

## **Schnelle Spanndrahtbruchortung in Querspanngliedern von Brückenplatten**

H. Scheel, Technische Universität Berlin

### **Kurzfassung**

Wesentliches Merkmal eines funktionstüchtigen, sicheren Spannbetonbauteils ist der einwandfreie Zustand der Spannbewehrung. Eine besondere Korrosionsgefahr für die Querspannglieder in Brückenplatten geht von Tausalzen aus.

Mit der magnetischen Streufeldmethode können Spanndrahtbrüche erkannt werden. Eine erforderliche Überprüfung von Querspanngliedern der Fahrbahnplatte einer Brücke wird häufig dennoch nicht durchgeführt, weil der Verkehr nicht über den für die Prüfarbeiten benötigten Zeitraum umgeleitet werden kann.

Die Geschwindigkeit des Verfahrens musste deshalb so weit erhöht werden, dass eine komplette Brückentafel in einer Nacht messtechnisch erfasst werden kann, um so eine Behinderung des Verkehrs weitestgehend zu vermeiden.

Zur Erhöhung der Messgeschwindigkeit und zur Verringerung des Aufwands der vorbereitenden Arbeiten (Einmessen der Spanngliedlagen mit Georadar) sollten folgende Ziele verwirklicht werden:

- Magnetisierung eines Spannglieds in einem Arbeitsschritt.
- Scannen der magnetischen Flussdichte über einen großen Bereich in einem Arbeitsschritt.

Zur Verwirklichung dieser Ziele wurde ein Magnet hergestellt, mit dem Spanngliedabschnitte von etwa 3,50 m Länge durch Überfahren in einer Fahrtrichtung quer zur Spanngliedrichtung aufmagnetisiert werden. An diesen gekoppelt läuft eine Sensoreinheit dem Magneten hinterher, die auf einer Breite von etwa 3,50 m die aus der Brückenplatte austretende magnetische Flussdichte in einem Rastermaß von 1 cm x 1 cm erfasst. Die Magnetisierungs- bzw. Messgeschwindigkeit beträgt etwa 500 m/h. Eine 18 m breite und 500 m lange Fahrbahnplatte kann damit in einer Nacht komplett messtechnisch erfasst werden, wobei zu keiner Zeit eine vollständige Sperrung erforderlich ist.

Der Magnet wurde bereits an einem Bauwerk erfolgreich getestet, ein Bauwerkseinsatz der Sensoreinheit steht unmittelbar bevor.

### **Einleitung**

Brückenbauwerke sind einer ständig steigenden Verkehrslast in Häufigkeit und Lasthöhe ausgesetzt. Die Altersstruktur und die Belastungssituation können in Zukunft zu einem starken Anstieg der Erhaltungskosten führen. Aus diesen Gründen ist es erforderlich, neben einer Optimierung der Planung bezüglich des Einsatzes von Erhaltungsmaßnahmen auch die Effizienz der Diagnoseverfahren zu steigern.

Der aus Gründen der Verkehrssicherheit bis heute unumgängliche Einsatz von Tausalz kann zu gravierenden Korrosionsschäden an der Bewehrung von Brückenbauwerken führen. Besonders betroffen von dieser Korrosionsgefahr sind Querspannglieder in Brückenplatten.

Eine erforderliche Überprüfung von Querspanngliedern der Fahrbahnplatte einer Brücke lässt sich häufig dennoch nicht durchführen, weil der Verkehr nicht über den erforderlichen Zeitraum umgeleitet werden kann.

Ziel der hier geschilderten Geräteentwicklung war es, das magnetische Streufeldverfahren zur Ortung von Spanndrahtbrüchen [1], [2] mit einer Messgeschwindigkeit anwenden zu können, die es erlaubt, eine komplette Brückentafel in einer Nacht messtechnisch erfassen zu können, um so die Behinderung des Verkehrs weitestgehend zu vermeiden. Für die Untersuchung der meisten Brücken wäre es inzwischen ausreichend, den Verkehr während einer Nacht in der verkehrssarmen Zeit durch Sperrung einzelner Fahrspuren einzuschränken, um die Querspannglieder auf Spanndrahtbrüche zu untersuchen.

