

DGZfP-Berichtsband BB 69-CD
Vortrag M1

Photothermische Feuchtebestimmung an Baumaterialien

B.K. Bein, I. Delgadillo-Holtfort *, J. Gibkes, J. Pelzl,
Ruhr-Universität Bochum, AG Festkörper-Spektroskopie,
D-44780 Bochum;

* Aufenthalt mit Erlaubnis vom Instituto Politécnico Nacional, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados,

Apdo. postal 14-740, 07000 México D.F.

Kurzfassung

Die thermischen Eigenschaften von porösen Festkörpern (z.B. Baustoffe und Mauerwerke) variieren stark mit dem Feuchtigkeitsgehalt in dem Porenraum. Mit Hilfe photothermischer Messverfahren können die effektiven thermischen Eigenschaften von Festkörpern kontaktlos gemessen werden. Dabei wird die Probenoberfläche durch Absorption periodisch modulierter elektromagnetischer Strahlung beheizt und die thermische Response mittels eines IR-Detektors gemessen. Bei Variation der Modulationsfrequenz der Heizung können die Tiefenprofile der thermischen Eigenschaften gemessen und mit Hilfe von Schichtmodellen quantitativ bestimmt werden.

In dieser Arbeit wurden mittels der IR-Radiometrie Feuchte-Tiefenprofile als Funktion der Trocknungszeit aufgenommen. Aus der gemessenen Amplitude der thermischen Welle und ihrer Phasenverschiebung gegenüber der Heizungsmodulation können der Wärmeeindringkoeffizient und die thermische Diffusionszeit bestimmt werden. Die Kombination der beiden Messgrößen liefert Information über die Wärmekapazität. In mineralen Materialien, Erdböden und Baumaterial variieren der Wärmeeindringkoeffizient und die kombinierte Messgröße stark mit dem Feuchtegehalt, da sich die Effekte der Feuchte auf die effektive Wärmeleitung, Massendichte und Wärmespeicherung akkumulieren, so dass sich diese beiden Größen zur Charakterisierung des Feuchtegehalts von Mauerwerk und Baumaterialien besonders gut eignen.

Die zerstörungsfreien Methoden der thermischen Wellen eignen sich sowohl zur Bestimmung des Feuchtegehalts von Materialproben im Labor, als auch bei großflächiger modulierter Heizung und Messung mittels IR-Kamera vor Ort.

Einleitung

Baustoffe und Mauerwerk sind poröse Festkörper, deren Porenraum mit Luft und teilweise mit Feuchte gefüllt ist. Bedingt durch die niedrigen thermischen Transporteigenschaften der Luft, liegen in trockenen porösen Materialien im allgemeinen niedrigere thermische Eigenschaften vor als im entsprechenden kompakten Material. Bei teilweiser Füllung der Poren mit Wasser und Wasserdampf können dagegen die effektiven thermischen Transportparameter erheblich ansteigen, bedingt durch die

Wärmeleitung in den wassergefüllten Poren, bzw. durch die vom Wasserdampf getragene Wärmediffusion im Porenraum.

In dieser Arbeit wurden mit Hilfe der photothermisch modulierten Infrarot-Radiometrie die effektiven thermischen Eigenschaften verschiedener Baumaterialien (Kalksandstein, Ziegelstein, Stuck, Mörtel, Beton, Schaumstoff-Isolierungen) in Abhängigkeit von der Feuchte gemessen. In Kapitel 2 werden das Messverfahren und die Interpretation der Messwerte kurz beschrieben, im Anschluss daran werden in Kapitel 3 einige Messergebnisse am Beispiel Kalksandstein und Stuck vorgestellt und bewertet. In Kapitel 4 werden Anwendungsmöglichkeiten der modulierten IR-Radiometrie zur In-situ-Bestimmung der Feuchte an Bauwerken diskutiert.

Photothermisch modulierte Infrarot-Radiometrie

Bei intensitätsmodulierter Heizung von Körpern mittels elektromagnetischer Strahlung werden räumlich-zeitlich variierende Temperaturfelder, sogenannte thermische Wellen, erzeugt, die von der Wärmeleitungsgleichung beschrieben werden und von den thermischen Eigenschaften und ihrer Verteilung im Körper abhängen. Aus der Messung der thermischen Response des beheizten Körpers mittels IR-Radiometrie, bei der die modulierte Abstrahlung des Körpers im nahen und mittleren Infraroten detektiert wird, können die effektiven thermischen Eigenschaften orts- und tiefenabhängig bestimmt werden, die bei Baumaterialien von der Porosität abhängen und sich mit der jeweilig vorhandenen Feuchte ändern können.

Mess-System

Das von der AG Festkörperspektroskopie für diese Arbeiten entwickelte Mess-System zur IR-Detektion thermischer Wellen (Abb. 1) besteht im wesentlichen aus drei Komponenten: einem Argon-Ionen-Laser zur Anregung thermischer Wellen relativ geringer Temperaturamplitude, dem IR-Detektionssystem und der Mess-Elektronik, um die kleine periodische Strahlungsvariation, die der thermischen Welle $\Delta T(f)$ entspricht, aus dem vergleichsweise großen Strahlungshintergrund bei der stationären Oberflächentemperatur T der Probe herauszufiltern und als digitales Signal zu speichern.

Für die periodisch oszillierende Beheizung der Proben wird der Strahl eines Argon-Ionen-Lasers (Spectra Physics, Series 2000) mit Hilfe eines akusto-optischen Modulators (Isle Optic LM 080) periodisch moduliert. Für die Messung der Feuchte an Baumaterialien wurde je nach Reflexionsvermögen der Proben eine effektive Heizleistung von maximal 1000 mW auf einen Heizfleck von etwa 7,5 mm Durchmesser aufgebracht. Um die Tiefenverteilung der effektiven thermischen Eigenschaften und das Feuchteprofil messen zu können, wurde die Modulationsfrequenz der Heizung zwischen 0,03 Hz und 100 Hz variiert.

