

DGZfP-Berichtsband BB 69-CD  
Poster 14

## **Dielektrische Untersuchung mineralischer Baustoffe in Abhängigkeit von Feuchte- und Salzgehalt bei 2,45 GHz**

W. Leschnik, U. Schlemm, Technische Universität Hamburg-Harburg

---

### **Einleitung**

Mit dem Ziel, ein zerstörungsfrei arbeitendes, wiederholbares elektrisches Meßverfahren für mineralische Baustoffe zu entwickeln, wurden am Arbeitsbereich Bauphysik und Werkstoffe im Bauwesen der Technischen Universität Hamburg-Harburg im Rahmen verschiedener Forschungsprojekte Untersuchungen der dielektrischen Eigenschaften mineralischer Baustoffe durchgeführt [LHP94][LHA96]. Es erfolgte anschließend die Entwicklung eines Verfahrens zur Feuchtemessung an Baustoffen, das bei einer Meßfrequenz von 2,45 GHz arbeitet. Bei dieser Frequenz ist der Realteil  $\epsilon'$  der Dielektrizitätszahl weitgehend salzunabhängig, d. h. eine Feuchtemessung durch Bestimmung von  $\epsilon'$  ist möglich. Die ermittelte Abhängigkeit zwischen dem Realteil  $\epsilon'$  und der Baustofffeuchte ist für eine Vielzahl von Baustoffen unterschiedlicher Porosität annähernd gleich. Der Imaginärteil  $\epsilon''$  ist dagegen in diesem Frequenzbereich noch abhängig vom Feuchte- und Salzgehalt. Da der Feuchtegehalt aus dem Realteil  $\epsilon'$  der Dielektrizitätszahl bestimmbar ist, kann über den Imaginärteil  $\epsilon''$  auf den Salzgehalt geschlossen werden. So konnten Salzprofile an dotierten Kalksandsteinen erfolgreich bestimmt werden [LSc99]. Da mit zunehmenden Frequenzen die dielektrischen Verluste durch Ionenleitung betragsmäßig geringer werden, nimmt die Detektierbarkeit des Salzgehaltes allerdings ab. Ergänzende dielektrische Untersuchungen mineralischer Baustoffe bei 2,45 GHz unter Variation des Salzgehaltes waren einerseits zur Kalibration der Salzmessung nötig, andererseits sollte die Abschätzung der erreichbaren Auflösung bezüglich des Salzgehaltes bei 2,45 GHz erfolgen.

Diese dielektrischen Untersuchungen wurden mit Hilfe eines durchtrennten Hohlraumresonators durchgeführt. Es handelt sich hierbei um ein für andere Materialien bewährtes Hochfrequenzmeßverfahren zur Bestimmung dielektrischer Eigenschaften [WAR68] [SUL88].

### **Untersuchte Materialien und Probenpräparation**

Die ergänzenden dielektrischen Messungen wurden weitgehend an der gleichen Baustoffauswahl durchgeführt wie die vorhergehenden Untersuchungen, im Rahmen derer auch die bauphysikalischen Kenngrößen der Materialien bestimmt wurden [LHA96]. Messungen erfolgten also an einer Auswahl von Sandsteinen, Ziegeln und an Kalksandstein. Bauphysikalische Kenngrößen früher nicht untersuchter Ziegelsorten werden noch ermittelt.

Für das gewählte Meßverfahren mußten dünne Probenplättchen mit Hilfe einer Steinsäge präpariert werden. Die Proben hatten eine Abmessung von 110 mm x 55 mm und eine Dicke von 3 mm.

Die Salzdottierung der Proben erfolgte mit der gleichen Salzlösung wie bei den früheren Untersuchungen. Die Proben wurden in einer vom WTA für die Prüfung von Sanierputzen vorgeschlagene Lösung aus 34 g HCl, 63g Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> und 14 g NaNO<sub>3</sub> in 1 l Wasser gelagert [WTA 92]. Die Salzlösung wurde in unterschiedlichen Verdünnungen zum Einstellen verschiedener Salzgehalte verwendet. Die Lagerungsdauer betrug mehrere Tage. Auf gravimetrischem Wege wurde nach der Dottierung der Salzgehalt festgestellt. Die Feuchtedottierung erfolgte jeweils durch schrittweises Zuführen einer bestimmten Wassermenge und anschließender Lagerung in dampfdichter Verpackung für mindestens einen Tag. Die Bestimmung des jeweiligen Feuchtesatzes erfolgte ebenfalls auf gravimetrischem Wege.

## Meßverfahren

Der verwendete Hohlraumresonator besteht aus 2 gleichlangen Rechteckhohlleitern, die an den Enden durch Lochblenden kurzgeschlossen sind. Die Anordnung ist in Bild 1 skizziert. In Mitte der Anordnung sind die Hohlleiter durch einen dünnen Schlitz getrennt, in den die zu untersuchende Materialprobe eingeschoben wird.

