

**Verifizierung zerstörungsfreier Prüfverfahren zur Detektion von Spannstahlschäden an Spannbetonbauteilen mit nachträglichem Verbund**

**T 3076**

**T 3076**

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprotechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprotechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

Im Originalmanuskript enthaltene Farbvorlagen, wie z.B. Farbfotos, können nur in Grautönen wiedergegeben werden. Liegen dem Fraunhofer IRB Verlag die Originalabbildungen vor, können gegen Berechnung Farbkopien angefertigt werden. Richten Sie Ihre Anfrage bitte an die untenstehende Adresse.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2005, ISBN 3-8167-6846-6

Vervielfältigung, auch auszugsweise,  
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

**Fraunhofer IRB Verlag**

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69  
70504 Stuttgart

Nobelstraße 12  
70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00

Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

E-Mail [irb@irb.fraunhofer.de](mailto:irb@irb.fraunhofer.de)

[www.IRBbuch.de](http://www.IRBbuch.de)



**BAM**

Bundesanstalt für  
Materialforschung  
und -prüfung

# **Abschlussbericht**

**Forschungsvorhaben  
P 32-5-7.207-1015/02**

**Verifizierung zerstörungsfreier Prüfverfahren  
zur Detektion von Spannstahlschäden an  
Spannbetonbauteilen mit nachträglichem  
Verbund**



# **Abschlussbericht**

**zum Forschungsvorhaben  
P 32-5-7.207-1015/02**

## **Verifizierung zerstörungsfreier Prüfverfahren zur Detektion von Spannstahlschäden an Spannbetonbauteilen mit nachträglichem Verbund**

**Auftraggeber:** Deutsches Institut für Bautechnik,  
Postfach 620229, 10792 Berlin

**Forschungsstelle:** Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung,  
FG VII.3, Dr.-Ing. Bernd Isecke Dir. und Prof.  
BAM-Az.: Vh 7326  
Unter den Eichen 87,  
12205 Berlin

**Projektleiter:** Dr.-Ing. Jürgen Mietz

**Bearbeiter:** Dipl.-Ing. Joachim Fischer  
Dr.-Ing. Jürgen Mietz

**unter Mitarbeit der:** Universität Stuttgart  
Technischen Universität Braunschweig  
Technischen Universität Berlin

## **Kurzfassung**

An Spannbetonteilen mit nachträglichem Verbund kann es unter ungünstigen Bedingungen, wie z. B. Korrosion des Spannstahls vor dem Verpressen oder unzureichende Verpressung der Hüllrohre, zu einer Schädigung der Spanndrähte kommen, die unter Umständen von der Betonoberfläche nicht erkannt werden kann. Im schlimmsten Fall ist ein Versagen des gesamten Bauteils ohne Vorankündigung möglich. Um ein solches Szenario zu vermeiden, wäre eine zerstörungsfreie Prüfung des Zustandes der Spanndrähte in den Spanngliedern von der Betonoberfläche aus von allergrößter Bedeutung.

Beim Abriss der Hohenzollerdammbücke in Berlin bestand die Möglichkeit Trägersegmente des Brückenüberbaus zu entnehmen, bei denen auf Grund von Voruntersuchungen mit großer Wahrscheinlichkeit davon ausgegangen werden konnte, dass einige der Spanndrähte durch Spannungsrisskorrosion geschädigt waren (Anrisse bzw. Brüche). Die Bauteile wurden zunächst mit zwei auf magnetischer Streufeldmessung sowie einem auf elektromagnetischer Resonanzmessung basierenden Prüfverfahren zerstörungsfrei untersucht. Anschließend erfolgte die Freilegung der vorher geprüften Spannglieder, um die Ergebnisse hinsichtlich ihrer Zuverlässigkeit und Aussagekraft zu verifizieren. Die visuelle Beurteilung sowie die Magnetpulverprüfung der entnommenen Spanndrähte ergab, dass in den untersuchten Spanngliedern an mehreren Stellen Drahtbrüche vorlagen sowie zahlreiche Drähte Anrisse aufwiesen.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass Anrisse, die an vielen Drähten gefunden wurden, in keinem Fall zu einer Auffälligkeit in den Messsignalen geführt haben. Bereiche, in denen gehäuft Brüche vorliegen, können dagegen mit den beiden auf dem Prinzip der magnetischen Streufeldmessung basierenden Prüfverfahren offensichtlich erkannt werden. Mit dem Bruchortungsverfahren auf der Basis der elektromagnetischen Resonanzmessung wurden keine Hinweise auf Spannstahlschädigungen gefunden. Es ist anzustreben die beiden Streufeldverfahren weiter zu optimieren, damit deren Aussagegenauigkeit verbessert werden kann.

## **Abstract**

Under unfavourable conditions, e. g. corrosion of the prestressing steel before grouting or insufficient grouting, damage of prestressed concrete structures with post-tensioned steel members can occur which cannot be detected from the concrete surface in certain cases. In the worst case collapse of the whole structure without prior indications is possible. In order to avoid such scenario a non-destructive testing of the prestressing wires within the grouted ducts from the concrete surface would be of utmost importance.

During the demolition of the Hohenzollerndamm bridge in Berlin parts of the girders of the bridge superstructure could be taken out. Due to results from preliminary tests where incipient cracks were found it could be assumed that some of the prestressing wires were damaged by hydrogen-induced stress corrosion cracking. At first, the parts of the girders were non-destructively investigated by means of two testing techniques based on magnetic stray field measurement and one technique based on electromagnetic resonance measurement. Subsequently the ducts were carefully opened to inspect the single wires in order to verify the non-destructive testing results with respect to their reliability. The visual inspection and the magnetic particle test of the removed prestressing wires have shown that some of the wires in the inspected tendons were fractured and some of the wires show numerous incipient cracks.

From the investigations it can be concluded that incipient cracks which were found at numerous wires did not give any distinctive features in the measured signals. Contrary to that areas with fractures of several wires could obviously be detected by the two techniques based on magnetic stray field measurement. Using the electromagnetic resonance measurement no indications of prestressing steel damage were found. Efforts should be made to optimize the two stray field techniques to improve their reliability and accuracy.

<b>Inhalt</b>	<b>Seite</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>2</b>
<b>1.1 Problemstellung</b>	<b>2</b>
<b>1.2 Ziel des Forschungsvorhabens</b>	<b>3</b>
<b>2 Untersuchungen und Ergebnisse</b>	<b>4</b>
<b>2.1 Allgemeines zum Bauwerk</b>	<b>4</b>
<b>2.1.1 Frühere Untersuchungen</b>	<b>4</b>
<b>2.1.2 Trägersegment I</b>	<b>5</b>
<b>2.1.3 Trägersegment 2a</b>	<b>5</b>
<b>2.2 Zerstörungsfreie Untersuchungen</b>	<b>7</b>
<b>2.2.1 Uni Stuttgart</b>	<b>7</b>
<b>2.2.2 TU Berlin</b>	<b>8</b>
<b>2.2.3 TU Braunschweig</b>	<b>9</b>
<b>2.3 Untersuchungen der BAM</b>	<b>10</b>
<b>2.3.1 Öffnung der Spannglieder</b>	<b>12</b>
<b>3 Bewertung der Ergebnisse</b>	<b>25</b>
<b>4 Zusammenfassung</b>	<b>28</b>
<b>5 Literatur</b>	<b>30</b>
<b>6 Abbildungen</b>	<b>31</b>

**Anlagen:**

Anlage 1: Untersuchungsbericht der Uni Stuttgart

Anlage 2: Untersuchungsbericht der TU Berlin

Anlage 3: Untersuchungsbericht der TU Braunschweig

## **1. Einleitung**

### **1.1 Problemstellung**

In den letzten Jahren sind vereinzelt Schäden an mehr als 30 Jahre alten Spannbetonbauteilen mit Spanngliedern in nachträglichem Verbund beobachtet worden, bei denen nicht die in der Regel für derartige Schadensfälle verantwortlichen Mängel hinsichtlich schlecht verpresster Hüllrohre oder korrosionsfördernder Bestandteile im Einpressmörtel nachgewiesen werden konnten. Die Spanndrähte bestanden überwiegend aus vergütetem Stahl „alten Typs“ der Festigkeitsklasse St 1420/1570. Hierbei handelt es sich um einen Stahl (Firmen-Bezeichnung „Neptun“ bzw. „Sigma“), der in der vorliegenden Zusammensetzung nur bis Mitte der 60er Jahre zugelassen war. In einem neueren Schadensfall war allerdings auch ein Bauwerk mit vergütetem Spannstahl „neuen Typs“ betroffen [1]. Der in der ehemaligen DDR hergestellte vergütete Stahl der Festigkeitsklasse St 1370/1570 (Bezeichnung Hennigsdorf), der bis Anfang der 90er Jahre hergestellt wurde, ist mit den o. g. Stählen „alten Typs“ bzgl. der chemischen Zusammensetzung und des Gefüges vergleichbar.

Die Analyse der Schäden ergab, dass die vorgefundenen Bruchbilder charakteristische Merkmale einer wasserstoffinduzierten Spannungsrisskorrosion aufweisen. Zur Aufklärung des Schadensmechanismus und zur Abschätzung der Gefährdung älterer Spannbetonbauwerke, in denen der betreffende Stahl eingesetzt wurde, sind mehrere Forschungsvorhaben durchgeführt worden [2, 3, 4], die sich zum einen mit der Untersuchung an Bauwerken beschäftigten und sich zum anderen in Laborversuchen der Fragestellung widmeten, ob und inwieweit eine korrosionsbedingte Risseinleitung und -ausbreitung an vergüteten Stählen in hinreichend verpressten Spanngliedern über längere Zeiträume im Gebrauchszustand möglich ist.

In vielen Fällen können sich fortschreitende Spannstahlschäden durch Risse im Beton bemerkbar machen; unter Umständen kann jedoch der Spannstahlausfall unmerklich so lange fortschreiten, bis die rechnerische Sicherheit unter 1,0 sinkt, d. h. das Bauwerk plötzlich versagt. An Bauwerken, bei denen bekannt ist, dass ein empfindlicher Spannstahl eingesetzt wurde und bei denen die Tragwerksicherheit bei Spannstahlschäden besonders gefährdet sein kann, sind verschiedentlich lokal einzelne Spanndrahtabschnitte entnommen worden. Bei dieser Vorgehensweise beschränkt sich eine sichere Aussagefähigkeit allerdings nur auf die entnommenen und im Labor näher untersuchten Proben. Für eine zuverlässige Beurteilung des Gefährdungspotentials bestehender Bauwerke (die Anzahl der Bauwerke, bei denen die o. g. Stähle verwendet wurden, bewegt sich in vierstelliger Größenordnung) ist daher ein zerstörungsfreies Prüfverfahren, mit dem der Zustand der Spannstähle sicher bewertet werden kann, von allergrößter Bedeutung.

## 1.2 Ziel des Forschungsvorhabens

Zur Zeit gibt es zwei zerstörungsfreie, auf magnetischer Streufeldmessung basierende Prüfverfahren, mit denen schon verschiedentlich Spanndrahtbrüche an realen Bauteilen erfolgreich detektiert werden konnten. Die Messverfahren nutzen die ferromagnetischen Eigenschaften des Spannstahls. An Bruchstellen magnetisierter Spanndrähte bilden sich magnetische Streufelder, die mit geeigneten Sensoren an der Bauteiloberfläche nachgewiesen werden.

Neben diesen beiden Streufeldmessverfahren ist im Rahmen des DFG-Sonderforschungsbereiches 477 „Bauüberwachung“ an der TU Braunschweig eine Methode entwickelt worden, mit der Spannglieder mittels elektromagnetischer Resonanzmessung auf Schädigungen geprüft werden können.

Inwieweit mit den ersten beiden Verfahren auch Brüche in tiefer liegenden Spanngliedern, d. h. für den in der Praxis häufig vorkommenden Fall, dass mehrere Spannglieder hintereinander angeordnet sind, erfasst werden können, ist bisher nicht ausreichend geklärt. Des weiteren ist bisher unklar, ob alle drei Verfahren auch Anrisse detektieren können. Aus den o. g. Schadensfällen ist bekannt, dass die Drahtbrüche und als Folge davon das völlige Versagen der Bauteile von Anrissen ausgingen, die schon vor dem Verpressen der Spannglieder vorhanden waren. Bei Spannbetonkonstruktionen, die im Zuge von Umbaumaßnahmen oder Nutzungsänderungen künftig veränderten Einwirkungen ausgesetzt sind, sowie bei dynamischer Belastung der Spanndrähte können solche Anrisse aber Ausgangspunkte für verzögerte Brüche sein.

Bei den für den Berliner Senat im Herbst 1998 im Rahmen eines Gutachtens durchgeführten Untersuchungen an Spanngliedern der Längsvorspannung der Hohenzollerndammbrücke wurden an mehreren geöffneten Stellen Anrisse festgestellt. Bei dem Spannstahl handelt es sich um vergüteten Spannstahl des Typs Neptun N40, Festigkeitsklasse St 1420/1570. Der Bau der Brücke erfolgte in den Jahren 1957 bis 1958.

Auf Grund der Erfahrungen bei vergleichbaren Schadensfällen kann davon ausgegangen werden, dass auch in anderen Bereichen der Spannglieder weitere Spannstähle mit Anrissen oder auch Brüchen vorhanden sind. Da eine Ertüchtigung der Brücke aus wirtschaftlichen Gründen nicht in Frage kam, wurde entschieden, das Bauwerk in zwei Phasen abzureißen. Der Abriss des ersten Bauabschnitts erfolgte am 10. und 12. Februar 2001. Der zweite Bauabschnitt wurde im Jahre 2002 abgerissen werden. Mit finanzieller Unterstützung des Berliner Senats wurden zwei ca. 12 m lange Abschnitte der Stege auf das Gelände der BAM gebracht. Beim Abriss des zweiten Bauabschnitts wurde ein Stegabschnitt auf das BAM-Gelände transportiert, bei dem auf Grund der o. g. Voruntersuchungen ganz sicher Anrisse vorhanden sind.

## **2 Untersuchungen und Ergebnisse**

### **2.1 Allgemeines zum Bauwerk**

Die Brücke auf dem Kreuzungsbauwerk Hohenzollerndamm (Brücken-Nr. 905a) [5] überspannte die Bundesautobahn – Stadtring Berlin in Berlin Wilmersdorf in Ost-West-Richtung. Die Spannbetonbrücke war als Mehrfeldrahmensystem in den Jahren 1957 bis 1958 anstelle einer alten Stahlbrücke errichtet worden (Abb.1). Die Vorspannung erfolgte nach dem Spannsystem der Fa Züblin. In den ca. 24 m langen Spannbetonbalken des Überbaues wurden Längsspannglieder (unterschiedlicher Anzahl) parabelförmig so verlegt, dass sie etwa in der Mitte des Balkens ihren Tiefpunkt hatten. Pro Spannglied sind 16 Spannstähle vom Typ Neptun 40, oval, gerippt der Firma Felten und Guilleaume eingebracht worden. Als Verpressmörtel wurde Zement Z 375 (Fortuna, Gesecke/ Westfalen) mit 1 kg Zusatzmittel und 40 l Wasser auf 100 kg Zement verwendet. Als Betongüte für die Überbaukonstruktion ist im Brückenbuch B300 angegeben.

#### **2.1.1 Frühere Untersuchungen**

Bei umfangreichen Instandsetzungsarbeiten in den Jahren 1970 bis 1974 wurde die vorgespannte Fahrbahnplatte erneuert. Hier wurde Spannstahl SIGMA 40 St 145/160 HWR und das Spannsystem Polensky& Zöllner verwendet.

Den vorliegenden Unterlagen ist zu entnehmen, dass 1983 an Spanngliedern Kontrollbohrungen und Nachverpressarbeiten durchgeführt wurden.

Aufgrund der zunehmenden Kenntnisse zur Problematik der vergüteten NEPTUN Spannstähle wurden in den 90iger Jahren gezielte Untersuchungen an den Längsträgern vorgenommen. 1993 wurden Spannglieder freigelegt und nach vorliegenden Berichten [5] optisch sichtbare, mit Zementmilch gefüllte Anrisse gefunden; in den Hohlkästen Bewehrungskorrosion und Wasserlachen.

1994 wurden von der BAM Untersuchungen an der Quervorspannung (SIGMA-Stähle) durchgeführt. Dabei wurden keine Auffälligkeiten gefunden.

1998 wurden aus drei Längsträgern mehrere Spannstahlproben entnommen und von der BAM untersucht [6]. Für diese Untersuchungen waren die Längsträger etwa im Bereich der Tiefpunkte der parabelförmig verlaufenden Spannglieder geöffnet worden und insgesamt 5 Spannstahlproben von je etwa 70 cm Länge herausgetrennt worden. An den Spannstahlproben wurden in der BAM chemische Analysen, metallografische Untersuchungen, Anrissprüfungen, DIBt-Standversuche und Zugversuche durchgeführt. Die entnommenen Beton- und Mörtelproben wurden auf Carbonatisierung und korrosionsfördernde Bestandteile untersucht.

Im Ergebnis dieser Untersuchungen wurden im Spannbetonbalken mit der Bezeichnung 2a (Bezeichnung entspricht den vorliegenden Bauzeichnungen) zahlreiche Anrisse an den

Spannstahlproben gefunden. Die weiteren Untersuchungen zeigten, dass wasserstoffinduzierte Spannungsrisskorrosion Ursache für die Anrisse war.

Das Brückenbauwerk wurde daraufhin in den Jahren 2001 und 2002 in zwei Etappen abgerissen. Hierzu wurden nach Entfernung bzw. Auftrennung der Fahrbahn- und Grundplatte (Abb. 2) die Spannbetonbalken etwa in der Mitte geteilt und Abschnitte von ca. 12 m Länge mittels Kran herausgehoben. Zwei dieser Segmente wurden für weitere Untersuchungen auf dem Gelände der BAM abgelegt (Abb. 3). Dabei handelt es sich um ein Segment aus dem östlichen Bauabschnitt (Bezeichnung I), an dem bisher keine Untersuchungen vorgenommen worden waren und ein Segment aus dem Spannbetonbalken 2a (Bezeichnung 2a), an dem bei den Untersuchungen 1998 Anrisse gefunden worden waren.

### **2.1.2 Trägersegment I**

Das Segment stammt aus dem östlichen Bauabschnitt und wurde beim Abriss 2001 entnommen. Die genaue Zuordnung zum Lageplan war nach dem Ausbau nicht mehr möglich. Das Teilstück hat, gemessen am Boden, eine Länge von 11,80 m und ist entlang der Oberkante ca. 40 cm kürzer. Auf der an der ehemaligen Verankerung liegenden Seite befinden sich die für die Untersuchungen ausgewählten Spannglieder im Bereich von 125 bis 60 cm Höhe (Abb. 4). Auf der gegenüberliegenden Seite, etwa in der ehemaligen Mitte des Balkens enden alle Spannglieder in ca. 40 cm Höhe (Abb. 5). In der Betonüberdeckung vor den zu untersuchenden Spanngliedern verläuft alle 0,25 m vertikal angeordnete schlaffe Bewehrung. Die Lage dieser Bewehrung war anhand der sichtbaren Schnittstellen an der Oberkante des Trägers erkennbar. Die Spannglieder sind in regelmäßigen Abständen durch Halteklauen und Bindedraht auf horizontal, quer zum Verlauf der Spannglieder angeordneten Bewehrungsstählen aufgelegt und mit den vertikalen Bewehrungsstählen verknüpft (s.a. Abb. 21). Zur genauen Bezeichnung der untersuchten Spanngliedabschnitte wurde die Balkenbezeichnung I beibehalten, die untersuchten Seiten nach Lage in der BAM mit Ost/West bezeichnet und die zu untersuchenden Spannglieder entsprechend Abbildung 6 fortlaufend nummeriert. Die Betondeckung der Hüllrohre der Spannglieder SG1 bis SG3 beträgt etwa 5 cm die der SG4 bis SG6 etwa 9 cm. Die Abstände untereinander jeweils etwa 10 cm.

### **2.1.3 Trägersegment 2a**

Das Segment stammt aus dem westlichen Bauabschnitt und wurde beim Abriss 2002 entnommen. Die Bezeichnung 2a entspricht der bei der Bauwerksplanung vorgenommenen Zuordnung. An diesem Teilsegment wurden 1998 Untersuchung vor Ort durchgeführt und in den Tiefpunkten der Spannglieder SG 10 bis 12 an einem Spannglied Anrisse gefunden. Erst nach der Öffnung der Träger war klar, dass es sich um das SG 11 gehandelt haben muss. Der bei der damaligen Untersuchung eingebrachte und wieder verschlossene

Öffnungsbereich ist noch deutlich erkennbar (Abb. 7). Das Trägersegment hat, gemessen am Boden, eine Länge von 11,30 m und ist entlang der Oberkante ca. 1,30 m kürzer. Auf der näher an der ehemaligen Verankerung liegende Seite befinden sich die für die Untersuchungen ausgewählten Spannglieder im Bereich von 80 bis 50 cm Höhe (s. a. Abb. 4). Auf der gegenüberliegenden Seite, etwa in der ehemaligen Mitte des Balkens enden alle Spannglieder in ca. 50 cm Höhe. In der Betonüberdeckung vor den zu untersuchenden Spanngliedern verläuft alle 0,25 m vertikal angeordnete schlaffe Bewehrung. Die Lage dieser Bewehrung war anhand der sichtbaren Schnittstellen an der Oberkante des Trägers erkennbar. Die Spannglieder sind in regelmäßigen Abständen durch Halteklauen und Bindedraht auf horizontal, quer zum Verlauf der Spannglieder angeordneten Bewehrungsstäben aufgelegt und mit den vertikalen Bewehrungsstäben verknüpft (s.a. Abb. 21).

Zur genauen Bezeichnung der untersuchten Spanngliedabschnitte wurde die Balkenbezeichnung 2a beibehalten, die untersuchten Seiten nach Lage in der BAM mit Ost/West bezeichnet und die Spannglieder entsprechend Abbildung 6 fortlaufend nummeriert. Die Betondeckung der Hüllrohre der Spannglieder SG7 bis SG9 beträgt etwa 5 cm die der SG10 bis SG12 etwa 6 cm. Der Abstand zwischen den Hüllrohren etwa 10 cm. Durch die für die Demontage angebrachten Transportbohrungen ist an diesem Trägersegment das Spannglied 12 angeschnitten worden (Abb. 8). Die Schnittstelle befindet sich von der Ankerseite aus am Boden gemessen bei 2,40 m in einer Höhe von ca. 0,55 m. Alle anderen Bohrungen (auch am Balken I) haben keine Beschädigungen von Spanngliedern hervorgerufen.

## **2.2 Zerörungsfreie Untersuchungen**

### **2.2.1 Uni Stuttgart**

Zur Durchführung der Messungen werden die Spannglieder von der Bauteiloberfläche aus mit Jochmagneten in mehreren Schritten bis zur Remanenz (maximale Restfeldmagnetisierung) aufmagnetisiert. Dabei entstehen verschiedene magnetische Zustände des Spannbetonbauteils, die mit Magnetfeldsensoren messtechnisch erfasst werden. Ist die Lage der Spannglieder nicht bekannt, so muss diese vor der Überprüfung auf Spanndrahtbrüche mit geeigneten Verfahren (z. B. Radar) bestimmt werden.

Die Untersuchungen mit der Methode der magnetischen Streufeldmessung durch die Universität Stuttgart wurden in der Zeit vom 16. bis 18.07.2002. durchgeführt. Die Ortung der Spannglieder erfolgte dazu mittels Impuls-Radar durch das Forschungszentrum Jülich im Auftrag der Universität Stuttgart. Der Verlauf der Spannglieder wurde auf der Oberfläche der Träger markiert und auch als Messgrundlage für die Messungen der TU Berlin benutzt. Die magnetischen Streufeldmessungen wurden durch das Otto-Graf-Institut (FMPA) der Universität Stuttgart durchgeführt. Der Bericht zu den durchgeführten Untersuchungen liegt der BAM seit Juli 2003 vor und ist in der Anlage 1 komplett enthalten.

Die im Bericht der MPA Stuttgart verwendeten Spanngliederbezeichnungen weichen von den in Abbildung 6 angegebenen ab (Abb. 9). Aufgrund des zu hohen Mess- und Ortungsaufwandes beschränken sich die Untersuchungen auf die in Abbildung 6 markierten 12 Spannglieder. Die Messungen entlang der Träger erfolgten jeweils von einem 0-Punkt (0-Punkt-Stuttgart) nahe der ehemaligen Trägermitte aus. Der Messsensor wurde horizontal annähernd entlang der markierten Spannglieder durch umsetzen der Messschiene verfahren. Dabei wurde versucht die Messschiene so zu positionieren, dass der Prüfkopf jeweils mittig über dem mittleren der drei Spannglieder angeordnet war (Abb. 10). Es wurde vom 0-Punkt ausgehend die gesamte Balkenlänge als Messbereich erfasst.

Bei diesen Messungen wurden Hinweise auf Spannstahlbrüche an insgesamt 5 Positionen gefunden (s. Bericht, Anlage 1, S. 13). In Abbildung 11 bis 13 sind diese Positionen auf den Balkenoberflächen markiert. Eine der Positionen ist die mit den angeschnittenen Spannstählen in der Transportbohrung (Abb. 13).

Der Nachweis von Defekten auf der Ebene von Anrissen war mit diesem Verfahren nicht möglich (Bericht S. 13).

### **2.2.2 TU Berlin**

Zur Durchführung der Messungen werden die Spannglieder von der Bauteiloberfläche aus mit Jochmagneten in mehreren Schritten bis zur Remanenz (maximale Restfeldmagnetisierung) aufmagnetisiert. Dabei entstehen verschiedene magnetische Zustände des Spannbetonbauteils, die mit Magnetfeldsensoren messtechnisch erfasst werden. Die Lage der Spannglieder war bereits durch die Radarmessungen bekannt. Die vorhandenen Verlaufszeichnungen wurden für diese Messungen genutzt.

Die Messungen mit dem Remanenzmagnetismus-Verfahren der TU Berlin, Institut für Bauingenieurwesen, Baustoffe und Baustoffprüfung, wurden am 30.9. und 1.10.2002 durchgeführt. Bei der Auswertung zeigten sich erhebliche Störsignale infolge vorheriger Messungen, so dass zusätzliche Messungen am 24. und 25.3.2003 mit einem leistungsfähigeren System erforderlich wurden. Der Abschlußbericht zu diesen Messungen liegt der BAM seit Mai 2003 vor und ist in der Anlage 2 komplett enthalten.

Die im Bericht der TU Berlin verwendeten Spanngliedbezeichnungen stimmen mit den in Abbildung 6 angegebenen überein. Aufgrund des zu hohen Mess- und Ortungsaufwandes beschränken sich die Untersuchungen auf die in Abbildung 6 markierten 12 Spannglieder, die bereits für die Messungen der Uni Stuttgart eingemessen worden waren. Die Messungen entlang der Träger erfolgten jeweils von Seite der ehemaligen Ankerlage aus. Der Startpunkt war durch eine Kerbe in den darüber liegenden Spanngliedern markiert. Der Messsensor wurde mittels eines gekrümmten Aluminiumrohres entlang der markierten Spannglieder verfahren (Abb. 14). Bei den Messungen konnten die jeweils am tiefsten liegenden Spannglieder SG3, SG6, SG9 und SG12 nicht auf ganzer Länge gemessen werden.

Bei diesen Messungen wurden Hinweise auf Spannstahlbrüche am Träger 2a west am SG12 an der Position mit den angeschnittenen Spannstählen in der Transportbohrung registriert (Bericht S. 29). Weitere Bruchsignale wurden nicht festgestellt.

### **2.2.3 TU Braunschweig**

Bei diesem Verfahren wird eine elektromagnetische Welle an einem Punkt des Spanngliedes in den Stahl eingekoppelt. Am Punkt der Einkopplung wird der Reflektionsparameter der Anordnung über der Anregungsfrequenz gemessen. Der Reflektionsparameter gibt mit Betrag und Phase denjenigen Anteil der eingekoppelten Welle an, der vom Stabende bzw. Bruchort zum Punkt der Ankopplung reflektiert wird. Aus dem so erhaltenen Spektrum werden die Resonanzfrequenzen der Anordnung bestimmt. Sowohl die absolute Lage der Resonanzen als auch der Abstand der Resonanzen voneinander unterliegen einer großen Änderung im Bruchfall. Für eine Bruchortbestimmung ist der Abstand zweier Resonanzen möglichst genau zu vermessen. Der Vorteil dieses Prinzips der Bruchortung in Spanngliedern ist die einseitige Ankopplung des Hochfrequenzsignals. Im Gegensatz zu den o. g. Verfahren muss die exakte Lage der Spannglieder nicht bekannt sein. Lediglich die Erreichbarkeit einer Ankoppelstelle ist notwendig. Untersuchungen mit diesem Verfahren an realen Bauwerken sind bisher allerdings noch nicht durchgeführt worden. Ein äußerliches Abfahren der Spannglieder ist nicht erforderlich und das Messverfahren ist unabhängig von der Anzahl und dem Verlauf und der Lage der Spannglieder solange diese zugänglich sind. Der Messvorgang dauert nur wenige Sekunden. Es sind mit diesem Verfahren Brüche an Einzelstäben ab einem Bruchabstand von 0,5 mm detektierbar. Bei elektrischem Kontakt mehrerer nebeneinander liegender Spannstäbe und Kontakt mit dem Hüllrohr kann der Bruch eines einzelnen Stahles nicht identifiziert werden (Bericht S. 9).

Die Messungen durch die TU Braunschweig wurden an 4 Messterminen (24.10.2002, 22.01., 17.07. und am 20.11.2003 durchgeführt. Der Abschlußbericht zu diesen Messungen liegt der BAM seit Juni 2004 vor und ist komplett in der Anlage 3 enthalten.

Die im Bericht der TU Braunschweig verwendeten Spanngliedbezeichnungen weichen von den in Abbildung 6 angegebenen ab (Abb. 15).

Die Messungen erfolgten durch Ankoppeln der Stähle auf der Seite der ehemaligen Ankerlage (Abb. 16) und am Träger 2a auch durch Ankopplung auf der Seite der ehemaligen Mitte des Trägers. Es wurden verschieden Messanordnungen getestet. Von den in Abbildung 6 aufgeführten 12 bezeichneten Spanngliedern wurden an einem Messtermin alle Spannstäbe des Spanngliedes SG4 angekoppelt, an 2 Terminen je 2 Spannstäbe der Spannglieder SG1 bis SG12 und an einem weiteren Termin je 1 Spannstahl der Spannglieder SG1 bis SG12.

Die Messungen an den beiden Trägersegmenten ließen keine Rückschlüsse auf vorhandene Spannstaahlbrüche zu.

### 2.3 Untersuchungen der BAM

Im Juli 2004 wurden die beiden Balken zertrümmert und die Spannglieder 1 bis 12 komplett entnommen (Abbildungen 17 bis 20). Der Beton der Trägersegmente wurde mit Hilfe eines Hydraulikmeißels abschnittsweise von oben zerstört und die schlaffe Bewehrung herausgetrennt. Die mittels Radarmessungen ermittelte Lage der Spannglieder entsprach im wesentlichen der tatsächlichen Lage (Abb. 19). Verschiebungen in der Höhe traten normalerweise nur bis zu 5 cm auf (Abb. 18), Verschiebungen bis 10 cm (tatsächliche Lage höher) trat nur am Trägersegment I im Bereich der stärkeren Krümmung auf (ca. 2 bis 3 m auf der ehemaligen Ankerseite). Der Abstand der Spannglieder untereinander (10 cm vom Mittelpunkt gemessen) entsprach offensichtlich aufgrund der sorgfältigen Befestigung (Abb. 21) nahezu korrekt den Bauplänen. Während des Abrisses wurden mechanische Beschädigungen der Spannglieder weitgehend vermieden. An einigen wenigen Stellen traten dennoch einige unvermeidbare Hüllrohrbeschädigungen auf. Spannstähle waren davon nicht betroffen.

Bei der Entnahme der Spannglieder wurden bereits einige Durchrostungen an Hüllrohren (Abb. 17) und einige Spannstahlbrüche am SG9 gefunden. Die Spannstähle lagen in Hüllrohrmörtel eingebettet. Das Hüllrohr war zum großen Teil durch Korrosion zerstört (Abb. 22). Am Spannglied 11 sind bei der Entnahme nach mechanischer Einwirkung in einem Bereich der außerhalb des eigentlichen Prüfbereiches lag (über 9,55 m), Brüche entstanden. Die Bruchflächen dieser Brüche zeigen typische Anrisslinsen, wie sie bei wasserstoffinduzierter Spannungsrisskorrosion entstehen (Abb. 23).

Die entnommenen Spannglieder wurden bis August trocken zwischengelagert und die außerhalb des tatsächlichen Prüfbereiches liegenden Abschnitte abgetrennt. Der tatsächliche Prüfbereich wurden von der Markierung der TU-Berlin ausgehend (Kerbe ist 0 m) bis zur Startmarkierung der Uni-Stuttgart (0-Punkt auf der Balkenaußenseite) eingemessen. Die Spannglieder wurden anschließend in Einzelstücke von etwa 1,2 m geschnitten. Die Einzelstücke wurden längs auf der ehemals im Bauwerk oben liegenden Seite vorsichtig aufgetrennt und der Zustand der Spannglieder dokumentiert. An allen Spannstählen wurde im Labor der BAM eine zerstörungsfreie Rissprüfung mit dem Magnetpulververfahren durchgeführt. Hierbei wird auf die Oberfläche ein Prüfmittel aufgebracht, das aus fluoreszierenden, ferromagnetischen Teilchen besteht. Dabei wird der zu prüfende Drahtabschnitt magnetisiert. Infolge des großen Feldgradienten in der Nähe von Oberflächenfehlern, wie z.B. Anrissen, wird das Magnetpulver angezogen, und es bildet sich eine deutlich sichtbare Pulverraupe.

Einige Probenabschnitte wurden einer Zugprüfung unterzogen. Dabei wurden weitere Brüche an sehr kleinen Anrissen am SG11 erzeugt. Die Anrisse waren vorher nicht detektiert worden. Die Ergebnisse von Zugversuchen sind nicht Gegenstand des Forschungsberichtes.

Im folgenden Abschnitt ist der Zustand der geöffneten Spanngliedabschnitte und Spannstähle im Text und den Tabellen 1 bis 12 beschrieben und beispielhaft dokumentiert. Auffälligkeiten wurden mit ihrer Position vermerkt, wobei die erste Zahl jeweils die Position ab Kerbe (0-Punkt-Anker) ist und die Zahl im Klammern die Position ab 0-Punkt-Stuttgart. Aufgrund der ehemals parabelförmigen Lage der Spannglieder ist die Genauigkeit auf +/- 10 cm eingeschränkt. Die komplette fotografische Dokumentation der einzelnen geöffneten Anschnitte ist in digitaler Form nach Spanngliedabschnitten sortiert in der BAM vorhanden.

### 2.3.1 Öffnung der Spanngliedabschnitte

**Tabelle 1: Spannglied 1**

Abschnitt [m]	Bemerkungen/Zustand
0,00 - 1,20	Hüllrohr außen wenige Korrosionserscheinungen in der 6-Uhr-Position, wenig Korrosionserscheinungen innen; Verpresszustand gut; einzelne Korrosionsstellen an den Berührungspunkten der Spannstähle untereinander
1,20 - 2,40	Hüllrohr außen wenige Korrosionserscheinungen; wenig Korrosionserscheinungen innen; Verpresszustand gut; Spannstahl mit geringen Korrosionserscheinungen an Berührungspunkten
2,40 - 3,60	Hüllrohr außen wenige Korrosionserscheinungen, innen überwiegend metallisch blank; Verpresszustand gut; einzelne Korrosionsstellen an den Berührungspunkten der Spannstähle untereinander
3,60 - 4,80	Hüllrohr außen wenige Korrosionserscheinungen, innen überwiegend metallisch blank, schwache Spur von Korrosionserscheinungen in der 6-Uhr-Position; Verpresszustand gut; einzelne Korrosionsstellen an den Berührungspunkten der Spannstähle untereinander
4,80 - 6,00	Hüllrohr außen wenige Korrosionserscheinungen, innen überwiegend metallisch blank, einige Spuren von Korrosionserscheinungen in der 6-Uhr-Position; Verpresszustand gut; einzelne Korrosionsstellen an den Berührungspunkten der Spannstähle untereinander
6,00 - 7,20	Hüllrohr außen wenige Korrosionserscheinungen, innen überwiegend metallisch blank, wenige Korrosionserscheinungen in der 6-Uhr-Position; Verpresszustand gut; einzelne Korrosionsstellen an den Berührungspunkten der Spannstähle untereinander
7,20 - 8,40	Hüllrohr außen geringe Korrosionserscheinungen, innen überwiegend metallisch blank, wenige Korrosionserscheinungen in der 6-Uhr-Position; Verpresszustand gut; einzelne Korrosionsstellen an den Berührungspunkten der Spannstähle untereinander
8,40 - 9,60	Hüllrohr außen sehr geringe Korrosionserscheinungen, innen überwiegend metallisch blank, einige wenige Korrosionserscheinungen in der 6-Uhr-Position; Verpresszustand gut; wenige Korrosionsstellen an den Berührungspunkten der Spannstähle untereinander
9,60 - 10,80	Hüllrohr außen sehr geringe Korrosionserscheinungen, innen überwiegend metallisch blank; Verpresszustand gut; wenige Korrosionsstellen an den Berührungspunkten der Spannstähle untereinander
10,80 - 11,20	Hüllrohr außen praktisch ohne Korrosionserscheinungen, innen überwiegend metallisch blank; Verpresszustand gut; wenige Korrosionsstellen an den Berührungspunkten der Spannstähle untereinander

Das Spannglied 1 zeigte insgesamt einen guten Verpresszustand. Das Hüllrohr war außen und innen überwiegend metallisch blank und nur vereinzelt sind Korrosionserscheinungen in etwa im Bereich der 6-Uhr-Position aufgetreten. Die Spannstähle haben vereinzelt unwesentliche Korrosionserscheinungen. Spannstahlbrüche oder Anrisse wurden nicht gefunden. Die Abbildungen 24 bis 26 zeigen beispielhaft diesen Zustand.

**Tabelle 2: Spannglied 2**

Abschnitt [m]	Bemerkungen/Zustand
0,00 - 1,20	Hüllrohr außen ohne Korrosionserscheinungen, wenig Korrosionserscheinungen innen; Verpresszustand gut; wenige Korrosionsstellen an einigen Berührungspunkten der Spannstähle untereinander
1,20 - 2,40	Hüllrohr außen ohne Korrosionserscheinungen, wenig Korrosionserscheinungen innen; Verpresszustand gut; wenige Korrosionsstellen an einigen Berührungspunkten der Spannstähle untereinander
2,40 - 3,60	Hüllrohr außen ohne Korrosionserscheinungen, ohne Korrosionserscheinungen innen; Verpresszustand gut; wenige Korrosionsstellen an einigen Berührungspunkten der Spannstähle untereinander
3,60 - 4,80	Hüllrohr außen ohne Korrosionserscheinungen, ohne Korrosionserscheinungen innen; Verpresszustand gut; wenige Korrosionsstellen an einigen Berührungspunkten der Spannstähle untereinander
4,80 - 6,00	Hüllrohr außen ohne Korrosionserscheinungen, geringe Korrosionserscheinungen innen etwa um die 6-Uhr-Position, stärker unter einer Hüllrohrmuffe etwa bei 5,0 m; Verpresszustand gut; wenige Korrosionsstellen an einigen Berührungspunkten der Spannstähle untereinander
6,00 - 7,20	Hüllrohr außen ohne Korrosionserscheinungen, ohne Korrosionserscheinungen innen; Verpresszustand gut; Spannstähle ohne Korrosionserscheinungen
7,20 - 8,40	Hüllrohr außen ohne Korrosionserscheinungen, geringe Korrosionserscheinungen innen entlang der 6-Uhr-Position, Verpresszustand gut; wenige Korrosionsstellen an einigen Berührungspunkten der Spannstähle zum Hüllrohr
8,40 - 9,55	Hüllrohr außen ohne Korrosionserscheinungen, sehr geringe Korrosionserscheinungen innen entlang der 6-Uhr-Position, Verpresszustand gut; einige wenige Korrosionsstellen an Spannstählen
9,60 - 10,80	Hüllrohr außen ohne Korrosionserscheinungen, innen metallisch blank, Verpresszustand gut; keine Korrosionserscheinungen an Spannstählen
10,80 - 11,20	Hüllrohr außen ohne Korrosionserscheinungen, innen metallisch blank, Verpresszustand gut; keine Korrosionserscheinungen an Spannstählen

Das Spannglied 2 zeigte insgesamt einen guten Verpresszustand. Das Hüllrohr war außen und innen überwiegend metallisch blank und nur vereinzelt sind Korrosionserscheinungen, meist im Bereich der 6-Uhr-Position aufgetreten. Die Spannstähle haben vereinzelt unwesentliche Korrosionserscheinungen. Spannstahlbrüche oder Anrisse wurden nicht gefunden. Die Abbildungen 27 bis 29 zeigen beispielhaft diesen Zustand.

**Tabelle 3: Spannglied 3**

Abschnitt [m]	Bemerkungen/Zustand
0,00 – 1,20	Hüllrohr außen ohne Korrosionserscheinungen, Korrosionserscheinungen innen etwa in der 6-Uhr-Position; Verpresszustand gut; zahlreiche Korrosionsstellen an Berührungspunkten der Spannstäbe untereinander
1,20 – 2,40	Hüllrohr außen ohne Korrosionserscheinungen, Korrosionserscheinungen innen entlang der 6-Uhr-Position; Verpresszustand gut; zahlreiche Korrosionsstellen an Berührungspunkten der Spannstäbe untereinander
2,40 – 3,60	Hüllrohr außen ohne Korrosionserscheinungen, Korrosionserscheinungen innen entlang der 6-Uhr-Position; Verpresszustand gut; zahlreiche Korrosionsstellen an Berührungspunkten der Spannstäbe untereinander
3,60 – 4,80	Hüllrohr außen ohne Korrosionserscheinungen, Korrosionserscheinungen innen entlang der 6-Uhr-Position; Verpresszustand gut; einige Korrosionsstellen an den Spannstäben
4,80 – 6,00	Hüllrohr außen ohne Korrosionserscheinungen, deutliche Korrosionserscheinungen innen entlang der 6-Uhr-Position; Verpresszustand gut; einige Korrosionsstellen an den Spannstäben
6,00 – 7,20	Hüllrohr außen ohne Korrosionserscheinungen, Korrosion unter einer Hüllrohrmuffe bei 6,15 m, deutliche Korrosionserscheinungen innen entlang der 6-Uhr-Position; Verpresszustand gut; einige Korrosionsstellen an den Spannstäben,
7,20 – 8,40	Hüllrohr außen ohne Korrosionserscheinungen, deutliche Korrosionserscheinungen innen entlang der 6-Uhr-Position; Verpresszustand gut; einige Korrosionsstellen an den Spannstäben
8,40 – 9,60	Hüllrohr außen ohne Korrosionserscheinungen, deutliche Korrosionserscheinungen innen entlang der 6-Uhr-Position; Verpresszustand gut; einige Korrosionsstellen an den Spannstäben
9,60 – 11,20	Hüllrohr außen ohne Korrosionserscheinungen, deutliche Korrosionserscheinungen innen entlang der 6-Uhr-Position mit einigen Durchrostungen, Verpresszustand gut; einige Korrosionsstellen an den Spannstäben

Das Spannglied 3 zeigte insgesamt einen guten Verpresszustand. Das Hüllrohr war außen und innen überwiegend metallisch blank und außen nur vereinzelt mit Korrosionserscheinungen bedeckt. Auf der Innenseite waren im Bereich der 6-Uhr-Position deutlichere Korrosionserscheinungen vorhanden, die bis zu Durchrostungen im ehemaligen Tiefpunktbereich des Trägers (ab 9,6 m) geführt haben. Die Spannstäbe haben vereinzelt unwesentliche Korrosionserscheinungen und sind auch in den Durchrostungsbereichen aufgrund des guten Verpresszustandes nicht stärker betroffen. Spannstahlbrüche oder Anrisse wurden nicht gefunden. Die Abbildungen 30 bis 32 zeigen beispielhaft diesen Zustand.

**Tabelle 4: Spannglied 4**

Abschnitt [m]	Bemerkungen/Zustand
0,00 – 1,20	Hüllrohr außen mit gleichmäßig geringen Korrosionserscheinungen, innen einige Korrosionserscheinungen in der 6-Uhr-Position; Verpresszustand gut; keine Korrosion an Spannstählen
1,20 – 2,40	Hüllrohr außen mit gleichmäßig geringen Korrosionserscheinungen, innen einige Korrosionserscheinungen in der 6-Uhr-Position; Verpresszustand gut; einzelne geringe Korrosionserscheinungen an Spannstählen
2,40 – 3,60	Hüllrohr außen mit gleichmäßig geringen Korrosionserscheinungen, innen einige Korrosionserscheinungen in der 6-Uhr-Position; Verpresszustand gut; einzelne geringe Korrosionserscheinungen an Spannstählen
3,60 – 4,80	Hüllrohr außen mit gleichmäßig geringen Korrosionserscheinungen, innen einige Korrosionserscheinungen in der 6-Uhr-Position; Verpresszustand gut; einzelne geringe Korrosionserscheinungen an Spannstählen
4,80 – 6,00	Hüllrohr außen mit gleichmäßig geringen Korrosionserscheinungen, innen einige Korrosionserscheinungen entlang der 6-Uhr-Position; Verpresszustand gut; einzelne geringe Korrosionserscheinungen an Spannstählen <i>im SG5 in Höhe 5,7 m (5,7 m) Bruchanzeige der UNI Stuttgart (1aw1)</i>
6,00 – 7,20	Hüllrohr außen mit gleichmäßig geringen Korrosionserscheinungen, innen einige Korrosionserscheinungen entlang der 6-Uhr-Position; Verpresszustand gut; einzelne geringe Korrosionserscheinungen an Spannstählen
7,20 – 8,40	Hüllrohr außen mit gleichmäßig geringen Korrosionserscheinungen, innen metallisch blank; Verpresszustand gut; einzelne geringe Korrosionserscheinungen an Spannstählen
8,40 – 9,60	Hüllrohr außen mit gleichmäßig geringen Korrosionserscheinungen, innen metallisch blank; Verpresszustand gut; kaum Korrosionserscheinungen an Spannstählen
9,60 – 10,80	Hüllrohr außen mit gleichmäßig geringen Korrosionserscheinungen, innen metallisch blank mit geringen Korrosionserscheinungen entlang der 6-Uhr-Position; Verpresszustand gut; kaum Korrosionserscheinungen an Spannstählen
10,80 – 11,40	Hüllrohr außen mit gleichmäßig geringen Korrosionserscheinungen, innen metallisch blank mit geringen Korrosionserscheinungen entlang der 6-Uhr-Position; Verpresszustand gut; einzelne geringe Korrosionserscheinungen an Spannstählen

Das Spannglied 4 zeigte insgesamt einen guten Verpresszustand. Das Hüllrohr war außen und innen überwiegend metallisch blank oder außen mit wenigen gleichmäßigen Korrosionserscheinungen bedeckt. Auf der Innenseite waren im Bereich der 6-Uhr-Position vereinzelt schwache Korrosionserscheinungen vorhanden. Die Spannstähle haben vereinzelt unwesentliche Korrosionserscheinungen. Spannstahlbrüche oder Anrisse wurden nicht gefunden. Die Abbildungen 33 bis 35 zeigen beispielhaft diesen Zustand.

**Tabelle 5: Spannglied 5**

Abschnitt [m]	Bemerkungen/Zustand
0,00 – 1,20	Hüllrohr außen mit gleichmäßig geringen Korrosionserscheinungen, innen metallisch blank mit geringen Korrosionserscheinungen entlang der 6-Uhr-Position; Verpresszustand gut; einzelne geringe Korrosionserscheinungen an Spannstählen
1,20 – 2,40	Hüllrohr außen mit gleichmäßig geringen Korrosionserscheinungen, innen metallisch blank mit geringen Korrosionserscheinungen entlang der 6-Uhr-Position; Verpresszustand gut; einzelne geringe Korrosionserscheinungen an einem Spannstahl
2,40 – 3,60	Hüllrohr außen mit gleichmäßig geringen Korrosionserscheinungen, innen metallisch blank mit vereinzelt geringen Korrosionserscheinungen entlang der 6-Uhr-Position; Verpresszustand gut; einzelne geringe Korrosionserscheinungen an Spannstählen
3,60 – 4,80	Hüllrohr außen mit gleichmäßig geringen Korrosionserscheinungen, innen metallisch blank mit deutlicher Spur von Korrosionserscheinungen entlang der 6-Uhr-Position; Verpresszustand gut; kaum Korrosionserscheinungen an Spannstählen
4,80 – 6,00	Hüllrohr außen mit gleichmäßig geringen Korrosionserscheinungen, innen metallisch blank mit Korrosionserscheinungen entlang der 6-Uhr-Position, an Hüllrohrmuffe 5,35 m (6,05 m) etwas stärker; Verpresszustand gut; wenige Korrosionserscheinungen an Spannstählen <b>Bruchanzeige (1aw1) in Höhe 5,7 m (5,7 m) der UNI Stuttgart</b>
6,00 – 7,20	Hüllrohr außen mit gleichmäßig geringen Korrosionserscheinungen, innen metallisch blank, einige wenige Korrosionserscheinungen in der 6-Uhr-Position, Verpresszustand gut; kaum Korrosionserscheinungen an Spannstählen
7,20 – 8,40	Hüllrohr außen mit gleichmäßig geringen Korrosionserscheinungen, innen metallisch blank, Verpresszustand gut; wenige vereinzelte Korrosionserscheinungen an Spannstählen
8,40 – 9,60	Hüllrohr außen mit gleichmäßig geringen Korrosionserscheinungen, innen metallisch blank, Verpresszustand gut; keine Korrosionserscheinungen an Spannstählen
9,60 – 10,80	Hüllrohr außen mit gleichmäßig geringen Korrosionserscheinungen, innen metallisch blank, Verpresszustand gut; einige wenige Korrosionserscheinungen an Spannstählen
10,80 – 11,40	Hüllrohr außen mit gleichmäßig geringen Korrosionserscheinungen, innen metallisch blank, Verpresszustand gut; einige wenige Korrosionserscheinungen an Spannstählen

Das Spannglied 5 zeigte insgesamt einen guten Verpresszustand. Das Hüllrohr war außen und innen überwiegend metallisch blank oder außen mit wenigen gleichmäßigen Korrosionserscheinungen bedeckt. Auf der Innenseite waren im Bereich der 6-Uhr-Position vereinzelte z.T. auch regelmäßige Korrosionserscheinungen vorhanden. Die Spannstähle haben vereinzelt unwesentliche Korrosionserscheinungen. Spannstahlbrüche oder Anrisse wurden nicht gefunden. Etwa im Bereich der Bruchanzeige der Uni Stuttgart befindet sich eine Koppelstelle am Hüllrohr. Die Abbildungen 36 bis 38 zeigen beispielhaft den Zustand der Spannstähle.

**Tabelle 6: Spannglied 6**

Abschnitt [m]	Bemerkungen/Zustand
0,00 – 1,20	Hüllrohr außen mit gleichmäßig geringen Korrosionserscheinungen, innen metallisch blank mit einzelnen Korrosionserscheinungen, Verpresszustand gut; einige Korrosionserscheinungen an Spannstäben
1,20 – 2,40	Hüllrohr außen metallisch blank mit geringen Korrosionserscheinungen, innen metallisch blank Spur von Korrosionserscheinungen in der 6-Uhr-Position, Verpresszustand gut; einige deutliche Korrosionserscheinungen an Berührungspunkten der Spannstäbe untereinander
2,40 – 3,60	Hüllrohr außen metallisch blank mit geringen Korrosionserscheinungen, innen metallisch blank, Spur von Korrosionserscheinungen in der 6-Uhr-Position, Verpresszustand gut; einige wenige Korrosionserscheinungen an Berührungspunkten der Spannstäbe untereinander
3,60 – 4,80	Hüllrohr außen metallisch blank mit geringen Korrosionserscheinungen, innen metallisch blank, Spur von Korrosionserscheinungen in der 6-Uhr-Position, Verpresszustand gut; einige Korrosionserscheinungen an Berührungspunkten der Spannstäbe zum Hüllrohr
4,80 – 6,00	Hüllrohr außen metallisch blank mit geringen Korrosionserscheinungen, innen metallisch blank, Korrosionserscheinungen entlang der 6-Uhr-Position, Verpresszustand gut; kaum Korrosionserscheinungen an Spannstäben <i>im SG5 in Höhe 5,7 m (5,7 m) Bruchanzeige der UNI Stuttgart (1aw1)</i>
6,00 – 7,20	Hüllrohr außen metallisch blank mit geringen Korrosionserscheinungen, innen metallisch blank, Korrosionserscheinungen entlang der 6-Uhr-Position, Verpresszustand gut; wenig Korrosionserscheinungen an Spannstäben
7,20 – 8,40	Hüllrohr außen metallisch blank mit geringen Korrosionserscheinungen, innen metallisch blank, einzelne Korrosionserscheinungen entlang der 6-Uhr-Position, Verpresszustand gut; wenig Korrosionserscheinungen an Spannstäben
8,40 – 9,60	Hüllrohr außen metallisch blank mit geringen Korrosionserscheinungen, innen metallisch blank, Spur von Korrosionserscheinungen entlang der 6-Uhr-Position, Verpresszustand gut; einige Korrosionserscheinungen an Spannstäben an Berührungspunkten zum Hüllrohr
9,60 – 10,80	Hüllrohr außen metallisch blank mit geringen Korrosionserscheinungen, innen metallisch blank, deutliche Spur von Korrosionserscheinungen entlang der 6-Uhr-Position ab 10,3 m (1,1 m) durchgerostet, Verpresszustand gut; einige Korrosionserscheinungen an Spannstäben an Berührungspunkten zum Hüllrohr
10,80 – 11,40	Hüllrohr ab 10,8 m (0,3 m) durchgerostet, teilweise zu etwa 2/3 erhalten; Verpresszustand gut, wenige Korrosionsstellen an einigen Berührungspunkten der Spannstäbe untereinander

Das Spannglied 6 zeigte insgesamt einen guten Verpresszustand. Das Hüllrohr war außen und innen überwiegend metallisch blank oder außen mit wenigen gleichmäßigen Korrosionserscheinungen bedeckt. Auf der Innenseite waren im Bereich der 6-Uhr-Position vereinzelt z.T. auch regelmäßige Korrosionserscheinungen vorhanden. Die Spannstäbe haben vereinzelt unwesentliche Korrosionserscheinungen. Spannstahlbrüche oder Anrisse wurden nicht gefunden. Im Bereich der ehemaligen tiefsten Lage des Spanngliedes (ab 10,3 m) sind am Hüllrohr Durchrostungen vorhanden. Die Abbildungen 39 bis 41 zeigen beispielhaft den Zustand der Spannstäbe.

**Tabelle 7: Spannglied 7**

Abschnitt [m]	Bemerkungen/Zustand
0,00 – 1,20	Hüllrohr außen metallisch blank, Durchrostungsstellen in der 6-Uhr-Position; innen Korrosionsspur und zahlreiche Durchrostungen in der 6-Uhr-Position; Verpresszustand gut, am Spannstahl einige wenige Korrosionsstellen;
1,20 – 2,40	Hüllrohr außen metallisch blank, Durchrostungsstellen in der 6-Uhr-Position; innen gleichmäßige Korrosionsspur und zahlreiche Durchrostungen; Verpresszustand gut, am Spannstahl einige Korrosionsstellen, stärkere Korrosion bei Hüllrohrkontakt an wenigen Stellen
2,40 – 3,60	Hüllrohr außen überwiegend metallisch blank, Durchrostungsstellen in der 6-Uhr-Position bis in die äußere Seite (3-Uhr-Position); innen gleichmäßige Korrosionsspur und zahlreiche Durchrostungen; Verpresszustand gut, am Spannstahl einige Korrosionsstellen, stärkere Korrosion an mehreren Spannstählen an Durchrostungsstellen <b>Bruchanzeige 2ao3 der Uni Stuttgart in Höhe 2,4 m (7,15 m)</b>
3,60 – 4,80	Hüllrohr außen überwiegend metallisch blank, einige Durchrostungsstellen in der 6-Uhr-Position; innen gleichmäßige Korrosionsspur und einige Durchrostungen; Verpresszustand gut, am Spannstahl einige Korrosionsstellen, stärkere Korrosion bei Hüllrohrkontakt an einer Stelle
4,80 – 6,00	Hüllrohr außen überwiegend metallisch blank, außen kaum sichtbare Durchrostungen in der 6-Uhr-Position, besonders unter der Hüllrohrmuffe; innen gleichmäßige Korrosionsspur in der 6-Uhr-Position, Verpresszustand gut, einige Spannstähle teilweise stärker korrodiert;
6,00 – 7,20	Hüllrohr außen überwiegend metallisch blank, außen kaum sichtbare Durchrostungen in der 6-Uhr-Position, innen teilweise Korrosionsspur in der 6-Uhr-Position mit einigen Durchrostungen, Verpresszustand gut, einige Spannstähle an Berührungspunkten zum Hüllrohr stärker korrodiert;
7,20 – 8,40	Hüllrohr außen überwiegend metallisch blank, Durchrostungen in der 6-Uhr-Position, innen einzelne Korrosionserscheinungen mit Durchrostung in der 6-Uhr-Position, Verpresszustand gut, einige Spannstähle an Berührungspunkten zum Hüllrohr stärker korrodiert; <b>Bruchanzeige 2ao1 der Uni Stuttgart in Höhe 8,05 m (1,55 m)</b>
8,40 – 9,55	ab 9,0 m (bis 0,55m) ist die untere Hälfte des Hüllrohres (3- bis 9-Uhr-Position) vollständig durch Korrosion zerstört; außerhalb dieser Flächen ist das Hüllrohr bis auf eine gleichmäßige Korrosionsspur in der 6-Uhr-Position metallisch blank; Verpresszustand gut, Spannstahl ab 9,0m (ab 0,55m) zum Teil stark korrodiert mit festhaftendem Mörtel mit Korrosionsprodukten durchsetzt; <b>Bruchanzeige 2ao1 der Uni Stuttgart in Höhe 8,80 m (0,75 m)</b>

Das Spannglied 7 zeigte trotz zahlreicher Hüllrohrdurchrostungen insgesamt einen guten Verpresszustand. Das Hüllrohr war außerhalb von Durchrostungen in intakten Bereichen überwiegend metallisch blank oder außen mit wenigen gleichmäßigen Korrosionserscheinungen bedeckt. Auf der Innenseite waren im Bereich der 6-Uhr-Position regelmäßige Korrosionserscheinungen und Durchrostungen teilweise auch bis in die außen liegende 3-Uhr-Position vorhanden. Die Spannstähle haben vereinzelt unwesentliche Korrosionserscheinungen, im Bereich der großflächigen Durchrostungen des Hüllrohres aber auch stärkere Korrosionserscheinungen. Spannstahlbrüche oder Anrisse wurden nicht gefunden. Etwa in Höhe der Bruchanzeigen sind jeweils seitlich durchgerostete Hüllrohre. Die Abbildungen 42 bis 44 zeigen beispielhaft den Zustand der Spannstähle.

**Tabelle 8: Spannglied 8**

Abschnitt [m]	Bemerkungen/Zustand
0,00 – 1,20	Hüllrohr außen metallisch blank, eine Durchrostungsstelle, innen Spur von Korrosionserscheinungen etwa in der 6-Uhr-Position mit einer Durchrostungsstelle; Verpresszustand gut, wenig einzelne Korrosionserscheinungen auf den Spannstählen
1,20 – 2,40	Hüllrohr außen metallisch blank, innen schwache Spur von Korrosionserscheinungen etwa in der 6-Uhr-Position; Verpresszustand gut, wenig Korrosionserscheinungen auf den Spannstählen
2,40 – 3,60	Hüllrohr außen metallisch blank, innen schwache Spur von Korrosionserscheinungen etwa in der 6-Uhr-Position; Verpresszustand gut, wenig Korrosionserscheinungen auf den Spannstählen <i>im SG7 in Höhe 2,4 m (7,15 m) Bruchanzeige 2ao3 der UNI Stuttgart</i>
3,60 – 4,80	Hüllrohr außen metallisch blank, innen schwache Spur von Korrosionserscheinungen etwa in der 6-Uhr-Position, keine Korrosion in der Hüllrohrmuffe; Verpresszustand gut, wenig Korrosionserscheinungen auf den Spannstählen
4,80 – 6,00	Hüllrohr außen metallisch blank, innen einzelne Korrosionserscheinungen etwa in der 6-Uhr-Position, Verpresszustand gut, kaum Korrosionserscheinungen auf den Spannstählen
6,00 – 7,20	Hüllrohr außen metallisch blank, innen wenige schwache Korrosionserscheinungen etwa in der 6-Uhr-Position, Verpresszustand gut, kaum Korrosionserscheinungen auf den Spannstählen
7,20 – 8,40	ab ca. 7,9 m (ab 1,65 m) Durchrostungen etwa in der 3- bis 9-Uhr-Position;; Verpresszustand gut, Spannstahl wenige Korrosionserscheinungen, nahe der Durchrostungsstelle etwas stärker <i>im SG7 in Höhe 8,05 m (1,55 m) Bruchanzeige 2ao1 der UNI Stuttgart</i>
8,40 – 9,55	Korrosionserscheinungen am gesamtem Hüllrohr, mehr als die Hälfte des Umfanges völlig weggerostet; Verpresszustand gut, Spannstahl leicht korrodiert, in Bereichen nahe der Durchrostungen stärker; <b>Anrisse: bei 9,0 m; 9,1 m; 9,2 m; 8,9 m; 9,5 m; mehrere von 9,1 bis 9,2 m an 4 Spannstählen</b> <i>im SG7 in Höhe 8,80 m (0,75 m) Bruchanzeige 2ao1 der UNI Stuttgart</i>

Das Spannglied 8 zeigte insgesamt einen guten Verpresszustand. Das Hüllrohr war außerhalb von Durchrostungen in intakten Bereichen überwiegend metallisch blank oder außen mit wenigen gleichmäßigen Korrosionserscheinungen bedeckt. Auf der Innenseite waren im Bereich der 6-Uhr-Position regelmäßige Korrosionserscheinungen vorhanden. Etwa ab der ehemaligen Tieflage des Spanngliedes sind Durchrostungen teilweise von der 3-Uhr-Position bis zur 9-Uhr-Position vorhanden. Die Spannstähle haben vereinzelt unwesentliche Korrosionserscheinungen, im Bereich der Durchrostungen des Hüllrohres zum Teil auch stärkere Korrosionserscheinungen. Spannstahlbrüche wurden nicht gefunden. Im Abschnitt 8,4 bis 9,55 wurden an 4 Spannstählen Anrisse in einem relativ eng abgegrenzten Bereich von 8,9 bis 9,5 m gefunden. Die Abbildungen 45 bis 49 zeigen beispielhaft den Zustand der Spannstähle und einige der Anrissanzeigen unter UV-Licht.

**Tabelle 9: Spannglied 9**

Abschnitt [m]	Bemerkungen/Zustand
0,00 – 1,20	Hüllrohr gleichmäßige Korrosionserscheinungen außen, innen metallisch blank, Verpresszustand gut, an Spannstählen einige wenig Korrosionserscheinungen
1,20 – 2,40	Hüllrohr gleichmäßige Korrosionserscheinungen außen, innen metallisch blank bis 2,2 (7,4 m) ab da unverpresst und korrodiert, Verpresszustand sonst gut, Spannstahl im unverpressten Bereich korrodiert sonst kaum Korrosion
2,40 – 3,60	Hüllrohr außen korrodiert; ab ca. 2,6 m (7,0 m) im unteren Bereich durchkorrodiert; fast vollständig unverpresst, ab 3,5 m wieder gut verpresst; Spannstahl korrodiert <i>im SG7 in Höhe 2,4 m (7,15 m) Bruchanzeige 2ao3 der UNI Stuttgart</i>
3,60 – 4,80	Hüllrohr außen gleichmäßig korrodiert, innen metallisch blank; guter Verpresszustand, Spannstahl kaum korrodiert
4,80 – 6,00	Hüllrohr außen wenig korrodiert, innen metallisch blank; guter Verpresszustand, Spannstahl ohne Korrosion
6,00 – 7,20	Hüllrohr außen wenig korrodiert, innen metallisch blank; guter Verpresszustand, Spannstahl ohne Korrosion
7,20 – 8,40	Hüllrohr ab 7,6 m etwa 3- bis 9-Uhr-Position durchkorrodiert, Verpressmörtel während der Entnahme zurückgeblieben, Spannstähle überwiegend ohne Korrosion, einzelne Korrosionsstellen im unverpressten Bereich <b>1 Spannstahlende bei 8,20 m (1,35 m); 1 Spannstahlende bei 8,30 m (1,25 m) ohne Gegenstück</b> <b>Anrisse bei 8,1 m (2), 8,3 m, 8,15 m an 3 Spannstählen</b> <i>im SG7 in Höhe 8,05 m (1,55 m) Bruchanzeige 2ao1 der UNI Stuttgart</i>
8,40 – 9,55	Hüllrohrreste bei der Entnahme im Beton verblieben, Spannstähle bis auf einzelne Korrosionsbereiche überwiegend ohne Korrosion, <b>5 Spannstahlenden und 7 Spannstahlanfänge bei: 8,5 m (1,1 m), 8,6 m (1,0 m), 8,8 m(0,8 m), 8,85 m(0,7 m), 8,9 m (0,7 m), 8,9 m (0,7 m), 8,95 m (0,6m) zwei 9,0 m (0,55 m)</b> <b>mehrere Anrisse von 9,0 bis 9,2, einzelne Anrisse an 4 Spannstählen bei 8,90, 9,0, 9,10, 9,20, und 9,55 m</b> <i>im SG7 in Höhe 8,80 m (0,75 m) Bruchanzeige 2ao1 der UNI Stuttgart</i>

Das Spannglied 9 zeigte überwiegend einen guten Verpresszustand. Einige Bereiche waren aber unverpresst, das Hüllrohr durchkorrodiert und die Spannstähle deutlich korrodiert. An den Durchrostungen in der ehemaligen Tieflage ist das Hüllrohr fast vollständig zerstört, während die Spannstähle dennoch gut verpresst und überwiegend korrosionsfrei sind. Das Hüllrohr war außerhalb von Durchrostungen in intakten Bereichen überwiegend metallisch blank oder außen mit wenigen gleichmäßigen Korrosionserscheinungen bedeckt. Die Spannstähle haben in diesen Bereichen keine Korrosionserscheinungen. Mehrere Spannstahlbrüche und Anrisse wurden im Bereich von 7,2 bis 9,55 m gefunden. Die Abstände zwischen den Bruchenden betragen teilweise 0,3 bis 0,5 m, bei einigen Bruchabständen aber auch nur 10 bis 20 cm (s. Abb.53/54). Der von den Messungen der TU Berlin erfasste Bereich endet am SG9 vor diesem Bereich bei ca. 6 m. Die Abbildungen 50 bis 55 zeigen beispielhaft den Zustand der Spannstähle, Anrissanzeigen und Bruchlagen.

