

Bestimmung der feuchte- und temperaturabhängigen Wärmeleitfähigkeit von Dämmstoffen

F. Ochs¹⁾, H. Stump¹⁾, D. Mangold²⁾, W. Heidemann¹⁾, H. Müller-Steinhagen^{1) 2) 3)}

¹⁾Universität Stuttgart, Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW)
Pfaffenwaldring 6, D-70550 Stuttgart

Tel. +49-(0)711-685-3278, Fax: +49-(0)711-685-3242

E-Mail: ochs@itw.uni-stuttgart.de

²⁾Solar- und Wärmetechnik Stuttgart (SWT),
ein Forschungsinstitut der Steinbeis-Stiftung

³⁾DLR Stuttgart, Institut für Technische Thermodynamik (ITT)

1. Einleitung

Für die Auslegung von Komponenten sowie für die Simulation von solarthermischen Systemen ist die Kenntnis der effektiven Wärmeleitfähigkeit von Dämmstoffen von großer Bedeutung. Die effektive Wärmeleitfähigkeit wird nach DIN 52616 [1] bei einer Probenmitteltemperatur von 10 °C und einer Temperaturdifferenz von 10 K bestimmt. Für den durchschnittlichen Baubereich ist der Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit bei 10 °C ausreichend. Dämmstoffe für Solarkollektoren oder Wärmespeicher sind aber in der Regel höheren Temperaturen ausgesetzt, im Fall von Heißwasser-Wärmespeichern bis zu 95 °C.

Die effektive Wärmeleitfähigkeit steigt aber mit der Temperatur. Des Weiteren werden Dämmstoffe beim Betrieb durch Umwelteinflüsse belastet. Durch Diffusionsvorgänge in Folge hoher Feuchtigkeitsgradienten oder durch Wasserbelastung (z.B. Regen) erhöht sich der Wassergehalt des Dämmstoffes. Höhere Temperaturen und Wassergehalte bewirken eine stärkere Erhöhung der effektiven Wärmeleitfähigkeit. Zu niedrig angenommene Werte für die effektive Wärmeleitfähigkeit führen zu falsch ausgelegten Komponenten und somit z.B. zu höheren Wärmeverlusten.



Bild 1: Foto der Zwei-Platten-Apparatur

2. Messung der Wärmeleitfähigkeit

Die effektive Wärmeleitfähigkeit von Dämmstoffen wird als Funktion der Stofffeuchte und der Temperatur in einem Bereich von 20 bis 95 °C bestimmt. In Tabelle 1 sind die untersuchten Dämmstoffe aufgelistet. Die Messung der Wärmeleitfähigkeit erfolgt am ITW mit einer speziell für die Untersuchung von Dämmstoffen für Solaranlagen und Wärmespeicher modifizierten Zwei-Platten-Apparatur (Bild 1) nach DIN 52616. Die Proben werden dampfdiffusionsdicht in einem Edelstahlbehälter eingebracht, um Dampftransportvorgänge zur Umgebung zu minimieren.

Jede Probe wird jeweils in einem trockenen und einem feuchten Zustand vermessen. Die offenporigen Dämmstoffe (Mineralwolle und die Schüttgüter) werden zusätzlich noch in mindestens einem weiteren feuchten Zustand vermessen.

Tabelle 1: Hersteller- bzw. Literaturangaben zu Dichte (ρ) bzw. Schüttdichte (ρ_b) Wärmeleitfähigkeit (λ_{10}), Dauergebrauchstemperatur ($T_{\max,dauer}$), Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl (μ) und spez. Wärmekapazität (c_p) untersuchter Dämmstoffe

	ρ in kg/m ³	ρ_b in kg/m ³	λ_{10} in W/mK	$T_{\max,dauer}$ in °C	μ	c_p in J/kgK
Plattenmaterial						
Mineralwolle	160		0.040	250	1	840
Foamglas	100-150		0.045	430	∞	840
XPS	40		0.035	70	80-250	1500
EPS	40		0.030	85	60	1500
PUR	80		0.035	110	40-200	1400
Schüttgut						
Blähglasgranulat Typ A	320	190	0.070	700	1	800
Blähglasgranulat Typ B	310	190	0.065	700	1	800
Perlite	100-300	90	0.050	100	3-5	1000
Schaumglasschotter	250	160-190	0.066	430	1	