Die Abmaße der verwendeten Anordnung sind die folgenden:

Gesamtlänge  $L = 324,1$  mm

Hohlleiterlänge  $l = 160,035$  mm

Breite  $a = 72,14$  mm

Höhe  $b = 3,4$  cm

Schlitzbreite:  $s = 3,4$  mm

Probendicke  $d \approx 3$  mm

Einkoppellöcher:  $\varnothing 18$  mm

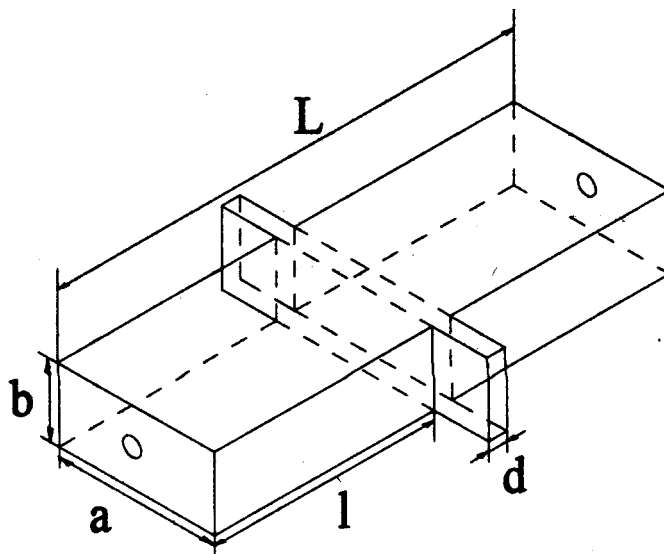


Bild 1: Skizze des Meßaufbaus

In den Resonator wird durch die Koppellöcher eine elektromagnetische Welle ein- und ausgekoppelt. Die Messungen erfolgten in Transmissionsanordnung. In Abhängigkeit von den geometrischen Eigenschaften des Resonators bilden sich diskrete Resonanzen, d. h. es existieren diskrete Resonanzfrequenzen maximaler Transmission. Diese durch  $f_{\text{imp}}$  bezeichneten Resonanzen lassen sich durch folgende Beziehung berechnen [MEG 92], in die die Resonatorabmessungen eingehen:

$$f_{\text{imp}} = \frac{c_0}{2} \sqrt{\left(\frac{l}{a}\right)^2 + \left(\frac{m}{b}\right)^2 + \left(\frac{p}{L}\right)^2} \quad (1)$$

In Beziehung (1) bezeichnet  $c_0$  die Lichtgeschwindigkeit. Die Parameter  $l$ ,  $m$  und  $p$  nehmen ganzzahlige Werte (0,1,2,..) an, wobei mindestens einer der Parameter stets ungleich Null ist. Für die dielektrischen Untersuchungen sind die  $H_{10p}$ -Resonanzen mit ungeradem Index  $p$  entscheidend. Der Index  $p$  bezeichnet hierbei die Anzahl der stehenden Halbwellen im Resonator in Längsrichtung. Für ungerade Halbwellenzahl befindet sich die maximale elektrische Feldstärke in der Resonatormitte. Das elektrische Feld ist hier tangential zur Oberfläche der Probe und der Schlitz durchbricht keine Wandströme.

Für die hier durchgeführten Messungen wurde die  $H_{103}$ -Resonanz betrachtet. Mit einer nach Beziehung (1) berechneten Resonanzfrequenz von  $f_{103} = 2498,52$  MHz liegt sie genau im richtigen Frequenzbereich. Da die Resonanzen mit einem Netzwerkanalysator HP8714B aufgenommen wurden, dessen obere Arbeitsfrequenz bei 3 GHz liegt, war diese die einzige in Frage kommende Resonanz.

Zur Untersuchung dielektrischer Materialeigenschaften wird die  $H_{103}$ -Resonanz des leeren Resonators mit der entsprechenden Resonanz nach Einschub der Materialprobe in Beziehung gesetzt. Eine typische Resonanzkurve ist in Bild 2 zu sehen.

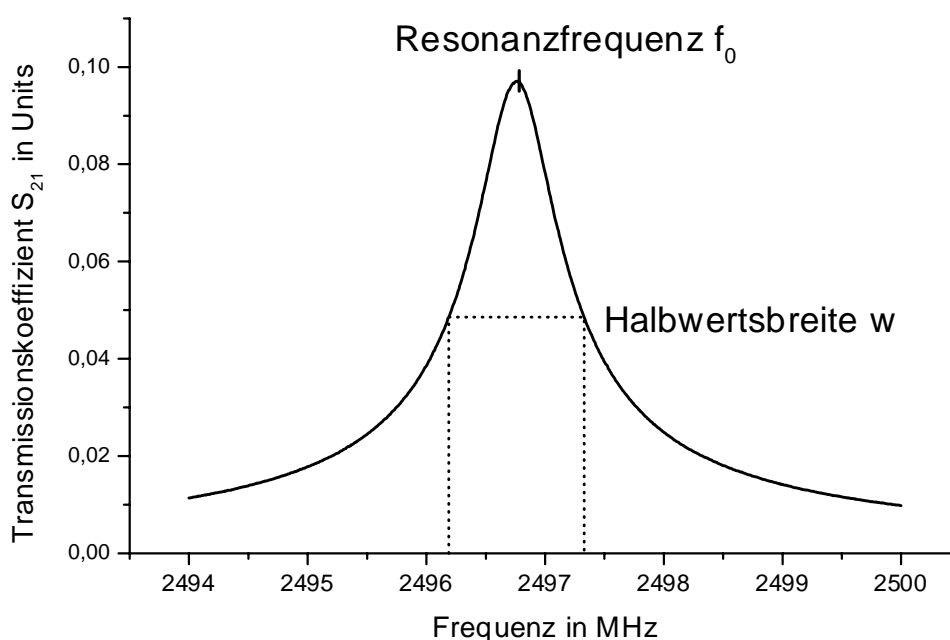


Bild 2: Typische Resonanzkurve

In Bild 2 sind die die Resonanz beschreibenden Kenngrößen eingezeichnet: Die Resonanzfrequenz  $f_0$  und die Halbwertsbreite  $w$ , die die Breite der Resonanzkurve auf halber Höhe bezeichnet. Die Güte des Resonators  $Q$  ist über diese beiden Größen definiert:

$$Q = \frac{f_0}{w} \quad (2)$$

Der verwendete Resonator hat in leerem Zustand für die  $H_{103}$ -Resonanz eine Güte von  $Q \approx 2250$ .

