



DEUTSCHE
GESELLSCHAFT FÜR
ZERSTÖRUNGSFREIE
PRÜFUNG E.V.

DGZfP Fachausschuss für Zerstörungsfreie Prüfung im Bauwesen
Unterausschuss Magnetische Verfahren zur Spannstahlbruchortung

Positionspapier

Magnetische Verfahren zur Spannstahlbruchortung

Was ist Zerstörungsfreie Prüfung?

Der Wunsch, in die Dinge hineinzuschauen, Werkstoffe und Werkstücke so zu prüfen, dass ihre weitere Verwendung nicht beeinträchtigt und ihre Form nicht verändert wird – eben zerstörungsfrei –, ist so alt wie das Vermögen der Menschen, Material zu formen und Werkstücke zu schaffen.

Über 100 Jahre ist es her, dass Wilhelm Conrad Röntgen (1845-1923) die „X-Strahlen“ entdeckte, mit denen das Durchdringen von Werkstoffen und das Sichtbarmachen von Inhomogenitäten möglich war. Durch diese Entdeckung war der Grundstein der modernen zerstörungsfreien Werkstoffprüfung (ZfP) gelegt. Die immer schnellere Entwicklung neuer Verfahren und moderner Geräte kann in der „Chronik der Zerstörungsfreien Materialprüfung“ nachgelesen werden

Heute gehört die ZfP zu den wichtigsten Methoden der Qualitätskontrolle im Herstellungsprozess und während der sicherheitstechnischen Anlagenüberwachung. Vergleichbar mit der medizinischen Diagnostik sollen verborgene Fehler in Bauteilen und Konstruktionen vor und während des Betriebes so rechtzeitig erkannt werden, dass unvorhergesehenes Versagen verhütet wird.

Der Start eines Flugzeuges, der Einsatz von Hochgeschwindigkeitszügen, die Fertigung sicherer Automobile, der Bau einer Brücke oder der Betrieb von komplexen Anlagen sind ohne die Kontrolle mittels ZfP nicht mehr denkbar.

In fast allen Industriezweigen ist die ZfP zum unverzichtbaren Instrument für Qualitätskontrolle und Qualitätssicherung geworden. Sie ist auch ein wichtiger Faktor zur Senkung der Kosten in Produktion und Betrieb.

Zur Vermeidung von Unfällen mit Gefährdung von Menschenleben und schweren Sach- und Umweltschäden werden Röntgenverfahren, Ultraschallmethoden, thermographische Verfahren, Lecksuchmethoden und optische, elektrische und magnetische Oberflächenverfahren für die ZfP eingesetzt.

Wer ist die DGZfP?

Die DGZfP ist die älteste ZfP-Gesellschaft der Welt, 1933 in Berlin gegründet. Sie organisiert die Kommunikation und den Erfahrungsaustausch zwischen Forschungs- und Entwicklungsinstituten und ZfP-Anwendern, Geräteherstellern und privaten Dienstleistern und informiert über neueste ZfP-Entwicklungen in der Gerätetechnik und den ZfP-Anwendungen.

Zu den rund 1.600 Mitgliedern der DGZfP gehören die großen Konzerne und mittelständische Unternehmen die ZfP einsetzen, ebenso wie Forschungseinrichtungen, Universitäten und Behörden, aber auch einzelne Personen, die sich mit der Zerstörungsfreien Materialprüfung beschäftigen.

Ziele der DGZfP sind Erforschung, Entwicklung, Anwendung und Verbreitung der zerstörungsfreien Prüfverfahren.

Zur Lösung spezieller technischer Probleme hat die DGZfP **Fachausschüsse** eingerichtet. Der praxisnahe Erfahrungsaustausch und die kostenfreie fachliche Weiterbildung finden in 18 regionalen **Arbeitskreisen** statt.

Die DGZfP veranstaltet regelmäßig Konferenzen, Symposien und Seminare. Höhepunkt ist die **DGZfP-Jahrestagung** mit über 500 Teilnehmern. Die DGZfP ist Mitglied des EFNDT und ICNDT, der europäischen und der weltweiten Dachorganisation der nationalen ZfP-Gesellschaften und war Organisator der 19. WCNDT 2016 in München www.wcndt2016.com mit 2500 Teilnehmern und 1400 Ausstellungsbesuchern.

