

# BetoFlux: Mobiles Streufluss-Prüfsystem zur Detektion von Korrosionsschäden an Spannbetonmasten

Sargon YOUSSEF \*, Klaus SZIELASKO \*, Ralf BIRRINGER \*\*, Jochen H. KURZ \*,  
Alexander SOURKOV \*, Sergey PUSHKAREV \*\*\*

\* Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren IZFP, Saarbrücken

\*\* ZWP Anlagenrevision GmbH, Beckingen

\*\*\* Universität des Saarlandes, Lehrstuhl für Zerstörungsfreie Materialprüfung und  
Qualitätssicherung, 66123 Saarbrücken

**Kurzfassung.** Spannbetonmasten sind in der urbanen Infrastruktur in größerem Umfang seit Jahrzehnten im Einsatz und unterliegen dabei oft hohen statischen und dynamischen Lasten. Die Lebensdauer verkürzt sich unter Umständen massiv, befinden sich diese Masten in einer korrosiven Umgebung. Dies betrifft insbesondere den Übergang zum Erdreich, wo Tierexkremate, Streusalz oder elektrische Kriechströme in Verbindung mit der zusätzlichen mechanischen Belastung Spannungsrisskorrosion im Spannstahl begünstigen. Es kam in jüngster Zeit bereits zu mehreren Vorfällen durch abgebrochene Betonmasten, wobei die Schadensbilder auf Spannungsrisskorrosion hindeuten. Aufgrund der Betonüberdeckung ist die Korrosion mit dem bloßen Auge erst in sehr fortgeschrittenem Stadium zu erkennen. Die Prüfung erfolgt derzeit durch mechanische Belastung, was zusätzliche Schädigung bewirken kann. Das Prüfsystem »BetoFlux« gestattet die bildgebende Fehlerprüfung an Spannbetonmasten auf Basis magnetischer Streuflussmessungen. Mit einem im Prüfsystem integrierten Permanentmagnet-Joch wird der Bewehrungsstahl im Beton magnetisiert. Ein Hallsensorarray detektiert die magnetischen Streufeldsignale, welche im Prüfsystem digitalisiert und durch eine USB-Verbindung an den PC übermittelt werden. Die Korrosionsschädigung ist in der aufgezeichneten Draufsicht der Streufeldsignale deutlich erkennbar. Da die Stromversorgung ebenfalls über USB erfolgt, ist das Gerät für den mobilen Einsatz vor Ort geeignet.

## 1. Ausgangssituation

In der Verkehrsinfrastruktur werden Spannbetonmasten seit Jahrzehnten in größerem Umfang eingesetzt. Durch statische und dynamische Lasten verkürzt sich die Lebensdauer, insbesondere beim Einsatz in korrosiver Umgebung, massiv. Betroffen ist hauptsächlich der Übergang zum Erdreich, wo Tierexkremate, Streusalz oder elektrische Kriechströme in Verbindung mit zusätzlichen mechanischen Belastungen im ferromagnetischen Spannstahl Spannungsrisskorrosion begünstigen. In jüngster Zeit kam es ohne nennenswerte Fremdeinwirkung zu mehreren Vorfällen durch umgestürzte und abgebrochene Betonmasten. Die Schadensbilder deuten auf Spannungsrisskorrosion hin. Die Korrosion ist aufgrund der Betonüberdeckung mit dem bloßen Auge erst im fortgeschrittenen Stadium zu erkennen. Derzeitige Prüfungen sind mit mechanischen Belastungen verbunden, was zu



zusätzlichen Schädigungen führen kann. Eine Prüfung mittels Röntgenstrahlung ist nicht ohne hohen Aufwand zur Einhaltung von Strahlenschutzrichtlinien möglich.

## 2. Zielsetzung

Das magnetische Streuflussverfahren eignet sich prinzipiell zur Detektion von rissartigen Fehlern in ferromagnetischen Werkstoffen. Dieses Verfahren wird auch in der zerstörungsfreien Prüfung im Bauwesen unter anderem zur Detektion rissartiger Fehler korrosiver Natur eingesetzt ([1] und [2]). Aufgrund der beschriebenen Ausgangssituation besteht Bedarf für ein Prüfsystem, welches den mobilen und einfach handhabenden Einsatz des magnetischen Streuflussverfahrens an zylinderförmigen Betonmasten erlaubt. 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.