Für die Detektion der IR-Strahlung wird ein Stickstoff-gekühlter photoleitender HgCdTe-Detektor (Judson) und eine IR-Optik benutzt, die aus zwei BaF₂-Linsen und einem Germanium Cut-on-Filter zur Unterdrückung von Streulichtbeiträgen im sichtbaren Spektralbereich besteht. Das detektierbare Wellenlängenintervall ist auf das nahe und mittlere Infrarot, $1 \mu\text{m} < \lambda < 12 \mu\text{m}$, beschränkt.

Das vom IR-Detektor gemessene Strahlungssignal wird über einen Vorverstärker auf einen Zwei-Phasen-Heterodyn-Lock-In-Verstärker (Stanford 830 DSP) gegeben, mit dessen Hilfe die mit der Frequenz f der Heizung modulierten Strahlungsbeiträge aus dem Strahlungshintergrund herausgefiltert werden und nach Amplitude und Phasen-

verschiebung relativ zur Modulation der Heizung zerlegt werden. Der gesamte Messprozess wird von einem Computer gesteuert.

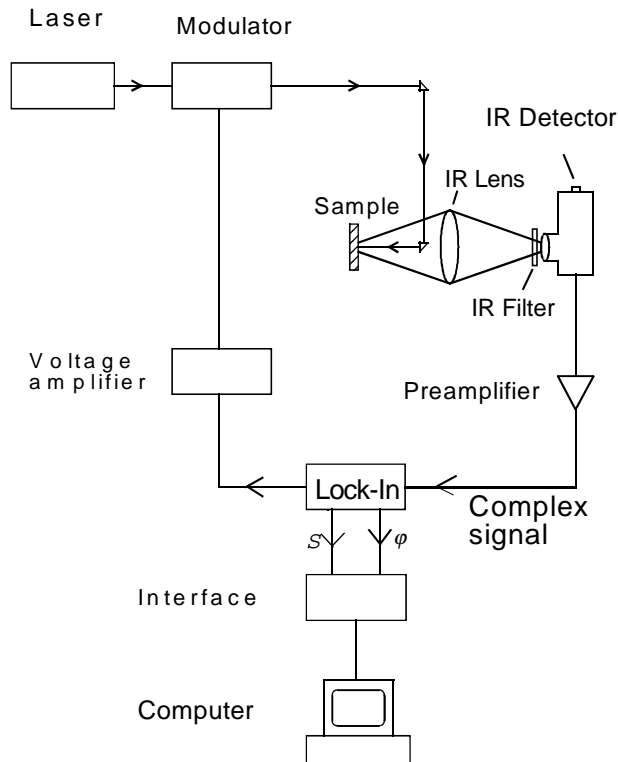


Abb. 1. Mess-System zur IR-Detektion thermischer Wellen.

Bei stationären Proben temperaturen von 20°C bis 100°C können mit dem von der AG Festkörperspektroskopie entwickelten Detektionssystem kleinste thermische Wellen von etwa $\Delta T = 50 \mu\text{K}$ bis $15 \mu\text{K}$ detektiert werden [1].

Theorie thermischer Wellen

Das bei intensitätsmodulierter Heizung in der Probe angeregte Temperaturfeld $T(\vec{x}, t)$ gehorcht der Wärmeleitungsgleichung

$$\frac{\partial T(\vec{x}, t)}{\partial t} = \alpha \operatorname{div} \operatorname{grad} T(\vec{x}, t) + \frac{Q(\vec{x}, t)}{C} \quad (1)$$

und wird von der Stärke und Lokalisierung der Wärmequellen $Q(\vec{x}, t)$ bestimmt. Die thermischen Parameter in Gl. (1) sind der Temperaturleitwert α und die spezifische Wärme pro Volumeneinheit $C = \rho \cdot c$, wobei ρ die Massendichte und c die spezifische Wärmekapazität des Materials sind. Für die qualitative Diskussion der Eigenschaften thermischer Wellen wird hier ein opaker halbumendlicher Körper bei eindimensionaler Ausbreitung der Wärme und harmonisch periodischer Heizungsmodulation betrachtet. Neben einer stationären Aufheizung ergibt sich eine modulierte thermische Response, die nach Carslaw and Jaeger [2] durch

$$\Delta T(x, t) = \frac{\eta I_0}{e \sqrt{2\pi f}} \exp\left(-x/\sqrt{\alpha/\pi f}\right) \cos\left(2\pi ft - x/\sqrt{\alpha/\pi f} - \pi/4\right) \quad (2)$$

beschrieben wird. In Gl. (2) gibt η den absorbierten Anteil der einfallenden Intensität I_0 der elektromagnetischen Strahlung an, und f ist die Modulationsfrequenz der Heizung. Wie Gl. (2) zeigt, ist die Eindringtiefe x der thermischen Welle, die proportional zur thermischen Diffusionslänge

$$x \propto \mu_{th} = \sqrt{\alpha / \pi f} \quad (3)$$

ist, durch exponentielle Dämpfung begrenzt. Bedingt durch die Frequenzabhängigkeit der thermischen Diffusionslänge kann die Eindringtiefe bei der Messung durch gezielte Variation der Modulationsfrequenz kontrolliert werden. Da andererseits Amplitude und Phasenverschiebung von den thermischen Eigenschaften abhängen, dem Wärmeeindringkoeffizienten e und dem Temperaturleitwert α , können frequenzabhängige Messungen der Amplitude und Phase der thermischen Welle tiefenaufgelöste Information über diese thermischen Parameter liefern. Der in Gl. (2) auftretende Wärmeeindringkoeffizient [3] ist durch

$$e = \sqrt{k \rho c} \quad (4)$$

mit der Wärmeleitfähigkeit k , der Massendichte ρ und der spezifischen Wärmekapazität c verknüpft und ist der relevante thermophysikalische Parameter bei der Aufheizung von Festkörpern durch Absorption von zeitabhängigen Wärmeströmen [2]. Während die Oberflächentemperatur $\Delta T_s(t) = \Delta T(x=0, t)$ nur vom Wärmeeindringkoeffizienten abhängt, wird die Wärmeausbreitung innerhalb des Körpers auch vom Temperaturleitwert

$$\alpha = k / (\rho c) \quad (5)$$

bestimmt.

