

**Zusammenfassung des Abschlußberichts
zum Forschungsauftrag des DIBT**

Ortung von Spannstahlbrüchen in metallischen Hüllrohren

AZ.: IV 1-5-672/92

DIBT

Deutsches Institut für Bautechnik

Technische Universität Berlin

Institut für Bauingenieurwesen

Fachgebiet Baustoffkunde und Baustoffprüfung

August 1996

Die Problematik

Es ist in jüngster Vergangenheit vorgekommen, daß Spannbetonbauteile versagten und teilweise einstürzten, weil Spannstähle brachen. Nicht in allen Fällen konnten die Ursachen der Spannstahlbrüche geklärt werden.

Um Spannbetonbauteile mit nachträglichem Verbund auf Schädigungen der Spannstähle zu prüfen, stand bis vor kurzem nur die Möglichkeit zur Verfügung, das Bauteil bis zu den Spanngliedern zu öffnen und die Spannstähle visuell zu überprüfen bzw. einzelne Spannstähle aus den Spanngliedern an den geöffneten Stellen zu entnehmen und an diesen Proben Laboruntersuchungen durchzuführen (Magnetpulverprüfungen, Zugversuche, metallographische Untersuchungen). Eine Überprüfung der Spannstähle konnte damit nur lokal durchgeführt werden und es konnten darüberhinaus nur Aussagen über den Zustand der Spanndrahtlage gemacht werden, die von der Betonoberfläche aus zugänglich ist. Die hinter dieser Lage liegenden Spanndrähte können weder visuell überprüft noch entnommen werden. Der geprüfte Stichprobenumfang bei zerstörender Prüfung ist also zwangsläufig sehr klein. Das ist insbesondere dann kritisch, wenn nicht bekannt ist, wo besonders gefährdete Bereiche liegen, weil die Schadensursache nicht bekannt ist. Eine zerstörungsfreie Prüfung von Spannstählen, die einen wesentlich größeren Stichprobenumfang erfaßt, stand bis zur Entwicklung dieses zerstörungsfreien Prüfverfahrens nur für Spannbetonbauteile mit sofortigem Verbund zur Verfügung.

Das Ziel

Das Ziel des Forschungsvorhabens war es, ein Verfahren zur Ortung von Spannstahlbrüchen in metallischen Hüllrohren bis zur Praxistauglichkeit für Bauwerkuntersuchungen zu entwickeln. Genutzt werden sollte, wie bei der Ortung von Spannstahlbrüchen mit sofortigem Verbund, der physikalische Effekt, daß an Bruchstellen magnetisierter Spanndrähte magnetische Streufelder entstehen, die an der Betonoberfläche mit einer geeigneten Sensorik nachweisbar sind.

Das Meßprinzip

Die Spannglieder werden mit einem speziell zu diesem Zweck konstruierten Elektromagneten von der Betonoberfläche aus magnetisiert. Der von den Spanndrahtbrüchen ausgehende magnetische Streufluß wird an der Betonoberfläche mit Sensoren für die magnetische Flußdichte wegabhängig gemessen. Störsignale erschweren die Interpretation der Meßergebnisse. Sie werden hauptsächlich durch die zwangsläufig ebenfalls aufmagnetisierte Stahlbetonbewehrung verursacht.

Die Laboruntersuchungen

Die Laboruntersuchungen sollten folgende Fragestellungen klären:

- Welche Zusammenhänge bestehen zwischen der Art der Magnetisierung und der Ausbildung eines Bruchsignals ?
- Welche physikalischen Methoden können genutzt werden, um die Störsignale zu unterdrücken ?
- Welche Parameter bestimmen die Form und die Stärke eines Bruchsignals ?
- Welche Rückschlüsse aus dem Verlauf der gemessenen Flußdichte auf den Schädigungsgrad eines Spannglieds sind möglich ?
- Welche magnetischen Eigenschaften haben Spann- und Bewehrungstähle ?
- Welche Störsignale ergeben sich aus speziellen Anordnungen der Stahlbetonbewehrung und anderen Störquellen ?
- Welchen Einfluß hat das Hüllrohr auf das Meßsignal ?

Es wurde drei Arten von Laboruntersuchungen durchgeführt.