## 3. Entwicklung des Prüfsystems

### 3.1. Vorarbeiten

In [1] und [2] wurde das magnetische Streuflussverfahren an größeren Bauwerken wie z.B. Brücken bereits mit Erfolg eingesetzt. Die gesamte hierfür eingesetzte Prüftechnik inkl. der Magnetisierungseinheit in Form eines großen Elektromagneten ist jedoch für die Anwendung am Betonmast überdimensioniert. Eine Anpassung der gesamten Prüftechnik an veränderte Gegebenheiten bei Betonmasten, wie beispielsweise der geringeren Überdeckung von bis zu 3 cm war notwendig. Für den mobilen Einsatz erfolgte die Auslegung der Prüftechnik nach Low-Power Aspekten.

### 3.2. Einführung in die Prüftechnik

Die magnetische Streuflussprüfung dient zum Nachweis rissartiger Oberflächenfehler in ferromagnetischen Werkstoffen [3]. Das Verfahren beruht auf einem physikalischen Effekt, welcher auch bei der Magnetpulverprüfung ausgenutzt wird, die z.B. in der Stahl verarbeitenden Industrie 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. In Abbildung 1 wird dies durch das dargestellte Feldlinienmodell veranschaulicht:

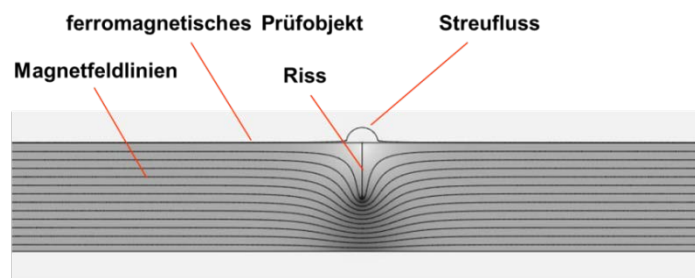
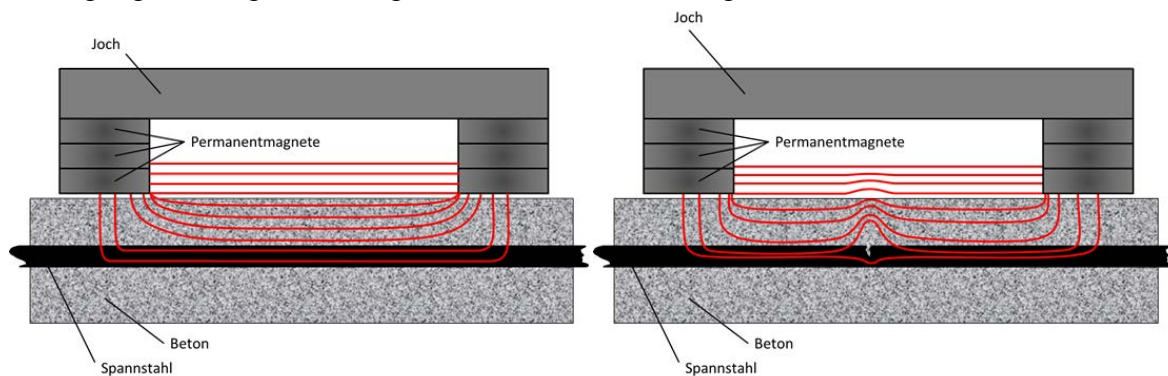


Abbildung 1: Verlauf des Magnetfeldes an einem Riss in einem magnetisierten Bauteil

Dieses Verhalten kann zur zerstörungsfreien Fehlerprüfung an ferromagnetischen Spannstählen ausgenutzt werden. 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. Da das Prüfsystem »BetoFlux« für den mobilen Einsatz vorgesehen ist, werden Permanentmagneten in Kombination mit einem Joch als Flussbrücke, statt eines Elektromagneten, welcher zusätzlich elektrisch versorgt werden müsste, bevorzugt.

