

Nachwuchspreis der DGZfP 2023

Detektion von Spannstahlbrüchen mit der magnetischen Streufeldmessung unter Variation physikalischer und geometrischer Parameter

Jonathan Villing

MPA Universität Stuttgart, 70569 Stuttgart, www.mpa.uni-stuttgart.de

Kontakt E-Mail: Jonathan.Villing@mpa.uni-stuttgart.de

Kurzfassung. Die magnetische Streufeldmessung ist ein zerstörungs- und berührungsfreies Verfahren zur Detektion von Spannstahlbrüchen. Die Ursache vieler Spannstahlbrüche ist wasserstoffinduzierte Spannungsrisskorrosion, bei der Schäden bis zum Bauteilversagen ohne Vorankündigungsverhalten auftreten können. Um eine zuverlässige Detektion zu gewährleisten wurden physikalische und geometrische Parameter quantifiziert, denen die magnetische Streufeldmessung in der praktischen Anwendung unterliegt. Diese Parameter wurden in Laborversuchen variiert und durch statistische Methoden analysiert, wodurch die elementaren Einflussfaktoren separiert werden konnten. Außerdem wurde der Einfluss regelmäßiger und unregelmäßiger magnetischer Störeinflüsse untersucht.

Beispiel eines Schadensfalls

Im Zusammenhang mit Spannbetonbauwerken kam es in der Geschichte der Bautechnik immer wieder zu schwerwiegenden Schadensfällen. Ein Beispiel dafür ereignete sich im Jahr 1995, als in einer Fabrikhalle bei einem 17,50 m langen Spannbetonbinder ein Riss in Feldmitte bemerkt wurde. Dieser Riss klappte zum Zeitpunkt der Entdeckung etwa 5 cm auseinander, weshalb der Binder bereits um 20 cm abgesackt war. Glücklicherweise stürzte der Binder nicht ab, sondern konnte ausgebaut werden.

Da der Spannbetonbinder abgesehen von dem Gewaltbruch keine weiteren Risse aufwies, konnte niemand mit einem Versagen des Bauteils rechnen. Um die Ursache zu klären, wurde er eingehend untersucht.

Der Binder wurde im Jahr 1965 produziert und mit einem parabelförmig verlaufenden Spannglied aus insgesamt 16 Spannstählen Sigma oval der Festigkeitsklasse 145/160 vorgespannt. Beim Öffnen des Spanngliedhüllrohres wurde festgestellt, dass 16 von 16 Spannstählen in einem Bereich von 15 cm gebrochen waren und somit ein Querschnittsverlust des Spanngliedes von 100 % vorlag. Außerdem wurden an sieben weiteren Stellen des Binders Spannstahlbrüche und auf der gesamten Länge des Spanngliedes bis zu 50 Anrisse pro Meter gefunden.

Das Bauteil war in einem trockenen Innenraum verbaut und die Analysen ergaben, dass der Einpressmörtel keine korrosionsfördernden Substanzen enthielt. Anhand der chemischen Zusammensetzung des Spannstahls konnte eindeutig festgestellt werden, dass es sich um Sigma Spannstahl des neueren Typs aus dem Produktionszeitraum von 1965 bis 1978 handelte. Er wies unterschiedlich starke Korrosion auf, die teilweise auf Vorkorrosion im unverpressten Zustand zurückzuführen war [1].



Der Autor

Jonathan Villing erwarb 2016 seinen Bachelor of Engineering an der Technischen Hochschule Georg Simon Ohm, sammelte ein paar Jahre Berufserfahrung als Bauingenieur und begann anschließend sein Masterstudium an der Universität Stuttgart. Seit 2022 arbeitet er als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart und führt die Forschung seiner Masterarbeit an der magnetischen Streufeldmessung in Form einer Promotion weiter.

Spannungsrisskorrosion

Nachdem in den 90er Jahren viele vergleichbare Schadensfälle – teilweise mit Einsturzfolge – an zu dieser Zeit ungefähr 30 Jahre alten Spannbetonbauteilen auftraten, wurde intensiv nach der Ursache gesucht. Dabei konnten die Eigenschaften und Mechanismen der Spannungsrisskorrosion aufgedeckt werden [2]. Ein Beispiel für einen Spannstahlbruch infolge Spannungsrisskorrosion ist in Abbildung 1 zu sehen.



Abbildung 1: Beispiel eines Spannstahlbruchs infolge Spannungsrisskorrosion, der mit der magnetischen Streufeldmessung gefunden wurde

Das alkalische Milieu des Einpressmörtels bietet Spannstählen einen zuverlässigen Korrosionsschutz. Schäden können durch Fehler bei Bemessung, Konstruktion und Verarbeitung der Spannstähle entstehen. Typische Ausführungsmängel sind Verpressfehler und eine Vorschädigung der Spannstähle beim Einbau. Führen diese

Mängel dazu, dass ein korrosives Medium unter gleichzeitiger hoher Zugspannung auf einen empfindlichen Werkstoff trifft, kommt es zur Spannungsrisskorrosion. Dabei findet eine fortschreitende Rissausbreitung im kristallinen Gefüge statt. Die Anrisse, von denen dieses Risswachstum ausgeht, entstehen in Korrosionsnarben. Diese Korrosionsnarben können auf unterschiedliche Weise entstehen; ein typisches Beispiel ist das Eindringen von Betonabsetzwasser durch undichte Hüllrohre nach dem Betonieren, jedoch noch im unverpressten Zustand des Spanngliedes. Somit sind die korrosionsfördernden Bedingungen häufig schon während der Bauausführung entstanden und später von außen nicht mehr erkennbar [3].

Im Laufe der Untersuchungen fand man heraus, dass einige zur Zeit der Erstellung übliche Spannstähle aufgrund ihrer Zusammensetzung besonders spannungsrisskorrosionsgefährdet waren. Im Einzelnen sind dabei die Spannstähle St 145/160, Handelsnamen Neptun und Sigma, und St 140/160, Hennigsdorfer Spannstahl, bekannt. Diese Spannstähle wurden teilweise bis ins Jahr 1993 in Spannbetonbrücken, Turnhallen, Versammlungsstätten, Schulen, Universitäten, Stadien und anderen weitgespannten Tragwerken mit teilweise starkem Besucherverkehr verbaut [2][4]. Für Brückenbauwerke im Zuge von Bundesfernstraßen gibt es dazu detaillierte Statistiken. Wie Abbildung 2 veranschaulicht, wurde ein Großteil der deutschen Verkehrsinfrastruktur im Produktionszeitraum dieser besonders spannungsrisskorrosionsgefährdeten Stähle errichtet. In Kombination mit der Tatsache, dass nahezu 70% der Brückenbauwerke in Spannbetonbauweise ausgeführt sind, ist es wahrscheinlich, dass ein großer Anteil der deutschen Brückenbauwerke von einer Spannungsrisskorrosion gefährdet sein könnte [5].

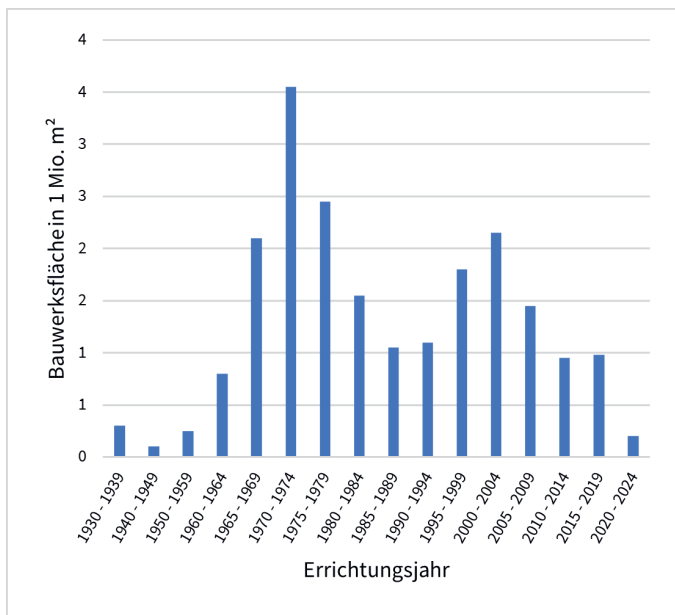


Abbildung 2: Altersstruktur der Brückenbauwerke der Bundesfernstraßen in Deutschland [5].

Spannstahlbrüche aufgrund von Spannungsrisskorrosion zeichnen sich durch plötzliche, spröde und verformungsarme Gewaltbrüche aus. Teils ist an dem Spannstahl mit dem bloßen Auge keine Korrosion erkennbar und auf der Betonoberfläche bilden sich keine Risse aus [3]. Dieses Riss-vor-Bruch-Kriterium ist jedoch eine entscheidende Voraussetzung für das Ankündigungsverhalten bei Bauteilversagen und die Durchführung effektiver handnaher Bauwerksprüfungen. Bei dieser Form der Bauwerksprüfung werden alle Bauteile eines Bauwerkes von einem dafür ausgebildeten Ingenieur „hand-

nah“ begutachtet und unter Anderem das Risswachstum akribisch dokumentiert. Wiederkehrende Prüfungen sind so wichtig für die Sicherheit dieser Bauwerke, dass der Gesetzgeber Vorschriften dafür erlassen hat [6][4][7][8][9][10][11][12].

