

# Betoflux – Stand der Technik in der Spannstahlbruchortung

Martin WILCKE<sup>1</sup>, Andrei WALTHER<sup>1</sup>, Klaus SZIELASKO<sup>2</sup>, Sargon YOUSSEF<sup>2</sup>

<sup>1</sup> BauConsulting Dr. Walther GmbH, Brandenburg

<sup>2</sup> Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren IZFP, Saarbrücken

Kontakt E-Mail: Wilcke@bauconsulting.com

**Kurzfassung.** [Von Beginn des Spannbetonbaus bis in die 80-iger Jahre wurde spannungsrissegefährdeter Spannstahl verwendet. Für viele Tragwerke besteht das Erfordernis zur eingehenden Untersuchung auf Spannstahlbrüche im Rahmen der ohnehin regelmäßig erforderlichen Bauwerksprüfung. Auch durch die natürliche Alterung der Bausubstanz von Spannbetontragwerken sowie vielfältig mögliche Mängel und Fehler in der Bauausführung besteht die Notwendigkeit zur Überprüfung auf Unversehrtheit der standsicherheitsrelevanten Spannstahlkonstruktionen.

Durch die magnetische Streuflussprüfung der Vorspannelemente (Litzenbündel und Einzelglieder) können diese Untersuchungen zerstörungsfrei erfolgen. Das Prüfverfahren ist seit mehr als 30 Jahren Gegenstand der Forschung sowie an einer Vielzahl von Spannbetontragwerken erfolgreich angewandt und validiert worden. Ausgehend vom physikalischen Messprinzip der Streufeldmessung an Dipol-Bildungen im Bereich von Bruchstellen der magnetisierten Spannstahlglieder wird die praktische Anwendungsmöglichkeit anschaulich wiedergegeben.

Mit der nachfolgend vorgestellten Weiterentwicklung des BetoFlux-Systems steht eine Prüftechnik zur Verfügung, die die Vorteile des rein physikalischen Messprinzips mit den wirtschaftlichen Anforderungen der Anwendung zur frühzeitigen Erkennung von versagensgefährdeten Spanngliedlagen kombiniert.

Die Darstellung eines praktischen Anwendungsbeispiels an Spannbetonträgern in Ortbetonbauweise demonstriert die robuste Baustellentauglichkeit einer Untersuchungsmethode mit einem mittlerweile verbreiteten und anerkannten zerstörungsfreien Prüfverfahren.]

## 1. Einführung

In den 1950er bis 1970er wurden viele Neubauten in der Spannbetonbauweise ausgeführt. Insbesondere Brücken-, Park-, Fertigteilbauten und Viehställe wurden aus Spannbeton hergestellt. Durch das Einbringen einer Vorspannung mittels hochfester Stähle, werden Druckspannungen im Betonquerschnitt erzeugt, die auch nach Aufbringen der äußeren Lasten und Wirkung der zeitabhängigen Verformungen, keine bzw. geringe Überschreitungen der Betonzugfestigkeit hervorrufen. Dies ermöglicht rissfreie Zugzonen im Bauteilquerschnitt, geringere Durchbiegungen, schlankere Tragwerke, größere Spannweiten und Materialeinsparungen der schlaffen Betonstahlbewehrung.

Mittels zerstörungsfreier Materialprüfung der Spannstahlelemente im eingebauten Zustand können Risse bzw. Bruchzustände im Inneren der Konstruktion ohne Beeinträchtigung der Gebrauchstauglichkeit des untersuchten Bauwerks detektiert werden.



Die energetische Wechselwirkung des Prüfsystems mit dem Untersuchungsobjekt wird unter Ausnutzung der bekannten physikalischen Abhängigkeiten bzw. Effekte ausgewertet und in eine Prüfaussage überführt.

Ab den 1980er Jahren traten vermehrt Schadensfälle und plötzliches Tragwerksversagen von Spannbetonbauwerken auf (z.B. 1980 Kongresshalle Berlin, 1985 Hallenbad Uster Schweiz, 1989 Fabrikhalle Mannheim, 2005 Brückenbauteil Lake View Bridge USA, s. Abb. 1).



