

Ortung von Spannstahlbrüchen in metallischen Hüllrohren

T 2827

T 2827

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

1998, ISBN 3-8167-5516-X

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.fhg.de

URL <http://www.irb.fhg.de>

Abschlußbericht
zum
Forschungsauftrag des DIBT

Ortung von Spannstahlbrüchen in
metallischen Hüllrohren

AZ.: IV 1-5-672/92

DIBT

Deutsches Institut für Bautechnik

Technische Universität Berlin
Institut für Bauingenieurwesen
Fachgebiet Baustoffkunde und Baustoffprüfung

August 1996

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3	2.2.2	Messungen der Flußdichte am Spannstahl während des Magneti- sierungsprozesses	31
1.1	Die Problematik	3	2.2.3	Messungen der Flußdichte am Be- tonstahl während des Magnetisie- rungsprozesses	43
1.2	Die zerstörungsfreien Verfahren zur Prüfung von Spanngliedern	3	2.3	Die Untersuchung des Bruchsignals	55
1.3	Die Ausgangssituation	6	2.3.1	Der Versuchsstand und die Proben	55
1.4	Das Ziel	7	2.3.2	Die Anzahl und die Lage der Brü- che in einer Querschnittsfläche bei verschiedenen Betondeckungen	55
1.5	Der Stand der Technik bei der ma- gnetischen Spannstahlbruchortung	7	2.3.3	Der Einfluß der Bruchweite auf das Bruchsignal	70
1.6	Die Grundlagen des Verfahrens	8	2.3.4	Der Abschirmeffekt des Hüllrohrs	72
1.6.1	Der Ferromagnetismus	8	2.3.5	Das Bruchsignal von nebeneinan- der liegenden Bruchstellen	72
1.6.2	Die Anforderung an die Magnetisierung	15	2.4	Die Untersuchung der magneti- schen Eigenschaften der Beweh- rung	75
1.6.3	Die magnetischen Materialeigen- schaften	17	2.4.1	Der Versuchsaufbau und die Pro- ben	75
1.6.4	Die magnetischen Streufelder an Materialinhomogenitäten	21	2.4.2	Die Hysteresen und ihre numeri- sche Bearbeitung	77
1.6.5	Die Anforderungen an die Sensorik	22	2.4.3	Die Koerzitivfeldstärke und die Re- manenz der Spannstähle	80
2	Die Versuche	23	2.4.4	Die Koerzitivfeldstärken der Beton- stähle und eines Hüllrohrblechs	86
2.1	Die Versuchseinrichtungen	23	2.4.5	Die Bedeutung der Koerzitivfeld- stärke und der Remanenz für die Spannstahlbruchortung	87
2.1.1	Der Versuchsstand	23			
2.1.2	Der mobile Magnet	24			
2.1.3	Die stationäre Spule	27			
2.1.4	Der Meßwagen	28			
2.1.5	Die anderen Magnetfeldstärkemeß- geräte	28			
2.1.6	Die A/D-Wandler und das DMM	29			
2.2	Das magnetisierende Feld	29			
2.2.1	Der Versuchsaufbau und die Pro- ben	29			

3	Die Bauwerkuntersuchungen	89	6	Zusammenfassung	112
3.1	Die baulichen Randbedingungen	89	7	Literaturverzeichnis	115
3.2	Die Lage der Spannglieder	91	8	Anhang I - Tabellen	119
3.3	Der Einfluß der Störsignale	92	9	Anhang II - Photographien	123
4	Magnetostatische Berechnungen auf Grundlage der Maxwell- Gleichungen	100	10	Anhang III - Numerische Simulation der Flußverteilung bei der Magneti- sierung mit einem Jochmagneten	139
4.1	Die Maxwell-Gleichungen	100	11	Anhang IV - Die Vorstellung des Remanenzmagnetismus-Verfahrens auf der Hannover Messe '95	140
4.2	Numerische Berechnungen und mathematische Modelle	101			
5	Die numerische Signalverarbeitung	107			
5.1	Vor- und Nachteile	107			
5.2	Die angewandten Methoden	107			
5.2.1	Die Addition von Meßkurven	107			
5.2.2	Die Glättung der Meßkurven	108			
5.2.3	Korrelationsfunktionen	109			
5.3	Weitere Signalverarbeitungs- methoden	110			
5.3.1	Die numerische Differenzschätzung	110			
5.3.2	Die numerische Verkleinerung des Meßabstands	110			

1 Einleitung

1.1 Die Problematik

Die Forderung nach einem zerstörungsfreien Prüfverfahren zur Detektion von Spannstahlbrüchen ergab sich nach dem Versagen vorgespannter Bauteile. Die weit über dreihundert Schäden an eingebauten Spannstählen, die in der westlichen Welt zwischen 1950 und 1986 bekannt wurden, beschrieben Nürnberger und Jungwirth [NÜR1], [JUN]. Seitdem haben sich weitere Schadensfälle ereignet. Betroffen waren alle Arten von Spannbetonbauteilen, wie Brücken, Druckbehälter, Hochbauteile etc.. Während viele Schäden sich vor dem totalen Versagen des Bauteils ankündigten, z. B. durch sich stark erweiternde Risse, [SCHMI], [FRA], [SCHWI], kam es auch zum schlagartigen Versagen von Bauteilen, das sich nicht durch sichtbare Zeichen ankündigte. Darunter war ein Fall, bei dem die gebrochenen Spannstähle sich in einem nicht korrodierten Hüllrohr befanden, das vollständig verpreßt war [HIL] (Abb. 9-1). Der Verpressmörtel war alkalisch, hatte also noch eine passivierende Wirkung.

Während aggressive, von außen eingedrungene Substanzen, z. B. Tausalze, eine häufige Schadensursache bei Brückenbauwerken sind, konnten sie in diesem Fall nicht die Ursache für die Spannstahlbrüche gewesen sein.

Die Schadensursache ist bis heute nicht eindeutig geklärt. In Frage kommen:

- Eine Schadensursache, die im Herstellungsverfahren oder in der chemischen Zusammensetzung der Stähle zu suchen ist. In allen Spannbetonbauteilen mit nachträg-

lichem Verbund, die ohne vorher erkennbare äußere Zeichen versagten, war vergüteter Spannstahl eingebaut, der z. B. hinsichtlich wasserstoffinduzierter Spannungsrisskorrosion generell empfindlicher ist als kaltgezogener Spannstahl [NÜR2].

- Eine bereits vor oder während des Einbaus aufgetretene Vorschädigung. Dabei kann es sich sowohl um mechanische Schädigungen als auch um beginnende Korrosion in Einbaulage vor dem Verpressen handeln.
- Die Verwendung korrosiver Zusatzmittel zum Verpressmörtel.

Unabhängig von der konkreten Schadensursache verdienen diese Schadensfälle deshalb besondere Beachtung, weil keine äußeren Anzeichen auf das bevorstehende Versagen hinwiesen. Darin liegt ein besonders hohes Sicherheitsrisiko, das insbesondere auch eine potentielle Gefährdung von Menschenleben darstellt.

Es sollte deshalb ein Verfahren entwickelt werden, mit dem auch diese Schäden frühzeitig und möglichst zerstörungsfrei detektierbar sind.

1.2 Die zerstörungsfreien Verfahren zur Prüfung von Spanngliedern

Eine Zusammenstellung der bis 1987 eingesetzten zerstörungsfreien Prüfverfahren für Spannglieder hat Matt erarbeitet [MAT]. Damals kam er zu dem Schluß, daß keine zerstörungsfrei arbeitende Methode direkte Auskunft

über den Schädigungsgrad eingebauter Spannstähle gibt.

Eine Literatursichtung 'Anwendung von zerstörungsfreien Prüfmethode bei Betonbrücken' führte Krieger 1995 durch [KRI].

Seit Ende der Achtzigerjahre wird eine Vielzahl zerstörungsfreier Verfahren im Bauwesen entwickelt. Über den aktuellen Entwicklungsstand auf diesem Gebiet informieren die Vortragsbände zum internationalen Symposium 'Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE)', das im September 1995 in Berlin stattfand [NDT-CE].

Auf einige Verfahren soll kurz eingegangen werden.

Durchstrahlungsprüfung

Zur Durchstrahlung von Spannbetonbauteilen eignen sich als Strahlungsquellen radioaktive Präparate, die γ -Strahlung emittieren oder Linienbeschleuniger, die eine sehr harte Röntgenstrahlung erzeugen. Aufgrund des unterschiedlichen Absorptionsvermögens von Stahl und Beton bilden sich die Konturen stählerner Einbauten auf einer photographischen Schicht ab.

Mit diesem Verfahren lassen sich bei geeigneter Strahlenquelle Betondicken von bis zu 1,20 m durchstrahlen. Die Belichtungszeiten für ein Röntgenbild mit den Abmessungen 300 mm x 400 mm betragen zwischen 10 min und 60 min. Abgesehen davon, daß dieser Bereich sehr klein ist, wird das Bild nur in speziellen Fällen vorhandene Spannstahlbrüche

auch zeigen, nämlich nur dann, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind:

- Die Bruchufer müssen ausreichend weit auseinanderliegen.
- Der Freiraum zwischen den Bruchufern muß von der Strahlung durchdrungen werden, d. h. die Ausbreitungsrichtung der Strahlen muß nahezu orthogonal zum Normalenvektor der Bruchflächen stehen und die Bruchstelle darf nicht durch andere Spanndrähte, Stahlbetonbewehrung oder Spannglieder verdeckt sein.

Das Verfahren bietet also hinsichtlich der Spannstahlbruchortung eine sehr geringe Ausagesicherheit. Während einer Durchstrahlungsprüfung sind Menschen und Tiere von einem weiten Bereich um den Einsatzort fernzuhalten [MDS].

Ultraschallverfahren

Bei der Ultraschall-Prüfung von Beton werden üblicherweise Schallwellen der Frequenzen zwischen 20 kHz und 200 kHz verwendet.

Die Lokalisation von Spanngliedern mit dem Pulse-Echo-Verfahren ist zumindest unter Laborbedingungen möglich [KRA].

Die Spannstahlbruchortung mit Ultraschall ist, bei der Anwendung von der Betonoberfläche aus, prinzipiell nicht möglich. Bei einer Frequenz von 200 kHz und einer Schallgeschwindigkeit von etwa 4500 ms^{-1} in Beton beträgt die Wellenlänge etwa 2,25 cm. Objekte mit einer Ausdehnung von weniger als etwa der halben Wellenlänge, also etwa einem Zentimeter sind grundsätzlich nicht erkennbar. Die

Entfernung zwischen den Bruchfugen gebrochener Spannstähle ist kleiner als diese Länge. Der Erhöhung der Frequenz der Ultraschallwellen und damit der Auflösung steht ein starkes Anwachsen der Absorptionsrate mit steigender Frequenz entgegen.

Werden die Spannglieder von den (meist nicht zugänglichen) Ankerköpfen aus durchschallt, können wesentlich höhere Frequenzen verwendet werden, da die Absorptionsrate für Ultraschallwellen in Stahl insbesondere für hohe Frequenzen um ein Vielfaches geringer ist als in Beton. Es treten aber verschiedene andere Randeffekte auf, bedingt durch die Oberflächenbeschaffenheit der Stähle, ihre Krümmung und ihren Verbund mit dem Verpressmörtel. Die elastische Energie der Ultraschallwellen wird dadurch stark aus den Stählen abgekoppelt.

In günstigen Fällen kann aus den reflektierten Signalen, innerhalb einer Reichweite von 6 m, auf Unregelmäßigkeiten, wie Spannstahlbrüche, und deren Lage geschlossen werden [DIR].

Impact-Echo-Methode

Mit einem anderen akustischen Verfahren, der Impact-Echo-Methode, die als Anregung einer Schallwelle einen kurzen mechanischen Schlag nutzt, ist es bereits an Bauwerken gelungen, Spannglieder nicht nur zu orten, sondern auch Aussagen über ihren Verpreßzustand zu machen [SAN]. Das ist eine wichtige Information, weil die Schadenshäufigkeit bei nicht oder mangelhaft verpreßten Spanngliedern

aufgrund des nicht vorhandenen Korrosionsschutzes relativ hoch ist.

Spannstahlbrüche sind mit der Impact-Echo-Methode nicht detektierbar.

Die Anregung der elastischen Welle an den Ankerköpfen und die Messung des transmittierten und reflektierten Signals eignet sich nur bei einzelnen Stäben mit kleiner Querschnittsfläche zur Detektion von Brüchen. Zur Ortung von Brüchen einzelner Spannstähle in Spanngliedern ist die Methode nicht geeignet [DIR].

Elektrische Reflektometrie

Die Einspeisung hochfrequenter Spannungsimpulse an freigelegten Spannstahlenden und die Messung des an Störungen reflektierten Signals ist ein Verfahren, das sich bei der Lokalisierung von Schädigungen in elektrischen Leitern bewährt hat. Unter Laborbedingungen war an einem Spannglied, bestehend aus 22 Spanndrähten $\varnothing = 7$ mm, die Detektion von 3 in einem Spanngliedquerschnitt gebrochenen Drähten bei großen Bruchweite (2 cm) möglich [KAP].

Georadar

Das Georadar arbeitet mit elektromagnetischen Wellen in dem Frequenzbereich von 100 MHz bis 2 GHz. Es bietet eine schnelle und relativ sichere Methode der Lokalisierung von Spanngliedern. Eine Neueentwicklung ist die Kombination eines Georadars mit einem elektromagnetischen Betondeckungsmesser, wodurch die Interpretation des Radarsignals erleichtert wird [PÖP].

Das Hüllrohr bildet einen Faradayschen Käfig, so daß das Meßsignal keine Information über das Innere des Hüllrohrs, sei es der Verpresszustand oder seien es eventuelle Spannstahlbrüche, enthalten kann.

Potentialfeldmessung

Korrodierte Bereiche in Stahlbetonbauteilen können mit der Potentialfeldmessung frühzeitig zerstörungsfrei erfaßt werden. Die Potentialdifferenz zwischen passivem und korrodierendem Betonstahl bzw. das daraus resultierende elektrische Feld ist an der Betonoberfläche meßbar [CZI], [VOL].

Auch an korrodierendem Spannstahl bildet sich an der Korrosionsstelle eine Anode aus. Das entstehende elektrische Feld ist an der Betonoberfläche aber nur dann meßbar, wenn sich das Hüllrohr bereits aufgelöst hat. Ein eventuell auch korrodierendes, den Spannstahl aber noch umhüllendes Metallrohr würden einen Faradayschen Käfig bilden. Das elektrische Feld des Spannstahls würde vollständig abgeschirmt. Detektierbar wären dann allenfalls Korrosionsstellen an Hüllrohren.

Magnetische Verfahren

Magnetische Verfahren eignen sich zur Detektion von Spannstahlbrüchen. Der Beton verhält sich dem magnetischen Feld gegenüber neutral. Das Hüllrohr mit seiner geringen Wandungsdicke hat nur eine schwach abschirmende Wirkung auf das Magnetfeld. Daß es einen Faradayschen Käfig bildet, führt nur zu einer vollständigen Abschirmung elektrischer Felder und nicht, wie häufig fälschlich angenommen

[MAT], zur vollständigen Abschirmung magnetischer Felder.

1.3 Die Ausgangssituation

Die ersten Versuche, Materialfehler mit Hilfe des Magnetismus zu detektieren, liegen mehr als 100 Jahre zurück. Mit einer Kompaßnadel detektierte man Fehler an Gewehrläufen und Eisenbahnschienen. Die elektromagnetischen Grundlagenkenntnisse waren zu dieser Zeit jedoch noch sehr unvollständig.

Es dauerte bis 1922, als William E. Hooke feststellte, daß Stahlkörner auf der Oberfläche stählerner Werkstücke, die sich in einer magnetischen Spannvorrichtung befanden, Muster bildeten, die mit den Oberflächenrissen übereinstimmten. Daraufhin setzte eine intensive wissenschaftliche Untersuchung dieser Phänomene ein, die Anfang der Dreißigerjahre zu ersten technischen Anwendungen in größerem Maßstab führte.

Neben zahlreichen anderen Anwendungen in der Stahlindustrie ist die elektromagnetische Drahtseilprüfung [SCHLE], [BER], [HAR] der Aufgabenstellung, Spanndrahtbrüche in Spanngliedern im Einbauzustand zu detektieren, prinzipiell ähnlich. Der Unterschied im Schwierigkeitsgrad ist jedoch groß. Die Drahtseile sind direkt zugänglich. Sie können von der Magnetisiereinheit und einer Meßspule umschlossen werden. Störsignale lassen sich wesentlich einfacher vermeiden als bei der Spannstahlbruchortung.

In Deutschland wurden magnetische Verfahren zur Detektion von Spanndrahtbrüchen seit 1989 in großem Umfang eingesetzt. Die Ver-

fahren wurden entwickelt, nachdem Anfang der Achtzigerjahre in Bayern Viehstaldecken eingestürzt waren, die mit Spannbetonträgern hergestellt waren [FLO]. Hier stellte sich die Aufgabe, Spanndrahtbrüche in Spannbetonträgern mit sofortigem Verbund zu orten. Die Spanndrähte sind bei dieser Art der Vorspannung einzeln (ohne Berührungspunkte) mit relativ geringer Betondeckung im Träger angeordnet. Beherrschbare Störsignale verursachen bei diesen Trägern die Bügel, die quer zu den Spanndrähten liegen. Das von HOCHTIEF entwickelte magnetische Verfahren zur Ortung von Spanndrahtbrüchen in dieser Art von Trägern, war Ausgangspunkt für die Entwicklung eines Verfahrens zur Detektion von Spanndrahtbrüchen in Spanngliedern.

1.4 Das Ziel

Das Ziel des Forschungsvorhabens war die Entwicklung eines zerstörungsfreien Meßverfahrens zur Ortung von Spannstahlbrüchen in Spannbetonbauteilen mit nachträglichem Verbund.

Genutzt werden sollte der Remanenzmagnetismus der ferromagnetischen Spannstähle. An Bruchstellen bildet sich ein charakteristisches Streufeld aus, das mit Magnetfeldsensoren an der Betonoberfläche nachgewiesen werden sollte.

Für die Magnetisierung des Spannstahls sollten spezielle Elektromagneten entwickelt und gebaut werden. Das Verfahren sollte unter Praxisbedingungen bis zur Tauglichkeit für Bauwerkuntersuchungen erprobt werden.

1.5 Der Stand der Technik bei der magnetischen Spannstahlbruchortung

Zerstörungsfreie magnetische Spannstahlbruchortungsverfahren für Spannbetonbauteile mit nachträglichem Verbund ist in Deutschland außer von uns von einer weiteren Arbeitsgruppe entwickelt worden. Über Arbeiten und Ergebnisse der anderen Gruppe, die sich aus Wissenschaftlern der Forschungs- und Materialprüfungsanstalt Stuttgart, des Kernforschungszentrums Jülich und der Kraftwerks- und Anlagenbau AG, Pirna, zusammensetzt, informieren die Veröffentlichungen [SAW1] und [SAW2]. Es wird auf diese Arbeiten an den entsprechenden Stellen dieses Berichts eingegangen (Kap. 4.2, Kap. 5.2.3 und Kap. 5.2.5). In den USA wurde in den achtziger Jahren von Barton und Kusenberger [KUS1], [KUS2], [BAR] ein magnetisches Verfahren zur Spannstahlbruchortung entwickelt, das zur Zeit weiterentwickelt wird [COO]. Details zum Stand der dortigen Arbeiten sowie neuere Veröffentlichungen sind nicht bekannt.

In Deutschland ist das Verfahren von beiden Arbeitsgruppen bis zur Praxistauglichkeit entwickelt worden und wird für Bauwerkuntersuchungen eingesetzt. Die Durchführung der Messungen und insbesondere die Auswertungen der Ergebnisse erfordert allerdings noch den Spezialisten.

Einen Überblick über die magnetischen Verfahren zur zerstörungsfreien Materialprüfungen im allgemeinen geben die Reviews von Jiles [JIL1], [JIL2].

Eine theoretische Behandlung physikalischen Prozesse, die bei der Anwendung des Verfahrens stattfinden, ist äußerst komplex. Berechnungen mit ernstzunehmenden mathematischen Modellen, basierend auf den Maxwell-Gleichungen, scheiterten bisher an den Schwierigkeiten, die geometrischen Randbedingungen, die die physikalischen Vorgänge stark beeinflussen, angemessen zu modellieren. Selbst Berechnungen mit stark vereinfachten Annahmen, die zu Ergebnissen führen, die nicht im Einklang mit den experimentellen Untersuchungsergebnissen stehen, benötigen sehr lange Rechenzeiten.

Auf die theoretischen Modellbildungen [DOB], die zur Berechnung der Streufelder an Fehlstellen bei aktiver Magnetisierung entwickelt wurden, kann nur beschränkt zurückgegriffen werden.

1.6 Die Grundlagen des Verfahrens

1.6.1 Der Ferromagnetismus

Spannstähle haben ferromagnetische Eigenschaften. Ferromagnetische Stoffe zeichnen sich dadurch aus, daß sie unterhalb einer kritischen Temperatur, dem Curie-Punkt T_C , ein magnetisches Moment \underline{M} besitzen, auch wenn kein äußeres Magnetfeld \underline{H} wirkt.