Die DGZfP versorgt die ZfP-Fachleute durch die Herausgabe von **Publikationen** mit aktuellen und ausführlichen Informationen. Sie bietet diverse Online-Service-Dienste über die Homepage der DGZfP im Internet.

Die Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V. (DGZfP) betreut seit mehr als 60 Jahren Fachpersonal der Zerstörungsfreien Prüfung. Seit etwa 30 Jahren existiert ein geordnetes System zur Qualifizierung von Fachpersonal. Zertifikate werden seit 1990 ausgestellt.

Als 1993 die europäische Norm DIN EN 473 gültig wurde, wurde eine unabhängige **Personal-Zertifizierungsstelle (DPZ)** nach den Anforderungen der EN 45013 eingerichtet und diese im Juni 2004 auf ISO/IEC 17024 umgestellt. Im Januar 2013 wurde die DIN EN 473 durch die DIN EN ISO 9712 ersetzt.

Die DPZ ist von der Zentralstelle der Länder für Sicherheitstechnik (ZLS) als anerkannte unabhängige Prüfstelle nach Artikel 13 der europäischen Richtlinie 97/23/EG (Druckgeräterichtlinie „DGR“) anerkannt und für den nicht geregelten Bereich von der Deutschen Akkreditierungsstelle GmbH (DAkkS) als Zertifizierungsstelle für Personal der Zerstörungsfreien Prüfung akkreditiert. Weiterhin garantieren Verträge mit vielen Ländern Europas und Ländern in Übersee dem DGZfP-Zertifikat weltweite Anerkennung.

Der Inhalt von DGZfP Richtlinien und Merkblättern ist ein von Experten formulierter Stand der Technik, dessen Anwendung empfohlen wird.

Herausgeber:



DEUTSCHE
GESELLSCHAFT FÜR
ZERSTÖRUNGSFREIE
PRÜFUNG E.V.

www.dgzfp.de

Max-Planck-Straße 6 • D-12489 Berlin

Telefon: +49 30 67807-0 • Telefax: +49 30 67807-109 • E-Mail: mail@dgzfp.de

© DGZfP e.V. 2017. Alle Rechte vorbehalten, insbesondere das Recht auf Vervielfältigung und Verbreitung sowie Übersetzung auch in elektronischen Systemen bedarf der schriftlichen Genehmigung der DGZfP e.V.

DGZfP MVS, Ausgabe August 2017, 1. Fassung

Inhalt

1	Anlass	4
2	Methoden und Messprinzip	5
3	Prüfaussage und Grenzen der Verfahren	7
4	Weiterentwicklungen	8
5	Literatur	9
6	Autorenverzeichnis	11

1 Anlass

Die Spannbetonbauweise erlebte besonders in den 1950er bis 1970er Jahren eine starke Verbreitung in Deutschland. Eine Vielzahl von Brücken- und Hochbauwerken wurde in dieser Bauweise errichtet. Die Vorteile gegenüber herkömmlichen Stahlbetonbauwerken lagen hauptsächlich in den vergleichsweise großen Spannweiten bei gleichzeitiger Materialersparnis. Das damalige Vertrauen in diese Bauweise führte dazu, dass sehr geringe Mengen Betonstahlbewehrung verbaut wurden. Demnach ist die Integrität des Spannstahls für die Standsicherheit der damals errichteten Spannbetonbauwerke unabdingbar.

Im o.g. Zeitraum wurden teilweise Spannstähle verbaut, die eine erhöhte Empfindlichkeit gegenüber wasserstoffinduzierter Spannungsrisskorrosion (SpRK) aufweisen. Spannungsrisskorrosion ist eine Korrosionsart, bei der es zum plötzlichen und unangekündigten Bruch der Spannstähle kommen kann. Charakteristisch für diese Korrosionsart ist eine Rissbildung und Rissausbreitung im Stahlgefüge. Besonders empfindlich sind vergütete Spannstahlsorten, die bis 1965 bzw. bis 1978 hergestellt wurden [1]. Auch ein mangelhafter Korrosionsschutz kann Ursache für den Bruch von Spanndrähten sein. Hauptgrund ist die unsachgemäße Verpressung der Hüllrohre mit Mörtel, sodass Hohlräume verbleiben. Die Gefahr einer unzureichenden Betondeckung besteht besonders bei älteren Spannbetonbauteilen mit sofortigem Verbund. Weiterhin führen äußere Einflüsse wie schadhafte Abdichtungen und defekte Entwässerungen zur Gefahr des Spannstahlbruchs. Die Ursache ist in diesem Fall die in den Beton eindringende Feuchte mit darin gelösten Chloriden aus Tausalzen, die zur Korrosion der Spanndrähte führen können. Eine besondere Gefahr stellt daher die Kombination aus empfindlichem Spannstahl und mangelhaftem Korrosionsschutz bzw. schädlichen äußeren Einflüssen dar.

