

DGZfP-Berichtsband BB 69-CD
Poster 10

MOISTURE MAPPING - Flächen- und tiefenaufgelöste Feuchtemessung mit dem MOIST-Verfahren

A. Göller, hf sensor GmbH, Leipzig

Einleitung

Seit einiger Zeit werden auch im Bauwesen dielektrische Feuchtemeßverfahren mit wachsendem Erfolg eingesetzt. Eine herausragende Rolle kommt hierbei den seit mehr als 40 Jahren bekannten Mikrowellen-Feuchtemeßverfahren zu /1/.

Seit etwa zwei Jahren sind Weiterentwicklungen der im Prozeßmeß-Bereich eingesetzten Mikrowellen-Meßtechnik in Form portabler Meßgeräte und -systeme auch für Anwendungen im Bauwesen verfügbar /2/ /3/ /4/ /5/. Wesentliche Vorteile dieser Handheld-Mikrowellen-Feuchtemeßgeräte der MOIST-Serie bestehen neben dem zum Einsatz kommenden fortschrittlichen Mikrowellen-Verfahren in der Möglichkeit, die Messungen durch einfaches Aufsetzen der Meßköpfe auf das Meßgut durchzuführen und so in sehr kurzer Zeit sehr viele Meßwerte aufnehmen zu können.

Nachdem am Anfang der Entwicklung der MOIST-Geräte und zugehöriger Meßverfahren hauptsächlich Fragen der gerätetechnischen Konzeption im Vordergrund standen, stellte sich bei eigenen Messungen an verschiedenen Objekten schnell heraus, daß die entwickelte Gerätetechnik sehr viel mehr leisten kann als eine bloße Feuchtemessung.

Mit den MOIST-Geräten lassen sich in kurzer Zeit viele Meßwerte aufnehmen und mit der zugehörigen Software MOISTANALYZE auch zu aussagefähigen Grafiken weiterverarbeiten. Da die Messung in zwei Eindringtiefen möglich ist (oberflächennah - Meßkopf MOIST-R; im Volumen - Meßkopf MOIST-P), können mit Hilfe von Messungen mit beiden Meßköpfen bereits Quasi-Tiefenaussagen getroffen werden. Das System wird ergänzt durch den Bohrloch-Meßkopf MOIST ENDO.

Mikrowellen-Feuchtemessung nach dem Reflexionsverfahren

Mikrowellen-Feuchtemeßverfahren basieren auf den herausragenden dielektrischen Eigenschaften des Wassers. Der dielektrische Effekt ist bei Wasser so stark ausgeprägt, daß die relative Dielektrizitätskonstante (DK) von Wasser etwa 80 beträgt. Die relative DK der meisten Feststoffe, darunter auch der Baustoffe, ist wesentlich kleiner, sie liegt im Bereich 2 ...10 und vorzugsweise zwischen 3 und 6. Der Meßeffect wird daher verursacht durch den Unterschied zwischen der DK von Wasser und der DK der Baustoffe.

Im Mikrowellen-Frequenzbereich kommt zum Realteil der DK aufgrund der internen Bindungskräfte auch der Imaginärteil oder anders gesagt die dielektrischen Verluste hinzu.

$$\underline{\epsilon}_r = \epsilon_r' + j \epsilon_r'' = \epsilon_r' (1 + j \tan \delta_\epsilon) \quad (1)$$

Die elektrischen Gesamtverluste $\tan \delta$ eines Materials setzen sich aus der Summe der dielektrischen Verluste und der Verluste durch Gleichstromleitfähigkeit von Ionen (z.B. Salze im Mauerwerk) zusammen.

$$\tan \delta = \frac{\epsilon_r'}{\epsilon_r''} + \frac{\kappa_{\text{ion}}}{\epsilon_0 \epsilon_r' 2\pi f} \quad (2)$$

Aus (2) geht hervor, daß die Einflüsse der Ionenleitfähigkeit mit wachsender Frequenz f sinken, da diese im Nenner des zweiten Terms steht. Im Mikrowellenbereich (ab 2...3 GHz) werden die Einflüsse der Leitfähigkeit wegen der hohen Frequenz vernachlässigbar klein; es tragen nur noch die dielektrischen Eigenschaften des Wassers zu den Verlusten bei, so daß eine Verfälschung durch Leitfähigkeitseinflüsse ausscheidet.

Für die Mikrowellen-Feuchtemeßgeräte der MOIST-Serie wurden zwei Aufsatz-Meßköpfe entwickelt : MOIST-R als Oberflächen-Meßkopf und MOIST-P als Volumenmeßkopf.

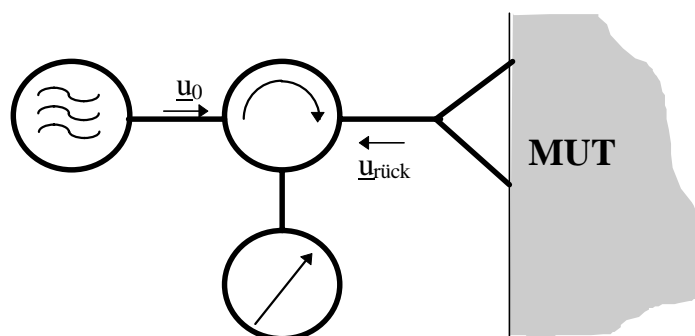


Abb. 1 Mikrowellen-Feuchtemessung nach dem Reflexions-Prinzip

Beide arbeiten nach einem reflektiven Verfahren, d.h. sie können von einer Seite auf das Material aufgesetzt werden. Gemessen werden sowohl die ins Material hineinfließende elektromagnetische Welle als auch die vom Material reflektierte Welle. Der sogenannte Reflexionsfaktor Γ ist der Quotient aus rück- und hinlaufender Welle

$$\Gamma = \frac{u_{\text{rück}}}{u_{\text{hin}}} \quad (3)$$

Mikrowellen-Applikatoren unterschiedlicher Eindringtiefen

Feuchtigkeit ist in einem Baustoff oder in einem Bauwerk immer inhomogen verteilt. Aus diesem Grunde sollte die Feuchteverteilung in allen drei Koordinatenrichtungen eines Probekörpers ermittelt werden, um eine Aussage über den gesamten Feuchtehaushalt treffen zu können.