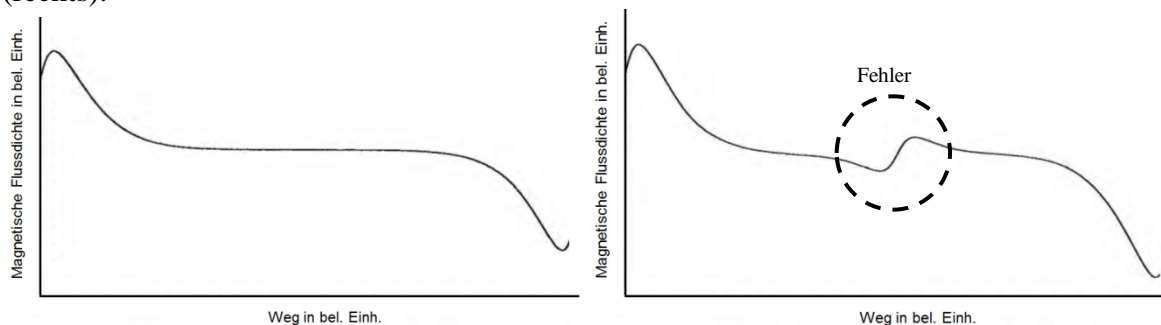
Abbildung 2 zeigt den Verlauf der magnetischen Feldlinien im Spannstahl sowohl im unbeschädigten (links), als auch im beschädigten (rechts) Fall. Mit wachsendem Abstand vom beschädigten Spannstahl wird das magnetische Streufeld abgeschwächt und unschärfer, wodurch eine entsprechend starke Magnetisierung 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.



**Abbildung 2:** Feldlinienverlauf an unbeschädigten (links) und beschädigtem (rechts) Spannstahl

Zur Detektion kann prinzipiell sowohl die zur Oberfläche tangentielle Komponente des Magnetfeldvektors als auch die zur Oberfläche normale Komponente herangezogen werden. Die Erfassung der Normalkomponente bietet sich aufgrund des Aufbaus potentieller Magnetfeldsensoren an.

Abbildung 3 zeigt den qualitativen Verlauf der Normalkomponente über eine feste Strecke beim unbeschädigten Spannstahl (links) und beim beschädigten Spannstahl (rechts).



**Abbildung 3:** Verlauf der Normalkomponente 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.

Deutlich zu erkennen ist auch der Gradient der Normalkomponente zum Rand hin, bedingt durch die Inhomogenität des Feldverlaufs, sowohl beim unbeschädigten, als auch beim beschädigten Spannstahl. Ab einer bestimmten Höhe führt dieser Gradient dazu, dass der Sensor außerhalb seines zulässigen linearen Arbeitsbereiches betrieben wird. Nahe der

Sättigung der Sensoren kann keine magnetische Feldänderung mehr registriert werden. Neben Durch entsprechenden Abstand der Sensoren zu den Magneten und Kombination von hard- und softwareseitigen Filtern kann dieser Gradient jedoch praktisch eliminiert werden.

### 3.3. Miniaturisierung der Prüftechnik

In den Vorversuchen hat sich für diesen Anwendungsfall ein Magnetfeld von 80 A/cm im Spannstahl als geeignet erwiesen. Ebenfalls konnte die Nachweisgrenze der Fehlertiefe in der erforderlichen Sensordistanz von 3 cm in Luft ermittelt werden. Da die Betonüberdeckung ein ähnliches magnetisches Verhalten wie Luft aufweist, können diese Untersuchungen als für die Praxis relevant betrachtet und bei der Dimensionierung der Prüftechnik herangezogen werden. Ferner konnte mittels des Laboraufbaus die Auswahl geeigneter Sensoren und die in 3.2. beschriebene Kombination der Stärke der Magnetisierung und den Dimensionen des Jochs ermittelt werden. Die Aufnahme der Streuflusssignale erfolgt über eine Sensorzeile. Das Joch hat eine Länge von 300 mm und die Magnete eine breite von 30 mm. Somit standen maximal 240 mm für die Auslegung der Sensorzeile zur Verfügung.

