

WTA Referat 4 Mauerwerk, WTA Arbeitsgruppe 4.11

Leiter: Günter Rieche

Sachstandsbericht zur Messung der Feuchte von mineralischen Baustoffen

Sachstandsbericht zur Messung der Feuchte von mineralischen Baustoffen

Herausgeber:
WTA Referat 4 Mauerwerk,
WTA Arbeitsgruppe 4.11

Leiter:
Günter Rieche,
Institut für Bautenschutz, Baustoffe und Bauphysik, Fellbach

Druck:

Satz- und Druckcenter des Fraunhofer-Informationszentrums Raum und Bau IRB, Stuttgart

Für den Druck des Buches wurde chlor- und säurefreies Papier verwendet.

Dieses Werk ist einschließlich aller seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die über die engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes hinausgeht, ist ohne schriftliche Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Speicherung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen und Handelsnamen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass solche Bezeichnungen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und deshalb von jedermann benutzt werden dürften.

Soweit in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z.B. DIN, VDI) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden ist, kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen.

© Fraunhofer IRB Verlag, 2004,
ISBN (Print): 3-8167-6353-7 (vergriffen)
ISBN (E-Book): 978-3-7388-0046-3
Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB
Postfach 800469, D-70504 Stuttgart
Nobelstraße 12, D-70569 Stuttgart
Telefon (0711) 970-2500
Telefax (0711) 970-2508
E-Mail irb@irb.fraunhofer.de
URL www.baufachinformation.de

Messung der Feuchte von mineralischen Baustoffen
- WTA-Sachstandsbericht (STATE OF THE ART REPORT) -
(vom 25. November 2002)

Erarbeitet durch: WTA-Referat 4 Mauerwerk
Arbeitsgruppe 4.11

Leiter der Arbeitsgruppe 4.11: Prof. Dr.-Ing. Günter Rieche

Mitglieder der Arbeitsgruppe 4.11
(Anlage 6): J. Brockmann
J. de Hesselle
H. Fitz
S. Keppeler
Dr. J. Legrum
G. Pleyers
Prof. Dr. Rieche
T. Ritzer
U. Schlemm
U. Schürger
Dr. H. Schuh
J. Weber
K. Zepf

Erarbeitungszeitraum: Oktober 1998 bis September 2001

Dieser Sachstandsbericht entstand im Rahmen der Erarbeitung des gleichbleibenden WTA-Merkblatts E-4-2-2002/D "Messung der Feuchte von mineralischen Baustoffen". Er gibt eine Übersicht und eine Bewertung der existierenden Messverfahren.

Inhaltsverzeichnis des Sachstandberichtes

1.	Vorbemerkungen.....	4
2.	Feuchtetechnische Kennwerte	5
2.1	Grundlagen	5
2.2	Wassergehalt u_m bzw. u_v	5
2.3	Wassergehalt infolge Sorption; Ausgleichsfeuchte; Hygroskopische Feuchte	7
2.4	Praktischer Wassergehalt.....	8
2.5	Kritischer Wassergehalt u_{KR}	8
2.6	Freiwilliger Wassergehalt u_f	9
2.7	Sättigungsfeuchte u_{max}	9
2.8	Durchfeuchtungsgrad.....	9
2.9	Feuchtezustand.....	10
3.	Verfahrensauswahl.....	11
4.	Praxiserprobte Verfahren	12
4.1	Darr-Methode	12
4.1.1	Baustoffspezifische Probenentnahme	12
4.1.2	Durchführung	13
4.2	CM-Methode	14
4.3	Folientest.....	16
4.4	Luftfeuchte-Ausgleichsverfahren	16
4.5	Augenscheinliches Abtrocknen feuchter Zonen.....	17
5.	Sonstige Verfahren.....	18
5.1	Vorbemerkungen	18
5.2	Neutronenrückstreuverfahren	19
5.3	Thermographie.....	21
5.3.1	Infrarotemissions-Verfahren	21
5.3.2	Infrarotreflexions-Verfahren.....	22
5.4	Widerstandsmessung	22

5.4.1	Gleichspannung	22
5.4.2	Wechselspannung	25
5.5	Dielektrische Verfahren.....	25
5.5.1	Grundlagen	25
5.5.2	Niederfrequente dielektrische Messverfahren	26
5.5.3	Hochfrequente Verfahren (Mikrowelle).....	27
5.5.4	TDR-Verfahren	29
5.6	Kernspinnresonanz / NMR-Verfahren	30
5.7	Hygrometrische Verfahren	30
5.8	Ultraschall	31
5.9	Sondenmethode (Lambda-Sonde).....	33
5.10	Impuls-Radar-Verfahren	34
5.11	Gamma-Strahlungs-Verfahren.....	35
5.12	Röntgenstrahlungs-Verfahren	37
6.	Ausblick	38
7.	Literatur	39
8.	Anlagen	46

Anlagen 1 bis 6

1. Vorbemerkungen

Der Sachstandsbericht "Messung der Feuchte von mineralischen Baustoffen" entstand im Rahmen der Erarbeitung des gleichlautenden WTA-Merkblatts. Er gibt eine Übersicht und eine Bewertung der existierenden Messverfahren. Der Inhalt des WTA-Merkblatts "Messung der Feuchte von mineralischen Baustoffen" ist ebenfalls Bestandteil dieses Sachstandsberichtes. Das Merkblatt besteht nämlich im Wesentlichen aus den Abschnitten 2.1 bis 2.8 sowie den Abschnitten 3 und 4.

Der Sachstandsbericht beschreibt in Abschnitt 2 die Definitionen der feuchtetechnischen Kennwerte der Baustoffe. In Abschnitt 3 werden Ausführungen zu der Art der in Frage kommenden Messverfahren bzw. -methoden gemacht. Der Abschnitt 4 behandelt die praxiserprobten Messverfahren bzw. Methoden, nämlich die Darr-Methode und die CM-Methode sowie den Folientest und das Luftfeuchte-Ausgleichsverfahren. Diese vier Verfahren sind auch Bestandteil des WTA-Merkblatts. Außerdem haben wir im Abschnitt 4 auch die augenscheinliche Prüfung des Abtrocknens feuchter Zonen als Verfahren aufgenommen. Im Abschnitt 5 werden alle anderen Verfahren behandelt, die nicht in das Merkblatt aufgenommen wurden.

Es ist das Ziel der Messung der Feuchte von Baustoffen, eine Grundlage für die Instandsetzungsplanung von Bauwerken zu schaffen. Dabei muss man sich bewusst sein, dass die an den Baustoffen ermittelten Werte für die Feuchte allein noch keine Beurteilung des Feuchtezustands der Konstruktion bzw. des Bauwerkes insgesamt erlauben. Für eine solche Beurteilung ist die Kenntnis mehrerer feuchtetechnischer Kennwerte der Baustoffe (Abschnitt 2) und der klimatischen Umgebungsbedingungen sowie der konstruktive Aufbau der Bauteile erforderlich.

2. Feuchtetechnische Kennwerte

2.1 Grundlagen

Mineralische Baustoffe weisen Poren mit unterschiedlichen Durchmessern bzw. unterschiedlichen Volumina auf, es handelt sich also um kapillarporöse Stoffe. Die Verteilung und der Anteil der unterschiedlichen Poren beeinflussen die Wassereinlagerung. Feinporöse Baustoffe nehmen kapillar mehr Feuchteanteile auf als grobporöse [2:1]. Für die Feuchteeinlagerung in porösen Stoffen sind unter praktischen Gesichtspunkten zwei Mechanismen maßgeblich, nämlich die Anlagerung von Wassermolekülen an den Porenwänden durch Oberflächenkräfte (Sorptionsfeuchte, hygroskopische Feuchte) und die Aufnahme von ungebundenem Kapillarwasser in benetzbaren Kapillarporen (überhygroskopischer Bereich der Feuchtespeicherung, Wasserspeicherung durch Kapillarität) [2:2].

Es ist zu beachten, dass mineralische Baustoffe sowohl physikalisch als auch chemisch gebundenes Wasser enthalten können. Darüber hinaus kann freies Wasser in den Baustoffporen eingelagert sein. Das chemisch gebundene Wasser ist Bestandteil der Struktur des Baustoffes, es darf nicht in den hier zu bestimmenden Wassergehalt eingerechnet werden (Abschnitt 2.2).

Die zu untersuchenden mineralischen Baustoffe enthalten oft wasserlösliche und somit bauschädliche Salze, die zu Schäden, z. B. Ausblühungen, Aussinterungen, Zerstörung des Baustoffgefüges, führen können. Die Salze führen zu einer Veränderung der Sorptionsisothermen (Abschnitt 2.3) und vielfach zu Verfälschungen der Messwerte bei einigen Feuchtemessverfahren. Um Fehlinterpretationen der Sorptionsisothermen und der Messwerte zu verhindern, ist die Kenntnis über die Art und den Anteil der bauschädlichen Salze in dem zu untersuchenden Baustoff unerlässlich.

2.2 Wassergehalt u_m bzw. u_v

Der Wassergehalt u_m bezeichnet das Verhältnis der in einem Stoff enthaltenen physikalisch gebundenen + freien Wassermasse zur Masse des trockenen Baustoffs [2:1]. Der Wassergehalt lässt sich mit einfachen Hilfsmitteln leicht in Masse% ermitteln und wird daher bevorzugt auch in Masse% angegeben. Der Wassergehalt u_m in Masse% kann mit folgender Gleichung bestimmt werden:

$$u_m = \frac{m_{\text{Baustoff, feucht}} - m_{\text{Baustoff, trocken}}}{m_{\text{Baustoff, trocken}}} \cdot 100 \% = \frac{m_{\text{Wasser}}}{m_{\text{Baustoff, trocken}}} \cdot 100 \%$$

Gleichung (1)

Hierbei bedeuten:

u_m	Wassergehalt in Masse%
$m_{\text{Baustoff, feucht}}$	Masse der entnommenen feuchten Baustoffprobe in kg, d. h. die Probe enthält physikalisch gebundenes + freies Wasser.
$m_{\text{Baustoff, trocken}}$	Masse der Baustoffprobe in kg nach dem Trocknen bis zur Massekonstanz, d. h. die Masse des Baustoffs ohne das ursprünglich enthaltene physikalisch gebundene + freie Wasser.
m_{Wasser}	Menge des in der Probe vorhandenen Wassers in kg, d. h. das physikalisch gebundene Wasser + das freie Wasser.

Der volumenbezogene Wassergehalt u_v (in Volumen%) und der massebezogene Wassergehalt u_m (in Masse%) stehen über folgende Formel in Beziehung:

$$u_v = u_m \cdot \frac{\rho_{\text{Baustoff}}}{\rho_{\text{Wasser}}} \quad \text{Gleichung (2)}$$

Hierbei bedeuten:

u_v	Wassergehalt in Volumen%. Der volumenbezogene Wassergehalt bezieht sich auch bei Baustoffen mit Lufthohlräumen, z. B. Lochziegel, immer auf den Baustoff allein ohne die Hohlräume.
u_m	Wassergehalt des Baustoffs in Masse%
ρ_{Baustoff}	Rohdichte des trockenen Baustoffs in kg/m^3
ρ_{Wasser}	Rohdichte des Wassers in kg/m^3 ; $\rho_{\text{Wasser}} = 1000 \text{ kg/m}^3$.

2.3 Wassergehalt infolge Sorption; Ausgleichsfeuchte; Hygroskopische Feuchte

Jeder mineralische Baustoff nimmt Feuchte aus der Luft auf und gibt sie auch wieder an die Luft ab. Diese Feuchteaufnahme und auch -abgabefähigkeit ist baustoffabhängig und lässt sich über die sog. "Sorptionsisothermen" beschreiben. In diesen Sorptionsisothermen ist der Wassergehalt des Baustoffs in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte der umgebenden Luft dargestellt. Dieser Zusammenhang ist bei mineralischen Baustoffen nahezu temperaturunabhängig. Innerhalb des Baustoffs stellt sich bei einer bestimmten relativen Luftfeuchte der Umgebungsluft ein bestimmter Wert des Wassergehalts (in Masse%) ein. Diesen Wert bezeichnet man auch als Ausgleichsfeuchte bzw. Gleichgewichtsfeuchte oder als hygroskopische Feuchte. Die Sorptionsisothermen poröser Baustoffe haben einen typischen Verlauf (Anlagen 1 und 2). - Bei der Wasseraufnahme (Sorption) und der Wasserabgabe (Desorption) des Baustoffes von bzw. an die Luft stellt sich ein Gleichgewicht ein, wenn die relative Luftfeuchte konstant ist. Sinkt die rel. Luftfeuchte ab, so gibt der Baustoff Wasser ab. Erhöht sich die relative Luftfeuchte der Umgebungsluft, so nimmt der Baustoff Wasser aus der umgebenden Luft auf, der Wassergehalt des Baustoffs steigt an. Ideale Voraussetzung zur Beurteilung eines Bauteils sind die vollständigen Sorptionsisothermen der zu untersuchenden Baustoffe. Hierzu ist es notwendig, die Ausgleichsfeuchte des Baustoffs von 0 % relativer Luftfeuchte bis nahe 100 % relativer Luftfeuchte zu bestimmen, was in der Praxis allerdings mit vergleichsweise hohem Aufwand verbunden ist. – Die Anlage 3 zeigt beispielhaft eine "erweiterte Sorptionsisotherme", d. h. diese Sorptionsisotherme umfasst nicht nur den Bereich von 0 % bis 100 % relativer Feuchte, sondern auch noch Bereiche der überhygroskopischen Feuchtigkeit (Einlagerung von freiem Wasser in die Baustoffporen) [2:3].

Durch Salzbelastung eines Baustoffs wird seine Sorptionsisotherme deutlich zu höheren Wassergehalten verändert.

Die Ausgleichsfeuchten kennzeichnet man durch Indizierung mit derjenigen relativen Luftfeuchte, mit der sie im Gleichgewicht stehen [2:2]. So entspricht z. B. die Ausgleichsfeuchte u_{50} dem Wassergehalt bei 50 % relativer Luftfeuchte.

In Anlage 4 sind Beispiele für die Ausgleichsfeuchten von mineralischen Baustoffen angegeben. Eine Vielzahl bekannter Sorptionsisothermen kann entsprechender Fachliteratur entnommen werden, z. B. [2:3; 2:4; 2:5; 2:6].

2.4 Praktischer Wassergehalt

Der "praktische" Wassergehalt eines Baustoffes ist derjenige Wassergehalt, der in der Praxis, d. h. in eingebauten Baustoffen, mit einer Wahrscheinlichkeit von 90 % nicht überschritten wird (DIN V 4108-4:1998-10). Für die Beurteilung des "praktischen Wassergehalts" wird im allgemeinen die Ausgleichsfeuchte bei einem Umgebungsklima von ca. 80 % bis ca. 85 % relativer Luftfeuchte herangezogen.

Zieht man zur Beurteilung die Definition der Ausgleichsfeuchte nach DIN 4108 heran, so kann der messtechnische Aufwand für die Ermittlung der Sorptionsisotherme des Baustoffs deutlich reduziert werden. In diesem Fall ist die Bestimmung von drei Ausgleichsfeuchten als ausreichend anzusehen, nämlich bei relativen Luftfeuchten von ca. 75 %, ca. 80 % und ca. 85 %. Die Ausgleichsfeuchten sollten dabei durch Trocknen von feuchten Proben bestimmt werden, also durch Desorption. In DIN 52620:1991-4 "Bestimmung des Bezugsfeuchtegehalts von Bau- und Dämmstoffen" wird ein Verfahren zur Bestimmung der Ausgleichsfeuchte bei 23 °C und 80 % relativer Luftfeuchte (bei Sorption) beschrieben. Als Sorbens wird dabei Ammoniumsulfat $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ verwendet. Für die Messung bei 75 % rel. Luftfeuchte eignet sich Natriumchlorid NaCl (Kochsalz), 85 % rel. Luftfeuchte können mit Kaliumchlorid KCl als Sorbens eingestellt werden. Alle drei Salze sind in ihrer Anwendung einfach zu handhaben, da sie leicht wasserlöslich sind, in wässrigen Lösungen annähernd neutral reagieren und nicht toxisch sind.