**Tabelle 10: Spannglied 10**

Abschnitt [m]	Bemerkungen/Zustand
0,00 – 1,20	Hüllrohr außen metallisch blank mit einzelnen Durchrostungen im 6-Uhr-Bereich; unverpresst; Spannstahl gleichmäßig stark korrodiert
1,20 – 2,40	Hüllrohr außen metallisch blank mit einzelnen Durchrostungen im 6-Uhr-Bereich; unverpresst; Spannstahl gleichmäßig stark korrodiert <b>Spannstahlende mit Bruch ohne Gegenstück bei 2,30 m (7,25 m)</b>
2,40 – 3,60	Hüllrohr außen metallisch blank mit einzelnen Durchrostungen im 6-Uhr-Bereich; unverpresst; Spannstahl gleichmäßig stark korrodiert <b>Spannstahlende mit Bruch ohne Gegenstück bei 3,10 m (6,45 m)</b>
3,60 – 4,80	Hüllrohr außen metallisch blank mit einzelnen Durchrostungen im 6-Uhr-Bereich; unverpresst; Spannstahl gleichmäßig stark korrodiert
4,80 – 6,00	Hüllrohr außen metallisch blank mit einzelnen Durchrostungen im 6-Uhr-Bereich; unverpresst; Spannstahl gleichmäßig stark korrodiert
6,00 – 7,20	Hüllrohr außen metallisch blank mit einzelnen Durchrostungen im 6-Uhr-Bereich; unverpresst; Spannstahl gleichmäßig stark korrodiert
7,20 – 8,40	Hüllrohr außen metallisch blank mit einzelnen Durchrostungen im 6-Uhr-Bereich; unverpresst; Spannstahl gleichmäßig stark korrodiert <b>Spannstahlende mit Bruch ohne Gegenstück bei 7,45 m (2,1m)</b> <b>Spannstahlende mit Bruch ohne Gegenstück bei 7,75 m (1,8 m)</b> <b>2x Spannstahlanfang mit Bruch ohne Gegenstück bei 7,95 m (1,6 m)</b>
8,40 – 9,55	Hüllrohr außen metallisch blank mit einzelnen Durchrostungen im 6-Uhr-Bereich; unverpresst bis etwa 9,3 m (0,25 m); Spannstahl gleichmäßig stark korrodiert, im wieder verpressten Abschnitt ohne Korrosion <b>Spannstahlanfang mit Bruch ohne Gegenstück bei 8,70 m (0,85 m)</b> <b>2x Spannstahlanfang mit Bruch ohne Gegenstück bei 8,75 m (0,80 m)</b>

Das Spannglied 10 war vollständig unverpresst. Das Hüllrohr war außerhalb von Durchrostungen in intakten Bereichen außen überwiegend metallisch blank. Die Innenoberfläche ist gleichmäßig mit Korrosionserscheinungen bedeckt. Die Spannstähle sind gleichmäßig mit Korrosionsprodukten bedeckt und enthalten zum Teil erhebliche Korrosionsnarben. In unterschiedlichen Bereichen wurden Bruchstellen gefunden, denen keine gegenüberliegende Bruchstelle zuzuordnen ist. Anrisse wurden nicht gefunden. Die Abbildungen 56 bis 61 zeigen beispielhaft den Zustand der Spannstähle und die Lage der Bruchstellen.

**Tabelle 11: Spannglied 11**

Abschnitt [m]	Bemerkungen/Zustand
0,00 – 1,20	Hüllrohr außen und innen metallisch blank, ohne Korrosion; guter Verpresszustand, Spannstahl ohne Korrosionserscheinungen; <b>Anrisse an einem Spannstahl bei 0,90 bis 0,96 m und 1,05 bis 1,10 m</b>
1,20 – 2,40	Hüllrohr außen und innen metallisch blank, ohne Korrosion; guter Verpresszustand, Spannstahl ohne Korrosionserscheinungen;
2,40 – 3,60	Hüllrohr außen und innen metallisch blank, ohne Korrosion; guter Verpresszustand, Spannstahl ohne Korrosionserscheinungen; <b>Anrisse an einem Spannstahl bei 2,75 m, 3,30 m und 3,40 bis 3,50 m</b>
3,60 – 4,80	Hüllrohr außen und innen metallisch blank, wenig Korrosion außen an einer Hüllrohrmuffe; guter Verpresszustand, Spannstahl ohne Korrosionserscheinungen; <b>Anrisse an einem Spannstahl bei 3,75 m, 4,40 m und 4,60 m</b> <b>Anrisse an einem Spannstahl von 3,70 bis 4,00 m</b> <b>Anriss an einem Spannstahl bei 4,10 m</b>
4,80 – 6,00	Hüllrohr außen und innen metallisch blank, ohne Korrosion; guter Verpresszustand, Spannstahl ohne Korrosionserscheinungen; zahlreiche <b>Anrisse an 8 Spannstählen (s. Tab.)</b>
6,00 – 7,20	Hüllrohr außen und innen metallisch blank, ohne Korrosion; guter Verpresszustand, Spannstahl ohne Korrosionserscheinungen; zahlreiche <b>Anrisse an 11 Spannstählen (s. Tab.)</b>
7,20 – 8,40	Hüllrohr außen und innen metallisch blank, ohne Korrosion; guter Verpresszustand, Spannstahl ohne Korrosionserscheinungen; zahlreiche <b>Anrisse an 5 Spannstählen (s. Tab.)</b>
8,40 – 9,55	Hüllrohr außen und innen metallisch blank, ohne Korrosion; guter Verpresszustand, Spannstahl ohne Korrosionserscheinungen; <b>8 Anrisse an 4 Spannstählen (s. Tab.)</b>

Das Spannglied 11 zeigte insgesamt einen guten Verpresszustand. Das Hüllrohr war außen und innen überwiegend metallisch blank und frei von Korrosion. Die Spannstähle sind praktisch nicht mit Korrosionserscheinungen bedeckt. Spannstahlbrüche wurden nicht gefunden. Über alle Spannstähle verteilt sind Anzeichen für Anrisse gefunden worden (Tabelle 11a). Bei einem späteren Zugversuch an Proben dieses Spanngliedes traten Brüche an zuvor vorhandenen Anrissen auf, die bei der Anrissprüfung nicht detektiert worden waren. An einem Bereich außerhalb des Prüfbereiches (über 9,55 m) wurden an vorhandenen Anrissen auf der Baustelle durch mechanische Einwirkung Brüche erzeugt. Die Abbildungen 62 bis 67 zeigen beispielhaft den Zustand der Spannstähle und Anrissanzeigen.

**Tabelle 11a: Anrissanzeigen am Spannglied 11**

Abschnitt:

Spannstahl:	0,0-1,20	1,20-2,4	2,4-3,6	3,6-4,8	4,8-6,0	6,0-7,2	7,2-8,4	8,4-9,55
1	0,89 - 0,97 1,04 - 1,11		2,75 3,33 3,41 - 3,52	3,74 4,37 4,58	5,15 5,23 5,39	7,04	7,34 - 7,46 7,59 7,74 - 7,76 7,83 8,00 8,15 - 8,20 8,34	8,43 8,45
2				3,66-4,03	5,37 - 5,43 5,48 5,96	7,04	7,22 - 7,53 7,69 7,95 8,14 8,26-8,30	8,50 9,00
3				4,10	5,66 - 5,87	6,11 - 6,37 6,56 - 6,68 7,17	7,65-7,84	8,87 8,93
4					5,12	6,32 - 6,42 6,56 - 6,68 7,15 7,17	7,79	9,12
5					5,25 5,27 5,39 - 5,45	7,07	7,23 - 7,29 7,60-7,62	
6					5,16 5,31 5,62	7,11		
7					4,84 - 5,13 5,21	6,65 6,99 - 7,09		
8					5,91 - 5,97	6,02 - 6,28 6,68 7,16		
9						6,86 - 7,07		
10						6,32		
11						6,45-6,48 6,59 - 6,65		

**Tabelle 12: Spannglied 12**

Abschnitt [m]	Bemerkungen/Zustand
0,00 – 1,20	Hüllrohr außen und innen metallisch blank, ohne Korrosion; guter Verpresszustand, Spannstahl ohne Korrosionserscheinungen;
1,20 – 2,40	Hüllrohr außen und innen metallisch blank, ohne Korrosion; guter Verpresszustand, Spannstahl ohne Korrosionserscheinungen; bei etwa 1,5 m (8,05 m) angeschnitten durch Bohrkernentnahme; <b>2 Spannstähle einfach zerschnitten, 1 Spannstahl angeschnitten; 4 Spannstähle doppelt zerschnitten</b> <b>Bruchanzeige 2aw4 der Uni Stuttgart, bei 1,65 m (7,87)</b> <b>Bruchanzeige TU Berlin bei 1,64 m</b>
2,40 – 3,60	Hüllrohr außen und innen metallisch blank, ohne Korrosion; guter Verpresszustand, Spannstahl ohne Korrosionserscheinungen;
3,60 – 4,80	Hüllrohr außen schwache Korrosionserscheinungen, innen metallisch blank, ohne Korrosion; guter Verpresszustand, Spannstahl ohne Korrosionserscheinungen;
4,80 – 6,00	Hüllrohr außen schwache Korrosionserscheinungen, innen metallisch blank, ohne Korrosion; guter Verpresszustand, Spannstahl ohne Korrosionserscheinungen;
6,00 – 7,20	Hüllrohr außen schwache Korrosionserscheinungen, innen metallisch blank, ohne Korrosion; guter Verpresszustand, Spannstahl ohne Korrosionserscheinungen;
7,20 – 8,40	Hüllrohr außen schwache Korrosionserscheinungen, innen überwiegend metallisch blank, einige schwache Korrosionserscheinungen; guter Verpresszustand, Spannstahl ohne Korrosionserscheinungen;
8,40 – 9,55	Hüllrohr außen schwache Korrosionserscheinungen, innen überwiegend metallisch blank, einige schwache Korrosionserscheinungen; guter Verpresszustand, am Spannstahl wenige Korrosionserscheinungen;

Das Spannglied 12 zeigte insgesamt einen guten Verpresszustand. Das Hüllrohr war innen und außen überwiegend metallisch blank oder an einigen Stellen mit wenigen gleichmäßigen Korrosionserscheinungen bedeckt. Die Spannstähle haben vereinzelt unwesentliche Korrosionserscheinungen und sind sonst frei von Korrosion. Spannstahlbrüche wurden nicht gefunden. Im Abschnitt 1,2-2,4 m war das Spannglied durch eine Kernbohrung angeschnitten. Das Hüllrohr war seitlich aufgeschnitten (s. Abb. 8) und 7 Spannstähle waren durchtrennt worden. 4 davon waren doppelt durchtrennt, so dass 4 separate Spannstahlabschnitte von ca. 15 cm Länge im Spannglied vorlagen. Die Abbildungen 68 bis 70 zeigen beispielhaft den Zustand der Spannstähle und den angeschnittenen Bereich.

### 3 Bewertung der Ergebnisse

In den Prinzipskizzen (Abbildungen 71 bis 74) sind die Ergebnisse der Untersuchungen der zerstörungsfreien Prüfverfahren mit den beim Öffnen der Trägersegmente gefundenen Auffälligkeiten wie Brüche, Anrisse und Hüllrohrdurchrostungen vergleichend dargestellt.

Mit dem Untersuchungsverfahren der TU Braunschweig wurden in den Trägersegmenten keine Hinweise auf Brüche oder Anrisse gefunden. Auch die im Spannglied 12 sowohl von der TU Berlin als auch von der Uni Stuttgart etwa gleichermaßen erkannte Bruchlage an der Kernbohrung wurde mit der elektromagnetischen Resonanzmessung nicht erfasst. In den Prinzipskizzen ist die TU Braunschweig deshalb auch nicht aufgeführt.

Anrisse an Spannstählen, die sehr zahlreich in SG11 und in Teilen des SG8 und SG9 vorhanden waren, konnten von keinem der zerstörungsfreien Verfahren geortet werden.

Die im Spannglied 10 enthaltenen Einzelbrüche (9 End- bzw. Anfangsstücke von Spannstählen) wurden von keinem Verfahren geortet. Diese Bruchenden sind auch nicht im eigentlichen Sinne als Brüche zu betrachten, da die Bruchufer teilweise mehrere Meter auseinander liegen. Die Messdaten wurden nicht auf diese spezielle Art von „Brüchen“ analysiert. Das vollständig unverpresste Spannglied enthielt gleichmäßig korrodierte Spannstähle und das Hüllrohr wies lokale Durchrostungen in der 6-Uhr-Position auf.

Im Spannglied 12 gab es in Höhe 1,5 m (8,05) eine Kernbohrung, an der ein Teil des Spanngliedes doppelt zertrennt wurde (Abb. 75). Hier waren sowohl das Hüllrohr seitlich aufgeschnitten als auch 2 einzelne Spannstähle einmal zerschnitten und 4 Spannstähle doppelt zerschnitten worden. Das Spannglied verlief nahezu waagrecht vom 0-Punkt-Anker bis zum Mittelpunkt der Kernbohrung und fällt bis 0-Punkt-Stuttgart noch um 20 cm ab (Abb. 75). Die zerstörungsfreie Bruchanzeige der Uni Stuttgart lag bei 1,6 m (2aw4 787cm) und trifft damit fast exakt die Bruchposition im Balken.

Die Bruchanzeige der TU Berlin für SG12 wird im Text S. 16 mit 0,97 m hinter dem Startpunkt der Messung angegeben. Mit dem in Tabelle 1 (Text S. 4) angegebenen Startpunkt von 67 cm ergibt sich für die Bruchortung die Position 1,64 m. Damit wird ebenfalls fast exakt der Bereich der Kernbohrung als Schadenstelle geortet. Weitere Bruchpositionen wurden von TU Berlin nicht angegeben. Dabei ist anzumerken, dass die Bereiche „erster-“ und „letzter Meter“ der Messkurve von der TU Berlin als eingeschränkt interpretierbar angegeben werden (Text S. 14) und deshalb auch nicht untersucht werden konnten.

Von der Uni Stuttgart wurden weitere 4 Positionen angegeben, an denen Bruchsignale geortet wurden:

- 1 Im Messabschnitt 2ao1 gibt es eine Bruchanzeige für die Position 8,8 m (75 cm) am SG7. Am SG7 befindet sich in diesem Bereich kein Bruch. Das Hüllrohr ist in diesem Bereich allerdings erheblich korrodiert, so dass etwa die Hälfte praktisch nicht mehr vorhanden ist (Abb. 44). In einem ähnlichen Durchrostungszustand befindet sich auch das in diesem Bereich unmittelbar anliegende SG8 und SG9. In SG 9 wurden in diesem Bereich nach dem Öffnen mehrere Spannstahlbrüche gefunden. Die Spannglieder liegen hier im ehemaligen Tiefpunkt des Trägers dicht gebündelt. Die Radarmessungen haben in diesem Bereich das Spannglied 9 nicht mehr separat erfassen können.
- 2 Die sehr nahe an diesem Bereich liegende, zweite Bruchanzeige im Messabschnitt 2ao1 für die Position 8,05 m (1,55 m) bezieht sich ebenfalls auf das Spannglied 7. Hier sind ebenfalls keine Brüche aber ein stark korrodiertes Hüllrohr vorhanden. Am Spannglied 8 beginnt hier der Bereich mit Hüllrohrdurchrostungen und am Spannglied 9 wurden hier ebenfalls Spannstahlbrüche gefunden. Das Hüllrohr war hier praktisch nicht mehr vorhanden.
- 3 Im Messabschnitt 2ao3 gibt es eine Bruchanzeige für die Position 2,4 m (7,15 m) ebenfalls am Spannglied 7. Brüche waren hier nicht vorhanden. Das Hüllrohr war an dieser Position stark korrodiert und bis in die 3-Uhr-Position durchgerostet (Abb. 42). Vor und nach diesem Bereich ist das Hüllrohr nur in der 6-Uhr-Position punktuell durchrostet. Das darunter liegende SG8 (10 cm tiefer) zeigte keine Auffälligkeiten. Am Spannglied 9 (10 cm tiefer) beginnt etwa in dieser Position ein Bereich, in dem das Hüllrohr durchkorrodiert und nicht verpresst war (Abb. 50).
- 4 Im Messabschnitt 1aw1 gibt es eine Bruchanzeige für die Position 5,7 m (5,7 m) am Spannglied 5. Brüche waren hier nicht vorhanden. An der angegebenen Position befand sich eine Hüllrohrkoppelstelle (Abb. 37). Die Spannglieder oberhalb und unterhalb dieser Stelle wiesen auch keine Auffälligkeiten auf. Spannstähle und Hüllrohre sind weitgehend korrosionsfrei.

Die magnetischen Streufeldverfahren der Uni Stuttgart und der TU Berlin haben gemeinsam an einer Positionen (SG12) eine Bruchanzeige ergeben, die unmittelbar mit tatsächlich vorhandenen Trennungen im Spannglied im Zusammenhang standen.

An 3 weiteren Positionen sind Bruchanzeigen durch die Uni Stuttgart nicht unmittelbar im Zusammenhang mit Spannstahlbrüchen sondern offensichtlich mit Hüllrohrauffälligkeiten entstanden. In all diesen Fällen war das Hüllrohr bis über die 3-Uhr-Position korrodiert. (Am SG12 war infolge der Kernbohrung ebenfalls das Hüllrohr in der 3-Uhr-Position nicht mehr

vorhanden.) Zumindest in 2 Fällen (2ao1) wären bei weiteren Untersuchungen tatsächlich auch Spannstahlbrüche gefunden worden. In einem Fall (2ao3) die dort vorhandenen Durchrostungen und bei Ausweitung der Untersuchungen auch der unverpresste Bereich. Die Bruchanzeige im SG5 liegt an einer Hüllrohranomalie, ohne dass Schäden an Hüllrohr oder Spannstahl gefunden worden.

#### **4 Zusammenfassung**

An Spannbetonteilen mit nachträglichem Verbund kann es unter ungünstigen Bedingungen, wie z. B. Korrosion des Spannstahls vor dem Verpressen oder unzureichende Verpressung der Hüllrohre, zu einer Schädigung der Spanndrähte kommen, die unter Umständen von der Betonoberfläche nicht erkannt werden kann. Im schlimmsten Fall ist ein Versagen des gesamten Bauteils ohne Vorankündigung möglich. Um ein solches Szenario zu vermeiden, wäre eine zerstörungsfreie Prüfung des Zustandes der Spanndrähte in den Spanngliedern von der Betonoberfläche aus von allergrößter Bedeutung.

Zur Zeit gibt es zwei zerstörungsfreie, auf magnetischer Streufeldmessung basierende Prüfverfahren, die schon erfolgreich zur Detektion von Spanndrahtbrüchen eingesetzt wurden. Des Weiteren ist ein auf elektromagnetischer Resonanzmessung basierendes Verfahren entwickelt worden, mit dem im Labormaßstab mit Erfolg Schädigungen festgestellt werden konnten.

Beim Abriss der Hohenzollerndammbrücke in Berlin bestand die Möglichkeit Trägersegmente des Brückenüberbaus zu entnehmen, bei denen auf Grund von Voruntersuchungen mit großer Wahrscheinlichkeit davon ausgegangen werden konnte, dass einige der Spanndrähte durch Spannungsrisskorrosion geschädigt waren (Anrisse bzw. Brüche). Die Bauteile wurden zunächst mit den drei o. g. zerstörungsfreien Prüfverfahren untersucht. Anschließend erfolgte die Freilegung der vorher geprüften Spannglieder, um die Ergebnisse hinsichtlich ihrer Zuverlässigkeit und Aussagekraft zu verifizieren.

Die visuelle Beurteilung sowie die Magnetpulverprüfung der entnommenen Spanndrähte ergab, dass in den untersuchten Spanngliedern an mehreren Stellen Drahtbrüche vorlagen sowie zahlreiche Drähte Anrisse aufwiesen.

Mit dem Bruchortungsverfahren auf der Basis der elektromagnetischen Resonanzmessung (TU Braunschweig) wurden keine Hinweise auf Spannstahlschädigungen gefunden. Die Auswertung und Analyse der Messungen haben gezeigt, dass unter den gegebenen Bedingungen der Bruch eines einzelnen Drahtes nicht gefunden werden kann, da ein Einzeldrahtbruch eines mehrdrähtigen Spanngliedes nur dann geortet werden kann, wenn kein niederohmiger Kontakt des einzelnen Spannstahls zu anderen benachbarten Spannstählen oder zum Hüllrohr vorliegt, was für den vorliegenden Fall aber sicher nicht zutreffend ist. Damit ist dieses Verfahren für die untersuchten Trägersegmente bzw. für vergleichbare Bauteile für die Detektion von Spannstahlbrüchen in mehrdrähtigen Spanngliedern nicht geeignet.

Mit den beiden anderen Prüfsystemen, die beide auf dem Prinzip der magnetischen Streufeldmessung basieren, wurde ein Bereich mit Stahltrennungen eindeutig erkannt. In diesem Fall waren die Stahltrennungen mechanisch durch eine Kernbohrung verursacht. Sie

sind aber vergleichbar mit einem Bereich, in dem mehrere Drähte gleichzeitig gebrochen wären. Mit dem Verfahren der Uni Stuttgart wurden in der Nähe von Drahtbrüchen Bruchsignale gefunden, die nicht genau mit den Bruchpositionen übereinstimmen, aber möglicherweise doch durch sie hervorgerufen wurden.

Anrisse, die an vielen Drähten gefunden wurden, haben in keinem Fall zu einer Auffälligkeit in den Messsignalen geführt.

Bereiche, in denen gehäuft Brüche vorliegen, können dagegen offensichtlich erkannt werden. Dies sind aber auch die für die Tragwerkssicherheit entscheidenden Bereiche, da Brüche einzelner Drähte an weit voneinander entfernten Stellen auf Grund der Verbundwirkung über den Einpressmörtel weniger kritisch anzusehen sind. Nichtsdestotrotz wäre es wünschenswert, wenn die beiden Streufeldverfahren weiter optimiert würden, damit deren Aussagegenauigkeit verbessert werden kann.

## 5 Literatur

---

- [1] Mietz, J.; Fischer, J.; Isecke, B.; Friedl, L.; Schießl, P.:  
Baupraktische Untersuchungen zum Korrosionsverhalten hochfester, vergüteter Spannstähle aus Spannbetonbauwerken  
Schlussbericht des DIBt-Forschungsvorhaben IV 12-5-7.181-878/98, TU München und BAM Berlin, 2000
- [2] Nürnberger, U.; Menzel, K.; Mietz, J.; Isecke, B.:  
Spannungsrissskorrosion vorgeschädigter Spannstähle im verpressten Zustand.  
Abschlussbericht des DIBt-Forschungsberichtes IV 1-5-654/91, FMPA Stuttgart und BAM Berlin, 1993
- [3] Mietz, J.; Nürnberger, U.; Beul, W.:  
Untersuchungen an Verkehrsbauten aus Spannbeton zur Abschätzung des Gefährdungspotentials infolge Spannungsrissskorrosion der Spannstähle. Abschlussbericht des BMV-Forschungsberichtes FE 15.209 R91D, BAM Berlin und FMPA Stuttgart 1994.
- [4] Mietz, J.; Pasewald, K.; Isecke, B.:  
Untersuchungen zum wasserstoffinduzierten Spröbruch vergüteter Spannstähle. Abschlussbericht des DIBt-Forschungsberichtes IV 1-5-651/92, BAM Berlin 1998, (veröffentlicht als Forschungsbericht T 2819 beim Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart 1998).
- [5] Brückenbuch Nr. 905, Senator für Bau- und Wohnungswesen VII D/Brückenbau
- [6] BAM-Gutachten VII.4/13364 vom 26.10.1998

## 6 Abbildungen



Abb. 1: Ansicht des Brückenbauwerkes nach der Fertigstellung



Abb. 2: Ansicht der Längsträger beim Abriss nach Entfernung der Fahrbahnplatte

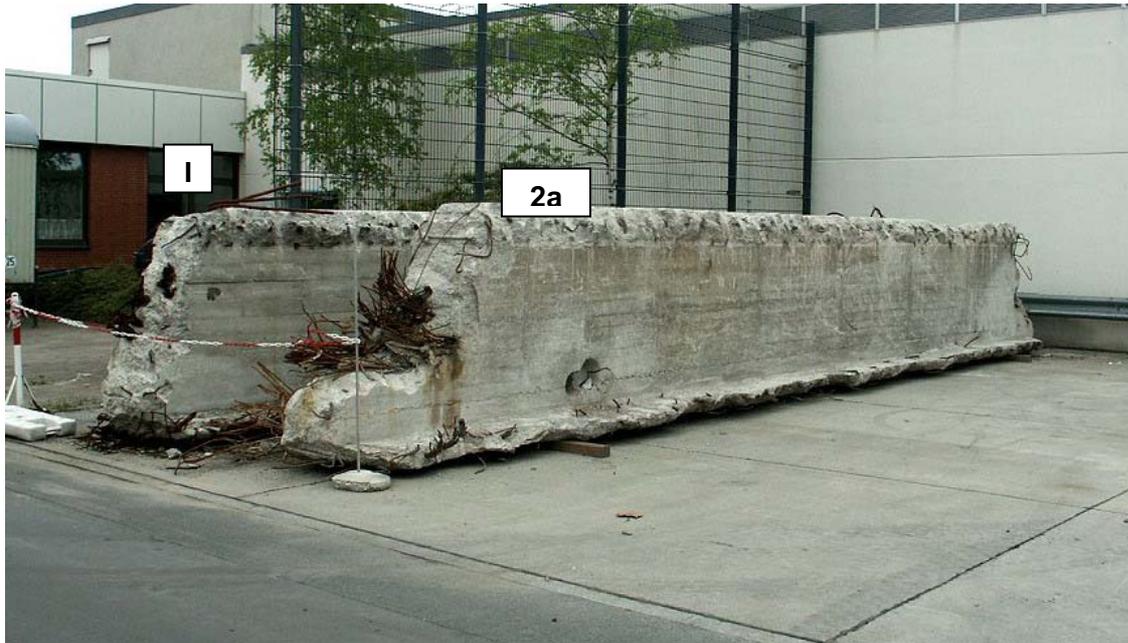


Abb. 3: Trägersegmente auf dem Gelände der BAM



Abb. 4: Trägersegmente, Draufsicht, vorn ehemalige Ankerungsseite



Abb. 5: Seitenansicht der ehemaligen Trägermitte (vorn 2a, hinten I)

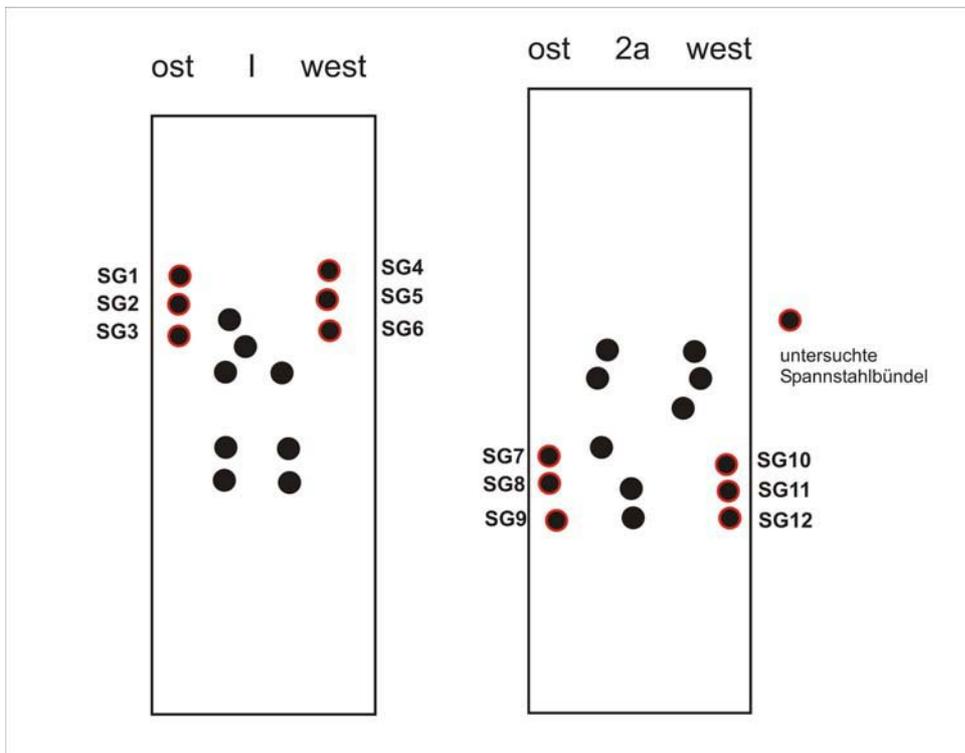


Abb. 6: Schnittdarstellung (etwa Draufsicht Abb. 4), untersuchte Spannglieder



Abb. 7: Träger 2a, ehemalg Entnahmestelle von Spannstahlproben



Abb. 8: Träger 2a, Kernbohrung mit angeschnittenem Spannglied 12

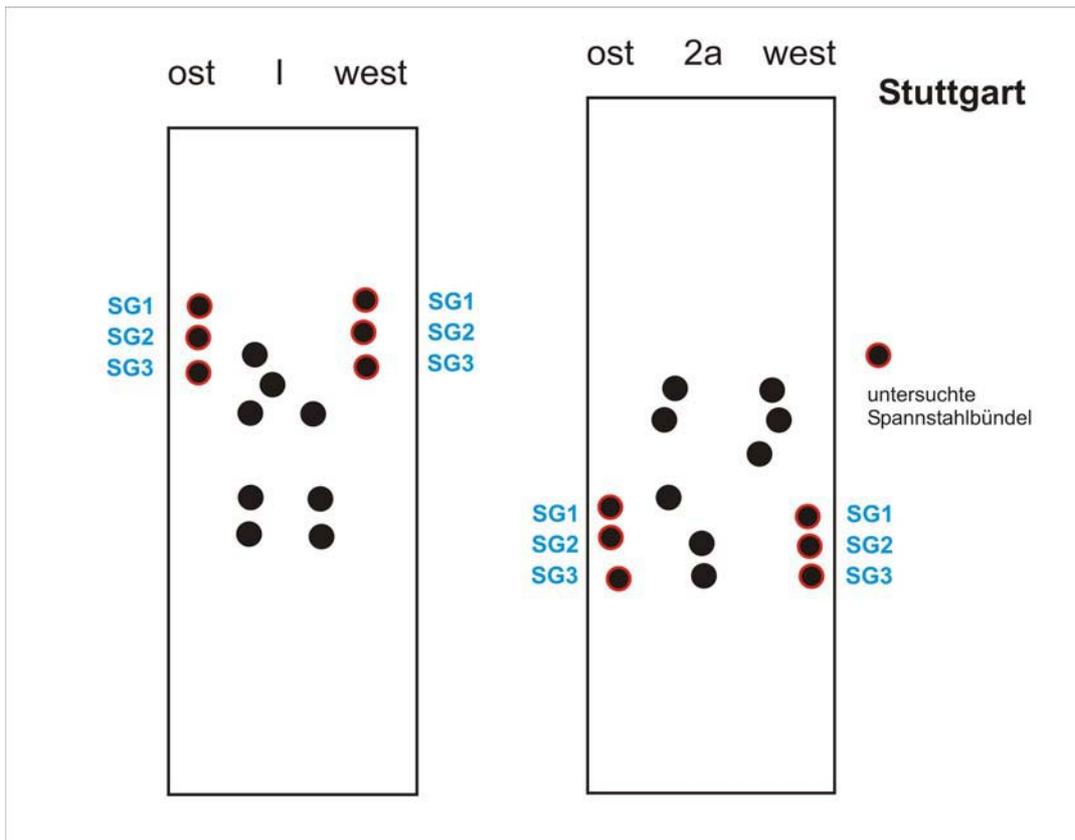


Abb. 9: Spannstahlbezeichnung der Uni Stuttgart (vgl. Abb. 6)



Abb. 10: 0-Punkt-Stuttgart für die Messungen der Uni Stuttgart am Träger 2a Westseite



Abb. 11: Bruchortung  
Uni Stuttgart  
Messabschnitt 1aw1 x=572 cm



Abb. 12:  
Bruchortung  
Uni Stuttgart  
Messabschnitt  
2aw4  
x=787 cm

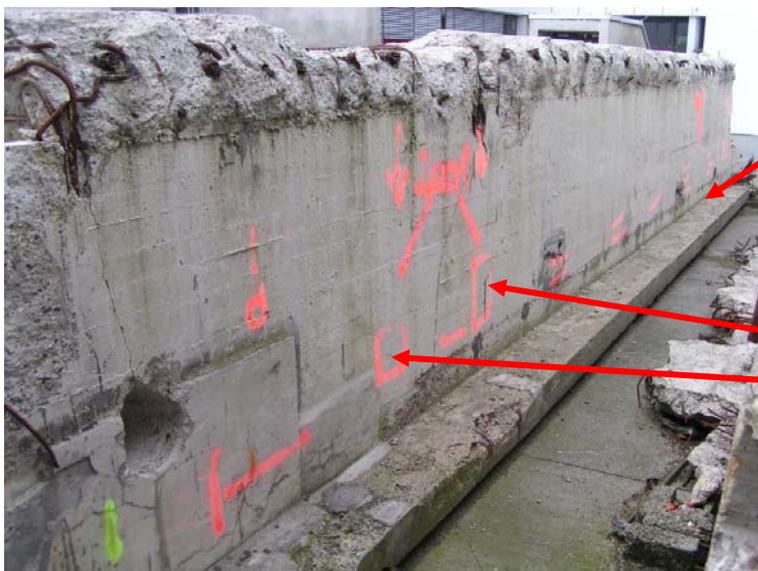


Abb. 13:  
Bruchortung  
Uni Stuttgart  
Messabschnitt 2ao3 x=715 cm

Messabschnitt 2ao1 x=165 cm  
und x= 76 cm



Abb. 14: Befestigung der Messeinrichtung der TU Berlin Träger 2a Ost

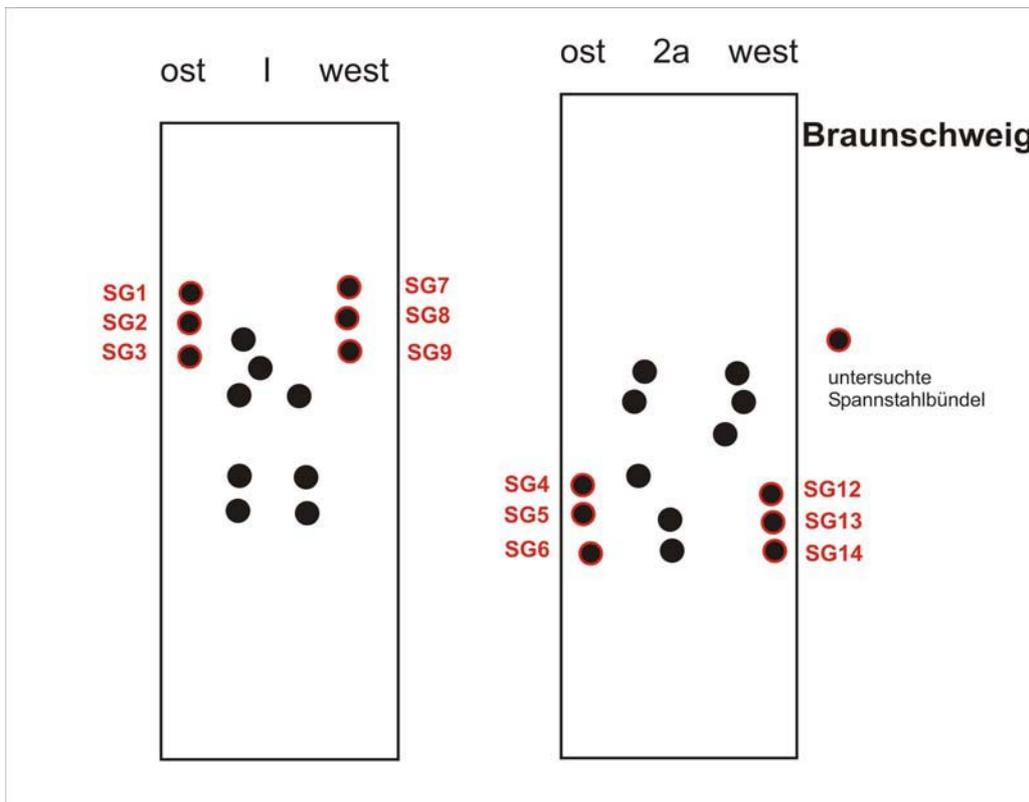


Abb. 15: Spannstahlbezeichnung der TU Braunschweig (vgl. Abb. 6)

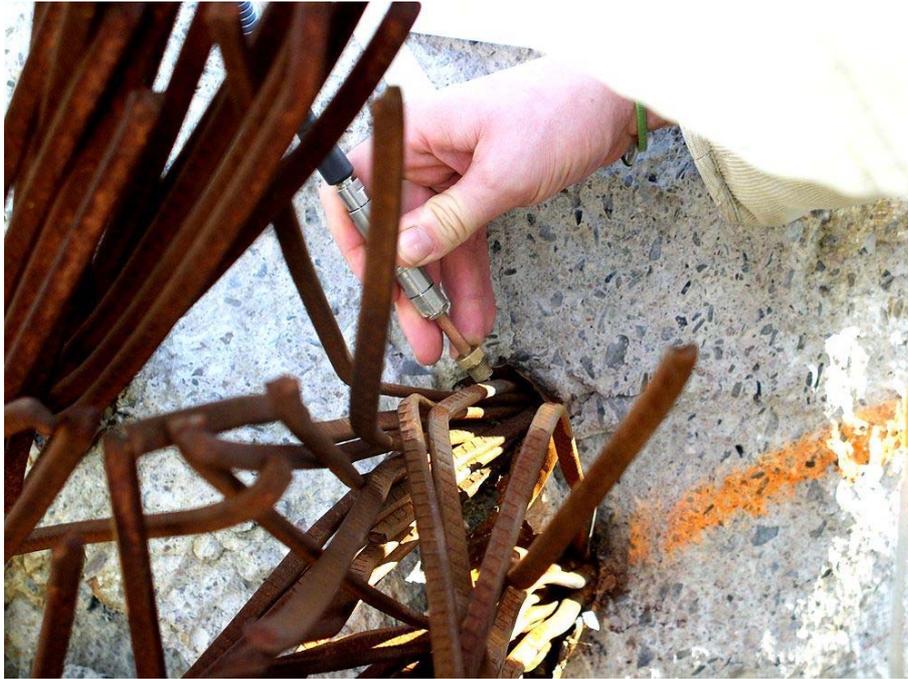


Abb. 16: Ankoppelung eines Spannstahtes beim Messverfahren der TU Braunschweig

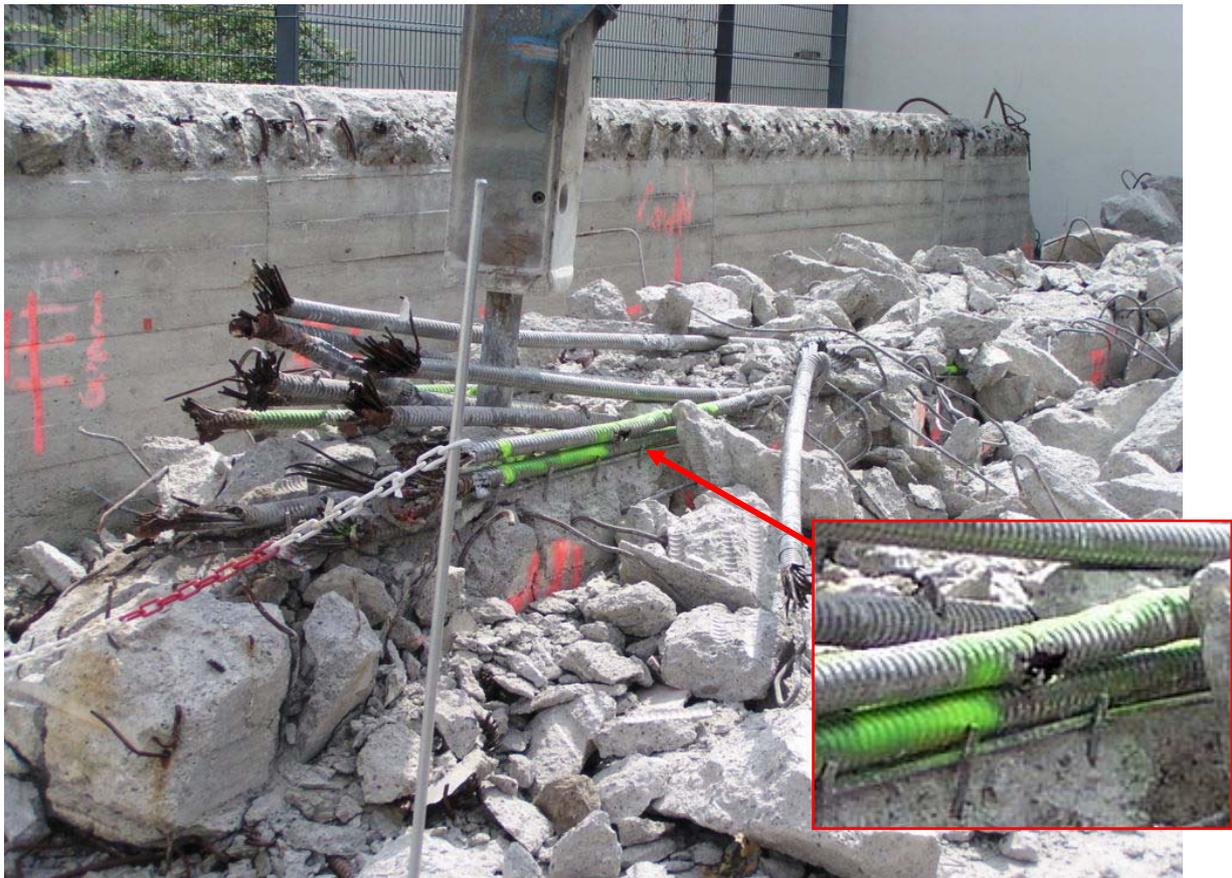


Abb. 17: Abriss Träger 2a, Durchrostung an SG10



Abb. 18: Abriss 2a west, SG10 und SG11 etwas höher als angezeichnet



Abb. 19: Abriss Träger I west, SG4 und SG5 etwas höher als angezeichnet



Abb. 20: Abriss Träger I Ost, von oben: SG1, SG2, SG3, Lage der senkrechten Bewehrung



Abb. 21: SG3, Befestigung der Spannglieder



Abb. 22: SG9, Spannstahlbruch, Hüllrohr zu mehr als 50% wegkorrodiert



Abb. 23: SG11, spröde Spannstahlbrüche, die bei der Entnahme durch mechanische Zügeinwirkung des Hydraulikmeisels entstanden sind. Der Bereich liegt außerhalb des Prüfabschnittes des Spanngliedes 11, bei ca. 10 m (-0,6 m).

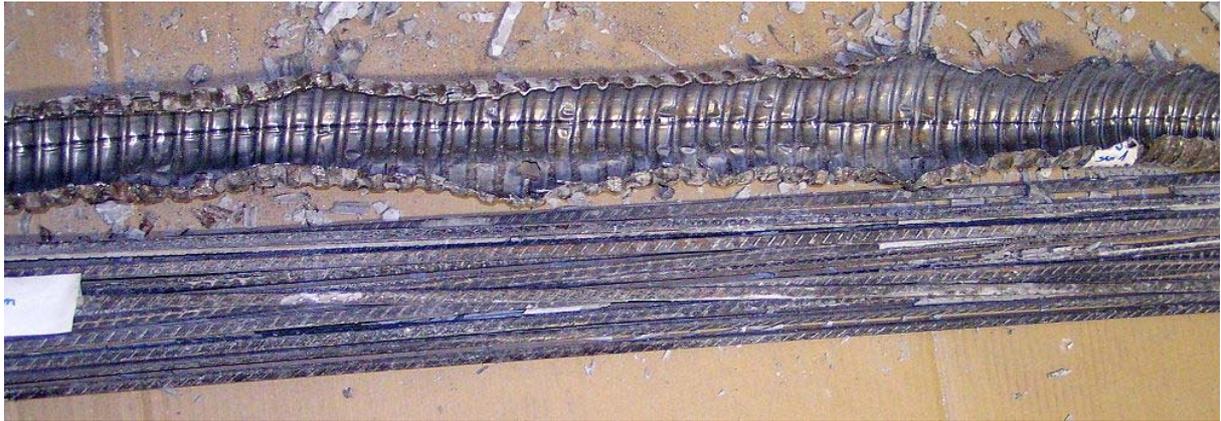


Abb. 24: SG1 Abschnitt 1,2-2,4 m



Abb. 25: SG1 Abschnitt 6,0-7,2 m



Abb. 26: SG1 Abschnitt 7,2-8,4 m



Abb. 27: SG2 Abschnitt 1,2-2,4 m

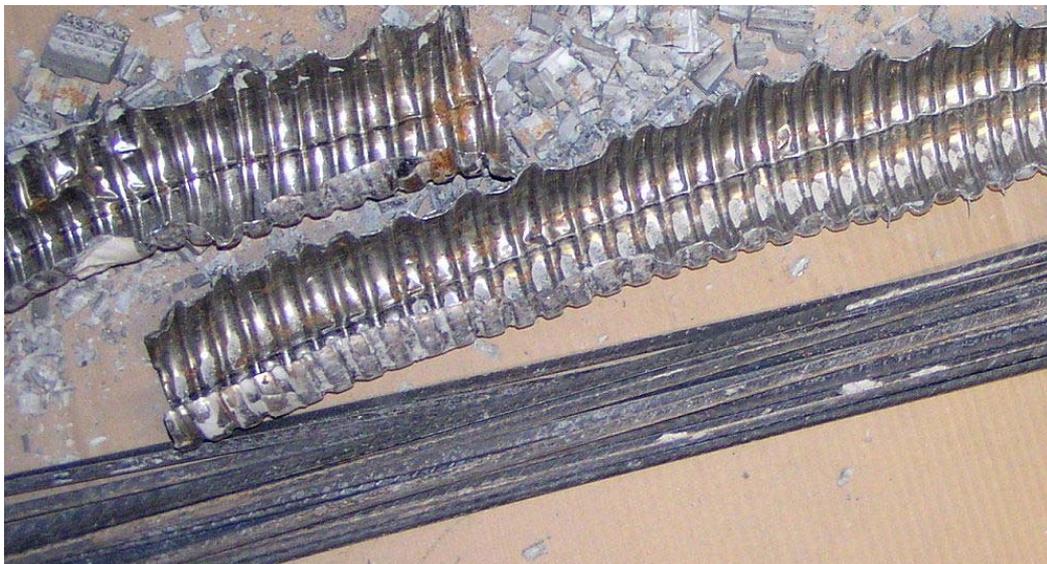


Abb. 28: SG2 Abschnitt 4,8-6,0 m (Hüllrohrkoppelstelle)



Abb. 29: SG2 Abschnitt 7,2-8,4 m

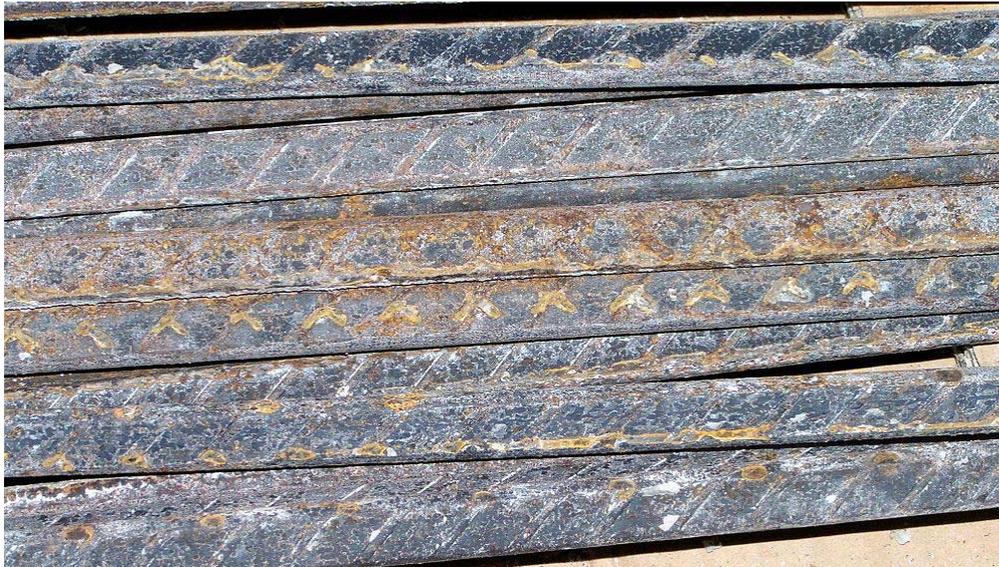


Abb. 30: SG3 Abschnitt 1,2-2,4 m



Abb. 31: SG3 Abschnitt 6,0-7,2 m



Abb. 32: SG3 Abschnitt 9,6-11,2 m Durchrostungen (6-Uhr-Lage) etwa ab 9,85 m (1,35 m)

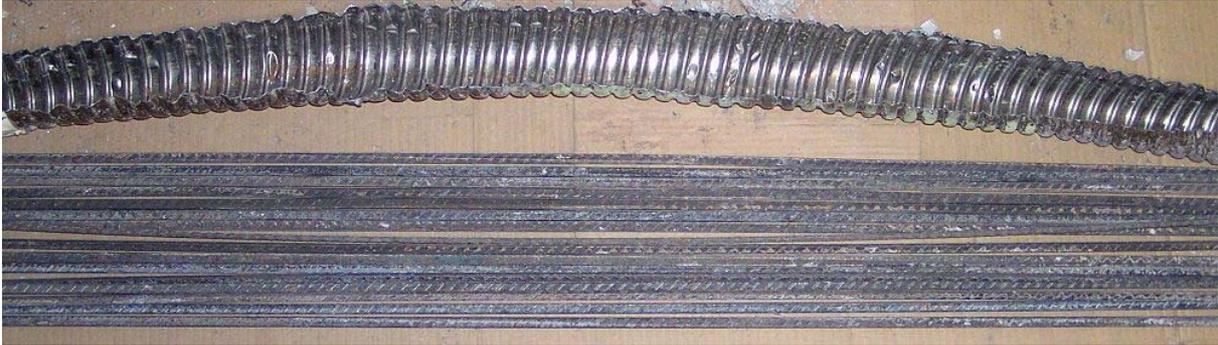


Abb. 33: SG4 Abschnitt 2,4-3,6 m

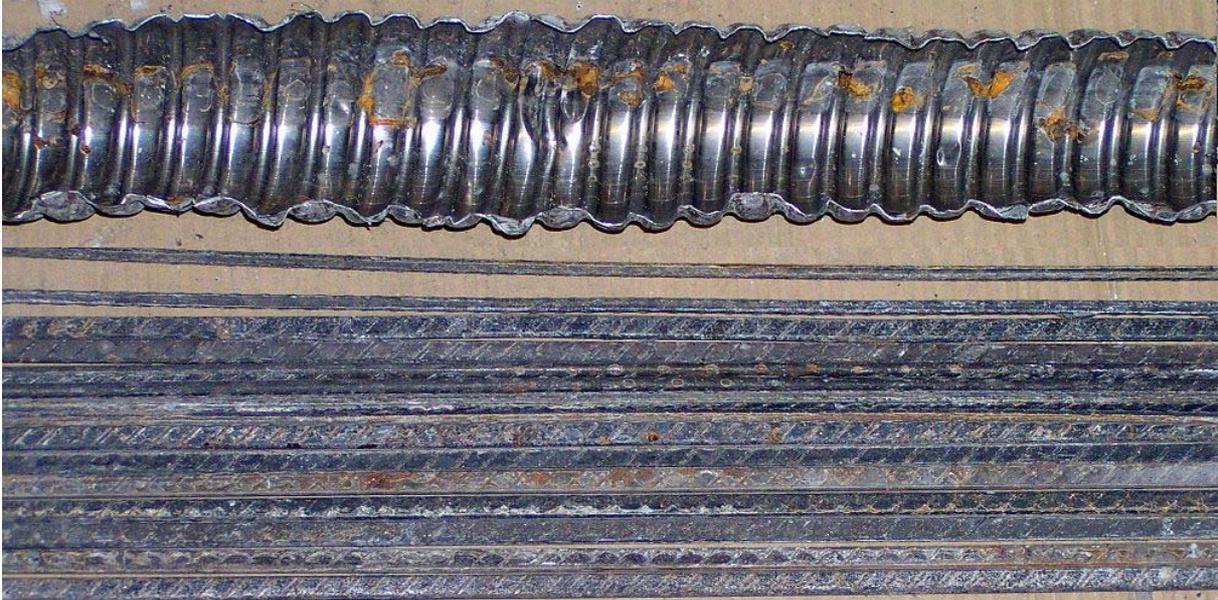


Abb. 34: SG4 Abschnitt 4,8-6,0 m



Abb. 35: SG4 Abschnitt 9,6-10,8 m

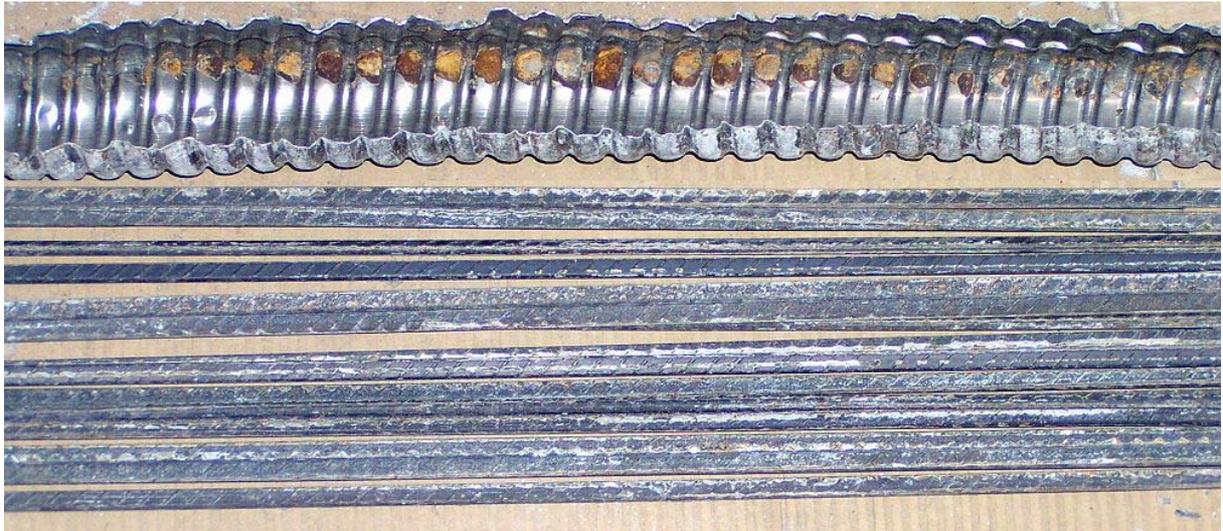


Abb. 36: SG5 Abschnitt 3,6-4,8 m

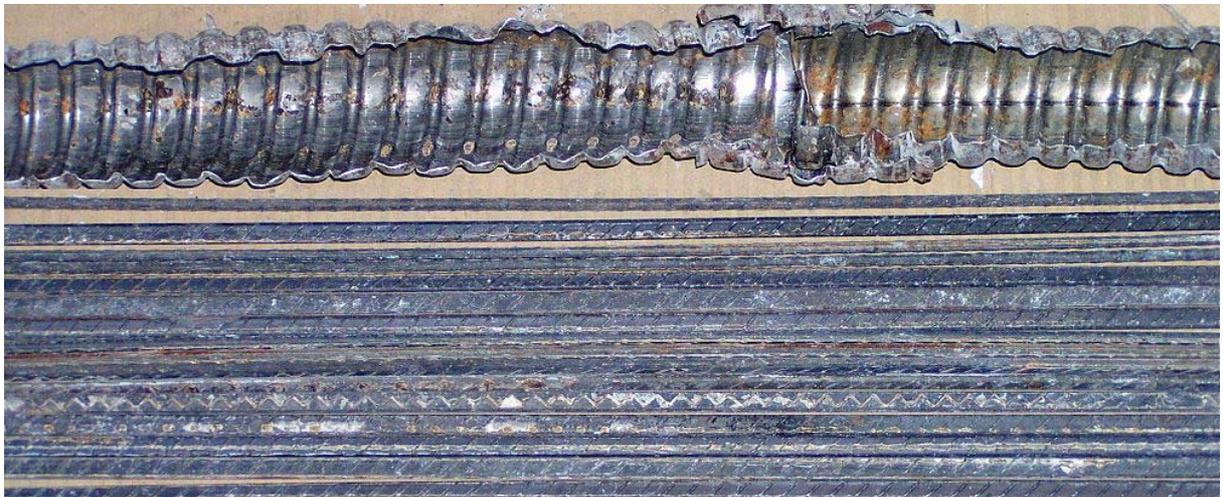


Abb. 37: SG5 Abschnitt 4,8-6,0 m, Koppelstelle bei 5,7 m (5,7 m), Bruchanzeige Stuttgart

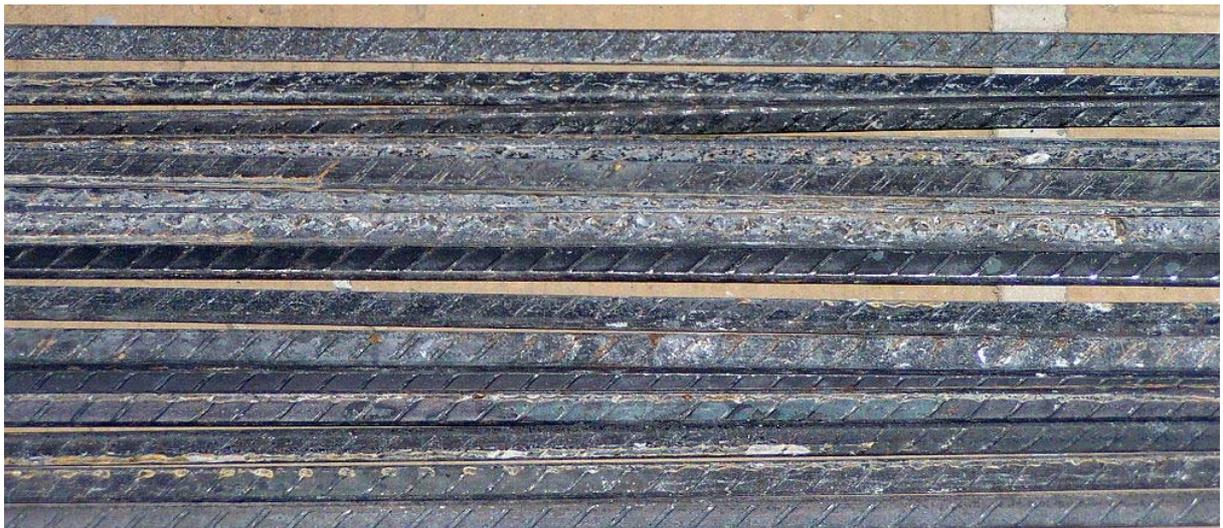


Abb. 38: SG5 Abschnitt 10,8-11,4 m

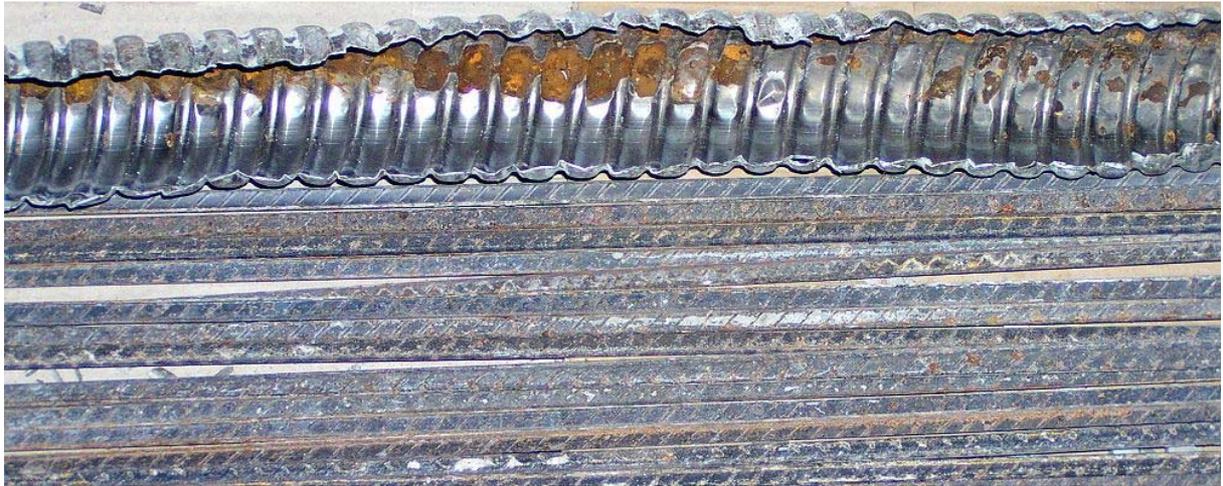


Abb. 39: SG6 Abschnitt 3,6-4,8 m

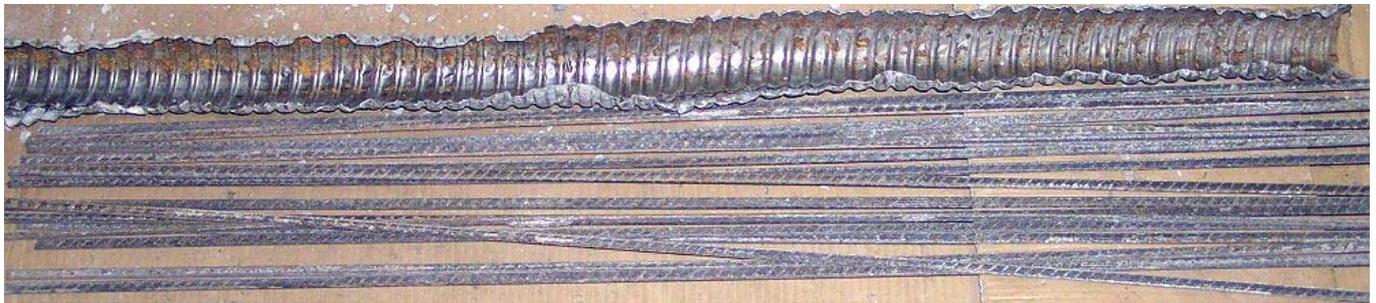


Abb. 40: SG6 Abschnitt 4,8-6,0 m (Höhe der Bruchanzeige am SG5)

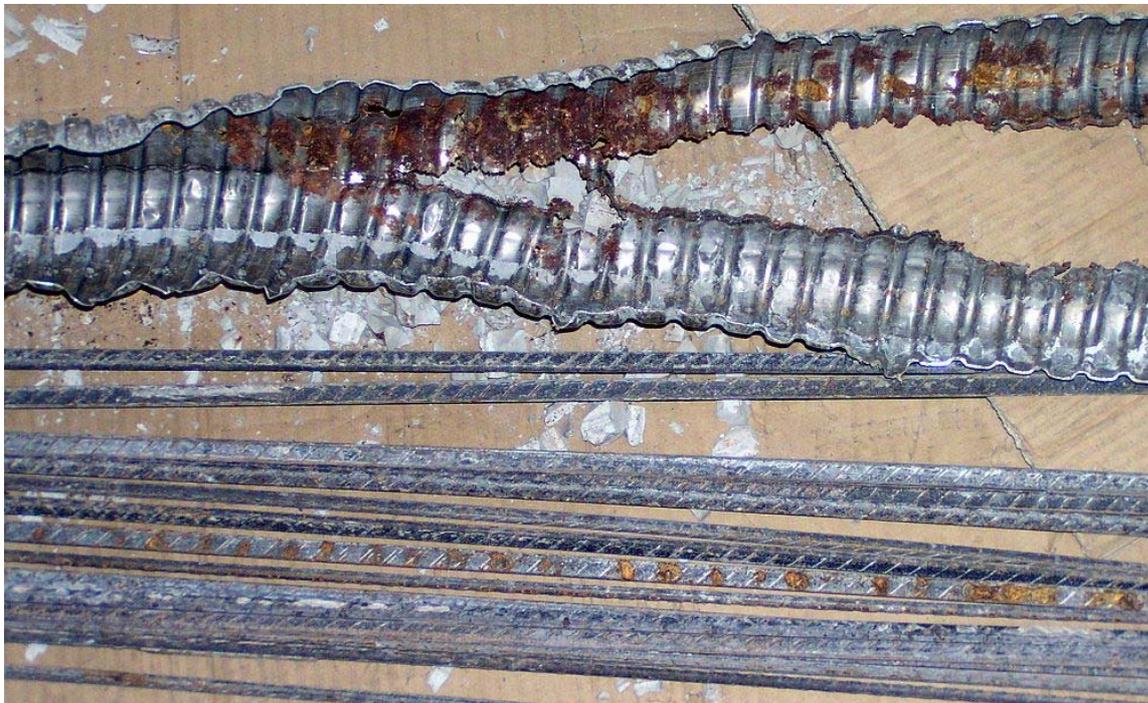


Abb. 41: SG6 Abschnitt 9,6-10,8 m



Abb. 42: SG7 Abschnitt 2,4-3,6 m in Höhe der Bruchanzeige 2ao3



Abb. 43: SG7 Abschnitt 7,2-8,4 m in Höhe der Bruchanzeige 2ao1 8,05 m(1,55 m)

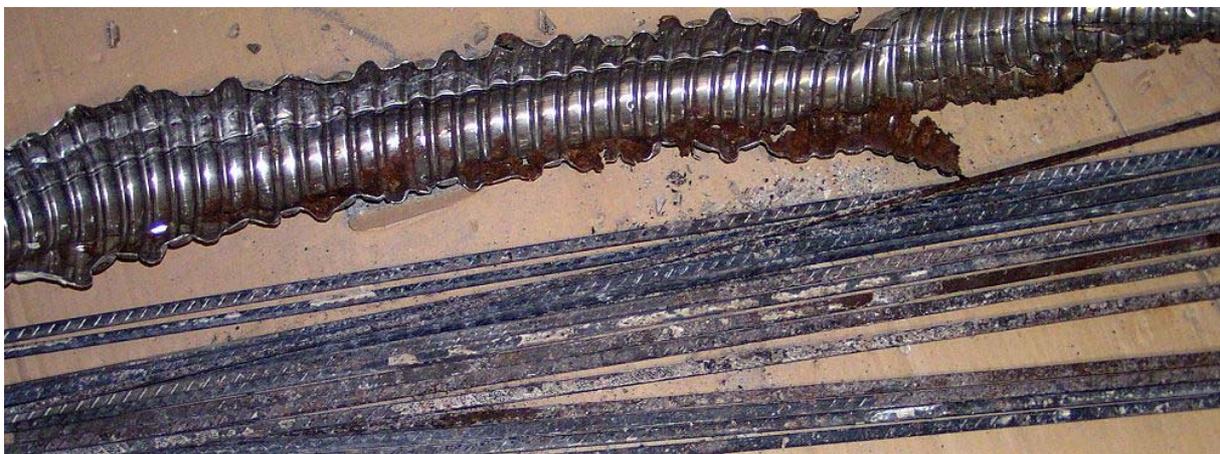


Abb. 44: SG7 Abschnitt 9,6-10,8 m in Höhe der Bruchanzeige 2ao1 8,80 m (0,75 m)



