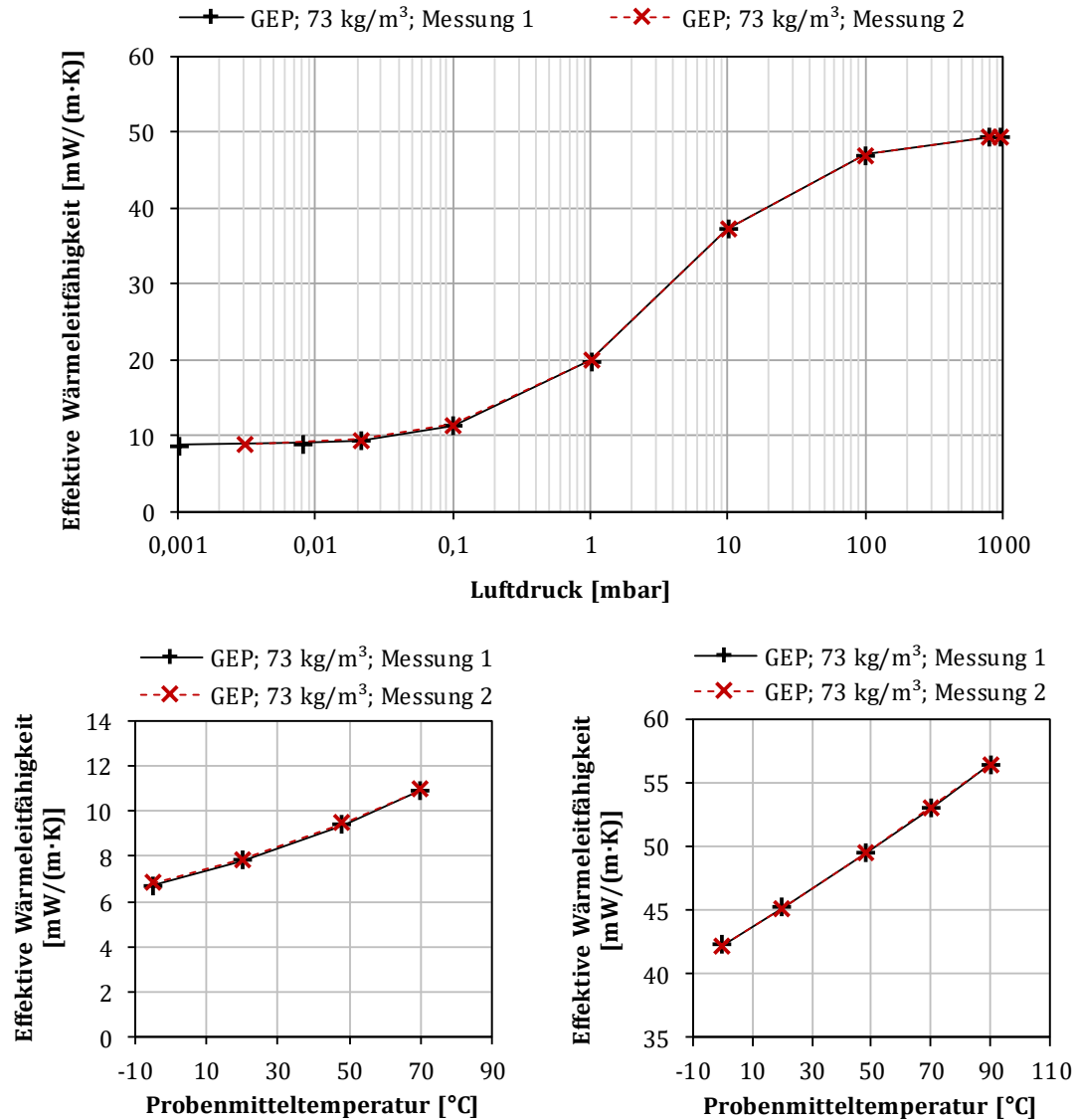


Abbildung 13-6: Vergleich zweier Messungen der effektiven Wärmeleitfähigkeit von GEP in der Zylinderapparatur zur Prüfung der Reproduzierbarkeit. Oben: in Abhängigkeit vom Luftdruck bei einer Probenmitteltemperatur von 48 °C; links unten: in Abhängigkeit von der Probenmitteltemperatur bei einem Luftdruck von $(0,02 \pm 0,005)$ mbar; rechts unten: in Abhängigkeit von der Probenmitteltemperatur bei Atmosphärendruck von (960 ± 20) mbar

Erklärung zu Messergebnissen in früheren Veröffentlichungen des Autors

In [14] und [125] sind Messergebnisse der effektiven Wärmeleitfähigkeit aus einer Versuchsanlage mit Zylinderapparatur dargestellt, welche sich von den in der vorliegenden Arbeit gezeigten Messergebnissen unterscheiden. Bei dieser Versuchsanlage handelte es sich um eine ältere Version von der in Kapitel 7 beschriebenen Versuchsanlage. Diese ältere Version wurde für die vorliegende Arbeit umfassend überarbeitet um die darin aufgetretenen systematischen Messfehler stark zu reduzieren. Die in der vorliegenden Arbeit gezeigten Messergebnisse der effektiven Wärmeleitfähigkeit besitzen demnach eine deutlich höhere Genauigkeit und Präzision als die in [14] und [125] dargestellten Werte.