In DIN 4108 sind die Größenordnungen für die Werte des praktischen Wassergehalts einiger Baustoffe aufgeführt (Anlage 5). Da die Werte des praktischen Wassergehalts innerhalb einer Baustoffklasse stark von der Baustoffzusammensetzung abhängig sind, kann eine zutreffende Bewertung im Einzelfall nur durch Messung an dem vorliegenden Baustoff vorgenommen werden.

2.5 Kritischer Wassergehalt u_{KR}

Der kritische Wassergehalt u_{KR} stellt die untere Grenze für die Möglichkeit kapillaren Wassertransports dar [2:2]. Er stellt sich im kapillar durchfeuchteten Bereich eines ansonsten trockenen Baustoffes ein, welcher durch lokale

Zugabe einer begrenzten Wassermenge erzeugt wurde. - Dies ist ein theoretischer Wert, dessen Anwendung in der Praxis nicht üblich ist.

2.6 Freiwilliger Wassergehalt u_f

Der freiwillige Wassergehalt u_f bezeichnet diejenige Wassermenge, die ein Baustoff aufnimmt, wenn er einige Zeit der Einwirkung von drucklosem Wasser ausgesetzt ist [2:2]. Die Bestimmung von u_f erfolgt nach DIN 52103:1988 "Bestimmung von Wasseraufnahme und Sättigungswert". Dort ist der entsprechende Wert als W_a bezeichnet.

2.7 Sättigungsfeuchte u_{max}

Unter Druck oder durch langfristige Lagerung unter Wasser können sämtliche Poren eines Baustoffs mit Wasser gefüllt werden [2:2]. Der Baustoff hat dann die maximal mögliche Wassermenge aufgenommen und seine sog. Sättigungsfeuchte u_{max} erreicht. Die Sättigungsfeuchte u_{max} an sich ist in diesem Merkblatt von untergeordneter Bedeutung, da davon auszugehen ist, dass die zu untersuchenden Baustoffe bzw. Baukonstruktionen nicht allseitig von Wasser beansprucht werden. Die Sättigungsfeuchte stellt jedoch die Bezugsgröße für die Bestimmung des Durchfeuchtungsgrades dar und muss deshalb bestimmt werden. In DIN 52103:1988 ist die Sättigungsfeuchte mit W_d bezeichnet.

2.8 Durchfeuchtungsgrad

Der Durchfeuchtungsgrad bezeichnet in diesem Merkblatt das Verhältnis des massebezogenen Wassergehalts u_m zur Sättigungsfeuchte u_{max} des Baustoffs.

$$\text{Durchfeuchtungsgrad} = \frac{u_m}{u_{max}} \cdot 100 \% \quad \text{Gleichung (3)}$$

Der Durchfeuchtungsgrad gibt an, welcher Anteil in % des für Wasser zugänglichen Porenvolumens zum Zeitpunkt der Probenentnahme mit Wasser gefüllt war.

2.9 Feuchtezustand

Unter vielen Bedingungen in der Baupraxis sind die Werte für den Wassergehalt der Baustoffe kleiner als der freiwillige Wassergehalt u_f . Höhere Werte des Wassergehalts sind möglich bei

- langfristiger Wassereinwirkung
- Wassereinwirkung unter hydrostatischem Druck
- Wasserdampfdiffusion im Temperaturgefälle mit Tauwasserbildung.

Bezieht man nun den Wassergehalt des Baustoffs im Gegensatz zum Durchfeuchtungsgrad (Abschnitt 2.8) auf den freiwilligen Wassergehalt u_f , so nennt man diesen Quotienten "Feuchtezustand":

$$\text{Feuchtezustand} = \frac{u_m}{u_f} \cdot 100 \%, \quad \text{Gleichung (4)}$$

Aus diesem Quotienten können Rückschlüsse auf die Dauer oder die Art der Wassereinwirkung auf den Baustoff gezogen werden. Ergeben sich nämlich Werte des Feuchtezustands größer 100 %, so ist das ein Hinweis auf eine der o. g. Ursachen. Solche Hinweise sind bei der Schadensanalyse von maßgeblicher Bedeutung.

3. Verfahrensauswahl

Nach ihrer Aussage über die Baustofffeuchte sind die Messverfahren in direkte und indirekte Methoden zu unterscheiden. Direkte Methoden geben ohne weitere Eichmessungen die Baustoff-Feuchte (Wassergehalt u) quantitativ an. Die Darr-Methode und die CM-Methode (Abschnitte 4.1 und 4.2) stellen die einzigen direkten Methoden dar. Die in den Abschnitten 4.3 und 4.4 beschriebenen Methoden, nämlich der Folientest und das hygrometrische Verfahren, sind den indirekten Methoden zuzuordnen. Die o. g. vier Verfahren wurden in das WTA-Merkblatt aufgenommen, da sie entweder auf einfache Weise zu einer schnellen Einschätzung des Feuchtezustands des Baustoffs führen bzw. weil durch die Messung der relativen Feuchte im bzw. am Baustoff ein feuchtetechnischer Kennwert bestimmt wird und nicht eine physikalische Eigenschaft des Baustoffs (siehe unten). Aus den gleichen Gründen wurde auch die indirekte Methode durch Beobachtung des "augenscheinlichen Abtrocknens feuchter Zonen" dem Abschnitt 4 zugeordnet (Abschnitt 4.5).

Alle sonstigen Verfahren ergeben zunächst keinen quantitativen Wert für die Feuchte. Bei fachgerechter Handhabung sowie messtechnischer und baulicher Erfahrung können aufgrund der Ergebnisse aber qualitative Aussagen zum Wassergehalt der Konstruktion gemacht werden. Die sonstigen Verfahren werden im Abschnitt 5 dieses Sachstandsbericht behandelt.

Die sonstigen Verfahren bestimmen zunächst physikalische Eigenschaften der Baustoffe bzw. der Konstruktion, die mit der Feuchte in Zusammenhang stehen. Um einen Wert für die Baustoff-Feuchte zu erhalten, bedarf es einer baustoffspezifischen Kalibrierung (Probenentnahme erforderlich). Sofern diese Kalibrierung nicht vorliegt, können nur qualitative Aussagen gemacht werden. - Viele der sonstigen Verfahren erlauben eine zerstörungsfreie, halbquantitative Ermittlung von Feuchteunterschieden, so dass flächige Kartierungen möglich sind. Weil die sonstigen Verfahren zerstörungsfrei vorgenommen werden, eignen sie sich besonders für die Ermittlung des Wassergehalts u als Funktion der Zeit. Auf diese Weise ist eine gezielte Probenentnahme für die Darr-Methode möglich, wodurch die Probenanzahl und damit der Zerstörungsgrad deutlich reduziert werden können. Diese Verfahren eignen sich daher auch besonders für die Leckortung und die Ermittlung der Ursachen von Feuchteschäden.

4. Praxiserprobte Verfahren

4.1 Darr-Methode

4.1.1 Baustoffspezifische Probenentnahme

Nach der Entnahme müssen unterschiedliche Baustoffe getrennt, gesondert verpackt und untersucht werden. Durch die Entnahme und den Transport der Proben zur Waage darf der Wassergehalt der Proben nicht verändert werden. Die Baustoffproben müssen direkt nach der Entnahme wasserdampfdicht verpackt werden, um einen Feuchteausgleich mit der Umgebung vor der Wägung zu verhindern. Die Verpackung muss so erfolgen, dass möglichst wenig Luft eingeschlossen wird, weil der Wassergehalt der eingeschlossenen Luft das Ergebnis beeinflussen kann. Eine Alternative ist die Wägung vor Ort.

Es bestehen die folgenden Möglichkeiten/Werkzeuge für die Probenentnahme:

Hammer und Meißel

Die geringste Veränderung des Wassergehalts ist bei der Probenentnahme mittels Hammer und Meißel zu erreichen. Die Probenmenge muss mindestens 50 g betragen. Die Probe muss alle maßgeblichen Bestandteile des Baustoffs enthalten.

Winkelschneider

Mit Winkelschneidern können Proben aus plattigen Baustoffen (z. B. Putz oder Estrich) herausgeschnitten werden. Um den Wassergehalt der Proben möglichst wenig durch die Reibungswärme zu verändern, sollte die Probengröße mindestens 0,1 m x 0,1 m betragen.

Bohrkern

Mit Hartmetall bestückte Bohrkronen werden üblicherweise in einer Schlagbohrmaschine verwendet, für Diamant besetzte Bohrkronen benötigt man eine schneller drehende Bohrmaschine ohne Schlag. Der durch höhere Reibungswärme der schnell laufenden Diamantbohrkronen resultierende Wasserverlust gegenüber den Hartmetallbohrern wird durch die geringere Bohrzeit kompensiert. Für beide Bohrweisen gilt ein Mindestdurchmesser der Bohrkern von 50 mm, da bei geringeren Durchmessern die Wassergehaltsänderung unverträglich hoch wird. Die geringste Veränderung des Wassergehalts bei der Probenentnahme erhält man durch die

gleichzeitige Verwendung von Pressluft (Kompressor mit geringer Leistung) und einer Absaugung (Staubsauger) zur Kühlung und zum Abtransport des entstandenen Bohrmehls. Um die Veränderung des Wassergehalts der Proben klein zu halten, empfiehlt es sich, Bohrproben abschnittsweise zu entnehmen (Länge ca. 2- bis 3-facher Bohrkern Durchmesser). Diese Art der Probenentnahme eignet sich besonders zur Ermittlung von Feuchteprofilen in Bauteilen. Mit zunehmender Festigkeit des Baustoffs, insbesondere bei Bewehrungen in einem Beton, wird durch die zunehmende Bohrzeit der Wasserverlust immer größer, so dass die Methode an ihre Grenzen stößt.

Bohrmehl

Bohrmehlproben werden mit einem Spiralbohrer von mindestens 20 mm Durchmesser abschnittsweise entnommen. Durch diese Probenentnahme wird der Wassergehalt relativ stark verändert, deshalb lassen sich auf diese Weise nur qualitative Ergebnisse ermitteln. Das Ergebnis wird zusätzlich durch die Vermischung des Bohrmehls aus unterschiedlichen Bohrtiefen verfälscht.

4.1.2 Durchführung

Mit der Darr-Methode wird der Absolutwert des Wassergehaltes von Baustoffen bestimmt. Deshalb werden daran alle anderen Feuchtemessverfahren kalibriert [4.1:1].

Mit der Darr-Methode wird der massebezogene Wassergehalt u_m ermittelt. Hierzu wird die feuchte Probe gewogen, getrocknet und dann nach Abkühlung der Probe bei 0 % relativer Luftfeuchte, z. B. im Exsikkator, erneut gewogen. Mit Gleichung (1) kann dann der Wassergehalt bestimmt werden.

Üblicherweise wird zur Trocknung von Baustoffen ein Wärmeschrank mit einer Temperatur von 105 °C, etwas oberhalb der Siedetemperatur von Wasser, verwendet. Es muß sichergestellt werden, dass hierbei das gesamte freie und physikalisch gebundene Wasser freigesetzt wird. Dies wird durch Trocknung bis zur Massekonstanz erreicht. Die Konstanz der Masse gilt als erreicht, wenn die Massendifferenz zwischen zwei Wägungen, die mindestens 24 Stunden auseinander liegen, kleiner als 0,1 % der zuletzt festgestellten Masse ist.

Bei einer Temperatur von 105 °C kann unter Umständen jedoch ein Teil des chemisch gebundenen Wassers ausgetrieben werden und zu Fehlern führen.

Zur Bestimmung der Feuchte von Gips bzw. calciumsulfathaltigen Baustoffen wählt man als Trocknungstemperatur deshalb 40 °C.

Die Anzahl der Proben, die Trocknungsdauer und auch die Reproduzierbarkeit der Messungen sind in werkstoffspezifischen Normen festgelegt, z. B. DIN EN ISO 12570:1996-8 "Bestimmung des Feuchtegehalts durch Trocknen bei erhöhter Temperatur".

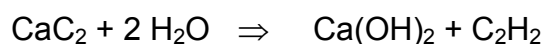
Die Beendigung der Trocknung entspricht dem Erreichen des Gleichgewichts zwischen dem Wasserdampfpartialdruck der Luft in den Baustoffporen und demjenigen in dem Trockenraum. Die Luftfeuchte im Trockenraum muss durch Konvektion mit trockener Luft niedrig gehalten werden, da sonst eine erhebliche Restfeuchte im zu untersuchenden Werkstoff verbleibt und somit ein Messfehler entsteht. Besonders eine Trocknung bei niedrigen Temperaturen setzt eine definierte Trocknung der verwendeten Luft voraus. Zudem steigt die Trocknungszeit stark an.

Neben der Verwendung von Trockenschränken wird die Mikrowellen- und die Infrarottrocknung angewendet. Der Vorteil dieser Verfahren ist eine schnellere Messwertbestimmung, sie sind jedoch nicht für alle Werkstoffe anwendbar. Es können bei Verwendung dieser Methoden lokale Erwärmungen des Werkstoffs über 105 °C auftreten. Eine Trocknungsmethode ohne Probenerwärmung besteht in der Vakuumtrocknung [4.1:2]. Eine weitere Methode ist die Gefriertrocknung, die unterhalb 0 °C erfolgt. Hier finden keine Umverteilungsprozesse neben der Feuchteumverteilung statt; die Probe kann anschließend z. B. auf ihre Salzverteilung hin untersucht werden.

Die Darr-Methode setzt eine zerstörende Probennahme voraus. Wiederholungsmessungen sind an ein und derselben Stelle des Bauteils deshalb nicht möglich.

4.2 CM-Methode

Die Bestimmung der Feuchte von Baustoffen nach der CM-Methode beruht auf der Reaktion von Calciumcarbid (CaC₂) mit Wasser [4.2:1].



Dabei entstehen Calciumhydroxid (Ca(OH)₂) und das Gas Acetylen (C₂H₂). Die Menge des gasförmigen Reaktionsproduktes Acetylen ist proportional zur umgesetzten Menge an Wasser. Zur Feuchtebestimmung werden entnommene Baustoffproben zerkleinert, gewogen und dann zusammen mit

einer definierten Menge Calciumcarbid in einer Glasampulle und einer festgelegten Anzahl von Stahlkugeln in eine Druckflasche eingefüllt. Nachdem die Druckflasche verschlossen wurde, wird sie geschüttelt, wobei die Stahlkugeln die Glasampulle zerstören. Durch die Acetylenbildung entsteht in dem Behälter ein Überdruck. Dieser wird an einem Manometer an der Druckflasche abgelesen. Aus der Einwaage und dem Überdruck wird gerätespezifisch mit Hilfe von Umrechnungstabellen der Wassergehalt der Einwaage in Masse% ermittelt. Diese Umrechnungstabellen berücksichtigen den Einfluss des Größtkorns der Probe und den Einfluss des Ablesezeitpunktes [4.2:2].