## Auswertung

Mit Hilfe des Netzwerkanalysators wurden für jede Materialprobe und jede jeweilige Feuchte- und Salzdotierung die Resonanzkurve des gefüllten Resonators aufgenommen. Aus dieser Kurve wurden die Resonanzfrequenz  $f_m$  und die Halbwertsbreite  $w_m$  des gefüllten Resonators bestimmt. Zusätzlich wurden bei jeder Messung Resonanzfrequenz  $f_0$  und Halbwertsbreite  $w_0$  des leeren Resonators bestimmt, da der genaue Wert dieser Größen von den Umgebungsbedingungen, wie Temperatur und Luftfeuchte, abhängig ist. Das Auslesen von Resonanzfrequenzen und Halbwertsbreiten erfolgt durch Anpassung einer Lorentz-Funktion an die aufgenommene Resonanzkurve. Die Lorentz-Funktion stellt eine ideale Resonanzfunktion dar, durch ihre Anpassung ist das Auslesen der gesuchten Parameter mit größter Genauigkeit möglich. Die Anpassung wurde mit Hilfe einer Software-Routine des Programms Origin (Fa. Microcal) durchgeführt.

Bei Einbringen von Materialproben in den Resonatorspalt sinkt die Resonanzfrequenz der  $H_{103}$ -Resonanz. Diese Verschiebung wächst mit zunehmender Feuchte der Probe. Bild 3 zeigt beispielhaft die an einer Probe aus Postaer Sandstein gemessene Resonanzfrequenzverschiebung  $\Delta f = f_0 - f_m$  in Abhängigkeit von der Probenfeuchte.

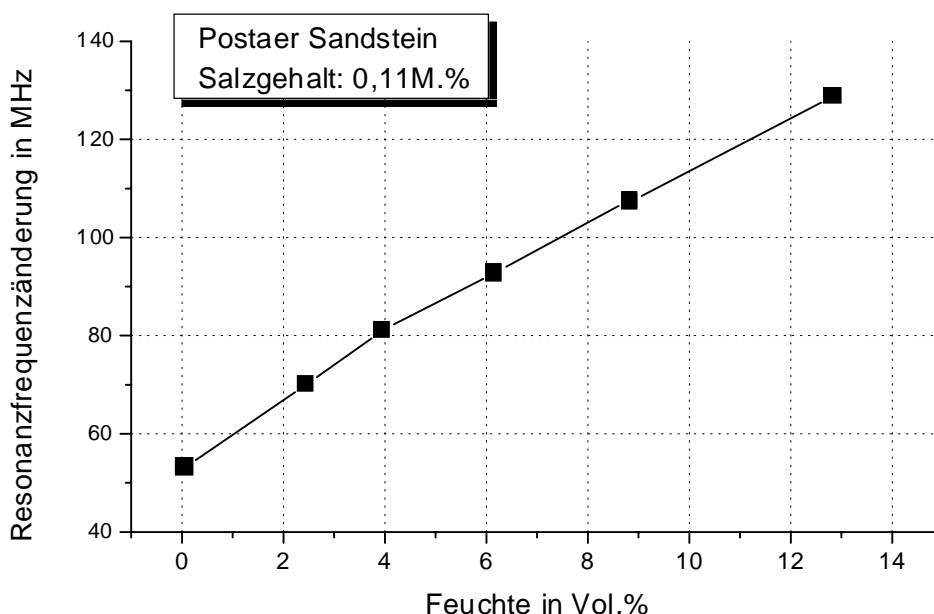


Bild 3: Resonanzfrequenzverschiebung in Abhängigkeit von der Probenfeuchte gemessen an Postaer Sandsteinen

Die Halbwertsbreite der Resonanz nimmt mit zunehmender Feuchte zu. Sie wird zusätzlich bei steigendem Salzgehalt der Proben vergrößert, da mit wachsendem Salzgehalt zunehmend dielektrische Verluste auftreten. Die Verbreiterung der Resonanzkurve bedeutet nach Gleichung (2) eine Abnahme der Güte des Resonators. Bei feuchten Materialproben und besonders bei Proben mit hohem Salzgehalt werden die Resonanzen stark unterdrückt und sind in Extremfällen nicht mehr vom Grundrauschlevel zu unterscheiden. Im höheren Feuchtebereich wird die dielektrische Charakterisierung deshalb ungenauer.

Die Berechnung beider Teile der Dielektrizitätszahl aus den ermittelten Resonanzparametern erfolgte mit Hilfe der Störungsrechnung [WAL60] [WAR68].

Für die Ermittlung des Realteils der Dielektrizitätszahl  $\epsilon'$  wird die folgende Beziehung verwendet:

$$\epsilon' = \frac{L}{d} \cdot \frac{(f_0 - f_m)}{f_0} + 1 \quad (3)$$

Bedingt durch die Existenz des Schlitzes im Resonator kommt es zu Verzerrungen des elektrischen Feldes am Ort der Probe. Hierdurch bedingt wird  $\epsilon'$  zu niedrig bestimmt. Nach einem Korrekturansatz, der von MAIER [MAI70] vorgeschlagen wurde, besteht folgender Zusammenhang zwischen wahren Realteil der Dielektrizitätszahl  $\epsilon'$  und dem gemessenen Wert  $\epsilon'_w$ :

$$\epsilon' = \frac{\epsilon'_w}{1 - \frac{\pi \cdot (s-d)}{4 \cdot b \cdot s} \cdot (d + 0,7 \cdot d^2) \cdot (\epsilon'_w - 1)} \quad (4)$$

Probemessungen mit einer 3mm dicken PVC- Probe (Literatur:  $\epsilon'=2,7$ ) ergaben nach Anwendung von Beziehung (4) einen Wert von  $\epsilon'=2,74$ .

