

DGZfP-Berichtsband BB 69-CD
Vortrag H2

Feuchtemessung an Baustoffen – Zwischen Klassik und Moderne

W. Leschnik, Technische Universität Hamburg-Harburg

Kurzfassung

Der Feuchtemessung an Baustoffen kommt bei der Bauwerksdiagnostik und bei der Qualitätsbewertung von Instandsetzungsmaßnahmen eine große Bedeutung zu. Nach wie vor stehen aber für eine qualifizierte Feuchtemessung nur die klassischen gravimetrischen Methoden zur Verfügung, die zerstörend (Probenentnahme) und langwierig (Labortrocknung) sind. Ziel zahlreicher Untersuchungen war und ist es, einen Feuchtemesser zu entwickeln, der sich durch eine einfache, aber zuverlässige Messung auszeichnet, vor Ort Ergebnisse liefert, zerstörungsfrei oder zumindest zerstörungsarm arbeitet, tiefenaufgelöst messen kann, keine Empfindlichkeit gegenüber baurelevanten Salzen zeigt und Wiederholungsmessungen zuläßt. Im folgenden wird darüber berichtet, welche Verfahren für die Feuchtemessung an Baustoffen in Frage kommen und in wieweit auf der Basis dieser Verfahren Meßgeräte entwickelt wurden, entweder als Meßgeräte, die bereits im Handel erhältlich sind, oder als Prototypen, die von wissenschaftlichen Einrichtungen entwickelt wurden. Schließlich wird der derzeitige Stand der Feuchtemessung diskutiert und ein Ausblick gegeben.

Abstract

In the case of a moisture damage at buildings the measurement of the moisture content of building materials is of great importance for diagnostics and quality control. However, a sophisticated measurement is still only possible by application of the destructing and prolonged gravimetrical methods. It was the aim of the efforts of several researchers to develop a new moisture meter. This should stand out for a measurement which is simple but sophisticated, repeatabe, non- or less destructive, independent of relevant salts and showing the moisture profile. It will be reported once on the methods which are suitable for application in civil engineering and second on the results of the investigations and developments of specialist firms and researchers in developing a new moisture meter. The results obtained will be discussed and an outlook will finish the contribution.

1. Einleitung

Eine erhebliche Zahl von Schäden an Bauwerken liegt in Feuchteeinwirkung begründet. Zu den häufigen Ursachen zählen Undichtigkeiten am Bauwerk, z. B. im wasserführenden Bodenbereich oder im berechneten Fassadenbereich. Da beim Vorhandensein von Wasser im Bauteil vorhandene Salze in Lösung gehen, werden diese beim Wassertransport mitbewegt und lagern sich nahe den Trocknungsbereichen ab. Die hygroskopischen Eigenschaften vieler Salze können eine Wassereinlagerung bewirken, die häufig mit einer erheblichen Volumenvergrößerung verbunden ist. Damit sind Schäden vorprogrammiert, selbst wenn das Bauteil wieder ausgetrocknet ist.

Zur Schadensdiagnose sind Feuchtemessungen an Bauteilen unerlässlich, lassen sich doch wirksame Sanierungsmaßnahmen nur ergreifen, wenn Klarheit über Umfang und Ursachen eines Schadens besteht. Aber auch eine Überwachung und eine abschließende Erfolgskontrolle sind nur durch begleitende Feuchtemessungen möglich.

Bei Bauwerksinstandsetzungen kommt neben der Kenntnis des Feuchtegehalts auch der Kenntnis des Salzgehaltes von Bauteilen, sowie deren laufende Kontrolle während der Sanierung eine besondere Bedeutung zu.

2. Feuchtegehalt als Meßgröße

Übliche Baustoffe wie Ziegel, Kalksandstein, Sandstein, Mörtel, Putze usw. stellen kapillar-poröse Stoffe dar, die auch im trockenen Zustand einen gewissen Feuchtegehalt aufweisen. Dabei handelt es sich zum einen um chemisch im Baustoff gebundenes Wasser (z. B. Hydrate) mit der höchsten Bindungsenergie, zum anderen um monomolekular an den Porenoberflächen adsorbiertes Wasser mit hoher Bindungsenergie (physikalisch-chemische Bindung). Diese Anteile sind als feste Bestandteile des Baustoffs anzusehen. Sie lassen sich, abgesehen von einigen Ausnahmen, nur bei Trocknung mit hoher Temperatur aus dem Bauteil lösen. Für die praktische Feuchtemessung sind sie ohne Bedeutung. Mit zunehmender Stoffeuchte nimmt die Bindungsenergie des aufgenommenen Wassers ab. Neben polymolekular adsorbiertem Wasser, sowie kapillar gebundenem Wasser mit geringer Bindungsenergie (physikalisch-kapillare Bindung), findet man in den Poren mehr oder weniger freies Wasser mit der geringsten Bindungsenergie. Diese letztgenannten Anteile sind für den praktischen Feuchtegehalt eines Bauteils maßgebend, da sie von den gegebenen Randbedingungen wie Luftfeuchte und anderen abhängen, beispielsweise ob ein Bauteil dem Grundwasser oder Schlagregen ausgesetzt ist. Die Bindungsenergie des Wassers im Baustoff hängt nicht nur von der Art der Bindung, sondern auch von der Temperatur ab.

Wegen dieser komplexen Abhängigkeiten gibt es keine physikalisch eindeutige Definition eines trockenen Bauteils. Vielmehr wird ein Bauteil dann als trocken bezeichnet, wenn beim Trocknen bei einer bestimmten Temperatur praktisch keine Gewichtsveränderung mehr eintritt (Darr-Wäge-Methode, "Trocknen bis zu Massekonstanz"). Diese Trocknungstemperatur muß so gewählt sein, daß chemisch im Baustoff gebundenes Wasser nicht gelöst wird (z. B. Trocknung von Sandstein bei 105 °C und von Gips bei 40 °C). Die Darr-Wäge-Methode stellt die Bezugsmethode

für die Feuchtemessung dar. Dies ist aber wegen der unklaren Definition nicht unumstritten.

Der Feuchtegehalt eines Bauteils, auch Feuchtesatz genannt, ist als massebezogener Feuchtegehalt u_m definiert als das Verhältnis von Wassermasse zur Masse des trockenen Bauteils und als volumenbezogener Feuchtegehalt u_v als Verhältnis von Volumen des Wassers zum Volumen des trockenen Bauteils.

3. Forderungen an einen Feuchtemesser

Die klassische Feuchtemessung besteht nach wie vor in einer zerstörenden Probenentnahme vor Ort und einer Analyse der Probe im Labor, meist nach der Darr-Wäge-Methode.

Das Ziel einer Neuentwicklung eines Feuchtemessers besteht darin, einen Ersatz für die klassische Methode zu finden, also ein Verfahren zu finden und ein Gerät zu entwickeln, mit dem sich die Feuchte von Bauteilen zuverlässig vor Ort bestimmen läßt. Dabei sollte nur der Feuchteanteil gemessen werden, der auch durch Trocknung ausgetrieben werden kann, also das mit geringerer Energie gebundene Wasser (physikalisch-kapillar gebundenes und freies oder quasi-freies Wasser), nicht aber das fest gebundene Wasser (chemisch und physikalisch-chemisch gebundenes Wasser).

Ein Feuchtemesser sollte möglichst wenig zerstörend arbeiten, so daß Messungen vor Ort, insbesondere Wiederholungsmessungen, ohne gravierende Eingriffe in die Bausubstanz, insbesondere ohne Probenentnahme, möglich sind. Eine Auflösung der Feuchtemessung in der Bauteiltiefe ist wünschenswert. Der Feuchtemesser sollte höchst feuchteselektiv arbeiten und sich weitgehend störungssicher verhalten. Insbesondere sollte die Messung unabhängig vom Gehalt an gelösten Salzen im Bauteil sein. Schließlich sind noch Forderungen an Genauigkeit, Schnelligkeit und Sicherheit zu nennen, letzteres auch im Hinblick auf eine mögliche Gesundheitsgefährdung, z. B. durch schädliche Strahlung.

Im folgenden wird über den Stand der Technik und der Forschung bei der Feuchtemessung an Baustoffen berichtet werden.

4. Meßverfahren und -geräte zur Feuchtemessung an Baustoffen

4.1 Übersicht über Verfahren

Für die Feuchtemessung an Stoffen kommt grundsätzlich eine ganze Anzahl von Verfahren in Frage. Einen Überblick zu Feuchtemeßverfahren allgemein findet sich z. B. bei BERLINER [Ber80]. Für die Anwendung im Bauwesen in Frage kommende Verfahren werden z. B. von KAŠPAR genannt [Kas78], Anwendungen für das Bauwesen werden von verschiedenen Autoren in [MFM97] beschrieben.

Im folgenden sollen Verfahren und Geräteentwicklungen für die Anwendung im Bauwesen dargestellt und diskutiert werden. Soweit Fehlerangaben gemacht werden, stellen sie absolute Fehler bei der Messung der Stoffeuchte dar.

4.2 Gravimetrische Methoden

Die gravimetrischen Methoden stellen die klassischen, zerstörenden Verfahren zur Materialfeuchtebestimmung dar. Dem zu untersuchenden Bauteil wird eine Bohrprobe entnommen (Bohrkern oder Bohrmehl), die im Labor gewogen, getrocknet und wieder gewogen wird. Die festgestellte Gewichts Differenz stellt den Wassergehalt der Probe dar. Die gravimetrische Trocknungs-Wäge-Methode, auch Darr-Wäge-Methode genannt, stellt international die standardisierte Feuchtemeßmethode dar und dient anderen Meßmethoden als Bezugsverfahren. Die Trocknung der Probe erfolgt meist durch Erwärmung der Bohrprobe im Trockenschrank. Getrocknet wird bei einer Temperatur, bei der kein chemisch gebundenes Wasser (Hydratwasser) freigesetzt wird. Für die meisten mineralischen Baustoffe beträgt die Trockentemperatur 105°C, bei einigen ist sie niedriger, so z. B. bei Gips 40°C.

Fehler bei der Feuchtebestimmung können auftreten durch Entweichen von Wasser beim Bohren infolge zu starker Erwärmung sowie zwischen der Probenentnahme und der ersten Wägung durch Undichtigkeit der Behältnisse, durch zu hohe Luftfeuchtigkeit im Trockenschrank beim Trocknen, insbesondere bei niedrigen Trocknungstemperaturen und sommerlichen Außenluftbedingungen, durch hygroskopische Wasseraufnahme zwischen den Wägungen sowie durch ungeeignete Trocknungstemperatur.