A4. Einfluss des Strahlungshemmers Siliziumkarbid auf die effektive Wärmeleitfähigkeit einer Mischung aus expandiertem Perlit und pyrogener Kieselsäure

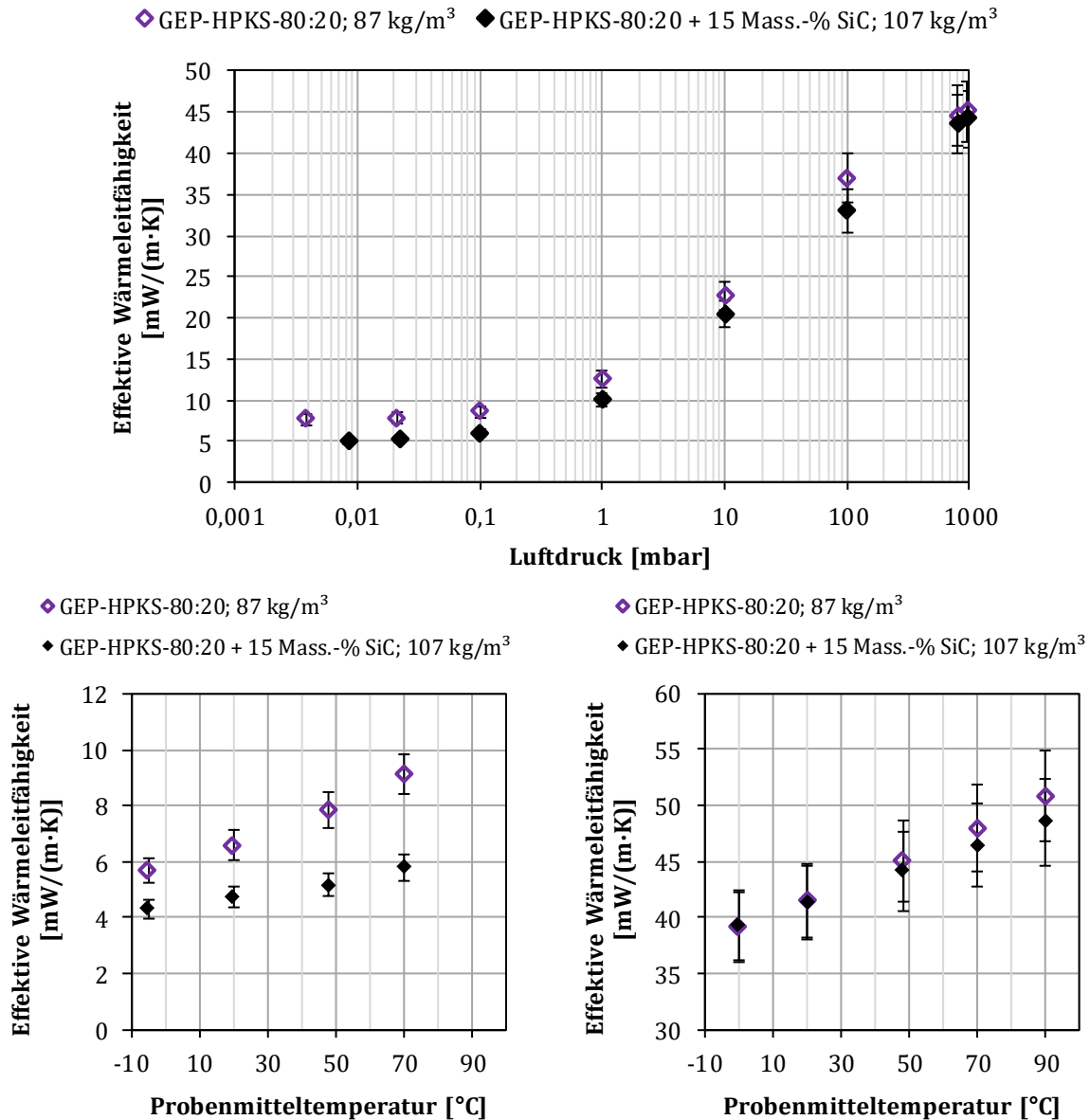


Abbildung 13-7: Effektive Wärmeleitfähigkeit von GEP-HPKS-80:20 mit einer Beimischung von 15 Mass.-% Siliziumkarbid (SiC) im Vergleich mit GEP-HPKS-80:20 ohne SiC. Oben: in Abhängigkeit vom Luftdruck bei einer Probenmitteltemperatur von 48 °C; links unten: in Abhängigkeit von der Probenmitteltemperatur bei einem Luftdruck von (0,02 ± 0,005) mbar; rechts unten: in Abhängigkeit von der Probenmitteltemperatur bei Atmosphärendruck von (960 ± 20) mbar