Der Realteil der Dielektrizitätszahl  $\epsilon'$  wird also ausschließlich durch die Verschiebung der Resonanzfrequenz berechnet. Der Imaginäreil der Dielektrizitätszahl  $\epsilon''$  wird aus der Güteänderung des Resonators bei Einschub des Material berechnet:

$$\epsilon'' = \frac{L}{2d} \cdot \left( \frac{1}{Q_0} - \frac{1}{Q_m} \right) = \frac{L}{2d} \cdot \left( \frac{w_0}{f_0} - \frac{w_m}{f_m} \right) \quad (5)$$

## Dielektrizitätszahl der trockenen Materialien

Die Dielektrizitätszahl der trockenen Baustoffe um 2,45 GHz wurde anhand aller hergestellter Proben nach Ofentrocknung gemessen. Die präsentierten Werte sind anhand 4–8 einzelner Proben pro Material bestimmt worden. Die bestimmten Werte für beide Anteile der Dielektrizitätszahl können zusammen mit der ermittelten Standardabweichung der Tabelle 1 entnommen werden. Die Tabelle gibt außerdem eine Übersicht über die untersuchten Materialien.

		$\epsilon'$	$sd(\epsilon')$	$\epsilon''$	$sd(\epsilon'')$
<b>Ziegel</b>	Egernsunder D13	4,112	0,100	0,069	0,006
	Neuenfelder Klinker	5,304	0,243	0,078	0,012
<b>Sandsteine</b>	Cottaer	3,088	0,064	0,075	0,009
	Obernkirchner	3,699	0,034	0,026	0,004
	Postaer	3,570	0,103	0,024	0,008
	Seeberger	3,915	0,064	0,020	0,006
<b>Kalksandstein</b>		3,984	0,099	0,141	0,018
<b>Porenbeton</b>		2,041	0,138	0,109	0,021

*Tabelle 1: Dielektrizitätszahl trockener Baumaterialien und Standardabweichung  $sd$*

Die meisten der gewählten Baustoffe zeigen große Übereinstimmung ihrer dielektrischen Eigenschaften im trockenen Zustand. So läßt sich ein Mittelwert für diese Materialien bilden, der bei  $\epsilon' = 3,86 \pm 0,20$  liegt. Ein abweichendes Verhalten zeigen Cottaer Sandstein mit  $\epsilon' = 3,09$  und Neuenfelder Klinker mit  $\epsilon' = 5,3$ . Ein abweichender Wert wurde auch für Porenbeton mit  $\epsilon' = 2,04$  ermittelt. Für dieses Material soll in diesem Artikel jedoch nur der Wert des trockenen Baustoffs dokumentiert werden.

Die gemessenen Werte zeigt große Übereinstimmung zu den von HAUENSCHILD [HAU99] dokumentierten. Dieser gibt einen Mittelwert von  $\epsilon' = 3,52$  an und erhielt ebenfalls einen geringeren Wert für Cottaer Sandstein.

Der gemessene Wert des Imaginärteils  $\epsilon''$  ist in der Größenordnung  $10^{-2}$  bestimmt worden. Der höchste Wert wird mit  $\epsilon'' = 0,14$  für Kalksandstein erreicht.

Die Schwankungen der bestimmten Werte sind nicht mit der Dicke der Plättchen korreliert. Dies zeigt, daß Materialinhomogenitäten zu einer Schwankung der Meßwerte führen, aber kein systematischer Meßfehler durch die Probendicken herbeigeführt wird.

## **Realteile der Dielektrizitätszahl in Abhängigkeit von Feuchte und Salz**

Die im Rahmen dieser Versuchsreihe ermittelten Werte des Realteils der Dielektrizitätszahl  $\epsilon'$  zeigen für alle Baustoffe ein annähernd lineares Verhalten, eine lineare Regression der Meßwerte erschien deshalb sinnvoll. Bild 4 zeigt beispielhaft die bestimmten Werte für Seeberger Sandstein mit Salzgehalten von 0–2 M.% in Abhängigkeit von der Feuchte der Probe. Die resultierende Regressionsgerade ist eingezeichnet.