Untersuchungen haben gezeigt, daß bei der Entnahme von Bohrproben auf eine möglichst kurze Bohrzeit zu achten ist, um eine zu starke Erwärmung des Bohrgutes zu vermeiden. Auch ist es günstiger, an Stelle von Bohrkernen mit kleinem Durchmesser, z. B. 16 mm Durchmesser, Bohrmehl mit einem Bohrhammer zu entnehmen, da kleine Bohrkern sich vergleichsweise stark erwärmen. Für Materialien geringerer Druckfestigkeit ergaben sich keine Unterschiede bei der Feuchtebestimmung mittels größerem Bohrkern (Durchmesser 50 mm und mehr) und Bohrmehl (Bohrlochdurchmesser 16 mm), bei Materialien höherer Druckfestigkeit erwies sich die Bohrkernentnahme als genauer. [RLH95]

Einige Fehler lassen sich auch durch Vakuumtrocknung vermeiden. Dabei wird die Probe in einen Exsikkator gebracht und durch Dampfdrucksenkung eine Trocknung bei niedriger Temperatur durchgeführt, so daß eine chemische Veränderung der Probe ausgeschlossen ist. Untersuchungen von KÜNZEL UND KIESSL [KKi90] an Natursandsteinproben zeigen, daß Konvektions- und Vakuumtrocknung dann zu etwa den gleichen Restfeuchten führen, wenn bei der Konvektionstrocknung bei niedrigen Temperaturen mit vorgetrockneter Luft gearbeitet wird. Eine Trocknung ist auch im gefrorenen Zustand der Probe möglich, wobei dann auch jeglicher Transport von Salzen bei der Trocknung unterbunden wird. Grundsätzlich müssen bei der Vakuumtrocknung insbesondere bei dickeren Proben längere Trocknungszeiten in Kauf genommen werden, so daß sich die "gesteuerte" Konvektionstrocknung in der Regel als günstiger erweist.

Ein wesentlicher Nachteil der gravimetrischen Methoden besteht darin, daß es sich um zerstörende Verfahren handelt. Insbesondere bei Bohrkernentnahme muß ein nicht unerheblicher Eingriff in die Bausubstanz vorgenommen werden, zumal für eine fundierte Diagnose häufig eine ganze Reihe von Proben zu entnehmen ist. Eine wiederholte Feuchtemessung zur Kontrolle des Verlaufs oder des Erfolges einer Saniermaßnahme ist am selben Ort nicht möglich. Vielmehr sind weitere Proben an

benachbarten Stellen zu entnehmen, was zu einer weiteren Zerstörung des Bauteils, aber auch zu Fehlaussagen führen kann.

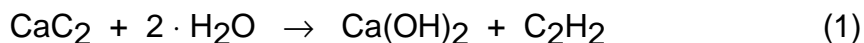
Ein weiterer Nachteil der gravimetrischen Methoden besteht darin, daß die Meßergebnisse nicht sofort, sondern erst nach Laborauswertung zu Verfügung stehen.

Letztlich kommt den gravimetrischen Methoden aber eine bevorzugte Stellung bei der Feuchtebestimmung an Baustoffen zu. Bei sorgfältigem Vorgehen lassen sich viele der genannten möglichen Fehler vermeiden. Dann kann die Materialfeuchte mit einer Genauigkeit von $\pm 0,5\%$ bestimmt werden. Allerdings liegt die üblicherweise in der Baupraxis erzielte Genauigkeit doch merklich niedriger.

4.3 Chemische Methoden

Chemische Methoden finden im Bauwesen häufiger Anwendung, da sie vor Ort eingesetzt werden können. Dabei wird die chemische Reaktion eines Stoffes auf Wasser beobachtet und analysiert. Dem Baustoff wird eine kleine Materialprobe von 5g bis 20g entnommen. Diese Probe muß unbedingt sorgfältig zerkleinert werden. Wie bei der gravimetrischen Methode kann die Probe nur einmal verwendet werden, für weitere Messungen, z. B. zu einem späteren Zeitpunkt, sind weitere Proben zu entnehmen.

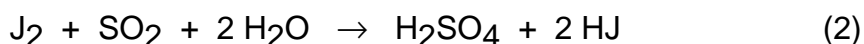
Beim Calciumcarbid-Verfahren wird die zerkleinerte Materialprobe in einem Druckbehälter mit Calciumcarbid vermischt. Dabei entsteht Azetylen gas, dessen Menge ein Maß für den Wassergehalt der Probe ist:



Die Anwendung dieses Verfahrens bedarf einiger Erfahrung, da die benötigte Probenmenge vom Feuchtegehalt der Probe abhängt. Bei der Zerkleinerung der Probe entweicht - insbesondere bei harten Stoffen - leicht Materialfeuchte, was zu mehr oder minder großen Meßfehlern führt. Daher ist praktisch nur mit einer Genauigkeit von ca. $\pm 3\%$ zu rechnen. Dies haben auch Untersuchungen an Ziegeln mit dem Calciumcarbid-Verfahren im Vergleich zur Trocknungs-Wäge-Methode mit großen Bohrkernen gezeigt [RLH95].

Trotz der vergleichsweise geringen Genauigkeit kommt der Calciumcarbid-Methode in der Baupraxis eine relativ große Bedeutung zu, da sich mit dieser Methode vor Ort schnell der Feuchtegehalt eines Baustoffs bestimmen läßt. Im Übrigen ist das Verfahren als zerstörend einzustufen, jedoch ist die benötigte Bohrprobe im Vergleich zu Bohrkernen klein.

Beim Karl-Fischer-Verfahren findet eine Titration statt:



Jod, Schwefeldioxyd und Wasser verbinden sich zu Schwefelsäure und Jodwasserstoff, wobei die braune Färbung des Jod verloren geht. Am Ende der Titration verfärbt sich die Probe bräunlich, so daß dieser Zeitpunkt visuell bestimmt werden kann. Der Feuchtegehalt der Probe wird aus der Menge der erforderlichen Karl-Fischer-Lösung ermittelt. Mit diesem Verfahren lassen sich bereits Spuren von Wasser nachweisen. Bei Anwendung auf feste Stoffe ist eine Pulverisierung der Probe un-

bedingt erforderlich, was wegen dem Entweichen von Wasser ähnlich wie bei der Calciumcarbid-Methode zu mehr oder minder großen Meßfehlern führen kann. In der Baupraxis kommt der Karl-Fischer-Methode keine große Bedeutung zu.

4.4 Thermometrische Verfahren

Bekanntlich hängt die Wärmeleitfähigkeit eines porösen Stoffes von dessen Feuchtegehalt ab. Dieses Verhalten läßt sich benutzen, um den Feuchtegehalt zu bestimmen. Ist die Wärmeleitfähigkeit eines Stoffes und deren Abhängigkeit von der Materialfeuchte bekannt, läßt sich aus der Messung der Wärmeleitfähigkeit die Materialfeuchte bestimmen.

Am bekanntesten ist die Sondenmethode. Ein Widerstandsdraht wird in das Bauteil eingebracht und elektrisch beheizt. Aus der Temperatur in unmittelbarer Umgebung des Drahtes läßt sich unter Kenntnis der Wärmeleitfähigkeit des Materials der Feuchtegehalt ableiten. Eine Auflösung in Bauteiltiefe ist möglich. Für das Einbringen der Sonde genügt ein Lochdurchmesser kleiner als 1 cm. Bei Anwendung dieser Methode auf ein bestimmtes Bauteil empfiehlt sich eine Kalibrierung durch eine Feuchtemessung nach dem Trocknungs-Wäge-Verfahren.

In den 70er Jahren haben VOS [Vos70]) und BOEKWIJT [Boe79] an der Entwicklung einer solchen Sonde gearbeitet. STOPP et al. entwickelten eine entsprechende Sonde, mit der sie Feuchtemessungen an Dämmstoffen durchführten [SHä92] [SHF95].

Der Vorteil dieser Methode besteht darin, daß sie zerstörungsarm arbeitet und eine Auflösung der Feuchtemessung in der Bauteiltiefe erlaubt. Allerdings bestehen noch zahlreiche Probleme bei der praktischen Anwendung der Methode. So treffen die geometrischen Voraussetzungen des idealisierten theoretischen Modells in der Praxis nicht zu und führen zu sich teilweise widersprechenden Forderungen bei der Durchführung der Messung.

4.5 Hygrometrische Verfahren

Jeder Baustoff nimmt aus der Luft Wasser auf, das an dessen Porenoberflächen angelagert wird (Sorption). Die Menge des aus der Luft aufgenommenen Wassers hängt vom Baustoff und der relativen Feuchte der Luft ab. Sinkt die relative Feuchte der Luft, gibt der Baustoff wieder Feuchte an die Luft ab (Desorption). Diese Vorgänge werden durch die Sorptionsisothermen gekennzeichnet. Sind die Sorptionsisothermen eines Bauteils bekannt, dann läßt sich aus der Luftfeuchte in einem abgeschlossenen Volumen innerhalb des Bauteils die Materialfeuchte der Umgebung angeben. Problematisch ist, daß die Sorptionsisothermen zum einen eine Temperatur- und Materialabhängigkeit sowie eine Hysteresese zeigen, zum anderen teils sehr geringe, teils sehr hohe Gradienten aufweisen.

Daher wird diese Methode nur zur Beobachtung von Feuchtevorgängen eingesetzt, z. B. beim Abbinden von Beton. MARQUARDT setzte dieses Verfahren erfolgreich bei der Beobachtung des Feuchtegehaltes von Betonsandwichwänden [Mar93] ein. Baupraktisch ist dieses Verfahren jedoch nicht relevant.

4.6 Akustische Verfahren

Die akustischen Eigenschaften von Baustoffen werden im Hörbereich und im Ultraschallbereich unter anderem von der Feuchte bestimmt. WILFER benutzte die akustische Impedanz im Bereich des Hörschalls als Meßgröße für die Feuchte [Wil88]. SCHWARZ und VENZMER entwickelten einen Resonator, dessen Resonanzfrequenz und Güte sich durch den umgebenden Baustoff ändert [Sve95]. Wegen der Abhängigkeit der akustischen Parameter von zahlreichen weiteren Einflußgrößen lassen sich diese Verfahren nur bei einfachen Situationen bzw. für orientierende Zwecke anwenden.