Die durch das Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung herausgegebene Handlungsanweisung für ältere Straßenbrücken mit gegenüber Spannungsrisskorrosion empfindlichem Spannstahl [1] fordert den rechnerischen Nachweis darüber, dass sich das Versagen einzelner Bauwerksbereiche durch gebrochene Spannglieder zuvor anhand von Rissen im Beton ankündigt (Riss-vor-Bruch Kriterium). In vielen Fällen kann dieser rechnerische Nachweis nicht erbracht werden. Damit auch in diesen Fällen eine Aussage zur Tragfähigkeit bzw. zur Sicherheit eines Spannbetonbauwerks getroffen werden kann, muss die Integrität des Spannstahls nachgewiesen werden. Hierfür bietet sich die zerstörungsfreie Methode der magnetischen Streufeldmessung an. Mithilfe dieses Verfahrens können Bauwerke auf mögliche Brüche im Spannstahl untersucht werden (Bild 1). Im Vergleich zu Öffnungsstellen und Spannstahlentnahmen werden dem Bauwerk bei diesem Verfahren keine weiteren Schwächungen zugeführt. Der den Spannstahl umgebende Beton hat keinen Einfluss auf die Messergebnisse, sofern keine ferromagnetischen Bestandteile im Beton enthalten sind. Die Signale werden ausschließlich durch den ferromagnetischen Stahl beeinflusst. Anwendungsgrenzen ergeben sich aus der Zugänglichkeit der Messfläche, der Tiefenlage der zu untersuchenden Spannglieder, der Verlegedichte von Stahlbetonbewehrung an der Betonoberfläche und dem Anteil und der Lage der gebrochenen Spanndrähte ([2] und [3]).

In den letzten 30 Jahren wurden ca. 20.000 Bauwerke mit dem Verfahren untersucht, darunter Spannbetonfertigteile (insbesondere Viehstaldecken), Brückenbauwerke, Parkhäuser, Hallenkonstruktionen und Tankbehälter. Eine der beiden Hauptanwendungen ist, wie in Bild 1a dargestellt, die Untersuchung von Längsspanngliedern, die i.d.R. von der Unterseite von Brückenbauwerken erfolgt. In Bild 1b ist mit der Untersuchung von Querspanngliedern die zweite Hauptanwendung dargestellt. Hier erfolgt die Untersuchung von der Oberseite des Bauteils. Hierfür stehen verschiedene Apparaturen mit unterschiedlichen Flächenleistungen zur Verfügung, die eine Tagesleistung von bis zu mehreren Tausend Quadratmetern untersuchte Brückenfläche erlauben.



(a)



(b)



(c)



(d)

Bild 1: Prüftechnische Anlagen zur Detektion von Spannstahlbrüchen im Einsatz: (a) Untersuchung von Längsspanngliedern von der Brückenunterseite (Bildquelle: Materialprüfungsanstalt, Universität Stuttgart/DGZfP-VNB 88/28.08.17); (b) Untersuchung von Querspanngliedern in der Fahrbahnplatte (Brückenoberseite) (Bildquelle: Ingenieure für Bauwesen – Prof. Hillemeier & Knapp GmbH, Berlin/DGZfP-VNB 89/28.08.17); (c) Untersuchung von Längsspanngliedern von der Seite und (d) Untersuchung von Längsspanngliedern mit hyperbolischem Verlauf (Bildquelle: Walther, Brandenburg/DGZfP-VNB 91/28.08.17.