Die bisher im Baubereich angewendeten zerstörenden (Darr-Verfahren, CM-Verfahren) und zerstörungsfreien (Leitfähigkeitsverfahren, Kapazitives Verfahren, Neutronensonde) Feuchtemeßverfahren gehen jedoch aus praktischen Erwägungen nur von einer punktuellen Messung aus. Wurde mittels eines dieser Verfahren der Feuchtegehalt an einem bestimmten Punkt im Bauwerk ermittelt, so handelt es sich im schlimmsten Fall um einen Meßpunkt, dessen Feuchtegehalt nicht repräsentativ für das Bauwerk ist.

Die Messung mit einem zerstörungsfrei arbeitenden Meßsystem mit Aufsetz-Meßköpfen mit festgelegter Eindringtiefe kann Aussagen über den Feuchtehaushalt eines Baustoffs in einer Ebene liefern.

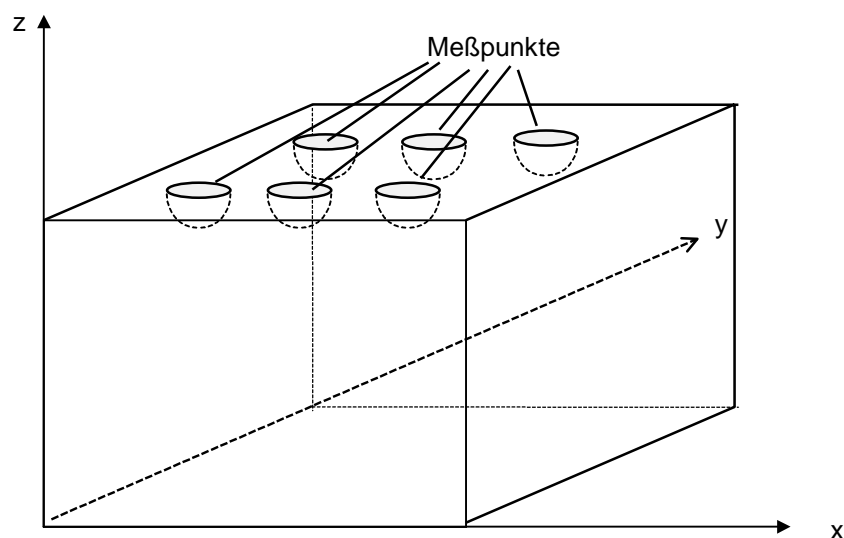


Abb.2 Laterale Verteilung der Meßpunkte und Meßvolumina bei Messung mit einem Aufsetz-Meßkopf fester Eindringtiefe

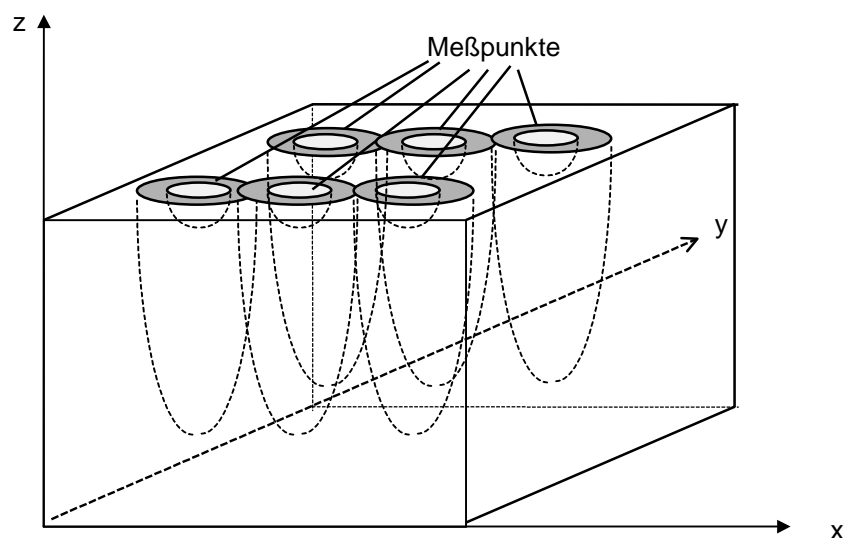


Abb.3 Verteilung der Meßpunkte und Meßvolumina bei Messung mit mehreren Aufsetz-Meßköpfen fester Eindringtiefe

Um auch Aussagen über die Feuchteverteilung in der z-Richtung zu erhalten, können mehrere Wege beschritten werden. Einerseits ist per Puls-Radar oder TDR-Verfahren eine Impuls-Messung möglich, die über eine kombinierte Laufzeit- und Amplituden-Auswertung eine örtliche Zuordnung der DK und damit der Feuchte des Meßguts möglich. Radar-Geräte sind jedoch sehr aufwendig und teuer. TDR-Meßsysteme hingegen benötigen einen Wellenleiter, der ins Medium eingebracht werden muß, so daß der zerstörungsfreie Charakter der Messung verloren geht.

Ein anderer Weg besteht in der Verwendung von verschiedenen Meßköpfen unterschiedlicher fester Eindringtiefen, die sich einfach herstellen lassen.

Für eine Feuchtemessung in Baustoffen und Bauwerken kommen dabei zunächst zwei Haupt-Tiefenbereiche in Frage:

- oberflächennaher Bereich - Eindringtiefe 2...5 cm
- mittlerer Tiefenbereich - Eindringtiefe 10...30 cm.