Eine wesentliche Fehlerquelle resultiert aus der Temperaturabhängigkeit des Druckes in dem Behälter, denn die bei der chemischen Reaktion freiwerdende Wärme erhöht die Temperatur des entstehenden Gases und damit seinen Druck. Das ist einer der Gründe dafür, dass das Ergebnis erst nach der vom Hersteller angegebenen Zeit abgelesen werden darf. Außerdem führt eine zu starke Abweichung der Temperatur der Druckflasche von der Umgebungsluft zu Messfehlern. Eine weitere Beeinflussung des Messergebnisses wird durch die Änderung des Wassergehaltes verursacht, die bei der Gewinnung und Zerkleinerung der Probe eintritt. Der Grad der Zerkleinerung beeinflusst ebenfalls das Ergebnis, weil bei zu grobem Prüfgut nicht der gesamte Wassergehalt erfasst wird. Zudem hängt das Ergebnis von der Genauigkeit der Einwaage ab und der ordnungsgemäßen Funktion der Gerätebestandteile (Manometer, Dichtigkeit der Druckflasche und der Dichtungen, Dichtigkeit der Glasampulle) [4.2:2].

Die CM-Methode ermöglicht die Ermittlung der Menge an freiem Wasser in einer Probe. Bei calciumsulfatgebundenen Baustoffen muss beachtet werden, dass auch teilweise das chemisch gebundene Wasser (Kristallwasser) mit dem Calciumcarbid reagieren kann.

Vorteil des Verfahrens ist die Tatsache, dass man vor Ort innerhalb einer relativ kurzen Zeit ein Ergebnis erhält. Nachteilig ist - wie bei allen Verfahren, bei denen man auf die Entnahme von Proben angewiesen ist - dass eine Wiederholungsmessung an der gleichen Stelle eines Bauteils nicht möglich ist.

Die mit der CM-Methode ermittelten Wassergehalte sind niedriger im Vergleich zu den mit der Darr-Methode ermittelten Wassergehalten (Ausnahme calciumsulfathaltige Baustoffe) [4.2:3].

4.3 Folientest

Der Folientest führt nur zu einer qualitativen Einschätzung des Feuchtezustands des Bauteils [4.3]. Auf das Bauteil wird eine mindestens 1 m x 1 m große, wasserdampfdichte, transparente Kunststoff-Folie (s_d größer 10 m) dicht aufgelegt. Diese Maßnahme ist mindestens 24 Stunden aufrecht zu erhalten. Das Bauteil ist als feucht zu bewerten, wenn sich nach der Dauer von 24 Stunden Tauwasser an der Unterseite der Folie zeigt. Zur Bewertung der Situation sind die Bauteiltemperaturen sowie für die umgebende Luft die Temperatur und die Luftfeuchte zu messen und zu dokumentieren.

4.4 Luftfeuchte-Ausgleichsverfahren

Mit Hilfe des Luftfeuchte-Ausgleichsverfahrens bestimmt man die rel. Luftfeuchte ϕ , die sich in einem geschlossenen Hohlraum in einem Baustoff einstellt [4.4:1 bis 4.4:4].

Dieses Verfahren setzt voraus, dass sich die Luftfeuchte in der Messkammer und die Baustofffeuchte im Gleichgewicht befinden. Auf diese Weise kann festgestellt werden, ob die Baustofffeuchte mit der Feuchte der umgebenden Luft im Gleichgewicht steht, d. h. ob der Baustoff trocken ist, oder ob der Baustoff feucht ist.

Für die Messung gibt es zwei Möglichkeiten:

Bei der ersten Möglichkeit stellt der zu prüfende Baustoff selbst eine der Wandungen der Messkammer dar. Die Messkammer ist dicht an den Baustoff anzuschließen. In dieser Messkammer wird der Messfühler angeordnet. Außerdem ist für eine Luftzirkulation in der Messkammer zu sorgen. Diese Möglichkeit ist für den Baustoff zerstörungsfrei.

Der Messfühler kann auch direkt in einem Baustoff angeordnet werden (zweite Möglichkeit). Dazu wird ein Bohrloch in den Baustoff eingebracht, welches die Messkammer darstellt. Darin wird der Messfühler installiert. Das Bohrloch ist nach außen dicht zu schließen. Dieses Verfahren erlaubt es auch Feuchteprofile zu messen, wenn man das Bohrloch abschnittsweise abdichtet. Diese Möglichkeit eignet sich auch für Messungen über einen längeren Zeitraum, z. B. in einer Wand. - Die Anordnung des Messfühlers im Bohrloch eignet sich besonders zur Messung von Änderungen der Feuchte, z. B. in Wänden. In einem solchen Fall ist die Messung nahezu baustoffunabhängig, Inhomogenitäten im Bauteil und lokale Feuchtedifferenzen beeinflussen das Messergebnis nicht nennenswert.

Als Messfühler werden bevorzugt kapazitive Polymer- bzw. Oxid-Fühler oder resistente keramische Fühler verwendet.

Fehlinterpretationen für die Baustofffeuchte sind möglich bei einer Versalzung des Baustoffs und/oder bei zu großer Temperaturdifferenz zwischen dem Baustoff und der umgebenden Luft.

4.5 Augenscheinliches Abtrocknen feuchter Zonen

Diese Prüfung führt nur zu einer qualitativen Einschätzung des Feuchtezustands des Bauteils [4.5]. Bei dieser Prüfung wird die Bauteiloberfläche oder eine ca. 2 cm tiefe frisch hergestellte Bruchfläche erwärmt, z. B. mit einem Fön. Feuchte Bauteile werden dabei deutlich heller.

5. Sonstige Verfahren

5.1 Vorbemerkungen

Die nachfolgend beschriebenen sonstigen Verfahren bestimmen zunächst physikalische Eigenschaften der Baustoffe bzw. der Konstruktion, die mit der Feuchte in Zusammenhang stehen. Um einen Wert für die Baustoff-Feuchte zu erhalten, bedarf es einer stoffspezifischen Kalibrierung (Probenentnahme erforderlich). Sofern diese Kalibrierung nicht vorliegt, können nur qualitative Aussagen gemacht werden. - Viele der sonstigen Verfahren erlauben eine zerstörungsfreie, halbquantitative Ermittlung von Feuchteunterschieden, so dass flächige Kartierungen möglich sind. Weil die sonstigen Verfahren zerstörungsfrei vorgenommen werden, eignen sie sich besonders für die Ermittlung des Wassergehalts u als Funktion der Zeit. Auf diese Weise ist eine gezielte Probenentnahme für die Darr-Methode möglich, wodurch die Probenanzahl und damit der Zerstörungsgrad deutlich reduziert werden können. Diese Verfahren eignen sich daher auch besonders für die Leckortung und die Ermittlung der Ursachen von Feuchteschäden.

Die zerstörungsfreien Prüfverfahren sind dafür bestimmt, an Bauwerken und Bauteilen und nicht nur an einem homogenen Baustoff eingesetzt zu werden. Alle diese Verfahren messen einen Wert innerhalb eines bestimmten Volumens $V = A \cdot d$ der Konstruktion, nämlich innerhalb einer Fläche A und innerhalb einer Tiefe (Dicke) d . Dieses Volumen besteht im allgemeinen nicht nur aus einem Baustoff, sondern aus unterschiedlichen nebeneinander liegenden Baustoffschichten (z. B. Mauerstein + Mauermörtel oder verschiedene Wandbildner) und aus unterschiedlichen hintereinander liegenden Schichten (z. B. Innenputz + Mauerwerk + Außenputz, möglicherweise aus mehrschaligen Wänden oder Böden). Deshalb stellt das Messergebnis der zerstörungsfreien Prüfung zwar ein gewisses Maß für den Wassergehalt der Konstruktion dar, jedoch kann eine Aussage für eine bestimmte Baustoffart nur dann getroffen werden, wenn eine entsprechende Eichung erfolgte (Probenentnahme erforderlich). Diese müsste dann für alle einzelnen Baustoffe getrennt erfolgen, will man deren Wassergehalt u bestimmen. Diese Eichung ist aufwendig und erfordert ein hohes Maß an messtechnischer Erfahrung hinsichtlich des verwendeten Messverfahrens und baulicher Erfahrung hinsichtlich der zu untersuchenden Konstruktion. Als weitere Schwierigkeit kommt hinzu, dass an der überwiegenden Zahl der Messorte der tatsächliche konstruktive Aufbau nicht bekannt ist, weil es sich hier ja um eine zerstörungsfreie Untersuchung handelt. Deshalb kann eine

fachgerechte Messung und Beurteilung einer Baukonstruktion hinsichtlich ihres Wassergehalts und hinsichtlich der Ursachen von Durchfeuchtungen und deren Beseitigung nur durch einen Sachverständigen erfolgen.

5.2 Neutronenrückstreuverfahren

Bei dem Neutronenrückstreuverfahren zur Feuchtebestimmung von Baustoffen werden schnelle Neutronen, also Neutronen mit hoher kinetischer Energie, in den Baustoff eingestrahlt [5.2:1; 5.2:2; 5.2:3]. Diese Neutronen treten mit den Atomen des Baustoffs in Wechselwirkung. Dabei kommt es zu Streuungen, Diffusion und vor allem zu einer Abbremsung der schnellen Neutronen. Wasserstoffkerne bremsen die schnellen Neutronen am wirksamsten.

Neutronen werden nur durch Stoßvorgänge an anderen Atomen abgebremst. Die Stöße an den Atomkernen des durchstrahlten Stoffes verringern die Energie der schnellen Neutronen, wobei die Energieabgabe an den Stoßpartner umso größer ist, je ähnlicher dessen Masse der Neutronenmasse ist. Wasserstoffatome besitzen die kleinste Masse aller Atomkerne des periodischen Systems. Damit ist auch der Energieverlust, den ein Neutron beim Stoß mit einem Wasserstoffatom erfährt am größten. Die Qualität der Stöße von Wasserstoffkernen, sogenannte Protonen, mit den Neutronen ist für die Stärke des Energieabbaus von besonderer Bedeutung. Bei zentrischen Stößen überträgt das Neutron nahezu seine gesamte Energie auf den Wasserstoffkern. Hierbei genügen bereits 18 Stöße für ein schnelles Neutron an Protonen, um seine Energie auf thermische Energie abzumindern. Man spricht dann von sogenannten thermischen Neutronen. Im Vergleich hierzu benötigt man bei Kohlenstoff, um die gleiche Energieminderung zu erreichen, 114 Stöße und bei Uran sogar 2300 Stöße. Wenn also ein feuchter Stoff mit schnellen Neutronen bestrahlt wird, so lässt die Intensität der sich ergebenden langsamen Neutronenstrahlung Rückschlüsse auf die Menge der vorhandenen Wasserstoffatome und damit auf die Feuchte des Bauteils zu.

Gemessen wird der Wasserstoffanteil der im Messvolumen befindlichen Bauteile. Dies hat zur Folge, dass bei dem Neutronenrückstreuverfahren neben dem freien und physikalisch gebundenen Wasser auch das chemisch gebundene Wasser mitgemessen wird. Bei Kalibrierungen des Messgerätes ist daher der Grundpegel, der aus dem Wasserstoffanteil des trockenen Baustoffs resultiert, jeweils zu berücksichtigen.

Ein Einfluss der Baustofftemperatur auf das Messsignal besteht nicht.

Ein Einfluss von Salzen auf das Messsignal besteht ebenfalls nicht.

Bei dem Neutronenrückstreuverfahren breitet sich das Messvolumen halbkugelförmig unter dem Messgerät mit einem Radius von ca. 30 cm aus. Die Feuchte des Bauteils wird integral über die gesamte Halbkugel erfasst, innere Bereiche liefern jedoch einen größeren Beitrag als äußere Bereiche. Das Messvolumen nimmt mit zunehmendem Wassergehalt des Bauteils ab.

Der Zerfall radioaktiver Stoffe, der für die Erzeugung der benutzten Strahlung erforderlich ist, geht nicht kontinuierlich vonstatten. Für die Neutronenfeuchtemessung bedarf es daher einer Mehrfachmessung und Mittelwertbildung.

Die Anwendung und der Transport des Messgerätes (Neutronensonde) unterliegen mehreren behördlichen Auflagen. So sind z. B. eine behördliche Umgangs- und Transportgenehmigung erforderlich. Der Transport einer Neutronensonde unterliegt außerdem der Gefahrgutverordnung.

Die Anwendung der Neutronensonde für die Feuchtemessung im Bauwesen bedarf nicht zuletzt auch aus Gründen behördlicher Auflagen speziell geschulter Fachkräfte. Die Kenntnis der baulichen Zusammenhänge und deren jeweiliger Einfluss auf das Messsignal entscheiden über eine erfolgreiche Anwendung des Messverfahrens.

Der größte Vorteil des Messverfahrens ist die große Eindringtiefe bzw. das große Messvolumen. Die Feuchte der Bauteile wird in der Regel über den gesamten Querschnitt respektiv zumindest über einen maßgeblichen Querschnittsteil des Bauteils bestimmt. Damit lassen sich tatsächliche Aussagen über die Feuchte eines Bauteils treffen. Die Feuchte an der Oberfläche spielt demzufolge bei dem Messverfahren nur eine untergeordnete Rolle. Dies ist als durchaus positiv zu bewerten, da die Oberflächenfeuchte eines Bauteils die gesamte Feuchte des zu messenden Bauteils bzw. der zu messenden Konstruktion nur ungenügend wiedergibt (man denke hier z. B. an Tauwasserbildung).

Unter Berücksichtigung statistischer Verfahren lassen sich mit der Neutronensonde sehr gut Langzeitbeobachtungen durchführen. So können Abtrocknungsprozesse oder Befeuchtungsprozesse mit der Neutronensonde sehr gut nachvollzogen werden.

Ein weiterer gewichtiger Vorteil dieses Messverfahrens ist die Tatsache, dass das Messsignal einer Neutronensonde nicht von der elektrischen Leitfähigkeit des Baustoffs abhängig ist. So beeinflussen im Mauerwerk eingelagerte Salze, unter der Oberfläche liegende Bewehrungsstähle oder andere elektrisch leitende Baustoffe das Messsignal nicht.

Eine Kalibrierung des Messverfahrens mit der Darr-Methode ist unter Berücksichtigung der Eigenschaften der Neutronensonde möglich.

5.3 Thermographie

5.3.1 Infrarotemissions-Verfahren

Bei diesem Verfahren wird die von jedem Körper ausgehende Infrarotstrahlung (Wärmestrahlung) erfasst. Es handelt sich hierbei um ein bildgebendes Verfahren, das mit einem Video-Aufnahmesystem zu vergleichen ist [4.2:1]. Auf dem sogenannten Wärmebild (Thermogramm) ergeben sich Flächen unterschiedlicher Schwärzung bzw. Färbung, entsprechend den unterschiedlichen Oberflächentemperaturen des Baustoffes. Diese Oberflächentemperaturen können unter gewissen Umständen als Indikator für die Baustofffeuchte genutzt werden.

Trockene Baustoffe weisen andere Oberflächentemperaturen auf als feuchte Baustoffe. Dies beruht auf zwei physikalischen Effekten. Durch Verdunstung von Wasser wird dem Baustoff Energie entzogen, was zur Absenkung der Oberflächentemperatur führt (Verdunstungskälte). Zum anderen bewirkt die erhöhte Wärmeleitfähigkeit eines durchfeuchteten Baustoffs einen schnelleren Energieabfluss bei Bauteilen, die sich im Temperaturgefälle befinden.

Da dieses Verfahren auf der Bestimmung von Temperaturunterschieden basiert, sind außer der Feuchtigkeit alle anderen Ursachen, die einen Einfluss auf die Oberflächentemperatur des Baustoffes haben, als Störgrößen anzusehen. Unterschiede in der Oberflächentemperatur können durch Inhomogenitäten des Baustoffs sowie durch geometrische oder konstruktive Wärmebrücken sowie durch Nebeneffekte wie Verschattungen, Erwärmung durch Sonnenbestrahlung oder sonstige Wärmequellen entstehen. Das Verfahren ist sehr anfällig gegenüber Umgebungseinflüssen wie Staub oder einem Tauwasserfilm an der Baustoffoberfläche.

