

Detektion von Ermüdungsbrüchen bei Stahlbetonbrücken

Thomas VOGEL*, Thomas WOLF*, Patrick FEHLMANN*

* Institut für Baustatik und Konstruktion, ETH Zürich, CH-8093 Zürich,
vogel@ibk.baug.ethz.ch

Kurzfassung. Ermüdungsbrüche sind bei Stahlbetonbrücken am ehesten in Rahmenecken von Unterführungen und Bachdurchlässen unter Schwerverkehr zu erwarten, wurden aber bis heute kaum gefunden. Parallel zu einem Großversuch mit einem zyklisch belasteten Stahlbetonrahmen wurde die magnetische Streufeldmethode, die sich in Vorversuchen bereits als geeignet erwiesen hatte, als zerstörungsfreie Prüfmethode verwendet. Einzelne Ermüdungsbrüche konnten erkannt und lokalisiert werden; für eine Anwendung im Feld ist noch Entwicklungsarbeit zu leisten.

1 Ermüdung im Stahlbeton

Das Phänomen der Ermüdung ist in metallischen Werkstoffen wie Stahl und Aluminium gut erfasst. Als Ermüdungsfestigkeit wird der ertragbare Wert der Spannungsdifferenz $\Delta\sigma$ bei einer endlichen Anzahl Lastwechsel N bezeichnet. Diese kann in Dauerschwingversuchen bestimmt werden. Werden sowohl $\Delta\sigma$ als auch N logarithmisch aufgetragen, beschreiben die sogenannten Wöhlerlinien als Geraden mit materialabhängiger Steigung m die Ermüdungsfestigkeit abhängig von der Lastwechselzahl. Die Teilschäden unterschiedlicher Spannungsdifferenzen, wie sie in der Praxis vorkommen, lassen sich mit der Hypothese der linearen Schadensakkumulation nach Palmgren [1] und Miner [2] aufsummieren. Ist die Spannungsdifferenz genügend klein, führt auch eine beliebig große Lastwechselzahl nicht zu einem Bruch und man spricht von einer Dauerfestigkeit.

Beim Stahlbeton als Verbundwerkstoff sind die Komponenten Betonstahl und Beton einzeln und der Verbund zusätzlich zu betrachten. In der Regel – zumindest bei Biegebeanspruchung – ist der Betonstahl maßgebend; deshalb soll in der Folge auch nur dieser behandelt werden.

1.1 Ermüdung im Betonstahl

Betonstahl, wie er für Bewehrungen eingesetzt wird, hat kleinere Ermüdungsfestigkeiten als glatter Stahl, da die Rippen und Walzzeichen der Hersteller zu Kerbwirkungen führen. Eigene Versuche an fabrikneuen sowie alten, aus Bauwerken gewonnen Stäben ergaben Ermüdungsfestigkeiten (bei $N = 2 \cdot 10^6$) von 200 bis 260 N/mm², was mit Werten in der Literatur, z.B. [3], übereinstimmt, siehe auch [4]. In Normen sind tiefere Werte enthalten, die zum Teil noch eine Sicherheitsmarge enthalten. Weitere Einflüsse, die die Ermüdungsfestigkeit reduzieren, sind Abbiegungen und Schweißungen infolge der Verfestigung bzw. Aufhärtung und Korrosionsnarben infolge der Kerbwirkung. Abbiegungen werden in den Normen durch einen Reduktionsfaktor berücksichtigt, Schweißungen sollten bei ermüdungsgefährdeten Konstruktionen generell vermieden werden und über den Einfluss der Korrosion liegen bislang kaum Ergebnisse vor.

Eine eigentliche Dauerfestigkeit von Bewehrungsstahl lässt sich nicht experimentell nachweisen; deshalb wird für hohe Lastwechselzahlen eine flachere Wöhlerkurve angenommen.

1.2 Ermüdungsgefährdung von Stahlbetonbrücken

Die Ermüdung war bei Eisenbahnbrücken schon immer ein maßgebendes Bemessungskriterium. Bei Straßenbrücken ist dies zunehmend auch der Fall, wenn die bisherige Entwicklung in die Zukunft extrapoliert wird.

