



Optische Messungen zur salz- und temperatur-unabhängigen Bestimmung der Feuchte in Bauwerkstoffen

Oybek BAKHRAMOV, Christian KAPS, Bauhaus Universität Weimar, Bereich Bau- und Werkstoffchemie, Weimar
Nigmatdjon SAMIGOV, Taschkenter Architektur-Bau Universität, Taschkent

Kurzfassung. In dem Beitrag wird ein optisches Verfahren vorgestellt, das mittels Lichtdurchlässigkeit arbeitet und Feuchtegehalte in Baustoff und Mauerwerk unabhängig vom Salzgehalt und der Temperatur zu ermitteln ermöglicht. Die Lichtdurchlässigkeit poröser Baustoffe und deren merkliche Steigerung durch Porenfeuchte ist Grundlage des Messprinzips. Durchfeuchtungsgrade in Baustoffen können unabhängig von der Temperatur und dem spezifischen elektrischen Widerstand kontinuierlich gemessen werden (Monitoring). Es wird ein optischer Feuchte-Sensor beschrieben, der auf die Porenfeuchte reagiert und keine (elektro-) chemischen Reaktionen verursacht. Die neue diagnostische Methode wird an einem Laboraufbau zur Messung von Mauerwerksproben vorgestellt.

Einführung

Die Feuchte-Messmethoden lassen sich in konventionelle Verfahren (z.B. Darmmethode) und *unkonventionelle strahlungstechnische* Verfahren einteilen. Diese Methoden basieren auf:

1. Elektrischer Widerstand
2. Wärmeleitfähigkeit
3. Elektrische Kapazität
4. Ultraschall
5. Tracer-Methode
6. Röntgenstrahlung
7. Mikrowellen
8. Gammastrahlung
9. Neutronenstrahlung
10. Kernmagnetische Resonanz

Obwohl diese Verfahren in mehr oder weniger großen Breite angewendet werden, zeigt sich, dass quantitative oder unverfälschte Ergebnisse zum Durchfeuchtungsgrad (DFG) nur erzielbar sind, wenn weitere Parameter z.B. Salzgehalt, Temperatur und die Vielfalt des Einflusses der inneren Phasengrenzen des untersuchenden Objekts berücksichtigt werden. Dabei erfordert diese genaue Untersuchung oft die Teilzerstörung von dem gemessenen Bauteil.

Die von uns vorgeschlagene neue optische Methode basiert auf einfachen, günstigen und vor allem weitgehend salz- und temperatur -unabhängigen Messungen, welche vor allem im Zusammenhang mit Sanierungsmaßnahmen (Salzminderung, Unterbindung des kapillaren Transport von Salzen mit der Porenlösung) von Bedeutung ist. Da chemisch gelöste Salzkomponenten fast ausschließlich nur im kondensierten Wasser der Porenlösung transportiert werden können, ist der durch den geometrischen Porenaufbau und durch die

äußeren klimatischen Bedingungen vorgegebene Porenraum (Poren-Teilsystem), der mit Wasser gefüllt ist, von besonderem Interesse. Zur Charakterisierung dieses Teilbereiches bieten sich optische Messmethoden an, da Licht vorzugsweise nur über diese Bereiche in den Poren geleitet bzw. im vernetzten/verzweigten System von wassergefüllten Poren gestreut werden kann. Dabei können die Gefügebestandteile des porenbildenden Werkstoffes als weitgehend lichtundurchlässig angesehen werden. Eine derartige Situation der Lichtleitung bzw. -streuung in einem porösen Bauwerkstoff mit hoher Feuchtebelastung ist schematisch in Bild 1 dargestellt [1]. Der Einfluss des Durchfeuchtungsgrades (DFG) auf die Lichtleitverhältnisse im Porensystem erscheint naheliegend. In dieser stark vereinfachten, strahlenoptischen Betrachtung (Bild 1) erfolgt die Lichtstreuung vorzugsweise durch Beugungserscheinungen an Gefügebestandteilen (Spalten, Kreisöffnungen bzw. Porenengstellen, engen Kapillarporen oder Oberflächenrauigkeiten) bzw. durch Totalreflexion an den Grenzflächen Wasser/Luft.