Das Verfahren gibt keine quantitativen Ergebnisse für die Baustofffeuchte. Deshalb muss man erforderlichenfalls nach einer thermographischen Aufnahme des Objektes die Messstellen für quantitative Feuchtemessverfahren festlegen.

Geeignet ist dieses Verfahren, um schnell einen qualitativen Überblick über große Flächen zu erhalten, an denen dann genauere Untersuchungen durchgeführt werden können. Vorteilhaft ist dabei insbesondere, dass die

Untersuchung berührungslos und aus der Entfernung erfolgen kann, d. h., die zu untersuchende Fläche muss nicht direkt zugänglich gemacht werden.

5.3.2 Infrarotreflexions-Verfahren

Bei diesem Verfahren wird nicht nur die vorhandene Wärmestrahlung registriert, sondern zusätzlich Strahlung vorgewählter Wellenlänge (Infrarot-Licht) auf die Messfläche gerichtet. Diese wird von der Oberfläche diffus reflektiert und von der Kamera ebenfalls zusammen mit der dem Objekt eigenen Wärmestrahlung registriert. Das Besondere dieses Vorgehens liegt darin, dass die Wellenlänge der Zusatzstrahlung bei $3\ \mu\text{m}$ liegt, also so gewählt ist, dass sie einer wichtigen Absorptionsbande des Wassers entspricht. Strahlung dieser Wellenlänge wird von Wasser besonders stark absorbiert und dementsprechend weniger stark reflektiert. Je höher die Oberflächenfeuchte ist, desto geringer ist die Reflektion und desto deutlicher treten Unterschiede gegenüber trockenen Stellen im Infrarotbild zutage. Wird außerdem eine IR-Kamera eingesetzt, die mit zwei Detektoren arbeitet, welche in unterschiedlichen Wellenlängenbereichen empfindlich sind, so lassen sich bei der Auswertung der Thermogramme mittels Computer aussagefähige Bilder erzeugen, die ausschließlich die Verteilung der Oberflächenfeuchte und nicht wie sonst noch die dem Objekt eigene Wärmestrahlung zeigen. Quantitative Feuchteangaben sind allerdings auch mit dieser Methode nicht möglich [4.2:1].

Ansonsten gelten die gleichen Voraussetzungen und Einschränkungen wie bei der Infrarotemission.

5.4 Widerstandsmessung

5.4.1 Gleichspannung

Grundlage der elektrischen Feuchtemessung ist die Abhängigkeit der elektrischen Eigenschaften der Baustoffe von ihrer Feuchte. Wasser kann bei vielen Stoffen, die im trockenen Zustand Nichtleiter sind, die spezifische elektrische Leitfähigkeit in einem sehr weiten Bereich verändern [2:1]. Stoffe, die im trockenen Zustand Nichtleiter mit spezifischen Widerständen im Bereich von 10^{10} bis $10^{15}\ \Omega\text{cm}$ darstellen, werden durch Befeuchtung leitfähig. Auch der Charakter der Leitfähigkeit ändert sich mit der Feuchte. Die Leitfähigkeit feuchter Baustoffe ist die Summe aus Ionenleitfähigkeit (gelöste Stoffe, z.B. Salze) und Elektronenleitfähigkeit. Bereits reines Wasser hat eine merkliche elektrische Leitfähigkeit ($10^6\ \Omega\text{cm}$ bei 20°C), wichtiger ist aber seine stark dissoziierende Wirkung auf den Feststoff.

Zur Messung der elektrischen Leitfähigkeit werden Elektroden in den Baustoff eingeführt. Soll die Untersuchung zerstörungsfrei sein, werden Oberflächenelektroden verwendet.

Die Widerstandsmessung, auch Leitfähigkeitsmessung genannt, ist mit relativ geringem Aufwand realisierbar. Es sind handliche Geräte mit einem sehr großen Messbereich von $10^2 - 10^{12} \Omega$ kommerziell verfügbar. Die meisten Geräte arbeiten infolge des hohen Widerstandes trockener Baustoffe mit Gleichstrom. In komfortablen Geräten sind eine große Zahl von nichtlinearen Kalibrierkurven gespeichert, da der Zusammenhang zwischen Feuchte und elektrischer Leitfähigkeit für jeden Baustoff verschieden ist. Die Temperatur wird von Sensoren erfasst, die in den Elektroden integriert sind. Um derartige Geräte auch wechselnden Baustoffen oder neuen Baustoffen anzupassen, sollte die Möglichkeit bestehen, selbst ermittelte Kalibrierkurven einzugeben [2:1].

Leitfähigkeitsmessgeräte für Feuchtemessungen in Baustoffen müssen vor ihrem Einsatz kalibriert und auf ihre Reproduzierbarkeit überprüft werden. Die Anwendung einer vom Gerätehersteller mitgelieferten Kalibrierung ist demnach vom Baustoff, den Einsatzbedingungen und den Anforderungen an die Genauigkeit abhängig [2:1].

Mit steigender Temperatur wird die Ionenbeweglichkeit im Elektrolyt und damit auch die spezifische Leitfähigkeit durch einen Temperaturkoeffizienten zwischen 2 %/K und 5 %/K beeinflusst. D.h., bei einem Temperaturunterschied von 10 K liegen die Abweichungen der Leitfähigkeit zwischen 20 % und 50 % [5.4:1]. Der Einfluss der Temperatur kann bei den Messgeräten auf zwei Arten ausgeschaltet werden. Entweder durch einen temperaturabhängigen Kompensationswiderstand oder durch eine interne Temperaturumrechnung im Messgerät mit zuvoriger Feststellung der Temperaturkompensationskonstanten [5.4:2].

Die Leitfähigkeit feuchter Baustoffe wird vor allem durch den Gehalt an gelösten Salzen bestimmt. Dieser Einfluss verschiedener Ionenkonzentrationen im Wasser muss bei der Messung durch entsprechende Kalibrierkurven berücksichtigt werden

Der Messwert ist von der geometrischen Form der Elektroden und deren Anpressdruck abhängig [2:1]. Um einen gleichbleibenden Kontakt zwischen Elektrode und Baustoff zu erreichen, sollte man mit einem leitenden Gel arbeiten [4.2:1].

Unterschiede der Leitfähigkeit an der Oberfläche und in den inneren Schichten des Baustoffs beeinflussen ebenfalls die resultierende Gesamtleitfähigkeit [2:1]. Dabei ist ein Strom, der durch das Innere einer Messgutprobe fließt, ein besseres Maß für die mittlere Feuchte der Probe als ein Strom längs der Oberfläche oder durch die oberflächennahe Schicht. Faktisch gehen aber bei jeder Messung sowohl Oberflächenströme als auch Ströme durch das Probeninnere in das Messergebnis ein.

Im Gegensatz zur Elektronenleitung ist die Ionenleitung (Elektrolyt) mit einem Materialtransport verbunden, und an den Elektroden werden bei Stromfluss in eine Richtung (Gleichstrom) verschiedene Ionen und/oder Reaktionsprodukte angereichert. Dadurch kann der Übergangswiderstand zwischen Elektrode und Elektrolyt erheblich vergrößert werden und zu einer Verfälschung des Messergebnisses führen [5.4:1].

Technisch wird der Messbereich nach unten durch die Schwierigkeiten begrenzt, die sich aus der Messung sehr hoher Widerstände (über $10^{11} \Omega$) ergeben. Für die meisten Stoffe liegt die dadurch bedingte Messbereichsgrenze bei 5 bis 8% Feuchte.

Entscheidend für die Nutzbarkeit des Leitfähigkeitsprinzips für quantitative Aussagen zur Feuchte ist, dass in höherem Maße als bei vielen anderen Verfahren alle Bedingungen der im Labor erfolgten Kalibrierung am realen Messobjekt in der Praxis eingehalten werden müssen. Bei der Bauzustandsanalyse ist diese Forderung in der Regel nicht realisierbar. Durch Eintrag von Salzen, chemische Umwandlung oder Auswaschung können im Bauteil die Konzentrationen wasserlöslicher Substanzen stark verändert werden [2:1].

Das Verfahren eignet sich gut zur Bestimmung der Feuchte in Holz. Schwankungen der Feuchte im Vergleich zwischen den Holzarten sind nicht viel größer als beim Vergleich von Holz ein und derselben Art, das von unterschiedlichen Standorten stammt.

Die Bestimmung der spezifischen Leitfähigkeit feuchter Baustoffe setzt gleichartige Messbedingungen voraus. Schon geringe Abweichungen von den bei der Kalibrierung vorhandenen Messbedingungen (Temperatur, Dichte, Salzgehalt des Baustoffes etc.) führen zu starken Abweichungen der Leitfähigkeit und machen das Messergebnis unbrauchbar. Unter Umständen kann man trotzdem lokale Feuchteunterschiede in Baustoffen oder Bauteilen näherungsweise erfassen.

Die Vorteile der Feuchtemessung mit der Leitfähigkeitsmethode liegen in der einfachen Handhabung der Geräte und in deren, im Vergleich zu vielen anderen Verfahren, sehr günstigen Anschaffungskosten. Es ist aber vermessen, unabhängig von dem untersuchten Baustoff und den Messbedingungen, in den Messwerten quantitative Angaben für die Materialfeuchte zu sehen, wie dies häufig in den Gerätebeschreibungen der Hersteller zu lesen ist.

5.4.2 Wechselspannung

Die Grundlage der Leitung des elektrischen Stromes in porösen Baustoffen ist der Ladungstransport durch Ionen, hierauf wurde bereits in Abschnitt 5.4.1 eingegangen. Diese Grundlagen gelten auch für die Messung bei Wechselspannung.

Der eigentliche Vorteil der Messung bei Wechselspannung gegenüber der Messung mit Gleichspannung ist, dass beim Arbeiten mit Wechselspannung die Polarisationserscheinungen vermieden werden. Dadurch wird es möglich, kontinuierlich über längere Zeiträume zu messen [5.4:2].

Als Weiterentwicklung der üblichen Elektrodenanordnung wurde die Multiring-Elektrode entwickelt. Diese besteht aus einer Serie von Elektroden. Sie erlaubt die Messung von Feuchteprofilen. Die bisherigen Erfahrungen beziehen sich auf die Messung in Beton [5.4:3; 5.4:4].

5.5 Dielektrische Verfahren

5.5.1 Grundlagen

Bei diesem Verfahren macht man sich die Abhängigkeit der dielektrischen Eigenschaften mineralischer Baustoffe von der Feuchte zunutze [5.5:1; 5.5:2; 5.5:3]. Kennzeichnende Größe ist die komplexe Dielektrizitätszahl ε , die das Verhalten von Materie im elektromagnetischen Feld beschreibt:

$$\varepsilon = \varepsilon' - j \cdot \varepsilon''.$$

Der Realanteil der Dielektrizitätszahl ε' stellt die klassische Dielektrizitätszahl dar, die z. B. zur Kapazitätsberechnung eines Kondensators herangezogen wird. Es handelt sich hierbei um eine dimensionslose Größe, die auf die Dielektrizitätszahl des freien Raumes $\varepsilon_0 = 8,85416 \cdot 10^{-12} \text{ As/(Vm)}$ bezogen wird, welche eine Naturkonstante darstellt. Sie beschreibt die Polarisierbarkeit des Mediums bzw. die damit verbundene in der Materie gespeicherte Energie.

Der Imaginäranteil ϵ'' ist ein Maß für auftretende dielektrische Verluste. Die Dielektrizitätszahl ist stark frequenzabhängig.

Aufgrund stark unterschiedlicher Dielektrizitätszahlen ϵ von trockenen und feuchten Baustoffen sind sie für die Feuchtemessung geeignete Größen. Trockene und feuchte Baustoffe unterscheiden sich in den interessierenden Frequenzbereichen durch den Wert für ϵ' . Während trockene Baustoffe Werte von $\epsilon' = 3 \dots 7$ aufweisen, wirkt sich im feuchten Baustoff maßgeblich der Wert für Wasser von $\epsilon' = 80$ aus. Diese Gegebenheiten gelten für Messfrequenzen unterhalb der sog. Dipol-Relaxationsfrequenz des Wassers. Diese liegt für freies Wasser bei 16 GHz, für Wasser in Baustoffen mit zunehmender Bindung des Wassers an den Baustoff auch einige GHz niedriger. Die Dipol-Relaxationsfrequenz markiert die Frequenz, ab der die Wasserdipole nicht mehr in der Lage sind, sich nach einem elektrischen Wechselfeld auszurichten. Da die Anteile ϵ' und ϵ'' der Dielektrizitätszahl nicht direkt gemessen werden können, erfolgt ihre Bestimmung über die Messung spezifischer Parameter wie Kapazität C und Widerstand R bei tieferen Frequenzen und Dämpfung und Phasenverschiebung bzw. Wellenausbreitungskonstante, Transmissionskoeffizient usw. bei höheren Frequenzen.

Neben der Feuchte beeinflusst allerdings in weiten Bereichen auch der Ionengehalt des Baustoffs die Dielektrizitätszahl. Deshalb stellt der Gehalt an gelösten Salzen eine der wesentlichen Störgrößen der dielektrischen Feuchtemessung dar und hat besonderen Einfluß auf die dielektrischen Verluste ϵ'' , welche mit steigendem Ionengehalt zunehmen (trockener Baustoff $\epsilon'' \approx 0$).

5.5.2 Niederfrequente dielektrische Messverfahren

Der niederfrequente Bereich (kleiner 100 MHz) ist messtechnisch verhältnismäßig einfach zugänglich. Mit einfachen Verfahren können hier elektrische Kenngrößen wie der Widerstand R oder die Kapazität C eines Kondensators bestimmt werden. Zum Teil wird auch die gleichzeitige Bestimmung von Widerstand und Kapazität zur Bestimmung der Feuchte verwendet. Wegen der einfachen Messtechnik wird dieser Frequenzbereich bevorzugt für Feuchtemessgeräte herangezogen. Zahlreiche Geräte, die nach diesem Prinzip arbeiten, sind im Handel erhältlich.

Eine zuverlässige Bestimmung der Feuchte ist jedoch nur in speziellen Situationen möglich [5.5:4; 5.5:5; 5.4:1]. Die Bestimmung der Feuchte von mineralischen Baustoffen, deren Zusammensetzung nicht bekannt ist, ist in

den meisten Fällen jedoch nicht möglich. Hauptsächliche Ursache hierfür ist der gravierende Einfluß gelöster Salze auf die Dielektrizitätszahl, der den Einfluß der Feuchte überlagert. In der Baupraxis liegen jedoch meist kombinierte Salz- und Feuchteschäden vor. Eine Messung der Feuchte wäre nur bei Kenntnis des Salzgehaltes möglich oder umgekehrt, was, abgesehen von Sonderfällen, im allgemeinen baupraktischen Fall nicht gegeben ist.

Weitere Störungen entstehen durch die Kontaktierung zwischen Elektroden und Material, eine weitere störende Einflußgröße ist durch die Temperatur gegeben. Trotz mannigfaltiger Ansätze zur Minimierung der durch die Kontaktierung gegebenen Störungen gilt, dass in der allgemeinen Baupraxis niederfrequent arbeitende elektrische Messgeräte keine brauchbaren bzw. zweifelsfreien interpretierbaren Ergebnisse liefern können.

Unterhalb einer Frequenz von ca. 100 MHz ist eine Bestimmung der Bauteilfeuchte nur bei bekanntem Salzgehalt möglich, d. h. der Frequenzbereich unter ca. 100 MHz ist für eine qualifizierte Messung der Feuchte von Baustoffen ungeeignet.