Bei der periodischen Aufheizung des homogenen halbbunendlichen Körpers ist in Gl. (2) zu erkennen, dass die Phase der thermischen Response an der Oberfläche $x = 0$ relativ zum Heizprozeß um den Winkel $-\pi/4 = -45^\circ$ verzögert ist. Diese Verzögerung entspricht auch unserer Erfahrung bei der Aufheizung des Erdbodens durch die Sonne im Tages- bzw. Jahresverlauf. Der höchste Sonnenstand und die höchste Einstrahlung werden um 12 Uhr mittags erreicht, während die höchsten Tagestemperaturen zeitlich verzögert gegen 15 Uhr gemessen werden. Im Jahresverlauf entspricht der Phasenverzögerung von 45° eine Differenz von etwa 45 Tagen, d. h. die höchsten Temperaturen werden erst Anfang August erreicht [4].

Beschreibung der Mess-Signale

Das Strahlungssignal, das der stationären mittleren Oberflächentemperatur T der Probe entspricht, kann durch

$$M(T) = C \int_0^\infty d\lambda F(\lambda) R'(\lambda) \varepsilon(\lambda, T) w(\lambda, T) \quad (6)$$

beschrieben werden. Dabei ist $F_D(\lambda)$ das Transmissionsvermögen der IR-Optik, $R'(\lambda)$ die relative spektrale Empfindlichkeit des Detektors, $\varepsilon(\lambda, T)$ das spektrale Emissionsvermögen der Probe im fokussierten Raumwinkel und $w(\lambda, T)$ die Strahlung des schwarzen Körpers nach Planck. Die Konstante C umfaßt verschiedene Einflußfaktoren: den fokussierten Raumwinkel und die Größe der emittierenden Fläche, die maximale Response R_{max} des Detektors und den Verstärkungsfaktor der Mess-Elektronik.

Da die periodische thermische Response im Vergleich zur stationären mittleren Oberflächentemperatur klein ist, $\Delta T(f) \ll T$, kann Gleichung (6) zur Beschreibung des periodischen Strahlungssignals nach T differenziert und linearisiert werden,

$$\Delta M(T, f) = C \left[\int_0^\infty d\lambda F_D(\lambda) R'(\lambda) \frac{\partial \varepsilon(\lambda, T)}{\partial T} w(\lambda, T) + \right.$$

$$+ \int_0^{\infty} d\lambda F_D(\lambda) R'(\lambda) \varepsilon(\lambda, T) \partial w(\lambda, T) / \partial T \Big] \cdot \Delta T(f) \quad (7)$$

Bei Vernachlässigung der Temperaturabhängigkeit des Emissionsvermögens im Vergleich zur Temperaturvariation des Planck'schen Strahlungsgesetzes und bei Annahme eines von der Wellenlänge unabhängigen Emissionsvermögens $\varepsilon = \varepsilon(\lambda, T)$ können Gleichungen (6) und (7) vereinfacht werden:

$$M(T) = C\varepsilon \int_0^{\infty} d\lambda F_D(\lambda) R'(\lambda) w(\lambda, T) \quad (8)$$

$$\Delta M(T, f) = C\varepsilon \int_0^{\infty} d\lambda F_D(\lambda) R'(\lambda) \partial w(\lambda, T) / \partial T \cdot \Delta T(f) \quad (9)$$

Das periodische Strahlungssignal (9), das der thermischen Welle $\Delta T(f)$ entspricht, ist ein kleiner zusätzlicher Beitrag, der mit Hilfe des Zwei-Phasen-Lock-In-Verstärkers aus der gesamten emittierten Strahlung, die der mittleren Oberflächentemperatur T entspricht, herausgefiltert wird. Der Lock-In-Verstärker dient auch dazu, das detektierte Signal nach Amplitude und Phasenverschiebung relativ zur Modulation der Heizung zu zerlegen. Bei gleichzeitiger Messung des periodischen und des stationären Strahlungssignals können der geräteabhängige Faktor C und das effektive Emissionsvermögen ε eliminiert werden und die periodische thermische Response kann, bei bekannter Temperatur T , direkt bestimmt werden:

$$\Delta T(f) = \frac{\Delta M(T, f)}{M(T)} \frac{\int_0^{\infty} d\lambda F_D(\lambda) R'(\lambda) w(\lambda, T)}{\int_0^{\infty} d\lambda F_D(\lambda) R'(\lambda) \partial w(\lambda, T) / \partial T} \quad (10)$$

Bei der Messung des periodischen Strahlungssignals $\Delta M(T, f)$ sind quantitative Aussagen über physikalische Eigenschaften, thermische, optische und damit korrelierende andere Eigenschaften, wie z.B. die Porosität oder Feuchte möglich, wenn die Einflüsse des Detektionsprozesses vernachlässigt oder eliminiert werden können. Die Elimination solcher Einflußfaktoren wird praktisch erreicht, indem Referenzmessungen an einfachen Modellkörpern bekannter Eigenschaften zur Normierung der Mess-Signale von Körpern unbekannter Eigenschaften herangezogen werden, oder wenn Messungen am gleichen Material im feuchten und trockenen Zustand miteinander verglichen werden.

