

Bruch- und Korrosionsortung in Spannbetonbauwerken

Localization of fractures and corrosion damages in P/C-structures

Holst, A.; Wichmann, H.-J.; Budelmann, H.

Abstract

Prestressed tension members are essential for the structural safety, reliability and serviceability of P/C-structures, as bridges. One of the most important aspects of structural health monitoring (SHM) is to ensure a robust condition and the functionality of the prestressed members during service life. Due to the risk of brittle fracture, the observation especially of the corrosive system condition at prestressed structures until fracture has a huge importance. This paper focuses on a new method for fracture detection and localization as well as on a corrosion monitoring procedure for detection of steel corrosion, both based on microwave technology.

1. Einführung und Intention

Stahlzugglieder leisten im konstruktiven Ingenieur- und Brückenbau einen essentiellen Beitrag zur Gewährleistung der Tragsicherheit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit vorgespannter Bauwerke. Aus sicherheitsrelevanten und aus wirtschaftlichen Gründen müssen Schäden an den Zuggliedern im Rahmen der Bauwerksüberwachung möglichst frühzeitig und zerstörungsfrei diagnostiziert werden. Hierzu werden am iBMB im Rahmen des Sonderforschungsbereiches SFB 477 neue zerstörungsfreie Messtechniken entwickelt, verifiziert und optimiert. Nachfolgend wird das HF-Bruchortungsverfahren der elektromagnetischen Resonanzmessung und als Weiterführung die HF-Reflexionsmesstechnik zur Detektion von Korrosionsschäden an den Spanngliedern vorgestellt. Diese Verfahren wurden bislang an Laborversuchskörpern und zunehmend auch an größeren Versuchsbauteilen und Realbauwerken erprobt.

2. Bruchortung durch Elektromagnetische Resonanzmessung (ERM)

Wird eine elektromagnetische Welle einseitig an einem Punkt in einen Stahl eingekoppelt und deren Frequenz systematisch verändert, so kann die Spanngliedlänge durch elektromagnetische Resonanzmessung bestimmt werden, Abb. 1. Dabei werden die Betonspannglieder als ungeschirmte Resonatoren betrachtet, die in einem verlustbehafteten Material (Beton) gebettet sind, /1/. In Ver-

suchen wird der Reflexionsparameter S_{11} als direkte Spannstahtantwort von einem vektoriiellen Netzwerkanalysator aufgezeichnet. Die Ankopplung für vorgespannte Stähle erfolgt mit einem handelsüblichen Koaxialkabel.

Im aufgezeichneten Reflektogramm lassen sich Resonanzerscheinungen feststellen, vgl. Abb. 2. Die durch einen Bruch verkürzte Länge des Spannstabes l lässt sich aus dem Abstand benachbarter Resonanzen (Abstand der Minima) Δf vereinfacht wie folgt berechnen, /2/:

$$l = c_0 / (2\sqrt{\epsilon_r} \Delta f), \quad (1)$$

mit der Vakuumlichtgeschwindigkeit c_0 und der Dielektrizitätskonstante (DK) ϵ_r des umgebenden Mediums (Mörtel bzw. Beton). Eine Spannstabverkürzung führt somit zu einem größeren Abstand Δf der Minima des Reflexionsparameters.

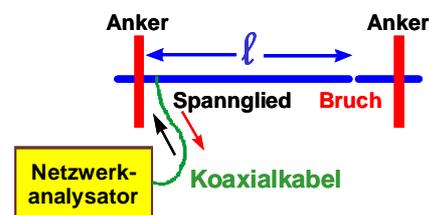


Abb. 1: Prinzip der HF-Reflexionsmessung mit dem Netzwerkanalysator (NWA) als Messgerät

