

Reihe I:
Allgemeine Fragen des Wärme- und Kälteschutzes

Zur Wärmeleitfähigkeits- Messung feuchter Stoffe bei beidseitig feuchtedichtem Probenabschluss

o. Prof. (em.) Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. mult. Dr. E.h. mult. Karl Gertis
Prof. Dr.-Ing. Andreas H. Holm

Zur Wärmeleitfähigkeits-Messung feuchter Stoffe bei beidseitig feuchtedichtem Probenabschluss

Bei Wärmeleitfähigkeits-Messungen sind die Proben in der Regel trocken. Wenn feuchte Proben gemessen werden, baut sich aufgrund des angelegten Temperaturgefälles über den Probenquerschnitt nicht nur ein Temperaturfeld auf, vielmehr setzt unvermeidbarerweise in der Probe auch ein Feuchtetransport ein, selbst dann, wenn beide Probenoberflächen als feuchtedicht anzusehen sind. Die Probe gibt dann zwar über Ihre Oberflächen keine Feuchte ab; die Feuchte kann sich aber während der Messung innerhalb der Probe verlagern, was latente Energien freisetzt oder bindet. Dadurch wird das Temperaturfeld bei der Messung beeinflusst. Der Feuchteeinfluss wird durch den sogenannten „Feuchte-Einflussfaktor“ beschrieben, der in einer früheren Untersuchung bei einseitig dichtem Feuchteabschluss der Proben untersucht worden war. Bei dem nunmehr untersuchten beidseitig feuchtedichten Probenabschluss ergeben sich annähernd gleiche Feuchte-Einflussfaktoren. Dies überrascht. Die vorhandenen hygrischen Randbedingungen (einseitiger oder zweiseitiger Feuchteabschluss) scheinen also doch nicht so viel Einfluss auszuüben, wie bislang vermutet.

Thermal conductivity testing of damp sample material using double-sided moisture-proof end pieces. *Samples used for thermal conductivity measurements are normally dry. Using damp samples means that due to the temperature gradient generated, not only will a temperature-field over the entire sample cross-section build up, but also there is no way to avoid moisture transfer inside the sample; even with both surfaces considered moisture-proof. The sample will not pass moisture over the surface during measurement, but the moisture inside the sample could shift causing release or absorption of latent energy. This would generate an impact on the temperature field during measurement. The moisture flow is characterized by the so called 'moisture influence factor', which has been monitored in a former test, using a one-sided moisture-proof end piece. The samples with double-sided moisture-proof end pieces used in the current test series show nearly identical 'moisture influence factors'. This result is surprising and seems to prove that the influence of the existing hydric boundary conditions (one-sided or double-sided moisture-proof end piece) is much less than previously assumed.*

1 Problemstellung

In einer früheren Arbeit [1] wurde der Feuchteeinfluss auf die Wärmeleitfähigkeit in grundsätzlicher Weise untersucht. Wenn bei der Messung der Wärmeleitfähigkeit feuchter Stoffe an die Probe ein Temperaturgefälle angelegt wird, baut sich über den Probenquerschnitt nicht nur ein Tempe-

raturfeld auf; vielmehr setzt – unvermeidbarerweise – auch ein Feuchtetransport ein, der Auswirkungen auf den Wärmeleitvorgang zeitigt. Das Temperaturfeld und das sich zeitlich ebenfalls verändernde Feuchtefeld beeinflussen sich wechselseitig. Es hatte sich gezeigt, dass die Beeinflussung des Temperaturfeldes durch die anwesende und sich verlagernde Feuchte stark von den Randbedingungen abhängt, denen die Probe bei der Messung unterworfen ist.

Bei der früheren Untersuchung [1] wurde als Standardfall eine einseitig feuchteoffene Platte aus 20 cm dickem Porenbeton zugrunde gelegt. Die andere (warme) Plattenoberfläche wurde als feuchtedicht angenommen. Bei der Messung mit dem Wärmestrom-Messplattengerät bzw. auch bei anderen Messverfahren, wenn die Proben z. B. mittels einer Folie dicht umhüllt werden, sind demgegenüber beide Oberflächen feuchtedicht. Dieser beidseitig dichte Abschluss wird in der vorliegenden Arbeit untersucht. Dabei sollen – wie beim Wärmestrom-Messplattengerät – beiden Oberflächen konstante Temperaturen aufgebracht sein, in der Regel 20 °C auf der Warmseite und 0 °C auf der Kaltseite, so dass bei der Messung eine Mitteltemperatur von 10 °C über den (trockenen) Plattenquerschnitt zustande kommt. Die vorhandenen Randbedingungen sind somit wie folgt definiert:

Thermisch

Die Temperaturen beider Oberflächen sind vorgegeben (0 °C kalte Seite, 20 °C warme Seite).