### Physikalisches Prinzip des Verfahrens

Das Verfahren der magnetischen Spanndrahtbruchortung beruht auf dem Effekt, dass sich an der Bruchstelle eines magnetisierten Körpers eine Dipolverteilung ausbildet. Das magnetische Streufeld an der Bruchstelle eines magnetisierten Spanndrahts gleicht dem an der Bruchstelle eines Stabmagneten (Abb. 1 links). Betrachtet man die transversale Komponente der magnetischen Flussdichte (orthogonal zum Spannglied gerichtet) an der Betonoberfläche, so zeigt sich an Bruchstellen einzelner Spanndrähte eines Spannglieds ein charakteristisches Bruchsignal.

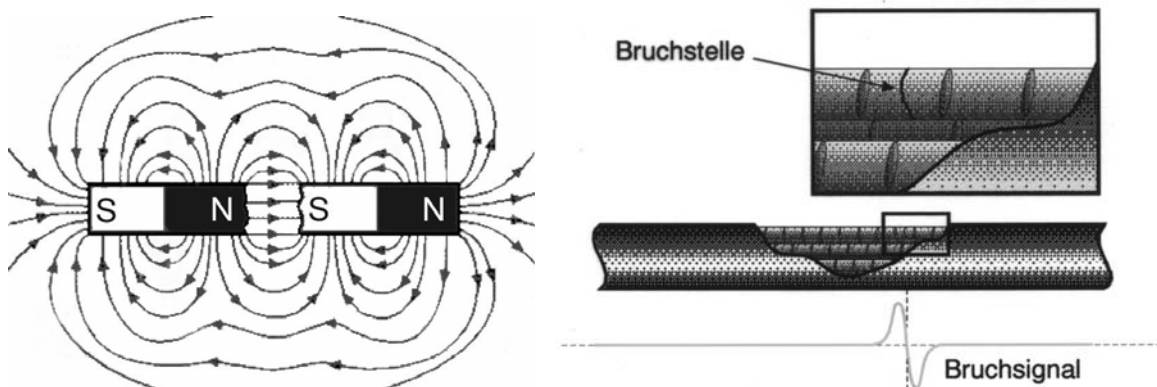


Abb. 1 Von einem magnetisierten Spanndraht geht ein magnetisches Feld aus, das dem eines Stabmagneten gleicht. An einer Bruchstelle formt sich ein zusätzliches Polpaar (Dipol), das ein magnetisches Streufeld hervorruft (links). Die transversale Komponente des Streufelds an einem Spanndrahtbruch zeigt das rechte Bild. Von diesem Bruchsignal wird auf Bruchstellen geschlossen.

### Ausgangssituation

Das magnetische Streufeldverfahren wird seit über 80 Jahren in der Werkstoffprüfung wissenschaftlich genutzt. Im Bauwesen nutzt man es zur Ortung von Spanndrahtbrüchen seit Anfang der Achtzigerjahre in den USA [3] und seit Ende der Achtzigerjahre auch in Deutschland zu diesem Zwecke eingesetzt. Anfänglich konnte das Verfahren nur bei Spannbeton mit direktem Verbund eingesetzt werden [4]. In den Neunzigerjahren wurde das Verfahren von zwei Arbeitsgruppen unabhängig voneinander für die Anwendung auf Spannbeton mit nachträglichem Verbund weiterentwickelt. Seit Mitte der Neunzigerjahre kann das Verfahren auf praktisch alle

Spannbetonbauteile bei verschiedenen Randbedingungen angewandt werden [5], [6]. Der Messablauf war unabhängig von der Art des untersuchten Bauteils stets gleich: Das Spannglied musste, bis es bis remanent aufmagnetisiert war, mehrmals von einem elektromagnetischen Jochmagneten entlang seiner Projektionslinie auf die Betonoberfläche „überfahren“ werden. Nach den einzelnen Magnetisierungsschritten wurde die magnetische Flussdichte mit magnetischen Sensoren (z. B. Hallsonden) entlang dieser Projektionslinie gemessen.

Dieser Messvorgang ist recht zeitaufwendig und lässt sich nach heutigem Kenntnisstand nur durch den Einsatz eines größeren Magneten und den Einsatz von magnetischen Sensoren, die größere Flächen überstreichen, beschleunigen.