Abb. 45: SG8 Abschnitt 3,6-4,8 m



Abb. 46: SG8 Abschnitt 7,2-8,4 m Beginn der Durchrostung bei 7,9 m



Abb. 47: SG8 Abschnitt 8,4-9,55 m, Durchrostungen

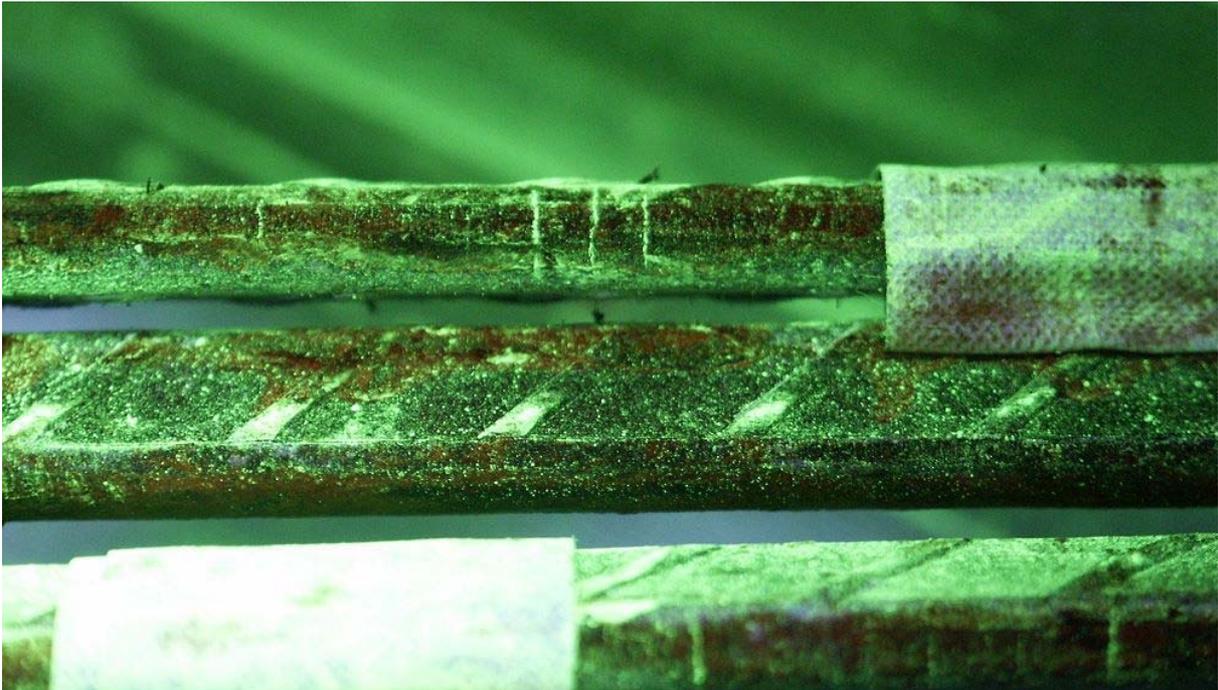


Abb. 48: Rissanzeigen bei der Magnetpulverprüfung SG8, Bereich 8,4-9,55

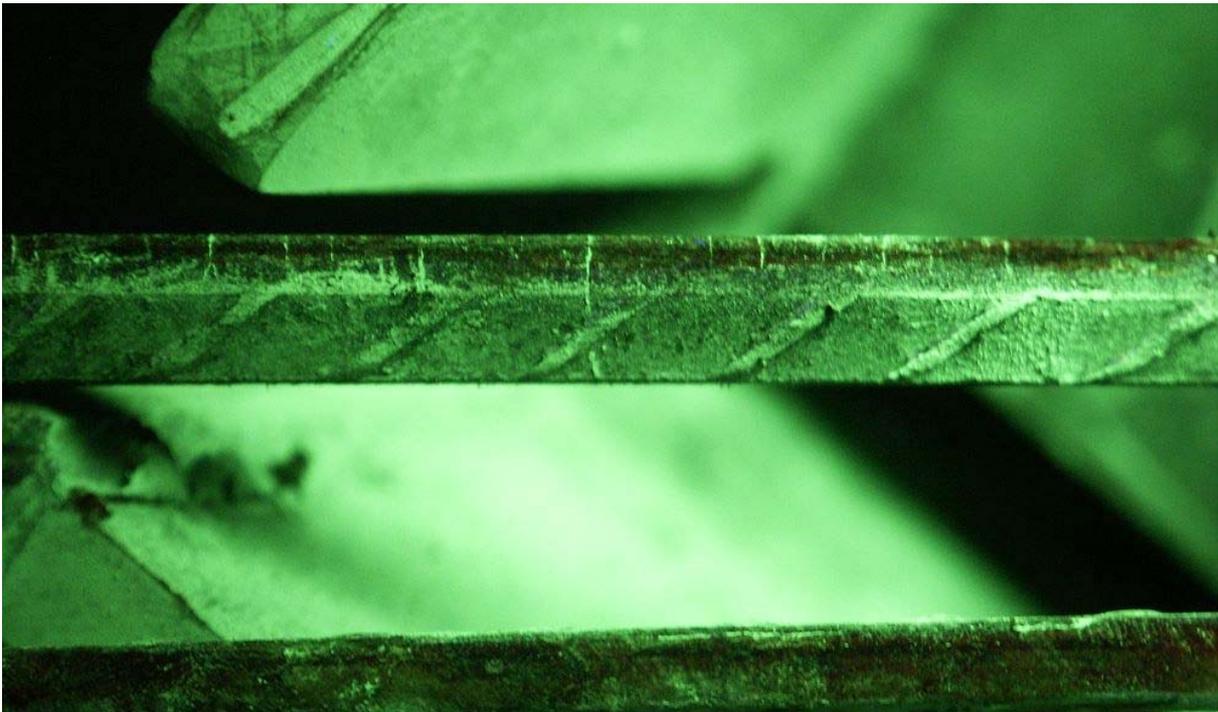


Abb. 49: Rissanzeigen bei der Magnetpulverprüfung SG8, Bereich 8,4-9,55



Abb. 50: SG9 Abschnitt 2,4-3,6 m unverpresster Bereich in diesem Abschnitt

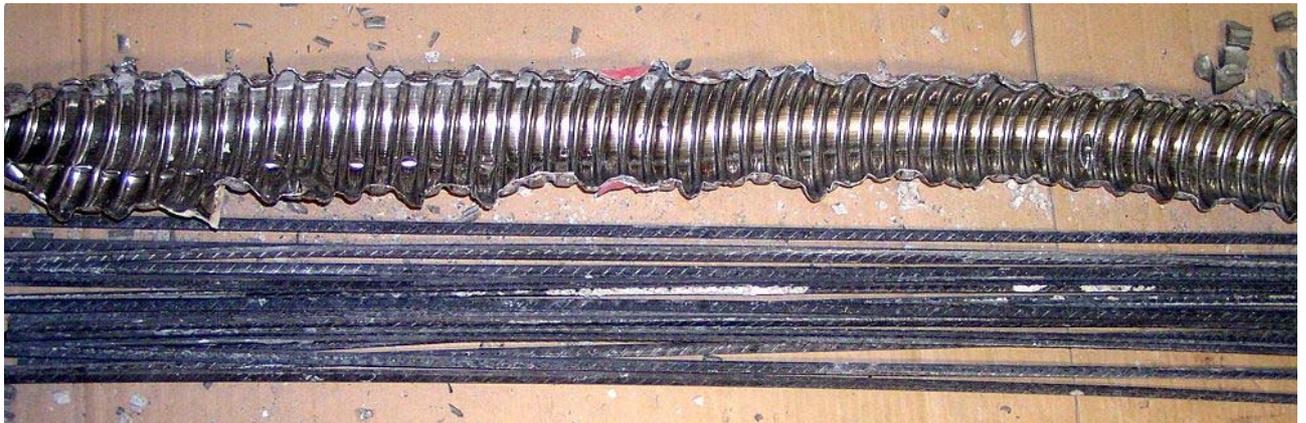


Abb. 51: SG9 Abschnitt 4,8-6,0 m



Abb. 52: SG9 Abschnitt 7,2-8,4 m Lage der Bruchenden

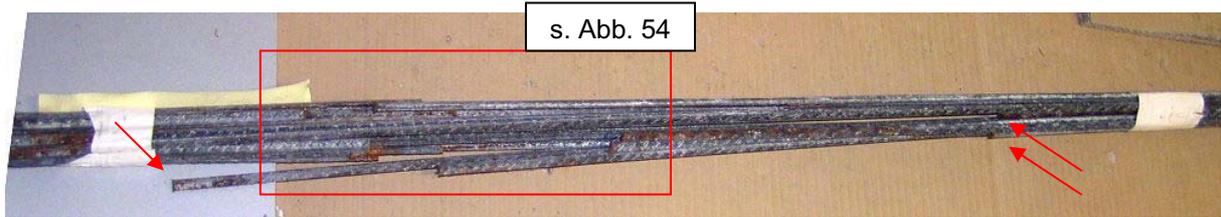


Abb. 53: SG9 Abschnitt 8,4-9,55 m Übersicht mehrere Brüche



Abb. 54: SG9 Abschnitt 8,4-9,55 m, Ausschnitt aus Abb. 53, Bereich um 8,8 m

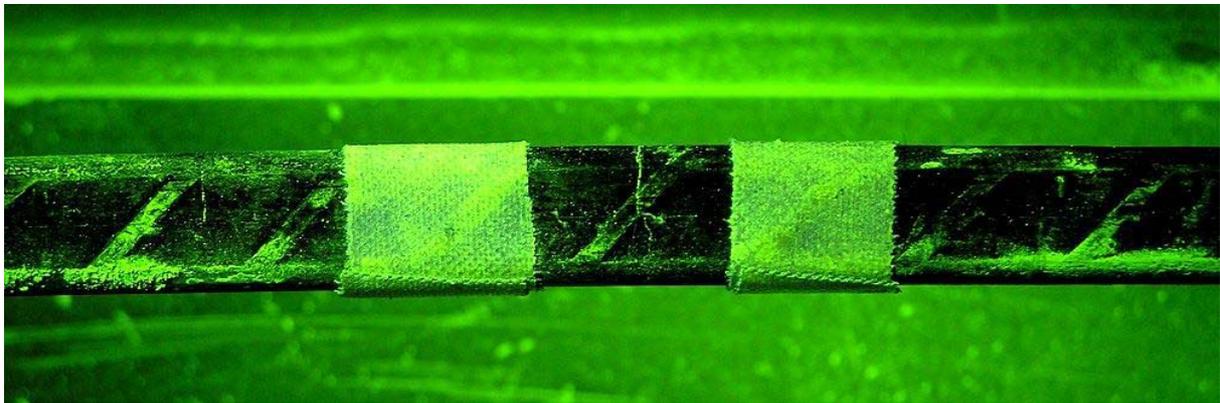


Abb. 55: SG9 Abschnitt 8,4-9,55 m, Rissanzeige bei der Magnetpulverprüfung



Abb. 56: SG10 Abschnitt 1,2-2,4 m Spannstaehlende bei 2,3 m (7,25 m)



Abb. 57: SG10 Abschnitt 2,4-3,6 m, Spannstaehlende bei 3,1 m (6,45 m)



Abb. 58: SG10 Abschnitt 7,2-8,4 m, Spannstaehlende bei 7,45 m (2,1 m)

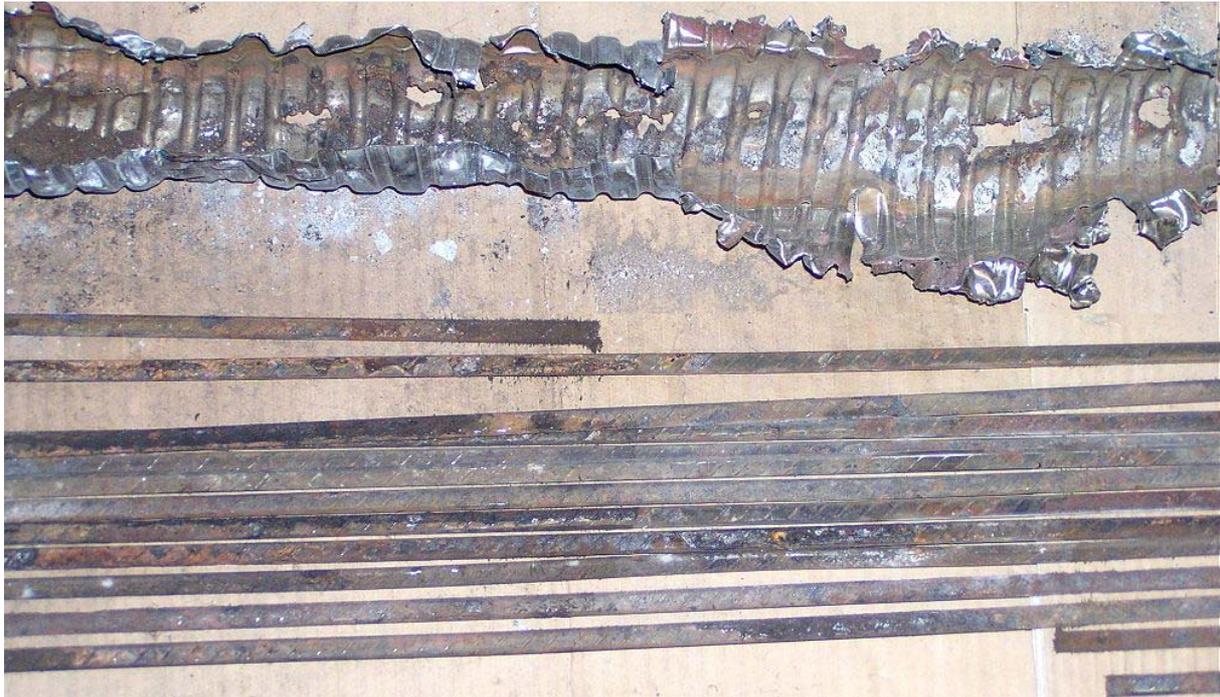


Abb. 59: SG10 Abschnitt 7,2-8,4 m, Spannstahlende bei 7,75 m (1,8 m),  
2x Spannstahlanfang bei 7,95 m (1,6 m)



Abb. 60: SG10 Abschnitt 8,4-9,55 m, Spannstahlanfang bei 8,7 m (0,85 m) und 2x bei 8,75 (0,8 m)



Abb. 61: SG10 Abschnitt 6,0-7,2 m, stark korrodierte Oberfläche, Bruchfläche nach Zugversuch (keine sichtbare Anrisslinie)

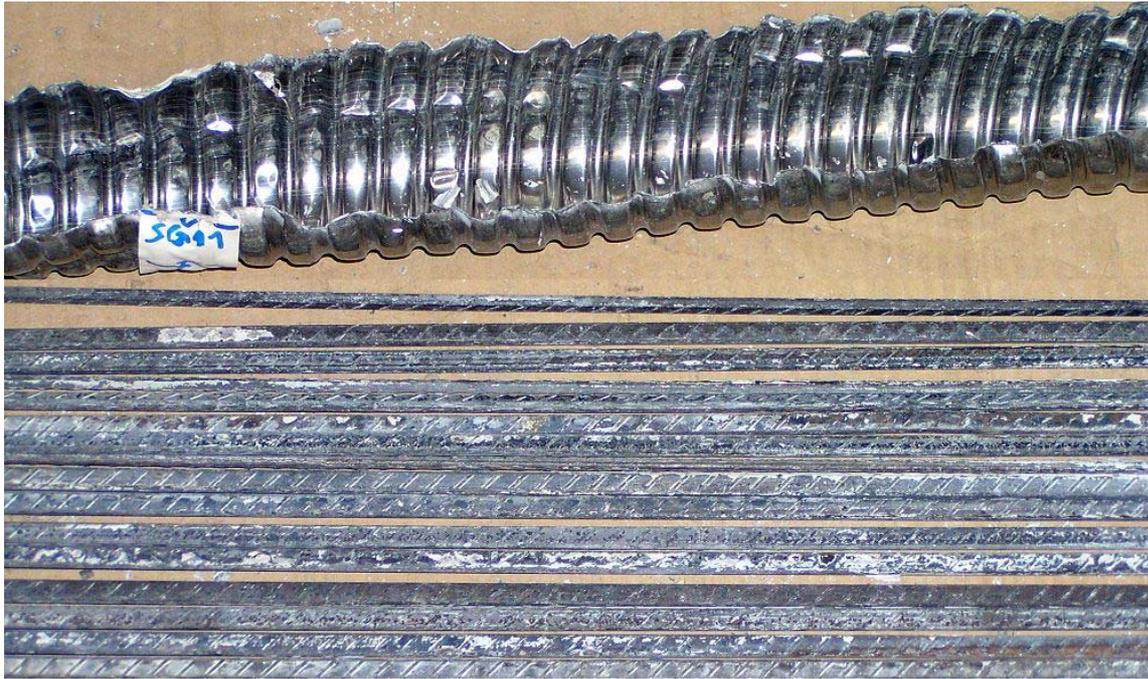


Abb. 62: SG11 Abschnitt 2,4-3,6 m,

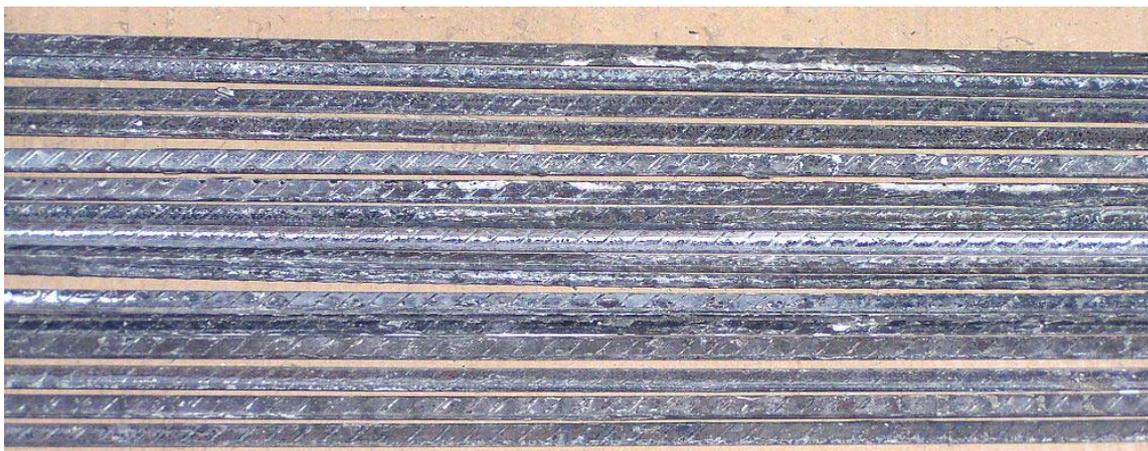


Abb. 63: SG11 Abschnitt 6,0-7,2 m)

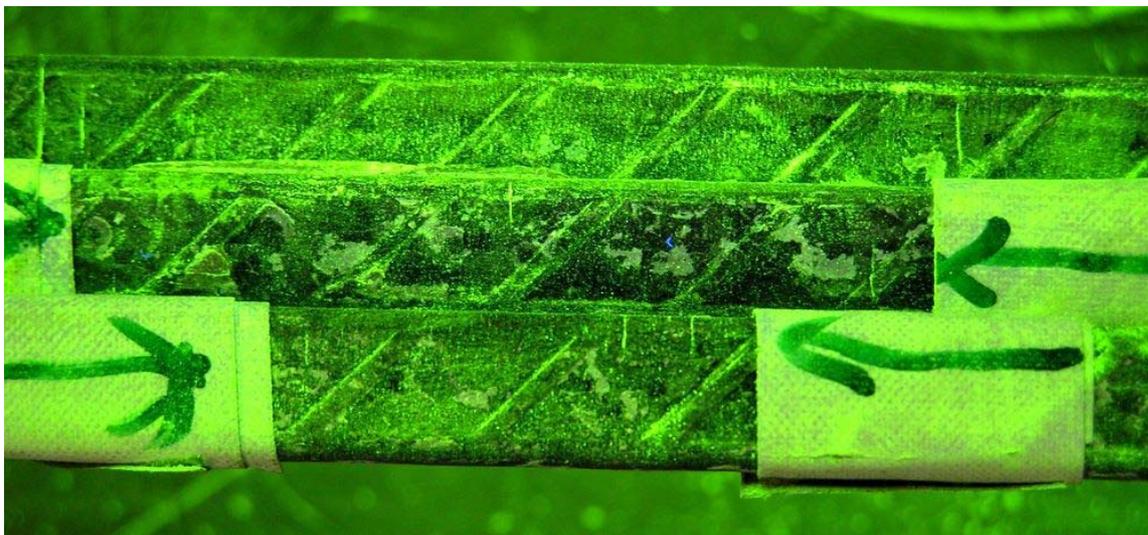


Abb. 64: SG11 Abschnitt 7,2-8,4 m, beispielhafte Anrissanzeigen an 3 Spannstäben



Abb. 65: SG11 Abschnitt außerhalb des Prüfbereiches, mehrere Spannstahlbrüche durch mechanische Einwirkung beim Zerstören der Trägersegmente



Abb. 66: SG11 Blick auf die Bruchflächen aus Abbildung 65 (roter Kreis)



Abb. 67: SG11 Abschnitt 6,0-7,2 m, nicht korrodierte Oberfläche, Bruchfläche nach Zugversuch (mit Anrisslinse)



Abb. 68: SG12 Abschnitt 1,2-2,4 m, Seitenansicht des angeschnittenen Bereiches



Abb. 69: SG12 Abschnitt 1,2-2,4 m, geöffnet

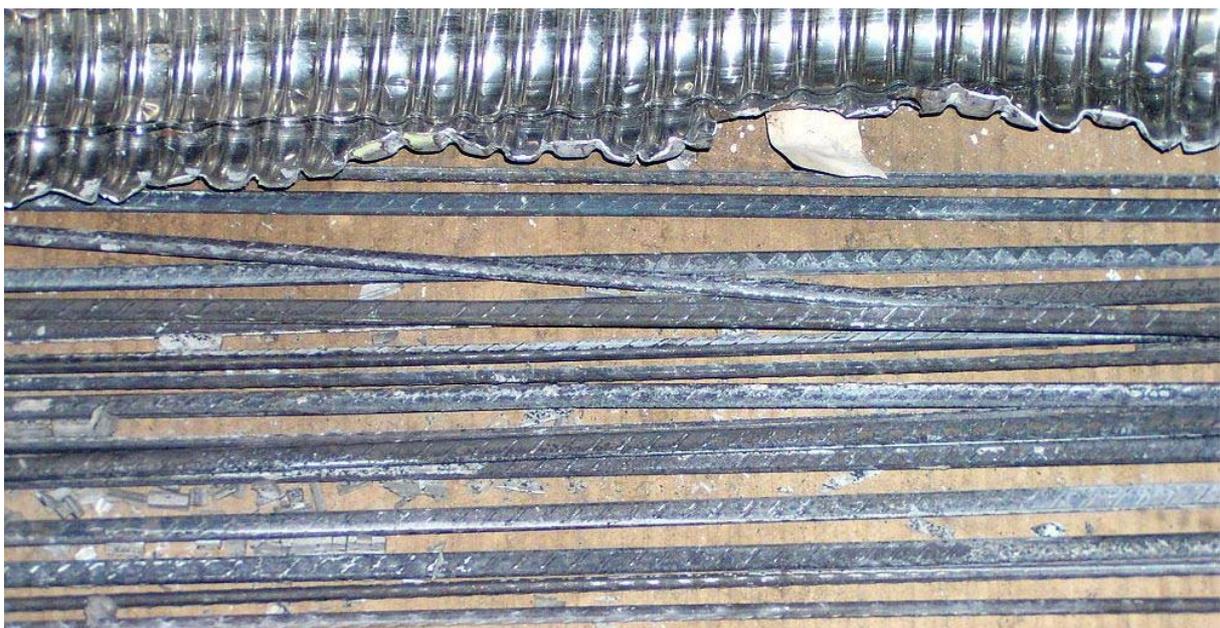


Abb. 70: SG12 Abschnitt 4,8-6,04 m, typischer Zustand in SG12

# I Ost

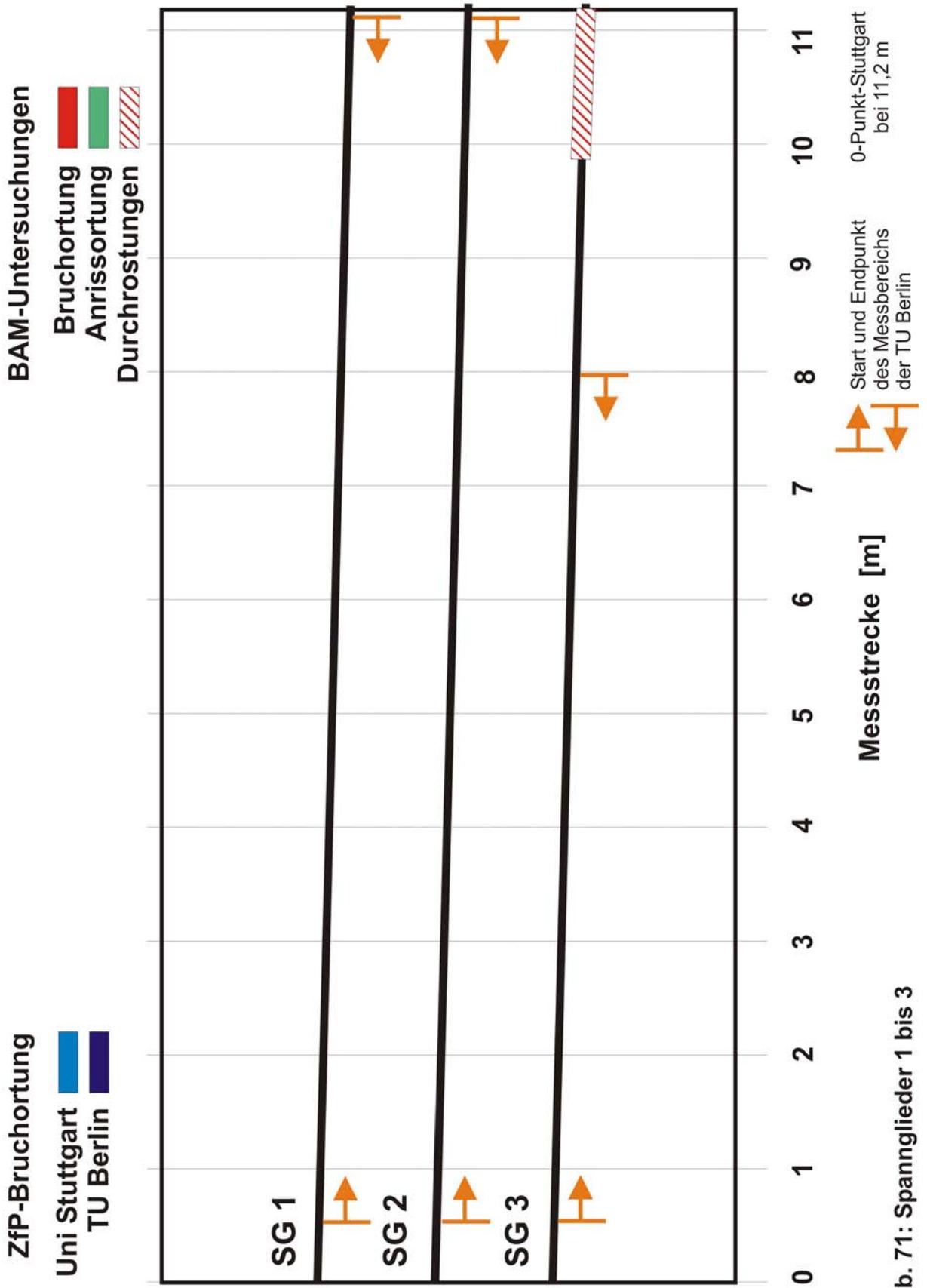


Abb. 71: Spannglieder 1 bis 3

# I West

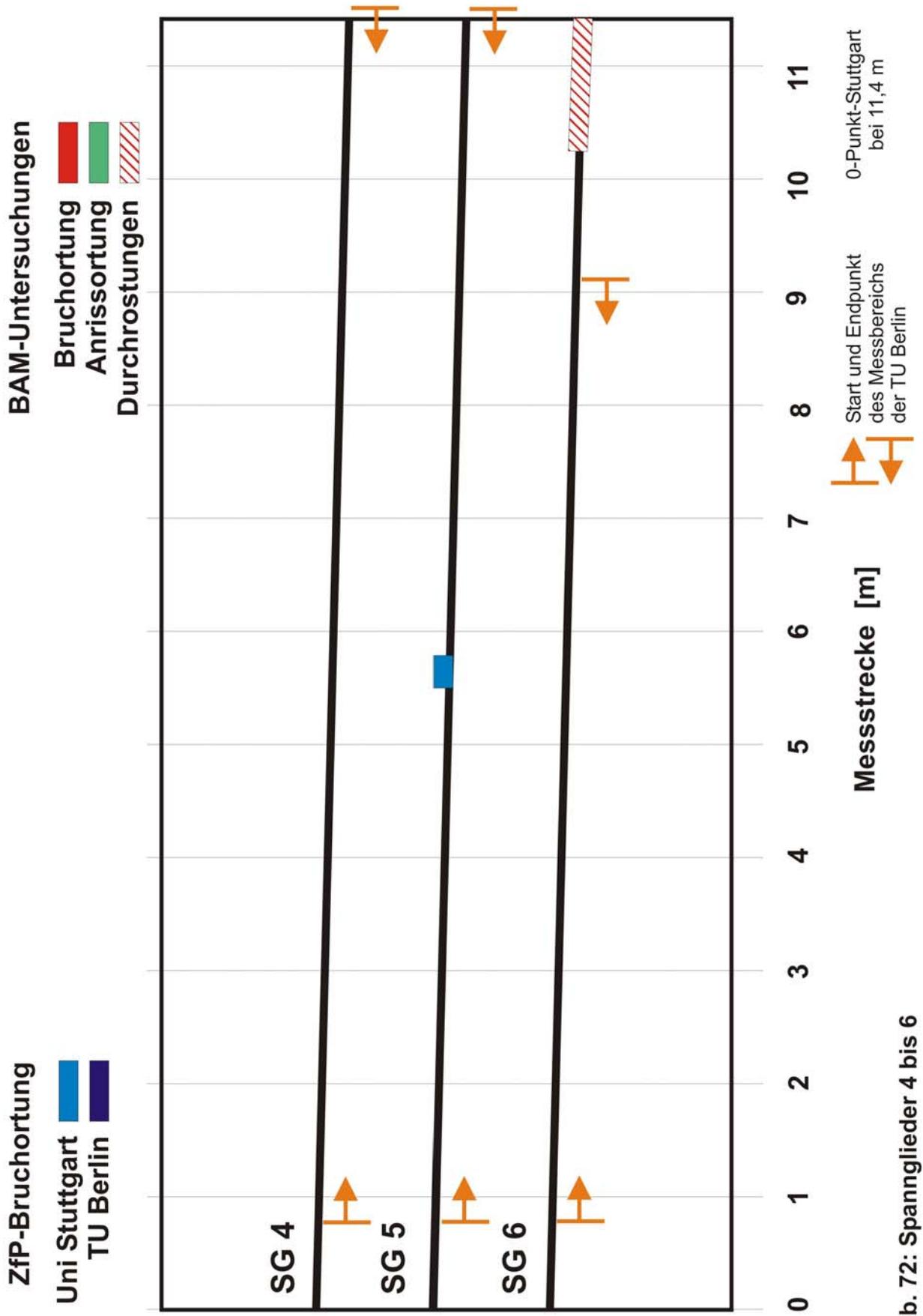


Abb. 72: Spannglieder 4 bis 6

# 2a Ost

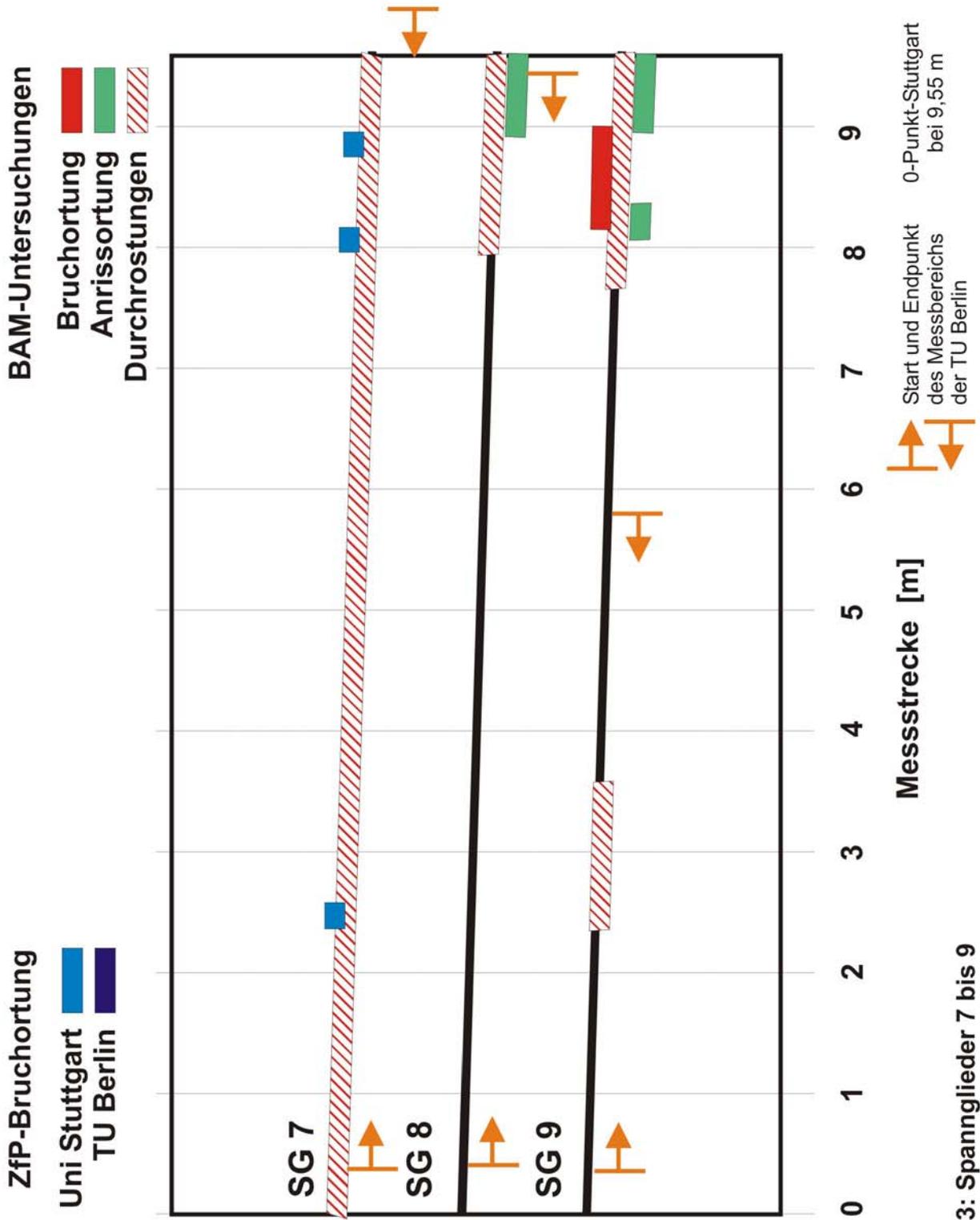


Abb. 73: Spannglieder 7 bis 9

# 2a West

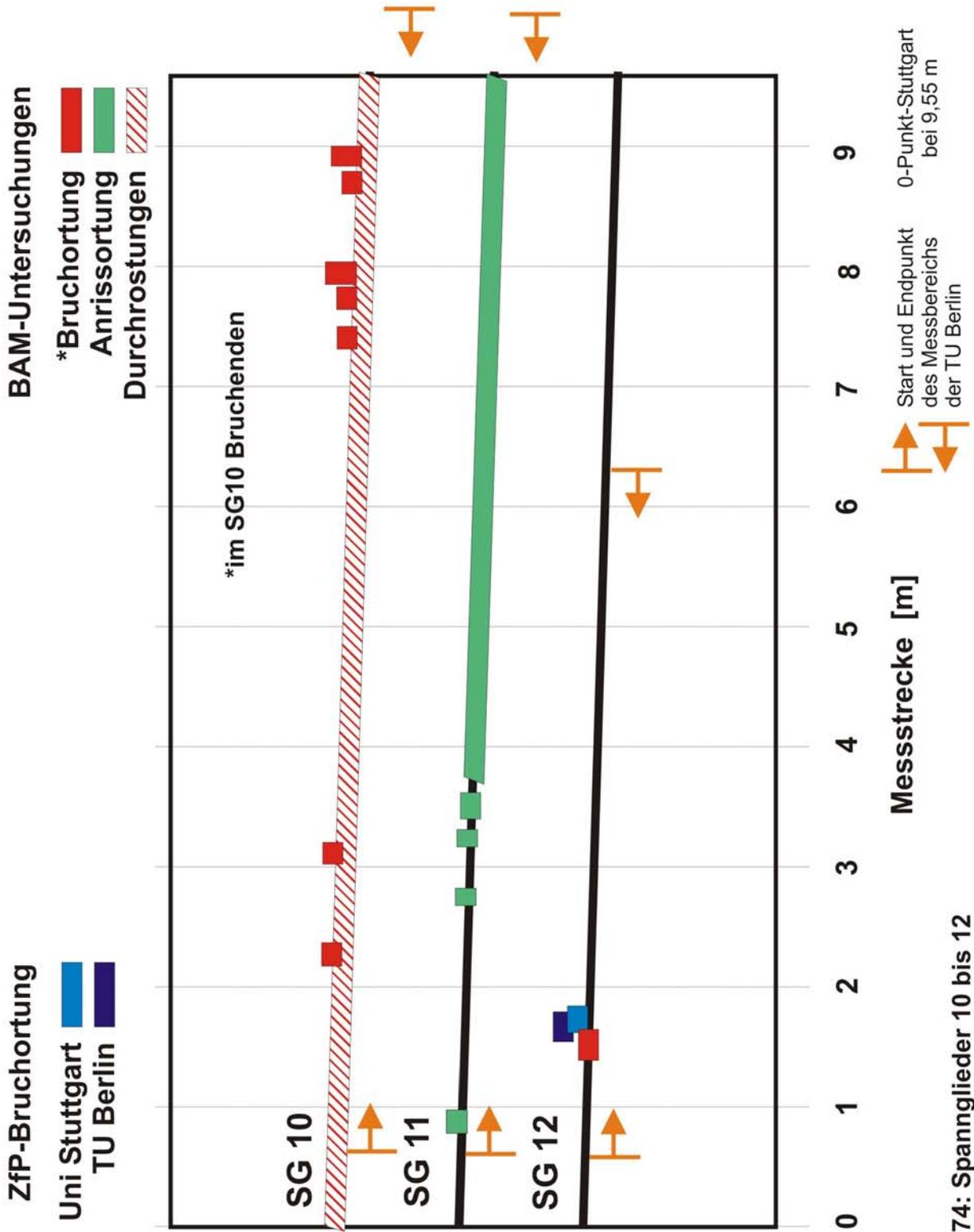


Abb. 74: Spannglieder 10 bis 12

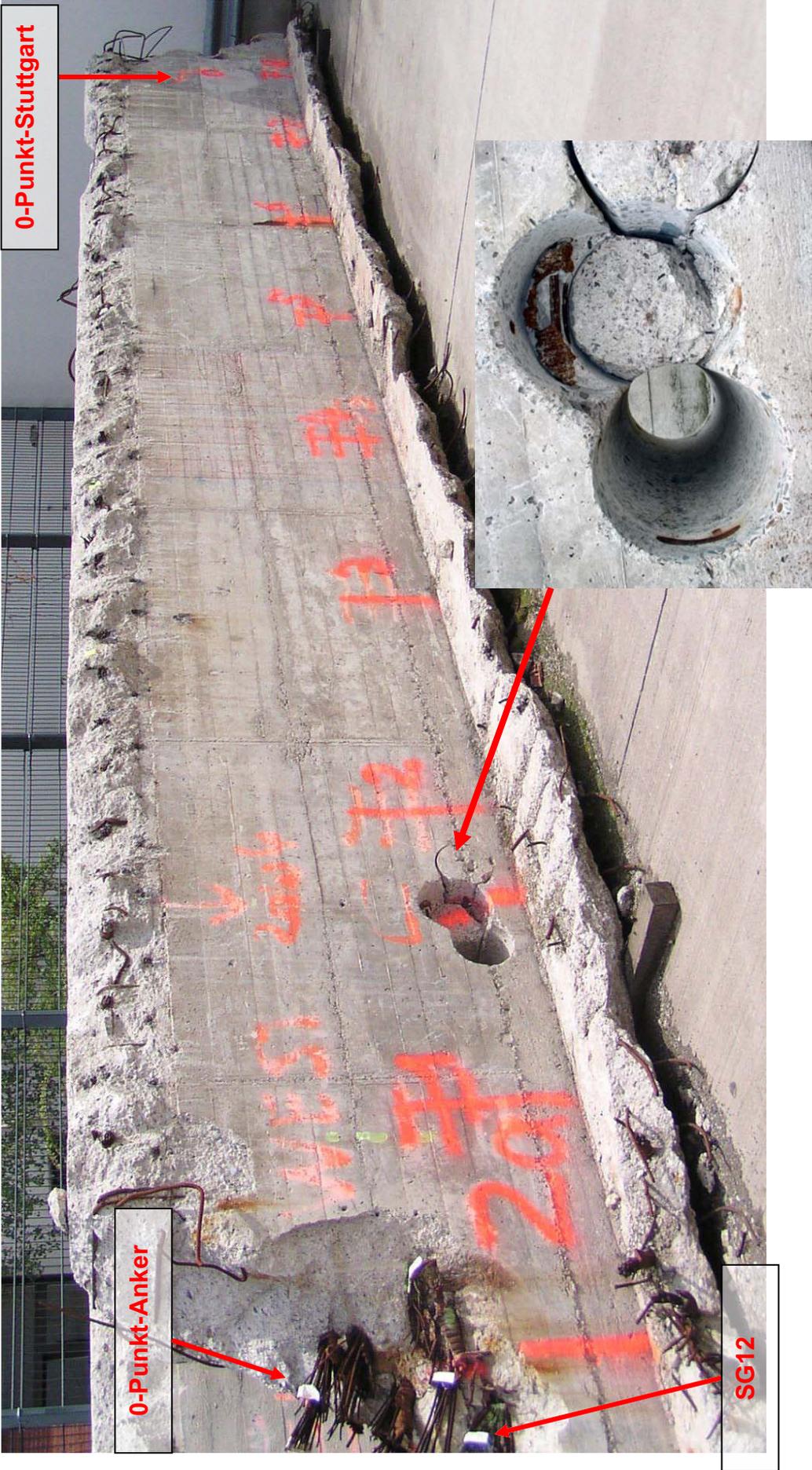
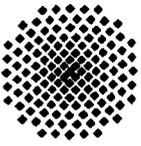


Abb. 75: 2a West

# **Anlage 1**



**Bundesanstalt für Materialforschung und -Prüfung (BAM)  
Magnetische Streufeldmessung an zwei ausgebauten Balken des  
Kreuzungsbauwerkes Hohenzollerndamm**

902 539 000

01.07.2003

Auftraggeber:

Bundesanstalt für Materialforschung

Unser Auftrag:

902 539 000

Datum:

01.07.2003

Der Bericht umfasst 13 Textseiten und 23 Beilagen

## **1 Vorgang**

Die MPA der Universität Stuttgart wurde von der BAM beauftragt, an zwei ausgebauten Spannbetonbalken des Kreuzungsbauwerkes Hohenzollerndamm, die auf dem Gelände der BAM lagerten, Untersuchungen mit der Methode der magnetischen Streufeldmessungen zur Ortung etwaiger Spannstahlbrüche vorzunehmen. Von der FMFA wurde das Forschungszentrum Jülich (FZJ) beauftragt, die Ortung der Spannglieder mit dem Hilfe des Impuls-Radars vorzunehmen. Diese Untersuchungen sowohl zur Ortung der Spannglieder, wie zur Untersuchung der Spannglieder mit der Methode der magnetischen Streufeldmessungen wurden vom 16-18.07.2002 vorgenommen. Dabei wurden die magnetischen Streufeldmessungen von der MPA durchgeführt, die Radarmessungen wurden von der Arbeitsgruppe Dr.Krause des FZJ vorgenommen.

## **2 Unterlagen**

Vom Auftraggeber wurde eine Kopie des Bewehrungsplanes 81/15b vom 07.05.1958 der Fa. Züblin zum 7.Bauabschnittes des Kreuzungsbauwerkes Hohenzollerndamm übergeben.

## **3 Beschreibung der Untersuchungen**

### **3.1 Grundlagen des Impuls-Radar-Verfahrens zur Bewehrungsortung**

Das Verfahren wird einem Merkblatt des FZJ erläutert. Bei den durchgeführten Messungen wurde eine bistatische 1 GHz-Sende-Empfangs-Antennen-Kombination des Geo-Radar-Systems RAMAC/GPR von MALÅ GeoScience verwendet.

### **3.2 Grundlagen des Verfahrens der magnetischen Streufeldmessung**

Mit der Methode der magnetischen Streufeldmessung werden Brüche der Spannbewehrung anhand magnetischer Anomalien (lokale Maxima der axialen Feldkomponente) des magnetischen Streufeld des Bauteils detektiert. Hierzu wird das Bauteil mit einem Prüfkopf, der längs des zu untersuchenden Spannglieds bewegt wird, untersucht. Die Stärke des Magnetfeldes des Jochmagneten wird durch die Vorgabe des Spulenstromes  $I$  gesteuert. Für die Untersuchung eines Abschnittes werden mehrere Messfahrten vorgenommen, bei denen der Spulenstrom  $I$  bei der Hin - und Rückfahrt des Prüfkopfes variiert

wird. Dadurch werden die Streufeldmessungen bei unterschiedlichen Magnetisierungszuständen der Bewehrung vorgenommen. Bedingt durch das hartmagnetische Verhalten der Spannglieder treten Brüche der Spannbewehrung erst bei höheren Feldstärken des erregenden Feldes zutage. Bruchsignale, die erst bei höheren Wertes des Spulenstromes  $I$  des Prüfkopfes sichtbar werden, zeigen somit Brüche der Spannbewehrung an.

Durch die stufenweise Absenkung des Spulenstromes bei den späteren Mess- und Magnetisierungsfahrten des Prüfkopfes wird erreicht, daß am Ende der Magnetisierung hauptsächlich Bruchsignale der Spannbewehrung wegen deren hartmagnetischen Verhaltens übrig bleiben, während die weichmagnetische schlaffen Bewehrung (insb. Querbügel) relativ stark entmagnetisiert sind und nur noch geringere Signalanteile ergeben.

Die Querbügel können außerdem ummagnetisiert werden, ohne daß die Magnetisierung der Längsbewehrung wesentlich beeinflußt wird. Damit kann der Signalanteil der Querbügel durch Summation zweier Restfeldsignale mit invertierter Magnetisierung der Querbügel unterdrückt werden.

Bei der Signalanalyse werden von den Messsignalen die Anteile der Querbügel numerisch herausgefiltert. Hierzu werden die Bügelorte aus Restfeldmessungen oder Messungen im aktiven Feld bestimmt und der Signalanteil der Querbügel mittels Best-Fit-Methode unter Verwendung eines Referenzsignals für Querbügel aus dem Meßsignal bestimmt. Das Referenzsignal kann entweder aus einer Messung des Streufeldes eines einzelnen Bügels oder analytisch erhalten werden. Der verbliebene, bügelbereinigte Signalanteil wird mittels der lokalen Korrelationsanalyse in jedem Längenintervall  $[x-dl, x+dl]$  auf Bruchsignale der Form  $p/z^3$  ( $p$  – Bruchamplitude,  $z$  als Abstand Sonde zur Bruchstelle) untersucht. Dabei wird die Bruch-Stärke  $p(x)$  und der Korrelationskoeffizient  $r(x)$  (d.h. die Ähnlichkeit) des Signals zu dem Bruchsignal bestimmt.

Die Korrelationslänge  $l$  wird zweckmäßigerweise zum Doppelten der Suchtiefe  $z$  gewählt. Bruchsignale werden dort angenommen, wo der Korrelationskoeffizient  $r(x) > 0.7$  ist. Eine eindeutige Beziehung zwischen den Amplituden der Bruchsignale und der tatsächlich Anzahl der gebrochenen Spannstähle im Querschnitt ist nicht möglich, da die Signalstärke  $p$  von Art, Abstand und Gesamtanzahl der Spannstähle sowie dem Anteil der schlaffen Bewehrung und im geringeren Maße von der Bruchweite abhängig ist. Mit der Zunahme der Anzahl der intakten Spanndrähte wird z.B. die Signalamplitude  $p$  eines Bruchquerschnittes abgeschwächt, da die intakten Spanndrähte im Bereich des Bruches infolge einer erhöh-

ten Magnetisierung die lokale Absenkung der Magnetisierung der gebrochenen Spanndrähte teilweise kompensieren. Für genauere Angaben bezüglich der Anzahl der gebrochenen Spanndrähte sind Kalibriermessungen an vergleichbaren Bewehrungsanordnungen erforderlich. Sofern dies nicht möglich ist, sind die bei Untersuchungen vor Ort gefundenen Stellen mit signifikanten Bruchsignalen als "Verdachtsstellen" zu betrachten, die zur Verifizierung der Spannstahlbrüchen geöffnet werden sollten.

Bei den Messungen wurde die von der MPA in Zusammenarbeit mit dem FZJ und der Siempelkamp Prüf-und Gutachter GmbH Dresden entwickelte Messanlage verwendet.

Der Prüfkopf enthält einen elektrisch betriebenen Jochmagneten (Jochlänge 45 cm) der 5 Magnetfeldsonden zur Messung der axialen Feldkomponente (parallel zur Fahrtrichtung) enthält, die im seitlichen Anstand von 4 cm angeordnet sind (Bild 2). Der Prüfkopf erreicht bei einem Spulenstrom  $I=8$  A in einem Abstand von 20 cm eine maximale Feldstärke von 46 A/cm und in einem Abstand von 30 cm eine Feldstärke von ca. 25 A/cm. Der Antrieb des Prüfkopfes wird mit einem Schrittmotor vorgenommen. Die Messung der Position des Prüfkopfes auf der Messschiene erfolgt mit einem optischen System.

Die Auswertung der Signale erfolgt rechnergestützt mit dem von der MPA im Rahmen eines Forschungsvorhabens in Zusammenarbeit mit dem FZJ entwickelten Auswerteprogramms "Analysez". Das Verfahren wird im Beiblatt "Magnetische Streufeldmessung" anhand eines einfachen Beispiels erläutert.

### **3.4 Durchführung und Umfang der Messungen**

#### **3.4.1 Radarmessungen zur Bewehrungsortung**

Die Trägermitte (Tiefpunkt der Spannglieder) wurde mit  $x=0$  festgelegt. Die Oberkante der Voute wurde mit der Trägerhöhe  $y =0$  angesetzt.

Bei den Untersuchungen wurde zunächst die Ortung der Spannglieder mit dem Impuls-Radar vorgenommen. Dazu wurden auf den Seitenflächen der Balken bis zu 8 vertikale Scans, beginnend in einer Balkenhöhe  $y=100$  cm bis zum Aufsetzen des Radargerätes auf der Voute, im Abstand von je 125 cm, beginnend bei  $x=0$  aufgenommen (s. Bild 7). Die Radarmessungen wurden vor Ort ausgewertet und die gefundenen Spannglieder auf der Oberfläche der Balken markiert (s. Bild 4). Zusätzlich zu den Messungen zur Ortung der

Spannglieder wurden Radar-Messungen zur Ortung der Querbewehrung vorgenommen. Hierzu wurden Längsscans bei jedem Balken bei  $y=80$  cm Balkenhöhe aufgenommen.

### 3.4.2 Magnetischen Streufeldmessungen

Bedingt durch die Messschienenlänge von ca. 5 m wurden die Untersuchungen in mehreren Abschnitten vorgenommen. Die Messschiene wurde auf Ziegelsteinen aufgelegt (s. Bild 4). Bei der Positionierung der Messschiene wurden die Markierungen der Spannglieder auf der Seitenfläche der Balken berücksichtigt. Dabei wurde versucht, die Messschiene so zu positionieren, dass der Prüfkopf mittig über dem Spannglied 2 angeordnet war..

Bedingt durch die Höhe der Messschiene und die niedrige Auflagerhöhe der Balken war die Messung des unteren Spanngliedes 3 in der Tieflage nicht möglich. Die Lage des Prüfkopfes an der Seitenfläche des Balkens ist in Bild 8 schematisch dargestellt. Die Messabschnitte sind in der nachfolgenden Tabelle zusammengefasst:

Balken	Datei	$x_0$ [cm]	$y_0$ [cm]	$y_1$ [cm]
IIA, Seite west	2aw1xy.mag	10.5	20	20
IIA, Seite west	2aw2xy.mag	10.5	20	20
IIA, Seite west	2aw3xy.mag	500	20	40
IIA, Seite west	2aw4xy.mag	375	20	25
IIA, Seite ost	2ao1xy.mag	-44	20	20
IIA, Seite ost	2ao3xy.mag	345	20	20
IIA, Seite ost	2ao4xy.mag	345	20	40
IA, Seite west	1aw1xy.mag	452	20	40
IA, Seite west	1aw2xy.mag	452	20	20
IA, Seite west	1aw3xy.mag	70	20	20
IA, Seite ost	1ao1xy.mag	62	20	20
IA, Seite ost	1ao2xy.mag	62	20	40
IA, Seite ost	1ao3xy.mag	558	33	56
IA, Seite ost	1ao4xy.mag	558	23	53
IA, Seite ost	1ao5xy.mag	558	22	44

xy=01,...,20

Tabelle 1: Zusammenfassung der Messabschnitte

Für die Untersuchungen wurden folgende in Tab. 1 dargestellten Magnetisierungsabfolgen verwendet:

Messfahrt Nr.	I/ A (Hinfahrt)	I/ A (Rückfahrt)	Messfahrt Nr.	I/ A (Hinfahrt)	I/ A (Rückfahrt)
1	0	0	11	2	0
2	2	0	12	1	0
3	4	0	13	0	1
4	6	0	14	0	0
5	8	0	15	0.5	0
6	0	0	16	0	0.5
7	8	8	17	0	0
8	0	0	18	0.2	0
9	6	0	19	0	0.2
10	4	0	20	0.0	0.0

Tab. 2: Magnetisierungsabfolge

Die Messung erfolgt immer bei der Hinfahrt des Prüfkopfes. Bei den Messfahrten 1-5,7,9-12,15 und 18 werden Messungen im aktiven Feld (Messung während des Magnetisierens) vorgenommen. Restfeldmessungen werden bei den Messfahrten 6,8,13-14, 16-17 und 19-20 vorgenommen. Mit den Magnetisierungsfahrten 1-5 wird die Bewehrung schrittweise aufmagnetisiert. Bei den nachfolgenden Magnetisierungsfahrten wird die Magnetisierungsfeldstärke abgesenkt, um die schlaife Bewehrung zumindestens teilweise abzumagnetisieren, wobei gleichzeitig die Magnetisierungsverteilung der hartmagnetischen Spannbewehrung homogenisiert wird, und somit eine Bruchdetektion erleichtert wird.

Bei den nachfolgenden Restfeldmessungen (Messfahrten 8,14,17 und 20) haben die Querbügel zumindest teilweise eine inverse Magnetisierung in Vergleich mit den Messfahrten 6,13,16 und 19.

## 4 Ergebnisse der Messungen

### 4.1 Ortung der Spannbewehrung mit Radar

Bei den vertikalen Scans zur Ortung der Spannbewehrung wurden folgende Ergebnisse erhalten:

Scan#	Name	Position x [mm]	Offset [Pixel]	Spannglied 1		Spannglied 2		Spannglied 3	
				y [mm]	z [mm]	y [mm]	z [mm]	y [mm]	z [mm]
1	Prof5	0	85	184	111				
2	Prof6	1250	85	217	76	120	76		
3	Prof7	2500	85	260	61	160	66		
4	Prof8	3750	89	288	83	197	78		
5	Prof9	5000	95	382	41	275	46	153	41
6	Prof10	6250	95	385	91	290	86	183	111
7	Prof11	7500	105	490	81	395	76	294	76
8	Prof12	8750	105	500	91	402	96	310	101

Tabelle 3a: Ortung der Spannglieder, Balken 2A, Westseite

Scan#	Name	Position x [mm]	Offset [Pixel]	Spannglied 1		Spannglied 2		Spannglied 3	
				y [mm]	z [mm]	y [mm]	z [mm]	y [mm]	z [mm]
11	Prof22	0	45	186	30				
12	Prof21	1250	45	239	45				
13	Prof20	2500	45	319	90	207	75		
14	Prof19	3750	45	325	65	206	65		
15	Prof18	5000	45	400	65	299	65	165	80
16	Prof17	6250	45	439	80	342	75	235	80
17	Prof16	7500	45	464	80	348	75	288	90
18	Prof15	8750	45	526	70	434	65	348	65

Tabelle 3b: Ortung der Spannglieder, Balken 2A, Ostseite

Scan#	Name	Position x [mm]	Offset [Pixel]	Spannglied 1		Spannglied 2		Spannglied 3	
				y [mm]	z [mm]	y [mm]	z [mm]	y [mm]	z [mm]
31	Prof32	1250	45	189	60				
32	Prof31	2500	45	297	60	185	60		
33	Prof30	3750	45	328		219		107	
34	Prof29	5000	45	383		287		176	
35	Prof28	6250	45	442		334		216	
36	Prof27	7500	45	543		434		335	
37	Prof26	8750	45	599		484		364	
38	Prof25	10000	45	755	90	647	65	551	

Tabelle 3c: Ortung der Spannglieder, Balken 1A, Westseite

Scan#	Name	Position x [mm]	Offset [Pixel]	Spannglied 1		Spannglied 2		Spannglied 3	
				y [mm]	z [mm]	y [mm]	z [mm]	y [mm]	z [mm]
21	Prof41	1250	45	232	75				
22	Prof40	2500	45	272	70	172	90		
23	Prof39	3750	45	342	65	235	65		
24	Prof38	5000	45	409	90	323	95	235	85
25	Prof37	6250	45	480	75	408	75	319	75
26	Prof36	7500	45	574	70	478	55	378	55
27	Prof35	8750	45	637	65	516	55	434	65
28	Prof34	10000	45	764	105	663	85	553	85

Tabelle 3d: Ortung der Spannglieder, Balken IA, Ostseite

Die gefundenen Spannglieder in den Messprofilen bei x=0 - 1000 cm wurden an der Balkenseitenfläche angezeichnet, und standen für die Positionierung der Messschiene zur Verfügung.

Aus den gefundenen Spanngliedorten wurde folgende Näherungsgleichungen zur Bestimmung der Spanngliedlagen aufgestellt.

$$y_{isn}(x) = y_{0isn} + c_{isn}x \quad (1)$$

Die Indizes bedeuten:

i - Bezeichnung des Balkens (i=IA, IIA)

s - Balkenseite ost (o) west (w)

n=Spanngliednummer n=1-3

Aus den Radarmessungen wurden folgende Parameter ermittelt:

$y_{0IIAw1}$	$c_{IIAw1}$	$y_{0IIAw2}$	$c_{IIAw2}$	$y_{0IIAw3}$	$c_{IIAw3}$
16,97	0,0385	6,14	0,0403	-8,51	0,04656
$y_{0IIAo1}$	$c_{IIAo1}$	$y_{0IIAo2}$	$c_{IIAo2}$	$y_{0IIAo3}$	$c_{IIAo3}$
19,81	0,0037523	9,98	0,036662	-7,21	0,04816
$y_{0IAw1}$	$c_{IAw1}$	$y_{0IAw2}$	$c_{IAw2}$	$y_{0IAw3}$	$c_{IAw3}$
11,11	0,05882	0,161	0,058942	-16,46	0,066354
$y_{0IAo1}$	$c_{IAo1}$	$y_{0IAo2}$	$c_{IAo2}$	$y_{0IAo3}$	$c_{IAo3}$
12,54	0,060152	0,82	0,062571	-6,68	0,060008

Tabelle 4: Faktoren und Konstanten zur Lagebeschreibung der georteten Spannglieder

Aus dem o.g. Bewehrungsplan wurden folgende Beziehungen zur Beschreibungen der Solllagen der Spannglieder 1 - 3 ermittelt:

Spannglied 1:

$$y(x) = 18,1 + 0,0056 \cdot x + 4,846 \cdot 10^{-5} \cdot x^2 \quad (2a)$$

Spannglied 2:

$$y(x) = 8,1 + 0,00538 \cdot x + 4,899 \cdot 10^{-5} \cdot x^2 \quad (2b)$$

Spannglied 3:

$$y(x) = -1,89 + 0,00564 \cdot x + 4,844 \cdot 10^{-5} \cdot x^2 \quad (2c)$$

Im Bereich von  $x=0$  bis ca. 1000 cm betragen die Abweichungen zwischen der Solllage und der mit dem Radar festgestellten Spanngliedlagen ca. 5 cm. Die Ortungsmessungen zur Bestimmung der Lage der Querbügel wurden bei  $y=80$  cm vorgenommen. Dabei wurden jedoch die zusätzlichen Querbügel im Bereich der Spannglieder, die bis zu einer Balkenhöhe von ca. 60 cm reichten jedoch nicht erfasst.

## 4.2 Ergebnisse der magnetische Streufeldmessungen

### 4.2.1 Messsignale

An den allen Messabschnitten (s.Tab. 1) wurden Messfahrten entsprechend der in Tab. 2 gegebenen Magnetisierungsabfolge vorgenommen. Die Messlänge betrug dabei je 500 cm. Die magnetischen Streufelder der 5 Sonden wurden zunächst mit einer örtlichen Auflösung von 2 mm, d. h. 2500 Messdaten pro Sonde und Scan, erfasst. Nach den Messungen wurden die Daten für die weitere Auswertung um den Faktor 5 reduziert (500 Messwerte auf 5 m pro Sonde und Scan). Bei der Datenreduzierung wird ein gleitender Mittelwert verwendet, so dass die Daten noch eine Glättung (Tiefpassfilterung) erfahren.

In den Bildern 9 - 28 sind als Beispiel alle Messungen des Messabschnittes 2aw4 dargestellt. Die Maßeinheit der magnetischen Streufelder ist A/cm. Aus den Streufeldsignalen bei Messung im aktiven Feld wird die Lage der Querbügel durch lokale Feldmaxima ersichtlich. Die Querbügel ergeben die deutlichen Maxima, die Steckbügel sind bei den Messungen im aktiven Feld durch kleinere Maxima zu erkennen (s. Bild 9). Im Restfeldsignal (s. Bilder 14 und 16) sind die Bügel anhand der Feldgradienten zu erkennen.

Aus den Messsignalen wird die Wirkung der Abmagnetisierung der schlaffen Bewehrung ab der Messfahrt 09 sichtbar. Zur Überprüfung der Reproduzierbarkeit der Messungen dienen die an den identischen Messabschnitten 2aw1 und 2aw2 erhaltenen Ergebnisse. Die Reproduzierbarkeit des Verfahrens kann aus der guten Übereinstimmung der Messsignale nach der vollständigen Magnetisierungsabfolge ersehen werden (s. Bild 37).

#### 4.2.2 Auswertung der Messsignale

Die Signalauswertung wurde wie folgt vorgenommen:

1. Ortung der Querbügel (aus der Messung 10)
2. Herausfiltern der Bügelsignalanteile aus den Restfeldmessungen 19 und 20
3. Addition der beiden bügelgefilterten Restfeldsignale 19 und 20
4. Lokale Korrelation des Summensignals mit einem typischen Bruchsignal zur Bestimmung der Bruchamplituden bei zwei unterschiedlichen Abständen Prüfkopf-Spannglied von 10 und 15 cm.
5. Als Kriterium für Bruchsignale wird festgelegt, dass die Bruchamplituden von mindestens drei Sonden an gleicher Stelle der Messlänge eine Bruchanzeige mit einem Korrelationskoeffizient  $>0,7$  haben.

Die Ortung der Querbügel wurde bei allen Messabschnitten aus dem Signal der Messfahrt 10 (Messung im aktiven Feld) vorgenommen, da die Bügelortung aus den Restfeldsignalen (Messfahrten 06 bzw. 08) wegen teilweiser geringer remanenter aufgrund eines recht weichmagnetischen Verhaltens der Bügel nicht zuverlässig war. Zur Ortung der Bügel wurden deshalb mit dem Auswerteprogramm die lokalen Maxima des Messsignal 10 bestimmt und als Bügelorte festgelegt (s. Bilder 29, 30). Auf die Nachbearbeitung der Bestimmung der Bügelorte, d. h. die nachträgliche Einarbeitung von Bügelorten, die mit der automatisierten Ortung nicht erhalten wurden, wurde wegen des hohen Auswerteaufwandes verzichtet.

Die Berechnung der lokalen Korrelation mit einem Bruchsignal wurde für die beiden Abstände  $z=10$  (Korrelationslänge  $l=20$  cm) und  $15$  cm ( $l=30$  cm) vorgenommen. Bei Annahme eines größeren Abstandes Prüfkopf-Spannglied wird berücksichtigt, dass die Magneti-

sierungsstörung von teilweise abgeschirmten Spannstahlbrüchen über einen längeren Bereich verteilt ist und damit das Bruchsignal "verbreitert" wird.

In den Bildern 31 - 35 ist die Auswertung am Beispiel der Messungen zum Messabschnitt 2aw4 dargestellt: Es wird bei  $z=10$  cm ein Bruchsignal bei ca.  $x = 412$  cm mit einer Stärke von ca.  $p=850$   $\text{Acm}^2$  gefunden. Bei einem rechnerischem Abstand des Prüfkopfes  $z=15$  cm und einer Korrelationslänge von 30 cm wird eine Signalstärke von  $p= 4500$   $\text{Acm}^2$  erhalten. Bei der Auswertung der Restfeldsignale wird ca. 50 cm im Anfangs- und Endbereich der Messstrecke keine eindeutige Bruchdetektion erhalten, da in diesem Bereich das Signal hauptsächlich durch das Ein- bzw. Ausschalten des Jochmagneten des Prüfkopfes beeinflusst ist. Die gefundenen Bruchsignale sind in Tabelle 5 zusammengestellt:

Messung	z=10 cm, l=20 cm			z=15 cm, l=30 cm		
	x [cm] <sup>1)</sup>	p [ $\text{Acm}^2$ ]	r [-] >	x	p [ $\text{Acm}^2$ ]	r [-]
2aw1	85	350 (S5) <sup>2)</sup>	0,7	-	-	-
	300	150 (S1)	0,7	-	-	-
2aw2	85	400 (S5)	0,7	-	-	-
	300	160 (S1)	0,7	-	-	-
2aw3	100	280 (S1)	0,7	-	-	-
	275	140 (S3)	0,7	-	-	-
2aw4	95	250 (S1)	0,7	-	-	-
	150	120 (S1)	0,7	-	-	-
	-	-	-	280	250 (S3)	0,7
	413	850 (S3)	0,8	413	4500 (S3)	0,9
2ao1	120	170 (S2)	0,8	120	580 (S3)	0,8
	200	130 (S1)	0,9	200	540 (S1)	0,9
2ao3	260	90 (S5)	0,7	-	-	-
	370	80 (S1)	0,7	370	570 (S1)	0,7
2ao4	-	-	-	-	-	-
1aw1	120	210 (S2)	0,9	120	750 (S4)	0,8
	250	110 (S3)	0,7	-	-	-
1aw2	145	160 (S1)	0,7	-	-	-
	240	80 (S5)	0,7	-	-	-
1aw3	220	80 (S4)	0,7	-	-	-
	360	90 (S1)	0,8	360	520 (S1)	0,7
1ao1	-	-	-	180	900 (S4)	0,7
1ao2	-	-	-	120	540 (S4)	0,7
1ao3	335	250 (S1)	0,7	-	-	-
1ao4	335	310 (S1)	0,7	-	-	-
1ao5	-	-	-	-	-	-

1) in Bezug auf Start des Messabschnittes 2) Sonde mit maximaler Bruchstärke

Tab. 5: Zusammenstellung der aus der Auswertung der Restfeldmessung gefundenen Stellen mit Bruchsignalen

Zur Kontrolle der Ergebnisse wurde die Auswertung ebenfalls mit den Restfeldsignalen der Messfahrten 13,14 und 16,17 vorgenommen. Dabei zeigte es sich, dass man auch bei Auswertung dieser Restfeldsignale ähnliche Bruchsignale wie bei der Auswertung der Restfeldmessungen 19 und 20 erhält.