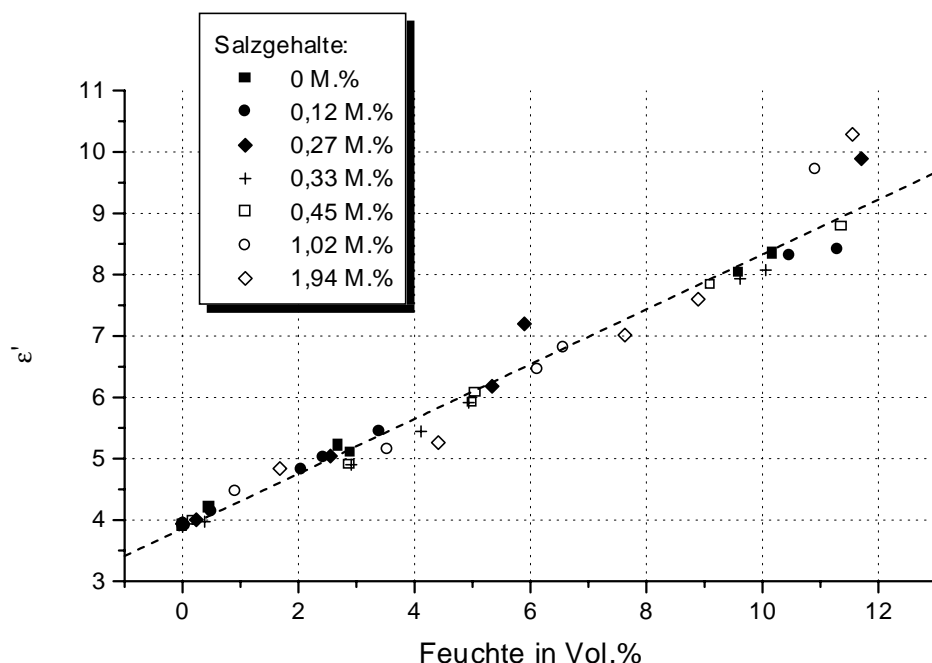


Bild 4:  $\epsilon'$  in Abhängigkeit von Feuchte- und Salzgehalt von Seeberger Sandstein

Die weitgehende Unabhängigkeit des Realteils der Dielektrizitätszahl  $\epsilon'$  vom Salzgehalt der Baustoffe bei 2,45 GHz wird durch die Messungen bestätigt, vergl. z. B. [LHA96]. Bei Feuchtegehalten nahe der Sättigung der Probe erkennt man auch der Bestimmung des Realteils  $\epsilon'$  eine Vergrößerung der Streuung der Meßwerte aus den oben genannten Gründen. Die Bestimmung der Resonanzfrequenz ist jedoch weniger kritisch als die Bestimmung der Halbwertsbreite der Resonanzen. Die Störeinflüsse treten deshalb stärker bei der Bestimmung des Imaginärteils der Dielektrizitätszahl  $\epsilon''$  auf.

		a	b	sd( $\epsilon'$ )
<b>Ziegel</b>	Egernsunder D13	0,370	4,083	0,457
	Neuenfelder Klinker	0,374	5,328	0,688
<b>Sandsteine</b>	Cottaer	0,345	2,907	0,515
	Obernkirchner	0,371	3,615	0,404
	Postaer	0,416	3,402	0,396
	Seeberger	0,448	3,859	0,321
<b>Kalksandstein</b>		0,389	3,886	0,786

Tabelle 2: Ergebnisse der linearen Regression und Standardabweichung  $sd$ ,  
Regressionsgerade  $\epsilon' = a \cdot \text{Feuchte}[\text{Vol.}\%]+b$

Tabelle 2 zeigt das Ergebnis der linearen Regression für die einzelnen Baustoffe und gibt Aufschluß über die ermittelten Standardabweichungen. Eingetragen sind also die Koeffizienten a und b der Geradengleichung:

$$\epsilon' = a \cdot \text{Feuchte}[\text{Vol.}\%] + b \quad (5)$$

Die Steigungen der Regressionsgeraden liegen in einem Bereich zwischen 0,345 für Cottaer Sandstein und 0,448 für Seeberger Sandstein (vergl. Bild 4). Auch die Steigungen für die Baustoffe mit abweichender Dielektrizitätszahl im Trockenzustand liegen in diesem Bereich. Der Betrag von  $\epsilon'$  für den trockenen Baustoff differiert aufgrund der Regression von den in Tabelle 1 gegebenen Werten.

Für die meisten Baustoffe kann der Zusammenhang zwischen Feuchte und  $\epsilon'$  durch eine gemittelte Gerade angegeben werden. Als gemittelte Parameter ergeben sich:  $a = 0,388 \pm 0,034$  und  $b = 3,769 \pm 0,264$ . In einem früheren Projekt wurden diese Parameter zu  $a = 0,38$  und  $b = 3,59$  ermittelt [LHA96]. Eine nichtlineare Anpassung, die Mischungsmodelle wie den 'complex refractive index' berücksichtigt (vergl. [HAU99]), bietet sich für die vorliegenden Daten nicht an, da hier eine lineare Beziehung die ermittelten Datensätze am besten beschreibt. Für Materialien wie Neuenfelder Klinker und Cottaer Sandstein ist die Kenntnis der Dielektrizitätszahl im Trockenzustand wichtig, um auf die Baustofffeuchte schließen zu können.

## Imaginärteile der Dielektrizitätszahl in Abhängigkeit von Feuchte und Salz

Die Imaginärteile der Dielektrizitätszahl  $\epsilon''$  der mineralischen Baustoffproben wurden in Abhängigkeit von Feuchte- und Salzgehalt über die Güte Q des Resonators nach Gleichung (5) bestimmt.

Die ermittelten Werte zeigen für die verschiedenen Baustoffe einen ähnlichen Verlauf. Bild 5 zeigt  $\epsilon''$  beispielhaft für Egernsunder D13 Ziegel.

Die Kurvenverläufe weisen besonders für hohe Feuchte- und Salzgehalte Schwankungen auf, die durch die oben erwähnte starke Unterdrückung der Resonanzkurven ergibt. Eine weitere Fehlerquelle ist durch freies Wasser auf der Probenoberfläche nahe der Sättigungsfuchte der Probe gegeben. Im niedrigeren Feuchtebereich kommt es zum Teil trotz Lagerung in dampfdichter Verpackung an den Probenrändern zu stellenweiser Trocknung und Salzausblühungen, die sich nicht vermeiden lassen. Hierdurch kann eine Inhomogenität des Salzgehaltes entstehen, die eine Streuung der Meßwerte auch im trockeneren Bereich erklärt. Trotz dieser Streuung ist der Zusammenhang zwischen  $\epsilon''$  und Salz- und Feuchtegehalt eindeutig beschreibbar.

