

DGZfP-Berichtsband BB 69-CD
Vortrag M2

Feuchtemessung mit infrarotoptischen Methoden

K.A. Büscher, W. Wild, Universität Rostock
H. Wiggenhauser, BAM Berlin

Der Anspruch, der an Feuchtemeßverfahren gestellt wird, ist in den letzten Jahren durch zunehmend auftretende Schäden an Bauwerken erheblich gestiegen. Gesucht wird seit langem ein Allround-Verfahren, das zerstörungsfrei, großflächig und gut reproduzierbar arbeitet. Ein Schwerpunkt der Entwicklung bildet in letzter Zeit die Infrarotthermografie.

Der Entwicklung dieser Methode zum Feuchtemeßverfahren stehen aber einige Hindernisse im Wege. So muß die Trennung der emittierenden Strahlung des Meßobjektes von der Umgebungs- oder Störstrahlung erreicht werden, damit ein unverfälschtes, feuchtigkeitsabhängiges Signal erhalten wird.

Es ist bekannt, daß sich zum Aufbau eines neuen Feuchtemeßverfahrens die IR-Absorptionsbanden von Wasser ausnutzen lassen. Dazu wird schmalbandig im Absorptionswellenlängenbereich von Wasser die Oberfläche der Baustoffe bestrahlt und angeregt und dann aus dem Absorptionsverhalten auf den Feuchtegrad geschlossen.

Für die meßtechnische Bewertung ist es von Vorteil, wenn die einzelnen Strahlungsanteile separat vorliegen, um so eine singuläre Abhängigkeit zum Feuchtegrad des Baustoffes zu erzeugen. Durch eine Modulation der Anregungsstrahlung läßt sich der Amplituden- und Phasenwert jedes Bildpunktes der Infrarotkamera ermitteln, wobei der Anteil aus konstanter Störstrahlung eliminiert wird.

Die alleinige Kenntnis des Absorptionsverhältnisses führt jedoch nur zu qualitativen Bewertungen der Oberflächenfeuchte. Erst durch ergänzende Referenzmessungen mit neutralem Verhalten zum Feuchtegrad, gelingen quantitative Aussagen.

Dieses infrarotoptische Verfahren konnte unter Praxisbedingungen an der Martinikirche und am Petershof in Halberstadt getestet werden. Es zeigt gute Übereinstimmungen mit der Darr-Wäge-Methode, die parallel eingesetzt wurde.

1 Einleitung

Zahlreiche Bauschäden, insbesondere im Altbaubestand, sind direkt oder indirekt auf Feuchteinwirkung zurückzuführen. Als Ursachen kommen Undichtigkeiten an Bauwerksteilen, Schlagregen an Fassadenbereichen oder Feuchteansätze in erdnahen Bereichen in Betracht. Außerdem enthalten viele Bauteile Salze, die mit Wasser in Lösung gehen und indirekte Schäden hervorrufen. Selbst nach vorangegangenen Trockenlegungsmaßnahmen sind diese Schäden immer noch wirksam /1/.

Für eine umfangreiche Diagnose zur Bestimmung von Schadensursache und Schadensausmaß sind Feuchtemessungen an Bauteilen unumgänglich, da wirksame Sanierungsmaßnahmen erst nach eingehender Schadensdiagnose sinnvoll sind. Ideal wäre ein Diagnosemeßsystem, das zerstörungsfrei, berührungslos, hoch feuchteselektiv und möglichst großflächig Feuchtigkeit detektiert. Hier steht jedoch der Bauingenieur in der Praxis vor einem großen Problem, da ein Feuchtemeßgerät mit diesen Eigenschaften auf dem Markt nicht erhältlich ist /3/. Deshalb wird versucht, das Verfahren der Infrarotthermografie, welches im Bauwesen zum Aufspüren von Wärmebrücken eingesetzt wird, auch zur Feuchtebestimmung zu benutzen.

2 Motivation

In den achtziger Jahren wurde begonnen, reflektografische Untersuchungen mit Infrarotsystemen vorzunehmen, da die normale passive Thermografie keine kontrastreichen Aussagen zur Feuchtigkeit im Mauerwerk liefert /2/. Mit der reflektografischen Methode wird das Absorptionsverhalten von gelöstem Wasser in Baustoffen ausgenutzt. Wasser besitzt deutliche Infrarotabsorptionsbanden bei den Wellenlängen 1,49 μm , 1,73 μm , 1,94 μm und 2,97 μm . Bei der praktischen Anwendung wird entweder ein Breitbandstrahler oder ein selektiver Strahler eingesetzt.

Bei den eigenen Messungen zur Bestimmung von Feuchtigkeit im Mauerwerk wird eine Bestrahlung mit der Wellenlänge von 2,97 μm verwendet, da das eingesetzte Infrarotsystem im Wellenlängenbereich von 2...5 μm arbeitet. In der linken Hälfte der Abb. 1 ist ein Thermogramm eines im oberen Bereich durchfeuchteten Mauerwerks ohne zusätzliche Bestrahlung dargestellt. Mit aufprojizierter Infrarotstrahlung wird

der Kontrast zwischen feuchten und trockenen Regionen im sogenannten Reflektogramm (Abb. 1, rechte Hälfte) wesentlich deutlicher /5/.