2 Methoden und Messprinzip

Die Anwendung der Methode der magnetischen Streufeldmessung auf Spannbetonbauteile wurde erstmals Anfang der 1980er-Jahre in den USA von Kusenberger [4] beschrieben. Die ersten Anwendungen wurden in Deutschland 1989 anlässlich vermehrter Einstürze von vorgespannten Viehstaldecken vorgenommen ([5] und [6]). Später wurde das Verfahren für Spannbetonbauteile mit nachträglichem Verbund weiterentwickelt ([7], [8], [9], [10], [11], [12], [13]). Die magnetische Streufeldmessung wird auch zur Untersuchung von Drahtseilen eingesetzt [14].

Die Anwendung des Verfahrens umfasst drei Arbeitsschritte:

- 1) Ortung der Spannglieder
- 2) Magnetisieren der Spannglieder
- 3) Detektion von Spanndrahtbrüchen

Im dritten Schritt werden zwei Techniken unterschieden: Entweder wird im aktiven Magnetfeld gemessen, oder es wird das magnetische Restfeld gemessen. Die Restfeldmessung wird auch als Messen des Remanenzmagnetismus bezeichnet, woraus sich die häufig verwendete Bezeichnung Remanenzmagne-

tismusverfahren ableitet [8]. An Spannstahlbrüchen entsteht ein magnetischer Streufluss, den die Magnetfeldsensoren aufnehmen. Bei der Messung der (axialen) x-Komponente wird der Bruch als lokaler Extremwert (Maximum) angezeigt. Die Messung der (transversalen) z-Komponente zeigt den Bruch als lokalen Feldwechsel (Dipol) an. Bild 2a stellt beide Messergebnisse vergleichend dar. Der Prüfkopf mit der Lage des Jochmagneten und der Sensoren ist in Bild 2b schematisch abgebildet.

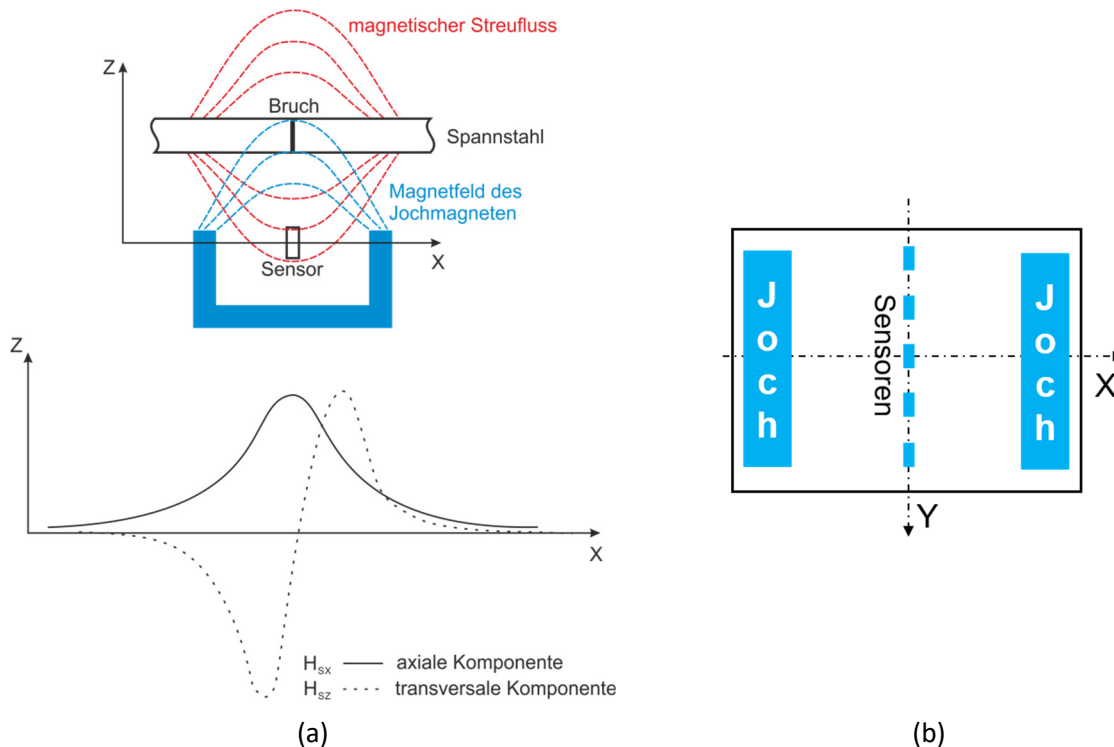


Bild 2: Typische Bruchsignale bei Messung der axialen bzw. transversalen Komponente der magnetischen Feldstärke (a) und Anordnung eines Prüfkopfs mit Jochmagnet und mittlerer Sensoreinheit (b).