1.2.1 Einwirkungen

Verkehrslasten sind von ihrer Natur her dynamisch und repetitiv und werden lediglich für die Nachweise der Tragsicherheit als statisch angenommen. Maßgebend sind die Achslasten des Schwerverkehrs. Diese sind zwar bezüglich ihrer Größe gesetzlich beschränkt; die zulässige maximale Achslast nimmt jedoch tendenziell zu und wird nicht immer eingehalten. Die Frequenz kann nicht beschränkt, sondern allenfalls gemessen werden, und nimmt weiter zu, bis die Sättigung des Straßenabschnitts erreicht ist.

1.2.2 Gefährdete Bauteile und Systeme

Die Ermüdungsgefährdung von Tragwerken lässt sich zwar nur bedingt aus dem Ermüdungsverhalten der beteiligten Baustoffe herleiten, da zu viele Parameter unbekannt oder von den konkreten Verhältnissen abhängig sind. Trotzdem ist offensichtlich, dass die Ermüdung des Betonstahls, d.h. der Bewehrung, im Vordergrund steht.

Da bei ungesichertem Wissensstand die Normvorschriften eher auf der sicheren Seite liegen, lässt sich bei vielen Tragwerken eine genügende Ermüdungssicherheit rechnerisch nicht nachweisen. Das heißt noch nicht, dass diese auch akut gefährdet sind; es zeigt aber, bei welchen Tragwerken und Bauteilen Ermüdungsschäden am ehesten zu erwarten sind. Vor allem diejenigen Bauteile, die von den Radlasten direkt belastet werden und relativ schlank sind, weisen die größten Spannungsdifferenzen in der Bewehrung auf, d.h. die Fahrbahnplatten und die Riegel der kleinen Rahmen, wie sie für Bachdurchlässe und Unterführungen verwendet werden. Bei den Fahrbahnplatten werden insbesondere die Konsolen von Hohlkastenbrücken hoch beansprucht. Wird die äußerste Spur jedoch als Standspur genutzt, treten keine großen Lastwechselzahlen auf; wird sie als Fahrspur benutzt, hilft der üblicherweise eingehaltene Abstand der Räder vom Fahrbahnrand, der in der statischen Berechnung nicht berücksichtigt wird, um die Beanspruchung zu reduzieren.

Anders ist die Situation bei Rahmenbrücken, insbesondere bei schmalen Fahrspuren. Alle Räder belasten die Platten etwa an denselben Stellen, die Bewehrung ist in den Rahmenecken abgebogen, häufig mit minimalem Radius und weist tendenziell infolge Verlegeungenauigkeiten eine minimale statische Höhe, d.h. einen verminderten Hebelarm auf.

1.2.3 Beobachtungen

Trotz dem an sich klaren Gefährdungsbild und obwohl sie rechnerisch bereits eingetreten sein sollten, werden in den genannten Situationen kaum Ermüdungsbrüche festgestellt. Dies liegt wohl daran,

- dass in den Rahmenecken die Betonoberfläche nicht zugänglich, sondern mit Abdichtung und Belag versehen ist,
- dass auch im Rahmen einer Instandsetzung, wenn Abdichtung und Belag entfernt und ersetzt werden, Ermüdungsbrüche nicht zum Vorschein kommen,
- dass bei geschädigter und freigelegter Bewehrung entdeckte Bewehrungsbrüche wohl eher auf Korrosion zurückgeführt werden,

- oder zusammenfassend, dass nicht aktiv nach Ermüdungsbrüchen gesucht wird.

2 Detektion von Bewehrungsbrüchen

2.1 Prüfmethoden

Bis heute ist es nur mit großem Aufwand möglich, Brüche in einbetonierten Bewehrungsstäben mit zerstörungsfreien Maßnahmen zu lokalisieren. Neben den zerstörenden existieren eine Reihe ZfP-Methoden, mittels derer der Zustand des Betons bzw. der Bewehrung untersucht werden kann. Scheel [5] zeigt ZfP-Verfahren zur Detektion von Spannstahlbrüchen auf (z. B. Durchstrahlungsmethoden, Messung der Anziehungskraft auf einen jochförmigen Magneten, Einspeisung eines elektromagnetischen Impulses in den Spannkopf) und weist auf deren Anwendungsmöglichkeiten und Einschränkungen durch Messungenauigkeiten hin.