Im folgenden sollen die periodischen Strahlungssignale, die nach Gl. (2) und (9) für einen Referenzkörper bekannter thermischer und optischer Eigenschaften und einen feuchten Probenkörper unbekannter Eigenschaften gemessen werden, miteinander verglichen werden. In der invers normierten Darstellung ergibt sich dann:

$$S_n^{-1}(f) = \frac{\Delta M_{ref}(T_{ref}, f, t)}{\Delta M_s(T_s, f, t)} = \frac{\varepsilon_{ref} \int_0^{\infty} d\lambda F_D(\lambda) R'(\lambda) [\partial w(\lambda, T) / \partial T]_{T=T_{ref}}}{\varepsilon_s \int_0^{\infty} d\lambda F_D(\lambda) R'(\lambda) [\partial w(\lambda, T) / \partial T]_{T=T_s}} \cdot \frac{\eta_{ref}}{\eta_s} \frac{e_s}{e_{ref}} \quad (11)$$

Wegen der relativ niedrigen Heizleistung, die bei der Messung verwendet wird, können die Unterschiede in der stationären Oberflächentemperatur von Probe T_s und Referenz T_{ref} in den Integralen, welche den Einfluß von Gerätegrößen und Planck'schem Strahlungsgesetz berücksichtigen, vernachlässigt werden, und es ergibt sich:

$$S_n^{-1}(f) = \frac{\varepsilon_{ref}}{\varepsilon_s} \frac{\eta_{ref}}{\eta_s} \frac{e_s}{e_{ref}} \quad (12)$$

Die optischen Eigenschaften in Gleichung (12), das Emissionsvermögen im Infraroten (ε_s) und das photothermische Absorptionsvermögen im sichtbaren Spektralbe-

reich (η_s) können zwar auch mit der Feuchte F variieren, hängen als optische Eigenschaften aber nicht von der Eindringtiefe der thermischen Welle ab wie der Wärmeindringkoeffizient $e_s = e_s(f, F)$, so dass bei frequenzabhängigen Messungen eindeutig auf die Feuchteeffekte zu schließen ist:

$$S_n^{-1}(f, F) = \frac{\epsilon_{ref} \eta_{ref}}{e_{ref}} \frac{1}{\epsilon_{s,F} \eta_{s,F}} e_s(f, F) \quad (13)$$

Messungen an trockenen und feuchten Baumaterialien

Im folgenden werden einige Messergebnisse an Kalksandstein und Stuck vorgestellt, zwei Materialien, welche sich bei der Fechteaufnahme und beim Trocknen unterschiedlich verhalten. Als Referenzkörper zur Normierung der Messungen wird zu meist eine Sigradur-Probe benutzt, ein amorpher Kohlenstoff-Körper bekannter thermischer und optischer Eigenschaften mit glatter Oberfläche, der kompakt und bei Raumtemperatur sowohl im sichtbaren Spektralbereich als auch im gemessenen IR-Bereich opak ist und dadurch als Referenzkörper besonders geeignet ist.

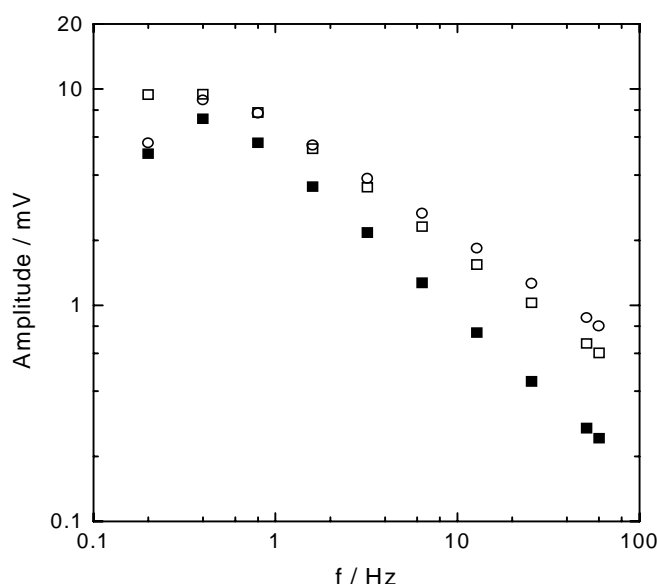


Abb. 2: Gemessene Signalamplituden für einen trockenen (□) und einen feuchten (■) Kalksandstein, im Vergleich mit dem Signal der Referenzprobe Sigradur (○).

Abb. 2 zeigt die gemessenen Signale, die mit Hilfe der in Abb. 1 dargestellten Anordnung in Reflexion an einem Kalksandstein im trockenen (□) und im feuchten Zustand (■) gemessen wurden, im Vergleich mit den Signalen für den Referenzkörper Sigradur (○). Auf den ersten Blick wird bereits sichtbar, dass das Signal des feuchten Kalksandsteins kleiner ist als bei dem trockenen, woraus geschlossen werden kann, dass nach Gl. (2) und (9) ein höherer Wärmeindringkoeffizient e nach der Befuchtung gemessen wurde. Deutlicher wird dieser Effekt, wenn wir die invers normierten Amplituden (Vergl. Gl 13)

$$S_n^{-1}(f^{-1/2}) = S_{ref}(f)/S_{KS}(f) \quad (14)$$

des feuchten und des trockenen Kalksandsteins als Funktion von $f^{-1/2}$ darstellen (Abb. 3).