Zusätzlich zur Auswertung der Restfeldsignale wurde noch bei allen Messabschnitten ein Vergleich der Messfahrten 10 und 03 (beides Messungen bei  $I=4$  A Spulenstrom) auf Veränderungen der Signalform vor und nach der maximalen Bauteilmagnetisierung vorgenommen. Im Differenzsignal der beiden Messungen 10 und 03 bei Abschnitt 2aw4 heben sich die Bügelsignale auf und es wird ein Bruchsignal bei  $x = 413$  cm (s. Bild 38) deutlich sichtbar. Dieses Bruchsignal hat eine Signalstärke von ca.  $800 \text{ Acm}^2$  (s. Bild 39). Im Abschnitt 2ao3 zeigt die Differenz der Messsignale 10 und 3 ebenfalls eine Auffälligkeit bei ca.  $x = 350$  cm (Bild 40). Bei den Messabschnitten 2aw3, 1aw1, 1aw2, 1aw3 und 1ao3 hoben sich im Differenzsignal der Messungen 10 und 3 die Querbügelanteile nicht gegenseitig auf, so dass eine Bewertung des Differenzsignals auf etwaige Bruchsignale der Längsbewehrung somit nicht möglich war. Bei den übrigen Messabschnitten waren im Differenzsignal der Messungen 10 und 3 keine Auffälligkeiten festzustellen.

#### **4.3 Indikationen für Spannstahlbrüche**

Bei der Bewertung von Bruchsignalen sind folgende Fragen zu klären:

- Handelt es sich bei Bruchsignalen um die Anzeige von Spannstahlbrüchen oder nur um einen Artefakt z.B. infolge einer unzureichenden Unterdrückung von Signalanteilen der schlaffen Bewehrung?
- Wie ist der Zusammenhang zwischen der Bruchamplituden und der Anzahl der gebrochenen Spannstähle im Querschnitt?

Zur Lösung dieser Fragen sind Kalibrierversuche an vergleichbaren Bewehrungsanordnungen erforderlich. Im vorliegenden Fall war dies nicht möglich, da für ein Nachstellen der Bewehrungsanordnungen kein entsprechender Spannstahl zur Verfügung stand. Deshalb wurden Ergebnisse von Versuchen an ähnlichen Anordnungen zur Bewertung der obigen Signale herangezogen (s. Bild 41). Bei den Dummies wurde Spannstahl aus ver-

gütetem Kruppstahl 1420/1570 Durchmesser 8 mm (Querschnittsfläche 50 mm<sup>2</sup>) verwendet. Die Dummies hatten kein Hüllrohr. Der Abstand der Querbügel (Durchmesser 10 mm) untereinander betrug 25 cm. Die "Brüche" wurden im unteren Dummy 1 durch getrennte Spannstähle, die einen Abstand von 1 mm hatten simuliert. Dabei ergaben sich folgende Ergebnisse:

Anzahl der Brüche	Auswertung mit:			
	z=10 cm , l=20 cm		z=15 cm, l= 30 cm	
	p [Acm <sup>2</sup> )	r [-]>	p [Acm <sup>2</sup> )	r [-]>
0	140	0,8	300	0,7
1	120	0,7	700	0,8
2	450	0,9	1800	0,9
4	1200	0,9	4200	0,9
8	2000	0,9	8000	0,9
16	4000	0,9	12000	0,9

Tab.6: Bruchamplituden ermittelt aus Laborversuchen

Es wird ersichtlich, dass die Nachweisgrenze von Brüchen bei den Laborversuchen bei Wahl der Auswerteparameter z=15 cm und l=30 cm bei 1 Bruch im Querschnitt liegt. Bei Berücksichtigung der Laborversuche wurden die Grenzen für ein Bruchindikationen wie folgt festgelegt:

Auswertung mit z= 10 cm, l= 20 cm		Auswertung mit z=15 cm , l= 30 cm	
p>120	r>0,8	p>300	r>0,8

Tab. 7: Kritische Parameter für Spannstahlbruchindikationen

Das Bruchsignal im Messabschnitt 2aw4 ist auf eine zumindest teilweise Durchtrennung des Spanngliedes 3 verursacht. Allerdings konnte von uns vor Ort nicht ermittelt werden, wie viele Spannglieder dabei durchtrennt wurden. Deshalb wird die Bewertung der Anzahl gebrochener Stähle unter Berücksichtigung von Tab. 6 vorgenommen.

Die Bedingungen nach Tab. 7 werden bei folgenden Bruchsignalen erfüllt (vgl.Tab. 5):

Messabschnitt 2aw4:  $x = 787$  cm, vermutlich 4-8 Brüche Spannglied 3

Messabschnitt 2ao1:  $x = 76$  cm,  $x = 156$  cm, vermutlich 1-2 Brüche Spannglied 1

Messabschnitt 1aw1:  $x = 572$  cm, vermutlich 2- 4 Brüche Spannglied 2

Messabschnitt 2ao3:  $x = 715$  cm vermutlich 1-2 Brüche Spannglied 1 (allerdings mit sehr geringer Wahrscheinlichkeit),

Die Angaben für  $x$  erfolgen in Bezug auf die Balkenmitte.

## 5 Zusammenfassung

Es wurden unter Berücksichtigung von Labormessungen insgesamt 3 Stellen gefunden, an denen Spannstahlbrüche zu vermuten sind. Dabei war eine Stelle (Abschnitt 2aw4) durch Anbohren der Spannglieder zu erklären.

Es ist darauf hinzuweisen, dass die Nachweisgrenze des Verfahrens (unter Laborbedingungen bei vergleichbarer Spannbewehrung) bei Einzelbruch in einem Spannglied, bestehend aus 16 Spannstählen, liegt. Allerdings ist unter Praxisbedingungen (dichtere schlaffe Bewehrung, unregelmäßiger Abstand der Bügel, Ungenauigkeiten bei der Spannglied- und Querbügelortung) zu erwarten, dass die Nachweisgrenzen erst bei einer größeren Anzahl von gebrochenen Spannstählen im Querschnitt liegt. Das Verfahren dient bei komplizierteren Spannbetonbauteilen in erster Linie dazu, größere Störungen der Spannbewehrung, die eine erhebliche Abminderung der Standsicherheit bewirken, festzustellen um sofortige Massnahmen zur Sicherung des Bauteils einzuleiten. Der Nachweis von Defekten auf der Ebene von Anrissen, sowie räumlich versetzten Einzelbrüchen erscheint bei komplizierteren Bauteilen nicht möglich.



Dr.-Ing. Sawade  
(Referatsleiter)



Dr.-Ing.habil. Schad  
(Fachbereichsleiter)

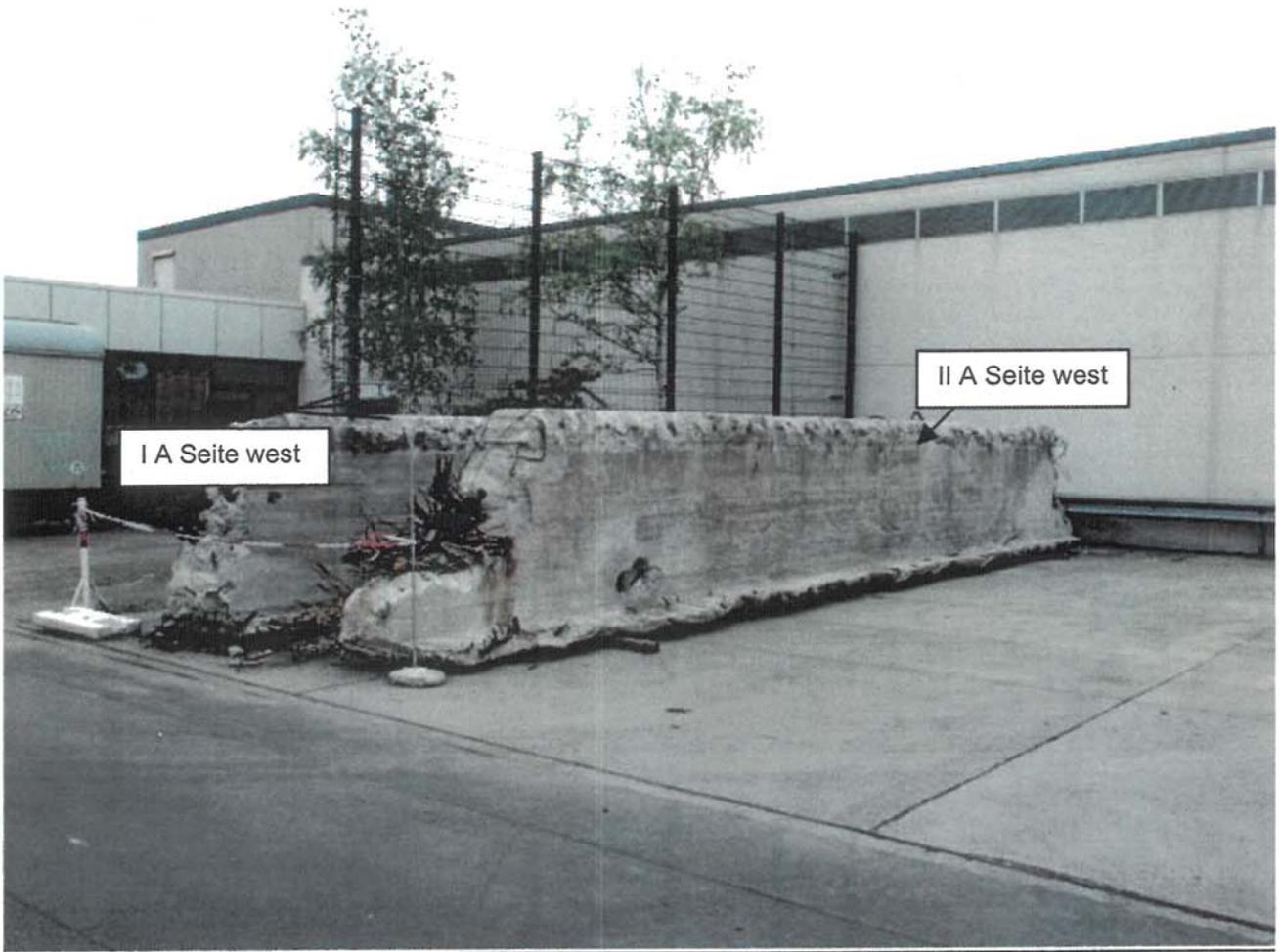


Bild 1: Ansicht der Balken

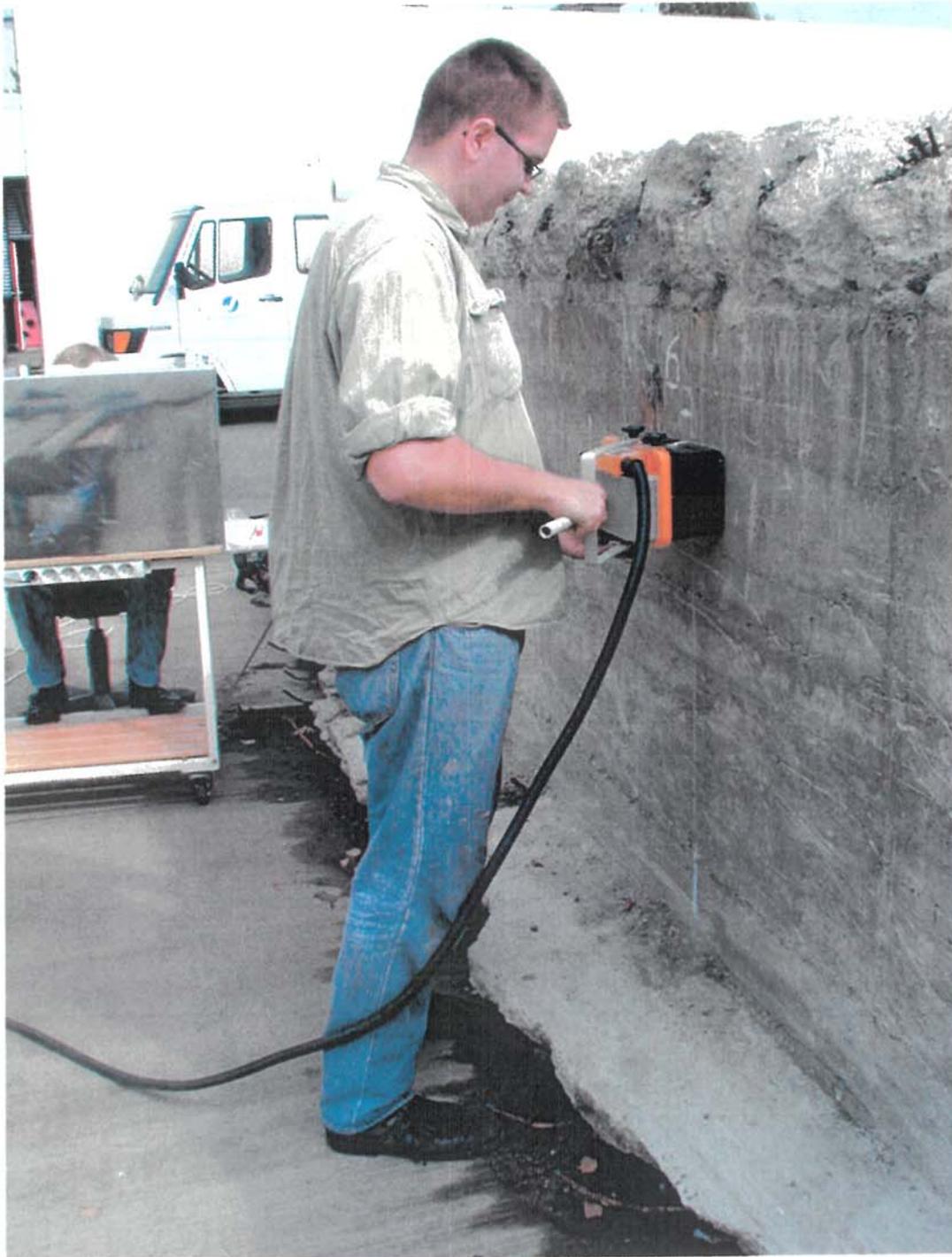


Bild 2: Orten der Spannglieder mit Radar (Balken II, Seite west)

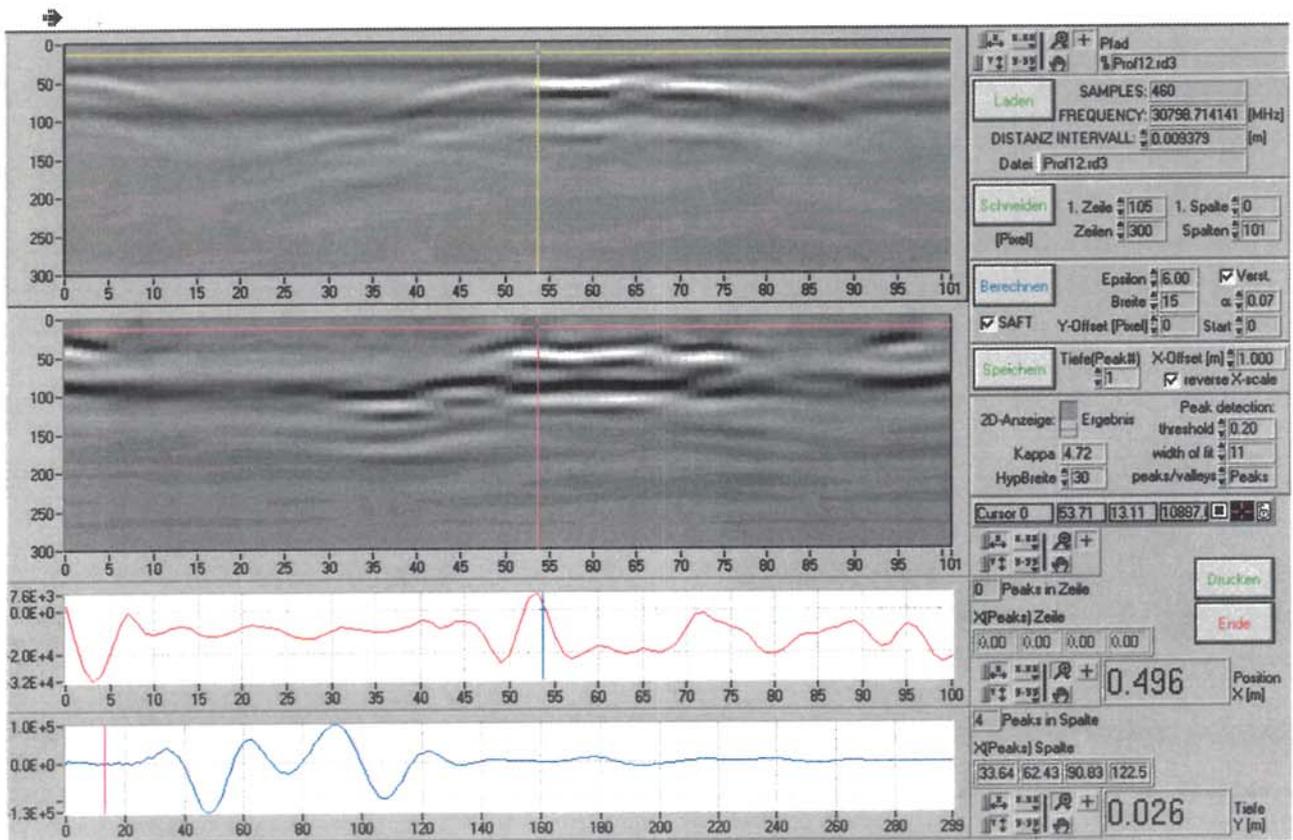


Bild 3. Auswertung des Radargramm (B-Scan) zur Ortung der Spannglieder, Balken lia, Seite West bei x=875 cm

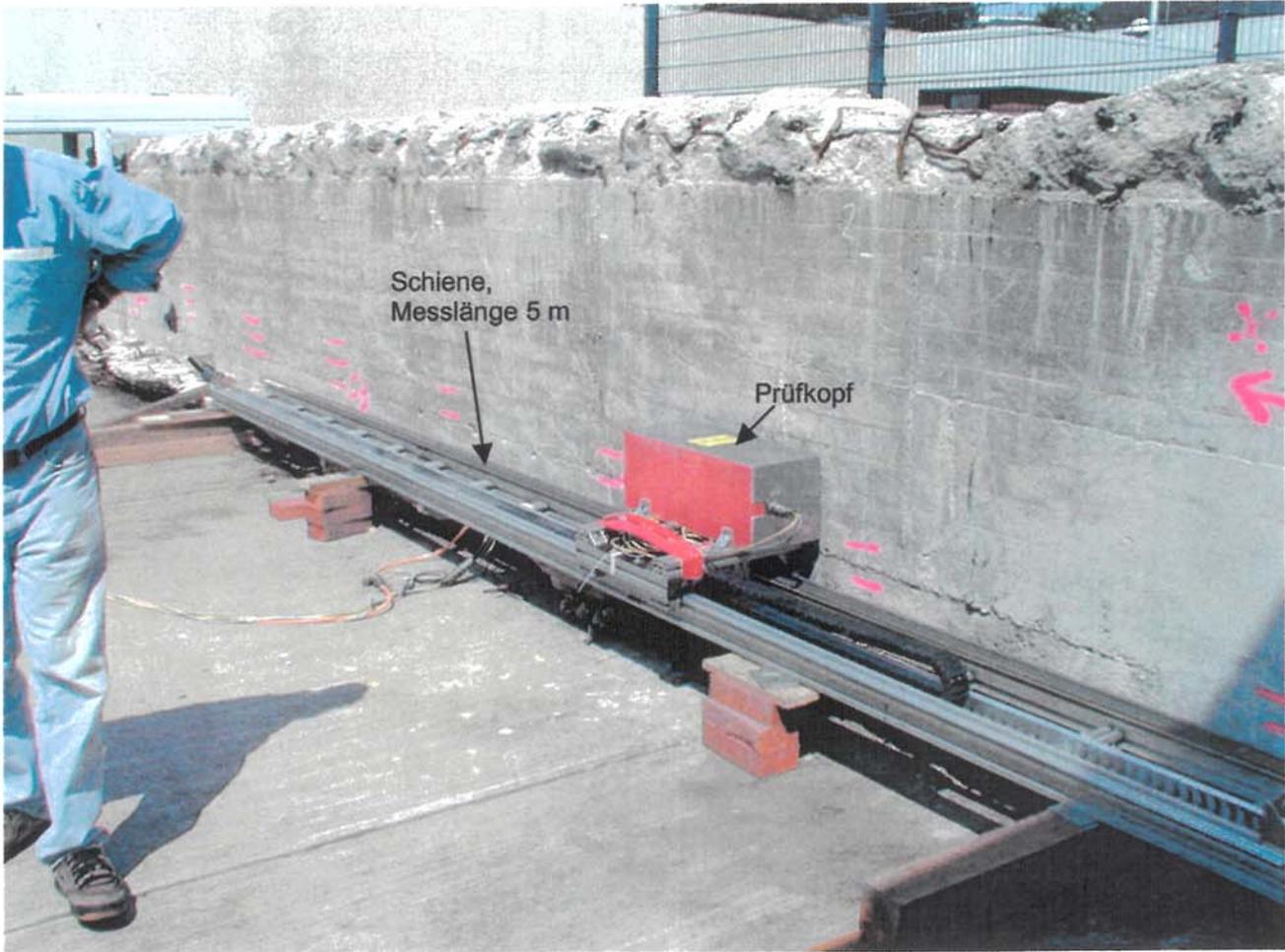


Bild 4: Durchführung von magnetischen Streufeldmessungen (Balken II A, Seite west), die roten Markierung bezeichnen die aus den Radarmessungen georteten Spannglieder

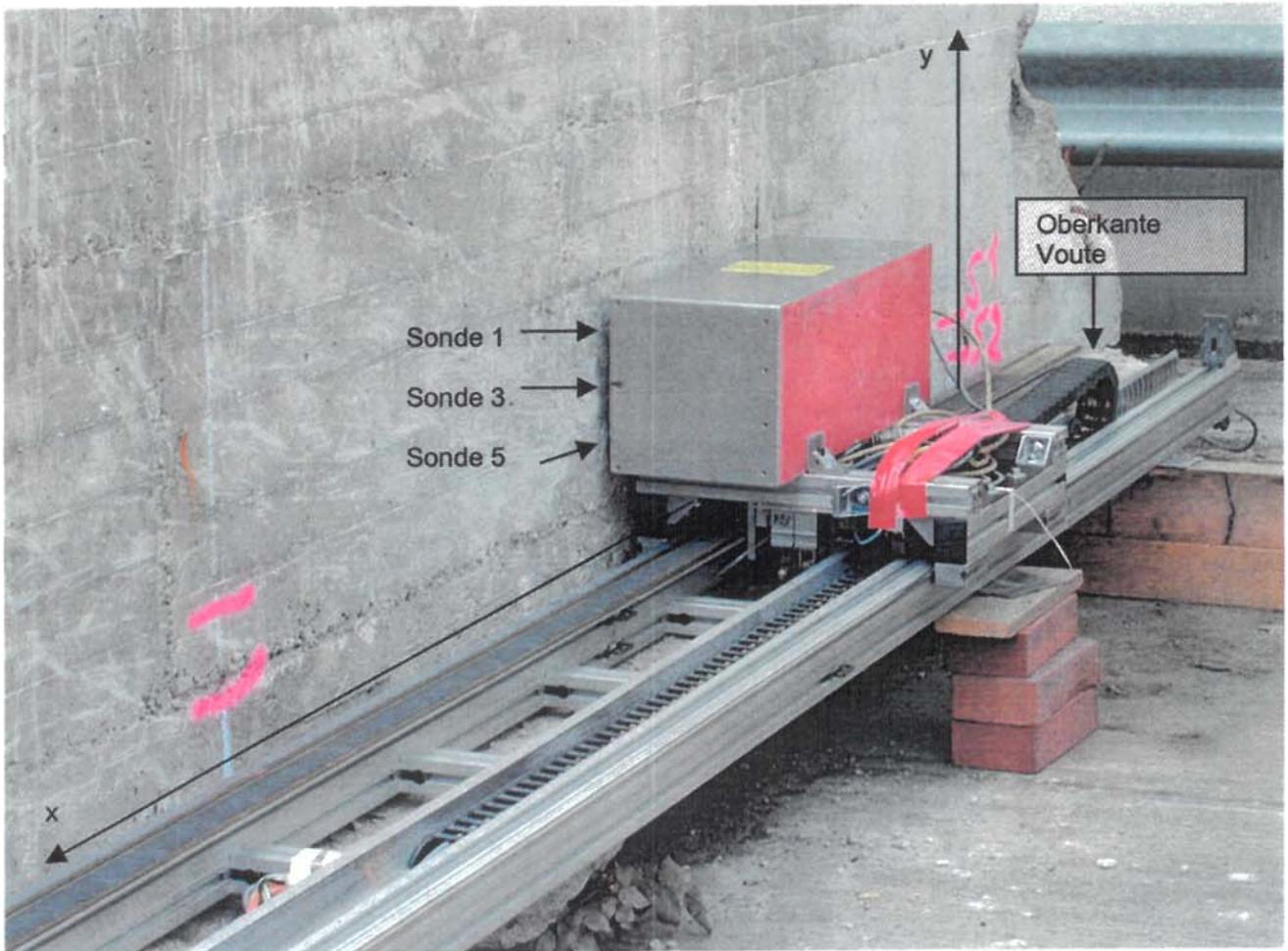


Bild 5: Ansicht der Längs- und Querachse (Balken IIA, Seite west).  
Bei allen Messungen war die Sonde 1 oben angeordnet

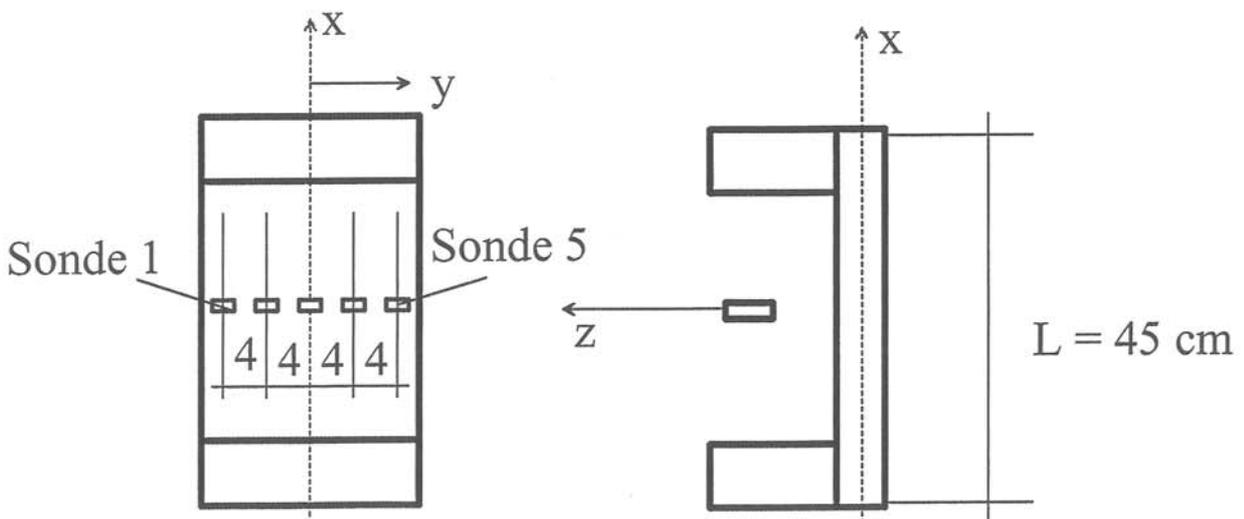


Bild 6: Schematische Darstellung des Prüfkopfes

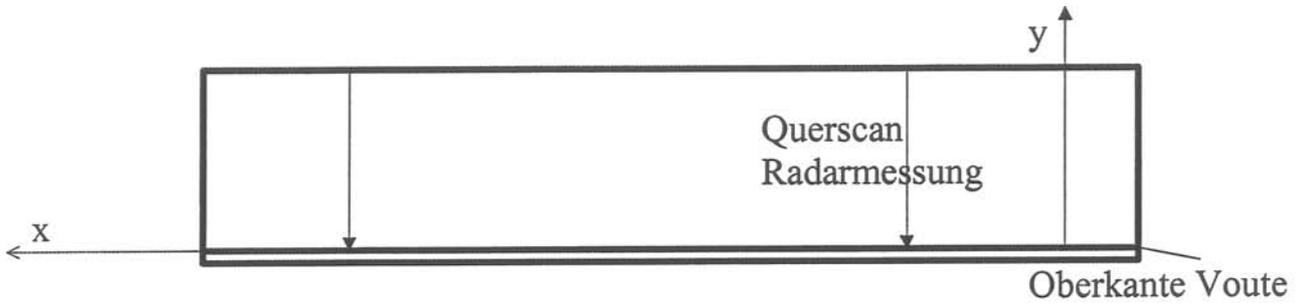


Bild 7: Zur Messgeometrie,  $x=0$  ist die Balkenmitte (Tieflage der Spannglieder),  $y=0$  ist die Oberkante der Voute

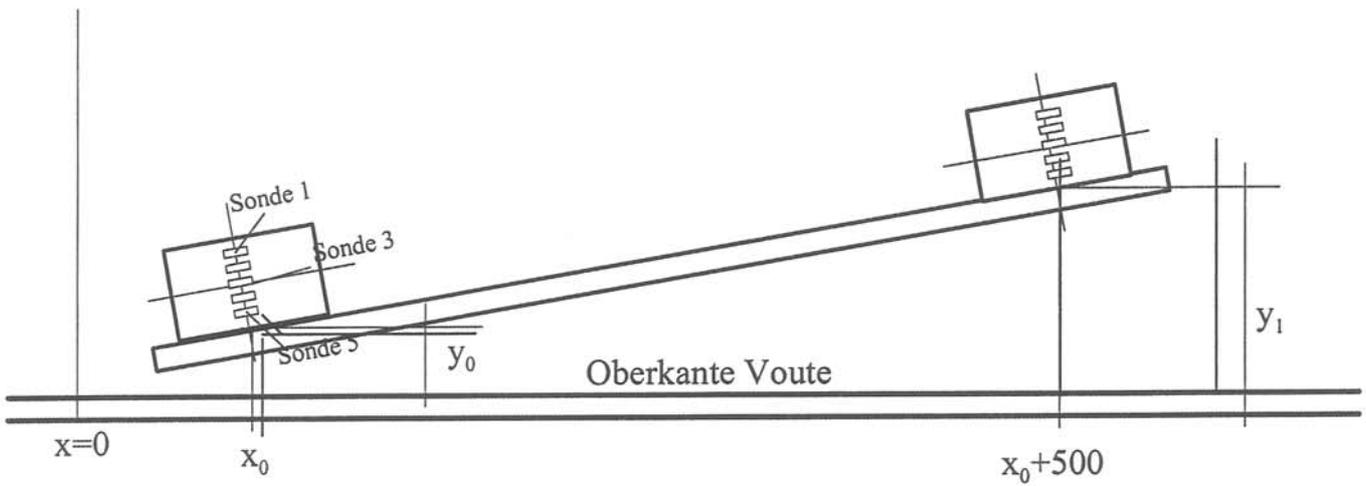


Bild 8: Lage des Prüfkopfes auf der Seitenfläche des Balkens

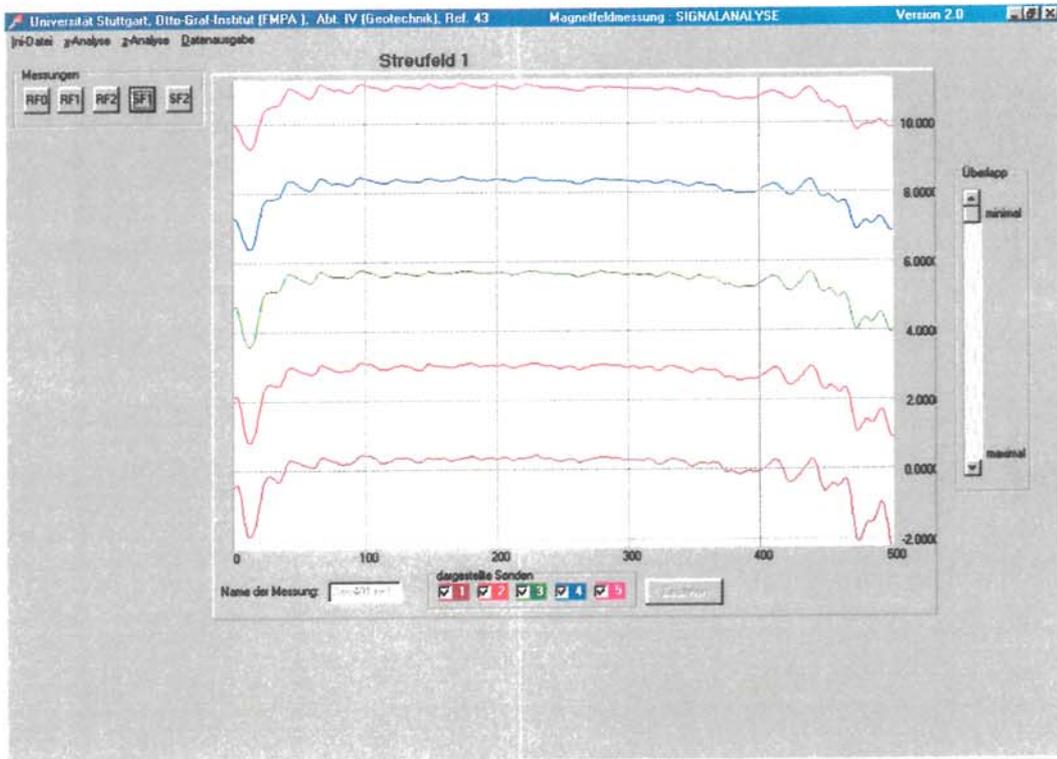


Bild 9: Streufeldverlauf, Messung 2aw4, Messfahrt 01

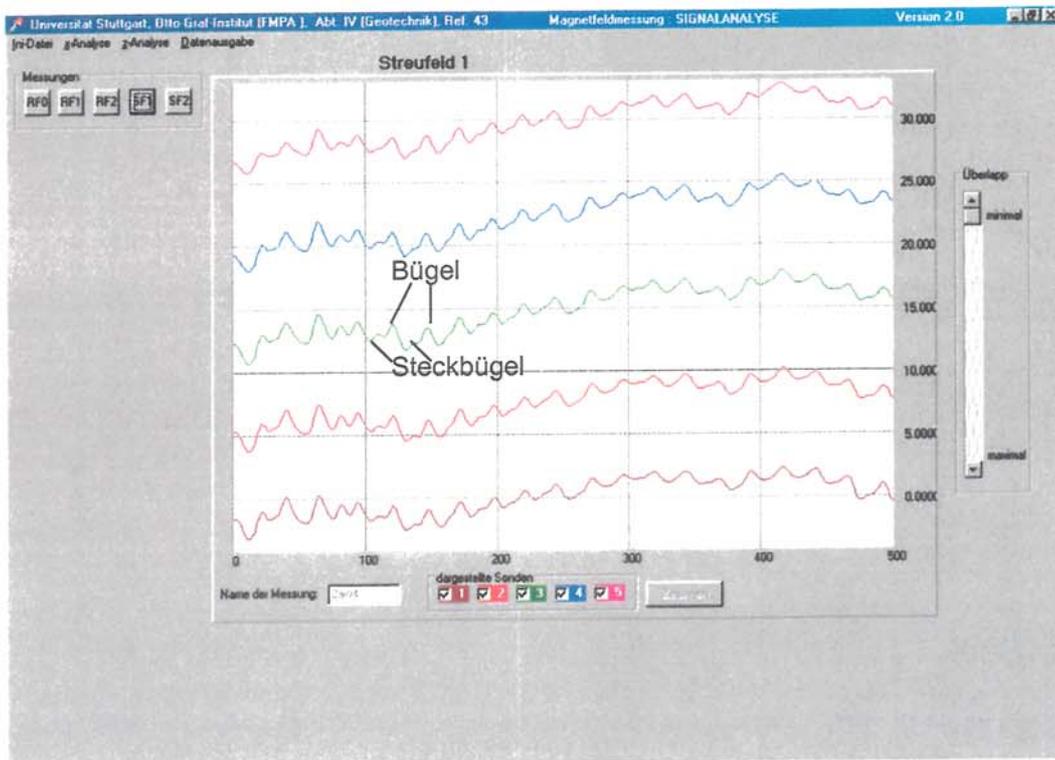


Bild 10: Streufeldverlauf, Messung 2aw4, Messfahrt 02

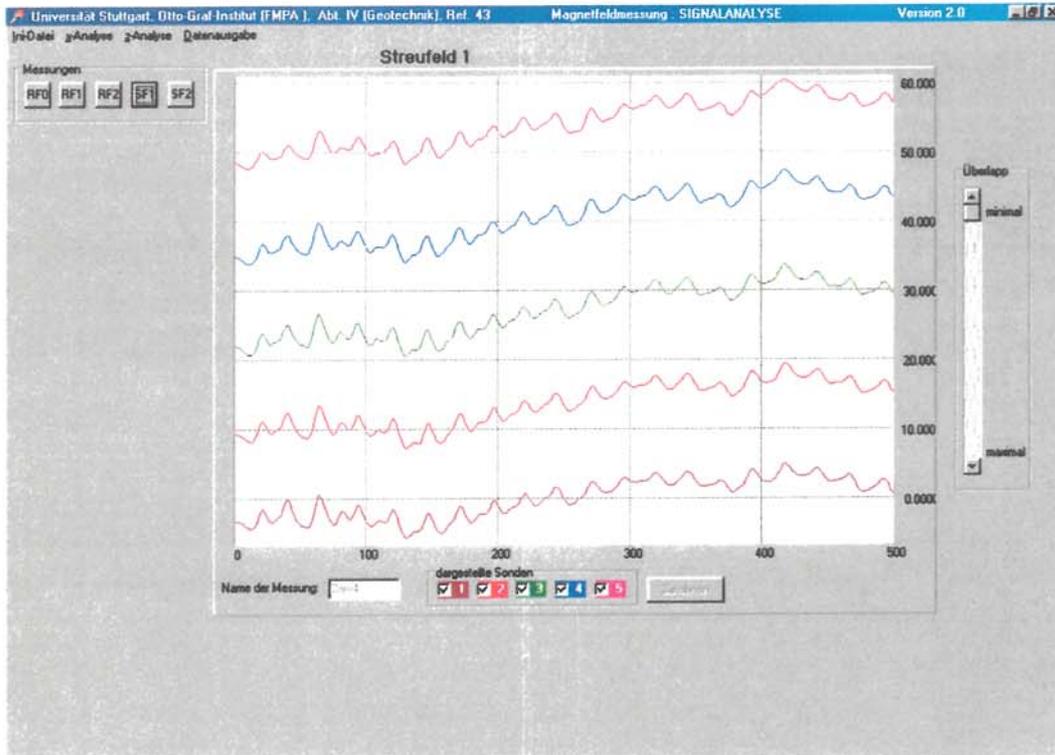


Bild 11: Streufeldverlauf, Messung 2aw4, Messfahrt 03

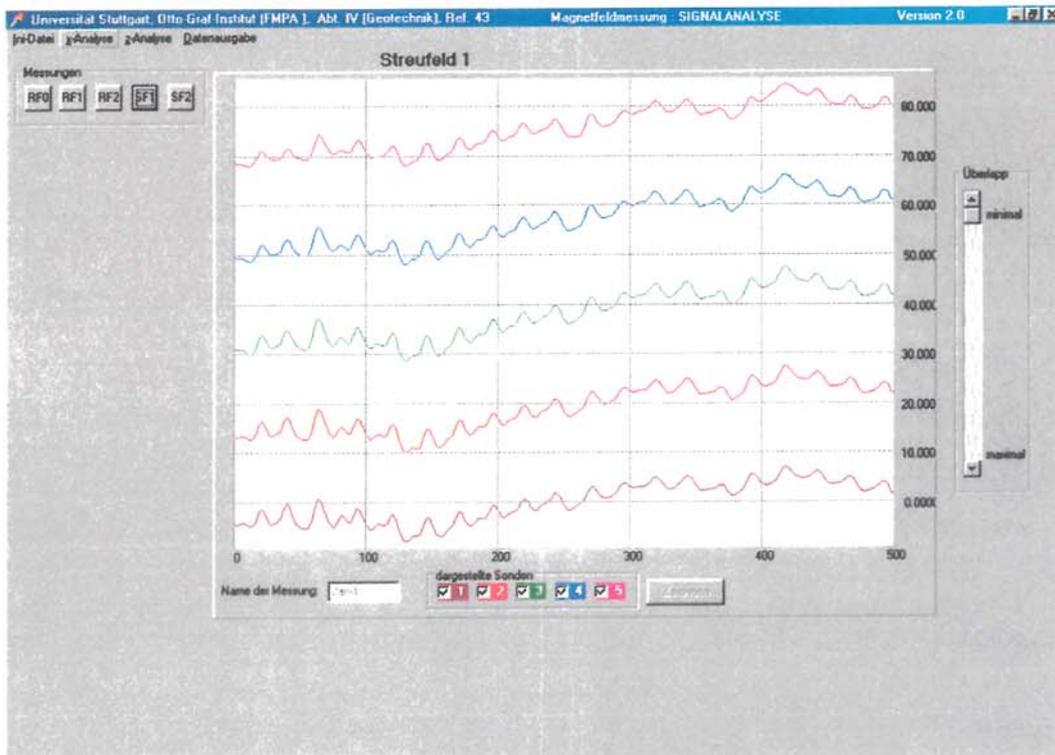


Bild 12: Streufeldverlauf, Messung 2aw4, Messfahrt 04

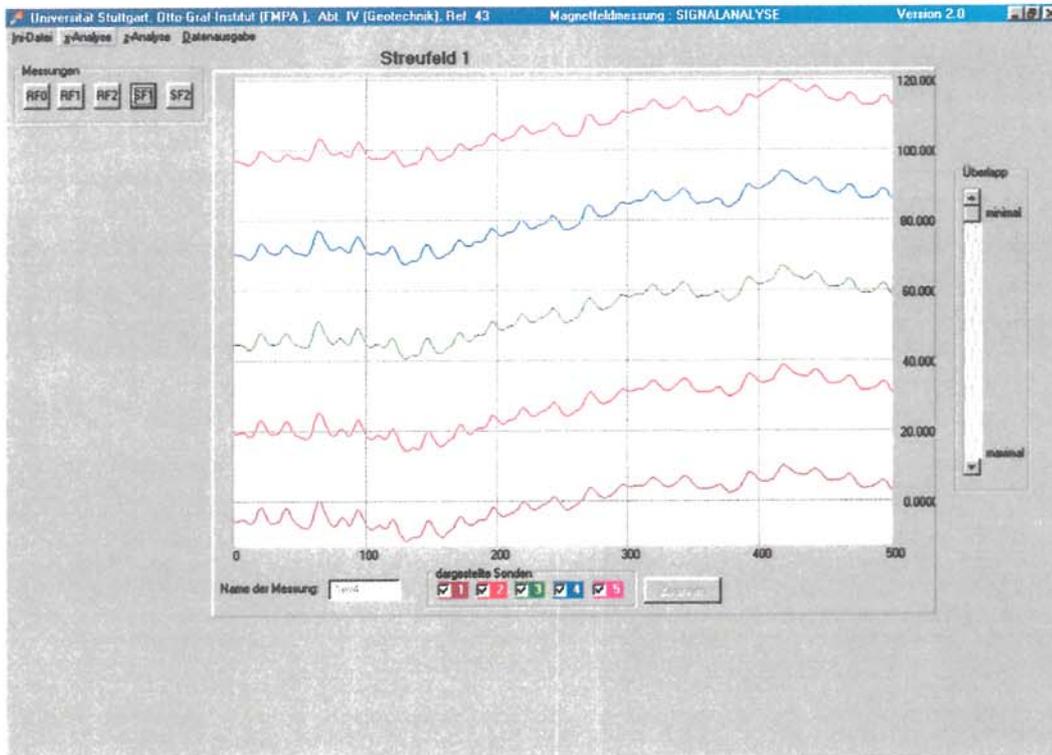


Bild 13: Streufeldverlauf, Messung 2aw4, Messfahrt 05

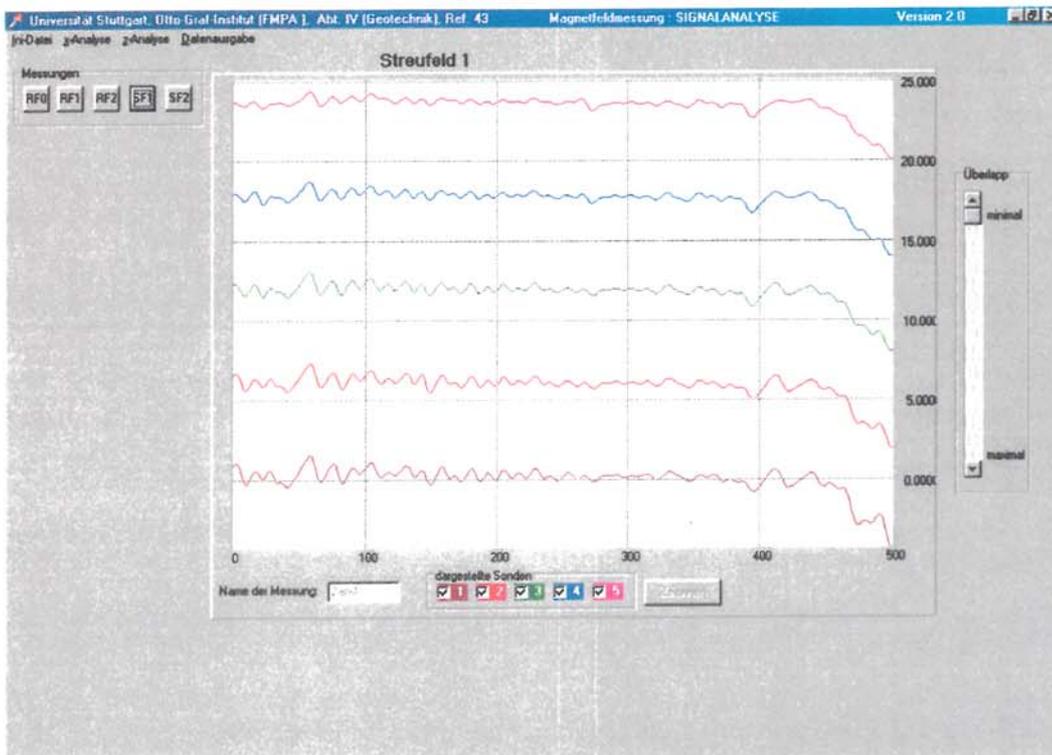


Bild 14: Streufeldverlauf, Messung 2aw4, Messfahrt 06 (Restfeldmessung z. Bügelortung)

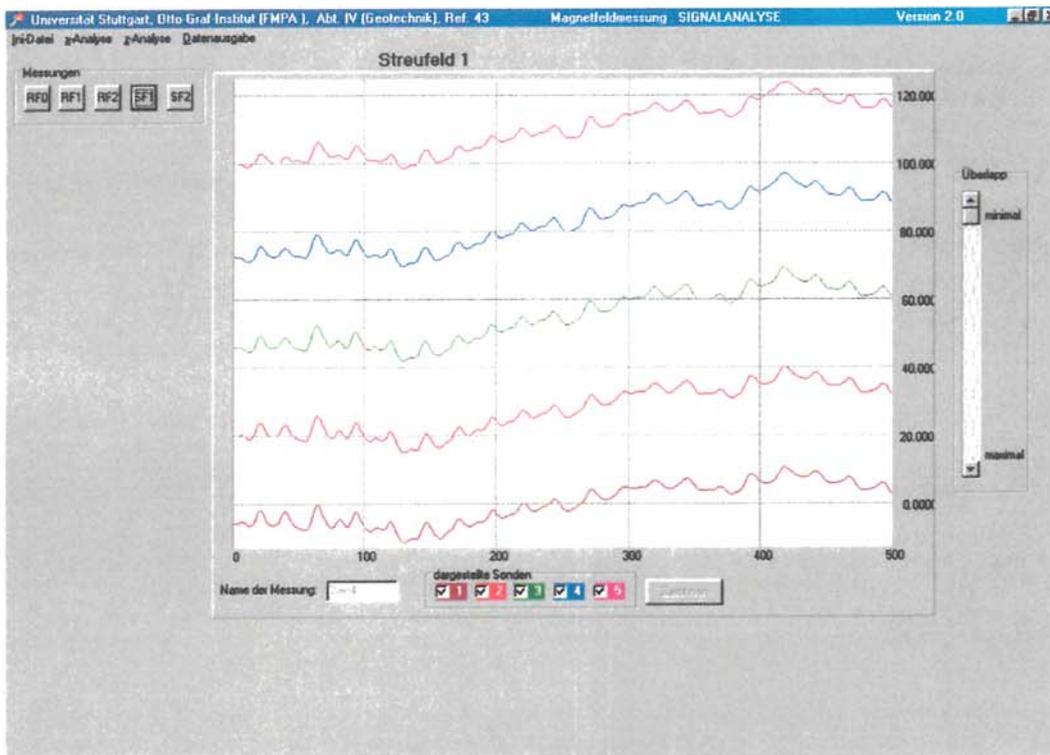


Bild 15: Streufeldverlauf, Messung 2aw4, Messfahrt 07

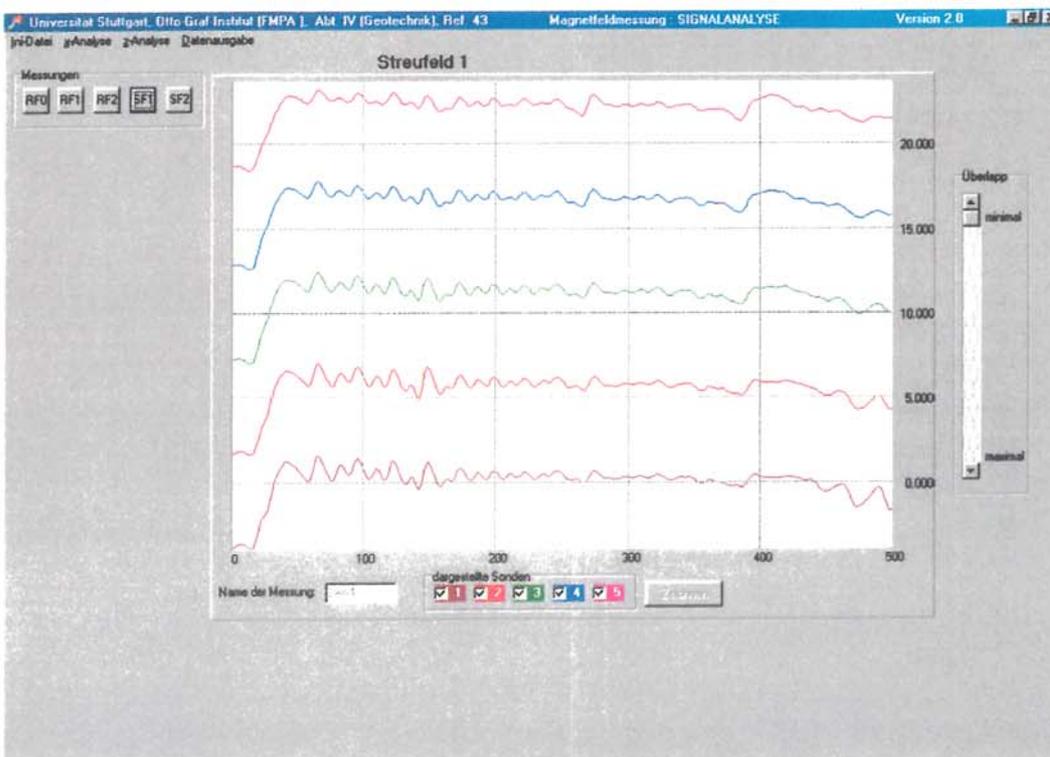


Bild 16: Streufeldverlauf, Messung 2aw4, Messfahrt 08 (Restfeldmessung z. Bügelortung)

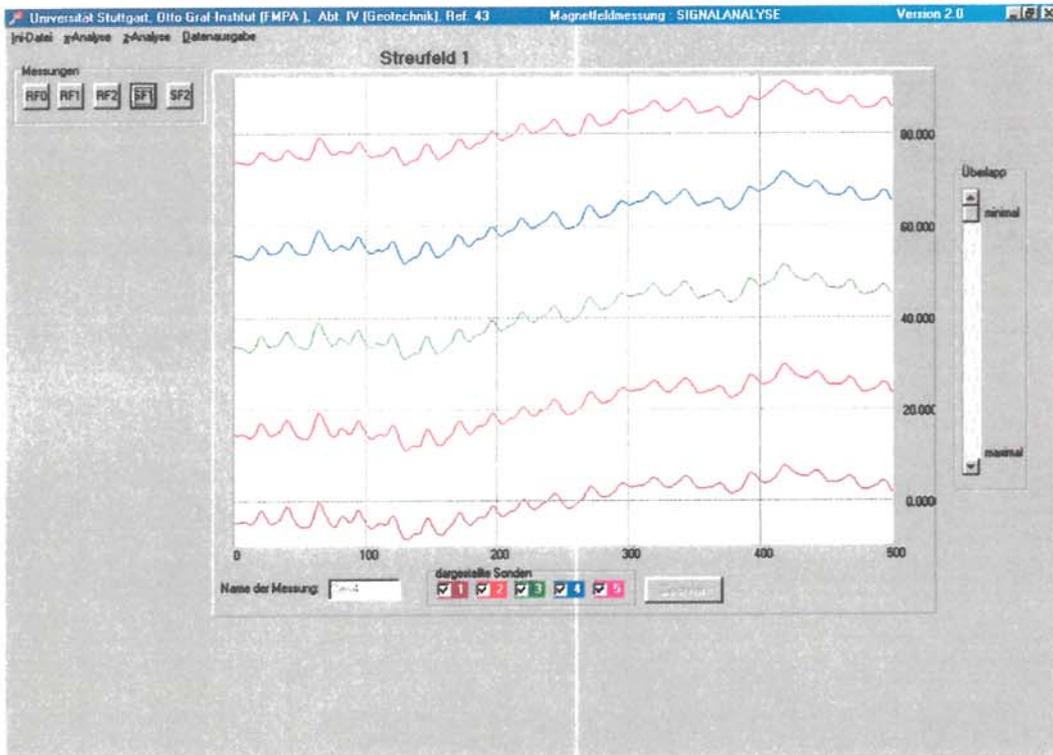


Bild 17: Streufeldverlauf, Messung 2aw4, Messfahrt 09

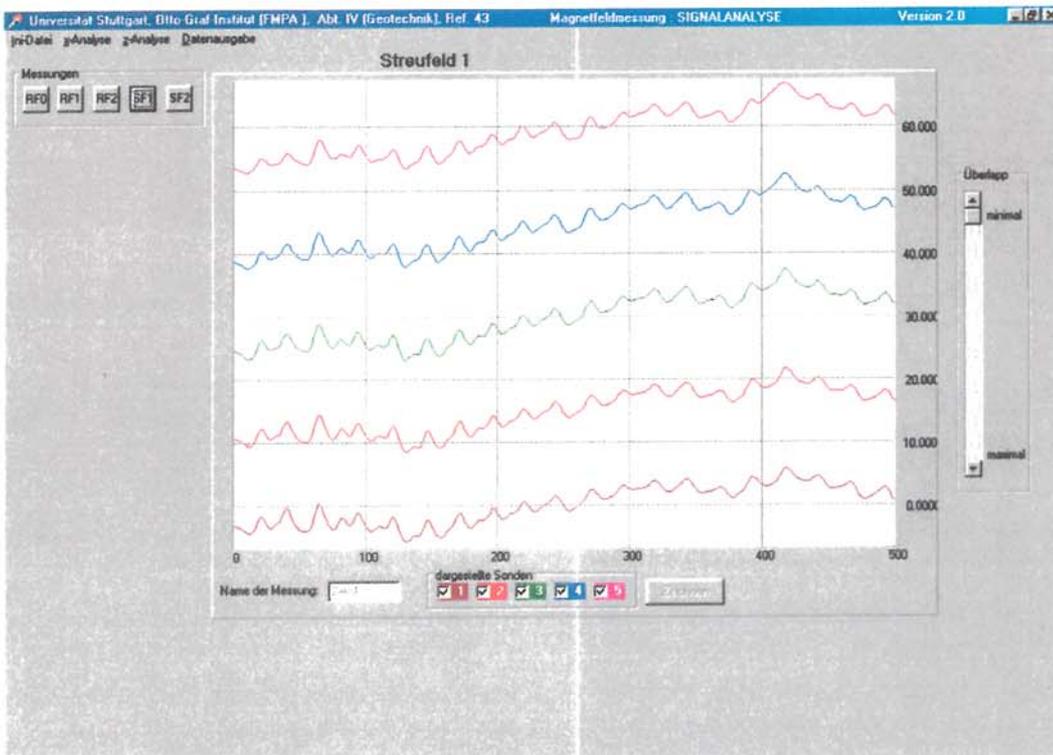


Bild 18: Streufeldverlauf, Messung 2aw4, Messfahrt 10

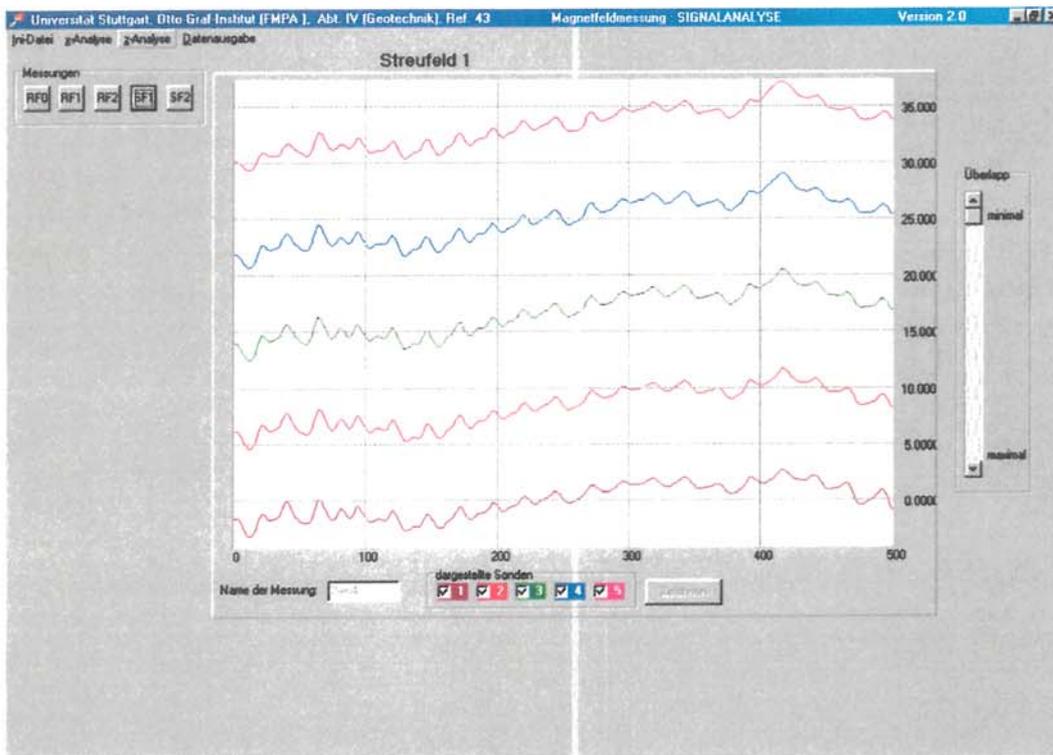


Bild 19: Streufeldverlauf, Messung 2aw4, Messfahrt 11

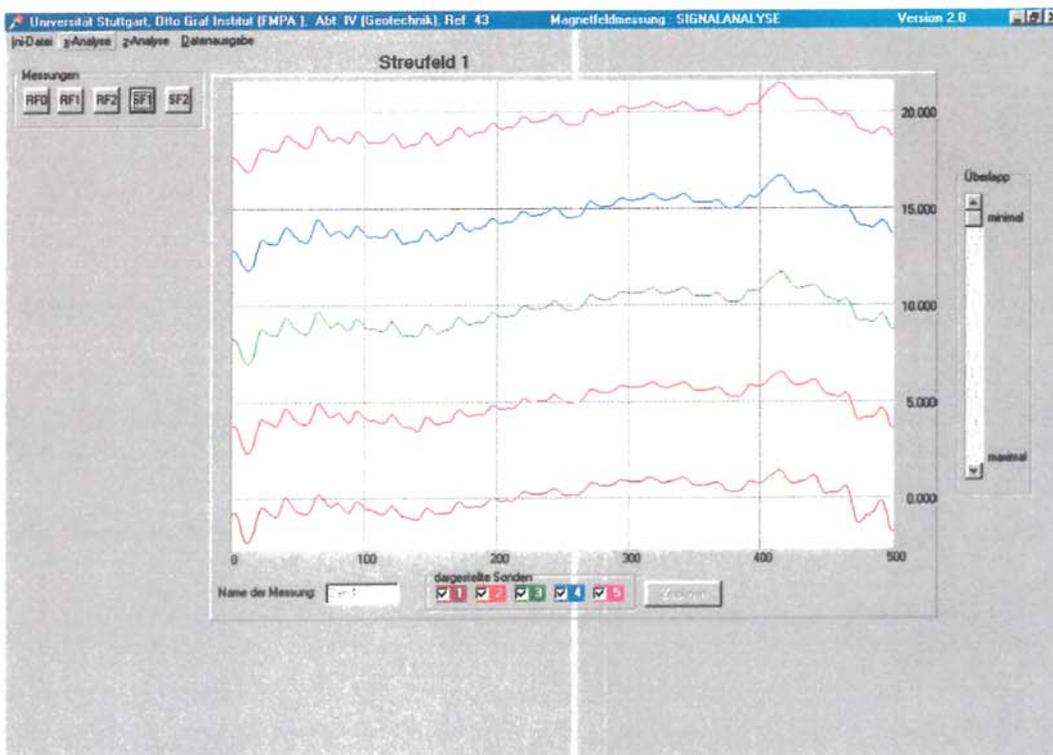


Bild 20: Streufeldverlauf, Messung 2aw4, Messfahrt 12

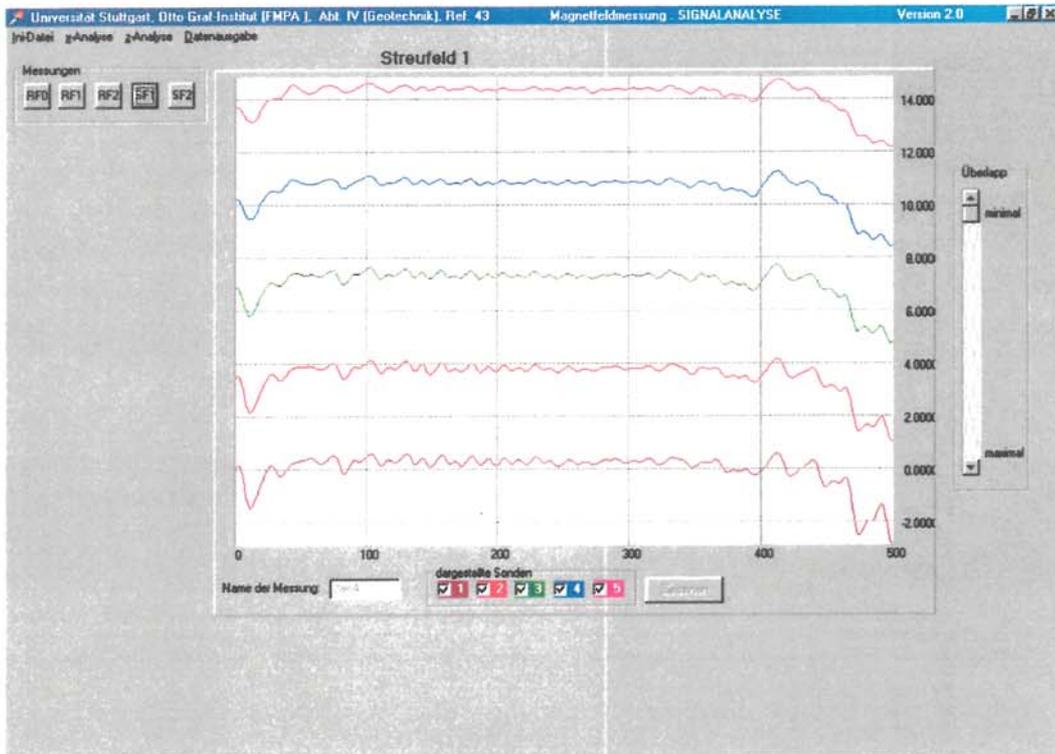


Bild 21: Streufeldverlauf, Messung 2aw4, Messfahrt 13 (Restfeldmessung)



Bild 22: Streufeldverlauf, Messung 2aw4, Messfahrt 14 (Restfeldmessung)



Bild 23: Streufeldverlauf, Messung 2aw4, Messfahrt 15

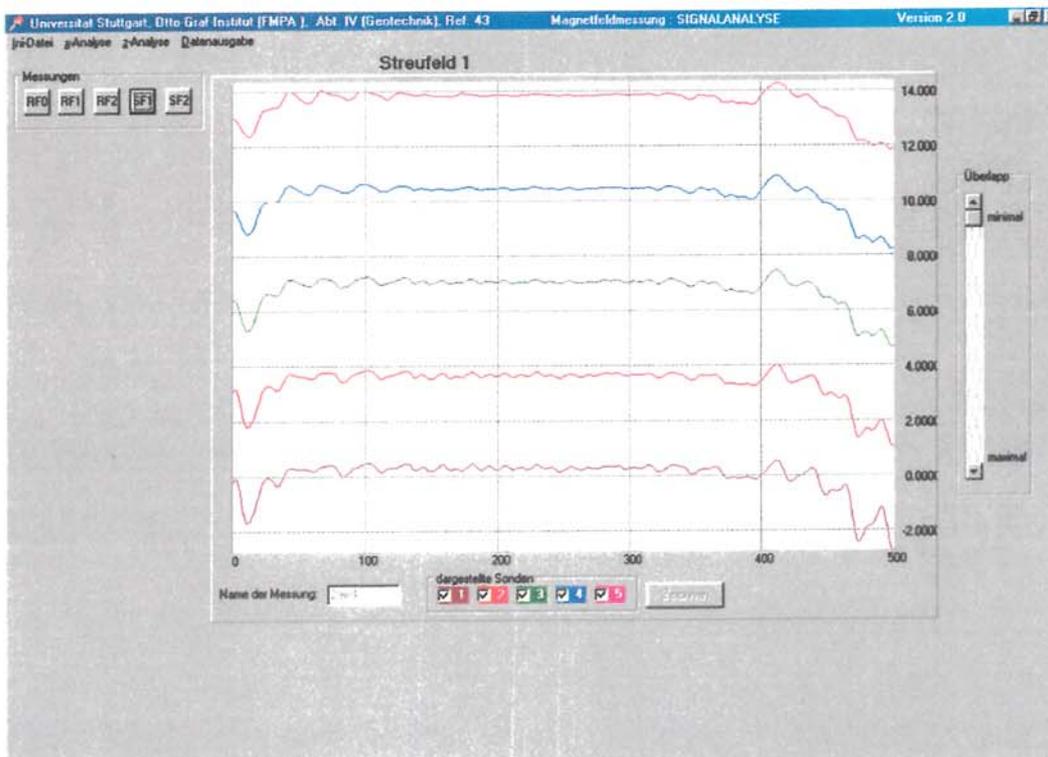


Bild 24: Streufeldverlauf, Messung 2aw4, Messfahrt 16 (Restfeldmessung)