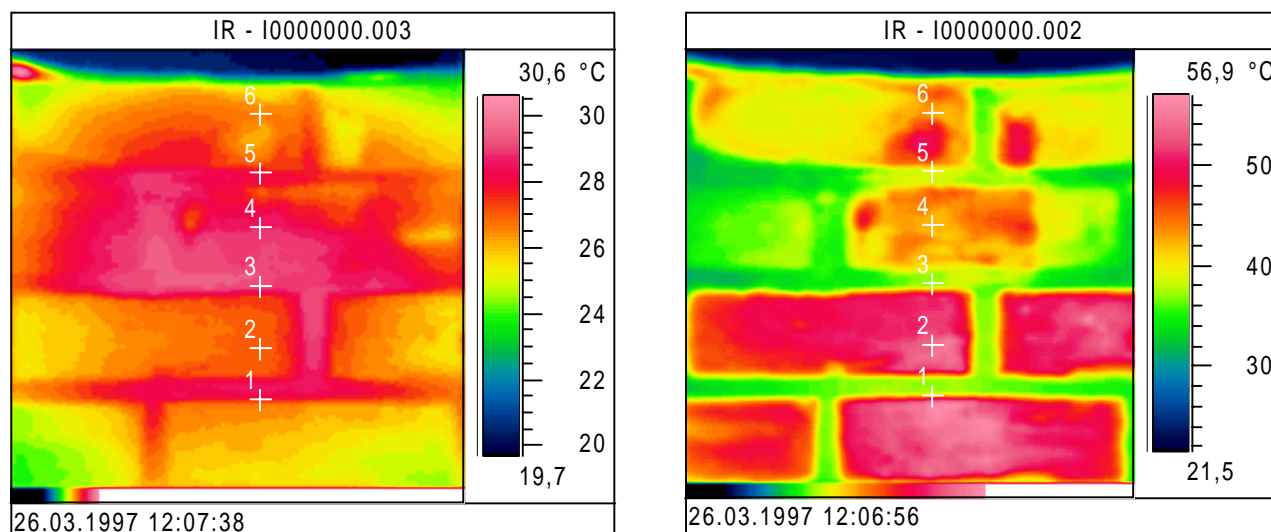


Abb. 1: Vergleich Thermogramm und Reflektogramm eines Mauerwerks

Ein Vorteil dieser Methode ist es, daß ein kontrastreicher Überblick über feuchte und trockene Zonen eines Mauerwerks entsteht und sofort großflächig abgetastet werden kann. Zur Quantifizierung von Feuchtigkeit im Mauerwerk können aber nur eingeschränkte Aussagen getroffen werden, da Emissionsgradunterschiede der Oberfläche, inhomogene Ausleuchtung durch die aufprojizierte Strahlung oder auch Fremdstrahlung das Ergebnis negativ beeinflussen können. Auch sind die Zusammenhänge zwischen den Remissionsspektren und ihrer quantitativen Beziehung zur Feuchtigkeit nicht eindeutig geklärt. Nach vorangegangener genauerer Analyse des Remissionverhaltens von Baustoffen im Wellenlängenbereich von 1,3...3,1µm soll die Idee einer amplitudenempfindlichen Modulationsthermografie näher untersucht werden /6/.

3 Voruntersuchungen

Voruntersuchungen sollen den Zusammenhang zwischen der Remission einer Bauteiloberfläche und deren Oberflächenfeuchte klären. Gleichzeitig soll versucht werden, das erhaltene Meßsignal der reflektierten Strahlung zur Oberflächenfeuchte ins Verhältnis zu setzen. Dabei geht es auch darum, die Anteile der Stör- oder Fremdstrahlungen zu eliminieren.

Von der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung sind in der Vergangenheit umfangreiche Remissionsuntersuchungen an Baustoffen durchgeführt worden /4/. Die Messungen von Remissionsspektren an trockenen und befeuchteten Baustoffen

im Wellenlängenbereich von 0,3...13,0 μm zeigen deutlich, daß im infraroten Spektralbereich von 1...2 μm die Ermittlung der Oberflächenfeuchte besonders gut gelingt.

Eigene Infrarotspektren werden von entionisiertem Wasser, Leitungswasser und einer Auswahl von trockenen und feuchten Baustoffen aufgenommen. Eindeutig wird festgestellt, daß keine nennenswerten Verschiebungen der Absorptionsmaxima von gelöstem Wasser in Baustoffen auftritt. Daraus kann gefolgert werden, daß die meßtechnisch ermittelten Absorptionsmaxima für die Bestimmung der Oberflächenfeuchtigkeit in Baustoffen genutzt werden können. Die Absorptionsmaxima liegen – wie oben angegeben - bei 1,49 μm , 1,73 μm , 1,94 μm und 2,97 μm mit einer maximalen Verschiebung von ± 50 nm.

Die Voruntersuchungen und die einzuhaltenden experimentellen Randbedingungen legen somit einen Detektor im nahen Infrarotbereich fest, wie er in der Vidicon Hamamatsu C2400 mit einem Arbeitswellenlängenbereich von 1,0...2,1 μm gegeben ist. Das heißt, daß die Absorptionen bei 1,49 μm , 1,73 μm und 1,94 μm für die Messungen ausgenutzt werden.

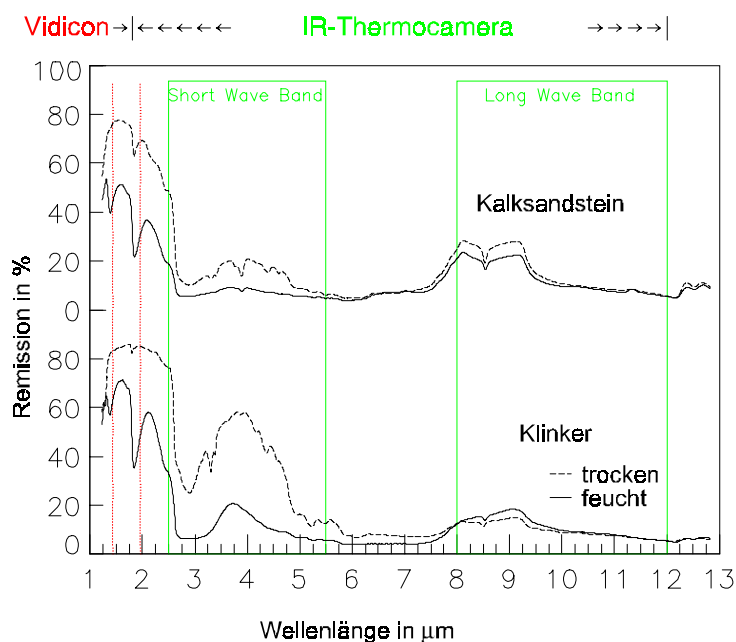


Abb. 2: Diagramm von Remissionsspektren trockener und feuchter Baustoffe /1/

4 Amplitudenempfindliche Modulationsthermografie mit Bildpunktaufnahme

Nach den Voruntersuchungen wird im ersten Realisierungsschritt des neuen Meßverfahrens die amplitudenempfindliche Modulationsthermografie mit

