

Mikrowellensensoren zur zerstörungsfreien Materialuntersuchung

C. Sklarczyk¹, R. Tschuncky¹, V. Melev¹, C. Boller¹

¹ Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren (IZFP), Saarbrücken, Deutschland

Keywords: microwaves, sensor, nondestructive, contactless

Abstract

Microwave sensors allow for the nondestructive measurement of moisture in diverse materials (except metals) in contact mode as well as in standoff mode (non-contact) even for big object distances. Beside of the qualitative and quantitative determination of moisture the imaging of the two-dimensional moisture distribution is feasible with multiaxial scanners. For the qualitative moisture determination a calibration is necessary with the help of specimens exhibiting different and known moisture. Arbitrary complex moisture profiles can be reconstructed with the help of pattern recognition algorithms. For that purpose extensive calibration data sets can be needed in dependence on the complexity of the test object and its moisture distribution.

Zusammenfassung

Mikrowellensensoren erlauben die zerstörungsfreie Messung der Feuchte in den unterschiedlichsten Materialien (außer Metallen) sowohl im Kontaktmodus als auch berührungslos aus – wenn nötig – großer Distanz. Neben der punktuellen qualitativen und quantitativen Feuchtebestimmung ist mit Hilfe von Mehrachsen-Scannern auch eine Abbildung der flächenhaften Feuchteverteilung möglich. Für die quantitative Feuchtebestimmung ist eine Kalibrierung mit Hilfe von Proben unterschiedlicher und bekannter Feuchte notwendig. Beliebige, auch komplexe Tiefenprofile der Feuchte können mit Hilfe von Mustererkennungs-Algorithmen rekonstruiert werden. In Abhängigkeit von der Komplexität des Prüfobjekts und der Feuchteverteilung können hierfür umfangreiche Kalibrierdatensätze notwendig sein.

Contact address:

Dr. Christoph Sklarczyk

Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren (IZFP)

Campus E 31

66123 Saarbrücken, Deutschland

Phone: +49-681-9302-3881

Fax: +49-681-9302-5920

Email: christoph.sklarczyk@izfp.fraunhofer.de

1 Einleitung

Elektromagnetische Wellen im Mikrowellenbereich erlauben die zerstörungsfreie Messung von Materialeigenschaften (Dobmann et al., 2012; Zoughi, 2000), insbesondere der Feuchte, in den unterschiedlichsten Materialien außer den Metallen, da freies Wasser in einem breiten Frequenzbereich bis ca. 20 GHz eine deutlich höhere Permittivität (Dielektrizitätskonstante) als fast alle Festkörper aufweist (Nyfors et al., 1989). Feuchte bewirkt eine starke Veränderung der Wechselwirkung (Reflexion, Transmission, Beugung) der Mikrowellen mit diesen Materialien, so dass ein qualitativ und quantitativ nutzbarer Kontrast gegenüber dem trockenen Zustand entsteht. Die eingesetzte Mikrowellenleistung ist normalerweise gering und verändert das Prüfobjekt nicht, so dass die Prüfung zerstörungsfrei ist. Die Messung kann im Kontaktmodus oder aus der Distanz heraus berührungslos durchgeführt werden, wobei diese prinzipiell unbegrenzt sein kann. Im Folgenden werden Beispiele für den Einsatz von Mikrowellensensoren für die Feuchtemessung gegeben.

2 Feuchtemessungen mit verschiedenen Mikrowellensensoren

2.1 Zeitbereichsreflektometrie

Normalerweise wird die Zeitbereichsreflektometrie (Time Domain Reflectometry TDR) in der Weise durchgeführt, dass die Wellenleiter in das Prüfobjekt, meistens das Erdreich oder Schüttgüter, eingestochen werden, d. h. die Messung erfolgt (gering) invasiv. In einer Variante besitzt der Sensor jedoch ein weiches Kissen, das auf das Prüfobjekt nur aufgedrückt wird, ohne einzudringen. Es wird stets berührend gemessen. Das Kissen ermöglicht eine Anpassung der Antenne an eine Probenkrümmung. Zur Verminderung der Messstreuung ist es günstig, wenn bei jeder Messung derselbe Anpressdruck eingestellt wird. Die Hochfrequenz-Feldlinien dringen in das Prüfobjekt ein und werden durch den Feuchtegehalt verändert. Der Gerätetyp TRIME von IMKO arbeitet bei ca. 0,6 - 1,2 GHz (Bild 1). Gemessen wird im Wesentlichen die Pulslaufzeit, die in diesem Frequenzbereich mit dem Realteil der komplexen Permittivität korreliert und mit steigendem Feuchtegehalt anwächst (IMKO). Der etwaige Salzgehalt der Probe hingegen beeinflusst den Imaginärteil und damit die Signalamplitude, die nicht gemessen wird. Der Einfluss des Salzgehaltes und damit der Ionenleitfähigkeit wird somit minimiert.