Eine kleinere Eindringtiefe ist nicht sinnvoll, weil dann die Einflüsse der Oberflächenstruktur des Baustoffs zu stark in den Vordergrund treten. Eine größere Eindringtiefe kommt nur selten in Frage, weil die meisten Wände nicht stärker als 30 bis 40 cm sind.

Um dieses Ziel zu erreichen, ist im Mikrowellen-Bereich für den oberflächennahen Bereich die Verwendung von Streufeld-Applikatoren möglich und für den Bereich mittlerer Tiefe der Einsatz von Strahlungsfeld-Applikatoren, d.h. Antennen /6/.

Für die Realisierung von Streufeld-Applikatoren bieten sich z.B. strahlungsfeldkompensierte offene Resonatoren an, bei denen ausschließlich Nahfeld-Anteile zum Tragen kommen, die nach

$$\vec{E} \sim 1 / r^2 \quad (4)$$

mit dem Abstand abfallen. Hingegen weisen Antennen zwar auch einen Nahfeld-Anteil auf; entscheidenden Einfluß auf den (mit einer Mikrowellenschaltung erfaßbaren) Reflexionsfaktor am Antennenfußpunkt hat jedoch auch das Fernfeld mit

$$\vec{E} \sim 1 / r \quad (5)$$

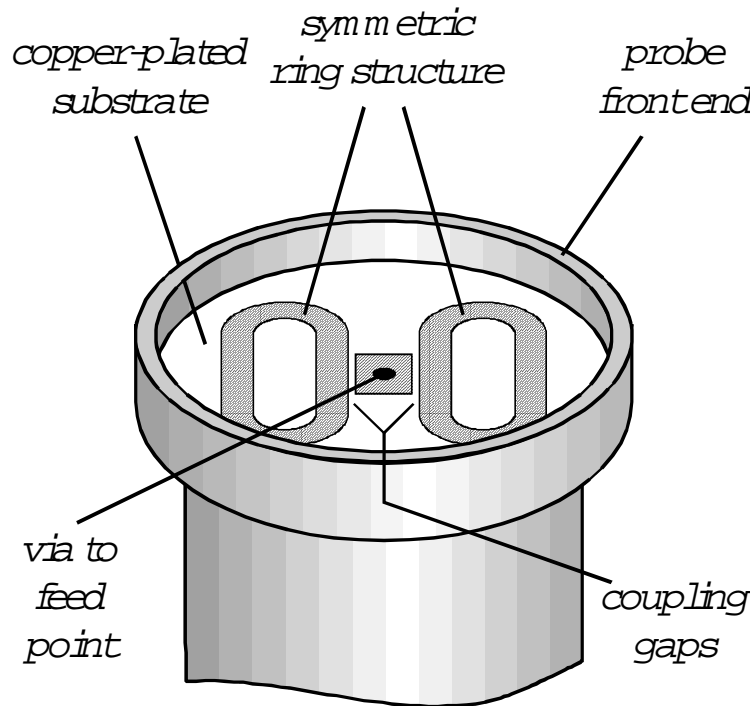


Abb.4 Realisierung Streufeld-Meßkopf für Oberflächenmessungen
Physische Realisierungsvarianten der Applikator-Strukturen sind in Abbildung 4 und 5 dargestellt.

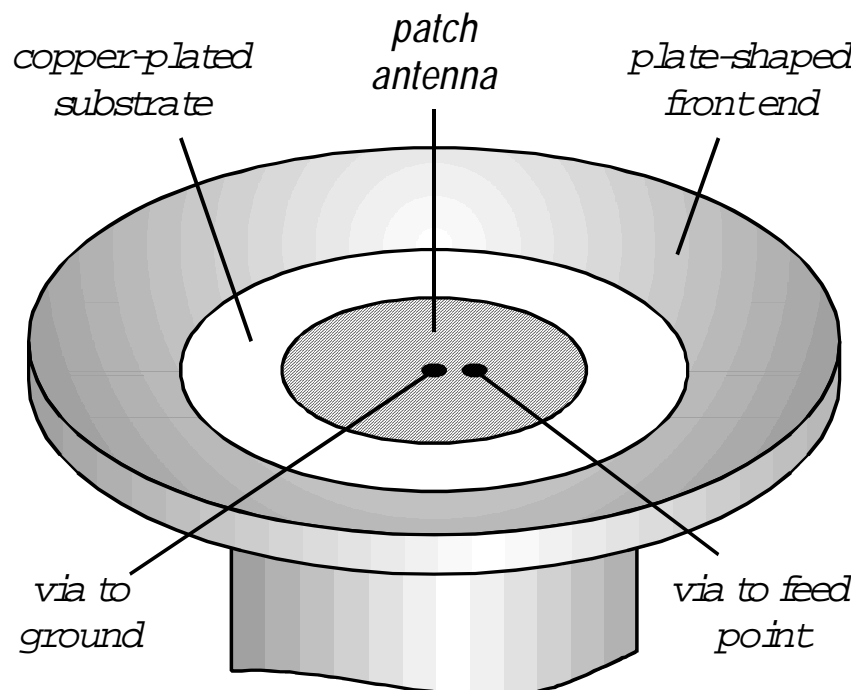


Abb. 5 Realisierung Fernfeld-Meßkopf für Volumenmessungen

Rastermessungen an verschiedenen Bauwerken

Für die Aufnahme einer Feuchteverteilung sind die Meßpunkte gemäß Abb. 2 und 3 als Matrix anzuordnen, d.h. in Reihen und Spalten. Mit den MOIST-Geräten können

die Meßwerte so abgespeichert werden, wie sie aufgenommen wurden. Einen Vorschlag für ein derartiges Meßnetz liefert die obige Skizze (MP = Meßpunkt).

