

# EM HYDRA – Mikrowellen-Messverfahren zur Erfassung von Hydratationsprozessen in Beton

Björn JUNGSTAND<sup>1</sup>, Arndt GÖLLER<sup>1</sup>  
André DOLLASE<sup>2</sup>, Ulrich MÖLLER<sup>2</sup>

<sup>1</sup> hf sensor GmbH (Weißenfelser Str. 67, D-04229 Leipzig ([www.hf-sensor.de](http://www.hf-sensor.de)))

<sup>2</sup> Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig ([www.htwk-leipzig.de](http://www.htwk-leipzig.de))

Kontakt E-Mail: [sales@hf-sensor.de](mailto:sales@hf-sensor.de)

**Kurzfassung.** Das vor zwei Jahren in seinen Grundlagen vorgestellte Mikrowellen-Messverfahren EM HYDRA zur Erfassung von Hydratationsprozessen in Beton wurde zwischenzeitlich in einer Reihe von Anwendungen getestet.

Für diverse Bauaufgaben ist die Entwicklung der Druckfestigkeit des Betons von enormer Bedeutung. Herkömmlich werden separate Probekörper bei der Herstellung des Bauwerks mit angefertigt, welche mittels genormten Druckprüfverfahren auf ihre Festigkeit untersucht werden. Diese Vorgehensweise ist zeitaufwändig, und die im Labor ermittelten Druckfestigkeitsergebnisse sind gegenüber der realen Festigkeitsentwicklung bei äußeren Witterungsbedingungen nur bedingt anwendbar. Daher steigt die Nachfrage nach zerstörungsfreien Prüfmethode, welche eine zuverlässige in-situ Festigkeitsermittlung ermöglichen. Die bereits seit vielen Jahren bekannte mikrowellenbasierte Feuchtemessung für Anwendungen im Bauwesen wurde zur Überwachung des Hydratationsprozesses von Beton weiterentwickelt.

Im Gegensatz zur Feuchtemessung in inerten Baustoffen ist der Prozess der Wassereinlagerung bei Beton sehr kompliziert. Physikalische und chemische Eigenschaften sowie Kristallisationsprozesse spielen bei der Strukturentwicklung eine Rolle, verschiedene Bindungsformen des Wassers liegen parallel vor und verändern sich zeitabhängig. Mit den kommerziell verfügbaren einparametrischen elektrischen Feuchtemessverfahren, dazu gehören auch die Mikrowellenverfahren, ist es nicht möglich, diese Vorgänge zu erfassen.

Durch zeitparallele Auswertung mehrerer Mikrowellenparameter/-spektren ist der Verlauf von Hydratations- und Abbindeprozessen erfassbar. Im Beitrag wird ein mikrowellenspektroskopisches Verfahren zur kontinuierlichen Erfassung des Hydratationsfortschrittes von Beton vorgestellt, mit dem die Druckfestigkeitsentwicklung zerstörungsfrei abbildbar ist. Ein darauf aufbauendes Mikrowellen-Messsystem wird so gestaltet, dass es direkt in die Schalung integriert werden und Aussagen zu deren erforderlicher Standzeit liefern kann.

Die durchgeführten Untersuchungen zeigten, dass sich der Hydratationsverlauf mit Hilfe spektroskopischer Mikrowellenverfahren darstellen lässt. Der Beitrag beschreibt dies für verschiedene Anwendungen bei der Herstellung von Beton unter praktischen Bedingungen.

## **Einführung**

Für diverse Bauaufgaben ist die Kenntnis über die Entwicklung der Druckfestigkeit des Betons von enormer Bedeutung. Eine bewährte Methode besteht darin, separate Probekörper bei der Herstellung des Bauwerks mit anzufertigen, welche mittels genormten Druckprüfverfahren auf ihre Festigkeit untersucht werden. Diese Vorgehensweise ist zeitaufwändig, und die im Labor ermittelten Druckfestigkeitsergebnisse sind gegenüber der realen Festigkeitsentwicklung bei äußeren Witterungsbedingungen nur bedingt anwendbar. Daher steigt die Nachfrage nach zerstörungsfreien Prüfmethoden, welche eine zuverlässige in-situ Festigkeitsermittlung ermöglichen.

Die Mikrowellenfeuchtemessung hat sich bereits zu einem anerkannten Verfahren in Bauwesen und Industrie etabliert. Diese Technik wurde zur Überwachung des Hydratationsprozesses von Beton weiterentwickelt.