2.2 Magnetische Streufeldmethode

2.2.1 Phänomen des Remanenzmagnetismus

Durch das Anlegen eines äußeren Magnetfeldes lassen sich ferromagnetische Materialien magnetisieren. Es bildet sich ein eigenständiges Magnetfeld, das nach Abschalten oder Entfernen des primären Magneten als Rest- bzw. Remanenzmagnetismus verbleibt [6]. Die verschiedenen ferromagnetischen Materialien weisen unterschiedliche magnetische Hysteresis-Kurven auf, aus denen die Beziehung von magnetischer Feldstärke des einwirkenden Feldes zu magnetischer Flussdichte des im Material etablierten Feldes ablesbar ist.

2.2.2 Prinzip der Methode

Die magnetische Streufeldmethode basiert auf der Tatsache, dass an Brüchen eines Ferromagneten – in diesem Fall des aufmagnetisierten Bewehrungsstabs – ein Streufeld entsteht, das an der Betonoberfläche durch Messung der magnetischen Flussdichte (abrunder Steigungswinkel der stabparallelen Komponente) nachgewiesen werden kann. Wie noch gezeigt wird, enthalten auch die radiale und die tangentielle Komponente des Streufeldes Informationen, die ausgewertet werden können.

2.2.3 Bisherige Anwendungen im Betonbau

Zum Detektieren von Spanndrahtbrüchen wird die magnetische Streufeldmethode seit Beginn der 1980er Jahre in den USA und seit Ende der 1980er in Deutschland angewendet [4]. Bei der Spannstahlbruchortung kommen im Wesentlichen zwei Verfahren zum Tragen, welche sich in der Anordnung der Sensoren und im Zeitpunkt der Flussdichtemessung unterscheiden. Zum einen können die Sensoren nahe dem Magneten bzw. zwischen dessen Jochenden angeordnet und die Messung der magnetischen Flussdichte während des Magnetisierungsvorganges durchgeführt werden. Zum anderen können Aufmagnetisierung und Messung des Magnetfeldes auch räumlich und/oder zeitlich getrennt erfolgen.

In den Arbeiten von Hillemeier [7], [8], [9] und Scheel [10] werden das Remanenzmagnetismus-Verfahren und damit durchgeführte Feldversuche ausführlich beschrieben. In den Dissertationen von Kloster [11] und Scheel [12] sind detaillierte Informationen zu den verwendeten Geräten und Versuchsanordnungen festgehalten.

2.3 Anwendungen zur Detektion von Brüchen der schlaffen Bewehrung

Im Gegensatz zu anderen ZfP-Verfahren hat die magnetische Streufeldmethode den Vorteil, dass der Beton für die Untersuchung keinerlei dämpfenden oder abschirmenden Ein-

fluss aufweist, sofern keine ferromagnetischen Bestandteile eingearbeitet wurden. Der kritische Punkt ist vielmehr der Abstand zwischen der zu untersuchenden Bewehrung und dem Sensor. Da der Betonstahl eine kleinere Überdeckung als der Spannstahl aufweist, erleichtert dies die Untersuchung.

Während der Literaturrecherche konnten keine Informationen darüber gefunden werden, ob es Bestrebungen im In- und Ausland gab oder gibt, Brüche in der Betonstahlbewehrung zu detektieren. Der Grund ist wohl darin zu suchen, dass im Spannbeton das Schwergewicht bei den Spanngliedern liegt und bei der schlaffen Bewehrung die Korrosion im Vordergrund steht, die mit der Potenzialmessung erkannt werden kann.