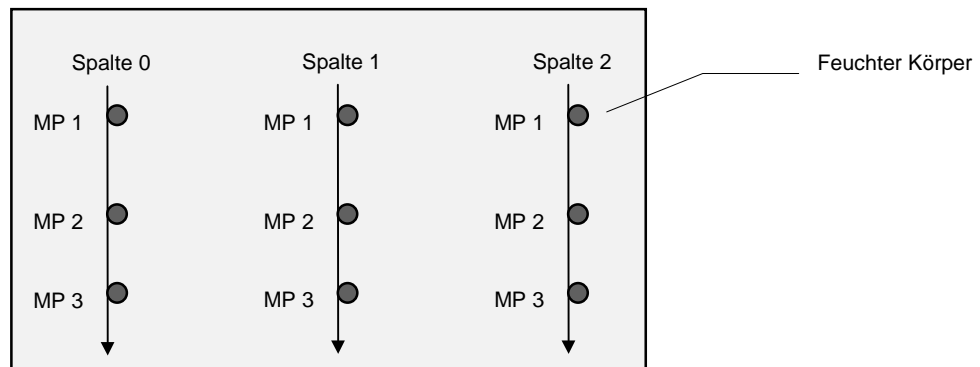


Abb. 6 Aufnahme eines Meßfelds

Jedes Meßfeld enthält eine solche Matrix. Eine Speicherung in Matrixform ist für bis zu 2000 Meßwerte möglich.

Zusätzlich kann mit Hilfe der verfügbaren Mittelwertfunktion jeder Meßpunkt (MP) aus n (z.B. $n = 3$) Meßwerten (MW) zusammengesetzt werden.

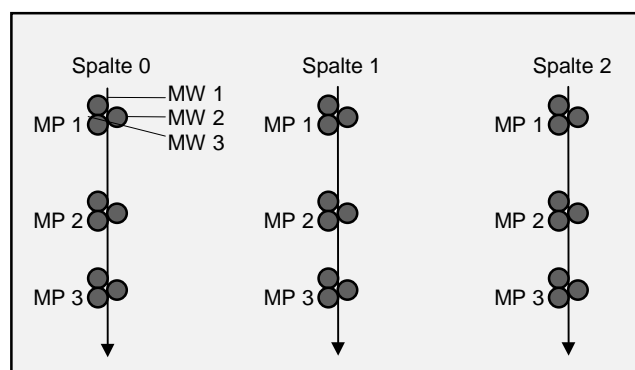


Abb. 7 Aufnahme der Meßwerte an einer durchfeuchteten Wand mit Mittelwertbildung

Bauwerke mit und ohne Bewehrung - Auswahl eines Rastermaßes

Von sehr großer Bedeutung für den mit der Messung verbundenen Aufwand ist die sinnvolle Auswahl eines Rastermaßes. Hierbei muß zunächst unterschieden werden zwischen

- Bauwerken ohne Bewehrungsstähle
- Bauwerken mit Bewehrungsstählen.

Die Aufnahme einer Feuchteverteilung an Bauwerken ohne Bewehrung ist genauso möglich wie eine Einzelmessung an feuchten Proben im Labor. Das gewählte Rastermaß hat zunächst keinen Einfluß auf mögliche Meßfehler bei der jeweiligen

punktuellen Messung. Vorprogrammierte Kalibrierkurven für verschiedene Materialien sind unter Beachtung der sonstigen Vorgaben und Randbedingungen uneingeschränkt anwendbar.

Ausgehend von eigenen praktischen Erfahrungen haben sich folgende Rastermaße als sinnvoll herauskristallisiert:

Überblicksmessungen, z.B. an großen Flächen	0,25...0,5 m
Hochauflösende Messungen zur genauen Lokalisierung von Leckagen	0,1...0,25 m

Gänzlich anders stellt sich die Situation in bewehrten Bauwerken dar. Die Aufnahme einer Feuchteverteilung ist auch in solchen Bauwerken möglich, wenn der Durchmesser der Einkopffläche auf dem Meßgut und die Wellenlänge im Material kleiner als das Rastermaß einer Bewehrungsmasche ist und die Bewehrung insgesamt nicht zu dicht liegt.

Bei einem Koppelflächen-Durchmesser von 0,08 m (MOIST-P) und einer Wellenlänge von ca. 0,03...0,07 m im Material beträgt das geringste zulässige Rastermaß der Bewehrungsmaschen 0,1 m.

Die Messung sollte daher wenigstens auch in diesem Rastermaß, wenn möglich aber mit einem noch kleineren Rastermaß, z.B. 0,05 m durchgeführt werden

Grafische Darstellung der Meßwerte

Die aufgenommenen Meßwerte lassen sich sowohl mit der Software MOISTANALYZE als auch mit Hilfe von MICROSOFT EXCEL darstellen.

Die schnelle Darstellungsmöglichkeit in MOISTANALYZE bietet sich derzeit vor allem in Kombination mit Überblicksmessungen an. Hervorzuheben ist dabei, daß die auf diese Weise generierten Bilder Bitmaps sind und sich in eine Vielzahl von Bildbearbeitungs-Programmen einbinden lassen.

Für hochauflösende Messungen ist derzeit hingegen eine Nachbearbeitung mit EXCEL zu empfehlen (z.B. 3D-Diagramme).

Beispiele für MOISTURE MAPs

Ausgehend von einer Vielzahl von Einzelmessungen hat sich das MOISTURE MAPPING - Verfahren als das für die Beurteilung des Feuchtehaushalts eines Bauwerks gegenüber einer punktuellen Messung sinnvollere Verfahren herauskristallisiert. Einige Beispiele sollen im folgenden dargestellt werden.

Feuchtemessungen im Keller des Gebäudes Hainstraße 8, Leipzig

Bei dem Mehrfamilienhaus Hainstraße 8 handelt es sich ein historisches Gebäude (15. Jahrhundert) im Kern der Leipziger Innenstadt. Das Gebäude ist stark baufällig (Dach nahezu komplett zerstört), so daß durch die Witterungseinflüsse bereits starke Nässeschäden entstanden sind.