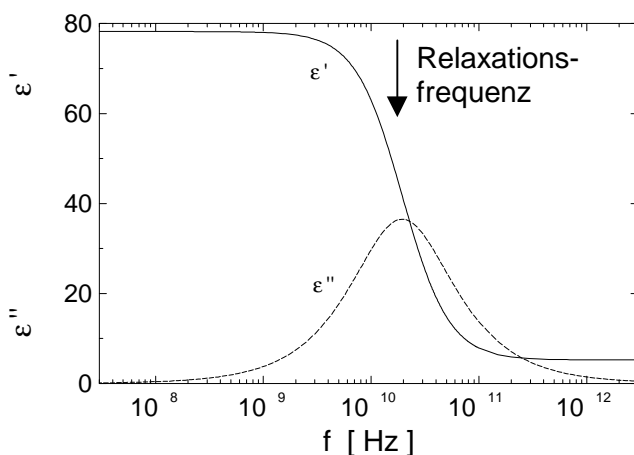
4.7 Elektrische Verfahren

4.7.1 Dielektrisches Verhalten von Baustoffen

Bei den elektrischen Verfahren macht man sich die Abhängigkeit der elektrischen Eigenschaften poröser Baustoffe von der Feuchte zunutze. Kennzeichnende Größe ist die komplexe (relative) Dielektrizitätszahl ϵ :

$$\epsilon = \epsilon' - j \cdot \epsilon'' \quad (3)$$

Der Realteil ϵ' der Dielektrizitätszahl stellt die klassische Dielektrizitätszahl dar, die z. B. zur Kapazitätsberechnung eines Kondensators herangezogen wird, der Imaginärteil ϵ'' die dielektrischen Verluste. Die Dielektrizitätszahl ist stark frequenzabhängig. Für trockene Baustoffe gilt weitgehend frequenzunabhängig $\epsilon' \approx 3 \dots 7$ und $\epsilon'' \approx 0$. Für Wasser finden sich unterhalb ca. 1 GHz Werte von $\epsilon' \approx 80$ und für ϵ'' sehr kleine Werte (Bild 1). Mit zunehmender Frequenz steigen die dielektrischen Verluste (ϵ'') an und zeigen im Bereich der Relaxationsfrequenz ein Maximum, danach fallen sie wieder ab. Diese Relaxationsfrequenz liegt für freies Wasser bei ca. 16 GHz, mit zunehmender Wasserbindung sinkt sie zu tieferen Frequenzen. Der Realteil ϵ' der Dielektrizitätszahl sinkt oberhalb von ca. 1 GHz zunächst langsam, dann zunehmend rascher ab, erreicht bei der Relaxationsfrequenz etwa den Wert $\epsilon'' \approx 40$ und nimmt bei Frequenzen oberhalb vom 100 GHz einen Wert von $\epsilon'' \approx 7-8$ ein. Die Dielektrizitätszahl eines Baustoffs stellt damit eine Größe dar, die sich hervorragend für die Feuchtemessung an Baustoffen eignet, wobei eine hohe Feuchteempfindlichkeit gegeben ist.



*Bild 1
Realteil ϵ' und Imaginärteil ϵ'' der komplexen Dielektrizitätszahl von Wasser bei 25 °C in Abhängigkeit von der Frequenz*

Letztlich stellt sich beim feuchten Baustoff eine Mischung der Dielektrizitätszahlen ein, für deren Beschreibung es verschiedene Ansätze, z. B. mit Quadratwurzel-, Kubikwurzel- oder Logarithmusfunktionen, gibt. Es hängt vom Stoffgemisch und der Frequenz ab, welches Modell am besten geeignet ist. Modellhafte Beschreibungen sind insofern von Bedeutung, daß sich geschlossene Beschreibungen für den Zusammenhang zwischen Feuchtegehalt und Dielektrizitätszahl geben lassen.

Da die Anteile der Dielektrizitätszahl nicht direkt gemessen werden können, erfolgt ihre Bestimmung über die Messung spezifischer Parameter wie Kapazität und Leitwert 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. Der Gehalt an gelösten Salzen stellt eine der wesentlichen Störgrößen der dielektrischen Feuchtemessung dar und hat besonderen Einfluß auf die dielektrischen Verluste ϵ'' . Darüber hinaus finden im Elektrolyten, den ein Baustoff enthält, zumindest bei tieferen Frequenzen, recht komplexe elektrochemische Vorgänge statt, die eine Messung der gewünschten Größen wesentlich erschweren oder ganz unmöglich machen.

4.7.2 Verfahren bei Frequenzen unter 100 MHz

Der niederfrequente Bereich ist meßtechnisch verhältnismäßig einfach zugänglich. Zur Messung des Realteils ϵ' der Dielektrizitätszahl eignen sich z. B. Kondensator-schaltungen (Kapazitätsbestimmung), zur Messung der dielektrischen Verluste ϵ'' können z. B. Elektroden benutzt werden, die eingeschlagen, eingebettet oder aufgesetzt werden (Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit). Die elektrischen Parameter können mit einfachen Brückenschaltungen ermittelt werden. Wegen der einfachen Meßtechnik wird dieser Frequenzbereich bevorzugt für die Entwicklung von Feuchtemeßgeräten herangezogen. Zahlreiche Geräte, die nach diesem Prinzip arbeiten, sind im Handel erhältlich.

Allerdings zeigt sich in der praktischen Anwendung, daß mit einfachen Meßgeräten und bei Frequenzen, die häufig noch unter 1 MHz liegen, eine zuverlässige Messung der Feuchte von Baustoffen nicht möglich ist, was z. B. durch eine Untersuchung von ARENDT eindeutig belegt wird [Are93a][Are93b]. Ursache hierfür ist der gravierende Einfluß gelöster Salze auf die Dielektrizitätszahl, der dem Einfluß der Feuchte überlagert wird. Eine Messung des Feuchtegehaltes wäre nur bei Kenntnis des Salzgehaltes möglich oder umgekehrt, was, abgesehen von Sonderfällen, im allgemeinen baupraktischen Fall nicht gegeben ist. So sind dielektrische Messungen an Holz unkritisch, solange keine salzhaltigen Tränkungs-mittel verwendet wurden. FRIESE berichtet über erfolgreiche Salzgehaltsmessungen an Wandmalereien bei wassergesättigtem Baustoff [Fri91].

Weitere Störungen entstehen durch elektrochemische Phänomene im Elektrolyten, insbesondere in der Nähe der Elektroden. Schließlich ist der Einfluß von Übergangswiderständen und -kapazitäten zwischen Elektroden und Material, insbesondere bei unebenen Materialoberflächen, zu nennen, durch die weitere Fehler entstehen können.

Es wurden verschiedene Versuche unternommen, den Einfluß von Störgrößen zu mindern. Hierzu zählt z. B. der von ALTMANN entwickelte Feuchtefühler, bei dem die Meßelektroden in einen porösen Keramikkörper eingebettet sind [Alt70]. Die von NEUE konzipierte Feuchtesonde arbeitet bereits bei Frequenzen über 100 MHz, ist aber hier insofern interessant, als zur Erzielung eines reproduzierbaren Kontaktes zwischen Elektroden und Material die Elektroden mittels Pneumatik gegen die Wänden eines Bohrlochs gepreßt werden [Neu82].

Nach wie vor hat jedoch hinsichtlich der preiswerten handelsüblichen Geräte die Aussage von ARENDT, der eine Reihe dieser Geräte an Baustoffen mit Feuchte- und Salzbeaufschlagung untersuchte, daß keines der untersuchten Geräte brauchbare bzw. zweifelsfrei interpretierbare Ergebnisse liefere und daß die untersuchten Geräte für eine Vor-Ort-Messung der Feuchtigkeit völlig unbrauchbar seien, Gültigkeit [Are93b].

Im Zusammenhang mit der Entwicklung eines elektrischen Feuchtemessers wurde vom Autor und seinen Mitarbeitern das dielektrische Verhalten von zahlreichen Baustoffen untersucht, wobei Feuchte- und Salzgehalt der Proben systematisch variiert wurden (siehe z. B. [LHP94][Hau99]). Hierbei zeigte sich, daß unterhalb von ca. 1 MHz elektrochemische Effekte wie Doppelschichten und Diffusionsschichten in Elektrodennähe den Einfluß der Probenfeuchte erheblich verdecken. Kontaktprobleme zwischen Elektroden und Materialprobe waren im übrigen durch einen entsprechenden Labormeaufbau minimiert worden, was in der Baupraxis eine zusätzliche Fehlerquelle darstellt. Als besonders gravierend stellte sich der Einfluß gelöster Salze heraus. Gelöste Salze beeinflussen Real- und Imaginärteil der Dielektrizitätszahl in gleicher Weise wie die Feuchte, so daß eine Trennung der Einflüsse nur bei konstantem Feuchte- oder Salzgehalt und Kenntnis desselben möglich wäre (Bild 2, Meßfrequenz 40 MHz, im Vergleich z. B. zu Meßfrequenz 1 GHz). Da es sich bei Feuchte- und Salzgehalt jedoch um Größen handelt, die örtlich und zeitlich veränderlich sind, ist auch eine allgemeine Kalibration nicht möglich. Erst oberhalb von ca. 100 MHz findet sich ein Kennlinienfeld, das sich nach Feuchte- und Salzgehalt aufspaltet, so daß durch die Messung von Real- und Imaginärteil der Dielektrizitätszahl grundsätzlich eine Feuchte- und Salzgehaltsbestimmung möglich wird (Bild 2).

Mit dieser Untersuchung konnte eindeutig nachgewiesen werden, daß der Frequenzbereich unter ca. 100 MHz für eine qualifizierte Messung des Feuchtegehaltes von Baustoffen ungeeignet ist.

4.7.3 Verfahren bei Frequenzen oberhalb 100 MHz

Oberhalb 100 MHz gelangt man in das Dispersionsgebiet des Wassers, in dem die Wassermoleküle eine DEBYE-Relaxation zeigen, die eine Frequenzabhängigkeit der DK und des Verlustfaktors hervorruft. Kennzeichnend im Dispersionsgebiet ist, daß für steigende Frequenzen der Realteil ϵ' der Dielektrizitätszahl von $\epsilon' \approx 80$ auf Werte unter 10 fällt und daß der Imaginärteil ϵ'' einen resonanzähnlichen Verlauf mit einem Maximum bei ca. 16 GHz (freies Wasser, 20°C) aufweist.

Wie bereits erläutert wurde, läßt sich oberhalb von 100 MHz grundsätzlich der Einfluß von Feuchte und Salz auf die Dielektrizitätszahl trennen, wenn sowohl Realteil als auch Imaginärteil der Dielektrizitätszahl bestimmt werden. Darüber hinaus wird

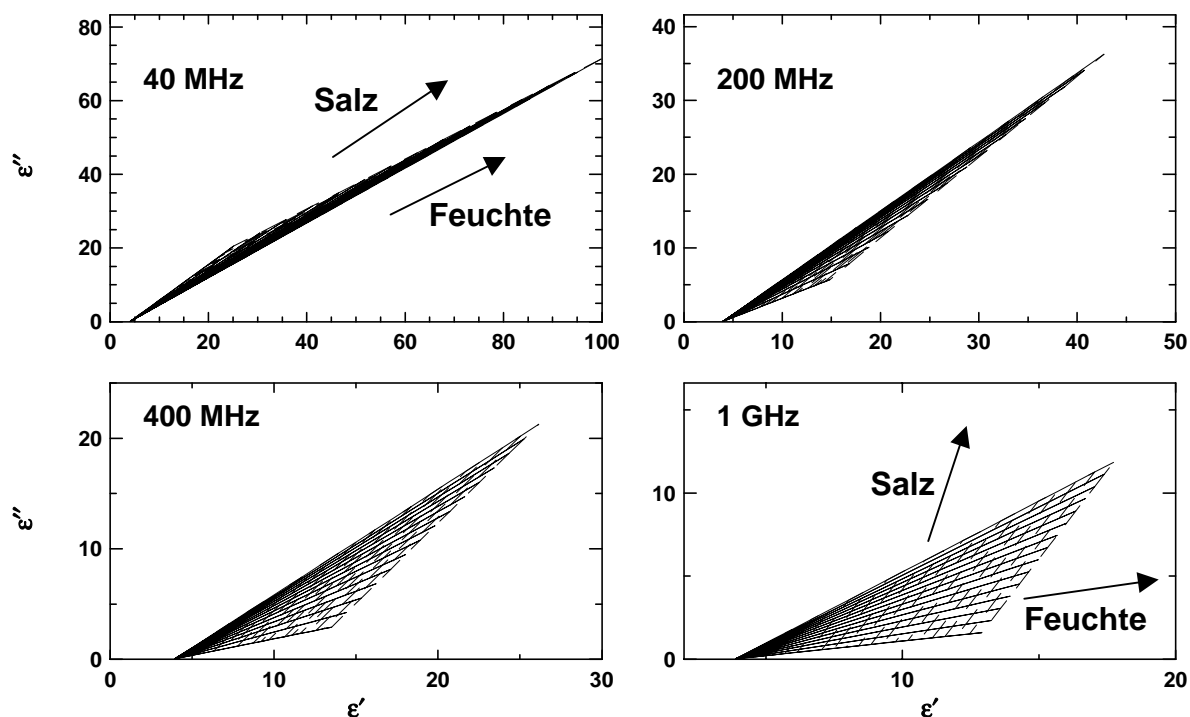


Bild 2:

