

Feuchtemessung im Bauwesen - ein Überblick

Sabine KRUSCHWITZ *

* BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin
Unter den Eichen 87, 12205 Berlin

Email: sabine.kruschwitz@bam.de, Tel.: *49/30/8104 4234

Kurzfassung Ein Großteil der Schäden im Baubereich ist auf feuchteinduzierte Prozesse zurückzuführen. Der Erhaltungsaufwand allein im Hochbau wurde bereits vor einiger Zeit auf jährlich ca. 35Mrd. Euro geschätzt [1]. Aus diesem Grund hat die Feuchtemessung in der Bauwerksdiagnose eine sehr hohe Bedeutung – und im Idealfall sollte sie natürlich alles können: schnell sein, wiederholbar und zerstörungsfrei anwendbar. Zwar gibt es eine Vielzahl an verfügbaren Feuchtemesstechniken, oft fällt es Anwendern aber schwer, einzuschätzen welches die richtige Prüfmethode für ihr Problem ist. Genormt sind nur direkte und zerstörende Verfahren, die zwar teils hochgenau, aber doch nur stichprobenartig Aussagen liefern können. Die anderen, zerstörungsfreien Methoden basieren auf der Änderung feuchteabhängiger physikalischer Materialeigenschaften. Ihre Grundlagen, sowie Vor- und Nachteile werden hier näher dargestellt.

Einführung

In Deutschland gibt es eine bestehende Bausubstanz im Wert von rund 50 Billionen Euro mit teilweise angenommenen Lebensdauern von Einzelbauwerken von bis zu 100 Jahren [1]. Um diesen Baubestand, und dazu zählen Hoch- und Infrastrukturbauten gleichermaßen, zu erhalten, zu sanieren und zu modernisieren müssen zum Teil beträchtliche Kosten aufgebracht werden. Der Weg dahin führt nur über neue Methoden der Bauwerksüberwachung und Diagnosetechnologien. Feuchte ist neben mechanischen Belastungen die wesentlichste Ursache für Schäden an Bauwerken. Aber auch nach vielen Jahren Forschungstätigkeit ist die Bestimmung des Wassergehaltes kapillarporöser, mineralischer Baustoffe immer noch eine herausfordernde Aufgabe, insbesondere wenn es darum geht, quantitative Aussagen zu treffen.

Ursachen für Schäden an kapillarporösen Baustoffen wie z. B. Ziegeln, Sandsteinen, Kalksandsteinen und Beton sind vielfach bauliche Mängel, aufsteigende Feuchte oder auch falsches Heiz- und Lüftungsverhalten. Bei einigen (v.a. zementgebundenen) Materialien ist Wasser bei der Herstellung bereits enthalten und muss erst entweichen. Oft hat sich gezeigt, dass einfache Normen mit Schwellwerten, deren Einhaltung dann punktuell vor Ort nachgewiesen wird, nicht auszureichen scheinen, um feuchteinduzierte Schäden zu vermeiden. Innovative, flächig einsetzbare Messtechnik könnte hier Abhilfe schaffen. Im Folgenden wird aufbauend auf [22,23] eine Übersicht über vorhandene Verfahren, deren Grundlagen sowie deren Vor- und Nachteile vorgestellt.



Direkte Feuchtemessverfahren

Bei den direkten Messverfahren muss grundsätzlich Probenmaterial entnommen werden. Anschließend erfolgt eine stoffliche Trennung von Feststoff und Wasser. Leider sind auf diesem Wege Wiederholungsmessung (Monitoring) und flächige Aussagen nicht möglich. Da sie aber sehr präzise sind, werden sie in der Praxis gern angewendet.