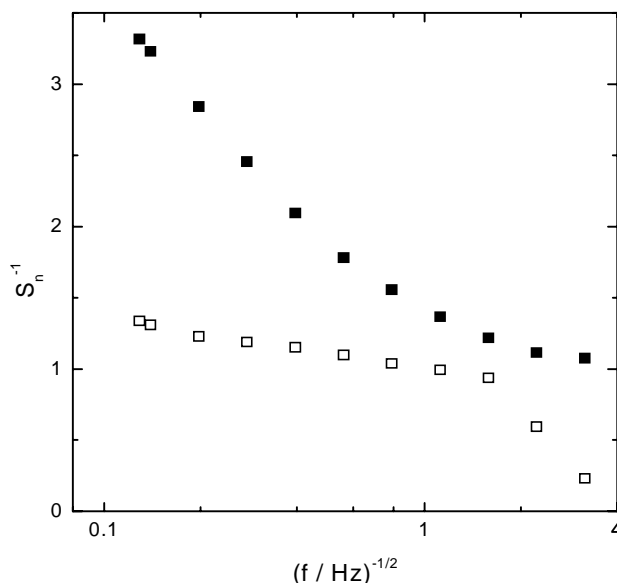


Abb. 3: Normierte Signalamplituden für einen trockenen (\square) und einen feuchten Kalksandstein (\blacksquare), dargestellt in der Form $S_n^{-1}(f^{-1/2})$.

In dieser Darstellung geben die gemessenen Profile ein anschauliches Bild des Tiefenprofils des Wärmeeindringkoeffizienten, wenn wir berücksichtigen, dass die optischen Eigenschaften, (η, ε) nicht von der Eindringtiefe abhängen. Der Wärmeeindringkoeffizient des trockenen Kalksandsteins (\square) zeigt bei kleinen Eindringtiefen, $x \propto f^{-1/2} \rightarrow 0$, nur eine geringe Tiefenprofilierung und fällt erst für größere Eindringtiefen stärker ab, was darauf zurückgeführt werden kann, dass sich an der Messposition nach einer Materialdicke von $d = 11$ mm ein Hohlraum anschließt. Der Wärmeeindringkoeffizient des feuchten Kalksandsteins (\blacksquare) zeigt nach Abb. 3 eine stärkere Tiefenprofilierung für kleine Eindringtiefen und liegt weit über dem Wert der trockenen Probe.

Bei Messungen an feuchten und trockenen Proben von Kalksandstein und Backstein geringer Dicke in der Transmissionsanordnung thermischer Wellen, bei welcher die thermischen Wellen an der Probenvorderseite mittels modulierter Laserheizung erzeugt werden und die thermische Response an der Probenrückseite gemessen wird, wurde diese Interpretation bestätigt [8]. Dabei hat sich nämlich gezeigt, dass der Wärmeeindringkoeffizient entschieden stärker mit der Feuchte variiert als der Temperaturleitwert. Dies ist verständlich, wenn man berücksichtigt, dass sowohl die effektive Wärmeleitfähigkeit k , die Massendichte ρ und die spezifische Wärmekapazität c zunehmen, wenn mit zunehmender Feuchte die Luft im Porenraum durch Wasser ersetzt wird und wenn man berücksichtigt, dass die Effekte auf die verschiedenen Größen k , ρ und c sich nach Gl. (4) im Wärmeeindringkoeffizienten multiplizieren, während sie sich beim Temperaturleitwert nach Gl. (5) teilweise wieder gegenseitig eliminieren.

Systematische Messungen an einer Kalksandsteinprobe begrenzter Dicke in Reflektionsanordnung (Abb. 1) sind als Funktion der Feuchte in Abb. 4 in normierter Form dargestellt, wobei hier als Referenz zur Normierung die an der trockenen Kalksand-

steinprobe gemessenen Signale benutzt wurden. Wie Abb. 4 zeigt, steigt das inverse normierte Signal, das proportional zum relativen Wärmeeindringkoeffizienten ist

$$\left| S_n^{-1}(f^{-1/2}) \right| \propto \frac{e(F)}{e(F=0)} = \frac{\sqrt{(k \rho c)_F}}{\sqrt{(k \rho c)_{F=0}}} \quad (17)$$

mit dem Feuchtegehalt F , der hier in Gewichtsprozenten (■ 12%, * 10%, ○ 2%, + 0,75%, □ 0,13% Feuchtegehalt) angegeben ist, stark an. Erst für die fast wieder trockene Probe (□), für die noch ein Feuchtegehalt von 0,13 % gemessen wurde, ergibt sich ein annähernd konstantes Tiefenprofil in der Nähe des Wertes 1.

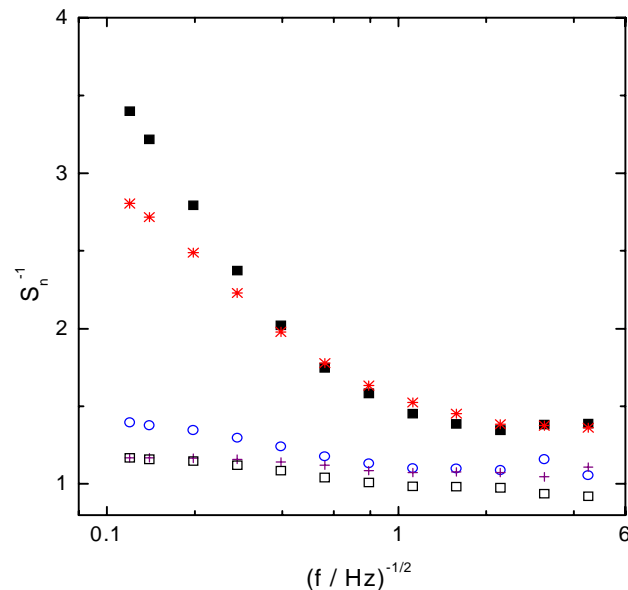


Abb. 4: Invers normierte Amplituden von Kalksandsteinproben als Funktion der Feuchte (■ 12%, * 10%, ○ 2%, + 0,75% und □ 0,13% Feuchtegehalt), wobei eine trockene Kalksandsteinprobe zur Normierung benutzt wurde.