(Bildquelle: Materialprüfungsanstalt, Universität Stuttgart/DGZfP-VNB 88/28.08.17)

In einem Bauteil ist neben der Spannbewehrung in der Regel auch eine Betonstahlbewehrung vorhanden. Diese trägt erheblich zum magnetischen Streufeld bei. Zur Interpretation der Streufeldsignale müssen die Anteile der Querbewehrung (zumeist Bügelbewehrungen) herausgefiltert werden.

Auch hier werden verschiedene Vorgehensweisen unterschieden. Je nach Verfahren wird einmal oder mehrmals magnetisiert. Das Ziel besteht darin, die Spannbewehrung zu magnetisieren und gleichzeitig die Betonstahlbewehrung zu entmagnetisieren [8] und anschließend die Signale der Querbewehrung aus den Restfeldsignalen rechnerisch herauszufiltern ([9], [12], [13]). Die bei unterschiedlichen Magnetisierungsfeldstärken gemessenen Streufeldsignale werden durch Korrelationsanalyse verglichen [11].

Da Mobilität und Flächenleistung für die Praxis eine wichtige Rolle spielen, wurden verschiedene Geräte entwickelt. Gewichtsoptimierte Varianten der beschriebenen Prüftechnik werden mit Permanentmagneten betrieben. Sie verfügen über USB-basierte oder kabellose Kommunikation mit Akkubetrieb. Bei geringer Betondeckung (z.B. ca. 3 cm im Falle von Betonmasten aus Schleuderbeton mit vorgespanntem Stahlanteil) können Gerätemassen von ca. 5 kg erzielt werden ([15], [16]), vgl. Bild 3a. Darüber hinaus konnte gezeigt werden, dass eine Hochskalierung der Permanentmagnet-Systeme für Betondeckungen von mindestens 15 cm möglich ist. Flächenoptimierte Varianten für die Untersuchung von Querspanngliedern in Fahrbahnplatten erreichen bis zu 4000 m² pro Tag, vgl. Bild 3b.



Bild 3: Mobile Streufluss-Prüftechnik für Spannbeton, (a) portables Prüfsystem für Betonmasten (Bildquelle: Fraunhofer IZFP/Bellhäuser/DGZfP-VNB 90/28.08.17); **(b) MobiRem System zur Prüfung von Querspanngliedern** (Bildquelle: Ingenieure für Bauwesen – Prof. Hillemeier & Knapp GmbH, Berlin/DGZfP-VNB 89/28.08.17).

3 Prüfaussage und Grenzen der Verfahren

Ein wesentlicher Aspekt bei der Anwendung der magnetischen Streufeldmessung ist das Wissen um die Grenzen des Verfahrens. Die Grenzen ergeben sich durch ein Zusammenspiel der Gesamtmenge an Spannstahl, des Anteils an gebrochenem Spannstahl, der Betondeckung, der Menge an Betonstahlbewehrung und deren Lage, die Stärke des anregenden Magnetfelds, sowie der Auflösung des gemessenen Magnetfelds. Brüche werden anhand charakteristischer Magnetfeldsignale erkannt. Mit zunehmendem Grad der Bewehrung sinkt die Detektionsmöglichkeit von Einzeldrahtbrüchen eines Spannglieds. Im Vorfeld einer Untersuchung ist es daher zweckmäßig, das zu untersuchende Bauteil im Labor oder in Simulationsrechnungen nachzustellen, um die zu erwartenden Streufeldsignale aus Kalibriermessungen erhalten zu können.