1.1 Trocknungsverfahren (Darr-Wäge-Verfahren)

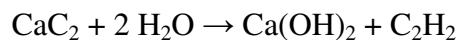
Für die Feuchtebestimmung im Trockenschrank wird dem zu untersuchenden Bauteil eine Probe in Form eines Bohrkerns oder -mehl entnommen. Sie wird sofort luftdicht verschlossen und anschließend das Feuchtgewicht im Labor bestimmt. Danach wird die Probe bei 105°C (oder bei der für den Baustoff zugelassenen Höchsttemperatur) im Trockenschrank bis zur Gewichtskonstanz getrocknet. Es ist darauf zu achten, dass nicht durch zu hohe Temperaturen chemisch gebundenes Wasser ausgetrieben wird, Gipse und Sandsteine z. B. dürfen nur bei 40°C getrocknet werden. Aus der Gewichtsdiﬀerenz zwischen der feuchten (m_A) und der trockenen Probe (m_0) wird dann der Feuchtgehalt u in Masseprozent ermittelt:

$$u_{M\%} = \frac{m_A - m_0}{m_0} * 100. \quad (\text{Glg. 1})$$

Generell ist während der Probenahme darauf zu achten, eine starke Erwärmung des Bohrgutes zu vermeiden, da es dabei sonst Verdunstungen kommen kann. Dies gilt für Bohrmehl noch stärker als für Bohrkern. Empfohlen werden Kerne mit Durchmesser nicht kleiner als 50 mm [2]. Die genauen Angaben zur Vorgehensweise für das Trocknungsverfahren waren ursprünglich in [3] definiert, diese DIN ist aktuell jedoch zurückgezogen und es liegt keine überarbeitete Fassung vor.

1.2 Calcium-Carbid-Methode (CM)

Die CM kann direkt vor Ort angewendet werden. Dazu wird zerkleinertes Probenmaterial (5-20g) abgewogen und in einer Druckflasche zusammen mit Calciumcarbid zur Reaktion gebracht. Das in der Probe enthaltene Wasser reagiert mit dem Calciumcarbid zu Acetylen:



Die Druckerhöhung durch das entstehende Acetylen im Probenbehälter kann man an einem Manometer ablesen und über Vergleichstabellen den Feuchtegehalt ableiten.

Besonders im Bereich Estrichfeuchtemessung findet die Calcium-Carbid-Methode viel Anwendung, da sie hier in die Norm Eingang gefunden hat [4]. Fußbodenleger sind darauf angewiesen, die „Belegereife“ von Estrichböden sicherzustellen, indem sie Werte von < 2% CM Feuchte nachweisen, bevor sie mit der Belegung beginnen. Diese Vorgehensweise ist äußerst kritisch zu sehen, da stets nur punktuell gemessen wird. Häufig wurde außerdem bereits von Schadensfällen berichtet, in denen die mit CM bestimmte Feuchte unter dem geforderten Mindestwert lag [5,24].

Indirekte Feuchtemessverfahren

2.1 Elektrische Verfahren

2.1.1. Widerstandsverfahren

Widerstandsverfahren machen sich die Abhängigkeit des elektrischen Widerstands vom Feuchtegehalt eines porösen Mediums zunutze. Je feuchter ein Baustoff, desto geringer ist sein elektrischer Widerstand und umso höher seine elektrische Leitfähigkeit (Kehrwert des Widerstands). Sollen mit elektrischen Verfahren quantitative Aussagen über die Materialfeuchte getroffen werden, müssen stets materialspezifische Kalibrierkurven ermittelt werden. Sie besitzen Gültigkeit, wenn die Leitfähigkeit des Porenfluids im Baustoff bekannt und konstant ist. Ist sie konstant, aber nicht bekannt, können immerhin qualitative Feuchteverteilungen detektiert werden.

- Multi-Ring-Elektrode (MRE)

Ein klassischer Vertreter elektrischer Feuchtemessverfahren ist die Multi-Ringelektrode. Sie wurde in den 1990er Jahren am Institut für Bauforschung in Aachen (ibac) zur Bestimmung der Feuchteverteilung in der Betonrandzone entwickelt, um z.B. die Korrosionsanfälligkeit zu prüfen [6,7]. Sie besteht aus abwechselnd übereinanderliegenden Edelmetall- und Isolierringen, die beliebig oft hintereinander gesteckt werden können. Zwischen zwei benachbarten Edelstahlringen können dann die Widerstände im Baustoff (maßgeblich beeinflusst durch den Fluidgehalt und –konzentration) ermittelt werden. Die MRE kann sowohl in bestehende Bauteile nachträglich eingesetzt als auch von vornherein integriert werden. Einige Praxisbeispiele zur Erfassung der Funktionstüchtigkeit von Abdichtungen und Hydrophobierungen mit Multi-Ring-Elektroden wurden vorgestellt in [8]. Da die Messwerte allerdings stark von der Fluidleitfähigkeit, der Temperatur und der Porosität abhängen, sind quantitative Aussagen schwierig. Eine große Rolle für die Güte der Messwerte spielt die Ankopplung der MRE an das Bauteil.