Im Gegensatz zur Feuchtemessung in inerten Baustoffen ist der Prozess der Wassereinlagerung bei Beton sehr kompliziert. Physikalische und chemische Eigenschaften sowie Kristallisationsprozesse spielen bei der Strukturentwicklung eine Rolle, verschiedene Bindungsformen des Wassers liegen parallel vor und verändern sich zeitabhängig. Mit den kommerziell verfügbaren einparametrischen elektrischen Feuchtemessverfahren, dazu gehören auch die Mikrowellenverfahren, ist es nicht möglich, diese Vorgänge zu erfassen.

Durch zeitparallele Auswertung mehrerer Mikrowellenparameter/-spektren ist der Verlauf von Hydratations- und Abbindeprozessen abbildbar. Im Beitrag wird ein mikrowellenspektroskopisches Verfahren zur kontinuierlichen Erfassung des Hydratationsfortschrittes von Beton vorgestellt, mit dem die Druckfestigkeitsentwicklung zerstörungsfrei abbildbar ist. Ein darauf aufbauendes Mikrowellen-Messsystem wird so gestaltet, dass es direkt in die Schalung integriert werden und Aussagen zu deren erforderlicher Standzeit liefern kann.

Die durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass sich der Hydratationsverlauf mit Hilfe spektroskopischer Mikrowellenverfahren darstellen lässt. Für die Auswertung der Mikrowellendaten werden Referenzdruckfestigkeiten genutzt. Mit deren Hilfe kann für unterschiedliche Wasseranteile des Betons ein Kalibriermodell erstellt werden, das eine Aussage über die Festigkeitsentwicklung anhand der Mikrowellendaten ermöglicht.

### **1. Grundlagen der Mikrowellen-Messtechnik**

Mikrowellenmessverfahren gehören zu den dielektrischen Messverfahren, welche auf den herausragenden dielektrischen Eigenschaften des Wassers beruhen. Die relative DK von Wasser beträgt etwa 80, die relative DK der meisten Feststoffe, darunter auch der Baustoffe, ist wesentlich kleiner, sie liegt vorzugsweise zwischen 3 und 6. Im Mikrowellenbereich kommen zur ausgeprägten Polarisierbarkeit der Wassermoleküle auch noch dielektrische Verluste dazu, die auf die starken Bindungen der Wassermoleküle untereinander zurückzuführen sind. Auf dieser Grundlage lassen sich auch kleine Wassermengen gut detektieren.

Die eingesetzte Mikrowellen-Messtechnik basiert auf dem Reflexionsprinzip. Das heißt, es werden die Leistungen der vom Material reflektierten und der eingestrahlten Welle gemessen. Der Quotient aus beiden bildet die Grundlage für den sogenannten Feuchteindex. Dabei resultiert der Hauptbeitrag zur Reflexion der Mikrowellen aus dem freien und physikalisch gebundenen Wasser im Baustoff. Chemisch gebundenes Wasser verändert die dielektrischen Parameter des Baustoffs und geht somit in dessen reflektive Eigenschaften und darauf aufbauend in materialspezifische Kalibrierfunktionen für das mikrowellenspektroskopische Verfahren mit ein. Während des Hydratationsprozesses wird

freies Wasser chemisch gebunden. Somit kann mit Hilfe der Mikrowellentechnik indirekt auf den Hydratationsprozess geschlossen werden.

## **2. Multivariate Datenanalyse**

Im Gegensatz zur Austrocknung eines Baustoffes werden während des Hydratationsprozesses auch die dielektrischen Eigenschaften des „trockenen“ Anteils verändert. Die Auswertung eines einzelnen Mikrowellenparameters ist bei dieser chemischen Veränderung und gleichzeitigen Wasserabnahme im Messgut nicht eindeutig. Zur Messung des Hydratationsprozesses mit Mikrowellensensoren müssen daher mehrere prägnante Parameter des Mikrowellenspektrums (z.B. Resonanzparameter) der Sensoren genutzt werden. Diese sind je nach Applikator unterschiedlich. Alternativ kann das gesamte Amplitudenspektrum benutzt werden.

