

Mikrowellen-Feuchtemessung in Schichtaufbauten

Arndt GÖLLER¹, Björn JUNGSTAND¹
¹ hf sensor GmbH, Leipzig

Kontakt E-Mail: sales@hf-sensor.de

Kurzfassung. Im Zusammenhang mit der energetischen Ertüchtigung und Sanierung von Gebäudehüllen kommen seit Jahren mehrschichtige Außenwandkonstruktionen zum Einsatz. Häufig wurden solche Konstruktionen an Bestandsbauten mangelhaft dimensioniert, mit den falschen Materialkombinationen errichtet oder unsachgemäß ausgeführt, so dass oft Feuchteschäden im Inneren der Bauteile an den Grenzen der verschiedenen Baustoffe auftreten. Zur Erkennung und Beseitigung der Schäden besteht ein großer Marktbedarf an zerstörungsfreier Materialfeuchtemessung in Mehrschichtaufbauten, der in den kommenden Jahren noch wachsen wird. Für solche Messaufgaben gab es jedoch lange Zeit im weltweiten Maßstab keine zerstörungsfrei arbeitende technische Lösung.

Einen für derartige Aufgabenstellungen sehr gut geeigneten Lösungsansatz bietet das Mikrowellen-Rasterfeuchtemessverfahren mit Sensoren verschiedener Eindringtiefen. Diese werden bei gleicher Messfrequenz möglich durch unterschiedliche elektromagnetische Wirkprinzipien der eingesetzten Mikrowellen-applikatoren. Dem liegt zugrunde, dass sich für jeden Mikrowellenapplikatortyp gemäss seiner Feldgeometrie oder Abstrahlungscharakteristik die Abnahme des elektrischen Feldes in Abhängigkeit vom Abstand in Richtung der Flächennormalen zur Applikatorfläche, d.h. in der jeweiligen Tiefenstufe, unterschiedlich auswirkt.

Bisher stellte das oszillierende Verhalten des Reflexionsfaktors vorrangig von Antennen in Abhängigkeit von der Schichtdicke eine Einschränkung des reflektiven Mikrowellenverfahrens zur Feuchtemessung in Schichtaufbauten dar, da dieser Effekt zu Mehrdeutigkeiten bei der Auswertung der Messungen führen kann. Dies betrifft sowohl absolute als auch relative Feuchtemessungen in Schichtaufbauten.

Für die Lösung dieses Problems konnte nun ein neuer, sehr vielversprechender Ansatz gefunden werden, der auf der dielektrischen Modellierung verschiedener realer Schichtaufbauten und Bauteilkonstruktionen beruht. Dabei werden die in Frage kommenden Schichtaufbauten hin-sichtlich der Abfolge der einzelnen Schichten, deren dielektrischer Eigenschaften und Dicken charakterisiert. Zur praktischen Umsetzung dieses Modells wurden Permittivitäten verschiedener Baustoffe messtechnisch ermittelt. Diese Daten fanden Eingang in Modelle realer Schichtaufbauten. Mit deren Hilfe konnte der Einfluss der Materialfeuchte in ausgewählten Schichten rechnerisch abgeschätzt und durch Messungen bestätigt werden.

1. Einführung

Im Bauwesen bestehen immer mehr Wand- und Bodenaufbauten nicht nur aus einfachen homogenen Baustoffen wie einschaligem Ziegelmauerwerk, sondern werden aus mehreren



Lagen verschiedener Baustoffe aufgebaut. Durch falschen Einbau, fehlerhafte Dimensionierung oder Materialschäden können Feuchteschäden vor allem an den inneren Grenzen der Materialschichten auftreten. Mit mikrowellenbasierten Rasterfeuchtemessungen lassen sich derartige Feuchteschäden klassifizieren und zuordnen [1][2] [3].

Mikrowellen–Feuchtemessverfahren beruhen auf den herausragenden dielektrischen Eigenschaften des Wassers. Diese werden durch die Permittivität beschrieben, die bei Wasser besonders stark ausgeprägt ist. Im Mikrowellenbereich wird die ausgeprägte Polarisierbarkeit der Wassermoleküle noch durch dielektrische Verluste ergänzt, die auf die starken Bindungen der Wassermoleküle untereinander zurückzuführen sind.