Komplexes Feld der Dielektrizitätszahl für Neuenfelder Ziegel bei 40, 200, 400 MHz und 1 GHz in Abhängigkeit von Salz- (—) und Feuchte(- - -) mit Termen 1. Ordnung interpoliert. Die Linien gleicher Feuchte unterscheiden sich um 1 Vol.-%, die Linien gleicher Salzgehalte um 0,1 M.-%.

der Einfluß gelöster Salze mit zunehmender Frequenz geringer, was insbesondere den auf den Realteil der Dielektrizitätszahl betrifft. Oberhalb 100 MHz beginnt bereits Wellenausbreitung, so daß Kontaktprobleme und Störungen im Elektrolyten, die bei tieferen Frequenzen von besonderem Einfluß sind, mit steigender Frequenz an Bedeutung verlieren.

Messungen im Frequenzbereich oberhalb 100 MHz, insbesondere im Bereich der Mikrowellen (oberhalb 200 MHz) erfordern eine aufwendigere Technik zum Messen und Auswerten. Eine Reihe von Wissenschaftlern befaßte und befaßt sich mit der Entwicklung von Verfahren und Geräten zur Messung der Feuchte von Baustoffen in diesem Frequenzbereich. In den meisten Fällen liegen Labormeißgeräte vor, die oft nicht bis zur Produktreife weiterentwickelt wurden.

Bei Frequenzen unterhalb der Mikrowellen, also zwischen 100 und ca. 200 MHz, benötigt man Elektroden, die Kontakt zum Baustoff haben. Häufig finden Streufeld-elektroden Anwendung, die aufgesetzt (z. B. Oberflächensonde von GARRECHT, MOUHASSEB et al. [MSG95]) oder in ein Bohrloch eingeführt werden (z. B. Streufeldsonde von NEUE [Neu86], mit pneumatischer Elektrodenanpressung). Für verschiedene Materialien werden in der Regel Kalibrierkurven aufgenommen. Die Eliminierung des Einflusses gelöster Salze durch Auswertung eines zweiten Meßparameters erfolgt nicht.

Die Dielektrizitätszahl ist mit der volumenbezogenen Materialfeuchte verknüpft. Soll die massebezogene Feuchte bestimmt werden, muß die Materialdichte berücksichtigt

werden. Untersuchungen an Schüttgütern, z. B. von MEYER und SCHILZ [MSz81] und von KUPFER und MORGENEIER [KMo88], zeigen, daß durch eine Zwei-Parameter-Messung - z. B. Messung von Dämpfung und Phasenverschiebung - und Quotientenbildung eine Dichtekompensation möglich ist. KUPFER berichtet von der Entwicklung einer Oberflächensonde mit Materialdichtekompensation durch Auswertung von zwei dielektrischen Parametern [Kup96]. Bei der Anwendung auf Baustoffe muß allerdings vorausgesetzt werden, daß kein Salzeinfluß auf einen der Meßparameter vorliegt, da der Einfluß des Salzgehaltes nicht kompensiert werden kann. Weitere Möglichkeiten zur Materialdichtekompensation zeigt KUPFER in [Kup99].

Verschiedentlich wird durch Auswertung des Rückwurfs eines Hochfrequenzimpulses auf die Materialeigenschaften, hier der Feuchte, der Probe geschlossen. Dieses als Time-Domain-Reflectometry bekannte Verfahren wurde z. B. von PLAGGE et al. für Untersuchungen an Erde benutzt [PRR96]. Für die Anwendung an Baustoffen erscheint dieses Verfahren nur begrenzt geeignet, da Inhomogenitäten wie Materialübergänge, Hohlräume, Zuschlagstoffe usw. erhebliche Störungen hervorrufen.

Erste Untersuchungen zur Anwendung einer Mikrowellentechnik für die Feuchtemessung an Bauteilen wurden von WATSON durchgeführt, indem die Dämpfung von Mikrowellen (Frequenz zunächst 500 MHz, später 3 und 10 GHz) beim Durchgang durch ein Mauerwerk gemessen wurde (Einparametermessung) [Wat65][Wat70]. Als Störgröße stellte er, insbesondere bei 500 MHz, den Einfluß von Salzen fest, darüber hinaus Störungen durch Materialinhomogenitäten.

Vorangetrieben wurde die Entwicklung von Feuchtemeßverfahren mit Mikrowellen von verschiedenen Forschern. KAHLE und ILLICH et al. wendeten ein Transmissionsverfahren an, bei dem der Sender auf der einen und der Empfänger auf der anderen Seite des Bauteils angeordnet ist [Kil92][Kah93]. Mit diesem Verfahren läßt sich ein mittlerer Feuchtegehalt angeben. An der BAM in Berlin wurde ein Verfahren entwickelt, bei dem Sende- und Empfangsantenne parallel in zwei Bohrlöchern in ein Bau-

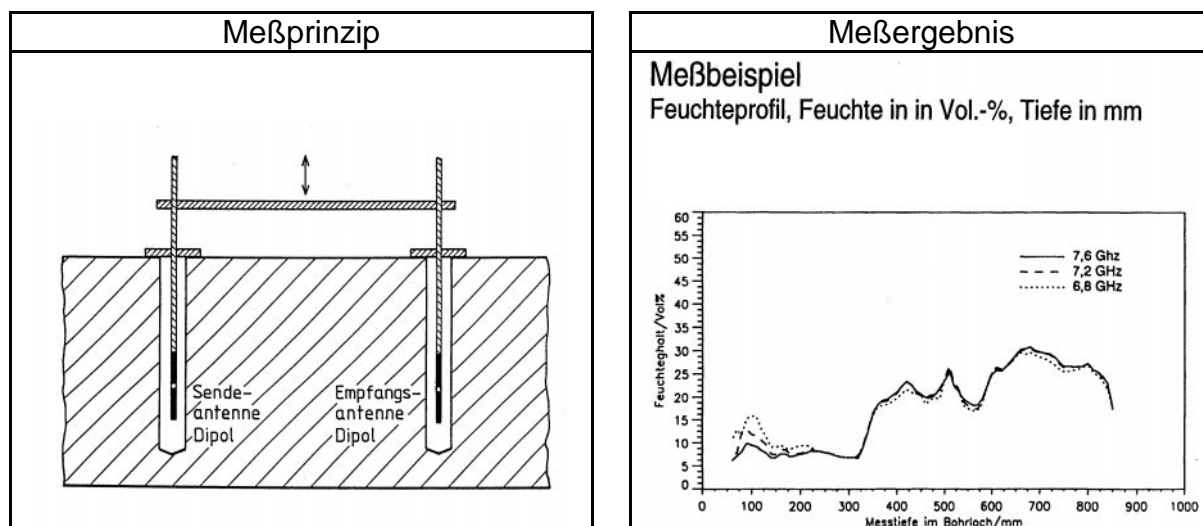


Bild 3
Feuchteprofilmessung mit Mikrowellen bei Anwendung der Zwei-Loch Methode
Feuchteprofile am Deutschen Dom in Berlin, mit drei Frequenzen gemessen
Quelle: RUDOLF, SCHAURICH und WIGGENHAUSER [RSW93]

teil eingeführt werden, was eine tiefenaufgelöste Messung erlaubt. Gemessen wird die Dämpfung für Frequenzen zwischen 6 und 8 GHz, eine Beispiel für eine Feuchteprofilmessung in einem Bauteil zeigt Bild 3 [RSW93].

Bei der Erprobung wurde festgestellt, daß Störungen insbesondere durch Fugen und Hohlräume auftreten. RAHM und BLUM verwendeten teilweise offene Hohlraumresonatoren [Rah97]. Ein neuer Feuchtesensor der Sensortech GmbH arbeitet mit zwei Resonatoren um 2,45 GHz. Durch entsprechende Auswertung ist eine dichteunabhängige Feuchtebestimmung möglich [Sen95]. Ein Feuchtemeßgerät, das nach dem Resonatorprinzip bei 150 MHz arbeitet, wurde von KOCH vorgestellt [Koc96]. Durch Auswertung von zwei dielektrischen Parametern läßt sich auch auf den Salzgehalt schließen. GÖLLER et. al. entwickelten einen Feuchtemesser, der ebenfalls nach dem Resonatorprinzip, aber bei 2,45 GHz arbeitet [GHL99]. Ein Meßbeispiel zeigt Bild 4. Für die Feuchteprofilmessung in Bauteilen wurde dazu eine Einschubsonde entwickelt, deren praktische Bewährung für die Feuchtemessung in Bauteilen allerdings noch aussteht. Die beiden letztgenannten Entwicklungen sind inzwischen als Meßgeräte im Handel erhältlich ist

Vorteilhaft erscheint aus elektrischer Sicht zunächst die Verwendung von Mikrowellen bei höheren Frequenzen, z. B. im X-Band (8,5-12,3 GHz), da zum einen wegen der Nähe der Relaxationsfrequenz eine hohe Feuchteempfindlichkeit besteht und zum andern der Einfluß gelöster Salze vernachlässigbar wird [Wat70][Kal78]. Bei der Anwendung auf Baustoffe zeigt sich jedoch, daß Materialkörner, Zuschläge, Hohlräume und Materialübergänge die Messungen durch Wellenstreuung erheblich stören können (siehe auch [RSW93]). Diese Einflüsse sind bei größeren Wellenlängen, also bei tieferen Frequenzen, geringer. Daher scheint die Verwendung von Mikrowellen aus dem ISM-Band (2,40-2,48 GHz) baupraktisch sinnvoller. Zudem wird in diesem Band keine Zulassung benötigt [BAPT94].