5.5.3 Hochfrequente Verfahren (Mikrowelle)

Laboruntersuchungen dielektrischer Eigenschaften mineralischer Baustoffe ergaben, dass erst oberhalb von ca. 100 MHz die Möglichkeit gegeben ist, im Falle der Bestimmung zweier dielektrischer Parameter den Einfluss von Feuchte und Salzgehalt auf den Real- und Imaginärteil der Dielektrizitätszahl zu separieren [5.5:6; 5.5:7; 5.5:8].

Im Frequenzbereich von 100 MHz bis ca. 1 GHz kann durch eine Messung zweier elektrischer Messgrößen auf die Feuchte des Baustoffs geschlossen werden. Diese Vorgehensweise ist notwendig, da in diesem Frequenzbereich beide Anteile der komplexen Dielektrizitätszahl noch vom Gehalt gelöster Salze abhängig sind. Der Einfluß des Salzes ist im Falle der Bestimmung zweier Messgrößen vom Einfluss der Feuchte trennbar, was bei Frequenzen unter 100 MHz nicht der Fall ist (Abschnitt 4.5.1).

Oberhalb von 1 GHz wird der Realteil der Dielektrizitätszahl zunehmend unabhängig vom Einfluss gelöster Salze, d. h. hier kann durch die Messung nur einer Messgröße eine salzunabhängige Feuchtemessung realisiert werden. Eine Feuchtemessung ist bis zum Frequenzbereich der Dipolrelaxation möglich (Abschnitt 4.5.1). Eine häufig verwendete Messfrequenz ist 2,45 GHz. Bei

dieser postalisch freigegebenen Frequenz arbeiten auch Geräte der Haushaltselektronik.

Seit den 60er Jahren sind in zahlreichen Laborversuchen verschiedenste Mikrowellenanwendungen erprobt worden. Es kommen hierbei verschiedene Antennen- oder Resonatoranordnungen zum Einsatz. Die Sensoren arbeiten entweder berührungsfrei, werden auf die Wandoberfläche aufgesetzt oder werden in einem Bohrloch in das Bauteil eingeführt. Zur Auswertung wird entweder das transmittierte oder das reflektierte Signal verwendet. So können in Abhängigkeit vom jeweiligen Messverfahren Messungen der Oberflächenfeuchte, Messungen der über ein bestimmtes Raumvolumen integrierten Feuchte sowie Feuchteprofilmessungen realisiert werden.

Im Falle der Oberflächenfeuchtemessung sowie der Messung über ein Volumen kann die Messung zerstörungsfrei erfolgen. Die Messung von Feuchteprofilen ist zerstörungsarm über kleinen Bohrlöchern möglich. Die Bestimmung der Feuchte nach diesem Verfahren ist an der selben Stelle wiederholbar. Die zur Messung benötigte geringe Mikrowellenleistung schließt eine Gefährdung von Personen aus.

Probleme bei der Anwendung der Mikrowellenfeuchtemessung ergeben sich hinsichtlich der Kalibrierung. Eine Vielzahl mineralischer Baustoffe zeigt einen gleichen Zusammenhang zwischen Realteil der Dielektrizitätszahl und dem Volumenanteil der Baustofffeuchte, d. h. eine weitgehend materialunabhängige Kalibrierung ist bezüglich der volumenbezogenen Feuchte möglich. Zur Ermittlung der massebezogenen Feuchte ist jedoch die Kenntnis der Rohdichte des Baustoffs nötig.

Weitere Probleme können durch Inhomogenitäten im zu untersuchenden Bauteil entstehen (z. B. Bewehrungsstahl, Installationsleitungen, Hohlräume im Baustoff bzw. Bauteil, Schalungssteine, Verfüllziegel). An diesen werden die Mikrowellen gestreut, eine Verfälschung des Empfangssignals ist deshalb möglich. Im Falle der Messung von Feuchteprofilen sind jedoch Konzepte entwickelt worden, um diese Störungen zu minimieren.

Die rasante Entwicklung im Zusammenhang mit der kommerziellen Nutzung mikrowellenorientierter Systeme wie Mobilfunk und Satellitenempfang brachte es mit sich, dass heute Mikrowellenkomponenten in kleiner Ausführung und sehr preiswert im Handel erhältlich sind. Hierdurch wird die Entwicklung von Mikrowellenmessgeräten zur Feuchtemessung an Baustoffen in besonderem Maße begünstigt. Erste Anbieter von handlichen, in der Baupraxis einsetzbaren Mikrowellenfeuchtemessern sind vorhanden. In nächster Zukunft werden

sicherlich verschiedene Mikrowellenmessgeräte und Messmöglichkeiten erhältlich sein.

Durch den grundsätzlichen Vorteil, zerstörungsfrei oder zerstörungsarm, wiederholbar, sicher und salzunabhängig messen zu können, zählt die Mikrowellenmesstechnik zu den erfolversprechenden neueren Verfahren zur Feuchtemessung in Bauteilen.

5.5.4 TDR-Verfahren

Bei der TIME DOMAIN REFLECTOMETRY (TDR) macht man sich die hohe Dielektrizitätskonstante (DK) des Wassers zu nutze, die dazu führt, dass die DK poröser Stoffe in feuchtem Zustand hauptsächlich eine Funktion des Wassergehaltes ist [5.5:9; 2:1].

Das ursprünglich zur Ortung von Kabelbrüchen entwickelte Verfahren misst die Laufzeit von hochfrequenten Spannungsimpulsen auf einem metallischen Leiter definierter Länge, der sich im Kontakt mit dem zu messenden Medium befindet. Der Quotient aus Leiterlänge und Laufzeit ergibt die Geschwindigkeit der Impulse, die in nicht magnetischen Materialien nur von der DK beeinflusst wird.

Der Zusammenhang zwischen der DK und dem Wassergehalt eines porösen Stoffes wird mittels einfach zu erstellender, empirischer Kalibrierungen ermittelt. Referenzmethode ist dabei die Darr-Methode.

Weiterentwicklungen der TDR-Technik, wie zum Beispiel die TRIME-Methode, wurden speziell auf die Bedürfnisse des Bauwesens zugeschnitten. Kleine, handliche akkubetriebene Geräte für die Messung vor Ort mittels zerstörungsarmer Tiefensonden oder zerstörungsfreier Oberflächensonden wurden entwickelt. Die Eindringtiefe des Messfeldes erreicht je nach Sondentyp 3 cm bis 5 cm, die Messdauer beträgt nur wenige Sekunden.

Die Methode zeichnet sich vor allem durch ihre einfache Bedienbarkeit und hohe Genauigkeit aus. Die Störeinflüsse durch z. B. Salzgehalt, Temperatur, Anpressdruck bei Oberflächensonden, Lufteinschlüsse oder Oberflächenfeuchte sind vorhanden, wenn auch je nach Material und Rauigkeit der Oberfläche gering. Da neben der Feuchte auch die Leitfähigkeit des Materials ermittelt wird, sind die Störgrößen, resultierend aus elektrischer Leitfähigkeit des zu messenden Stoffes, allerdings kalkulierbar. Das gewonnene Messergebnis ist somit kontrollierbar. Das Verfahren wurde in

Praxistests bei Messungen des Austrocknungsverhaltens von Estrichen sowie zu Feuchtekartierungen an historischen Bauwerken aus Naturstein erprobt.

5.6 Kernspinnresonanz / NMR-Verfahren

Die Nukleare-Magnetische-Resonanz-Methode nutzt das magnetische Moment der Wasserstoffkerne [5.6:1; 5.6:2; 5.6:3]. In einem konstanten magnetischen Feld richten sich die Wasserstoffkerne aus. Durch Einstrahlung eines elektromagnetischen Impulses einer definierten Frequenz nehmen die Wasserstoffkerne durch Niveauänderung Energie auf, die nach Ende des Impulses wieder abgegeben wird, da dann das ursprüngliche Niveau wieder eingenommen wird. Bei geeigneter Wahl der Frequenz des Impulses werden nur Wasserstoffatome angeregt, so dass die Energieabgabe nach Ende des Impulses ein Maß für den Wassergehalt der Probe ist. Untersuchungen zeigen, dass diese Messmethode selektiv wasserbezogen und genau arbeitet. Gemessen wird allerdings das gesamte Wasser, also auch das chemisch gebunden Wasser.

Der apparative Aufwand für NMR-Messungen ist sehr groß, die Kosten sind sehr hoch. Zwar gibt es inzwischen auch portable Messeinrichtungen für Oberflächenmessungen, letztlich ist diese Methode jedoch für den praktischen Einsatz für die Feuchtemessung an Bauteilen weniger geeignet. Sie kommt eher als Labormethode für spezielle Anwendungen in Frage.

5.7 Hygrometrische Verfahren

Unter hygrometrischen Verfahren versteht man

- das Luftfeuchte-Ausgleichsverfahren (Luft - Baustoff) und
- das Baustofffeuchte-Ausgleichsverfahren (Baustoff - Baustoff).

Das Luftfeuchte-Ausgleichsverfahren wird in Abschnitt 4.4 behandelt.

Das Baustofffeuchte-Ausgleichsverfahren hat eine wissenschaftliche Bedeutung, denn es ermöglicht die Bestimmung der Feuchte der Probe oberhalb einer rel. Luftfeuchte von 95 %, d. h. im überhygroskopischen Bereich. Der überhygroskopische Bereich ist gekennzeichnet durch die Fähigkeit kapillarporöser Baustoffe, Wasser bis zum Erreichen des freiwilligen Wassergehalts u_f (= freie Wassersättigung) zu speichern. In Baustoffen mit unterschiedlichen Kapillardurchmessern erfolgt die Wassereinlagerung mit steigendem Feuchtepotential zunächst in den engsten Kapillaren. Erst wenn diese engen Kapillaren vollständig mit Wasser gesättigt sind, erfolgt weitere

Wassereinlagerung in den nächstgrößeren Kapillaren. Bei kapillaren Baustoffen mit kontinuierlicher Porengrößenverteilung werden also in Abhängigkeit vom Wassergehalt bis zu einer bestimmten Porengröße alle kleineren Poren mit Wasser gefüllt sein. Damit besteht ein Zusammenhang zwischen dem Wassergehalt des Baustoffs und dessen Kapillardruck, der durch die größten noch gefüllten Poren bestimmt ist. In gleicher Weise wie bei umgebender feuchter Luft erfolgt die Wassereinlagerung durch kapillaren Wassertransport bei Kontakt eines trockenen Baustoffs zu einem feuchteren Baustoff. Der trockene Baustoff entzieht dem feuchten Baustoff so lange Wasser, bis beide Baustoffe den gleichen Kapillardruck aufweisen. Setzt man voraus, dass die beiden Baustoffe eine unterschiedliche Porengrößenverteilung besitzen, liegen dann bei gleichem Kapillardruck unterschiedliche Wassergehalte vor. Die Saugspannungskurve beschreibt diesen Zusammenhang im überhygroskopischen Bereich.

Diese Zusammenhänge macht man sich beim Baustofffeuchte-Ausgleichsverfahren zu Nutze [4.4:1]. Das Messgut wird dabei in direktem Kontakt zu einem hygroskopischen Referenzkörper (in der Regel aus Gips oder Zement in definierter Zusammensetzung) gebracht. Zwischen den beiden Proben findet in Richtung des Feuchtegefälles so lange ein Ausgleich statt, bis sich ein Gleichgewichtszustand einstellt. Die Kinetik der Feuchtetransportvorgänge wird durch die Gradienten der Massentransportpotentiale bestimmt, deren Abhängigkeit vom Wassergehalt für beide Proben bekannt sein sollte. Darüberhinaus benötigt man zur Auswertung von der zu beurteilenden Probe die Kalibrierkurve einer elektrischen Größe (z. B. Leitfähigkeit) in Abhängigkeit von der Feuchte. Die Auswertung erfolgt in Form von Ausgleichskennlinien des "Stoffpaares" (Baustoffprobe und Referenzkörper).

Das Baustofffeuchte-Ausgleichsverfahren konnte sich wegen der hohen Trägheit und der beschränkten Anwendung nicht durchsetzen. Eine praktische Anwendbarkeit des Verfahrens ist nicht zu erkennen [4.4:1]

5.8 Ultraschall

Ultraschallmessungen werden in der Bauwerksdiagnostik mit Erfolg bei der Beurteilung von Festigkeiten herangezogen [5.8]. Bei der Messung wird mit einem Ultraschallsignal (US), das in einen Impulsgeber erzeugt und in die Oberfläche übertragen wird (Ankoppelung), ein Baustoff durchschallt. Auf der anderen Seite wird das Signal mit einem Ultraschallaufnehmer aufgefangen und elektronisch weiterverarbeitet. Neben der Messung der Laufzeit des

Signals durch den Baustoff in Abhängigkeit von der Weglänge (= US-Geschwindigkeit: $v = \text{Weg/Laufzeit [km/s]}$) kann auch die Frequenz des Empfangssignals im Vergleich zum Ausgangssignal analysiert werden. Dabei wird das Zeitsignal mittels Fouriertransformation in einzelne Frequenzbestandteile zerlegt. Die Übertragung des US-Signals erfolgt über die punktuellen bzw. flächigen Korn-Korn-Kontakte im Baustoffgefüge. Bei wenigen bzw. schlecht ausgebildeten Kornkontakten benötigt das Signal eine größere Laufzeit (geringe Geschwindigkeit) als bei einem festen Baustoff mit einem innigen Korngefüge (hohe Geschwindigkeit). Zusätzlich wird das Porengefüge zu Schwingungen angeregt, so dass sich die Frequenz des Ursprungssignals verändert. Die Veränderung des Schwingungsverhaltens wird weniger vom Baustoff als vielmehr von der Feuchtigkeit, die in den Kornwickeln beiderseits der Kornkontakte sitzt, verändert.

Die Übertragung des Ultraschallsignals wird durch folgende Parameter beeinflusst:

- Baustoffart, -gefüge
- Mauerwerksgefüge
- Salze, hygroskopische Salze
- Feuchte des Baustoffs
- Ankoppelung des Sende- und Empfangskopfes.

Der Baustoff selbst wirkt sich über seine Porosität, Dichte, Feuchtigkeit und seinen Verwitterungsgrad auf die Ultraschallgeschwindigkeit und die Frequenzspektren aus. Risse, Luftspalten im Mauerstein bzw. im Mauerwerk verändern bzw. dämpfen das Ultraschallsignal derart, dass keine Auswertung hinsichtlich der Feuchte möglich ist. Die Füllung der Poren und die Belegung der Porenwickel mit Salzen wirkt sich auf die Geschwindigkeit und die Veränderung des US-Signals in gleicher Weise aus wie die Feuchte. Als weiterer Einflussfaktor kommt die Art der Ankoppelung der Messköpfe (mit oder ohne Koppelmasse, Festigkeit des Andrucks etc.) dazu.

Bei der Ultraschallmessung wird üblicherweise mit Durchschallung gearbeitet. Da so viele Parameter die Ultraschallmessung beeinflussen, müssen genaue Kenntnisse des Mauerwerksaufbaus und der Salzverteilung von jeder Messstelle vorliegen, um Veränderungen des Signals infolge unterschiedlicher Feuchte im Baustoff bzw. im Mauerwerkquerschnitt zu erkennen.

Bisherige detaillierte Untersuchungen am homogenen Baustoff im Labor jeweils mit definierter Feuchte haben gezeigt, dass qualitative Aussagen nur

bei geringen Durchfeuchtungsgraden möglich sind. Im überhygroskopischen Bereich der Feuchte ist die Messung nicht möglich. Weder mit der Laufzeitmessung noch mit der Frequenzanalyse noch mit der Bewertung der US-Signaldämpfung alleine kann die Feuchte im überhygroskopischen Bereich bestimmt werden. Vielleicht können in Zukunft durch rechnerische Kombination der einzelnen Messwerte mittels Ultraschallmessung bessere Aussagen zur Feuchte im Baustoff gemacht werden.