Diese spontane Magnetisierung ferromagnetischer Stoffe resultiert aus einer Wechselwirkung zwischen Atomen, die bei bestimmten Atomen in bestimmten Kristallgittern, bestrebt ist, Elektronenspins, denen ein magnetisches Moment zugeordnet ist, parallel zu stellen. Es

ist die sogenannte Austauschwechselwirkung, ein quantenmechanischer Effekt [LAN].

Dieser ordnenden Tendenz wirkt die Wärmebewegung und die Minimierung der magnetischen Feldenergie entgegen. Um den Einfluß der Temperatur auf die Messungen zur Spannstahlbruchortung abzuschätzen, wird die Temperaturabhängigkeit der spontanen Magnetisierung $M_S(T)$ betrachtet.

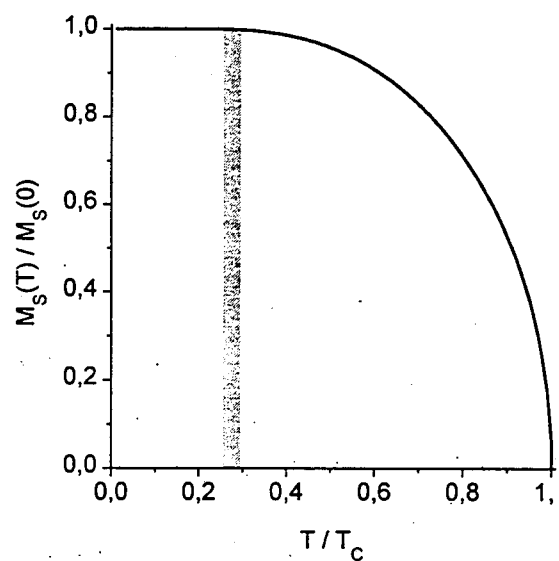


Abb. 1-1. Die spontane Magnetisierung für Eisen als Funktion der Temperatur. Der Temperaturbereich von $T = -10^\circ\text{C}$ bis $T = 35^\circ\text{C}$ ist grau unterlegt ($T_{C,\text{Eisen}} = 723^\circ\text{C}$).

In Abb. 1-1 ist die Abhängigkeit der spontane Magnetisierung $M_S(T)$ von der Temperatur T dargestellt. Die spontane Magnetisierung $M_S(T)$ wurde dabei auf die Sättigungsmagnetisierung $M_S(0)$ am absoluten Nullpunkt $T = 0\text{ K}$ normiert, die Temperatur T auf den Curie-Punkt T_C .

Am absoluten Nullpunkt $T = 0\text{ K}$ richten sich alle den Ferromagnetismus hervorrufenden Elektronenspins parallel aus. Mit zunehmender Temperatur beginnen diese Spins immer stärker um ihre Vorzugsrichtung zu präzedieren.

Das resultierende magnetische Moment nimmt ab, bis bei einer stoffabhängigen kritischen Temperatur, dem Curie-Punkt T_C , das resultierende magnetische Moment und damit die ferromagnetische Eigenschaft des Materials verschwindet. Für Eisen liegt der Curie-Punkt bei $T_C = 723^\circ\text{C} \approx 996\text{ K}$.

Der in der Abb. 1-1 dargestellte Zusammenhang der beiden normierten Größen ist nach der Weißschen Molekularfeldtheorie [WEI] durch die transzendente Gleichung

$$\frac{M_S(T)}{M_S(0)} = \tanh\left(\frac{M_S(T) T_C}{M_S(0) T}\right) \quad (1.6-1)$$

gegeben. Die nach dieser Theorie, die auf einer Näherung beruht, berechneten Werte stimmen mit experimentell ermittelten Literaturwerten gut überein.

Für die Remanenz $M_R(T)$, die maximale stoffabhängige Magnetisierung, wenn keine externen magnetischen Felder H vorhanden sind, läßt sich keine analytische Lösung angeben. Die Temperaturabhängigkeit ist jedoch qualitativ der Temperaturabhängigkeit der Sättigungsmagnetisierung $M_S(T)$ sehr ähnlich. Nur wenige Stoffe zeigen ein abweichendes Verhalten [KNE], Spannstähle gehören nicht dazu.

Der für die Anwendung des Verfahrens interessante Temperaturbereich von $T = -10^\circ\text{C}$ bis $T = 35^\circ\text{C}$ ist in Abb. 1-1 grau unterlegt. In diesem Temperaturbereich ist die Auswirkung der Temperatur auf die Sättigungsmagnetisierung $M_S(T)$ und die Remanenz $M_R(T)$ vernachlässigbar.

Der zweite Effekt, der der Parallelstellung der Elektronenspins entgegen wirkt, ist die Minimierung der magnetischen Feldenergie. Sie ist

dafür verantwortlich, das ein ferromagnetischer Stoff, wie Stahl, trotz der spontanen Magnetisierung $M_S(T)$ nach außen unmagnetisch erscheinen kann.

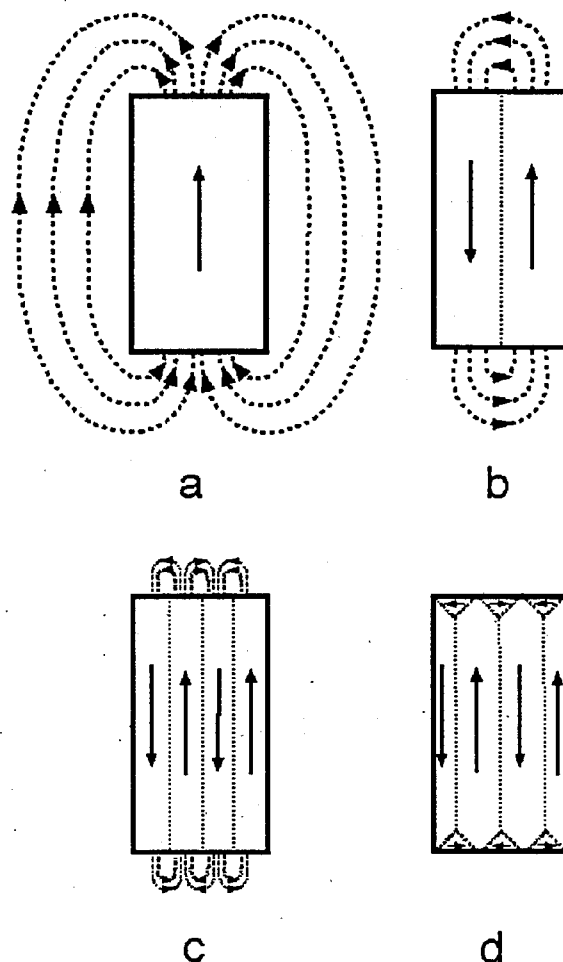


Abb. 1-2. Die spontane Magnetisierung M_S der einzelnen Weißschen Bezirke kann sich nach außen hin aufheben

Der makroskopische Ferromagnet ist in eine Vielzahl sogenannter magnetischer Domänen aufgeteilt, sogenannter Weißscher Bezirke, die jeweils bis zur temperaturabhängigen Sättigungsmagnetisierung bzw. spontanen Magnetisierung $M_S(T)$ magnetisiert sind. Die Magnetisierungsrichtungen der einzelnen Bezirke sind jedoch so angeordnet, daß der Ferromagnet nach außen kein resultierendes magnetisches

Moment besitzt. Die Abb. 1-2 zeigt die von a nach d zunehmende Minimierung der Feldenergie. Die Bezirke haben Abmessungen von etwa 10^{-3} cm. Begrenzt werden sie durch sogenannte Bloch-Wände, in denen sich die Magnetisierungsrichtung innerhalb einer Wanddicke von $0.5 \cdot 10^{-6}$ bis $5 \cdot 10^{-6}$ cm dreht.

Die Minimierung der magnetischen Feldenergie erzeugt also, makroskopisch betrachtet, ein entmagnetisierendes Feld, dessen Größe stark von den Abmessungen des Meßobjekts abhängt. Erst ein externes magnetisches Feld \underline{H} erzeugt eine makroskopische Magnetisierung \underline{M} .

Bei ferromagnetischen Stoffen besteht zwischen der Magnetisierung \underline{M} und dem magnetisierenden Feld \underline{H} ein komplizierter Zusammenhang, der üblicherweise graphisch durch die magnetische Hysteresis Kurve dargestellt wird (Abb. 1-3).

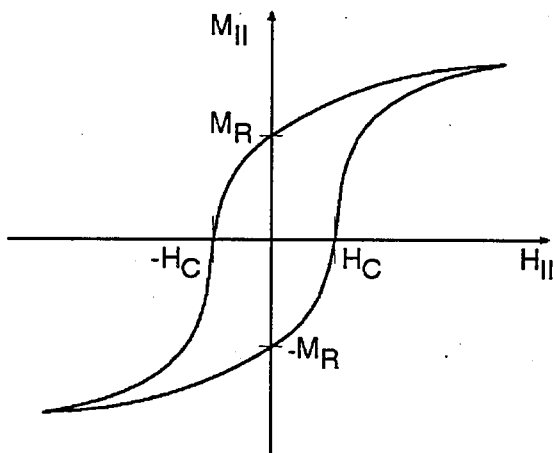


Abb. 1-3. Die magnetischen Eigenschaften eines ferromagnetischen Stoffes werden durch die Hysteresis charakterisiert. M_R ist die Remanenz, H_C ist die Koerzitivfeldstärke.

Dabei werden zunächst die reinen Werkstoffeigenschaften beschrieben, der Zusammenhang zwischen $M_{||}$ und $H_{||}$ in einem in Magneti-

sierungsrichtung unendlich ausgedehnten Körper. $M_{||}$ und $H_{||}$ sind die Komponenten von \underline{M} und \underline{H} parallel zur Ausrichtung des Körpers. In Untersuchungen der magnetischen Eigenschaften eines ferromagnetischen Stoffes dient häufig ein Torus des Werkstoff als „unendlich“ ausgedehnter Körper entlang einer Richtung.

Daß es Punkte auf der Hysteresis gibt, an denen die Magnetisierung $M_{||}$ gleich Null ist, liegt an der Minimierung der magnetischen Feldenergie.

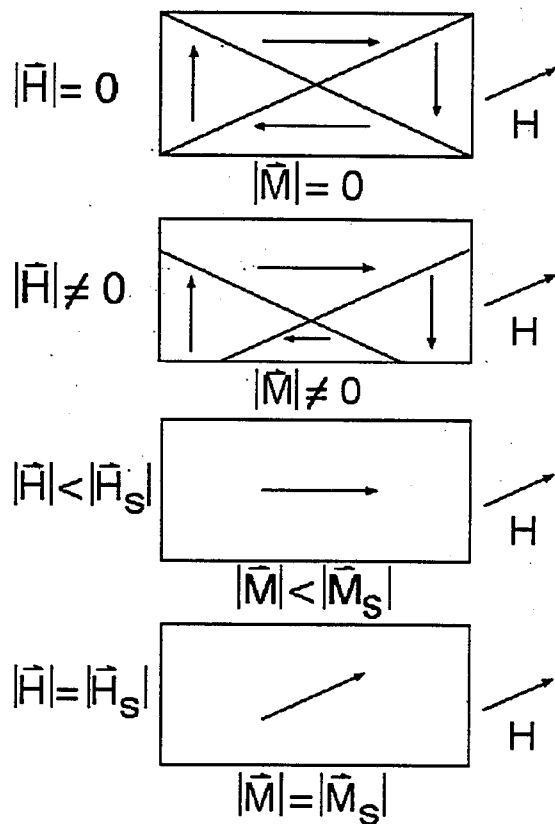


Abb. 1-4. Die Veränderung der Bezirksstruktur und der Magnetisierung mit der Stärke des externen Felds in einem Kristallit

Die Prozesse, die in einem ferromagnetischen Körper während einer Magnetisierung durch ein externes Feld stattfinden, lassen sich anhand der Abb. 1-4 erläutern.

Die resultierende Magnetisierung \underline{M} sei ohne äußeres magnetisches Feld \underline{H} gleich null (Abb. 1-4 oben), der Körpers befindet sich im Zustand minimaler magnetischer Feldenergie. Wird ein äußeres Magnetfeld \underline{H} angelegt, verschieben sich zunächst die Bloch-Wände, so daß die Bezirke, deren Magnetisierungsrichtung den kleinsten Winkel mit der Richtung von \underline{H} einschließen, wachsen (Abb. 1-4, 2. Skizze).

Die Wandverschiebungen sind, solange noch keine Weißschen Bezirke völlig ausgelöscht wurden, also für kleine Feldstärken, reversibel. Parallel zu den Wandverschiebungen finden reversible Drehprozesse statt; die Magnetisierung einzelner Bezirke wird leicht in die Richtung des externen Felds \underline{H} gedreht. Es schließen sich bei Erhöhung des externen Felds \underline{H} irreversible Wandverschiebungen und irreversible Drehprozesse (Umklappen der Magnetisierung eines Bezirks in eine energetisch günstigere Richtung) an. Die irreversiblen Prozesse sind abgeschlossen, sobald nur noch ein Weißscher Bezirk in jedem Kristallit übrig ist (Abb. 1-4, 3. Skizze). Die Magnetisierung jedes einzelnen Kristallits ist jetzt entlang der magnetischen Vorzugsrichtung gerichtet, die mit der Richtung des externen Felds den kleinsten Winkel bildet. Jeder ferromagnetische Stoff hat magnetische Vorzugsrichtungen oder magnetisch leichte Richtungen, die dadurch gekennzeichnet ist, daß sich die Spins mit dem geringsten Energieaufwand in dieser Ausrichtung parallel stellen lassen.

Bei weiterer Erhöhung der externen Feldstärke \underline{H} wird die Magnetisierung \underline{M} des übriggebliebenen Bezirks zunehmend in die Richtung des externen Felds gedreht bis der Körper gesättigt

magnetisiert ist (Abb. 1-4 unten). Auf diese reversiblen Drehprozesse folgen noch sogenannte Paraprozesse, die hier bedeutungslos sind.

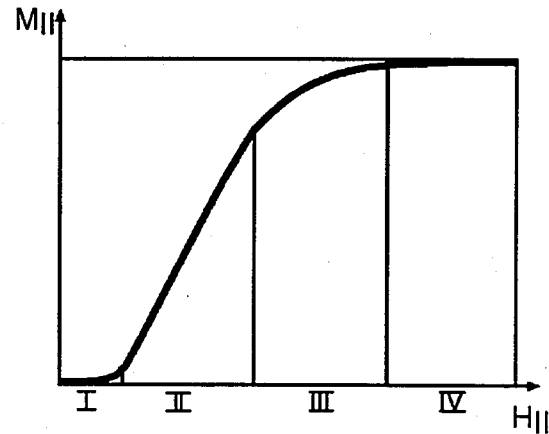


Abb. 1-5. Die Neukurve, unterteilt in die Bereiche, in denen die verschiedenen Magnetisierungsprozesse stattfinden.

Den Zusammenhang zwischen der Magnetisierung $M_{||}$ und dem externen magnetischen Feld $H_{||}$ entlang der Achse des Ferromagneten ausgehend vom makroskopisch unmagnetischen Zustand gibt die sogenannte Neukurve (Abb. 1-5). Die einzelnen Prozesse während des Aufmagnetisierens lassen sich nicht so scharf trennen, wie dies bei dem geschilderten einfachen Modell gemäß Abb. 1-4 geschieht. Grob lassen sich die vier Bereiche der Neukurve in Abb. 1-5 aber den jeweiligen Prozessen zuordnen.

Für das Verfahren von Bedeutung sind insbesondere die irreversiblen Prozesse, die während des Aufmagnetisierens ablaufen. Sie führen dazu, daß der Körper makroskopisch magnetisiert bleibt, wenn das externe Feld $H_{||}$ auf Null zurückgefahren wird (Abb. 1-3). Diesen Effekt der remanente Magnetisierung $M_{||R}$ zeigen auch Spannstähle, die durch ein externes

magnetisches Feld $H_{||}$ so stark magnetisiert wurden, daß alle irreversiblen Dreh- und Wandverschiebungsprozesse in dem Spannstahl in Magnetisierungsrichtung abgelaufen sind.

Wird die Feldstärke des externen Felds $H_{||}$ nun mit umgekehrtem Vorzeichen wieder erhöht, bleibt die Richtung der Magnetisierung $M_{||}$ bis zum Erreichen der Koerzitivfeldstärke H_C entgegengesetzt zur Richtung des externen Felds $H_{||}$. Bei weiterer Erhöhung von $H_{||}$ strebt die Magnetisierung $M_{||}$ wieder der Sättigung $M_{||S}$ entgegen. Wird das äußere Feld auf Null zurückgenommen, bleibt eine remanente Magnetisierung $M_{||R}$ umgekehrten Vorzeichens (Abb. 1-3).

Die in Abb. 1-3 gezeigte Hysterese ist die sogenannte Sättigungshysterese oder äußere Hysterese, die sich ergibt, wenn ein Ferromagnet dieses Verlaufs einer externen Feldstärke ausgesetzt wird:

- Ausgangszustand ist, daß der Stoff der externen Sättigungsfeldstärke H_S ausgesetzt ist und die Sättigungsmagnetisierung M_S hat. Die externe Feldstärke $H_{||}$ wird dann auf Null zurückgenommen. Die Magnetisierung $M_{||}$ des Stoffs beträgt in diesem Zustand M_R .
- Die externe Feldstärke $H_{||}$ wird jetzt mit umgekehrtem Vorzeichen wieder erhöht bis wiederum die Sättigungsfeldstärke $-H_S$ erreicht ist.
- Die externe Feldstärke wird auf Null zurückgenommen. Die Magnetisierung $M_{||}$ des Stoffs beträgt in diesem Zustand $-M_R$.

- Die Richtung des externen Felds $H_{||}$ wird wieder gewechselt und bis zu Sättigungsfeldstärke erhöht. Die Hysterese ist jetzt geschlossen.

Es gibt auch andere Pfade in der $M_{||} - H_{||}$ -Ebene, die beschränkt werden, wenn man z. B. vor dem Erreichen der Sättigungsmagnetisierung H_S den Betrag der Feldstärke $H_{||}$ wieder kleiner werden läßt. Die äußere Hysterese in Abb. 1-3 gibt also nur die Grenzen aller möglichen Pfade an. Jeder Punkt der $M_{||} - H_{||}$ -Ebene, der innerhalb des Gebiets liegt, das von der Sättigungshysterese begrenzt wird, ist erreichbar.

Die magnetische Flußdichte \underline{B} ist gegeben durch

$$\underline{B} = \mu_0 \underline{H} + \underline{M} \quad (1.6-2)$$

mit der Induktionskonstante

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ VsA}^{-1} \text{m}^{-1}.$$

Die Magnetisierung ist selbst eine Funktion der Feldstärke \underline{H} , so daß gilt

$$\underline{B} = \mu_r \mu_0 \underline{H} = \mu_r \underline{B}_0 \quad (1.6-3)$$

mit der relativen magnetischen Permeabilität μ_r und der Flußdichte im Vakuum B_0 .

Nur entlang der Neukurve (Abb. 1-5) gilt die Beziehung (1.6-3). Sie ist also auf das erste Aufmagnetisieren eines Ferromagnetikums mit der anfänglichen Magnetisierung $\underline{M} = \underline{0}$ beschränkt.

Da der Ferromagnetismus eine Eigenschaft ist, die an die Kristallstruktur gebunden ist, ist die Magnetisierung anisotrop, die relative Permeabilität μ_r also ein Tensor 2. Stufe. Hier wird sie als skalar angenommen. Sie gilt dann streng-

genommen nur für die isotropen magnetischen Eigenschaften von Vielkristallen.

Mit den Gleichungen 1.6-2 und 1.6-3 läßt sich die Magnetisierung \underline{M} schreiben als

$$\underline{M} = \underline{B} - \underline{B}_0 = \mu_r \mu_0 \underline{H} - \mu_0 \underline{H} = (\mu_r - 1) \underline{B}_0 = \chi \underline{B}_0, \quad (1.6-4)$$

mit der magnetischen Suszeptibilität χ .

Die relative Permeabilität μ_r und die magnetische Suszeptibilität χ in der Definition durch die Gleichungen 1.6-3 und 1.6-4 bezeichnet man auch als die totale Permeabilität μ_t und die totale Suszeptibilität χ_t .

Häufig wird auch die differentielle Suszeptibilität

$$\chi_d = \left. \frac{\partial M}{\partial H} \right|_P, \quad (1.6-5)$$

d. h. die Steigung der Neukurve in einem Punkt P betrachtet.

Ein Spezialfall der differentiellen Suszeptibilität ist die Anfangsuszeptibilität

$$\chi_A = \left. \frac{\partial M}{\partial H} \right|_{H=0} \quad (1.6-6)$$

Die differentielle Permeabilität μ_d und die Anfangspermeabilität μ_A folgen aus dem Zusammenhang

$$\mu_r = \chi + 1. \quad (1.6-7)$$

Die diskutierte Hysteresis in Abb. 1-3 ist, wie bereits erwähnt, von der Probenform unabhängig und beschreibt ausschließlich die magnetischen Werkstoffeigenschaften.