Zur Abschätzung eines funktionalen Zusammenhangs zwischen  $\epsilon''$  und Salz- und Feuchtegehalt wurde eine Anpassung von Wurzelfunktionen der Form

$$\epsilon'' = a(\text{Salzgehalt}) \cdot \sqrt{\text{Feuchte}[\text{Vol.}\%]} \quad (6)$$

durchgeführt.

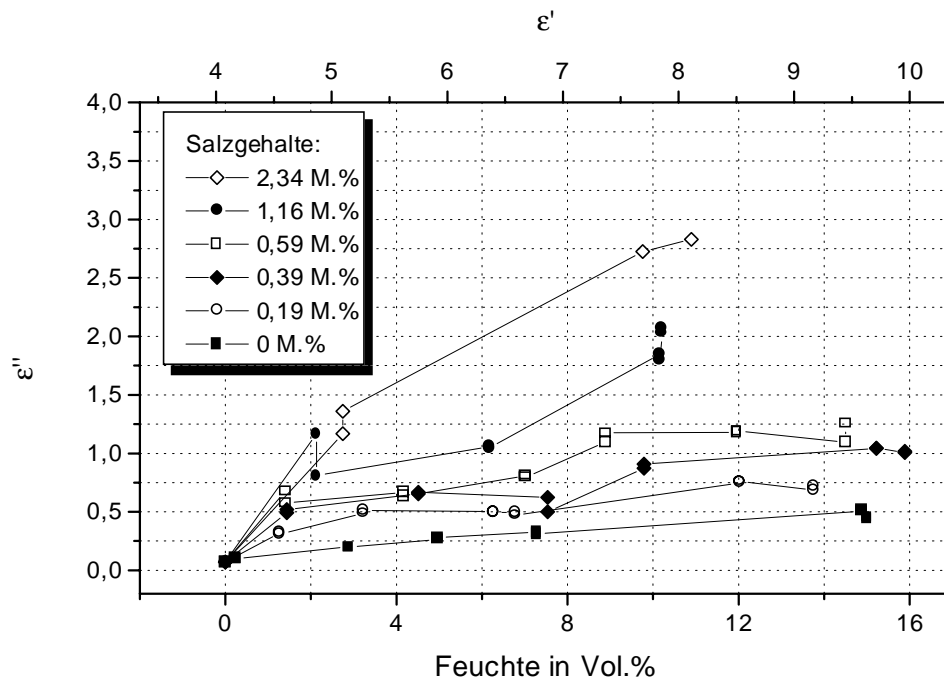


Bild 5: Gemessene Imaginärteile  $\epsilon''$  für Egersunder D13 Ziegel in Abhängigkeit von Feuchtegehalt und Realteil  $\epsilon'$

Die gewählte Funktionsform erschien zur Beschreibung der Daten am besten geeignet. Die Anpassung der Parameter  $a$  erfolgte durch eine nichtlineare Anpassung nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate. Diese Anpassung erfolgte zunächst für jedes untersuchte Material und jeden Salzgehalt einzeln. Bild 6 zeigen die angepassten Wurzelfunktionen für Egersunder D13 Ziegel (vergl. Bild 5).

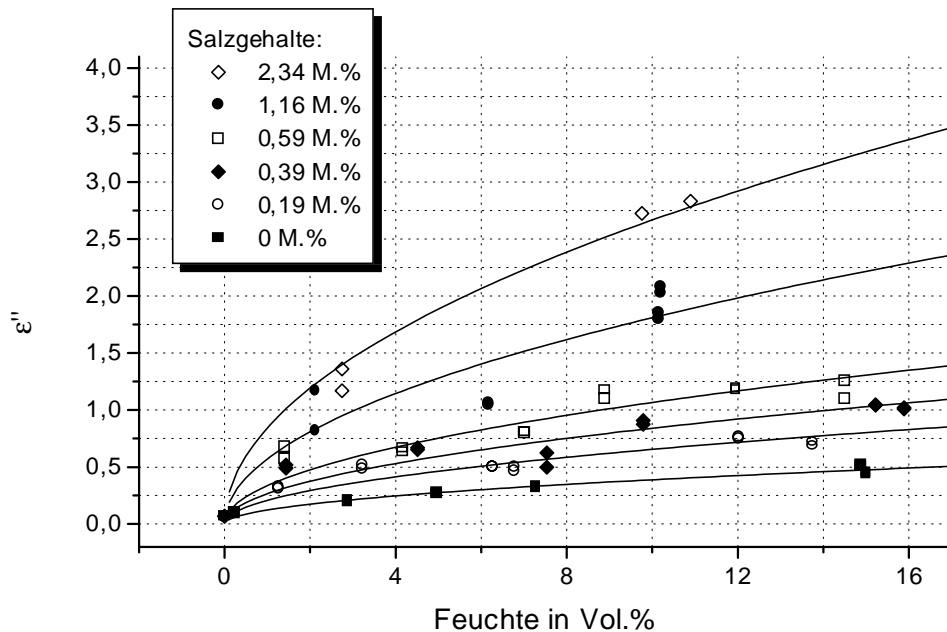


Bild 6: Gemessene Imaginärteile  $\epsilon''$  und angepasste Funktionen für Egersunder D13 Ziegel

Bild 7 zeigt alle bestimmten Parameter  $a$  für alle Materialien über dem jeweiligen Salzgehalt aufgetragen. Die für Kalksandstein bestimmten Werte sind betraglich niedriger als die der übrigen Materialien. Die Werte von  $a$  steigen bis zu einem Salzgehalt von ca. 1 M.% nahezu linear an, die Kurven ändern im Bereich um 1 M.% ihre Steigung. Dieses Verhalten ist für alle Materialien festgestellt werden. Das annähernd gleiche Verhalten des Parameters  $a$  für alle Materialien legt eine erneute Regression nahe, um eine materialunabhängige Beziehung zwischen Imaginärteil der Dielektrizitätszahl  $\epsilon''$  und dem Feuchte- und Salzgehalt zu ermitteln.