3 Detektion von Bewehrungsbrüchen

3.1 Verwendete Messeinrichtung

Die magnetische Flussdichte wird mit Förstersonden gemessen, die im Handel erhältlich sind. Nach anfänglichen Versuchen mit einem analogen Messgerät, einem sogenannten Gaußmeter, wurden alle weiteren Versuche mit einem Magnetometer durchgeführt, dessen drei Förstersonden für die drei Raumrichtungen nahe beieinander auf einen Print montiert sind, siehe **Abbildung 1**. Bei der späteren Auswertung konnten diese Abstände berücksichtigt und korrigiert werden, so dass grundsätzlich in jedem Punkt des Koordinatensystems, der für die Sensoren zugänglich ist, der räumliche Vektor der Flussdichte bestimmt werden kann.

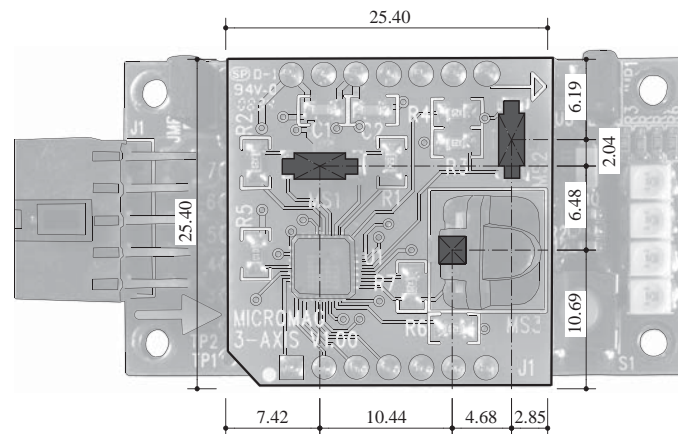


Abbildung 1 Draufsicht auf den Print des MicroMag 3-Axis Magnetometers mit Vermassung der drei Förstersonden in mm, aus [13]

Das Magnetometer wurde auf einen Messwagen montiert, womit sichergestellt werden soll, dass der Abstand von der Betonoberfläche konstant bleibt. Mit einem an ein Rad montierten Rotationsencoder kann die Längskoordinate erfasst und aufgezeichnet werden, Detail A in **Abbildung 2**.

Für die Messeinrichtung wurden nur nicht-ferromagnetische Materialien wie Aluminium und Holz verwendet, um die Messungen nicht zu beeinflussen.

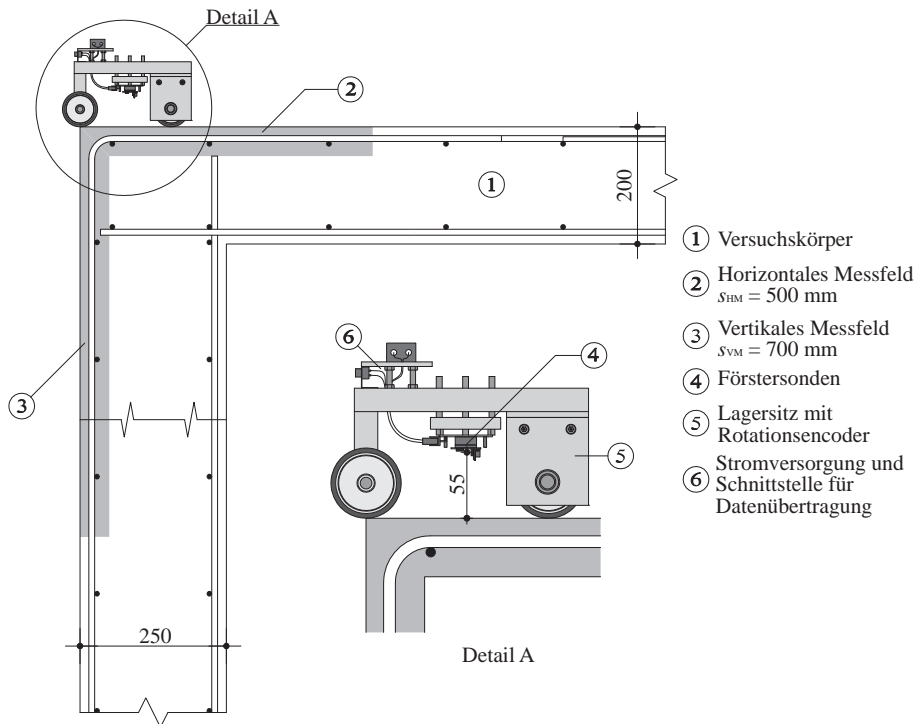


Abbildung 2 Rahmeneck mit Messwagen und Messfeldern, Abmessungen in mm, aus [13]

