

Rissdetektion und -lokalisierung in Betonstrukturen mittels Auswertung elektromagnetischer Hochfrequenzwellen

Dipl.-Inf. Sebastian Hegler¹, Dr.-Ing. Marco Liebscher², Prof. Dr.-Ing. Viktor Mechtcherine²,
Prof. Dr.-Ing. Dirk Plettemeier¹

¹ Professur für Hochfrequenztechnik der TU Dresden, 01062 Dresden

E-Mail: sebastian.hegler@tu-dresden.de, Telefon: +49 351 463 35338

² Institut für Baustoffe der TU Dresden, 01062 Dresden

E-Mail: marco.liebscher@tu-dresden.de, Telefon: +49 351 463 42853

Zusammenfassung

Das Erkennen und die Lokalisierung kritischer Risse ist ein wesentlicher Schlüssel für eine sichere und nachhaltige Bauwerksnutzung. In diesem Beitrag wird ein neuartiges, kostengünstiges Sensorsystem vorgestellt, das zur Echtzeit-Zustandsüberwachung von sowohl neuen als auch Bestandsbauwerken geeignet ist. Erste Ergebnisse zeigen, dass das System prinzipiell in der Lage ist, die Gesamtdehnung eines Bauteiles zu erfassen sowie auftretende Risse zu erkennen und zu lokalisieren. Die Erkennungsgenauigkeit hängt dabei von technischen Parametern ab, wodurch das System auf verschiedene Einsatzszenarien angepasst werden kann.

1 Einleitung

Über die gesamte Lebensdauer sind Ingenieurbauwerke diversen, teilweise hohen Belastungen ausgesetzt, was unterschiedliche Schädigungsmechanismen zur Folge hat. In Europa zeigen gegenwärtig insbesondere Brückenbauwerke schwerwiegende Alterungserscheinungen, welche sich durch zunehmende Umwelteinflüsse und ein gestiegenes Verkehrsaufkommen weiter dramatisch beschleunigen. Eine genauere Abschätzung von Restlebensdauern ist dabei oft nicht möglich, z. B. aufgrund unzureichender Kenntnisse über vorliegende Rissentwicklungsstadien. Eine kontinuierliche Überwachung von Bauwerken, die sowohl genaue Kenntnisse über die vorliegenden Rissgrößen als auch eine genau Risslokalisierung liefert, kann daher maßgeblich zu einer sicheren Nutzung bzw. gezielten Instandsetzung von bauwerklichen Infrastrukturen beitragen.

Bisherige Arbeiten zur Überwachung von Betonbauwerken umfassten die Detektion von Makrorissen bspw. mittels der Applikation spezieller Messelektroden [1], die Messung elektrischer Widerstandsänderungen [2]–[4] oder die Verwendung von optischen Fasern [5], [6]. Eine hinreichend genaue Risslokalisierung wurde mittels Radarwellen [7], Ultraschall [6] oder Bildanalysetechniken [8]–[10] erreicht. Unzugängliche Bauwerksabschnitte, limitierte Messbereiche oder die starke Abhängigkeit der dielektrischen Eigenschaften von Beton von bspw. Feuchtigkeit [11], [12] schränken aber oft die Anwendbarkeit dieser Ansätze ein.

Im vorliegenden Beitrag wird die Entwicklung eines Messsystems auf Basis von Koaxialkabeln für Hochfrequenzmessung im Beton vorgestellt. Die zugrundeliegende Idee ist, Störstellen im Material (z. B. offene Risse) durch den von ihnen verursachten Sprung der Impedanz zu erkennen. Dafür wird ein hochfrequentes elektromagnetisches Signal in eine Hochfrequenz-Leitung eingespeist; siehe [13]. Durch Messung des reflektierten Signals lässt sich auf das Vorhandensein solcher Störstellen schließen; durch Messung des transmittierten Signals auf die Gesamtverformung des Messobjektes. Die Fähigkeit der Ortung ergibt sich aus der Nutzung mehrerer Frequenzen, gleichmäßig verteilt über eine (wählbare) Messbandbreite. Dieser Ansatz versetzt den Anwender in die Lage, strukturelle Risse in Betonbauwerken frühzeitig zu erkennen und zu lokalisieren, was hier im Labormaßstab nachgewiesen wird.