Besonders macht sich dies in den Kellerräumen bemerkbar, welche als Tonnengewölbe ausgeführt sind, die im vergangenen Jahrhundert mit einer Ziegelschale verkleidet wurden.

Im Keller herrschte eine Luftfeuchte um 90%.

Da ein Tonnengewölbe rund ist, konnten bei einer Höhe in der Mitte des Gewölbes von 2,50 m die Messungen nicht mehr ohne Leiter durchgeführt werden. Es war daher für die Messung notwendig, die auf ein Rechteck abgebildete Mantelfläche des Halbzylinders, der die Sattelfläche des Gewölbes darstellt, noch einmal in der Mitte zu teilen. Die Messungen begannen an dem an der hinteren Stirnwand des Gewölbes gelegenen Scheitelpunkt.

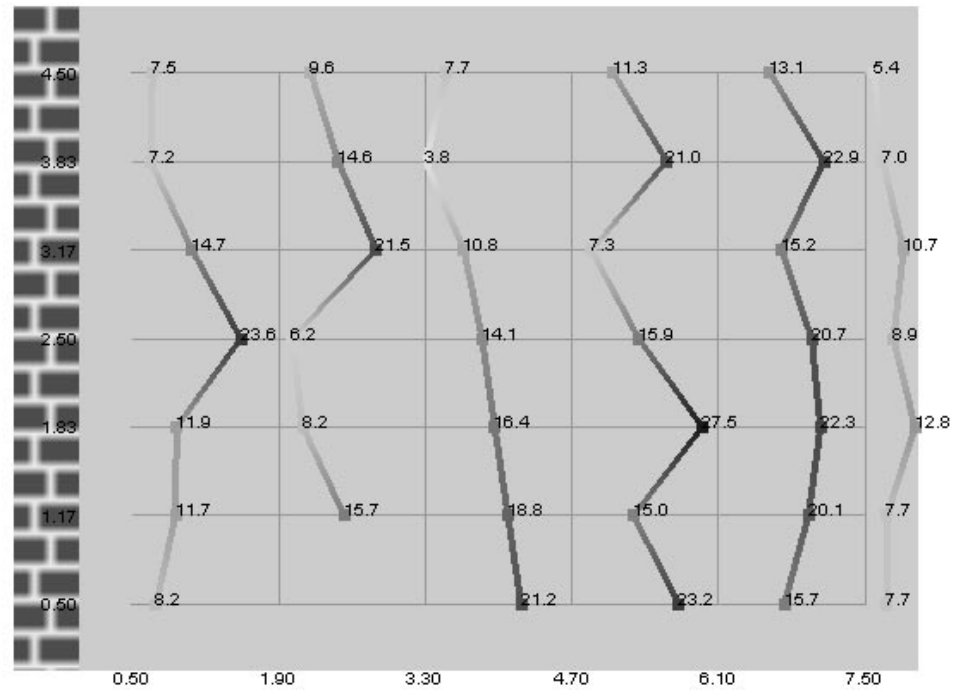
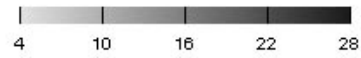


Abb. 8 Oberflächenmessung am Gebäude Hainstraße 8

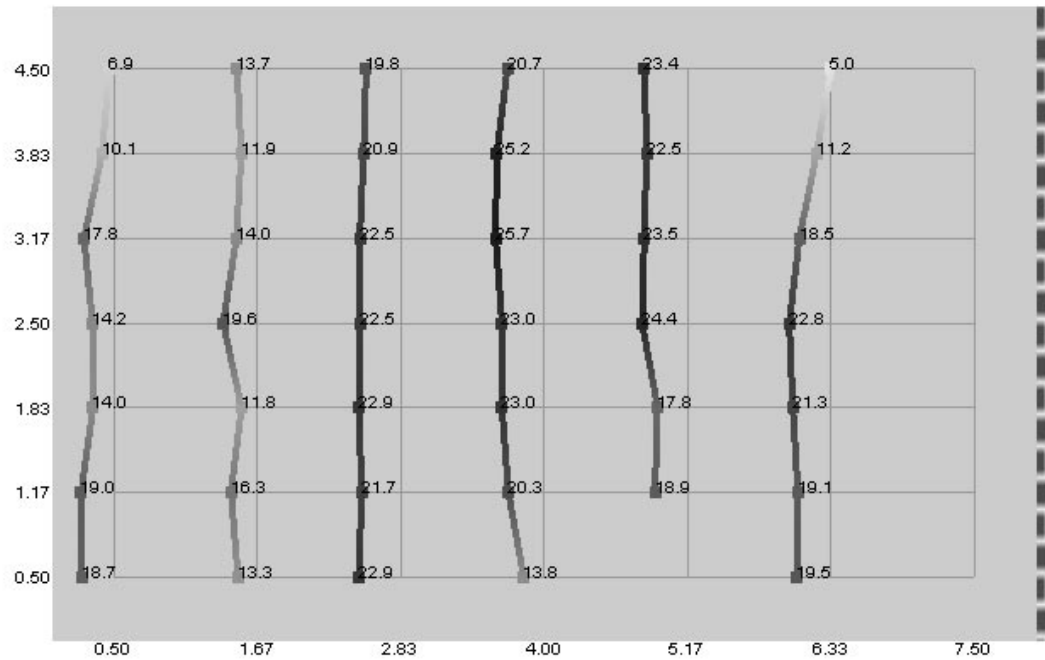
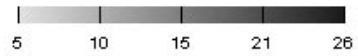
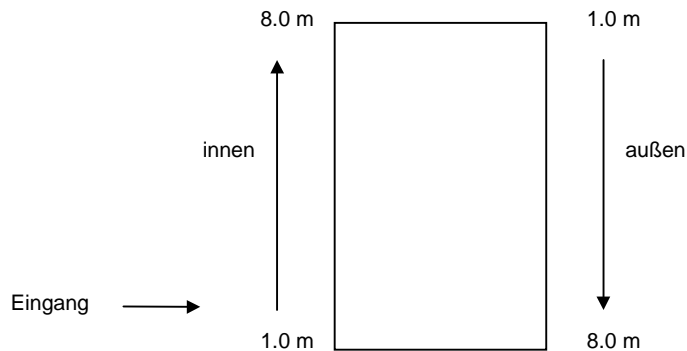


Abb. 9 Volumenmessung am Gebäude Hainstraße 8

Wie aus der grafischen Darstellung ersichtlich wird, stimmen die Messungen von Oberflächen- und Volumen-Messung relativ gut überein, vor allem, was die Feuchteverteilung angeht.