Eigene Untersuchungen zum dielektrischen Verhalten von Bauteilen hatten ergeben,

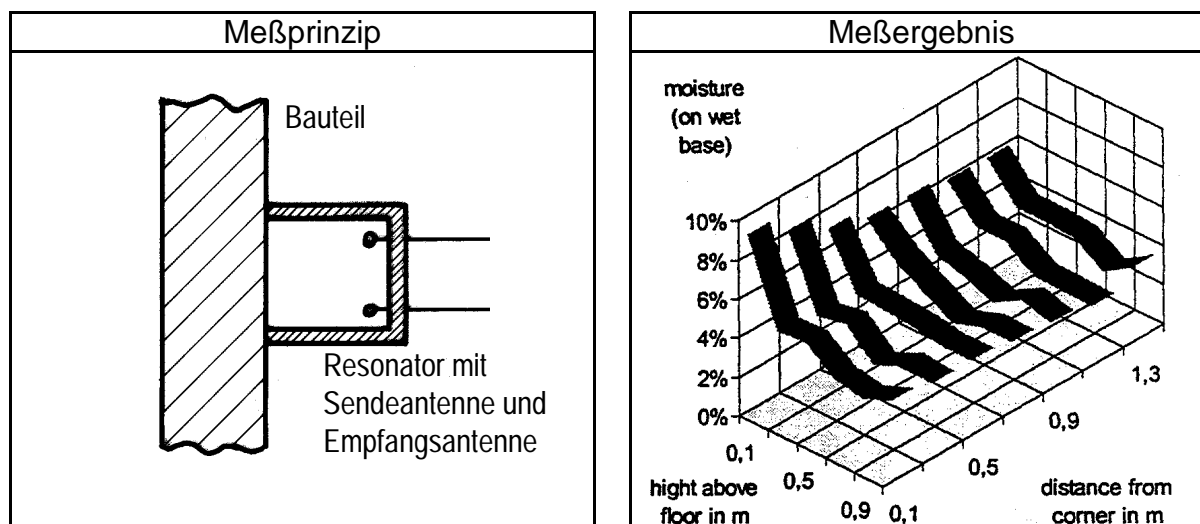


Bild 4
 Feuchtemessung mit Mikrowellen bei Anwendung der Resonator-Methode
 Feuchteprofilverteilung auf einem Bauteil
 Quelle: GÖLLER, HANDO und LANDGRAF [GHL99]

daß oberhalb von 100 MHz eine Separierung des Feuchte- und Salzeinflusses durch Auswertung von Real- und Imaginärteil der Dielektrizitätszahl (Zwei-Parameter-Messung) möglich ist. Oberhalb von 2 GHz zeigt der Realteil ϵ' der Dielektrizitätszahl bereits eine weitgehende Unabhängigkeit vom Salzgehalt, während der Imaginärteil noch vom Salzgehalt mitbestimmt wird. Für eine Meßfrequenz von 2,45 GHz wurde festgestellt, daß die Abhängigkeit des Parameters ϵ' von der Feuchte für die meisten Baustoffe gleich ist, so daß eine Materialkalibration in der Regel nicht erforderlich wird. Damit eröffnet sich die Möglichkeit einer salzunabhängigen Feuchtebestimmung an Baustoffen über eine Bestimmung des Realteils der Dielektrizitätszahl bei 2,45 GHz. [LHP94] [HLe94]

Aufbauend auf diesen Untersuchungsergebnissen wurde im Rahmen eines Gemeinschaftsprojektes an der TUHH eine Tiefen-Feuchte-Sonde entwickelt [LHK95] [VWS96] [HLB97]. Ein Sendeantenne, ausgeführt als planare Patch-Antenne, befindet sich außerhalb des Bauteils, eine Dipolantenne mit kurzem Dipol wird über ein Bohrloch von 16 mm Durchmesser in das Bauteil eingeführt. Auf diese Weise kann eine tiefen aufgelöste Feuchtemessung erfolgen. Ein Meßbeispiel zeigt Bild 5.

Bei der Erprobung der Sonde zeigte sich, daß bei der verwendeten Meßfrequenz um 2,45 GHz Störungen durch Salzeinfluß nicht auftreten. Störungen waren aber zu verzeichnen durch Inhomogenitäten wie Materialübergänge, Hohlräume usw., ein Phänomen, das auch schon von anderen Autoren festgestellt wurde, z. B. [RSW93]. Da eine ebene Wellenausbreitung zugrunde gelegt wird, können Streuwellen nicht berücksichtigt werden. Die Anwendung modellhafter Auswerteverfahren verbesserte zwar die Ergebnisse, konnte aber den Mangel nicht grundsätzlich beseitigen [Bol96][BHK95]. Eine neu entwickelte drehbare Sendeantenne mit veränderlicher Polarisierung ermöglicht es, die Störungen insbesondere durch Hohlräume auszublenken bzw. erheblich zu mindern [SLe99a]. Eine systematische Untersuchung des Einflusses von Streukörpern wie Hohlräumen, Zuschlägen (Kiesel) und Eisen (Be-

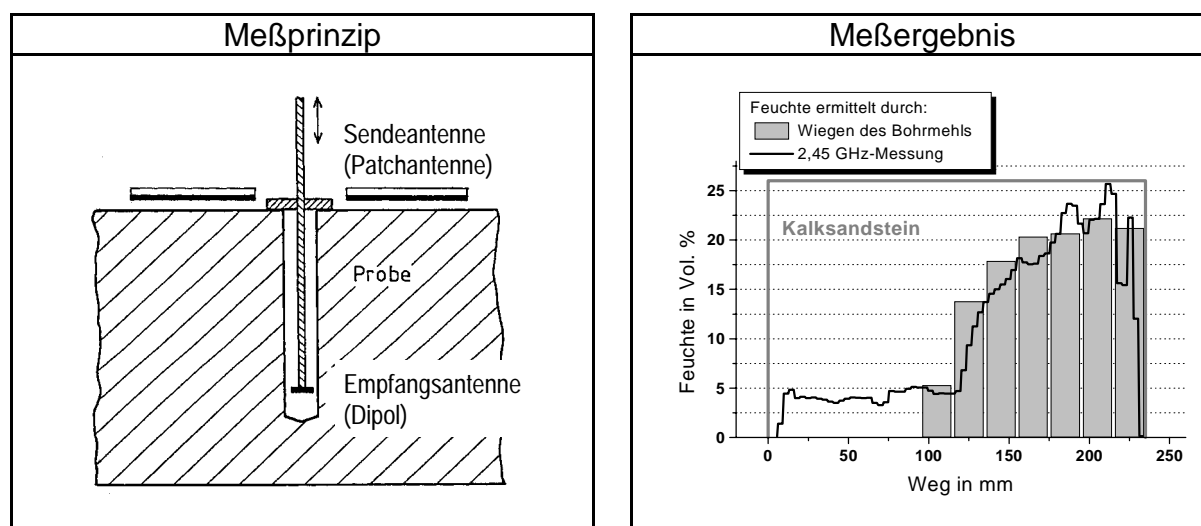


Bild 5
 Feuchteprofilmessung mit Mikrowellen bei Anwendung der Ein-Loch Methode
 Feuchteprofil an Kalksandstein, Mikrowellenmessung im Vergleich mit klassischer Feuchtemessung nach einer gravimetrischen Methode (Darr-Wäge-Methode)
 Eigene Ergebnisse, siehe z. B. VWS96]

wehrung) zeigt, daß nur begrenzte Bereiche um die Streukörper gestört werden, während der übrige Bereich weitgehend ungestört bleibt [SLe99b]. Da beim eigenen Verfahren gestörte Bereiche durch eine Fehleranzeige von ungestörten unterschieden werden können, ist eine Verwendung der ungestörten Meßergebnisse möglich.

Zahlreiche Messungen an Bauteilen im Labor und vor Ort zeigen, daß mit diesem Verfahren eine Feuchtemessung möglich ist. Vorteile des Meßverfahrens sind Schnelligkeit, Tiefenaufgelöstheit bei geringer Materialzerstörung und Wiederholbarkeit der Messung sowie mechanische Unempfindlichkeit der Anordnung.

4.8 Infrarot-Verfahren

Der Einfluß des Feuchtegehalts auf die Wärmeleitfähigkeit wirkt sich bekanntlich auf die Oberflächentemperaturen von Bauteilen und damit auf die von diesen ausgesandte langwellige Wärmestrahlung, also die elektromagnetische Strahlung im infraroten Spektralbereich, aus. Mit Hilfe der Infrarotthermographie ist es daher grundsätzlich möglich, unterschiedliche Durchfeuchtungsgrade eines Bauteils zu erkennen. Allerdings hängt die Intensität der emittierten Strahlung nicht nur von der Feuchte, sondern auch von zahlreichen weiteren Faktoren ab (siehe hierzu [Jan82]). Insbesondere sind Veränderungen im Aufbau eines Bauteils, z. B. Wärmebrückenbereiche, von Bedeutung. Daher lassen sich mit Hilfe der Infrarotthermographie allenfalls orientierende, qualitative Aussagen bezüglich des Durchfeuchtungszustandes einer Wand machen. Keinesfalls sind quantitative Aussagen möglich.

Neben der Messung der thermischen Eigenstrahlung lassen sich auch Reflexionsmessungen durchführen. Dabei wird das Prüfobjekt mit einer Infrarotstrahlung mit einer Wellenlänge von ca. 2,89 oder 1,94 μm beaufschlagt. Dort ist die Absorption durch das Wasser besonders hoch. Untersuchungen an Schüttgütern haben gezeigt (siehe z. B. FAUTH [Fau82]), daß nach entsprechender Kalibrierung eine Feuchtegehaltsbestimmung der Proben möglich ist. Für Bauteile erscheint diese Methode weniger geeignet, da nur die äußere Bauteilschicht erfaßt wird (siehe z. B. BÖTTCHER und RICHTER [BRi82]) und die Zusammenhänge zwischen Feuchte im Inneren eines Bauteils und an der Oberfläche Unklarheit besteht (siehe z. B. HOFFMANN und NIESEL [HNi86]), andererseits berichtet BROKMANN [BRO97] über eine IR-Meßgerät, das zum Einsatz am und im Mauerwerk geeignet sein soll, wobei allerdings Erfahrungen nicht mitgeteilt werden.

4.9 Kernphysikalische Verfahren

4.9.1 Gamma-Strahlen

Gamma- oder Röntgenstrahlung ist eine sehr kurzwellige elektromagnetische Strahlung, die beim Durchgang durch kapillar-poröse Stoffe sowohl durch die trockene Materie als auch durch das enthaltene Wasser geschwächt wird, so daß einerseits eine Feuchtemessung an Baustoffen grundsätzlich möglich ist, andererseits umfangreiche Kalibriermessungen erforderlich werden. Eine Meßeinrichtung für den Einsatz an Bauteilen wurde z. B. von KOBBER und MEHLHORN entwickelt [KMe91]. Sie zeichnet sich durch eine hohe Ortsauflösung von 1 mm aus. Wegen der von der sehr harten Strahlung ausgehenden Gefahr für das Meßpersonal sind umfangreiche Abschirmmaßnahmen erforderlich. Darüber hinaus ist eine behördliche Genehmigung erforder-

derlich, und Sicherheitsvorkehrungen sind zu treffen, wie dies auch bei der Verwendung von Neutronen-Strahlung erforderlich ist. Daher eignet sich dieses Verfahren für den praktischen Einsatz im Bauwesen weniger.