2 Materialien und experimenteller Aufbau

Für die experimentellen Untersuchungen diente eine Feinbetonmatrix gemäß Tabelle 1 und Koaxialkabel vom Typ RG 316. Um sicherzustellen, dass das Kabel mit der Betonmatrix eine kraftschlüssige Verbindung eingeht, wurde seine äußere Isolation im einzubetonierenden Bereich entfernt. Es wurden Betonplatten mit den Abmaßen 70 cm × 2 cm × 15 cm hergestellt, in die zentral das isolierte Koaxial-Kabel platziert worden ist (Bild, links). In der Mitte der Probe wurde eine Sollbruchstelle generiert, welche zur Überprüfung der Risslokalisierung dienen sollte (Bild, rechts).

Tabelle 1 Zusammensetzung der genutzten Feinbetonmatrix

Bestandteil	[kg/m ³]
CEM II 32,5 R	956
Quarzsand 0/2 (Ottendorf)	1153
Wasser	288
Fließmittel (MG SKY 593)	2

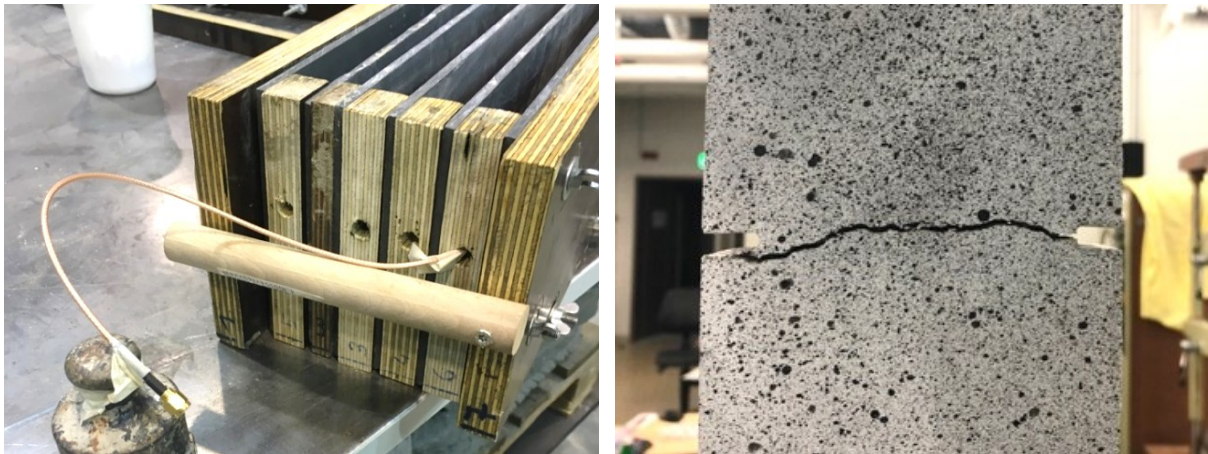


Bild 1 Schalung zur Herstellung der Probekörper mit zentral platziertem Koaxial-Kabel (links) und geprüfter Probekörper mit Speckle-Muster und Riss an der Sollbruchstelle (rechts). Fotos: Sebastian Hegler

Für die Herstellung des Betons wurde ein Mischer Zyklus 30 He von Pemat Mischtechnik GmbH, Deutschland genutzt. Anfänglich wurde das Material für 2 min mit 30 U/min gemischt, um eine gute initiale Vermengung der Komponenten zu erreichen. Abschließend wurde der Mörtel bei 60 U/min für 1 min homogenisiert und anschließend in die Schalung gegossen. 28 Tage nach der Herstellung wurden die Proben geprüft. Zuvor wurde ein Speckle-Muster appliziert, welches zur simultanen Rissüberwachung mittels digitaler Bildkorrelation diente.