Werden die magnetischen Felder von Stäben mit endlicher Länge gemessen, muß der so-

genannte Entmagnetisierungsfaktor beachtet werden.

Bei Stäben endlicher Länge wird die Sättigung nämlich erst bei größeren Feldstärken erreicht und die remanente Magnetisierung ist kleiner, als es der Hysteresis in Abb. 1-3 entsprechen würde.

Die Ursache, eine Verringerung der Feldstärke \underline{H} im Inneren des ferromagnetischen Körpers auf einen Wert \underline{H}_i , kann so gedeutet werden, daß sich an den Stirnflächen eines entlang seiner Längsachse magnetisierten Stabs freie magnetische Ladungen bilden, die ein zusätzliches magnetisches Feld \underline{H}_{Entmag} erzeugen, das dem externen Feld \underline{H} entgegengerichtet ist. Dieses Bild der freien magnetischen Ladungen ist als Analogon zu den freien elektrischen Ladungen in der Elektrostatik zu sehen. Sie sind im physikalischen Sinne nicht wirklich existent. Der elektrischen Ladungsdichte σ entspricht eine magnetische Ladungsdichte $\underline{n} \cdot \underline{M}$, wobei \underline{n} der Normalenvektor der jeweiligen Stirnfläche des Stabs ist. Im Gegensatz zur elektrischen Ladungsdichte ist die magnetische Ladungsdichte integriert über die Oberfläche eines Körpers identisch gleich Null; es gibt keine magnetischen Monopole.

Das entmagnetisierende Feld \underline{H}_{Entmag} schwächt das in der Probe wirkende innere Feld :

$$\underline{H}_i = \underline{H} + \underline{H}_{Entmag}$$

bzw.

$$|\underline{H}_i| = |\underline{H}| - |\underline{H}_{Entmag}| \quad (1.6-8)$$

Das entmagnetisierende Feld ist proportional zur Magnetisierung

$$\underline{H}_{\text{Entmag}} = -\frac{NM}{\mu_0} \quad (1.6-9)$$

Als Funktion des Entmagnetisierungsfaktors N lautet Gleichung 1.6-8

$$\underline{H}_i = \underline{H} - \frac{NM}{\mu_0} \quad (1.6-10)$$

Durch Vergleich mit den Gleichungen 1.6-2, 1.6-3 und 1.6-4 erhält man

$$\underline{H}_i = \frac{\underline{H}}{1 + \chi N} \quad (1.6-11)$$

und damit

$$\underline{M} = \frac{\mu_0 \chi \underline{H}}{1 + \chi N} \quad (1.6-12)$$

Der Entmagnetisierungsfaktor hat eine entscheidende Bedeutung für das Verfahren zur Detektion von Spannstahlbrüchen. Er setzt sich additiv zusammen aus dem geometrischen Entmagnetisierungsfaktor und dem inneren Entmagnetisierungsfaktor [KNE]. Der innere Entmagnetisierungsfaktor wächst mit der Inhomogenität der Probe, ist also eine stoffabhängige Größe [DUS].

Der geometrische Entmagnetisierungsfaktor hängt vor allem vom Dimensionsverhältnis

$$p = \frac{l}{d} \quad (1.6-13)$$

ab, mit

l : Probenlänge,

d : Probendurchmesser.

Für zylindrische Probenformen ist das entmagnetisierende Feld nicht homogen und deshalb vom Ort im Stab und der Suszeptibilität abhängig. Geschlossen berechenbar sind dagegen die geometrischen Entmagnetisierungsfak-

toren für gestreckte Rotationsellipsoide, die für $p \gg 1$ eine für unsere Zwecke hinreichend genaue Näherung für Stäbe darstellen.

Für den geometrischen Entmagnetisierungsfaktor des gestreckten Rotationsellipsoids ($p \gg 1$) gilt [KOH]:

$$N \approx \frac{\ln 2p - 1}{p^2} \quad (1.6-14)$$

Der Zusammenhang zwischen dem Dimensionsverhältnis und dem geometrischen Entmagnetisierungsfaktor in Gleichung 1.6-13 ist in Abb. 1-6 graphisch dargestellt.

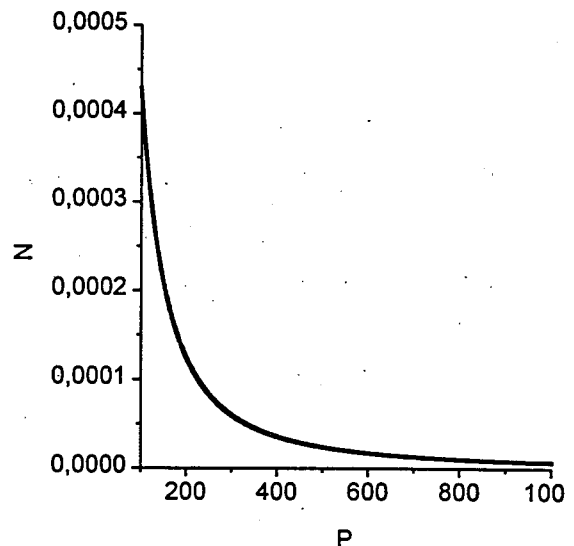


Abb. 1-6. Der geometrische Entmagnetisierungsfaktor N ist eine Funktion des Quotienten aus der Probenlänge l und dem Durchmesser d .

Der Entmagnetisierungsfaktor bewirkt, wie man an Gleichung 1.6-10 erkennt, daß die Hysteresis einer Probe endlicher Abmessungen aus der Werkstoffhysteresis (Abb. 1-3) durch Scheinung hervorgeht. Das externe Feld H_{\parallel} ist durch das tatsächliche Feld im Inneren $H_{i\parallel}$ zu ersetzen.

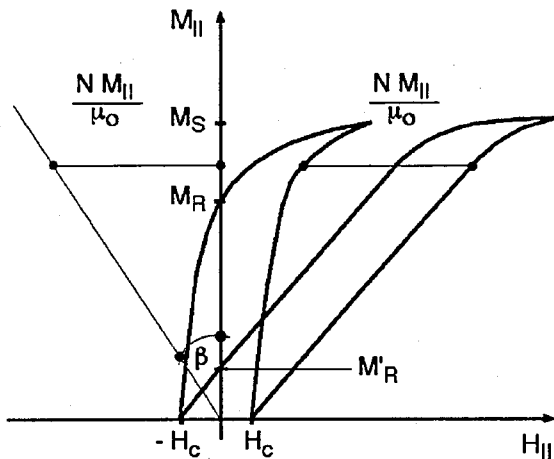


Abb. 1-7. Die Hysterese eines gestreckten Rotationsellipsoid geht durch Scherung aus der Werkstoffhysterese hervor. Die Scherung wird mit kleiner werdendem Quotienten aus Probenlänge l und Probendurchmesser d größer.

Der Einfluß der Scherung einer Hysterese auf die Remanenz ist in Abb. 1-7 dargestellt.

Für die Anwendung des Meßverfahrens ergibt sich daraus, daß die magnetisierte Länge eines Spannglieds nicht zu kurz sein darf, wenn die Ergebnisse der Prüfung auf Spanndrahtbrüche aussagekräftig sein sollen. Untersuchungen an einer magnetisierten Spanngliedlänge von 2 m oder kürzer durchzuführen ist nicht sinnvoll.

1.6.2 Die Anforderung an die Magnetisierung

Die Spannglieder besitzen bereits eine gewisse, wenn auch in der Regel kleine Magnetisierung M , da sie dem Magnetfeld der Erde ausgesetzt sind. Diese Magnetisierung kann zur Detektion von Spannstahlbrüchen nicht genutzt werden. Abgesehen davon, daß die Magnetisierung meist sehr klein ist, ist sie auf jeden Fall nicht definiert.

Wird das zu untersuchende Spannglied vor der Messung der magnetischen Flußdichte nicht so stark magnetisiert, daß die irreversiblen Prozesse in Magnetisierungsrichtung abgelaufen sind, hängen die gemessenen Signale von der magnetischen Vorgeschichte des Spannstahls und der anderer ferromagnetischer Einbauten, wie der Stahlbetonbewehrung, ab.

Welchen magnetischen Feldern diese Stähle seit ihrer Herstellung ausgesetzt waren, z. B. aufgrund des Transports mit Hubmagneten, ist unbekannt.

Die Abb. 1-8 bis Abb. 1-10 zeigen jeweils eine Messung der transversalen und axialen Komponente der magnetischen Flußdichte (orthogonal bzw. parallel zur Betonoberfläche gerichtet) an der Oberfläche eines Spannbetonbinders. Der magnetische Fluß wird verursacht durch das eingebaute Spannglied, bestehend aus 22 vergüteten Spanndrähten mit der jeweiligen Querschnittsfläche von $A = 40 \text{ mm}^2$ und durch die Stahlbetonbewehrung.

Die Kurven repräsentieren drei verschiedene magnetische Zustände des untersuchten Spannbetonbinders.

Die Meßkurve in Abb. 1-8 zeigt die magnetische Flußdichte, die im vorgefundenen Zustand gemessen wurde, ohne zuvor magnetisiert zu haben.

Im Anschluß an diese Messung wurde der regelbare Elektromagnet (Kap. 2.1.2), der zum Magnetisieren der Spannglieder dient, ausgeschaltet an die Stelle $x = 408 \text{ cm}$ (Entfernung vom Startpunkt der Messungen) gebracht. An dieser Stelle wurde der jochförmige Elektroma-

gnet kurzzeitig eingeschaltet und so eingestellt, daß er ein relativ kleines Magnetfeld erzeugt. Er wurde ausgeschaltet zurückgefahren. Die dann aufgenommene Meßkurve (Abb. 1-9) zeigt ein starkes Signal an dieser Stelle. Der Spannbetonbinder wurde, trotz der geringen Feldstärke des Magneten, lokal stark magnetisiert. Das Signal hat einen Verlauf, der für Spannstahlbrüche charakteristisch ist.

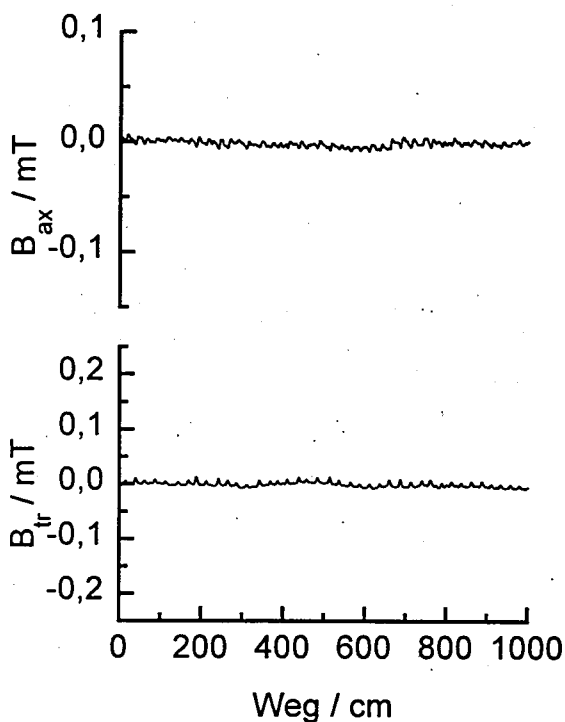


Abb. 1-8. Der Verlauf der transversalen und der axialen Komponente der Flußdichte entlang der unteren Betonoberfläche eines Spannbetonbinders, der nicht magnetisiert wurde. Die Betondeckung des Spannglieds betrug an den Enden etwa 20 cm, in der Mitte etwa 3 cm. Die Skalierung wurde so groß gewählt, um die Vergleichbarkeit mit Abb. 1-9 und Abb. 1-10 zu erhalten.

Zum Vergleich ist in Abb. 1-10 die Flußdichte dargestellt, die nach dem Magnetisieren des Spannglieds gemessen wird. Das scheinbare

Bruchsignal an der Stelle $x = 408$ cm ist verschwunden. Es resultierte ausschließlich aus der lokalen Magnetisierung, nicht aus einem Spannstahlbruch.

Diese Messungen zeigen deutlich, daß ohne vorangegangene Magnetisierung Signale auftreten können, die fälschlicherweise als durch Spanndrahtbrüche verursacht interpretiert werden können.

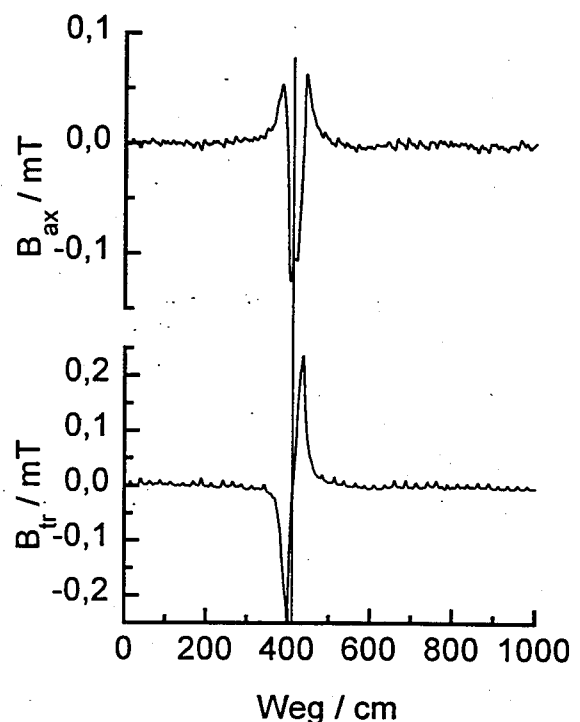


Abb. 1-9. Der Verlauf der transversalen und der axialen Komponente Flußdichte entlang der gleichen Betonoberfläche wie in Abb. 1-8. Der Binder wurde in einem Bereich um die Stelle $x = 408$ cm (vertikale Linie) von einem schwachen externen Feld magnetisiert. Dort zeigt sich ein Signal, wie es auch bei Spanndrahtbrüchen gemessen wird.

Der umgekehrte Fall, daß trotz vorhandener Spanndrahtbrüche keine Signale auftreten, ist, wenn auf eine vorangehende Magnetisierung

verzichtet wird, ebenfalls möglich. Das Spannungsglied könnte zufällig in der Umgebung der Brüche nicht oder nur sehr schwach magnetisiert sein.

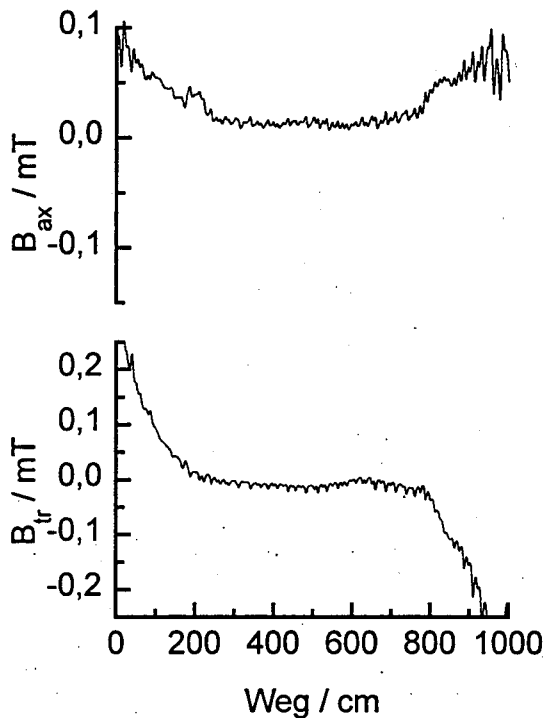


Abb. 1-10. Der Verlauf der transversalen und der axialen Komponente der Flußdichte entlang der gleichen Betonoberfläche wie in Abb. 1-8 und Abb. 1-9. Der Binder wurde über die gesamte Meßlänge bis zum Erreichen der remanenten Magnetisierung des Spannglieds magnetisiert. Das bruchartige Signal aus Abb. 1-9 ist verschwunden.

Die Unkenntnis der magnetischen Vorgeschichte des Spannstahls und des Bewehrungsstahls erlaubt keine Interpretation von Messungen der magnetischen Flußdichte, die durchgeführt werden, ohne zuvor die magnetische Vorgeschichte des Spannglieds zu löschen. Das wird durch die Magnetisierung mit einem hinreichend großen Feld $H_{||S}$ erreicht.

Das Feld ist dann ausreichend, wenn irreversible Prozesse beim Anlegen eines Feldes $|H_{||}| > |H_{||S}|$ nicht mehr auftreten.

1.6.3 Die magnetischen Materialeigenschaften

Die magnetischen Eigenschaften von Stahl, hauptsächlich charakterisiert durch die Remanenz $M_{||R}$ und die Koerzitivfeldstärke $H_{||C}$, hängen insbesondere von der chemischen Zusammensetzung, der Korngröße, den äußeren Spannungen und den Eigenspannungen ab. Diese Zusammenhänge sind für reale Vielkristalle theoretisch schwierig zu handhaben und größtenteils noch nicht vollständig verstanden.

Ein Teil der durchgeführten Untersuchungen diente deshalb dazu, die Koerzitivfeldstärke für verschiedene Beton- und Spannstähle experimentell zu bestimmen und deren Remanenz abzuschätzen.

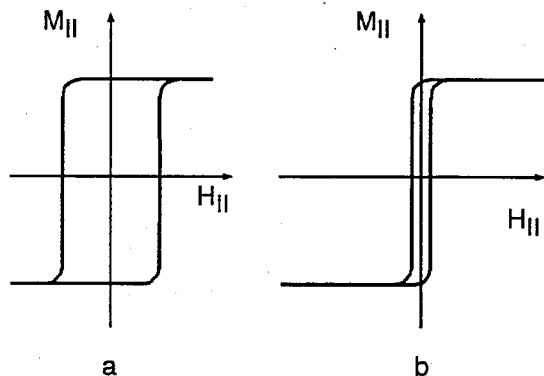


Abb. 1-11. Die Hysterese eines magnetisch harten (a) und die eines magnetisch weichen Stoffs (b).

Die Koerzitivfeldstärke ist wichtig, weil sie eine Unterscheidung zwischen den Nutzsensoren, die von den Spanndrähten ausgehen, und den Störsensoren, ausgehend von der Stahlbetonbewehrung, erlaubt. Spannstähle sind magne-

tisch härter als Betonstähle, d. h. es wird ein stärkeres externes Feld benötigt, um sie umzumagnetisieren (Abb. 1-11).

Die Fragen nach dem magnetischen Materialverhalten der Spannstähle, wenn diese unter externen mechanischen Spannungen stehen, lassen sich, in den für das Verfahren interessanten Aspekten, ohne Versuche ausreichend klar beantworten.

Ein magnetisches Feld erzeugt eine Volumen- und Gestaltänderung ferromagnetischer Stoffe. Dieses Phänomen wird als Magnetostriktion bezeichnet.

In unserem Fall reicht es, sich auf die Längenänderung der Spannstähle im Magnetfeld zu beschränken. Beim Anlegen eines externen Magnetfelds H_{\parallel} wird ein Stahlstab gedehnt oder gestaucht, je nach Vorzeichen der Magnetostriktion

$$\lambda(H_{\parallel}) = \frac{\Delta l(H_{\parallel})}{l} \quad (1.6-15)$$

In Abb. 1-12 sind die Dehnungen λ_{100} , λ_{110} und λ_{111} eines Eiseneinkristalls infolge eines magnetischen Felds H entlang der ausgezeichneten Kristallrichtungen mit den Millerschen Indizes $[100]$, $[110]$ und $[111]$ graphisch dargestellt. Die Kristallrichtungen $\langle 100 \rangle$ entsprechen den Richtungen der Würfelkanten der kubisch raumzentrierten Elementarzelle, die $\langle 110 \rangle$ -Richtungen den Richtungen der Flächendiagonalen und die $\langle 111 \rangle$ -Richtungen den der Raumdiagonalen.

Der Entmagnetisierungsfaktor bewirkt, wie man an Gleichung 1.6-10 erkennt, daß die Hysteresis einer Probe endlicher Abmessungen aus

der Werkstoffhysteresis (Abb. 1-3) durch Scheerung hervorgeht. Das externe Feld H_{\parallel} ist durch das tatsächliche Feld im Inneren H_{\parallel} zu ersetzen.