A5. Einfluss einer vorherigen Evakuierung auf die effektive Wärmeleitfähigkeit bei Atmosphärendruck

In Tabelle 13-3 und Abbildung 13-8 sind die Abweichungen der Messwerte der effektiven Wärmeleitfähigkeit bei Atmosphärendruck und einer Probenmitteltemperatur von 48 °C vor (Messpunkt 1 in Tabelle 7-3) und nach einer Evakuierung der Probe (Messpunkt 14 in Tabelle 7-3) dargestellt. Vor der Evakuierung wurden die Proben über mindestens 6 Wochen im Labor bei witterungsbedingter relativer Luftfeuchtigkeit zwischen 20 % und 60 % und bei einer Umgebungstemperatur von (23 ± 4) °C gelagert. Nach der Evakuierung kann von einer geringeren Feuchtebeladung der Probe ausgegangen werden als zuvor, da Feuchtigkeit durch Verringerung des Luftdrucks und Erhöhung der Temperatur ausgast. Die Abweichungen der Messwerte können daher Erkenntnisse bzgl. der Auswirkung von Feuchtigkeit auf die effektive Wärmeleitfähigkeit bei Atmosphärendruck liefern.

Tabelle 13-3: Absolute und relative Abweichung der effektiven Wärmeleitfähigkeit einer gelagerten (MP1¹⁾) und vorevakuierten Probe (MP14²⁾) bei Atmosphärendruck und einer Probenmitteltemperatur von 48 °C

| Probe | Dichte [kg/m ³] | Absolute Abweichung $\lambda_{eff}(MP1) - \lambda_{eff}(MP14)$ [mW/(m·K)] | Relative Abweichung $\frac{\lambda_{eff}(MP1) - \lambda_{eff}(MP14)}{\lambda_{eff}(MP14)}$ [%] |
|----------------|--------------------------------|---|--|
| GEP | 73 | 0,565 | 1,14 |
| GEP(0,5-1) | 48 | 0,330 | 0,68 |
| MEP(0,2-0,5) | 90 | 1,316 | 2,58 |
| FEP(0,1-0,2) | 79 | 0,580 | 1,13 |
| FEP(0-0,1) | 258 | 4,080 | 5,45 |
| UPKS | 42 | -2,530 | -6,1 |
| HPKS | 44 | -0,741 | -1,78 |
| GEP-HPKS-90:10 | 104 | 0,461 | 0,93 |
| GEP-HPKS-80:20 | 87 | 0,544 | 1,21 |
| GEP-HPKS-70:30 | 83 | 0,462 | 1,08 |
| GEP-HPKS-60:40 | 74 | -0,208 | -0,51 |

¹⁾ MP1: Messpunkt 1 aus Tabelle 7-3

²⁾ MP14: Messpunkt 14 aus Tabelle 7-3

Bei den reinen expandierten Perliten sind die Messwerte vor der Evakuierung stets höher als die nach der Evakuierung, was auf eine Erhöhung der effektiven Wärmeleitfähigkeit durch die erhöhte Feuchtebeladung hindeutet. Sowohl die absoluten, als auch die relativen Abweichungen steigen tendenziell mit der Dichte der Probe an.

Dies kann zum einen auf eine Überbrückung der Kontaktwiderstände an den Berührstellen der Körner durch Feuchtigkeit zurückgeführt werden, welche die Festkörperwärmeleitung und ggf.

auch den Kopplungseffekt erhöht. Zum anderen kann sich durch die Feuchtigkeit ein sogenannter Heat-Pipe-Effekt aus Verdampfung und Kondensation ausbilden, der die effektive Wärmeleitfähigkeit von Wärmedämmstoffen stark erhöhen kann. Dieser Heat-Pipe-Effekt ist u. a. in [126], [127], [28] beschrieben.

Bei den pyrogenen Kieselsäuren UPKS und HPKS zeigt sich wiederum eine Zunahme der effektiven Wärmeleitfähigkeit bei Atmosphärendruck nach der Evakuierung. Diese wurde auch bei den Messungen der effektiven Wärmeleitfähigkeit von UPKS bei der Firma Netzsch beobachtet (vgl. Kapitel 7.7).