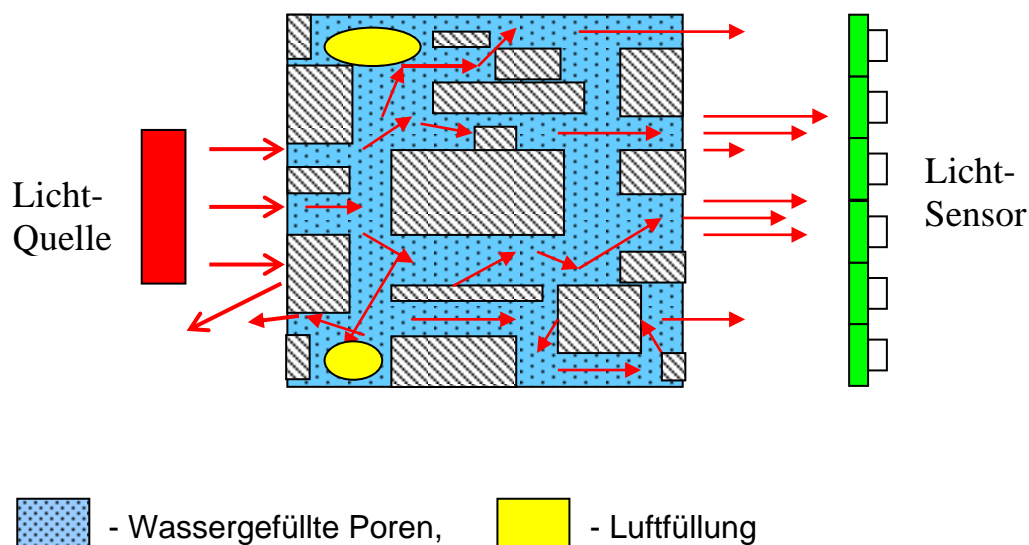


Bild 1: Formalisiertes Schema zur Lichtleitfähigkeit in den Poren des Bauwerkstoffes

1. Messanordnung für die Lichtdurchlässigkeit

Für die Messung der Lichtdurchlässigkeit bzw. der Intensitätsverteilung des Lichtes nach Durchgang durch die porösen, feuchtebelasteten Baustoffe wurden folgende Geräte und Aufrüstungen benutzt, die zugleich in den Bildern 2 und 3 dargestellt sind:

- | | |
|----------------------------------|------------------------------|
| 1. Black Box; | 7. Oszilloskop; |
| 2. CCD Kamera; | 8. Optik; |
| 3. Lichtquelle Laser mit 670 nm; | 9. PC-Rechner |
| 4. Fotodiode FD; | 10. Analog-Digital Interface |
| 5. Lichtdiode (LED) mit 930 nm; | 11. Probe |
| 6. Impuls Generator; | |

Der Neuaufbau der Messanordnung ist in einer Schwarz-Box installiert. Die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchungen wurden durch Lichtdetektion mittels der CCD-Kamera und Fotodiode erzielt (Bild 2).