Zur Erzeugung trockener Proben wurden diese vor der Messung bis zur Massenkonstanz getrocknet, zur Erzeugung der feuchten bzw. nassen Proben wurden die Proben eine Woche unter Wasser getaucht und dann einen Tag (nasse Probe) bzw. eine Woche (feuchte Probe) bei 25 °C gelagert. Der Wassergehalt wurde jeweils vor und nach der Messung der Wärmeleitfähigkeit bestimmt. Die gemessenen Wassergehalte können Tabelle 2 entnommen werden. Die maximale Wassersättigung ist vor allem bei geschlossenporigen Dämmstoffen abhängig von der Dauer und der Art der Feuchtigkeitsbelastung. Die Messung der Wärmeleitfähigkeit der feuchten Proben wurde im Gegensatz zu der nach DIN 52616 vorgeschriebenen Temperaturdifferenz von 10 K mit 5 K durchgeführt, um die Feuchtigkeitsgradienten im Dämmstoff möglichst gering zu halten.

Tabelle 2: Dicke der Probe (d), gemessene Rohdichte/Schüttdichte (ρ_{mes}), Dichte des Feststoffs (ρ_s), Porosität (ϵ), Kornporosität (ϵ_k) bzw. Porosität der Schüttung (ϵ_b) und maximaler Wassergehalt ($u_{v,max}$), sowie Wassergehalt bei der Messung ($u_{v,mes}$) der untersuchten Dämmstoffe

	d mm	ρ_{mes} kg/m ³	ρ_s kg/m ³	ϵ	ϵ_k	ϵ_b	$u_{v,max}$ Vol.-%	$u_{v,mes1}$ Vol.-%	$u_{v,mes2}$ Vol.-%
Plattenmaterial									
Mineralwolle	100	161	2500	0.94			73.8	25.1	8.2
Foamglas	90	85	2500	0.97			2.9	4.2 ¹⁾	
XPS	100	34	1050	0.97			1.1	0.4 ²⁾	
EPS	120	38	1050	0.96			2.0	0.3	
PUR	80	84	1400	0.94			2.1	0.5	
Schüttgut									
Blähglasgranulat Typ A	70	170	2500	0.93	0.87	0.41	32.8	19.4	16.0
Blähglasgranulat Typ B	70	218	2500	0.91	0.88	0.39	--	--	--
Perlite	70	102	2000	0.95	0.90	0.55	32.0	12.6	10.4
Schaumglasschotter	70	140	2500	0.94	0.90	0.30	25.0	14.6	11.2

¹⁾ 3 Platten à 30 mm ²⁾ 2 Platten à 50 mm

3. Feuchte- und Temperaturabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit

Die Auswertung der Messdaten erfolgt nach einem von Krischer [2] entwickelten Schichten-Model für poröse Körper. Hierbei wird angenommen, dass sich die effektive Wärmeleitfähigkeit eines feuchten, porösen Körpers wie die eines Körpers mit einer seriellen und parallelen Aneinanderschaltung von Feststoff und Hohlraum, bestehend aus Wasser, gesättigter Luft und trockener Luft berechnen lässt. Zusätzlich beinhaltet die effektive Wärmeleitfähigkeit noch einen temperaturabhängigen Strahlungsanteil.

Die Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von der Temperatur (T) lässt sich für trockene Dämmstoffe hinreichend genau mit einem linearen Zusammenhang entsprechend Gleichung 1 beschreiben.

$$\lambda_{eff} = \lambda_0 + a \cdot T \quad (1)$$

Tabelle 3: Berechnete Koeffizienten (λ_0 , a) für die Temperaturabhängigkeit der effektiven Wärmeleitfähigkeit

	λ_0 W/mK	a W/mK°C
Plattenmaterial		
Mineralwolle	0.037	2.0E-04
Foamglas	0.043	1.3E-04
XPS	0.032	2.2E-04
EPS	0.030	2.3E-04
PUR	0.035	7.0E-05
Schüttgut		
Blähglasgranulat Typ A	0.055	1.9E-04
Blähglasgranulat Typ B	0.057	2.1E-04
Perlite	0.045	1.9E-04
Schaumglasschotter	0.057	2.7E-04

Die gemessene effektive Wärmeleitfähigkeit für die verschiedenen Dämmstoffe im trockenen Zustand sowie die jeweiligen Ausgleichsgeraden sind in Bild 2 dargestellt. Die Koeffizienten der Ausgleichsgerade können Tabelle 3 entnommen werden.