Üblicherweise kommen für Bauanwendungen nur reflektive Mikrowellenanordnungen in Frage, da sie von einer Seite des Bauwerks aus betreibbar sind. Bei derartigen Anordnungen wird aus einer Antenne eine elektromagnetische Welle ins Material eingestrahlt oder es dehnt sich das elektromagnetische Feld einer Streufeld-Anordnung (z.B. offener Resonator) in das Material aus. Durch die Kombination dieser Wirkprinzipien sind mit Mikrowellen-Anordnungen zerstörungsfrei Feuchtemessungen in verschiedenen Schichten eines Bauobjekts möglich. Gemessen werden sowohl die ins Material hineinlaufende elektromagnetische Welle als auch die vom Material reflektierte Welle. Der sogenannte Reflexionsfaktor ρ ist der Quotient aus rück- und hinlaufender Welle

$$\rho = \frac{u_{\text{rück}}}{u_{\text{hin}}} . \quad (1)$$

Mikrowellen-Feuchtemessverfahren gehören zu den indirekten Messverfahren. Das Messergebnis von Mikrowellensensoren ist daher zunächst keine direkte Angabe der absoluten Materialfeuchte nach Definition, sondern ein Äquivalent zum Mikrowellen-Reflexionsfaktor gemäß (1). Der sogenannte Feuchteindex FI entsteht aus der Multiplikation des Reflexionsfaktors mit einem festen Faktor gemäß

$$FI = 4000 * \rho . \quad (2)$$

2. Mikrowellensensoren verschiedener Feldgeometrien und Wechselwirkungsvolumina

Von besonderer Bedeutung für Feuchtemessungen in verschiedenen Objekten ist die Möglichkeit der Messung in verschiedenen tiefen Materialschichten. Diese wird bei gleicher Messfrequenz möglich durch unterschiedliche elektromagnetische Wirkprinzipien der eingesetzten Mikrowellenapplikatoren. Das von diesen erzeugte elektrische Feld fällt mit wachsendem Abstand von ihrer Oberfläche exponentiell ab. Durch Entwicklung in eine Taylorreihe kann die Feldverteilung des elektrischen Feldes von Streufeldapplikatoren näherungsweise mit der Basisbeziehung

$$E \sim \frac{1}{r^2} \quad (3)$$

beschrieben werden, wobei r den Abstand zum Applikator darstellt. Für Strahlungsfeldanordnungen (Antennen) gilt im Fernfeld hingegen näherungsweise

$$E \sim \frac{1}{r} . \quad (4)$$

Die elektrische Feldstärke von Streufeldapplikatoren reduziert sich daher bei gleicher Entfernung sehr viel schneller als die von Strahlungsfeldapplikatoren. Dies hat zum einen große Unterschiede bei der maximalen Eindringtiefe zur Folge, die bei der typischerweise

verwendeten ISM-Frequenz 2,45 GHz für reine Streufeldapplikatoren etwa 2 - 3 cm beträgt, für kommerziell verfügbare Strahlungsfeldapplikatoren hingegen bis zu 25 cm.

Mischformen von Resonatoren und Antennen ermöglichen weitere Tiefenabstufungen, während höher bündelnde Antennentypen noch höhere Eindringtiefen zulassen.

Tabelle 1. Feldreichweiten und Auflösung verschiedener Applikatortypen

Applikatortyp	räuml. Auflös.	Feldreichweite	Messvolumen
Streufeld linear (Leitungen)	mm	mm	einige mm ³
Streufeld linear (Resonatoren)	mm	cm	einige cm ³
Streufeld rund, symmetrisch	cm	cm	bis 100 cm ³
Strahlungsfeld, planar, ungerichtet	cm	dm	bis zu 10 l
Strahlungsfeld, planar, gerichtet	cm	dm bis m	bis zu 200 l

Dem liegt zugrunde, dass sich für jeden Mikrowellenapplikatortyp gemäss seiner Feldgeometrie oder Abstrahlungscharakteristik die Abnahme des elektrischen Feldes in Abhängigkeit vom Abstand in Richtung der Flächennormalen zur Applikatorfläche, d.h. in der jeweiligen Tiefenstufe, unterschiedlich auswirkt. Als Bezugspunkt innerhalb der Tiefenschicht galt dabei der Mittelpunkt in Richtung der Flächennormalen zur Applikatorfläche.