Der in 3.2. beschriebene Gradient des Magnetfeldes zum Rand hin lässt sich durch eine geschickte Kombination von hard- und softwareseitigen Filtern fast vollständig eliminieren. Hierfür wurde in einem weiteren Vorversuch ermittelt, wie dicht die Sensoren an den Magneten platziert werden dürfen. Mit den ermittelten Parametern konnte die Sensorzeile bestehend aus 32 rauscharmen Hallsensoren verteilt über eine Länge von 20 cm entwickelt werden. Abbildung 4 zeigt den schematischen Aufbau der Magnetisierung und der Sensorzeile.

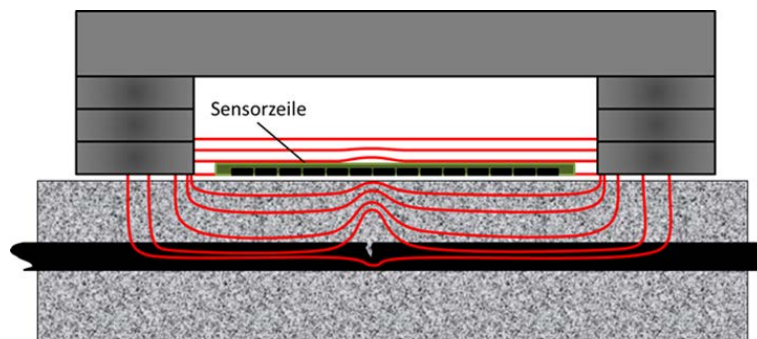


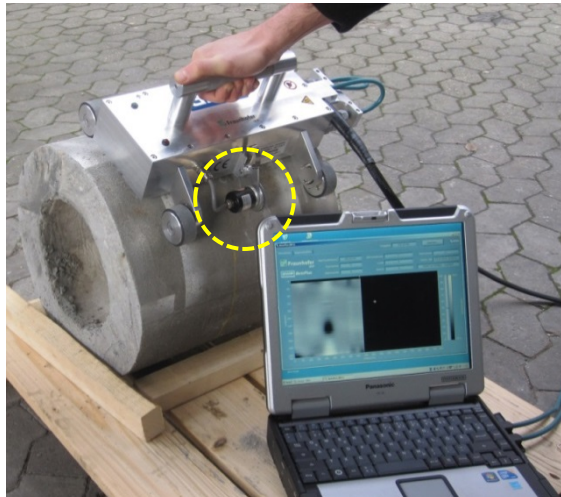
Abbildung 4: Schematische Anordnung der Sensorzeile zwischen den magnetischen Polen

Über eine USB-Schnittstelle erfolgt die Datenübertragung zum PC. Auch die Versorgung des Prüfsystems »BetoFlux« erfolgt über eine separate USB-Schnittstelle.

Um eine Zuordnung der Messwerte der Sensorzeile zu einer bestimmten Position am Betonmast zu erhalten, wurde das Prüfsystem »BetoFlux« mit einem Weggeber ausgestattet.

### 3.4. Handhabung der Prüftechnik

Das Prüfsystem »BetoFlux« sollte als mobiles Handgerät ausgelegt werden, welches in Umfangsrichtung um den Betonmast geführt wird. Hierfür war neben der Berücksichtigung des Gesamtgewichtes, ein geeignetes Handhabungskonzept zu ermitteln. Abbildung 5 zeigt die Handhabung des fertigen Prüfsystems an einem Betonmastsegment.



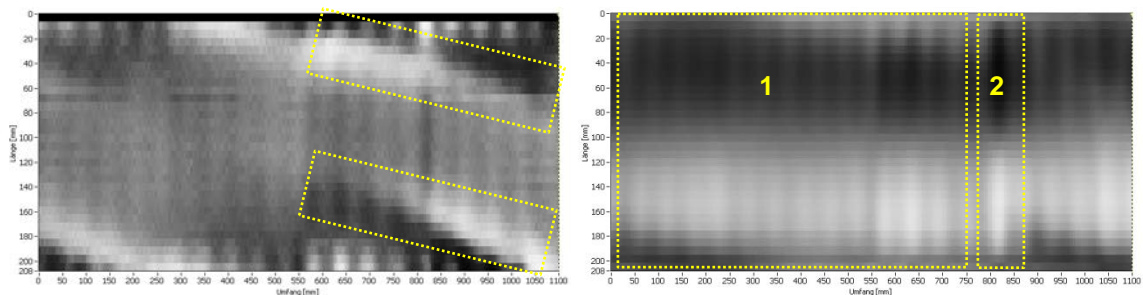
**Abbildung 5:** Handhabung des Prüfsystems »BetoFlux«