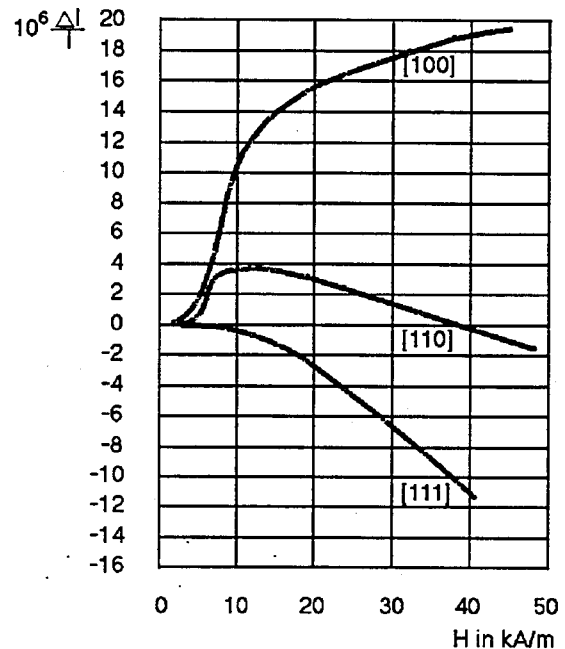


Abb. 1-12. Die Magnetostriktion eines Eiseneinkristalls in Abhängigkeit vom externen Magnetfeld. Die Magnetostriktion hängt von der Kristallrichtung, entlang der das Magnetfeld wirkt, ab. [HEC]

Die Magnetostriktion im Sättigungsbereich λ_s berechnet sich in einem Vielkristall durch Mittelung über alle Richtungen zu [KNE]

$$\lambda_s = \frac{1}{5}(2\lambda_{100} + 3\lambda_{111}). \quad (1.6-16)$$

Die Meßwerte für die Sättigungsmagnetostriktion von vielkristallinem Eisen liegen etwa bei $\lambda_s = -10^{-5}$.

Die in (1.5.3-2) durchgeführte Mittelung über alle Richtungen ist für kaltgezogene Stähle nicht ganz korrekt, denn die Kristallite drehen sich beim Ziehen mit den $\langle 110 \rangle$ -Richtungen in die Drahtachse [SCHUM]. Für kalt-

gezogene Spannstähle wird die Sättigungsmagnetostraktion also betragsmäßig größer sein als nach Gleichung 1.6-16.

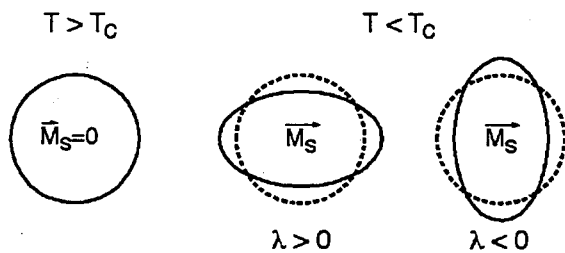


Abb. 1-13. Die magnetoelastische Wirkung eines Magnetfelds auf eine ferromagnetische Kugel in Abhängigkeit des Vorzeichens der Magnetostraktion. Die Verformungen sind stark übertrieben.

Die Magnetisierung erzeugt eine Deformation, die in Abb. 1-13 für eine Kugel stark übertrieben dargestellt ist.

Die Magnetisierung eines Körpers mit positiver Magnetostraktion wird durch eine mechanische Vorspannung des Körpers entlang der Magnetisierungsrichtung erleichtert. Die mechanische Spannung sinkt aufgrund der Magnetisierung. Die elastische Energie nimmt ab. Umgekehrt gilt, daß die Magnetisierung eines vorgespannten ferromagnetischen Körpers erschwert wird, wenn die Magnetostraktion negativ ist. Es muß elastische Arbeit verrichtet werden, die mechanische Spannung nimmt zu.

Die Spannungsänderungen durch das Magnetisieren sind für das mechanische Verhalten der Spannstähle vernachlässigbar, für das magnetische Werkstoffverhalten jedoch wichtig. Die mechanische Vorspannung hat Einfluß auf den Zusammenhang zwischen dem externen magnetischen Feld \underline{H} und der Magnetisierung \underline{M} . Sie beeinflusst die magnetische Hyste-

resis. Dieses Phänomen wird als Villari-Effekt bezeichnet.

Aufgrund der negativen Sättigungsmagnetostraktion wird die Sättigungsmagnetisierung bei vorgespanntem Stahl erst bei höheren Feldstärken erreicht als bei nicht vorgespanntem Stahl.

Auf die Remanenz, die bei dem Bruchortungsverfahren genutzt wird, wirkt sich die Vorspannung jedoch bei Stählen nicht in diesem Maße aus. Die spontane Magnetisierung von Stahl liegt in $\langle 100 \rangle$ -Richtungen. Die Weißschen Bezirke sind also alle entlang einer $\langle 100 \rangle$ -Richtung magnetisiert. Nach Ablauf der irreversiblen Prozesse während des Aufmagnetisierens (Abb. 1-5) sind alle Kristallite entlang ihrer energetisch günstigsten $\langle 100 \rangle$ -Richtung magnetisiert. Das ist jeweils die $\langle 100 \rangle$ -Richtung, die den kleinsten Winkel mit dem externen Feld \underline{H} einschließt. Die Magnetisierung in die $\langle 100 \rangle$ -Richtung, die den kleinsten Winkel mit der Spanndrahtachse und dem externen Feld \underline{H} einschließt, wird durch die positive, monoton mit der Stärke des externen Felds wachsenden Magnetostraktion λ_{100} sogar unterstützt (Abb. 1-12). Die mechanische Spannung ist nämlich, vergleicht man alle $\langle 100 \rangle$ -Richtungen, am größten entlang der $\langle 100 \rangle$ -Richtung, die den kleinsten Winkel mit der Drahtachse einschließt.

Bei weiterer Steigerung des externen Felds über die Feldstärke hinaus, bei der die irreversiblen Magnetisierungsprozesse abgeschlossen sind, wird die Magnetisierung der Kristallite, erschwert durch die Vorspannung, in Richtung des externen Felds gedreht (Abb. 1-4),

denn jetzt muß die Magnetisierung in die Richtung des externen Felds gedreht werden. Durch Mittelung über alle Kristall-Richtungen (1.6-16) ergibt sich für Eisen eine negative Sättigungsmagnetostriktion. Es muß für die magnetische Sättigung also Arbeit gegen die mechanische Spannung geleistet werden. Dieser Drehprozeß, der zur Sättigung führt, ist jedoch reversibel und somit für die remanente Magnetisierung ohne Bedeutung.

Die Remanenz M_R der Spannstähle ist nach dieser Betrachtung unabhängig vom Grad der Vorspannung.

Die Koerzitivfeldstärke H_C wird durch die Vorspannung größer, denn um die Stähle umzumagnetisieren, muß die Magnetisierung der Kristallite um 180° gedreht werden. Während die potentielle Energie eines in $\langle 100 \rangle$ -Richtungen magnetisierten Kristallits durch die Vorspannung abgesenkt wird, erhöht sich die Energie für die Richtungen $\langle 110 \rangle$ und $\langle 111 \rangle$. Der Potentialwall, der überwunden werden muß, um von einer $\langle 100 \rangle$ -Richtung in eine andere zu gelangen, wächst durch die Vorspannung.

Diese Überlegungen beziehen zwar innere Spannungen nicht mit ein, diese können aber bei nicht kaltgezogenen Spannstählen als isotrop angenommen werden, so daß sich ihre Auswirkung auf die Remanenz unter Zugspannungen nicht ändern dürfte. Die Kristallenergie, die die $\langle 100 \rangle$ -Richtungen zu magnetisch leichten Richtungen macht (Kristallanisotropie) und die Spannungsenergie, die zur Spannungsanisotropie führt, liegen bei einer Vorspannung von 1000 Nmm^{-2} in der gleichen Größenordnung. Die Spannungsanisotropie

wird gegenüber der Kristallanisotropie nicht so groß, das sie dominant wird [KNE], was dazu führen würde, daß die magnetischen Vorzugsrichtungen nicht mehr durch die Kristallanisotropie vorgegeben wäre.

Die Laborversuche wurden an Spannstählen ohne Vorspannung durchgeführt. Der Vergleich der Stärke von Bruchsignalen, die an Bauteilen mit gespannten gebrochenen Spannstählen gemessen wurden, mit der Stärke der entsprechenden Signale, die bei der Nachstellung der Anordnung in Labor gemessen wurden, bestätigen die theoretischen Überlegungen, daß die Vorspannung auf das remanente Feld bei vergütetem Spannstahl zumindest keinen großen Einfluß hat.

Nach den Untersuchungen von Gimmel verringert sich die Remanenz von Stählen mit der Vorspannung [GIM]. Die Experimente wurden an kaltgezogenen Spanndrähten durchgeführt. Bei diesen Stählen sind durch die Herstellung die $\langle 110 \rangle$ -Richtungen bevorzugt in die Drahtachse gedreht. Werte für die Verringerung der Remanenz sind nicht angegeben. Die Remanenzänderungen dürften angesichts der kleinen Sättigungsmagnetostriktion von Eisen relativ gering sein. Die Koerzitivfeldstärke steigt nach Ergebnissen der Versuche des Autors bei Zugspannungen. Zur Zeit werden Untersuchungen zum magnetoelastischen Effekt in Spannstählen an der TU Braunschweig durchgeführt [FAL].

1.6.4 Die magnetischen Streufelder an Materialinhomogenitäten

Das magnetisierte Spannglied wird von magnetischen Feldlinien durchsetzt. Ein Maß für die „magnetische Leitfähigkeit“ ist die relative Permeabilität. Ändert diese sich un stetig, z. B. an der Bruchstelle eines Spannstahls, ergibt sich eine Störung des magnetischen Flusses. Zum Teil umläuft er die Fehlstelle mit erhöhter Flußdichte durch den Restquerschnitt, bzw. durch die anderen ungebrochenen Spanndrähte. Ein anderer Teil verläuft durch die Fehlstelle hindurch. Der dritte, für die Detektion der Bruchstelle nutzbare, Teil tritt bereits in der Umgebung der Bruchstelle aus dem Spannstahl aus, denn die Komponente der magnetischen Flußdichte, die normal zur Grenzschicht zweier Medien gerichtet ist, ändert sich beim Durchtritt durch die Grenzschicht nicht. (Abb. 1-14).

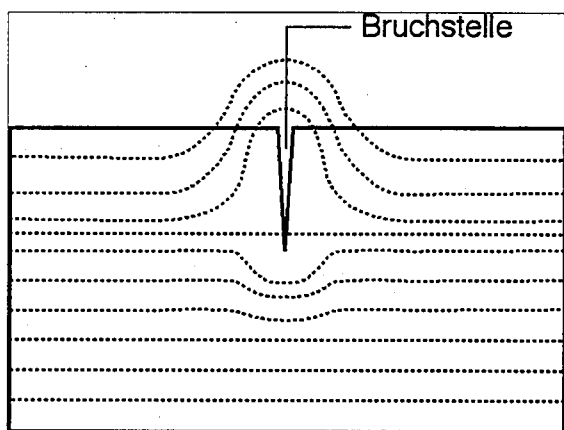


Abb. 1-14. Schematische Darstellung des magnetischen Streufusses an einer Fehlstelle.

Der Austrittswinkel errechnet sich gemäß dem Brechungsgesetz für die magnetische Flußdichte (Abb. 1-15)

$$\frac{\sin \alpha_L}{\sin \alpha_S} = \frac{\mu_L}{\mu_S}$$

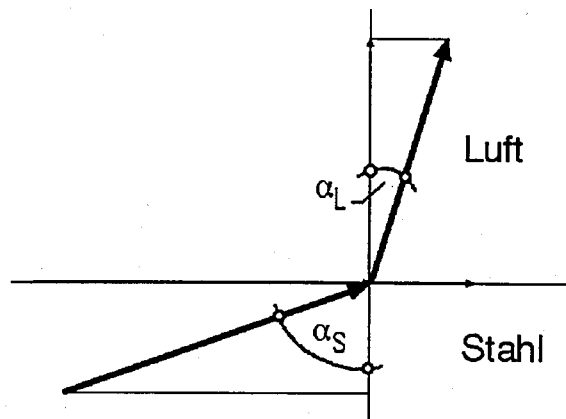


Abb. 1-15. Die Brechung der magnetische Flußdichte beim Übergang durch die Grenzschicht zweier Stoffe mit unterschiedlicher Permeabilität.

Die magnetischen Feldlinien treten also fast senkrecht aus dem gebrochenen Stahl aus (Abb. 9-2), denn die magnetische Permeabilität des Stahls μ_S (10^2 bis 10^3) ist um ein Vielfaches höher als die Permeabilität der Luft. $\mu_L \approx 1$.

Das Streufeld, hervorgerufen durch einen Spannstahlbruch, wird an der Betonoberfläche gemessen. Das gemessene Bruchsignal hat einen charakteristischen Verlauf.

Abb. 1-16 zeigt die transversale und axiale Komponente der Flußdichte des Streufeldes der Bruchstelle eines einzelnen Spanndrahts (Sigma rund, gerippt, Durchmesser 7,2 mm, Abstand Meßstrecke - Stabachse: 4 cm). Die transversale Komponente ist orthogonal zur Spanndrahtachse gerichtet. Die axiale Komponente verläuft parallel zur Spanndrahtachse.

Die Parameter, die den Signalverlauf und die Signalstärke bestimmen, wurden untersucht (Kap. 2.3).

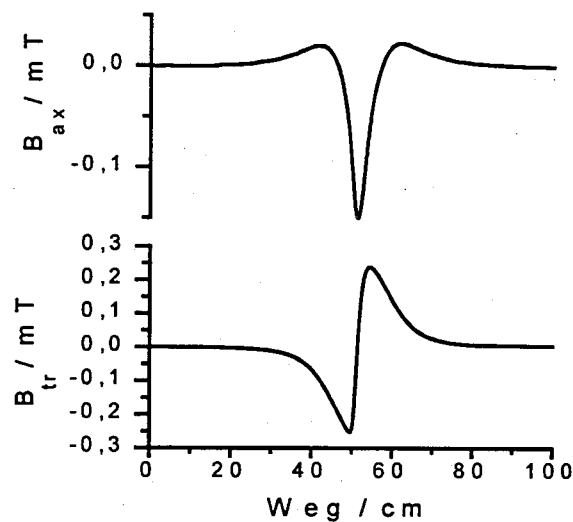


Abb. 1-16. Die transversale und die axiale Komponente der Flußdichte, B_{tr} und B_{ax} , gemessen entlang eines gebrochenen Spanndrahts.

1.6.5 Die Anforderungen an die Sensorik

Das Magnetfeld des magnetisierten Spannglieds kann nur in einem gewissen Abstand von seiner Ursache, nämlich an der Betonoberfläche gemessen werden. Da bei der Magnetisierung des Spannglieds zwangsläufig auch die Stahlbetonbewehrung magnetisiert wird, entstehen neben den Nutzsignalen, die vom Spannglied ausgehen, eine Fülle von Störsignalen, die ebenfalls, dem Nutzsignal überlagert, gemessen werden.

Wegen des unvermeidlichen Abstands der Meßsonde vom Meßobjekt, der Betondeckung, sollte die Empfindlichkeit der Sensorik möglichst hoch sein. Ab einer bestimmten Betondeckung wird der Streufluß an der Betonoberfläche aufgrund von Spannstahlbrüchen jedoch so gering, daß er in dem Hintergrund der Stör-

signale nicht mehr auflösbar ist. Die Detektierbarkeit von Spannstahlbrüchen wird also nicht ausschließlich durch die Empfindlichkeit des Sensors bestimmt, sondern hauptsächlich durch die Störsignale der Stahlbetonbewehrung beschränkt. Eine möglichst hohe Empfindlichkeit ist damit nicht unbedingt sinnvoll, denn die Sensorik wird auch für Störsignale empfindlicher. Die Auswahl der Sensoren sollte deshalb neben einer angemessenen Empfindlichkeit auch die Praxistauglichkeit, dazu zählt z. B. die Temperaturempfindlichkeit, die Robustheit und die Bedienbarkeit, berücksichtigen.

Punktuellen Messungen der magnetischen Flußdichte sind ebenfalls aufgrund der Störsignale nicht sinnvoll. Der Verlauf der Flußdichtekomponenten muß deshalb wegabhängig von einem Meßrechner aufgenommen werden.

Der Sensor muß möglichst genau entlang der Projektion des Spannglieds auf die Betonoberfläche geführt werden. Entsprechende Hilfsvorrichtungen mußten entwickelt werden.

Der Beton selbst hat keinen nennenswerten Einfluß auf das magnetische Feld, es sei denn, er enthält einen ferromagnetischen (oder ferrimagnetischen) Zuschlag. Er verhält sich im Rahmen der erforderlichen Genauigkeiten wie Luft bzw. wie ein Vakuum. In den Laborversuchen wurde daher auf das Einbetonieren der Spannglieder verzichtet.

2 Die Versuche

2.1 Die Versuchseinrichtungen

2.1.1 Der Versuchsstand

Physikalische Gesetze sind nicht invariant gegen Ähnlichkeitstransformationen (Änderungen des räumlichen Maßstabs). Deutlich wird das z. B. bei näherer Betrachtung der Auswirkung des Entmagnetisierungsfaktors N , der geometrisch von dem Verhältnis der Länge zum Durchmesser der Proben abhängt. Verringert man die Länge einer Probe um einen Faktor a , so muß der Durchmesser, um den Entmagnetisierungsfaktor N konstant (und klein) zu halten ebenfalls um den Faktor a verkleinert werden. Nimmt man an, daß die Stärke des Streufelds an einem Spannstahlbruch in erster Näherung vom eingenommenen Volumen der „magnetischen Ladungen“ abhängt, wird die Streustärke um den Faktor a^3 kleiner. Diese Betrachtungen lassen sich fortsetzen bis hin zu den Meßsonden, mit denen aufgrund ihrer räumlichen Ausdehnung keine echten Punktmessungen vorgenommen werden können, sondern stets über einen gewissen räumlichen Bereich integriert wird. Das wirkt sich natürlich auf das gemessene Bruchsignal aus und zwar um so stärker je kleiner die Probenabmessungen sind.

Ein miniaturisiertes Modell der Wirklichkeit kommt bei der Spannstahlbruchdetektion deshalb als Versuchsstand nicht in Frage. Es wurde ein Versuchsstand konstruiert, dessen Ab-

messungen so gewählt wurden, daß der Entmagnetisierungsfaktor vernachlässigt werden konnte, wenn mit kommerziellen Spanndrähten und Hüllrohren, wie sie auch in Bauwerken Verwendung finden, gearbeitet wird.

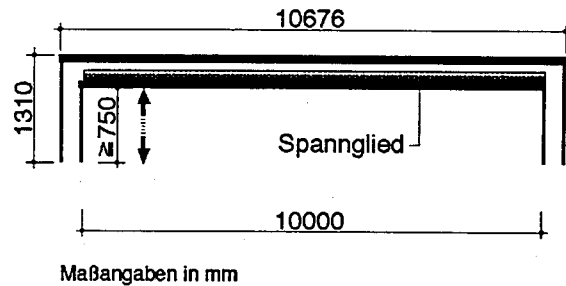


Abb. 2-1. Skizze des Versuchsstands. Der Untertisch ist höhenverstellbar, so daß verschiedene Betondeckungen simuliert werden können.

Abb. 2-1 zeigt eine Skizze des Versuchsstands. Photographien des Versuchstands findet man im Anhang II. Er besteht aus zwei Tischen, einem feststehenden Obertisch und einem beweglichen Untertisch, die beide aus Aluminium gefertigt sind. Die Tischplatten sind aus Hartgewebe hergestellt (Abb. 9-3).

Der Obertisch ist 10,70 m lang und 1,10 m breit. Auf der Tischplatte werden die Magneten, die in Kap. 2.1.2 beschrieben werden, und der Meßwagen (Kap. 2.1.4) von Hand entlang geeigneter auf der Platte befestigter Führungsschienen aus Aluminium bewegt. Die Oberfläche des Tisches stellt die simulierte Betonoberfläche dar. Die Platten sind herausnehmbar, so daß unter ihnen in den Obertisch Stahlbetonbewehrung eingebaut werden kann (Abb. 9-4).

Unter dem Obertisch befindet sich der Untertisch. Er hat eine Länge von 10 m und eine Breite von 0,80 m. Der Untertisch hat eine hohe Steifigkeit, damit seine Durchbiegung mit

der Last einiger Spannglieder gering bleibt, obwohl er nur an seinen Enden aufgelagert ist. Die Durchbiegung in der Mitte beträgt bei allen zu erwartenden Lasten weniger als 1 mm. Der Untertisch ist herausfahrbar, so daß die Spannglieder und weitere Stahlbetonbewehrung wie in einem Spannbetonbauteil auf ihm angeordnet werden können. Seine Höhe kann variiert werden, um verschiedene Betondeckungen zu simulieren. Der einstellbaren Betondeckungen der Spannglieder reichen von 3 cm bis 50 cm.

2.1.2 Der mobile Magnet

Für die Magnetisierung der Spannglieder von der Betonoberfläche aus mußte eine Magnet entwickelt und gebaut werden. Elektromagneten haben sich wegen der Regelbarkeit des erzeugten magnetischen Feldes als vorteilhaft erwiesen. Die wichtigsten Vorgaben für die Konstruktion des Magneten waren:

- Die Masse des Magneten sollte nicht mehr als 35 kg betragen, damit er auch beim Einsatz am Bauwerk handhabbar ist.
- Die maximale zur Magnetisierung der Spannglieder nutzbare Feldstärke, die mit dem Elektromagneten erzeugt werden kann, sollte unter Berücksichtigung der anderen Vorgaben möglichst hoch sein.
- Die Einschaltdauer des Elektromagneten bei Maximallast sollte mindestens 100 s betragen, um auch lange Spannglieder durchgehend magnetisieren zu können.
- Der Magnet mußte in einem Wagen untergebracht sein.