3.2 Aufmagnetisierung

Die Aufmagnetisierung der Bewehrung erfolgte bisher mit starken Permanentmagneten aus einer Neodym-Eisen-Bor-Legierung. Bei dickeren Bewehrungen und größerer Betondeckung ist auch der Einsatz eines Elektromagneten denkbar.

3.3 Vorversuche

Die ersten Versuche wurden an einem einzelnen, nicht einbetonierten Bewehrungsstab durchgeführt. Insbesondere ging es darum, den Einfluss des Sensorabstandes zum Bewehrungsstab zu erfassen.

Anschließend wurden drei quadratische Stahlbetonplatten mit einer Seitenlänge von 520 mm und einer Dicke von 100 mm erstellt.

- In der ersten Platte variierte einzig die Betondeckung der vier Bewehrungsstäbe.
- In der zweiten Platte wurden zwei alte, freigelegte Bewehrungsstäbe einer 50 Jahre alten Brücke einbetoniert. Beide Stäbe waren im Rahmen der in [4] beschriebenen zyklischen Ermüdungsversuche zu Bruch gebracht worden. Der dritte Bewehrungsstab wurde mit einer Kerbe von der Tiefe des halben Stabdurchmessers versehen und der vierte war durch Lochfraßkorrosion geschädigt.
- In die dritte Platte wurden ein abgebogener und zwei gestoßene Bewehrungsstäbe einbetoniert.

3.4 Großversuch

Die eingangs geschilderte Beurteilung des Gefährdungsbildes *Ermüdung von Stahlbetonbrücken* führte in einem parallel durchgeführten Forschungsprojekt zu einem zyklischen Belastungsversuch eines Stahlbetonrahmens, der häufig vorkommenden Stahlbetonrahmen im Schweizer Nationalstraßensystem im Maßstab 1:2 entsprach.

Der Prüfkörper wies eine Spannweite $l = 3.60 \text{ m}$, eine Breite $b = 1.50 \text{ m}$ und eine Wandhöhe von $h = 2.60 \text{ m}$ auf. Wände und Riegel waren 0.25 m bzw. 0.20 m dick. Zu-

sammen mit den Streifenfundamenten wog er knapp 12 Tonnen, was der Kapazität eines der beiden Hallenkrane in der Versuchshalle der ETH Zürich auf dem Höggerberg entspricht, siehe **Abbildung 3**. Alle weiteren Details können dem Versuchsbericht [13] entnommen werden.