Bildpunktaufnahme aufgebaut. Die Untersuchung dient zur Ermittlung der Amplitudenwerte verschiedener Baustoffe, um den maximalen meßeffectabhängigen Meßbereich in den einzelnen Wellenlängenbereichen herauszufinden. Dadurch läßt sich das Verhalten der Remissionseigenschaft mit steigender Oberflächenfeuchte beschreiben.

Im Gegensatz zur „reinen Reflektografie“ wird das zu untersuchende Bauteil ohne Rückkopplung an die Infrarotkamera angeregt. Bei der amplitudenempfindlichen Modulationsthermografie wird der Detektor des Meßsystems mit dem Lock-In-Verstärker verbunden, der seine Referenz von dem im Strahlengang befindlichen Chopper erhält. Diese Anordnung ermöglicht die selektive Messung der vom Strahler stammenden Reflexionsanteile. Wesentlicher Vorteil dieser Methode ist es, daß der Einfluß durch Fremdstrahlung unterbunden wird. Grundsätzlich werden die gleichen Komponenten wie bei der Infrarotthermografie verwendet, jedoch wird die Meßfläche auf einen Kreis von 2 cm Durchmesser limitiert, der nach anschließender Integration als Punktwert ausgegeben wird.

Die Besonderheit dieser Anordnung liegt darin, daß durch den Einsatz von Interferenzfiltern nur die Strahlung vom Detektor gemessen wird, die exakt im Wellenlängenbereich der Wasserabsorptionsbanden liegt.

Die Abb. 3 gibt einen Auszug aus den Messungen der relativen Remission von Vollziegeln bei definiert aufprojizierter Strahlung wieder. Die Messungen in den einzelnen Wellenlängenbereichen sind auf das Absorptionsmaximum von Wasser bei 1,94 μm normiert. Wünschenswert ist eine möglichst gute Auflösung im Bereich geringer Oberflächenfeuchte, da diese mit dem menschlichen Auge nur schwer oder gar nicht zu erkennen ist. Die Meßauflösung und -dynamik im Bereich geringer Oberflächenfeuchte ist bei Verwendung der Wellenlänge 1,94 μm am günstigsten.

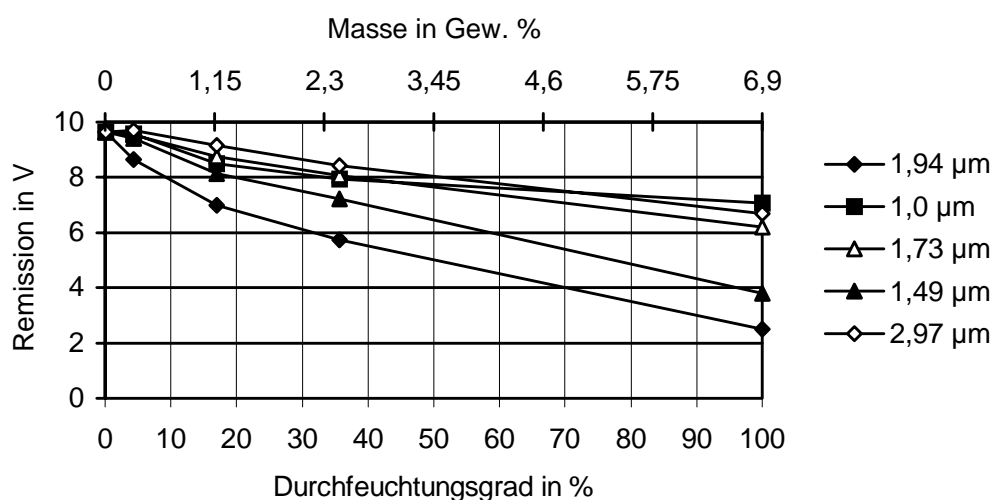


Abb. 3: Relative Remission von Vollziegeln mit unterschiedlichem Feuchtegehalt und bei Bestrahlung mit verschiedenen Wellenlängen

5 Modulationsthermografie im bildgebenden System

Um die Modulationsthermografie im bildgebenden System zu realisieren, ist eine gerätetechnische Anpassung gegenüber der Punktmessung notwendig.

Für die Infrarotbildaufnahme wird eine Vidicon Hamamatsu mit einem Arbeitswellenlängenbereich von 0,8...2,1 µm und einer Bildwiederholrate von 25 Bildern/Sekunde verwendet. Gegeben durch die Aufnahmecharakteristik des Infrarotsystems kann der zuvor verwendete Chopper nicht mehr eingesetzt werden, da dieser kein vollständig auswertbares Signal zuläßt. Die Funktion des Choppers ersetzt ein Strahler, der im Frequenzbereich von 0,1 Hz moduliert wird. Die Modulationsfrequenz stellt in diesem Fall einen Kompromiß zwischen der entstehenden Datenmenge während der Messungen und der möglichen Modulation des Strahlers dar.