1. Zur Entwicklung und Optimierung des Magneten und der Magnetisierungstechnik wurde der Verlauf der magnetischen Flußdichte in speziellen Punkten im und am Spannstahlbündel, sowie an speziellen Punkten der Stahlbetonbewehrung während verschiedener Magnetisierungsprozesse gemessen.
2. Um aus der Analyse eines Bruchsignals auf die Lage der Bruchstellen im Spanngliedquerschnitt und auf den Grad der Schädigung schließen zu können, wurde untersucht, von welchen Parametern die charakteristischen Kennwerte eines Bruchsignals abhängen.
3. Die Koerzitivfeldstärke und ein Kennwert, der angenähert proportional zur Remanenz ist, wurde an unterschiedlichen Spann- und Betonstahlproben gemessen. Geklärt werden sollte die Frage, ob die Unterschiede, die zwischen den einzelnen Spannstahlsorten hinsichtlich dieser Werte bestehen, beim Magnetisieren und bei der Signalinterpretation berücksichtigt werden müssen. Betonstahlproben wurden ebenfalls untersucht, um mit der Kenntnis ihrer magnetischen Eigenschaften die Stärke und die Richtung der Störfelder über die Art der Magnetisierung gezielt zu beeinflussen.

Die wesentlichen Ergebnisse der einzelnen Untersuchungsbereiche sind:

1. Die Bruchsignalstärke ist bei sonst gleichen Bedingungen am stärksten, wenn die Restfeldmagnetisierung des Spannglieds maximal ist. Die Messung der Flußdichte an Spanngliedern durchzuführen, die zuvor nicht magnetisiert wurden, kann aufgrund bestehender lokaler Magnetisierungen der Spannstähle, weil diese irgendwann magnetischen Feldern ausgesetzt waren, zu Fehlinterpretationen der Meßdaten führen. Die unbekannt magnetische Geschichte muß deshalb gelöscht werden. Das erreicht man indem man sie einem hinreichend großen magnetischen Feld aussetzt. Das Feld ist dann groß genug, wenn bei seiner Einwirkung auf den Spannstahl in diesem alle irreversiblen Magnetisierungsprozesse stattfinden. Erst dadurch wird ein definierter magnetischer Zustand erzeugt, der nicht von der magnetischen Geschichte des

Stahls abhängt. Die Geometrie des benutzten Magneten und die Magnetisierungsprozedur wurden hinsichtlich einer maximalen Magnetisierung der Spannglieder optimiert. Dabei wurde die Nebenbedingung berücksichtigt, daß die Magnetisierung der Stahlbetonbewehrung möglichst klein bleiben soll. Unabhängig von der Betondeckung, wenn diese kleiner als 30 cm ist, wird die remanente Magnetisierung (maximale Restfeldmagnetisierung) der Spannstähle erreicht. Die Kenntnis der Magnetisierungsverteilung in kritischen Punkten der Stahlbetonbewehrung nach den einzelnen Magnetisierungsschritten erlaubt die gezielte Erzeugung unterschiedlicher magnetischer Zustände des Spannbetonbauteils zur Unterscheidung der Störsignale von Bruchsignalen.

2. Es konnten phänomenologische Gesetzmäßigkeiten abgeleitet werden, die Rückschlüsse aus einem Bruchsignal auf die Lage der Bruchstellen im Spanngliedquerschnitt und den Schädigungsgrad erlauben. Die Bruchsignalstärke ist bei sonst gleichen Bedingungen proportional zur Querschnittsschwächung und proportional zu $c^{-1.75}$, wobei c die Betondeckung ist. Außerdem bestimmt die Bruchweite die Bruchsignalstärke. Auf die Bruchweite selbst kann nicht aus dem Bruchsignal geschlossen werden. Sie muß bei der Abschätzung des Schädigungsgrads geschätzt werden. Die Bruchsignalstärke geht nicht mit der Bruchweite gegen Null; schon die Gefügestörung aufgrund eines Bruchs führt zu einem Streufeld, auch wenn die Bruchufer sich nicht voneinander entfernt haben.

Das Hüllrohr führt zu einer Verbreiterung und leichten Abschwächung des Signals. Die Bruchsignalstärke nimmt durch den Einfluß des Hüllrohrs um bis zu 20 % ab .

Die Überlagerung benachbarter Brüche kann bei homogener Bruchstellenverteilung zur partiellen Auslöschung der Bruchsignale führen. Das kann bei homogener Bruchstellenverteilung über eine größere Spanngliedlänge, die in der Praxis sehr unwahrscheinlich ist, zu Interpretationsschwierigkeiten führen. Schwankungen in der Bruchstellenverteilung erzeugen wiederum bruchartige Signale.