Hygrisch

Beide Oberflächen sind feuchtedicht.

Unter diesen Randbedingungen wird in der vorliegenden Arbeit das gekoppelte instationäre Temperatur- und Feuchtefeld untersucht, indem die in der Wärmeleitfähigkeits-Apparatur während der Messung auftretenden hygrothermischen Wanderungsprozesse theoretisch nachgebildet werden. Um Missverständnissen vorzubeugen, ist hervorzuheben, dass die vorliegende Arbeit nur die Feuchteverlagerung und deren energetische Auswirkungen behandelt. Nicht enthalten sind hierin jene Feuchteeinflüsse, die vom in den Poren des Materials ruhenden Wasser oder Wasserdampf-Luft-Gemisch herrühren. Die molekulare Wärmeleitung der in den Poren ruhenden Komponenten (vgl. [1, dort Ziffer 3, Buchstabe c und d]) ist also nicht Gegenstand der vorliegenden Untersuchung.

2 Durchführung der Untersuchung und zugrunde gelegte Stoffwerte

Wie in [1] wird bei der Untersuchung eine 20 cm dicke Probe aus Porenbeton zugrunde gelegt. Das Material Porenbeton wird gewählt, weil sich wegen seiner relativen Homogenität an ihm der Ablauf der einzelnen Phänomene anschaulich analysieren lässt. Bei diesem Material wirken zudem die Diffusions- und Kapillartransporteigenschaften zusammen. Die Wärme- und Feuchteübertragungsvorgänge werden (wie in [1]) mit dem WUFI-Verfahren [2] berechnet. Die Material-Kennwerte entstammen der WUFI-Datenbank [3]. Als Ausgangszustand vor Beginn der Messung wurden entsprechend der Probenvorbereitung im Labor folgende Daten gewählt:

Temperatur

20 °C, isotherm über den Plattenquerschnitt verteilt (Umgebungstemperatur im Labor),

Feuchte

20 Vol.-%, gleichmäßig über den Plattenquerschnitt verteilt.

In Bezug auf die Verdunstungsenthalpie und die Sorptionswärme gelten dieselben Voraussetzungen wie in [1].

3 Ergebnisse

Wegen des beidseitig feuchtedichten Abschlusses der Probe kann während der Messung kein Feuchteaustausch über die Oberflächen erfolgen. Trotzdem kann sich die anwesende Feuchte, die bei Messbeginn konstant über den Plattenquerschnitt verteilt war, im Inneren der Probe verlagern, was latente Energien freisetzt oder bindet. Dies hat Auswirkungen auf das Temperaturfeld im Proben-Inneren, obwohl die Temperaturen an den beiden Oberflächen der Probe fix vorgegeben sind. Man erkennt aus dieser kurzen Erläuterung, dass bei der Messung feuchter Proben relativ komplizierte Wärme- und Feuchte-transportprozesse in der Probe ausgelöst werden, die zunächst nicht ohne weiteres durchschaubar sind.

Bild 1 veranschaulicht die sich zu verschiedenen Zeitpunkten während der Messung einstellenden Feuchteverteilungen über den Plattenquerschnitt. Ausgehend von einer mittleren Start-Feuchte von 20 Vol.-% (gestrichelte Linie) senkt sich der Feuchtegehalt an der (warmen) Innenoberfläche allmählich ab, während er an der kalten Außenoberfläche ansteigt. Das während der Messung anliegende Temperaturgefälle schiebt die Feuchte also nach außen. Nach 14-tägiger Messdauer ist der Feuchtegehalt außenseitig auf ca. 21 Vol.-% angestiegen; innenseitig sinkt er auf 18,7 Vol.-% ab. Da die Innen- und die Außenoberfläche feuchtedicht sind, müsste der Gradient der Feuchtekurven an den Oberflächen eigentlich Null sein; d. h., dass die Kurven dort senkrecht einmünden müssten (vgl. die schematische Darstellung in Bild 2, die bewusst etwas „übertrieben“ gezeichnet wurde). Die schraffierte Fläche F_1 muss ferner gleich der Fläche F_2 sein, weil insgesamt ja kein Feuchteaustausch erfolgen kann.