**Abb. 1: Einsturz Lake View Drive Bridge am 27.12.2005**

Die Ursachen der meisten bekannten Schadensfälle sind zu meist auf eine wasserstoffinduzierte Spannungsrisskorrosion (SpRK) der Spannstähle im Spannbeton zurückzuführen. Die SpRK ist ein Vorgang, bei dem Korrosion und Dehnungen eines Metalls als Folge innerer oder aufgebrachter Zugspannungen auftreten. Begünstigt wird diese durch ungenügendes/ fehlerhaftes Verpressen der Hüllrohre, Kerbungen im Spannstahl, geringe Betondeckung, schadhafte Abdichtung und mangelhafte Entwässerung. Die besondere Gefahr der SpRK liegt darin begründet, dass der Prozess von außen nicht sichtbar ist, verformungsarm abläuft und ein plötzliches Versagen ohne Vorankündigung eintritt. Bruchzustände in Spannstahlgliedern führen in aller Regel anfänglich zu keinen äußerlich am Bauwerk wahrnehmbaren Veränderungen. Treten Risse und starke Verformungen am Tragwerk auf, so ist im Allgemeinen zumindest die Gebrauchstauglichkeit nicht mehr gegeben und eine kostenintensive Instandsetzung, sofern überhaupt möglich, ist die Folge. Zur Sicherung der Standsicherheit ist bei Spannbetontragwerken das sogenannte „Riss-vor-Bruch“-Kriterium durch einen Prüfsachverständigen für Baustatik nachzuweisen.

Durch regelmäßige Untersuchung von vorgespannten Stahlbetonbauwerken können potentielle Gefahrenmomente frühzeitig erkannt und auf diese Weise Instandhaltungsbedarfe zur Sicherstellung von Standsicherheit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit von wirtschaftlich bedeutsamer Infrastruktur identifiziert werden.

## **2. Verfahrensentwicklung**

Der Beginn einfacher Anwendungen in der Praxis erfolgte u.a. bereits Ende der 1989er Jahre durch die Arbeiten von Hillemeier und Flohrer bei den groß angelegten Untersuchungen von Viehstaldächern in Bayern. Mittels Linienmessungen an Spannbetonfertigteilen im sofortigen Verbund wurden an unteren Flansch von I-Trägern der Deckenkonstruktionen gerissene Einzelspannglieder detektiert.

Im weiteren Verlauf der Forschungsarbeiten erfolgte der Entwicklungsschritt zur automatischen Aufzeichnung der Messergebnisse für die einzelnen Sensorelemente um eine spätere Detailauswertung am PC vornehmen zu können, s. Abb. 2.



**Abb. 2: Line-Scanning-System (Elektromagnet, kabelgebundene Signalübermittlung)**

Bildgebende Prüfverfahren mit Praxisrelevanz durch Ausnutzung des Remanenz-Magnetismus der Spannbewehrung ermöglichten Flächenmessungen mit weiterentwickelter bzw. größerer Gerätetechnik ab Mitte der 2000er Jahre, s. Abb. 3.



**Abb. 3: System Mobi-Rem (Großmagnet, Messrichtung quer zum Spanngliedverlauf)**

Durch den neuentwickelten Betoflux existiert die Möglichkeit bildgebende Linienmessungen ohne externe Stromversorgung und mit kabelloser Messwertübertragung zur Aufzeichnung am Messrechner durchzuführen, s. Abb. 4. Eine senkrecht zur Prüfrichtung orientierte Sensorzeile erzeugt eine flächenartige Ergebnisauflösung der Messstrecke. Die Messungen erfolgen im aktiven Magnetfeld ohne vorherige Magnetisierungsschritte.



**Abb. 4: System BetoFlux (kabellos, Messrichtung in Spanngliedachse)**

### 3. Messprinzip

Das magnetische Streuflussverfahren eignet sich prinzipiell sehr gut zur Detektion von rissartigen Fehlern in ferromagnetischen Werkstoffen. Dieses Verfahren wird sowohl im remanenten als auch im aktiven Magnetfeld in der zerstörungsfreien Prüfung zur Spannstahlortung im Bauwesen eingesetzt ([1] und [2]).

Das Verfahren beruht auf einem physikalischen Effekt, welcher auch bei der Magnetpulverprüfung ausgenutzt wird, die z.B. in den Stahl verarbeitenden Industrien verbreitet und standardisiert ist. An scharfkantigen Unterbrechungen der Oberfläche eines Bauteiles bilden sich bei Anlegen eines externen Magnetfeldes zusätzliche magnetische Dipole, die ein oberflächennahes magnetisches Streufeld hervorrufen, s. Abb. 5.