Je tiefer das Spannglied liegt, desto weniger ausgeprägt ist ein Bruchsignal. Daher sind vor jeder Messung die Tiefenlage der Spannbewehrung festzustellen und die erzielbare Aussagegenauigkeit abzuschätzen. Mit dem Verfahren können Spannglieder mit einer Betondeckung von bis zu 30 cm magnetisiert werden. Die Erfassung des Magnetfelds mit Magnetfeldsensoren gelingt bis in eine Tiefe von ca. 20 cm ([2], [3]). Spannstahlschäden, welche die Standsicherheit von Spannbetonbauteilen beeinträchtigen, werden sicher erkannt ([17], [18], [19], [20]).

In [21] wird über Untersuchungen zur Verifizierung von Ergebnissen des Verfahrens an einem Brückenbauwerk berichtet. Die Relevanz des Verfahrens wurde nachgewiesen und es kann aufgrund detaillierter Radaruntersuchungen an Verdachtsstellen und verbesserter Auswertemethoden mittlerweile von einer Relevanz zwischen 70 und 80 % ausgegangen werden.

Langjährige baupraktische Erfahrungen sowie die Bewertung der Untersuchungsergebnisse von [22] und [23] ergaben, dass bei der Untersuchung eines Bauteils folgende Fälle unterschieden werden sollten:

1. gering bewehrte Bauteile mit sofortigem Verbund unter Verwendung von Einzelspanndrähten
2. Spannbetonbauteile mit nachträglichem Verbund unter Verwendung von „Einstabankern“
3. Spannbetonbauteile mit nachträglichem Verbund unter Verwendung von Spannstahlbündeln

Die Fälle 1 und 2 gelten als unkritisch für die Detektion auch von geringen Querschnittsverlusten. Im Fall 3 können im Normalfall Spanngliedschädigungen ab 20 bis 25 % der Querschnittsfläche detektiert werden [23]. Bei Laboruntersuchungen wurden Spanngliedschädigungen ab ca. 15 % Querschnittsverlust detektiert ([22], [23]).

4 Weiterentwicklungen

Die magnetische Streufeldmessung ist bereits zum jetzigen Zeitpunkt ein ausgereiftes Verfahren zur Ortung von Brüchen an Spannstählen in verschiedensten Spannbetonbauteilen. Die gerätetechnischen Weiterentwicklungen, um eine breitere Anwendbarkeit dieser Prüftechnik zu erreichen, gehen in Richtung einer Leistungssteigerung sowie einer Optimierung der Prüfaussage bezüglich Analyse und Darstellung der Messergebnisse.

Die numerische Simulation der magnetischen Streufeldmessung und der Remanenzmessung ([12], [24]) wird weiterentwickelt. Hierbei ist besonderes Augenmerk auf die Verwendung realitätsnaher Stoffgesetze zur Beschreibung der Hysterese von Spann- und Betonstahl unter der Berücksichtigung der magnetostriktiven Effekte zu legen. Hierzu sind die entsprechenden experimentellen Voraussetzungen zu entwickeln. Ziel sollte eine sichere rechnerische Vorhersage der möglichen Bruchdetektion auf der Basis vorhandener Bewehrungspläne sowie die Verbesserung der Signalauswertung durch den Vergleich von simulierten und gemessenen Signalen sein.

Weiterhin könnte das Verfahren zur Schärfung der Aussagekraft mit dem Verfahren der Georadarmessung gekoppelt werden. Eine synchrone Messung mit beiden Verfahren kann eine Fehlinterpretation von Bruchsignalen verbessern und Hinweise auf Bereiche mit Feuchtigkeit bzw. Durchsalzungen liefern [25].

Die Anwendungsfelder der magnetischen Verfahren zur Spannstahlbruchortung sind vielfältig, so dass neben Brücken auch Parkhäuser, Hallen und Hyperschalenkonstruktionen sowie Windenergieanlagen und andere Spannbetonmasten von Relevanz sind. Generell ist es ratsam, die Untersuchungsbereiche für die magnetische Streufeldmessung einzugrenzen. Hierfür bietet sich bei flächigen, chloridbelasteten Bereichen die Potentialfeldmessung an. Auch durch ingenieurmäßigen Sachverstand und die Durchsicht der vorhandenen Planunterlagen können gefährdete Bereiche im Spanngliedverlauf eingegrenzt werden. Jedoch können auch diese Bereiche an Brückenbauwerken große und schlecht zugängliche Flächen umfassen. Als Vision wäre gerade für diese Anwendung eine robotergesteuerte Prüfanlage denkbar, die den Prüfkopf präzise am gewünschten Messbereichen entlangführt. Mit einer solchen Anlage könnten der zeitliche Bedarf der Messung sowie die notwendigen Sperrzeiten für die Infrastruktur deutlich reduziert werden.