Da im bildgebenden System alle Punkte des Infrarotbildes zur Messung verwendet werden, wäre theoretisch für jeden einzelnen Bildpunkt ein Lock-In-Verstärker notwendig, um ein Amplitudenbild und Phasenbild zu erzeugen. Da das technisch nicht zu realisieren ist, wird der hypothetisch angenommene Lock-In-Verstärker für jeden Bildpunkt durch eine rechnergesteuerte Fourieranalyse ersetzt. Die Strahlung wird sinusförmig moduliert und damit der Rechenprozeß bzw. die Fourieranalyse wesentlich vereinfacht /10/. In den Strahlengang werden- wie vorher auch -

Interferenzfilter eingebracht, so daß nur die Wellenlängen der Wasser-Infrarotabsorptionsmaxima auf das Objekt gelangen.

Die Infrarotbilder, die während der Anregung von der Kamera aufgezeichnet werden, enthalten vor der Fourieranalyse noch die Fremdstrahlung, die reflektierte Strahlung und die Eigenstrahlung des Objektes. Nach durchgeführter Fourieranalyse werden die Anteile die aus der Fremdstrahlung resultieren eliminiert /7/. In Abbildung 4 ist der Versuchsaufbau für die Modulationsthermografie im bildgebenden System dargestellt.

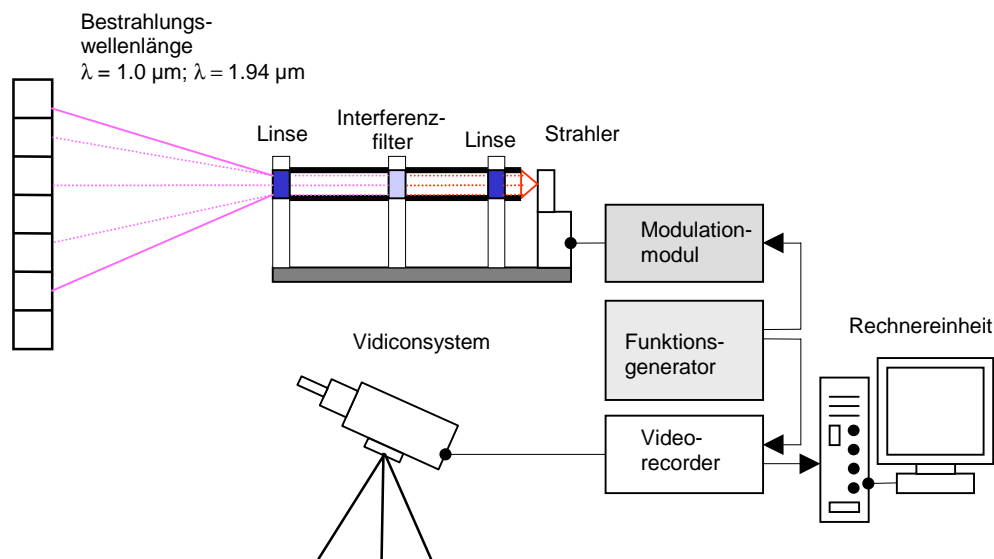


Abb.4: Versuchsaufbau für die amplitudenempfindliche Modulationsthermografie im bildgebenden System

6 Ergebnisse zur Modulationsthermografie

Das Verfahren ist unter Laborbedingungen an einer größeren Auswahl von Baustoffen getestet worden. Als Strahler wird ein abgeschirmter breitbandiger Halogenstrahler mit einer Leistung von 1000 W verwendet.

In Mikroklimakammern werden die Baustoffe auf eine definierte feinabgestufte Oberflächenfeuchte eingestellt, um genügend Meßpunkte zu erhalten. Es werden Baustoffe untersucht, die aus der Zeit der Jahrhundertwende wie auch aus der heutigen Zeit stammen, damit für die Kalibrierung des Meßverfahrens ein breites Spektrum abgedeckt wird. Nach der Amplitudenauswertung wird aus den Bildern ein neues Oberflächenfeuchteindexbild generiert und dieses zur quantitativen Oberflächenfeuchtebestimmung eingesetzt. Die Ergebnisse sollen repräsentativ für alle Baustoffe an dem Bauwerkstoff „Ziegel“ dargestellt werden.

6.1 Auswertung der Amplitudenbilder

Zu einer vollständigen Auswertung gehört neben dem Thermogramm auch das Foto des Untersuchungsobjektes. Abb. 5 zeigt die Fotoaufnahme der 5 Versuchskörper „Ziegel“, die mit unterschiedlicher Oberflächenfeuchte eingestellt sind. Das Thermogramm in der Abb. 6 des Vidiconkamarasystems, welches als Basisbild herangezogen wird, liefert noch keine Aussage zum Feuchtegehalt der einzelnen Proben. Sowohl das Thermogramm als auch die Fotoaufnahme erlauben selbst unter günstigen Bedingungen weder eine qualitative noch eine quantitative Aussage zur Oberflächenfeuchte.

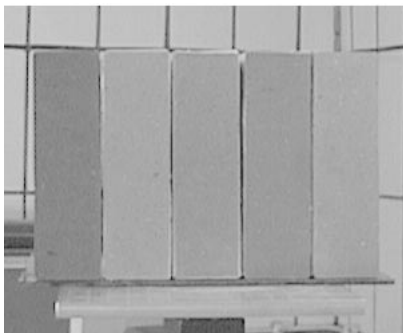


Abb. 5: Fotoaufnahme der Versuchskörper

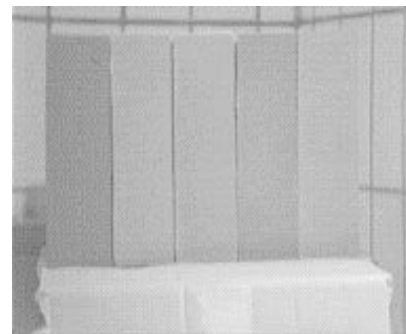


Abb. 6: Thermogramm der Versuchskörper

In Analogie zu den Voruntersuchungen mit der amplitudenempfindlichen Modulationsthermografie mit Bildpunktaufnahme werden die Amplitudenbilder bei unterschiedlichen Anregungswellenlängen aufgezeichnet.