Müssen Magnet und Sensorik seitlich oder unterhalb des Bauteils an diesem entlang geführt werden, stößt man bei dem Wunsch nach größeren und damit effizienteren Geräten schnell an Grenzen. Erstens ist die Zugänglichkeit zu den Bauteilen häufig eingeschränkt, zweitens ist die Masse des Magneten, der für derartige Messungen eingesetzt wird, bereits so groß, dass jede weitere Massenzunahme die Handhabbarkeit stark einschränken würde. Anders verhält es sich bei der Messung von der Oberseite eines Bauteils, wie sie bei der Überprüfung von Querspanngliedern in Brückenplatten durchgeführt wird. In einem solchen Fall war es prinzipiell möglich, selbstfahrende Magneten mit einer Masse in Tonnenbereich einzusetzen.

### Von der Idee zum baustellentauglichen Gerät

Zunächst wurde ein zerlegbarer Jochmagnet ins Auge gefasst, der an der zu untersuchenden Brücke zusammengesetzt werden sollte und die gesamte Brückenbreite übergreifen sollte, um die Querspannglieder auf ihrer gesamten Länge mittels Durchflutung mit einem magnetischen Fluss aufzumagnetisieren. Ob dies gelingen konnte und wie ein derartiger Magnet bemessen sein müsste, konnte nur experimentell herausgefunden werden, weil die mathematischen Modelle und darauf auf-

bauende numerische Methoden zur Berechnung magnetischer Felder allesamt auf vereinfachten Annahmen beruhen und nicht auf das Problem anwendbar sind, sondern nur bei geschlossenen magnetischen Kreisen zufrieden stellende Ergebnisse liefern. Bei der Magnetisierung der Querspannglieder muss an beiden Füßen des magnetischen Jochs jeweils ein bis zu 20 cm dicken „Spalt“ aus nicht ferromagnetischem Material (Beton) überwunden werden.



Abb. 2: Prototyp des Jochmagneten für die Spanndrahtbruchortung an Querspanngliedern.

Der erste Prototyp war der in Abb. 2 gezeigte elektrische Jochmagnet. Die Jochbeine bestehen jeweils aus 1,10 m langen Reineisen-Rundstäben mit einem Durchmesser

von 10 cm. Der Jochrücken ist aus einem 3 m langen Reineisen-Rundstab, Durchmesser 5 cm und zwei 50 cm langen Übergangsstücken von den Rundstangen zu den Jochbeinen zusammengesetzt. Die Spulen über den Jochbeinen haben eine Länge von jeweils 1 m und eine elektrische Leistungsaufnahme von jeweils 7,5 kW. Mit einem derartigen Jochmagneten mit einer Rückenlänge von 3,50 m gelang es, einen durchtrennten Rundstab aus St37, Durchmesser 40 mm, magnetisch zu durchfluten und auf diese Weise remanent zu magnetisieren. Abb. 3 zeigt den Verlauf der transversalen und der axialen Komponente der magnetischen Flussdichte entlang dem Stab im Abstand von 13,5 cm. Das Bruchsignal ist deutlich erkennbar und kehrt sich bei Umpolung der Magnetisierung um.