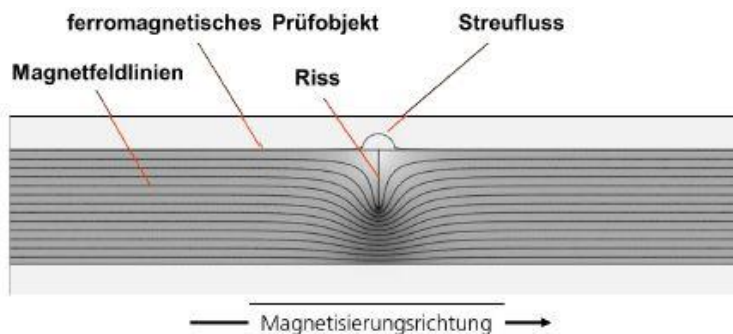


Abb. 5: Verlauf des Magnetfeldes an einem Riss in einem magnetisierten Bauteil

Mit Hilfe von Elektro- bzw. Permanentmagneten in Kombination mit dem ferromagnetischen Spannstahl wird ein magnetischer Kreis geschlossen. Durch die magnetische Permeabilität der Betonüberdeckung und des Luftspaltes (beide  $\approx 1$ ) wird das Magnetfeld über den Abstand zum Spannstahl mit dem reziproken des Abstandquadrates abgeschwächt. Dies muss in Form einer ausreichend starken Magnetisierung berücksichtigt werden. Mit wachsendem Abstand vom beschädigten Spannstahl wird das magnetische Streufeld abgeschwächt und unschärfer, wodurch eine entsprechend starke Magnetisierung nicht ausreichend ist, um beliebige benachbarte Fehler zu erkennen. Vielmehr ist die Kombination von Stärke der Magnetisierung, den Dimensionen des Jochs und der Abstand zum Spannstahl bei der Auslegung der Magnetisierung entscheidend für die mögliche Fehlererkennbarkeit.

Zur Detektion kann prinzipiell sowohl die zur Oberfläche tangentielle Komponente (axial) des Magnetfeldvektors als auch die zur Oberfläche normale Komponente (transversal) herangezogen werden. Die Erfassung der Normalkomponente bietet sich aufgrund des Aufbaus potentieller Magnetfeldsensoren an. Abb. 6 zeigt den qualitativen Verlauf der Normalkomponente über eine feste Strecke beim unbeschädigten Spannstahl (links) und beim beschädigten Spannstahl (rechts).

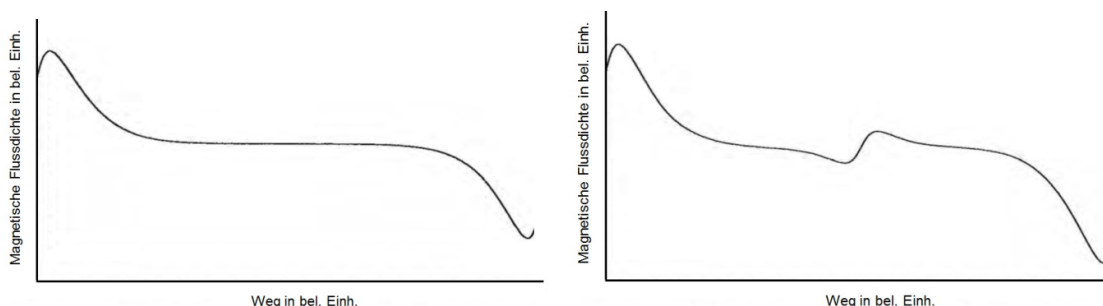


Abb. 6: Verlauf der Normalkomponente (transversal zur Stabachse) zwischen den Magnetpolen links ohne und rechts mit Fehler [1]

Um die Stelle des Fehlers im Spannstahl bildet sich ein neues magnetisches Pol-Paar, exakt über dem Fehler ist aufgrund des Polwechsels die Normalkomponente des magnetischen Streufeldes gleich Null. Die Veränderungen in magnetischen Fluss durch Streufelder an Fehlstellen und Trennrissen können durch Hall-Sensoren erfasst und in der Ergebnisdarstellung visualisiert werden. Durch Nutzung des Hall-Effekts erfolgt eine Spannungsinduktion bei Magnetfeldänderung in der stromdurchflossenen Leiterschleife im Sensorelement.

#### 4. Prüfverfahren zur magnetischen Spannstahlbruchortung

Mit dem zerstörungsfreien Verfahren auf Basis der magnetischen Streufeldmessung können qualitative Aussagen über den Zustand verbauter Spannglieder in Tragwerken und gegebenenfalls Brüche in Spanngliedern lokalisiert und werden. Die Verbundart der Spannstähle ist beliebig. Es können sowohl Spannstahlbrüche im sofortigen Verbund (Spannstahl ist während der Betonage bereits vorgespannt) und nachträglichen Verbund (Spannen des Spannstahls erfolgt nach der Betonerhärtung) festgestellt werden. Auch bei Berührungskontakt beider Bruchufer ist eine Ortung möglich.

Da es sich um eine schnelle zerstörungsfreie Prüfung handelt, müssen die Tragwerke für die Überprüfung nicht vollständig gesperrt oder die Betondeckung über den Spanngliedern großflächig abgetragen werden. Allen magnetischen Methoden gemeinsam ist die Tatsache, dass durch ein von außen wirkendes magnetisches Feld die Spannbewehrung magnetisiert werden kann und durch die Detektion des Streufeldes im remanenten Zustand oder durch Messung des aktiven Streufeldes Brüche detektiert werden können. An Bruchstellen vollzieht sich ein Polwechsel der magnetischen Flussdichte, der dann im Streuflussdiagramm zu erkennen ist.