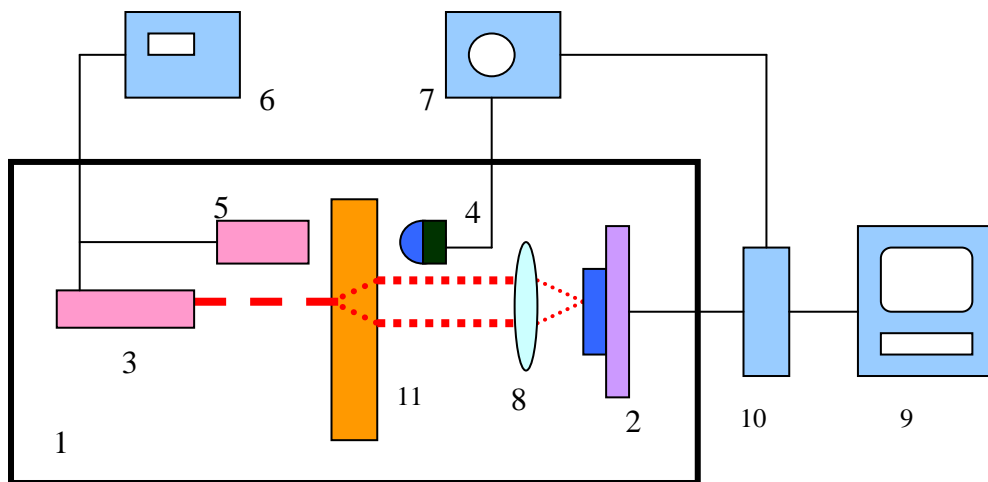


Bild 2: Schematische Darstellung der Messanordnung

Weitere Untersuchungen im Vergleich mit der vorherigen Arbeit [1], wo mit Punkt Laser Strahlung gearbeitet wurde, sind die Messungen der Lichtdurchlässigkeit mit verschiedenen Lichtwellenlängen. Die Licht-Emittierende-Diode (LED) als Lichtquelle ermöglicht z.B. die untersuchende Oberfläche des Probekörpers auch auf einer größeren Fläche zu beleuchten, als dies mit Laser-Licht möglich war. Obwohl mit Laser-Licht die Möglichkeit besteht, lineare „Strich“ Lichtquellen zu erzeugen.

2. Messproben und Probenpräparation

Zur Charakterisierung der Porensysteme wurden drei Bauwerkstoffe herangezogen, die wohl in der offenen Porosität mit etwa 20 bis 30 % vergleichbar sind, jedoch eine merklich verschiedene Porenradienverteilung haben. Während der Kalksandstein KS und Natursandstein NS vorzugsweise durch kleinste Kapillarporen um $0,025 \mu\text{m}$ gekennzeichnet sind, dominieren im Ziegel Jöns ausgeprägt größere Kapillarporen um $0,6 \mu\text{m}$. Es wurden alle drei porösen Baustoffe mit unterschiedlichen Schichtdicke (mm) untersucht.

Die Kennwerte alle drei Bauwerkstoffe sind in den Tabelle 1 und 2 zusammengestellt.

Tabelle 1: Material Parameter nach [2]

Proben	Trockenrohddichte ρ [g/cm ³]	Offene Porosität P_{offen} [%]	Totale Intrusion [ml/g]
Kalksandstein Vogt1 (KS)	1,79	26,9	0,13
Ziegel Jöns (ZJ)	1,83	33,1	0,19
Natursandstein Vogt2 (NS)	2,21	19,2	0,10

Tabelle 2: Dicken der Probenscheiben in mm

Proben	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4
Kalksandstein Vogt1 (KS)	2,5	3,2	4	8
Ziegel Jöns (ZJ)	1,6	2,5	3,1	4
Natursandstein Vogt2 (NS)	2,2	3,3	5,5	9

Die Materialien wurden mit einer Diamant-Kreissäge in parallele Platten von wenigen Millimetern Dicke geschnitten, bis zur Gewichtskonstanz bei 105 °C getrocknet und durch Tränken mit deionisiertem Wasser und anschließend dem Verdunsten bei Raumtemperatur ein Durchfeuchtungsgrad eingestellt, sowie gravimetrisch kontrolliert. Die verwendeten Proben sind mit ihren Abmessungen in Tab. 2 angegeben. Die Messungen wurden bei Raumtemperatur (22 ± 1) °C vorgenommen. Der Durchfeuchtungsgrad (DFG) wurde mit der Gleichung (1) berechnet

$$DFG = \frac{m - m_t}{m_{fg} - m_t} \cdot 100\% \quad (1)$$

m – Probenmasse; (t- trocken; fg- feuchte-vollgesättigt)

3. Lichtquelle und Variationen der Messbedingungen

Im Hinblick auf eine geeignete Wellenlänge zur Erfassung des Wassergehaltes in den Poren wurden Halbleiter-Lichtdioden mit folgenden Emissionswellenlängen 470 nm (blau), 590 nm (gelb) 930 nm (IR - Infrarot-Bereich) für die Untersuchungen verwendet. Das optische Absorptions- und Rückstreuverhalten von Wasser im sichtbaren und angrenzenden Spektralbereichen ist prinzipiell bekannt. Bild 4 zeigt die Absorptions- und Rückstreuoeffizienten von Wasser im Spektralbereich 400 und 850 nm. Während das Rückstreuvermögen mit steigender Wellenlänge fällt, steigt die Absorption an. Der kurzwellige Bereich ist durch sehr geringe Absorption, der langwellige Bereich dagegen durch sehr hohe Absorptionen gekennzeichnet. Wegen kleinerer Rückstreuung im IR Bereich ist der Transmissioinsgrad des Wassers viel höher als im kurzwelligen Bereich [3].