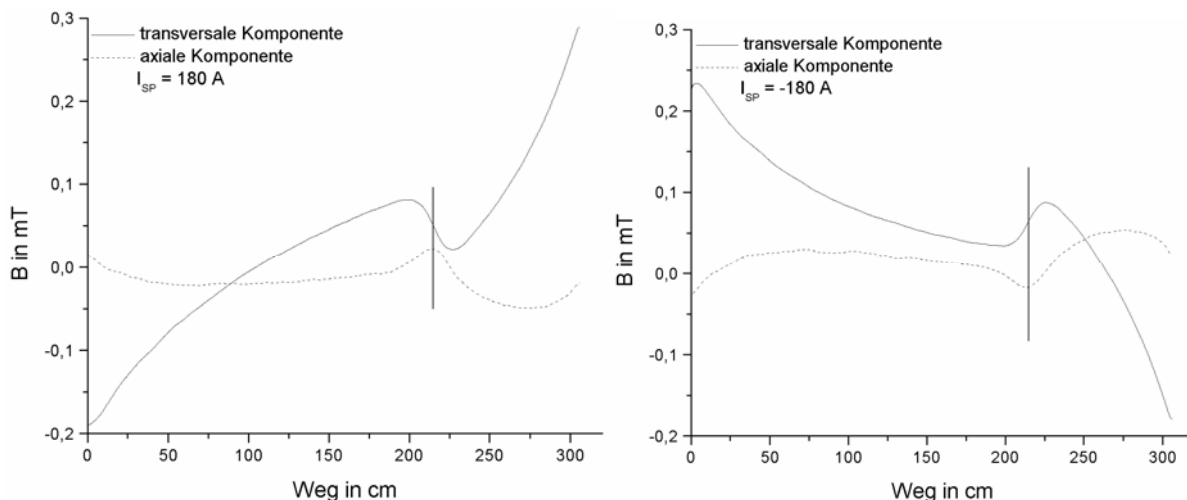


Abb. 3: Transversale und axiale Komponente der magnetischen Flussdichte entlang einem St 37 Stab in 13,5 cm Entfernung von dem Stab. Der vertikale Strich markiert die Lage der Bruchstelle. Der linke und der rechte Graph unterscheiden sich durch das Vorzeichen der Spulenströme – der gleiche Stab hat im linken Graph eine Süd-Nord-Polarisation und im rechten die entgegengesetzte Nord-Süd-Polarisation.

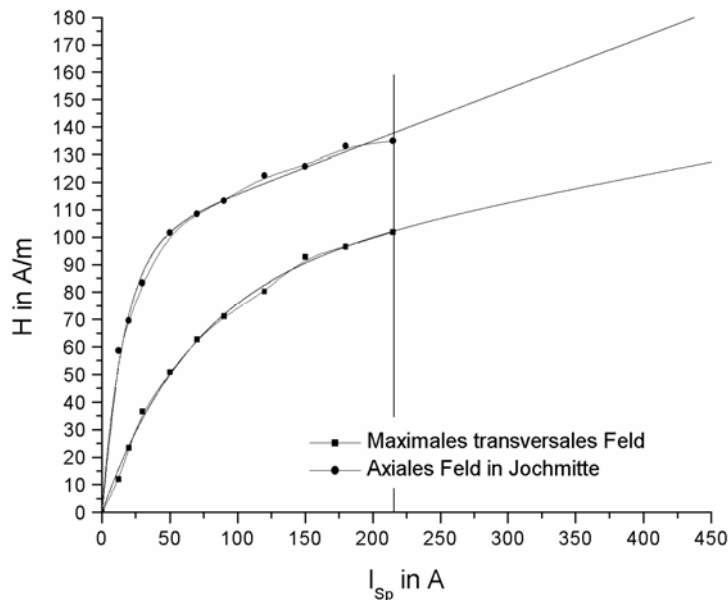
Die Durchflutung gelang in späteren Versuchen mit einer Rückenlänge des Jochs von 10 m an 10 m langen Stäben aus St 37. Spanndrähte hingegen wurden nicht einmal auf einer Länge von 3,50 m magnetisch durchflutet. Der Grund dafür ist, dass Spanndrähte magnetisch wesentlich härter sind als ein normalfester St 37. Sie haben eine höhere Koerzitivfeldstärke – setzen einer Ummagnetisierung also einen höheren Widerstand entgegen.

Die von dem Elektromagneten erzeugte magnetische Feldstärke reichte nicht aus, um Spannstahl zu durchfluten und auf diese Weise zu magnetisieren. Ein größerer Magnet musste konstruiert und gebaut werden.

Zur Bemessung des neuen Magneten wurden Messwerte der magnetischen Feldstärke, die der vorhandene Magnet erzeugen konnte herangezogen. Die axiale Komponente der magnetischen Feldstärke exakt in der Mitte zwischen den Jochbeinen 15 cm unter dem Magneten, dort wo sonst die Mitte des zu magnetisierenden Spanngliedabschnitts liegt und die Maximalwerte des transversalen Felds im gleichen Abstand direkt unter den Jochbeinen, in Abhängigkeit von dem Spulenstrom, sind in Abb. 4 dargestellt. Es zeigt sich, dass ab einem Spulenstrom von etwa 50 A die magnetische Feldstärke  $H$  nur noch schwach ansteigt. Die Jochbeine aus Reineisen geraten bei diesem Spulenstrom in die magnetische Sättigung und tragen bei

weiterer Erhöhung der Stromstärke mit mehr nennenswert zur Steigerung der magnetischen Feldstärke bei.