3. Die Streuung der magnetischen Kennwerte verschiedener Spannstahlproben unterschiedlicher Hersteller und unterschiedlicher Herstellungsart kann für die Signalinterpretation vernachlässigt werden.

Der Einfluß von Zugspannungen auf die magnetischen Kennwerte wurde von uns nicht untersucht. Bei vergüteten und warmverformten Stählen ohne kristalline Vorzugsrichtung dürfte sich die Vorspannung nicht nennenswert auf die Bruchsignalstärke auswirken. Bei kaltgezogenen Spannstählen ist eine ausgeprägtere Abhängigkeit der magnetischen Kenngrößen von dem Vorspanngrad zu erwarten. Die Ergebnisse anderer Forschungsprojekte, in denen diese Thematik behandelt wird, müssen gegebenenfalls bei der Abschätzung des Schädigungsgrads berücksichtigt werden.

Die Vorspanngrad wirkt sich eventuell auf die Bruchsignalstärke aus, nicht auf die Bildung eines Streufelds an Bruchstellen an sich.

Die Koerzitivfeldstärken von Spann- und Betonstählen unterscheiden sich stark. Das kann zur Abschwächung der Störsignale ohne Beeinflussung der Bruchsignale genutzt werden.

Numerische Weiterverarbeitung der Meßdaten

Neben der physikalischen Unterdrückung der Störsignale, indem derart aufmagnetisiert wird, daß die Magnetisierung der Stahlbetonbewehrung klein wird, werden numerische Verfahren zur Eliminierung kurzweiliger Signalanteile benutzt (Fast-Fouriertransformation-Filter). Einflüsse der Signale, die durch quer zum Spannglied ausgerichtete Betonstahlstäbe (Bügel) erzeugt werden, können damit fast vollständig unterdrückt werden. Es wurden Programme entwickelt, die die Korrelationsfunktion zweier Meßdatensätze berechnen. Repräsentieren die Datensätze zwei magnetische Zustände des Spannbetonbauteils, die sich ausschließlich in der Magnetisierung der Stahlbetonbewehrung, nicht aber in der Magnetisierung des Spannglieds unterscheiden, dann liefert die Korrelationsfunktion in den Bereichen große Werte, in denen die gemessene Flußdichte vom Spannglied erzeugt wird und kleine Werte in den Bereichen, in denen sie von der Stahlbetonbewehrung ausgeht. Das liefert Kriterien zur Unterscheidung der Störsignale von den Nutzsignalen (Bruchsignalen).

Mathematische Berechnungsmodelle

Mathematische Modelle zur quantitativen Beschreibung der physikalischen Prozesse, die bei der magnetischen Spannstahlbruchortung stattfinden, existieren bisher nicht. Die elektromagnetischen Felder werden zwar durch die Maxwell-Gleichungen vollständig beschrieben, die stofflichen und geometrischen Eigenschaften aber, die das magnetische Verhalten ferromagnetischer Körper bestimmen, sind zu komplex, um einfach und allgemeingültig modellierbar zu sein. Für Berechnungen der Feldverteilung sind sie jedoch entscheidend, weil sie die Materialgleichungen bestimmen, die die Feldgrößen in den Maxwell-Gleichungen miteinander verknüpfen.

Die Lösung des inversen Problems, um aus der Feldverteilung außerhalb des Betons auf die Quellen der Streufelder im Bauteil zu schließen, ist prinzipiell nicht möglich.

Die Bauwerkuntersuchung

Parallel zu den Laborversuchen wurde das Verfahren bei Bauwerkuntersuchungen erprobt.

Vor der Spanndrahtbruchortung an Spannbetonbauteilen müssen die Spannglieder, wenn Abweichungen von dem in den Bauplänen angegebenen Verlauf zu erwarten sind, mit dem Radarverfahren lokalisiert werden.

Der Magnet und der Meßwagen sind mit geeigneten Hilfskonstruktionen möglichst dicht an der Betonoberfläche entlang der Projektion des Spanngliedverlaufs zu führen. Je nach den baulichen Randbedingungen, sind unterschiedliche Hilfskonstruktionen erforderlich, um die Geräte entlang des Spanngliedverlaufs zu führen. Die Hilfskonstruktionen ermöglichen die Überprüfung der Spannglieder von der oberen, einer seitlichen und der unteren Bauteiloberfläche aus.