Unterschiedliche Feldgeometrien wie in Tabelle 1 dargestellt korrespondieren mit unterschiedlichen Mikrowellenanordnungen für verschiedene Schichten. Derzeit sind Sensoren für Schichttiefen bis 3 cm, 6 cm, 10 cm, 25 cm und bis 80 cm verfügbar. So kann an homogenen Materialien eine Tiefenstufung in insgesamt 5 Einzelstufen vorgenommen werden, wovon sich 4 im Bereich der üblicherweise am Bau benötigten Eindringtiefen bewegen.

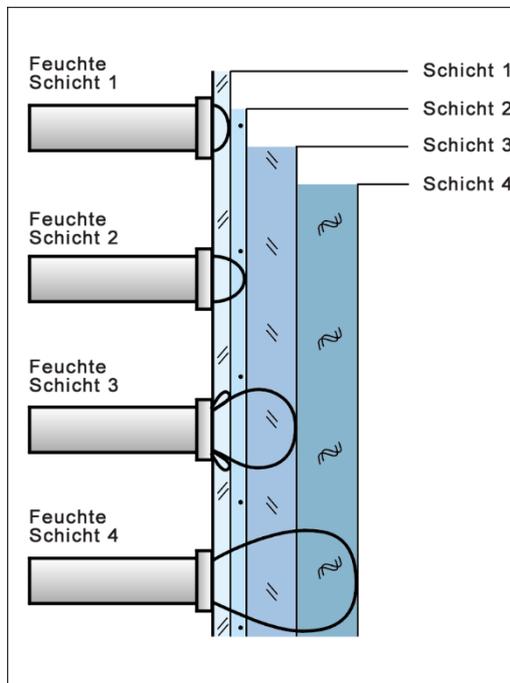


Abb. 1. Tiefenwirkung verschiedener Mikrowellenfeuchtesensoren

Aus Abb. 1 wird ersichtlich, dass gleiche Schichten eines Untersuchungsobjekts von verschiedenen Applikatoren unterschiedlich bewertet werden. Die Energie der Oberflächenapplikatoren verbleibt vollständig in der oberflächlichen Schicht. Bei den Strahlungsfeldapplikatoren ist die Wechselwirkung mit der obersten Schicht hingegen nur gering ausgeprägt, der grösste Teil der Mikrowellenenergie wechselwirkt in den tieferen Schichten.

3. Oszillation des Mikrowellen-Reflexionsfaktors an Schichten geringer Dicke

Das reflektive Feuchtemessverfahren kann zur eindeutigen Ermittlung absoluter Feuchtwerte z.B. in Masse- oder Volumenprozent nur an homogenen Materialien mit einer Schichtdicke größer als die Feldreichweite des jeweiligen Mikrowellenapplikators eingesetzt werden.

Das Kriterium einer Mindestdicke eines homogenen Materials ist an dünnen Wänden, an Baustoffen mit Hohlräumen zur Wärmeisolation wie Poroton oder Hohlblocksteinen oder an mehrschichtig aufgebauten Baukörpern nicht gegeben. An der Rückseite jeder Materialschicht wird die elektromagnetische Welle durch den erneuten Übergang in Luft oder in Dämmstoffe nochmals reflektiert, ebenso beim Übergang aus Luft oder aus einer Dämmstoffschicht in ein darunter oder dahinter liegendes Material. Diese Rückseiten-Reflexionen überlagern sich – teilweise mehrfach – den am Eingang des Mikrowellen-Applikators gemessenen Reflexionsfaktor-Anteilen, die beim Eintritt der Welle an der Stirnfläche des Materials entstehen. Der Effekt ist allerdings auch feuchteabhängig.