Erforderlich zur Steigerung der maximal erzeugbaren magnetischen Feldstärke waren damit schwerere Spulenkern bzw. Jochbeine aus Reineisen. Eine rechnerische Abschätzung für die erforderliche Masse auf Grundlage der Messwerte des vorhandenen Magneten, lieferte das Ergebnis, dass die Jochbeine bei einer Höhe von 1,10 m einen Durchmesser von 32 cm haben sollten. Die damit erreichte Masse für



einen Magneten, der ein 3,50 m langen Spanngliedabschnitt magnetisch durchfluten soll, um ihn bis zur Remanenz zu magnetisieren, überschreitet durch diese Forderung 1,5 t. Von der Idee die Querspannglieder über die gesamte Brückenplattenbreite in einem Schritt, also mit einem bis zu 18 m breiten Magneten zu arbeiten, wurde aus diesem Grunde abgerückt. Ziel war jetzt der Bau eines Magneten, mit dem 3,50 m breite Spanngliedabschnitte magnetisiert werden können.

Abb. 4: Die charakteristischen Kenngrößen, maximales transversales Feld und axiales Feld in Jochmitte, als Funktion des Spulenstroms  $I_{Sp}$ . Messwerte liegen nur bis zu einem Spulenstrom von etwa 215 A vor (vertikale Linie). Für größere Werte handelt es sich um Extrapolationen gemäß den Funktionen (dickere Kurven), die sich für die gefitteten Messwerte ergeben.

Mit dem neuen Magneten (Abb. 5) gelang die magnetische Durchflutung der Spanndrähte leider zunächst immer noch nicht. Der Rücken des Magneten bestand derzeit noch aus einem Rückenelement und den zwei Übergangselementen seines Vorgängers, weil davon ausgegangen wurde, dass ein Rückenquerschnitt, der einem maximal zu erwartenden Spanngliedquerschnitt entspricht, ausreichen müsste, um den magnetischen Fluß durch das Spannglied durch den Jochrücken auf der anderen Seite der Jochbeine zu schließen. Dies war ein Irrtum, wie sich zeigen sollte.

Die magnetische Durchflutung des Spanngliedabschnitts und das Aufmagnetisieren dieses Spanngliedabschnitts bis zur Remanenz gelang erst, nachdem der vorhandene Jochrücken durch zwei in der Mitte verbundene Reineisenbleche mit der wesentlich größeren Querschnittsabmessung 320 mm x 50 mm ersetzt wurde.