Die Auswertung mehrerer Parameter kann durch die Regression von Funktionen mit mehreren Variablen erfolgen (MLR), oder es können multivariate, statistische Verfahren wie die Hauptkomponentenanalyse (PCA) bzw. -regression (PCR) sowie Partial Least Square Regression (PLSR) benutzt werden. Bei den zwei letztgenannten Verfahren erfolgt eine Transformation bzw. Reduktion der Ausgangsdaten, so dass die relevanten Informationen hervorgehoben werden. Bei der PCA bzw. PCR werden neue Parameter (Hauptkomponenten) berechnet. Dabei soll eine Verdichtung der Messdaten mit möglichst geringen Verlusten bei gleichzeitiger Verringerung der Anzahl der Parameter erreicht werden. Bei der PLSR wird zusätzlich für die Transformation der Eingangsdaten (Bestimmung der Hauptkomponenten) deren Abhängigkeit von der Zielgröße (Hydratationsgrad) mit berücksichtigt.

Alle genannten Verfahren wurden auf die Messdaten in Voruntersuchungen angewendet. Die Bewertung der einzelnen Verfahren erfolgte durch Bestimmung statistischer Parameter (max. absoluter und relativer Fehler, RMSE,  $R^2$ ), welche die Vorhersagegenauigkeit bei der Anwendung der erstellten Modelle auf die Messdaten beschreiben. Bei diesen Voruntersuchungen konnte die Hauptkomponentenregression der Parameter des Mikrowellenspektrums als das geeignetste Verfahren ermittelt werden. Es ist somit möglich aus den Strukturen der Daten zerstörungsfrei auf Eigenschaften von Materialien wie Beton zu schließen.

## **3. Mikrowellenmesssystem zur Erfassung von Hydratationsprozessen**

Zur Untersuchung des Hydratationsprozesses von Beton wurde eine versiegelte Kunststoffschalung entwickelt (Abb. 1). Diese Schalung ermöglicht eine seitliche Applikation des Mikrowellensensors und gleichzeitig eine Versiegelung des Probenmaterials. Eine Abdeckung mit integriertem Dichtstreifen sorgt dafür, dass aus dem Probenmaterial kein Wasser verdunsten kann. Der Sensor wird dabei über einen speziellen Flansch an das Probenmaterial angekoppelt (Abb. 2). Während der Untersuchungen kamen drei verschiedene, skalare, reflektive Mikrowellensensoren zum Einsatz. Zwei dieser Sensoren waren schmalbandige resonante Sensoren mit einer Bandbreite von 250 MHz (2,3...2,55 GHz) und Eindringtiefen von ca. 5 bzw. 15 cm. Der dritte Sensor war ein breitbandiger Sensor (2,0...3,0 GHz) und einer Eindringtiefe von ca. 1 cm.

Parallel dazu erfolgte eine Temperaturmessung des Betons mithilfe von Widerstandsdrähten (NiCr-Ni). Dies ermöglicht eine Kompensation des Temperatureinflusses auf das Mikrowellensignal.

Mit Hilfe eines Messrechners wurden die Mikrowellensignale aufgezeichnet. Dabei wird die Messung kontinuierlich ausgeführt und direkt nach dem Einbau des Betons in die Schalung gestartet. Durch eine spezielle Software werden die Messsignale zeitlich aufgelöst gespeichert. Das Messintervall ist programmtechnisch dem Erhärtungsfortschritt angepasst worden. Zu Beginn wurde ein Messintervall von 1 Stunde und am Ende der Messung ein Intervall von 24 Stunden gewählt. Im Gesamten wurden so für eine Versuchsreihe ca. 65 Einzelmessungen über einen Zeitraum von 7 Tagen aufgezeichnet. Bei den Versuchsreihen kamen drei verschiedene Mikrowellensensoren zum Einsatz mit denen unterschiedliche Eindringtiefen in das Material realisiert werden können.

Aus den so gewonnenen Mikrowellendaten konnte im Weiteren mit Hilfe der multivariaten Datenanalyse auf die Eigenschaften des Betons geschlossen werden.



**Abb. 1** Messsystem zur Erfassung des Hydratationsprozesses



**Abb. 2** Flansch zur Sensorankopplung an das zu untersuchende Material

#### 4. Untersuchung des Hydratationsprozesses von Beton mit unterschiedlichen Wasseranteilen (w/z-Werten)

Die Untersuchung des Hydratationsprozesses von Beton erfolgte mithilfe des oben beschriebenen Messsystems. Dabei wurden im Gesamten 9 Versuchsreihen mit Wasserzementwerten von 0,45; 0,50 & 0,55 durchgeführt, wobei ein Portlandzement (CEM I 42,5 R) verwendet wurde. Die Messungen erfolgten in einem Versuchsklima mit einer Temperatur von  $20\pm 2^\circ\text{C}$  und  $65\pm 5\%$  relativer Luftfeuchte.