Bild 2 zeigt am Beispiel von ungebrannter Grünkeramik aus dem Bereich der Sanitärkeramik, dass nach einer mehrstufigen Kalibrierung eine gute Übereinstimmung zwischen der mit Zeitbereichsreflektometrie und der konventionell mittels Wägung ermittelten Feuchte besteht. Bei konstanter Probendicke (hier: 8,2 mm) liegt die Standardabweichung (Vertrauensintervall 95 %) der Messwerte für mehrere untersuchte Prüfgeräte im Bereich von 0,2 % bis 0,3 % für Feuchtegehalte von 0 % bis 17 %. Die Probendicke kann die Messwerte verändern, da die Feldlinien bei geringeren Dicken über die Probe hinaus reichen und dabei von anderen Objekten

bzw. der Luft beeinflusst werden können. Schwankt die Probendicke von 8 mm bis 11 mm, erhöht sich die Standardabweichung um den Faktor 2 bis 3. Durch eine Verkleinerung des Sensors wird eine Verringerung der Eindringtiefe erreicht, so dass auch dünnere Proben untersucht werden können. Der Sensor, der als Feldsensor dient und die Mikrowellen nicht abstrahlt, kann jedoch nicht beliebig verkleinert werden, da die feuchtebedingten Laufzeitunterschiede sonst zu klein werden. Bild 1: TDR-Feuchtesensor mit weichem Ankoppelkissen

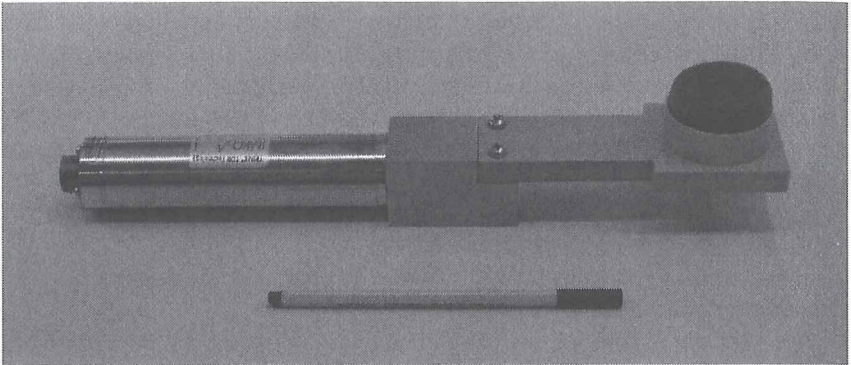


Bild 1: TDR-Feuchtesensor mit weichem Ankoppelkissen

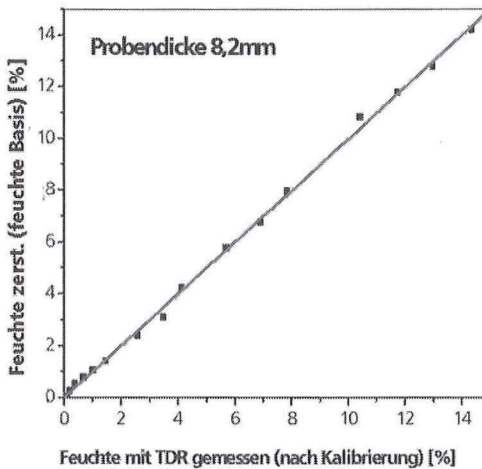


Bild 2: Konventionell an Grünkeramik gemessene Feuchte (bezogen auf Feuchtmasse) in Abhängigkeit von der mit dem TDR-Sensor gemessenen Feuchte

Es wurden vergleichende Messungen mit dem in Bild 1 gezeigten TDR-Sensor und einem kommerziellen 2,45 GHz-Resonatorsensor an einem Karosserieteil eines