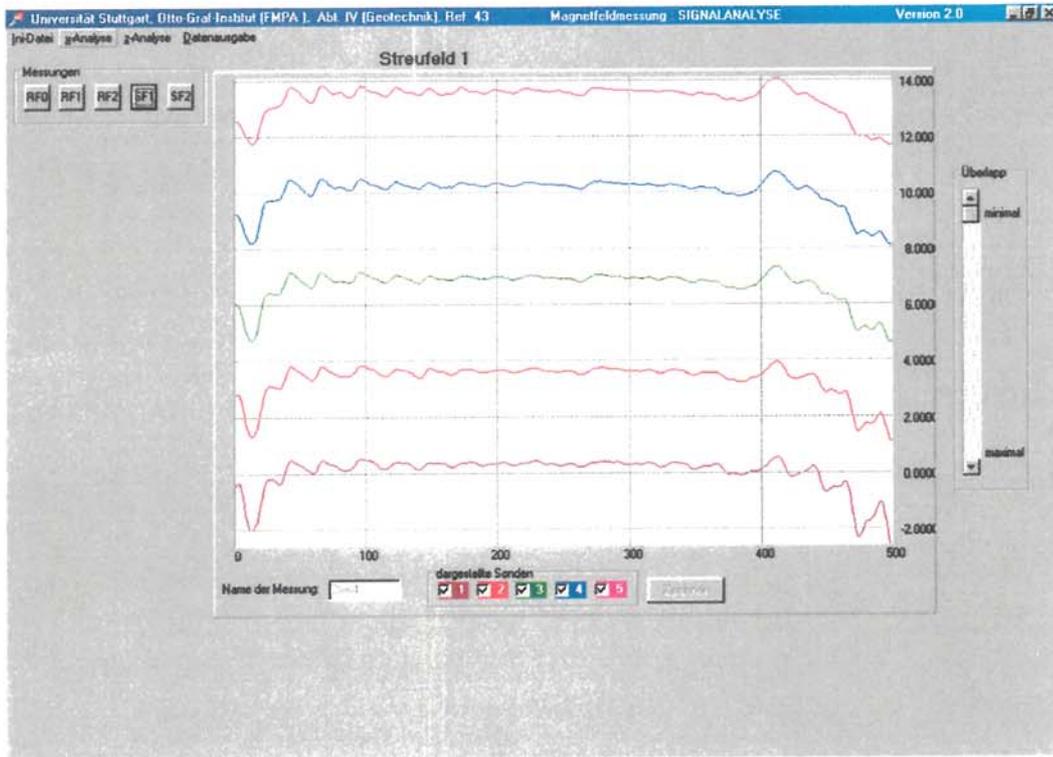


Bild 25: Streufeldverlauf, Messung 2aw4, Messfahrt 17(Restfeldmessung)

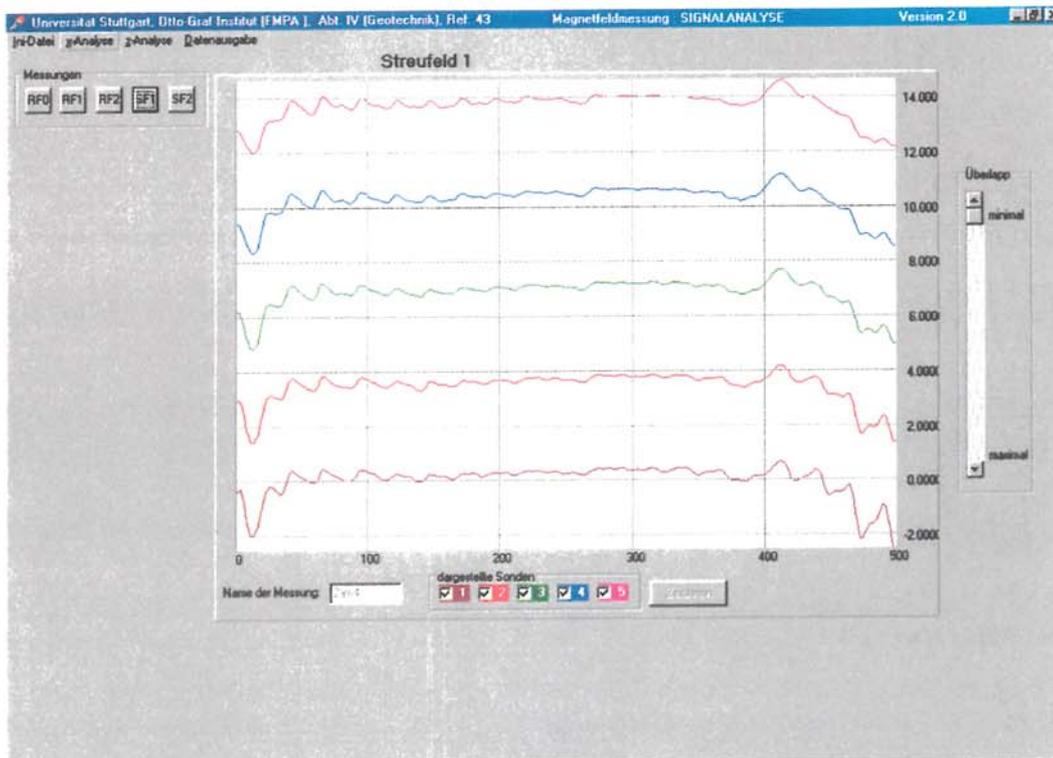


Bild 26: Streufeldverlauf, Messung 2aw4, Messfahrt 18



Bild 27: Streufeldverlauf, Messung 2aw4, Messfahrt 19 (Restfeldmessung)

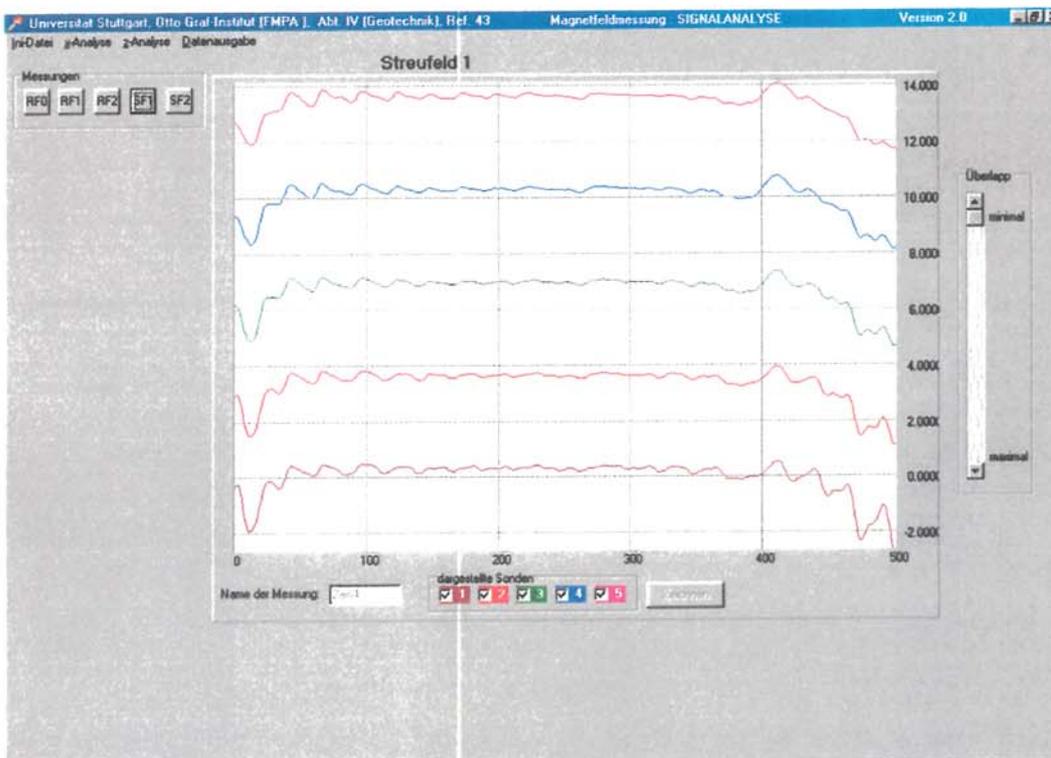


Bild 28: Streufeldverlauf, Messung 2aw4, Messfahrt 20 (Restfeldmessung)

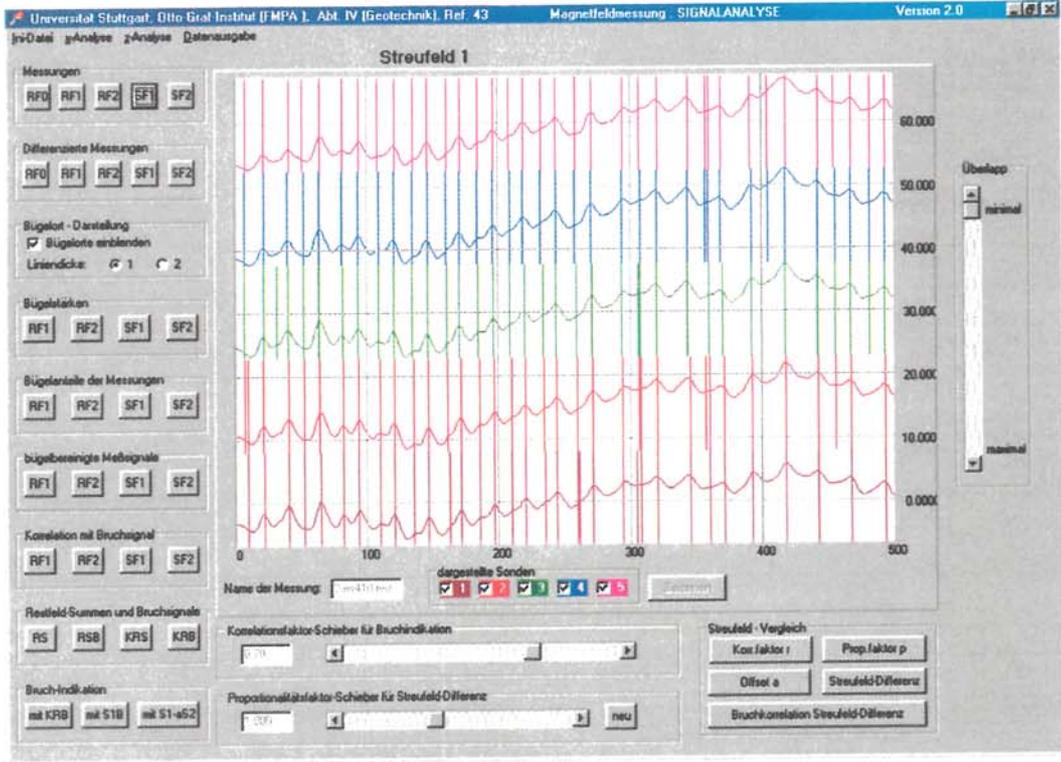


Bild 29: Bügelortung aus Messfahrt 10, senkrechte Striche sind Bügelorte

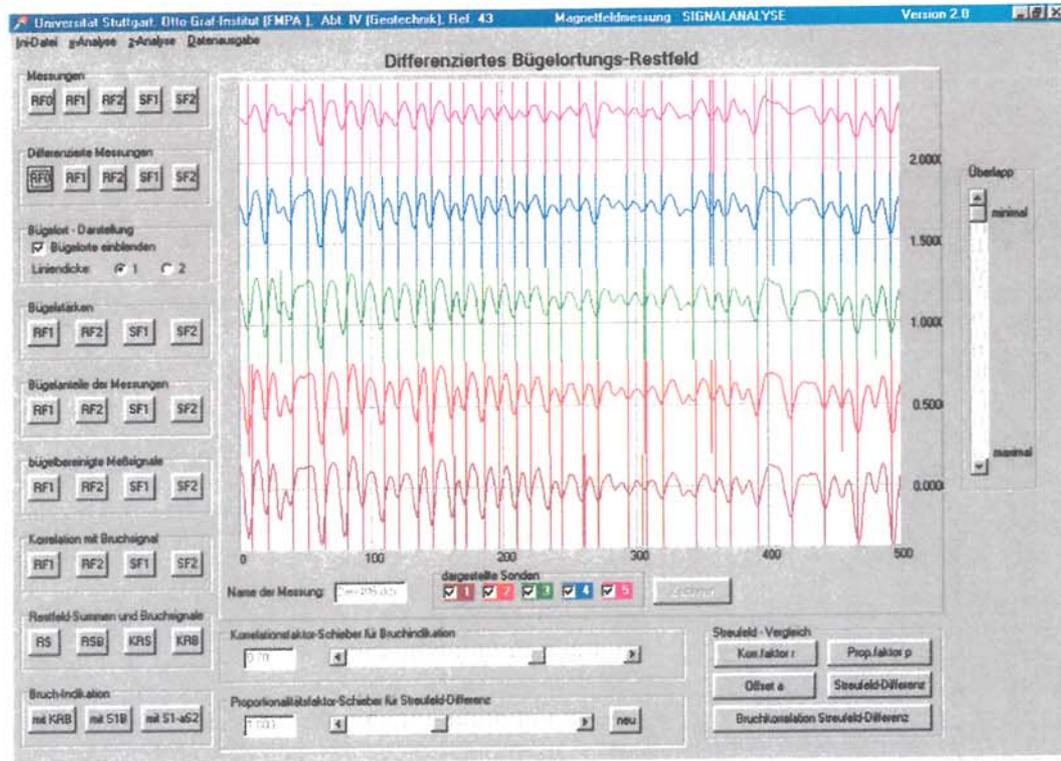


Bild 30: differenziertes Restfeldsignal (Messfahrt 06) zur Bügelortung

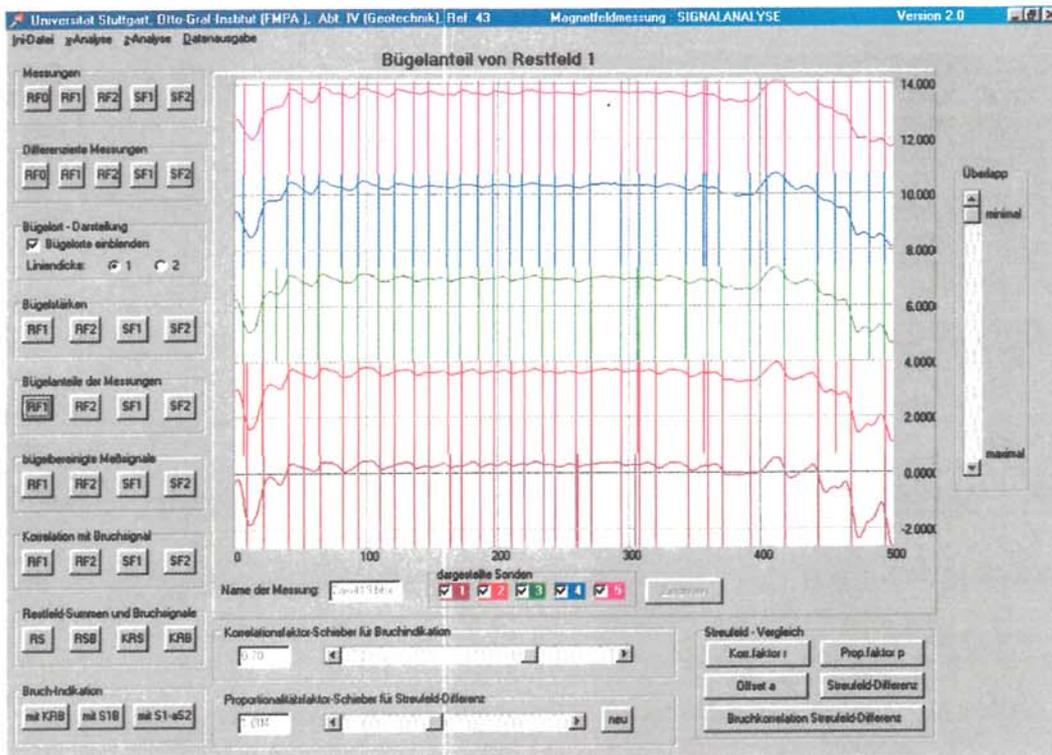


Bild 31: berechneter Bügelanteil des Restfeldsignals 19

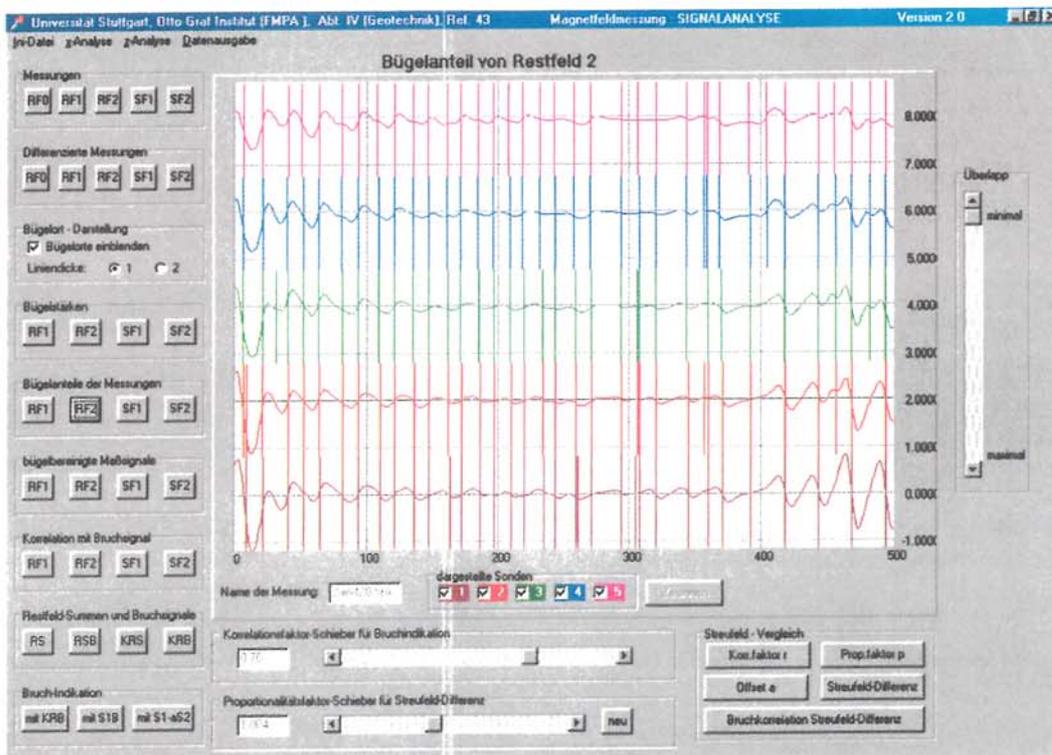


Bild 32: berechneter Bügelanteil des Restfeldsignals 20

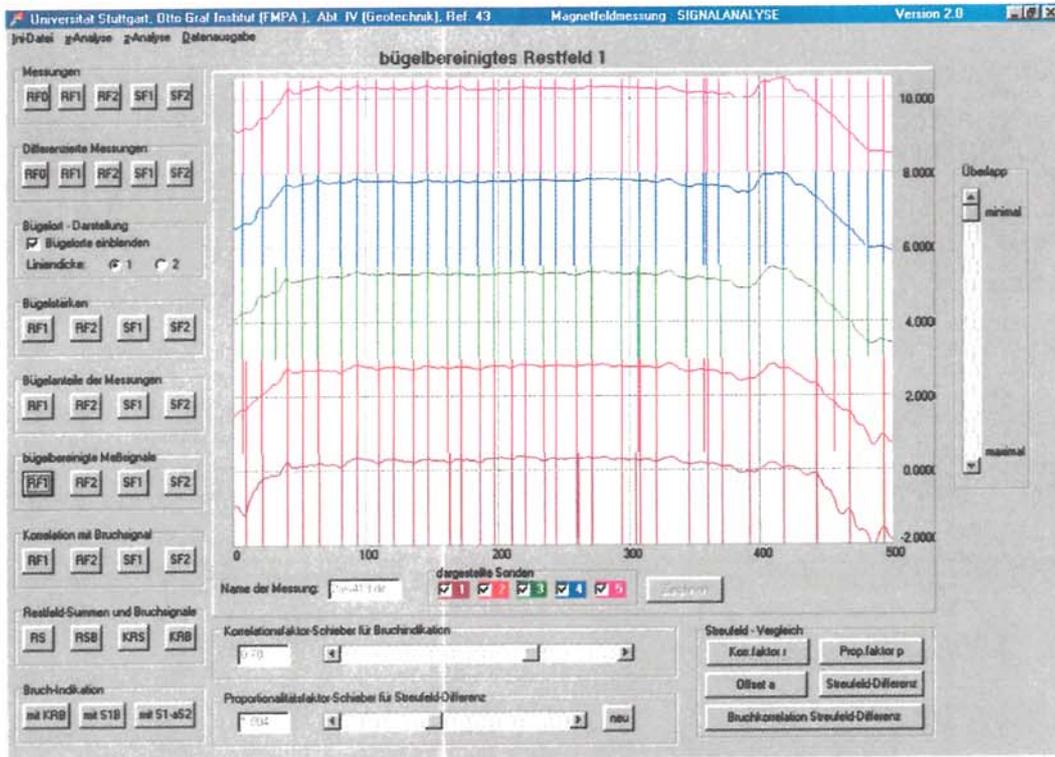


Bild 33: bügelgefiltertes Restfeldsignal 19 (Differenz Bild 27 - Bild 31)

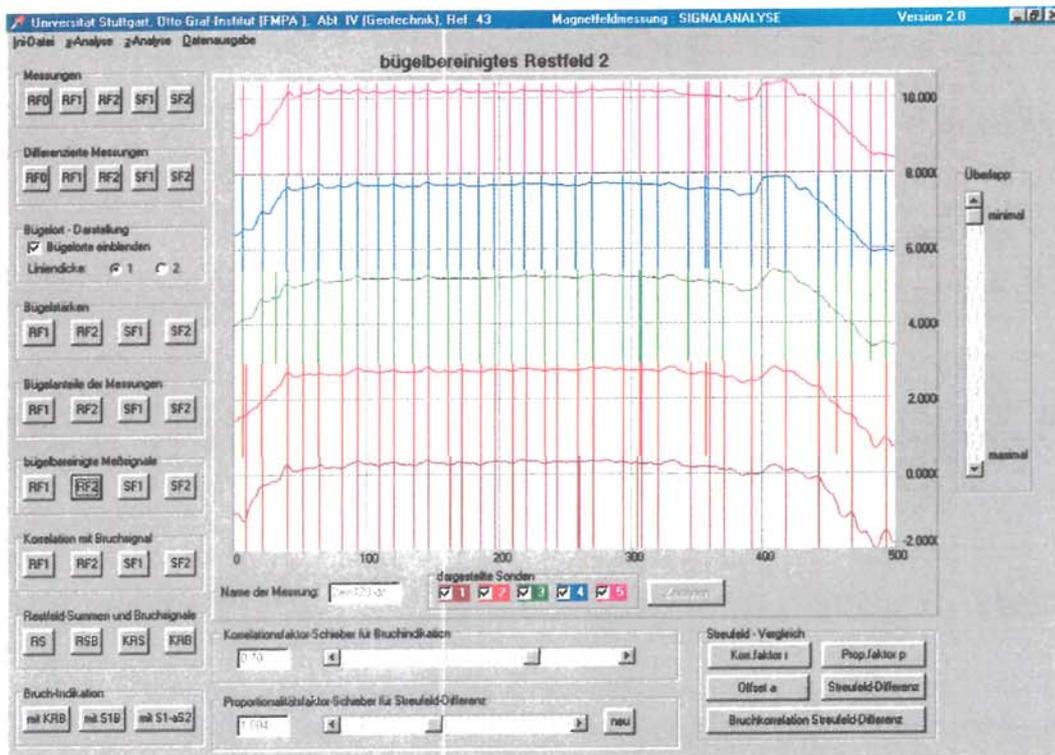


Bild 34: bügelgefiltertes Restfeldsignal 20 (Differenz Bild 28 - Bild 32)

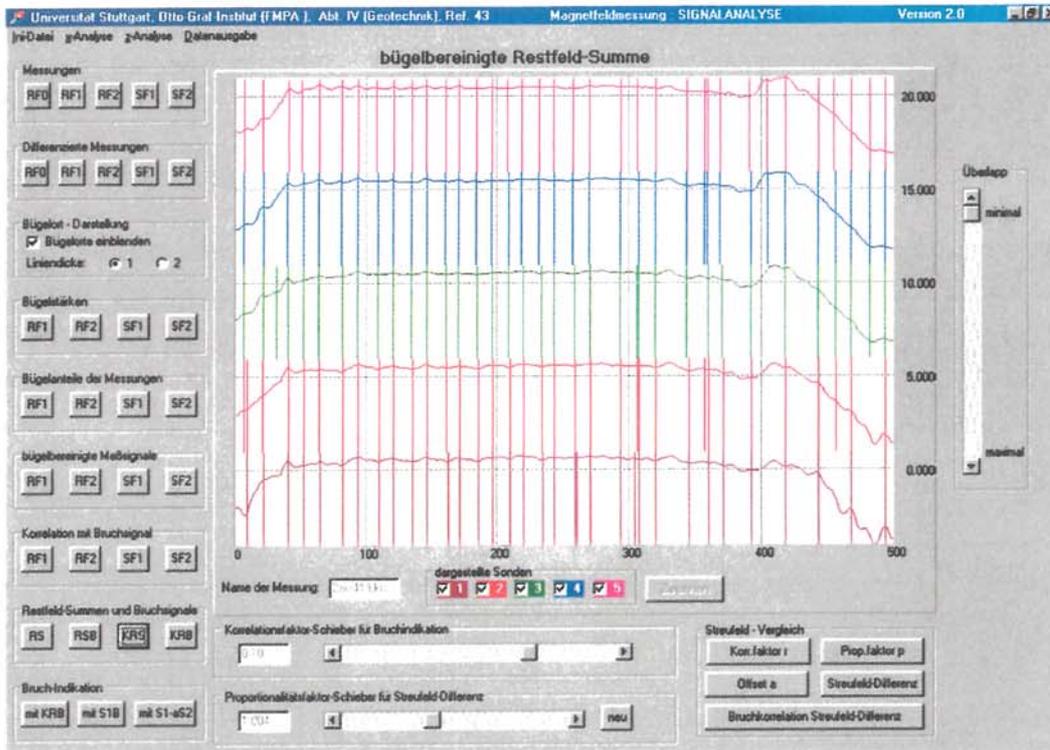


Bild 35: Summensignal der bügelgefilterten Restfeldsignale 19 und 20

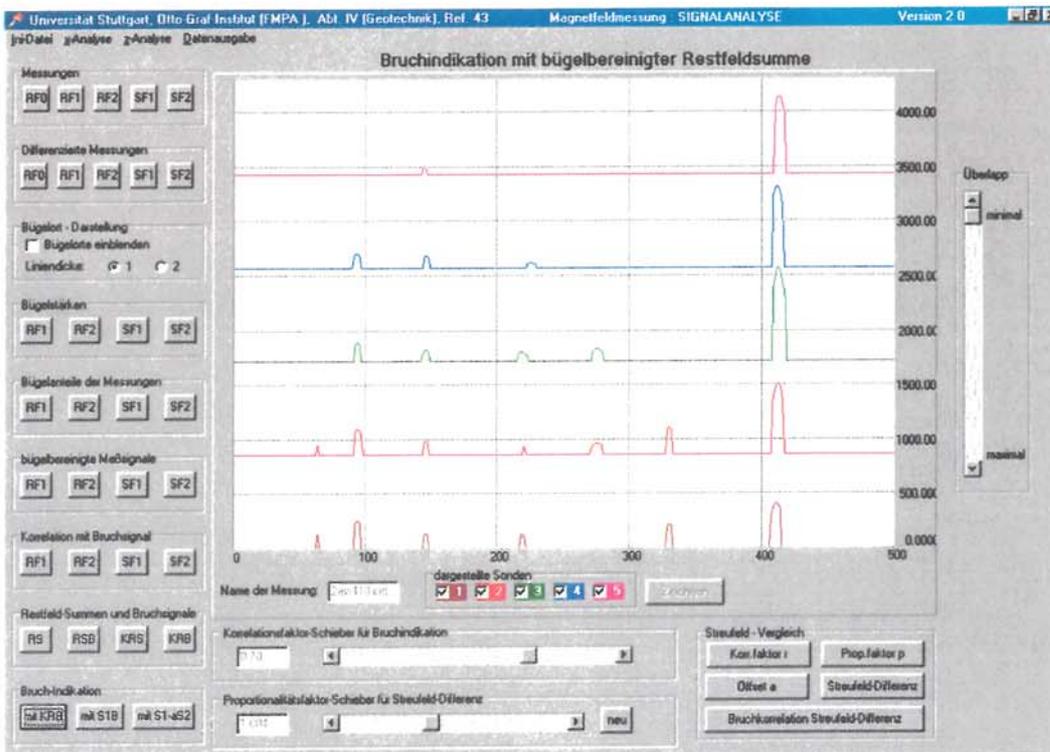


Bild 36: lokale Korrelation des Summensignals mit typ. Bruchsignal die Anzeige der Querbügel ist ausgeschaltet

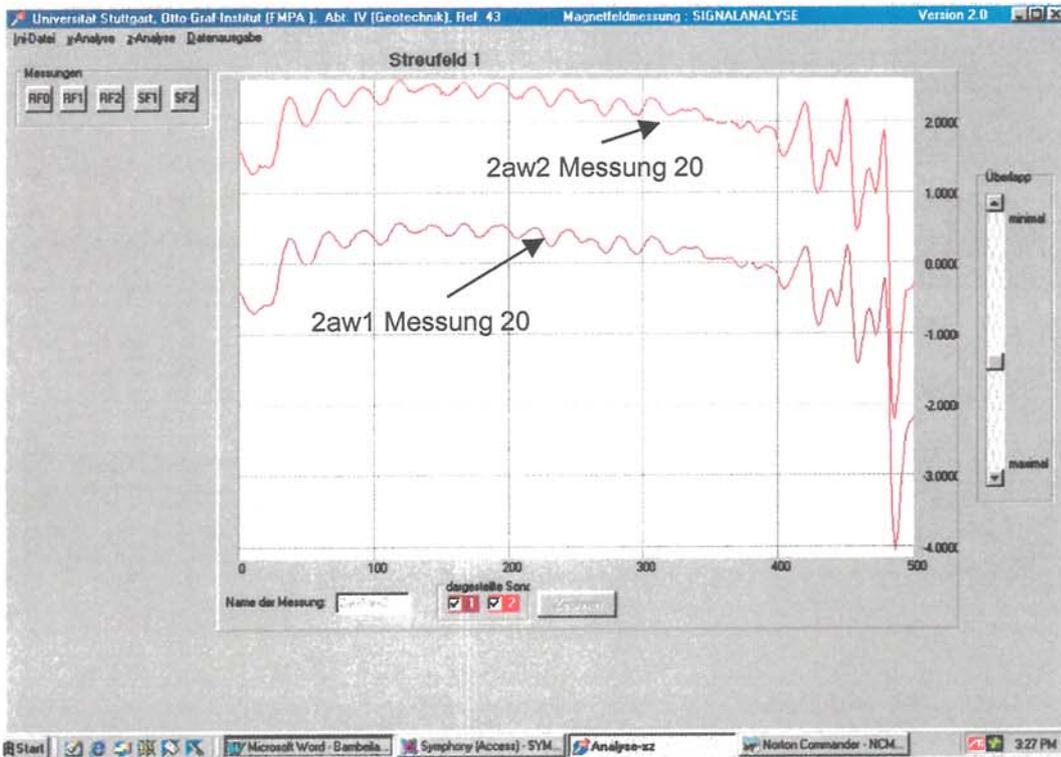


Bild 37: Zur Reproduzierbarkeit (Vergleich 2aw1 2aw2, Messung 20 bei Sonde 1)

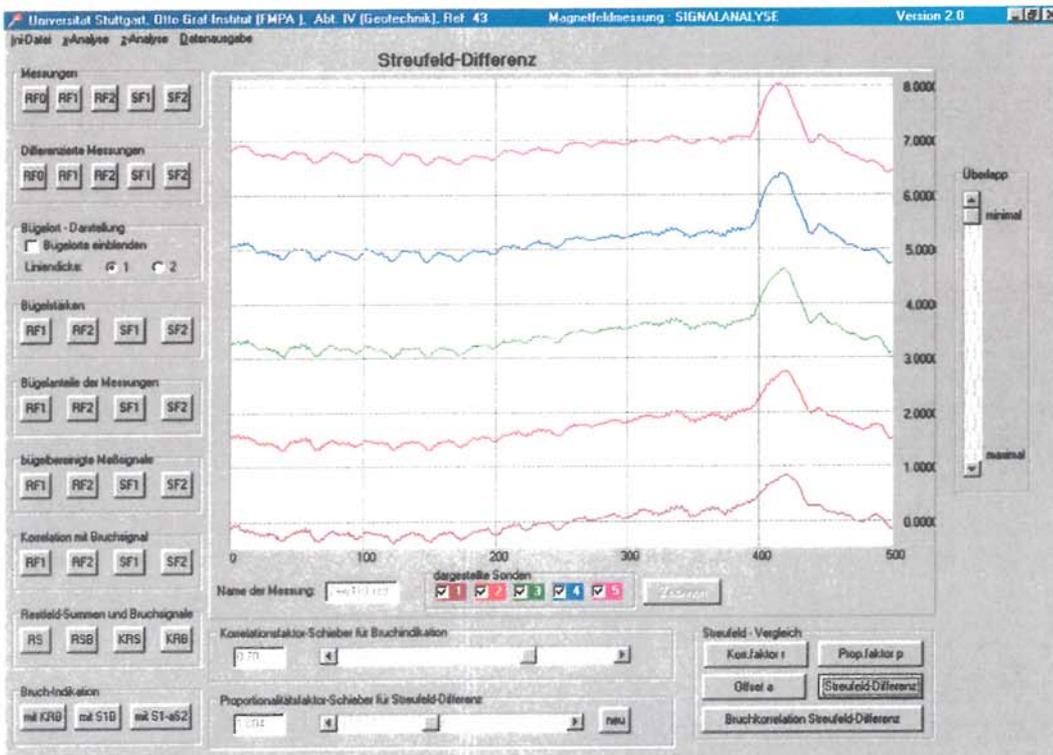


Bild 38: Differenzsignal Messung 10 - Messung 03 Abschnitt 2aw4

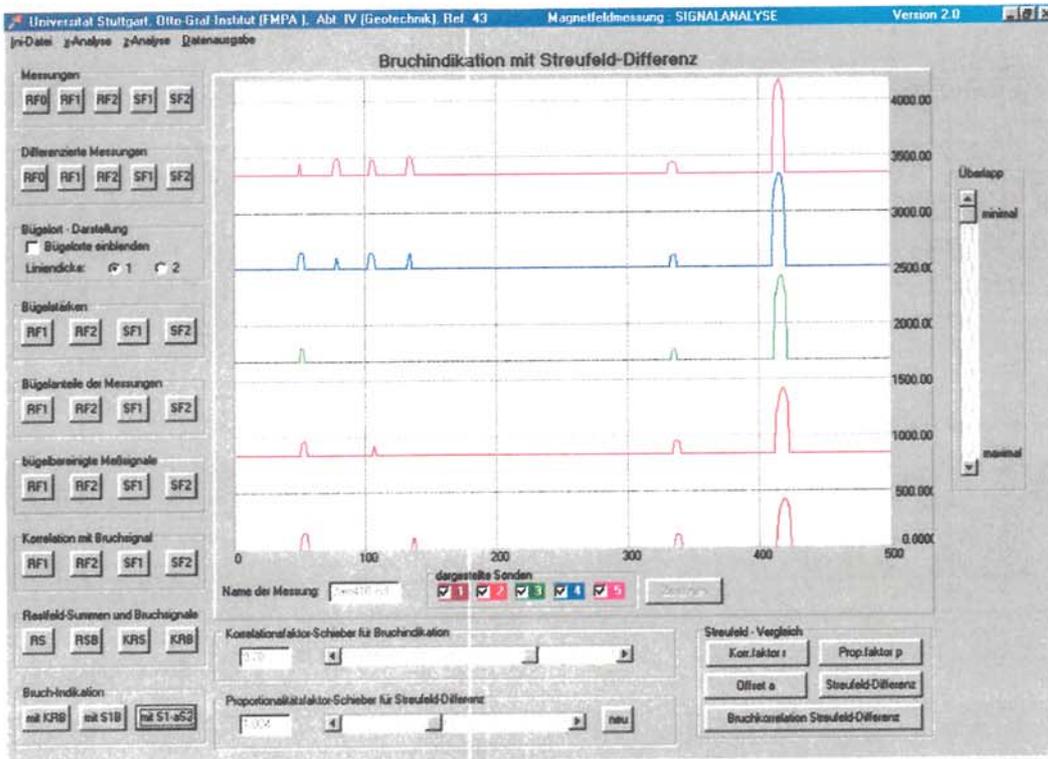


Bild 39: lokale Korrelation des Differenzsignals (Bild 38) mit typ. Bruchsignal

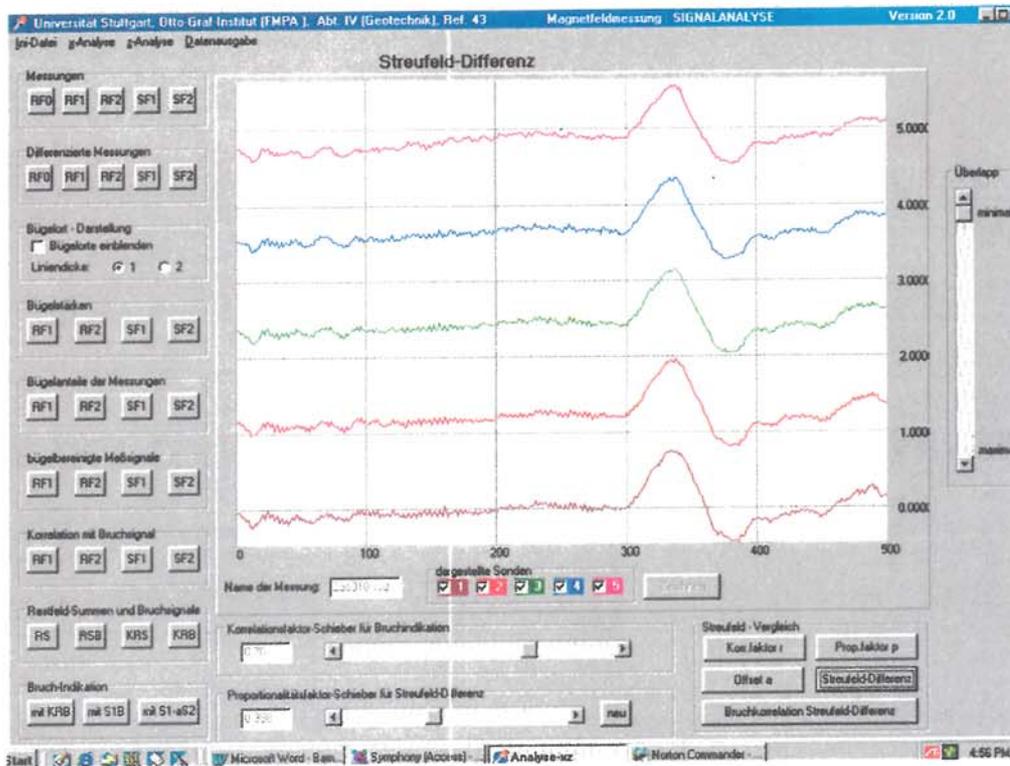


Bild 40: Differenzsignal Messung 10 - Messung 03 Abschnitt 2a03

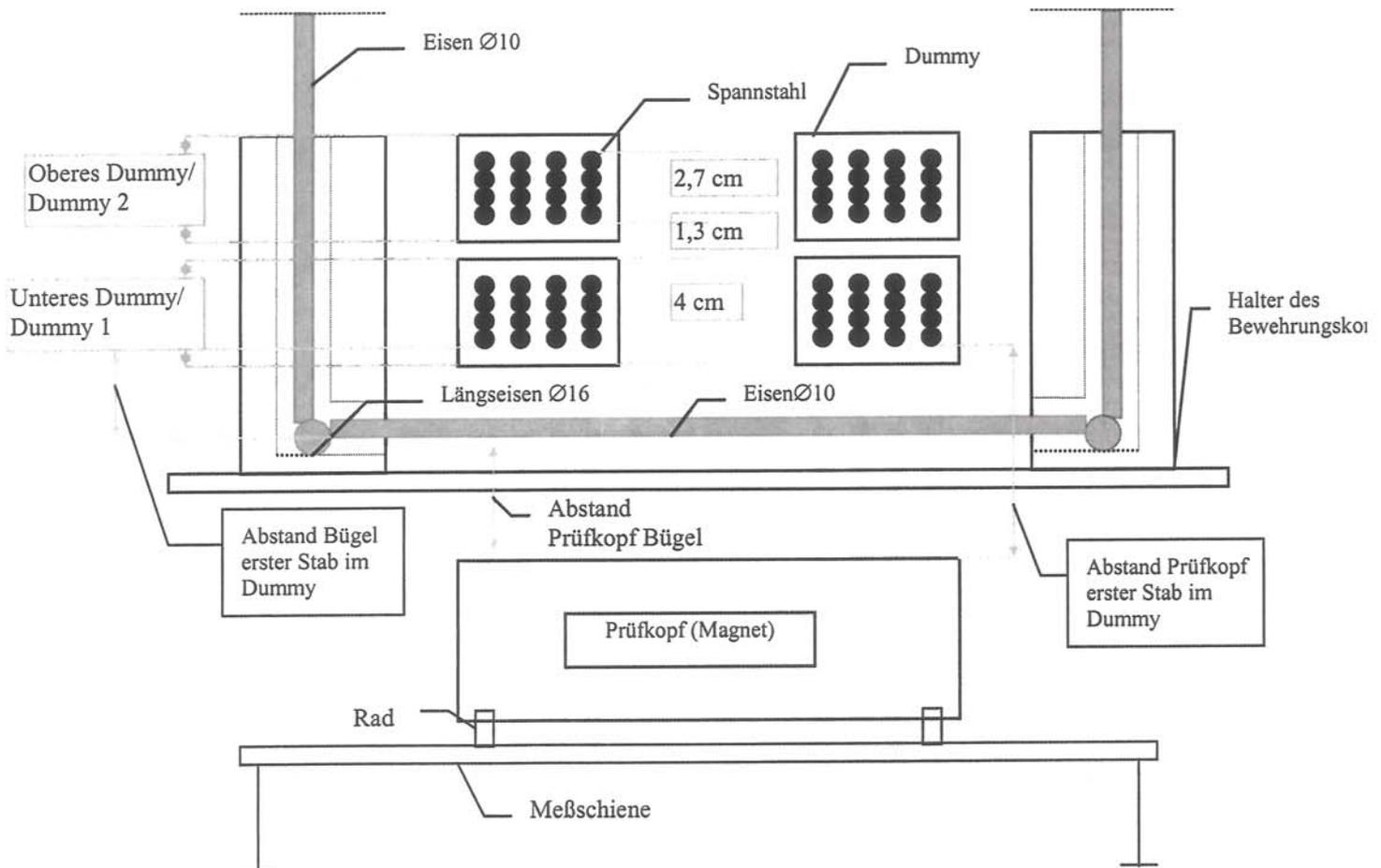


Bild 41: Schematische Darstellung der Laborversuche zur Kalibrierung von Bruchsignalen

## **Anlage 2**



# **Bericht über die Durchführung der Spanngliedunter- suchungen mit dem Remanenzmagnetismus- Verfahren und deren Ergebnisse**

**im Rahmen der**

**„Verifizierung zerstörungsfreier Prüfverfahren zur  
Detektion von Spannstahlschäden an Spannbeton-  
bauteilen mit nachträglichem Verbund“**

**Mai 2003**

**Auftraggeber:**

**Bundesanstalt für Material-  
forschung und –prüfung (BAM)**

**Berlin**

**BAM-Bestellnummer**

**Z.4220/02032305-1B/VII.32**

**Ausführung:**

**Technische Universität Berlin**

**Fakultät VI**

**Institut für Bauingenieurwesen**

**Fachgebiet Baustoffe und Baustoff-  
prüfung**

**Univ.-Prof. Dr.-Ing. Bernd Hillemeier**



## Inhalt

1	DER VORGANG.....	3
2	DIE PROBEKÖRPER.....	3
3	DIE DURCHFÜHRUNG DER MESSUNGEN.....	4
4	DIE EINGESETZTEN GERÄTE .....	5
4.1	MAGNET I.....	5
4.2	MAGNET II.....	7
4.3	DAS HALLSONDEN-ARRAY IM MESSWAGEN .....	8
5	DAS REMANENZMAGNETISMUS-VERFAHREN .....	9
6	DIE MESSDATENVERARBEITUNG .....	10
6.1	MAGNETISIERUNGSPROZEDUREN .....	10
6.2	DIE AUSWERTEPROZEDUR.....	14
7	ERGEBNISSE .....	16
8	WEITERES VORGEHEN .....	16
ANHANG	DIE ÜBERARBEITETEN MESSDATEN	16



## 1 Der Vorgang

Die Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung (BAM) erteilte am 28.08.2002 den Auftrag an die Technische Universität Berlin (TUB), Spanndrähte eines Spannbetonträgers aus der abgerissenen Hohenzollerndammbrücke zerstörungsfrei mit dem Remanenzmagnetismus-Verfahren gemäß Angebot vom 24.07.2002 auf Schäden zu untersuchen.

## 2 Die Probekörper

Bei den beiden Probekörpern handelt es sich um zwei halbe Träger aus der abgerissenen Hohenzollerndammbrücke über den Berliner Stadtring. Die Probekörper werden zur Zeit auf dem Gelände der BAM gelagert. Dort wurden auch die Untersuchungen der eingebauten Spannglieder auf Spanndrahtschäden durchgeführt.

Die Hohenzollerndammbrücke wurde in den Jahren 1957 und 1958 gebaut. Sie bestand aus zwei vorgespannten Überbauten mit jeweils etwa 24 m Stützweite. Die Spannglieder bestehen aus jeweils 16 Spanndrähten Neptun N 40 (St145/160), oval gerippt.

Mit dem Remanenzmagnetismus-Verfahren konnten pro Probekörper und Seite jeweils drei aussenliegende Spannglieder mit Betondeckungen von 6 bis 10 cm untersucht werden. Die untersuchten Spanngliedabschnitte wurden von Ost nach West und von oben nach unten durchnummeriert. Der Startpunkt der Messungen wird von markierten Stellen (Kerben in Spanndrähten) aus eingemessen. Bei den markierten Stellen handelt es sich um Kerben in Spanndrähten, weil die Träger im Rahmen der Schadensauswertung durch die BAM zu einem späteren Zeitpunkt zerlegt werden sollen. Die überprüften Spanngliedlängen sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

**Tabelle 1: Die untersuchten Spanngliedabschnitte**

Bezeichnung des Spanngliedabschnitts	Träger/ Seite/ Höhenlage	Startpunkt in cm	gemessen von der	Messlänge in cm
SG 1	I/ Ost/ oben	54		1061
SG 2	I/ Ost/ Mitte	54	Kerbe in einem Spanndraht	1060
SG 3	I/ Ost/ unten	54	des SG 1	744
SG 4	I/ West/ oben	73		1078
SG 5	I/ West/ Mitte	73	Kerbe in einem Spanndraht	1076
SG 6	I/ West/ unten	72	des SG 4	841
SG 7	2a/ Ost/ oben	40	Kerbe in einem Spanndraht	947
SG 8	2a/ Ost/ Mitte	44	des obersten Spannglieds	890
SG 9	2a/ Ost/ unten	37	(innenliegend, Ost)	537
SG 10	2a/ West/ oben	69	Kerbe in einem Spanndraht	929
SG 11	2a/ West/ Mitte	68	des obersten Spannglieds	928
SG 12	2a/ West/ unten	67	(innenliegend, West)	569

### 3 Die Durchführung der Messungen

Die Messungen wurden zunächst durchgeführt am 30.09.2002 und 01.10.2002. Die Auswertung zeigte, dass starke magnetische Störsignale, die wahrscheinlich von vorangegangenen magnetischen Untersuchungen durch andere Gruppen verursacht worden waren, die Interpretation der Messdaten erheblich beeinträchtigte. Eine erneute Untersuchung mit einer anderen Magnetisierungsprozedur war erforderlich. Die erneuten Messungen wurden durchgeführt am 24.03.2003 und am 25.03.03 (Abb. 1).

Alle Messungen wurden durchgeführt von den Herren

Dr.-Ing. Scheel,

Dipl.-Ing. Walther,

Schroeter.

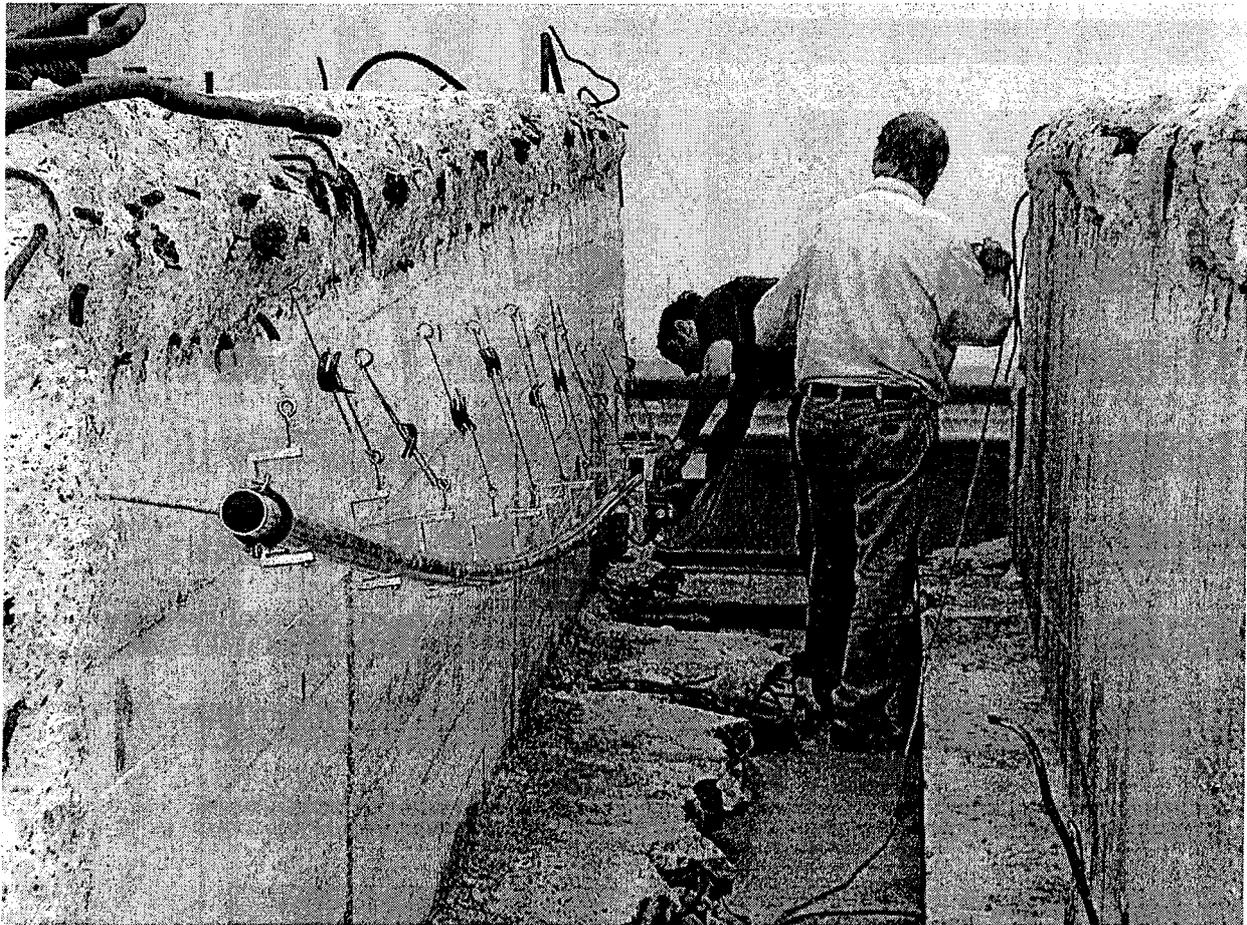
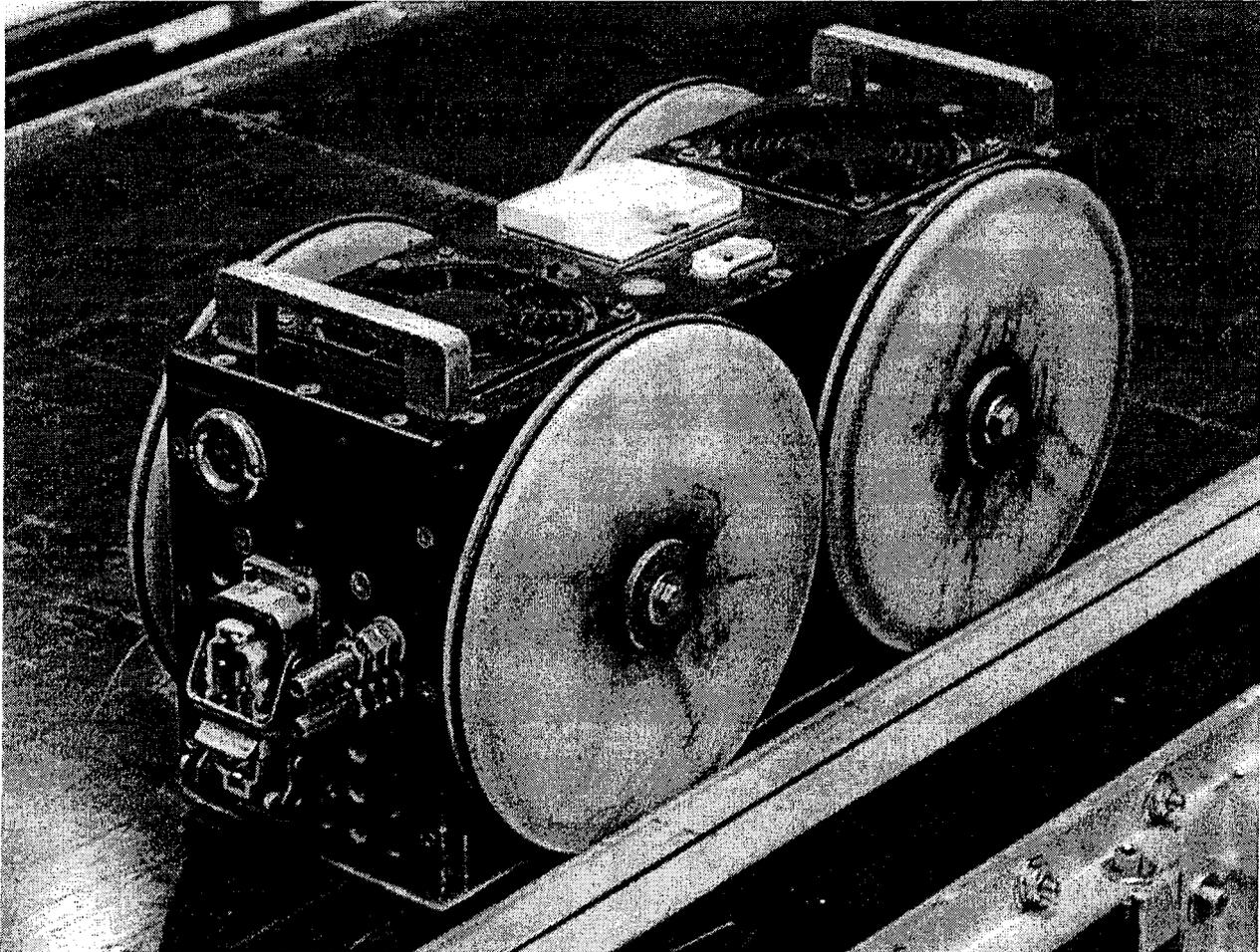


Abb. 1 Die Durchführung der Messarbeiten. Das Aluminiumrohr dient als Hilfskonstruktion, in die die Geräte eingehängt werden, um dem Spanngliedverlauf zu folgen.

## 4 Die eingesetzten Geräte

### 4.1 Der Magnet I

Für die Magnetisierung der Spannglieder von der Betonoberfläche aus werden Elektromagnete eingesetzt. Elektromagnete haben sich wegen der Regelbarkeit des erzeugten magnetischen Feldes als vorteilhaft erwiesen. Ein Magnet für die Spanngliedmagnetisierung stellt stets einen Kompromiss aus Handhabbarkeit hinsichtlich seiner Abmessungen und seines Gewichts und seiner Leistungsfähigkeit hinsichtlich der Magnetisierung dar.



**Abb. 2** Der für die Spanngliedmagnetisierung bei der ersten Messung genutzte Magnet I.

Der Magnet (Abb. 2), mit dem die ersten Untersuchungen durchgeführt wurden, besteht aus zwei 120 mm langen Spulen mit Weicheisenkernen (Füßen) der Abmessungen 120 mm x 80 mm x 25 mm, die einseitig über einen magnetischen Schluss (Rücken) mit den Abmessungen 400 mm x 100 mm x 30 mm, ebenfalls aus Weicheisen, gekoppelt sind. Das für die Herstellung der Füße und des Rückens verwendete Armco-Eisen zeichnet sich durch eine sehr hohe Sättigungsflussdichte  $B_S = 2,15 \text{ T}$  und eine kleine Koerzitivfeldstärke  $H_C = 50 \text{ A/m}$  aus. Die Spulen haben bei Raumtemperatur jeweils einen ohmschen Widerstand von  $R_S = 1,65 \Omega$  und sind in Reihe geschaltet. Der Magnet ist auf Gleichstrombetrieb ausgelegt. Gegen Überhitzung ist der Magnet durch einen Überlastungsschutz gesichert.

Die Gleichspannung wird von einem netzbetriebenen, stromgeregelten Steuergerät erzeugt. Das Steuergerät ist auf regelbaren Wechselspannungsbetrieb umschaltbar. Die maximale Ausgangsleistung des Steuergeräts beträgt  $P \approx 2$  kW. Die Einschaltdauer des Magneten bei Maximallast beträgt  $\tau \approx 2$  min; er ist 35 kg schwer.

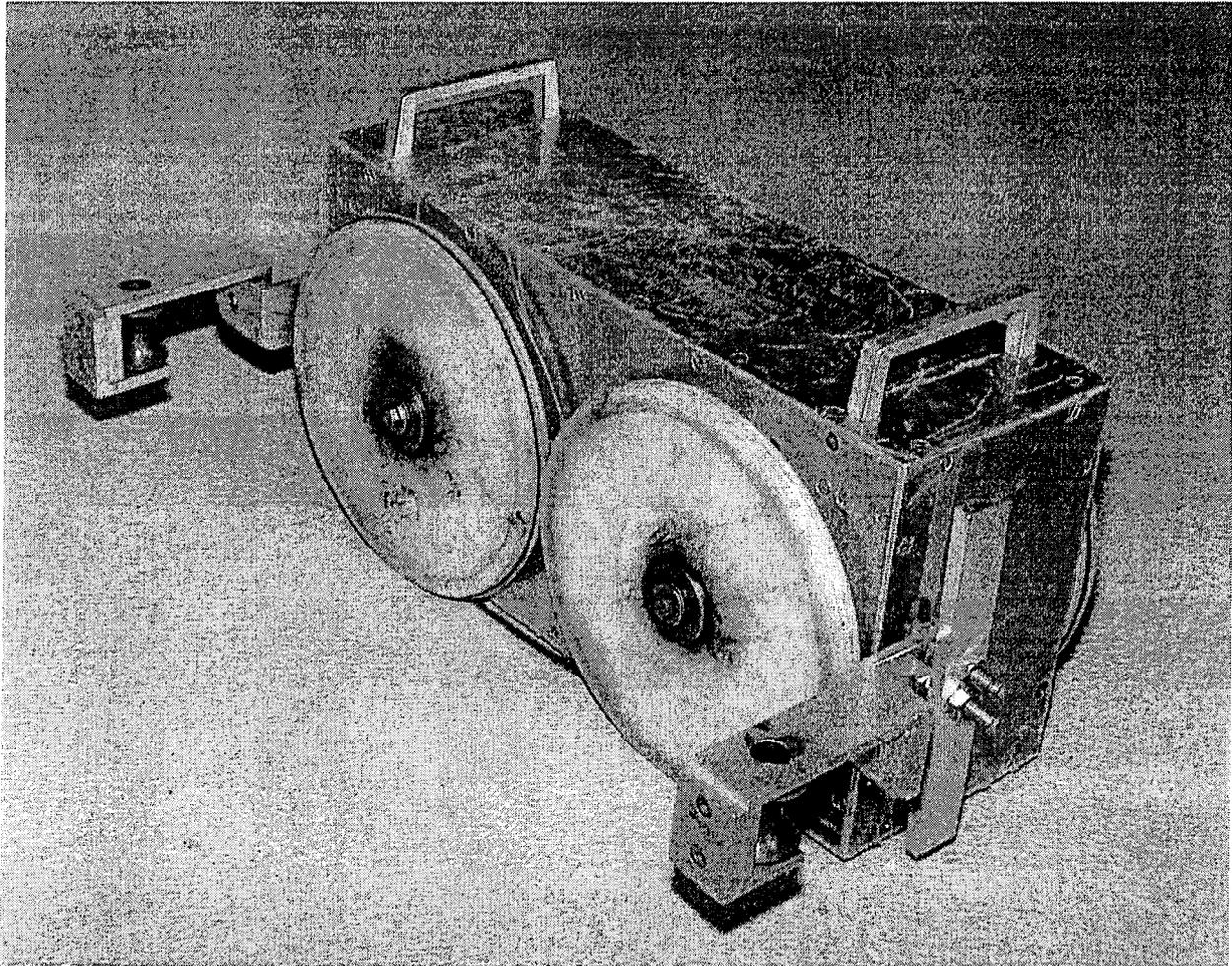
## 4.2 Der Magnet II

Zwischen der Durchführung der ersten Messung und der zweiten Messung wurde ein neuer leistungsfähigerer Magnet hergestellt.

Vorgaben für die Konstruktion des Magneten waren, dass die bewährte Jochform beibehalten wird, die Länge und Breite des Magneten nur in einem Maße zunehmen, dass vorhandene Hilfskonstruktionen zur Führung des Magneten im wesentlichen weiterhin genutzt werden können und auch die vorhandene Stromversorgung weiter genutzt werden können. Außerdem sollte die Masse des Magneten 75 kg nicht überschreiten. Die elektrischen Daten blieben aus den genannten Gründen die gleichen, während die Massen der eingesetzten Spulen, des Jochrückens und der Jochbeine sowie ihre Abmessungen gegenüber denen des Magneten I vergrößert wurden, um einen größeren magnetischen Fluss zu erzeugen.

Der gemäß dieser Randbedingungen hergestellte Magnet II (Abb. 3), besteht aus zwei 200 mm langen Spulen mit Weicheisenkernen (Füßen) mit den Abmessungen 200 mm x 80 mm x 80 mm, die einseitig über einen magnetischen Schluss (Rücken) mit den Abmessungen 400 mm x 100 mm x 30 mm, ebenfalls aus Weicheisen, gekoppelt sind.

Aufgrund der 5-fachen Kupfermasse der Spulen gegenüber denen des Magneten I vergrößert sich die Einschaltdauer bei Maximallast auf  $\tau > 10$  min.



**Abb. 3 Der Magnet II.**

### **4.3 Das Hallsonden-Array im Messwagen**

Der Messwagen ist mit einem Wegaufnehmer und zehn Hallsonden bestückt. Der Wegaufnehmer wird über eine Wagenachse angetrieben. Er wird von einer Steuereinheit mit Spannung versorgt und erzeugt pro Radumdrehung (Radumfang = 39,8 cm) 512 TTL-Signale. Das entspricht einer Wegauflösung von  $\Delta s = 0,777$  mm. Die Hallsonden sind paarweise über die Breite des Messwagens angeordnet. Fünf Sonden messen die axiale Feldkomponente, die anderen fünf Sonden die transversale Feldkomponente bezogen auf Längsachse des Messwagens. Die transversale Komponente liegt orthogonal zur Betonoberfläche. Die Hallsonden werden ebenfalls über die Steuereinheit mit Spannung versorgt. Die Hallspannung kann in der Steuereinheit abgeglichen und stufenweise verstärkt werden.

Die Signale der Hallsonden und des Wegaufnehmers werden über die Steuereinheit direkt auf die A/D-Wandlerkarte eines Messrechners geleitet und dort online mit einer speziell für diese Aufgabe entwickelten Messwerterfassungs-Software weiterverarbeitet.

## 5 Das Remanenzmagnetismus-Verfahren

Das Remanenzmagnetismus-Verfahren nutzt die ferromagnetischen Eigenschaften des Spannstahls zur zerstörungsfreien Lokalisierung von Spannstahlbrüchen. Das zu untersuchende Spannglied wird von der Betonoberfläche aus remanent magnetisiert.

An Bruchstellen einzelner Spanndrähte bilden sich magnetische Streufelder, wie sie auch an Bruchstellen gebrochener Stabmagneten entstehen (Dipolbildung an der Bruchstelle) (Abb. 4 links).

Im Anschluss an die Magnetisierung werden die axiale (parallel zur Betonoberfläche und zur Messrichtung gerichtete) und die transversale (orthogonal zur Betonoberfläche gerichtete) Komponente der magnetischen Flussdichte entlang dem Spanngliedverlauf an der Betonoberfläche gemessen. An Spanndrahtbrüchen zeigt sich ein charakteristischer Signalverlauf (Abb. 4 rechts). Die Bruchstelle befindet sich dort, wo die axiale Komponente ein Extremum und die transversale Komponente einen Wendepunkt besitzt.

Der Schädigungsgrad eines Spannglieds an einer Stelle, an der ein Bruchsignal aufgetreten ist, lässt sich bei Kenntnis anderer Parameter, wie der Betondeckung des Spannglieds, der Spannstahlart usw., aus der Stärke des Signals abschätzen.

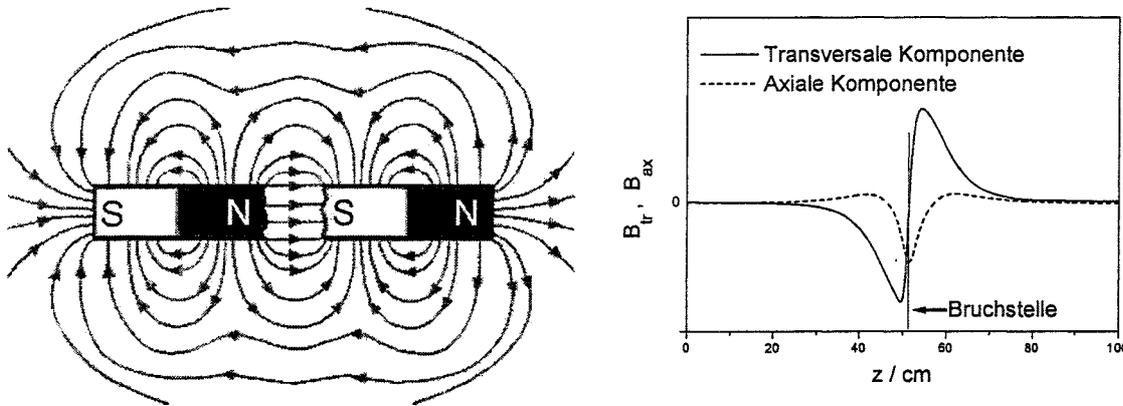


Abb. 4: Das magnetische Streufeld an Spannstahlbrüchen ähnelt dem Streufeld an einem gebrochenen Stabmagneten (links). Rechts sind die axiale (gestrichelt) und die transversale (durchgezogen) Komponente der magnetischen Streuflussdichte an der Bruchstelle eines Spanndrahts in einem Spannglied dargestellt.