Für die Anpassung über den gesamten Bereich der gemessenen Salzgehalte wurde wiederum eine Wurzelfunktion gewählt. Die bestimmten Werte für Kalksandstein wurden bei dieser Regression nicht berücksichtigt.

Bild 8 zeigt die angepaßte Wurzelfunktion. Für Salzgehalte von 0 bis 2,3 M.% ergibt sich materialunabhängig (nicht für Kalksandstein):

$$a = 0,564 \cdot \sqrt{\text{Salzgehalt[M.]\%}} \quad (7)$$

Die Summe der verbleibenden Fehlerquadrate  $\chi^2$  beträgt bei dieser Anpassung  $\chi^2 = 0,00376$ .

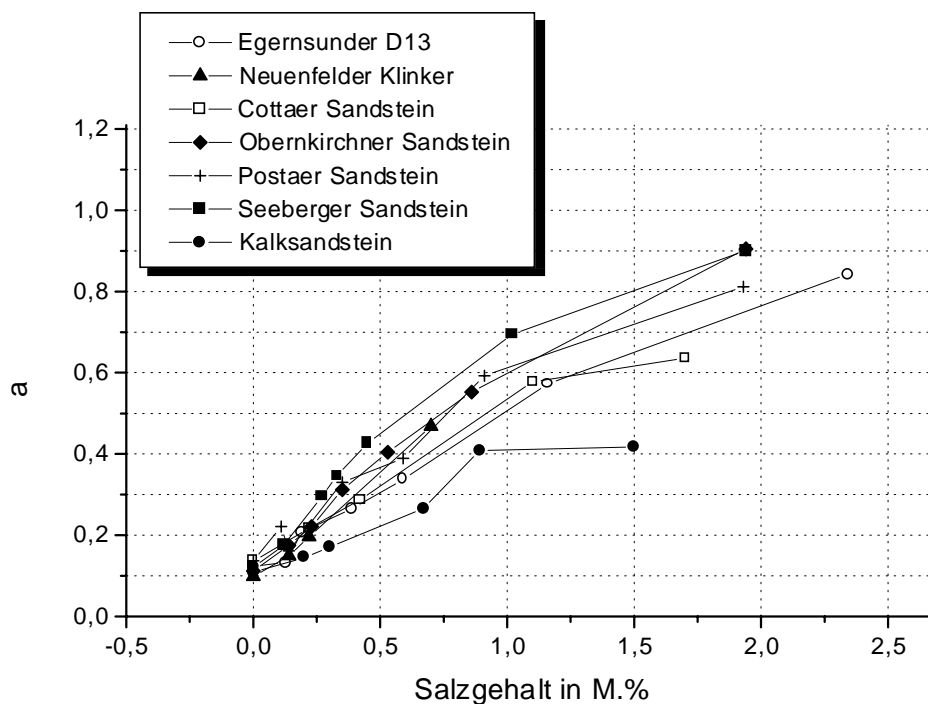


Bild 7: Parameter  $a$  in Abhängigkeit vom Salzgehalt

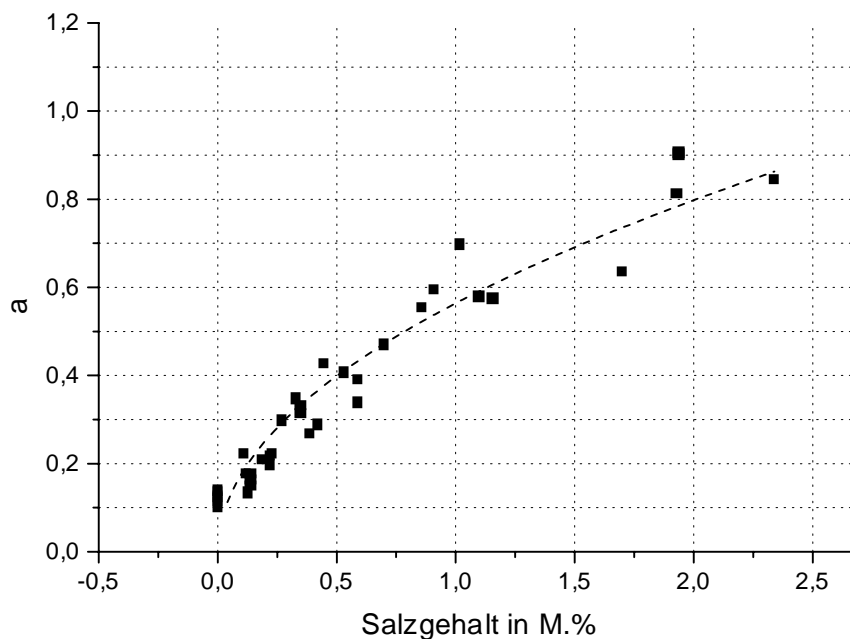


Bild 8: Anpassungsfunktion zur Ermittlung eines materialunabhängigen Parameters  $a$

Es ergibt sich also unter Verwendung der Gleichungen (6) und (7):

$$\varepsilon'' = 0,564 \cdot \sqrt{\text{Salzgehalt[M.]\%}} \cdot \sqrt{\text{Feuchte[Vol.]\%}} \quad (8)$$

Als Endergebnis findet sich unter Verwendung von Gleichung (5) eine materialunabhängige Beziehung für den Salzgehalt von mineralischen Baustoffen in Abhängigkeit von beiden teilen der Dielektrizitätszahl:

$$\text{Salzgehalt[M.]\%} = \left( \frac{\varepsilon''}{0,564 \cdot \sqrt{2,56 \cdot \varepsilon' - 9,67}} \right)^2 \quad (9)$$

Die Gleichung wurde an Salzgehalten von 0 bis 2,3 M.% ermittelt, sie kann für Kalksandstein näherungsweise für Salzgehalte von 0-0,8 M.% verwendet werden (vergl. Bild 7).