Der Magnet, der diese Anforderungen nach unseren Berechnungen und Versuchen am besten gerecht wurde, besteht aus zwei 120 mm langen Spulen mit Weicheisenkernen (Füßen) mit den 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. (Abb. 2-2). Das für die Herstellung der Füße und des Rückens verwendete Armco-Eisen zeichnet sich durch eine sehr hohe Sättigungsmagnetisierung M_S und eine kleine Koerzitivfeldstärke H_C 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. Eine Photographie des Magneten ist im Anhang II abgebildet (Abb. 9-5). 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 etwa 2 kW.

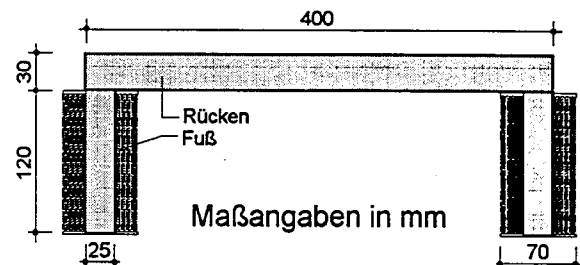


Abb. 2-2. Schnitt durch den zur Magnetisierung der Spannglieder verwendeten jochförmigen Elektromagneten

Die Einschaltdauer des Magneten bei Maximallast beträgt etwa 2 min, er ist etwa $m \approx 35$ kg schwer. Mit diesem Magneten können Spannungsglieder mit einer Betondeckung bis etwa 30 cm bis zur remanenten Magnetisierung M_R magnetisiert werden. Die maximale magnetische Flußdichte B_p parallel zur Spulenrichtung, die der Magnet in verschiedenen Abständen vom seiner Unterseite bei Abwesenheit anderer Ferromagnetika erzeugt, ist für verschiedene Spulenströme in der Abbildung Abb. 2-3 dargestellt.

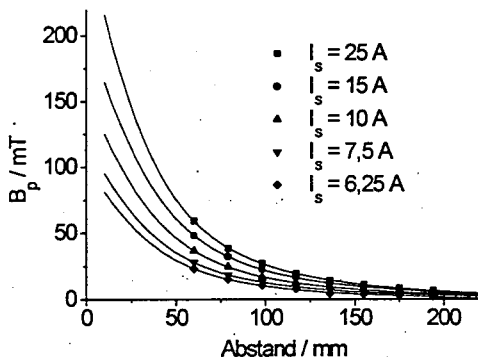


Abb. 2-3. Die durch den Jochmagneten erzeugte magnetische Flußdichte parallel zu den Spulenachsen in Abhängigkeit von dem lichten Abstand zum Magneten bei verschiedenen Spulenströmen I_s (Messung in Luft).

Abb. 2-4 zeigt die parallel und die orthogonal zu den Spulenachsen gelegenen Flußdichtekomponenten in Luft, entlang einer Linie, die parallel zur Längsachse 6 cm unterhalb des Magneten liegt. Bei Anwesenheit magnetischer Leiter, also ferromagnetischer Materialien, ändern sich der Betrag und die Richtung der magnetischen Flußdichte \underline{B} in der Umgebung des Magneten stark. Die Ferromagnetika in der Umgebung werden magnetisiert und erzeugen ebenfalls ein magnetisches Feld \underline{H}_F , so daß

sich auch das Magnetfeld in der Spule \underline{H}_S ändert. Die magnetische Flußdichte \underline{B}_S und das Magnetfeld \underline{H}_S in der Spule oder in ihrer Umgebung sind also, außer von dem Spulenstrom, von der räumlichen Verteilung der magnetischen Permeabilität μ abhängig. Diese ist für ferromagnetische Stoffe wiederum eine Funktion $\mu(\underline{H}, \underline{M}_G)$ der Feldstärke \underline{H} selbst und der magnetischen Geschichte \underline{M}_G der Ferromagnetika.

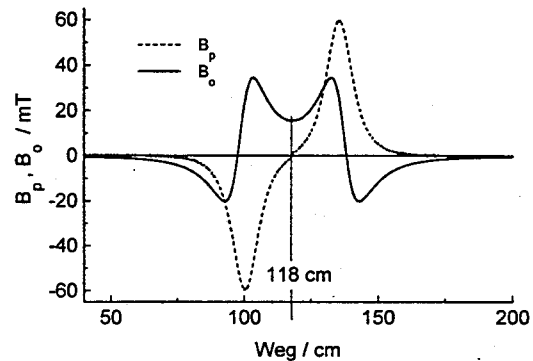


Abb. 2-4. Parallel und orthogonal zur Spulenachse gerichtete Komponenten der magnetischen Flußdichte B_p und B_o entlang einer Geraden, zentral 6 cm unterhalb des Elektromagneten. Spulenstrom $I_s = 25$ A. An der Stelle 118 cm befindet sich der Mittelpunkt des Magneten über der Meßsonde.

Selbst bei bekanntem räumlichen Verlauf der Permeabilität $\mu(\underline{H}, t)$ und ihrer werkstoffspezifischen Abhängigkeit ist eine Berechnung der Flußdichte $\underline{B}(\underline{H}, t)$ mithilfe von FD- und FEM-Programmen nur für einfache Geometrien mit vertretbarem Zeitaufwand möglich (Kap. 4.2). In der Regel sind die Meßbedingungen aber weder im Labor (z. B. schwanken die magnetischen Materialeigenschaften) und schon gar nicht am Bauwerk so genau definiert. Deshalb wird als Maß für die Magnetisierleistung des

Elektromagneten im weiteren Verlauf der Spulenstrom I_S benutzt und nicht die erzeugte magnetische Flußdichte $\underline{B}(r_0)$ oder magnetische Feldstärke $\underline{H}(r_0)$ an einem bestimmten Punkt r_0 .

Bei Anwesenheit eines Spannglieds würde der magnetische Fluß idealerweise bei dem beschriebenen Jochmagneten ausschließlich von einem Fuß über das Spannglied zum anderen Fuß verlaufen. Bei den großen Luftspalten (bzw. den großen Betondeckungen) zwischen dem Jochmagneten und dem Spannglied entsteht jedoch ein starker Streufluß \underline{B}_S , so daß das Spannglied, wenn es von dem Magneten überfahren wird, unmittelbar nachdem es dem Nutzfeld \underline{B}_N des Magneten zwischen dessen Polschuhen ausgesetzt war, in ein entgegengesetzt gerichtetes Streufeld \underline{B}_S gerät, das die Magnetisierung teilweise wieder aufhebt (Abb. 2-5).

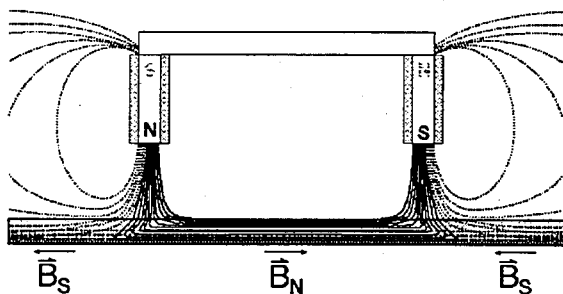


Abb. 2-5. Schematischer Verlauf des magnetischen Flusses, erzeugt durch den jochförmigen Elektromagneten über einem Spannglied. Zwischen den beiden Spulen wirkt das Nutzfeld \underline{B}_N , vor und hinter dem Joch das entgegengesetzt gerichtete Streufeld \underline{B}_S .

Mit einer speziellen Magnetisierungsprozedur (Kap. 2.2) ist es jedoch gelungen, diesen Nachteil zu überwinden. Der Vorteil der Joch-Geometrie gegenüber einer einzelnen Spule (Abb. 2-6) besteht darin, daß die erreichbare

magnetische Flußdichte im Spannglied zwischen den Polschuhen bei gleicher elektrischer Leistung sehr viel höher ist als bei der einzelnen Spule. Außerdem läßt sich das Streufeld des Jochmagneten für die Unterscheidung zwischen Signalen, die von der Spannbewehrung ausgehen, und solchen, die durch die Stahlbetonbewehrung erzeugt werden, nutzen. Mit einer einfachen Spule wäre das nicht möglich.

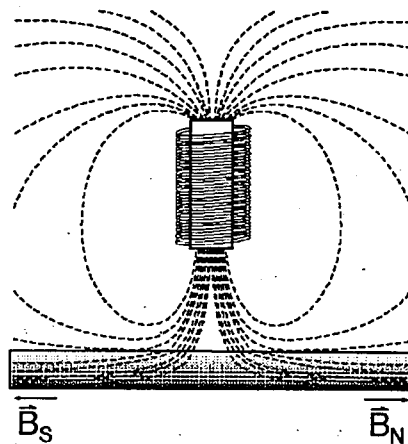


Abb. 2-6. Schematischer Verlauf des magnetischen Flusses, erzeugt durch eine Spule über einem Spannglied. Der magnetische Fluß durch das Spannglied hat unterschiedliche Richtungen. Welche Richtung das Nutzfeld \underline{B}_N hat, ist von der Richtung, in die die Spule über das Spannglied geführt wird, abhängig

Das Vorgängermodell des beschriebenen Magneten ist ebenfalls jochförmig aufgebaut und ist etwa $m \approx 9$ kg schwer. Der Rücken und die Füße dieses Magneten sind aus lamelliertem Elektroblech hergestellt um Wirbelstromverluste gering zu halten. Er wird mit Wechselspannung oder hochfrequenten Gleichspannungspulsen stromgesteuert betrieben. Dieser Magnet ist aufgrund des geringen Gewichts zwar handlicher, die erreichbaren Feldstärken

sind jedoch zu gering um Spannglieder mit einer Betondeckung von mehr als 8 cm remanent zu magnetisieren. Auch bei kleineren Betondeckungen ist die Praxistauglichkeit dieses Magneten wegen der kurzen Einschaltzeiten eingeschränkt. Es ist darüberhinaus nicht empfehlenswert einen Magneten mit ferromagnetischem Kern und damit hoher Induktivität mit Gleichspannungspulsen zu speisen, weil die Leistungsverluste trotz der Lamellierung sehr hoch sind.

Es wurden auch Permanentmagneten (NiFeB) zur Magnetisierung der Spannstähle benutzt. Da sie einerseits nicht regelbar sind, andererseits zur Magnetisierung der Spannglieder in Spannbeton mit nachträglichem Verbund hohe Feldstärken erforderlich sind, haben sie sich für diesen Fall nicht als tauglich erwiesen. Da sie nicht abschaltbar sind, ist ihre Handhabung besonders im Praxiseinsatz schwierig.

Mit ausreichender Vorsicht behandelt, sind sie zur Spannstahlbruchortung bei Spannbeton mit sofortigem Verbund und kleiner Betondeckung ($c = 0 \text{ cm} - c = 4 \text{ cm}$) empfehlenswert. Sie haben ein geringes Gewicht, benötigen keine Stromversorgung und keine Abkühlpausen.

Es wurde auch überlegt, die Spannglieder mithilfe von Bitterspulen [KOH] und starken gepulsten Feldern zu magnetisieren. Diese Idee wurde verworfen, weil es schwierig ist, auf diese Weise die Spannglieder kontrolliert gleichmäßig zu magnetisieren. Die Gleichmäßigkeit der Magnetisierung ist aber eine Voraussetzung für die richtige Interpretation der Meßsignale.

Supraleitende Magnetspulen, mit denen sehr hohe Feldstärken erzeugt werden können, sind

mechanisch sehr empfindlich und müssen aufwendig auf niedrige Temperaturen gekühlt werden. Sie eignen sich zum Bau stationärer Magneten, sind jedoch bisher für transportable Magneten ungeeignet.

2.1.3 Die stationäre Spule

Für die Bestimmung der Koerzitivitätsfeldstärke H_C von Spannstählen und Betonstählen wurde eine Spule für den stationären Betrieb hergestellt (Abb. 9-6). In der Spule sollen Stahlproben über eine Länge von etwa 30 cm einem möglichst homogenen magnetischen Feld ausgesetzt werden, um ihre Koerzitivfeldstärke zu bestimmen.

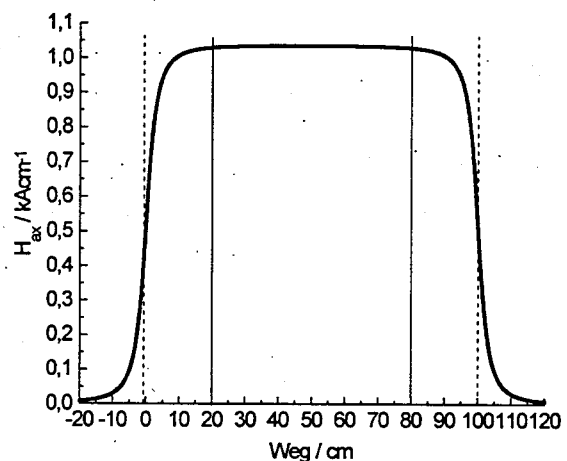


Abb. 2-7. Der Verlauf der axialen Komponente der magnetischen Feldstärke entlang der Achse der stationären Spule. Die Spule beginnt bei 0 cm und endet bei 100 cm auf der Wegachse (gestrichelte Linien). Im mittleren Bereich ist das Feld fast homogen. Der durch die durchgezogenen Linien begrenzte Bereich wird für die Untersuchungen zur Koerzitivfeldstärke H_C genutzt.

Die Spule kann mit dem gleichen Steuergerät wie der mobile Magnet betrieben werden. Ihr ohmscher Widerstand beträgt bei Raumtempe-

ratur etwa $R = 3,3 \Omega$. Sie hat eine Länge von $l = 100 \text{ cm}$ und eine Masse von etwa $m \approx 50 \text{ kg}$. Der Innen- und der Außendurchmesser der Spule betragen $d_i = 4,2 \text{ cm}$ und $d_a = 10 \text{ cm}$.

Die mit der Spule entlang der Spulenachse erzeugbare magnetische Feldstärke ist in Abb. 2-7 dargestellt. Die Spulenenden befinden sich bei 0 cm bzw. 100 cm der Wegachse. Der mittlere Bereich ist zum Zweck der Bestimmung der Koerzitivitätsfeldstärke (Kap. 2.4) von Stahlproben ausreichend homogen.

2.1.4 Der Meßwagen

Der Meßwagen (Abb. 9-7) ist mit einem Wegaufnehmer und zehn Hallsensoren bestückt. Der Wegaufnehmer wird über eine Wagenachse angetrieben. Er wird über die Steuereinheit mit Spannung versorgt und erzeugt pro Radumdrehung (Umfang = $39,8 \text{ cm}$) 512 TTL -Signale. Das entspricht einer Wegauflösung von $\Delta s = 0,777 \text{ mm}$. Die Hallsonden sind paarweise über die Breite des Meßwagens angeordnet. Fünf Sonden messen die axiale Feldkomponente, die anderen fünf Sonden die transversale Feldkomponente relativ zur 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.

2.1.5 Die anderen Magnetfeldstärkemeßgeräte

Für die meisten Untersuchungen wurde ein Series 9900 Gaussmeter von F.W. Bell verwendet, das heute unter der Bezeichnung FH 27/1-IF von Magnet-Physik Steingröver vertrieben wird. Es wurden mit dem Gerät die Hallsonden HS-HTF 99-0608 (tangential) und HS-SAA 99-1202 (axial) vom gleichen Hersteller eingesetzt.

Das Gerät hat drei Meßbereiche:

- 0 bis $300 \mu\text{T}$; Auflösung : $0,01 \mu\text{T}$
- 0 bis 3 mT ; Auflösung : $0,1 \mu\text{T}$
- 0 bis 30 mT ; Auflösung : $1 \mu\text{T}$
- 0 bis 300 mT ; Auflösung : $10 \mu\text{T}$

Die Anzeige ist $4 \frac{3}{4}$ - stellig. Der Meßfehler ist nach Herstellerangaben kleiner als $0,2 \%$. Es sind Gleich- und Wechselfelder mit einer Frequenz bis zu $\nu \leq 50 \text{ kHz}$ meßbar.

Streng genommen ist dieses Gerät kein Feldstärkemeßgerät, sondern ein Flußdichtemeßgerät, wie im übrigen alle Geräte mit Hallsonden [SCHAU]. Die Maßeinheit ist deshalb $[B] = 1 \text{ T}$ (Tesla) und nicht $[H] = 1 \text{ Am}^{-1}$.

Als handliches Kleingerät wurde zusätzlich der Feldstärkenmesser FH 14 von Magnet-Physik Dr. Steingröver eingesetzt. Als dazugehörige Tangentialsonde wurde die Hallsonde HS-T614 und als Axialsonde die Hallsonde HS-A614 vom gleichen Hersteller benutzt. Es sind

Gleich- und Wechselfelder meßbar. Das Gerät hat drei Meßbereiche:

- 0 bis 200 A cm⁻¹
- 0 bis 2000 A cm⁻¹
- 0 bis 20000 A cm⁻¹.

Die Anzeige ist 3 1/2 - stellig. Die Genauigkeit beträgt nach Herstellerangaben $\pm 2\%$.

Zusätzlich wurde das nach dem Differenzspulenverfahren arbeitende Feldstärkenmeßgerät Magnetoscop F 1.068 mit der Punktpolsonde Nr. 1.005-1512 von Institut Dr. Förster eingesetzt. Mit dem Gerät sind sehr kleine magnetische Gleichfelder und Gleichfelddifferenzen meßbar. Die größte Empfindlichkeit des Geräts beträgt 1 nT pro Skalenteil bzw. 30 nT für Skalenvollausschlag. Es ist wie das zuvor beschriebene FH 14 mobil einsetzbar.

2.1.6 Die A/D-Wandler und das DMM

Die Meßwerte wurden in der Regel von einem Meßrechner erfaßt und gegebenenfalls numerisch weiterverarbeitet. Dazu wurde die A/D-Wandlerkarte DT 21-EZ von Data-Translation und das Softwarepaket DT-VEE ebenfalls von Data-Translation benutzt. Die numerische Weiterverarbeitung wurde teils mit eigenentwickelter Software und teils mit diesem Softwarepaket durchgeführt.

Für die Messung elektrischer Größen, wie Spulenstrom I_S und -spannung U_S wurde hauptsächlich das Digital-Multimeter (DMM) DMS 2000 von Keithley verwendet.

2.2 Das magnetisierende Feld

2.2.1 Der Versuchsaufbau und die Proben

Das magnetische Feld des Elektromagneten in Luft (Abb. 2-4) verändert sich deutlich bei der Anwesenheit von ferromagnetischen Stoffen in der Nähe der Spule. Für den Magnetisierungsprozeß entscheidend ist der magnetische Fluß durch den Querschnitt des Spannglieds, wenn dieser von dem Magneten überfahren wird.

Ziel der in diesem Abschnitt beschriebenen Experimente war es, Aufschluß über den Verlauf der magnetischen Flußdichte in unmittelbarer Nähe von Bruchstellen der Spannstähle während des Magnetisierungsprozesses zu bekommen, sowie darüber, wie groß die Restflußdichte nach Beendigung der Magnetisierungsfahrt an diesen Stellen ist. Es wurde eine Hallsonde z. B. zwischen den Bruchfugen (Abb. 2-9) bzw. an der Mantelfläche in der Nähe der Bruchstelle des gebrochenen Stabs positioniert. Die ersten Ergebnisse der Untersuchungen führten zur Entwicklung der angewandten Magnetisierungstechnik.

Die magnetische Restflußdichte an Bruchstellen ist dann maximal, wenn der Spannstahl bis in den Bereich, wo alle irreversiblen Magnetisierungsprozesse (Verweis) abgeschlossen sind, magnetisiert wurde. Erst dann ist die magnetische Vorgeschichte der Stähle ausgelöscht - eine Voraussetzung zur Vermeidung der Fehlinterpretation eines Signals (Verweis). Die Stärke des Bruchsignals ist dann maximal, wenn die in der Bruchstelle gemessene Restflußdichte maximal ist. Die Magnetisierung M

des Spannglieds ist dann gleich seiner remanenten Magnetisierung M_R .

Die Untersuchungsergebnisse sollten bestätigen, daß dies bei einer Betondeckung bis etwa 30 cm, unabhängig von der Lage des gebrochenen Stahlstabs im Spannglied, mit der entwickelten Magnetisierungstechnik erreicht wird.

Die magnetische Flußdichte wurde auch an verschiedenen Punkten von Betonstählen, während und nach den Magnetisierungsfahrten, gemessen. Die Stahlbetonbewehrung ist die Hauptquelle von Störsignalen. Die Kenntnis des magnetischen Verhaltens von Betonstahl ist deshalb ebenso wichtig wie die von Spannstahl.