## 6 Die Messdatenverarbeitung

### 6.1 Die Magnetisierungsprozedur

Bei der Auswertung der ersten Messungen musste festgestellt werden, dass bei diesen Messungen nicht auf eine Weise magnetisiert worden war, die gewährleistet, dass die magnetische Geschichte der Stahlbetonbewehrung, resultierend aus vorangegangenen Magnetisierungen, „überschrieben“ wurde. Die von der Stahlbetonbewehrung ausgehenden starken Störsignale, erlaubten keine zufriedenstellende Auswertung der Messsignale. Die Messungen wurden aus diesem Grund wiederholt. Dabei wurde mit dem leistungsfähigeren Magneten II die in Tabelle 2 zusammengestellte Magnetisierungsprozedur zur Magnetisierung des Spannglieds angewandt.

**Tab. 2 Die angewandte Magnetisierungsprozedur**

Nr.	Prozedur	Richtung	Messung
	Strom in A		
1	25	Süd	nein
2	25	Nord	nein
3	25	Süd	nein
4	25	Nord	nein
5	18,75	Süd	nein
6	14,06	Nord	nein
7	10,55	Süd	nein
8	7,91	Nord	nein
9	5,93	Süd	nein
10	4,45	Nord	Messung 1
11	4,45	Süd	Messung 2
12	3,34	Süd	nein
13	2,50	Nord	nein
14	1,88	Süd	nein
15	1,41	Nord	Messung 3
16	1,41	Süd	Messung 4
17	1,06	Süd	nein
18	0,79	Nord	nein
19	0,59	Süd	nein
20	0,45	Nord	nein
21	0,33	Süd	nein
22	0,25	Nord	Messung 5
23	0,25	Süd	Messung 6

Die Prozedur in Tabelle 2 erwies sich als geeignet, ein Spannglied mit Sicherheit ausreichend stark zu magnetisieren und darüber hinaus ausreichend definierte Magnetisierungszustände zu erzeugen, um Bruch- von Störsignalen unterscheiden zu können.

Die Spannglieder sind entlang der Nord-Süd-Richtung ausgedehnt. Die Nord- bzw. Süd-Richtung dient deshalb im Folgenden als Fahrtrichtungsangabe für den Elektromagneten. Die Fahrtrichtung des Magneten relativ zum Spannglied hat Auswirkungen auf das Vorzeichen der Magnetisierung der quer zum Spannglied ausgerichteten Bewehrung.

Folgende magnetische Zustände werden bei den Labormessungen in der angegebenen Reihenfolge erfasst:

- Messung 1 wird durchgeführt nach Anwendung der Magnetisierungsprozedur bis Schritt Nr.10 (4,45 A). Die letzte Fahrt führt von Süd nach Nord. Der magnetische Zustand nach dieser Prozedur ist ein magnetisiertes Spannglied und magnetisierte Stahlbetonbewehrung.
- Messung 2 wird durchgeführt, nachdem der Magnet II einmal mit einem Magnetisierungsstrom von 4,45 A von Nord nach Süd entlang dem zu untersuchenden Spannglied gefahren wurde. Diese Magnetisierung führt zu einer Umkehrung der Störsignale, die durch die Querbewehrung hervorgerufen werden, bezogen auf diese Signale in Messung 1. Das Spannglied wird durch diesen Magnetisierungsschritt hinsichtlich seines magnetischen Restfelds nicht signifikant beeinflusst.
- Messung 3 wird durchgeführt nach Fortführung der Magnetisierungsprozedur bis Schritt Nr.15 (1,41 A). Die letzte Fahrt führt von Süd nach Nord. Der magnetische Zustand nach dieser Prozedur ist ein magnetisiertes Spannglied und eine schwächer als nach Messung 1 magnetisierte Stahlbetonbewehrung.
- Messung 4 wird durchgeführt, nachdem der Magnet II einmal mit einem Magnetisierungsstrom von 1,41 A von Nord nach Süd entlang dem zu untersuchenden Spannglied gefahren wurde. Diese Magnetisierung führt zu einer Umkehrung der Störsignale, die durch die Querbewehrung hervorgerufen werden, bezogen auf diese Signale in Messung 3. Das Spannglied wird durch diesen Magnetisierungsschritt hinsichtlich seines magnetischen Restfelds nicht signifikant beeinflusst.
- Messung 5 wird durchgeführt nach Fortführung der Magnetisierungsprozedur bis Schritt Nr.22 (0,25 A). Die letzte Fahrt führt von Süd nach Nord. Der magnetische Zustand nach dieser Prozedur ist ein magnetisiertes Spannglied und schwach magnetisierte Stahlbetonbewehrung. Nur in den Polbereichen der Spannglieder ist die schwache Bewehrung durch die Wechselwirkung mit dem magnetischen Feld der Spannglieder stärker aufmagnetisiert.

- Messung 6 wird durchgeführt, nachdem der Magnet II einmal mit einem Magnetisierungsstrom von 0,25 A von Nord nach Süd entlang dem zu untersuchenden Spannglied gefahren wurde. Diese Magnetisierung führt, soweit diese noch vorhanden sind, zu einer Umkehrung der Störsignale, die durch die Querbewehrung hervorgerufen werden, bezogen auf diese Signale in Messung 5. Das Spannglied wird durch diesen Magnetisierungsschritt hinsichtlich seines magnetischen Restfelds nicht signifikant beeinflusst. In den Polbereichen, in denen die Störsignale letztlich aus der Wechselwirkung der Stahlbetonbewehrung mit dem magnetischen Feld des Spannglieds resultieren, gelingt die Umpolung wegen des unveränderten Felds des Spannglieds nicht.

Die Messungen und die magnetischen Zustände, die sie repräsentieren, sind in Tabelle 3 zusammengefasst.

**Tab. 3 Messungen und magnetische Zustände**

Messung	Magnetischer Zustand
1	SG magnetisiert, BS magnetisiert
2	SG magnetisiert, BS magnetisiert, Signale durch Querbewehrung umgekehrt gegenüber Messung 1
3	SG magnetisiert, BS schwächer magnetisiert
4	SG magnetisiert, BS schwächer magnetisiert, Signale durch Querbewehrung umgekehrt gegenüber Messung 3
5	SG magnetisiert, BS schwach magnetisiert (außer im Polbereich)
6	SG magnetisiert, BS schwach magnetisiert (außer im Polbereich), Signale durch Querbewehrung umgekehrt gegenüber Messung 5 (außer im Polbereich)
<b>SG: Spannglied; BS: Betonstahl</b>	

## 6.2 Die Auswerteprozedur

Zur Auswertung der Messdaten wird jede Messspur des Hallsonden-Arrays für sich betrachtet. Herangezogen werden zunächst die Messungen 5 und 6. Bei diesen Messungen ist das Spannglied maximal magnetisiert, während die Stahlbetonbewehrung, im Vergleich zu den anderen Messungen, nur schwach magnetisiert ist. Die Messungen 1 bis 4 werden dann zur Auswertung herangezogen, wenn in den Messungen 5 und 6 bruchartige Signale auftreten, die auch von der Stahlbetonbewehrung ausgehen könnten.

Abb. 5 zeigt die Bearbeitungsschritte exemplarisch an der Bearbeitung der Messspur 3 der Messung 6 am Spannglied SG 4. An eine Messkurve (schwarze Kurve in Abb. 5) wird zunächst die Summe zweier Exponentialfunktionen, die dem Messkurvenverlauf der Messung an einem intakten Spannglied ohne Störsignale sehr nahe kommt, angepasst. Die sich ergebende Kurvenanpassung (rote Kurve in Abb. 5) wird von der Messkurve subtrahiert, so dass nur der Anteil der Messkurve, der von dem Kurvenverlauf der Messung an einem intakten Spannglied ohne benachbarte Ferromagnetika (Stahlbetonbewehrung) abweicht, übrig bleibt (blaue Kurve in Abb. 5). Dieser Anteil enthält eventuelle Bruchsignale und Störsignale. Er wird interpretiert.

Die Störsignale in den Polbereichen, die von der durch das Spannglied in diesen Bereichen magnetisierten Stahlbetonbewehrung ausgehen, sind bei den vorliegenden Messungen derart stark, dass jeweils etwa der erste und der letzte Meter einer Messkurve nur eingeschränkt interpretierbar sind.

bam240303\_sg4\_kurven63

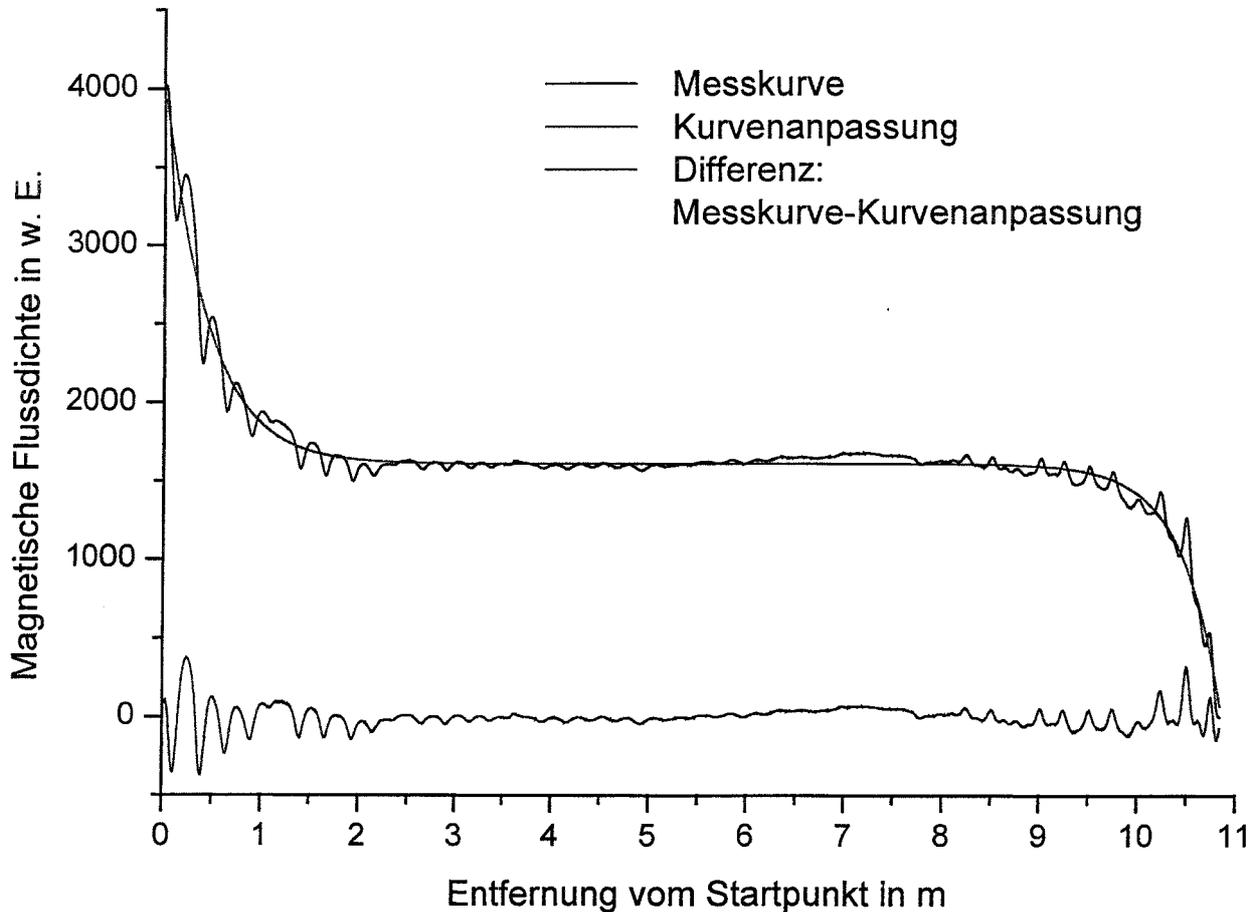


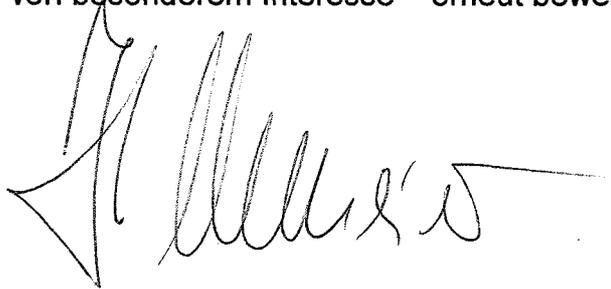
Abb. 5: Vorgehen bei der Auswertung der Messkurven. Die rote Kurve ist eine Kurvenanpassung an die schwarze Messkurve. Die blaue Kurve ist die Differenz beider Kurven. Sie enthält exakt die gleichen potenziellen Bruchsignale wie die Messkurve, kann aber stärker graphisch verstärkt werden (siehe Kurven im Anhang „Bearbeitete Messkurven“).

## 7 Die Ergebnisse

Nur in dem Spanngliedabschnitt SG 12 trat 97 cm hinter dem Startpunkt ein Bruchsignal auf. An dieser Stelle war das betreffende Spannglied (SG 12) durch eine Bohrkernentnahme beschädigt worden. Weitere bruchartige Signale wurden nicht festgestellt.

## 8 Das weitere Vorgehen

Die Messkurven werden nach dem Freilegen und der zerstörenden Untersuchung der Spanndrähte und dem Vorliegen von Photographien zur Lage und Anordnung der Stahlbetonbewehrung – hier ist die „parallel“ zum Spannglied verlaufende Stahlbetonbewehrung von besonderem Interesse – erneut bewertet.





## Anhang

### Überarbeitete Messkurven

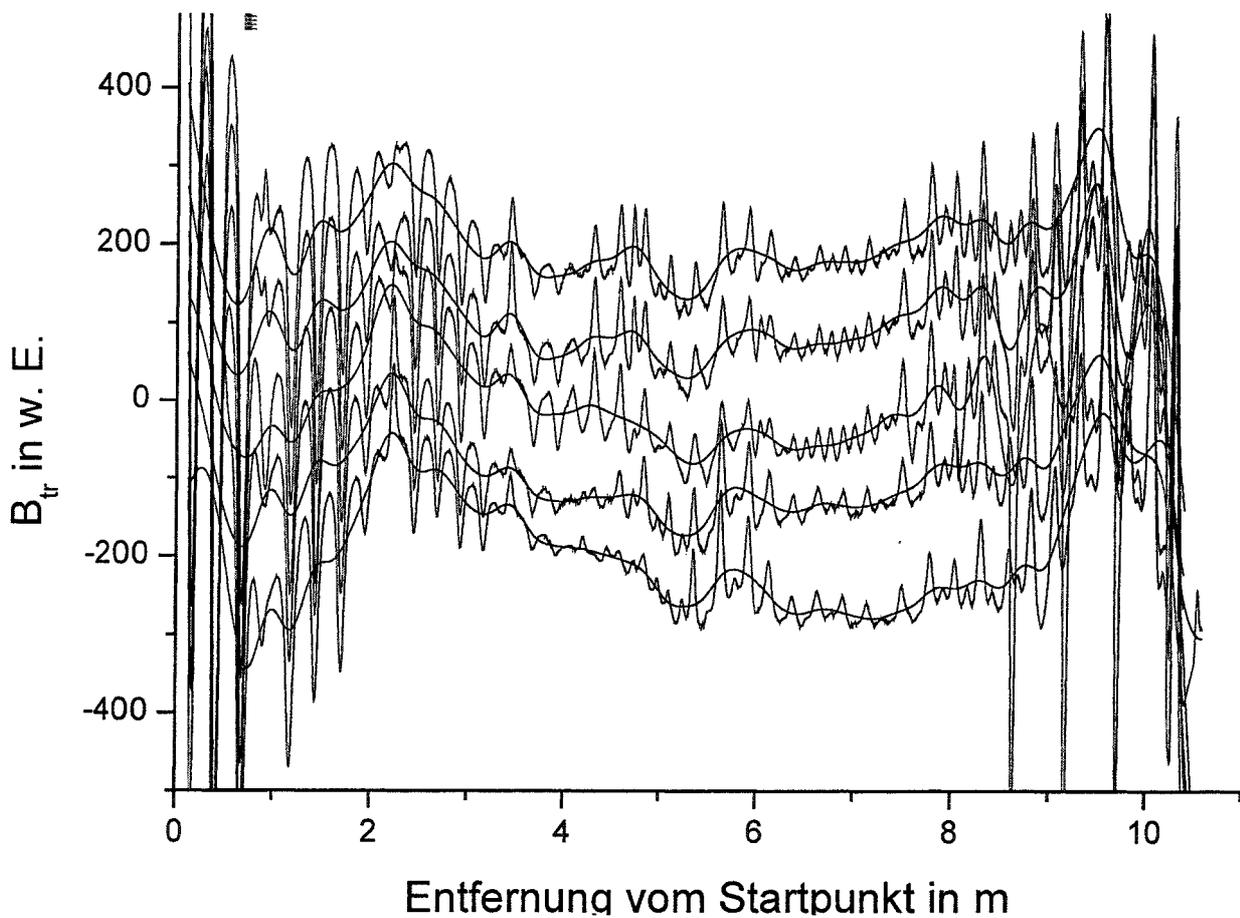


Abb. 1: Bearbeitete Messkurven und zugehörige geglättete Kurven der Messung am Spannglied SG 1. Die Messkurven sind von 5 nebeneinander im Abstand von etwa 2 cm zueinander angeordneten Hallsonden aufgenommen worden.

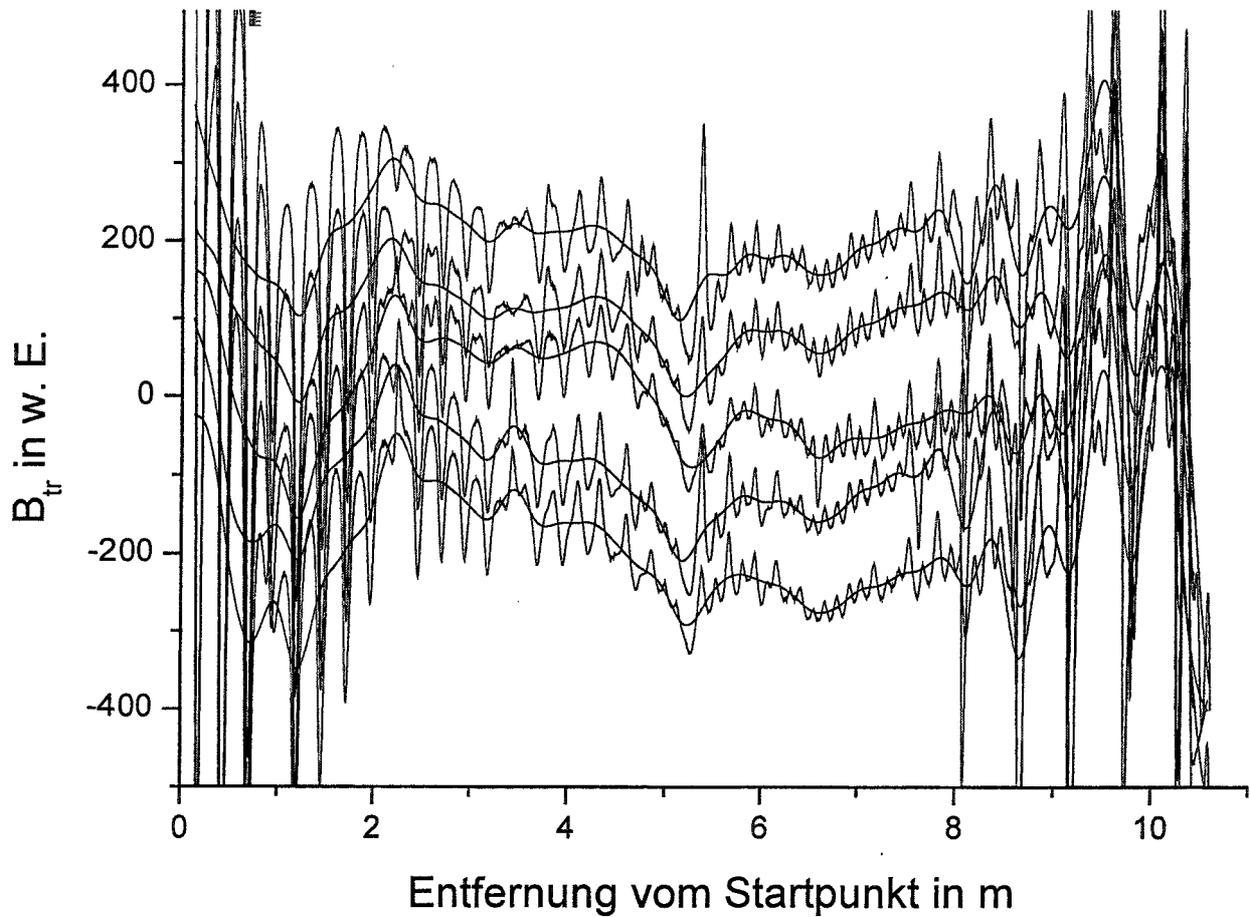


Abb. 2: Bearbeitete Messkurven und zugehörige geglättete Kurven der Messung am Spannglied SG 2. Die Messkurven sind von 5 nebeneinander im Abstand von etwa 2 cm zueinander angeordneten Hallsonden aufgenommen worden.

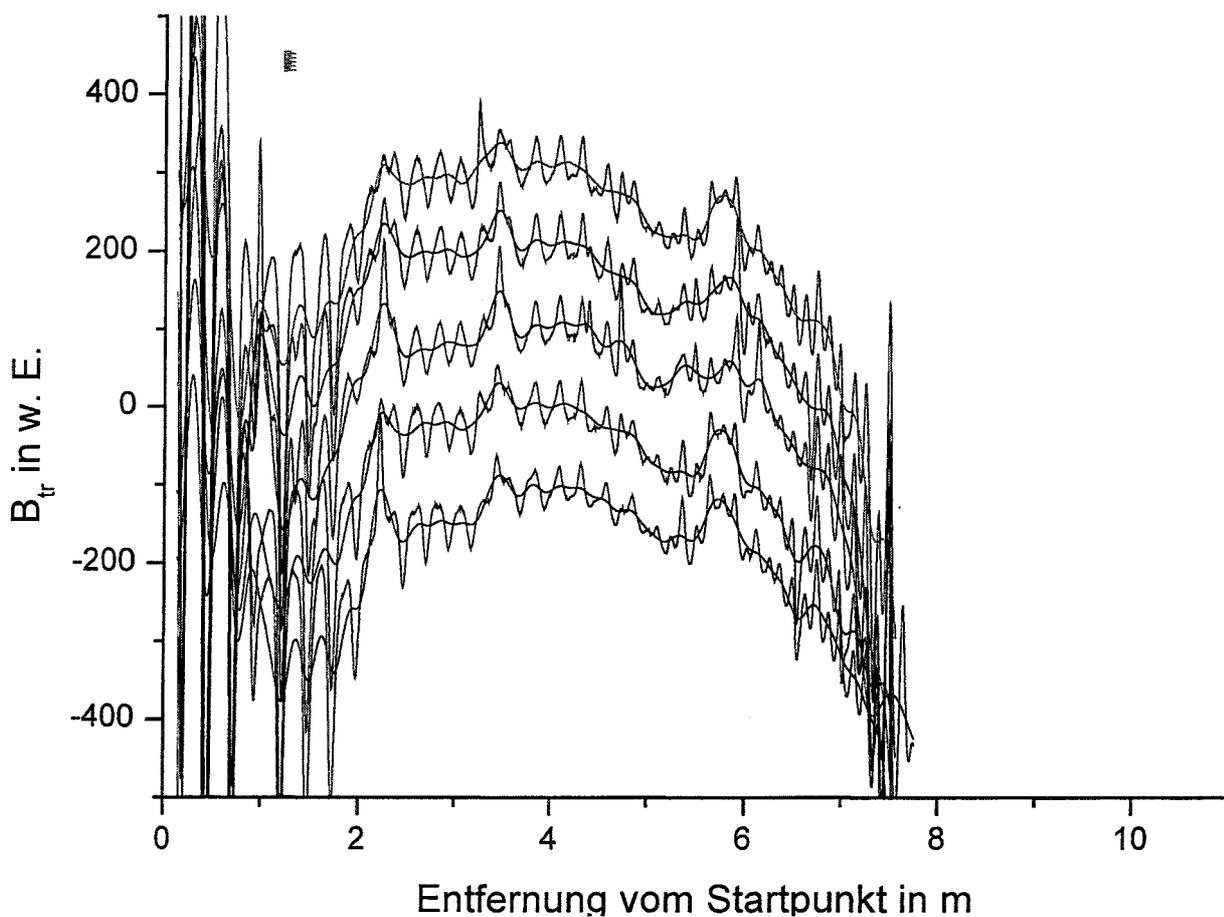


Abb. 3: Bearbeitete Messkurven und zugehörige geglättete Kurven der Messung am Spannglied SG 3. Die Messkurven sind von 5 nebeneinander im Abstand von etwa 2 cm zueinander angeordneten Hallsonden aufgenommen worden.

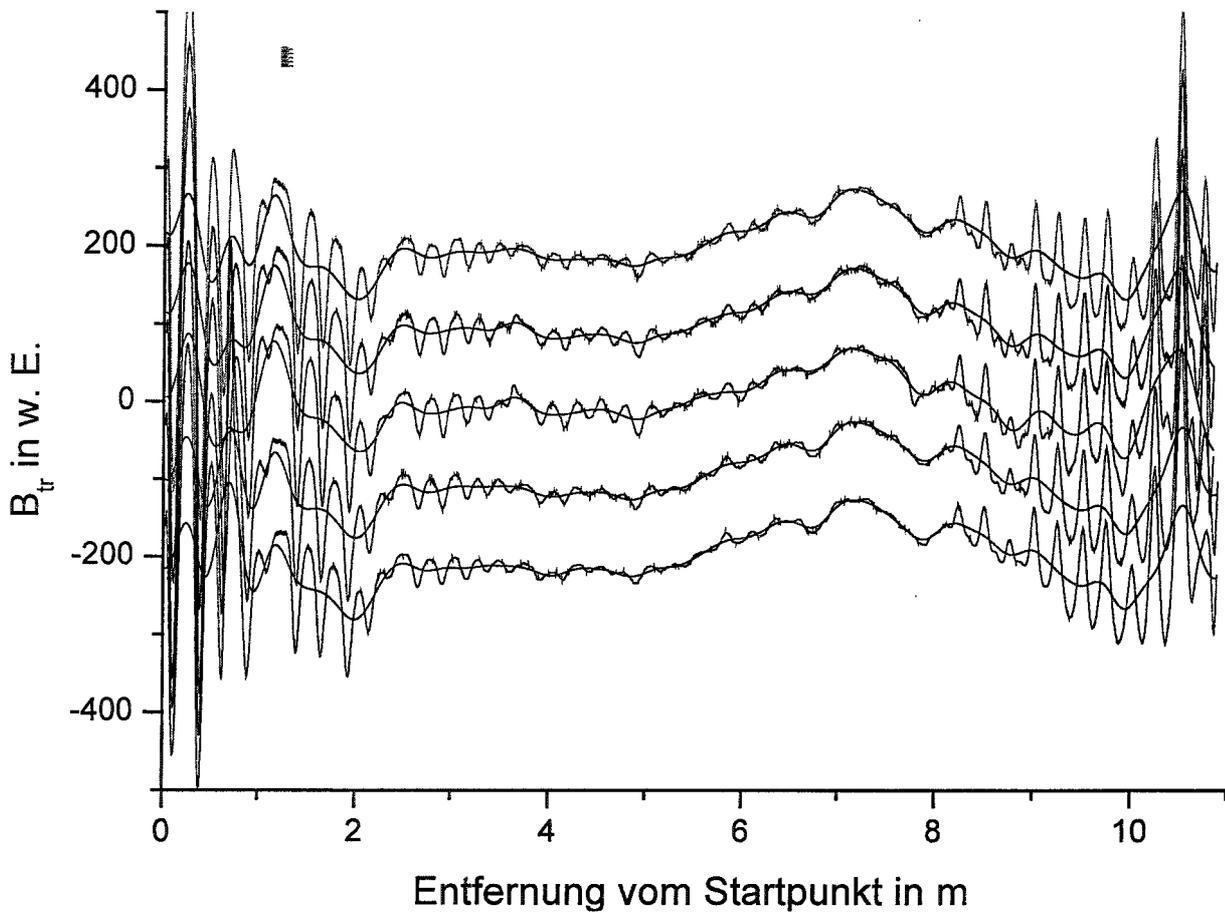


Abb. 4: Bearbeitete Messkurven und zugehörige geglättete Kurven der Messung am Spannglied SG 4. Die Messkurven sind von 5 nebeneinander im Abstand von etwa 2 cm zueinander angeordneten Hallsonden aufgenommen worden.

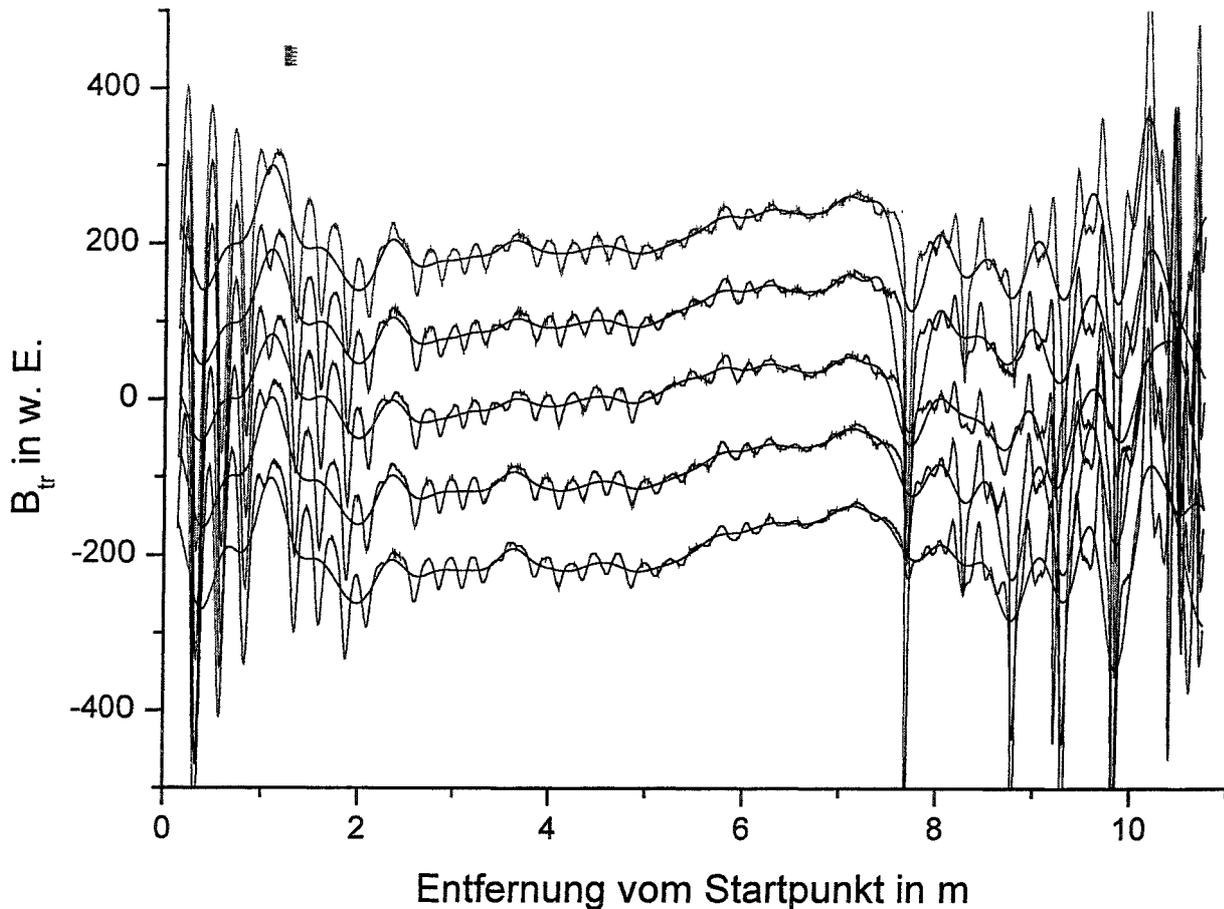


Abb. 5: Bearbeitete Messkurven und zugehörige geglättete Kurven der Messung am Spannglied SG 5. Die Messkurven sind von 5 nebeneinander im Abstand von etwa 2 cm zueinander angeordneten Hallsonden aufgenommen worden.

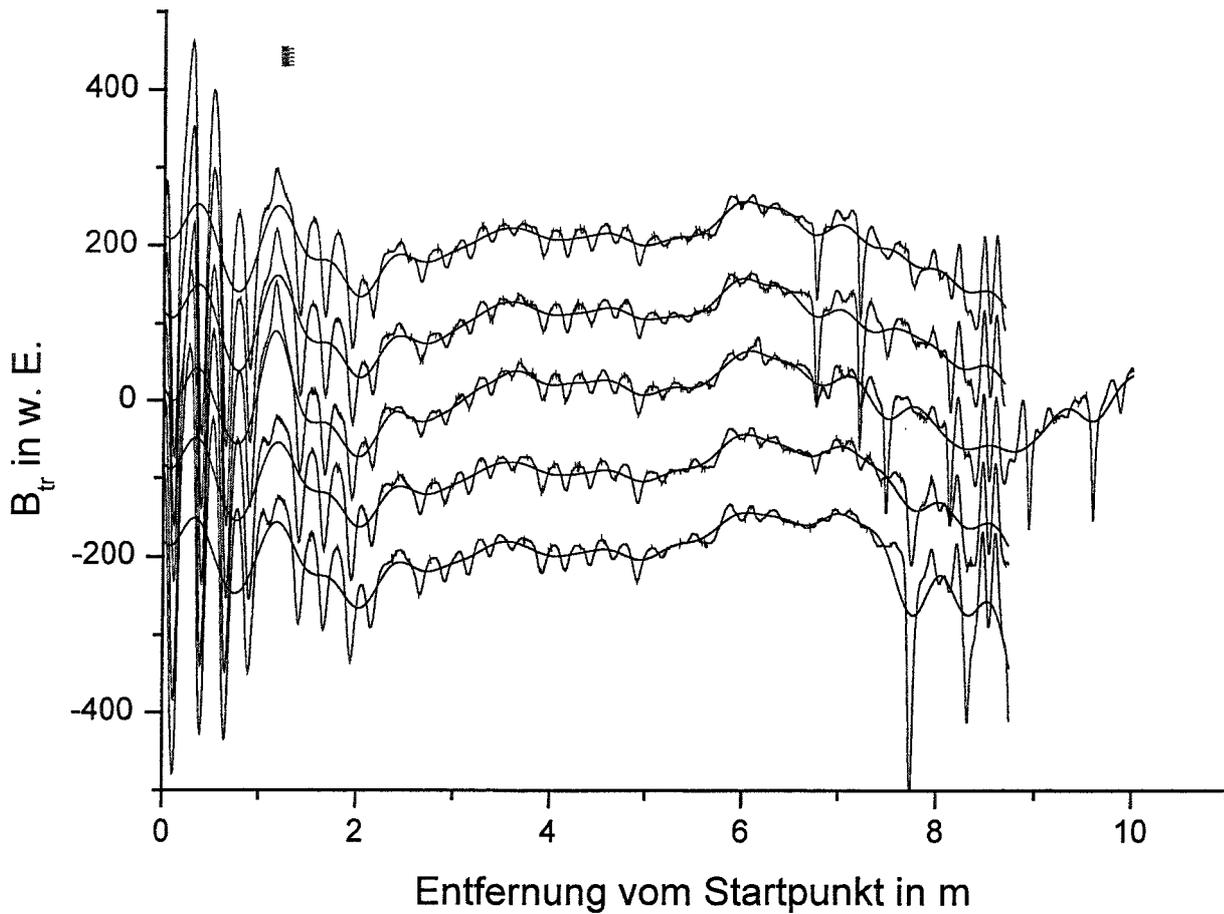


Abb. 6: Bearbeitete Messkurven und zugehörige geglättete Kurven der Messung am Spannglied SG 6. Die Messkurven sind von 5 nebeneinander im Abstand von etwa 2 cm zueinander angeordneten Hallsonden aufgenommen worden.

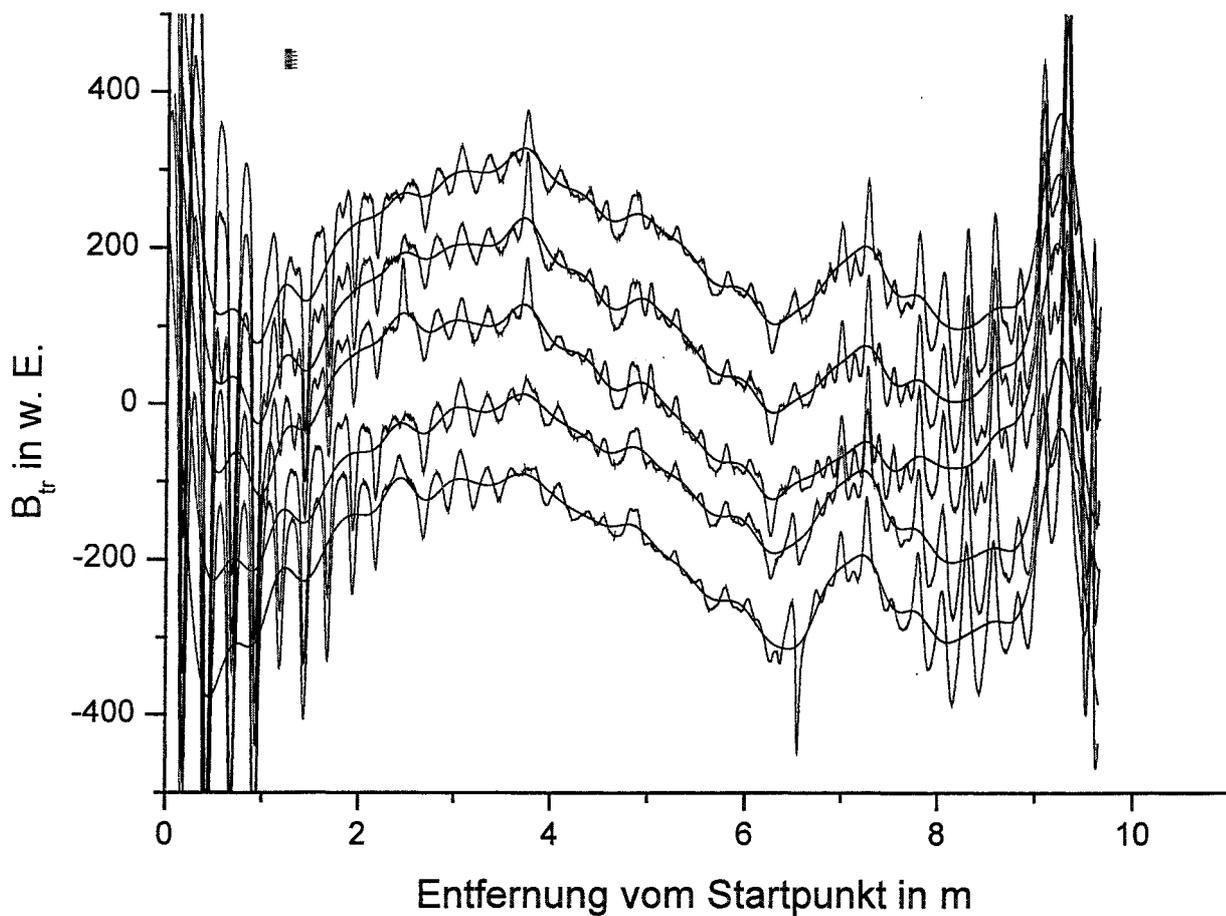


Abb. 7: Bearbeitete Messkurven und zugehörige geglättete Kurven der Messung am Spannglied SG 7. Die Messkurven sind von 5 nebeneinander im Abstand von etwa 2 cm zueinander angeordneten Hallsonden aufgenommen worden.

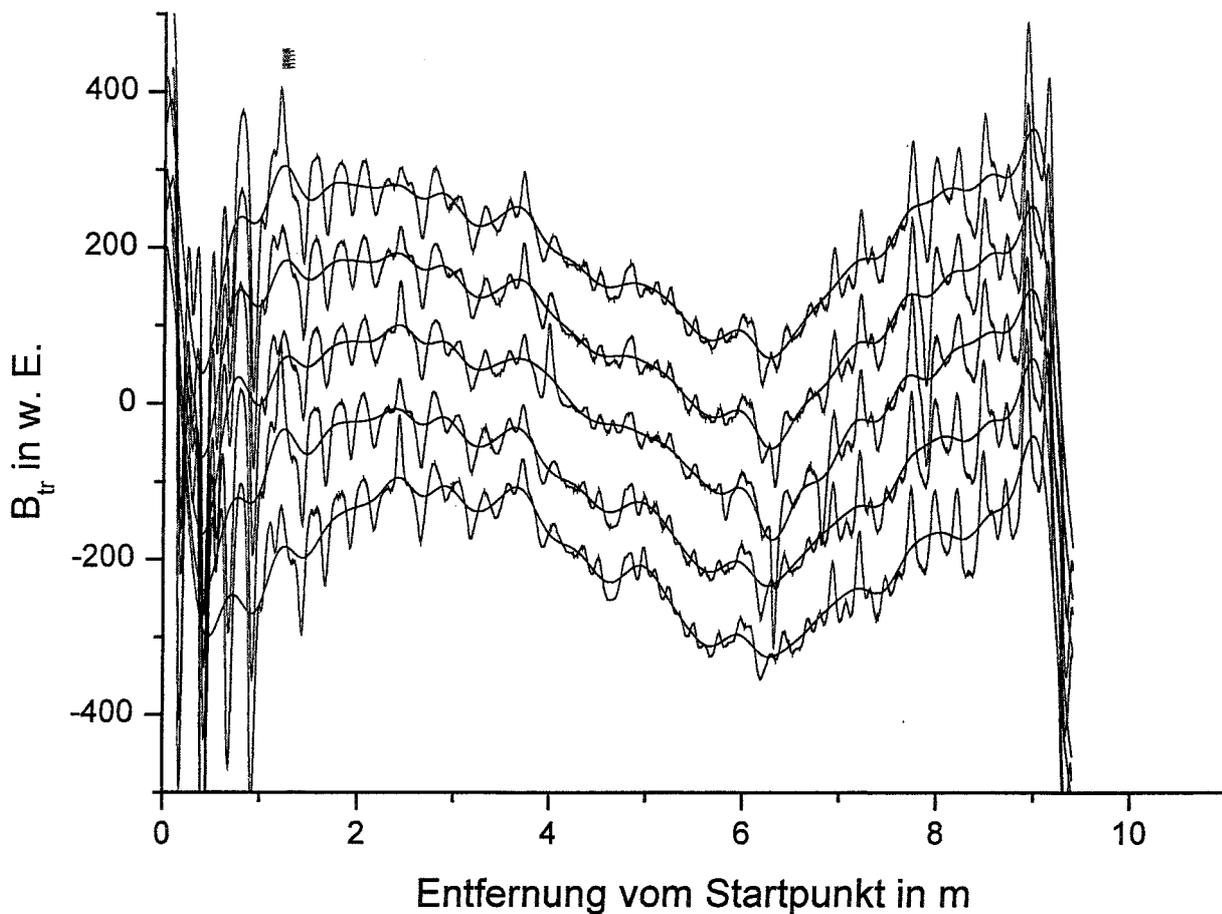


Abb. 8: Bearbeitete Messkurven und zugehörige geglättete Kurven der Messung am Spannglied SG 8. Die Messkurven sind von 5 nebeneinander im Abstand von etwa 2 cm zueinander angeordneten Hallsonden aufgenommen worden.

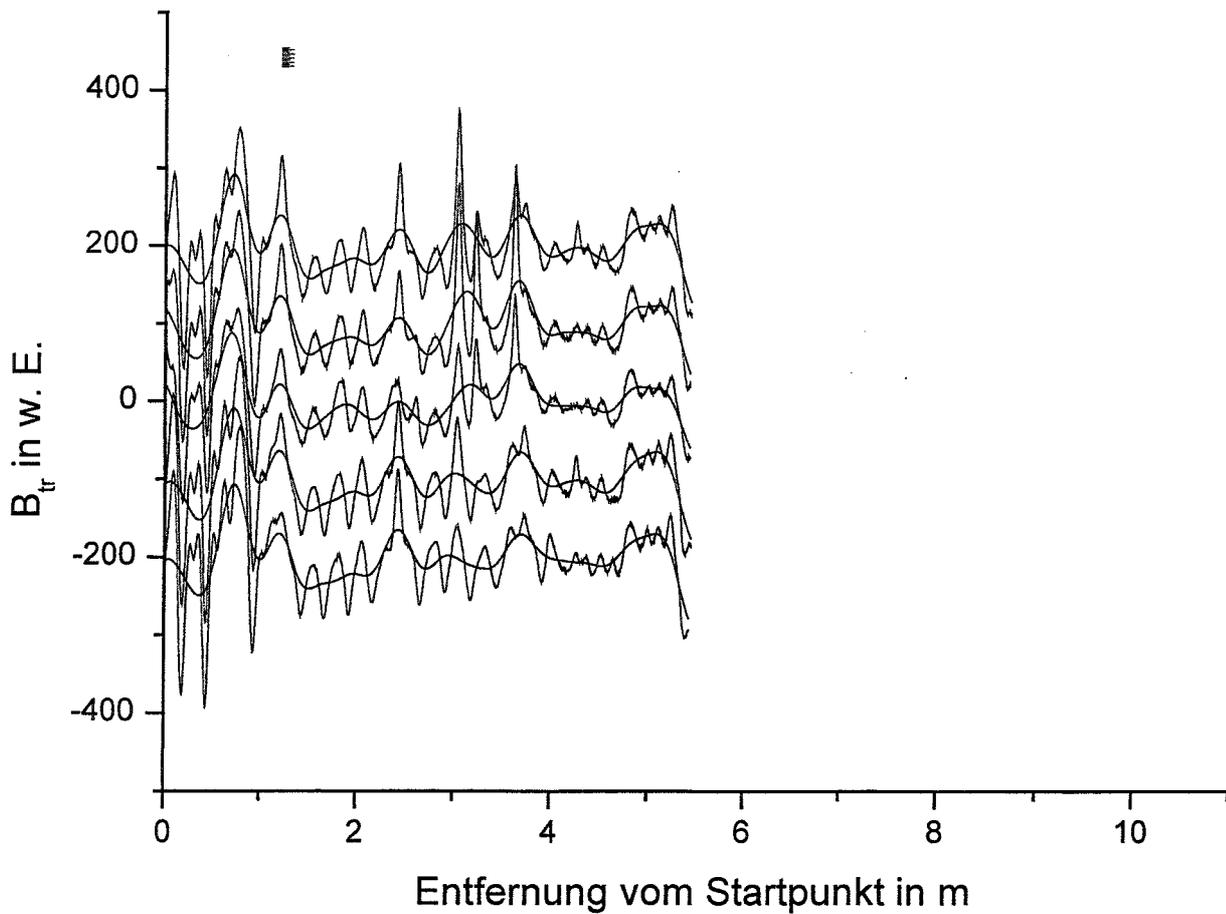


Abb. 9: Bearbeitete Messkurven und zugehörige geglättete Kurven der Messung am Spannglied SG 9. Die Messkurven sind von 5 nebeneinander im Abstand von etwa 2 cm zueinander angeordneten Hallsonden aufgenommen worden.

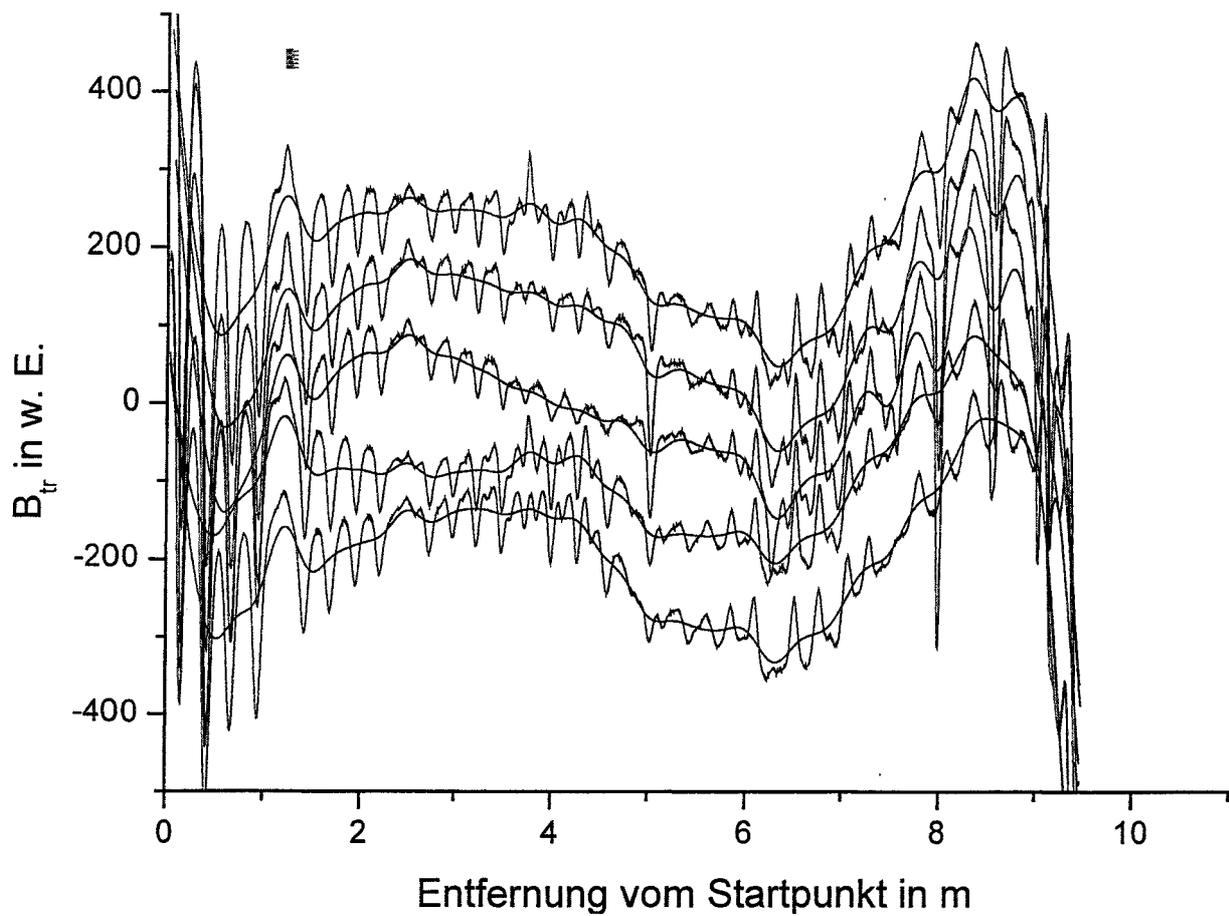


Abb. 10: Bearbeitete Messkurven und zugehörige geglättete Kurven der Messung am Spannglied SG 10. Die Messkurven sind von 5 nebeneinander im Abstand von etwa 2 cm zueinander angeordneten Hallsonden aufgenommen worden.

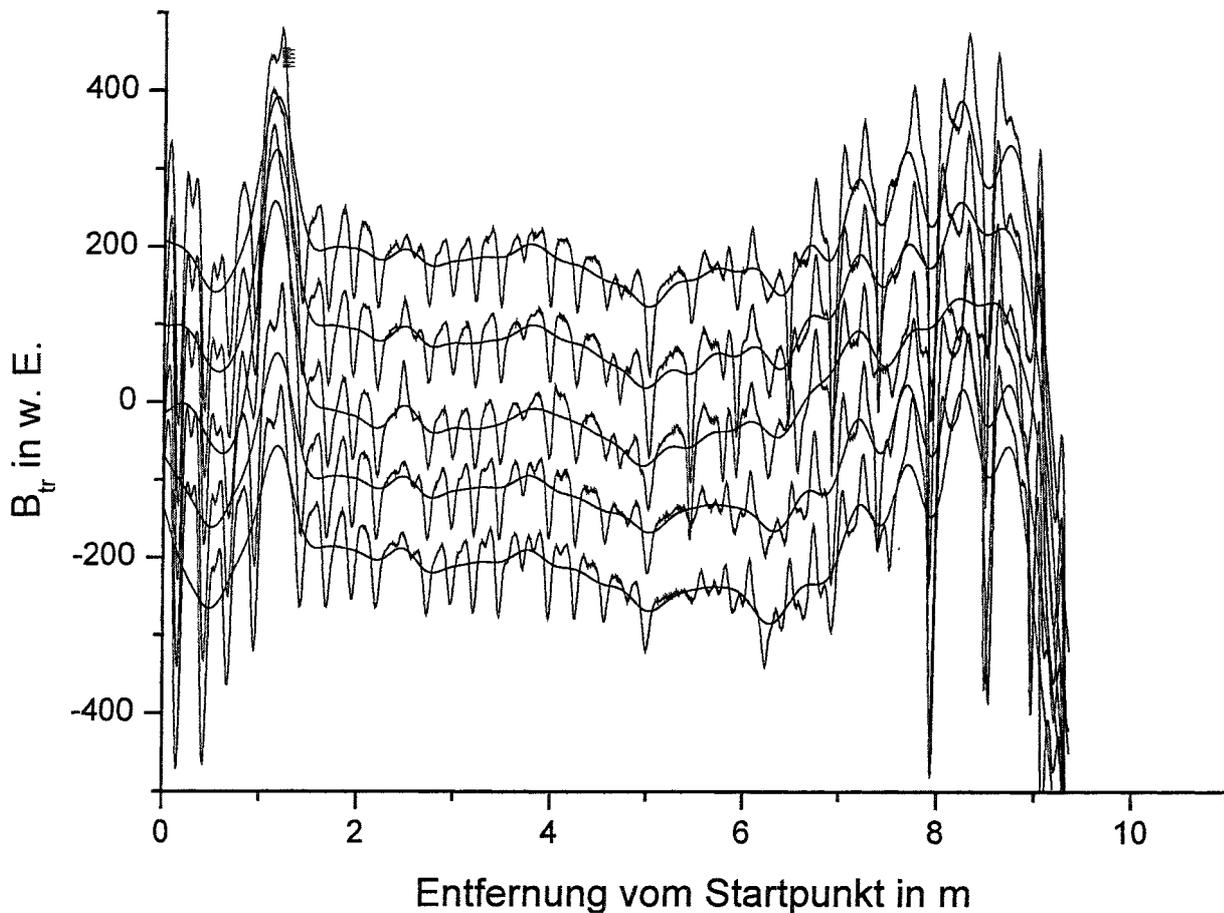


Abb. 11: Bearbeitete Messkurven und zugehörige geglättete Kurven der Messung am Spannglied SG 11. Die Messkurven sind von 5 nebeneinander im Abstand von etwa 2 cm zueinander angeordneten Hallsonden aufgenommen worden.

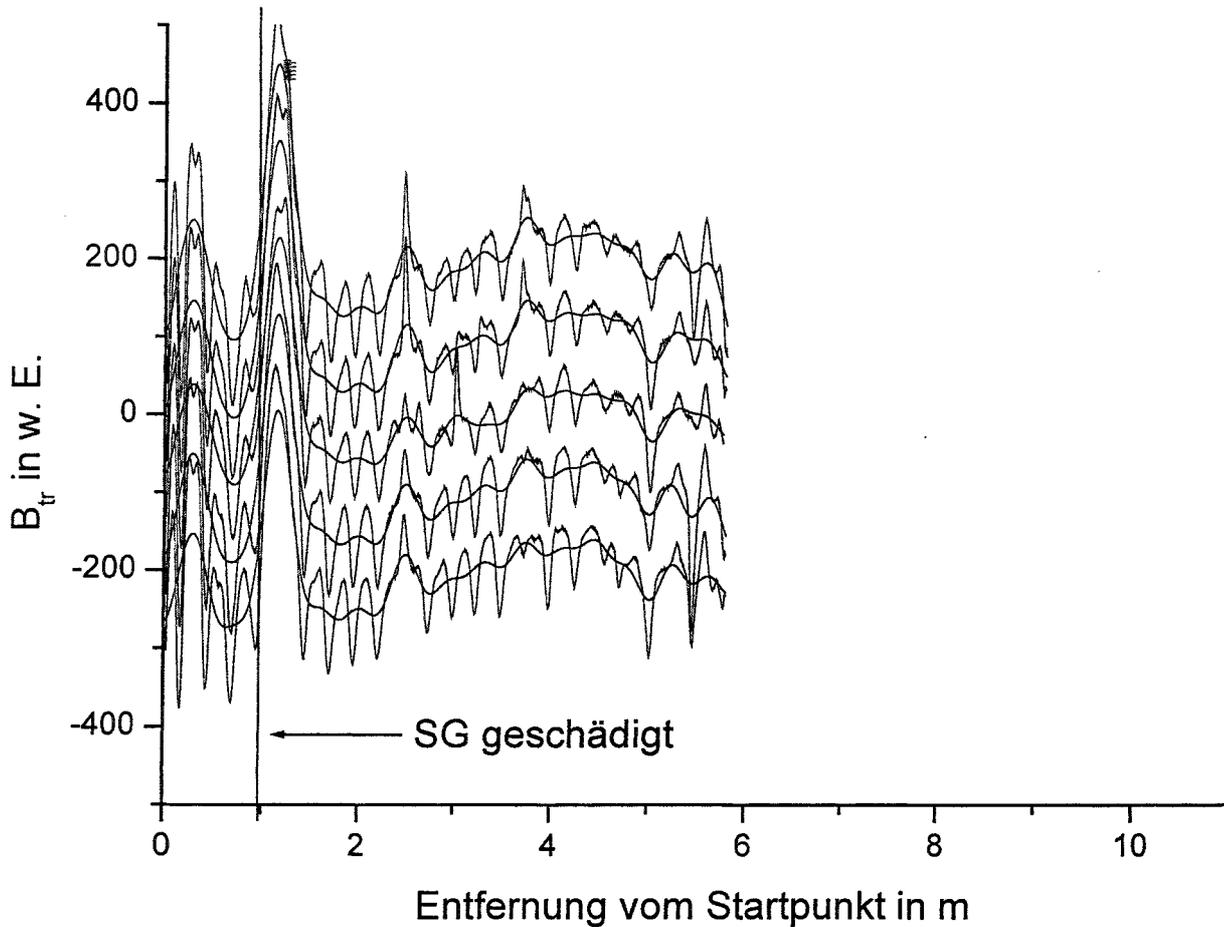


Abb. 12: Bearbeitete Messkurven und zugehörige geglättete Kurven der Messung am Spannglied SG 12. Die Messkurven sind von 5 nebeneinander im Abstand von etwa 2 cm zueinander angeordneten Hallsonden aufgenommen worden. Das Spannglied war an der gekennzeichneten Stelle durch eine Bohrkernentnahme geschädigt.

## **Anlage 3**

**Untersuchungen an der alten Hohenzollerndammbrücke Berlin  
mit dem HF-Bruchortungsverfahren auf der Basis  
der elektromagnetischen Resonanzmessung**

Dipl.-Ing. Hans-Joachim Wichmann

Dipl.-Ing. Alexander Holst

Dr.-Ing. Karim Hariri

Prof. Dr.-Ing. Harald Budelmann

Abschlussbericht 9001/0013

Juni 2004

## 1 Aufgabenstellung

Im Rahmen des Sonderforschungsbereiches SFB 477 „Bauwerksüberwachung“ wird am Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB) der TU Braunschweig ein neuartiges zerstörungsfreies Bruchortungsverfahren für vorgespannte Stahlzugglieder auf der Grundlage der elektromagnetischen Resonanzmessung entwickelt, [1]. Bisher wurde dieses Bruchortungsverfahren an einfachen balkenförmigen Versuchsbauteilen im Labormaßstab und an industriell produzierten Spannbetonhohlplatten erfolgreich erprobt.

Die Untersuchungen an den beiden rückgebauten und auf dem Gelände der Bundesanstalt für Materialprüfung und -forschung (BAM) in Berlin befindlichen Teilträgern der alten Hohenzollerndamm-Brücke Berlin stellen den erstmaligen Praxiseinsatz an einem Betonbauteil dar, welches älter als 5 Jahre ist.

Als wesentliche, gegenüber den bisherigen Laboruntersuchungen neuartige Randbedingungen sind aufzuführen:

- reale Anordnung der Spannglieder im Bauteil, d.h. im Bündel mit parabelförmigem Spanngliedverlauf, Hüllrohr, Einpressmörtel und Schlaffarmierung
- 45 Jahre alte in-situ-Bauteile mit entsprechender Belastungsgeschichte, Schadensbildern und Material- und Bauteilzustand sowie
- unbekannter Schädigungsgrad und -ort der zu überprüfenden Spannglieder.

Entsprechend dem BAM-Gutachten (BAM-Az.: VII.4/13364) ist von einem insgesamt guten Zustand der Brückenträger und der Spannglieder auszugehen. Es werden jedoch einzelne Anrisse und Brüche an den Spannstählen infolge Spannungsrisskorrosion vermutet.

Gemäß der Auftragserteilung vom 11.07.2002 durch die BAM (Auftragsnummer Z.4359/02026120-1B/VII.32) wurden im Zeitraum vom 24.10.2002 bis 20.11.2003 insgesamt vier Vor-Ort-Untersuchungen mit dem HF-Bruchortungsverfahren durchgeführt. Das Ziel dieser Untersuchungen lag in der Detektion und Ortung von Spannstahlbrüchen an den verlegten Spannkabeln. Auf die Ergebnisse dieser Untersuchungen wird im Kapitel 3 eingegangen.

Zur Verifikation wurden am iBMB ergänzend mehrere Laborversuchskörper hergestellt und versuchstechnisch geprüft. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen werden im Kapitel 4 kurz vorgestellt.

## 2 Messprinzip der elektromagnetischen Resonanzmessung

### 2.1 Grundlagen

Bei der elektromagnetischen Resonanzmessung werden die Spannglieder im Beton als ungeschirmte Resonatoren betrachtet, die sich in einem verlustbehafteten Material befinden. Eine elektromagnetische Welle wird an einem Punkt des Spanngliedes in den Stahl eingekoppelt. Die Frequenz der eingekoppelten Welle wird dann systematisch über ein vorher bestimmtes Spektrum systematisch verändert. Am Ort der Einkopplung wird der Reflektionsparameter  $S_{11}$  der Anordnung über der Anregungsfrequenz gemessen. Der Reflektionsparameter gibt mit Betrag und Phase denjenigen Anteil der eingekoppelten Welle an, der vom Stabende bzw. Bruchort zum Punkt der Ankopplung reflektiert wird. Aus dem so erhaltenen Spektrum werden die Resonanzfrequenzen  $f_{\text{res}}$  (Minimalfrequenzen) der Anordnung bestimmt. Der Abstand zweier benachbarter Resonanzen der Ordnungen  $i$  und  $i+1$   $\Delta f = |f_{i+1} - f_i|$  voneinander ist eine Funktion der Materialparameter des die Spannstähle umgebenden Stoffes, beispielsweise Beton, und der Länge des ggf. durch einen Bruch verkürzten Spanngliedes. Im einfachsten Fall, wenn keine bzw. nur eine sehr geringe elektromagnetische Verkoppelung der Stäbe vorhanden ist, kann ein Bruch durch eine signifikante Änderung des Messsignals gegenüber dem intakten Fall sehr einfach erkannt werden. Sowohl die absolute Lage der Resonanzen als auch der Abstand der Resonanzen voneinander unterliegen einer großen Änderung im Bruchfall. Für eine Bruchortbestimmung ist der Abstand zweier benachbarter Resonanzen möglichst genau zu vermessen. Für Füllmedien zwischen den einzelnen Spannstäben, die im untersuchten Frequenzbereich nicht dispersiv sind, ist der Abstand  $\Delta f$  zweier benachbarter Resonanzen konstant. Beim einzelnen Stab lässt sich der Resonanzabstand  $\Delta f$  wie folgt berechnen:

$$\Delta f = \frac{c_0}{2l\sqrt{\epsilon_r}}, \quad (1)$$

wobei  $c_0$  die Vakuumlichtgeschwindigkeit (300.000 km/s),  $l$  die gegebenenfalls durch einen Bruch verkürzte Länge des Spannstahlstabes und  $\epsilon_r$  die Dielektrizitätskonstante DK des umgebenden Mediums darstellen. Weitere Details zur Bruchmodellierung werden im Kapitel 5 diskutiert.

Der besondere Vorteil dieses Bruchortungsprinzips an Stahlzuggliedern ist die einseitige Ankopplung des Hochfrequenzsignals. Lediglich die Erreichbarkeit einer Ankopplestelle entsprechend Abbildung 1 ist dafür erforderlich. Im Gegensatz zu anderen Verfahren muss die exakte Lage und der Verlauf der Spannglieder nicht bekannt sein. Der Messvorgang dauert nur wenige Sekunden.

Wesentliche Vorteile des Verfahrens sind ferner, dass

- Zugang ist nur zu einem Spanngliede erforderlich ist,
- kein Abfahren des Spanngliedes notwendig ist
- Lagertiefe und Geometrie der Spannglieder beliebig sind und
- das Verfahren nahezu unabhängig von Anzahl und Verlauf der Spannglieder ist.

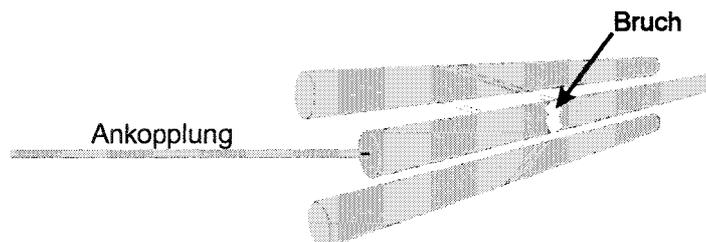


Abbildung 1: Einkopplung des HF-Signals in das Spannglied über ein Koaxialkabel

Die Abbildung 2 zeigt ein Beispiel einer Messung. Hierbei wurde der Reflektionsparameter  $|S_{11}|$  eines 59,4 m langen Drahtes aus Spannstahl in Luft im Frequenzbereich von 0 bis 50 MHz ermittelt. Angegeben ist ferner exemplarisch einer der Resonanzabstände  $\Delta f$  zweier benachbarter Resonanzen, welche zur Berechnung der Stablänge herangezogen werden.

Im Gegensatz zum RIMT-Verfahren, welches als „Nutzinformation“ lediglich die Laufzeit des gesendeten Impulses liefert, stehen bei diesem Verfahren im Regelfall mehrere Resonanzabstände  $\Delta f$  zur Verfügung, die zur Längen- bzw. Bruchortbestimmung verwendet werden können. Durch Mittelwertbildung der einzelnen Resonanzabstände werden Störungen teilweise eliminiert.

Bei einer Länge von 59,4 m ergibt sich nach (1) ein durchschnittlicher Frequenzabstand von  $\Delta f = 2,52$  MHz zwischen zwei Resonanzfrequenzen (die Minima des Reflektionsparameters  $|S_{11}|$ ). Dieses stimmt mit den gemessenen Abständen  $\Delta f$  des untersuchten Spannstahls überein (Abbildung 2 rechter Teil).

Die gemessenen Resonanzabstände  $\Delta f_{\text{mess}}$  liegen jeweils um ca. 3 bis 5% unter den Werten der berechneten Resonanzabstände. In der vereinfachten Gleichung (1) wird von einem idealen Leerlauf am Spanngliedende ausgegangen. Tatsächlich ist jedoch eine zusätzliche parasitäre Kapazität gegenüber dem Erdboden vorhanden.