- Wenner Sonde

Die Wenner-Sonde ist im Vergleich zur Multi-Ring-Elektrode eine reine Oberflächensonde und erlaubt keine Aussage in der Tiefe eines Bauteils. Sie besteht aus vier Elektroden, die nebeneinander in gleichem Abstand angeordnet sind. Sie wird über kleine Schwämmchen an den Baustoff galvanisch angekoppelt. An den beiden äußeren Elektroden wird ein elektrisches Wechselfeld niedriger Frequenz aufgeprägt und an den inneren beiden die resultierende Spannung aufgezeichnet. Unter Berücksichtigung des Geometriefaktors kann dann der elektrische Widerstand ermittelt und wiederum über Kalibrationskurven eine Aussage über die Materialfeuchte abgeleitet werden.

- Elektrische Tomographie

Verwendet man statt vier Elektroden ein vollständiges Profil, ist es möglich auch Tiefeninformationen entlang von Messlinien zu gewinnen. Diese Anwendungen werden jedoch bisher vorwiegend im Rahmen von Forschungsarbeiten durchgeführt [25,26]. Einige Beispiele haben jedoch gezeigt, was in der Zukunft möglich sein könnte.

2.1.2 Kapazitive Verfahren

Kapazitive Messverfahren basieren auf den herausragenden dielektrischen Eigenschaften von Wasser. Da Wasser ein polares Molekül ist, richtet es sich in einem von außen angelegten Feld in einer Vorzugsrichtung aus und ist somit polarisierbar. Wird dann ein

äußeres elektromagnetisches Feld angelegt, beginnen die Moleküle mit der Frequenz des Feldes zu rotieren. Dieser Effekt wird makroskopisch durch die physikalische Größe Dielektrizitätskonstante (DK, Formelzeichen ϵ) beschrieben:

$$\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0, \quad (\text{Glg. 2})$$

mit ϵ_0 als Dielektrizitätszahl im Vakuum und ϵ_r als relativer Dielektrizitätszahl des Mediums. Die relative Dielektrizitätszahl ϵ_r ist komplexwertig, d.h. sie besteht aus Realteil und Imaginärteil und kann wie folgt beschrieben werden:

$$\epsilon_r^* = \epsilon_r' + i\epsilon_r'' = \epsilon_r' (1 + i \tan\delta_\epsilon). \quad (\text{Glg. 3})$$

Der Realteil stellt die klassische Permittivität oder dielektrische Leitfähigkeit (z.B. eines Kondensators) dar, der Imaginärteil beschreibt die dielektrischen Verluste. Die Gesamtverluste $\tan \delta$ eines Materials setzen sich generell aus den dielektrischen Verlusten und den elektrischen Verlusten durch Leitfähigkeit von Ionen (z.B. Salze) zusammen:

$$\tan \delta = \epsilon_r'' / \epsilon_r' + \kappa_{\text{ion}} / (\epsilon_0 \epsilon_R 2\pi f). \quad (\text{Glg. 4})$$

Trockene Baustoffe weisen in der Regel $\epsilon_r' \approx 3-7$ und $\epsilon_r'' \approx 0$ auf und zeigen im Gegensatz zu Wasser keine Abhängigkeit der Dielektrizitätszahl von der Messfrequenz. Freies Wasser dagegen hat bei etwa 16 GHz eine ausgeprägte Relaxationsfrequenz.