In unserer ersten Veröffentlichungen haben wir mit einer Laser Strahlung (670nm) Lichtquelle gearbeitet. Die weitere Untersuchungen mit unterschiedlicher Lichtwellenlänge (LED) haben gezeigt, dass die Lichtdurchlässigkeit poröser, wasserhaltiger Baustoffe ähnlich verläuft wie in reinem Wasser.

In weiteren Untersuchungen wurde die Lichtdurchlässigkeit der wassergefühlte Poren (DFG 100%) in Abhängigkeit von der Lichtwellenlänge gemessen. Als Probekörper wurde Kalksandstein Vogt1 mit der Dicke d=2,5mm genommen. Im Bild 3 (a,b,c) sind die Lichtdurchlässigkeit bei Verwendung von verschiedenen Lichtquellen durch Präsentation entsprechender Oszilloskopbilder dargestellt.

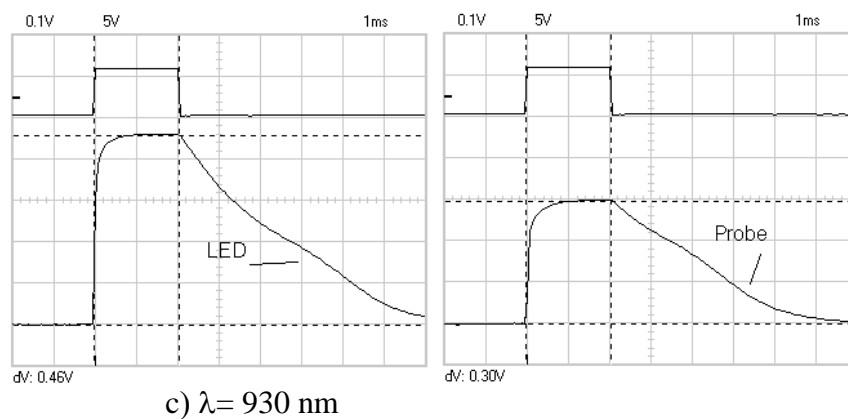
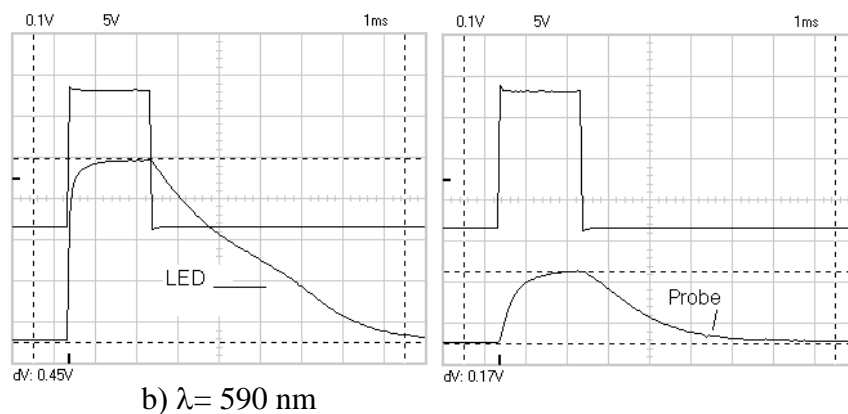
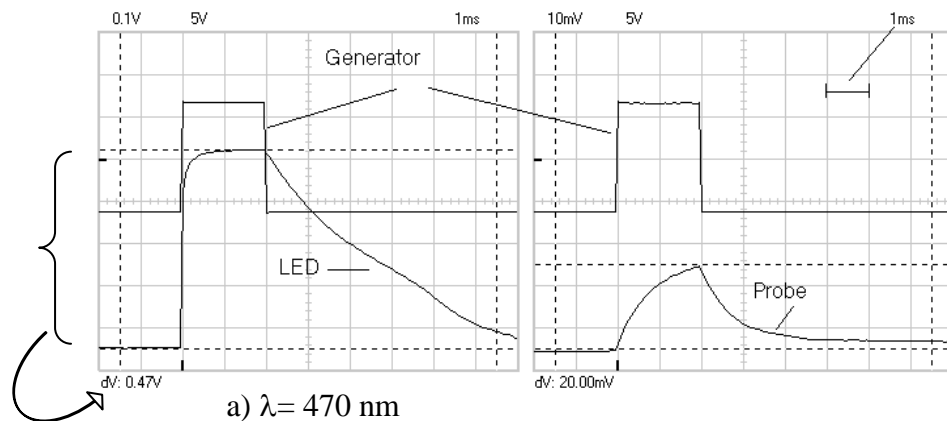