Triebwagens durchgeführt. Der Resonatorsensor wertete die feuchteabhängige Verschiebung und Verbreiterung der Resonanzlinie aus (Göller, 2004). Der Karosserieteil war gekrümmt und bestand aus einer glasfaserverstärkten harten Außenhaut und einem Hartschaum, wobei letzterer lokal vernässt wurde (Messfläche ca. 34 cm x 17 cm). Die Messung erfolgte in beiden Fällen berührend auf der harten Außenhaut. Der TDR-Sensor misst im Wesentlichen die Pulslaufzeit, während der Resonatorsensor Indexwerte ausgibt, die mit der Feuchte korrelieren. Bild 2a zeigt die Ergebnisse einer Rastermessung mit beiden Sensoren anhand der Differenzen zwischen der trockenen und der lokal vernässten Probe in Form von unterschiedlichen Grauwerten (hell: geringe Differenz, dunkel: hohe Differenz). Man erkennt die gleichen Tendenzen in beiden Fällen. Kleinere Unterschiede können darauf zurückgeführt werden, dass der starre Resonatorsensor je nach dem Krümmungsradius der Probe partiell abgehoben war, woraus Messwertschwankungen resultieren können. Der nachgiebige TDR-Sensor konnte sich dagegen stets an die Krümmung anpassen.

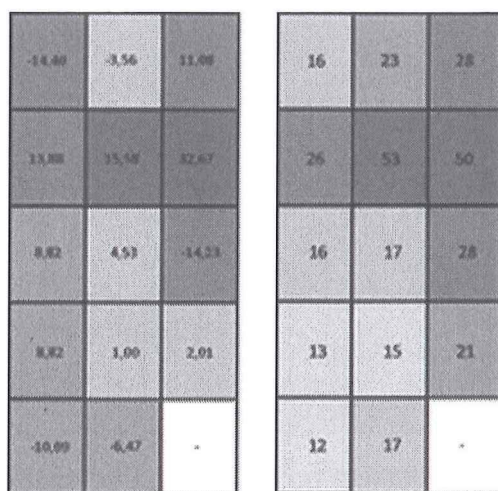


Bild 2a: Messung an einem Karosserieteil aus GFK mit Schaumstoff, links: Differenz der Messwerte für den TDR-Sensor, rechts: Differenz der Messwerte für den Resonatorsensor. Die lokale Vernässung erfolgte im oberen Probendrittel. Ein Rasterelement entspricht einer Fläche von ca. 7,0 cm x 5,7 cm.

2.2 Festfrequenzsensoren

Quantitative Feuchtebestimmung

Für berührungslose Feuchtemessungen mit Abständen zwischen Antenne und Probe von bis zu ca. 40 cm wurden Festfrequenzsensoren bei den lizenzfreien Frequenzen 2,45 GHz und 5,8 GHz eingesetzt (Bild 3). Für diese Sensoren sind prinzipiell beliebige Antenne-Objekt-Abstände möglich. Die Sensoren waren homo-

dyn aufgebaut, d. h. ein Teil des Sendesignals wurde einem Quadraturmodulator zugeführt, der daraus zwei Signale generierte: die Replik und die um 90° verschobene Version des anregenden Sinus (Sachs, 2010). Diese Signale wurden mit dem vom Messobjekt gestreuten Signal gemischt, woraus bei konstanter Messfrequenz ein komplexes Gleichspannungssignal resultierte, das aus Real- und Imaginärteil (auch I- und Q-Komponente genannt) bestand. Daraus konnten der Betrag und die Phase des Empfangssignals bestimmt werden, wobei die Reflexionseigenschaften des Prüfobjekts mit diesen Messgrößen korrelierten. Abhängig vom Antennentyp können die Prüfobjekte berührend, im Nahfeld der Antenne oder in großem Abstand von der Antenne (Fernfeld) untersucht werden. Ist das Verhältnis von eingesetzter Wellenlänge zum Objektabschab groß, dient der Sensor als Feldsonde, die die Mikrowellen nicht abstrahlt. Ist es dagegen klein, werden die Mikrowellen abgestrahlt. In beiden Modi ist eine Feuchtemessung möglich.