o Impuls-Radar

Das Impuls-Radar Verfahren basiert auf dem Aussenden und Empfangen kurzer elektromagnetischer Impulse von ca. 1 ns Dauer (üblicherweise drei Halbwellen). Die Mittenfrequenz der Impulse für die relevanten Anwendungsgebiete im Bauwesen liegt bei ca. 200 MHz bis 2,5 GHz. Die Impulse breiten sich im zu untersuchenden Bauteil aus und werden an den Grenzflächen von Materialien mit unterschiedlichen dielektrischen Eigenschaften reflektiert. In der Antenne, die über die Oberfläche des Messobjektes geführt wird, ist sowohl ein Sender als auch ein Empfänger integriert. Letzterer empfängt die reflektierten Impulse und leitet diese an das Radargerät zur Datenerfassung weiter. Später können dann die aufgenommenen Signale mit Hilfe eines Computers bezüglich der Intensität und Laufzeit ausgewertet werden. Für Feuchteanwendungen wurde dies u.a. in [10,11] gezeigt. Feuchte Bereiche zeichnen sich in Radarsignalen meist durch Laufzeitverlängerungen ab. Die Geschwindigkeit v der elektromagnetischen Welle berechnet sich nach

$$v = \frac{c_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (\text{Glg.5})$$

mit c_0 als Lichtgeschwindigkeit im Vakuum. Da die effektive relative Permittivität eines Baustoffs mit dem Wassergehalt ansteigt (für Ziegel z.B. von $\epsilon_r \approx 4-8$ in trockenem Zustand auf 8-12 in feuchtem Zustand), ergibt sich entsprechend eine Erhöhung der Laufzeit.

Erhöhte Salzgehalte führen hauptsächlich zu einer Dämpfung der Signalamplitude. Dies führt bei extremer Feuchtigkeit bzw. bei sehr starker Salzlast in einem Baustoff dazu, dass eine Auswertung nicht mehr möglich ist.

o Mikrowellen-Aufsatzsensoren

In den letzten 10 Jahren hat sich auch das Mikrowellenverfahren durch neue messtechnische Konzepte intensiv weiterentwickelt, so dass heute relativ kostengünstig teilweise vorkalibrierte Handgeräte am Markt erhältlich sind. Je nach Messkopfdesign haben die Sensoren unterschiedliche Sensitivitätsbereiche. Mit Resonator-Applikatoren werden elektromagnetische Streufelder erzeugt, die im Baustoff Eindringtiefen von 2-6 cm

erreichen. Mit Patch-Applikatoren werden elektromagnetische Strahlungsfelder angeregt, die bis zu 50 cm eindringen. Inzwischen sind auch Rasterfeuchtescanner mit gekoppelten Messköpfen erhältlich, die gleichzeitig in verschiedenen Tiefen Messwerte erfassen und Feuchteverteilungsbilder erzeugen [13].

Mit den verwendeten Aufsatzsensoren werden dann sowohl die in das Material hineinlaufende als auch die reflektierte oder rückgestreute elektromagnetische Welle aufgezeichnet. Der sog. Reflektionsfaktor R ist der Quotient aus rück- und hinlaufender Welle [14]. Dieser ist abhängig von den effektiven dielektrischen Eigenschaften des untersuchten Mediums. Diese wiederum ändern sich stark mit dem Wassergehalt aufgrund seiner hohen Verlusteigenschaften. Für die Messung werden elektromagnetische Wellen im Bereich 2,45 GHz verwendet. In diesem Bereich sind die Einflüsse der Leitfähigkeit wegen der hohen Frequenzen vernachlässigbar klein (vergleiche Glg. 4) und es tragen nur noch die dielektrischen Eigenschaften von Wasser zu den Verlusten bei. Aus diesem Grund gibt es im Mikrowellenbereich praktisch keine Beeinflussung durch Salze.

- Mikrowellen-Bohrlochverfahren

Vor etwa 20 Jahren wurde an der Bundesanstalt für Materialforschung das Mikrowellen-Bohrlochverfahren entwickelt [15]. Für dieses Messverfahren müssen zwei exakt parallele Bohrlöcher mit je einem Durchmesser von 12 mm in das zu untersuchende Medium eingebracht werden. Mit einem Schrittmotor werden dann eine Sende- und eine Empfangsantenne parallel in die Bohrlöcher eingebracht und in definierten Abständen Messungen ausgelöst. Aufgezeichnet wird die Dämpfung der elektromagnetischen Welle zwischen den beiden Bohrlöchern. Die Messfrequenz liegt im Bereich 6-10 GHz, so dass Einflüsse durch mögliche Salzgehalte ebenfalls vernachlässigt werden können. Dieses Verfahren ist jedoch nach wie vor eher eine Labormethode.