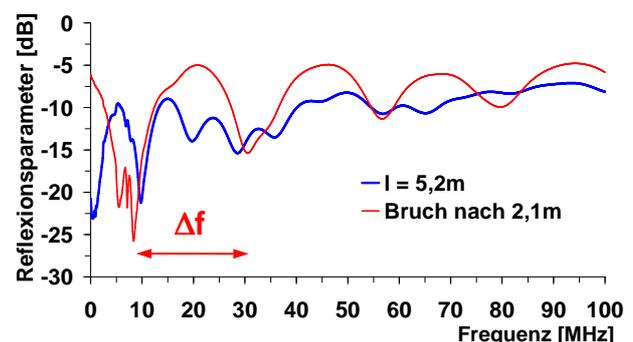


Abb. 2: Reflexionsparameter $|S_{11}|$ eines ungebrochenen und eines nach 2,1 m gebrochenen 5,2 m langen Einzelstabes mit Resonanzabstand Δf

Für die Hochfrequenzmessung an Spannstählen sind generell folgende, sich überlagernde Einflüsse relevant, welche die Bauwerksdiagnose verkomplizieren, /3/, /4/:

- Position, Geometrie und elektrischer Kontakt der Spannstähle und flankierende Metallbauteile (Bewehrung, Hüllrohre) als elektrische Leiter
- Elektr. Eigenschaften des Umgebungsmaterials und
- Existenz von Defekten / Schäden (Hohlstellen, Kerben, Korrosion und Brüche der Vorspannelemente).

Folgende grundlegenden Erkenntnisse zur ERM konnten bislang in umfangreichen Versuchen an Versuchs- und Realbauwerken (vgl. Abb. 3) gewonnen werden, /2/ - /4/:

- bei elektrischem Kontakt mehrerer Stäbe oder abschnittsweise mit dem Hüllrohr ist der Einzelstabbruch nicht detektierbar
- der Mindestabstand der Bruchenden ist 0,5 mm und bei Einkopplung an der Ankerkopfplatte ca. 10 cm
- Einzelstabskopplung hat keinen signifikanten Einfluss
- hohe Betonfeuchte → hohe Dämpfung
- im Altbeton, im Leichtbeton und Hohlkörper → geringere Dämpfung, dadurch bessere Auswertung
- bei PE-Ummantelung des Stabes (auch als Bezugspotential) treten stärkere Resonanzen auf.

Aus Abb. 4 wird ersichtlich, dass die ERM z.B. für den Einsatz an externen Spanngliedern prädestiniert ist.



Abb. 3: Einige der untersuchten Realbauwerke

3. HF-Korrosionsdiagnoseverfahren

Wechselströme höherer Frequenz werden besonders gut im korrosionsgefährdeten Oberflächenbereich des Spannstahles geleitet, da infolge des sogenannten Skineffektes (Stromverdrängungseffekt) durch Selbstinduktion Wirbelströme induziert werden, die den Primärstrom im Leiterinneren schwächen und im Oberflächenbereich verstärken, /3/. Es ist daher denkbar, Störungen im Stahlmaterial, wie Kerben, Schädigungen infolge Korrosion, größere Injektionsfehlstellen und Spannstahlbrüche (s.o.) mit der Mikrowellentechnik zu detektieren, /4/.

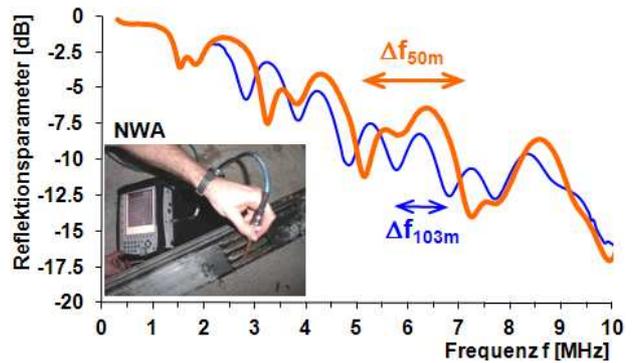


Abb. 4: In-situ-ERM-Messungen an einem externen Spannbund einer Hohlkastenbrücke: Gemessener Reflektionsparameter $|S_{11}|$ eines intakten und nach 50 m gebrochenen 103 m langen Spannbundes sowie Foto mit der Messkonfiguration mit einem mobilen Netzwerkanalysator (NWA)