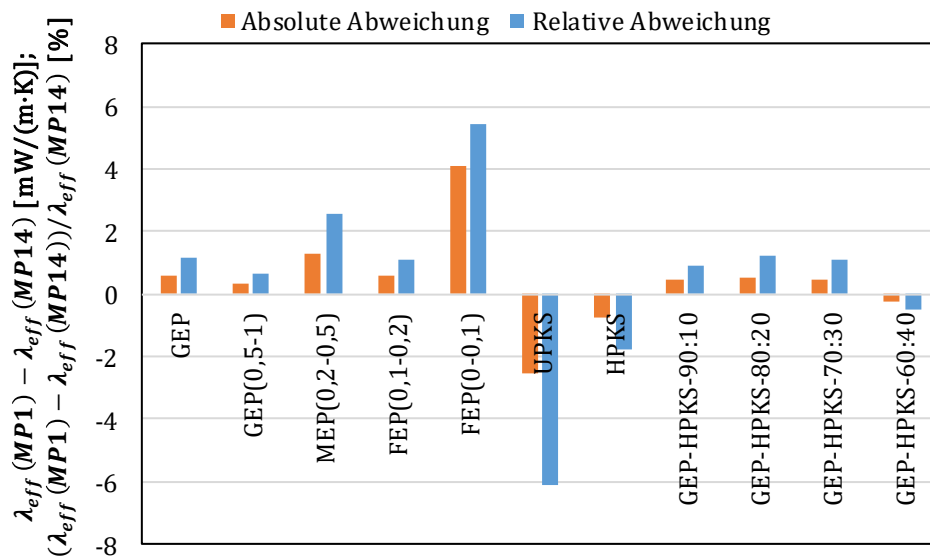


Abbildung 13-8: Absolute und relative Abweichung der effektiven Wärmeleitfähigkeit einer gelagerten (MP1) und vorevakuierter Probe (MP14) bei Atmosphärendruck und einer Probenmitteltemperatur von 48 °C

Eine mögliche Erklärung dieses Phänomens ist ein partielles Absaugen der sehr feinen Körner der pyrogenen Kieselsäuren durch die Filter während der Evakuierung. Durch diese Masseabnahme der Probe würde zum einen die Extinktion verringert, wodurch die Wärmestrahlung ansteigen würde und zum anderen könnten größere Hohlräume entstehen, wodurch die Luftwärmeleitung ansteigen könnte. Die Firma Netzsch konnte ein solches partielles Absaugen tatsächlich beobachten. In der Zylinderapparatur waren Anzeichen einer signifikanten Masseabnahme der Probe nach der Messung wiederum nicht eindeutig festzustellen. Auch durch das nach der Evakuierung erfolgte Fluten könnten, bei hinreichender Strömungsgeschwindigkeit, größere Hohlräume entstehen, welche die Luftwärmeleitung erhöhen können. An der in der vorliegenden Arbeit entwickelten und aufgebauten Versuchsanlage wurde zwar stets auf eine maximale Evakuierungs- und Flutungsgeschwindigkeit von betragsmäßig ca. 1 mbar/s geachtet, dennoch kann eine nicht direkt sichtbare Bildung von größeren Hohlräumen in der Probe, beispielsweise durch nicht erfasste Geschwindigkeitsspitzen, ebenso wie ein gewisser Masseaustrag nicht sicher ausgeschlossen werden.

Eine weitere mögliche Erklärung dieses Phänomens ist eine Verringerung der Extinktion und damit eine Erhöhung der Wärmestrahlung durch die Abnahme der Feuchtebeladung. Im Vergleich zu den expandierten Perliten ist die Extinktion, die Festkörperwärmeleitung und der Kopplungseffekt der pyrogenen Kieselsäuren sehr gering. Somit könnte die Feuchtebeladung bei den pyrogenen Kieselsäuren einen höheren absoluten Einfluss auf die Verringerung der Wärmestrahlung besitzen als auf eine Erhöhung der Festkörperwärmeleitung und des Kopplungseffekts.

Bei den Mischungen aus GEP und HPKS ist das Verhalten einer leichten Zunahme der effektiven Wärmeleitfähigkeit bei Atmosphärendruck nach der Evakuierung bei der Probe GEP-HPKS-60:40 zu erkennen, während bei den übrigen Mischungen die effektive Wärmeleitfähigkeit nach der Evakuierung in ähnlichem Ausmaß wie bei reinem GEP abnimmt.

Da die effektiven Wärmeleitfähigkeiten eines nicht evakuierten Wärmedämmstoffs für den Anwendungszweck einer Vakuumwärmedämmung von nachrangiger Bedeutung sind, wird diese Thematik in der vorliegenden Arbeit nicht weiter behandelt.

A6. Kosten-Nutzen-Betrachtung der Wärmedämmstoffe

Im Folgenden wird gezeigt welche Dämmdicke, abhängig vom Wärmedämmstoff, notwendig ist, um einen beispielhaften effektiven Wärmedurchgangskoeffizienten von $k_{eff} = 0,15 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ zu erreichen. Die Berechnungen werden für eine Hohlzylinder mit einem Innenradius von $r_i = 1 \text{ m}$ durchgeführt. Dieser Hohlzylinder repräsentiert die Wärmedämmung am Mantel eines großvolumigen, doppelwandigen Warmwasserspeichers. Der Wärmestrom \dot{Q} [W] durch die jeweiligen Wärmedämmstoffe wird entsprechend Gleichung (13-1), analog zu den Gleichungen (7-1) und (7-2), berechnet. Der effektive Wärmedurchgangskoeffizient k_{eff} bezieht sich auf die Innenfläche des Hohlzylinders A_i [m^2] und berechnet sich nach Gleichung (13-2). Die Innenfläche des Hohlzylinders A_i berechnet sich nach Gleichung (13-3).