- Time Domain Reflectometry

Das Time Domain TDR-Verfahren wurde in der Vergangenheit für Anwendungen im Baubereich fortentwickelt und wird jetzt (immer noch vermehrt zu Forschungszwecken) nach und nach zu Monitoringzwecken eingesetzt. Es basiert auf der Laufzeitmessung kurzer Mikrowellenimpulse (> 1 GHz), die sich entlang zweier Metallstäbe ausbreiten und an deren Ende reflektiert werden. Mit zunehmender Baustofffeuchte erhöht sich die Laufzeit. TDR-Sonden bestehen aus zwei gabelartig angeordneten Metallstäben mit 2-11 mm Durchmesser, 16-150 mm Abstand und 100 mm Länge. Die Sensoren müssen jeweils relativ aufwändig auf das Material, in das sie eingesetzt werden, kalibriert werden. In [16] wurde z.B. Studie mit TDR Sensoren veröffentlicht, in der über 3 Jahre die Austrocknung eines Stahlbetonbauwerks überwacht wurde.

- Kapazitive Handmessgeräte

Weiterhin sind am Markt verschiedene einfache Handgeräte erhältlich, die nach dem kapazitiven Prinzip arbeiten. Diese werden im Baubereich gern eingesetzt, um zumindest schnell einen Überblick über die Feuchtesituation an einem Bauteil zu erhalten. Sie erfordern in der Regel wenig Einarbeitungszeit und sind leicht zu bedienen. Ein Vertreter ist die Gann-Hydromette [17] (sog. Schnellfeuchteindikator, ein ähnliches Gerät von Gann existiert für das Widerstandsverfahren). Andere Hersteller bieten ähnliches an. Speziell für Estrich-Feuchtemessung entwickelt DNS Denzel Messgeräte nach dem Prinzip eines aufgeklappten Kondensators [18].

2.2 Radiometrische Verfahren, kernphysikalische Verfahren

- Neutronenrückstreuung

Mit Hilfe einer Isotopsonde (auch Neutronen- oder Troxler-Sonde) können zerstörungsfrei Feuchte- und Dichtemessungen vorgenommen werden. Die Eindringtiefe in Baustoffe beträgt ca. 30 cm. Für die Feuchtebestimmung werden schnelle Neutronen ausgesendet, die in das zu untersuchende Material eindringen und beim elastischen Zusammenstoß mit Wasserstoffatomen stark abgebremst werden, sie werden zu sog. langsamen Neutronen. Die pro Zeiteinheit erzeugte Anzahl an langsamen Neutronen ist ein Maß für den Wassergehalt eines Mediums. Da die Bindungsart des Wassers praktisch keine Rolle bei der Energieabgabe des Wassers spielt, können freies und gebundenes Wasser bei dieser Messung nicht unterschieden werden. Zu beachten ist, dass das Neutronenrückstreuverfahren dichteabhängig ist, daher müssen Kalibrierkurven vorher erstellt werden. Für die Dichtemessungen (auch für Hohlraumortung, Verdichtungsmängel, etc.) werden Gammastrahlen verwendet, die durch das Material gestreut und geschwächt werden. Die Auswertung findet im Gerät vollautomatisch statt. Die Bedienung solcher Geräte ist relativ leicht, allerdings müssen die Strahlenschutzbestimmungen eingehalten werden, was ggf. Schwierigkeiten bedeutet, da das Personal extra geschult werden muss. Positiv ist, dass diese Methode keine Beeinflussung durch Salze und Temperatur erfährt.

