

Verfolgung der Trocknung von Estrich mit Hilfe von ultrabreitbandigen Mikrowellen und luftgekoppelten Antennen

C. Sklarczyk

Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren, Saarbrücken, Deutschland

Keywords: Mikrowellen, breitbandig, Estrich, Reflexion, Trocknung

Abstract

The drying behavior of a freshly prepared anhydrite screed and a cement screed sample was investigated using ultrawideband microwave signals in the frequency range between about 1 GHz and 10 GHz in the reflection mode in nondestructive and contact-free way. For this purpose, the method of frequency-stepped continuous wave radar was used. At first, the back wall signal of the specimen was not recognizable due to the high attenuation of microwaves by water in the still moist sample. After a few weeks of drying, a signal was detected and increased with continued dessication, until a constant level was reached. At the same time, the position of the back wall signal shifted to smaller times due to the increase of the propagation velocity of the microwaves until here again a constant value was reached.

Zusammenfassung

Das Trocknungsverhalten einer frisch hergestellten Anhydrit- und einer Zementestrichprobe wurde mit Hilfe von ultrabreitbandigen Mikrowellensignalen im Frequenzbereich zwischen ca. 1 GHz und 10 GHz im Reflexionsmodus zerstörungsfrei und berührungslos untersucht. Dazu wurde die Methode des frequenzgestuften Dauerstrichradars eingesetzt. In der zunächst noch feuchten Probe war das Rückwandsignal der Probe aufgrund der hohen Dämpfung der Mikrowellen durch Wasser nicht erkennbar. Nach einigen Wochen tauchte dieses Signal aufgrund der Trocknung auf und wurde größer, bis ein Plateauwert erreicht war. Gleichzeitig verschob sich die Position des Rückwandechos infolge der Zunahme der Ausbreitungsgeschwindigkeit der Mikrowellen zu kleineren Zeiten hin, bis auch hier ein Plateauwert erreicht war.

Contact address:

Dr. Christoph Sklarczyk

Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren (IZFP)

Phone: +49-0681-9302-3881

Fax: +49-0691-9302-5920

Email: christoph.sklarczyk@izfp.fraunhofer.de

1 Einleitung

Im Rahmen einer von der Robert Bosch GmbH initiierten Feuchtemessreihe zur quantitativen Bestimmung der Feuchte in Baustoffen wurde das Trocknungsverhalten von zwei frisch hergestellten Estrichproben mit einem breitbandigen Impuls-Echo-Radar im Mikrowellenbereich untersucht. Die Untersuchungen fanden an der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) in Berlin statt.

2 Experimentelle Bedingungen

2.1 Proben

Die beiden mit Mikrowellenverfahren untersuchten Proben bestanden aus Anhydrit- und Zementestrich. Die Probendicken betragen 38 mm bzw. 37 mm, der Durchmesser 50 cm (Fig. 1). Die Proben lagen auf einer dünnen Kunststoffolie und diese wiederum auf zwei Styropor-Platten von zusammen 57 mm Dicke. Dieses Schichtpaket lag auf einer Waschbeton-Unterlage auf einem Labortisch.

Die Messungen starteten am Tag 3 (Tag 1 war der Tag der Probenherstellung) und wurden jeweils im Abstand von mehreren Tagen bis zum Tag 165 (vollständige Aushärtung) fortgeführt. Es wurde in einem klimatisierten Raum bei 23°C und 50% Luftfeuchte gemessen.

2.2 Mikrowellenmessungen

Das eingesetzte Messverfahren war ein frequenzgestuftes Dauerstrichradar (FSCW-radar, frequency stepped continuous wave radar) im Mikrowellenbereich. Dazu wurde ein vektorieller Netzwerkanalysator vom Typ Anritsu/Wiltron 37225B verwendet. Die Frequenzen wurden in ca. 1600 Stufen zwischen 0 GHz und 20 GHz variiert. Messgrößen waren der Real- und Imaginärteil des Reflexionskoeffizienten der Mikrowellen. Mit Hilfe einer inversen Fourier-Transformation wurden die Frequenzsignale in den Zeitbereich transformiert, d.h. die Zeitsignale wurden synthetisch erzeugt. Es wurde im Reflexionsmodus mit nur einer Antenne für das Senden und Empfangen der Mikrowellen gemessen (Streuparameter S_{11}).