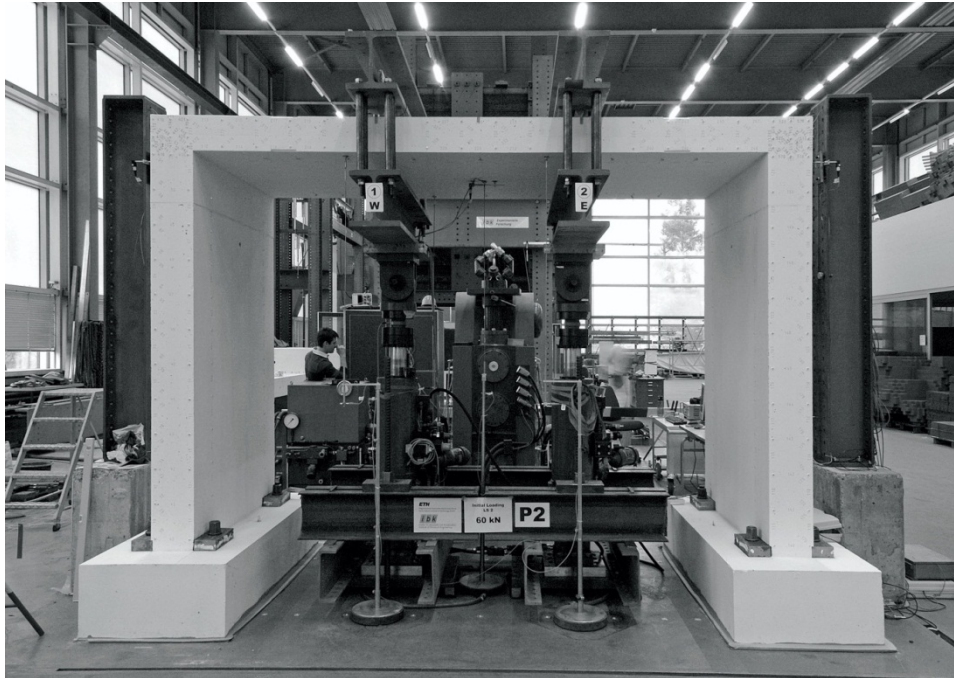


Abbildung 3 Prüfkörper und Belastungseinrichtung des Großversuchs, aus [13]

Der Rahmen wurde mit zwei Paaren von hydraulischen Pressen in den Drittelpunkten des Riegels vertikal belastet. Nach einer statischen Erstbelastung in vier Laststufen wurde er zyklisch so belastet, dass die Unterlast 20 kN und die Oberlast 120 kN pro Presse betrug. Die Untersuchungen mit der magnetischen Streufeldmethode wurden in insgesamt sieben Messdurchgängen durchgeführt, mit Schwergewicht ab 2 Mio. Lastzyklen, weil erst dann mit Schäden in der Bewehrung zu rechnen war.

Die zunehmende Schädigung des Versuchskörpers im Verlauf der zyklischen Belastung zeigte sich nicht nur im Risswachstum, sondern auch in den bleibenden Verformungen. In der Rahmenecke Ost begannen die Stäbe zu brechen, so dass sich diese der Momentenbeanspruchung entzog und zum Gelenk wurde. Dies führte zu einer Momentenumlagerung in den Feldbereich und einem horizontalen Ausweichen des Rahmens.

Bei 2'484'000 Lastzyklen wurde der Versuch schließlich abgebrochen, da die Zylinderwege über 6 mm betragen und das Ölvolumen nicht mehr reichte, um die Lastdifferenz aufrecht zu erhalten. Anschließend wurde die Betondeckung in den Rahmenecken entfernt; alle 25 Bewehrungsstäbe der Rahmenecke Ost waren gebrochen, dazu 18 im Feldbereich und einer der Rahmenecke West. 19 Brüche in der Rahmenecke Ost wurden als Ermüdungsbrüche mit glatter Trennfläche und die übrigen 6 als Verformungsbrüche mit ausgeprägter Einschnürung klassiert.

4 Versuchsergebnisse

4.1 Vorversuche

Die Vorversuche zeigten, dass Brüche grundsätzlich detektierbar sind und dass die Deutlichkeit des Signals – wie erwartet – vom Abstand zwischen Sensoren und Bewehrungsstab, sowie vom Abstand und der Ebenheit der Bruchflächen abhängt, siehe **Abbildung 4**.

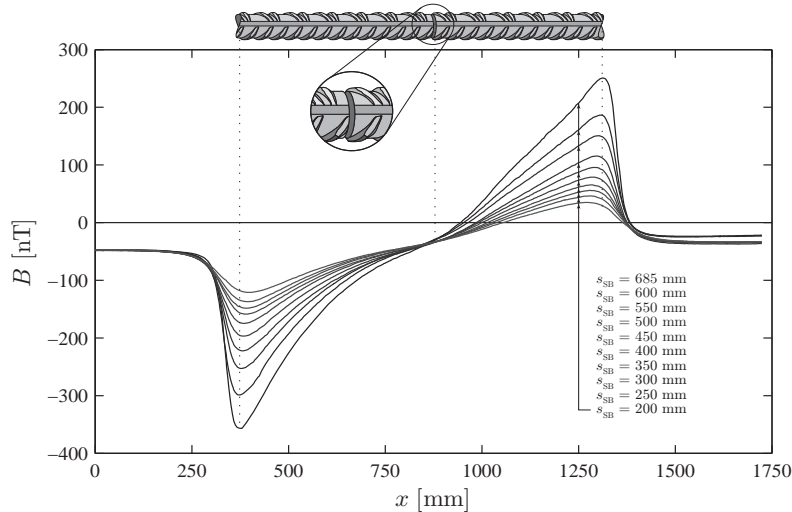


Abbildung 4 Stabparallele Komponente der magnetischen Flussdichte bei verschiedenen Abständen zwischen Bewehrungsstab und Sensor, aus [14]