Beitrag der magnetischen Streufeldmessung

Um die Sicherheit der betroffenen Bauwerke zu gewährleisten, werden Nachrechnungen vorgenommen, um das Riss-vor-Bruch-Kriterium zu überprüfen [2]. Außerdem kann die wiederkehrende Bauwerksprüfung durch Monitoringsysteme und zerstörende Prüfungen unterstützt werden [2][4][13][14].

Die nach wie vor einzige zerstörungsfreie Möglichkeit zum Nachweis von Spannstahlbrüchen im Bestand ist die magnetische Streufeldmessung [14]. Sie ist ein zerstörungs- und berührungsfreies Prüfverfahren, das Rückschlüsse auf den Zustand der Spanndrähte ermöglicht.



Abbildung 3: Brückenuntersuchung mit der magnetischen Streufeldmessung

Der technische Ablauf der magnetischen Streufeldmessung ist im Vergleich zu anderen Prüfverfahren sehr einfach: Ein Elektromagnet wird auf einem Schienensystem über ein Spannbetonbauteil geführt, um das zu untersuchende Bauteile mit eingebautem Spannstahl einem äußeren Magnetfeld auszusetzen. Der zu prüfende Stahl bildet dadurch ein magnetisches Streufeld aus, das ortsabhängig erfasst wird. Wenn der magnetisierte Spannstahl einen Bruch aufweist, bildet sich an den Bruchstellen ein magnetischer Dipol aus, der das magnetische Streufeld lokal verändert. Werden die magnetischen Streufelder entlang der Spannglieder mit Magnetfeldsensoren gemessen, kann diese magnetische Anomalie und somit der Bruch erkannt werden. Bei der Messung der axialen Komponente des Magnetfelds wird der Bruch als lokaler Extremwert (Maximum) angezeigt. In Abbildung 4 ist dies schematisch dargestellt. Wegen des ferromagnetischen Verhaltens des Spannstahls bleibt dessen Magnetisierung auch nach dem Ausschalten des Magnetfelds des Jochmagneten teilweise erhalten, sodass durch Messung des remanenten Felds ebenfalls die Detektion von Brüchen möglich ist [16].

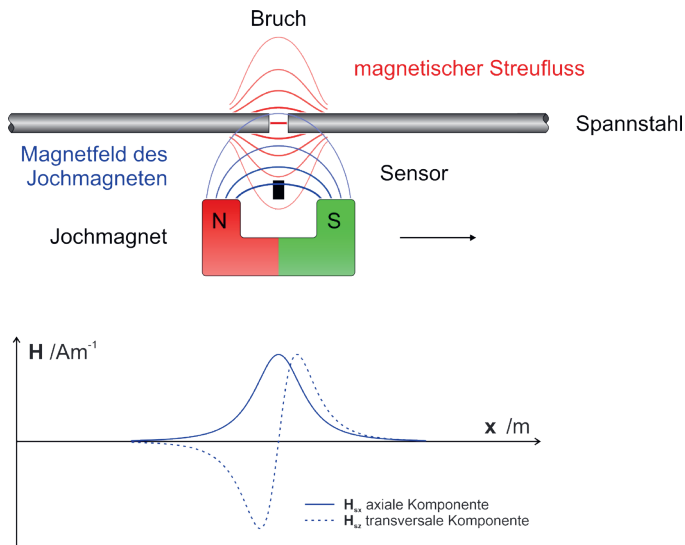


Abbildung 4: Schematische Darstellung der axialen und transversalen Komponente der magnetischen Feldstärke an einem Spannstahlbruch.

In Spannbetonbauteilen ist neben der vorgespannten Bewehrung auch schlaife Bewehrung vorhanden. Diese trägt erheblich zum magnetischen Streufeld bei. Zur Interpretation der gemessenen Streufeldsignale müssen die magnetischen Anteile der schlaffen Bewehrung (meist Bügelbewehrung quer zur Fahrtrichtung) herausgefiltert werden. Um dies in optimaler Weise vornehmen zu können, werden die unterschiedlichen magnetischen Materialeigenschaften von Spannstahl und Baustahl ausgenutzt. Dazu werden mit dem Prüfkopf mehrere Messfahrten durchgeführt, bei denen das Magnetfeld des Elektromagneten jeweils unterschiedliche Feldstärken hat. Das Ziel besteht darin, die Spannbewehrung möglichst gleichmäßig zu magnetisieren und gleichzeitig die schlaife Bewehrung nach Möglichkeit zu entmagnetisieren [16].

Die Herausforderung bei der magnetischen Streufeldmessung liegt in der Identifizierung möglicher Bruchsignale in den Datensätzen. Neben der genannten Bügelbewehrung überlagert eine Vielzahl von anderen magnetischen Störsignalen die registrierten Defektantworten, in besonderem Maße außerhalb der Laborumgebung. Dazu gehören beispielsweise die starken magnetischen Einflüsse der Robustheitsbewehrung in Prüfrichtung, Überlappungsstöße, offene Stabstahlenden, Baustahlmatten, Einbauteile und ferromagnetische Zuschlagstoffe. Zudem spielen intrinsische Effekte eine starke Rolle, wie z. B. die ungleichförmige Magnetisierung im Anfahrts- und Endbereich, die Reaktionszeit des Spulenstroms auf Änderungen der Bewehrungsdichte und magnetische Einstreuungen aus dem Motor der Verfahrenseinrichtung und äußerer Einflüsse aus dem Baustellenbetrieb. Diese Störsignale übersteigen in ihrer Amplitude in der praktischen Anwendung deutlich die zu identifizierenden Bruchsignale und müssen daher in der Auswertung der Streufeldsignale berücksichtigt werden. Aus diesem Grund wurden eine Vielzahl unterschiedlicher Methoden entwickelt, um die Störsignale so weit wie möglich zu unterdrücken [16].

Das Verfahren ist mittlerweile für die Untersuchung aller Spannbetonbauteile etabliert, insbesondere bei Anfälligkeit für wasserstoff- oder chloridinduzierter Spannungsrisskorrosion. Aber auch bei unsachgemäßem Bohren, vermuteter Überlastung, usw. liefert die magnetische Streufeldmessung entscheidende Informationen zur Beurteilung des Gesamtzustandes von Spannbetonbauwerken.

Diese Informationen können zur akuten Beurteilung der Verkehrssicherheit beitragen und in eine effiziente Priorisierung von Sanierungsmaßnahmen einfließen [4] [14] [16].

Ziele der vorliegenden Versuchsreihen

Das primäre Ziel der in der aktuellen Arbeit durchgeführten Versuchsreihen war es, das Verständnis der Einflussfaktoren auf die magnetische Streufeldmessung zu verbessern, die in einer realen Prüfsituation auftreten. Dazu wurden insgesamt 408 praxisnahe Laborversuche durchgeführt, bei denen die Randbedingungen nicht wie in vorigen Arbeiten auf einzelne Einflussfaktoren reduziert wurden. Stattdessen wurde die Komplexität der Versuchsaufbauten den realen Bedingungen bei Bestandsbauwerken angeglichen. So konnte in einem ersten Schritt die Effektivität des Prüfverfahrens innerhalb der etablierten Verfahrensgrenzen verifiziert werden. Anschließend wurde die große Datenmenge für eine statistische Auswertung herangezogen, bei der die Einflussfaktoren separiert und analysiert wurden. Die Bewertung der Ergebnisse beinhaltete die Quantifizierung der einzelnen Einflussfaktoren, sowie deren Kombination und Variation. Durch diese Herangehensweise konnte dargestellt werden, welche Effekte durch die Überlagerung der unterschiedlichen Randbedingungen entstehen. Um die Bedingungen, unter denen die Laborversuche durchgeführt wurden, noch weiter an reale Prüfsituationen anzugleichen, wurde der Einfluss unregelmäßiger magnetischer Einflüsse im Prüfbereich untersucht. Dabei wurden 181 unterschiedliche Anordnungen von Bewehrungsstählen im Versuchsstand eingebaut und sowohl mit Spannstahlbündeln und Bewehrungsstählen kombiniert als auch isoliert geprüft. Ergänzend zu den umfangreichen Versuchsreihen zur Detektion von Spannstahlbrüchen wurden 22 separate Versuche zum magnetischen Materialverhalten durchgeführt. Dabei wurde das ferromagnetische Materialverhalten, die Magnetisierungskurven und das Sättigungsverhalten unter Variation von Stahlorte, Menge und Anordnung untersucht. Die Versuche zum magnetischen Materialverhalten werden in diesem Artikel jedoch nicht weiter ausgeführt.