Der (feuchteabhängige) Reflexionsfaktor eines flächig ausgedehnten Volumenelements wie z.B. einer Bauteilschicht lässt sich in erster Näherung durch die Funktion

$$\rho = \frac{(1 - \epsilon_m)(1 - e^{-2\gamma d})}{(1 + \sqrt{\epsilon_m})^2 - (1 - \sqrt{\epsilon_m})^2 e^{-2\gamma d}} \quad (5)$$

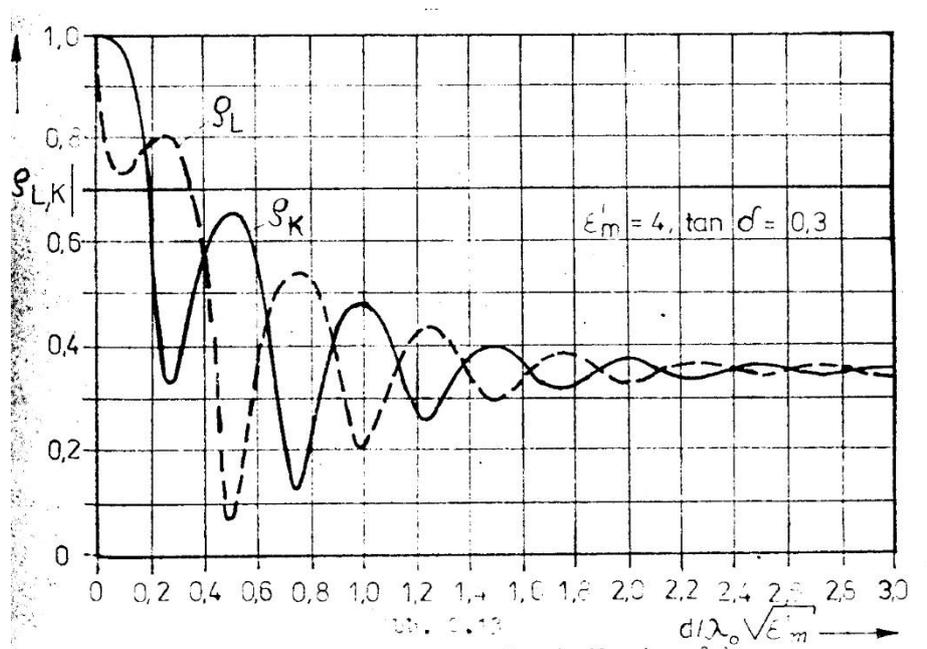


Abb. 2. Schichtdickenabhängige Oszillation des Reflexionsfaktors dargestellt an einem Beispiel

beschreiben [4]. Dabei ist ρ der Reflexionsfaktor, $\epsilon_m = f(F)$ die von der Feuchtigkeit abhängige Permittivität des Materials sowie d die Dicke der Bauteilschicht. Damit ergibt sich

eine über die Tiefenausdehnung des Materials je nach Verlusten (Feuchtegehalt) mehr oder weniger stark oszillierende Funktion, die für verschiedene Abschlüsse in Abb. 2 dargestellt ist. Das bedeutet für die Messpraxis: Bei bestimmten Bauteildicken steigt der Reflexionsfaktor und damit der Feuchteindex nicht mit wachsender Feuchte an, sondern er weist eine fallende Kennlinie auf.

Das von einem Messkopf mit integrierter Patch-Antenne erfasste Wechselwirkungsvolumen reicht in festen, homogenen Materialien bis in eine Tiefe von etwa 25 cm, abhängig von deren Dichte. Je höher die Dichte, desto geringer die Eindringtiefe. Das bedeutet, dass sich z.B. in einem Schichtaufbau mit fünf Schichten das mit (5) beschriebene Verhalten von bis zu fünf hintereinander liegenden Bauteilschichten überlagert.

Das oszillierende Verhalten des Reflexionsfaktors in Abhängigkeit von der Schichtdicke ist daher bei Schichtaufbauten ein Nachteil des reflektiven Mikrowellenverfahrens zur Feuchtemessung, da dieser Effekt zu Uneindeutigkeiten bei der Auswertung der Messungen führen kann. Dies betrifft sowohl absolute als auch relative Feuchtemessungen in Schichtaufbauten.

4. Lösung: Modellierung mit Hilfe von Leitungsmodellen

Dieses scheinbare Problem ist allerdings der Schlüssel zu einer verbesserten Tiefenaufklärung zerstörungsfreier Mikrowellen-Feuchtemessungen. Hierzu wurde für in der Baupraxis häufig auftretende Schichtaufbauten eine Modellbildung gestartet, bei der diese hinsichtlich der Abfolge der einzelnen Schichten, deren dielektrischer Eigenschaften und Dicken charakterisiert wurden. Dazu gehören u.a., aber nicht ausschließlich

- Flachdach-Aufbauten
- Fußboden-Aufbauten mit schwimmenden Estrichen
- Fassaden mit Wärmedämm-Verbundsystemen
- Holzwand-Konstruktionen mit WDS.