Die Antennen waren sehr breitbandige Doppelsteg-Hornantennen der Typen Schwarzbeck BBHA 9120C (nomineller Frequenzbereich 2 GHz bis 18 GHz, Antenne 1) und A.H. Systems SAS 571 (nomineller Frequenzbereich 0,7 GHz bis 18 GHz, Antenne 2, Fig. 1). Zur Unterdrückung von Störungen wurde eine Tiefpassfilterung (0 – 10 GHz) durchgeführt. Der Abstand zwischen Antennenöffnung und Probe betrug ca. 21 cm bzw. 13 cm. Damit wurde sichergestellt, dass die Streuung der Mikrowellen an der Probenumrandung nur einen geringen Störeinfluss darstellte. Zudem waren aufgrund der Luftstrecke die Reflexionen innerhalb der Antenne bis zu dem Zeitpunkt, an dem die Wellen die Probe trafen, weitgehend abgeklungen.

Als Referenzkörper diente ein dünnes Metallblech, das auf die Probe gelegt wurde und das die eingestrahlten Mikrowellen vollständig reflektierte ($S_{11} = -1$).

Um das reflektierte Zeitsignal für die weitere Auswertung zu optimieren, wurden die komplexen Frequenzdaten mit Nullen ergänzt (zero-padding). Durch Anwendung eines Hamming-Fensters im Frequenzbereich vor der Transformation in den Zeitbereich wurde die Entstehung von Transformationsartefakten weitgehend unterdrückt.



Fig. 1: Auf die Estrichprobe aufgesetzte Breitbandantenne (Antenne 2)

3 Ergebnisse

Fig. 2a und b zeigen die mit Antenne 1 und 2 aufgenommenen Zeitsignale für die Anhydrit- und Zementestrichprobe. Die großen Echos links rühren hauptsächlich von Reflexionen an der Antenne her. Das Vorderwandecho, also die Reflexion an der Grenzfläche zwischen Luft und Estrichprobe, tritt bei ca. 2,8 ns bis 2,9 ns auf. Diese Zeit beinhaltet neben der Laufzeit zwischen Antenne und Probe (hin und zurück) auch noch die Laufzeiten in den Kabeln und der Messapparatur. Dass es sich bei dem Echo um das Vorderwandecho handelt, konnte dadurch verifiziert werden, dass ein dünnes Metallblech auf die Probe gelegt wurde. Dieses erzeugte an derselben Stelle aufgrund der totalen Reflexion einen deutlich höheren Peak. Es wurde versucht, das Antennensignal dadurch zu eliminieren, dass das Signal mit Antenne, aber ohne Probe, vom Signal mit Probe abgezogen wurde. Eine vollständige Eliminierung konnte jedoch nicht erreicht werden. Die leichten Schwankungen bei der

zeitlichen Position der Echos sind darauf zurückzuführen, dass insgesamt nur zwei Proben zur Verfügung standen und die Antennen daher immer wieder umgesetzt werden mussten.

Je nach Probe und Antennentyp konnte nach einer Aushärtezeit von mehreren Tagen oder Wochen ein Rückwandecho (Grenzfläche Estrich – Styropor) bei ca. 3,4 ns detektiert werden. In Fig. 2 kann in den rechten Teilbildern bei ca. 3,8 ns ein weiteres Echo erkannt werden, das von der Reflexion am Labortisch herrührt. Das Nachschwingen des Antennensignals ist bei der Antenne 2 stärker als bei Antenne 1 ausgeprägt.