Versuchsaufbauten

Abbildung 5 zeigt eine Übersicht des Versuchsaufbaus, der für die Versuchsreihen zur Bruchdetektion und zur Untersuchung unregelmäßiger magnetischer Einflüsse verwendet wurde. Der Bewehrungskorb wies eine Länge von 6 m, eine Breite von 0,5 m und eine Höhe von 0,8 m auf. In Abbildung 5 (rechts) ist die Bewehrung im Querschnitt dargestellt. Die Längsbewehrung hatte einen Nenn-durchmesser von 12 mm und die Bügel 16 mm. An einem Ende wurde auf zwei Metern Länge der Bügeldurchmesser zu 8 mm reduziert. Im Randbereich der ersten und letzten 1,6 m betrug der Bügelabstand 20 cm, in Feldmitte waren es 30 cm. Der Bewehrungskorb bestand aus Betonstabstahl der Sorte B500B. Die Spannglieder und Störeinflüsse wurden bei der Versuchsdurchführung jeder Versuchsreihe variiert.

Die Messrichtung der magnetischen Streufeldmessung war von unten nach oben, entsprechend den realen Prüfsituationen. Der Bewehrungskorb wurde auf einem unmagnetischen Messtisch platziert, der aus Aluminiumprofilen und Holzbrettern bestand. Der Magnet befand sich unterhalb des Aufbaus und wurde entsprechend des erforderlichen Prüfkopfabstands in der Höhe angepasst. Da Beton unmagnetisch ist, hat er keinen Einfluss auf die Magnetfeldsignale der Bewehrung und des Spannstahls. Deshalb wurde darauf verzichtet, die Versuchsaufbauten mit Beton zu vergießen.

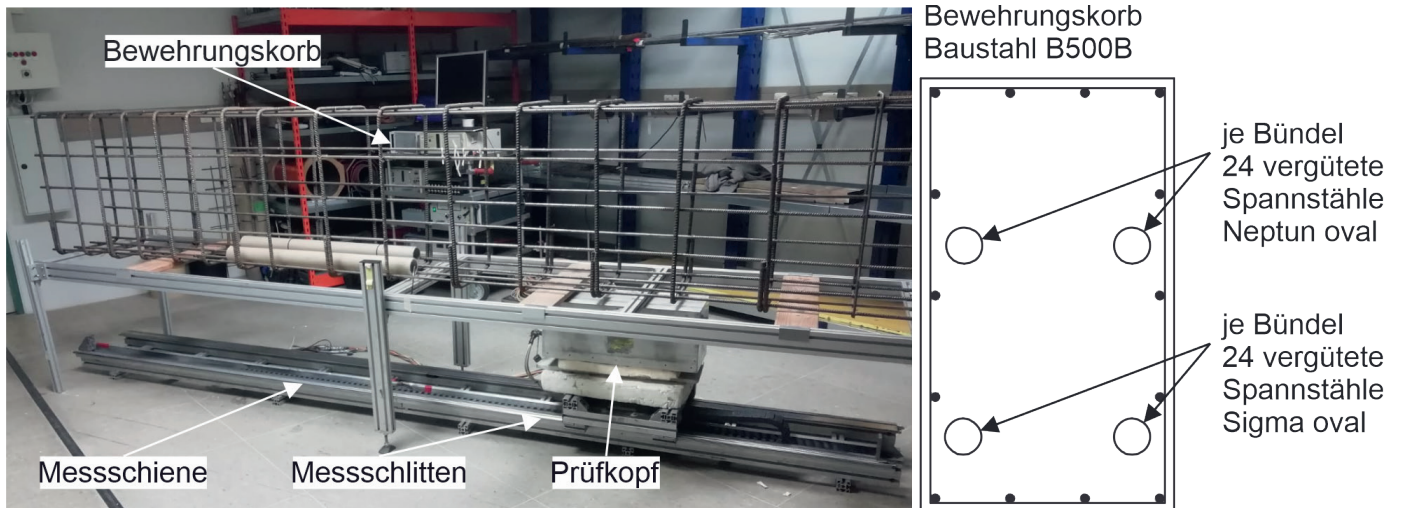


Abbildung 5: Übersicht Versuchsaufbau für die Versuchsreihen zur Bruchdetektion und zum Einfluss unregelmäßiger magnetischer Einflüsse (links) und Querschnitt des Bewehrungskorbs mit Spannstahlsorte und Spannstahlmenge (rechts)

In dem Bewehrungskorb wurden zwei Lagen mit je zwei Spannstahlbündeln eingebaut. Die untere Lage wurde aus dem Typ Sigma oval (St 145/160) hergestellt. Der Abstand zum Prüfkopf wurde zwischen 4,0 cm, 6,4 cm und 10,5 cm variiert. Dieser Abstand ist entscheidend, da sich in dem Prüfkopf der Elektromagnet und die Magnetfeldsensoren befinden. Die obere Lage wurde aus dem Typ Neptun oval (St 145/160) hergestellt. Der Abstand zum Prüfkopf betrug konstant 26,4 cm, wurde aber in einigen Versuchsreihen entfernt, um die Auswirkungen zu beurteilen. Jedes Bündel bestand aus 24 Einzeldrähten. Die Geometrie des Querschnitts ist in Abbildung 5 (rechts) veranschaulicht.

Versuchsdurchführung

Mit dem Ziel, möglichst viele unterschiedliche Einflussfaktoren zu untersuchen, wurden neun Versuchsreihen konzipiert. Dabei wurden in einem der unteren Bündel bis zu sechs Spannstähle mit jeweils vollständigen Brüchen eingebaut. Die Bruchufer wurden durch einen Sägeschnitt erzeugt und waren parallel zueinander ausgerichtet. Die Rissbreite betrug bei jedem Versuch konstant 1 mm. Dadurch ergaben sich in jeder Versuchsreihe sechs verschiedene Querschnittsschwächungen: 4 % (1/24), 8 % (2/24), 13 % (3/24), 17 % (4/24), 21 % (5/24) und 25 % (6/24). Für jede Querschnittsschwächung wurden drei verschiedene Bruchorientierungen und zwei verschiedene Positionen in Bezug auf die Bügel getestet. Die Multiplikation dieser Variationen ergab 36 Aufbauten, aus denen sich jede Versuchsreihe zusammensetzte.

Die drei verschiedenen Bruchorientierungen sind Zugewandt, Halb-Abgewandt und Abgewandt. Sie beschreiben die Beziehung zwischen dem Prüfkopf und den gebrochenen Spannstählen im Bündel und sind in Abbildung 8 schematisch dargestellt. Bei zugewandten Brüchen zeigen die Bruchufer nach unten direkt zum Prüfkopf, bei der Bruchorientierung Halb-Abgewandt wird das Spannglied in Längsrichtung um 90 ° gedreht und bei abgewandten Brüchen zeigen die Bruchufer nach unten vom Prüfkopf weg. Somit sind bei der Bruchorientierung Abgewandt die intakten Spannstähle des Bündels zwischen dem Prüfkopf und den Bruchufern. Die beiden unterschiedlichen Positionen in Bezug auf die Bügelbewehrung sind über einem Bügel und zwischen benachbarten Bügeln. Sie sind in Abbildung 10 schematisch veranschaulicht. Die theoretische Überlegung bei der Konzeption der Versuchsreihen war, dass die

Bügel den Bruch magnetisch abschirmen, wodurch das Bruchsignal verringert werden sollte. Ein Beispiel eines simulierten Bruchs zwischen den Bügeln mit einer abgewandten Bruchorientierung und einer Querschnittsschwächung von 25 % ist in Abbildung 6 dargestellt.



Abbildung 6: Beispiel eines Spannstahlbündels mit 25 % Querschnittsschwächung (6/24), Bruchorientierung Abgewandt und Bruch zwischen den Bügeln

Diese 36 Variationen der Parameter wurden in jeder der neun Versuchsreihen wiederholt. Für jede dieser Versuchsreihen galten andere Randbedingungen. Dabei wurden der Prüfkopfabstand, die Installation der oberen Spanngliedbündel, der Durchmesser der Bügelbewehrung und die offenen Enden der Bügelbewehrung variiert. Bei jedem der Bügel im Bewehrungskorb gab es offene Bügelenden, die durch die Herstellung bedingt waren. Die Bügelenden überlappten sich, sodass an dieser Stelle die doppelte Menge an Bewehrungsstahl in Kombination mit den offenen Enden eine magnetische Auswirkung auf die Versuche haben konnte. Zur Veranschaulichung ist in Abbildung 7 ein Bruch direkt über den offenen Bügelenden abgebildet. Um zu untersuchen, ob diese

Bewehrungsanordnung einen Einfluss auf die Bruchdetektion hat, wurden gezielt Brüche über dieser Bewehrungsanordnung platziert. Außerdem wurde der Bewehrungskorb nach der Hälfte der Versuchsreihen um die Längsachse rotiert. Das führte dazu, dass die offenen Bügelenden bei der Hälfte der Versuche unten und somit im Prüfbereich waren. Bei den restlichen Versuchen waren die offenen Bügelenden oben und somit außerhalb des Prüfbereichs.