3 Ergebnisse

In Dehnversuchen wurde untersucht, wie sich Dehnung und Rissbildung auf die Signalübertragung auswirken. Wie link in Bild 2 gezeigt, lässt sich die Rissposition auf der Zeitachse bestimmen. Die Risslage x_p ergibt sich aus der Verrechnung mit der Ausbreitungsgeschwindigkeit der elektromagnetischen Welle:

$$x_p = \frac{1}{2} \cdot t_p \cdot G \cdot c_0 \quad (1)$$

mit: t_p Zeitpunkt des Risses, wie aus Bild 2 (links) abgelesen werden kann
 G Geschwindigkeitsfaktor des verwendeten Kabeltyps
 c_0 Lichtgeschwindigkeit im Vakuum
Faktor $\frac{1}{2}$... zur Korrektur der Laufzeit für den reflektierten Ausbreitungsweg

Mit den abgelesenen Werten $t_p = 6$ ns und $G = 0,695$ ergibt sich für den Versuch $x_p = 0,625$ m, was sehr gut der Position der Sollbruchstelle (bezogen auf die Kabellänge) entspricht.

Bild 2 (rechts) zeigt, dass die Gesamtverformung des Prüfkörpers Änderungen in der Phase des transmittierten Signals verursacht. Auch hier kann über die Verrechnung mit der Ausbreitungsgeschwindigkeit auf die Wegänderung des Signals geschlossen werden, welche der Gesamtverformung entspricht:

$$\Delta l = \frac{\Delta\varphi(f)^{[\circ]}}{360^\circ} \cdot \frac{c_0}{f} \quad (2)$$

mit: Δl Längenänderung
 $\Delta\varphi(f)$ abgelesene Phasenänderung
 f Frequenz

Hier ergibt sich die Längenänderung bei 6 GHz für die voreingestellte Gesamtverformung von 1 mm bei abgelesenem $\Delta\varphi = 8^\circ$ zu $\Delta l = 1,11$ mm und für die voreingestellte Gesamtverformung von 1,5 mm bei abgelesenem $\Delta\varphi = 12^\circ$ zu $\Delta l = 1,67$ mm. Eine solche Übereinstimmung lässt sich als gut bezeichnen.

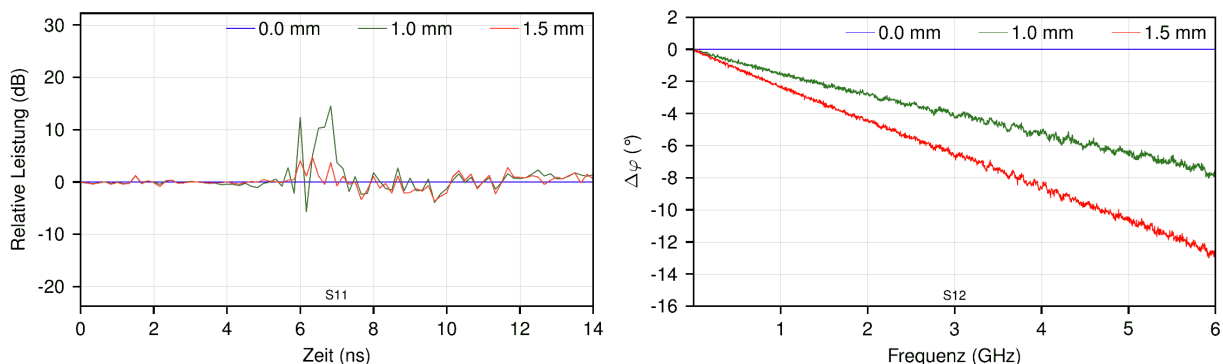


Bild 2 Änderung der Leistung des Reflexionssignals (links) und der Phase des Transmissionssignals (rechts) in Abhängigkeit der Gesamtverformung. Diagramme: Sebastian Hegler

4 Zusammenfassung und Ausblick

Die ersten Untersuchungen haben gezeigt, dass sich mit Koaxialkabeln ein kostengünstiges, echtzeitfähiges und quasi-kontinuierlich messendes Sensorsystem realisieren lässt. Der Ansatz wurde als Patent angemeldet. In den nächsten Arbeitsschritten werden die Randbedingungen untersucht, in denen das System außerhalb des Laborumfeldes betrieben werden kann.