Ebenfalls dargestellt ist der Weggeber (siehe gelbe Markierung). Durch eine Feder wird sichergestellt, dass der Weggeber zu jeder Zeit definierten Kontakt mit der Oberfläche hat.

### 3.5. Software

Hauptaufgabe der Software ist neben der der Steuerung der Stromversorgung des Prüfsystems und der Erfassung der Messwerte, die Filterung und die Darstellung der Messwerte als Grauwert in Form eines C-Bildes.

Es wurden zwei Filtermodi entwickelt, der Modus „Fehler hervorheben“ und der Modus „Stäbe hervorheben“. Abbildung 6 zeigt denselben Scan nach Anwendung der unterschiedlichen Filtermodi (links „Fehler hervorheben“, rechts „Stäbe hervorheben“).



**Abbildung 6:** Vergleich der Filtermodi Fehler hervorheben (links) und Stäbe hervorheben (rechts)

Der Modus „Fehler hervorheben“ ermöglicht eine intuitive Bewertung der Messwerte und weiterer ferromagnetischer Teile im Betonmast, wie beispielsweise einem Wickeldraht (vgl. Dipol gelbe Markierung Abbildung 6 links). Der Modus „Stäbe hervorheben“ erlaubt neben der Bewertung Stabanordnung (vgl. Abbildung 6 rechts 1) auch eine grobe qualitative Abschätzung von Stabdicke und Stabtiefe (vgl. Abbildung 6 rechts 2, auffälliger dickerer und dichter zur Oberfläche angeordneter Spannstahl).

## 4. Anwendung zur Fehlerprüfung in Spannbeton

Nach Fertigstellung der ersten Version des Prüfsystems »BetoFlux« wurden die Nachweisgrenzen der Vorversuche validiert. Zur Verfügung stand ein Betonmastsegment. Hierbei handelt es sich um den oberen Teil eines tatsächlich umgestürzten Betonmastes. Definierte Stellen des Betonmastes wurden nachträglich mit unterschiedlichen Testfehlern präpariert. Neben vollständig durchtrennten Spannstählen, wurden einzelne Spannstähle zur

Validierung der in den Vorversuchen ermittelten Nachweisgrenzen mit definierten Sägeschnitten präpariert. Die Spannstähle wurden mit Sägeschnitten von 25 % und 50 % des Stabdurchmessers und vollständig durchtrennten Spannstählen unterschiedlicher Rissbreiten im Filtermodus „Fehler hervorheben“ versehen (vgl. Abbildung 7 bis Abbildung 10).