Abbildung 7: Bruchufer direkt über den offenen Bügelenden – 21 % Querschnittsschwächung (5/24) und Bruchorientierung Abgewandt

Im einfachsten Fall bestehen Bewehrungskörbe aus einzelnen Stäben, die rechtwinklig zueinander angeordnet und in regelmäßigen Abständen eingebaut sind. Diese Art der Anordnung lässt sich in den Messdaten einfach erkennen und mit den etablierten Filtermethoden zuverlässig eliminieren. In der Baupraxis sind Bewehrungsanordnungen jedoch oft unregelmäßig. Um diesen Einfluss besser bewerten zu können, wurden bei den entsprechenden Prüfserien Bewehrungsseisen schräg im Probekörper eingebaut.

Jede Ausrichtung wurde mit Stabdurchmessern von 8 mm, 12 mm und 20 mm Bewehrungsstahl B500B eingebaut. Die verwendeten Stäbe hatten Längen zwischen 60 cm und 75 cm. Die Bewehrungsstäbe wurden in sechs verschiedenen räumlichen Orientierungen eingebaut, die in Tabelle 1 dargestellt sind. Diese Ausrichtungen wurden zunächst separat und störungsfrei geprüft. Anschließend wurden sie in den Bewehrungskorb eingebaut und geprüft, danach wurden ungebrochene Spannstahlitzen hinzugefügt und schließlich wurde direkt neben dem zusätzlichen Bewehrungsstab eine Querschnittsschwächung im Spannglied simuliert. Bei diesem letzten Schritt wurde die Querschnittsschwächung zuerst ohne einen Störeinfluss erfasst. Anschließend wurde sie mit allen Raumorientierungen des zusätzlichen Stahls in direkter Nähe des Bruchs unter Variation der Bruchorientierung und der Lage bezüglich der Bügelbewehrung erfasst.

Tabelle 1: Untersuchte Raumorientierungen der Stabstähle bezogen auf das Spannglied. x – Prüfkörperlängsrichtung, y – Querrichtung, z – Höhe. Eine Rotation um die Längsachse (x - z) von 0° entspricht einem Stab in der horizontalen Ebene. Eine Rotation um die Querachse (x - y) von 90° bzw. 180° entspricht einem Stab in der Ebene parallel zur Seitenfläche des Prüfkörpers.

Rotation x-z	Rotation x-y	
90°	0°	„Senkrechter Stab“
45°	0°	
45°	45°	
45°	90°	„Schrägstab der Schubbewehrung“
45°	135°	
45°	180°	„Schrägstab der Schubbewehrung“

Methodik der Versuchsauswertung

Eine Besonderheit bei der Herangehensweise dieser Arbeit war, dass in jeder Versuchsanordnung alle Einflussfaktoren vorhanden waren. Die Interpretation erfolgte durch Sortieren, Filtern, grafische und statistische Methoden. So konnten die Einflussfaktoren getrennt und gewichtet werden.

Dabei stand die Bruchamplitude der bügelbereinigten Restfeldsumme als Kennwert im Vordergrund. Die bügelbereinigte Restfeldsumme ist die Magnetisierungskurve, die nach Anwendung des mehrschrittigen Filterprozesses entsteht. Die Bruchamplitude ist das Ergebnis, das der verwendete Auswertungsalgorithmus als ortsbezogenen Wert ausgibt. An jeder Position in Fahrtrichtung wird die Stärke der Magnetisierung in Kombination mit der Ähnlichkeit des Messsignals mit einem idealisierten Bruchsignal bewertet. Die Bruchamplitude kann als Wahrscheinlichkeit eines Spannstahlbruchs an der Stelle interpretiert werden [16].

Die Bruchamplitude ist also kein absoluter und unabhängiger Wert, wie die Magnetisierung, aus der sie berechnet wird. Ihre Größe ist abhängig von den zugrunde gelegten Parametern des Auswertungsalgorithmus, die individuell angepasst werden müssen, um optimale Ergebnisse zu erzielen. Um die Ergebnisse aller Versuchsreihen trotzdem untereinander vergleichen zu können, wird in manchen Darstellungen die relative Bruchamplitude verwendet. Dies ist wichtig, um die Größenordnung der Einflussfaktoren korrekt zu bewerten. Die relative Bruchamplitude wurde als Quotient aus der Bruchamplitude am Ort des simulierten Bruchs und der größten Bruchamplitude an einem anderen Ort definiert. Somit kann man daran ablesen, wie deutlich sich die Bruchamplitude am Bruchort vom Signalrauschen abgehoben hat.

Bei Angaben zur Bruchdetektionswahrscheinlichkeit wurden alle Messungen wie im praktischen Einsatz händisch bewertet, jedoch wurde als zusätzlicher objektiver Parameter eine relative Bruchamplitude größer als Eins eingeführt. In der Praxis werden auch kleinere Bruchamplituden und weitere Auswertungsmethoden zur Bruchdetektion herangezogen. Das erfordert jedoch viel Erfahrung und ist im Kontext einer objektiven Beurteilung der Leistungsfähigkeit dieser Auswertungsmethode nicht zielführend. Die Bruchdetektionswahrscheinlichkeit ergibt sich als Quotient aus allen durchgeführten Versuchen der jeweiligen Kategorie und den als gefunden bewerteten Brüchen.

Alle gewonnenen Werte wurden in Kategorien eingeteilt und statistisch bewertet. Zunächst wurde die Datenmasse anhand der einzelnen Einflussfaktoren sortiert und Schritt für Schritt in feinere Unterkategorien eingeteilt. Die Gewichtung der Einflussfaktoren

wurde durch Quervergleiche zwischen den einzelnen Kategorien unterschiedlicher Stichprobengröße verifiziert. Folgende Kategorien bilden die größte Aufteilung mit der entsprechend größten Stichprobenmenge pro Kategorie:

- Bruchorientierung
- Querschnittsschwächung
- Lage bezüglich Bügelbewehrung
- Prüfkopfabstand

Anschließend wurden folgenden Unterkategorien gebildet:

- Bruchorientierung und Querschnittsschwächung
- Lage bezüglich Bügelbewehrung und Querschnittsschwächung
- Prüfkopfabstand und Querschnittsschwächung
- Prüfkopfabstand und Bruchorientierung

Bei den folgenden Kategorien war der Stichprobenumfang teilweise zu gering, um eine klare statistische Aussage treffen zu können. Da die kleinsten Kategorien am wenigsten andere Einflussfaktoren enthielten, waren sie bei der Gewichtung der Einflussfaktoren trotzdem hilfreich und konnten durch Quervergleiche mit den statistisch relevanteren Kategorien verifiziert werden.

- Prüfkopfabstand, Bruchorientierung und nur 25 % Querschnittsschwächung
- Querschnittsschwächung, Bruchorientierung und nur 6,3 cm Prüfkopfabstand
- Querschnittsschwächung, Bruchorientierung und nur 10,5 cm Prüfkopfabstand

Bei den Versuchsreihen zu unregelmäßigen magnetischen Störeinflüssen wurden zunächst die separat gemessenen Bewehrungsstahlanordnungen betrachtet und mit typischen Bruch- und Bügelsignalen verglichen. Bei den Versuchsaufbauten mit Bewehrungsstahlstäben im ansonsten leeren Bewehrungskorb und bei den Versuchen mit hinzugefügten ungebrochenen Spanngliedern wurde nach Auffälligkeiten am Einbauort gesucht. Dabei wurden Bruchsignale in Form einer Bruchamplitude erwartet. Die letzte Art der Versuchsaufbauten zu magnetischen Störeinflüssen war ein Bewehrungsstahl in direkter Nähe einer Querschnittsschwächung. Dabei wurde die Bruchamplitude ohne Störeinfluss berechnet und danach mit den Bruchamplituden verglichen, bei denen das magnetische Signal des Bewehrungsstahls mit dem Bruchsignal überlagert war.

Versuchsergebnisse

Eine Darstellung der ersten vier Kategorien als Kastengrafiken vermittelt einen guten Überblick über die Größenordnung der Einflussfaktoren und die Gesamtmasse der Daten. In Abbildung 8 sind alle Messwerte nach der Bruchorientierung sortiert. In Abbildung 9 nach Querschnittsschwächung, in Abbildung 10 nach Position bezüglich der Bügelbewehrung und in Abbildung 11 nach Prüfkopfabstand.