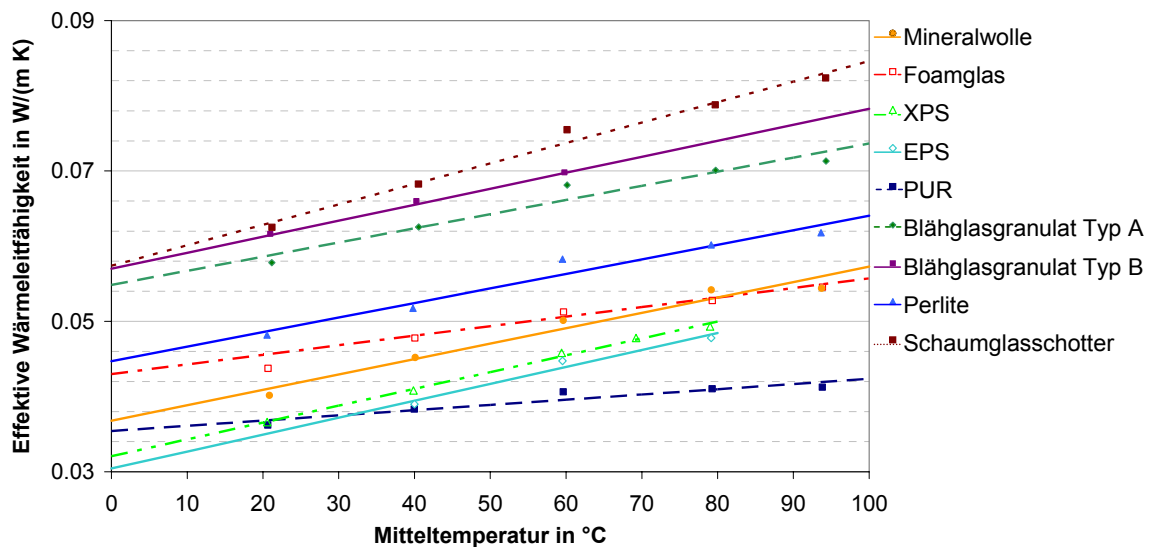


Bild 2: Vergleich der Messdaten für trockene Dämmstoffe

Die effektive Wärmeleitfähigkeit steigt mit der Temperatur und der Stofffeuchte, wobei der Einfluss der Stofffeuchte abhängig vom Porenanteil und von der Porenstruktur des Dämmstoffes ist. Beispielhaft ist für Mineralwolle und Blähglasgranulat die effektive Wärmeleitfähigkeit als Funktion der Temperatur für verschiedene Volumen bezogene Wassergehalte in Bild 3 bzw. Bild 4 dargestellt.