Über das zu untersuchende Spannglied wird ein magnetisches Prüfsystem an der Betonbauteiloberfläche geführt. An Bruchstellen einzelner Spanndrähte bilden sich magnetische Streufelder, die auch an Bruchstellen gebrochener Stabmagneten beobachtet und als Dipolbildung an Bruchstellen bezeichnet werden. (s. Abb. 7 links).

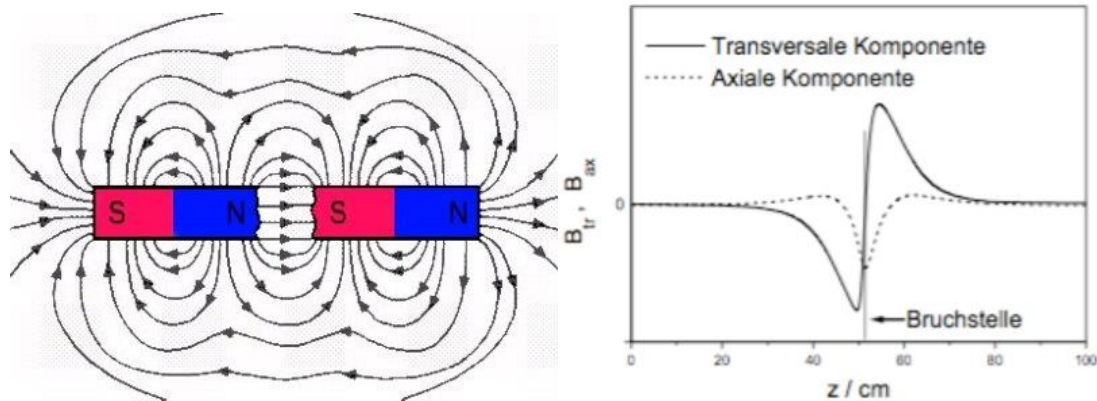
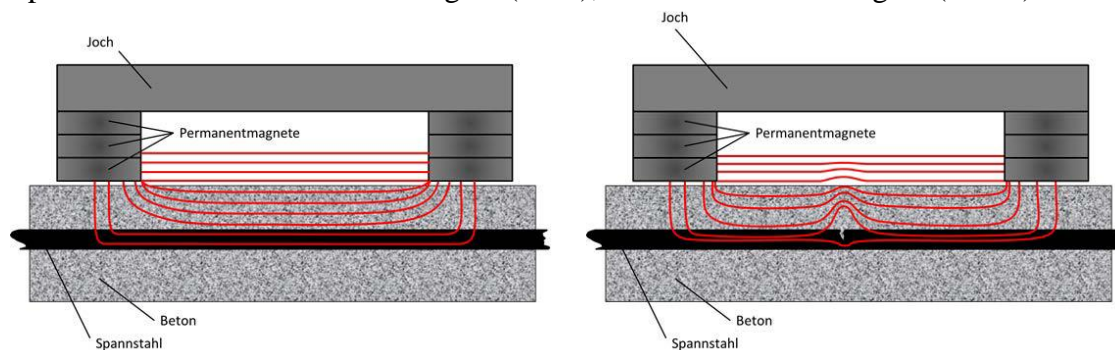


Abb. 7: Links: magnetisches Streufeld, Rechts: Verlauf des Messsignals getrennt nach Richtungskomponenten

An einer Bruchstelle liegen sich eng benachbart ein magnetischer Nordpol (N) und ein magnetischer Südpol (S) gegenüber. Das Messsignal zeigt einen charakteristischen Verlauf, wie er in der Abbildung 7 rechts dargestellt ist. Zwischen den beiden Polen (Extremwerten) befindet sich der Wendepunkt des Signalverlaufs, der exakt die Mitte der Bruchstelle anzeigt.

## 5. Gerätetechnische Entwicklung BetoFlux

Bereits 2007 wurde ein erstes BetoFlux-Prüfsystem am Fraunhofer IZFP konzipiert. Dieses allerdings mit der Prämisse zur Detektion von Korrosionsschäden an Spannbetonmasten durch Messungen entlang der umfänglichen Mantelfläche einer Höhenstufe. Das hier vorgestellte neue BetoFlux-System soll für Untersuchungen an üblichen Spannbetonkonstruktionen des Ingenieurbaus verwendet werden. Das bedeutet zum einen größere Durchmesser und zum anderen deutlich höhere Betondeckungen der zu prüfenden Spannstahlelemente. Aufgrund der zum Teil für Untersuchungszwecke stark eingeschränkten Zugänglichkeit der Prüfstellen an größeren Stahlbetontragwerken besteht Bedarf für ein Prüfsystem, welches den mobilen und einfach zu handhabenden Einsatz des magnetischen Streuflussverfahrens ermöglicht. Die besondere Herausforderung liegt, neben der einfachen Handhabung, der Auswahl und Anordnung geeigneter Sensorik, in der Konzeption der Prüftechnik mit möglichst geringem Stromverbrauch für den mobilen Einsatz. Zur Optimierung der Einsatzmobilität des Prüfsystems BetoFlux, werden Permanentmagneten in Kombination mit einem Joch als Flussbrücke, statt eines Elektromagneten verwendet. Abb. 8 zeigt den Verlauf der magnetischen Feldlinien im Spannstahl sowohl im unbeschädigten (links), als auch im beschädigten (rechts) Fall.