Die Flußdichtemessungen wurden durchgeführt an vergüteten Sigma Spannstählen rund gerippt \varnothing 7,2 mm der Festigkeitsklasse 1420/1570 sowie an verschiedenen Betonstählen. Die Spannglieder bestanden aus 16 Spannstählen der Länge $l = 10$ m. Bruchstellen wurden simuliert indem einzelne Spannstahlstäbe durchtrennt wurden.

Der Elektromagnet wurde mit einem Wegaufnehmer versehen. Der Spulenstrom, die Position des Magneten und die Flußdichte an ausgewählten Stellen in der Nähe der Trennstelle des Spannstahls konnten so gleichzeitig gemessen werden (Abb. 2-8).

Um den Spannstahl über einen Luftspalt (die Betondeckung) hinweg bis zur remanenten Magnetisierung M_R aufzumagnetisieren, ist eine spezielle Magnetisierungsprozedur erforderlich.

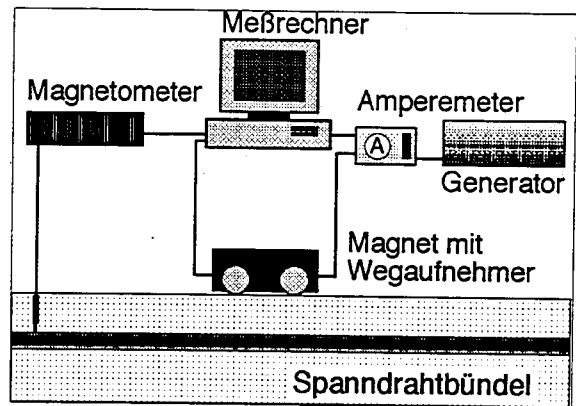


Abb. 2-8. Skizze des Versuchsaufbaus zur Messung der Flußdichte an Stählen während und nach einer Magnetisierungsfahrt mit dem elektrischen Jochmagneten.

Das Magnetisieren wurde in mehreren Magnetisierungsfahrten mit dem in Kap. 2.1.2 beschriebenen jochförmigen Elektromagneten durchgeführt. Der Magnet wird an ein Ende des zu untersuchenden Spannglieds gefahren und dort eingeschaltet. Es wird ein bestimmter Spulenstrom I_S eingestellt, so daß sich ein magnetischer Fluß, verursacht durch den Magneten, ausbildet. Der Magnet wird nun entlang des Spanngliedverlaufs auf dem Obertisch des Versuchsstands (Kap. 2.1.1) über die gesamte Spanngliedlänge geführt und verändert die Magnetisierung des Spannglieds.

Die simulierte Betondeckung kann auf dem in beschriebenen Versuchsstand variiert werden. Die Fahrtrichtung wechselt von Fahrt zu Fahrt. Auf die magnetische Restflußdichte, die an den Enden von Bewehrungsstößen und an der Bügelbewehrung gemessen wird, hat die Fahrtrichtung entscheidenden Einfluß. Die Angabe der Fahrtrichtung ist deshalb unerlässlich.

Die Meßdaten (Ort und Spulenstrom I_S des Magneten sowie die magnetische Flußdichte

an der ausgewählten Stelle) wurden mit einem Meßrechner aufgezeichnet (Abb. 2-8). Variiert wurde, neben der magnetischen Feldstärke des Elektromagneten, der Abstand des Magneten zum Spannglied (die simulierte Betondeckung) und die Lage des gebrochenen (aufgetrennten) Stabs im Spannstahlbündel.

2.2.2 Messungen der Flußdichte am Spannstahl während des Magnetisierungsprozesses

Die Hallsonde wird wie in Abb. 2-9 zur Messung der axialen Komponente der magnetischen Flußdichte B_{\parallel} zwischen den Stirnflächen des aufgetrennten Spannstahlstabs positioniert.

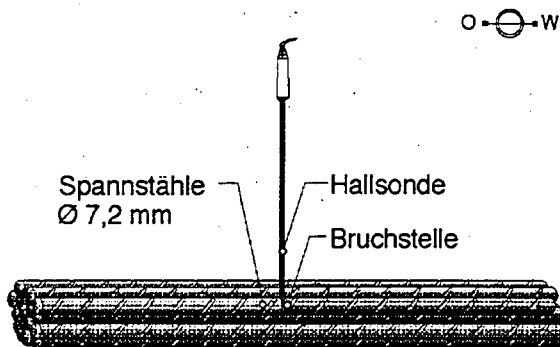


Abb. 2-9. Position der Hallsonde. Die axiale Komponente der magnetischen Flußdichte zwischen den Bruchflächen wird gemessen. Oben rechts sind die Himmelsrichtungen angegeben.

Abb. 2-10 zeigt den Verlauf der axialen Komponente der magnetischen Flußdichte an dieser Stelle während einer Magnetisierungsfahrt in Abhängigkeit der Position des Magneten. Die simulierte Betondeckung c_{SG} , damit ist die Betondeckung des Spannglieds, nicht zwangsläufig die des gebrochenen Stabs gemeint, beträgt $c_{SG} = 10$ cm. Der aufgetrennte

Stab ist obenliegend, also auf der dem Magneten zugewandten Seite im Spannstahlbündel eingebaut.

Der magnetische Ausgangszustand des Spannglieds ist nicht definiert. Das entspricht dem magnetischen Zustand in dem sich ein eingebautes Spannglied in einem Bauwerk befindet.

Der Spulenstrom beträgt $I_S = 25$ A, der Magnet wird unter Maximallast betrieben. Der Startpunkt (Weg = 0 cm) des Magneten, bezogen auf die Mitte zwischen den beiden Spulen, befindet sich 507 cm vor der aufgetrennten Stelle des Stabs (der simulierten Bruchstelle). Der Magnet wird in Richtung Osten über dem Spannglied verfahren.

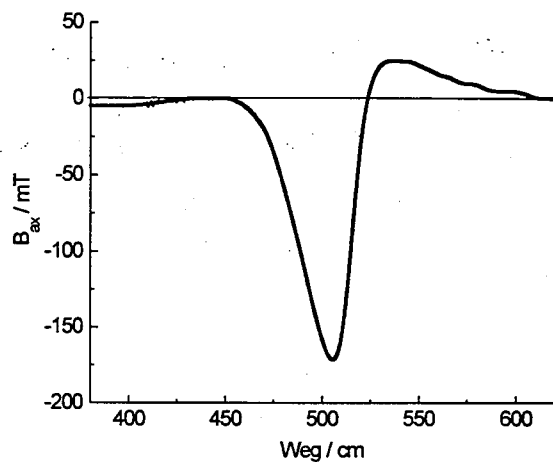


Abb. 2-10. Der Verlauf der axialen Komponente der magnetischen Flußdichte in Abhängigkeit der Position des Magneten. Die Bruchstelle befindet sich auf der dem Magneten zugewandten Seite. Fahrtrichtung: Ost, $I_S = 25$ A, $c_{SG} = 10$ cm

An der Bruchstelle wird, vor der Magnetisierung und solange der Elektromagnet noch weit genug von der Bruchstelle entfernt ist, eine

schwache, dem Nutzfeld des Magneten (negative Flußdichte) gleich gerichtete magnetische Flußdichte gemessen. Das ist die magnetische Restflußdichte, die den magnetischen Zustand des Spannglieds an der Meßstelle repräsentiert. Das externe, von dem Elektromagneten erzeugte, Magnetfeld hat noch keine meßbare Auswirkung auf die magnetische Flußdichte in der Bruchstelle. Die axiale Komponente der Flußdichte in der Bruchstelle hat in diesem Zustand den Wert $B_{||} = -4.9 \text{ mT}$. Der Einfluß des magnetischen Felds des Elektromagneten wird an der Bruchstelle erst meßbar, wenn die Entfernung Δl des Magneten (bezogen auf die Mitte zwischen den Spulen) kleiner als $\Delta l \leq 120 \text{ cm}$ wird.

Wenn sich der Magnet der Bruchstelle auf etwa 120 cm genähert hat, ändert sich die gemessene axiale Komponente der Flußdichte zunächst schwach. Der Betrag der Flußdichte $|B_{||}|$ in der Bruchstelle nimmt ab. Das Streufeld der Spule, das entgegengesetzt zur ursprünglichen Magnetisierung des Spannstahls an der Bruchstelle gerichtet ist, wird meßbar. Es ist in Abb. 2-5 gestrichelt dargestellt. Befindet sich der Mittelpunkt des Magneten etwa 60 cm vor der Bruchstelle, nimmt die Flußdichte betragsmäßig wieder zu. Das Nutzfeld des Magneten, in Abb. 2-5 durchgezogen dargestellt, erreicht jetzt die Bruchstelle. Befindet sich die Mitte des Magneten über der Bruchstelle wird die Flußdichte betragsmäßig maximal. Im Anschluß daran wirkt das Streufeld der hinteren Spule des Jochmagneten in der Bruchstelle und die dort gemessene Flußdichte wechselt ihr Vorzeichen. Die gemessene Restflußdichte $B_{||R}$ beträgt im Zustand nach dieser Magnetisie-

rungsfahrt $B_{||R} = 0 \text{ mT}$. Sie hat also an der gemessenen Stelle (im Bruch) trotz der Magnetisierungsfahrt betragsmäßig ab und nicht zugenommen. Ursache ist das Streufeld des Jochmagneten, das im Bereich der obenliegenden Stäbe ausreichend stark ist, um zu diesen Effekt hervorzurufen.

Den Verlauf der axialen Komponente der Flußdichte in der Bruchstelle eines im Spannglied untenliegenden (auf der dem Magneten abgewandten Seite liegenden) Stab zeigt Abb. 2-11.

Der Magnet wurde bei dieser Messung ebenfalls unter Vollast ($I_S = 25 \text{ A}$) betrieben und von Westen nach Osten über dem Spannglied verfahren.

In diesem Fall ist der magnetische Fluß in der Bruchstelle vor der Magnetisierungsfahrt sogar dem Nutzfeld des Magneten entgegengerichtet. Dennoch ist der Stahl im Bereich der Bruchstelle nach der Magnetisierungsfahrt in Richtung des Nutzfelds des Magneten magnetisiert und zwar etwa mit einem Viertel der remanenten, also maximal erreichbaren, magnetischen Restflußdichte.

Das Streufeld des Magneten hat in diesem Bereich des Spannstahlbündels (auf der dem Magneten abgewandten Seite) eine geringere Feldstärke. Es ist zu schwach um die durch das Nutzfeld hervorgerufene Magnetisierung umzupolen. Das Spannglied ist jedoch durch die einmalige Magnetisierungsfahrt nicht definiert magnetisiert worden, da die remanente Magnetisierung M_R nicht erreicht wurde.

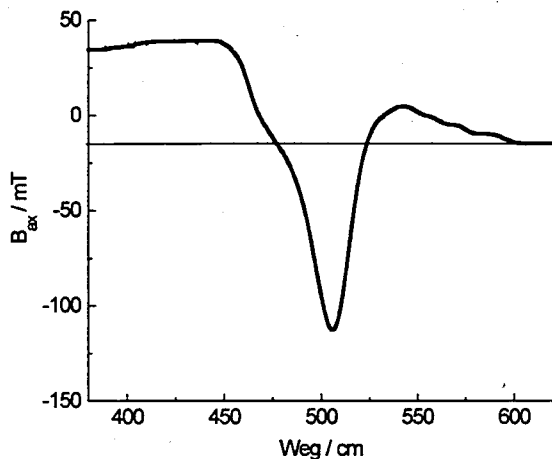


Abb. 2-11. Der Verlauf der axialen Komponente der magnetischen Flußdichte in der Bruchstelle in Abhängigkeit der Position des Magneten. Die Bruchstelle befindet sich auf der dem Magneten abgewandten Seite. Fahrtrichtung: Ost, $I_S = 25 \text{ A}$, $c_{SG} = 10 \text{ cm}$

Der Einfluß der magnetischen Vorgeschichte des Spannstahls wird deutlich, wenn man den Verlauf der magnetischen Flußdichte in der Bruchstelle betrachtet, der gemessen wird, wenn der Magnet ein zweites Mal mit dem gleichen Spulenstrom $I_S = 25 \text{ A}$ im gleichen Abstand über das Spannglied gefahren wird (Abb. 2-12). Die Fahrtrichtung des Magneten ist jetzt umgekehrt (Richtung Westen).

Der Startpunkt (Weg = 0 cm) des Magneten bezogen auf die Mitte zwischen den beiden Spulen befindet bei den Fahrten in Richtung Westen 378 cm vor der aufgetrennten Stelle. Die magnetische Flußdichte im Bruch ist jetzt fast doppelt so hoch, wie bei der Magnetisierungsfahrt zuvor, obwohl die externen Bedingungen genau die gleichen sind, wenn sich der Magnet über der Bruchstelle befindet. Geändert hat sich nur der magnetische Anfangszustand des Spannglieds, der bei eingebauten Spanngliedern nicht bekannt ist. Das einzige,

was zu der ungefähren Verdopplung der magnetischen Flußdichte geführt haben kann, ist die Zunahme der magnetischen Permeabilität μ und die Zunahme der Magnetisierung M des Spannglieds. Die nach der Magnetisierungsfahrt (Abb. 2-12) gemessene Restflußdichte B_{IR} hat sich betragsmäßig gegenüber der nach der ersten Magnetisierungsfahrt (Abb. 2-11) gemessenen mehr als verdoppelt.

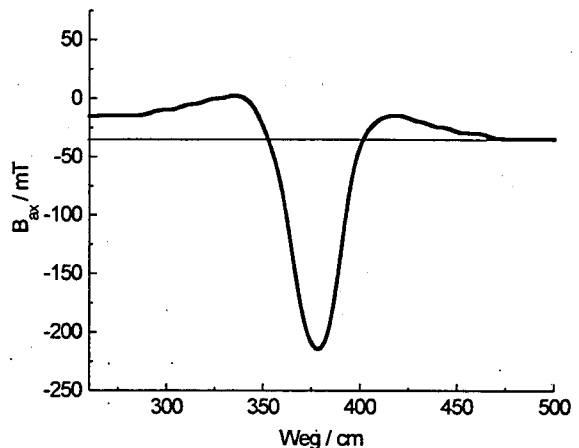


Abb. 2-12. Der Verlauf der axialen Komponente der magnetischen Flußdichte in der Bruchstelle in Abhängigkeit der Position des Magneten. Die Bruchstelle befindet sich auf der dem Magneten abgewandten Seite. Fahrtrichtung: West, $I_S = 25 \text{ A}$, $c_{SG} = 10 \text{ cm}$

Vergrößert man den Abstand zwischen dem Magneten und dem Spannglied auf 14 cm ergibt sich ein etwas anderer Verlauf der axialen Komponente der Flußdichte $B_{||}$ in der Bruchstelle. Die Bruchstelle liegt unten, also auf der dem Magneten abgewandten Seite des Spannglieds. Die Restflußdichte B_{IR} vor der Magnetisierungsfahrt ist in der Bruchstelle entgegengesetzt zum Nutzfeld des Magneten gerichtet und beträgt etwa 80 % der maximal erreichbaren bzw. remanenten Restflußdichte B_{IR} . Der Verlauf der magnetischen Flußdichte

während der Magnetisierungsfahrt ist in Abb. 2-13 dargestellt. Der Magnet wurde von West nach Ost über das Spannglied gefahren.

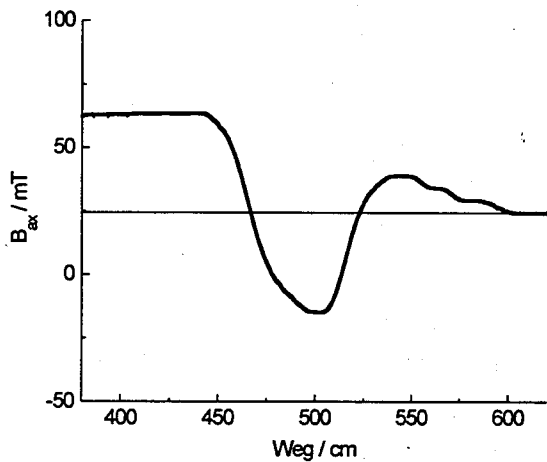


Abb. 2-13. Der Verlauf der axialen Komponente der magnetischen Flußdichte in der Bruchstelle in Abhängigkeit der Position des Magneten. Die Bruchstelle befindet sich auf der dem Magneten abgewandten Seite. Fahrtrichtung: Ost; 1. Fahrt $I_S = 25$ A, $c_{SG} = 14$ cm

Das Nutzfeld des Magneten ist selbst unter Vollast ($I_S = 25$ A) zu klein, um den gebrochenen Spannstahl an der Bruchstelle umzumagnetisieren. Obwohl das Streufeld an der abgewandten Seite kaum Wirkung zeigt, bleibt die Richtung der Magnetisierung die gleiche wie vor der Magnetisierungsfahrt, sie wird lediglich abgeschwächt.

Anders ist es, wenn der gebrochene Stab bei einer Betondeckung von $c_{SG} = 14$ cm auf der der „Betonoberfläche“ zugewandten Seite liegt. Ist die magnetische Flußdichte in der Bruchstelle vor der Magnetisierungsfahrt dem Nutzfeld des Magneten entgegengerichtet, wie in Abb. 2-14, so ist das Nutzfeld immerhin stark genug die Magnetisierung des Spannstahls nach Einwirkung des Streufelds in der Bruchstelle

aufzuheben. Die Wirkung des Streufelds des Jochmagneten ist bei dieser Betondeckung selbst für einen oberliegenden Stab wesentlich geringer als bei einer Betondeckung von $c_{SG} = 10$ cm (Abb. 2-10).

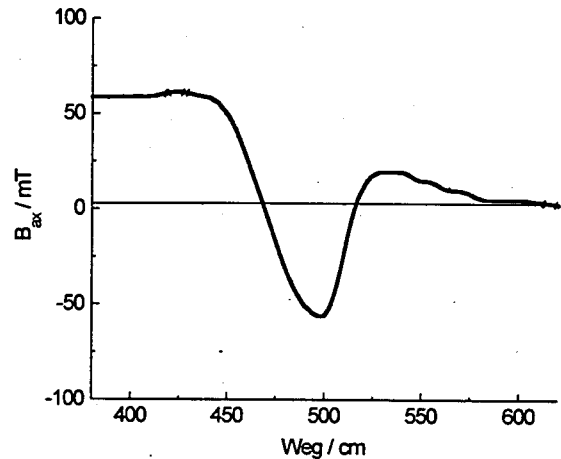


Abb. 2-14. Der Verlauf der axialen Komponente der magnetischen Flußdichte in der Bruchstelle in Abhängigkeit der Position des Magneten. Die Bruchstelle befindet sich auf der dem Magneten zugewandten Seite. Fahrtrichtung: Ost; $I_S = 25$ A, $c_{SG} = 14$ cm

Die aus einer einmaligen Magnetisierungsfahrt resultierende Magnetisierung des Spannstahls an einer Bruchstelle ist also stark abhängig von:

- der Magnetisierung \underline{M} des Spannstahls vor der Magnetisierungsfahrt (der magnetischen Geschichte des Spannstahls)
- der Betondeckung des Spannglieds
- der Lage der Bruchstelle in dem Spannglied

In der zuerst geschilderten Situation (Abb. 2-10), wo die Bruchstelle bei einer Betondeckung von $c_{SG} = 10$ cm auf der dem Magneten zugewandten Seite liegt, überwiegt sogar der Einfluß des Streufelds dem des Nutzfelds, so daß die Magnetisierung des Spannglieds an der

Bruchstelle entgegengesetzt zur erwünschten Magnetisierungsrichtung verstärkt wird.

Aber selbst wenn das Spannglied tiefer im Beton und auf der dem Magneten abgewandten Seite liegt, wo die Streufelder der Spule relativ klein sind, ist das Erreichen der maximalen magnetischen Restflußdichte mit voller Magnetisierungsleistung nicht möglich. Die Wirkung wiederholter, mit der maximalen Leistung des Elektromagneten, durchgeführten externen Magnetisierungen ist in den Abb. 2-15 bis Abb. 2-19 dargestellt. Sie wurden im Anschluß an die in Abb. 2-13 dargestellten Messung an einem Spannglied mit einer Betondeckung von $c = 14$ cm durchgeführt. Die präparierte Bruchstelle, in der die Hallsonde zur Messung der magnetischen Flußdichte positioniert wurde, lag auf der dem Magneten abgewandten Seite des Spannstahlbündels. Die vor Beginn der Magnetisierungsprozedur in der Bruchstelle gemessene magnetische Flußdichte betrug $B_{||0} = 60$ mT (Abb. 2-13). Die maximale magnetische Restflußdichte verursacht durch die remanente Magnetisierung beträgt dort $B_{||S} = \pm 68,5$ mT.

Durch die erste Magnetisierungsfahrt (Abb. 2-13) wird die Magnetisierung des Spannglieds in der Bruchstelle auf etwa ein Drittel der Anfangsmagnetisierung abgeschwächt. Die magnetische Flußdichte beträgt nach der Abschluß der Magnetisierungsfahrt $B_{||1} = 20,5$ mT. Die Magnetisierungsrichtung des Spannglieds liegt nach der Magnetisierungsfahrt nicht in Richtung des Nutzfelds des Jochmagneten.