Die normierten Phasen sind in Abb. 5 dargestellt. Während für die fast trockene Probe nur eine leichte Phasenerhöhung von maximal $\Delta\Phi = 4^\circ$ gemessen wurde, gibt es mit steigendem Feuchtegehalt hier stärker anwachsende Phasenänderungen.

Wie aus Abb. 4 für die Amplituden und aus Abb. 5 für die Phasen schon ersichtlich wird, gibt es eine kontinuierlich variierende Abhängigkeit zwischen der Feuchte und den gemessenen Signalen, die dazu benutzt werden kann, um eine empirische Kalibrierung der Amplituden- und Phasensignale nach dem Feuchtegehalt aufzustellen.

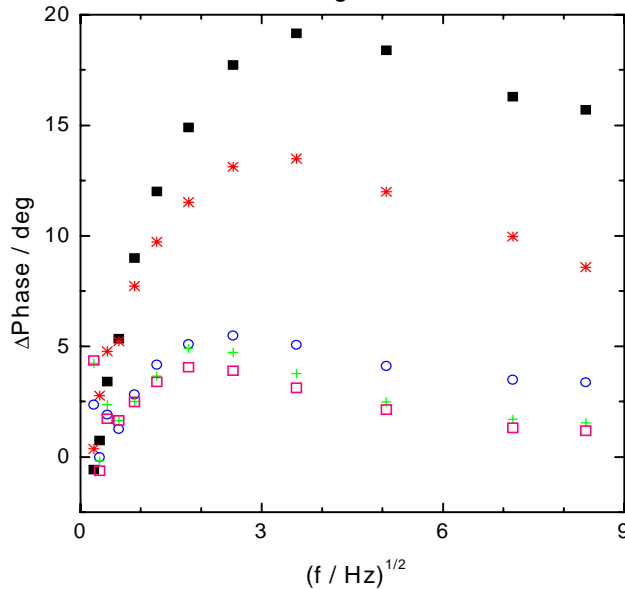


Abb. 5: Normierte Phasenverschiebung von Kalksandsteinproben als Funktion der Feuchte (■ 12%, * 10%, ○ 2%, + 0,75% und □ 0,13% Feuchtegehalt), wobei eine trockene Kalksandsteinprobe zur Normierung benutzt wurde.

Abb. 6a zeigt solche Kalibrierungen zwischen Feuchtegehalt und Signalamplitude, die für drei verschiedene Modulationsfrequenzen gemessen wurden. Abb. 6b zeigt die entsprechenden Kalibrierungen bei sehr kleinem Feuchtegehalt.

Wie Abb. 6a und 6b zeigen, gibt es im Bereich größerer und kleinerer Feuchte jeweils einen linearen Zusammenhang zwischen Signal und Feuchtegehalt, das heißt also, dass aus dem bei einer bestimmten Frequenz gemessenen Signal auf den Feuchtegehalt geschlossen werden kann.

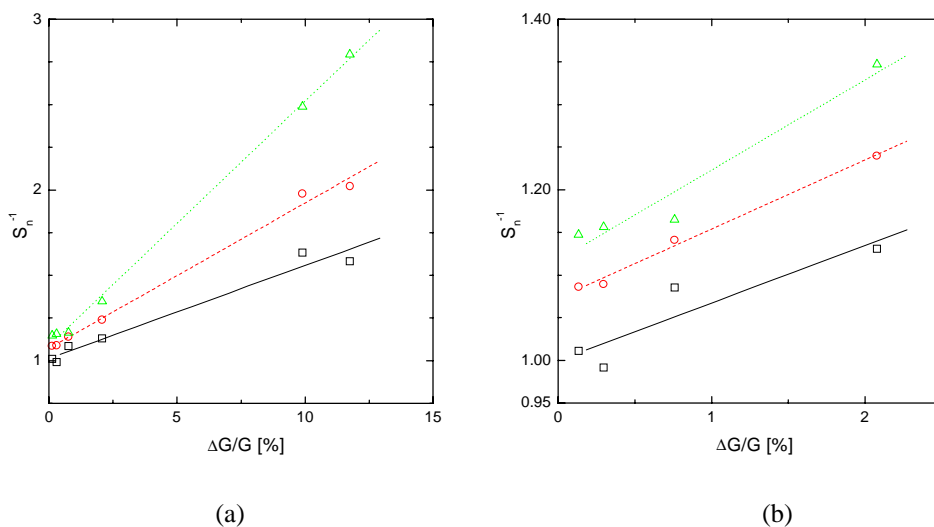


Abb. 6: Kalibrierungskurven für (a) höhere bzw. (b) kleinere Feuchtegehalte von Kalksandstein auf der Grundlage der invers normierten Amplituden, die bei den Frequenzen $f = 1.6 \text{ Hz}$ (□), 6.4 Hz (○) und 25.6 Hz (Δ) gemessen wurden.

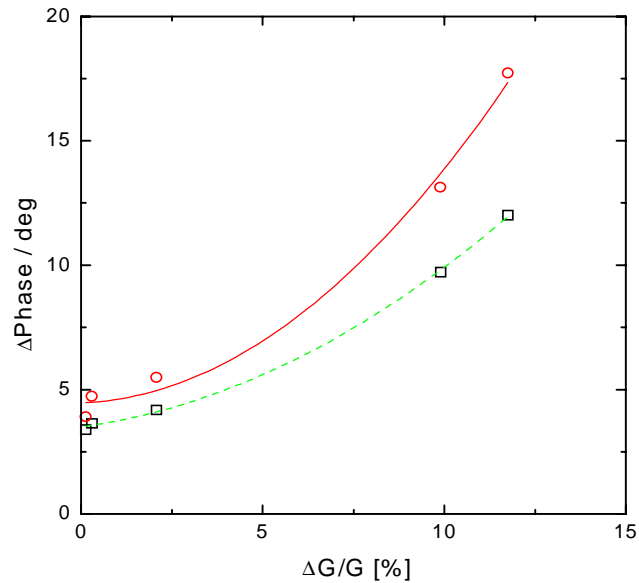


Abb. 7: Feuchte-Kalibrierungskurven von Kalksandstein auf der Grundlage der Phasenverschiebung, die bei den Frequenzen $f = 1.6$ Hz (O) und 6.4 Hz (\square) gemessen wurden und die durch Parabeln angenähert werden können.