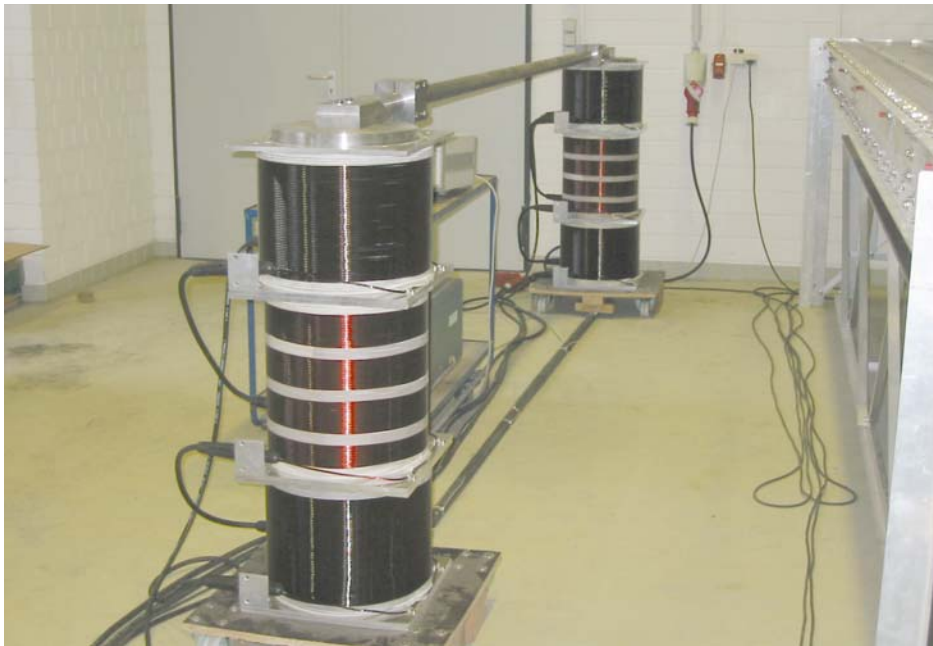


Abb. 5: Das elektromagnetische Joch zur Durchflutung von Spanngliedabschnitten mit einem Rücken, der später durch einen neuen Jochrücken mit größerer Querschnittsfläche ersetzt wurde.

Nächster Schritt war es, den Magneten fahrbar zu machen. In Zusammenarbeit mit der Firma HFB- Fahrzeugbau & Service GmbH aus Müncheberg wurde ein elektrohydraulisch angetriebenes Fahrzeug entwickelt, in das der Magnet integriert wurde (Abb. 6).



Abb. 6: Das elektromagnetische Joch, integriert in das dafür angefertigte Fahrzeug.



## Der erste Einsatz auf einer Brücke

Ein erster Bauwerkeinsatz des Magnetwagens fand im Sommer 2005 auf der Mörschbrücke in Berlin statt (Abb. 7). Die Brücke sollte abgerissen werden und wurde uns von der Senatsverwaltung für Stadtentwicklung in einem Bereich für eine



Testmessung zur Verfügung gestellt. Da nicht bekannt war, ob weitere Spanndrahtbrüche vorlagen, wurde ein Querspannglied durchtrennt (Abb. 8). Getestet wurde der Magnetwagen. Da das Gerät für die Messwerterfassung zum Zeitpunkt der Messung noch nicht fertiggestellt war, wurde konventionell mit einem von Hand geführten Messwagen, bestückt mit einem Hallsonden-Array, gemessen.

Abb. 7: Der Magnetwagen auf der Mörschbrücke in Berlin

Das "Bruchsignal" an der Trennstelle des aufgetrennten Querspannglieds (Abb. 9)



ist deutlich und ohne weitere Messdatenbearbeitung in der Messkurve erkennbar, so wie es bei diesem Schädigungsgrad zu erwarten ist. Die Betondeckung betrug etwa 15 cm. Obwohl die Spannglieder noch mit Georadar eingemessen werden mussten und auch die Messung der magnetischen Flussdichte noch per Hand erfolgte, konnten in 3 Stunden 58 Spanndrahtabschnitte geprüft werden.

Abb. 8: Das aufgetrennte Spannglied in der Brückenplatte (Pfeil)

Der Bauwerkeinsatz zeigte, dass das Aufmagnetisieren der Spanngliedabschnitte durch das Überfahren mit dem Magneten gelingt. Außerdem wurden einige Schwächen im Detail deutlich, wie z. B. ein zu schwacher Antrieb, die inzwischen behoben wurden.