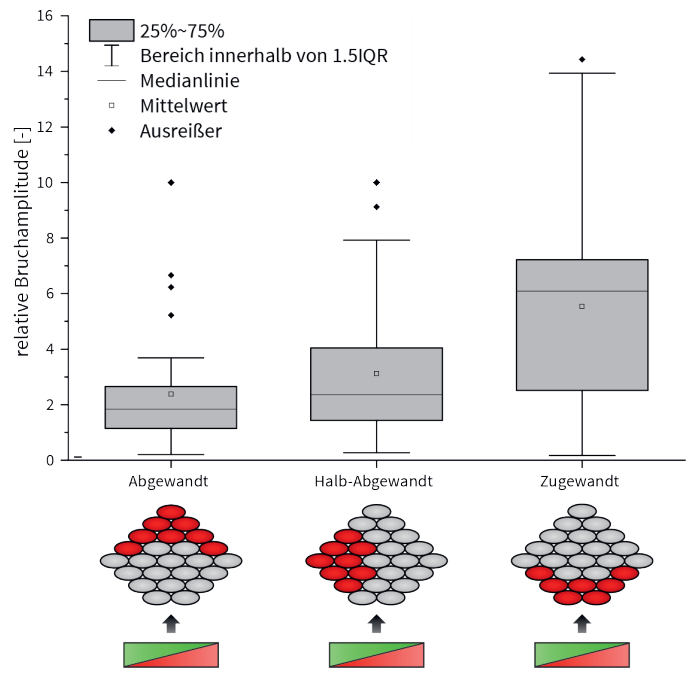


Abbildung 8: Kastengrafik mit allen Messdaten sortiert nach Bruchorientierung und schematische Darstellung

In Abbildung 8 ist gut erkennbar, dass die relative Bruchamplitude bei Brüchen, die dem Prüfkopf zugewandt sind, zuverlässig am höchsten ist. Sie beträgt durchschnittlich 5,54, reduziert sich bei halb-abgewandten Brüchen auf 3,12 und bei abgewandter Bruchorientierung auf 2,38, womit eine Reduktion von ungefähr 60 % von der Bruchorientierung „Zugewandt“ zu „Abgewandt“ vorliegt.

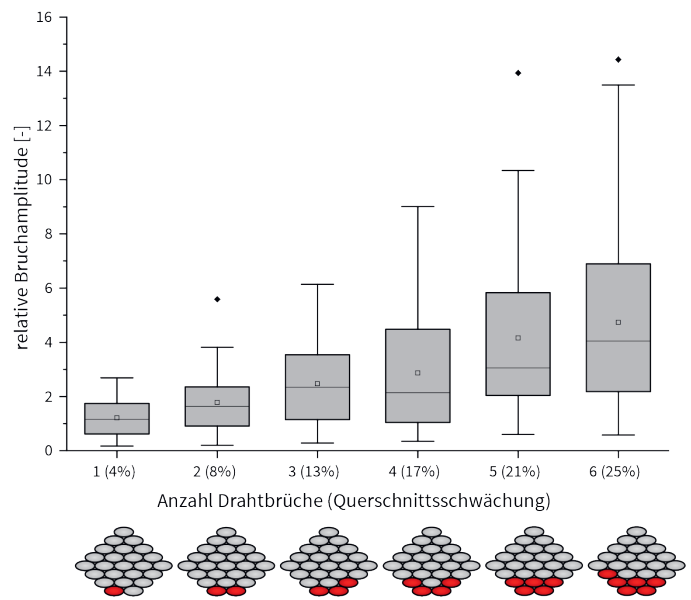


Abbildung 9: Kastengrafik mit allen Messdaten sortiert nach Querschnittsschwächung und schematische Darstellung

Aus Abbildung 9 geht hervor, dass größere Querschnittsschwächungen zuverlässig zu stärkeren Signalen führen. Im Durchschnitt löst ein gebrochener Stab von 24 Stäben im Bündel (4% Querschnittsschwächung) eine relative Bruchamplitude von 1,21 aus. Dies steigt nahezu linear auf 4,74 bei einer Querschnittsschwächung von 25% an.

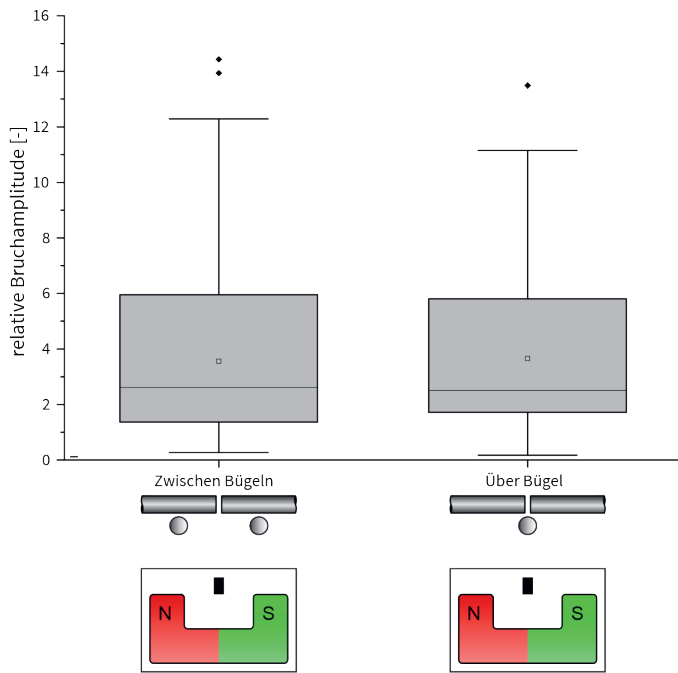


Abbildung 10: Kastengrafik mit allen Messdaten sortiert nach Positionen bezüglich Bügelbewehrung und schematische Darstellung

In Abbildung 10 ist die Einteilung nach Position bezüglich der Bügelbewehrung dargestellt. Die Auswirkungen dieses Einflussfaktors sind sehr gering. Ist der Bruch zwischen den Bügeln angeordnet beträgt die durchschnittliche relative Bruchamplitude 3,55 und über den Bügeln 3,66. Somit ergibt sich eine Steigerung von 3 %. Die Annahme einer abschirmenden Wirkung der Bügelbewehrung kann somit nicht bestätigt werden. Das kann unter Anderem mit der Funktionalität der verwendeten Filtermethoden begründet werden.

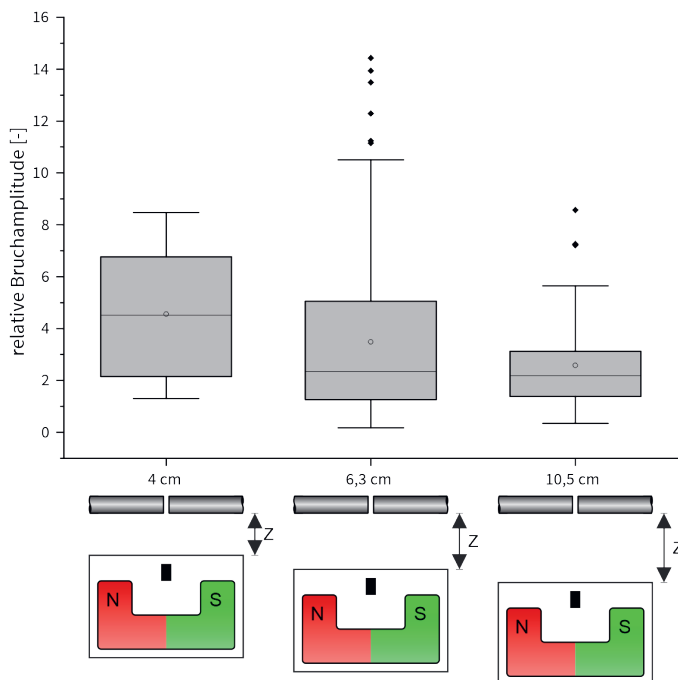


Abbildung 11: Kastengrafik mit allen Messdaten sortiert nach Prüfkopfabstand und schematische Darstellung

Der Prüfkopfabstand hat einen entscheidenden Einfluss auf die Ergebnisse der magnetischen Streufeldmessung. Wie in Abbildung 11 veranschaulicht, beträgt die relative Bruchamplitude bei einem Abstand von 4 cm 4,56. Bei einem Prüfkopfabstand von 6,3 cm reduziert sie sich auf 3,48 und bei einer Steigerung des Abstands auf 10,5 cm verringert sie sich weiter auf 2,58. Die große Streuung der Versuchsergebnisse bei 6,3 cm entsteht, da bei diesem Prüfkopfabstand die meisten Versuche durchgeführt wurden. Deshalb sind darin aus statistischen Gründen die meisten Ausreißer mit besonders großen Bruchamplituden enthalten. In der Literatur wird ein nahezu quadratischer Einfluss des Prüfkopfabstands angegeben ^[16].

Das Zusammenspiel der Einflussfaktoren kann besonders gut in den Übersichtsdiagrammen gesehen werden, die aus den Unterkategorien erstellt wurden. Dabei bietet es sich meistens an, die Querschnittsschwächung als x-Achse zu verwenden. Nachdem die Bruchamplitude, die relative Bruchamplitude und die Detektionswahrscheinlichkeit in direktem Zusammenhang stehen, ist die Aussage der Grafiken bei allen drei Kenngrößen sehr ähnlich. Die Bruchdetektionswahrscheinlichkeit stellt die als gefunden gewerteten Brüche der Versuchsaufbauten dar. Dies spiegelt nicht in direkter Art und Weise die Wahrscheinlichkeit wieder, Brüche an realen Bauwerken zu finden. Sie ist jedoch anschaulicher als die anderen beiden Kenngrößen und kann ein guter Anhaltspunkt für die Leistungsfähigkeit des Verfahrens sein. Deshalb wird sie in den folgenden Grafiken als y-Achse verwendet.