Diese sind alle dadurch gekennzeichnet, dass sie aus zwei bis acht Schichten verschiedener Baustoffe mit verschiedenen Permittivitäten bestehen. Die dielektrischen Eigenschaften dieser Baustoffe sind entweder aus der Literatur bekannt, oder sie können messtechnisch erfasst werden. So wurden für die Modellbildung u.a. die Permittivitäten von Polymer-Bitumenbahnen, XPS-Dämmung und EPS-Dämmung messtechnisch ermittelt.

Bei nichtmagnetischen Materialien lassen sich die einzelnen Baustoffschichten vereinfacht jeweils in z-Richtung als ein Abschnitt einer elektrischen Leitung (siehe Abb. 3) mit der Abschlussimpedanz Z_A auffassen, deren Eigenschaften wie Eingangsreflexionsfaktor ρ , Leitungsimpedanz $Z_L = f(\epsilon_r)$ und elektrische Länge $l_{el} = l_{mech} * \sqrt{\epsilon_r}$ von der Dicke der Schicht und deren Permittivität abhängen.



Abb. 3. Modell einer elektrischen Zweidrahtleitung

Wenn die Dicken der einzelnen Materialschichten bekannt sind, kann mit Hilfe dieses Leitungsmodells deren Mikrowellen-Reflexionsverhalten berechnet werden.

In Abb. 4 ist ein solches Schichtenmodell für einen Aufbau bestehend aus n Schichten mit den jeweiligen Wellenwiderständen $Z_{L,1} \dots Z_{L,n-1}$ der Schichten 1 bis n-1, der Abschlussimpedanz Z_A der untersten Schicht n und den elektrischen Dicken der jeweiligen Schichten $d_{el,1} = d_{mech,1} * \sqrt{\epsilon_{r,1}}$ bis $d_{el,n} = d_{mech,n} * \sqrt{\epsilon_{r,n}}$ dargestellt.

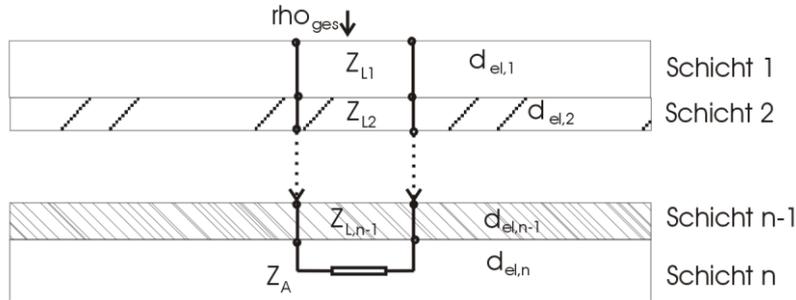


Abb. 4. Bild Schichtenaufbau modelliert mit Leitungselementen

Nachfolgend werden in Tabelle 2 bis 4 vereinfacht einige typische Schichtfolgen mit den jeweiligen Dicken der Materialschichten und deren Permittivitäten jeweils von oben nach unten bzw. von außen nach innen dargestellt:

Tabelle 2. Beispiel eines Flachdach-Aufbaus

Schicht-Nr.	Material	Typische Dicke in mm	Permittivität ϵ_r
1	EPDM-Folie	5	2,5
2	Mineralwoll-Dämmung	120	ca. 3
3	Dampfsperre (Polymer oder Bitumen)	5	2,5
4	Metallkaschierung (Aluminium)	wirkt als Reflektor	∞

Tabelle 3. Beispiel eines Boden-Aufbaus mit schwimmendem Estrich

Schicht-Nr.	Material	Typische Dicke in mm	Permittivität ϵ_r
1	Teppich (Polymerbasis)	10	2,5
2	Zementestrich	60	5 (bis 6)
3	EPS-Dämmung (expandiertes Polymer)	80	1,4
4	Abdichtung (Polymerbahn)	5	2,5
5	Betondecke	200	6

Tabelle 4. Beispiel einer Fassade mit Wärmedämm-Vebundsystem

Schicht-Nr.	Material	Typische Dicke in mm	Permittivität ϵ_r
1	Zementputz	10	4
2	Haftvermittler (Polymerbasis, Kleber)	10	3
3	EPS-Dämmung (expandiertes Polymer)	150	1,4
4	Abdichtung (Polymerbahn)	5	2,5
5	Kalksandstein	150	4