Dem Vorteil der Schnelligkeit einer Messung steht der Nachteil bei der Handhabung mit zwei Messköpfen, der Positionierung der beiden Messköpfe bei der Durchschallung auf beiden Seiten der Wand mit der Notwendigkeit langer Zuleitungskabel gegenüber. Ohne genaue Kenntnis des Mauerwerksaufbaus bzw. Eichung der Messung an Darr-Werten kann zur Zeit die Feuchte mittels Ultraschall nicht bestimmt werden. Auch die Überwachung von Austrocknungsvorgängen erscheint durch ungleichmäßige Feuchteverteilung im Querschnitt oder Umlagerung von Salzen nicht möglich.

5.9 Sondenmethode (Lambda-Sonde)

Bei der Sondenmethode (Lambda-Sonde) wird die Veränderung der Wärmeleitfähigkeit λ in Abhängigkeit von der Feuchte des Baustoffes genutzt [5.9:1; 5.9:3]. Die funktionale Abhängigkeit $\lambda(u)$ ist für viele Baustoffe messtechnisch ermittelt worden und daher bekannt, d. h. durch die Messung der Wärmeleitfähigkeit an einem bekannten Baustoff kann auf dessen Feuchte u geschlossen werden. Bei Baustoffen, bei denen die Abhängigkeit $\lambda(u)$ nicht bekannt ist, können immerhin Feuchteänderungen festgestellt werden [2:1].

Das Prinzip der Sondenmessung basiert auf der Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit λ mittels eines Heizdrahtes [5.9:2]. Sie ist eine absolute Methode für die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit λ . Bei der Sondenmethode wird ein elektrischer Widerstandsdraht, der mit einem Temperaturfühler ausgestattet ist, in den Werkstoff eingestochen bzw. an einem Bohrloch (Durchmesser ca. 10 mm) in den Baustoff eingebracht [5.9:1; 5.9:2]. Nach dem Einschalten des Heizstroms entsteht ein instationäres Temperaturfeld, das aus zylinderförmigen Isothermen mit dem Heizdraht als Zylinderachse besteht. Der Messzyklus besteht aus einer Heizphase, in der dem Baustoff eine definierte Energie zugeführt wird, und einer sich direkt daran anschließenden Abkühlphase. Aus dem zeitabhängigen Temperaturverlauf beider Phasen wird die Wärmeleitfähigkeit λ berechnet. Bei vorhandenen Kenntnissen der Abhängigkeit $\lambda(u)$ des Baustoffes kann dann auf die Feuchte u geschlossen werden. - Eine Ermittlung des Feuchte in unterschiedlichen

Tiefen eines Bohrlochs ist möglich, wenn man den Heizdraht mit mehreren Temperaturfühlern ausstattet. Auf diese Weise können Feuchteprofile über den Querschnitt des Baustoffs ermittelt werden.

Als Vorteile der Sondenmethode sind die nahezu zerstörungsfreie Vorgehensweise, die sehr gute Reproduzierbarkeit der Messungen und die Möglichkeit der Auflösung der Messwerte in der Bauteiltiefe zu sehen. Sie eignet sich bevorzugt für die Messung in Werkstoffen mit geringer Härte (z. B. Wärmedämmstoffe), da die Sonde dort leicht eingebracht (eingestochen) werden kann.

Nachteilig wirken sich die geringe absolute Genauigkeit der Messung und grundsätzliche Probleme bei der praktischen Durchführung der Sondenmessung in harten Baustoffen (nicht einsteckbar) aus. Die Einführung der λ -Sonde in Bohrungen lieferte keine befriedigenden Ergebnisse. Es traten dabei insbesondere Probleme aufgrund schwankender Wärmeübergangswiderstände auf. Grundsätzlich ist aber ihr Einsatz bei der langfristigen Kontrolle des Erfolges von Instandsetzungsmaßnahmen denkbar, wie z. B. bei Mauerwerkstroekenlegungen und Maßnahmen gegen aufsteigende Feuchte. Vorteilhaft wirkt sich dabei aus, dass die Messwerte durch die Anwesenheit von Salzen im Baustoff nur gering verändert werden.

5.10 Impuls-Radar-Verfahren

Das Impuls-Radar-Verfahren wird im Bereich der Bauwerksdiagnostik angewandt [5.10:1; 5.10:2; 5.10:3]. Es dient zur Lokalisierung von Leitungen, Bewehrungen, Hohlräumen im geologischen Untergrund und Fehlstellen in homogenen Materialien. Die zerstörungsfreie Eindringtiefe reicht dabei - je nach Beschaffenheit des zu untersuchenden Materials - von wenigen Zentimetern bis zu sechs Metern.

Bei dem Impuls-Radar-Verfahren handelt es sich um ein Verfahren, das auf dem Prinzip der Reflexion elektromagnetischer Wellen basiert. Prinzipiell wird eine Welle auf das zu untersuchende Material oder Medium abgestrahlt. Trifft die Welle im Material oder Medium auf eine Schicht, die eine andere Dichte hat, wird die Welle teilweise oder ganz reflektiert.

Um die reflektierten Wellen empfangen zu können, wird die Antenne pulsierend zwischen Senden und Empfangen umgeschaltet. Dieser Vorgang geschieht mehrmals pro Sekunde. Der Wellenimpuls hat im Material oder Medium eine Laufzeit, die von der Dielektrizitätszahl oder der Dichte abhängig ist. Wird dabei der Wellenimpuls teilweise reflektiert, läuft die Welle wieder zurück. Dabei

entsteht ein Echo, das von dem auf Empfang geschalteten Sender aufgenommen wird. Die Zeit, die seit der Sendung des Wellenimpulses und dem Empfang des Echos verstrichen ist, wird als Laufzeit gemessen. Reflexionen an Grenzschichten, die nahe am Sender liegen, haben eine kürzere Laufzeit als Reflexionen an tieferliegenden Schichten. Vergleicht man die Laufzeit, so lässt sich dadurch die Anzahl der Bauteilschichten bestimmen.

Im Hinblick auf die Ermittlung der Feuchte in Bauteilen macht man sich auch bei diesem Verfahren die Kenntnisse über die Dielektrizitätskonstante zu nutze (Abschnitt 5.5.1). Anhand der mit dem Impuls-Radar-Verfahren ermittelten Dielektrizitätskonstanten können dann Rückschlüsse auf die Feuchteverteilung in einem Bauteil geschlossen werden.

In der Regel wird die Laufzeit der elektromagnetischen Wellen über die gesamte Bauteildicke bzw. über ein Messvolumen bestimmt, so dass sich mit dem Impuls-Radar-Verfahren nur relativ grobe, integrale Werte der Bauteilfeuchte über ein bestimmtes Messvolumen bestimmen lassen. Lokale Feuchtenester bleiben dabei eher unterrepräsentiert.

Das zerstörungsfrei arbeitende Verfahren eignet sich vor allem für großräumige und großflächige Untersuchungen der lateralen Feuchteunterschiede in mehrschichtigen bzw. inhomogenen Bauteilen (Kartierungen).

5.11 Gamma-Strahlungs-Verfahren

Gammastrahlung entsteht beim Zerfall radioaktiver Nuklide. Sie wird durch Wechselwirkung mit jeder Art von Material durch Streuung und Absorption geschwächt. Baustoffe mit höherer Dichte absorbieren mehr Strahlung als Baustoffe mit geringerer Dichte. Daher gelangt nach einer Durchstrahlung einer feuchten Probe weniger Strahlung zu einem Detektor als bei der Durchstrahlung einer trockenen Probe unter gleichen Bedingungen. Für die Untersuchung von feuchten Baustoffen werden als Strahlungsquellen die Elemente Americium (Am 241), Kobalt (Co 57) und Cäsium (Cs 137) verwendet.

Bei der Untersuchung feuchter Baustoffe mittels Durchstrahlung (Transmission) mit Gamma-Strahlung wird die Intensität der Strahlung vor und nach dem Durchgang durch den Baustoff miteinander verglichen [5.11:1; 5.11:2; 5.11:3; 5.11:4; 5.11:5]. Daraus wird die Gesamtdichte bestimmt, aus der bei bekannter Dichte im trockenen Zustand die Feuchte des Baustoffs errechnet werden kann.

Bei der während der letzten Jahre vom WKI in Braunschweig entwickelten Gamma-Sonde besteht die Messanordnung aus einer Strahlungsquelle und einem Detektor sowie dem zu untersuchenden, sich dazwischen befindlichen Baustoff. Für die Feuchtemessung an Mauerwerk wird ein Sondenpaar (Strahlungsquelle und Detektor) in zwei parallele Bohrkanäle (\varnothing 22 mm) eingeführt. Durch schrittweise Messung können Dichte- bzw. Feuchteänderungen bis zu einer Tiefe von ca. 250 mm mit einer Ortsauflösung von weniger als 1mm ermittelt werden.

Das erhaltene Messsignal wird wesentlich durch die Schwächung der Gamma-Strahlung im Probekörper selbst bestimmt. Es ist daher erforderlich, den Schwächungskoeffizienten im trockenen Zustand und die eventuell auftretenden Dichteunterschiede im Tiefenprofil bei jeder Messung zu ermitteln. Da die Sonden in Bohrungen eingebracht werden müssen, wird an den dafür gewonnenen Bohrkernen das Dichte- und Feuchteprofil bestimmt. Aus den Dichteprofilen beider Kerne kann dann auf die Dichte des Baustoffs zwischen den Bohrkanälen geschlossen werden.

Das Messverfahren liefert in erster Linie Angaben zur Dichte des durchstrahlten Baustoffs. Erst bei bekannter Trockenrohddichte kann auf den Wassergehalt geschlossen werden. In Bereichen, in denen starke Unterschiede der flächenbezogenen Masse in Strahlrichtung auftreten (z. B. Spalte oder Hohlstellen), sind die Messergebnisse nicht aussagekräftig.

Vorteile dieses mobilen Verfahrens liegen darin, dass eine zeitabhängige Messung der Feuchte im Tiefenprofil eines Bauteils möglich ist. Die hohe Ortsauflösung von weniger als 1 mm erlaubt eine kleinräumige Betrachtung des Feuchtehaushaltes eines Bauteils vor Ort. Das Messverfahren ist bei Kenntnis der entsprechenden Stoffeigenschaften (Dichte, Schwächungskoeffizient) in jeder Art von Baustoffen, deren Dichte zwischen der von leichten Dämmstoffen bis zu der eines massiven Gesteins variieren kann, einsetzbar.

Der Einsatz des Verfahrens setzt eine Genehmigung nach der Strahlenschutzverordnung voraus.

Die präzise Positionierung des Messkopfes ist wesentlich für die erzielbare Messgenauigkeit. Die Justierung wird um so kritischer, je stärker die Trockenrohddichte im Messobjekt räumlich variiert, wie dies z. B. bei geschichteten oder sehr unterschiedlich aufgebauten Bauteilen der Fall ist.

Der apparative Aufwand und die Kosten für das Gamma-Strahlungs-Verfahren sind sehr hoch. Für den praktischen Einsatz zur Feuchtemessung an Bauteilen

vor Ort erscheint die Methode bislang wenig geeignet. Als Untersuchungsmethode unter Laborbedingungen kann sie für spezielle Fragestellungen durchaus dienlich und hilfreich sein.

5.12 Röntgenstrahlungs-Verfahren

Das physikalische Messprinzip des Röntgenstrahlungs-Verfahrens [5.12] ist identisch mit dem des Gamma-Strahlungs-Verfahrens (Abschnitt 5.11). Der Unterschied liegt in der Erzeugung der Strahlung. Als γ -Strahlung bezeichnet man die durch radioaktive Isotope erzeugte Strahlung, während Röntgenstrahlung mit Röntgenröhren durch den Einsatz von Hochspannung erzeugt wird. Beide Strahlungen haben gleiche Bereiche der Wellenlänge und Energie. Beide Strahlungen haben eine hohe Eindringtiefe.

Die Entwicklung stabiler und handlicher Röntgenquellen im Bereich bis 100 keV ermöglicht seit wenigen Jahren den Einsatz dieser Quellen bzw. dieses Verfahrens zur Untersuchung von Baustoffen. Es hat gegenüber dem Gamma-Strahlungs-Verfahren den Vorteil, dass die Strahlung zwischen den Messungen abgeschaltet werden kann.

Das Röntgenstrahlungs-Verfahren eignet sich insbesondere dort, wo elektrische Verfahren versagen, weil die elektrischen Felder gestört werden (z. B. durch Stahlarmierung in Bauteilen). Nachteilig ist allerdings, dass bei den Untersuchungen nicht nur das freie Wasser ermittelt wird, sondern auch Kristallwasser und sämtliche Wasserstoffkerne anderer chemischer Verbindungen. Außerdem beeinflussen Dichteunterschiede des Baustoffs das Ergebnis. Die Messung erfolgt volumenbezogen.

6. Ausblick

Die Autoren dieses Sachstandsberichtes haben die Hoffnung, dass die Kenntnis der sonstigen Verfahren nach Abschnitt 5 dazu führt, dass in der Fachwelt und in der Baupraxis diese Verfahren verstärkt angewendet und damit intensive Erfahrungen gesammelt werden. Diese Erfahrungen könnten bei der nächsten Überarbeitung des WTA-Merkblatts "Messung der Feuchte von mineralischen Baustoffen" berücksichtigt werden oder zu einem WTA-Merkblatt "Messung der Feuchte in Bauteilen und Baukonstruktionen" führen.