Parallel zur Mikrowellenmessung erfolgte an festgelegten Prüftagen eine Druckfestigkeitsermittlung nach DIN EN 12390 Teil 1-4. Abweichend zur in der Norm festgelegten Lagerung der Probekörper in Wasser, wurden die Proben versiegelt in einer Folie bei den gleichen klimatischen Bedingungen wie das Messsystem gelagert. Mit diesem Vorgehen ist eine Vergleichbarkeit der Mikrowellenuntersuchung und der Druckfestigkeitsermittlung gegeben. Aus den nach DIN EN 12390 Teil 1-4 ermittelten Druckfestigkeiten wurde, zur Vereinheitlichung der Verläufe, der Hydratationsgrad berechnet. Dieser Hydratationsgrad ist ein Maß für den Fortschritt des Hydratationsprozesses und abhängig vom Wasseranteil des Betons sowie den klimatischen Bedingungen im Umfeld der Reaktion. Der ermittelte Hydratationsgrad diente als Referenzwert zur Auswertung der Mikrowellensignale. Die aufgenommenen Mikrowellensignale wurden im Weiteren mit Hilfe einer multivariaten Datenanalyse ausgewertet und es konnte für jede Versuchsreihe ein Kalibriermodell aufgestellt werden. Dieses Modell erlaubt es, den Hydratationsgrad aus der Änderung der aufgenommenen Mikrowellensignale zu berechnen.

Die Abbildungen 3-5 zeigen die Entwicklung des Hydratationsgrades in Abhängigkeit von der Zeit. Dabei stellen die Referenzwerte die aus den gemessenen Druckfestigkeiten berechneten Hydratationsgrade dar. Es wurden für jeden Wasserzementwert jeweils 3 Versuchsreihen durchgeführt. Im Weiteren wurde ein repräsentatives Berechnungsmodell (Versuchsreihe) gewählt und auf die Wiederholungsmessungen angewendet. Die gewählten Repräsentanten sind die Versuchsreihen 045\_2, 050\_3 & 055\_2. Die Berechnung erfolgte dann für jeden Wasserzementwert mit Hilfe des gewählten Modells.