Hierfür wird zunächst die Referenzwellenlänge bei $1,0 \mu\text{m}$ aufgenommen. Die Referenzwellenlänge von $1,0 \mu\text{m}$ liegt deutlich außerhalb des Infrarotabsorptionsmaximums, so daß keine Feuchtigkeitsabhängigkeit zum Remissionsverhalten besteht. Bei der Nutzung einer Referenzwellenlänge ist die Kenntnis der aufprojizierten Gesamtenergie und eine anschließende Verhältnisbildung nicht notwendig. Es gehen keine meßtechnisch wichtigen Informationen verloren. In Abb. 7 ist das Amplitudenbild mit einer Anregungswellenlänge von $1,0 \mu\text{m}$ wiedergegeben.

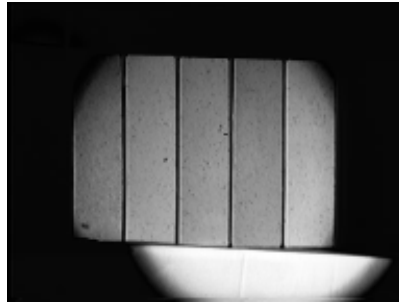


Abb. 7: Amplitudenbild von Vollziegeln mit der Bestrahlungswellenlänge von 1,0 µm

Um eine quantitative Oberflächenfeuchtemessung zu ermöglichen, muß jedoch ein ausgeprägtes Infrarotabsorptionsmaximum gewählt werden /9/. Hierzu wird die Bestrahlungswellenlänge von 1,94 µm gewählt, denn hier zeigen bereits die Voruntersuchungen die größte Sensibilität im gesamten Feuchtebereich. Die Untersuchungsrandbedingungen wie Modulationsfrequenz und Wahl des Baustoffes bleiben unverändert. Das Amplitudenbild in Abb. 8 wird mit einem Verstärkungsfaktor von $Q = 2,8$ multipliziert, um einen Ausgleich für die Empfindlichkeit der Detektorkennlinie des Vidiconsystems zu schaffen /8/.

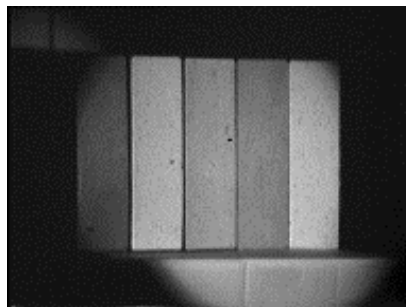


Abb. 8: Amplitudenbild von Vollziegeln mit der Bestrahlungswellenlänge von 1,94 µm

Unter Verwendung des ausgeprägten Infrarotabsorptionsmaximums bei 1,94 µm tritt der Unterschied zwischen den eingestellten Feuchtigkeitsbereichen besonders deutlich hervor. Vor allem der Feuchtigkeitsbereich von 1,0...2,0 Masseprozent (M%), der visuell nicht erkennbar ist, kann empfindlich detektiert werden. Mit diesem Verfahren ist die Möglichkeit geschaffen, unabhängig von der Tageszeit (unterschiedliche Sonneneinstrahlung) großflächig qualitative Feuchtigkeitsuntersuchungen durchzuführen. Zur quantitativen Bestimmung der Oberflächenfeuchte ist eine Verhältnisbildung zweier unterschiedlicher Meßwellenlängen notwendig.

6.2 Auswertung der Phasenbilder

Die Auswertung der Phasenbilder ist mit unveränderten Versuchsbedingungen an Vollziegeln bei einer Wellenlänge von $1,94 \mu\text{m}$ durchgeführt worden. In den Phasenbildern ist der Laufzeitunterschied zwischen der auftreffenden Strahlung und der remittierenden Strahlung in Abbildung 9 wiedergegeben. Für die Interpretation der Phasenbilder bedeuten somit größere Grauwerte bzw. hellere Bereiche eine größere Phasenverschiebung. Dunklere Bereiche deuten auf eine geringere Phasenverschiebung hin, so daß hier das Referenzsignal mit dem remittierenden Signal zeitlich nah beieinander liegt.

Aus dem Phasenbild läßt sich ableiten, daß tendenziell mit steigendem Feuchtegehalt beim Probenkörper eine größere Phasenverschiebung auftritt. Diese Phasenverschiebung kommt durch eine größere Eindringtiefe in feuchtere Bereiche nach der Kubelka-Munk-Beziehung zustande, so daß in feuchten Zonen im Verhältnis zu trockenen Zonen die Strahlung zeitlich später remittiert wird.

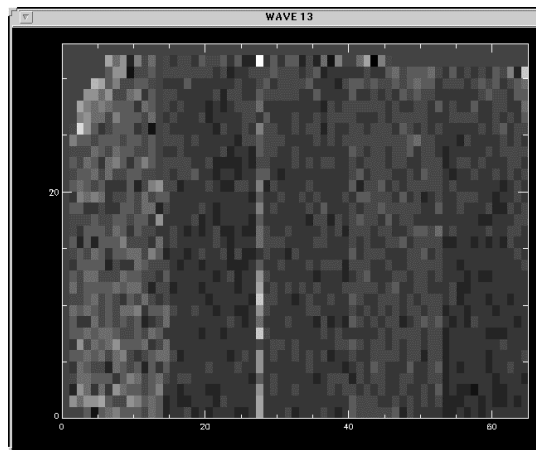


Abb. 9: Phasenbild bei $\lambda = 1,94 \mu\text{m}$

Aufgrund der geringen Meßdynamik zwischen den maximalen Feuchtigkeitswerten der Probekörper und dem Phasenauflösungsvermögens der Meßeinheit, ist die quantitative Betrachtung mit den vorgegebenen Parametern nur eingeschränkt möglich. Es fällt aber auf, daß offensichtlich die inhomogene Ausleuchtung im Phasenbild eliminiert ist. Gegeben durch die begrenzte Bildaufnahme von 25 Bildern pro Sekunde lassen sich mit der z.Zt. eingesetzten Technik keine höheren Auflösungsgenauigkeiten erreichen.