Trifft eine emittierte elektromagnetische Welle auf eine Fehlstelle im Leiter, so ändert sich die Impedanz des Leiters. Ein Teil der Energie wird dabei zum Ausgangspunkt reflektiert und überlagert sich mit dem emittierten Signal. Die Impedanz führt zu einer mehr oder weniger ausgeprägten Energieabsorption in Abhängigkeit der Frequenz sowie der elektrischen Charakteristika des leitenden Metallstabes und der Umhüllung. Starke Einbrüche im Frequenzbereich lassen auf die Resonanz bzw. Eigenfrequenz des elektrischen Systems bei minimaler Energie schließen. Durch die Lage und Amplitude der Resonanzen ist somit eine Aussage bezüglich der Größe der Anomalie möglich, vgl. Abb. 5.

Aufgrund der Reflexion am Leiterende und anderen Oberflächenstörungen ist die gemessene Reflexionsantwort ein überlagertes Mischsignal, das durch Referenzmessungen ausgewertet werden muss. Dies kann in der Praxis zu Problemen führen.

Folgende Ergebnisse können festgehalten werden, /3/:

- Korrosionsschädigungen sind mit dem Mikrowellenverfahren im Labormaßstab durch die zeitunabhängige Messung von Einflüssen im primär korrosionsgefährdeten Oberflächenbereich detektierbar
- durch Korrosion erfolgt die Modifikation des Reflexions- bzw. Transmissionsparameters als Messgröße
- die Messsignal- Interpretation ist z.T. schwierig, insbesondere im Beton aufgrund hoher Dämpfungserscheinungen und bei inhomogener Umgebung.

Es ist zu konstatieren, dass die Spanngliedkorrosion in situ aufgrund der geringen Signifikanz der Messsignaländerungen nicht zuverlässig detektierbar ist, /3/.

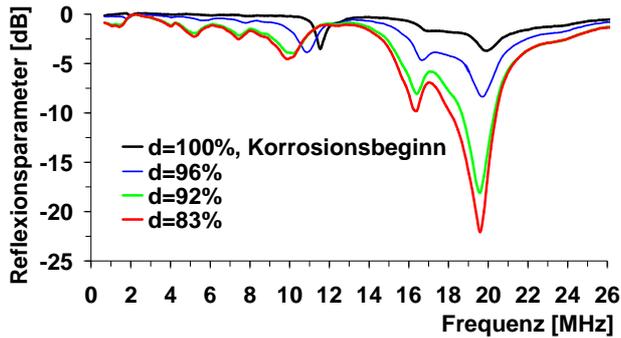


Abb. 5: Reflexionsantwort eines 3 m langen Spanndrahtes mit Initialdurchmesser $d = 7$ mm, welcher in der Stablängsmittle systematisch uniform korrodiert wurde

4. HF-Feldstärkemessungen

Als neuer Messansatz zur zerstörungsfreien Ermittlung von Spannstahlschäden und zugleich als Erweiterung der ERM wurden externe HF-Feldstärkemessungen durchgeführt. Grundidee ist hierbei, dass das elektromagnetische Feld um einen wechselstromführenden Spannstahlleiter zur Identifikation von Spannstahlbrüchen im Beton genutzt werden kann. Wird permanent eine elektromagnetische Welle in ein Spannglied eingekoppelt, so erfolgt an der Bruchstelle eine Teil- oder Totalreflexion des HF-Signals, /3/. Der Bruchort kann dann in Analogie zu magnetischen Messverfahren entsprechend Abb. 6 beim Abfahren des Spanngliedes an der Bauteiloberfläche durch den signifikanten Abfall der extern mittels Feldmeter gemessenen elektrischen Feldstärke E bzw. der magnetischen Feldstärke H ermittelt werden.