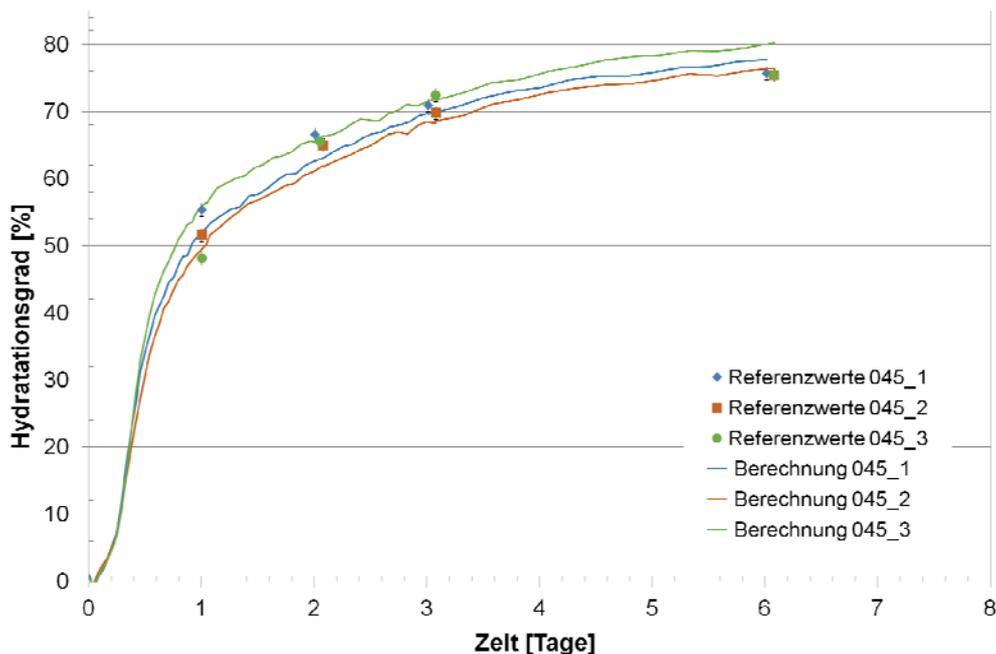
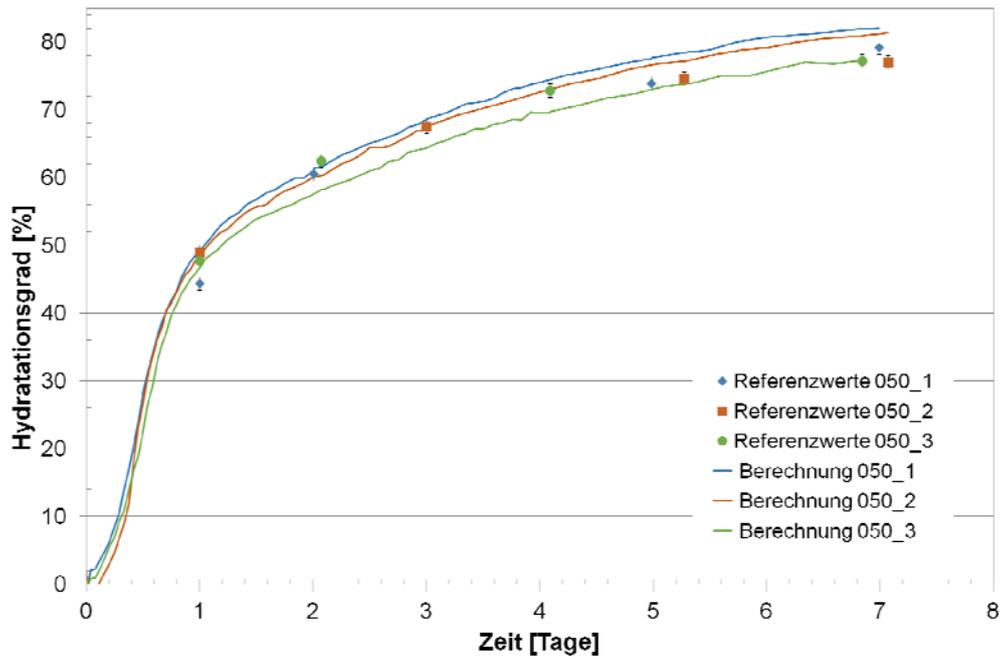
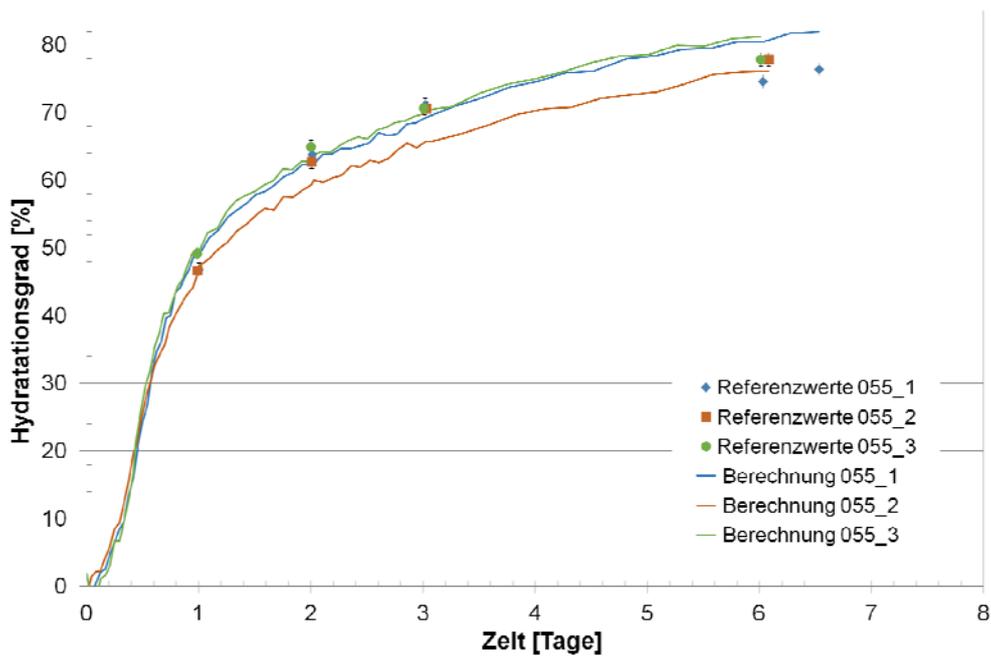


Abb. 3 Vergleich der Referenz- mit den berechneten Werten (w/z-Werte = 0,45)



**Abb. 4** Vergleich der Referenz- mit den berechneten Werten (w/z-Werte = 0,50)



**Abb. 5** Vergleich der Referenz- mit den berechneten Werten (w/z-Werte = 0,55)

Die Ergebnisse der Versuchsreihen zeigen eine sehr gute Übereinstimmung der berechneten- und der Referenzwerte für die verschiedenen Wasserzementwerte des Betons.