5 Literatur

- [1] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung: Handlungsanweisung zur Überprüfung und Beurteilung von älteren Brückenbauwerken, die mit vergütetem, spannungsrissskorrosionsgefährdetem Spannstahl erstellt wurden. Ausgabe 06/2011, Bonn 2011.
- [2] Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein e. V. (Hrsg.): Anwendung zerstörungsfreier Prüfverfahren im Bauwesen, DBV Merkblatt, 2014.
- [3] Mertens (Hrsg.), Handbuch Bauwerksprüfung, Kap. 4.2 „Zerstörungsfreie Prüfverfahren im Bauwesen“, Verlagsgesellschaft Rudolf Müller, Köln, 2015.
- [4] Kusenberger, F. N. and Barton, J. R.: Detection of flaws in reinforcement steels in prestressed concrete bridges, Washington DC, Final Report FH-WA/RD-81/087, Federal Highway Administration 1981.
- [5] Hillemeier, B., Flohrer, C. und Schaab A.: Zerstörungsfreie Ortung von Spannstahlbrüchen in Spannbeton-Deckenträgern. In: Beton- und Stahlbetonbau 84, 1989, S. 168–270.
- [6] Sawade, G. und Menzel, K.: Zerstörungsfreie Feststellung von Spannstahlrissen in vorgespannten Deckenträgern. In: Werkstoffe und Korrosion 40, 1989, S. 456 f.
- [7] Ghorbanpoor, A.: Magnetic-based NDE of steel in prestressed and post-tensioned concrete bridges. In: Proc. Structural Materials Technology III, San Antonio, Texas, 1998, S. 343–349.
- [8] Scheel, H.: Spannstahlbruchortung an Spannbetonbauteilen mit nachträglichem Verbund unter Ausnutzung des Remanenzmagnetismus, Berlin, Ph.D. Thesis, D 83, Technische Universität Berlin, 1997.
- [9] Sawade, G.: Mobiles SQUID-Meßsystem zur Bauwerksinspektion, Teilvorhaben Magnetisierungsvorrichtung und Signalverarbeitung, Forschungsbericht 13 N 7249/3, Bundesministerium für Bildung Wissenschaft, Forschung und Technologie, 2001.
- [10] Krause, H.-J., Glaas, W., Zimmermann, E., Faley, M. I., Sawade, G., Mattheus, R., Neudert, G., Gampe, U. und Krieger, J.: SQUID array for magnetic inspection of prestressed concrete bridges. In: Physica C 368, 2002, S. 91–95.
- [11] Sawade, G., Straub, J., Krause, H.-J., Bousack, H., Neudert, G. and Ehrlich, R.: Signal analysis methods for remote magnetic examination of prestressed elements. In: Proc. Intl. Symposium on NDT in Civil Engineering (NDT-CE), Berlin, Vol.II, DGZfP, 1077–1084, 1995.
- [12] Sawade, G., Krause, H.-J.: Inspection of prestressed concrete members using the magnetic leakage flux measurement method - Estimation of detection limit. In: Advances in Construction Materials 2007, Ed: C. Grosse, Springer-Verlag, Berlin, 2007, S. 639–649.
- [13] Sawade, G., Krause, H.-J.: Prüfung von Spannbetonteilen mit magnetischen Methoden, Beton- und Stahlbetonbau 105, 2010, S. 154-164.
- [14] Nussbaum, J.M.: Zur Erkennbarkeit von Drahtbrüchen in Stahlseilen durch Analyse des magnetischen Störstellenfeldes, Dissertation, Universität Stuttgart, 1999.
- [15] Szielasko, K., Youssef, S., Sourkov, A., Kurz, J.H., Pushkarev, S. und Birringer, R.: Magnetic Flux Leakage Detection of Corrosion Damage in Prestressed Concrete Poles. In: Knopp et al. (Eds.): Electromagnetic Nondestructive Evaluation (XIII): ENDE 2009. Amsterdam, Washington, Tokyo: IOS Press, 2010, S. 203-210.
- [16] Youssef, S., Szielasko, K., Kurz, J.H. und Tschuncky, R.: Nondestructive testing systems with magnetic flux leakage (MFL). In: Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V. (DGZfP): World Conference on Nondestructive Testing (19): WCNDT 2016. Poster P100. (DGZfP-Berichtsband 158), 2016.