6.3 Auswertung der Oberflächenfeuchteindexbilder

Zur Steigerung der Vergleich- und Reproduzierbarkeit der amplitudenempfindlichen Modulationsthermografie werden aus den gewonnenen Amplitudenbildern Oberflächenfeuchteindexbilder generiert. Die Idee der Indizierung stammt vom Vegetationsindex, wonach in unterschiedlichen meßeffectabhängigen Wellenlängen IR-Bilder miteinander verrechnet werden und danach das Maß der Vegetationsvitalität der Erde darstellt wird.

Die Besonderheit der vorliegenden Methode liegt darin, daß die Einflüsse durch Fremd- bzw. Störstrahlung durch die Amplitudenberechnung bereits eliminiert sind und somit relativ störungsfreie Amplitudenbilder in schmalbandigen Wellenlängenbereichen verwendet werden. Die Abb. 10 zeigt ein Oberflächenfeuchteindexbild, welches aus den Amplitudenbildern der Referenzwellenlänge 1,0 μm und der meßeffectabhängigen Wellenlänge von 1,94 μm berechnet wurde.

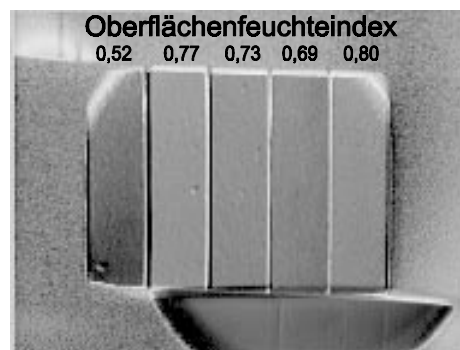


Abb. 10: Oberflächenfeuchteindexbild

Der sich daraus ergebende Oberflächenfeuchteindex in Abhängigkeit der Feuchtigkeit ist in Abb. 11 dargestellt. Diese Darstellung wird zur Kalibrierung der amplitudenempfindlichen Modulationsthermografie verwendet. Somit kann in der Praxis über die Ermittlung des Oberflächenfeuchteindex aus der Kalibrierungskennlinie der zugehörige Feuchtwert bestimmt werden.

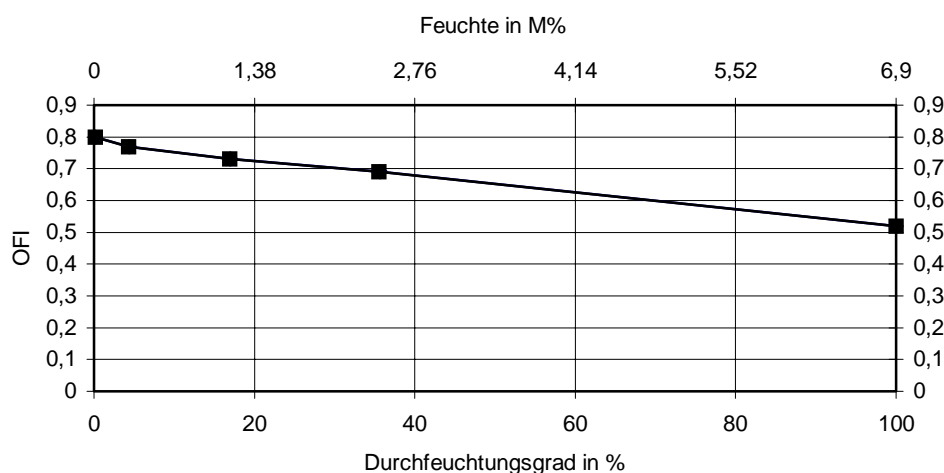


Abb. 11: Diagramm der Kalibrierungskennlinie des Ziegels

Die Zusammenfassung der Ergebnisse aller Referenzmaterialien unter der Nutzung des Oberflächenfeuchteindex führt unter Verwendung einer durchgeführten Regressionsanalyse zu der Tendenz, daß mit steigendem Oberflächenfeuchtegrad der Oberflächenfeuchteindex abnimmt. In der Abbildung 12 sind die Kalibrierungskennlinien unterschiedlicher Baustoffe dargestellt.