Die Meßfelder „of_außen“ und „vol_außen“ sind dabei ausgehend von der vom Eingang des Gewölbes aus rechten hinteren Ecke (Startpunkt linke obere Ecke des entstehenden Rechtecks) aufgenommen.

Die Zählrichtung in den vier Meßfeldern ist wie folgt:



Die Plots für „außen“ und „innen“ sind daher für die Ermittlung der Feuchteverteilung in dem gesamten Gewölbe für beide Meßköpfe (zwei Eindringtiefen) an ihren Oberseiten aneinanderzufügen, so daß der obere Plot auf dem Kopf steht.

Die aufgenommenen Meßwerte ergaben, daß vor allem im vorderen Scheitelbereich des Gewölbes sehr starke Durchfeuchtung gegeben ist, die sich dann auf der Außenseite bis zur Kellersohle durchzieht. Die Ursache hierfür ist in dem offensichtlich langandauernden Witterungseinfluß durch das defekte Dach zu suchen.

Leckageortung in einem Kaufhaus-Neubau

Im Auftrag eines großen Baukonzerns wurden in einem der Kellergeschosse eines Kaufhaus-Neubaus Leckageortungen durchgeführt. Dort war es auf Ebene - 2 wegen unzureichender Ausführung der das Fundament umschließenden Weißen Wanne zum Wassereintritt an verschiedenen Stellen gekommen.

Die Meßaufgabe bestand nun darin, herauszufinden, ob sich die Wassereinbrüche auf bestimmte Stellen begrenzen lassen und damit die als Gegenmaßnahme eingesetzte Injektage-Technik auf diese Stellen konzentriert werden könne.

Beispielhaft sei hier die Feuchteverteilung der vorgegebenen Referenzwand dargestellt. Diese war oberflächlich trocken, so daß auch angenommen wurde, daß im Volumen Durchfeuchtung nicht gegeben ist.

Das Raster mußte wegen des Stahlbetons des Fundaments mit 0,1 m gewählt werden. Die Messungen ergaben, daß zunächst durch die Bewehrungsstähle das Meßbild gestört wurde.