Auch bei symmetrischer Messanordnung sind die Resultate in der Regel nicht ganz symmetrisch, weil jeweils noch das Erdmagnetfeld mit gemessen wird.

4.2 Großversuch

Im Großversuch gestaltet sich die Aufgabe etwas schwieriger. Wenn es jedoch möglich ist Messungen durchzuführen, bevor Stäbe gebrochen sind, kann ein Bruch in der Regel erkannt und seine Lage bestimmt werden, siehe **Abbildung 5**.

Im Gegensatz zu hier nicht näher beschriebenen weiteren Kleinversuchen ist es aber kaum möglich, Ermüdungsbrüche von Verformungsbrüchen zu unterscheiden.

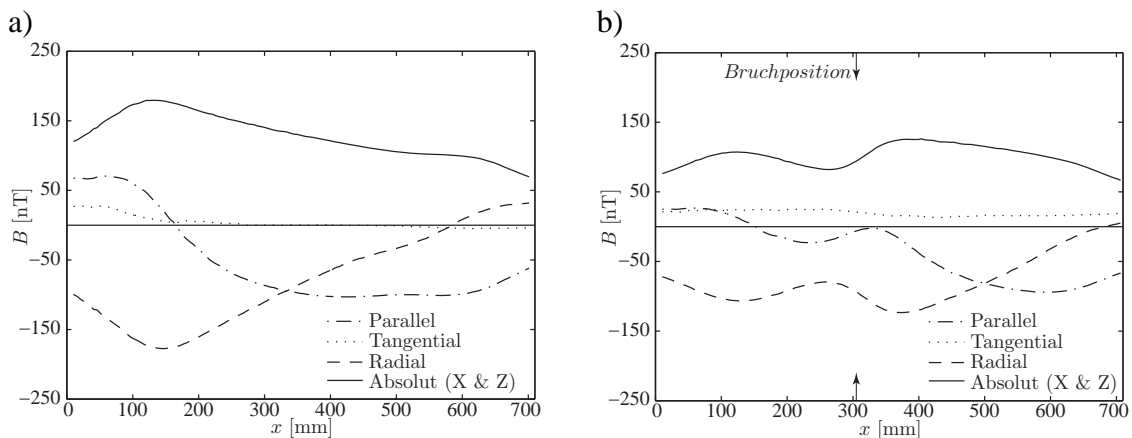


Abbildung 5 Komponenten der magnetischen Flussdichte für Bewehrungsstab Nr. 16
a) vor der zyklischen Belastung, b) nach 2.65 Mio. Lastwechsel und einem Ermüdungsbruch bei $x = 305$ mm, nach [15]

5 Schlussfolgerungen und Ausblick

Bisher konnte zumindest in einer Laborumgebung gezeigt werden, dass die magnetische Streufeldmethode grundsätzlich funktioniert, um Bewehrungsbrüche zerstörungsfrei zu detektieren. Bis zu einer praktischen Feldanwendung ist jedoch noch ein weiter Weg zurückzulegen.

Nächste Schritte dazu sind

- eine Automatisierung und Optimierung der Aufmagnetisierung,
- eine Automatisierung der Messungen durch leichtere, in zwei Richtungen bewegliche Sensoren,
- allenfalls die Verwendung mehrerer Sensoren pro Richtung im Sinne eines Arrays,
- eine Verbesserung der Auswertungssoftware mit bildlicher Darstellung der Messwerte,
- ein tieferes theoretisches Verständnis der Eigenschaften von Streufeldern, verbunden mit deren numerischer Simulation.