Das Messprinzip wurde zunächst an einer Spannbetonhohldiele mit mehreren durchtrennten Einzelspannstählen getestet, vgl. Abb. 7. Dabei wurden auf der Oberseite der Hohldiele die elektrische Feldstärke E und die Grundfeldstärke E_0 entlang des Spanngliedverlaufs nach einseitiger HF-Signaleinkopplung mittels Breitbandfeldmeter vom Typ Narda NBM-550 erfasst. Die gemessenen Daten zeigen frequenzunabhängig einen eindeutigen Abfall der Feldstärke im Bereich der jeweiligen Einzelstabbrüche. Andere Teilversuche implizieren ferner, dass durch Feldstärkemessungen möglicherweise auch Hohlstellen im Beton erfassbar sind. Am Medienübergang Beton-Luft erfolgt eine Teilreflexion bzw. Abstrahlung des HF-Signals, wodurch die Feldstärke verändert wird, /4/.

Gegenwärtige Untersuchungen befassen sich mit der Verfahrensensitivität sowie der Reproduzierbarkeit und Robustheit des Messsignals unter verschiedenen Randbedingungen.



Abb. 6: Feldstärkemeter als Messgerät zur externen Feldstärkemessung auf einem Betonversuchskörper mit Styropor-Hohlkörper bei einseitiger Einkopplung des monofrequenten HF-Signales in ein Spannglied

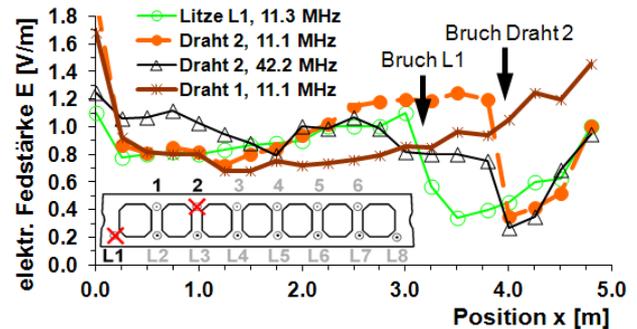


Abb. 7: Messdaten der auf der Oberseite einer mit Spannstahlbrüchen versehenen 4,8 m langen Spannbetonhohldiele aufgezeichneten elektrischen Feldstärke E ; die Signaleinkopplung erfolgte am linken Stabende, nur Draht 1 ist ungebrochen, die Grundfeldstärke beträgt $E_0 = 0,05$ bis $0,1$ V/m

5. Literaturverzeichnis

- /1/ Budelmann, H.; Jacob, A.F.; Wichmann, H.-J.; Jannsen, B.; Schneider, G.; Hariri, K.: Verfahren zur Zustandserkennung von elektrisch leitfähigen länglichen Spanngliedern. Deutsches Patent- und Markenamt, DE 101 02 577 C1
- /2/ Holst, A.; Budelmann, H.; Hariri, K.; Wichmann, H.-J.: Korrosionsmonitoring und Bruchortung in Spannbetonbauwerken – Möglichkeiten und Grenzen, Beton- und Stahlbetonbau (102) 2007, H. 12, S. 835-847
- /3/ Holst, A.: Korrosionsmonitoring und Bruchortung vorgespannter Zugglieder in Bauwerken, DAFStb-Heft Nr. 573, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Beuth-Verlag Berlin, 2008
- /4/ Holst, A.; Budelmann, H.; Wichmann, H.-J.: Verification of Advanced Electromagnetic Measurement Techniques for Corrosion and Fracture Detection of Bridge Tendons, Proc. of the 6th Int. Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management - IABMAS 2012, Stresa, Lago Maggiore, Italy, July 8-12, 2012, p. 333 / CD-Rom: pp. 1651-1658