Bild 3: Oszilloskopbilder der Lichtdurchlässigkeit der Probe in Abhängigkeit von verschiedenen Lichtquellen

In den linken Diagrammen sind mit unterschiedlichen LED Dioden-Spannungen (Bild 3: recht-eckige Impuls von Impulsgenerator) direkt, ohne Probekörper die gleichen Lichtintensitäten an der Fotodiode erzielt worden, welcher etwa 460 mV Potentialdifferenz entspricht (Bild 3: gekennzeichnet als LED). So kann man die transmittierte Lichtintensität (rechte Diagrammen) von verschiedenen Lichtquellen miteinander vergleichen (Bild 3: gekennzeichnet als Probe; a, b und c mit merklich verschiedenen Ordinatenmaßstab). Die Form des Signals ändert sich verständlicherweise auch stark mit der Absorption.

Es wurde gefunden, dass die wasserhaltigen Poren im Infrarot-Bereich einen viel größeren Transmissionsgrad als im sichtbaren Bereich haben. Mit der Fotodiode wurden bei Infrarotlicht 300 mV, bei Gelblicht 170 mV und bei Blaulicht 20 mV registriert. Mit anderen Baustoffen beobachteten wir auch einen höheren Transmissionsgrad in IR Bereich. Das zeigt, dass die Feuchte Bauwerkstoff-Lichtdurchlässigkeit verhält sich wie die Lichtdurchlässigkeit des Wassers.

4. Lichtabsorption in Poren von Baustoffen

Die Feuchtigkeit in den Proben wurden in der Blackbox bei Raumtemperatur (22 ± 1) °C verdunstet (ohne zusätzlichem Hilfsmittel), um die Verluste von Probenmasse als Funktion der Zeit bestimmen zu können. Im Bild 4 ist Probendurchfeuchtungsgrad DFG als Funktion der Zeit dargestellt. Die Probenbezeichnung mit N... gibt eine Information zur Probendicke gemäß Tab.2.

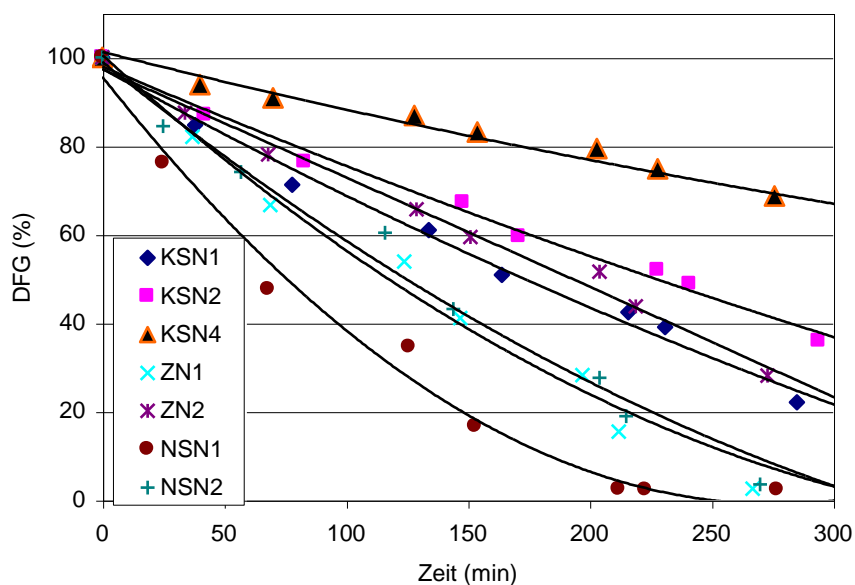


Bild 4: Probendurchfeuchtungsgrad DFG als Funktion der Zeit.