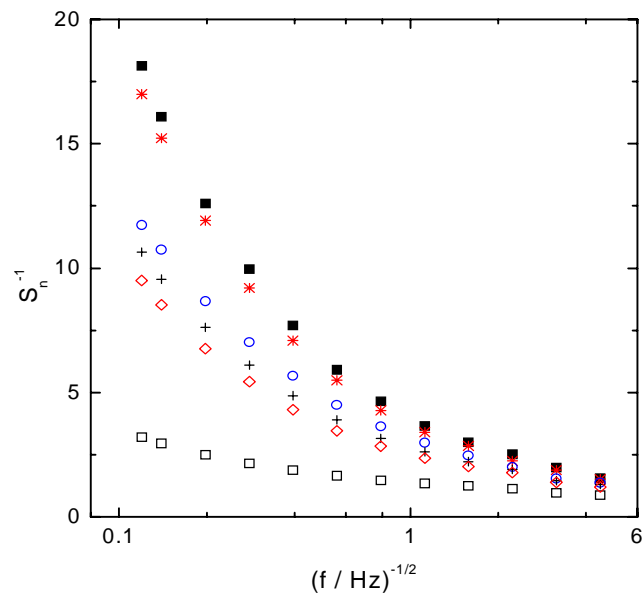


Abb. 8: Invers normierte Amplituden von Stuck als Funktion der Feuchte (\blacksquare 43%, $*$ 41%, O 23%, + 15%, \blacklozenge 12.5% und \square 0% Feuchtegehalt), wobei die an Sigradur gemessenen Signale zur Normierung benutzt wurden.

Abb. 7 zeigt solche Kalibrierungskurven, die für eine sehr niedrige Frequenz, $f = 0.05$ Hz, und eine mittlere Frequenz, $f = 1.6$ Hz, aus den gemessenen Phasen abgeleitet wurden und die mit der Feuchte beschleunigt ansteigen. Für beide Frequenzen ergibt

sich ein parabolischer Zusammenhang zwischen der gemessenen Phase und der Feuchte, der aber durch weitere Messungen im Bereich niedriger Feuchtegehalte noch abgesichert werden muss.

Messungen an Stuck als Funktion des Feuchtegehalts zeigen ähnliche Profile wie die Messungen an Kalksandstein, wobei allerdings der Feuchtegehalt in Gewichtsprozenten entschieden höher ist.

In Abb. 8 sind für Feuchtegehalte zwischen 13% und 43% die invers normierten Amplituden dargestellt, wobei Sigradur als Referenz zur Normierung der Messungen benutzt wurde. Mit steigenden Werten der Feuchte zeigt sich eine kontinuierlich anwachsender Effekt bei den Profilen $S_n^{-1}(f^{-1/2})$, die nach Gl. (13) einen Eindruck vom Einfluß der Feuchte auf den Wärmeeindringkoeffizient geben, während die trockene Stuckprobe (\square) nur eine geringe Variation des Tiefenprofils zeigt.

Für Stuck zeigt Abb. 9 die Kalibrierungskurven der Signale mit der Feuchte, die aus normierten Amplituden gewonnen wurden, bei denen eine trockene Stuckprobe als Referenz zur Normierung benutzt wurde. Für die hier dargestellten höheren Feuchtegehalte ergeben sich bei den verschiedenen benutzten Modulationsfrequenzen, $f = 0.05 \text{ Hz}$, 0.8 Hz und 6.4 Hz , lineare Abhängigkeiten zwischen den Signalen und dem Feuchtegehalt, die zur Bestimmung des Feuchtegehalts gut geeignet sind.

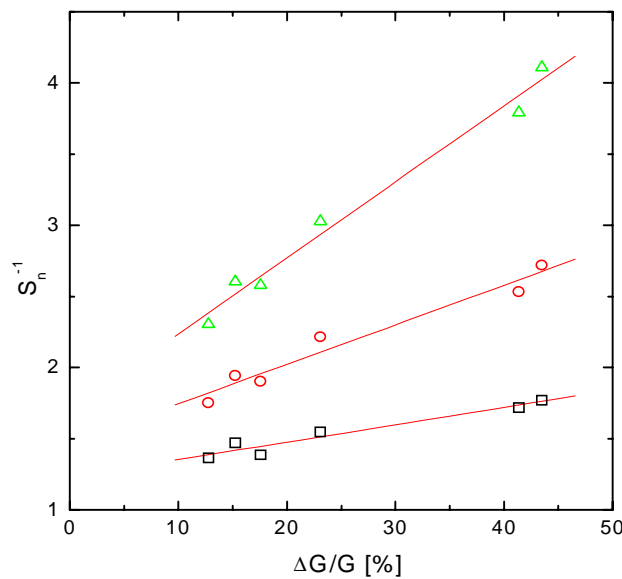


Abb. 9: Feuchte-Kalibrierungskurven von Stuck auf der Grundlage der invers normierten Amplituden, die bei den Frequenzen $f = 0.05 \text{ Hz}$ (\square), 0.8 Hz (\circ) und 6.4 Hz (Δ) gemessen wurden.