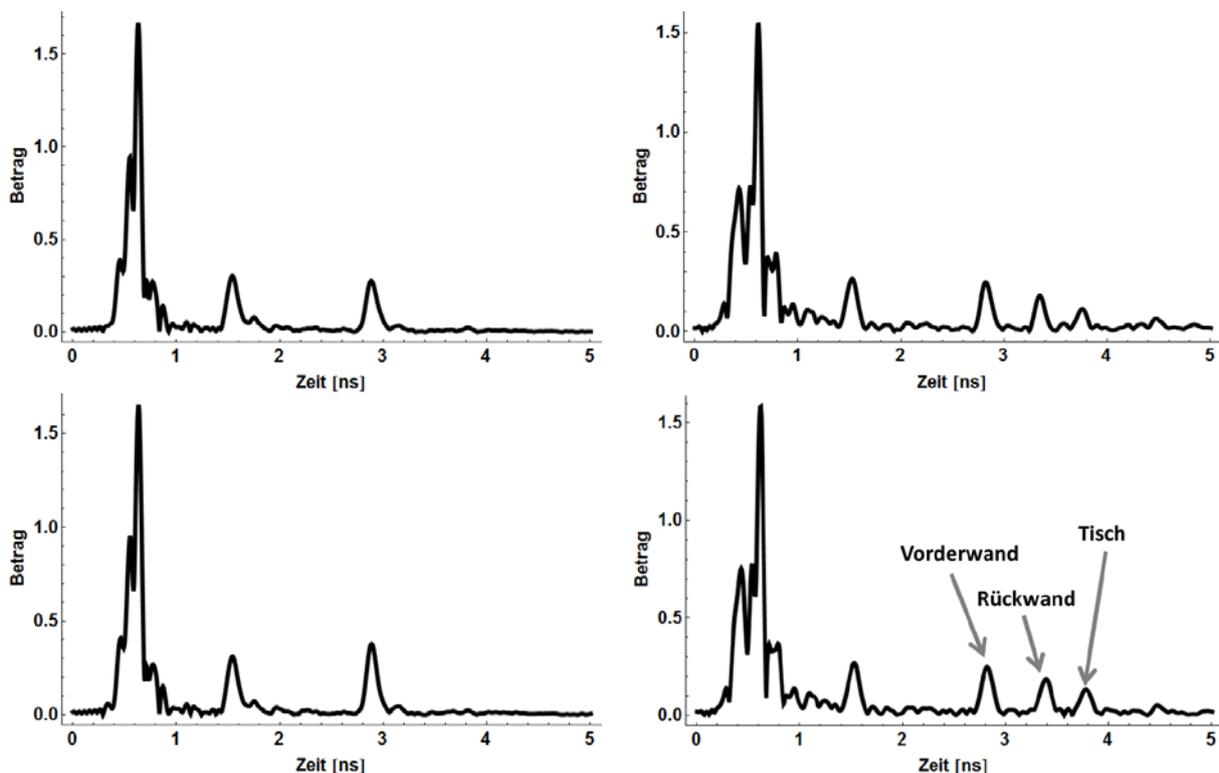


Fig. 2a: Betrag der Zeitsignale mit Antenne 1: oben links: Zementestrich am Tag 3, oben rechts: Zementestrich am Tag 165, unten links: Anhydritestrich am Tag 3, unten rechts: Anhydritestrich am Tag 165

Die zeitliche Entwicklung der Höhe des Vorderwandechos kann Fig. 3 entnommen werden. Nach einigen Tagen der Trocknung wird ein Plateauwert erreicht. Dieser Vorgang dauert beim Anhydritestrich etwas länger als beim Zementestrich. Fig. 4 zeigt, dass die Höhe des Rückwandechos beim Zementestrich nach etwa 20 Tagen weitgehend konstant bleibt. Davor ist das Echo kaum nachweisbar. Beim Anhydritestrich nimmt die Echohöhe zunächst zu und erreicht nach ca. 40 Tagen einen nahezu konstanten Wert. Auch die zeitliche Position des Rückwandechos bleibt beim Zementestrich konstant, sobald das Echo nachweisbar ist (Fig. 5). Beim Anhydritestrich verschiebt sie sich im Verlauf der Trocknung zu kleineren Werten hin, bis nach ca. 20 Tagen ein Plateau erreicht ist.