Bei der Gesamtquerschnitts-Darstellung in Bild 1 ist dies aus Maßstabsgründen nicht zum Ausdruck gekommen. Wählt man hingegen eine engmaschigere Fein-Darstellung, in der nur einige Millimeter der Proben-Innen-

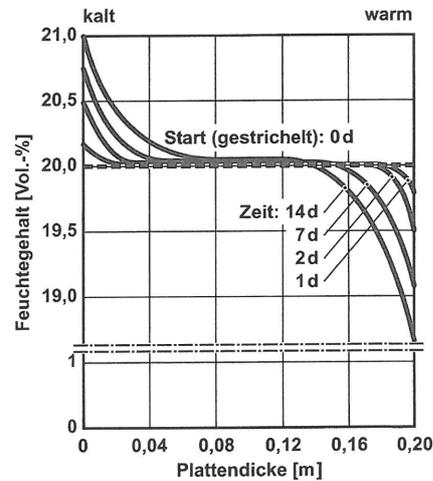


Bild 1. Verteilung des Feuchtegehaltes über die Plattendicke zu verschiedenen Zeitpunkten während der Messung; die Messung beginnt mit einer konstanten Feuchte von 20 Vol.-% zum Zeitpunkt $t = 0$ d

Fig. 1. Moisture distribution over the cross-section of the plate during measurement beginning at 20 vol.-% constant moisture at $t = 0$ d

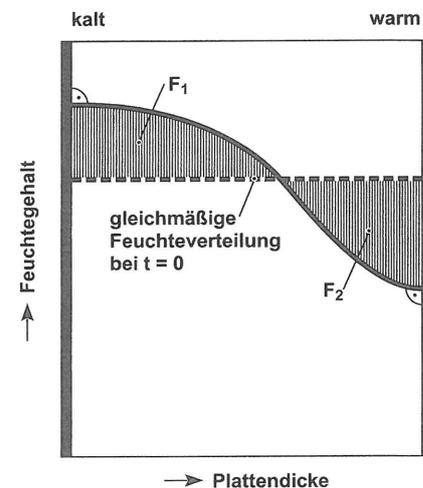


Bild 2. Schematische Darstellung der Feuchteverteilung über den Plattenquerschnitt; links: kalte Oberfläche (Kühlplatte), rechts: warme Oberfläche (Heizplatte). Die Verteilungskurve mündet links und rechts senkrecht ein. Die Fläche F_1 unter der Kurve muss gleich der Fläche F_2 oberhalb der Kurve sein (Fig. 2. Moisture distribution over the cross-section, schematically; left: cold surface (cooling plate), right: warm surface (heating plate). The distribution curve lands perpendicular on both plates. Areas F_1 and F_2 must be equal)

sicht abgebildet werden, wie dies in Bild 3 für den Bereich von 196 bis 200 mm geschehen ist, so erkennt man das senkrechte Einmünden der Kurven in die Innenoberfläche bei einer Plattendicke von 200 mm.

Bild 4 zeigt die Temperaturverteilungen über den Plattenquerschnitt. Bei einer trockenen Probe muss sich im stationären Endzustand eine lineare Temperaturverteilung einstellen (gestrichelte Linie). In der feuchten Probe bauchen sich die Kurven konvex nach oben auf. Bei Messbeginn (Start-Kurve) ist die Aufwölbung am stärksten ausgeprägt; nach 1 d wird sie bereits schwächer, bis sie – theoretisch nach unendlich langer Zeit – in die gestrichelt gezeichnete lineare Temperaturverteilung der trockenen Probe über-

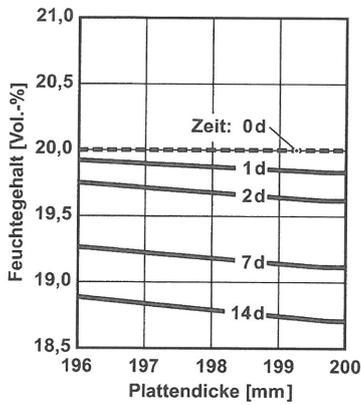


Bild 3. Fein-Verteilung des Feuchtegehaltes über die Innenschicht der Platte im Bereich von 196 bis 200 mm zu verschiedenen Zeitpunkten während der Messung
 Fig. 3. Moisture distribution over the inner cross-section of the plate in the warm zone from mm 196 to mm 200 at various time during measurement