$$\dot{Q} = \lambda_{eff} \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot l}{\ln\left(\frac{r_a}{r_i}\right)} \cdot \Delta T \quad (13-1)$$

$$k_{eff} = \frac{\dot{Q}}{A_i \cdot \Delta T} \quad (13-2)$$

$$A_i = 2 \cdot \pi \cdot l \cdot r_i \quad (13-3)$$

Als effektive Wärmeleitfähigkeiten λ_{eff} [$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$] werden die jeweils gemessenen Werte bei einer Probenmitteltemperatur von $48 \text{ }^\circ\text{C}$ und Luftdrücken von $(0,02 \pm 0,005) \text{ mbar}$, 1 mbar und 10 mbar gewählt, siehe Kapitel 8. Für die Mischungen mit UPKS werden die gleichen effektiven Wärmeleitfähigkeiten angenommen wie für Mischungen mit HPKS. Die Länge des Hohlzylinders l [m] und die Temperaturdifferenz zwischen Innen- und Außenradius ΔT [K] können beliebig gewählt werden. Für diese Berechnung werden Werte von $l = 1 \text{ m}$ und $\Delta T = 1 \text{ K}$ vorgegeben. Der Außenradius r_a [m] wird iterativ variiert um für jeden Wärmedämmstoff $k_{eff} = 0,15 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ zu erreichen. Die Dämmdicke berechnet sich durch Subtraktion des Innenradius r_i vom Außenradius r_a .

Die gesamten Dämmstoffkosten in € für das oben genannte Beispiel einer Länge des Hohlzylinders von $l = 1 \text{ m}$ ergeben sich durch die Multiplikation der volumenbezogenen Dämmstoffkosten aus Abbildung 9-1 mit dem Volumen des Hohlzylinders V [m^3], welches sich gemäß Gleichung (13-4) berechnet.

$$V = \pi \cdot l \cdot (r_a^2 - r_i^2) \quad (13-4)$$

Eine allgemeinere Kostenangabe für beliebig lange Hohlzylinderförmige Wärmedämmungen mit dem Innenradius $r_i = 1 \text{ m}$ ergibt sich, wenn die gesamten Dämmstoffkosten in € auf die Innenfläche des Hohlzylinders A_i bezogen werden. Die resultierenden Werte der Dämmstoffkosten je Quadratmeter Innenwandfläche in €/ m^2 sind in Tabelle 13-4 und Abbildung 13-9 über dem Luftdruck dargestellt.

Tabelle 13-4: Dämmdicken und Dämmstoffkosten je Quadratmeter Innenwandoberfläche um einen Wärmedurchgangskoeffizienten von $0,15 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ zu erreichen für die in der vorliegenden Arbeit untersuchten kommerziell verfügbaren Wärmedämmstoffe und Mischungen aus GEP und den pyrogenen Kieselsäuren UPKS und HPKS

| | (0,02 ± 0,005) mbar | | 1 mbar | | 10 mbar | |
|----------------|---------------------------------|--|---------------------------------|--|---------------------------------|--|
| | Dämm- dicke [mm] | Dämmstoff- kosten [€/m²] | Dämm- dicke [mm] | Dämmstoff- kosten [€/m²] | Dämm- dicke [mm] | Dämmstoff- kosten [€/m²] |
| GEP | 134 | 10 | 303 | 25 | 642 | 62 |
| FEP | 61 | 10 | 128 | 22 | 474 | 96 |
| HPKS | 248 | 98 | 262 | 104 | 330 | 135 |
| GEP-HPKS-90:10 | 110 | 21 | 225 | 44 | 514 | 114 |
| GEP-HPKS-80:20 | 111 | 24 | 183 | 42 | 353 | 87 |
| GEP-HPKS-70:30 | 118 | 32 | 177 | 50 | 306 | 91 |
| GEP-HPKS-60:40 | 138 | 41 | 194 | 60 | 295 | 95 |
| UPKS | 264 | 56 | 287 | 62 | 352 | 78 |
| GEP-UPKS-90:10 | 110 | 16 | 225 | 35 | 514 | 91 |
| GEP-UPKS-80:20 | 111 | 17 | 183 | 30 | 353 | 61 |
| GEP-UPKS-70:30 | 118 | 21 | 177 | 33 | 306 | 60 |
| GEP-UPKS-60:40 | 138 | 26 | 194 | 38 | 295 | 60 |