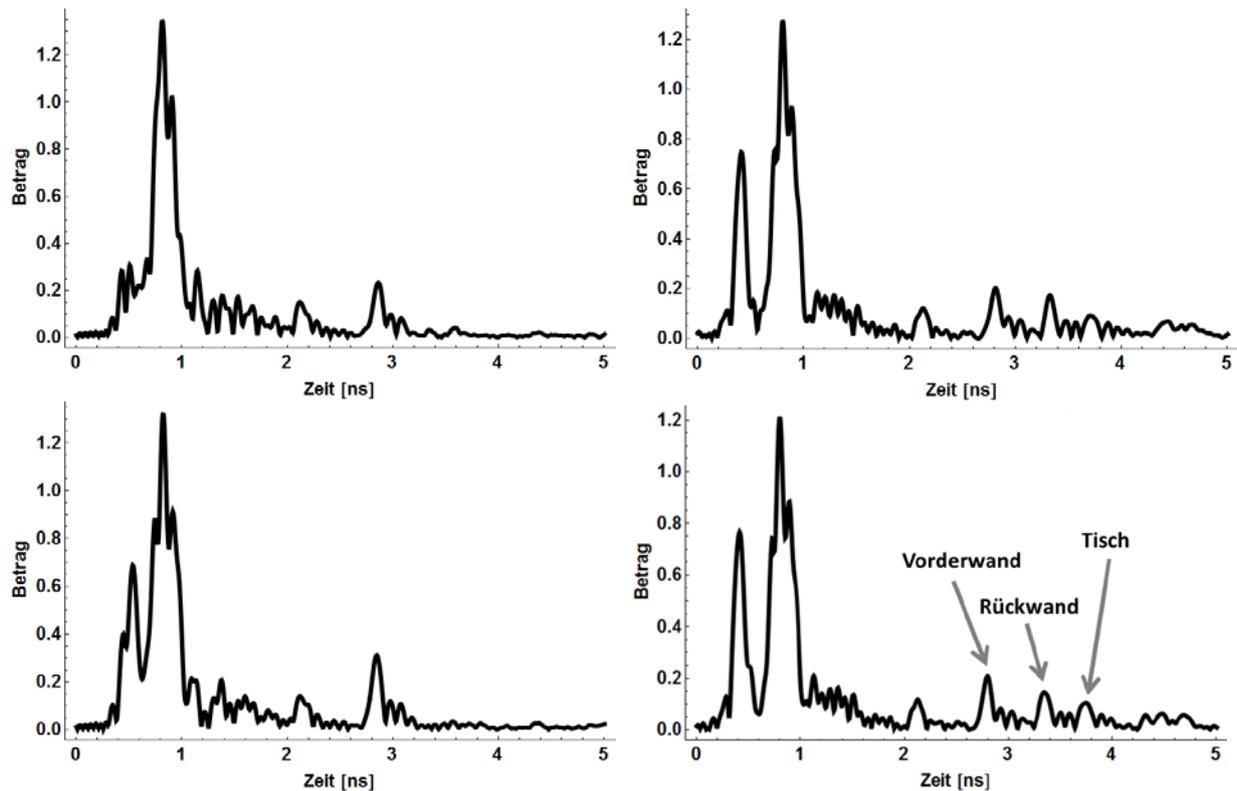


Fig. 2b: Betrag der Zeitsignale mit Antenne 2: oben links: Zementestrich am Tag 3, oben rechts: Zementestrich am Tag 165, unten links: Anhydritestrich am Tag 3, unten rechts: Anhydritestrich am Tag 165

Außer den identifizierten Echos an den Grenzflächen konnten innerhalb der Probe keine weiteren Echos, z.B. aufgrund eines Feuchtgradienten, gefunden werden.