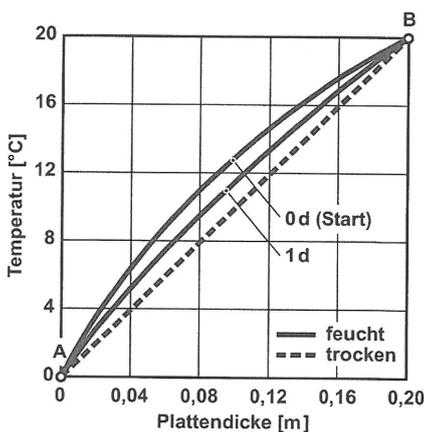


Bild 4. Temperaturverteilungen über den Plattenquerschnitt in der feuchten und trockenen Probe während der Messung; feucht: nach 0 d (Start) bzw. nach 1 d, trocken: stationärer Endzustand (gestrichelt). Die Temperaturen im Punkt A und B sind fest vorgegeben
 Fig. 4. Temperature distribution over the cross-section of the plate for the moist sample (at $t = 0$ d and $t = 1$ d resp.), and for the dry sample at stationary final state (dashed line). Temperatures at A and B are preset

geht. Der Punkt A (links unten in Bild 4) und der Punkt B (rechts oben) sind jeweils Fixpunkte, weil die beiden Oberflächen über die Kühl- bzw. Heizplatte auf 0 °C bzw. 20 °C gehalten werden. Das konvexe Aufwölben der Kurven rührt von den Latententhalpien beim Verdunsten bzw. beim Kon-

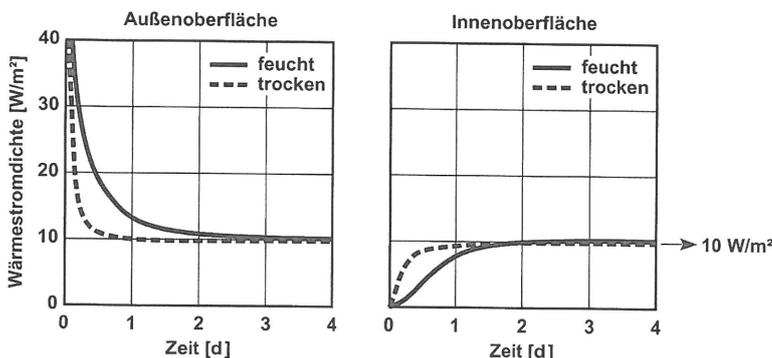


Bild 5. Zeitlicher Verlauf der Wärmestromdichten an der Außen- und an der Innenoberfläche der feuchten bzw. trockenen Probe während der Messung. Im Plattengerät wird die an der warmen Innenoberfläche zugeführte Wärme als Heizenergie gemessen
 Fig. 5. Time course of the heat flow density on the outer and inner sample surfaces of a moist and a dry sample, respectively during measurement. The heat that feeds the inner surface is measured as heating energy

densieren oder Tauen des Wassers in den Poren des Materials her.

Die Wirkung der latenten Phasenänderungen des Porenwassers wird bei der Betrachtung der Wärmestromdichten in Bild 5 besonders deutlich. Man erkennt, dass sich nach längerer Messdauer alle Wärmestromdichten asymptotisch dem trockenen Endwert von 10 W/m² annähern. Auch in der trockenen Probe muss sich nämlich das Temperaturfeld allmählich erst aufbauen, weil die vor Messbeginn auf 20 °C klimatisierte Probe außenseitig auf 0 °C abgekühlt wird. Dies bedeutet, dass die Wärmestromdichte an der Außenoberfläche (linkes Diagramm in Bild 5) zunächst wesentlich größer sein muss als die innenseitige Wärmestromdichte (rechtes Diagramm). Nachträglich erklärt dies auch die konvexe Krümmung der Temperaturkurven in Bild 4; der Gradient der dortigen Temperaturkurven, welcher sich zum Wärmestrom proportional verhält, ist auf der Außenseite nämlich steiler als auf der Innenseite.