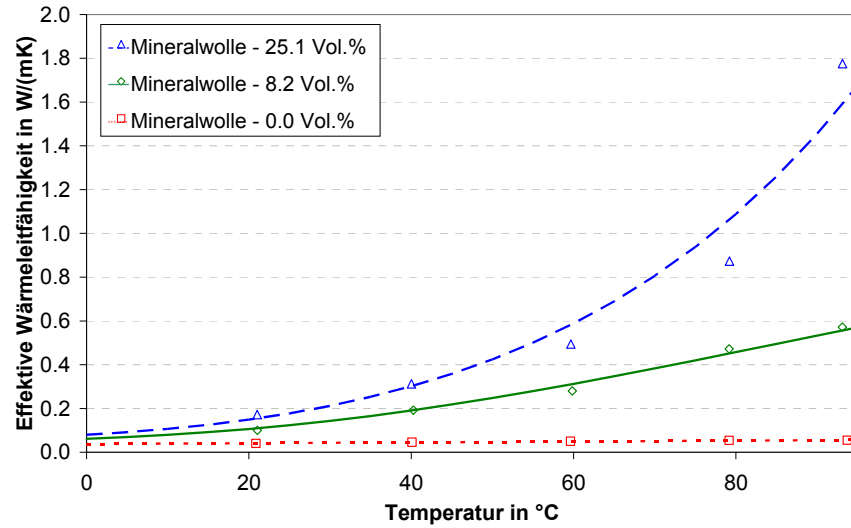


Bild 3: Effektive Wärmeleitfähigkeit von Mineralwolle

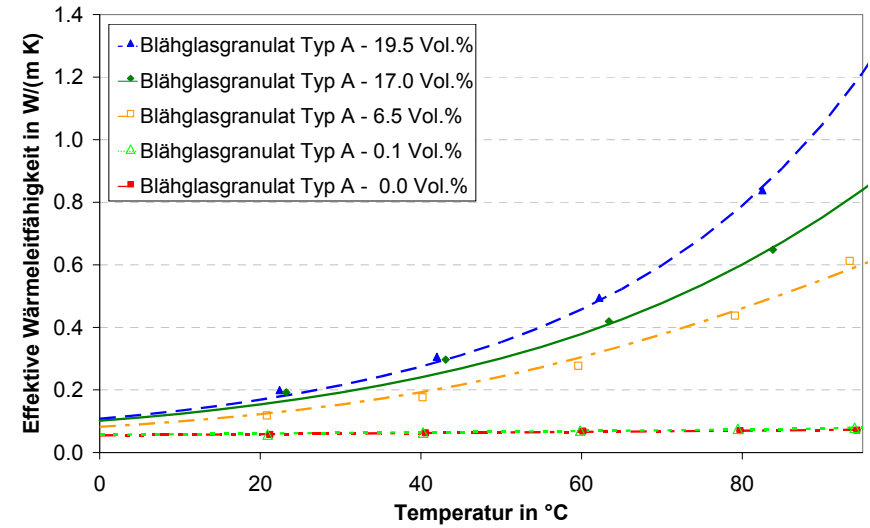


Bild 4: Effektive Wärmeleitfähigkeit von Blähglasgranulat

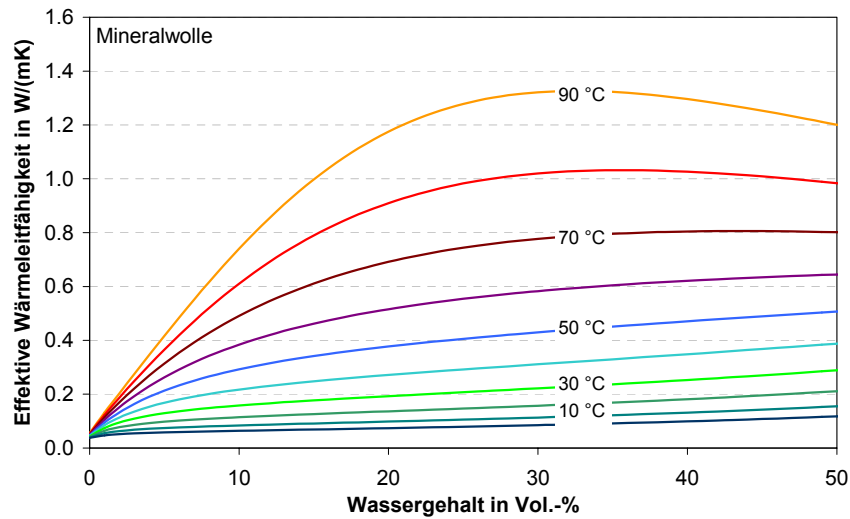


Bild 5: Wärmeleitfähigkeit nach dem Porositäts-Model

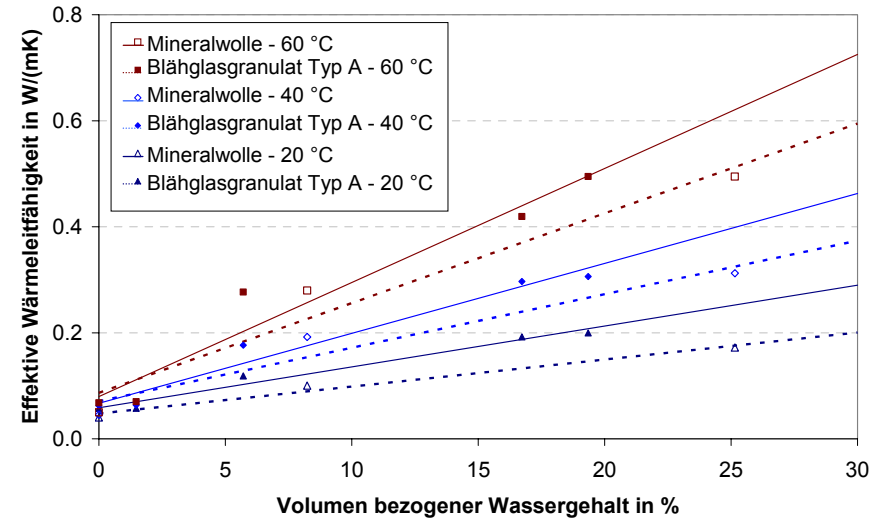


Bild 6: Linearisierung der Wärmeleitfähigkeit

Die effektive Wärmeleitfähigkeit steigt exponentiell mit der Temperatur bei hohen Volumen bezogenen Wassergehalten. Im Bereich hoher Temperaturen ($> 60\text{ °C}$) und Wassergehalte ($> 30\text{ Vol.}\%$) übersteigt die effektive Wärmeleitfähigkeit sogar den Wert der Wärmeleitfähigkeit von Wasser ($0.6\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$). Dies ist durch den Enthalpietransport aufgrund von Porendiffusion zu erklären. Mit höher werdendem Wassergehalt nimmt dieser Effekt wieder ab. Im Extremfall aber, erhöht sich die effektive Wärmeleitfähigkeit um ein Vielfaches: für Mineralwolle zum Beispiel von $0.04\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ bei 10 °C und $0\text{ Vol.}\%$ auf ca. $0.75\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ bei 70 °C und $30\text{ Vol.}\%$ Wassergehalt und sogar auf $1.3\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ bei 90 °C und dem selben Wassergehalt. Für den Anwendungsbereich bis 60 °C kann die Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit vom Volumen bezogenen Wassergehalt (u_v) und der Temperatur (T) hinreichend genau mit einem linearen Zusammenhang nach Gleichung 2 beschrieben werden, wie in Bild 6 beispielhaft für Mineralwolle und für Blähglasgranulat gezeigt wird.

$$\lambda_{eff} = \lambda_{trocken}(T) + \Delta\lambda_{feucht}(T, u_v) \quad (2)$$