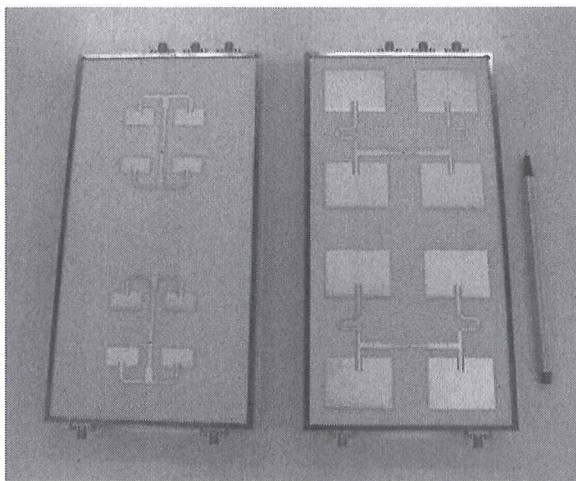


Bild 3: Mikrowellen-Festfrequenzsensoren mit integrierter Patch-Antenne. Alternativ können äußere Antennen angeschlossen werden. Links: 5,8 GHz, rechts: 2,45 GHz), Entwicklung der IMST GmbH

Am Beispiel von feuchten Gipskarton-Bauplatten (GKB) konnte eine Linearität zwischen der Messspannung und der Feuchte im Reflexionsmodus ermittelt werden (Bild 4). Da die Messwerte bei einer berührungslosen Messung außer vom Prüfobjekt auch vom Abstand zwischen der Antenne und dem Prüfobjekt abhängen, ist es wichtig, den Abstand zu optimieren und ihn bei allen Messungen konstant zu halten. Falls dies nicht möglich ist, sollten der Abstand mitgemessen und an die Prüfaufgabe angepasste Methoden zur Korrektur der Messwerte angewendet werden.

Für eine quantitative Feuchtebestimmung ist in jedem Fall eine Kalibrierung an geeigneten Prüfkörpern unterschiedlicher und bekannter Feuchte nötig.

Ermittlung eines Tiefenprofils der Feuchte

Um nicht nur die Gesamtfeuchte eines Prüfbodens, sondern auch sein Feuchteprofil senkrecht zu seiner Oberfläche (Tiefenprofil) zu ermitteln, wurde eine Kalibrierung auf Basis einer Mustererkennung erprobt. Derartige Mustererkennungs-Algorithmen unterziehen die Messdaten der zu charakterisierenden bzw. unbekannten Proben einer Ähnlichkeitsbetrachtung in Bezug auf die Daten der bekannten zur Kalibrierung verwendeten Proben (Kalibrierdatenbank) und berechnen dadurch die zugeordneten Zielgrößen (Stork, 2001). Somit sind Mustererkennungen stets modellfrei. Durch derartige Algorithmen werden diejenigen Proben aus der Kalibrierdatenbank identifiziert, von denen die gemessene Probe am wenigsten abweicht.

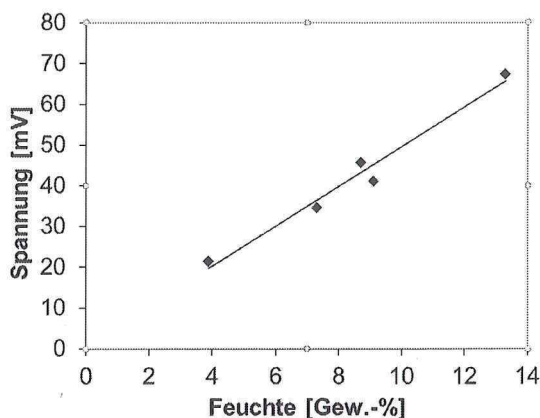


Bild 4: Messspannung gegen Feuchte in einer GKB, Reflexionsmessung bei 2,45 GHz (homodyner Mikrowellensensor)

Zur Kalibrierung auf das Feuchtetiefenprofil wurden GKB's (Dicke jeweils 12 mm) unterschiedlicher bekannter Feuchte ohne Lücke hintereinandergestellt und unter einem Einfallswinkel von ca. 50° zur Normalen mit einer Hornantenne bei 2,45 GHz und 5,8 GHz angestrahlt (Abstand zur Probe ca. 170 mm). Es wurden die beiden in Bild 3 gezeigten Mikrowellensensoren eingesetzt. Als Sendeantenne wurden die integrierten Antennen verwendet, während die reflektierten Wellen von einer zweiten, externen Antenne unter dem Reflexionswinkel von -50° aufgenommen und der Real- und Imaginärteil der Messspannung aufgezeichnet wurde. Da die Wellenausbreitung im betrachteten Plattenstapel aufgrund vielfacher Reflexionen und Brechungen sehr komplex ist, kommt eine analytische Bestimmung des Feuchteprofils durch Auflösen des Systems der Wellengleichungen nicht in Frage. Daher wurde ein im IZFP entwickelter modellfreier Mustererkennungs-Algorithmus, der auf einer Va-