Wie Bild 5 veranschaulicht, geht der Aufbau des Wärmefeldes in der trockenen Probe schneller vor sich als in der feuchten, weil im Trockenzustand keine Latentwärmeprozesse vorhanden sind. Die Wärmestromdichte an der Proben-Innenoberfläche entspricht der Heizleistung. Man ersieht, dass sich die Kurve für die Trockenprobe (gestrichelt) mit der ausgezogenen Kurve für die Feuchtprobe bei ca. 1,9 d kreuzt. Diese Kreuzung der Kurven, die auch schon in [1] festgestellt und beschrieben worden ist, stellt ein wichtiges Ergebnis dar. Das feuchte Material zieht nämlich ab dem Kreuzungspunkt an der Innenoberfläche mehr Wärmeenergie ab als das trockene.

Es verwundert deshalb nicht, dass sich auch die Kurven der Wärmeleitfähigkeit (vgl. Bild 6), die sich durch Quotientenbildung aus der Heizleistung und dem an den Oberflächen anliegenden Temperaturgefälle ermitteln lässt, in diesem Punkt kreuzen. Wegen der Bremswirkung der Feuchte aufgrund der Latentwärme steigt die Wärmeleitfähigkeit der feuchten Probe zunächst langsamer an als diejenige der trockenen Probe. Im Schnittpunkt wird für die trockene Probe genau dieselbe Wärmeleitfähigkeit gemessen wie für die feuchte.

Ermittelt man aus den Wärmeleitfähigkeitskurven für die trockene und für die feuchte Probe den Feuchte-Einflussfaktor, so erhält man den in Bild 7 wiedergegebenen Verlauf. Dieser Verlauf für die beidseitig feuchtedicht abgeschlossene Probe unterscheidet sich nur geringfügig von dem früher in [1] ermittelten Verlauf für die einseitig dichte Probe, der zum Vergleich in Bild 7 strichpunktiert miteingezeichnet worden ist.

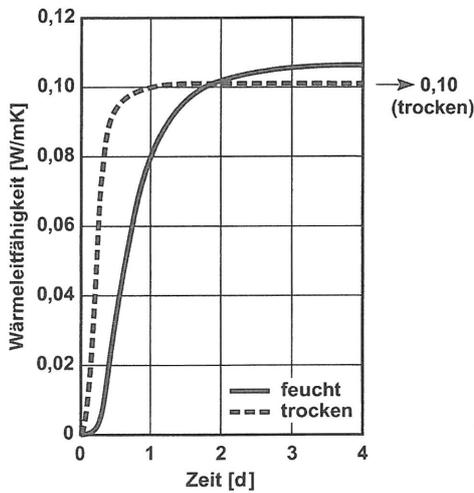


Bild 6. Zeitlicher Verlauf der Wärmeleitfähigkeit während der Messung einer feuchten und einer trockenen Probe
 Fig. 6. Time course of the thermal conductivity during measurement of a humid and a dry sample

Der Nulldurchgangspunkt für den beidseitig feuchtedichten Abschluss liegt, wie in Bild 7 vermerkt, bei 1,87 d. Für den früher untersuchten einseitig dichten Abschluss, welcher der Messung mit Wärmeflussmessplatten entspricht, lag er bei 1,77 d (vgl. [1, dort Bild 13]). Die Unterschiede zwischen einem einseitigen und einem zweiseitig dichten Abschluss sind also relativ marginal. Dass die Unterschiedlichkeit in der feuchtetechnischen Randbedingung sich in so geringem Maße auf das Wärmeleitfähigkeits-Messergebnis auswirkt, überrascht. Es besagt aber nicht, dass kein Feuchte-Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeitsmessung vorhanden ist, sondern lediglich, dass der Feuchte-Einfluss bei beiden hygrischen Randbedingungen annähernd gleich ist. In späteren Untersuchungen muss unbedingt überprüft werden, ob die Feuchte-Einflussfaktor-Kurve auch bei andersartigen Randbedingungen wiederum einen praktisch ähnlichen Verlauf nimmt. Wenn dies zuträfe, wäre die Feuchte-Einflussfaktor-Kurve praktisch „universell“ gültig und würde für alle Randbedingungen und Wärmeleitfähigkeits-Messmethoden gelten.

4 Zusammenfassung und Folgerungen

Bei Wärmeleitfähigkeitsmessungen sind die Proben in der Regel trocken. Wenn feuchte Proben gemessen werden, baut sich aufgrund des angelegten Temperaturgefälles über den Probenquerschnitt nicht nur ein Temperaturfeld auf; vielmehr setzt unvermeidbarerweise in der Probe auch ein Feuchtetransport ein, selbst dann, wenn beide Probenoberflächen als feuchtedicht anzusehen sind. Die Probe gibt dann zwar über ihre Oberflächen keine Feuchte ab; die Feuchte kann sich aber während der Messung innerhalb der Probe verlagern, was latente Energien freisetzt oder bindet. Dadurch wird das Temperaturfeld bei der Messung beeinflusst.