Die Diagramme zeigen, dass der Verdunstungsprozess viel langsamer ist als die optischen Aufnahmezeiten während der Untersuchungen, die etwa 2-3 Sekunden dauern. Im Bild 5 ist die relative Beleuchtungsstärke als Funktion des DFG dargestellt. Es wurde die relative Änderung der Beleuchtungsstärke der Probekörper Kalksandstein, Ziegel und Natursandstein mit fallendem Durchfeuchtungsgrad verglichen [4]. Die Untersuchungen zeigen, dass die Lichtabsorption des befeuchteten Ziegels sich anders verhält als die des Sandsteins. So ähnliche Abhängigkeiten sind auch bei poröser Bauwerkstoffen an Hand von Leitfähigkeitsmessungen mit der gleichen Material- bzw. Porensystemspezifik zu beobachten[5]. Das Bild 6 zeigt beispielhaft die Kalibrierungskurven verschiedener Bauwerkstoffe (PBW) mit unterschiedlichen Materialdicken.

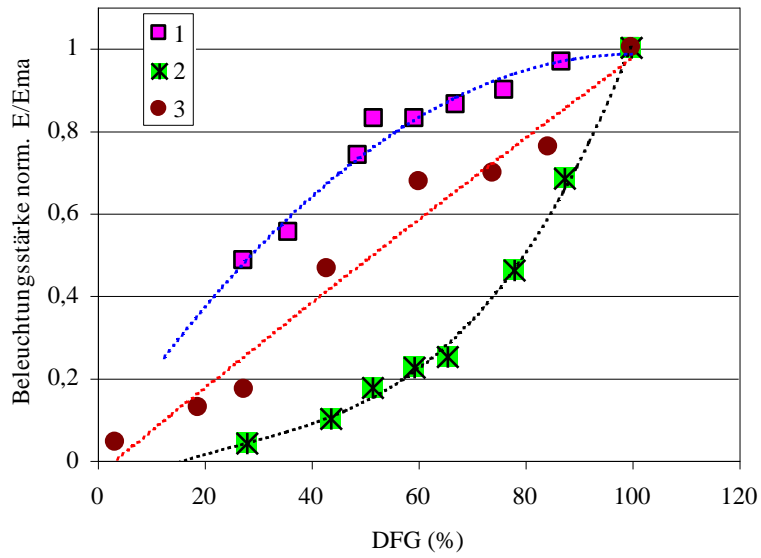


Bild 5: Relative Beleuchtungsstärke als Funktion des DFG bei 1- Kalksandstein, 2- Ziegel, 3- Natursandstein

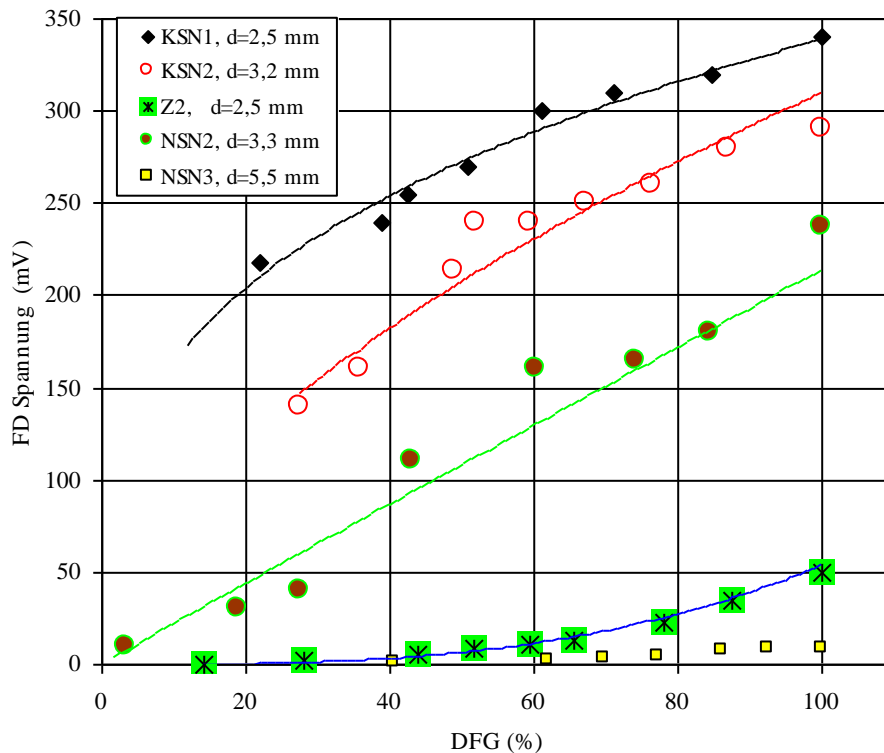


Bild 6: FD-Spannung in Abhängigkeit vom Durchfeutungsgrad (DFG); KSN-Kalksandstein, Z-Ziegel, NSN- (Natur-)Sandstein; d- Bauwerkstoffdicke