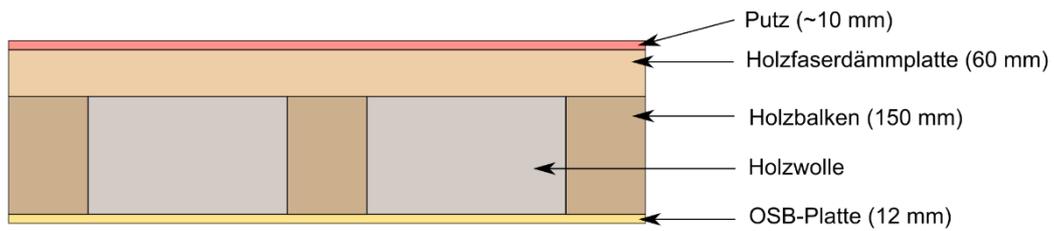


Abb. 5. Holzwandelement mit Wärmedämmverbundsystem

Auf Basis bekannter Materialdicken und Permittivitäten, dargestellt in Tabelle 5, wurde beispielhaft für ein Holzwand-Element (dargestellt in Abb. 5), wie es im Holzrahmenbau bei Fertighäusern verwendet wird, eine solche dielektrische Modellierung durchgeführt.

Tabelle 5. Schichtaufbau eines Holzwandelements

Schicht-Nr.	Material	Typische Dicke in mm	Permittivität ϵ_r
1	Zementputz	10	4
2	Haftvermittler (Polymerbasis, Kleber)	10	3
3	Holzfaser-Dämmplatte	60	2
4	Holz wolle-Dämmung (locker gestopft)	150	2 bis 2,5
5	OSB-Platte	12	2,5