Die gemessene maximale magnetische Flußdichte in der Bruchstelle während der zweiten Magnetisierungsfahrt (Abb. 2-15) ist schon

etwa doppelt so groß wie bei der ersten Fahrt (Abb. 2-13). Die Restflußdichte nach Abschluß der zweiten Magnetisierungsfahrt beträgt $B_{||2} = -28$ mT (Im dargestellten Bereich ist die Flußdichte $B_{||}$ noch nicht auf die Restflußdichte abgefallen). Die Magnetisierung $M_{||}$ des Spannstahlbündels ist nach dieser zweiten externen Magnetisierung dem Nutzfeld des Elektromagneten gleichgerichtet.

Bei der dritten Magnetisierungsfahrt (Abb. 2-16) steigt die maximale im Bruch gemessene Flußdichte auf fast das Doppelte der vorangegangenen Magnetisierung. Die Flußdichte nach Abschluß der dritten Magnetisierungsfahrt beträgt $B_{||3} = -51,5$ mT.

Die maximale Flußdichte während der vierten Magnetisierungsfahrt (Abb. 2-17) steigt nur geringfügig gegenüber der vorangegangenen. Die nach der Magnetisierung gemessene Flußdichte im Bruch ist ebenfalls nur geringfügig auf $B_{||4} = -54$ mT gestiegen.

Der Gleichgewichtszustand bei externer Magnetisierung mit maximaler Leistung des Jochmagneten ($I_S = 25$ A) ist erreicht.

Zwei weitere mit maximaler Leistung des Elektromagneten durchgeführte Magnetisierungsfahrten (Abb. 2-18 und Abb. 2-19) zeigen keine signifikanten Veränderungen des Verlaufs der Flußdichte in Abhängigkeit von der Position des Magneten. Die resultierende Restflußdichte im Bruch nach Abschluß der 5. bzw. der 6. Magnetisierungsfahrt liegt bei den gleichen Wert wie nach der 4. Magnetisierung $B_{||R6} \approx B_{||R5} \approx B_{||R4} \approx -54$ mT.

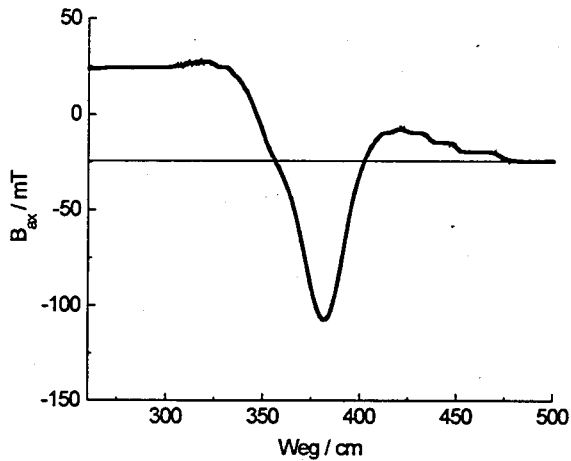


Abb. 2-15. Der Verlauf der axialen Komponente der magnetischen Flußdichte in der Bruchstelle in Abhängigkeit der Position des Magneten. Die Bruchstelle befindet sich auf der dem Magneten abgewandten Seite. Fahrtrichtung: West; 2. Fahrt $I_S = 25$ A, $c_{SG} = 14$ cm

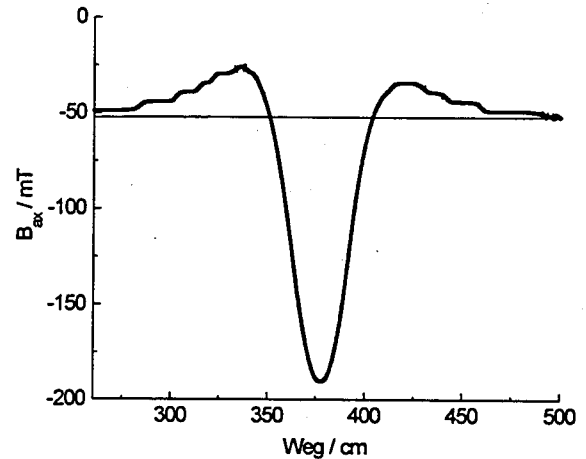


Abb. 2-17. Der Verlauf der axialen Komponente der magnetischen Flußdichte in der Bruchstelle in Abhängigkeit der Position des Magneten. Die Bruchstelle befindet sich auf der dem Magneten abgewandten Seite. Fahrtrichtung: West; 4. Fahrt $I_S = 25$ A, $c_{SG} = 14$ cm

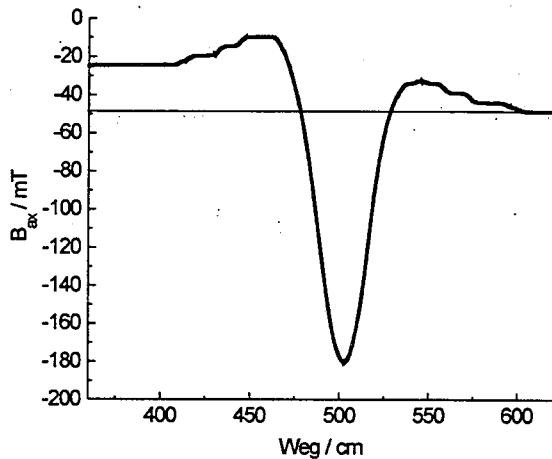


Abb. 2-16. Der Verlauf der axialen Komponente der magnetischen Flußdichte in der Bruchstelle in Abhängigkeit der Position des Magneten. Die Bruchstelle befindet sich auf der dem Magneten abgewandten Seite. Fahrtrichtung: Ost; 3. Fahrt $I_S = 25$ A, $c_{SG} = 14$ cm

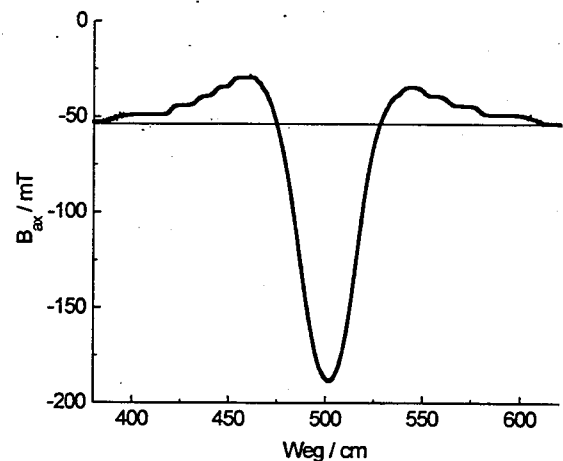


Abb. 2-18. Der Verlauf der axialen Komponente der magnetischen Flußdichte in der Bruchstelle in Abhängigkeit der Position des Magneten. Die Bruchstelle befindet sich auf der dem Magneten abgewandten Seite. Fahrtrichtung: Ost; 5. Fahrt $I_S = 25$ A, $c_{SG} = 14$ cm

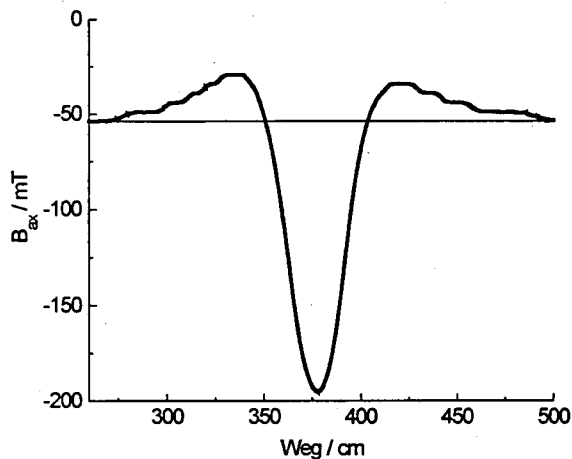


Abb. 2-19. Der Verlauf der axialen Komponente der magnetischen Flußdichte in der Bruchstelle in Abhängigkeit der Position des Magneten. Die Bruchstelle befindet sich auf der dem Magneten abgewandten Seite. Fahrrichtung: West; 6. Fahrt $I_s = 25 \text{ A}$, $c_{SG} = 14 \text{ cm}$

Die Magnetisierung des Spannglieds $M_{||}$ an der Bruchstelle beträgt, nachdem sich dieses Gleichgewicht eingestellt hat, jedoch nur etwa 80 % der maximal erreichbaren remanenten Magnetisierung $M_{||R}$.

Das Streufeld des Jochmagneten verhindert ein weiteres Anwachsen der Magnetisierung. Die bei dem Betrieb des Magneten mit maximaler Leistung erreichbare Restfeldmagnetisierung $M_{||}$ hängt damit zwar nicht mehr von der magnetischen Vorgeschichte des Magneten ab, wenn die Betondeckung kleiner als 30 cm ist, sehr wohl aber von der Betondeckung und der Lage der Bruchstelle im Spannstahlbündel.

Eine weitere Steigerung der Magnetisierung $M_{||}$ des Spannglied wird dadurch erreicht, daß die Feldstärke des Elektromagneten stufenweise vermindert wird. Mit der Senkung des Spulenstroms und der daraus resultierenden Senkung der magnetischen Feldstärke des Elektroma-

gneten kann nach zwei mit voller Magnetisierungsleistung durchgeführten Magnetisierungsfahrten begonnen werden. Die Abminderung muß so gewählt werden, daß das Nutzfeld des Jochmagneten bei einer Magnetisierungsfahrt ausreichend größer ist als das Streufeld, das die Magnetisierung M des Spannglieds bei der vorangegangenen Magnetisierung vermindert hat. Ausreichend ist die Größe des Nutzfelds dann, wenn sichergestellt ist, daß alle durch das Streufeld der vorangegangenen Magnetisierungsfahrt verursachten irreversiblen Prozesse rückgängig gemacht werden. Sie abschwächen die Magnetisierung $M_{||}$ des Spannglieds, die das Nutzfeld bewirkte, wieder ab. Wenn diese Bedingung eingehalten wird, wird die Verminderung der Magnetisierung des Spannglieds aufgrund des Streufelds der vorangegangenen Magnetisierungsfahrt durch das stärkere Nutzfeld wieder aufgehoben. Es wirkt dann ein kleineres Streufeld, das die Magnetisierung des Spannglied weniger schwächt als bei der vorangegangenen Magnetisierung.

Die Abb. 2-20 bis Abb. 2-29 zeigen den Verlauf der magnetischen Flußdichte in der Bruchstelle in Abhängigkeit der Position des Magneten, dessen Leistung Magnetisierungsfahrt für Magnetisierungsfahrt etwas herabgesetzt wird.

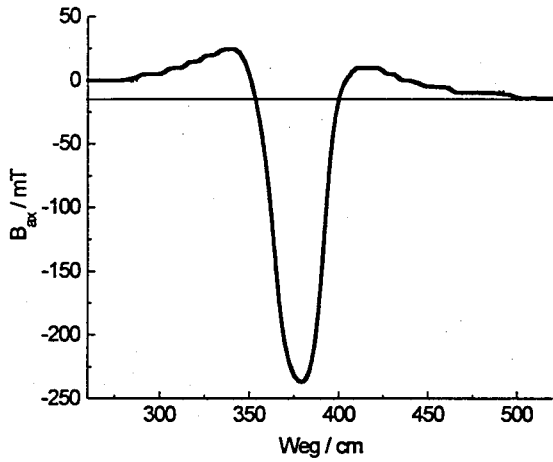


Abb. 2-20. Der Verlauf der axialen Komponente der magnetischen Flußdichte in der Bruchstelle in Abhängigkeit der Position des Magneten. Die Bruchstelle befindet sich auf der dem Magneten zugewandten Seite. Fahrtrichtung: West; 1. Fahrt $I_S = 25 \text{ A}$, $c_{SG} = 10 \text{ cm}$

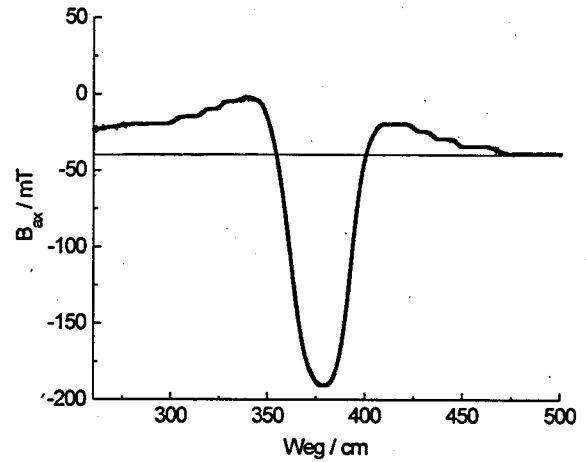


Abb. 2-22. Der Verlauf der axialen Komponente der magnetischen Flußdichte in der Bruchstelle in Abhängigkeit der Position des Magneten. Die Bruchstelle befindet sich auf der dem Magneten zugewandten Seite. Fahrtrichtung: West; 3. Fahrt $I_S = 10 \text{ A}$, $c_{SG} = 10 \text{ cm}$

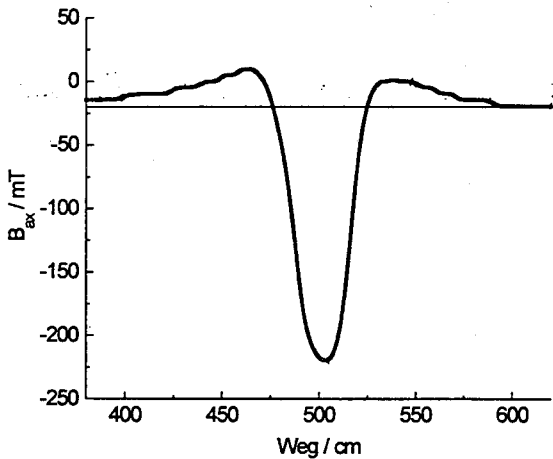


Abb. 2-21. Der Verlauf der axialen Komponente der magnetischen Flußdichte in der Bruchstelle in Abhängigkeit der Position des Magneten. Die Bruchstelle befindet sich auf der dem Magneten zugewandten Seite. Fahrtrichtung: Ost; 2. Fahrt $I_S = 15 \text{ A}$, $c_{SG} = 10 \text{ cm}$

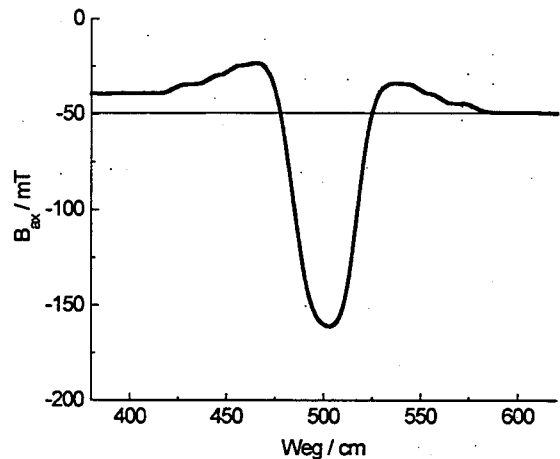


Abb. 2-23. Der Verlauf der axialen Komponente der magnetischen Flußdichte in der Bruchstelle in Abhängigkeit der Position des Magneten. Die Bruchstelle befindet sich auf der dem Magneten zugewandten Seite. Fahrtrichtung: Ost; 4. Fahrt $I_S = 7,5 \text{ A}$, $c_{SG} = 10 \text{ cm}$

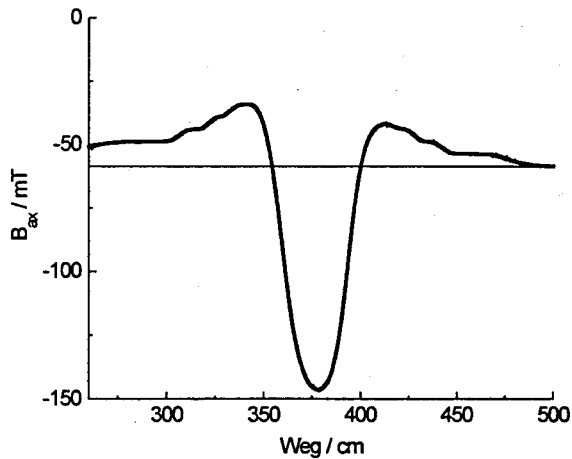


Abb. 2-24. Der Verlauf der axialen Komponente der magnetischen Flußdichte in der Bruchstelle in Abhängigkeit der Position des Magneten. Die Bruchstelle befindet sich auf der dem Magneten zugewandten Seite. Fahrtrichtung: West; 5. Fahrt, $I_S = 6,25$ A, $c_{SG} = 10$ cm

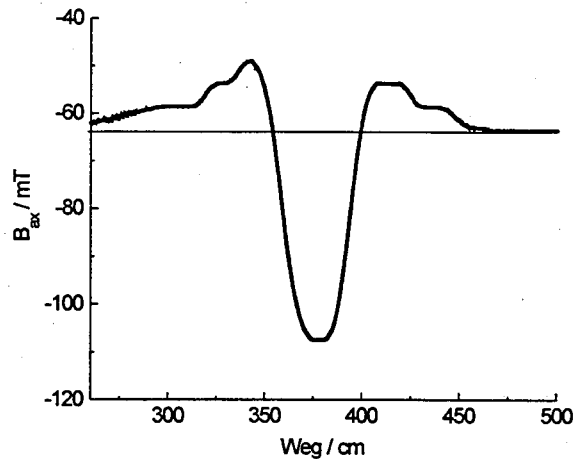


Abb. 2-26. Der Verlauf der axialen Komponente der magnetischen Flußdichte in der Bruchstelle in Abhängigkeit der Position des Magneten. Die Bruchstelle befindet sich auf der dem Magneten zugewandten Seite. Fahrtrichtung: West; 7. Fahrt, $I_S = 3,75$ A, $c_{SG} = 10$ cm

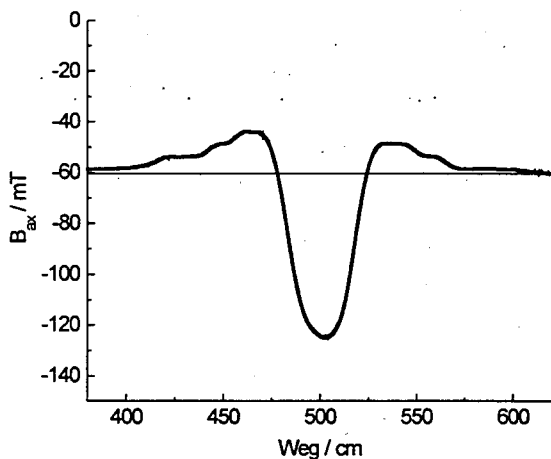


Abb. 2-25. Der Verlauf der axialen Komponente der magnetischen Flußdichte in der Bruchstelle in Abhängigkeit der Position des Magneten. Die Bruchstelle befindet sich auf der dem Magneten zugewandten Seite. Fahrtrichtung: Ost; 6. Fahrt, $I_S = 5$ A, $c_{SG} = 10$ cm

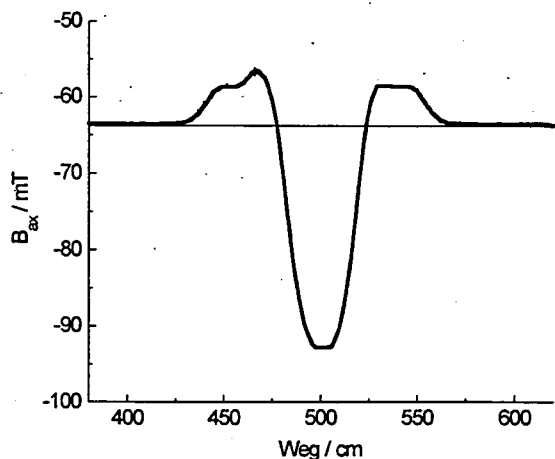


Abb. 2-27. Der Verlauf der axialen Komponente der magnetischen Flußdichte in der Bruchstelle in Abhängigkeit der Position des Magneten. Die Bruchstelle befindet sich auf der dem Magneten zugewandten Seite. Fahrtrichtung: Ost; 8. Fahrt, $I_S = 2,5$ A, $c_{SG} = 10$ cm

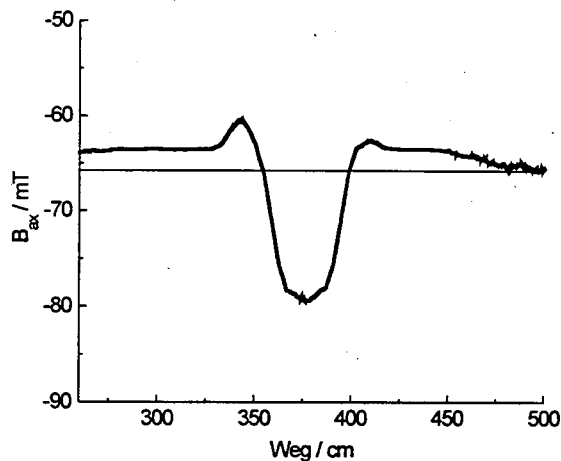


Abb. 2-28. Der Verlauf der axialen Komponente der magnetischen Flußdichte in der Bruchstelle in Abhängigkeit der Position des Magneten. Die Bruchstelle befindet sich auf der dem Magneten zugewandten Seite. Fahrtrichtung: West; 9. Fahrt $I_S = 1,5 \text{ A}$, $c_{SG} = 10 \text{ cm}$.