Abb. 10 zeigt den zeitlichen Verlauf der Trocknung einer Kalksandsteinprobe, die zu Beginn des Trocknungsprozesses eine Feuchte von ungefähr 13% hatte. Dargestellt sind hier die Feuchte (\blacksquare) als Funktion der Zeit und die normierte Signalamplituden (\circ , Δ , $+$),

$$S_n(f) = \frac{S(f, F)}{S(f, F=0)} \propto \frac{\varepsilon_F}{\varepsilon_{F=0}} \frac{\eta_F}{\eta_{F=0}} \frac{\sqrt{(k \rho c)_{F=0}}}{\sqrt{(k \rho c)_F}} \quad (18)$$

die bei unterschiedlichen Modulationsfrequenzen gemessen wurden. Wie aus Abb.10 ersichtlich ist, bestehen bei kleineren Modulationsfrequenzen (O) bessere Möglichkeiten kleinere Feuchtwerte und den Fortschritt der Trocknung zu beobachten.

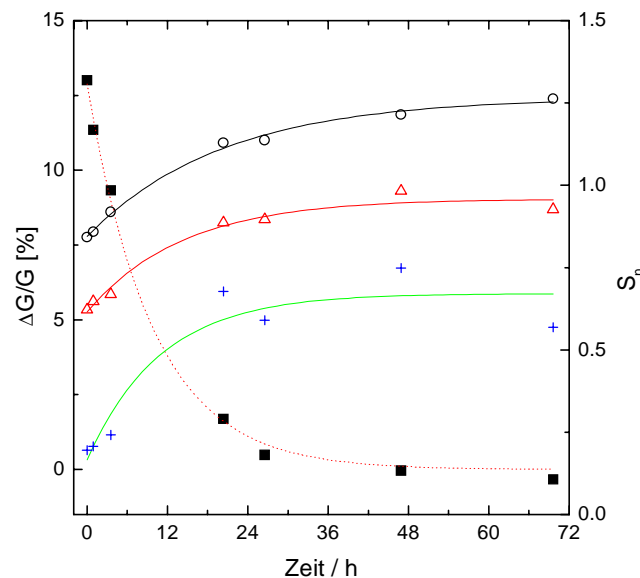


Abb. 10: Trocknungskurven als Funktion der Zeit.

In-situ-Feuchtebestimmung an Bauwerken

Anhand der hier vorgestellten Messungen an Baumaterialien konnte gezeigt werden, dass die mit Hilfe der IR-Radiometrie thermischer Wellen gemessenen Signale, sowohl Amplituden wie Phasenverschiebung, aufgetragen gegenüber der Modulationsfrequenz, relativ stark und kontinuierlich mit der Feuchte variieren, und dass es möglich ist, empirische Kalibrierungskurven zwischen Mess-Signalen und Feuchte aufzustellen, bei denen die Signale linear mit der Feuchte variieren. Dies bedeutet dass bei vorhandenen Kalibrierungskurven aus einzelnen Messungen bei festen Frequenzen der aktuelle Feuchtegehalt bestimmt werden kann, oder dass bei laufenden Trocknungs- und Sanierungsarbeiten, z.B. mittels dielektrischer Heizung [7], fortlaufend die Feuchte am Bauwerk kontaktlos kontrolliert werden kann.

Im Prinzip arbeitet die IR-Radiometrie thermischer Wellen unter ähnlichen Bedingungen wie die IR-Thermographie, bei der die Oberflächentemperatur der Probe, z.B. einer Mauer, kontaktlos gemessen wird. Im Gegensatz zur passiven IR-Thermographie, bei der aus einer niedrigeren gemessenen Oberflächentemperatur auf eine höhere Feuchte geschlossen werden kann, werden bei der IR-Radiometrie thermischer Wellen kleine Temperaturosillationen erzeugt, deren Ausbreitung und Dämpfung im Mauerwerk gemessen und als Einfluß der Feuchte auf die effektiven thermischen Eigenschaften interpretiert werden kann. Im Vergleich zur passiven IR-Thermographie, sollte die IR-Radiometrie thermischer Wellen empfindlicher auf kleinere Feuchteunterschiede reagieren, tiefenaufgelöste Information liefern, und besonders bei der gemessenen Phasenverschiebung des Signals Informationen geben, die unabhängig von den optischen Oberflächeneigenschaften, z.B. dem Emissionsvermögen sind.

Bei Benutzung eines relativ kleinen Heizflecks, z.B. mit einem Durchmesser von etwa 7 mm wie in dieser Arbeit, müßten bei der in-situ-Messung der Feuchte an Mauern größere Flächen abgerastert werden. Alternativ dazu könnte bei flächenhafter modulierter Beheizung mittels Lampen wieder eine IR-Kamera zur Messung der thermischen Response benutzt werden.

Referenzen:

- [1] J. Bolte, J.H. Gu, B.K. Bein, Background Fluctuation Limit of IR Detection of Thermal Waves at High Temperatures, High Temp.-High Pressures 29 (1997), 567-580.
- [2] H.S. Carslaw and J.C. Jaeger, Conduction of Heat in Solids, Oxford Univ.Press, 1959.
- [3] U. Grigull und H. Sandner, Wärmeleitung, Springer Verlag Berlin, 1979.
- [4] G. Matthes, Lehrbuch der Hydrogeologie, Band 2, Borntraeger-Verlag Berlin, 1990.
- [5] B.K. Bein, J. Bolte, D. Dietzel, A. Haj-Daoud, Charakterisierung technischer Schichtsysteme mittels IR-Radiometrie thermischer Wellen, tm – Technisches Messen 65 (1998), 387-395.
- [6] M.M.F. Aguiar Neto, B.K. Bein, T. Boski, J. Gibkes, S.Negm, J. Pelzl, Photo-thermal characterization of porous ceramic materials and minerals applied in civil engineering and hydrotechnics, In: Digest 8th Int.Top.Meeting Photoacoustic and Photother- mal Phenomena, Pointe-à-Pitre, France, Jan. 22-25, 1994, p.169-170.
- [7] P. Jütterschenke und A. Weija, Hochfrequenzerwärmung, BauSanierung 2, März/April 1998, S. 49-53.