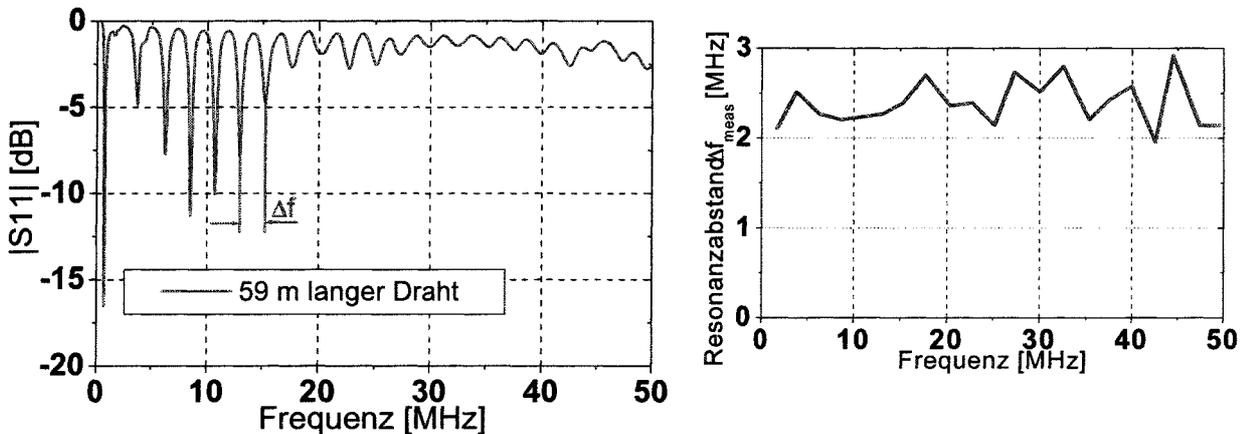


Abbildung 2: Reflektionsparameter eines 59,4 m langen Spannstahls in Luft

## 2.2 Einkopplung

Für die Einkopplung der elektromagnetischen Welle vom zuführenden Kabel in das Spannglied werden zwei Verfahren verwendet: Beim ersten Verfahren besteht die Ankoppelung aus einem etwa 10 cm langen, offen endenden, handelsüblichen Semi-rigid-Kabel 0.250“. Abbildung 3 zeigt die verwendete Einkopplung. Der Innenleiter ragt etwa 3 mm aus dem Kabel heraus und wird direkt mit einem Spannstahlende in Kontakt gebracht.

Das zweite Verfahren ist in der rechten Abbildung dargestellt: Das speisende Koaxialkabel wird an die Spannstähle herangeführt. Der Innenleiter ragt aus dem Kabel heraus und wird mit einer Schelle an einer definierten Position auf dem Stahl fixiert. Um eine definierte Masseverbindung (Bezugspotential) zu erstellen und damit Störungen durch Mantelwellen auf dem Außenleiter der Anregung zu vermeiden, wird mit einer weiteren Schelle der Außenleiter der Zuführung mit einem weiteren Spannstahl verbunden. Es ist für den praktischen Einsatz dieses Verfahrens keine Durchführung in der Ankerplatte notwendig. Das Verbindungskabel kann an einer beliebigen Stelle aus dem Bauwerk herausgeführt werden. Allerdings ist bei vorhandener Ankerplatte die nachträgliche einfache, transportable Ankoppelung, wie sie bei Nichtvorhandensein einer Ankerplatte genutzt wird, nicht möglich. Die Ankoppelung wird in das Bauwerk integriert und von außen durch einen Mikrowellenstecker zugänglich gemacht.

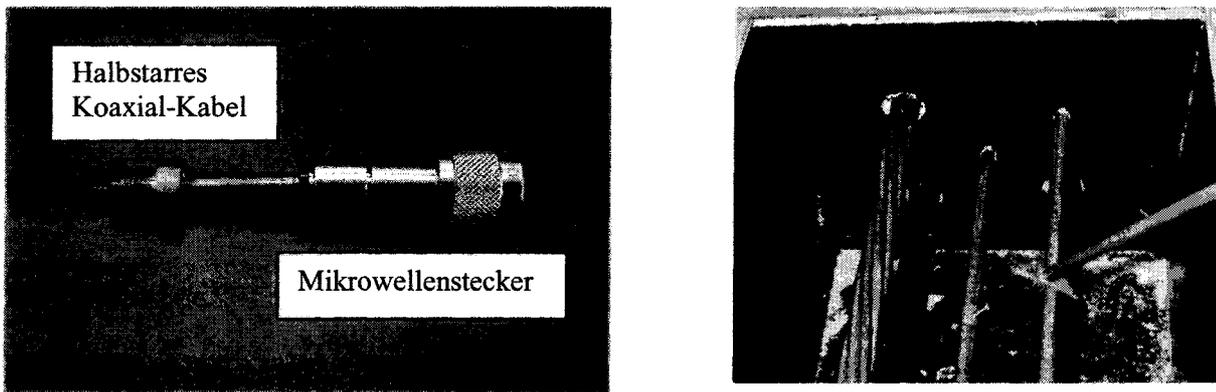


Abbildung 3: Einkoppelung des HF-Signals: links: extern, rechts: interne Ankopplung

### 2.3 Bisherige Erkenntnisse- Stand der Forschung

In umfangreichen Laborstudien konnte gezeigt werden, dass die Bruchortung auf der Basis der Resonanzmessung für einfache Spanngliedarrangierungen in Luft- Sand- und Mörtelumgebung geeignet ist. Nachfolgend werden einige Ergebnisse der durchgeführten Versuche vorgestellt.

#### 2.3.1 Umgebende Materialien

In Abbildung 4 sind die Reflektionsparameter in der Luftumgebung bei unterschiedlichen Bruchorten bzw. Spanngliedlängen dargestellt. Die untersuchten Spannstähle waren in einem Bündel mit vier weiteren Spannstählen (8,20 m) angeordnet. Bei einer Verkürzung der Bruchlänge steigt der Abstand zwischen den Betragsminima stetig an (siehe Abbildung 4 rechtes Diagramm).

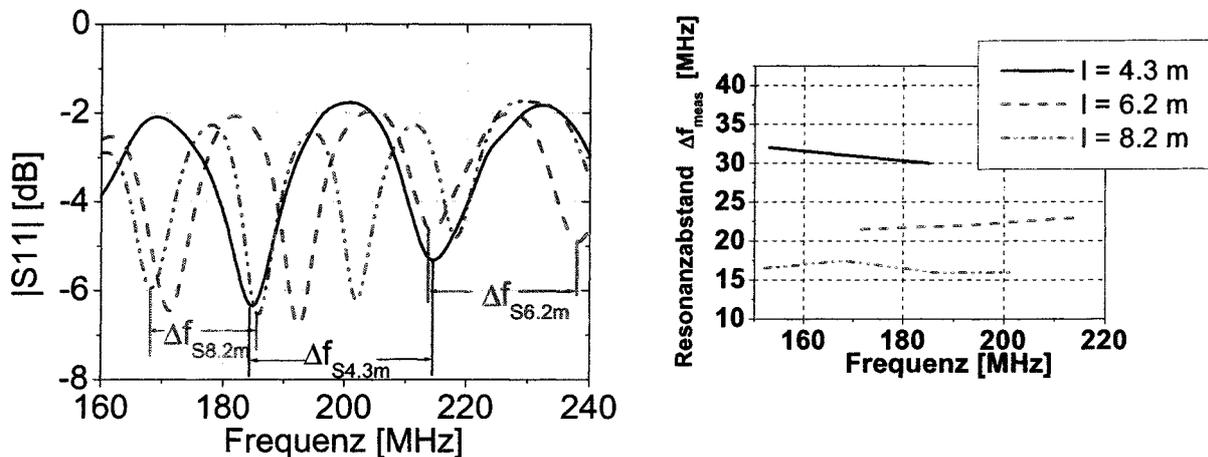


Abbildung 4: Reflektionsparameter von Spannstählen unterschiedlicher Längen in Luft

Bei der in Abbildung 4 dargestellten Messung wurde der gleiche Messaufbau verwendet, jedoch waren die Spannglieder hierbei von Sand umgeben. Dieses bewirkt in den gemessenen Reflektionsparametern eine Veränderung. Es erfolgt eine Verkürzung des Abstandes zwischen jeweils zwei Betragsminima um den Faktor  $\sqrt{\epsilon_r}$ , wobei die Dielektrizitätszahl  $\epsilon_r$  des Sandes als  $\epsilon_r \approx 3,5$  bestimmt wurde. Die Tabelle 1 zeigt die für die jeweiligen Stablängen gemessenen Resonanzabstände  $\Delta f$  in Luft und in Sand.

Tabelle 1: Vergleich der gemessenen Resonanzabstände.

Länge [m]	4,3	6,3	8,2
$\Delta f_{\text{sand}}$ (MHz)	18,5	12,9	9,1
$\Delta f_{\text{air}}$ (MHz)	33	22,5	16,5
$\Delta f_{\text{air}}/\Delta f_{\text{sand}}$	1,78	1,75	1,81

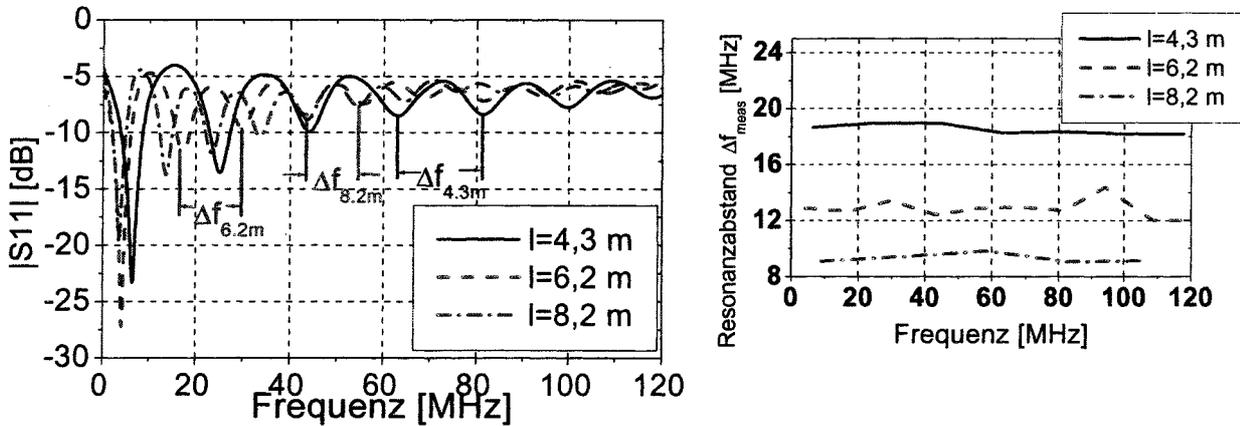


Abbildung 5: Reflektionsparameter von Spannstählen unterschiedlicher Länge in Sand

Um den Einfluss des Trocknungsprozesses auf den Reflektionsparameter  $|S_{11}|$  bei Frisch- und jungem Beton zu bestimmen, wurden mehrere Betonbauteile mit gleicher Geometrie, jedoch unterschiedlicher Zusammensetzung angefertigt und bei Raumtemperatur getrocknet. Die Abbildungen 5 und 6 zeigen einige signifikante Ergebnisse. Jedes Bauteil enthält 3 einzelne Drähte (S1-S3) mit einer Länge von 3 m, wobei der Draht S3 bei einer Länge von 2 m einen Bruch aufweist. Die Anordnung der einzelnen Drähte im Bauteil ist in den Abbildungen dargestellt. Die Bauteile sind aus Magerbeton mit  $100 \text{ kg/m}^3$  Portlandzement (Abbildung 6) und aus Hochofenzement (Abbildung 7) hergestellt. Ab dem Betonagezeitpunkt wurde der Reflektionsparameter  $|S_{11}|$  in regelmäßigen Abständen über ein Jahr hinweg bestimmt. In den Abbildungen sind vier Messungen zwischen dem ersten und dem 91. Tag nach der Betonage dargestellt.

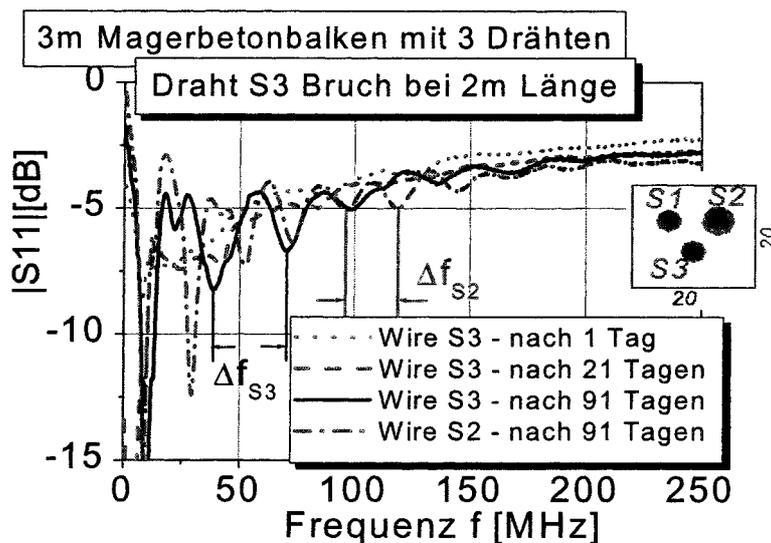


Abbildung 6: Reflektionsparameter der Drähte S2 und S3 im 3 m langen Magerbeton-Betonbalken

Am ersten und am 21. Tag nach der Betonage können noch keine Resonanzfrequenzen ermittelt werden. Der Feuchtigkeitsgehalt des Betons ist für eine genaue Bestimmung der Resonanzfrequenzen noch zu hoch. Nach 91 Tagen werden die Resonanzfrequenzen durch den Trocknungsprozess sichtbar. Der Bruch des Drahtes S3

ist dann durch den größeren Resonanzabstand  $\Delta f$  im Vergleich zum Draht S2 klar erkennbar. Der Trocknungsprozess führt außerdem zu einer Verringerung der Dielektrizitätskonstante  $\epsilon_r$ , wodurch der Resonanzabstand  $\Delta f$  kleiner wird. Dieser Effekt ist ebenso bei Betonbauteilen zu beobachten, die unter normalen klimatischen Bedingungen trocknen. Hierbei ist jedoch mit längeren Zeiträumen zu rechnen.

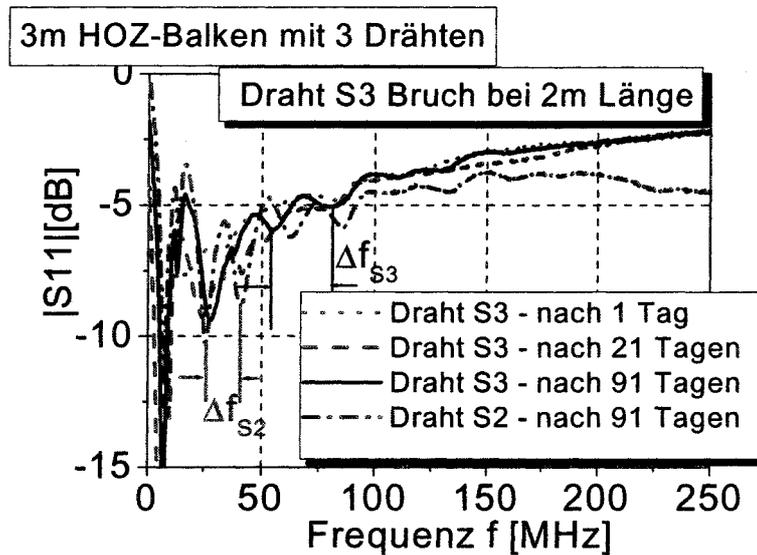


Abbildung 7: Reflektionsparameter der Drähte S2 und S3 im 3 m langen HOZ-Betonbalken

Aufgrund der unterschiedlichen Zusammensetzungen und Feuchtigkeitsgehalte der untersuchten Betonbauteile variieren die Dielektrizitätszahlen  $\epsilon_r$  und die Resonanzabstände  $\Delta f_{meas}$ . Für eine exakte Berechnung der Drahtlänge ist die Dielektrizitätszahl  $\epsilon_r$  des Bauteils erforderlich.

Ist die Dielektrizitätszahl  $\epsilon_r$  nicht bekannt, so kann die Länge des Spanngliedes bis zur Bruchstelle über das Verhältnis der Resonanzabstände  $\Delta f_{frac}$  des gebrochenen Spanngliedes zu den Resonanzabständen eines intakten Spanngliedes ermittelt werden. Die Länge bis zum Bruchort  $l_{Frac\_S3}$  ergibt sich zu:

$$l_{Frac\_S3} = \frac{\Delta f_{S2}}{\Delta f_{S3}} l_{S2} \quad (2)$$

Tabelle 2 zeigt die nach 91 Tagen gemessenen Resonanzabstände der Drähte S2 und S3 in jeweils beiden Bauteilen. Die nach (2) ermittelten Bruchlängen  $l_{Frac\_S3}$  stimmen mit dem tatsächlichen Wert  $l_{S3} = 2$  m überein.

Tabelle 2: Gemessene Resonanzabstände  $\Delta f_{meas}$

Draht	Bauteil aus Magerbeton	Bauteil aus HOZ-Beton
S2	$\Delta f_{meas} = 22$ MHz	$\Delta f_{meas} = 17,5$ MHz
S3	$\Delta f_{meas} = 33,5$ MHz	$\Delta f_{meas} = 26$ MHz
$l_{Frac-S3}$	2,12 m	2,01 m

### 2.3.2 Bruchabstände und Kopplungen

Dargestellt sind in Abbildung 8 die Resonanzabstände eines 3,3 m langen Spannstahls sowie eines 8,2 m langen Spannstahls, bei dem ein Bruch bei einer Länge von 3,3 m simuliert wurde. An der Bruchstelle wurde der Bruchabstand variiert.

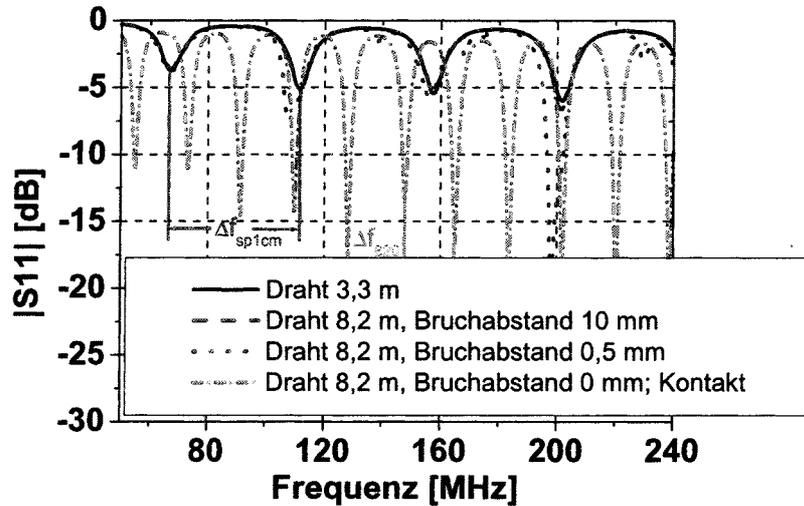


Abbildung 8: Einfluss des Bruchabstandes auf den Reflektionsparameter

Wie in Abbildung 8 zu sehen ist, ist der Bruch des 8,20m langen Spanngliedes bei 3,3 m sowohl bei einem Bruchabstand von 10 mm als auch bei nur 0,5 mm Bruchabstand eindeutig detektierbar. Besteht hingegen eine ohmsche Verbindung zwischen den Bruchstellen, so ist der Bruch nicht mehr zu erkennen. In diesem Fall „sieht“ die elektromagnetische Welle das gesamte Spannglied.

Die Abbildung 9 zeigt die Reflektionsantworten der Stäbe eines fünfstäbigen Spanngliedes in trockenem Sand. Die Anordnung der Stäbe ist daneben schematisch verdeutlicht. Am Stab Nr. 3, dessen zugehörige Kurve in der Abbildung durch eine fett gedruckte Linie herausgehoben ist, liegt ein Bruch bei einer Länge von 6,2 m vor. Alle weiteren Stäbe sind 8,2 m lang. Es zeigt sich ein deutlich vergrößerter Abstand der Resonanzen an dem gebrochenen Stab Nr. 3 gegenüber den intakten Stäben. Die Resonanzen des gebrochenen Stabes liegen im Abstand von etwa 13,6 MHz voneinander. Bei den intakten Stäben Nr. 1, 2, 4 und 5 beträgt der Resonanzabstand hier etwa 10,7 MHz.

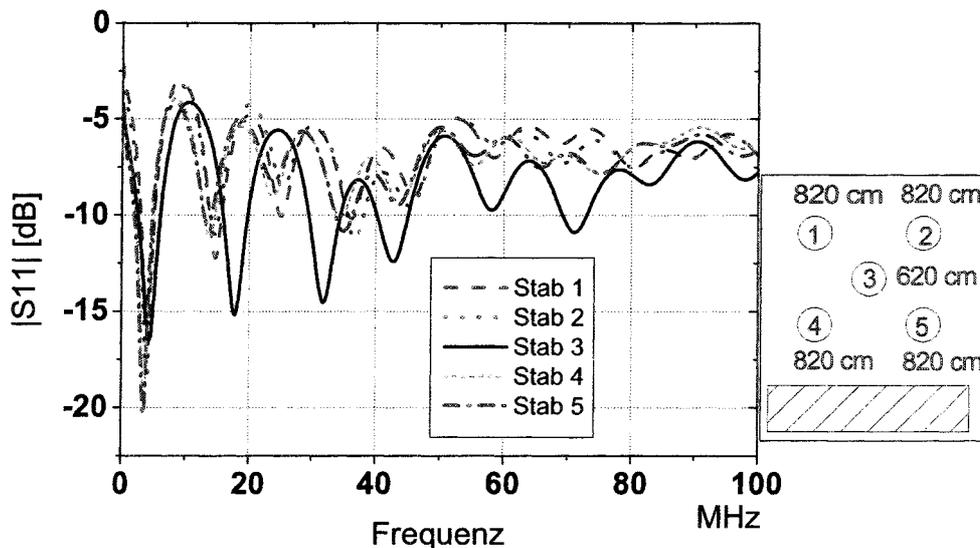


Abbildung 9: Reflektionsparameter eines mehrstäbigen Spanngliedes in Sand

Wie bei den Einzelstäben kann auch im mehrstäbigen Spannglied der Bruchort eines einzelnen Spanngliedes bestimmt werden. Die gemessenen Resonanzabstände  $\Delta f$  entsprechen den Werten der Einzelstäbe. Voraussetzung ist jedoch, dass über den Verlauf des Spanngliedes keine niederohmige Verbindung zwischen einzelnen Spanngliedern vorliegt.

Die in den bisherigen Versuchen gefundenen Zusammenhänge können wie folgt zusammengefasst werden, [1]:

- Im Frisch- und jungen Normalbeton werden elektromagnetische Wellen infolge der hohen Feuchte und der hohen Ionenkonzentration der Betonporenlösung sehr stark gedämpft, dies erschwert die Bestimmung der Resonanzfrequenzen und damit die Ermittlung der Bruchlänge.
- Die Modifikation des Materiales bzw. des Feuchtegehaltes in Stablängsrichtung wurde an einem 6 m-langen Balken simuliert, der in 1 m-langen Abschnitten intermittierend zu verschiedenen Zeitpunkten betoniert wurde, die Messwerte sind plausibel.
- Mehrmonatige Trocknung von Leichtbeton- und Normalbetonbalken führte zur signifikanten Verbesserung der Aussagefähigkeit der Messergebnisse.
- Beim Messvorgang mit einem weiteren Spanndraht als Bezugspotential kann generell eine bessere Messdynamik erzielt werden.
- Bei Untersuchung eines elektrisch vom Beton isolierten Spannstahles (z.B. einer PE-ummantelten Monolitze) sind die Resonanzen immer ersichtlich.
- Zur Abbildung praxismässiger Spannstahllängen wurde ein 20 m langer Balken konzipiert, wobei jedoch bezüglich der Aussagefähigkeit der Messwerte trotz der größeren elektromagnetischen Dämpfung keine generellen Unterschiede gegenüber kleineren Versuchskörpern festgestellt wurden.
- Eine uniforme Korrosionsschädigung auf der gesamten Stablänge hat im Gegensatz zum lokalen Korrosionsabtrag keinen signifikanten Einfluss auf das Messsignal.

Neben den Laborversuchen an kurzen stabförmigen Bauteilen unterschiedlicher Anordnung, Zusammensetzung und Beaufschlagung wurden die Einflüsse von Bündelspanngliedern mit Ankerkörpern und umgebender Bewehrung im Labormaßstab untersucht. Die wesentlichen Ergebnisse und Erkenntnisse können wie folgt dokumentiert werden, vgl. auch Kapitel 4:

- Bei Einzelstäben ist der Bruch ab einem Bruchendabstand von etwa 0,5 mm detektierbar.
- Bei elektrischem Kontakt mehrerer nebeneinander liegender Litzen (Kurzschluss) kann der Bruch einer Litze mit diesem Verfahren nicht identifiziert werden, gleiches gilt für den Fall des abschnittweisen Blechhüllrohrkontaktes. Ein Bügelkorb aus Schlaffstahl mit lokalem Kontakt einzelner Spannstähle wies jedoch keine Einschränkungen hinsichtlich der Interpretationsfähigkeit der Messwerte auf.
- Im Falle der Kopplung zweier Spannstähle hat die Koppelmuffe keinen Einfluss auf das Messergebnis, d.h. die elektromagnetische Welle „sieht“ das gesamte Spannglied.
- Durch zusätzliche elektromagnetische Verkopplungen der Stäbe oder durch Anregung unmittelbar hinter der Ankerplatte können in den Messergebnissen weitere Resonanzen auftreten.
- Zur Ankerkopfflatte ist von der Einkopplungsstelle ein Mindestabstand von ca. 10 cm vorzusehen, eine komplette elektrische Entkopplung des Spannstahles vom Ankerkopf z.B. durch Kunststoffbeschichtung ist empfehlenswert, dies gilt auch für das Hüllrohr.

Näheres zum Messverfahren kann [2] und den Veröffentlichungen [3] bis [5] entnommen werden.

### 3 Vor-Ort-Untersuchungen an den beiden Brückenlängsträgern der alten Hohenzollerndammbrücke Berlin

#### 3.1 Allgemeines

Die Hohenzollerndammbrücke über die Berliner Stadtautobahn wurde in den Jahren 1957 bis 1958 in der Spannbetonbauweise mit nachträglichem Verbund gebaut. Die hier betrachteten Längsspannglieder bestehen jeweils aus 16 oval gerippten Einzelspanndrähten des Typs St 145/160 Neptun 40 mit einem Nennquerschnitt von 40 mm<sup>2</sup>. Der Konstruktionsbeton weist die Güteklasse B300 auf.

Entsprechend dem BAM-Untersuchungsbericht wurden im Einpressmörtel nach dem Abbruch Feuchtegehalte zwischen 9 und 12 M.-% und Porositäten zwischen 18 und 21 Vol.-% festgestellt. Nach [6] ist bei feuchten Betonen je nach Porosität eine Dielektrizitätskonstante von 10 bis 20 anzusetzen. Im Rahmen der Untersuchungen wurde von einem DK-Wert  $\epsilon_R = 6,0$  ausgegangen. Dieser Wert berücksichtigt zum einen die erwarteten Hohlräume und zum anderen den diagnostizierten geringeren Feuchtegehalt des Konstruktionsbetons. Es wurde kein stark erhöhter Chloridgehalt des Einpressmörtels festgestellt.

In der Abbildung 10 ist die Lage, Anordnung und die nachfolgend verwendete Bezeichnung der Spannglieder in den beiden ca. 11,30 m langen Brückenträgern auf dem Gelände der BAM angegeben. Diese wurden dem Bewehrungsplan bzw. der Balkenkennzeichnung vor Ort entnommen. Dargestellt sind die Stirnseitenansichten der Träger, von der aus die jeweilige Messung erfolgte.

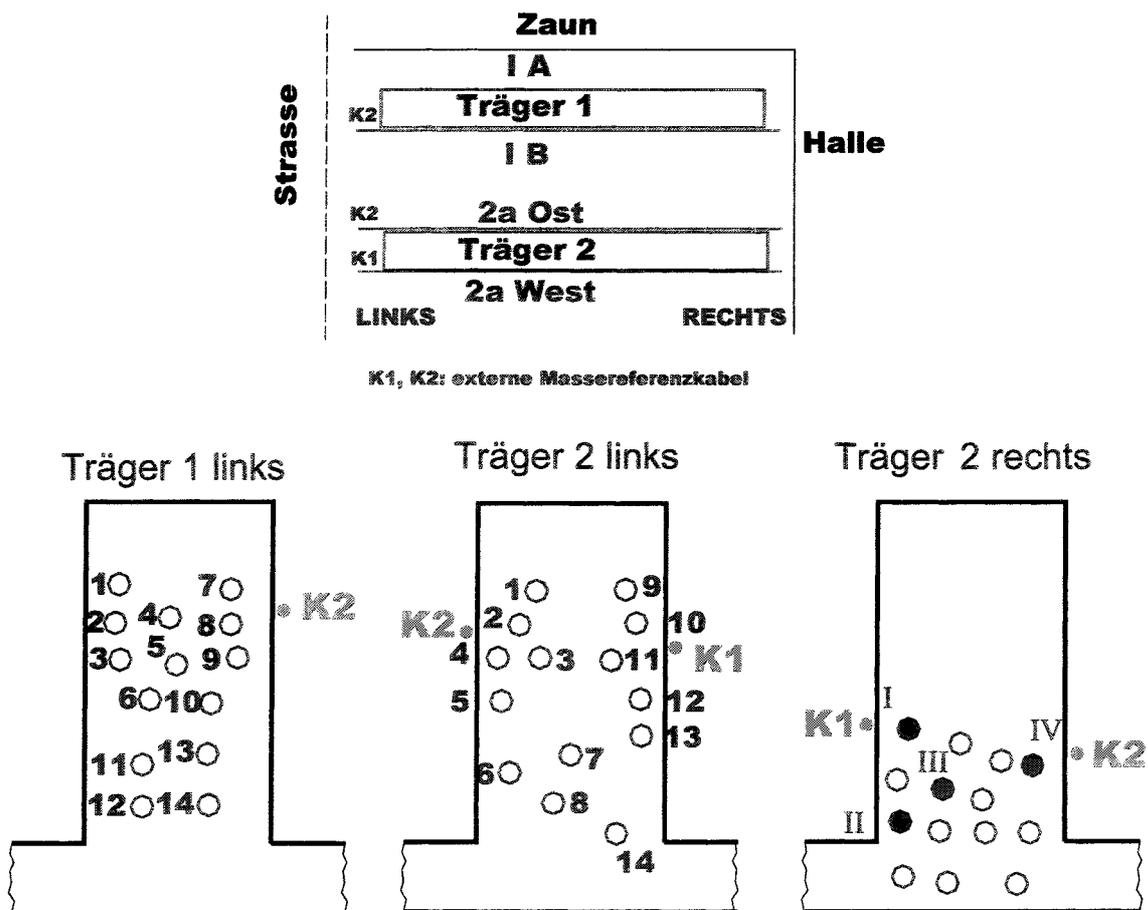


Abbildung 10: Lageplan- Grundriss und Vorderansicht der beiden Teilträger auf dem Gelände der BAM in Berlin mit den Spanngliederbezeichnungen und externen Referenzmesskabeln K1, K2- unmaßstäbliche Skizze, Deckplatte ist in den Ansichten nicht dargestellt

Zur Untersuchung unterschiedlicher Randbedingungen und aufgrund neuerer Erkenntnisse des ständig weiterentwickelten Messverfahrens wurden vor Ort insgesamt vier Messtermine wahrgenommen. Untersucht wurden jeweils nur einzelne Spannglieder bzw. Spannstähle am Träger 1 links sowie am Träger 2 links und Träger 2 rechts mit z.T. unterschiedlicher Messanordnung. Näheres ist hierzu in der Tabelle 3 aufgeführt.

Tabelle 3: Übersicht zu den Vor-Ort-Messungen, vgl. Abb. 10

Messtermin	Messobjekt	Messanordnung	Bemerkungen
24.10.02	Tr1 links: alle Einzeldrähte des Spanngliedes Nr. 7	Bezugspotential Draht Nr. 16 des Sg Nr.7 sowie Messungen ohne definiertes Bezugspotential	Untersuchung aller Drähte eines Spanngliedes (mit und ohne definiertem Bezugspotential), Messfrequenz von 0,3 bis 200/ 250 MHz, Wetter: teilweise sonnig, +5...+9°C
22.01.03	jeweils 2 Drähte eines Spanngliedes: Tr1 links: Sg1 bis Sg14 Tr2 links: Sg1 bis Sg14 Tr2 rechts: Sg1 bis SgIV	Ohne definiertes Bezugspotential	Messfrequenz 0,3 bis 300 MHz, Wetter: sonnig, +5° C
17.07.03	jeweils 2 Drähte eines Spanngliedes: Tr1 links: Sg1 bis Sg14 Tr2 links: Sg1 bis Sg14 Tr2 rechts: Sg1 bis SgIV	mit definiertem Bezugspotential (Tr1: Sg5, Tr2 links: Sg11, Tr2 rechts: SgIV), einzelne Sg zusätzlich auch ohne definiertes Bezugspotential	0,3 bis 250 MHz, zusätzlich Widerstandsmessung zwischen gemessenen Spanndraht und Bezugspotential mittels Ohmmeter, zusätzlich wurde auch das Hüllrohr des Sg6 vom Tr2 links (mit und ohne Stab als Bezugspotential) gemessen, Wetter: sonnig, t.w. bewölkt +27° C
20.11.03	jeweils 1 Draht eines Spanngliedes: Tr1 links: Sg1 bis Sg14 Tr2 links: Sg1 bis Sg14 Tr2 rechts: Sg1 bis SgIV	mit externer Bezugspotential (Kabel K1, K2 mit an dem Spanngliedverlauf angepasster Kabelführung)	0,3 bis 250 MHz, zusätzlich wurde auch das Hüllrohr vom Sg6, Tr2 links gemessen, Wetter: nass, bewölkt +12° C

Kennzeichnung: Tr- Träger, Sg- Spannglied, K1-K2- Kabel Nr. 1 und 2

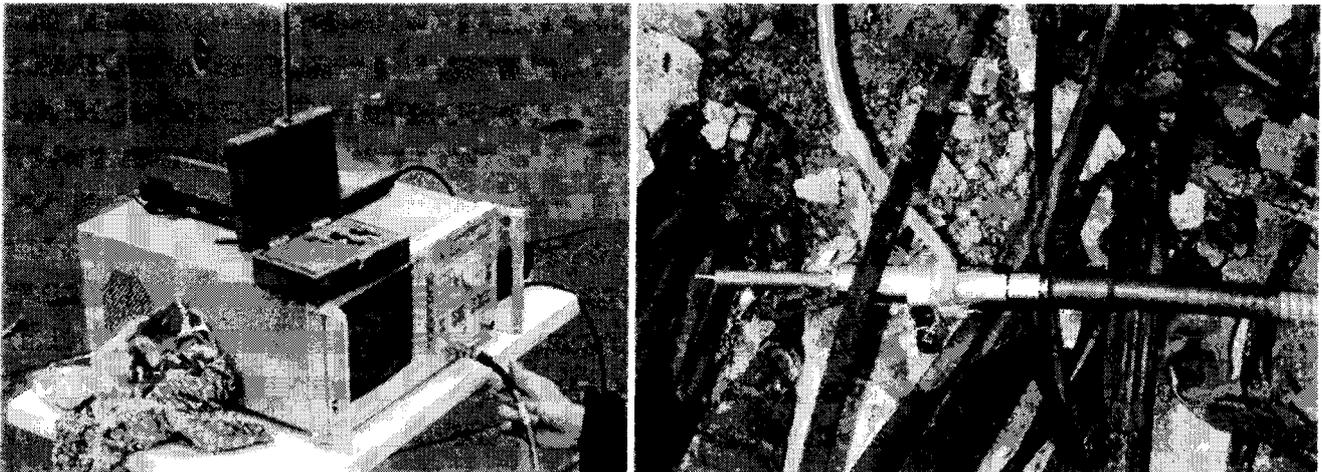


Abbildung 11: Photos vom Messaufbau: links: Messgerät Netzwerkanalysator (NWA) und rechts: elektro-magnetische Ankopplung an das Spannglied mittels Koaxialkabel und Massekabel

Der generelle Messaufbau mit dem Netzwerkanalysator des Typs Hewlett Packard HP8712 als Signalquelle und Messgerät ist aus Abbildung 11 links zu erkennen. Aufgezeichnet wurde der Reflektionsparameter  $S_{11}$  als Systemantwort in Betrag und Phase. Für die Auswertung wurde jedoch nur der Betrag des Reflektionsparameters herangezogen.

Die Längsspannglieder sind durch das Abtrennen der beiden Hohlkastenlängsträger im Auflagerbereich für das Messverfahren direkt zugänglich. Die elektromagnetische Ankopplung erfolgte bei den Messungen an den Enden der Spannstäbe entsprechend den Abbildungen 1 und 11. Um einen guten elektrischen Kontakt an der Einkopplungsstelle zu erhalten, wurden die Korrosionsprodukte dort vorher entfernt.

Zusätzlich wurde in einigen Versuchen ein anderer Spanndraht bzw. ein externes Kupferkabel als Bezugspotential eingesetzt. Dieses wurde mit dem Außenleiter des Koaxialkabels in elektrischen Kontakt gebracht, vgl. Abbildung 11 rechts. Ziel dieser Maßnahme war die Verbesserung der Resonanzausbildung (Amplitudengröße). Der Einfluss des Messkabels wurde vor den Messungen jeweils durch Initialkalibrierung kompensiert.

## 3.2 Messdurchführung, Interpretation und Diskussion der Versuchsergebnisse

### 3.2.1 Allgemeines

### 3.2.2 Messung aller Einzeldrähte des Spanngliedes 7 am Träger 1 links (24.10.02)

Im Rahmen der ersten Messserie am 24.10.02 wurden sämtliche Spannstäbe eines Spanngliedes (des Spanngliedes 7 am Träger 1 links) mit bzw. ohne internes Bezugspotential untersucht. Ziel war es, aus den Einzelverläufen der Messungen

- eindeutige Resonanzen zu identifizieren und
- generelle Unterschiede zwischen den Ergebnissen der Einzeldrähte eines Spanngliedes zu untersuchen.

Hintergrund ist die Überlegung, ob die Einzeldrähte eines Spanngliedes aufgrund der Ausbildung einer Passivschicht bzw. infolge von Korrosionsprodukten ausreichend elektrisch bzw. magnetisch entkoppelt sind. Im Falle des vermuteten zumindest teilweise vorhandenen elektrischen Kurzschlusses würde dies die Erkennung von evtl. vorhandenen Spannstahlbrüchen erschweren.

Als Bezugspotential wurde einer der 16 Spanndrähte im Spannglied Nr. 7 am Träger 1 ausgewählt. Zusätzlich erfolgte an den Einzelstäben auch die Messung ohne Bezugspotentialstab, d. h. mit Erdpotential.

Nachfolgend werden exemplarisch einige Messergebnisse vorgestellt:

#### 3.2.2.1 Einzelstab-Messungen (ohne definiertes Bezugspotential)

Die Ergebnisse einer Messreihe sind in Abbildung 12 aufgeführt. Im gewählten Frequenzbereich bis 300 MHz ergibt sich ein zueinander affiner Kurvenverlauf ohne ausgeprägte Resonanzen mit maximal 4 bis 5 Minima. Im höheren Frequenzmessbereich wird die Bestimmung der Absolutwerte schwieriger, da bei höheren Frequenzen auch eine höhere Dämpfung (Dispersion) erfolgt.

Im Anhang A1 und A2 werden die Messverläufe ausgewertet und die Stablänge für die Einzelmessungen auf der Basis des mittleren gemessenen Frequenzabstandes  $\Delta f$  und mit der DK  $\epsilon_R=6$  entsprechend Gleichung (1) ermittelt:

$$l_{\text{BRUCH}} = \frac{c_0}{2\sqrt{\epsilon_r} \Delta f} = \frac{61,237 \text{ m}}{\Delta f [\text{MHz}]} \quad (3)$$

Es werden dabei Stablängen von 0,8 m bis 1,1 m errechnet, d. h. dass entweder ein Kurzschluss der Stäbe bereits nach dieser kurzen Länge vorliegt bzw. dass dort ein Stabbruch vorhanden ist. Dass an dieser Stelle allerdings alle Drähte des Spanngliedes 7 am Träger 1 gebrochen sind, ist unwahrscheinlich.

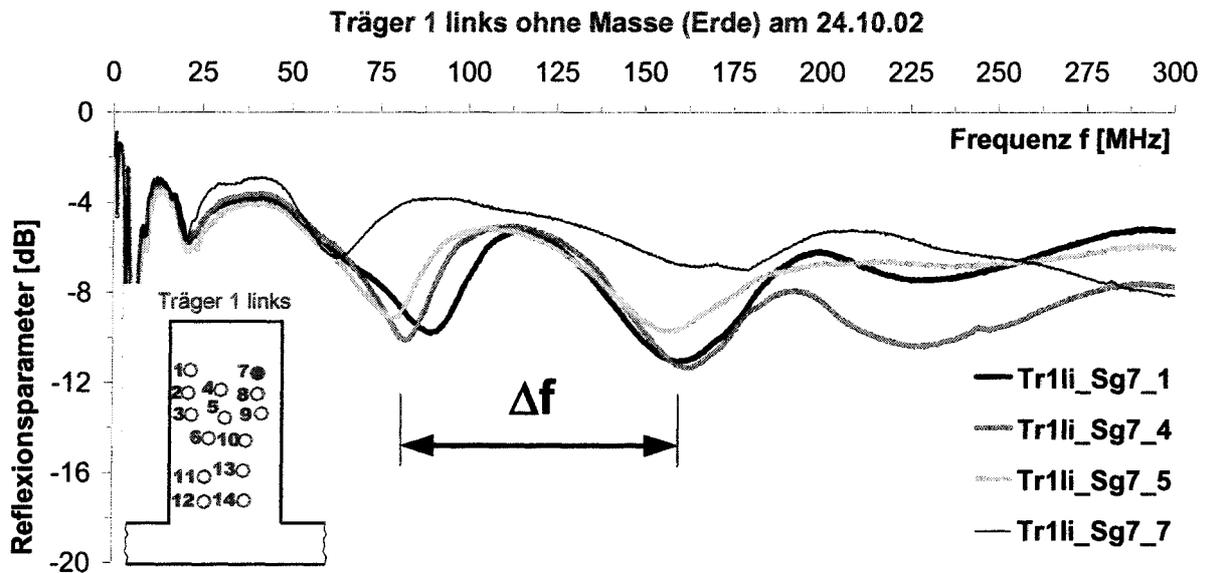


Abbildung 12: Betrag des Reflektionsparameters in Abhängigkeit der Messfrequenz, Träger 1 links, Spannglied 7, Draht Nr.1,4,5,7, Messung ohne definiertes Bezugspotential,  $\Delta f$ - Resonanzabstand

Zur Auswertung können auch die Abstände der lokalen Maxima verwendet werden. Diese unterscheiden sich bei diesen Auswertungen nur geringfügig von den Resonanzabständen  $\Delta f$  der Minima. Im allgemeinen sind die Minima jedoch stärker ausgeprägt.

### 3.2.2.2 Einzelstab-Messungen mit einem Draht aus dem untersuchten Spannglied als Bezugspotential

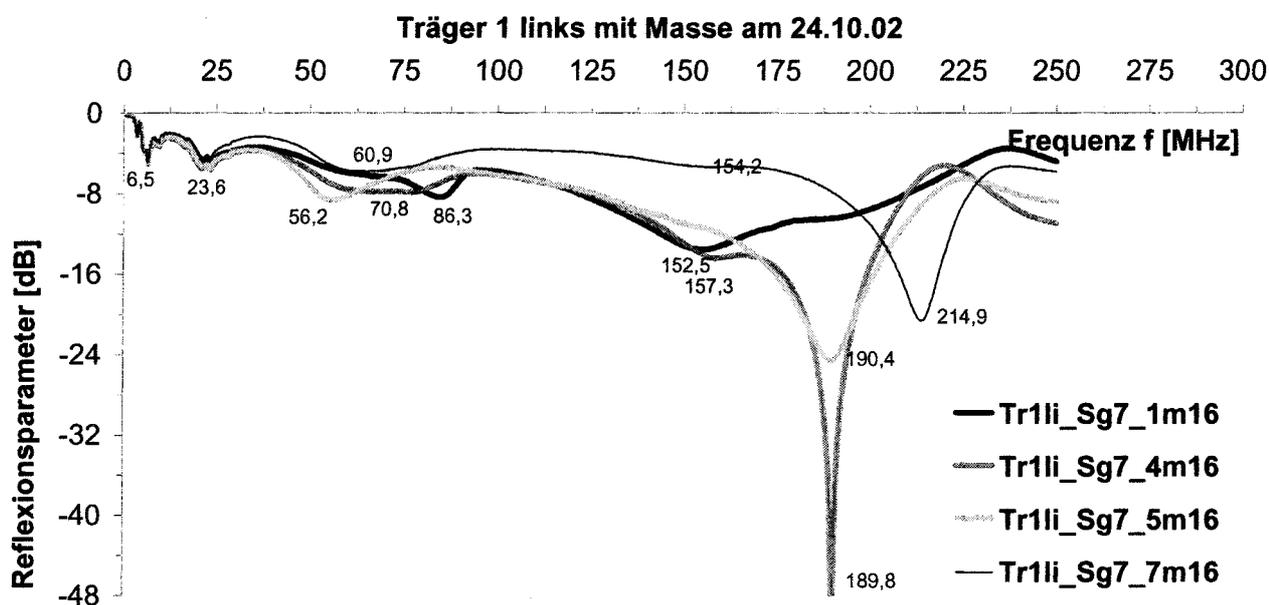
Nachfolgend wurden Messungen durchgeführt, bei denen ein interner Draht (hier Draht mit der Nr. 16) des Spanngliedes 7 als Bezugspotential verwendet wurde. Vier der durchgeführten 15 Messungen sind in der Abbildung 13 dargestellt.

Wider Erwarten sind auch bei dieser Messreihe keine signifikanten Resonanzen aufgetreten, was ebenfalls auf einen Kurzschluss der Spanndrähte untereinander schließen lässt. Die exakte Bestimmung des Abstandes benachbarter Minima bzw. Maxima des Reflektionsparameters ist somit nur näherungsweise möglich. Teilweise musste die Lage des Lokalminimums abgeschätzt werden. Bei der Berechnung wurde daher eine unterschiedliche Anzahl von Minima berücksichtigt. Daraus ergeben sich entsprechend große Unterschiede in der ermittelten Stablänge.

Bei den Messungen mit Bezugspotential wurden Stablängen zwischen 1,3 m und 1,7 m berechnet, vgl. Abbildung 13. Diese liegen mit etwas größeren Streuungen in der gleichen Größenordnung wie bei den Messungen ohne Spannstab als Bezugspotential. Das Minima des Reflektionsparameters bei 190 MHz bzw. 215 MHz resultiert aus der Teilreflektion vom ca. 0,6 m langem überstehenden freien Stabende. Die Tabelle unter der Abbildung gibt einen Überblick über die ermittelten Resonanzabstände  $\Delta f$  und die sich daraus ergebenden Stablängen bzw. Bruchlängen.

Die gewählte Messanordnung mit einem Bezugspotentialstab innerhalb des untersuchten Spanngliedes erscheint aufgrund des vorhandenen elektrischen Kontaktes der einzelnen Stähle eines Spanngliedes untereinander als nicht geeignet. Die Messung ohne definiertes Bezugspotential stellt in dieser Konstellation im Gegensatz zu den bisherigen Erkenntnissen aufgrund des relativ uniformen Verlaufes trotz fehlender ausgeprägter Minima die bessere Wahl dar.

Qualitative Unterschiede in den Messverläufen der Einzeldrähte konnten jedoch nicht festgestellt werden. Demzufolge kann der Einzeldrahtbruch innerhalb eines mehrstäbigen Spanngliedes unter den gegebenen Randbedingungen nicht detektiert werden. Eine Abweichung der berechneten Stablängen vom tatsächlichen Wert ist infolge der nur pauschalen Abschätzung der Dielektrizitätskonstante möglich.



Messung	$\Delta f_1$ [MHz]	$\Delta f_2$ [MHz]	$\Delta f_3$ [MHz]	$\Delta f_4$ [MHz]	$\emptyset \Delta f$	$l_{\text{bruch}}$ [m]
Tr1li_Sg7_1m16	17,1	62,7	66,2		48,7 (3 Min)	1,3
Tr1li_Sg7_4m16	17,1	47,2	86,5 (2 Min)	32,5	36,7 (5 Min)	1,7
Tr1li_Sg7_5m16	17,1	32,6	134,2 (2-3 Min)		36,8 (5 Min)	1,7
Tr1li_Sg7_7m16	17,1	37,3	93,3(2 Min)	60,7	41,7 (5 Min)	1,5

Abbildung 13: Betrag des Reflektionsparameters in Abhängigkeit der Erregerfrequenz und Auswertung der Minimaabstände, Träger 1 links, Spannglied 7, Draht Nr. 1,4,5,7, Messung mit Bezugspotential (Draht Nr. 16-Kenzeichnung m16), Berechnung der Stablänge nach Gleichung (3)

### 3.2.3 Messungen an verschiedenen Spanngliedern des Trägers 1 links und des Trägers 2 links und rechts jeweils ohne Bezugspotential (22.01.03)

An einem zweiten Messtermin wurden an beiden Brückenstegen Messungen ohne Bezugspotential realisiert. Aufgrund der Erfahrungen der ersten Messserie wurden dabei pro Spannglied jeweils nur 2 Spanndrähte ausgemessen. Ziel dieser Untersuchungen war auch hier die Identifizierung von generellen Unterschieden in den Verläufen des Reflektionsparameters. Einige repräsentative Messergebnisse am Träger 1 links sowie am Träger 2 links und rechts sind in Abbildungen 14 und 15 sowie im Anhang A3 bis A8 aufgeführt.

Die ermittelten Stablängen variieren je nach den gewählten Annahmen (berücksichtigte Minimaanzahl) wie folgt:

- Träger 1 links: 1,5 bis 2,8 m
- Träger 2 links: 1,5 bis 3,1 m und
- Träger 2 rechts: 2,0 bis 2,4 m.

Sie liegen damit etwas höher als die erste Messserie am 24.10.02.

Es konnte festgestellt werden, dass sich i. A. mit zunehmender Anzahl der Resonanzen (Minima) des Reflektionsparameters im gewählten Frequenzbereich auch eine Verbesserung der Aussagefähigkeit ergibt, da dies bei der Mittelwertbildung berücksichtigt wird. Insgesamt sind jedoch größere Störeinträge bei niedrigeren Frequenzen zu vermerken, welche erfahrungsgemäß bei Messungen ohne definiertes Bezugspotential auftreten.

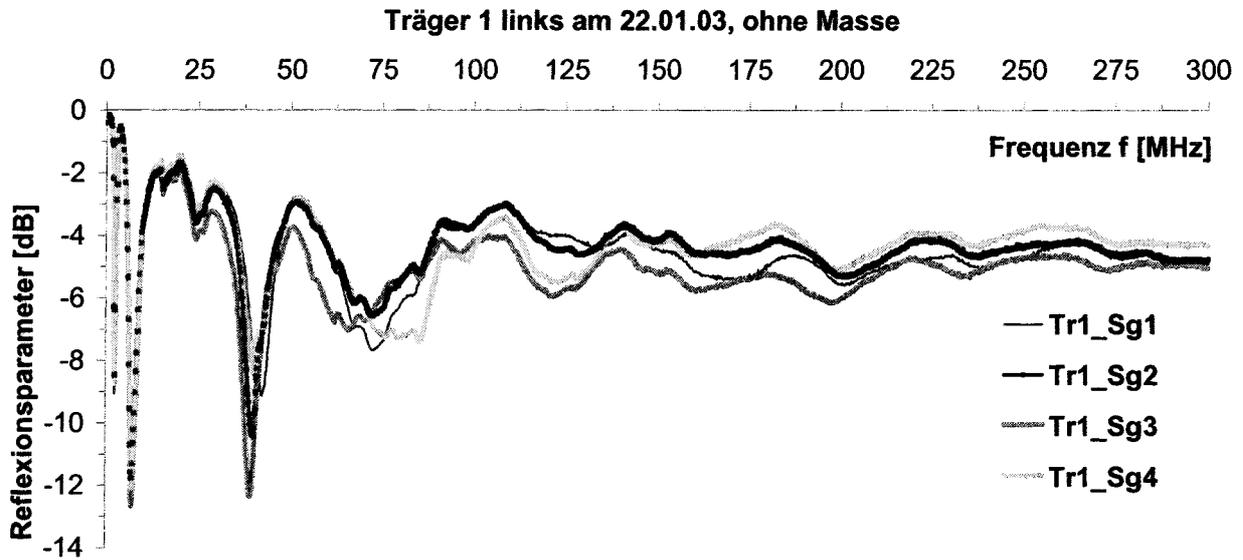


Abbildung 14: Betrag des Reflektionsparameters in Abhängigkeit der Erregerfrequenz, Träger 1 links, Spannglieder 1-4, Messung ohne Bezugspotential am 22.01.2003

Im Bereich von 50 – 100 MHz sind einige schwach ausgeprägte lokale Minima zu finden. Die Abbildung 15 zeigt diesem Bereich vergrößert dargestellt. Wenn der elektrische Kontakt bei der Berührung zweier Spannglieder durch z. B. Oberflächenkorrosion nicht zu niederohmig ist, so kann die restliche Leiterlänge bzw. die Länge bis zum Bruchort auch „hinter“ der ersten Kontaktstelle gesehen werden. Die Ergebnisse von entsprechenden Simulationen bestätigen diese Ergebnisse.

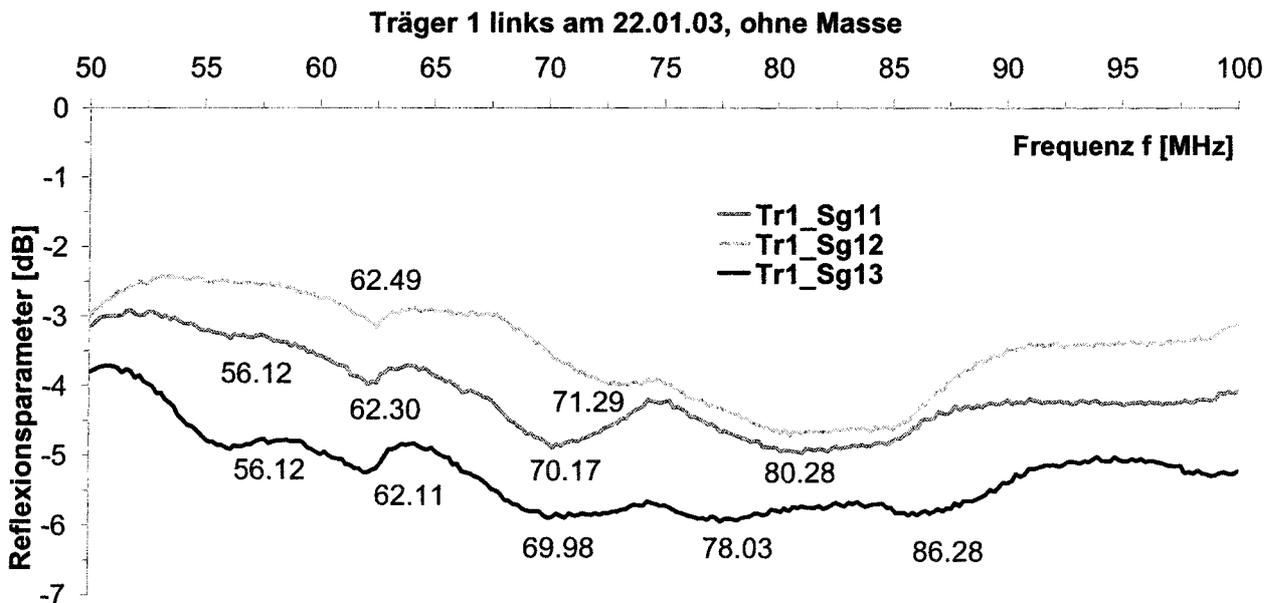


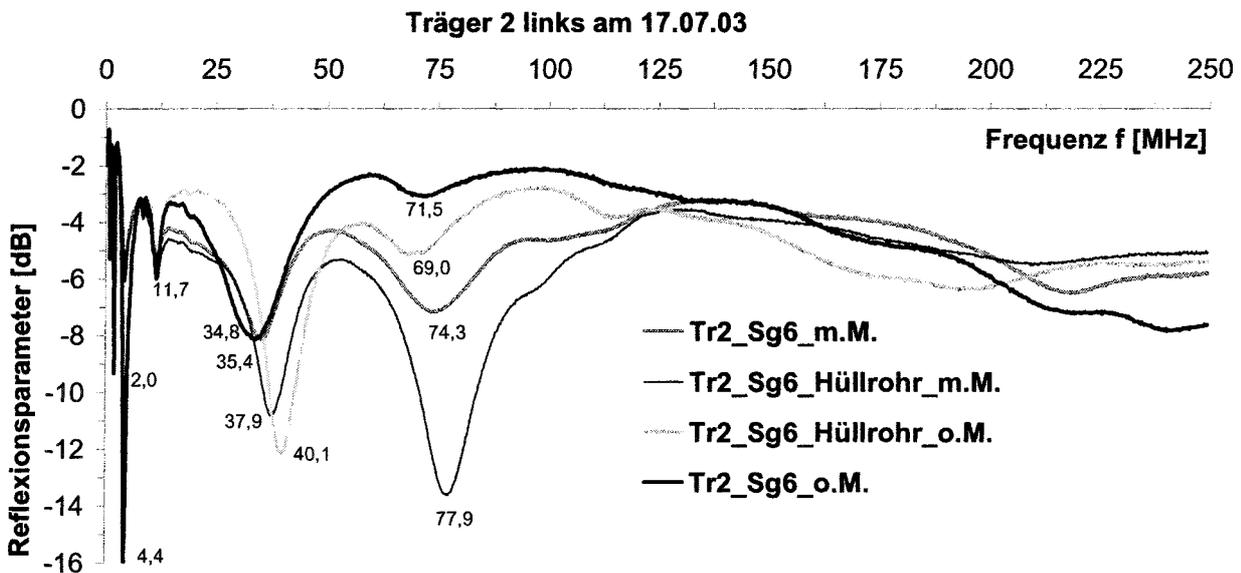
Abbildung 15: Betrag des Reflektionsparameters im Bereich 50-100 MHz Träger 1 links, Spannglieder 11 bis 13, Messung ohne Bezugspotential am 22.01.2003

Aus diesen Minima lässt sich ein mittlerer Frequenzabstand von etwa 7 MHz ermitteln, woraus nach Gleichung (3) unter der Annahme einer DK von  $\epsilon_R = 6$  eine Stablänge von 6,9 m berechnet werden kann. Sind beispielsweise in einem Spannglied viele Verpressfehler (Hohlräume) vorhanden, so ist es durchaus denkbar, dass die hier angesetzte mittlere DK von  $\epsilon_R = 6,0$  einen zu großen Wert darstellt. Bei einer angenommenen  $\epsilon_R = 4.0$  würde die ermittelte Länge bei ca. 11,30 m, d. h. der Bauteillänge, liegen.

### 3.2.4 Messungen an verschiedenen Spanngliedern der Träger 1 und 2 mit einem separatem Spannglied als internes Bezugspotential (17.07.03)

Beim 3. Messtermin wurden im Juli 2003 erneut Messungen mit Spannstäben als Bezugspotential durchgeführt. Diese unterschieden sich vom ersten Messtermin am 24.10.02 dadurch, dass ein anderes Spannglied des jeweils untersuchten Trägers als internes Bezugspotential genutzt wurde. Ergänzend erfolgten an einigen Stäben auch Einzelmessungen ohne Bezugspotentialsstab. Auch das Hüllrohr des Spanngliedes 6 am Träger 2 wurde zum Vergleich in die Untersuchungen miteinbezogen. Parallel hierzu wurde am Träger 1 eine qualitative Abschätzung des elektrischen Widerstandes zwischen Bezugspotential und gemessenem Stab mittels konventionellem Ohmmeter durchgeführt. Im allgemeinen sind Messungen dieser Art nur von geringer Aussagekraft, da der Gleichstromwiderstand aufgrund der veränderlichen Leitfähigkeit des Betons und der unterschiedlichen Oberflächenkorrosion der Spannglieder starken Schwankungen unterliegt. Es sind jedoch Abschätzungen möglich, ob ein elektrischer Kontakt vorliegt oder nicht.

Dabei wurden bei 60% der Einzelmessungen sehr geringe Widerstände unter  $1 \Omega$  und ansonsten Werte bis  $50 \Omega$  festgestellt. Dies deutet auf den erwarteten elektrischen Kurzschluss zwischen den Einzelspanngliedern infolge Kontakt durch die Schlaffbewehrung bzw. durch die Hüllrohre hin.



Messung	$\Delta f_1$ [MHz]	$\Delta f_2$ [MHz]	$\Delta f_3$ [MHz]	$\varnothing \Delta f$	$l_{\text{Stab}}$ [m]
Tr2_Sg6_m.M.	7,3	23,7	38,9	31,3 (3 Min)	2,0
Tr2_Sg6_Hüllrohr_m.M.	7,3	26,2	40	33,1 (2 Min)	1,6
Tr2_Sg6_Hüllrohr_o.M.	7,3	28,4	28,9	28,7 (3 Min)	1,8
Tr2_Sg6_o.M.	7,3	23,1	36,7	29,9 (3 Min)	1,8

Abbildung 16: Betrag des Reflexionsparameters in Abhängigkeit der Erregerfrequenz, Träger 2 links, Spannglied 6 mit Hüllrohr, Messung mit (m.M., Spannglied 11) bzw. ohne (o.M.), Verwendung eines Stabes als Bezugspotential am 17.07.2003, Berechnung der Stablänge nach Gleichung (3)

In Abbildung 16 sind exemplarisch die Ergebnisse einiger Messungen dieses Messtermins dargestellt. Weitere Auswertungen sind im Anhang A9 bis A12 aufgeführt. Aus der Auswertung kann geschlossen werden, dass der Resonanzfrequenzabstand bei den Messungen mit und ohne einem anderen Spannglied als Bezugspotential trotz unterschiedlicher Minimaamplituden des Reflektionsparameters die gleiche Größenordnung aufweist. Durch die definierte Masseankopplung erfolgt eine Verschiebung (Shift) der Messwerte in x-Richtung (Frequenz).

Mit der gewählten Messanordnung wurden mittlere Stablängen zwischen 1,6 m und 2,0 m ermittelt (siehe Tabelle in Abbildung 16). Die ermittelte Länge des Hüllrohres entspricht etwa der des gemessenen Spannglieddrahtes. Auch dieses lässt den Schluss zu, dass aufgrund des sehr niederohmigen elektrischen Kontaktes keine Unterscheidung zwischen den einzelnen Metallteilen des Spanngliedes möglich ist.

Im Frequenzbereich größer als etwa 100 MHz wurden keine ausgeprägten Resonanzen festgestellt, d.h. zur Auswertung konnten max. 3 bis 6 Resonanzen herangezogen werden.

## **Ergebnisse**

Aufgrund des beschriebenen elektrischen Kontaktes der einzelnen Spannglieder untereinander unterscheiden sich die Messungen mit und ohne Bezugspotential trotz der Minimaamplitudendifferenz kaum, vgl. Anhang A10 und A12. Dies führte im weiteren Verlauf der Untersuchungen zu einem veränderten Messaufbau mit einem separatem, externem isoliertem Massekabel (vgl. Kapitel 3.2.5).

### **3.2.5 Messungen an verschiedenen Spanngliedern der Träger 1 und 2 mit einem externem Kupferkabel als Bezugspotential (20.11.03)**

Die bisherigen Erfahrungen der am iBMB durchgeführten Laboruntersuchungen zeigen, dass der Bruch des Spannstabes bei elektrischer Isolation des untersuchten Einzelspannstahles im Beton bzw. Mörtel, wie das z.B. bei einer Monolithe der Fall ist, unabhängig vom umgebenden Medium immer detektierbar ist, [5]. Die Verwendung einer isolierten Litze oder eines isolierten Drahtes als Bezugspotential verbessert die Dynamik der einzelnen Resonanzfrequenzen und unterdrückt Störungen. In den Versuchen wurde daher ein separates, elektrisch isoliertes Kupferkabel als Bezugspotential verwendet. Dieses Kabel kann generell a priori im Beton bzw. auch außerhalb des Betonbauteiles angeordnet werden.

Bei der Untersuchung der Teilträger der Hohenzollernbrücke wurde beim Messtermin am 20.11.03 die externe Anordnung eines einadrigen Standard-Kupferkabels gewählt. Die Lage bzw. der Verlauf dieser mit K1 und K2 bezeichneten Bezugspotentialkabel ist dabei dem Spanngliedverlauf angenähert worden. Bei den Einzelmessungen wurde jeweils nur eines der beiden Kabel als Bezugspotential eingesetzt. Hierzu wurden die Kabel an den Stegseiten der Träger fixiert, vgl. Abbildung 10. Die Länge der Kabel betrug dabei 11,20 m (K1) bzw. 12,60 m (K2). Am gegenüberliegenden Ende des Trägers wurde das Massekabel an den Einzeldrähten befestigt, jedoch ohne elektrisch leitenden Kontakt.

In der Abbildung 17 sind die Ergebnisse einer Messreihe abgebildet. Weitere Auswertungen mit Angabe der berechneten Stablängen sind im Anhang A13 bis A16 zu finden.

Aus diesen Messergebnissen wird zunächst ersichtlich, dass der Resonanzfrequenzabstand kleinere Werte aufweist, d.h. dieser Sachverhalt deutet gegenüber den vorherigen Messungen auf eine größere Stablänge hin. Demzufolge steht im gewählten Messbereich eine größere Resonanzanzahl zur Verfügung und somit kann die Stablänge genauer ermittelt werden. Mit einer DK von  $\epsilon_R = 6,0$  wurde die Länge bei den einzelnen Spanngliedern am Träger 1 links sowie am Träger 2 links und rechts zu 6,7 m bis 9,0 m bestimmt.

Wird die Dielektrizitätskonstante  $\epsilon_R = 4,0$  angesetzt (vgl. Kapitel 3.1), so ergibt sich mit der Gesamtträgerlänge von 11,3 m nach Gleichung (1) ein mittlerer Resonanzfrequenzabstand von 6,4 MHz. Dieser Wert wurde näherungsweise an einzelnen Spanngliedern des Trägers 1 erzielt.

Dieser Sachverhalt unterstreicht, wie schon angesprochen, den signifikanten Einfluss der Dielektrizitätskonstante auf das Messergebnis. Entsprechende Sensoren zur Bestimmung der DK werden gegenwärtig im SFB 477 an der TU Braunschweig entwickelt und erprobt, [1].

Die Amplituden des Reflektionsparameters sind gegenüber den vorherigen Messungen stärker ausgeprägt. Die Resonanzen sind dadurch leichter identifizierbar. Eine Resonanzauswertung ist bis in den Bereich von etwa 100 MHz bis 150 MHz möglich.

In einem Fall wurde wiederum das Hüllrohr des Spanngliedes 6 am Träger 2 links ausgemessen, vgl. Abbildung 17. Die Messergebnisse variieren gegenüber den anderen Messungen jedoch nicht bzw. kaum.

Im Anhang A14 und A16 wurden für 4 Messungen neben den Minimawerten auch die lokalen Maxima ausgewertet. Bei diesen Messungen wurden gegenüber der Minimabetrachtung zwischen 0,5 m und 0,8 m größere Werte berechnet. Dies entspricht 7% bis 10%. Ob diese Tendenz verallgemeinbar ist, muss noch untersucht werden.