4.9.2 Neutronenstrahlen

Schnelle Neutronen, also Neutronen mit hoher kinetischer Energie, geben, wenn sie auf Atomkerne treffen, beim elastischen Stoß einen Teil ihrer kinetischen Energie ab. Weisen die Atomkerne etwa die gleiche Masse auf wie die Neutronen, dann geben die Neutronen bis auf ihre thermische Energie praktisch ihre gesamte kinetische Energie ab und werden zu sogenannten langsamen Neutronen.

Diese Energieabgabe ist bei schwereren Atomen wie z. B. Sauerstoffatomen wesentlich geringer. Bestrahlt man ein Bauteil mit schnellen Neutronen, dann stellt die pro Zeiteinheit erzeugte Anzahl langsamer Neutronen ein Maß für die vorhandenen Wasserstoffatome und damit den gesamten Wassergehalt dar. Zur Erzeugung schneller Neutronen wird häufig Beryllium mit β -Strahlung (He-Kerne) beaufschlagt. Die Zählung der langsamen Neutronen erfolgt durch spezielle Zählrohre oder Szintillationszähler.

Die Energieabgabe bei den elastischen Stößen ist im wesentlichen unabhängig von der Bindungsart des Wassers, so daß chemisch gebundenes Wasser praktisch genauso erfaßt wird wie freies Wasser. Bei der praktischen Anwendung ist dieser Umstand zu berücksichtigen. Wegen der Dichteabhängigkeit der Messungen ist die Aufnahme von Kalibrierkurven an dem jeweils zu prüfenden Material erforderlich.

Erfahrungen über die Anwendung des Neutronenverfahrens an Baustoffen liegen z. B. von NEUE und SCHÖBER [NSc89], GANSS und RÖNICKE [GRö92] sowie von BÜCHLI

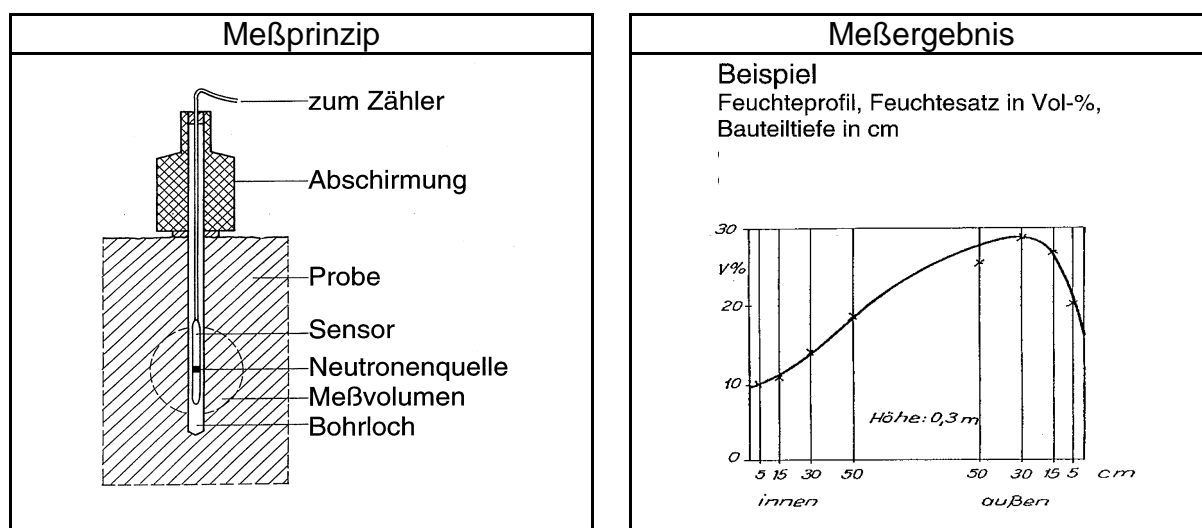


Bild 6
Feuchteprofilmessung mit Neutronensonde
Feuchteverteilung im nördlichen Querhaus des Doms von Halberstadt
Quelle: GANSS und RÖNICKE [GRö92] (Bildausschnitt)

[Büc94] vor. Bei sorgfältiger Kalibrierung lassen sich relativ hohe Genauigkeiten erzielen. Bild 6 gibt ein Meßbeispiel wieder.

Die Anwendung dieses Verfahrens setzt eine behördliche Genehmigung und die Einhaltung besonderer Sicherheitsvorschriften voraus, da radioaktive Materialien Verwendung finden. Darüber hinaus ist eine spezielle Schulung zum Umgang mit derartigen Stoffen erforderlich. Wegen dieser Einschränkungen ist nicht zu erwarten, daß sich Verfahren mit der Neutronen-Methode im Bauwesen durchsetzen werden.

4.9.3 NMR-Methode

Bei der Nuklearen-Magnetischen-Resonanz-Methode wird auf das magnetische Moment des Wasserstoffkerns zurückgegriffen. In einem konstanten magnetischen Feld richten sich die Wasserstoffkerne aus. Durch Einstrahlung eines elektromagnetischen Impulses einer definierten Frequenz kann ein Wasserstoffkern durch Niveauänderung Energie aufnehmen, 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 angesprochen, so daß die Energieabgabe nach Ende des Impulses ein Maß für den Wassergehalt der Probe ist. Untersuchungen wie z. B. von KIESSL und KRUS [KKr87] sowie GARRECHT [Gar92] zeigen, daß diese Meßmethode hochselektiv wasserbezogen und hochgenau arbeitet. Gemessen wird allerdings das gesamte Wasser, also auch der chemisch gebundene Anteil.

Der apparative Aufwand für NMR-Messungen ist sehr groß, die Kosten sind sehr hoch. Zwar gibt es inzwischen auch portable Meßeinrichtungen für Oberflächenmessungen (siehe z. B. [WND95]), 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. Diskussion zur Feuchtemessung an Baustoffen

Zur Feuchtemessung an Baustoffen bieten sich verschiedene Meßmethoden an. Besonders verbreitet ist nach wie vor die klassische gravimetrische Methode mit Ofentrocknung im Labor. Sie ist bei sorgfältiger Anwendung sehr genau und stellt meist die genormte Feuchtemeßmethode dar. Für die Anwendung vor Ort findet häufig die Calciumcarbid-Methode als chemisches Verfahren Anwendung. Sie liefert recht schnell vor Ort einen Feuchtwert, ist aber deutlich ungenauer als die Trocknungs-Wäge-Methode. Allerdings arbeitet sie immer noch genauer als alle bekannten einfachen elektrischen Meßgeräte.

Einfache und preiswerte elektrische Meßgeräte, die bei Frequenzen unter ca. 100 MHz arbeiten, können allenfalls als Anzeigergeräte bezeichnet werden, eine qualifizierte Feuchtemessung an Baustoffen ist im allgemeinen Fall nicht möglich. Es konnte durch eigene dielektrische Untersuchungen zweifelsfrei belegt werden, daß diese Verfahren keine eindeutige Feuchteanzeigen liefern können, wenn, wie dies in der Baupraxis häufiger und in Fällen von Feuchteschäden fast immer gegeben ist, leichtlösliche Salze im Baustoff vorhanden sind. Darüber hinaus gibt es weitere Störungen durch Elektrodenübergänge und elektrodennahe elektrochemische Vorgänge. Der Versuch, einfache Meßgeräte mit Arbeitsfrequenzen unter ca. 100 MHz zu

entwickeln, mit denen vor Ort ohne besonderen Aufwand Feuchtemessungen durchgeführt werden können, konnte und kann nicht von Erfolg beschieden sein.

Nach den derzeitigen Erkenntnissen ist eine qualifizierte Feuchtemessung an Baustoffen denkbar mit elektrischen Verfahren oberhalb 100 MHz, mit nuklearen Verfahren und mit der NMR-Methode. Wegen der mit den nuklearen Verfahren verbundenen Strahlungsgefahr und den behördlichen Auflagen ist nicht zu erwarten, daß sich diese Verfahren für die Anwendung an Baustoffen allgemein durchsetzen können. Die NMR-Methode ist apparativ sehr aufwendig, von hohem Gewicht und teuer, so daß dieses Verfahren für den allgemeinen Anwendungsfall an Bauteilen ausscheidet. Damit bestehen nur Aussichten auf Erfolg mit der Entwicklung von Feuchtemessern für Baustoffe, die nach einem elektrischen Verfahren bei Frequenzen oberhalb ca. 100 MHz arbeiten.

Eine Reihe von Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern hat sich mit der Entwicklung elektrischer Feuchtemesser bei höheren Frequenzen befaßt. Dabei wurden unterschiedliche Meßmethoden wie Transmission, Reflexion, Resonanz usw. erprobt. Vor- und Nachteile der Verfahren wurden untersucht und sind dokumentiert, Schwierigkeiten und Probleme sind, wenn auch nicht gelöst, so doch weitgehend bekannt. Eine Reihe von Prototypen von Meßgeräten stehen zur Verfügung und befinden sich in der Erprobung. Mit diesen ist es bereits heute möglich, Feuchtezustände und deren Veränderungen an Bauteilen zu erfassen. In Einzelfällen wurden bereits Meßgeräte entwickelt, die im Handel erhältlich sind. Der Entwicklungsstand ist jedoch noch nicht als ausreichend zu bezeichnen.

Derzeit vorhandene Störungen bei den Messungen, insbesondere mit Mikrowellen oberhalb von 2 GHz, lassen sich zum einen durch eine verbesserte Meßtechnik reduzieren, wie z. B. durch neuartige Antennenanordnung(en). Erhebliches Potential für eine Fehlerminderung liegt aber auch in einer Verbesserung der Auswertung, z. B. durch Annahme einer mehr als eindimensionalen Wellenausbreitung.

Durch die rasante Entwicklung der Kommunikationstechnik sind elektronische Bauteile im Mikrowellenbereich für die hier interessierenden Frequenzen, z. B. 2,45 GHz, heute sehr preiswert und in höchst kompakter Bauweise erhältlich, so daß sich elektronische Schaltungen für Mikrowellen heute wesentlich kostengünstiger und in kleineren Abmessungen herstellen lassen als früher. Damit ist eine wesentliche Hürde für die Entwicklung eines vergleichsweise preiswerten Feuchtemessers auf Mikrowellenbasis genommen. Erste kommerzielle Entwicklungen liegen bereits vor.

Noch gibt es keinen wirklich zuverlässigen Ersatz für die klassischen gravimetrischen Verfahren, die derzeitigen wissenschaftlichen Erkenntnisse und technischen Voraussetzungen sind jedoch vielversprechend. Damit der Spagat zwischen Klassik und Moderne gelingt, sind allerdings noch einige Anstrengungen bei Forschung und Entwicklung erforderlich.