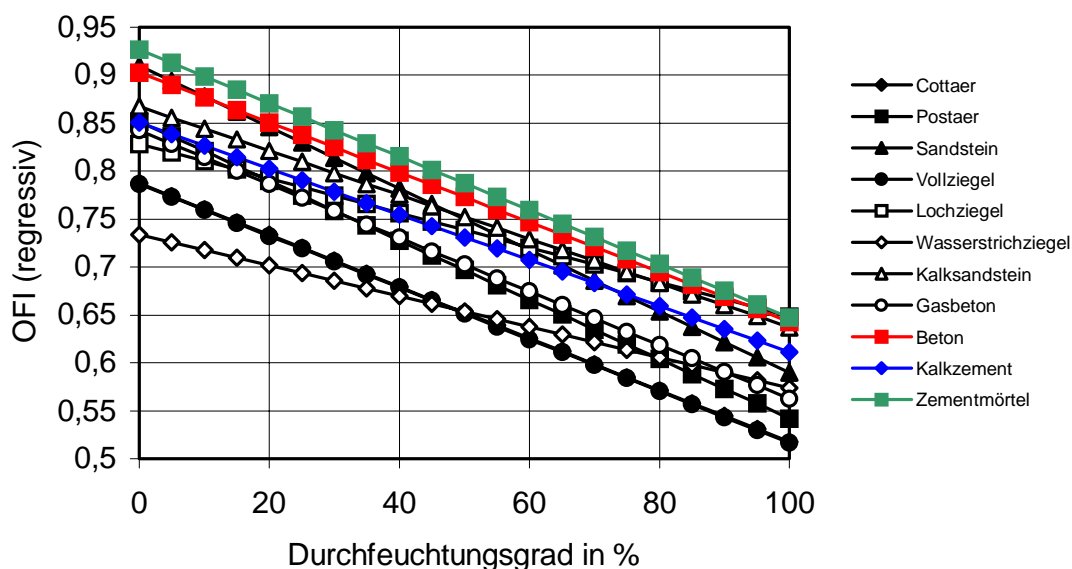


Abbildung 12: Regressive OFI-Werte aller Referenzmaterialien

Aus den Kalibrationskennlinien läßt sich schlußfolgern, daß bei der Bestimmung der Oberflächenfeuchte über den Oberflächenfeuchteindex das Material nur eine untergeordnete Rolle spielt.

6.4 Ergebnis des Feldversuches an der Martinikirche in Halberstadt

Zur Erprobung des Verfahrens unter Praxisbedingungen wurden Messungen an der Martinikirche in Halberstadt durchgeführt. Zusätzlich zu der amplitudenempfindlichen Modulationsthermografie ist das international anerkannte Darr-Wäge-Verfahren zur Feuchtemessung eingesetzt worden. Die Martinikirche wurde im Jahre 1362 erbaut und nach dem zweiten Weltkrieg wieder rekonstruiert. Der Einsatz der Messungen hat im Innern der Kirche stattgefunden und beschränkt sich auf eine Meßspur, da die Darr-Wäge-Methode nicht zerstörungsfrei arbeitet und im Sinne der Denkmalpflege keine größeren Veränderungen am Mauerwerk vorgenommen werden durften.

Es stellt sich heraus, daß sich eine gleichmäßige Feuchteverteilung an der Meßspur ergibt. Dies hat sich sowohl mit der Darr-Wäge-Methode als auch mit der amplitudenempfindlichen Modulationsthermografie ergeben. Aus diesem Grund wird auf eine bildliche Darstellung der Oberflächenfeuchteindexbilder verzichtet und nur das Darr-Wäge-Verfahren mit der amplitudenempfindlichen Modulationsthermografie in Abb. 13 gegenübergestellt.

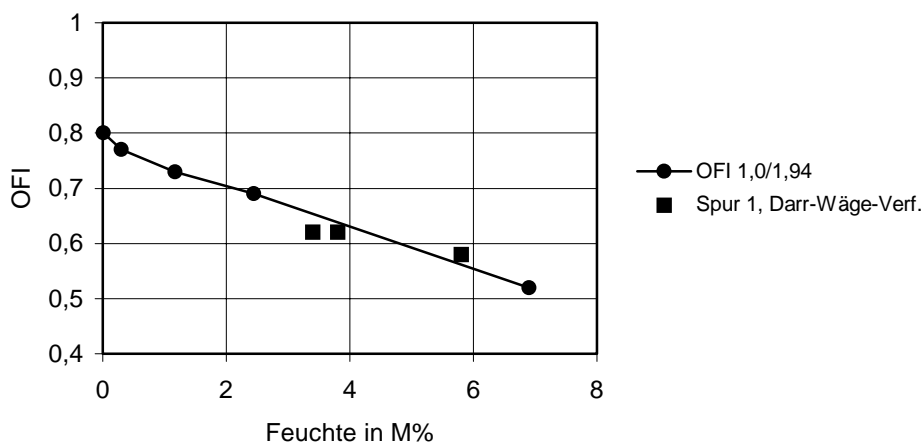


Abb. 13: Vergleich der Darr-Wäge-Methode mit der amplitudenempfindlichen Modulationsthermografie

Die Abweichungen von der amplitudenempfindlichen Modulationsthermografie zum Darr-Wäge-Verfahren liegen im Bereich $\pm 0,5$ M%. Dies liegt innerhalb der Meßunsicherheit, die üblicherweise für das Darr-Wäge-Verfahren angegeben wird. Die guten Ergebnisse der Messungen resultieren aus der Eliminierung negativ wirkender Meßeffekte. Mit der Amplitudenauswertung wird der Anteil aus der Störstrahlung unterbunden, obwohl die Messungen unter dem Einfluß von Sonneneinstrahlung (außen) und mit Beleuchtung (innerhalb) der Kirche

durchgeführt wurden. Desweiteren ist mit der Bildung des Oberflächenfeuchteindex aus zwei unterschiedlichen Wellenlängen die Minimierung des Einflusses der Oberflächeneigenschaften des Mauerwerkes erreicht worden.

7 Diskussion und Ausblick

Die Ausnutzung der Absorptionsmaxima von Wasser gegenüber Infrarotstrahlung zur Oberflächenfeuchtebestimmung von Baustoffen hat sich sowohl bei konventionellen Infrarotsystemen bei der Wellenlänge von 2,97 μm , als auch im nahen Infrarot bei den Wellenlängen von 1,49 μm , 1,73 μm und 1,94 μm bei Vidiconsystemen als sinnvoll herausgestellt. Die nachteiligen und kaum zu vermeidenden Folgen von Fremdstrahlungen können allerdings erst mit der amplitudenempfindlichen Modulationsthermografie eliminiert werden, da die Signale nur von der emittierten, gefilterten Strahlung aufgezeichnet werden.