Die Betonoberfläche von der aus die Spannstahlbruchortung durchgeführt werden soll, muß entlang der Projektionslinie des zu untersuchenden Spannglieds zugänglich sein. Es muß ein ausreichender Raum für die Hilfskonstruktionen zur Verfügung stehen, um den Magneten und den Meßwagen entlang dieser Projektionslinie zu führen (ca. 1 m x 1 m entlang des Spanngliedverlaufs).

Das Spannglied muß dabei auf einer ausreichenden Länge (Mindestlänge: 4 m) magnetisiert werden können, weil in den Polbereichen des magnetisierten Teils eines Spannglieds ist eine Interpretation der Meßsignale nicht möglich ist. Die Flußdichte ist in diesen Bereichen durch die Polausbildung zu stark. Zwischen einem zu untersuchenden Spannglied und der Betonoberfläche, von der aus die Messung durchgeführt wird, darf kein anderes Spannglied liegen. Ein hinter einem anderen Spannglied liegendes Spannglied könnte mit einem Magneten unserer Größenordnung (Masse: 30 kg) nicht aufmagnetisiert werden, weil der magnetische Fluß zum größten Teil durch das näher gelegene Spannglied verlief. Um ein Spannglied zu magnetisieren, das hinter einem anderen gelegen ist, müßte ein wesentlich größerer magnetischer Fluß erzeugt werden, wozu wiederum ein wesentlich größerer Elektromagnet erforderlich wäre. Gelänge es, das Spannglied aufzumagnetisieren, wären die Streuflüsse, die Spannstahlbrüche dieses Spannglieds erzeugen würden, an der Betonoberfläche sehr klein, denn die Betondeckung eines solchen Spannglieds ist relativ groß und außerdem würde der Streufluß teilweise durch das Spannglied abgeschirmt, das zwischen dem zu untersuchenden Spannglied und dem Sensor liegt. Solche Bruchsignale wären im Hintergrund der Störsignale nur bei sehr starken Schädigungen auflösbar. Prüfbar sind also nur Spannglieder, die nicht durch andere von der Bauteiloberfläche aus gesehen verdeckt sind.

Die Nachweisgrenze für Spannstahlbrüche ist davon abhängig, wie stark die gemessene magnetische Flußdichte von Störsignalen, erzeugt durch die Stahlbetonbewehrung, beeinflusst ist. Bei normaler Bewehrungslage können Brüche einzelner Spanndrähte in remanent magnetisierten Spanngliedern, bis zu einer Betondeckung nachgewiesen werden, die etwa das Zwanzigfache des Drahtdurchmessers beträgt. Bei sehr dicht und unregelmäßig verlegter Stahlbetonbewehrung verringert sich diese Nachweisgrenze. Bei fehlender Stahlbetonbewehrung in Laborversuchen liegt die Nachweisgrenze für Brüche einzelner Spanndrähte in Spanngliedern bei einer Betondeckung, die mehr als das Dreißigfache des Drahtdurchmessers beträgt und durch die Empfindlichkeit der eingesetzten Hallsonden begrenzt wird. Die Empfindlichkeit der Hallsonden kann bei Bauwerkuntersuchungen, wegen der unvermeidbar auftretenden Störsignale, nicht voll genutzt werden. Es ist also nicht erforderlich, empfindlichere Sonden (z.B. SQUIDs oder Schwingspulen) einzusetzen.

Die Durchführung der Messungen an Bauwerken erfordert geschultes Personal, die Auswertung der Meßdaten noch den Spezialisten. Die Signalauswertung wird durch die Anwendung verschiedener numerischer Hilfsmittel zwar vereinfacht, der Informationsgehalt der Meßkurven bleibt aufgrund der Störsignale dennoch sehr komplex und erfordert deshalb ein genaues Verständnis der physikalischen Zusammenhänge.

Ergebnis des Forschungsprojekts

Das Gesamtergebnis des Forschungsvorhabens ist die Entwicklung eines Meßverfahrens, mit dem Spannstahlbrüche in Spanngliedern mit ferromagnetischem Hüllrohr geortet werden. Die Anforderungen an die baulichen Randbedingungen, die erfüllt sein müssen, erlauben in der Regel nicht die Prüfung aller Spannglieder eines Bauteils in allen Bereichen. Der prüfbare Bereich ist aber andererseits in der Regel so groß, daß sich die Untersuchungsergebnisse mit hoher Aussagesicherheit auf das gesamte Bauteil übertragen lassen.