6. Messung des Salzgehaltes von Baustoffen

Dielektrische Untersuchungen an Baustoffen hatten ergeben, daß bei Frequenzen oberhalb von 100 MHz durch Bestimmung von Real- und Imaginärteil der komplexen Dielektrizitätszahl grundsätzlich die Bestimmung des Feuchte- und Salzgehaltes von Baustoffen möglich ist [LHP94]. Da zu höheren Frequenzen die Salzempfindlichkeit

abnimmt, erscheint es sinnvoll, eine Meßfrequenz zu wählen, die deutlich unter 2,45 GHz liegt.

Im Rahmen eines Forschungsprojektes war eine Tiefen-Feuchte-Sonde entwickelt worden, deren Arbeitsfrequenz bei ca. 2,45 GHz liegt [VWS96]. Die entwickelte Meßeinrichtung wurde so modifiziert, daß sie bei einer Arbeitsfrequenz von 830 MHz eingesetzt werden konnte [LSc98]. Hierzu waren wesentliche Änderungen an den Antennen erforderlich. Nach wie vor sollte der Empfangsdipol jedoch in ein Bohrloch von 16 mm passen. Messungen mit dieser Einrichtung führten jedoch nicht zu einem zufriedenstellenden Ergebnis. Als Hauptursache hierfür ist die extreme Kürze des Dipols zur Wellenlänge anzusehen, wodurch die Empfangscharakteristik näherungsweise kugelförmig wird. Da die Störungen bei den Messungen nicht beseitigt werden können, wurde ein anderer Weg eingeschlagen.

Es war festgestellt worden, daß bei einer Meßfrequenz von 2,45 GHz der Realteil ϵ' der Dielektrizitätszahl sich feuchteabhängig, jedoch weitgehend salzunabhängig verhält, während der Imaginärteil ϵ'' sowohl feuchte- wie salzabhängig ist. Eine entsprechende Auswertung beider Parameter erlaubt also grundsätzlich auch bei dieser Frequenz eine Bestimmung des Feuchte- und Salzgehaltes.

Untersuchungen an Kalksandstein und anderen Materialien zeigen, daß es mit der entwickelten Meßeinrichtung und einer entsprechenden Auswertung möglich ist, Feuchte- und Salzprofile von Baustoffen und Bauteilen aufzunehmen [LSc98] [LSc99a]. Ein Meßbeispiel ist in Bild 7 wiedergegeben.

Funktionale Zusammenhänge zwischen den dielektrischen Parametern ϵ' und ϵ'' und den Baustoffgrößen Feuchte- und Salzgehalt konnten abgeleitet werden. Das Verhalten weiterer Materialien wird noch untersucht, erste Ergebnisse liegen vor [LSc99b].

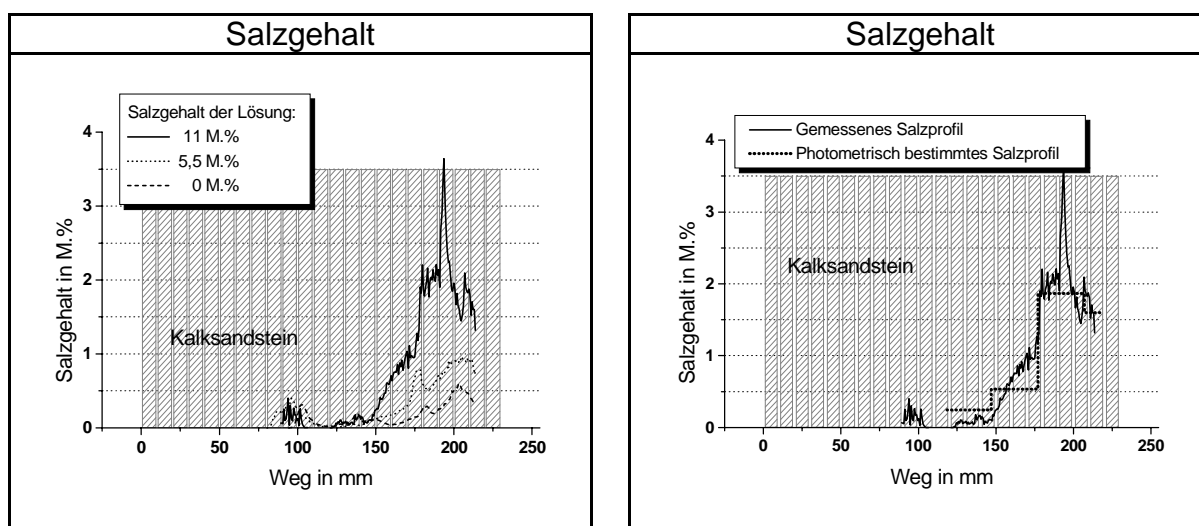


Bild 7

Messung von Feuchte- und Salzprofilen mit Mikrowellen an Kalksandstein im Labor

Links: Mikrowellenmessungen für verschiedene Salzdotierungen

Rechts: Mikrowellenmessung für eine Salzdotierung im Vergleich zur Salzbestimmung in nachchemischen Aufschluß

Quelle: Eigene Forschungsergebnisse, siehe z. B. [LSc98][LSc99c]]

Mit dieser Meßeinrichtung können nicht beliebige Salze erfaßt werden können, sondern nur diejenigen, die mit dem Wasser im Baustoff in Lösung gegangen sind. Letztlich sind es vorrangig die leicht löslichen Salze wie Chloride, Sulfate und Nitrate, die auch zur Dotierung der Proben entsprechend einer WTA-Empfehlung benutzt wurden [WTA92]. Nicht gelöste Salze, wie z. B. Gips, verhalten sich bei den Messungen wie übliche Baustoffe.

7. Zusammenfassung

Im Bauwesen stellen die klassischen gravimetrischen Methoden nach wie vor die wichtigsten Feuchtemeßmethoden dar. Handelsübliche Meßgeräte sind nur äußerst begrenzt einsetzbar, insbesondere wenn sie einem elektrischen Verfahren bei tieferen Frequenzen arbeiten.

Es wurde dargelegt, daß es eine Reihe von Versuchen gibt, einen neuen Feuchtemesser zu entwickeln, der insbesondere genau, salzunabhängig, wenig zerstörend, vor Ort einsetzbar, tiefenaufgelöst messend und schnell ist. Hieraus resultieren eine Reihe von Prototypen von Meßgeräten sowie einige wenige Geräte, die im Handel erhältlich sind. Bislang ist jedoch keines dieser Geräte auf einem Entwicklungsstand, daß eine problemlose Feuchtemessung an Baustoffen möglich ist.

Vielversprechend sind neuere Entwicklungen mit elektrischen Verfahren bei Frequenzen im Bereich der Mikrowellen. Eine Fortsetzung der Anstrengungen insbesondere bei diesen Verfahren sollte in absehbarer Zeit zu dem gewünschten Ziel führen.

8. Literatur

- [Alt70] K. Altmann: Neues Feuchtigkeitsmeßverfahren für Bauteile. Die Bautechnik 8 (1970), S. 268-272.
- [Are93a] C. Arendt: Praktischer Vergleich von Untersuchungsgeräten und –verfahren zur Feuchtemessung im Mauerwerk, Teil 1 und 2. Bautenschutz + Bausanierung, 1993, Nr. 5, S. 27-31 und 1993, Nr. 6, S. 10-14.
- [Are93b] C. Arendt: Einsatzmöglichkeiten gängiger Feuchtemeßgeräte unter Berücksichtigung von Salzeinflüssen. Feuchtetag '93, 21.9.93, Berlin, DGZfP-Berichtsband Nr. 40, 1993, S. 147-167.
- [BAPT94] Bundesamt für Post und Telekommunikation: Zulassungsvorschriften für Funkanlagen geringer Leistung für nichtöffentliche Funkanwendungen in ISM-Frequenzbereichen. BAPT 22 ZV 125, Dezember 1994.
- [Ber80] M. A. Berliner: Feuchtemessung. VEB Verlag Technik Berlin (1980).
- [BHK95] T. Boltze, C. Hauenschild, K. D. Kammeyer und W. Leschnik: Robust estimation algorithms for the determination of moisture profiles with microwaves. Feuchtetag '95, 29.9.95, Berlin, BAM, 1995.
- [Boe79] W. O. Boekwijt: Diagnoseverfahren bei der Feuchtigkeitsbekämpfung. Bautenschutz + Bausanierung, 2. Jahrgang, Nr. 2 - 1979, S. 48-51.
- [Bol96] T. Boltze: Parameterschätzung für die Feuchtemessung mit Mikrowellen. Dissertation, TU Hamburg-Harburg, 1996.

- [BRi82] B. Böttcher, H. Richter: Ein Beitrag zum Nachweis von Feuchtigkeit in Mauerwerk mit Hilfe einer Infrarotkamera. *Materialprüf.* 24 (1982), Nr. 1, S. 5-9.
- [Bro97] T. Brokmann: Infrarot-Meßverfahren. In: *Materialfeuchtemessung* (Herausgeber: C. Kupfer), Expert-Verlag (1997).
- [Büc94] R. Büchli: Zerstörungsfreie Feuchtemessung. *Der Schweizerische Hauseigentümer*, Nr. 18 (1994).
- [Fau82] G. Fauth: Die Anwendung des Infrarot-Reflexions-Verfahrens auf die Schnellbestimmung des Wassergehaltes in der Steinkohleaufbereitung. *Aufbereitungs-Technik*, 23 (1982), Heft 4, S. 201-208.
- [Fri91] P. Friese: Die Anwendung von Leitfähigkeitsmessungen an salz- und feuchtegeschädigtem Mauerwerk, Teil 1 und 2. *Bautenschutz + Bausanie- rung*, 14 (1991), S. [125-127] und [134-135].
- [Gar92] H. Garrecht: Porenstrukturmodelle für den Feuchtehaushalt von Baustof- fen mit und ohne Salzbefrachtung und rechnerische Anwendung auf Mauerwerk. Dissertation, Universität Karlsruhe, 1992.
- [GHL99] A. Göller, A. Handro, J. Landgraf: A new microwave method for moisture measurement in building materials. 3rd Workshop on Electromagnetic Wa- ve Interaction with Water and Moist Substances, Athens, Georgia, 11.- 13.4.1999.
- [GRö92] E. D. Ganss, H. J. Röncke: Zur Feuchtesituation in historischem Mauer- werk. WTA-Tag 1992, 5.-6.3.1992, Weimar. WTA-Bericht 8, 1992, S. 98- 106.
- [Hau99] C. Hauenschild: Untersuchung der dielektrischen Eigenschaften minerali- scher Baustoffe für die Entwicklung von Feuchtemeßsonden. Dissertation, Technische Universität Hamburg-Harburg, 1999 (im Druck).
- [HLB97] C. Hauenschild, W. Leschnik, T. Boltze, F. Menke, R. Knöchel: Tiefenauf- gelöste Feuchtemessung in Feststoffen. In: *Materialfeuchtemessung: Grundlagen, Messverfahren, Applikation, Normen*, Hrsg. K. Kupfer, Ex- pert-Verlag, Renningen-Malsheim, 1997.
- [HLe94] C. Hauenschild, W. Leschnik: Untersuchungen zum dielektrischen Ver- halten von Baustoffen - Grundlage zur Entwicklung von Feuchtesensoren. 9. Bauklimatisches Symposium, Dresden, September 1994.
- [HNi86] D. Hoffmann und K. Niesel: Möglichkeiten der Feuchtigkeitsmessung in Baustoffen. *ZfP-Bau-Symposium: Zerstörungsfreie Prüfung im Bauwesen*, 2.-3.10. 1985. Tagungsbericht S. 248-256. BAM Berlin (1986).
- [Jan82] F. Janka: Thermografie in der praktischen Anwendung. *Bautenschutz + Bausanie- rung*, 5. (1982), Nr. 1, S. 18-27.
- [Kah93] M. Kahle: Feuchtemessung an historischem Mauerwerk mit dem Radar- verfahren. Feuchtetag '93, 21.9.93, Berlin, DGZfP-Berichtsband Nr. 40, 1993, S. 57-67.
- [Kal78] J. Kalinski: Einige Probleme der industriellen Feuchtigkeitsmessung mit Mikrowellen. *Mikrowellen Magazin* 6/78, S. 441-452.
- [Kas78] I. Kaspar: Feuchtigkeitsmessung von Baumaterialien. *Wiss. Zeitschrift der Technischen Universität Dresden*, 27 (1978), Heft 2, S. 467-470.