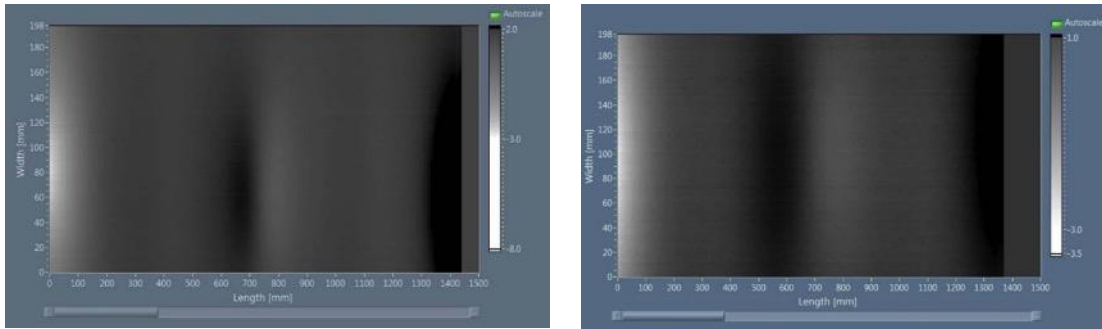


**Abb. 8: Feldlinienverlauf an unbeschädigten (links) und beschädigtem (rechts) Spannstahl**

Zur Messung der magnetischen Flussdichte werden Hallsonden verwendet, die sich bei ausreichender Empfindlichkeit durch eine baustellengerechte Robustheit und einfache Handhabbarkeit auszeichnen. Die Messvorrichtung ist mit einem Hallsonden-Array mit 80 Sonden bestückt. Die Signale werden mittels Funkverbindung auf einem Messrechner wegabhängig dargestellt und für die Dokumentation abgespeichert. Die Zuordnung der Signaländerungen zu der eventuellen Verdachtsstelle ist immer gegeben. Das Rohsignal kann als eine schwarz-weiß abgestufte Übersetzung über die Messlänge abgebildet werden. Durch eine mehrstufige Entwicklungszusammenarbeit von der Definition der Leistungsparameter für die praktische Anwendung in der Bauwerksuntersuchung über die rechnergestützte Simulation und Testmessungen an verschiedenen realitätsnahen Laborkonfigurationen bis hin zur Optimierung der softwareseitigen Ergebnisdarstellung bzw. Auswertungsalgorithmen ist ein baustellentaugliches Prüfsystem entstanden, welches die Standardkonstruktionen in Spannbetonbau abdecken kann.

An reproduzierbar dokumentierten Testszenarien sind u.a. Komplettrisse von Monolithen mit einem Durchmesser von 8 mm in einer Sensorabhebung von 15 cm Tiefe eindeutig detektierbar, s. Abb. 9.

Mittels eines individuell konstruierten Schienensystems sind gleichförmig geführte Messung an vertikalen und horizontalen Unterseiten von Prüfobjekten möglich, s. Abb. 10.



**Abb. 9: Eindeutig detektierbarer Komplettbruch eines Monoliten-Spannstahl im realen Testszenario, Links 10 cm, Rechts 15 cm Überdeckung**



**Abb. 10: Prüfsystem BetoFlux zur Lokalisierung von Spannstahlbrüchen auf Schienensystem**

## 6. Anwendungsbeispiel

Von den Autoren wurden diverse Bauwerke in der Spannbetonbauweise zerstörungsfrei auf Spannstahlbrüche mittels magnetischer Streufeldmessung untersucht.

Ein repräsentatives Anwendungsbeispiel für das neuentwickelte BetoFlux-System wird nachfolgend dargestellt.

Die Binder der Deckenkonstruktion eines zweigeschoßigen Hallengebäudes im Erdgeschoss und im 1. Obergeschoss wurden als Spannbetonträger in Ort betonbauweise hergestellt. Die Vorspannung erfolgte in nachträglichen Verbund durch in metallischen Hüllrohren geführte Spanngliedbündel, s. Abb. 11. Im Erdgeschoss befinden sich eine Kfz-Werkstatt und ein Reifenlager. Das 1. Obergeschoss wird als Parkdeck genutzt.