Der Feuchte-Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeitsmessung kommt im sog. „Feuchte-Einflussfaktor F “ zum Ausdruck $F = (\lambda_f - \lambda_{tr})/\lambda_{tr}$, wobei λ_f Wärmeleitfähigkeit der feuchten Probe, λ_{tr} Wärmeleitfähigkeit im Trockenzustand ist. Der Einflussfaktor nimmt bei Messbeginn zunächst ne-

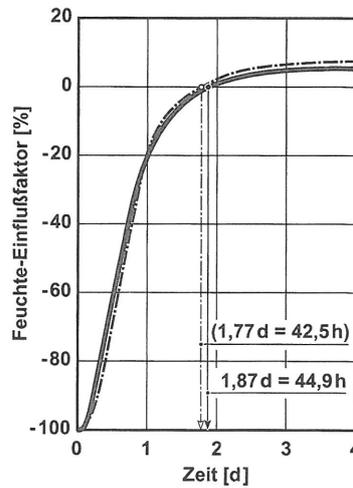


Bild 7. Zeitlicher Verlauf des Feuchte-Einflussfaktors $F = (\lambda_f - \lambda_{tr})/\lambda_{tr}$ während der Messung, F Feuchte-Einflussfaktor, λ_f Wärmeleitfähigkeit des feuchten Materials, λ_{tr} Trocken-Wärmeleitfähigkeit; zum Vergleich ist strichpunktiert auch die frühere Kurve für einseitig feuchtedichten Abschluss aus [1] miteingetragen

Fig. 7. Time course of the moisture effect factor $F = (\lambda_f - \lambda_{tr})/\lambda_{tr}$ during measurement, where λ_f is the thermal conductivity of the moist substance and λ_{tr} is the dry thermal conductivity; compared with the curve for a single-sided moisture proof sample

gative Werte an, erreicht nach einer knapp zweitägigen Messdauer den Wert Null und wird dann positiv. Es überrascht, dass der Zeitverlauf des Feuchte-Einflussfaktors bei beidseitig dichtem Feuchteabschluss nahezu identisch ist mit dem Verlauf der schon früher untersuchten Wärmeleitfähigkeitsmessung mit einseitig dichtem Feuchteabschluss. Die vorhandenen hygrischen Randbedingungen (einseitiger oder zweiseitiger Feuchteabschluss) scheinen also doch nicht so viel Einfluss auszuüben, wie bislang vermutet. Ob dies auch für die andersartigen Randbedingungen bei den übrigen Wärmeleitfähigkeitsmessverfahren zutrifft, müsste in weiteren Untersuchungen geklärt werden.

Literatur

- [1] Gertis, K., Holm, A.: Zur Messung der Wärmeleitfähigkeit feuchter Stoffe. Bauphysik 36 (2014), H. 1, S. 27–39.
- [2] Fraunhofer-Institut für Bauphysik: Berechnung des hygrothermischen Verhaltens von Baukonstruktion unter realen Bedingungen (WUFI). Version 5.1.0.599 (2012).
- [3] Fraunhofer-Institut für Bauphysik: WUFI-Datenbank. Version 24.71 (2012).

Autoren dieses Beitrages:

o. Prof. (em.) Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. mult. Dr. E.h. mult. Karl Gertis
 Lehrstuhl für Bauphysik, Universität Stuttgart
 Bis 2003 Direktor des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik.
 2007 Emeritierung

Prof. Dr.-Ing. Andreas Holm
 Leiter des Forschungsinstituts für Wärmeschutz FIW München
 Lochhauer Schlag 4
 82166 Gräfelfing
 Professor für Bauphysik,
 Hochschule München

Forschungsinstitut für Wärmeschutz e. V. München
Lochhamer Schlag 4
82166 Gräfelfing
Deutschland

Telefon +49 89 85800 0
Telefax +49 89 85800 40
info@fiw-muenchen.de
www.fiw-muenchen.de

Bauaufsichtlich anerkannte Prüf-, Überwachungs- und Zertifizierungsstelle