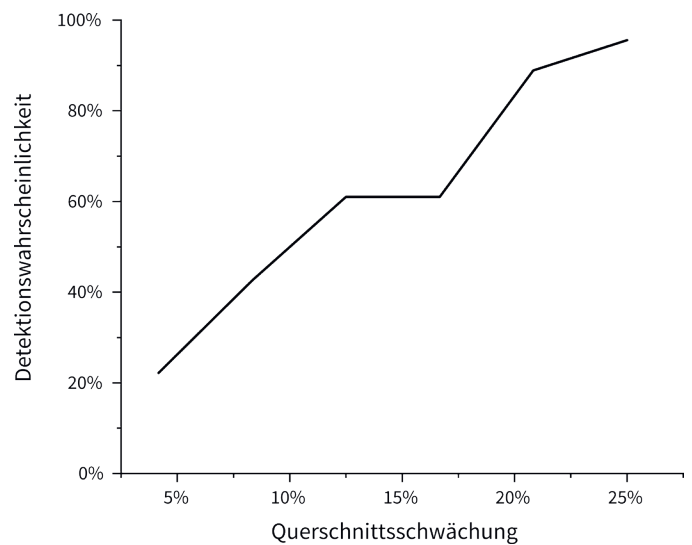


Abbildung 12: Bruchdetektionswahrscheinlichkeit unter Berücksichtigung der Querschnittsschwächung

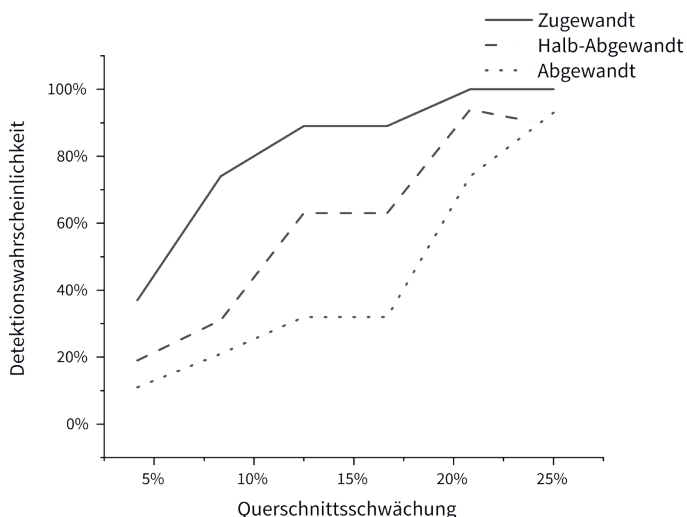


Abbildung 13: Bruchdetektionswahrscheinlichkeit unter Berücksichtigung der Querschnittsschwächung und der Bruchorientierung

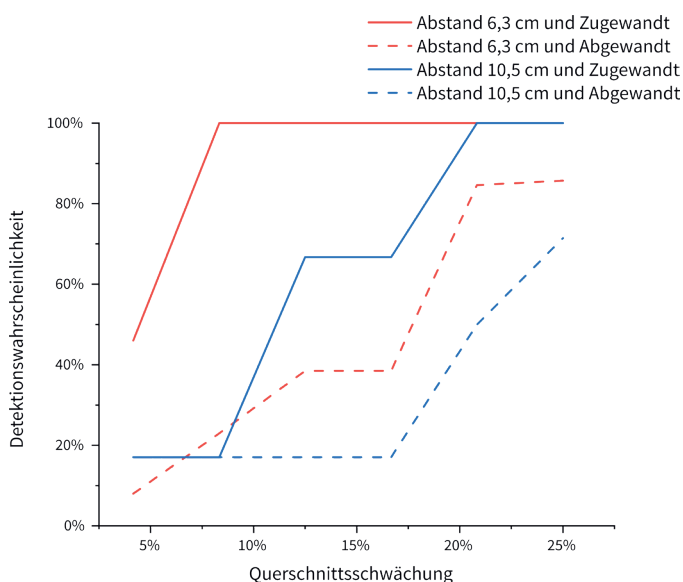


Abbildung 14: Bruchdetektionswahrscheinlichkeit unter Berücksichtigung der Querschnittsschwächung, der Bruchorientierung und des Prüfkopfabstands

In Abbildung 12 ist die Bruchdetektionswahrscheinlichkeit unter Berücksichtigung der Querschnittsschwächung dargestellt. Abbildung 13 berücksichtigt zusätzlich die Bruchorientierung und in Abbildung 14 ist ergänzend noch der Prüfkopfabstand von 6,3 cm und 10,5 cm berücksichtigt. Dabei kann man gut erkennen, wie durch Bildung der Unterkategorien Darstellungen von aufsteigender Komplexität möglich sind.

In Abbildung 12 ist der nahezu lineare Einfluss der Querschnittsschwächung erkennbar. Bei einer Querschnittsschwächung von 25% werden ohne Berücksichtigung weiterer Unterkategorien alle Brüche erfolgreich detektiert. Bei den zugewandten Brüchen in Abbildung 13 ist dies bereits ab einer Querschnittsschwächung von 21% der Fall. Die Kurven für die Bruchorientierungen Halb-Abgewandt und Abgewandt ordnen sich entsprechend der erwarteten Größenordnung unter den zugewandten Brüchen ein. In Abbildung 14 sieht man, wie sich die Einflussfaktoren in der praktischen Anwendung überlagern und gegenseitig beeinflussen. Betrachtet man nur Brüche, die eine zugewandte Bruchorientierung und einen ge-

ringen Prüfkopfabstand von 6,3 cm haben, können bereits ab 8% Querschnittsschwächung alle Brüche erfolgreich detektiert werden. Das bedeutet, dass bei günstigen Bedingungen eine zuverlässige Prüfaussage bei sehr kleinen Querschnittsschwächungen möglich ist. Jede Variation der Einflussfaktoren in eine ungünstige Richtung verringert die Bruchdetektionswahrscheinlichkeit und verdeutlicht so das Zusammenspiel der Einflussfaktoren, wie sie auch in der Praxis auftreten. Mit den Erkenntnissen der vorliegenden Arbeit kann man die Größenordnung der Einflussfaktoren abschätzen und bei der Interpretation der Messdaten an realen Bauwerken berücksichtigen.

Nach der ausführlichen Diskussion der Versuchsergebnisse zur Bruchdetektion werden die Ergebnisse zum Einfluss unregelmäßiger magnetischer Störeinflüsse kurz zusammengefasst. Die separaten Anordnungen der Bewehrungsstäbe in unterschiedlichen Raumorientierungen ähnelten in der Ausprägung ihrer Magnetisierungskurven eher Bügelsignalen statt Bruchsignalen. Ein Beispiel für den qualitativen Vergleich eines idealisierten Bügelsignals mit einem gemessenen Stabstahl ist in Abbildung 15 abgebildet. Obwohl die unterschiedlichen Raumorientierungen auch zu diversen Magnetisierungskurven führten, zeichneten sich alle durch einen Wendepunkt am Einbauort und Extremwerten davor und dahinter aus. Im Vergleich dazu zeichnet sich das Bruchsignal in der axialen Komponente durch ein deutliches Maximum aus (vgl. Abbildung 4). Durch diese magnetischen Eigenschaften wurden die Stabstähle in allen Raumorientierungen als Bügel erkannt und dementsprechend gefiltert.

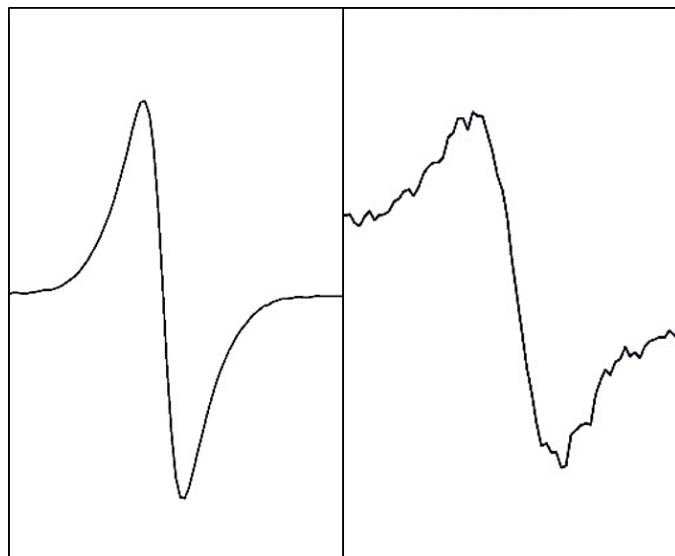


Abbildung 15: Vergleich idealisiertes Bügelsignal (links) und gemessenem Stabstahl (rechts)

Die erfolgreiche Unterdrückung der Stabstahlsignale aller Raumorientierungen setzte sich im leeren Bewehrungskorb und mit den ungebrochenen Spannstahlbündeln fort. Bei der Anordnung in direkter Nähe zum Bruchort hatten die Stabstähle keinen systematischen Einfluss auf die Bruchamplituden. Damit kann die Effektivität der Filtermethoden für in x-Richtung betrachtet punktuelle Stahlanordnungen bestätigt werden.