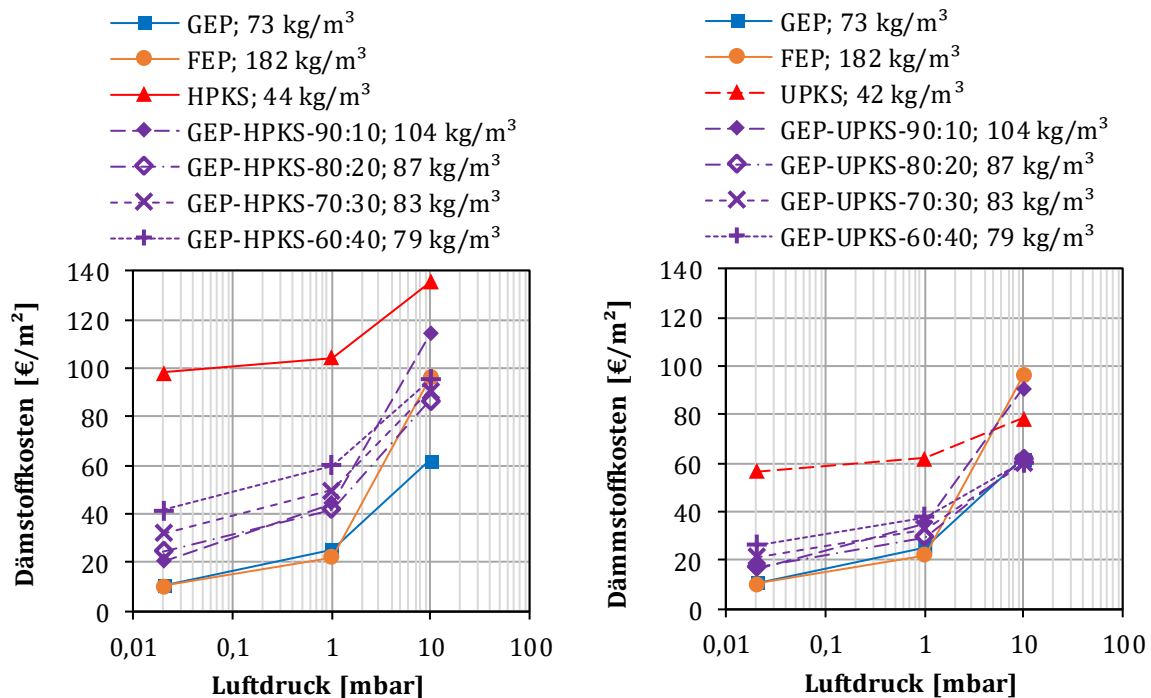
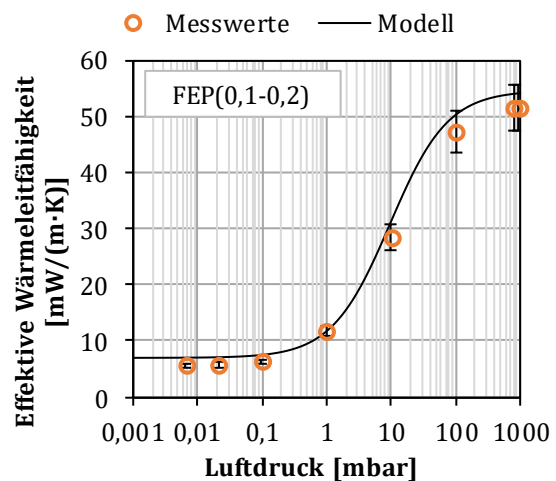
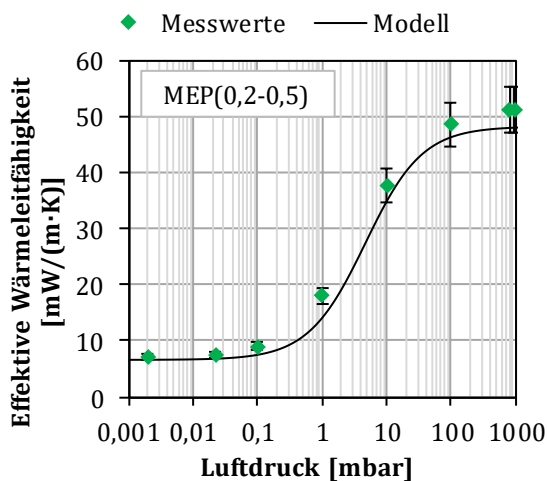
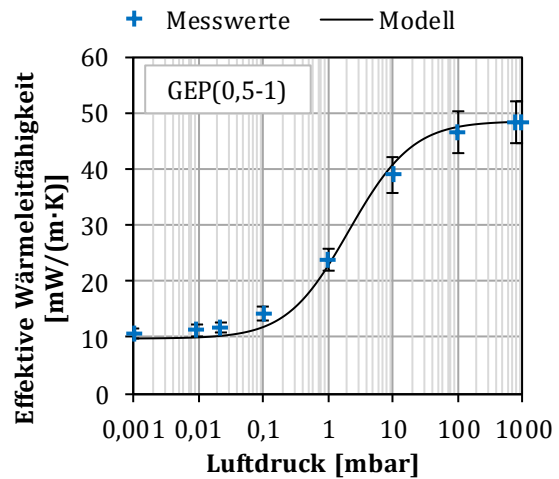
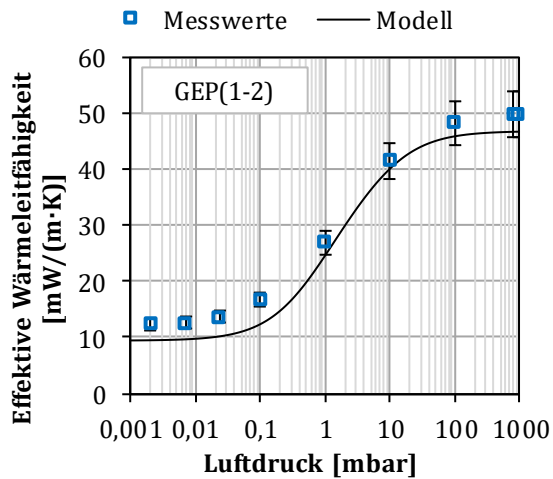
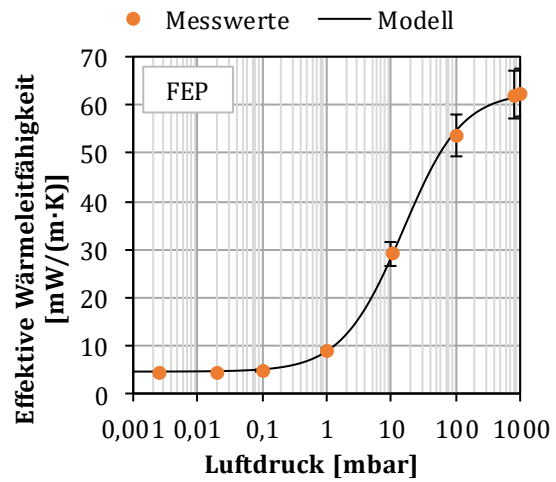
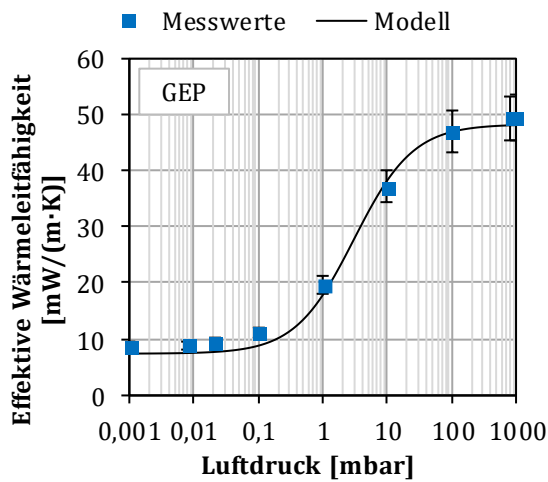