4 Diskussion und Schlussfolgerungen

Freies Wasser besitzt eine im Vergleich zu den meisten anderen Stoffen sehr hohe Permittivität (Dielektrizitätszahl). Dementsprechend haben auch wasserhaltige Stoffgemische eine gegenüber dem trockenen Stoff erhöhte Permittivität (Nyfors *et al*, 1989, Kupfer, 2005). Diese wird mit der Abnahme des Gehaltes an freiem Wasser im Verlauf der Trocknung kleiner, wodurch sich auch der Reflexionskoeffizient vermindert (Fig. 3). Die Rückwand ist zu Beginn der Trocknung aufgrund der hohen Absorption der Mikrowellen durch das freie Wasser noch nicht sichtbar. Mit der Abnahme der Absorption durch die Trocknung (Fig. 2 und 4) wird die Rückwand erkennbar. Die Verschiebung der Echoposition zu kleineren Zeiten hin (Fig. 5), also die Verminderung der Signallaufzeit durch die Probe, ist dadurch bedingt, dass die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Mikrowellen im Material mit zunehmender Trocknung zunimmt, da sich die Permittivität des zunächst noch feuchten Estrichs an die des trockenen annähert. Dieser Prozess ist beim Zementestrich schneller als beim Anhydritestrich erreicht (Fig. 4). Bei ersterem wird ein Plateauwert nach ca. 20 – 25 Tagen erreicht, bei letzteren nach 30 – 40 Tagen.