**Abb. 11: Spannbetonbinder über Parkhausebene, Spanngliedführung in nachträglich verpressten Hüllrohren**

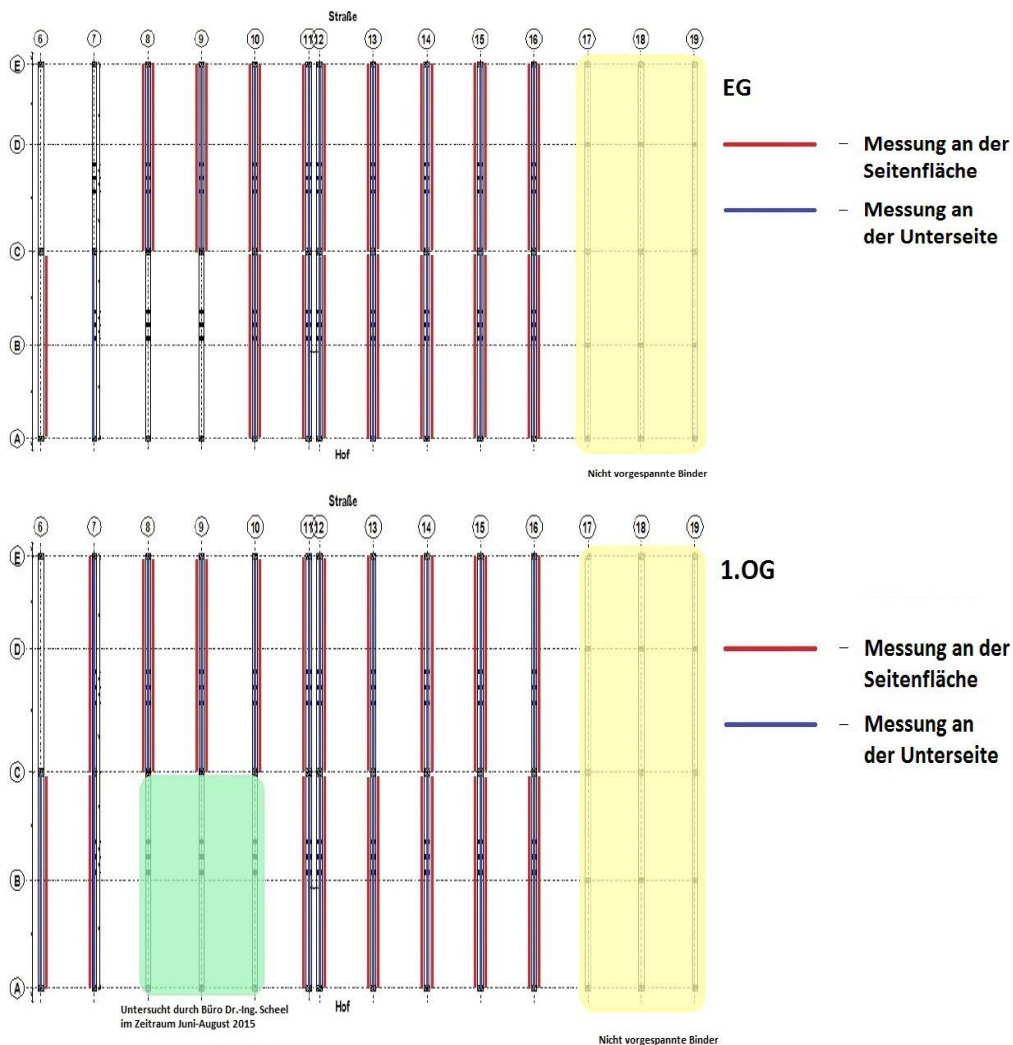
Ein im Vorfeld durch ein Ingenieurbüro für Tragwerksplanung erstellter statischer Bericht, verdeutlichte die Notwendigkeit weiterer messtechnischer Zustandsfeststellungen zur Beurteilung der dauerhaften Standsicherheit der Hallenkonstruktion. Unter anderem sollte der Zustand der Spanndrähte in den Spannbetonbindern als Entscheidungsgrundlage für statische Nachrechnungsmodelle dienen.

Im Zuge der vorhergehenden Begehung zur Aufklärung und Abstimmung mit dem Auftraggeber wurden Festlegungen bezüglich der Baufreiheit getroffen und Änderungen der Kabelführung veranlasst. Binder hinter massiven Abhängedecken und Verkleidungen, wurden nach Absprache mit dem Tragwerksplaner nicht untersucht.

Eine grafische Dokumentation der Messbereiche, unter Berücksichtigung der Zugänglichkeiten, ist in der Abb. 12 dargestellt. Für die Messungen an den Unterseiten der Binder im Obergeschoss und an allen Seitenflächen in beiden Ebenen wurden Stützkonstruktionen verwendet. Für die kontinuierlichen Messungen an den Binderunterseiten im Erdgeschoss wurde ein rollfähiges Gerüstsystem eingesetzt.