- Nuklearmagnetische Resonanz (NMR)

In den letzten 10 Jahren wurde das Potential der NMR-Methode zunehmend für die Baustoff-Feuchteanalyse entdeckt. Es wurde eine Aufsatzsonde, die NMR-MOUSE, an der RWTH Aachen entwickelt, die Feuchteuntersuchungen an einseitig begehbaren Konstruktionen erlauben. Die NMR-MOUSE hat eine hohe Tiefenauflösung, die Gesamtmesstiefe beträgt allerdings nur etwa 30 mm. Bei der NMR-Methode wird das magnetische Moment der Wasserstoffkerne ausgenutzt. In einem konstanten magnetischen Feld richten sich Wasserstoffkerne aus. Bringt man einen kurzen elektromagnetischen Puls definierter Frequenz auf, nehmen die Wasserstoffkerne Energie auf und geben sie anschließend wieder ab. Die Energieabnahme kann ermittelt werden und korreliert direkt mit der Anzahl der Wasserstoffatome. Kießl und Krus (1987) zeigten bereits, dass die Methode hochgenau ist und der Gesamtwassergehalt gemessen wird, auch der chemisch gebundene Anteil.

Der apparative und finanzielle Aufwand sind recht groß. Allerdings zeigt das Verfahren keine Beeinflussung durch Salze und es müssen im Gegensatz zur Neutronen-sonde auch keine Strahlenschutzbestimmungen eingehalten werden, allerdings verursachen ferromagnetische Stoffe Störsignale. Insgesamt handelt es sich noch eher um ein Laborverfahren in der Forschung für Baustoffuntersuchungen [2].

2.3 Thermische Verfahren

- IR-Reflektographie

Feuchte verringert das Remissionsvermögen einer Baustoffoberfläche, also deren Fähigkeit zur ungerichteten diffusen Reflexion elektromagnetischer Wellen. Dies ist bedingt durch die Absorptionsbande des Wassers im Wellenlängenbereich von 2-5 μm [19,20]. Für die flächige Erfassung oberflächennaher Feuchtebereiche werden Bauteile mit IR-Strahlern angestrahlt und das Absorptionsverhalten mit einer IR-Kamera aufgezeichnet (Abb. 5). Durch eine Frequenzmodulation der Anregungsstrahlung lassen sich Amplituden- und Phasenwerte für alle Bildpunkte der Kamera ermitteln und der Anteil an konstanter Störstrahlung eliminieren. Als Ergebnis erhält man ein digitales Wärmebild/Thermogramm.

Die mit den IR-Strahlern aufgebrauchte Strahlung wird mit zunehmender Oberflächenfeuchte weniger remittiert und stärker absorbiert. Feuchte Bereiche erscheinen daher mit geringeren Grauwerten als trockene [19]. Auf diese Art sind zumindest qualitative Feuchtebestimmung flächig möglich. Generell sind auch passive IR-

Thermographie Untersuchungen möglich, sie sind allerdings weniger kontrastreich, da sie nur unterschiedliche Wärmeleitfähigkeitsbereiche (feucht hoch, trocken niedrig) erfassen [20 und Zitat hierin].

2.4 Hygrometrische Verfahren

○ Ausgleichsfeuchtesonde

In porösen Baustoffen stellt sich bei einer bestimmten relativen Luftfeuchte der Umgebungsluft ein konstanter Wert des Wassergehalts ein. Diesen Wert bezeichnet man als Ausgleichsfeuchte oder als hygroskopische Feuchte. Den Zusammenhang zwischen relativer Luftfeuchte und sorbiertem Wasser beschreibt die Sorptionsisotherme. Sie ist für jeden Baustoff spezifisch und abhängig von der Porengrößenverteilung ist. Sofern die Sorptionsisotherme bekannt ist und sich ein Gleichgewicht in dem zu untersuchenden Medium eingestellt hat, kann sie zur Bestimmung des Wassergehalts herangezogen werden.

Das Verfahren ist zerstörungsarm, es erfordert ein Bohrloch mit geringem Durchmesser (1-2 cm, entsprechend dem Sensordurchmesser), das als Messkammer dient. Generell ist diese Methode nur bis zu einem Bereich von ca. 95%rH anwendbar, da im überhygroskopischen Bereich freies Wasser eingelagert wird und der exakte Wassergehalt nicht mehr zu bestimmen ist.