5. Optischer-Feuchte-Sensor

Wegen der Ergebnisse der Untersuchungen der Lichtdurchlässigkeit der porösen, feuchten Baustoffe, lässt das vorgestellte Messprinzip auch die Anwendung in der Feuchtediagnostik zu. Im Bild 7 ist eine Skizze eines entsprechender Sensors dargestellt. Der Sensor hat folgende Teile:

1. Poröses Material
2. IR LED Lichtquelle
3. FD-Fotodiode
4. Filter- und Kontaktschicht
5. Elektrischer Anschluss
6. Segment Isolationswand

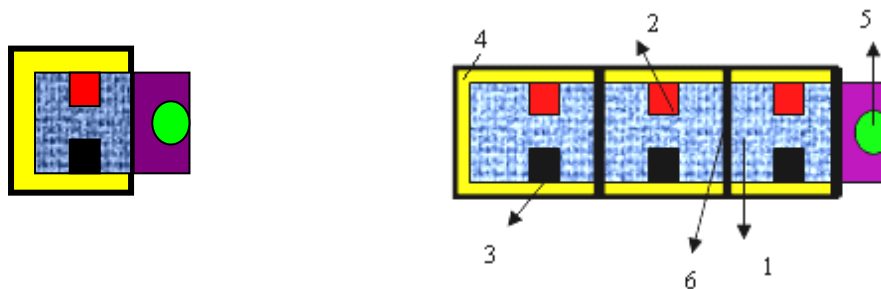


Bild 7: Ein- und Mehrsegment Optischer Sensor

Das Licht der IR LED wird durch die Porenfeuchtigkeit transmittiert und die Lichtintensität mit Hilfe der Fotodiode registriert. Je mehr Feuchtigkeit vorhanden ist, desto größer ist Potenzialdifferenz an der Fotodiode. Im Labor werden die Werte jedes Sensors im unterschiedlich wasserbefeuchtetem Zustand kalibriert. Die Mehrsegment Sensoren ermöglichen eine besseren mittleren Durchschnittswert des Signals und dadurch besseren Diagnose des Feuchtegehalt. Im Bild 8 ist ein Anwendungsbeispiel für die Feuchteuntersuchungen in der Tiefe bzw. der Höhe des Mauerwerks skizziert.

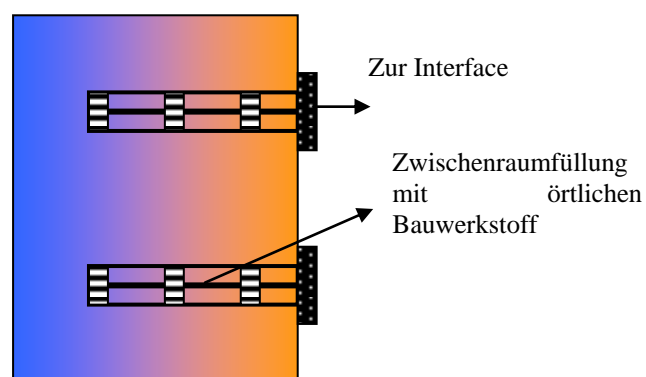


Bild 8: Zur Anwendung der mehreren Optischen Feuchte-Sensors in Mauerwerk

Der Vorteil des neuen Sensors besteht in der Unabhängigkeit von dem Salzgehalt der Porenlösung und der Temperatur. Wie bekannt ist, sind elektrische Leitfähigkeitsmessungen bei höheren Salzgehalten nicht in der Lage quantitative feuchtediagnostische Resultate zu

liefern, da die Salzkonzentration den Widerstand der Lösung beeinflusst. Die bei den vorliegenden Untersuchungen gemessene Lichtmenge ist dagegen nur an die Menge des Porenwassers gebunden und zerstörungsfrei bestimmbar.