rianten der Methode der nächsten Nachbarn beruht, verwendet (Tschuncky, 2011). Andere Methoden der Mustererkennung, z. B. Neuronale Netze, wurden bereits früher zur Feuchtebestimmung mit Mikrowellen eingesetzt (Daschner et al, 2001).

Die Mustererkennung wurde durch Messungen von Real- und Imaginärteil (s. 2.2) bei den beiden Frequenzen für unterschiedliche Stapeldicken (1 bis 10 trockene und feuchte Platten hintereinander, s. Tabelle 1) kalibriert. Eine der Feuchtetiefenprofilkombinationen (Messung Nr. 10: 8 Platten hintereinander, zuerst 4 trockene, dann 4 unterschiedlich feuchte) wurde als unbekannt angesehen, so dass die entsprechenden Messwerte nicht in die Kalibrierdatenbank eingingen. Zielgröße war das Feuchtetiefenprofil der unbekannten GKB.

Tabelle 1: Feuchtegehalte (bezogen auf Trockenmasse) in einem GKB-Plattenstapel (Beispiel: Bei Messung Nr. 7 wurden vier trockene (0 % Feuchte) und eine feuchte Platte (4 %) hintereinander gestellt). Die nicht für die Trainingsdatenbank verwendete Nr. 10 ist markiert. Messung 1 und 2 dienten zu Vergleichszwecken (Luft: keine Reflexion, Metall: 100 % Reflexion).

		Feuchte [%]									
Nr.	Anmerkung	0	0	0	0	4,0	7,0	8,6	9,5	10,0	10,0
1	ohne Probe										
2	Metallreflektor										
3		X									
4		X	X								
5		X	X	X							
6		X	X	X	X						
7		X	X	X	X	X					
8		X	X	X	X	X	X				
9		X	X	X	X	X	X	X			
10	nicht in Kalibrierdatenbank	X	X	X	X	X	X	X	X		
11		X	X	X	X	X	X	X	X	X	
12		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

Die unbekannte Kombination konnte weitgehend mit hoher Genauigkeit erkannt werden (Bild 5). Lediglich die 8. Platte wurde innerhalb des Feuchtetiefenprofils (Messung Nr. 10) nicht erkannt, da sie in der Kalibrierdatenbank nicht ausreichend abgedeckt war. Mit einer erweiterten Kalibrierdatenbank wäre auch sie erkannt wor-

den. Die Schichten 9 und 10, die aus Luft bestanden und denen somit die Materialfeuchten 0 % zugewiesen werden konnten, wurden korrekt rekonstruiert.

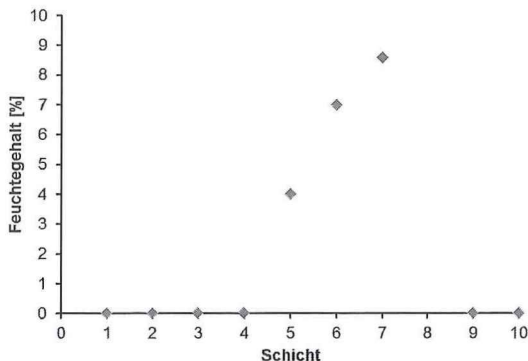


Bild 5: Mustererkennung an einem Plattenstapel aus acht trockenen und feuchten GKB-Platten bei der Frequenz 2,45 GHz

Die Auswertung zeigt, dass die Mustererkennungs-Kalibrierung gut funktioniert. Bei einer größeren Zahl von zu rekonstruierenden Schichten und Materialzuständen (Feuchte, Dichte) müsste die experimentell erstellte Kalibrierdatenbank jedoch deutlich erweitert werden. Dabei kommt es darauf an, ausschließlich plausible Feuchteprofile in der Kalibrierdatenbank zu berücksichtigen, um eine ausreichende Genauigkeit sicherzustellen und nicht zusätzliche Ungenauigkeiten in die Kalibrierung zu integrieren.