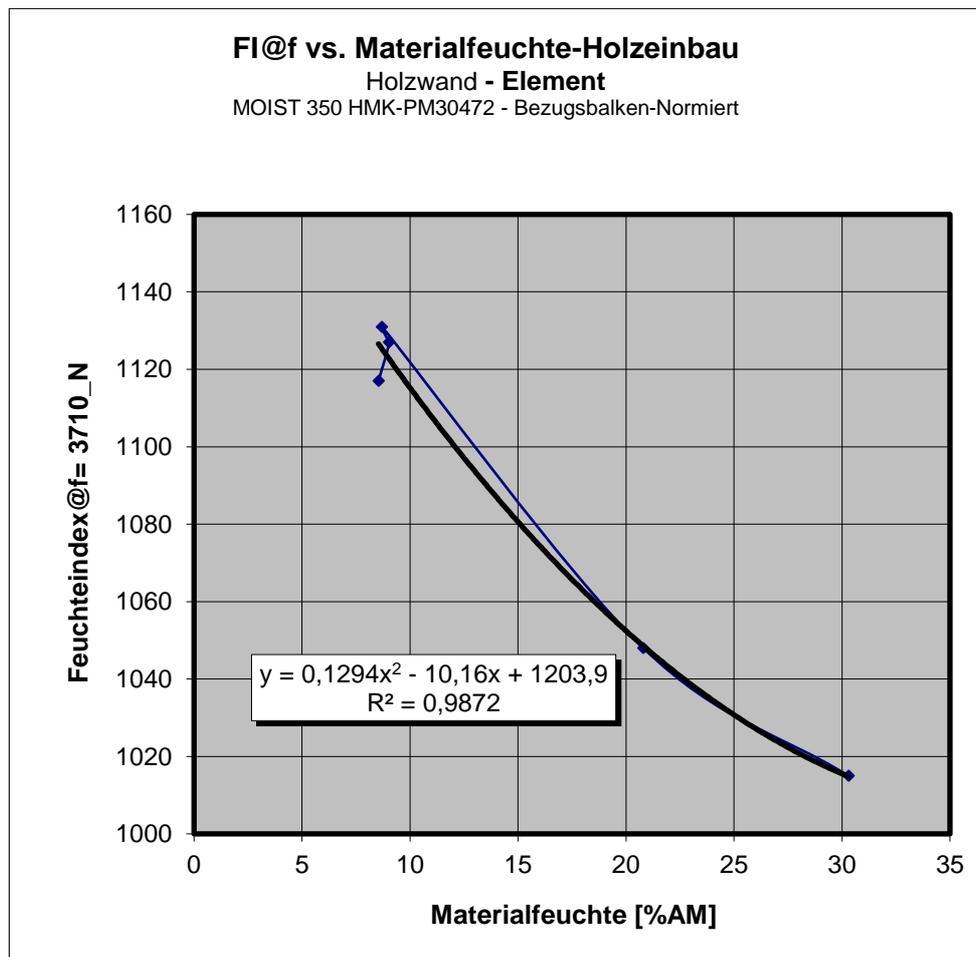


Abb. 6. Kalibrierfunktion für Sonde MOIST PM bei Messung direkt über dem inneren Holzbalken

Dabei war das Ziel die Bestimmung der Feuchte des Holzbalkens durch die oberflächlichen Schichten hindurch, d.h. ohne direkten Kontakt, aber bei bekannter Lage und Tiefe. Im Ergebnis der Modellberechnung konnte ermittelt werden, dass der Zusammenhang zwischen Materialfeuchte und Mikrowellensignal FI eine fallende Kennlinie aufweist.

Zur Bestätigung wurden an dem Holzwandelement Rasterfeuchtemessungen durchgeführt. Hierbei wurde die Putzseite des Testaufbaus mit einem Rastermaß von 5 cm mit verschiedenen Messköpfen mit jeweils unterschiedlichen Eindringtiefen vermessen.

Der mittlere Holzbalken sowie die Holzfaserdämmmatte des Testaufbaus konnten entfernt werden, um diese im Labor durch Wässerung mit paralleler Erfassung der Gewichtszunahme auf unterschiedliche Feuchtegehalte einzustellen. Die oberflächliche Schicht (Putz) war bei der Messung trocken. Der mittlere Holzbalken wurde auf folgende Feuchtegehalte eingestellt:

- ca. 9% atro (Ausgleichsfeuchte)
- ca. 20% atro
- ca. 30% atro
- ca. 40% atro.

Die auf dem Balken gemessenen Werte werden mit steigender Feuchte immer niedriger - es tritt ein „Umkehreffekt“ gemäß (5) auf. Wenn man die Lage des Holzbalkens in der Wand kennt und somit weiß, wo die Feuchtemessung durchgeführt werden muss, um genau über dem Balken zu messen, kann aus diesen Messwerten die in Abb. 6 dargestellte Kalibrierfunktion mit fallender Kennlinie abgeleitet werden.

Somit ist es in diesem mehrschichtigen Aufbau auch möglich, die absolute Feuchte des tiefer liegenden Holzbalkens zu messen, wenn man dessen Lage und Tiefe kennt.

5. Zusammenfassung

Für die zerstörungsfreie Materialfeuchtemessung in Schichtaufbauten können deren einzelne Schichten hinsichtlich ihrer dielektrischer Eigenschaften und Dicken beschrieben werden. Diese Daten können für die Modellierung realer Schichtaufbauten genutzt werden. Damit lässt sich der Einfluss der Materialfeuchte in ausgewählten Schichten rechnerisch abgeschätzt und konnte für ein Beispiel durch Messungen bestätigt werden. Das hier beschriebene Prinzip lässt sich bei bekannten Permittivitäten und Schichtdicken auch auf andere Schichtaufbauten anwenden und hat damit Allgemeingültigkeit.

6. Literatur

- [1] Göller, A., Landgraf, J.: Proc. 9. Feuchtetag 1997, Weimar, MFPA Weimar, 17.-18.09.97
- [2] Göller, A.: Mikrowellenbasierte Rasterfeuchtemessung. Bautechnik 6/2007, S. 417 ff.
- [3] Göller, A.: Schau an – Schicht für Schicht. Bautenschutz + Bausanierung 7/2007, S. 38ff.
- [4] Fuchs, G.: Mikrowellentechnische Sensoren für die Prozeßmeßtechnik und -automatisierung unter besonderer Berücksichtigung der Mikrowellen-Feuchtemessung. Diss. B, TU Ilmenau, 1986
- [5] Meinke, Gundlach: Taschenbuch der Hochfrequenztechnik, 5. Auflage, Springer Verlag 1992, S. C17 ff.