Aufgrund der nur ungefähr bekannten Spanngliedlage erfolgten zur Vorbereitung bzw. Qualitätssicherung der Streufeldmessungen Radaruntersuchungen um die Messlinien für das Prüfsystem exakt entlang der Spanngliedachsen festzulegen.

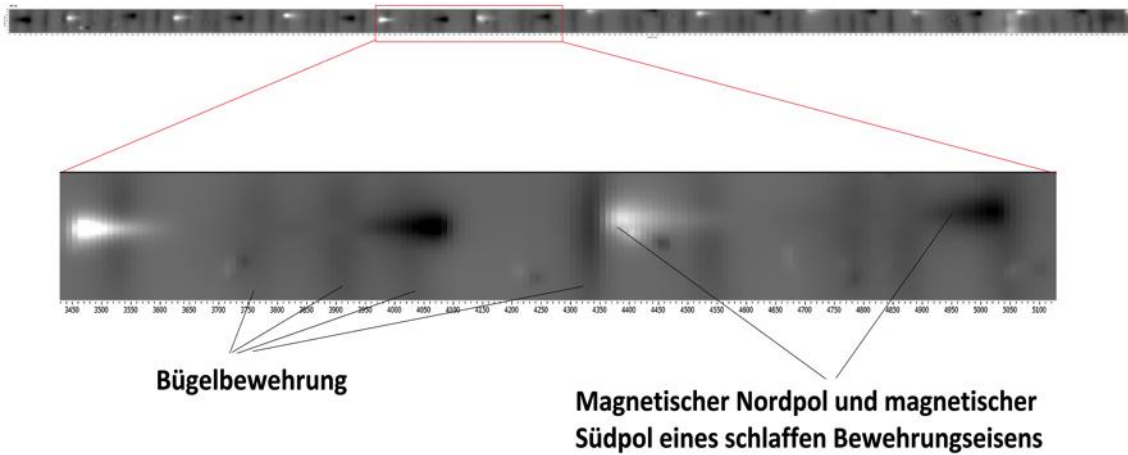
Um die nebeneinanderliegenden Spanngliedkanäle von der Unterseite der Spannbetonbinder zu erfassen, wurden zwei Spuren aufgenommen.



**Abb. 12: Schematische Darstellung des Prüfplans für die Untersuchungen zur Spannstahlbruchortung mittels magnetischer Streufeldmessungen**

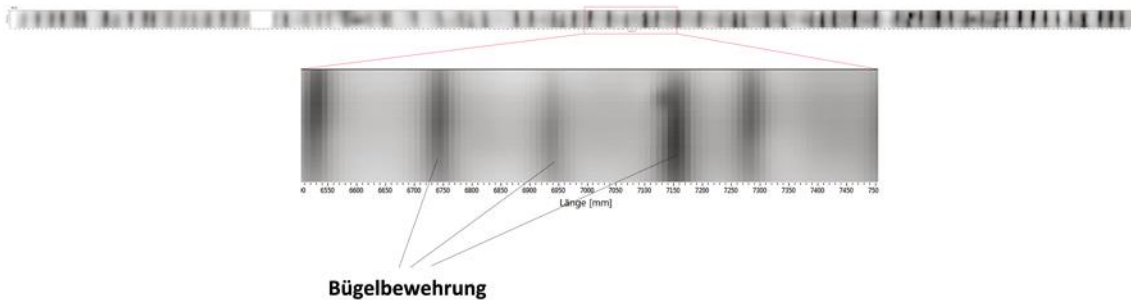


In Abb. 13 oben sind exemplarische Messsignale wiedergegeben. Es sind sowohl quer zur Messrichtung angeordnete Bügel der schlaffen Betonstahlbewehrung, als auch die entlang der Messrichtung angeordneten metallischen Einbauteile zu erkennen. Es ist eine deutliche Herausbildung von einem magnetischen Nordpol und einem magnetischen Südpol an vermutlich beiden Enden des Reflektors zu erkennen (vergrößerter Bildausschnitt).



**Abb. 13: Ausschnitt einer Messlinie an der Unterseite eines Spannbetonbinders**

In der Abb. 14 unten sind exemplarische Messsignale einer Messung an einer Seitenfläche dargestellt. Es sind quer zur Messrichtung angeordnete Bügel zu erkennen.



**Abb. 14: Ausschnitt einer Messlinie an der Seitenfläche eines Spannbetonbinders**

Insgesamt wurden an 20 Spannbetonbindern der Hallenkonstruktion im EG und 1.OG etwa 900 Meter Messungen an den Seitenflächen sowie etwa 1200 Meter an den Unterseiten durchgeführt. Durch eine abschnittsweise Sperrung einzelner Teilflächen konnte der Gebäudebetrieb und die tägliche Nutzung der Parkebene aufrechterhalten werden. Die messtechnischen Untersuchungen nahmen mit zeitlichen Unterbrechungen etwa 10 Messtage in Anspruch.