2.3 Messung im Millimeterwellenbereich

Quantitative Feuchtebestimmung

Die Differenz der Permittivitäten zwischen einem feuchten und einem trockenen Material ist im Millimeterwellen-Bereich (30 GHz - 300 GHz) zwar geringer als im cm-Wellenbereich, reicht in vielen Fällen jedoch für eine qualitative und quantitative Messung aus. Bild 6 zeigt am Beispiel von Kaffeepulver einen nahezu linearen Zusammenhang zwischen der mit einem Netzwerkanalysatorsystem im Frequenzbereich von 75 GHz bis 100 GHz gemessenen Signalamplitude und der Materialfeuchte. Das Pulver befand sich während der Messung in einem für Mikrowellen transparenten Kunststoffbecher und wurde mit Hilfe von kleinen Hornantennen durchstrahlt (Transmissionsmodus). Die Amplitude nimmt mit ansteigender Feuchte aufgrund der zunehmenden Absorption ab.

Abbildung einer flächigen Feuchteverteilung

Die Ermittlung einer flächigen Feuchteverteilung ist möglich mit der manuellen oder automatisierten Verschiebung des Sensors oder mit Hilfe eines mechanischen Mehrachsenscanners (Zoughi, 2000). Bild 7 zeigt als Beispiel einen im Frequenzbereich 75 GHz - 100 GHz aufgenommenen Feuchtefleck auf einem Hartschaum, nachdem das zuvor aufgebrauchte Wasser aufgesogen und der Feuchtefleck optisch nicht mehr sichtbar war. Es wurde eine kleine Hornantenne im Reflexionsmodus verwendet, wobei die Antennenöffnung nur wenig größer als der Hohlleiterquerschnitt war und der Antennenabstand zur Probe nur wenige mm betrug. Dadurch erfolgte die Abbildung im Antennennahfeld und es wurde eine hohe laterale Auflösung (Querauflösung) erzielt. Bei größeren Abständen zwischen der Antenne und dem Prüfobjekt verschlechtert sich generell die Auflösung, wobei bei hohen Messfrequenzen und Verwendung entsprechender Antennen eine bessere Bündelung der Mikrowellenstrahlung als bei kleinen Frequenzen erzielt werden kann. Dadurch kann der Verlust an lateraler Auflösung minimiert werden. Setzt man, wie es im Bereich der Fernerkundung bereits seit Längerem geschieht, die Methoden der synthetischen Apertur (Klausing et al., 2000) ein, dann kann theoretisch auch bei beliebig großen Antenne-Objekt-Abständen eine laterale Auflösung von ca. einer halben Wellenlänge erzielt werden. Voraussetzung hierfür ist, dass die Scanfläche mit zunehmendem Abstand entsprechend vergrößert wird.

Der mit einem mechanischen Scan verbundene hohe Zeitaufwand kann durch Verwendung eines Gruppenstrahlers (Antennenarray) reduziert werden, erfordert dann jedoch den verstärkten Einsatz an Hochfrequenzelektronik und einen entsprechend größeren Entwicklungsaufwand für die vielkanalige Mess- und Prüfapparatur.

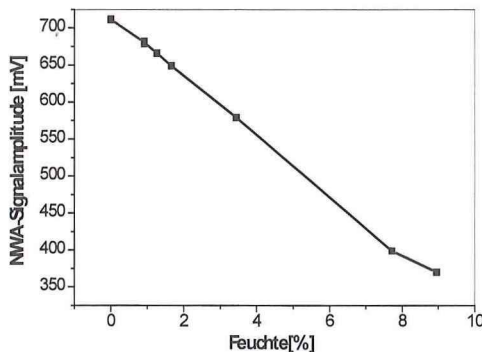


Bild 6: Mit Netzwerkanalysatorsystem (75 GHz - 100 GHz) im Transmissionsmodus gemessene Signalamplitude in Abhängigkeit von der Feuchte von Kaffeepulver (auf Trockenmasse bezogen)