2.5 Sonstige Verfahren

Feuchte hat ebenfalls einen Einfluss auf die Geschwindigkeit von akustischen Wellen in Baustoffen [21]. Systematische Untersuchungen liegen hierzu allerdings nicht in größerem Umfang vor. Im Labor haben sich die Röntgen- und die 3D-Computertomographie als äußerst zuverlässige Detektionsverfahren, v.a. mit der Möglichkeit zur Bildgebung etabliert. In-situ sind diese Methoden natürlich auf größere Bauteile schwer übertragbar.

Zusammenfassende Betrachtungen

Es gibt eine Vielzahl an Feuchtemesstechniken, darunter direkte, die eine Materialentnahme erfordern und indirekte, die auf der Erfassung von Änderungen physikalischer Materialeigenschaften beruhen. Welche Methode zum Einsatz kommt muss letztlich immer von den örtlichen Gegebenheiten (Zugänglichkeit, Material, Probenentnahme möglich, etc.) und den geforderten Genauigkeiten und Tiefenauflösung abhängig gemacht werden, Tabelle 1 gibt eine Schnellübersicht.

Physik. Prinzip	Verfahren	Einflüsse	Messort
Elektrisch	Multi-Ring-Elektrode Wenner Sonde elektr. Tomographie	für alle: Salz, Temperatur, Güte des Elektrodenkontakts, Stahl	Punkt (Tiefensonde) Punkt an der Oberfläche Profil
Kapazitiv	Impuls-Radar Mikrowelle-Aufsatz Mikrowelle-Bohrloch	für alle: Temperatur, Stahl, Güte des Kontakts	Profil Punkt (→ Messfläche) Tiefenprofil (max. 2m)
Radiometrisch	Neutronenrückstreuung NMR	- ferromagn. Stoffe	Punkt (→ Messfläche) Profil (max. 3cm Tiefe)
Thermisch	IR Reflektographie Passive IR Thermographie	Fremdstrahlung	Oberfläche Oberfläche
Hygrometrisch	Ausgleichsfeuchte	Temperatur	Tiefensonde