Die Auswertung aller Messdaten aller Spannbetonbinder der Hallenkonstruktion ergab keine bruchähnlichen Signale, die auf Brüche in der Spannbewehrung hindeuteten.

## 7. Fazit

Aussagen über den Zustand von spannungsrissegefährdeten Spannstählen sind nicht nur für die Umnutzung und Umbau von Bauwerken von großer Bedeutung. Mit der Spannstahlbruchortung ist es möglich, zerstörungsfreie Prüfaussagen zu treffen. Wesentlich ist die Abstimmung mit dem Auftraggeber bezüglich der Möglichkeiten und Grenzen der jeweiligen Prüfungsaufgabe. Gemeinsam ist ein Prüfplan zu entwickeln, der den genauen Prüfumfang und die erforderlichen bzw. vorhandenen Zugänglichkeiten klärt.

Das Wissen über den konstruktiven Aufbau ist unumgänglich, damit die Messsignale ingenieurtechnisch ausgewertet werden können.

Die Spannstahlbruchortung ist ein Prüfverfahren, mit dem vergleichsweise schnell, bildgebende und vor Ort auswertbare Verdachtsstellen lokalisiert werden können.

In der mittlerweile fast 30-jährigen Entwicklungs- und Anwendungsgeschichte der magnetischen Spannstahlbruchortung sind stetig substanzielle Verfahrensoptimierungen der z.T. unabhängig voneinander arbeitenden Teams zu verzeichnen. Als ein unter Fachleuten verbreitetes zerstörungsfreies Prüfverfahren steht die magnetische Spannstahlbruchortung auf dem Sprung zur anerkannten Regel der Technik in der Bauwerksprüfung für Spannbetontragwerke.

Der Unterausschuss Magnetische Verfahren zur Spannstahlbruchortung des Fachausschusses ZfP im Bauwesen der Deutschen Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung befasst sich mit der Weiterentwicklung und Verbreitung des Verfahrens. Ein Positionspapier mit weiteren Erklärungen zum Verfahren der Spannstahlbruchortung ist Ende 2017 veröffentlicht worden.

Zukünftige Weiterentwicklungen könnten z.B. die quantitative Erfassung der genauen Bruchanzahl gerissener Litzen, eine optimierte Automatisierung der Ergebnisauswertung und neue Geräte zur Erreichung größerer Detektionstiefen in den Fokus der Anwendungsorientierten Forschung stellen.

## Literatur

- [1] Walther, A. „Vergleichende Signalinterpretation von Spannstahlbrüchen im remanenten und aktiven magnetischen Streufeld“, Dissertation, Technische Universität Berlin, Berlin 2012
- [2] Youssef S., Szielasko K., Birringer R., Kurz, J, Sourkov A., Pushkarev S.; BetoFlux: Mobiles Streufluss-Prüfsystem zur Detektion von Korrosionsschäden an Spannbetonmasten, DGfZfP-Jahrestagung, 2014
- [2] Hillemeier, B., Flohrer, C. und Schaab, A. „Zerstörungsfreie Ortung von Spannstahlbrüchen in Spannbeton-Deckenträgern“, Beton- und Stahlbetonbau 84, 1989
- [3] Sawade, G.; Anwendung der Methode der magnetischen Streufeldmessung zur Ortung von Spanndrahtbrüchen, DGfZfP-Berichtsband 66, 1999
- [4] Scheel, H.; Spannstahlbruchortung von Spannbetonbauteilen mit nachträglichen Verbund unter Ausnutzung des Remanenzmagnetismus, Dissertation TU-Berlin 1997
- [5] Pak, Ch. I; „Optimierung des Remanenzmagnetismus-Verfahrens zur Stahlbruchortung in Bauwerken – Theoretische Weiterentwicklung“; Dissertation, TU Berlin, 2010
- [6] Hillemeier, B., Walther, A.: Schnelle zerstörungsfreie Ortung von Spannstahlrissen in Querspanngliedern von Spannbetonbrücken, DGZfP-Jahrestagung, 2007
- [7] Hillemeier B., Taffe A., Walther A.; „Verifizierung moderner zerstörungsfreier Prüfverfahren an einem Abbruchbauwerk -Zustandsermittlung, Untersuchung und Verifizierung von Messergebnissen an einem 45 Jahre alten Spannbetonbauwerk“, Beton- u. Stahlbetonbau 105, 12, Ernst u. Sohn 2010
- [8] UA Magnetische Verfahren zur Spannstahlbruchortung „Positionspapier – Magnetische Verfahren zur Spannstahlbruchortung“ Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung e. V., Fachausschuss ZfP im Bauwesen, 2017
- [9] Walther A., Wilcke M., Brossmann N.; „Zerstörungsfreies Untersuchen von Spannbetonbauteilen“, Der Bausachverständige 13, 6, Fraunhofer IRB 2017