## 5. Untersuchung des Einflusses von verschiedenen Zementarten sowie Zusatzmitteln und Zusatzstoffen auf das Mikrowellensignal

Die hier dargestellten Ergebnisse wurden unter der Variation des Wasseranteils (w/z-Wert) des Betons erzielt. Um den in der Praxis vorkommenden verschiedenen Zementen und Zusatzstoffen gerecht zu werden, wurde im Weiteren der Einfluss von verschiedenen Zementarten sowie Zusatzmitteln und Zusatzstoffen auf das Mikrowellensignal untersucht.

Die Ergebnisse der Versuchsreihen für die Untersuchung verschiedener Zementarten zeigt für einen Portlandkompositzement (CEM II) beispielhaft Abbildung 6. Die berechneten und die Referenzwerte zeigen auch für unterschiedliche Zementarten eine sehr gute Übereinstimmung. Es konnte eine Genauigkeit von ca.  $\pm 3$  N/mm<sup>2</sup> erreicht werden. Gleichzeitig wurde das aufgestellte Kalibriermodell aus den Versuchsreihen mit verschiedenen Wasseranteilen, einem w/z-Wert von 0,5 und einem reinen Portlandzement (CEM I) auf den CEM II angewendet. Es ist zu erkennen, dass auch dieses Kalibriermodell angewendet werden kann. Die oben genannte Genauigkeit bleibt dabei unverändert. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass verschiedene Zementarten keinen Einfluss auf das spektroskopische Messverfahren haben.

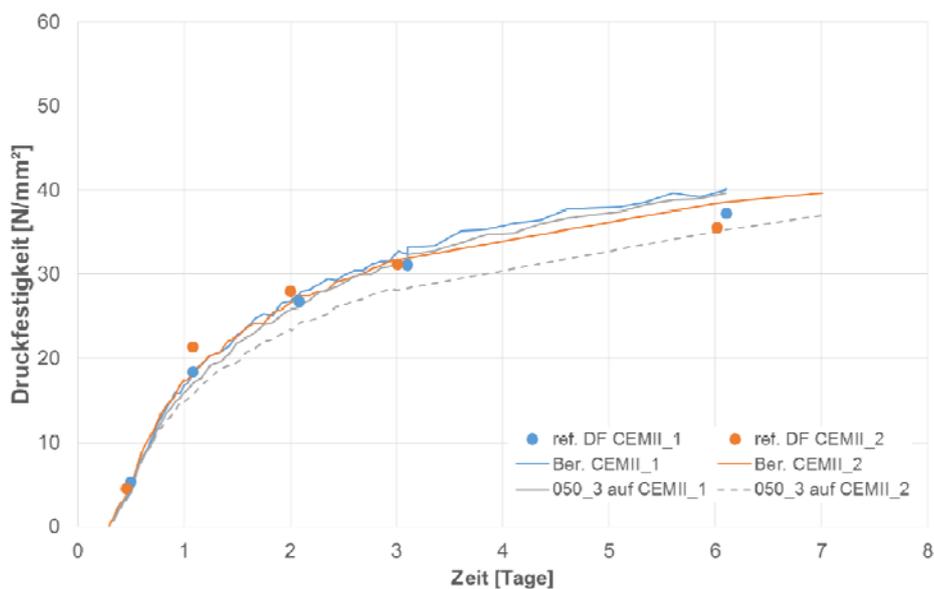
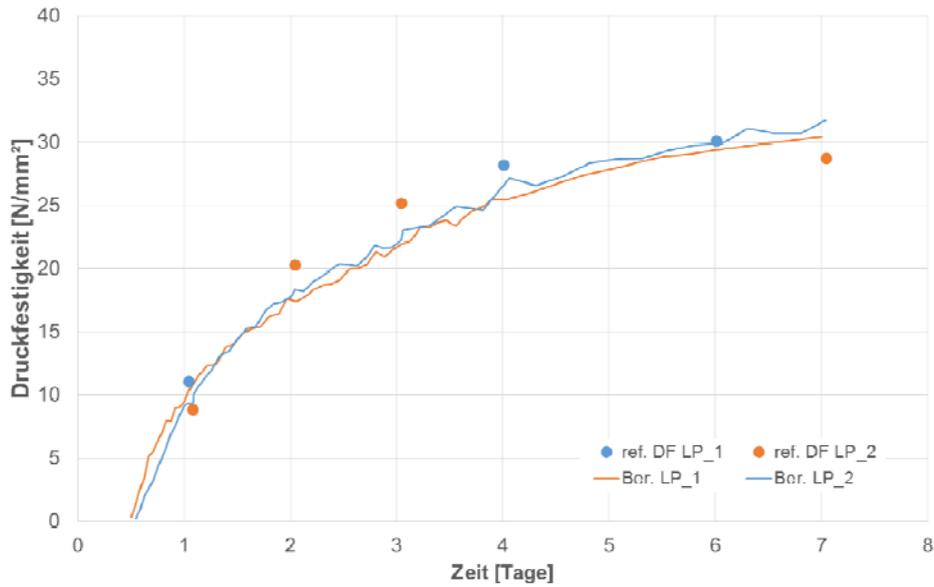