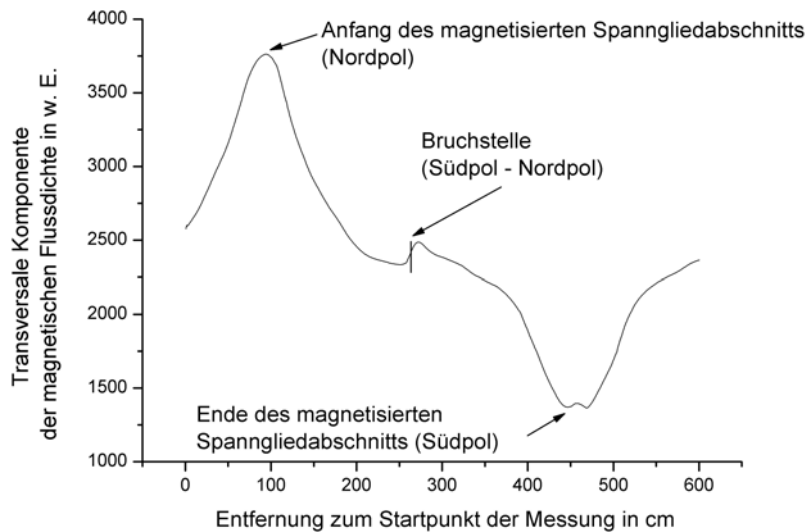


Abb. 9: Messkurve mit Bruchsignal, aufgenommen an dem aufgetrennten Spannglied

### Das Gesamtsystem mit Sensorik

Seit Ende 2005 ist auch die Sensoreinheit, die von IZFP Saarbrücken entwickelt und gebaut wurde, und damit das Gesamtsystem fertiggestellt (Abb. 10). Die Sensoreinheit ist als Anhänger an den Magnetwagen ausgeführt. Letzterer fährt voran und magnetisiert die Querspannglieder, deren Restfeldmagnetisierung daraufhin von der Sensoreinheit erfasst wird.



Abb. 10: Gesamtsystem zur Ortung von Spanndrahtbrüchen in Brückenplatten

Die Magnetisierungs- und Messgeschwindigkeit beträgt bis zu 500 m/h, wobei die magnetische Flussdichte an der Betonoberfläche der Brückenplatte in einem Raster von weniger als 1 cm x 1 cm gescannt wird. Bei einem Spanngliedabstand von beispielsweise 40 cm können also bis zu 1250 Spanngliedabschnitte in einer Stunde messtechnisch erfasst werden. Eine vorangehende Lageermittlung der Spannglieder mit Georadar ist nicht erforderlich.



## Danksagung

Die Senatsverwaltung für Stadtentwicklung, Referat X O hat dieses Forschungsvorhaben langjährig gefördert. Herr Dipl.-Ing. W. Kollotschek und seinen Mitarbeitern sowie Herrn Dipl.-Ing. P. Weyer danken wir sehr herzlich für die angenehme und vertrauensvolle Zusammenarbeit.

Herrn Herzfeld und Herrn Dipl.-Ing. Wegner von der Fa. HFB- Fahrzeugbau & Service GmbH, Müncheberg, sowie Herrn Dipl.-Ing. A. Kloster und Herrn Dipl.-Ing. K. Szielasko vom IZFP, Saarbrücken, danken wir für die anregende und unkomplizierte Zusammenarbeit bei der Konstruktion und Herstellung von Magnetwagen bzw. Sensoreinheit.

Gedankt sei auch Herrn Dipl.-Ing. J. Woestmann vom der BAM für die Ortung der Querspannglieder in der Mörschbrücke.

## Literatur

- [1] Scheel, H.; Hillemeier B. (2003), *Location of Prestressing Steel Fractures in Concrete*, Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 30, No. 3, pp. 228-234
- [2] Scheel, H., (1997), *Spannstahlbruchortung an Spannbetonbauteilen mit nachträglichem Verbund unter Ausnutzung des Remanenzmagnetismus*, Dissertation, Technische Universität Berlin
- [3] Kusenberger, F. N.; Barton, J. R. (1981), *Detection of Flaws in Reinforcing Steel in Prestressed Concrete Bridge Members*, Report No. FHWA/RD-81/087, FHWA U. S. Department of Transportation
- [4] Flohrer, C. (1990), *Zerstörungsfreie Ortung von Spanndrahtbrüchen in Spannbeton-Deckenträgern*, VDI-Berichte 1990, S. 425-433
- [5] Scheel, H.; Hillemeier, B., (1995), *The Capacity of the Remanent Magnetism Method to Detect Fractures of Steel in Tendons Embedded in Prestressed Concrete*, Vol. 1 of the International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE). Ed. by G. Schickert, H. Wiggerhauser, Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung e. V., p. 211 - 218
- [6] Sawade, G. et al. (1995), *Signal Analysis Methods for the Remote Magnetic Examination of Prestressed Elements*, Vol. 2 of the International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE). Ed. by G. Schickert, H. Wiggerhauser, Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung e. V., p. 1077 - 1084- 218