Dank

Teile dieser Arbeit wurden durch das Projekt FGL-RissSensor (FKZ: 03ZZ1037A) im Rahmen von Smart³ | materials-solution-growth, einer Initiative von Zwanzig20 – Partnerschaft für Innovation, gefördert. Die Autoren danken dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) für die Förderung.

Literatur

- [1] McCarter, W. J.; Chrisp, T. M.; Butler, A.; Basheer, P. A. M. (2001) *Near-surface sensors for condition monitoring of cover-zone concrete*. Construction and Building Materials 15, H. 2-3, S. 115-124. [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(00\)00060-X](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(00)00060-X)
- [2] Bontea, D. M.; Chung, D. D. L.; Lee, G. C. (2000) *Damage in carbon fiber-reinforced concrete, monitored by electrical resistance measurement*. Cement and Concrete Research 30, H. 4, S. 651-659. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00204-0](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00204-0)
- [3] Boulay, C.; Dal Pont, S.; Belin, P. (2009) *Real-time evolution of electrical resistance in cracking concrete*. Cement and Concrete Research 39, H. 9, S. 825-831. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.06.003>
- [4] Shi, Z. Q.; Chung, D. D. L. (1999) *Carbon fiber-reinforced concrete for traffic monitoring and weighing in motion*. Cement and Concrete Research 29, H. 3, S. 435-439. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(98\)00204-X](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(98)00204-X)

- [5] Li, H. N.; Li, D.-S.; Song, G.-B. (2004) *Recent applications of fiber optic sensors to health monitoring in civil engineering*. Engineering Structures 26, H. 11, S. 1647–1657.
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2004.05.018>
- [6] Kohl, C.; Streicher, D. (2006) *Results of reconstructed and fused NDT-data measured in the laboratory and on-site at bridges*. Cement and Concrete Composites 28, H. 4, S. 402–413.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.02.005>
- [7] Rhim, H. C. (2001) *Condition monitoring of deteriorating concrete dams using radar*. Cement and Concrete Research 31, H. 3, S. 363–373. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00496-8](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00496-8)
- [8] Barazzetti, L.; Scaioni, M. (2009) *Crack measurement: Development, testing and applications of an automatic image-based algorithm*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 64, H. 3, S. 285–296. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2009.02.004>
- [9] De Schutter, G. (2002) *Advanced monitoring of cracked structures using video microscope and automated image analysis*. NDT & E International 35, H 4, S. 209–212.
[https://doi.org/10.1016/S0963-8695\(01\)00042-1](https://doi.org/10.1016/S0963-8695(01)00042-1)
- [10] Hampel, U.; Maas, H.-G. (2009) *Cascaded image analysis for dynamic crack detection in material testing*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 64, H. 4, S. 345–350.
<https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2008.12.006>
- [11] Dinh, T. T.; Hegler, S.; Liebscher, M.; Navarro de Sosa, I.; Li, H.; Plettemeier, D.; Drossel, W.-G.; Mechtcherine, V. (2021) *Dielectric material characterization of concrete in GHz range in dependence on pore volume and water content*. Construction and Building Materials 311, Art. 125234.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125234>
- [12] Hegler, S.; Seiler, P.; Dinkelaker, M.; Schladitz, F.; Plettemeier, D. (2020) *Electrical Material Properties of Carbon Reinforced Concrete*. Electronics 9, H. 5, Art. 5. <https://doi.org/10.3390/electronics9050857>
- [13] Zinke, O.; Brunswig, H. (1965) *Lehrbuch der Hochfrequenztechnik*. Berlin, Heidelberg: Springer. online verfügbar unter: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-662-00476-0>