Abb. 6 Vergleich der Versuchsreihen (CEM II)

Weitere Ergebnisse von Versuchsreihen für den Einfluss eines Luftporenbildners (LP) als Betonzusatzmittel werden in Abbildung 7 dargestellt. Die Anwendung der Kalibriermodelle zeigt ebenfalls gute Ergebnisse. Die Genauigkeit liegt dabei bei ca.  $\pm 4$  N/mm<sup>2</sup>. Der Einfluss von Betonzusatzmitteln auf die Berechnung der Druckfestigkeitsverläufe konnte somit mit Hilfe des spektroskopischen Verfahrens ausgeschlossen werden.

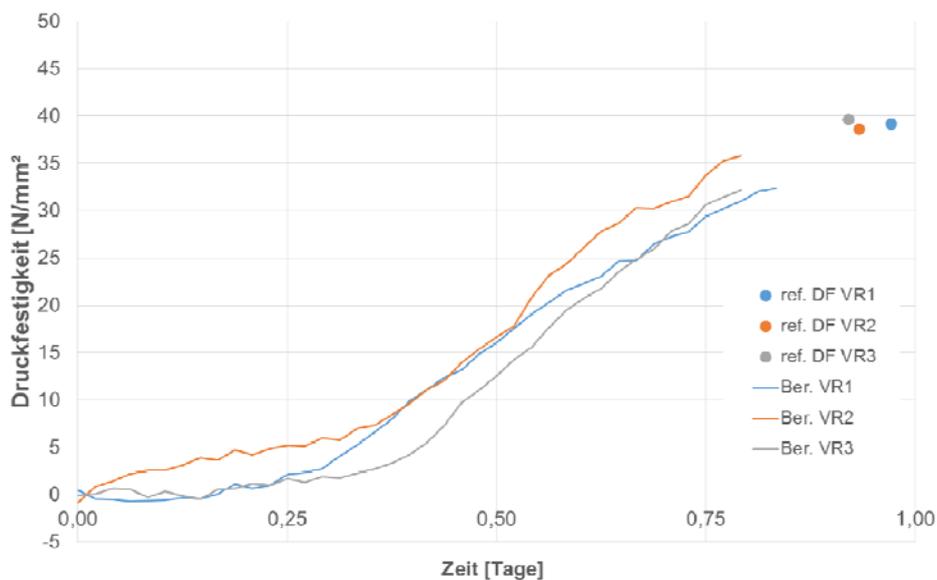


**Abb. 7** Vergleich der Versuchsreihen (FM)

Bei zwei Praxiseinsätzen in Betonfertigteilwerken wurde die Druckfestigkeitsentwicklung untersucht. Für diese Praxiseinsätze wurde ein stationäres Messsystem für den direkten Einbau in die Schalung (siehe Abbildung 8) entwickelt. Unter baustellenähnlichen Bedingungen wurde das Messsystem erprobt und es konnte der Druckfestigkeitsverlauf am ersten Tag sowie den ersten Tagen nach der Betonage aus den Mikrowellendaten berechnet werden. Dabei erfolgte die Mikrowellenmessung in den klimatischen Bedingungen des Herstellungsprozesses der Betonfertigteile.