- [17] Krieger, J.: Einsatz von SQUID-Systemen bei der zerstörungsfreien Prüfung von Spannbetonbauwerken, Schlussbericht des BAST-Projektes 97 242/B4, Bergisch-Gladbach 2000.
- [18] Mietz, J. und Fischer, J.: Verifizierung zerstörungsfreier Prüfverfahren zur Detektion von Spannstahlschäden an Spannbetonbauteilen mit nachträglichem Verbund. In: Beton und Stahlbetonbau 100, 2005, S. 656–663.
- [19] Hillemeier, B., Taffe, A.: Aktuelle Regelwerke der Bauwerksdiagnostik, In: Bauphysik-Kalender 2012, Berlin: Verlag Ernst & Sohn, S. 57-101.
- [20] Walther, A.: Vergleichende Signalinterpretation von Spannstahlbrüchen im remanenten und aktiven magnetischen Streufeld, Dissertation, Technische Universität Berlin, 2012.
- [21] Taffe, A., Hillemeier, B. und Walther, A.: Verifizierung moderner zerstörungsfreier Prüfverfahren an einem Abbruchbauwerk, Beton- und Stahlbetonbau 105 (2010) 12, Ernst & Sohn, S. 813–820.
- [22] Ramrath, M.: Quantitative Bewertung von magnetischen Streufeldsignalen mittels normierter Bruchamplituden, Diplomarbeit, Universität Stuttgart, 1998.
- [23] Steinfeld, B.: Untersuchungen zur Bestimmung der Nachweisgrenzen der Detektion von Spannstahlbrüchen in Spannbündeln mit der Methode der magnetischen Streufeldmessung. Diplomarbeit, Universität Stuttgart, 2014.
- [24] Pak, C.: Optimierung des Remanenzmagnetismus-Verfahrens zur Stahlbruchortung in Bauwerken – Theoretische Weiterentwicklung, Dissertation, Technische Universität Berlin, 2010.
- [25] Krause, H.-J., Rath, E., Sawade, G. und Dumat, F.: Bestimmung der Feuchte und des Chloridgehaltes von Beton mit der Radar-Magnet-Betontest-Methode. In: Messtechnik im Bauwesen 1/2009, S. 77–82.

6 Autorenverzeichnis

Dieses Positionspapier wurde vom Unterausschuss „Magnetische Verfahren zur Spannstahlbruchortung“ des DGZfP Fachausschusses „Zerstörungsfreie Prüfung im Bauwesen“ erstellt.

Dipl.-Ing. Bente Ebsen
HOCHTIEF Engineering GmbH

Dr.-Ing. Christian Fischer
Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart

Prof. Dipl.-Ing. Claus Flohrer
Ingenieurbüro für Bauwesen

Dr.-Ing. Martin Frieze
Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)

Prof. Dr.-Ing. Bernd Hillemeier
Ingenieure für das Bauwesen Professor Hillemeier & Knapp GmbH

Dipl.-Ing. Simon Knapp
Ingenieure für das Bauwesen Prof. Hillemeier & Knapp GmbH

Dr. Hans-Joachim Krause
Forschungszentrum Jülich Peter Grünberg-Institut

Dr.-Ing. Dipl.-Geophys. Jochen Kurz (Vorsitzender)
DEUTSCHE BAHN AG, DB Systemtechnik GmbH

Dr.-Ing. Gottfried Sawade[†]
Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart

Dr.-Ing. Klaus Zielasko
Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie (IZFP)

Prof. Dr.-Ing. Alexander Taffe
HTW - Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin

Prof. Dr.-Ing. Andrei Walther
BauConsulting Dr. Walther GmbH & Co. KG

Dipl.-Ing. Hans-Joachim Wichmann
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der TU Braunschweig