## Zusammenfassung und Ausblick

Dielektrische Eigenschaften zahlreicher mineralischer Baustoffe sind bei einer Frequenz um 2,45 GHz mit Hilfe eines durchtrennten Hohlraumresonators in Abhängigkeit von Feuchte- und Salzgehalt der Proben bestimmt worden. Ziel der Untersuchungen war die Abschätzung der Möglichkeit einer materialunabhängigen Salzgehaltmessung über die dielektrischen Eigenschaften bei dieser Frequenz.

Die weitgehende Unabhängigkeit des Realteil der Dielektrizitätszahl  $\varepsilon'$  wurde mit großer Übereinstimmung zu früheren Untersuchungen bestätigt [LHA96]. Ein ge-

meinsamer linearer Zusammenhang zwischen  $\epsilon'$  und dem Volumenanteil der Baustoffeuchte konnte für eine Vielzahl von Baumaterialien ermittelt werden.

Der Imaginärteil der Dielektrizitätszahl  $\epsilon''$  zeigt deutliche Abhängigkeit vom Salzgehalt, wobei die untersuchten Baumaterialien mit Ausnahme von Kalksandstein ein annähernd gleiches Verhalten zeigten. Es konnte deshalb eine weitgehend materialunabhängige Beziehung zwischen Salzgehalt des Baustoffs und beiden Teilen der Dielektrizitätszahl ermittelt werden.

Die materialunabhängige Messung gelöster Salze in Baustoffen mit Hilfe eines dielektrischen Meßverfahrens bei 2,45 GHz ist also möglich. Da der Wertebereich von  $\epsilon''$  bei dieser Frequenz stark eingeschränkt ist, wird die erreichbare Auflösung der Salzmessung hauptsächlich vom benutzten Meßgerät abhängen.

Als Fortsetzung der vorgestellten Untersuchungen soll eine erneute multiple Regression der gemessenen Werte erfolgen. Der Fehler der gewählten Quadratwurzelanpassung ist zwar niedrig, er kann jedoch noch minimiert werden. Es fehlt außerdem noch eine Fehlerabschätzung für die ermittelte materialunabhängige Beziehung für den Salzgehalt. Des weiteren sollen noch Ergänzungsmessungen an einigen weiteren Baustoffen erfolgen.

Es wird zusätzlich an Modifikationen der bestehenden Meßanlage gearbeitet, um die Messungen von Feuchte- und Salzgehalten in der Praxis zu realisieren [SLE99].

## Literatur

- [HAU99] C. Hauenschild: Untersuchung der dielektrischen Eigenschaften mineralischer Baustoffe für die Entwicklung von Feuchtemeßverfahren, Dissertation, TU Hamburg-Harburg (1999),-im Druck-
- [LHP94] W. Leschnik, C. Hauenschild, F. Pinsler: Entwicklung zerstörungsarm arbeitender Meßsonden zur Bestimmung des Feuchte- und Salzgehaltes von Wänden, Schlußbericht zum DFG-Projekt Nr. Le 765/1, (1994)
- [LHA96] W. Leschnik, C. Hauenschild: Feuchtemessung an Bauteilen. Schlußbericht zum Projekt der Stiftung Volkswagenwerk Nr. I/67 193 'Kontinuierliche und zerstörungsfreie Feuchtemeßverfahren mit Mikrowellen', TU Hamburg-Harburg (1996)
- [LSc99] W. Leschnik, U. Schlemm, F. Pinsler, B. Gätje: Tiefenaufgelöste und kontinuierliche Salz- und Feuchtemessung an Mauerwerk. Berichtsheft zum DFG-Schwerpunktprogramm "Bauphysik der Außenwände", erscheint demnächst
- [MAI70] H.G. Maier: Ein Verfahren zur Messung der komplexen Dielektrizitätszahl von Folien und dünnen Platten im Mikrowellenbereich, Frequenz 24, (1970), S. 303-307
- [MEG 92] H. Meinke, F.W. Gundlach: Taschenbuch der Hochfrequenztechnik, 5. Auflage, Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg (1992)

- [SLE99] U. Schlemm, W. Leschnik: Drehbares Antennensystem zur Unterdrückung von Störungen bei der Messung des Salz- und Feuchtegehaltes von Bauteilen bei 2,45 GHz, 10. Feuchtetag, Tagungsbericht, Berlin (1999)
- [SUL88] K. Sarabandi, F. T. Ulaby: Technique for Measuring the Dielectric Constant of Thin Materials, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 37, No.4, (1988), S. 631-636
- [WAR68] B. Wartenberg: Messung der elektromagnetischen Stoffkonstanten  $\mu$  und  $\epsilon$  von Ferriten im mm-Wellengebiet, Z. angew. Phys., Heft 4, (1968), S. 211-217
- [WAL60] R. A. Waldron: Perturbation Theory of Resonant Cavities, IEE , No. 373 E, (1960), S. 272-274
- [WTA 92] Wissenschaftlich-Technischer Arbeitskreis: Merkblatt 2-2-91 'Sanierputze', Bautenschutz und Bausanierung, Heft 15, (1992)