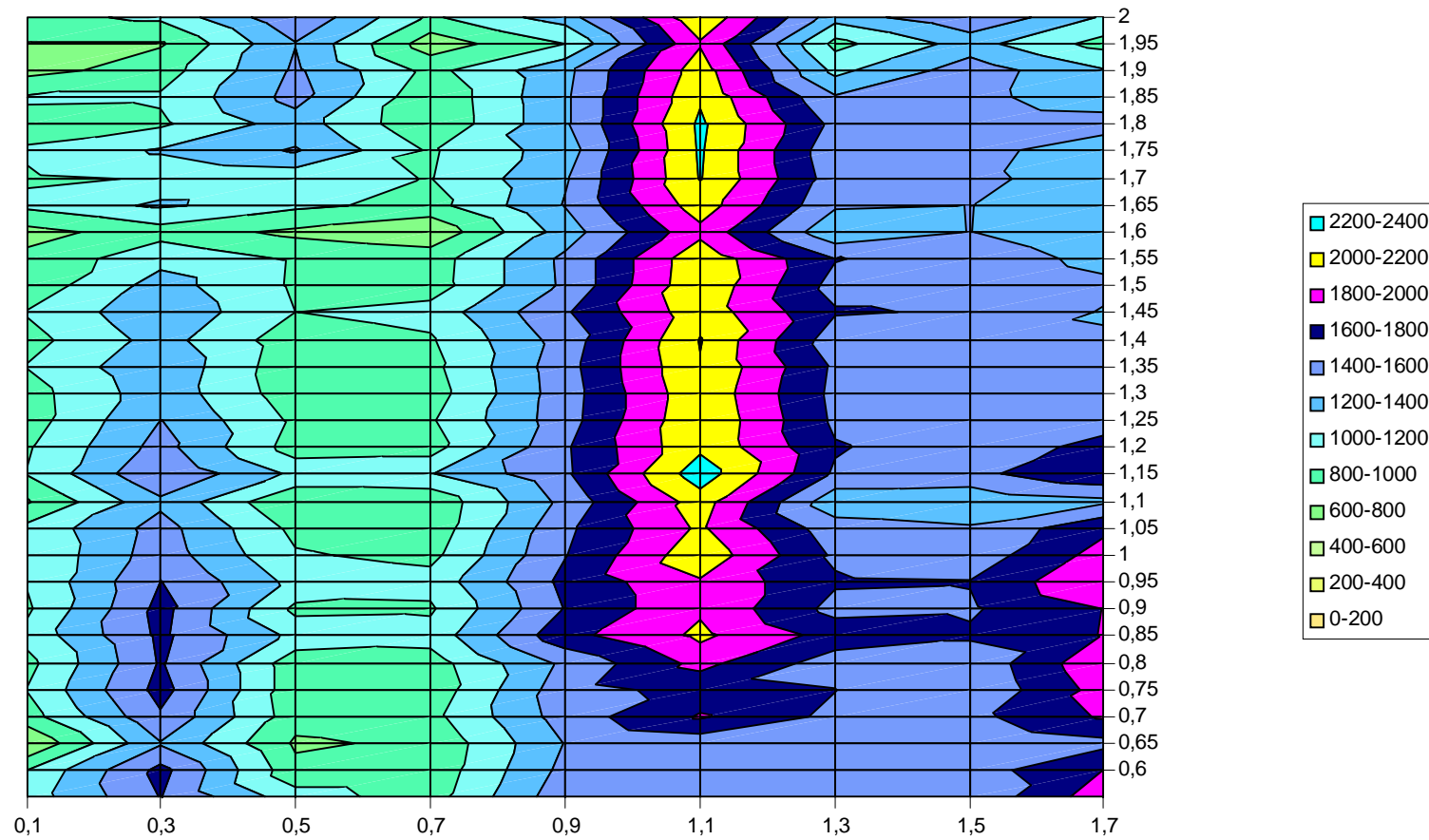


Abb. 10 *Volumen-Feuchteverteilung im Kellergeschoß eines Kaufhaus-Neubaus (Stahlbeton)*

Allerdings sind auf der rechten Seite des Bildes deutlich erhöhte Werte des Feuchteindex erkennbar, die auf eine Durchfeuchtung in diesem Bereich schließen lassen.

Da sich diese Tendenz auch in allen anderen Wandbereichen fortsetzte, mußte davon ausgegangen werden, daß das Bauwerk flächenhaft durchfeuchtet war, so daß nur noch eine Flächenverpressung in Frage kam.

Feuchteverteilung in einer Sandstein-Skulptur im Dresdner Zwinger

Im Auftrag des Staatshochbauamtes Dresden wurden im Frühjahr des Jahres Rastermessungen an einer Skulptur des Dresdner Zwingers durchgeführt.

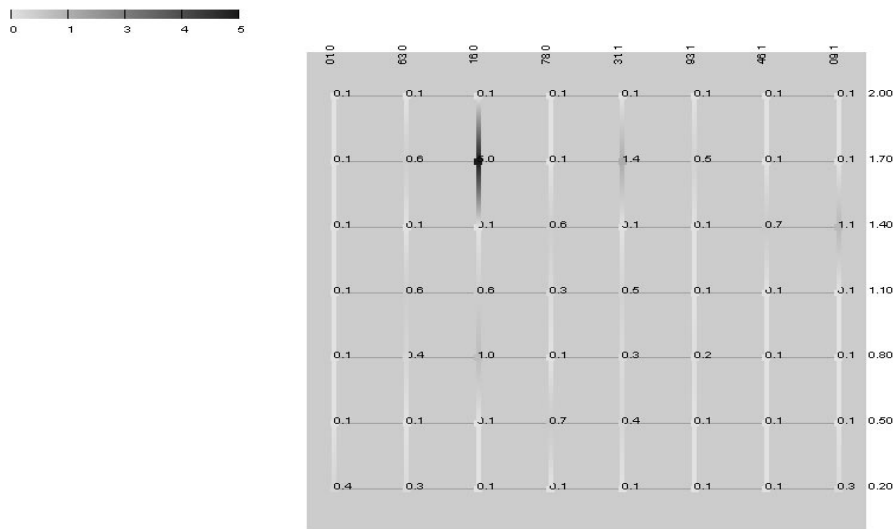


Abb. 11 Feuchtemessung in einer Skulptur des Dresdner Zwingers - Oberflächenmessung

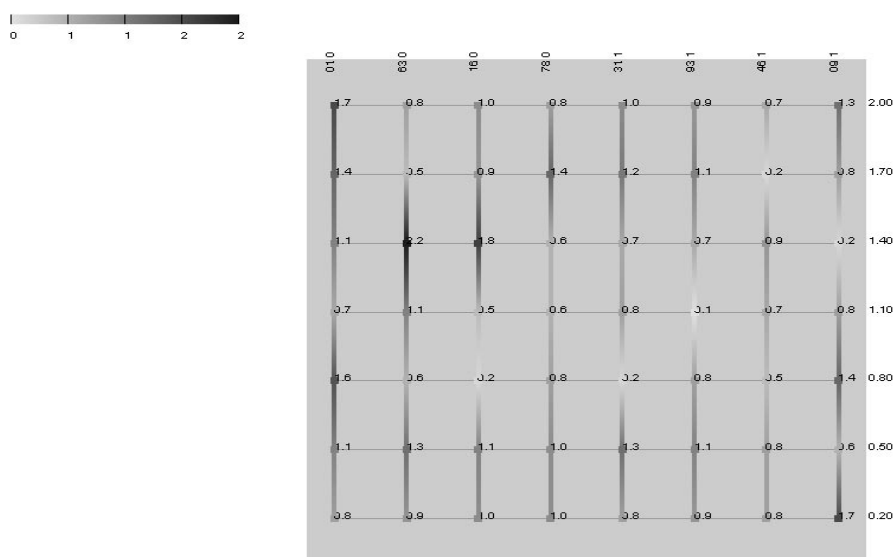


Abb. 12 Feuchtemessung in einer Skulptur des Dresdner Zwingers - Volumenmessung

Die Meßaufgabe bestand darin, zerstörungsfrei einen allgemeinen Überblick über die Feuchteverteilung in der Skulptur zu bekommen. Der zu vermessende Bereich war vom Auftraggeber in drei Teile zerlegt worden: zwei Sandsteinfelder, die die Figur einfaßten, und die Skulptur selber. Die Darstellungen in den Abbildungen beziehen sich nur auf die Skulptur.