Vergleich mit den etablierten Verfahrensgrenzen

Im letzten Schritt werden die Ergebnisse mit den etablierten Verfahrensgrenzen verglichen. Das „DGZfP-Positionspapier. Magnetische

Verfahren zur Spannstahlbruchortung“ aus dem Jahr 2017^[14] weist bereits auf die Überlagerung der Einflussfaktoren hin:

„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.“

Diese Verfahrensgrenzen werden im Folgenden noch konkretisiert und mit den Ergebnissen der Laborversuche verglichen. Das Positionspapier gibt an, dass Spannstahlbrüche bis zu einer Betonüberdeckung von 20 cm detektiert werden können. Sind die Spannglieder als Einzelstäbe verbaut, kann man grundsätzlich von guten Detektionswahrscheinlichkeiten ausgehen. Untersucht man ein Bündel mit mehreren Spanndrähten, wird die zuverlässige Bruchdetektion auf Querschnittsschwächung größer 20 % eingeschränkt. Nachdem alle Versuche im Spannstahlbündel durchgeführt wurden, werden für den Vergleich mit den Verfahrensgrenzen die Bruchdetektionswahrscheinlichkeiten bei Brüchen mit einer Querschnittsschwächung über 20 % betrachtet. Diese Ergebnisse sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Die Menge an Betonstahlbewehrung und der Lage wird im Positionspapier nur qualitativ beschrieben^[14].

„Mit zunehmendem Grad der Bewehrung sinkt die Detektionsmöglichkeit von Einzeldrahtbrüchen eines Spannglieds.“

Tabelle 2: Übersicht Bruchdetektionswahrscheinlichkeiten bei mehr als 20 % Querschnittsschwächung in Kombination mit anderen Einflussfaktoren

Betrachtete Kategorien	Bruchdetektionswahrscheinlichkeit bei mehr als 20 % Querschnittsschwächung
Alle Daten	94 %
Bruchorientierung Zugewandt	100 %
Bruchorientierung Abgewandt	89 %
Prüfkopfabstand 10,5 cm und alle Bruchorientierungen	80 %
Prüfkopfabstand 10,5 cm und Bruchorientierung Zugewandt	100 %
Prüfkopfabstand 10,5 cm und Bruchorientierung Abgewandt	62 %

Bei den Versuchen dieser Arbeit lag die Bruchdetektionswahrscheinlichkeit bei Brüchen mit mehr als 20% Querschnittsschwächung bei 94%. Diese Treffsicherheit konnte erreicht werden, obwohl darunter nicht nur zugewandte Brüche waren, sondern auch halb-abgewandte und abgewandte Bruchorientierungen. Außerdem sind in dieser Detektionswahrscheinlichkeit zusätzlich alle Prüfkopfabstände enthalten. Von den zugewandten Brüchen konnten ab 20% Querschnittsschwächung sogar 100% der Brüche detektiert werden. Bei den abgewandten Brüchen konnten 89% der Brüche mit einer Querschnittsschwächung über 20% detektiert werden.

Der größte untersuchte Prüfkopfabstand war 10,5 cm. Somit können anhand der durchgeführten Versuchsreihen keine Aussagen über Bruchdetektionen bis zu einer Tiefe von 20 cm getroffen werden. Bei einem Prüfkopfabstand von 10,5 cm konnten unter Berücksichtigung aller Bruchorientierungen noch 80% der Brüche

mit einer Querschnittsschwächung über 20 % gefunden werden. Betrachtet man nur die zugewandten Brüche sind es 100 % und bei den abgewandten Brüchen 62 %.

Nachdem nur eine beschränkte Variation der Bewehrungsanordnungen untersucht wurde, können keine quantitativen Aussagen über den Einfluss des Bewehrungsgrads getroffen werden. Es ist jedoch offensichtlich, dass die verwendeten Filtermethoden funktionieren, da alle der oben genannten Bruchdetektionswahrscheinlichkeiten mit dem regelmäßigen Störeinfluss des Bewehrungskorbs erzielt wurden. Die Effektivität der Filtermethoden wird besonders deutlich, wenn man den geringen Einfluss der Lage bezüglich Bügelbewehrung auf die Bruchdetektion und die Bruchamplituden betrachtet. Obwohl man im Vorfeld von einem abschirmenden Effekt der Bügelbewehrung ausging, konnten die Brüche über dem Bügel sogar geringfügig besser detektiert werden. Außerdem wurde gezeigt, dass die untersuchten unregelmäßigen Bewehrungsanordnungen von den Filtermethoden erkannt werden und keinen Einfluss auf die Bruchdetektion haben.

Zusammenfassung

In den 90er Jahren häuften sich Schadensfälle an Spannbetonbauwerken, bei denen es zum Teil zu einem Versagen ohne Vorankündigung kam. Bei den Untersuchungen zur Aufklärung der Ursache wurden die Wirkmechanismen und Voraussetzungen für die Spannungsrissskorrosion wissenschaftlich ergründet. Die Voraussetzungen für dieses Schadensbild können durch Fehler bei Bemessung, Konstruktion und Ausführung verursacht werden. Ein weiterer entscheidender Faktor ist die Zusammensetzung und Verarbeitung der Spannstähle selbst. Dabei wurden einige Spannstahlsorten als besonders spannungsrissskorrosionsgefährdet eingestuft. Diese Spannstähle wurden teilweise bis ins Jahr 1993 in Spannbetonbrücken, Turnhallen, Versammlungsstätten, Schulen, Universitäten, Stadien und anderen weitgespannten Tragwerken mit teilweise starkem Besucherverkehr verbaut. Aufgrund des plötzlichen, spröden und verformungsarmen Bruchverhaltens haben diese Gebäude einen undefinierten Bauwerkszustand. Die magnetische Streufeldmessung kann diese Wissenslücke schließen, zur Einleitung von effektiven Sanierungsmaßnahmen führen und gefährliche Bauwerkschäden bis zum Versagen verhindern.

Die magnetische Streufeldmessung ist ein ausgereiftes zerstörungsfreies Prüfverfahren, bei dem die Spannbetonteile magnetisiert werden und das Magnetfeld der Bewehrungselemente mit Magnetfeldsensoren gemessen wird. Durch Analyse der Messdaten können Anomalien identifiziert werden, die auf Brüche infolge von Spannungsrissskorrosion hindeuten. Dadurch können wertvolle Informationen über den Bauwerkszustand gewonnen werden.

Das Prüfverfahren unterliegt einer Vielzahl physikalischer Einflüsse. Das Ziel der vorgestellten Versuchsreihen ist es, das Verständnis der Einflussfaktoren zu vertiefen. Durch Sortieren, Filtern sowie grafische und statistische Methoden konnten die individuellen Einflussfaktoren quantifiziert und ihre komplexe Überlagerung im praktischen Einsatz dargestellt werden. Außerdem konnten die etablierten Verfahrensgrenzen und die Effektivität des Prüfverfahrens bestätigt werden.

Betrachtet man das Schadensbeispiel vom Anfang des Artikels unter dem Gesichtspunkt der vorgestellten Versuchsergebnisse, kann angenommen werden, dass der versteckte Schaden an den Spanngliedern lange vor einem Versagen hätte entdeckt werden können. Zum Zeitpunkt des Versagens waren alle der 16 Spannstähle gebro-

chen. Davor gab es keine von außen sichtbaren Anzeichen, dass ein Versagen bald bevorstehe, obwohl die Spannstähle im Inneren Schritt für Schritt korrodiert waren. Bei einer regelmäßigen Prüfung mit der magnetischen Streufeldmessung wäre dieser Schaden zuverlässig ab einer Querschnittsschwächung von 20 % erkannt worden. Somit hätte das plötzliche, unangekündigte Bauteilversagen verhindert werden können. Außerdem hätten die verbleibenden Spannbetonbinder auf vergleichbare Spannstahlschäden überprüft werden können. Ihre Integrität wäre sichergestellt, ohne sie systematisch durch Öffnungsstellen zu schwächen.

Ausblick

Die Weiterentwicklung der magnetischen Streufeldmessung ist auf verschiedenen Ebenen möglich. Magnetisierungseinheit, neuartige Sensoren, komplexere Maschinensteuerung, Messdatendarstellung, Auswertungsalgorithmen und viele weitere Elemente können stetig verbessert werden.

An der Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart wird momentan an mehreren Verbesserungen parallel gearbeitet. Die vorgestellten Ergebnisse aus der Masterarbeit werden übergangslos in einer Dissertation weitergeführt. Dabei stehen Optimierungen der bestehenden Auswertungsalgorithmen, die Entwicklung neuer Auswertungsmethoden unter Verwendung von Machine Learning und Simulationsmethoden im Vordergrund.