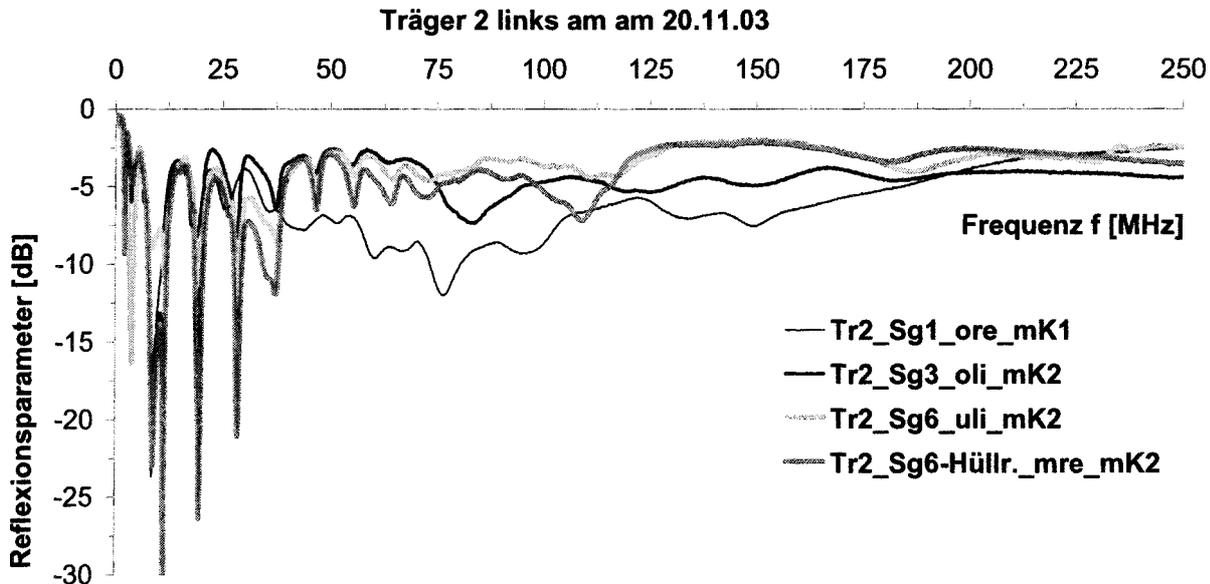


Abbildung 17: Betrag des Reflektionsparameters für Träger 2 links, Spannglieder 1,3,6 und Hüllrohr des Spanngliedes 6, (Lage des gemessenen Drahtes im Spannglied: o-oben, u-unten, re-rechts, li-links), Messung mit externem Cu-Massekabel K1 bzw. K2 am 20.11.2003

### Ergebnisse

Aufgrund der definierten Rückleitung der Welle durch das gut leitfähige Kupferkabel sind mit dem hier vorgestellten Messaufbau generell bessere Resonanzen zu erwarten. Eine Optimierung beispielsweise des Cu-Leiterquerschnittes muss jedoch noch erfolgen. Diese Anordnung stellt nach unserer Auffassung den Optimalfall dar. Der Einzelstabbruch ist jedoch auch mit dieser Versuchsanordnung aufgrund des elektrischen Kontaktes der Einzelstäbe eines Spanngliedes einerseits als auch der Spannglieder andererseits nicht detektierbar.

### 3.2.6 Diskussion der Messergebnisse

Im Anhang A17 und A18 sind für den Träger 1 Messungen am gleichen Spannglied 7 zu unterschiedlichen Messzeitpunkten aufgeführt. Dabei wurden Messungen mit und ohne Bezugspotential getrennt dargestellt. Aus

den Diagrammen wird ersichtlich, dass zum Teil gravierende Unterschiede der Messgröße trotz gleicher Randbedingungen herrschen. Dies unterstreicht die Bedeutung der Art und Ausprägung des Bezugspotentials und der elektromagnetischen Ankopplung an das Spannglied.

In den vorliegenden Untersuchungen stellte sich heraus, dass unter den gegebenen Randbedingungen ein anderer Spannstahlstab als internes Bezugspotential sowohl im untersuchten als auch an einem anderen Spannglied nicht praxisgeeignet ist. Bei den Messungen mit externem Referenzkabel (Kapitel 3.2.4) wurden gegenüber den anderen Messterminen etwa 2 bis 2,5-fach größere Längen berechnet.

Aufgrund des vorhandenen relativ hohen Feuchtegehalt des Einpressmörtels ist insgesamt von einer hohen elektromagnetischen Dämpfung im Mörtel auszugehen. Wie bereits in Vorversuchen unter Laborbedingungen festgestellt wurde, hat neben der Betonfeuchte und dem Salz- bzw. Ionengehalt des Betons auch die Art und Qualität der Ankopplung einen bedeutenden Einfluss auf die DK-Größe sowie auf den Amplitudenbetrag des Reflektionsparameters.

Die in wenigen Versuchen direkt am Hüllrohr durchgeführten HF-Untersuchungen lassen keine eindeutigen Unterschiede gegenüber den Einzeldrähten eines Spanngliedes erkennen. Dies gilt insbesondere auch für die Messung an verschiedenen Teilstäben eines Spanngliedes.

Die Messergebnisse lassen den Schluss zu, dass unter den gegebenen Randbedingungen (niederohmiger Kontakt der Einzelstäbe untereinander und zum Hüllrohr, Querverbindungen der Hüllrohre über die Schlaffbewehrung) eine Einzelmessung an einem oder mehreren Einzelstäben eines Spanngliedes nicht möglich ist. Die ermittelten Reflektionsparameter spiegeln stets die Resonanzantwort eines größeren Teils des Gesamtsystems „Brückensteg“ wider

## 4 Begleitende Laborversuche: Kurzschluss-Simulation

In zwei nachfolgend vorgestellten Versuchen wurde der Einfluss des elektrischen Kontaktes der Spannstähle untereinander bzw. mit anderen Bauwerksteilen (Schlaffstahl, Hüllrohr) an 4 m-langen Stahlbetonbauteilen untersucht. Es galt dabei zu untersuchen, ob die Detektion eines Einzelbruches bei begrenzter Stabanzahl unter diesen Bedingungen möglich ist.

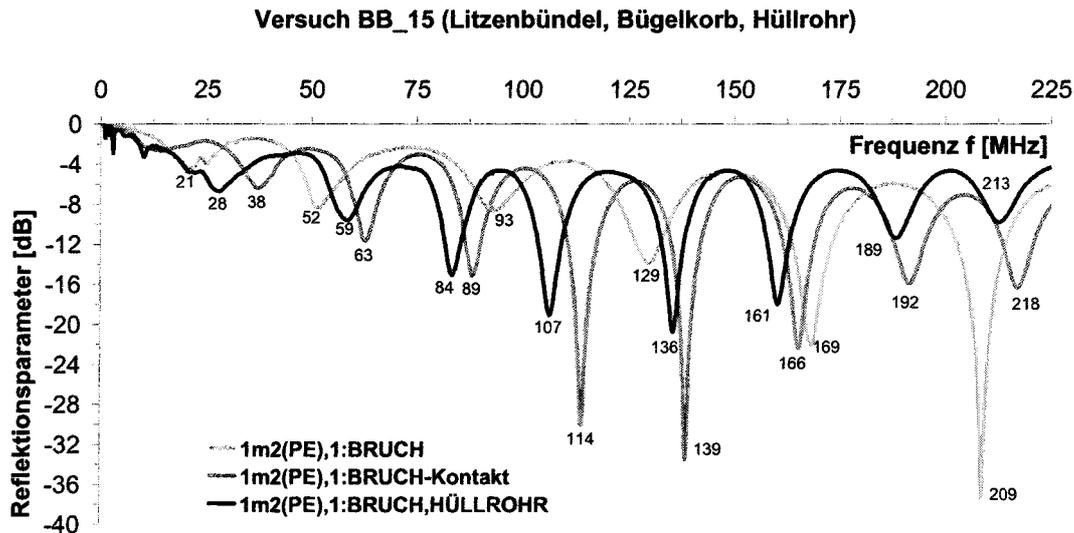
### 4.1 Versuchsdurchführung und Ergebnisse

Im **ersten Versuch BB\_15** wurden mehrere Stäbe lose nebeneinander auf den Schalboden gelegt und später zusätzlich mit einem Bügelkorb und einem Hüllrohr mit Durchmesser 10 cm umhüllt, wobei die einzelnen Metallteile nicht separat mit einem Rödeldraht o.ä. verbunden wurden. Die Messungen erfolgten ohne Mörtel bzw. Beton, d.h. in Luft, auf dem Schalboden aufliegend (kunststoffüberzogenes Holz; DK  $\epsilon_R = 2,8$ ). Über den gesamten Querschnitt ergibt sich eine DK von  $\epsilon_R = 1,6$ . Infolge der bekannten DK und der vernachlässigbaren elektromagnetischen Dämpfung ergibt sich eine sehr einfache Auswertung.

In Abbildung 18 sind die Ergebnisse der Bruchortung an einer nach 3 m gebrochenen Litze dargestellt. Es wurde jeweils die nach 3 m gebrochene, ursprünglich 4,5 m lange Litze (Stab1) mit der PE-Litze (Stab 2) als Bezugspotential ausgemessen.

Bei der ersten Messung wurde der gebrochene Stab 1 einzeln untersucht. Es ergibt sich mit der Gleichung (1) und der DK  $\epsilon_R = 1,6$  eine Stablänge von 3,12 m.

Die beiden weiteren Messungen, bei denen zum einen die beiden Bruchenden der Litze 1 Kontakt haben und sich zum andern alle 3 Stäbe im 2,3 m langen, zentrisch in Stablängsrichtung angeordneten Hüllrohr befinden, ergeben eine Stablänge: 4,63 m bzw. 4,49 m (siehe Tabelle unter der Abbildung 18).



Messung	$\Delta f_1$ [MHz]	$\Delta f_2$ [MHz]	$\Delta f_3$ [MHz]	$\Delta f_4$ [MHz]	$\Delta f_5$ [MHz]	$\Delta f_6$ [MHz]	$\Delta f_7$ [MHz]	$\emptyset \Delta f$	DK	calc. $l_{\text{Bruch}}$ [m]
1m2(PE), Bruch (ohne Kontakt)	31	41	36	40	40			37,6	1,6	3,12
1m2(PE), Bruch- mit Kontakt	25	25	25	25	27	26	26	25,6	1,6	4,63
1m2(PE), Bruch, Hüllrohr (ohne Kontakt)	31	25	23	29	25	28	24	26,4	1,6	4,49

Abbildung 18: Bruchversuch BB\_15 in Luftumgebung mit 3 nebeneinanderliegenden Stäben (Reihenfolge 1-2-3): Stab 1 ist nach 3 m gebrochen (Initiallänge Stab 1: 3+1,5m = 4,5 m), Stab 2 (PE-Litze) und Stab 3- 4,5 m lang, 2,3 m langes Hüllrohr in Stabmitte, Bügelkorb der Länge 2,5 m am Stabanfang positioniert, Berechnung der Bruchlänge:  $\text{calc } l_{\text{Bruch}} = 150 / (\sqrt{1,6} \cdot \Delta f \text{ [MHz]})$

In einem **zweiten Versuch BB\_16** wurde zunächst ein Einzeldraht ( $d = 7 \text{ mm}$ ) in ein 4m-langes Spanngliedhüllrohr ( $d = 10 \text{ cm}$ ) eingebaut, an mehreren Punkten mittels Draht befestigt, so dass elektrischer Kontakt gegeben war, und anschließend mit Mörtel verfüllt. Zwei Wochen später wurde das Hüllrohr mit dem Endabstand von 1,5 m bzw. 2,5 m mittels Trennschleifer angesägt und dabei der Stab 4 durchgetrennt. Anschließend wurde dieses Hüllrohr zusammen mit anderen Spannstählen in einen vorbereiteten Bügelkorb eingebaut und betoniert. Es wurde darauf geachtet, dass sämtliche Bauteile praxiskonform elektrischen Kontakt haben. Eine Skizze vom Versuchsaufbau ist in Abbildung 19 dargestellt. Als Bezugspotential für die Messungen wurde eine mit einbetonierte Kupferleitung (im Diagramm bezeichnet mit 5(Cu)) verwendet.

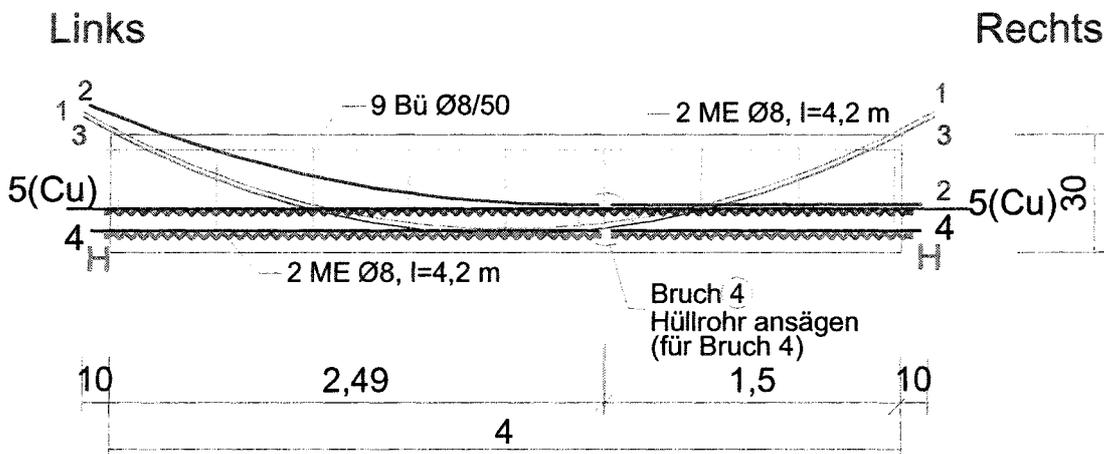
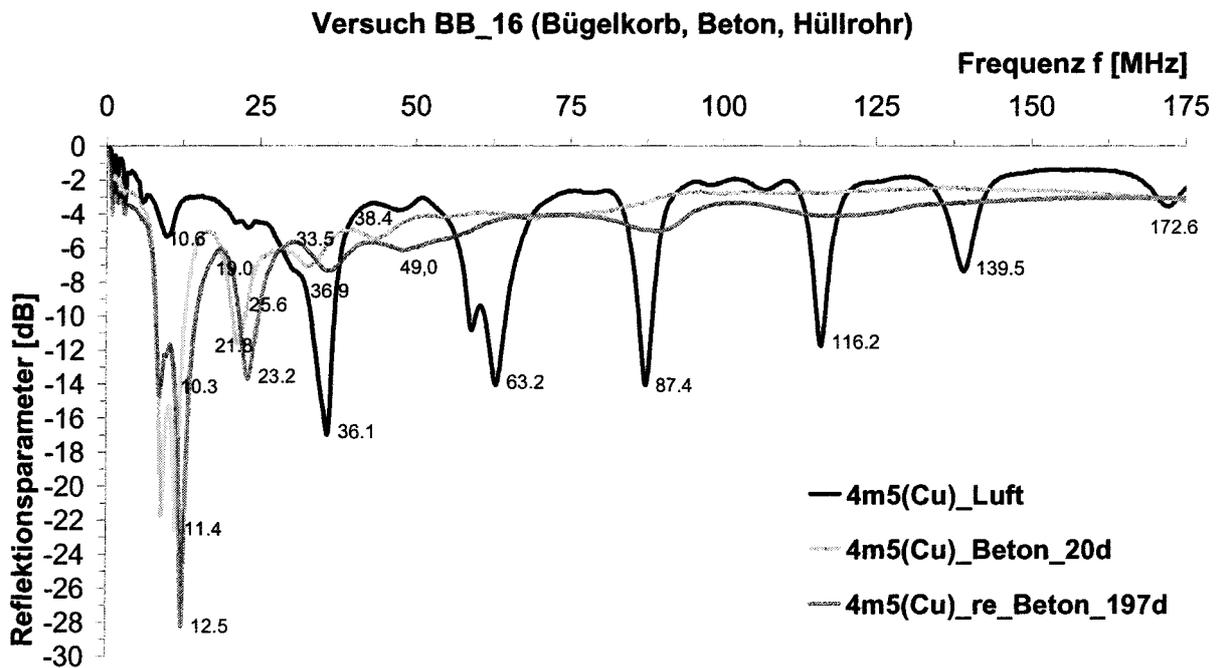


Abbildung 19: Versuchsaufbau BB\_16- Simulation Hüllrohreinbau (H-Hüllrohr)

Repräsentative Ergebnisse zu unterschiedlichen Rahmenbedingungen sind in der Abbildung 20 abgebildet. Es ergibt sich ein für jungen Beton typischer Verlauf des Reflektionsparameters, bei dem im Unterschied zur Messung in Luft ab etwa 50 MHz keine Resonanzen mehr auftreten.

Wie erwartet ist der Einzelstabbruch des Spanndrahtes 4 nicht zu erkennen. Die gemessenen Resonanzabstände betragen bei der Messung 20 Tage nach Betonage durchschnittlich  $\Delta f_{\text{meas}_20} = 10,7$  MHz, bei der Messung nach 187 Tagen  $\Delta f_{\text{meas}_187} = 12,1$  MHz. Die Vergrößerung der Resonanzabstände ist auf die Trocknung des Betons mit zunehmenden Alter zurückzuführen. Unter Verwendung plausibler DK-Werte ( $DK \epsilon_R = 9,0$  nach 20 Tagen,  $DK \epsilon_R = 7,0$  nach 187 Tagen) wird eine „wirksame Länge“ von 4,67 m ermittelt. Wird die parasitäre Kapazität am Ende des Spanngliedes ebenfalls mit berücksichtigt (d. h. abzüglich 3 – 5 % des ermittelten Länge, vgl. Kapitel 2.1), so ergibt sich eine Länge von ca. 4,47 m - 4,53 m. Dies entspricht der Länge des Hüllrohres. Dieses Versuchsergebnis bestätigt die Erkenntnisse der Versuche am Brückenunterzug.



Messung (alle $\Delta f$ in MHz)	$\Delta f_1$ [MHz]	$\Delta f_2$ [MHz]	$\Delta f_3$ [MHz]	$\Delta f_4$ [MHz]	$\Delta f_5$ [MHz]	$\Delta f_6$ [MHz]	$\varnothing \Delta f_7$ [MHz]	DK	calc. $l_{\text{Bruch}}$ [m]
4m5(Cu)_Beton_20d	10,8	10,2	11,1				10,7	9,0	4,67
4m5(Cu)_Beton_187d	10,8	13,7	12,0				12,1	7,0	4,68

Abbildung 20: Bruchversuch BB\_16: Stahlbetonkörper 0,3 m x 0,3 m x 4 m, gemessen wurde der Spanndraht Nr.4 (d=7 mm, Länge 1,6 m) mit einem Kupferkabel als Bezugspotential 5 (Cu) in Luftumgebung und im ca. 3 und 12 Wochen alten Beton, der Hüllrohrmörtel ist 2 Wochen älter

## 5 Modellierung

### 5.1 Theoretische Grundlagen

In Abbildung 21 sind schematisch fünf Spannstähle dargestellt. Je zwei Spannstähle  $i$  und  $j$  sind elektromagnetisch miteinander über die eingezeichneten Querkapazitätsbeläge  $C'_{ij}$  und Längsgegeninduktivitätsbeläge  $M'_{ij}$  verkoppelt. Die Beläge geben eine infinitesimale Kapazität bzw. Induktivität pro infinitesimalem Längenelement an. Außerdem hat jeder einzelne Leiter  $i$  einen Kapazitätsbelag  $C'_{ii}$  gegenüber dem als perfekt leitende

Ebene modellierten Erdboden sowie den Selbstinduktivitätsbelag  $L'_{ii}$  des Drahtes. Der Übersicht wegen sind nur einzelne Beläge eingezeichnet. Tatsächlich sind alle Stäbe jeweils paarweise durch die genannten Größen miteinander verkoppelt. Alle  $C'_{ij}$ ,  $M'_{ij}$  und  $L'_{ii}$  lassen sich nach [8] berechnen und sind nur von den Abmessungen  $d$  und  $h_i$  sowie der DK des die Stäbe umgebenden Mediums abhängig, wobei wegen der Reziprozität jeweils  $C'_{ij}=C'_{ji}$  und  $M'_{ij}=M'_{ji}$  gilt. Aus all diesen Größen lässt sich für einen längshomogenen Abschnitt der Länge  $l$  die Streumatrix  $[S]$  berechnen, die für  $n$  Leiter  $(2n)^2$  Einträge besitzt. Die Einträge der Streumatrix, die sog. Streukoeffizienten, setzen sich aus den Reflektionsparametern und den Transmissionsparametern, welche die Überkopplung einer an einem Spannglied eingekoppelten elektromagnetischen Welle auf die anderen Spannglieder beschreiben, zusammen.

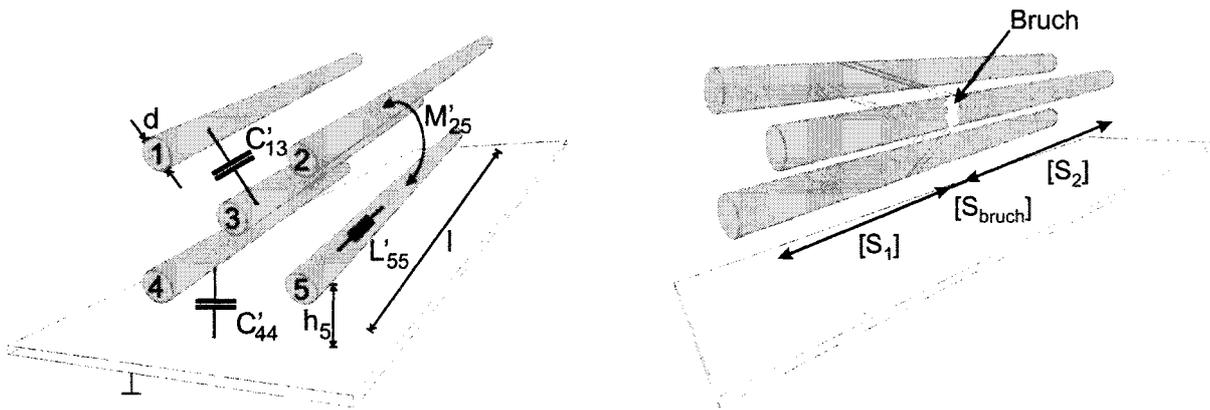


Abbildung 21: Modell der gekoppelten Leitungen      Abbildung 22: Zerlegung des Spannstahlleiters in längshomogene Abschnitte

Die gesamte Spannstahlanordnung wird dann in einzelne, längshomogene Abschnitte zerlegt, die jeweils durch eine Streumatrix dargestellt werden. So können Brüche an einem oder mehreren Spanngliedern sehr einfach simuliert werden: In einem Abschnitt bestehend aus  $n$  Leitern werden die zu den nicht gebrochenen  $n-1$  Leitern gehörenden Koppellemente nach dem oben beschriebenen Prinzip berechnet. Eine elektromagnetische Welle „sieht“ an den beiden Bruchenden des defekten Stabes einen Leerlauf, so dass die beiden komplexen Reflektionsparameter innerhalb der Streumatrix jeweils zu  $1+j_0$  gesetzt werden. Überkopplungen von einem Bruchende auf das andere oder auch von einem Bruchende auf die anderen Stäbe sind im Modell nicht berücksichtigt, können jedoch ggf. in das Modell aufgenommen werden. Vergleiche zwischen Simulationen und Messungen haben ergeben, dass diese Überkopplung keine signifikante Veränderung der Streuparameter hervorruft. Also werden die entsprechenden Einträge in der Streumatrix zu Null gesetzt.

Aus den einzelnen Streumatrizen lässt sich die Streumatrix der Gesamtstruktur berechnen. Um nun einen einfachen Bruch zu simulieren, müssen fünf Streumatrizen aufgestellt und zusammenschaltet werden: eine Streumatrix, welche die Einkopplung darstellt, eine Streumatrix mit  $n$  intakten Leitern, eine Streumatrix, die den Bruch beschreibt, wieder eine Streumatrix für  $n$  intakte Leiter und schließlich eine Streumatrix, die den Abschluss beschreibt. Abbildung 22 verdeutlicht diesen Zusammenhang.

In dieser einfachen Darstellung fehlen noch die Streumatrizen für die Einkopplung und den Abschluss. Dabei muss unterschieden werden, ob eine Ankerplatte vorhanden ist oder nicht. Ist eine Ankerplatte vorhanden, so „sieht“ eine auf den Abschluss zulaufende Welle einen Kurzschluss, ist keine Ankerplatte vorhanden, „sieht“ sie einen Leerlauf. Dementsprechend ist die Streumatrix des Abschlusses bei vorhandener Ankerplatte die negative Einheitsmatrix, sonst die positive Einheitsmatrix. Der Abstand der Resonanzen ist unabhängig vom Vorhandensein einer Ankerplatte. Lediglich die Lage der Resonanzen wird verändert. Somit hat also der Abschluss keinen Einfluss auf das eingangs beschriebene Verfahren, den Resonanzabstand auszuwerten.

Wie eben beschrieben wird auch die Streumatrix für die Einkopplung aufgestellt. Es wird zunächst angenommen, dass am angeregten Leiter keine Reflektionen auftreten. Vielmehr wird die einfallende Welle vollständig

transmittiert. Für den Fall der Einkopplung hinter der Ankerplatte wird die Einkopplung der Welle in den Stahl durch ein 3-Tor beschrieben. Ein Tor stellt die Verbindung zum Netzwerkanalysator dar, die anderen beiden Tore stellen den von der Einkopplung aus in beide Richtungen laufenden Spannstahl dar. Genauer untersucht wurde außerdem die Einkopplung vom speisenden Koaxialkabel in die Spannstahlanordnung hinein. Dabei wurde folgendes allgemeine Modell verwendet:

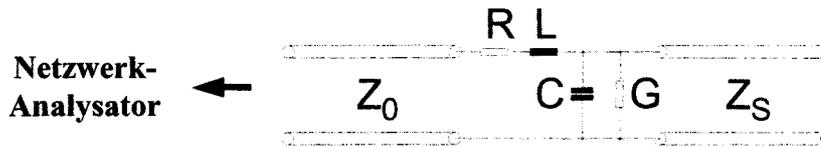


Abb. 14: Modell für die elektromagnetische Einkopplung

Es beinhaltet im Längswiderstand  $R$  ohmsche Verluste beim Kontakt vom speisenden Kabel zum Spannstahl, ebenso eine evtl. vorhandene Induktivität  $L$ . Weiterhin ist insbesondere bei vorhandener Ankerplatte eine Querkapazität  $C$  bei der Durchführung des Stahls durch die Platte anzunehmen. Der Vollständigkeit halber ist außerdem eine Leitfähigkeit  $G$  des die Stähle umgebenden Mediums angenommen worden. Diese vier Größen sind messtechnisch nur schwer bestimmbar, da ein entsprechendes Kalibrierverfahren für den Netzwerkanalysator noch nicht vorhanden ist. Sie wurden daher durch einen Vergleich zwischen Messung und Simulation iterativ angepasst. Es hat sich gezeigt, dass der Verlustwiderstand und die Leitfähigkeit nur einen unwesentlichen Einfluss auf das Reflektionsspektrum haben.

## 5.2 Simulationsergebnisse für Laboruntersuchungen

Abbildung 23 zeigt die Simulation von Brüchen nach verschiedenen Längen an einem 8,20 m langen Spannglied in Luft, welcher im Laborversuch bei genauer Kenntnis der Randbedingungen untersucht wurde. Nach Gleichung (1) ergibt sich ein Frequenzabstand  $\Delta f$  im ungebrochenen Fall von 18,2 MHz. Dieser findet sich so in der Abbildung wieder. Es ist weiterhin die deutliche Änderung des Spektrums bei einem vorhandenen Bruch und die deutliche Änderung des Resonanzabstandes bei Änderung des Bruchortes zu erkennen.

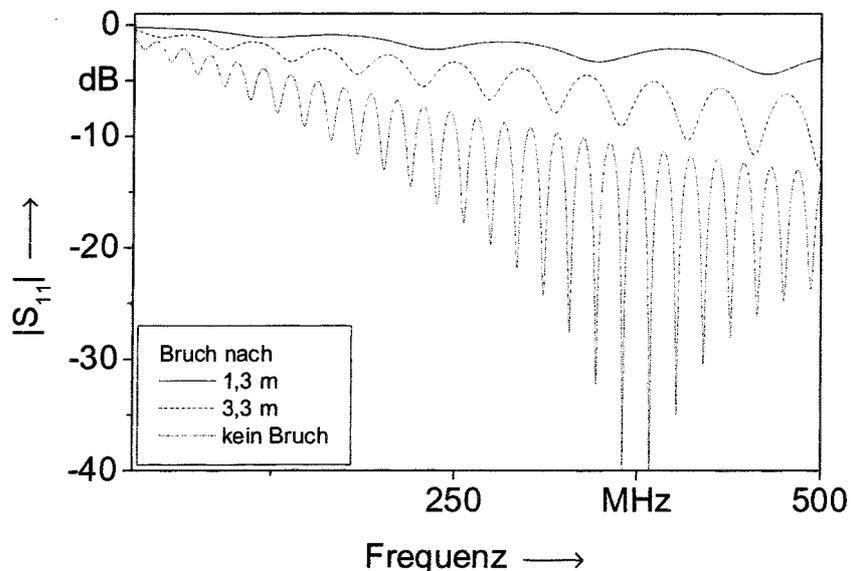


Abbildung 23: Bruchsimulation an einem 8,20 m langen Spannglied in Luft

In Abbildung 24 ist der berechnete Reflektionsparameter  $|S_{11}|$  eines 5er Bündels der Länge 8,20 m dargestellt. Es wurde angenommen, dass der Raum zwischen den Stäben mit Sand ( $DK = 3,7-j0,1$ ) gefüllt ist. In der kleineren Abbildung sind schematisch die Lagen und Nummerierungen der einzelnen Spannglieder im Bündel

dargestellt. In diesem Fall ist Leiter 1 nach 6,20 m gebrochen. Alle fünf Elemente wurden nacheinander ange-  
regt.

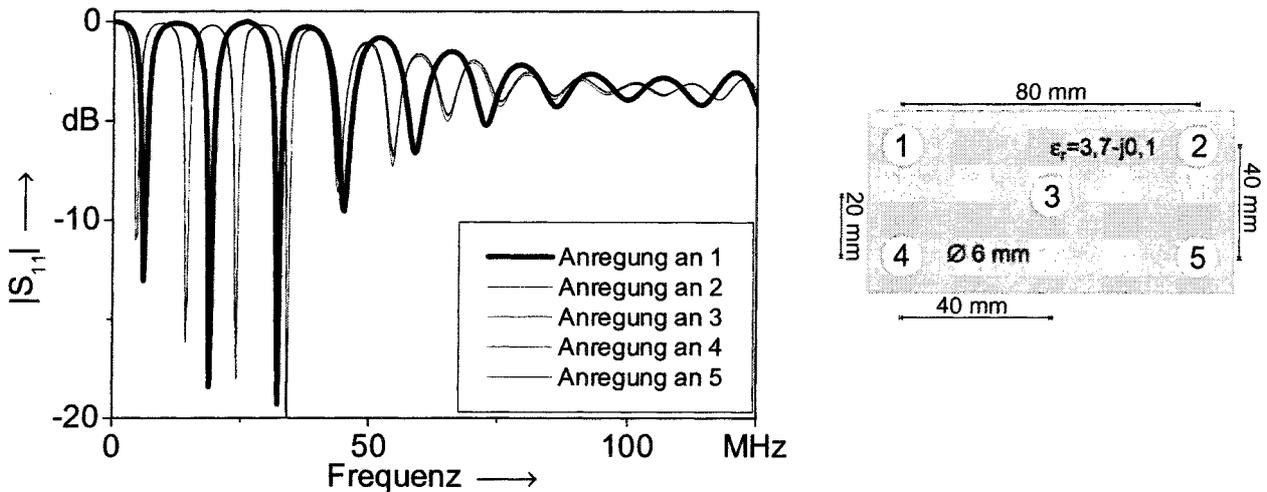


Abbildung 24: 5-Stabiges Spanngliedbündel in Sand, Länge 8,20 m, Stab 1 nach 6,20 m gebrochen

Es zeigt sich, dass sich die Simulationen bei Anregung an den Stäben 2 bis 5 kaum voneinander unterscheiden. Sowohl die Lagen als auch die Abstände der Resonanzfrequenzen sind nahezu gleich. Der Abstand  $\Delta f$  liegt bei etwa 10,7 MHz. Der gebrochene Stab 1, dargestellt durch die fett gedruckte Linie, hebt sich durch einen größeren Resonanzabstand deutlich ab. Aus dem gemessenen Abstand von 13,6 MHz lässt sich der Bruchort nach 6,20 m ermitteln. Es zeigt sich insbesondere eine sehr gute Übereinstimmung sowohl in der Lage als im Abstand der Resonanzen, verglichen mit den dieser Simulation entsprechenden Messwerten. Lediglich die Reflektionsmaxima liegen in der Messung um etwa 5 dB niedriger als in der Simulation. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Spannstähle durch die Lagerung im Labor an Luft stark korrodiert waren, so dass insbesondere die Einkopplung durch starke Zusatzverluste verschlechtert wurde. Durch die reine Auswertung der Lage der Resonanzen ist das HF-Bruchortungsverfahren jedoch unempfindlich gegen solche Zusatzverluste.

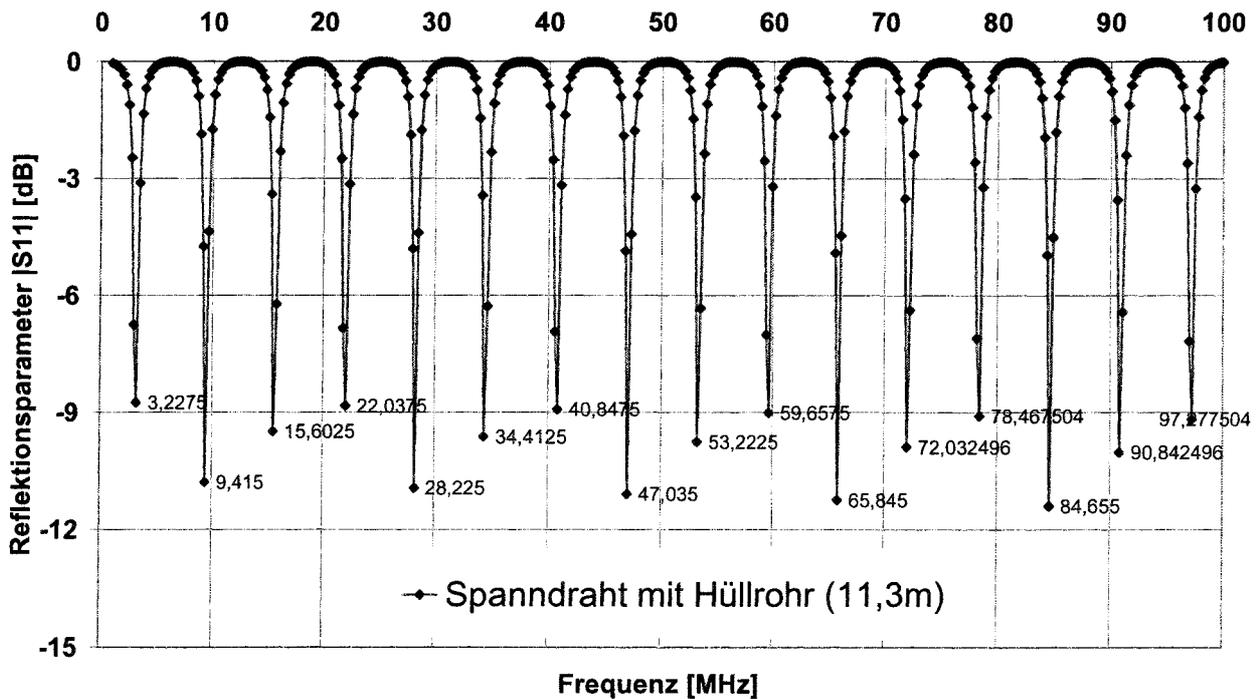


Abbildung 25: 5-Simulation eines 11,3m langen Spanndrahtes mit Hüllrohrkontakt, DK  $\epsilon_R = 4,0$  Spannglied in  
Beton

Auf Basis der Ergebnisse Messungen an verschiedenen Spanngliedern der Träger 1 und 2 mit einem externem Kupferkabel als Bezugspotential wurde eine entsprechende Simulation durchgeführt. Die Abbildung 25 zeigt die Ergebnisse der Simulation. Hierbei wurde ein einzelner Spanndraht mit Kontakt zum Hüllrohr simuliert. Bei einer angenommenen DK  $\epsilon_R = 4,0$  ergibt sich ein Frequenzabstand von ca. 6,3 MHz. Dieses entspricht in etwa den Ergebnissen der Messungen. Wie bereits erwähnt, führt die realistischere DK  $\epsilon_R = 6,3$  zu kürzeren Spanngliedlängen. Auch die Simulation zeigt, dass von mehreren niederohmigen Kontaktstellen zwischen den Spanndrähten und dem Hüllrohr bzw. zwischen den einzelnen Spanngliedern ausgegangen werden kann.

Eine ausreichend genaue HF-Modellierung des höchst inhomogenen Brückensteiges scheint mit dem derzeitigen Stand der Forschung nicht möglich. Ursache ist u.a. die fehlende Kenntnis der genauen materialspezifischen und elektromagnetischen, in Stablängs- und Querrichtung ggf. veränderlichen Eigenschaften und Wechselwirkungen des zu untersuchenden Bauteils.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Folgende Erkenntnisse und Schlussfolgerungen können festgehalten werden:

Bei der elektromagnetischen Resonanzmessung gibt es vorrangig drei Restriktionen, welche die Qualität der Bruchortung am Spannbetonbauteil mittels HF-Resonanzverfahren stark einschränken können:

- den elektrischen Kontakt der Spannglieder bzw. Spannstähle untereinander bzw. mit dem Schlaffstahl sowie mit dem Hüllrohr
- die relativ große elektromagnetische Dämpfung im Beton bzw. Verpressmörtel als verlustbehafteten Umgebungsmaterial des untersuchten Spannstahles bei frischem sowie jungem Beton und
- die Unkenntnis der elektromagnetischen Charakteristika des den Spannstahl umgebenden Mörtels bzw. Betons in Form der Dielektrizitätskonstante (DK) als Mittelwert über das gesamte Spannglied.

Wie die Betrachtungen in den vorherigen Kapiteln gezeigt haben, kann der Einzelstabbruch eines mehrstäbigen Spanngliedes nur dann geortet werden, wenn kein niederohmiger Kontakt des einzelnen Spannstahls zu anderen benachbarten Spannstählen oder zum Hüllrohr vorliegt. Aufgrund der sehr komplexen geometrischen und materialspezifischen Eigenschaften der Träger musste festgestellt werden, dass der Bruch eines einzelnen Stabes in den Spanngliedern unter den gegebenen Bedingungen nicht gefunden werden kann. Unter der Berücksichtigung der genannten Restriktionen kann aufgrund der realisierten Untersuchungen ein Anforderungsprofil für den Praxiseinsatz für im nachträglichem Verbund hergestellte Spannbetonbauteile generiert werden.

Zur Berechnung der effektiven Stab- bzw. Bruchlänge wurde auf der Grundlage der Leitungstheorie mit der Gleichung (1) eine vereinfachte Beziehung aufgestellt, welche die vorhandenen Randbedingungen jedoch nur im Ansatz berücksichtigt. Für einfache Geometrien und Spannstahlanordnungen, wie dies beispielsweise bei Spannbetonhohldielen, Masten oder vorgespannten Erdankern der Fall ist, liefert diese Gleichung erfahrungsgemäß ausreichend genaue Ergebnisse. Die Genauigkeit der Bestimmung der Bruchlänge steigt bei dieser Gleichung mit der Anzahl der im Frequenzspektrum vorhandenen Resonanzen.

Folgenden Fragestellungen müssen anhand weiterer Untersuchungen nachgegangen werden:

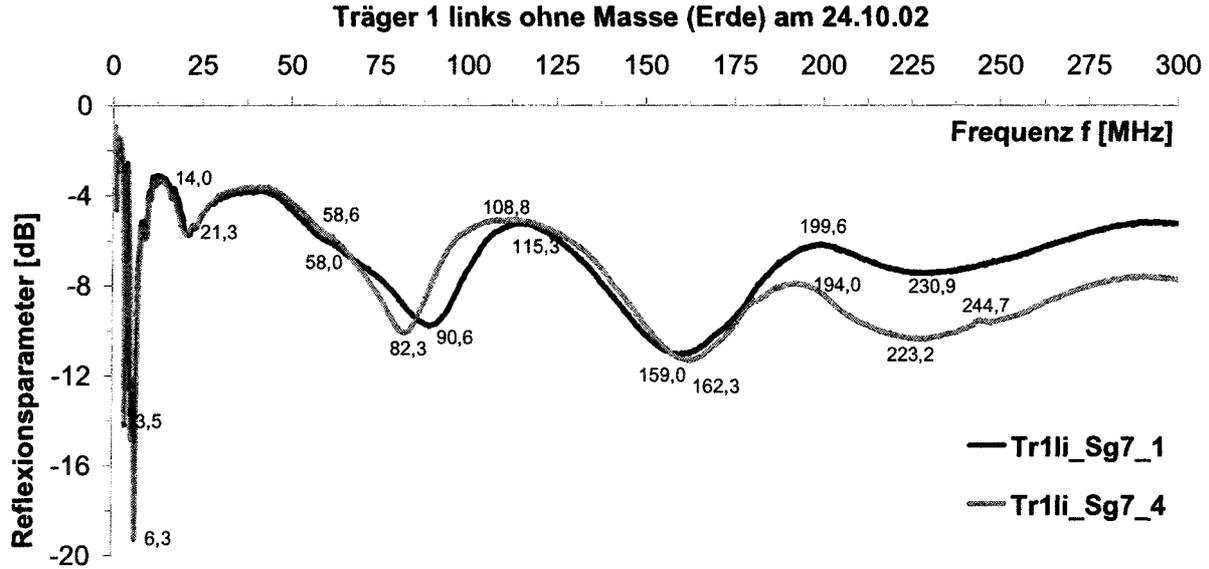
- Die Bestimmung der Dielektrizitätskonstante DK muss in Abhängigkeit der vorliegenden Randbedingungen am Bauteil und ggf. durch den Einsatz neuer SFB-Sensorik erfolgen. Dabei ist auch der Einbau eines Referenzstabes denkbar, an dem die effektive, d.h. repräsentative DK nach Initialkalibrierung aus dem aufgezeichneten Spektrum des Reflektionsparameters unter Voraussetzung der Kenntnis der Stablänge ermittelt wird.

- Erweiterung des Bruchortungsmodells und ggf. numerische Untersuchungen auf der Grundlage der elektromagnetischen Feldtheorie.
- Die elektromagnetische Ankopplung des Koaxialkabels an den Spannstahl muss noch bezüglich der maximalen Einkopplung in den Spannstahl optimiert werden.

## 7 Literatur

- [1] SONDERFORSCHUNGSBEREICH 477: Sicherstellung der Nutzungsfähigkeit von Bauwerken mit Hilfe innovativer Bauwerksüberwachung, Tagungsband Berichtskolloquium 2003. Braunschweig 2003, S. 69-77, [www.sfb477.tu-bs.de](http://www.sfb477.tu-bs.de)
- [2] BUDELMANN, H.; JACOB, A.F.; WICHMANN, H.-J.; JANNSEN, B.; SCHNEIDER, G.; HARIRI, K.: Verfahren zur Zustandserkennung von elektrisch leitfähigen länglichen Spanngliedern, Deutsches Patent- und Markenamt, DE 101 02 577 C1 (20. Juni 2002)
- [3] ROSTÁSY, F.S.; BUDELMANN, H.; HARIRI, K.; HOLST, A.; WICHMANN, H., 2003, Zustandserfassung und -beurteilung vorgespannter Zugglieder durch Monitoring, VDI-Berichte 1757, VDI-Verlag, Düsseldorf, 111-116
- [4] HARIRI, K., HOLST, A., WICHMANN, H.-J., BUDELMANN, H., 2003, Assessment of the State of Condition of Prestressed Concrete Structures with Innovative Measurement Techniques, Journal of Structural Health Monitoring, SAGE Publications, Vol.2, No.2, June 2003, 179-185
- [5] WICHMANN, H.-J.; HARIRI, K.; HOLST, A.; BUDELMANN, H., 2003, Detection and Localization of Fractures in Tendons by Means of Electromagnetic Resonance Measurement, in: Proceedings of the International Symposium on Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE), September 16-19 2003, Berlin
- [6] TAFFE., A., 2003, Zerstörungsfreie Prüfverfahren im Bauwesen (ZfPBau)- Automatisierung von zerstörungsfreien Prüfverfahren für das Bauwesen, ZfP-Zeitung 86, Oktober 2003, 36-41  
<http://www.dgzfp.de/pages/zeitung/fachbeitraege/zfp86-taffe.pdf>
- [7] UNGER, H.-G., 1980, Elektromagnetische Wellen auf Leitungen, Hüthig Verlag, Heidelberg
- [8] PAUL, C. R., 1994, Analysis of Multiconductor Transmission Lines, Wileys Series in Microwave and Optical Engineering, John Wiley & Sons, Inc.

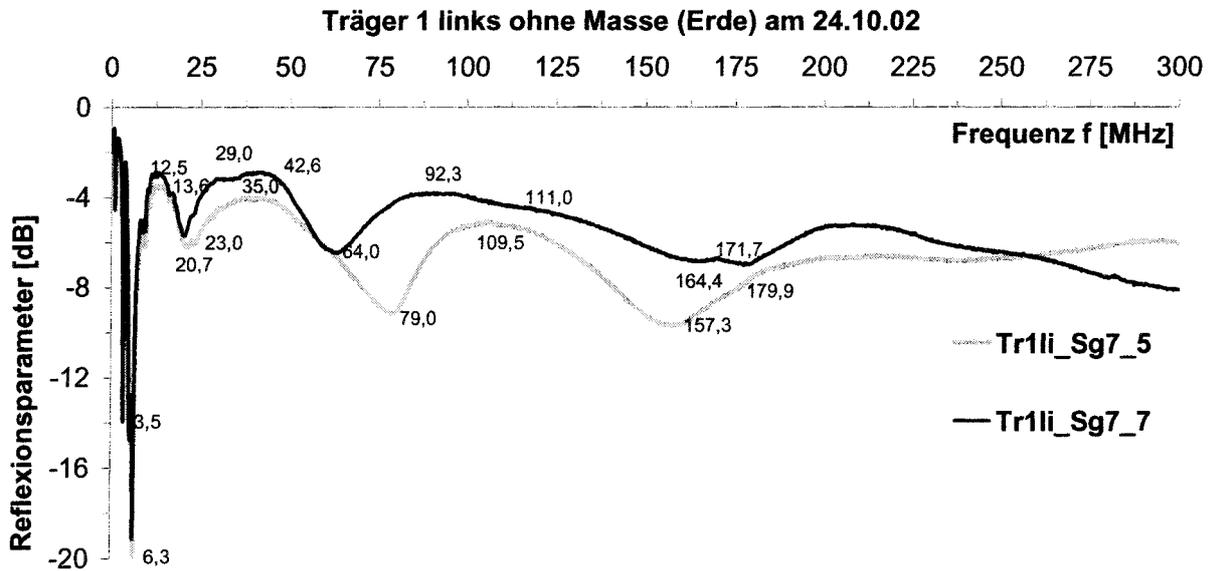
## 8 Anhang



Messung	Min	Min	Min	Min	Min	Max	Max	Max	$\emptyset \Delta f_{Add}$	$\emptyset \Delta f_{Min (Max)}$	$l_{bruch} [m]$
Tr1li_Sg7_1	15,0	37,3	32,0 84,3 (Add.)	68,4	71,9	75,3	84,3		74,9 (3 Min) 76,8 (3 Min+2 Max)	79,8 (2 Max)	0,8 0,8 0,75
Tr1li_Sg7_4	15,0	36,7	23,7 75,4 (Add.)	80,0	60,9	68,8	85,2	50,7	72,1 (3 Min) 70,2 (3 Min+3 Max)	68,2 (3 Max)	0,85 0,9 0,90

(alle  $\Delta f$  in MHz)

Anlage A1: Betrag des Reflektionsparameters Reflektionsparameter als Funktion der Messfrequenz, Träger 1 links, Spannglied 7, Draht Nr. 1,4, Messung ohne definiertes Bezugspotential am 24.10.2002



Messung	$\Delta f$	$\Delta f$	$\Delta f$	$\Delta f$	$\Delta f$	$\Delta f$	$\Delta f$	$\emptyset \Delta f_{Add}$	$\emptyset \Delta f_{Min (Max)}$	$l_{bruch} [m]$
Tr1li_Sg7_5	16,7	56 72,7 (Add.)	78,3		(21,4)	74,5	70,4	75,5 (2 Min) 72,5 (2 Max) 74,0 (2 Min+2 Max)		0,8 0,85 0,85
Tr1li_Sg7_7	14,4	43,3 57,7 (Add.)	47	60,7	(16,5)	(63,3)		57,8 (3 Min)	(39,9) (2 Max)	1,1 (1,5)

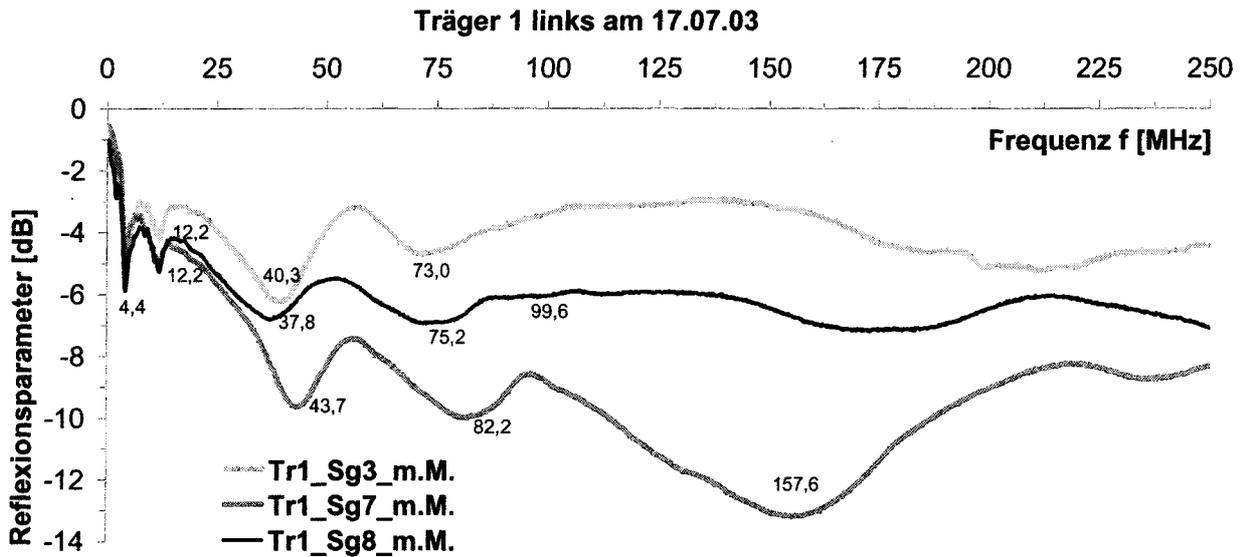
(alle  $\Delta f$  in MHz)

Anlage A2: Betrag des Reflektionsparameters in Abhängigkeit der Erregerfrequenz, Träger 1 links, Spannglied 7, Draht Nr. 5,7, Messung ohne definiertes Bezugspotential am 24.10.2002, Berechnung der Stablänge nach Gleichung (3)





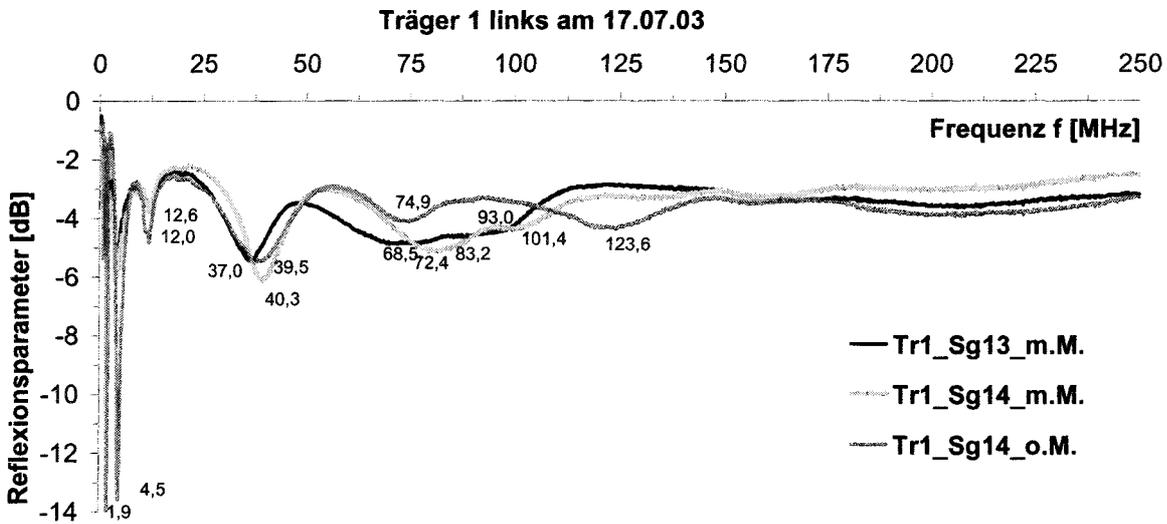




Messung]	$\Delta f$	$\Delta f$	$\Delta f$	$\Delta f$	$\Delta f$	$\emptyset \Delta f_{Add}$	$\emptyset \Delta f_{Min}$	$l_{Bruch}$ [m]
Tr1_Sg3_m.M.	7,8	28,1	32,7			34,3 (2 Min)	22,9 (3 Min)	2,7
		35,9 (Add.)					25,9 (3 Min)	1,8
Tr1_Sg7_m.M.	7,8	31,5	38,5			38,9 (2 Min)	25,9 (3 Min)	2,4
		39,3 (Add.)	(75,4)				23,8 (4 Min)	1,6
Tr1_Sg8_m.M.	7,8	25,6	37,4	24,4		31,7 (3 Min)	23,8 (4 Min)	2,6
		33,4 (Add.)					1,9	

(alle  $\Delta f$  in MHz)

Anlage A9: Betrag des Reflexionsparameters in Abhängigkeit der Erregerfrequenz, Träger 1 links, Spannglieder 3,7,8, Messung mit Stab als Bezugspotential (m.M., Spannglied 5) am 17.07.2003, Berechnung der Stablänge nach Gleichung (3)

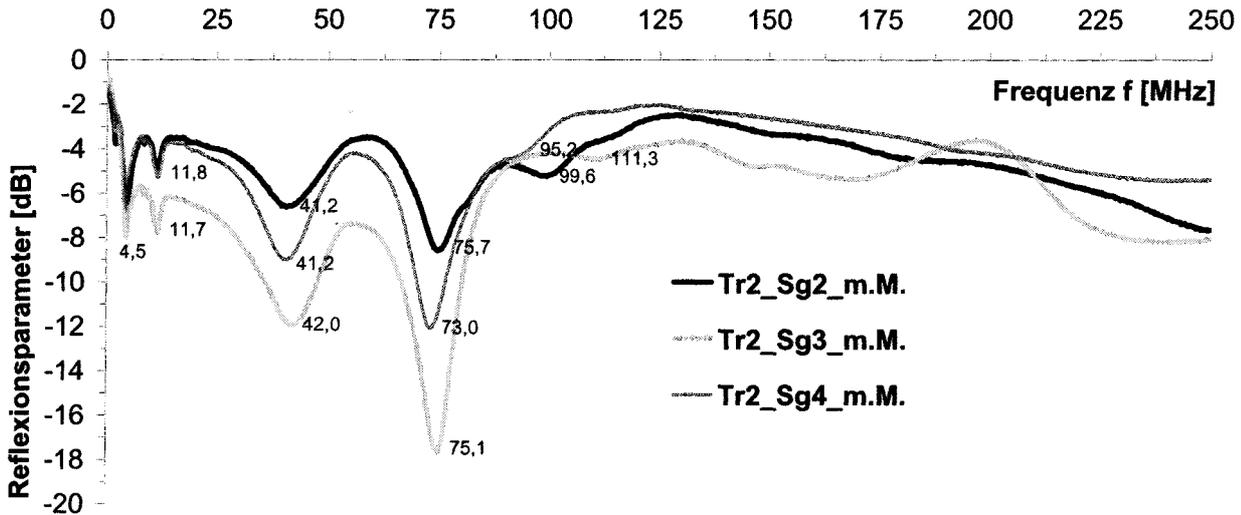


Messung	$\Delta f$	$\Delta f$	$\Delta f$	$\Delta f$	$\Delta f$	$\emptyset \Delta f_{Add}$	$\emptyset \Delta f_{Min}$	$l_{Bruch}$ [m]
Tr1_Sg13_m.M.	2,6	7,5	25	31,5	24,5	30,4 (3 Min)	18,2 (5 Min)	3,4
		35,1 (3Add.)					22,8 (4 Min)	2,0
Tr1_Sg14_m.M.	2,6	8,1	27,7	32,1	29	33,2 (3 Min)	19,9 (5 Min)	3,1
		38,4 (3Add.)					24,9 (4 Min)	1,8
Tr1_Sg14_o.M.	2,6	7,5	27,5	35,4	48,7	40,6 (3 Min)	24,3 (5 Min)	2,5
		37,6 (3Add.)					30,4 (4 Min)	1,5
								2,0

(alle  $\Delta f$  in MHz)

Anlage A10: Reflexionsparameter in Abhängigkeit der Erregerfrequenz, Träger 1 links, Spannglieder 13,14, Messung mit (m.M., Spannglied 5) bzw. ohne (o.M.) Stab als Bezugspotential am 17.07.2003, Berechnung der Stablänge nach Gleichung (3)

Träger 2 links am 17.07.03

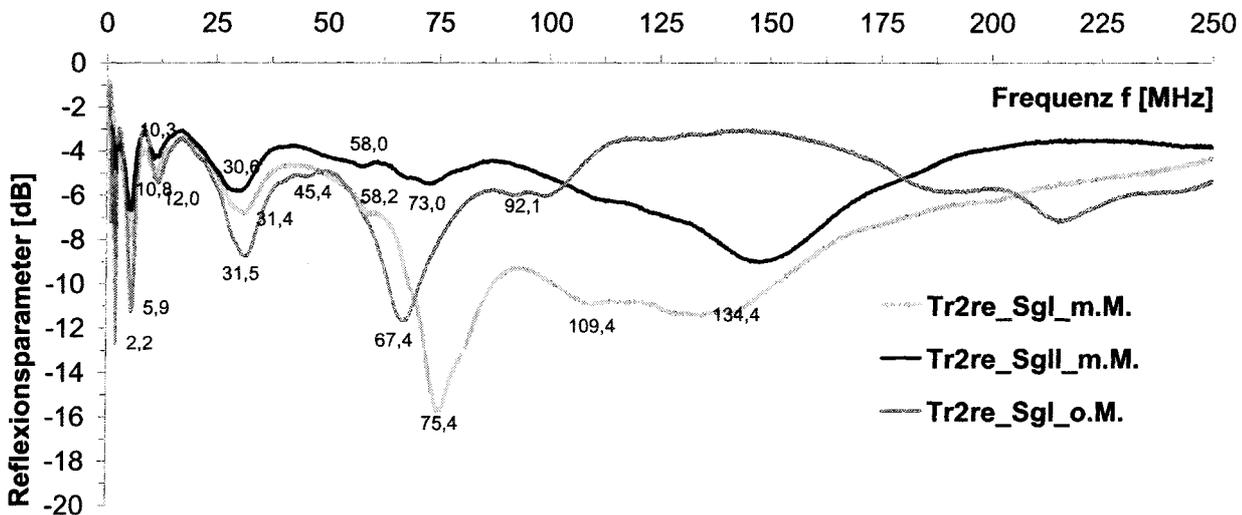


Messung	$\Delta f$	$\Delta f$	$\Delta f$	$\Delta f$	$\emptyset \Delta f_{Add}$	$\emptyset \Delta f_{Min}$	$l_{Bruch}$ [m]
Tr2_Sg2_m.M.	7,3	29,4 36,7 (Add.)	34,5	23,9	31,7 (3 Min)	23,8 (4 Min)	2,6 1,9
Tr2_Sg3_m.M.	7,2	30,3 37,5 (Add.)	33,1	36,2	35,6 (3 Min)	26,7 (4 Min)	2,3 1,7
Tr2_Sg2_m.M.	7,3	29,4 36,7 (Add.)	31,8	22,2	30,2 (3 Min)	22,7 (4 Min)	2,7 2,0

(alle  $\Delta f$  in MHz)

Anlage A11: Betrag des Reflexionsparameters in Abhängigkeit der Erregerfrequenz, Träger 2 links, Spannglieder 2-4, Messung mit Stab als Bezugspotential (m.M., Spannglied 11) am 17.07.2003, Berechnung der Stablänge nach Gleichung (3)

Träger 2 rechts am 17.07.03



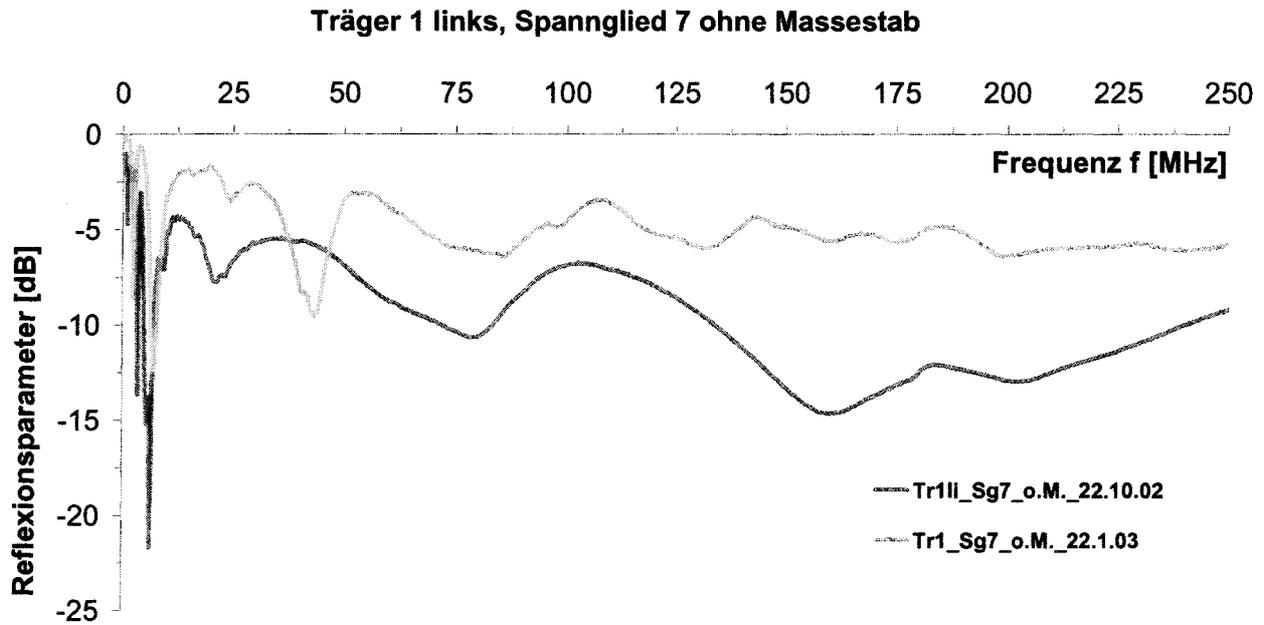
Messung	$\Delta f$	$\Delta f$	$\Delta f$	$\Delta f$	$\Delta f$	$\Delta f$	$\emptyset \Delta f_{Add}$	$\emptyset \Delta f_{Min}$	$l_{Bruch}$ [m]
Tr2re_SgI_m.M.	3,7	4,9	20,6 29,2 (Add.)	26,8	17,2	34 (25)	26,4 (5 Min)	22,0 (6 Min)	2,8 2,3
Tr2re_SgII_m.M.	3,7	4,4	20,3 28,4 (Add.)	27,4	15		23,6 (3 Min)	17,7 (4 Min)	3,5 2,6
Tr2re_SgI_o.M.	3,7	6,1	19,5 29,3 (Add.)	13,9	22	24,7	22,5 (4 Min)	18,0 (5 Min)	3,4 2,7

(alle  $\Delta f$  in MHz)

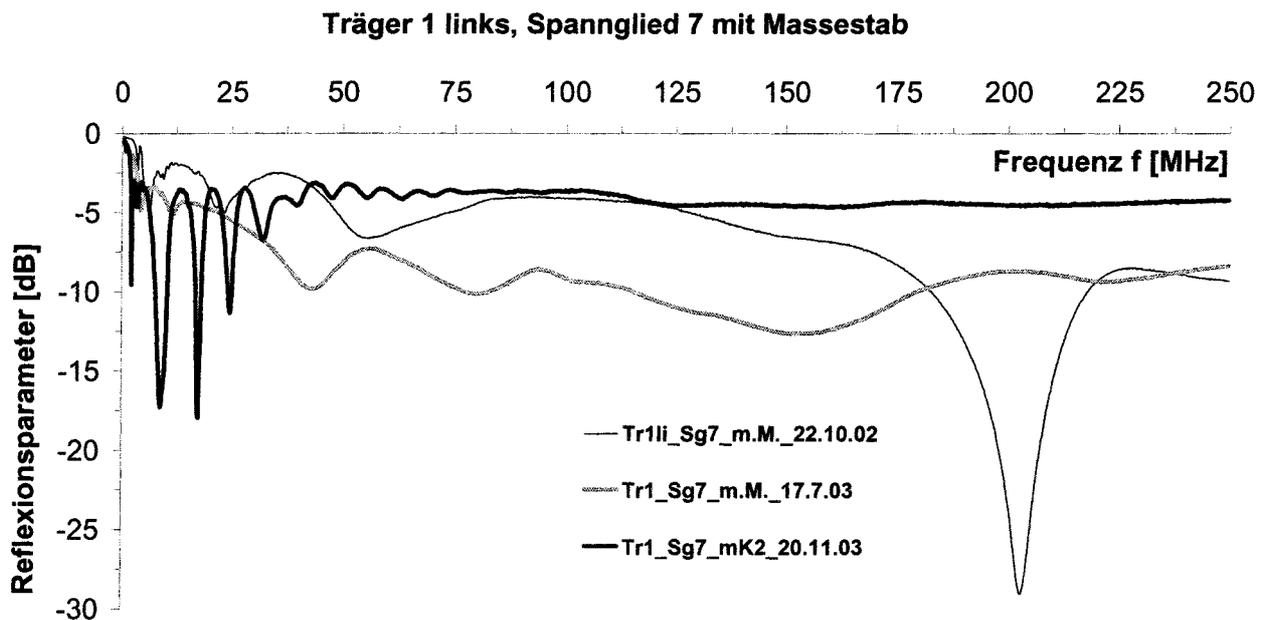
Anlage A12: Betrag des Reflexionsparameters in Abhängigkeit der Erregerfrequenz, Träger 2 rechts, Spannglieder I,II, Messung mit Stab (m.M., Spannglied IV) bzw. ohne (o.M.) Stab als Bezugspotential am 17.07.2003, Berechnung der Stablänge nach Gleichung (3)







Anlage A17: Betrag des Reflektionsparameters: Messungen am Träger 1 links, ohne definiertes Bezugspotential zu unterschiedlichen Messterminen, es wurden jedoch jeweils unterschiedliche Drähte des Spanngliedes untersucht



Anlage A18: Betrag des Reflektionsparameters: Messungen am Träger 1 links, mit Bezugspotential zu unterschiedlichen Messterminen (m.M. = mit definiertem Bezugspotential, mK2-mit externer Cu-Kabel K2 als Bezugspotential, es wurden jedoch jeweils unterschiedliche Drähte des Spanngliedes untersucht