Wie aus den Bildern erkennbar wird, schwanken die Feuchtwerte insgesamt nicht besonders stark, so daß davon ausgegangen werden konnte, daß sowohl die Skulptur als auch die Felder rechts und links daneben nicht besonders durchfeuchtet sind. Allerdings war auch zu erkennen, daß der Wassergehalt im mittleren Bereich der Skulptur und im Anschlußbereich der Felder leicht erhöht ist. Dies deckt sich mit der Vermutung, daß dort in die Skulptur eingedrungenes Wasser durch Abschattung weniger gut verdunsten kann als im vorderen Teil der Skulptur. Darüberhinaus ist der Wassergehalt im Volumen der Skulptur etwas höher als an deren Oberfläche. Auch das läßt sich aus der oberflächlichen Verdunstung erklären.

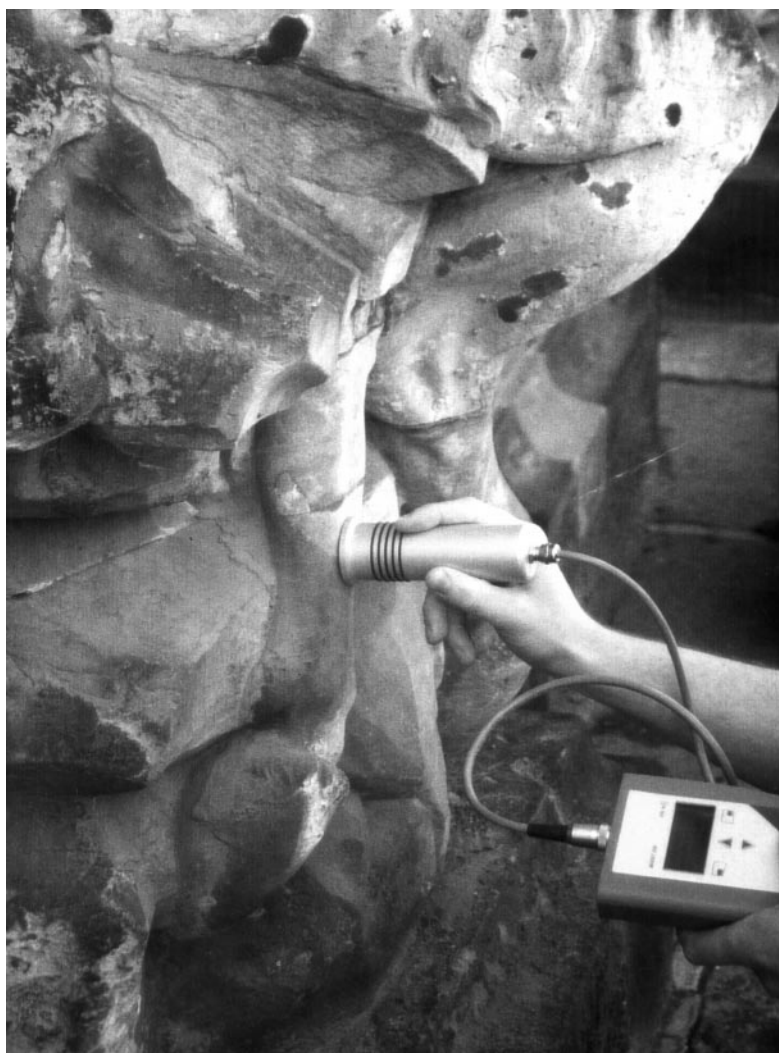


Abb. 13 Feuchtemessung in einer Skulptur des Dresdner Zwingers

Zusammenfassung

Auf der Grundlage des genauen und schnellen Mikrowellen-Feuchtemeßverfahrens und der mittlerweile verfügbaren kleinen, leichten und portablen Handheld-Meßgeräte lassen sich in kurzer Zeit sehr viele Meßwerte aufnehmen.

Durch Messungen in zwei verschiedenen Eindringtiefen lassen sich damit sowohl Aussagen über den Feuchtegehalt der oberflächennahen Schichten als auch über den Feuchtegehalt im Volumen machen.

Eine der Möglichkeit zur Aufnahme und Bearbeitung vieler Meßwerte angepaßte Datenauswertung mittels MOISTANALYZE oder MICROSOFT EXCEL läßt in kurzer Zeit die Erstellung aussagefähiger Grafiken zur Feuchteverteilung zu.

In der Verfeinerung und Weiterentwicklung dieser Technologie liegt ein großes Potential für die zukünftige zerstörungsfreie Bewertung des Zustands von Bauwerken.

Literatur:

- /1/ Kraszewski, A.: Microwave Aquametry -Recent Advances. Papers and Abstracts from the 3rd International Symposium on Humidity and Moisture, Vol.2, pp. 187 - 194, Teddington, UK, April 1998
- /2/ Göller, A.; Handro, A.; Heinrich, D.; Landgraf, J.; Schnieber, M.; Wagner, J.: Handheld-Mikrowellen-Feuchtemeßgeräte der MOIST-Serie - ein neues Konzept der Materialfeuchtemessung. Proc. DGZfP-Fachtagung „Bauwerksdiagnose“, München, 21.-22.01.99
- /3/ Göller, A., Handro, A., Heinrich, D., Landgraf, J., Schnieber, M., Wagner, J.: Leckageortung und Detektion von Feuchteverteilungen mit den MOIST-Geräten. Proc. DGZfP-Fachtagung „Bauwerksdiagnose“, München, 21.-22.01.99
- /4/ Göller, A., Handro, A., Landgraf, J.: A new microwave method for moisture measurement in building materials. Proc. 3rd Workshop on Electromagnetic Wave Interaction with Water, USDARS, Athens, Georgia, USA, 12.-13.04.99
- /5/ Göller, A.: Feuchtemessung im Raster - ein neues Konzept der Feuchtemessung in Bauwerken. erscheint in Bautenschutz Bausanierung 06/99
- /6/ Göller, A.: Mikrowellen-Feuchtemessung - Auswahl geeigneter Applikatoren. Proc. 9. Feuchtetag 1997, MFPA Weimar, S. 131 - 147