7. Literatur

- [2:1] K. Kupfer u. a.: Materialfeuchtemessung; Expert-Verlag, Renningen; 1997
- [2:2] Lutz / Jenisch / u. a.: Lehrbuch der Bauphysik; B.G. Teubner Stuttgart; 1985
- [2:3] K. Kießl: Kapillarer und dampfförmiger Feuchtetransport in mehrschichtigen Bauteilen. Rechnerische Erfassung und bauphysikalische Anwendung; Dissertation Universität Essen 1983
- [2:4] K. K. Hansen: Sorptions Isotherms - A Catalogue; Technical Report 162/86; The Technical University of Denmark; 1986
- [2:5] U. Bischof: Bestimmung von Sorptionsisothermen von Baustoffen; Diplomarbeit im Studiengang Bauphysik; Hochschule für Technik, Stuttgart; 1994
- [2:6] H. M. Künzel: Verfahren zur ein- bzw. zwei-dimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchte- transports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten; Dissertation 1994/5413; Universität Stuttgart, Lehrstuhl für konstruktive Bauphysik; 1994
- [4.1:1] K. Kupfer: Thermogravimetrische Verfahren, in: K. Kupfer (Hrsg.): Materialfeuchtemessung, Expert-Verlag, Renningen-Malmsheim, 1997, S. 46-57
- [4.1:2] H. M. Künzel, K. Kießl: Ist Vakuumtrocknung günstiger als Konvektionstrocknung. Untersuchungsergebnisse für Natursandsteine. Bauphysik 12 (1990), Heft 1, S. 27-30

- [4.2:1] G. Schickert: Feuchtemessverfahren im kritischen Überblick; Tagungsband Aachener Sachverständigentage, Bauverlag; 1994.
- [4.2:2] Technische Prüfvorschrift für die Bestimmung der Betonfeuchte mit dem CM-Gerät; ZTV-SIB 90, S. 38 - 39.
- [4.2:3] W. Schnell Zur Ermittlung von Belegreife und Ausgleichsfeuchte von mineralisch gebundenen Estrichen; Boden Wand Decke; Heft 1/1985.
- [4.3] P. Seidler: Handbuch Industriefußböden; Expert-Verlag; Renningen; 3. Auflage, 1994.
- [4.4:1] J. Neue, u. a.: Hygrometrische Verfahren, in: K. Kupfer (Hrsg.): Materialfeuchtemessung, Expert-Verlag, Renningen-Malmsheim, 1997, S. 235 -239.
- [4.4:2] G. Pleyers, u. a.: Zerstörungsarme Messung der tiefenabhängigen Feuchte poröser Stoffe; in: Moderne Verfahren und Geräte zur Materialfeuchtemessung, K. Kupfer (Hrsg.): Materialfeuchtemessung, Expert-Verlag, Renningen-Malmsheim, 1997, S. 104-119
- [4.4:3] G. Pleyers Was ist ein feuchter Baustoff; Berlin:BUM, 1999 – in: Umwelt-Messverfahren – Anwendungen, 10. Feuchtetag 1999 in Berlin., 7./8. Oktober 1999.
- [4.4:4] G. Pleyers Ermittlung der Feuchteprofils im Vorfeld von Schutz und Instandsetzungsmaßnahmen an Betonbauteilen. Berlin: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton; 1998, in: Beiträge zum 36. Forschungskolloquium am 08./09. Oktober 1998 an der Rheinisch-Westfälischen Technischen

- Hochschule Aachen, S. 258-263, 1998.
- [4.5] Richtlinie für Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen (Rili SIB), Teil 3 (Februar 1991): Qualitätssicherung bei Bauausführung; Abschnitt 3.2.3; Herausgegeben vom Deutschen Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb) Berlin.
- [5.2:1] T. Ritzer Feuchtemessung - Methoden, Anwendung und Aussagefähigkeit der Messergebnisse im Bauwesen; Diplomarbeit Universität Karlsruhe, Karlsruhe 1997
- [5.2:2] Troxler electronics laboratories, INC; Bedienerhandbuch, USA 1995
- [5.2:3] A. Jurnik Übersicht der in Betracht kommenden destruktionsfreien Messmethoden, sowie der derzeitige Stand der Kenntnis zur Ermittlung des Feuchtegehaltes in Beton; IRB Verlag, Wien 1984
- [5.4:1] P. Friese Die Anwendung von Leitfähigkeitsmessungen an salz- und feuchtegeschädigtem Mauerwerk, Teil 1; Bautenschutz + Bausanierung, Heft 14; 1991.
- [5.4:2] D. Pregizer: Untersuchung der Eignung von Keramik-, Zement- und Gips-Messelektroden zur Bestimmung des Feuchtigkeitsgehaltes von Beton; Diplomarbeit im Studiengang Bauphysik, Hochschule für Technik, Stuttgart; 1985.
- [5.4:3] M. Raupach, u. a.: Bestimmung der Feuchteverteilung in Betonböden mit Einbausensoren; Technische Akademie Esslingen 1999. - Industrieböden '99 Internationales Kolloquium 12.- 14. Jan. 1999, (P. Seidler (Ed.)), Vol. II, S. 605 - 610.

- [5.4:4] J. Bergholz: Wirksamkeitsbeurteilung von Hydrophobierungen auf Beton mit Hilfe der Multiring-Elektroden; Technische Hochschule Aachen, Fachbereich 3, Institut für Bauforschung, Diplomarbeit, 2000.
- [5.5:1] C. Hauenschild u. a. Untersuchungen zum dielektrischen Verhalten von Baustoffen – Grundlage zur Entwicklung von Feuchtesensoren. 9. Bauklimatisches Symposium, Dresden, 1994.
- [5.5:2] Ch. Maierhofer u.a. Einsatz des Impulsradars und der Laser Induced Breakdown Spectroscopy zur Untersuchung des Salzgehaltes auf die dielektrischen Eigenschaften poröser Baustoffe; Feuchtetag '99, Berlin, Tagungsbericht.
- [5.5:3.] W. Leschnik, U. Schlemm Dielektrische Untersuchung mineralischer Baustoffe in Abhängigkeit von Feuchte- und Salzgehalt bei 2,45 GHz. Feuchtetag'99, Berlin, Tagungsbericht
- [5.5:4] C. Arendt Praktischer Vergleich von Untersuchungsgeräten und – verfahren zur Feuchtemessung im Mauerwerk, Teil 1 und 2; Bautenschutz + Bausanierung, 1993, Heft 5, S. 27 – 31, und 1993, Heft 6, S. 10 – 14.
- [5.5:5] C. Hauenschild: Untersuchung der dielektrischen Eigenschaften mineralischer Baustoffe für die Entwicklung von Feuchtemessverfahren. Dissertation, TU Hamburg-Harburg, Shaker-Verlag, Aachen, 1999.

- [5.5:6] A. Watson: Measurement of moisture content in some structures and materials by microwave absorption, RILEM/CIB symposium on moisture problems in buildings. Helsinki; SF 1965, paper 6-8.
- [5.5:7] W. Leschnik u. a.: A microwave moisture sensor für building components; Int. Symposium NDT-CE, Berlin September 1995, proceedings
- [5.5:8] K. Kupfer: Materialfeuchtemessung; Expert-Verlag, Renningen, 1997, S. 46 - 57.
- [5.5:9] M. Stacheder u. a. Materialfeuchtemessung mit der Time Domain Reflectometry (TDR), Feuchtetag 1997, Weimar
- [5.6:1] H. Garrecht Porenstrukturmodelle für den Feuchtehaushalt von Baustoffen mit und ohne Salzbefrachtung und rechnerische Anwendung auf Mauerwerk; Dissertation, Universität Karlsruhe, 1992.
- [5.6:2] K. Kießl, K. Krus Messung von Wassergehalten und Feuchtetransportvorgängen in Baustoffen mittels kernmagnetischer Resonanz; IBP-Mitteilung 14 (1987), NR. 148, FhG Stuttgart.
- [5.6:3] B. Wolter u. a. Zerstörungsfreie Bestimmung von Tiefenprofilen in Baustoffen mit Hilfe der Kernspinnresonanz in Aufsatztechnik; Feuchtetag '95, Berlin, Tagungsband S. 18 – 26.
- [5.8] Neue Möglichkeiten und Grenzen der zerstörungsfreien Ultraschallmessung an Werkstoffen des Mauerwerks; Internationale Zeitschrift für Bauinstandsetzen, 1. Jhg., Heft 1, S. 21-36, 1995.

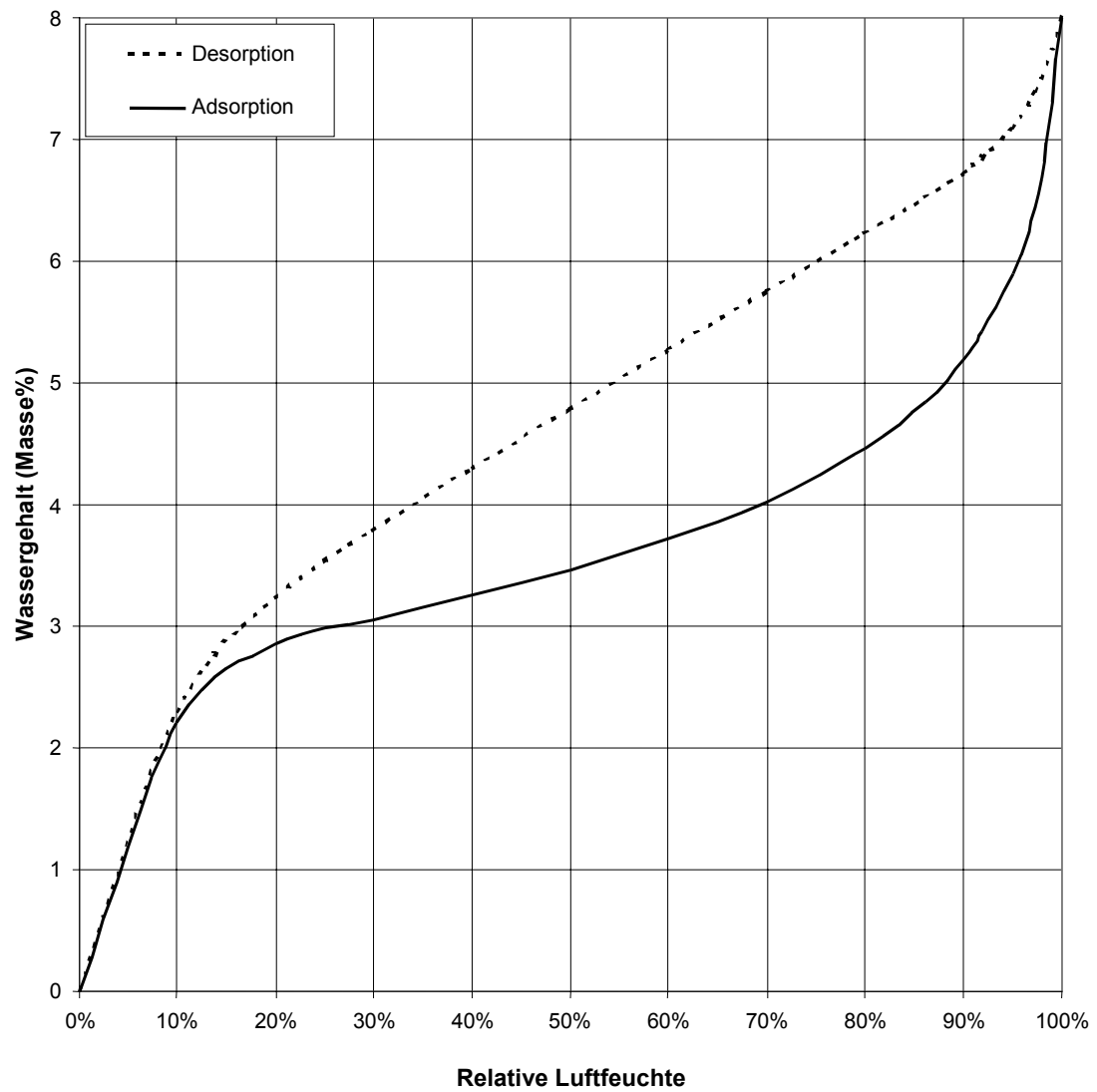
- [5.9:1] W. Leschnik Feuchteprofilmessung an schweren Bauwerken; 5. Hanseatische Sanierungstage, Kühlungsborn/Ostsee, November 1994.
- [5.9:2] W. O. Boekwijt Diagnoseverfahren bei der Feuchtigkeitsbekämpfung; Bautenschutz + Bausanierung, Heft 2; 1979 (2. Jahrgang)
- [5.9:3] W. Leschnik u. a.: Bauwerksdiagnostik und Qualitätsbewertung; WTA-Schriftenreihe, Heft 13, S. 241-252, 1997.
- [5.10:1] S. Weiß, K. Ungerer Feuchtemessverfahren bei Gebäudeschäden; Waiblingen, Verlag Lauth & Partner GmbH; 1. Auflage 1995.
- [5.10:2] von der Lieck Schadensdiagnostik für den Hoch- und Tiefbau; Prospektmaterial der Fa. von der Lieck, 62626 Heinsberg.
- [5.10:3] Verfahren und Geräte zur Erfassung von Bauschäden; Landesinstitut für Bauwesen des Landes NRW.
- [5.11:1] A. Kober, B. Plinke Feuchtemessung an Holz, Holzwerkstoffen und Baustoffen – Eine Literaturübersicht: WKI-Bericht Nr. 21 (1989), Braunschweig, S. 55 – 56.
- [5.11:2] A. Kober, L. Mehlhorn Radiometrische Feuchtemessung in Bauteilen mit hoher räumlicher Auflösung; Teil 1: Grundlagen und Beschreibung der Messvorrichtung, Bauphysik, 13. Jahrgang (1991), Heft 2, S. 43 – 49; Teil 2: Erprobung der Messvorrichtung und Ergebnisse, Bauphysik, 16. Jahrgang (1994), Heft 3, S. 81 - 85.
- [5.11:3] F. Hoyer u. a. Bestimmung der Eindringtiefe eines Tränkstoffes in Naturstein mit der Gammasonde; Braunschweig, WKI-Kurzbericht Nr. 42/1995.

- [5.11:4] F. Hoyer u. a. Feuchtemessung mit der Gammasonde bei der Entsalzung einer Ziegelmauer; Braunschweig, WKI-Kurzbericht NR. 43/1995.
- [5.11:5] F. Hoyer u. a. Austrocknungsverhalten einer stark salzbelasteten Ziegelmauer infolge Beheizung; Braunschweig, WKI-Kurzbericht NR. 44/1995.
- [5.12] C. Bachmann Kernstrahlungsverfahren, in:
K. Kupfer (Hrsg.): Materialfeuchtemessung, Expert-Verlag, Renningen-Malmsheim, 1997, S. 192 – 197.

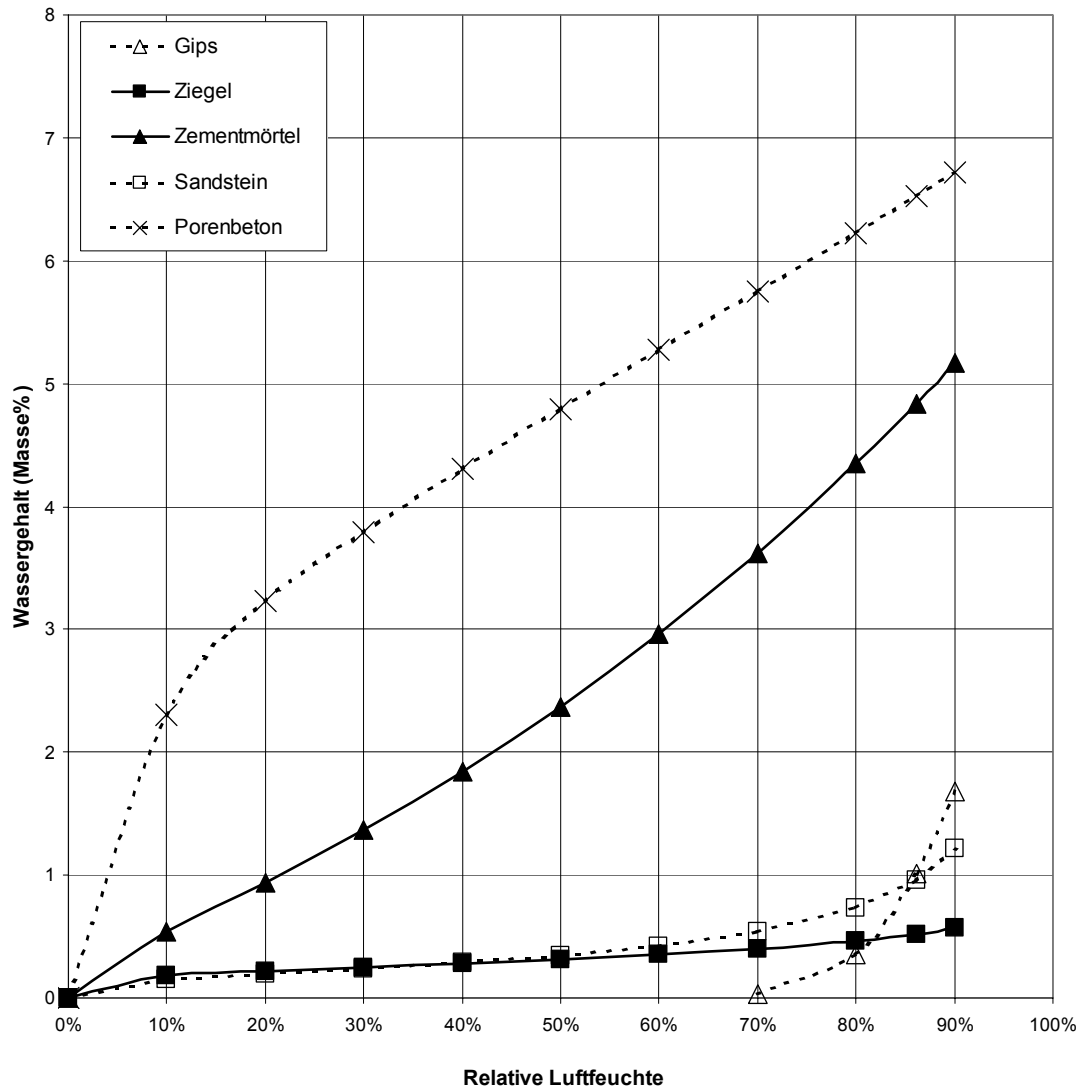
8. Anlagen

- Anlage 1: Schematische Darstellung einer vollständigen Sorptionsisotherme
- Anlage 2: Beispiele für Sorptionsisothermen mineralischer Baustoffe
- Anlage 3: Beispiel einer erweiterten Sorptionsisotherme
- Anlage 4: Hygroskopische Ausgleichsfeuchten unterschiedlicher Baustoffe
- Anlage 5: Praktische Wassergehalte von Baustoffen
- Anlage 6: Mitglieder der Arbeitsgruppe