4. Zusammenfassung

Die Ergebnisse zeigen, dass bei Verwendung von Dämmstoffen für Systemkomponenten mit Betriebstemperaturen über der Umgebungstemperatur die Auslegung der Dämmschichtdicke nicht mit den Bemessungswerten der Wärmeleitfähigkeit nach DIN 4108 Teil 4 [3] berechnet werden kann. Die Zuschlagswerte, die in der DIN 52616 angegebenen sind, sind nicht ausreichend für hohe Betriebstemperaturen. Gründe dafür sind, dass zum einen die meisten Dämmstoffe bei Anlieferung oder Lagerung nicht vollständig trocken sind (je nach Dämmstoff liegt der Wassergehalt bei Lagerung bzw. Lieferung zwischen 0.5 und $5\text{ Vol.}\%$). Zum anderen sind Dämmstoffe in der Regel Umwelteinflüssen ausgesetzt. Die Darstellung der Wärmeleitfähigkeit als Funktion der Temperatur und der Feuchte ermöglicht die exakte Auslegung der benötigten Dämmstärke von Komponenten von solarthermischen Systemen wie Kollektoren und Speichern.

Im Bereich höherer Temperaturen ($> 50\text{ °C}$) sowie für detaillierte Simulationen sollte aber mit der effektiven Wärmeleitfähigkeit nach dem Schichten-Model von Krischer [2] und nicht mit den vereinfachten linearisierten Zusammenhängen gerechnet werden.

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) unter dem Förderkennzeichen 0329607E gefördert. Die Autoren danken für die Unterstützung. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Literatur

- [1] DIN 52612: „Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit mit dem Plattengerät“.
- [2] Krischer, O; Kast, W: „Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik“, Springer, Berlin, 1992.
- [3] DIN 4108 Teil 4: „Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden“.