Zusammenfassung

Der optischer Feuchte-Sensor ist im Besonderen im Hinblick auf die messtechnischen Erfordernisse im Bauwesen und der Bautechnik mit langfristig geplanten Sanierungsmaßnahmen und verschiedenartigen Revitalisierungsverfahren (Bestimmung des optimalen Sanierungszeitpunktes bzw. der Nachhaltigkeit / Wirksamkeit der technischen Maßnahmen) zu sehen. Auf diesem bautechnischen Gebiet ist es notwendig, in größeren Zeitabständen an definierten Orten im Volumen von Bauteilen realitätsnah die Feuchte ohne merkliche Verfälschungen durch Störeinflüsse (gelöste Salze, Temperatur, Oberflächentrocknung) und korrosive Sensor-Degradation zu messen. Der optische Feuchte-Sensor ist eine kompakte, robuste und von Lichtquelle und -empfänger integrierte Messeinheit.

Die Lichtleitung des Wassers in den Poren eines Bauwerkstoffes ermöglicht die Mauerwerksfeuchte zu messen. Auf Grund der quantitativen Untersuchungen der Beleuchtungsstärke E der Bauwerkstoffe wie Ziegel, Kalksandstein und Natursandstein in Abhängigkeit von dem Durchfeuchtungsgrad DFG wurde festgestellt, dass der Verlauf der relativen Beleuchtungsstärke, wie im Bild 5 zu sehen ist, mit anderen physikalischen Parametern (Ionendiffusionen bzw. elektrischer Leitfähigkeit) korrelierbar ist [5].

Der mittels Lichtdurchlässigkeit gemessene Durchfeuchtungsgrad hat drei Vorteile im Vergleich zur elektrische Feuchtediagnostik:

1. Unabhängigkeit von dem Salzgehalt (keine Farbenänderungen durch baurelevante Schadsalze)
2. Unabhängigkeit von der Temperatur des Porenlösung (kein relevanter Temperatureinfluss)
3. Zerstörungsfreie bzw. -arme und chemisch „reaktionsneutrale“ Messungen an Bauwerkstoff (keine Elektrodenreaktion)

Auf Grund dieser Vorteile lässt die neue Messmethode auch ein langzeitliches Monitoring zu. Der Sensor ermöglicht die Beobachtung der Feuchtegehalte bzw. -verteilung im Bauteilvolumen für die Bauwerksüberwachung unabhängig von dem Mauerwerkssalzgehalt bzw. -temperatur. Im Mittelpunkt der Erfindung steht die bisher unbekannt Kombination von vorteilhafter langzeitlicher Feuchtemessung in den örtlichen Original- bzw. Vergleichsbaumaterialien im zeitaktuellen Zustand des Bauteils mit einem IR-optischen Transmissionsprinzip der Sensoren. Dabei entstehen keine Mauerwerksschäden durch die Messungen. Es ist eine einfache, günstige Messmethode, die keine großen Vorbereitungen und keine aufwendige Messtechnik erfordert.

Referenzen

- [1] Bakhramov O., Kaps Ch.: Unkonventionelle Charakterisierung des Porensystems von feuchtebelasteten Bauwerkstoffen durch Lichtstreuung. Optische Porosimetrie, Bauphysik, Heft 2, April 2005, S. 95-101
- [2] Vogt R., Persönliche Mitteilungen
- [3] Pope, R.M. and E.S. Fry. 1997: Absorption spectrum of pure water. II. Integrating cavity measurements. *Appl. Opt.* 36: 8710-8723.
- [4] Bakhramov O., Goretzki L., Kaps Ch.: Neues Verfahren zur Feuchtemessung in Baustoffen, WTA Blatt Sept. 2007 (in Vorbereitung.)
- [5] Buchwald A.: Ionentransportprozesse zur Verminderung von Schadsalzgehalt in porösen, feuchten Mauerwerksbaustoffen. Dissertation, 2000, Weimar, S.98
- [6] Meng, B.: Charakterisierung der Porenstruktur im Hinblick auf die Interpretation von Feuchtetransportvorgängen. IBAC, Technisch-wissenschaftlicher Bericht des Instituts für Bauforschung der RWTH Aachen, Band 3, 1993.