Abbildung 13-9: Dämmstoffkosten je Quadratmeter Innenwandoberfläche um einen Wärmedurchgangskoeffizienten von $0,15 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ zu erreichen für die in der vorliegenden Arbeit untersuchten kommerziell verfügbaren Wärmedämmstoffe und Mischungen aus GEP und den pyrogenen Kieselsäuren UPKS und HPKS

GEP erreicht im Druckbereich zwischen $(0,02 \pm 0,005)$ mbar und 10 mbar im arithmetischen Mittel die geringsten Werte der Dämmstoffkosten je Quadratmeter Innenwandfläche. Allerdings sind, aufgrund der vergleichsweise hohen effektiven Wärmeleitfähigkeit, sehr hohe Dämmdicken notwendig, die zu höheren Kosten für den Stahl und höherem Aufwand bei der Fertigung und beim Transport führen würden. Aus diesem Grund können bei einer ganzheitlicheren Betrachtung der Wirtschaftlichkeit, die beispielsweise die höheren Stahl-, Fertigungs- und Transportkosten berücksichtigen, andere der betrachteten Wärmedämmstoffe bevorzugt werden. Zwischen $(0,02 \pm 0,005)$ mbar und 1 mbar hat FEP die geringsten Dämmstoffkosten je Quadratmeter Innenwandfläche bei deutlich geringeren Dämmdicken als GEP.

A7. Übereinstimmung der Modelle der effektiven Wärmeleitfähigkeit mit Messwerten



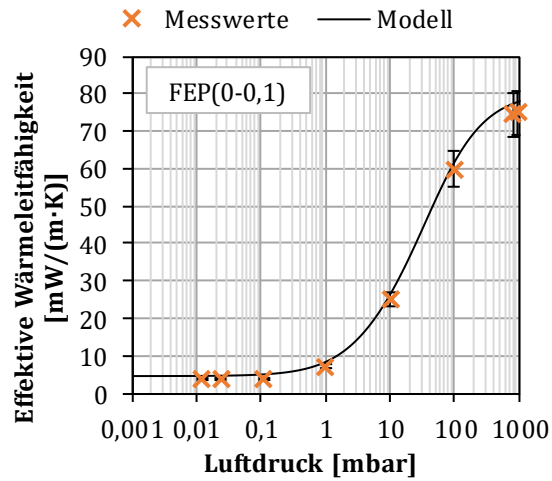


Abbildung 13-10: Prüfung der Übereinstimmung des vollständig prädiktiven Modells der effektiven Wärmeleitfähigkeit expandierter Perlite mit Messwerten über dem Luftdruck bei einer Probenmitteltemperatur von 48 °C