Referenzen

- [1] Cziesielski, E., 2007, Betoninstandsetzung – quo vadis? Bautechnik 84 (4), 259-267.
- [2] Leschnik, W., 1999, Feuchtemessung an Baustoffen – Zwischen Klassik und Moderne, Feuchtetag 1999, DGZfP-Berichtsband BB 69-CD, Vortrag H2, Berlin.
- [3] DIN EN ISO 12570/A1, April 2012. Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten - Bestimmung des Feuchtegehaltes durch Trocknen bei erhöhter Temperatur - Änderung 1; Deutsche Fassung EN ISO, Beuth Verlag GmbH 2012, 6 S.
- [4] DIN 18560-4:2012-06: Estriche im Bauwesen - Teil 4: Estriche auf Trennschicht, Beuth Verlag GmbH 2012
- [5] Brokamp, T., 2013, Belegreife und Feuchte – Die KRL Methode zur Bestimmung der Feuchte in Estrichen, Technische Kommission Bauklebstoffe Bericht 2, Industrieverband Klebstoffe e. V., Düsseldorf.
- [6] Breit, W. und Raupach, M., 1993, Bestimmung der Feuchteverteilung in der Betonrandzone mit Multi-Ring-Elektroden, ibac Kurzbericht 41, Institut für Bauforschung Aachen.
- [7] Breit, W., 1994, Bauwerksüberwachung mit Hilfe von nachträglich installierten Feuchtesensoren (Multi-ring-Elektroden), ibac Kurzbericht 49, Institut für Bauforschung Aachen.
- [8] Sodeikat, Ch., 2010, Feuchtesensoren in der Bauwerksüberwachung – Praxisbeispiele, Fachtagung Bauwerksdiagnose, DGZfP-Berichtsband, Vortrag 09.
- [9] http://sensortec.de/images/pdf/Datenblatt_Multiringelektrode_de.pdf
- [10] Maierhofer, Ch., Leipold, S., Schraurich, D., Binda, L. und A. Saisi, 1998, Determination of the moisture distribution in the outside walls of S. Maria Rossa using radar, in: Proceedings of the 7th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR) in Lawrence, USA, 27.-30. May 1998, Lawrence: Radar Systems and Remote Sensing Laboratory, Vol. 2, 509-514.
- [11] Colla, C. und L. Binda, 1999, Bestimmung der Feuchteverteilung mit Radar Tomografie in: DGZfP (Hrsg.); Feuchtetag 99 - Umwelt-Meßverfahren-Anwendungen, 07.-08. Oktober 1999, BAM, Berlin-Lichterfelde, DGZfP-Berichtsband 69-CD, Poster 8
- [12] Kohl, Ch., Krause, M., Maierhofer, Ch. und H. Wiggenhauser, 2004, Datenfusion komplementärer Impuls-Echo verfahren zur zerstörungsfreien Untersuchung von Betonbauteilen, DACH-Jahrestagung, Salzburg. <http://www.ndt.net/article/dgzfp04/papers/p37/p37.htm>
- [13] Göller, A., 2007, Mikrowellenbasierte Rasterfeuchtemessung –Moderne Konzepte der Feuchtemessung in Bauwerken, Bautechnik, 84 Heft 6, 417-422.
- [14] <http://www.hf-sensor.de/download/moistr1.pdf>
- [15] Rudolph, M., D. Schaurich, und H. Wiggenhauser,. 1993, Feuchteprofilmessungen mit Mikrowellen im Mauerwerk. Berlin, Germany: Feuchtetag.
- [16] Plagge, R., 2013, TDR Measurement of Continuous Drying Out of Concrete Walls, Proceedings of the 10th International Conference on Electromagnetic Wave Interaction with Water and Moist Substances – ISEMA, Weimar, 25.-27. September, 373-379.
- [17] <http://www.sachverstaendigen-bedarf.de/GANN/Compact-Serie/Gann-Hydromette-Compact-B-2030.html>
- [18] <http://www.dns-denzel.de/feuchte-messgeraete.html>
- [19] Weise, F. und H. Wiggenhauser, 2004, Zerstörungsfreie Feuchtemessung an historischen Bauten, MONUDOCthema01, In: Mauerwerksdiagnostik in der Denkmalpflege, Hrsg. G. Patitz, Fraunhofer IRB Verlag.
- [20] Büscher, K.A. und W. Wild, 1999, Feuchtemessung mit infraoptischen Methoden, Feuchtetag 1999, DGZfP Berichtsband BB 69 CD, Vortrag M2.
- [21] Lencis, U., Udriş, A. und A. Korjakins, 2013, Moisture Effect on the Ultrasonic Pulse Velocity in Concrete Cured under Normal Conditions and at Elevated Temperature, Construction Science, 14, 71-78, doi: 10.2478/cons-2013-0011.
- [22] Weise, F., 2008, Feuchtemessung in Beton – eine Gegenüberstellung gängiger Verfahren, Messtechnik im Bauwesen, Ernst und Sohn Special 02/2008, S. 60-68.
- [23] WTA-Merkblatt 4-11-02/D: Messung der Feuchte von mineralischen Baustoffen, München: WTA-Publications 2003
- [24] Rieche, G., 2004, Neue Wege der Feuchtemessung und Beurteilung von Estrichen und Betonen, Beton- und Stahlbetonbau 99 (10), S. 794-797.
- [25] Sass, O. und Viles, H.A., 2010, Wetting and drying of masonry walls: 2D-resistivity monitoring of driving rain experiments on historic stonework in Oxford, UK, Journal of Applied Geosciences, 70 (1), 72-83.
- [26] Kruschwitz, S., Niederleithinger, E., Trela, Ch. und J. Wöstmann, 2012, Use of Complex Resistivity Tomography for Moisture Monitoring in a Flooded Masonry Specimen, J. Infrastruct. Syst. (18), SPECIAL ISSUE: Nondestructive Testing in Civil Engineering, 2–11.
- [27] Kruschwitz, S., Niederleithinger, E., Trela, Ch. und J. Wöstmann, 2009, Complex Resistivity and Radar Investigation of Building Material: First Results of Field Scale Measurements, Acta Geophysica, 58 (1), 96-113, doi: 10.2478/s11600-009-0019-4