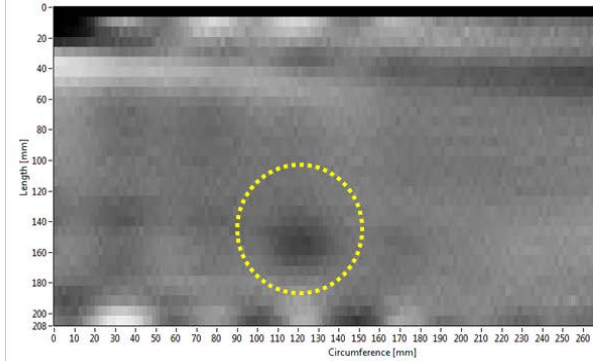


Abbildung 7: 25 % Sägeschnitt

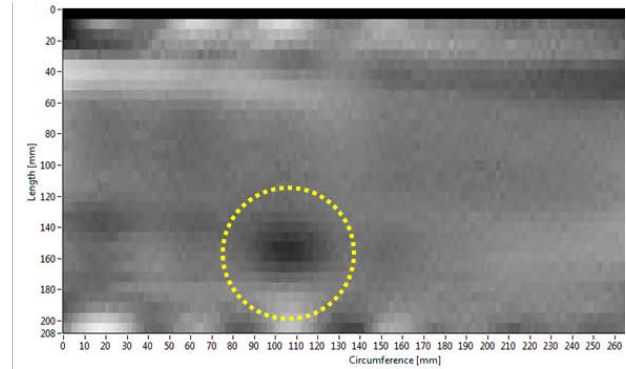


Abbildung 8: 50 % Sägeschnitt

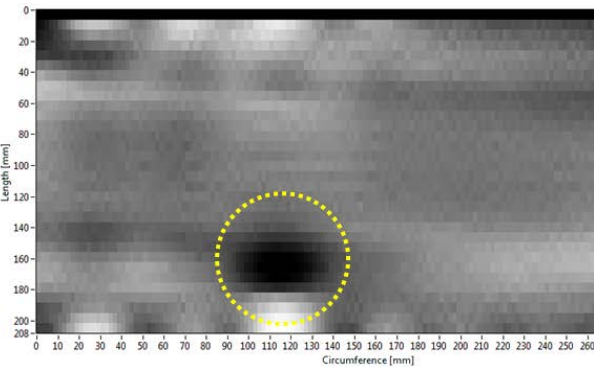


Abbildung 9: 100 % Sägeschnitt

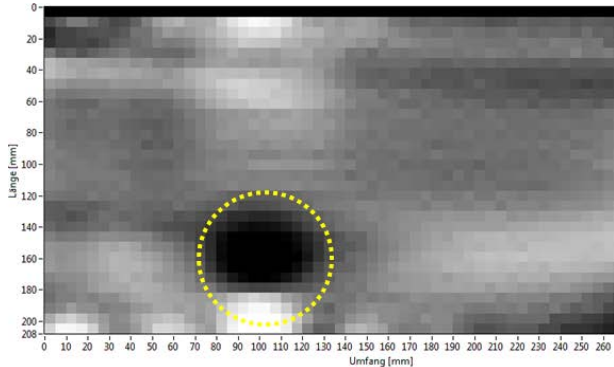
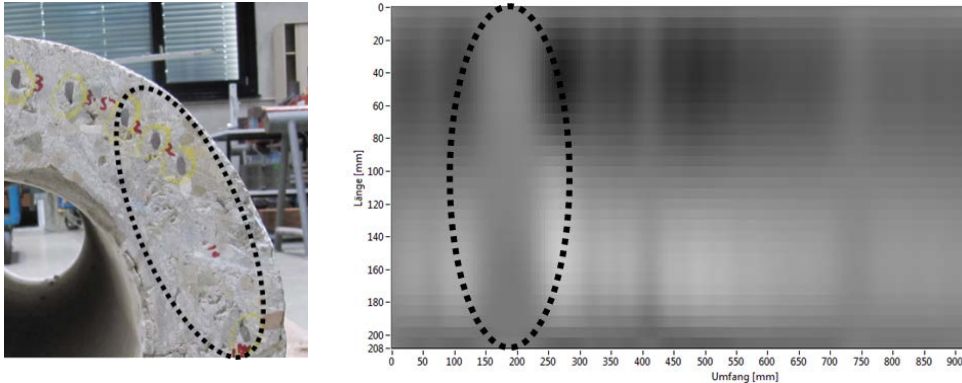


Abbildung 10: 2 cm breiter 100 % Sägeschnitt

In Abbildung 7 bis Abbildung 10 ist das gemessene Streuflusssignal und deren Abhängigkeit von der Fehlertiefe und der Fehlerbreite als C-Bild dargestellt (vgl. gelbe Markierung rechts). Das Dipolsignal ist deutlich als Grauwertübergang zu erkennen. Es existiert eine Korrelation zwischen der Intensität der Grauwerte mit der Fehlertiefe und der Breite des Signals mit der Fehlerbreite.