- [KII92] M. Kahle und B. Illich: Einsatz des Radarverfahrens zur Erkundung von Struktur und Zustand historischen Mauerwerks. Bautechnik Heft 7, 1992, S. 342-353.
- [KKi90] H. M. Künzel und K. Kießl: Ist Vakuumtrocknung günstiger als Konvektionstrocknung. Untersuchungsergebnisse für Natursandsteine. Bauphysik 12 (1990), Heft 1, S. 27-30.
- [KKr87] K. Kießl und K. Krus: Messung von Wassergehalten und Feuchtetransportvorgängen in Baustoffen mittels kernmagnetischer Resonanz. IBP-Mitteilung 14 (1987), Nr. 148, FHG Stuttgart.
- [KMe91] A. Kober und L. Mehlhorn: Radiometrische Feuchtemessung in Bauteilen mit hoher räumlicher Auflösung. Bauphysik, 13 (1991), Heft 2, S. 43-49.
- [KMo88] K. Kupfer und D. Morgeneier: Grundlagenuntersuchungen zur Feuchtemessung von Zuschlagstoffen nach dem Mikrowellenverfahren. Beton-technik 1988, 2 (April), S. 57-58.
- [Koc91] W. Koch: Ein kapazitiver Feuchtemesser für mineralische Werkstoffe. In: Materialfeuchtemessung: Grundlagen, Messverfahren, Applikationen, Normen, Hrsg: K. Kupfer, Expert-Verlag, Renningen- Malsheim, 1997.
- [Kup96] K. Kupfer: Microwave moisture sensors and their application in civil engineering. Workshop on Electromagnetic Wave Interacion with Water and Moist Substances. 17.5.1996, Athens GA, USA. Proceedings, S. 105-108.
- [Kup99] K. Kupfer: Methods and devices for density independent moisture measurement. III. Workshop on Electromagnetic Wave Interacion with Water and Moist Substances. 11-13.4.1999, Athens GA, USA. Proceedings, S. 11-19.
- [LHK95] W. Leschnik, C. Hauenschild, R. Knöchel, F. Menke und T. Boltze: A Microwave moisture sensor for building components. Int. Symp. NDT-CE, Berlin September 1995, proceedings.
- [LHP94] W. Leschnik, C. Hauenschild, F. Pinsler: Entwicklung zerstörungsarm arbeitender Meßsonden zur Bestimmung des Feuchte- und Salzgehaltes von Wänden. Schlußbericht an die DFG unter der Projekt-Nr. Le 765/1-2, Hamburg, 1994.
- [LSc98] W. Leschnik, U. Schlemm, F. Pinsler und B. Gätje: Tiefenaufgelöste und kontinuierliche Feuchtemessung an Mauerwerk. Berichtsheft zum DFG-Schwerpunktprogramm „Bauphysik der Außenwände“. Erscheint demnächst.
- [LSc99a] W. Leschnik und U. Schlemm: Measurement of the moisture and salt content of building materials. III. Workshop on Electromagnetic Wave Interacion with Water and Moist Substances. 11.-13.4.1999, Athens GA, USA. Proceedings, S. 189.193.
- [LSc99b] W. Leschnik und U. Schlemm: Dielektrische Untersuchung mineralischer Baustoffe in Abhängigkeit von Feuchte- und Salzgehalt bei 2,45 GHz. Feuchtetag '99, Berlin, 7.-8.10.1999. Tagungsbericht (erscheint demnächst).
- [Mar93] H. Marquardt: Feuchtemessungen in nachträglich gedämmten Beton-Sandwichwänden. Bauphysik 15 (1993), H. 5, S. 153-160.

- [MFM95] C. Kupfer (Herausgeber): Materialfeuchtemessung. Beiträge zahlreicher Autoren. Expert-Verlag (1997).
- [MSG95] H. Mouhasseb, J. Suhm, H. Garrecht, H. Hilsdorf: A new dielectric method to measure moisture in masonry. Int. Symp. Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE), 26.-28.9.1995, Berlin. Proceedings, Vol.1, S. 159-166.
- [MSz81] W. Meyer und W. Schilz: Feasibility study of density-Independent moisture measurement with microwaves. IEEE Transactions on microwave theory and techniques, Vol. MTT-29, No. 7, July 1981, pp. 732-739.
- [Neu82] J. Neue: Erfassung von Feuchteprofilen im Innern von Bauteilen mit einer dielektrischen Sonde. Bauplanung - Bautechnik, 36. Jg, Heft 3, März 1982, S. 120-123,132.
- [Neu86] J. Neue: Kapazitive Feuchtemessung an Gasbeton. Bauplanung - Bautechnik, 40. Jg., Heft 5, Mai 1986, S. 215-218.
- [NSc89] J. Neue, J. Schober: Feuchtebestimmung an Ziegelmauerwerk mit einer Neutronen-Tiefensonde. Wiss. Zeitschr. d. Technischen Universität Dresden, 39 (1989), Heft 5/6, S. 237- 239.
- [PRR96] R. Plagge, C. H. Roth und M. Renger: Dielectric soil water content determination using time-domain reflectometry. Workshop on Electromagnetic Wave Interacion with Water and Moist Substances. 17.5.1996, Athens GA, USA. Proceedings, S. 59-62.
- [RBI95] U. Rahm und R. Blum: Zerstörungsfreie Bestimmung des Wasser- und Salzgehaltes an Natursteinen mittels Mikrowellen in Transmissions- und Reflexionsanordnung. Feuchtetag '95, 29.9.95, Berlin, BAM, Berichtsband, S. 272- 282.
- [RLH95] T. Rachow-Seemann, W. Leschnik und C. Hauenschild: Zur Genauigkeit von klassischen Verfahren zur Bestimmung der Bauteilfeuchte Feuchtetag '95, 29.9.95, Berlin, BAM, Tagungsbericht S. 264-271.
- [RSW93] M. Rudolph, D. Schaurich, H. Wiggenhauser: Feuchteprofilmessungen mit Mikrowellen an Mauerwerk. Feuchtetag '93, 21.9.93, Berlin, DGZfP-Berichtsband Nr. 40, 1993, S. 44-56.
- [Sen95] Sensortech GmbH & Co KG: Der Hochfrequenz-Feuchtemesser DR-HUM. Informationsmaterial, Neumünster, 1995.
- [SHä92] H. Stopp, P. Häupl: Kontrolle der Wärmeleitfähigkeit in Dämmschichten von Umfassungskonstruktionen während des Nutzungszustandes. 1. Int. Kongreß zur Bauwerkserhaltung 1992 anlässlich der Bautec Berlin, 17.-19.2.1992, Kongreß-Dokumentation, S. 66-67.
- [SHF95] H. Stopp, P. Häupl, H. Fechner und J. Neue: Use of thermal Measurement methods within moist building materials. Int. Symp. Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE), 26.-28.9.1995, Berlin. Proceedings, Vol.1, S. 365-374.
- [SLe99a] U. Schlemm und W. Leschnik: Drehbares Antennensystem zur Unterdrückung von Störungen bei der Messung des Salz- und Feuchtegehaltes von Bauteilen bei 2,45 GHz. Feuchtetag '99, 7.-8.10.1999, Berlin, Tagungsbericht (erscheint demnächst).

- [SLe99b] U. Schlemm und W. Leschnik: Einfluß von Inhomogenitäten auf die Messung von Feuchte- und Salzgehalt von Baustoffen mit Mikrowellen. 5. Internationale Kolloquium „MSR99“, 30.11.-3.12.1999, TAE Esslingen, Tagungsbericht (erscheint demnächst).
- [SVe95] W. Schwarz, H. Venzmer: Neue Möglichkeiten und Grenzen der zerstörungsfreien Ultraschallfeuchtemessung an Werkstoffen des Mauerwerks. Int. J. for Restoration of Buildings and Monuments, Vol. 1, No. 1, 1995, S. 21-36.
- [Vos70] Vos B.H.: Measuring moisture content and distribution in constructions. Build International, März 1970, S. 51-54.
- [VWS96] W. Leschnik et. al.: Kontinuierliche und zerstörungsfreie Feuchtemeßverfahren mit Mikrowellen. Abschlußbericht an die Volkswagen-Stiftung, AZ: I/67 193. Technische Universität Hamburg-Harburg, September 1996.
- [Wat65] 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.
- [Wat70] A. Watson: Measurement and control of moisture content by microwave absorption. BUILD International, March 1970, S. 47-50.
- [WBH95] F. Weise, K. Borchardt, D. Hoffmann, M. Niedack-Nad, M. Rudolph, D. Schaurich: Feuchteuntersuchungen im Hauptgesimsbereich des Zeughauses Berlin. Feuchtetag '95, 29.9.95, Berlin, BAM, Berichtsband, S. 305-319.
- [Wil88] H.-P. Wilfer: Meßgerät zur Bestimmung der Feuchte von mehrphasigen Stoffen. msr, Berlin, 31 (1988), Nr. 9, S. 400- 402.
- [WND95] B. Wolter, U. Netzelmann und G. Dobmann: Zerstörungsfreie Bestimmung von Tiefenprofilen in Baustoffen mit Hilfe der Kernspinresonanz in Aufsatztechnik. Feuchtetag '95, 29.9.95, Berlin, BAM, Tagungsbericht S. 18-26.
- [WTA92] Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e. V.: WTA-Merkblatt 2-2-91 "Sanierputzsysteme". Veröffentlicht in: Bautenschutz + Bausanierung 15 (1992), S. 59-63.