**Abb. 8** Mikrowellenspektroskopisches Messsystem für den Einsatz im Betonfertigteilwerk



**Abb. 9** Messung des Druckfestigkeitsverlaufes im Betonfertigteilterwerk

In Abbildung 9 sind die Ergebnisse von 3 Versuchsreihen beispielhaft dargestellt. Die Referenzwerte konnten erst nach ca. 20 Stunden ermittelt werden. Der errechnete Verlauf der Druckfestigkeitsentwicklung, welcher direkt nach der Betonage startet, zeigt den typischen Verlauf einer solchen Kurve. In den ersten 6 Stunden nach der Betonage kommt es zu einer sogenannten Ruheperiode, erst danach steigt die Druckfestigkeit des Betons langsam an. Dabei verlaufen die berechneten Druckfestigkeiten direkt in Richtung der Referenzwerte. Es konnte mit Hilfe des Mikrowellenverfahrens der genaue Zeitpunkt bis zur benötigten Druckfestigkeit von ca. 20 N/mm<sup>2</sup> ermittelt und somit die Zeit bis zum Ausschalen des Betonfertigteils optimiert werden.

## 6. Zusammenfassung

Mit Hilfe des spektroskopischen Mikrowellenverfahrens ist es somit möglich, kontinuierlich und zerstörungsfrei den Hydratationsgrad des Betons zu bestimmen und somit Rückschlüsse auf den Verlauf der Festigkeitsentwicklung zu ziehen.

Die Ergebnisse für die Anwendungen der Kalibriermodelle zeigen im Gesamten eine gute Übereinstimmung der Referenz- und der berechneten Werte. Die spektroskopische Auswertung der Mikrowellendaten macht somit eine Verknüpfung der Mikrowellensignale mit den Eigenschaften des erhärtenden Betons, insbesondere der Druckfestigkeit, im Labor möglich. Mit Hilfe der Einsätze in den Fertigteilterwerken und auf der Baustelle konnten Ausschulfristen optimiert werden. Für die Unternehmen bedeutet dies, dass sie die Herstellung von Fertigteilen oder anderen Bauteilen wirtschaftlicher gestalten können.

## Literatur:

- [1] Göller, A., Handro, A., Landgraf, J.: A New Microwave Method for Moisture Measurement in Building Materials. Proc. 3<sup>rd</sup> Workshop on Electromagnetic Wave Interaction with Water, USDARS, Athens/GA (USA), April 11 - 13, 1999, pp. 84 - 89
- [2] Rzepecka, M. A. et al. (1972); Monitoring of Concrete Process by Microwave Terminal Measurements; IEEE Transactions on Industrial Electronics and Control Instrumentation, Vol. IECI-19, No. 4
- [3] Schmidt, J. (1991); Einsatz der Mikrowellenmesstechnik zur zerstörungsfreien und kontinuierlichen Erfassung der Hydratationskinetik von Mörteln und Betonen; DGZfP Symposium Zerstörungsfreie Prüfung im Bauwesen, Berlin
- [4] Mubarark, K. & Bois, K. J. (2001); A Simple, Robust, and On-Site Microwave Technique for Determining Water-to-Cement Ratio (w/c) of Fresh Portland Cement-Based Materials; IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 50, No. 5
- [5] Kessler, Waltraud: Multivariate Datenanalyse für die Pharma-, Bio- und Prozessanalytik. WILEY-VCH, Weinheim, 1. Auflage, 2007
- [6] Göller, A., Jungstand, B., Dollase, A., Möller, U. (2016): EM HYDRA - Mikrowellen-Messverfahren und -systeme zur Erfassung von Hydratationsprozessen in Beton; Poster 1, DGZFP-Fachtagung Bauwerksdiagnose, Berlin, 25.-26.02.2016
- [7] Dollase, A., Möller, U., Nietner, L., Göller, A., Jungstand, B., (2016): EM HYDRA - Microwave Method for detecting the hydration process of concrete; ISEMA 2016, Proc. of 11<sup>th</sup> International Conference on Electromagnetic Wave Interaction with Water and Moist Substances; Florence (Italy), May 23 - 27, 2016
- [8] Röhling, Stefan: Betonbau. Band 2 Hydratation - junger Beton – Festbeton. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 1. Auflage, 2012