**Abbildung 11:** Fehlende bzw. unregelmäßig angeordnete Spannstähle

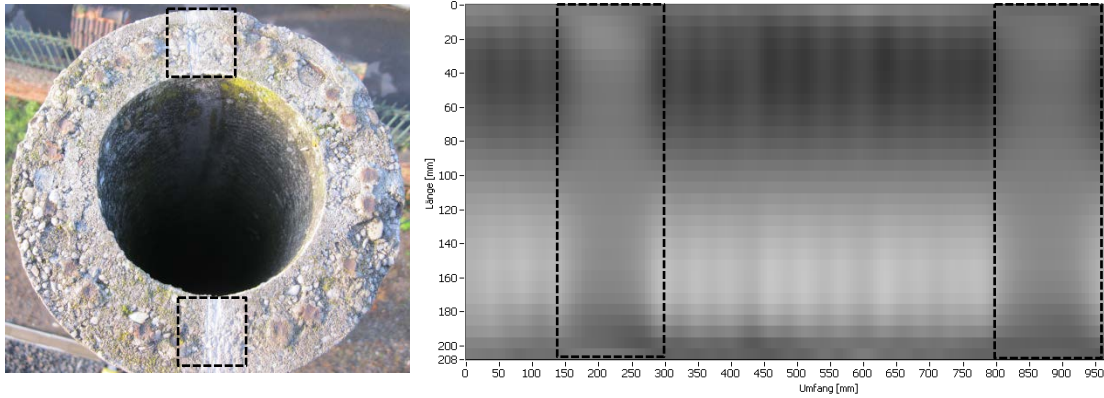
Das Prüfsystem konnte bereits in der Praxis an realen Betonmasten eingesetzt und erprobt werden. Dies führte zu weiteren Erkenntnissen hinsichtlich der Prüftechnik. Beispielsweise wurde die Geräteeinstellung an unterschiedliche Betonmastdurchmesser nachträglich optimiert. Statt der aufwendigen Einstellung über einen Inbusschlüssel, lässt sich die Position der Rollen in der überarbeiteten Version mit Hilfe einer Stirnverzahnung einhändig einstellen.

Abbildung 12 zeigt die in der Praxis eventuell notwendigen Vorarbeiten zur Messung eines Betonmastes wie das Freigraben des Erdreiches zur Vermessung der spannungsrissegefährdeten Zone (links), sowie die Handhabung des Prüfsystem »BetoFlux« am Betonmast (rechts).



**Abbildung 12:** Notwendige Vorarbeiten zur Messung im Erdnahen Bereich (links) und Handhabung des Prüfsystems »BetoFlux« (rechts)

In Abbildung 13 ist das Ergebnis der Vorort-Messung eines Betonmastes, welcher fertigungsbedingte Auffälligkeiten der Spannstahlanordnung aufwies, zu erkennen. Der Grauwert im schwarz markierten Bereich stellt ein fehlendes magnetisches Streufeld dar, was auf nicht vorhandene oder falsch angeordnete Spannstäbe deutet. Nach Vermessung des Betonmastes wurde diese Auffälligkeit näher untersucht. In der Draufsicht ist deutlich zu erkennen, dass der Betonmast aus zwei Halbschalen gefertigt und „verklebt“ wurde.



**Abbildung 13:** Fertigungsbedingte Auffälligkeit der Spannstähle bei einer Vorort-Messung von Betonmasten

## 5. Zusammenfassung

Das Prüfsystem »BetoFlux« erlaubt eine schnelle, mobile und intuitive Visualisierung der Anordnung und des Zustandes der ferromagnetischen Spannstähle im Betonmast in Umfangsrichtung auf Basis des magnetischen Streuflussverfahrens. Die Bewertung dieser Ergebnisse erlaubt eine Abschätzung über den Zustand des Betonmastes.

## Referenzen

- [1] Walther, A.: Vergleichende Signalinterpretation von Spannstahlbrüchen im remanenten und aktiven magnetischen Streufeld, Dissertation 2012
- [2] Hillemeier, B., Walther, A.: Schnelle zerstörungsfreie Ortung von Spannstahlrissen in Querspanngliedern von Spannbetonbrücken, DGZfP-Jahrestagung 2007
- [3] Szielasko, K., Kloster, A., Dobmann, G., Hillemeier, B., Scheel, H.: High-Speed, High-Resolution Magnetic Flux Leakage Inspection of Large Flat Surfaces, ECNDT 2006