Neben der Weiterentwicklung der Software wird die komplette Messanlage aktuell neu gebaut. Dies bietet viele Möglichkeiten für Optimierungen und neue Funktionen. Einer der innovativsten Ansätze, die im Zuge eines Forschungsvorhabens und dem Neubau der Anlage aktuell verfolgt werden, ist der Einsatz von Quantensensoren.

Matthias Niethammer und Kim Kafenda Advanced Quantum GmbH haben nach jahrelanger theoretischer Forschung am physikalischen Institut der Universität Stuttgart ein Start-Up mit ihren patentierten Diamant-basierten Quantensensoren gegründet. Die aktuelle Generation der Quantensensoren für Magnetfeldmessungen basieren auf NV-Zentren (negativ geladene Stickstoff-Vakanzzentren) in der Kristallstruktur von Diamanten und nutzen Elektronenspindefekte zur optischen Analyse der Magnetfelder. Sie messen alle Raumrichtungen des Magnetfelds zur gleichen Zeit und erreichen eine Auflösung, die im Bereich von pT bis nT liegt. Die hohe Empfindlichkeit der Quantensensoren erlaubt einen deutlich größeren Abstand der Sensoren vom Prüfobjekt. Für die Streufeldmessung eignen sie sich insbesondere auch aufgrund ihrer Hysterese-Armut, was diese Art Sensor von anderen präzisen Magnetfeldsensoren unterscheidet. Aktuell sind sie hauptsächlich wegen der hohen Herstellungskosten noch nicht im regulären Praxiseinsatz, wobei im Bereich der magnetischen Streufeldmessung zudem die komplexe Dateninterpretation noch nicht vollumfänglich den notwendigen Stand für die Anwendung bei kommerziellen Dienstleistungen erreicht.

Eine der entscheidendsten Neuerungen in Bezug auf die neue Sensortechnologie ist die Erweiterung der ortsabhängigen, quantitativen Erfassung der Magnetfelder auf drei Raumrichtungen. Durch die vektorielle Erfassung der transversalen, axialen und radialen Komponenten der lokalen magnetischen Felder im aktiven und passiven Zustand (Streufeld und Restfeld) kann die Orientierung der magnetischen Dipole im geprüften Bauteil bestimmt werden. Mit geeigneter Software kann der Ursprung des Signals lokalisiert und Rückschlüsse auf die Abmessungen des Dipols gezogen werden. Durch diese zusätzliche Information über die vorherrschenden

Magnetfelder werden die Möglichkeiten der Trennung von Bruch- und Störsignalen deutlich erweitert und das Signal-Rausch-Verhältnis wesentlich verbessert.

Wenn man diese Eigenschaft mit der gesteigerten Sensitivität der Quantensensoren kombiniert, könnten in Zukunft der maximale Abstand zwischen Prüfkopf und Spannglied erhöht werden. Für die Prüfung ergeben sich dadurch die Möglichkeiten einer Effizienzsteigerung, da Anbauteile, TGA und abgehängte Decken bestenfalls nicht mehr entfernt werden müssen. Außerdem wird eine Erfassung auch tieferliegender Spannglieder inklusive der Tiefeninformation und somit eine Steigerung der Leistungsfähigkeit der Spanndrahtbruchortung hin zu einer Gesamtbewertung aller Spannglieder innerhalb typischer Bauteilabmessungen ermöglicht.

Danksagung

Die vorgestellten Versuche wurden an der Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart im Zuge einer Masterarbeit durchgeführt. Die Masterarbeit wurde mit dem Nachwuchspreis der DGZfP 2023 prämiert. Ich möchte mich an dieser Stelle noch einmal für die Möglichkeit zur Teilnahme an der DACH-Jahrestagung inklusive eigenem Vortrag bedanken.

Referenzen

- [1] Müller, Bericht über Untersuchungen an einem gebrochenen Spannbetonbinder aus dem Werk Schrobenhausen der Firma YTONG. Bericht 1376/Mü. TU München, Lehrstuhl für Massivbau, Prof. Dr.-Ing. K. Zilch (unveröffentlicht). zitiert nach Bundesanstalt für Straßenwesen, Integration der Handlungsanweisungen Spannungsrisskorrosion und Koppelfugen in die Nachrechnungsrichtlinie. Brücken- und Ingenieurbau Heft B 186, Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG, 2023
- [2] Bundesanstalt für Straßenwesen, Integration der Handlungsanweisungen Spannungsrisskorrosion und Koppelfugen in die Nachrechnungsrichtlinie. Brücken- und Ingenieurbau Heft B 186, Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG, 2023
- [3] Nürnberger, Schäden an Spannbetonbauwerken. In: Betonbauwerke, Schriftenreihe des Verbandes Deutscher Architekten- und Ingenieurvereine, Band 2, 2003.
- [4] Lehmann, Non-destructive testing and monitoring as elements of building inspection, Universität Stuttgart, Materialprüfungsanstalt, 2020.
- [5] Bundesanstalt für Straßenwesen, „Fokus: Brücken“, 1 März 2023. [Online]. Available: <https://www.bast.de/>.
- [6] Verkehr, Bundesministerium für, Bauwerksprüfung nach DIN 1076. Bedeutung, Organisation, Kosten. Dokumentation 2013, Berlin: Bau und Stadtentwicklung (BMVBS), 2013.
- [7] Verein Deutscher Ingenieure (VDI), VDI 6200:2010-02. Standsicherheit von Bauwerken. Regelmäßige Überprüfung, Düsseldorf, 2010/2015.
- [8] DB Netz AG, Richtlinie 804.8002. Inspektion von Ingenieurbauwerken; Eisenbahnüberführungen, DB Netz AG, Frankfurt am Main, 2020.
- [9] DB Netz AG, Richtlinie 805.0104. Tragsicherheit Eisenbahnbrücken; Grundlagen für die Nachrechnung; Messtechnische Bauwerksuntersuchungen, Berlin, 2021.
- [10] DB Netz AG, Richtlinie 805.0104. Tragsicherheit Eisenbahnbrücken; Grundlagen für die Nachrechnung; Messtechnische Bauwerksuntersuchungen, Berlin, 2021.
- [11] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS), Richtlinie zur Nachrechnung von Straßenbrücken im Bestand (Nachrechnungsrichtlinie), Berlin, 2011.

[12] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS), Richtlinie zur Nachrechnung von Straßenbrücken im Bestand (Nachrechnungsrichtlinie). 1. Ergänzung, Berlin, 2015.

[13] Sakiyama, F.I.H.: Real-size structural health monitoring of a pre-stressed concrete bridge based on long-gauge fiber Bragg grating sensors. Dissertation, Universität Stuttgart, Materialprüfungsanstalt, 2021.

[14] Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung (DGZfP), Unterausschuss Dauerüberwachung von Bauwerken, DGZfP Merkblatt B 09. Dauerüberwachung von Ingenieurbauwerken, Berlin, 2022.

[15] Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung (DGZfP), Unterausschuss Magnetische Verfahren zur Spannstahlbruchortung, „DGZfP Positionspapier. Magnetische Verfahren zur Spannstahlbruchortung,“ Berlin, 2017.

[16] Sawade, „Prüfung von Spannbetonbauteilen mit magnetischen Methoden,“ Beton- und Stahlbetonbau 105, Nr. Heft 3, pp. 154-164, 2010.

Lückenlos nachvollziehbare Prüfabläufe

Einfache Erstellung von Prüfberichten

Auftragsstatus aller Prüfungen auf einen Blick

Digitalisieren Sie Ihren ZfP-Workflow!

Steigern Sie Ihre Effizienz um bis zu 50 % *

FROST & SULLIVAN
BEST PRACTICES AWARD
2021
GLOBAL NDT WORKFLOW MANAGEMENT SOFTWARE
NEW PRODUCT INNOVATION AWARD

Mit der Cloud-basierten Management-Software DRIVE NDT können Sie Ihren gesamten ZfP-Workflow für alle Prüfverfahren zentral organisieren und steuern.

- Umfassendes Auftragsmanagement
- Individuelle und automatisierte Prüfberichterstellung
- Verwaltung von Prüfpersonal inkl. Dosismanagement
- Prüfmittelüberwachung und -verwaltung
- Anlage von Prüfobjekten inkl. Prüfparameter, ROI, ...
- Zentraler Zugriff auf Prüfanweisungen und -vorschriften
- Unterstützende Systemhinweise und Erinnerungen
- Smarte Auswertbarkeit der Daten, z.B. für Statistiken
- Beschleunigung der Abrechnungsprozesse
- Benutzerzugriff jederzeit und von überall möglich

Jetzt Termin für eine kostenlose Demonstration vereinbaren!

DRIVENDT
www.drive-ndt.com

Eine Softwarelösung von
DÜRR NDT AAP NDT

AAP NDT Channel-Partner Deutschland

BW PLUS
NDT

PTH GmbH