Die Überführung der Modulationsthermografie mit Bildpunktaufnahme in ein bildgebendes System vermeidet die umständliche Orientierung an das Meßobjekt. So können Mauerwerksausschnitte mit dem Verfahren schnell, großflächig und vollständig analysiert werden. Mit dem Bildpunktverfahren wäre eine lückenlose Oberflächenfeuchtedetektion dagegen zeitlich sehr aufwendig.

Die aufgezeichneten Amplitudenbilder zeigen, daß die Oberflächenfeuchtedetektion mit der amplitudenempfindlichen Modulationsthermografie im bildgebenden System gute Ergebnisse liefert. Die Modulationsfrequenzen werden im Bereich von 0,01 Hz und 0,5 Hz variiert. Hierbei hat sich herausgestellt, daß mit der Modulationsfrequenz von 0,1 Hz die Datenflut beherrschbar ist und eine ausreichende Zahl von Mittelungsbildern für die Auswertung zur Verfügung steht.

Mit der Normierung der unterschiedlichen Anregungswellenlängen durch den Einsatz von speziellen Verstärkungsfaktoren zum Ausgleich der spektralen Empfindlichkeit des Infrarotdetektors können negative Meßeffekte sehr gut ausgeglichen werden. Mit der anschließenden Bildung des Oberflächenfeuchteindex ist die Möglichkeit gegeben, eine bildgebende, quantitative und zerstörungsfrei arbeitende Feuchtemessung zu realisieren und gleichzeitig reproduzierbare Ergebnisse zu erzielen.

Der quantitativen Feuchtebestimmung über die phasenempfindliche Modulationsthermografie sind mit der eingesetzten Bildaufnahmetechnik Grenzen

gesetzt, da die Phasenempfindlichkeit für die kontrastreiche Darstellung unterschiedlicher Oberflächenfeuchten zu gering ist. Der Vorteil der phasenempfindlichen Auswertung liegt darin, daß der unterschiedliche Emissionsgrad der ausgemessenen Oberfläche durch die angewendete Fourieranalyse eliminiert wird, was die Meßunsicherheit des Verfahrens wesentlich verringert. Die Messungen an einem feuchten Bauwerk zeigen deutlich, daß die Meßunsicherheiten im Bereich der Toleranzen der Darr-Wäge-Methode liegen. Mit den Vorteilen der bildlichen Darstellung der Oberflächenfeuchte und der zerstörungsfreien Meßmethodik lassen sich zukünftig aufwendige Probebohrungen auf ein Mindestmaß beschränken.

Danksagung

Die Hilfestellungen und die Verwendung der Laboreinrichtungen innerhalb der BAM von Dipl.-Ing. W.Hammer und Dipl.-Ing. B.Günther (Abteilung S 13) haben zum wesentlichen Gelingen der Arbeit beigetragen. Die tatkräftige Unterstützung der Messungen durch Dr. F. Weise und Dipl.-Ing. D. Arndt (Abteilung VII 3.1) ermöglichten einen raschen Fortschritt der Arbeit. Für die Möglichkeit, Messungen an der Martinikirche in Halberstadt durchführen zu können, und für die rasche Auswertung der Darr-Wäge-Methode durch Herrn Dr. Volker Lind von der FA. FEAD-GmbH sei besonderer Dank ausgesprochen.

Literatur

- /1/ *W. Leschnik*, Welchen Beitrag kann die Feuchtemesstechnik zur Qualitätssicherung bei der Bauwerkssanierung leisten?, Vortrag auf dem Feuchtetag, Berlin 1995
- /2/ *B. Böttcher, H. Richter*, Verfahren zur Messung der Zusammensetzung und örtlichen Konzentrationen von Stoffen an Oberflächen, Offenlegungsschrift DE 3204146 A 1, Deutsches Patentamt 1983
- /3/ *W. F. Cammerer*, Wärme- und Kälteschutz im Bauwesen und in der Industrie, Springer-Verlag, Tutzing 1995
- /4/ *E. Geyer, D. Arndt, B. Günther*, Bestimmung der Reflexion von trockenen und befeuchteten Baustoffen im Wellenlängenbereich 0,3 bis 2,5 µm für die IR-optische Bestimmung der Feuchte, Vortrag auf dem Feuchtetag, Berlin 1995
- /5/ *D. Krogmann*, Lokalisation von Feuchte in Baustoffen mit der Methode der Reflektografie, unveröffentlichte Diplomarbeit Universität Rostock, 1997
- /6/ *D. Arndt, K. Borchardt, P. Croy, E. Geyer, J. Henschen, C. Maierhofer, M. Niedack-Nad, M. Rudolph, D. Schaurich, F. Weise, H. Wiggerhauser*, Anwendung und Kombination zerstörungsfreier Prüfverfahren zur Bestimmung der Mauerwerksfeuchte im Deutschen Dom, Forschungsbericht 200, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin 1994
- /7/ *A. Mandelis*, Progress in Photothermal and Photoacoustic Science and Technology, Non-destructive Evaluation (NDE), Volume II, PTR Prentice Hall 1994, Toronto 1994
- /8/ *A.J.Richardson, C.L.Wiegand*, Distinguishing vegetation from soil background information, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 43, Weslaco 1977
- /9/ *W.Wild, K.A.Büscher, H.Wiggerhauser*, Amplitude sensitive modulationthermografie to measure moisture in building materials, SPIE Thermosense XX, Orlando 1998, Vol. 3361, pp. 156-162
- /10/ *D. Wu*, Lock-In Thermographie für die zerstörungsfreie Werkstoffprüfung und Werkstoffcharakterisierung, Dissertation Universität Stuttgart, 1996