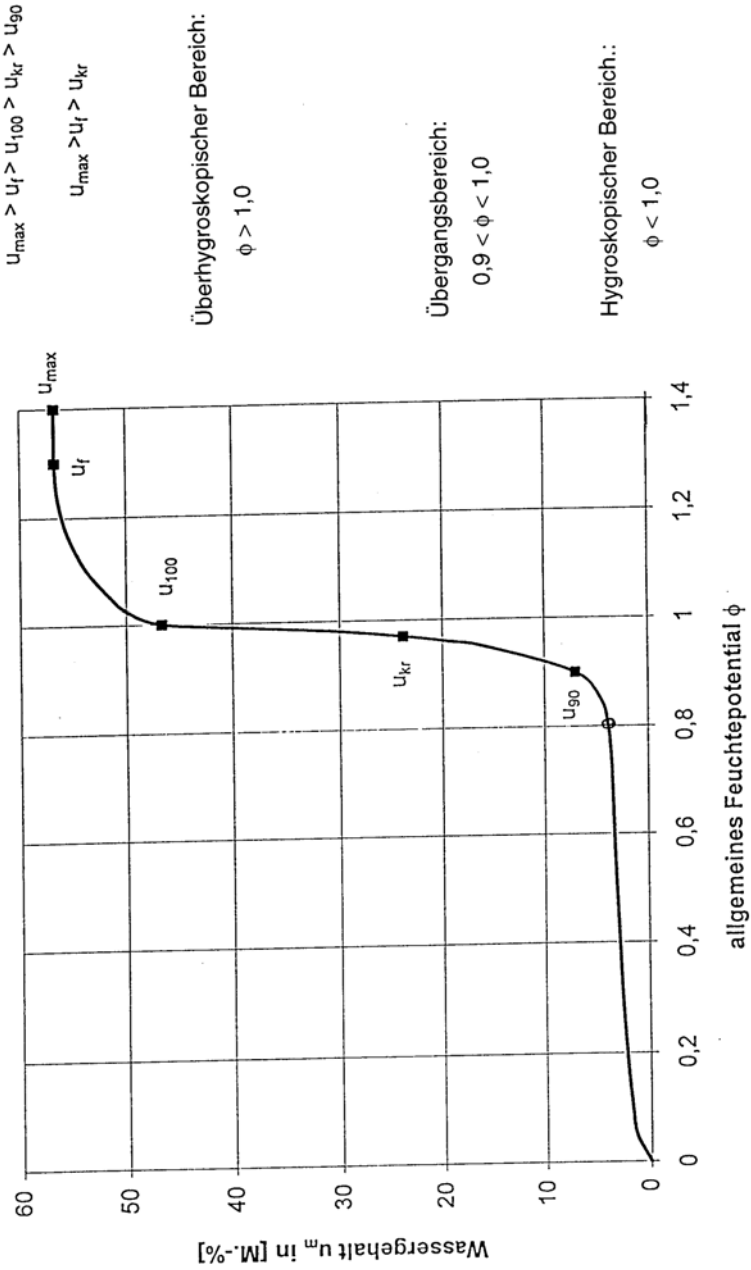
**Schematische Darstellung einer vollständigen Sorptionsisotherme
(Desorption und Adsorption) am
Beispiel Porenbeton**



Beispiele für Sorptionsisothermen mineralischer Baustoffe



Feuchtespeicherfunktion von Porenbeton
(erweiterte Sorptionsisotherme) [2:3]



Hygroskopische Ausgleichsfeuchten unterschiedlicher Baustoffe

Entnommen aus WTA-Merkblatt 4-5-99/D:
" Beurteilung von Mauerwerk - Mauerwerksdiagnostik"

Tabelle 7: Hygroskopische Ausgleichsfeuchten unterschiedlicher Baustoffe
(Angaben in Masse%)

Baustoff	Hygroskopische Ausgleichsfeuchten in Masse% (entsprechende relative Luftfeuchte)	
historische Vollziegel	< 2 bis 3 (75 % rel. LF)	
Vollziegel (Rohdichte 1900)	< 1 (80 % rel. LF)	
porosierter Hochlochziegel (Rohd. 800)	0,75 (80 % rel. LF)	
Kalkputz, -mörtel	< 0,5 (75 % rel. LF)	
Kalkzementputz	< 1,5 (75 % rel. LF)	
Kalksandstein (Rohdichte 1900)	1,3 (80 % rel. LF)	
vulkanischer Tuff (Kassel)	< 6 (75 % rel. LF)	< 10 (95 % rel. LF)
Rheinischer Tuff	< 2 (75 % rel. LF)	< 4 (95 % rel. LF)
toniger Sandstein	< 1,3 (75 % rel. LF)	< 2 (95 % rel. LF)
quarzitischer Sandstein		< 0,2 (95 % rel. LF)
karbonatischer Sandstein	< 0,8 (75 % rel. LF)	< 1,3 (95 % rel. LF)
Granit	< 0,1 (75 % rel. LF)	< 0,2 (95 % rel. LF)
Marmor	< 0,01 (75 % rel. LF)	< 0,05 (95 % rel. LF)

Praktische Wassergehalte von Baustoffen

Entnommen aus DIN V 4108-4:1998-10, Anhang A, Tabelle A.1.

Zeile	Baustoffe	Massebezogener Wassergehalt u_m in %
1	Ziegel	1
2	Kalksandstein	3
3	3.1 Beton mit geschlossenem Gefüge mit dichten Zuschlägen	2
	3.2 Beton mit geschlossenem Gefüge mit porigen Zuschlägen	13
4	4.1 Leichtbeton mit haufwerksporigem Gefüge mit dichten Zuschlägen nach DIN 4226-1	3
	4.2 Leichtbeton mit haufwerksporigem Gefüge mit porigen Zuschlägen nach DIN 4226-2	4,5
5	Porenbeton	6,5
6	Gips, Anhydrit	2
7	Gußasphalt, Asphaltmastix	0
8	Anorganische Stoffe in loser Schüttung; expandiertes Gesteinglas (z. B. Bläherlit)	1
9	Mineralische Faserdämmstoffe aus Glas-, Stein-, Hochofenschlacken-(Hütten) Fasern	1,5
10	Schaumglas	0
11	Holz, Sperrholz, Spanplatten, Holzfaserplatten, Schilfrohrplatten und -matten, organische Faserdämmstoffe	15
12	Holzwolle-Leichtbauplatten	13
13	Pflanzliche Faserdämmstoffe aus Seegras, Holz-, Torf- und Kokosfasern und sonstigen Fasern	15
14	Korkdämmstoffe	10
15	Schaumkunststoffe aus Polystyrol, Polyurethan (hart)	1

Mitglieder der WTA- Arbeitsgruppe 4.11

Dipl.-Ing.
Jeanette Brockmann
IBAC
Institut für Bauforschung
RWTH Aachen
Schinkelstr. 3
52062 Aachen

Dipl.-Ing.
Jörg de Hesselle
IBE
Ingenieurbüro für Bauwerkserhaltung
Mecklenburger Str. 6
53773 Hennef

Dipl.-Ing.
Hans Fitz
Bautest GmbH
Mühlmahdweg 25a
86167 Augsburg

Stephan Keppeler
ISOTECH Franchise-Systeme GmbH
Paffrather Str. 80
51465 Bergisch Gladbach

Dr.
Jürgen Legrum
Heilgebaumstr. 9
67596 Dittelsheim-Hesloch

Gerd Pleyers
Pleyers.bau innovationen GmbH
Bertha-von-Suttner-Str. 33
52146 Würselen

Prof. Dr.-Ing. Günter Rieche
Institut für Bautenschutz, Baustoffe und
Bauphysik
Daimlerstr. 18
70736 Fellbach

Dipl.-Ing.
Tobias Ritzer
Marktplatz 2
91785 Pleinfeld

Dipl.-Phys.
Udo Schlemm
TU-Hamburg-Harburg
Eißendorfer Str. 42
21071 Hamburg

Dipl.-Ing. (FH)
Uwe Schürger
Institut für Bautenschutz, Baustoffe und
Bauphysik
Daimlerstr. 18
70736 Fellbach

Dr.
Horst Schuh
Labor Dr. Ettl / Dr. Schuh
Imhofstr. 3
80805 München

Dipl.-Ing.
Jürgen Weber
Bürogemeinschaft für Bausach-
verständige
Schorlemmer Str. 3
04155 Leipzig

Dipl.-Ing. (FH)
Katja Zepf
Institut für Bautenschutz, Baustoffe und
Bauphysik
Daimlerstr. 18
70736 Fellbach

Verzeichnis Schriftenreihe Institut Prof. Rieche

Heft:

74	Sachstandsbericht (State of the Art Report) zur Messung der Feuchte von mineralischen Baustoffen	2002
73	Neue Feuchtigkeitsprüfung und Beurteilung in Estrichen/Beton	2003
72	Zulässige Rissbreiten in Parkhausbeschichtungen	2003
71	Baupraktische Erfahrungen bei der Instandsetzung chloridbelasteter Parkhäuser aus Stahlbeton	2002
70	Fugenausbildung in Fußböden - Ausführung, Bemessung, Abdichtung	2002
69	Fugenausbildung in Wänden - Werkstoffe - Bemessung - Abdichtung	2002
68	Stahlbeton- Grundlagen für die Instandsetzung (Die neue DIN 1045, europäische und nationale Normung)	2002
67	Abdichtungsprinzipien für flach geneigte, genutzte Flächen	2001
66	Der fachgerechte Sockel - Wärme- und Feuchteschutz, Dauerhaftigkeit und Gestaltung	2001
65	Die Kunst der Bauwerksabdichtung - Abdichtung von Kellern	2000
64	Planung, Ausschreibung und Ausführungsüberwachung von Betoninstandsetzungsarbeiten an Balkonen und Loggien	2000
63	Einsatzmöglichkeiten und -grenzen für rissüberbrückende Beschichtungen	1995
62	Erforderliche Oberflächenzug- und Haftzugfestigkeit von Beton	1995
61	Die Wirkung der Untergrundvorbehandlung durch das Kugelstrahlen auf Beton, Magnesia-Estriche und Anhydrit-Estriche	1995
60	Fugenabdichtungen in Wänden Werkstoffe - Bemessung - Abdichtung	1999
59	Fugen in Fußbodenkonstruktionen Bemessen der Fugenabstände und der Fugenbreite	1999
58	Einfluss mineralischer Untergründe auf die osmotische Blasenbildung bei Kunststoffbeschichtungen	1999

57	Bauweisen für elektrisch ableitfähige Fußböden	2000
56	Problembereich Sockel Kumulation der Beanspruchung aus Fassade und Erdreich; Lösungen zum Wärme- und Feuchteschutz sowie zur Dauerhaftigkeit und Gestaltung	1999
55	Stahlbeton - Grundlagen	1999
54	Schutz und Instandsetzung von Stahlbeton	1991
53	Balkoninstandsetzung Planungsgrundlagen für Balkone aus Stahlbeton	1998
52	Galvanisch verzinkte Schrauben in Kunststoffdübeln zur Verankerung der Unterkonstruktion für Fassadenbekleidungen in Porenbeton	1998
51	Bewährte Wärmedämm-Verbundsysteme und neue Entwicklungen	1997
49	Gesichtspunkte zur Auswahl des „richtigen“ Wärmedämm- Verbundsystems	1995
47	Wärmedämm-Verbundsysteme richtig aufgebaut	1994
45	Industrieböden und Gewässerschutz Anforderungen, Planung und Ausführung	1993
44	Befahrene Industriebeläge mit Wärmedämmung	1993
43	Wie können Verarbeitungsfehler an Wärmedämm-Verbundsystemen verhindert werden?	1992
42	Wie können Verarbeitungsfehler an Wärmedämm-Verbundsystemen verhindert werden?	1991
40	Sind Wärmedämm-Verbundsysteme dauerhaft?	1990
39	Die Schadensdiagnose und das Instandsetzungskonzept bei Schäden an Stahlbetonbauwerken	1989
38	Rissüberbrückung bei Industriefußböden	1988

- | | | |
|----|---|------|
| 37 | Einfluss von rückseitiger Feuchtigkeit auf Estriche und Beschichtungen | 1988 |
| 32 | Über die Langzeitbewährung von Hartschaumplatten aus expandiertem Polystyrol (EPS) in Wärmedämm-Verbundsystemen | 1985 |

WTA Referat 4 Mauerwerk, WTA Arbeitsgruppe 4.11
Leiter: Günter Rieche

Sachstandsbericht zur Messung der Feuchte von mineralischen Baustoffen

Der Sachstandsbericht »Messung der Feuchte von mineralischen Baustoffen« entstand im Rahmen der Erarbeitung des gleichlautenden WTA-Merkblatts. Er gibt eine Übersicht und eine Bewertung der existierenden Messverfahren. Der Inhalt des WTA-Merkblatts »Messung der Feuchte von mineralischen Baustoffen« ist ebenfalls Bestandteil dieses Sachstandsberichtes. Das Merkblatt besteht nämlich im Wesentlichen aus den Abschnitten 2.1 bis 2.8 sowie den Abschnitten 3 und 4.

Der Sachstandsbericht beschreibt in Abschnitt 2 die Definitionen der feuchtetechnischen Kennwerte der Baustoffe. In Abschnitt 3 werden Ausführungen zu der Art der in Frage kommenden Messverfahren bzw. –methoden gemacht. Der Abschnitt 4 behandelt die praxiserprobten Messverfahren bzw. Methoden, nämlich die Darr-Methode und die CM-Methode sowie den Folientest und das Luftfeuchte-Ausgleichsverfahren. Diese vier Verfahren sind auch Bestandteil des WTA-Merkblatts. Außerdem wurde im Abschnitt 4 auch die augenscheinliche Prüfung des Abtrocknens feuchter Zonen als Verfahren aufgenommen. Im Abschnitt 5 werden alle anderen Verfahren behandelt, die nicht in das Merkblatt aufgenommen wurden.

Es ist das Ziel der Messung der Feuchte von Baustoffen, eine Grundlage für die Instandsetzungsplanung von Bauwerken zu schaffen. Dabei muss man sich bewusst sein, dass die an den Baustoffen ermittelten Werte für die Feuchte allein noch keine Beurteilung des Feuchtezustands der Konstruktion bzw. des Bauwerkes insgesamt erlauben. Für eine solche Beurteilung ist die Kenntnis mehrerer feuchtetechnischer Kennwerte der Baustoffe und der klimatischen Umgebungsbedingungen sowie der konstruktive Aufbau der Bauteile erforderlich.