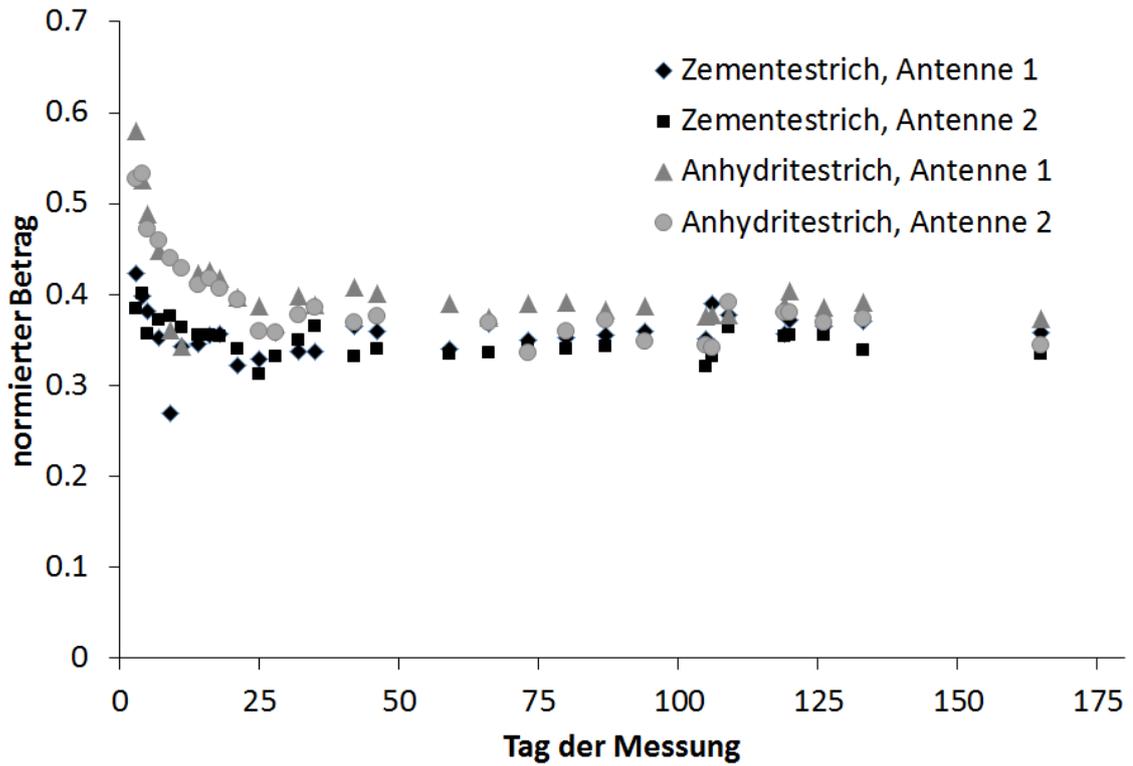


Fig. 3: Höhe des Vorderwandechos normiert auf die Reflexion an einer Metallplatte gegen Zeit der Trocknung

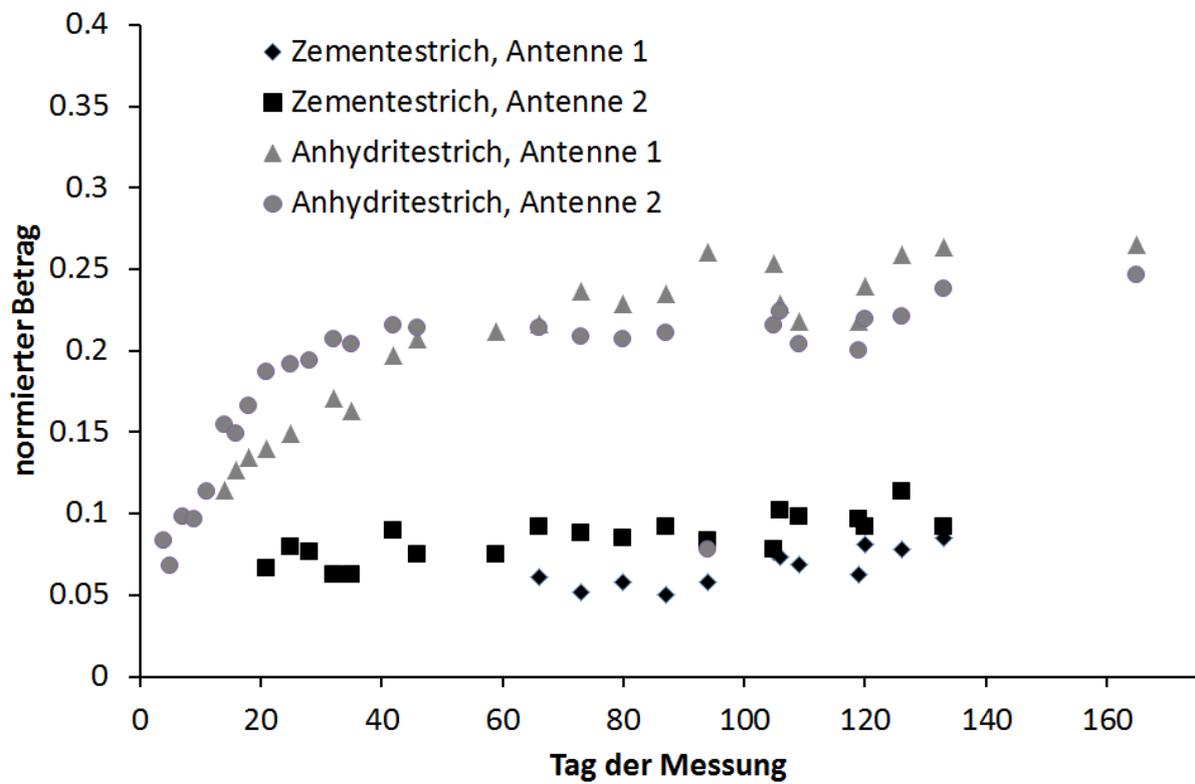


Fig. 4: Höhe des Rückwandechos normiert auf die Reflexion an einer Metallplatte gegen Zeit der Trocknung