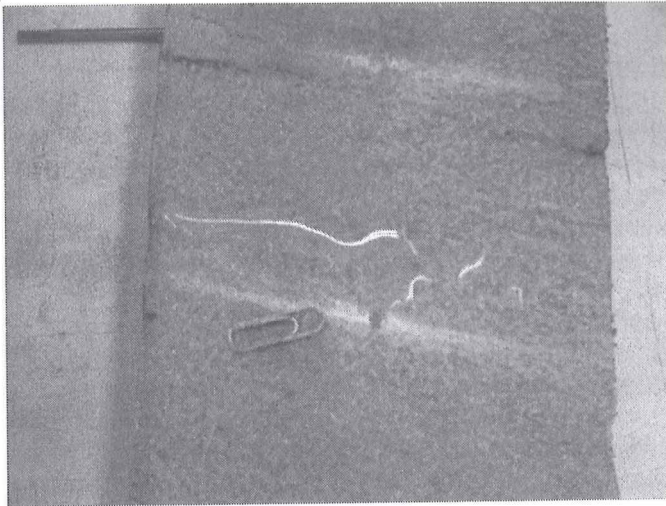


Bild 7a: Auf Hartschaum aufgebraute Wassertropfen (etwa in Bildmitte)

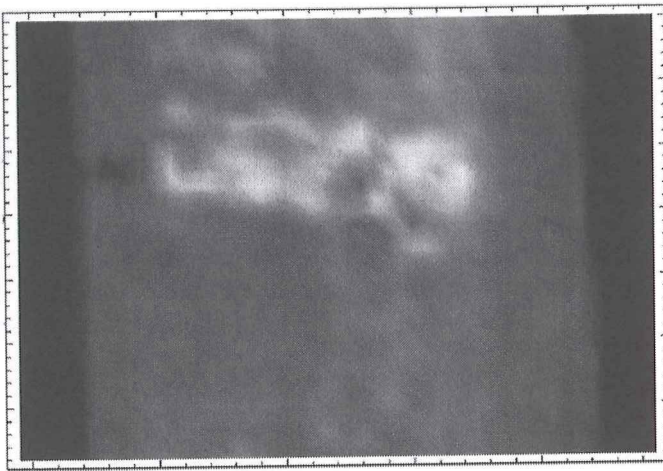


Bild 7b: Mikrowellenscan (Reflexionsmodus) des Feuchtflecks nach dem Aufsaugen des Wassers durch den Schaumstoff, Frequenzbereich 75 GHz - 100 GHz, Scanfläche 150 x 102 mm² (dunkel: kleine Amplitude, hell: große Amplitude)

3 Literatur

Daschner, F., Knöchel, R. (2001), Microwave Moisture Sensor with Nonlinear Data Processing using Artificial Neural Networks, SIcon'01, Sensors for Industry Conference, Rosemont, Illinois, USA, 5 – 7 Nov. 2001, 246 – 250

- Dobmann, G., Altpeter, I., Sklarczyk, C., Pinchuk, R. (2012), Non-Destructive Testing with Micro- and MM-Waves - Where We are and Where We Go, *Welding in the world*, vol. 56, 1 and 2, 111 – 120
- Göller, A. (2004), Morphologie typischer Feuchteschäden in Baustoffen – Mehrdimensionale Beschreibung von Feuchteschäden mit Hilfe mikrowellen-basierter Rasterfeuchtemessungen, *Feuchtetag 2004, DGZFP-Berichtsband 91 CD, Vortrag A1*, 71 - 78
- IMKO Mikromodultechnik GmbH, Theorie der Material- und Bodenfeuchtemessung mit der TRIME-Methode, <http://www.imko.de/phocadownload/publications/TRIME-THEORIE.pdf>
- Klausing, H., Holpp, W. (Hrsg., 2000), *Radar mit realer und synthetischer Apertur*, Oldenbourg
- Nyfors, E., Vainikainen, P. (1989), *Industrial Microwave Sensors*, Artech House
- Sachs, J. (2005), Principles of Ultra-Wideband Sensor Electronics, in: *Electromagnetic Aquametry* (Ed. Kupfer, K.), ch. 17, Springer
- Stork, D. (2001), *Pattern Classification*, John Wiley & Sons, Inc.
- Tschuncky, R. (2011), Sensor- und geräteunabhängige Kalibrierung elektromagnetischer zerstörungsfreier Prüfverfahren zur praxisorientierten Werkstoffcharakterisierung, Saarbrücken, 2011, Naturwissenschaftlich-Technische Fakultät III Chemie, Pharmazie, Bio- und Werkstoffwissenschaften der Universität des Saarlandes, Dissertation
- Zoughi, R. (2000), *Microwave Non-Destructive Testing and Evaluation, Non-Destructive Evaluation Series Vol. 4*, Kluwer Academic Publishers