Da die eingangs geschilderte Ermüdungsgefährdung noch nicht akut ist, sollte noch etwas Zeit zur Verfügung stehen um das Verfahren zur Praxisreife zu entwickeln.

Referenzen

- [1] Palmgren, A. (1924). *Die Lebensdauer von Kugellagern*; Zeitschrift des Vereins Deutscher Ingenieure, Vol. 68; pp. 339-341.
- [2] Miner, M.A. (1945). *Cumulative Damage in Fatigue*; Journal of Applied Mechanics – Transactions of the ASME; Vol. 12, No. 3; pp. A159-A164.
- [3] Fernández Canteli, A.; Esslinger, V. und Thürlimann, B. (1984). *Ermüdungsfestigkeit von Bewehrungs- und Spannstählen*; IBK-Bericht Nr. 8002-1; ETH Zürich, Zürich; 87 pp.
- [4] Fehlmann, P. und Vogel, T. (2009). *Versuche zur Ermüdungsfestigkeit alter Betonstähle*; Beton- und Stahlbetonbau; Vol. 104, Nr. 7; pp. 416-423.
- [5] Scheel, H. (2006). *Spanndrahtbruchortung mit der magnetischen Streufeldmethode*; Beton und Stahlbetonbau; Vol. 101, Nr. 8; pp. 614-621.
- [6] Tipler, P. A. und Mosca, G. (2004). *Physik – Für Wissenschaftler und Ingenieure*; Elsevier GmbH, München; 1388 pp.
- [7] Hillemeier, B. und Scheel, H. (1999). *Neue Methoden der zerstörungsfreien Prüfung im Stahlbeton- und Spannbetonbau*; Fachtagung Bauwerksdiagnose – Praktische Anwendungen Zerstörungsfreier Prüfungen; München, Januar 21-22, 1999; pp. 27-34.
- [8] Hillemeier, B. and Scheel, H. (2002). *Non-Destructive Location of Prestressing Steel Fractures in Post-Tensioned and Prestressed Concrete*; Transportation Research Board (TRB) Committee A2C03; Washington D.C., USA; January 16, 2002; pp. 1-11.
- [9] Hillemeier, B. and Scheel, H. (2003). *Location of Prestressing Steel Fractures in Concrete*; Journal of Materials in Civil Engineering; 15, 3; pp. 228-234.
- [10] Scheel, H. and Hillemeier, B. (1997). *Capacity of the Remanent Magnetism Method to Detect Fractures of Steel in Tendons Embedded in Prestressed Concrete*; NDT&E International; 30, 4; pp. 211-216.
- [11] Kloster, A. (2008). *Aufbau einer Entwicklungsplattform für niederfrequente magnetische Prüfverfahren*; Universität des Saarlandes, Saarbrücken; 138 pp.
- [12] Scheel, H. (1997). *Spannstahlbruchortung an Spannbetonbauteilen mit nachträglichem Verbund unter Ausnutzung des Remanenzmagnetismus*; Technische Universität Berlin, Berlin; 202 pp.
- [13] Fehlmann, P.; Wolf, T. und Vogel, T. (2011). *Versuche zum Ermüdungsverhalten von Stahlbetonbrücken*, IBK-Bericht Nr. 332, Institut für Baustatik und Konstruktion, vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich, Mai 2011; 95 pp.
<http://e-collection.library.ethz.ch/view/eth:3070>
- [14] Wolf, T., Vogel, T. (2010). *Experimental trials on the detection of reinforcement breaks with the magnetic flux leakage method*; Proceedings of the 5th International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management, Philadelphia (PA), USA, July 11-15, 2010.
<http://e-collection.library.ethz.ch/view/eth:4661>
- [15] Wolf, T.; Fehlmann, P.; Vogel, T. (2011). *First Applications on the Detection of Fatigue Breaks in Bridges with the Magnetic Flux Leakage Method*; Proceedings of the First Middle East Conference on Smart Monitoring, Assessment and Rehabilitation of Civil Structures, Dubai, UAE, Febr. 8-10, 2011.
<http://e-collection.library.ethz.ch/view/eth:2851>