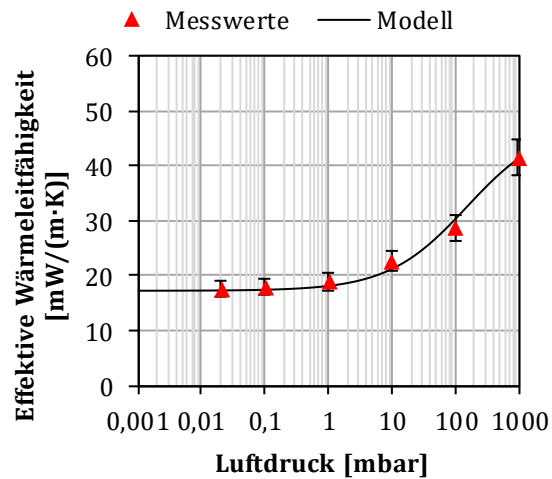


Abbildung 13-11: Prüfung der Übereinstimmung des Modells der effektiven Wärmeleitfähigkeit pyrogener Kieselsäuren mit Messwerten von UPKS über dem Luftdruck bei einer Probenmitteltemperatur von 48 °C.

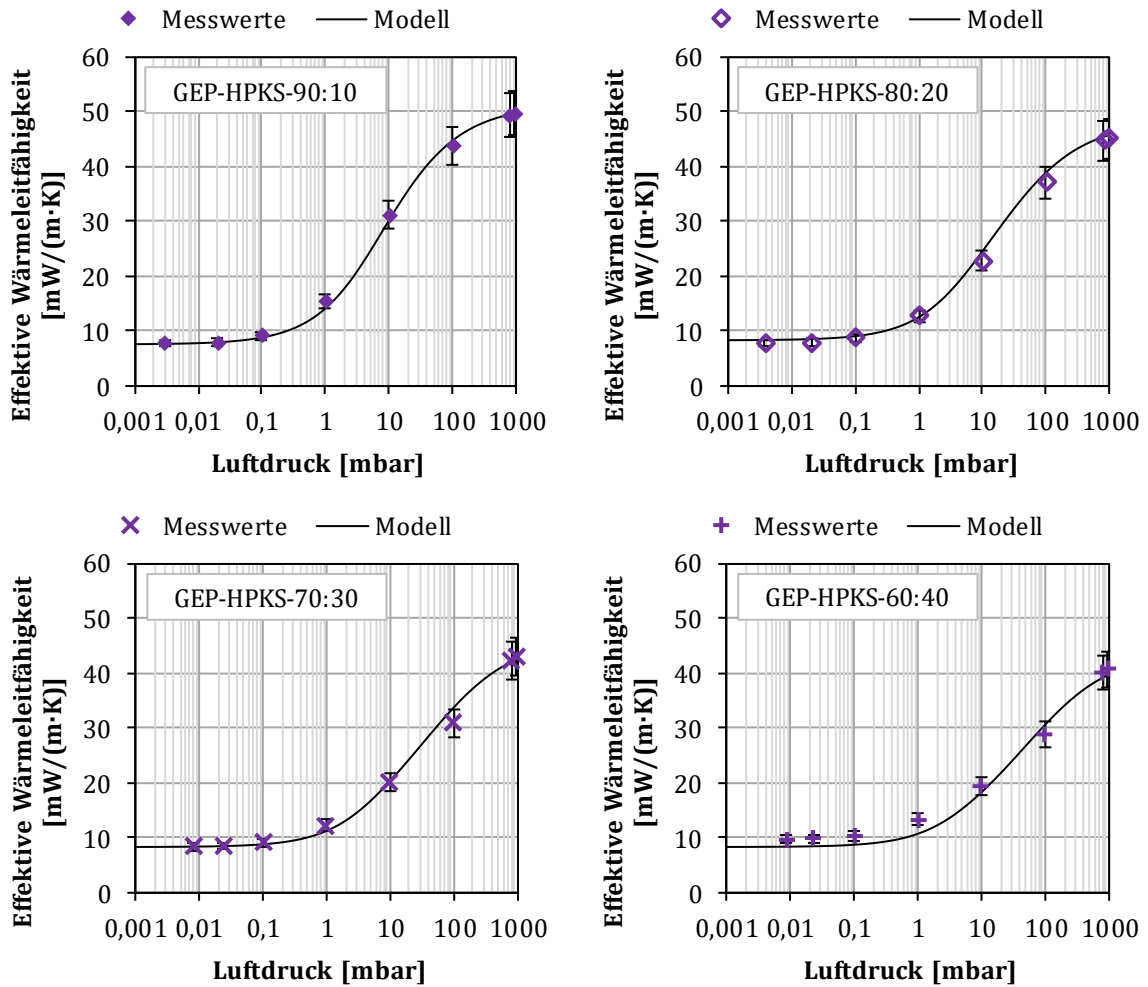


Abbildung 13-12: Prüfung der Übereinstimmung des vollständig prädiktiven Modells der effektiven Wärmeleitfähigkeit von Mischungen aus GEP und HPKS mit Messwerten über dem Luftdruck bei einer Probenmitteltemperatur von 48 °C