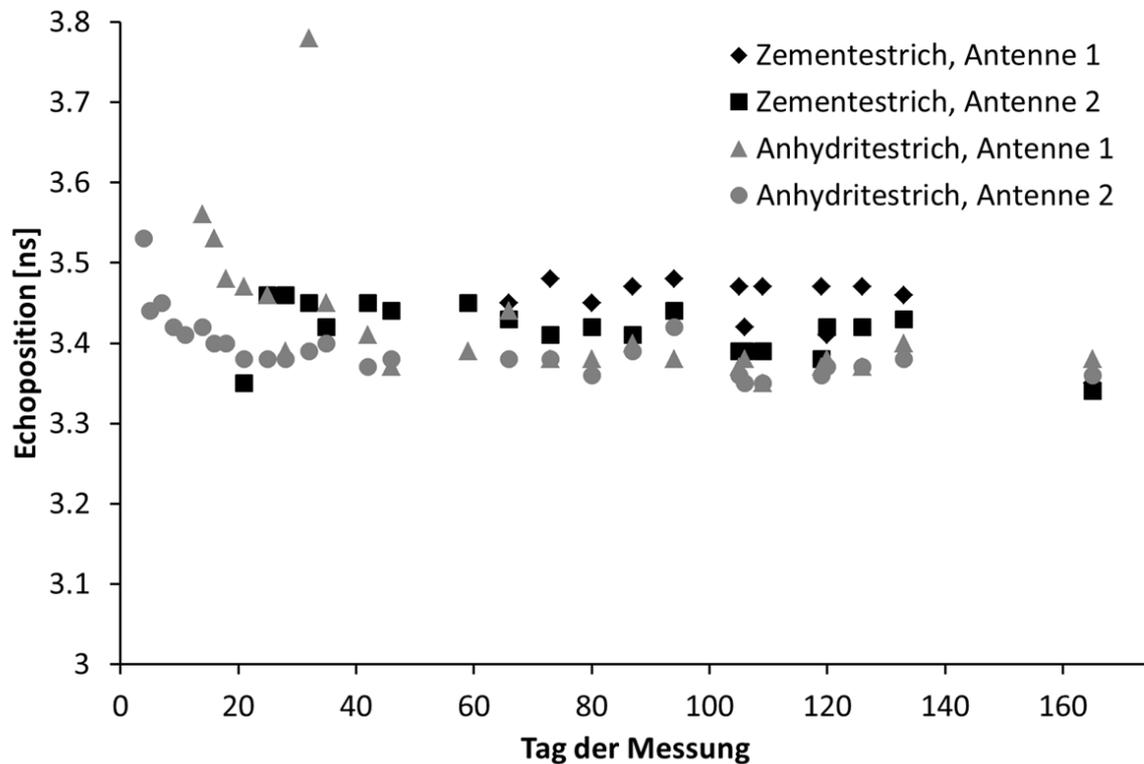


Fig. 5: Zeitliche Position des Rückwandechos gegen Zeit der Trocknung

5 Zusammenfassung

Die Untersuchungen zeigen, dass eine Mikrowellenmessung geeignet ist, das Trocknungsverhalten von Estrich zu charakterisieren. Die Reflexion an der Probenvorderwand zeigt dabei ein ähnliches Verhalten wie an der Rückwand. Somit ist auch eine einfache Mikrowellenmethode, bei der die einzelnen Echos nicht differenziert werden müssen, geeignet, die Trocknung zu verfolgen.

Referenzen

Nyfors, E., Vainikainen, P. (1989), Industrial Microwave Sensors, Artech House

Kupfer, K. (Ed.) (2005), Electromagnetic Aquametry, Springer

Danksagung

Der Verfasser dankt der Robert Bosch GmbH - Power Tools, Engineering Detection Systems, für die Bereitstellung der Proben und der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Fachbereich 8.2, Zerstörungsfreie Schadensdiagnose und Umweltmessverfahren, für die Durchführung der Experimente.