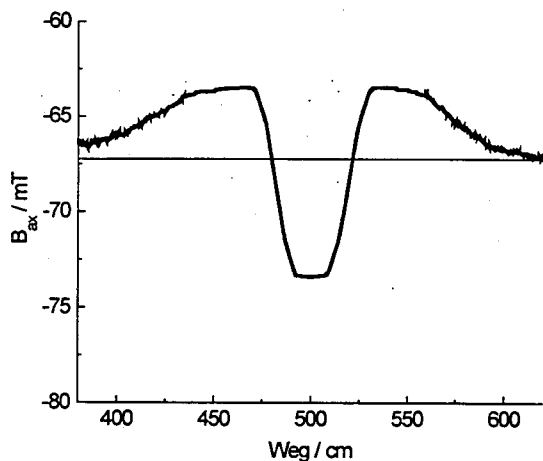


Abb. 2-29. Der Verlauf der axialen Komponente der magnetischen Flußdichte in der Bruchstelle in Abhängigkeit der Position des Magneten. Die Bruchstelle befindet sich auf der dem Magneten zugewandten Seite. Fahrtrichtung: Ost; 10. Fahrt $I_S = 0,9 \text{ A}$, $c_{SG} = 10 \text{ cm}$.

Das Spannglied ist vor der ersten Magnetisierungsfahrt (Abb. 2-20) fast entmagnetisiert. Die Betondeckung des Spannglieds beträgt $c = 10$

cm. Die Bruchstelle in der die Hallsonde positioniert ist, liegt auf der dem Magneten zugewandten Seite des Spannglieds. Hier ist der Einfluß des Streufelds des Jochmagneten besonders stark. Die in den Abb. 2-20 bis Abb. 2-29 dargestellten Kurvenverläufe zeigen das sukzessive Ansteigen des Betrags der Restflußdichte $|B_{||R}|$ nach Abschluß der jeweils aufeinanderfolgenden Magnetisierungsfahrten, wenn die Leistung des Jochmagneten von Fahrt zu Fahrt vermindert wird. Mit dieser Methode kann ein Spannglied mit einer Betondeckung von bis zu $c \approx 30 \text{ cm}$ mit dem benutzten Magneten vollständig remanent magnetisiert werden. Die gemessene Flußdichte in einer Bruchstelle (axiale Komponente) beträgt nach Durchführung der gesamten Magnetisierungsprozedur $B_{||R} = -68,5 \text{ mT}$. Die Lage der Bruchstelle ist unerheblich, hinsichtlich des Erreichens dieser maximalen magnetischen Restflußdichte im Bruch.

(Daß die maximale Magnetisierung der Spannglieder gerade dadurch erreicht wird, daß die Leistung des Elektromagneten schrittweise gesenkt wird, hat einen praktischen Vorteil: Die entstehende Wärme Q durch den ohmschen Widerstand R_S der Spulen ist gleich dem Produkt der elektrischen Leistung P und der Einschaltzeit T_E des Magneten ($Q = P T_E$) bzw. proportional zum Quadrat des Spulenstroms ($Q = I^2 R_S T_E$). Wird der Magnet nur bei zwei von mehr als zehn Magnetisierungsfahrten mit voller Leistung betrieben, braucht er fast nie Abkühlzeiten.)

Häufig ist es nützlich, den Elektromagneten nach abgeschlossener Spanngliedmagnetisierung mit Wechselstrom zu betreiben. Andere

ferromagnetische Gegenstände im Beton, insbesondere der Stahlbetonbewehrung, die Störsignale erzeugt, läßt sich durch das magnetische Wechselfeld abmagnetisieren. Aufgrund der Bewegung des Magneten fällt es in einem betrachteten räumlichen Punkt zeitlich ab. Die Wirkung dieses Wechselfelds auf die Magnetisierung des Spannglieds sollte untersucht werden. Es wurde deshalb die axiale Komponente der Flußdichte B_{\parallel} in der Bruchstelle eines Spannstahlstabs im remanent magnetisierten Spannglied bei der Einwirkung eines magnetischen Wechselfeld, gemessen. Das magnetische Wechselfeld wurde durch den in Abschnitt 2.1.2 erwähnten Elektromagneten mit einem Joch aus lamelliertem Stahlblech erzeugt.

Abb. 2-30 zeigt den Verlauf der axialen Komponente der magnetischen Flußdichte B_{\parallel} an dieser Stelle in Abhängigkeit von der Position des Magneten, der dieses Wechselfeld erzeugt. Das Spannglied hatte eine Betondeckung von $c = 10$ cm. Die Bruchstelle befand sich auf der dem Magneten zugewandten Seite. Die Frequenz des Wechselfelds betrug $\nu \approx 50 \text{ s}^{-1}$. Der Magnet wurde mit einer Geschwindigkeit von etwa 3 cms^{-1} verschoben. Die Frequenz des Wechselfelds ist höher als die Abstrategie. Deshalb verschmieren die in Abb. 2-30 dargestellten Meßwerte. Es ist jedoch deutlich zu erkennen, daß die Schwankungen der Flußdichte in der Bruchstelle sehr gering sind. Es floß ein Spulenstrom von 1 A und damit wurde ein stärkeres magnetisches Wechselfeld eingepreßt als das, das zur Entmagnetisierung von Stahlbetonbewehrung in Bauwerken verwendet wird. Die Magnetisierung des Spann-

glieds wird durch das magnetische Wechselfeld nicht nennenswert beeinflusst. Die helle Kurve in der Abb. 2-30 ergibt sich aus der Mittelung der Meßwerte über einige Perioden des Wechselfelds.

Nachdem die magnetische Flußdichte in der simulierten Bruchstelle eines Spannstahlstabs in einem Spannglied bei verschiedenen externen Magnetisierungen gemessen worden war, wurden die Messungen an dem einzelnen aufgetrennten Stab, der sich zuvor im Spannglied befand, durchgeführt. Der Stab mit der simulierten Bruchstelle befand sich nicht im Spannglied bzw. in Kontakt mit anderen Stäben.

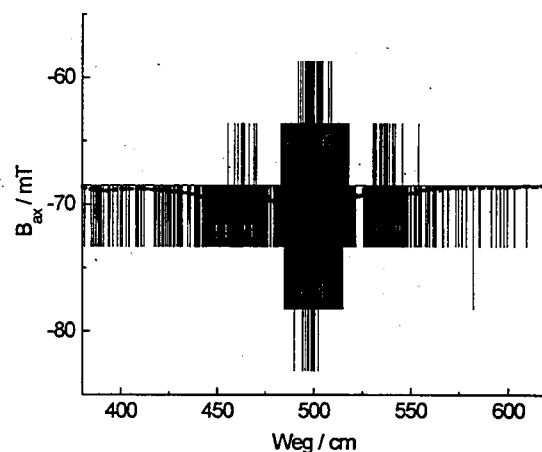


Abb. 2-30. Der Verlauf der axialen Komponente der magnetischen Flußdichte in der Bruchstelle in Abhängigkeit der Position des Magneten. Die Bruchstelle befindet sich auf der dem Magneten zugewandten Seite. Fahrtrichtung: West; $I_s = 1 \text{ AC}$, $c_{SG} = 10 \text{ cm}$

Der Wert der axialen Komponente der magnetischen Flußdichte B_{\parallel} in der Bruchstelle bei remanenter Magnetisierung des Spannstahls beträgt $B_{\parallel} \approx 160 \text{ mT}$. Dieser Wert ist beim isolierten Stab mehr als doppelt so hoch, als wenn

sich dieser in der Umgebung anderer Spannstahlstäbe in einem Spannglied befindet.

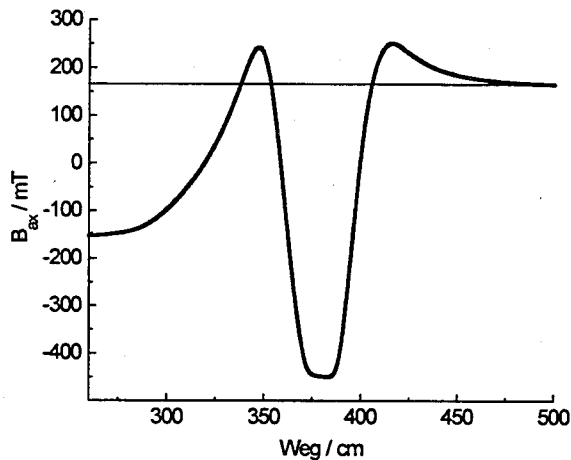


Abb. 2-31. Der Verlauf der axialen Komponente der magnetischen Flußdichte in der Bruchstelle in Abhängigkeit der Position des Magneten. Die Messung wurde an einem einzelnen Spannstahlstab durchgeführt. Fahrtrichtung: West; $I_S = 25 \text{ A}$, $c_{SS} = 10 \text{ cm}$

Abb. 2-31 zeigt den Verlauf der magnetischen Flußdichte in der Bruchstelle des Stabs bei der Magnetisierung mit dem Elektromagneten in Abhängigkeit von dessen Position, wenn dieser mit maximaler Leistung ($I_S = 25 \text{ A}$) im Gleichstrombetrieb in einer Entfernung von $c_{SS} = 10 \text{ cm}$ über dem Stab geführt wird. Die Magnetisierungsrichtung des vor der Messung maximal magnetisierten Stabs ist dem Nutzfeld des Elektromagneten gleichgerichtet. Der maximale magnetische Fluß, während sich der Magnet genau über der Bruchstelle befindet, beträgt $B_{||\text{max}} = 450 \text{ mT}$ und ist damit etwa doppelt so groß als wenn sich der Stab im Spannglied mit 15 weiteren Stäben befinden würde. Auch das Streufeld des Elektromagneten erzeugt eine wesentlich stärkere magnetische Flußdichte in dem Stab, wenn er allein als Leitermedium für

den magnetischen Fluß zur Verfügung steht. Das Streufeld reicht aus um den Stab vollständig umzumagnetisieren.

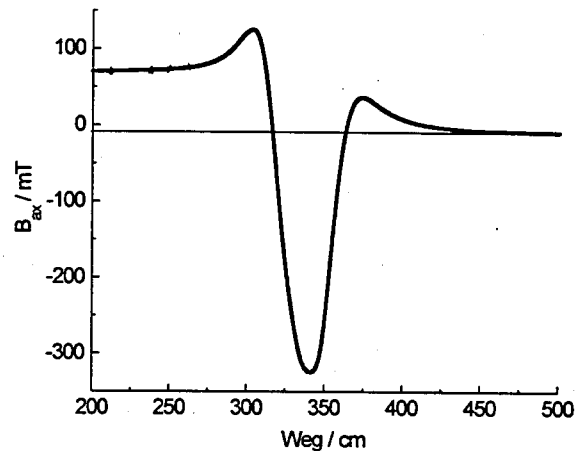


Abb. 2-32. Der Verlauf der axialen Komponente der magnetischen Flußdichte in der Bruchstelle in Abhängigkeit der Position des Magneten. Die Messung wurde an einem einzelnen Spannstahlstab durchgeführt. Fahrtrichtung: Ost; $I_S = 7,5 \text{ A}$, $c_{SS} = 10 \text{ cm}$

Erst wenn bei der Magnetisierungsprozedur ein Spulenstrom $I_S \leq 7,5 \text{ A}$ gewählt wird, wird der Einzelstab in Richtung des Nutzfelds magnetisiert (Abb. 2-32). Durch weiteres stufenweises Senken der Magnetisierungsfeldstärke erreicht man wiederum die maximale remanente Magnetisierung in Richtung des Nutzfelds. Das Durchführen der gesamten Magnetisierungsprozedur führt auch in dem einzelnen Spannstahlstab zu einem definierten magnetischen Zustand.

Eine weitere Frage, die versuchstechnisch geklärt werden sollte, war, wo und mit welcher Flußdichte der magnetische Streufluß in der Umgebung eines Spannstahlbruchs aus dem Spannstahl austritt. Die Messungen wurden an dem Spannstahl mit der simulierten Bruchstelle

im Spannglied durchgeführt. Die Trennflächen des aufgetrennten Spannstahts berührten sich vollflächig. Die Hallsonde wurde in verschiedenen Abständen von der Bruchstelle direkt auf dem gebrochenen Stab positioniert, so daß die radial aus der Mantelfläche des Stabs austretende Komponente der magnetischen Flußdichte gemessen wurde.

Der austretende magnetische Fluß war am größten, als die maximale remanente Magnetisierung des Spannglieds erreicht war. In diesem Zustand wurden die in der Tabelle 2-1 zusammengestellten Werte der magnetischen Flußdichte in verschiedenen Abständen von der Bruchstelle gemessen. Die Werte belegen, daß das Bruchsignal bei remanenter Magnetisierung M_{II} des gebrochenen Stabs nicht durch die Annahme magnetischer Flächenladungen auf den Bruchflächen zu modellieren ist (4.2).

Tabelle 2-1 Die aus der Mantelfläche eines Spannstahts in der Umgebung eines Bruchs radial austretende Flußdichte B_{rad} bei remanenter Magnetisierung. s ist die Entfernung zur Bruchstelle.

s / mm	B_{rad} / mT
2	8,75
14	4,6
24	3,6
34	2,3
44	1,7
> 1000	< 0,1

2.2.3 Messungen der Flußdichte am Betonstahl während des Magnetisierungsprozesses

Das magnetische Verhalten der Stahlbetonbewehrung bei den verschiedenen externen Ma-

gnetisierungen ist ebenfalls von großer Bedeutung für den Bauwerkeinsatz des Verfahrens. Die neben der Spannbewehrung eingebaute Stahlbetonbewehrung ist die Hauptquelle für magnetische Störsignale, die von den Nutzsignalen, die von der Spannbewehrung ausgehen, getrennt werden müssen, um die Meßsignale richtig zu interpretieren.

Ähnliche Versuche, wie die in 2.2.2 beschriebenen, wurden deshalb auch für verschiedene Betonstähle, die zusammen mit Spanngliedern in den Versuchsstand eingebaut wurden, durchgeführt.

Überlappungsstoß von Längsbewehrungsstäben

Die Hallsonde wurde an einem Ende eines Überlappungsstoßes so positioniert, daß die axiale Komponente der magnetischen Flußdichte gemessen wurde, also die Komponente, die stirnflächig aus dem Ende eines Betonstahlstabs austritt (Abb. 2-33). Die überlappenden Bewehrungsstäbe aus BSt 420 S lagen parallel zur Fahrtrichtung des Magneten. Die Betondeckung der Stäbe betrug $c_{0S} = 5 \text{ cm}$.

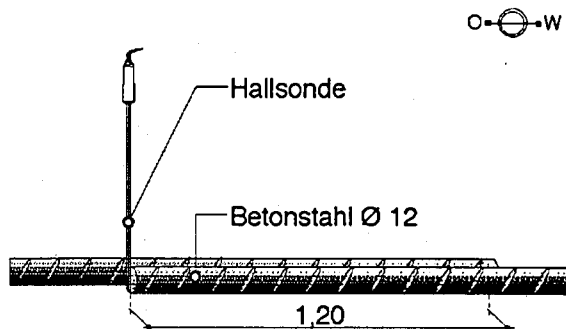


Abb. 2-33. Skizze zur Positionierung der Hallsonde am Ende eines Überlappungsstoßes. Die Richtungen sind oben rechts angegeben.

Abb. 2-34 zeigt die gemessene Komponente der Flußdichte in Abhängigkeit der Position des Elektromagneten, der mit maximaler Leistung, $I_S = 25$ A, betrieben wurde. Das Ende des Überlappungsstoßes, an dem sich die Hallsonde befindet liegt bei 373 cm auf der Wegachse. Die Ausgangsmagnetisierung war undefiniert. Am Ende des Überlappungsstoßes betrug die vor der ersten Magnetisierungsfahrt gemessene Restflußdichte $B_{ax0} = 15,2$ mT. Die Magnetisierungsrichtung des Betonstahls war der Richtung des Nutzfilds des Jochmagneten gleichgerichtet. Nach der Magnetisierungsfahrt hat sich die Magnetisierungsrichtung der Betonstahlstäbe umgekehrt und ist jetzt dem Streufeld des Magneten, dem der Stahl an jeder Stelle zeitlich nach dem Nutzfild ausgesetzt waren, gleichgerichtet.

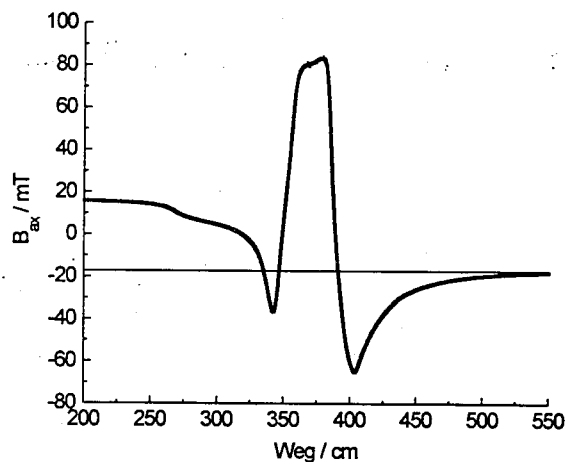


Abb. 2-34. Der Verlauf der axialen Komponente der magnetischen Flußdichte am Ende eines Überlappungsstoßes in Abhängigkeit der Position des Magneten. Durchmesser der überlappenden Bewehrungsstäbe BSt 420 S: $d = 12$ mm. Fahrtrichtung: West; $I_S = 25$ A, $c_{S0} = 5$ cm

Wie Abb. 2-35 zeigt, reicht auch das Streufeld bei einer Magnetisierungsfahrt mit einem Spu-

lenstrom $I_S = 15$ A, um die überlappenden Stäbe bis zur remanenten Magnetisierung M_{IR} aufzumagnetisieren. Die gemessene remanente Flußdichte beträgt $B_{IR} = 16,6$ mT. Der magnetische Zustand der Stäbe vor und nach der Magnetisierungsfahrt ist der gleiche, obwohl ein ausreichend starkes Nutzfild wirkte, um den Bewehrungsstahl zwischen den Spulen des Jochmagneten bis in den Bereich, in dem alle irreversiblen Magnetisierungsprozesse abgeschlossen sind, in entgegengesetzte Richtung zu magnetisieren.

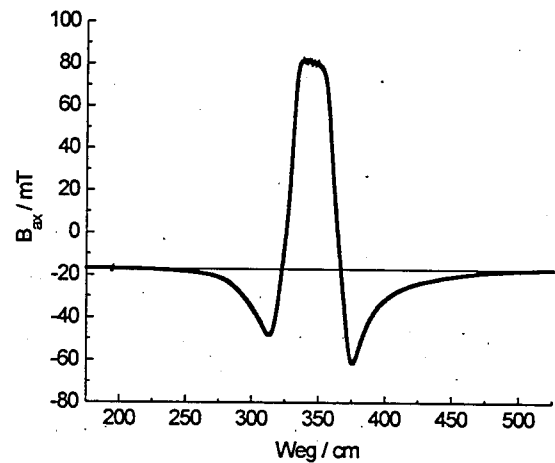


Abb. 2-35. Der Verlauf der axialen Komponente der magnetischen Flußdichte am Ende eines Überlappungsstoßes in Abhängigkeit der Position des Magneten. Durchmesser der überlappenden Bewehrungsstäbe BSt 420 S: $d = 12$ mm. Fahrtrichtung: Ost; $I_S = 15$ A, $c_{S0} = 5$ cm

Der unsymmetrische Verlauf der Meßkurve resultiert daraus, daß der Querschnitt, in dem die Meßstelle liegt, keine Spiegelebene der Stabanordnung ist. Wirkt bei der Annäherung des Magneten, der von West nach Ost gefahren wird, an das Ende des Überlappungsstoßes sein in Fahrtrichtung erstes Streufeld, so kann das Nutzfild durch zwei Stäbe fließen (Abb. 2-33). Das Streufeld ist dann kleiner, als

wenn das Nutzfeld nur über einen Stab fließen kann. Letzteres ist der Fall, wenn das zweite Streufeld an der Meßstelle wirkt. Die durch das Streufeld erzeugte Flußdichte ist aus dem gleichen Grund unsymmetrisch. Befindet sich die erste Spule über der Meßstelle, wirkt der endende Stab als Leitermedium für den magnetischen Fluß des Nutzfelds, weil er von einer Spule zur anderen reicht. Wenn sich die zweite Spule über der Meßstelle befindet, liegt der Stab, an dessen Stirnfläche die Hallsonde positioniert ist, nicht zwischen den Spulen und seine Leitungseigenschaften für den magnetischen Fluß sind schlechter, die gemessene Flußdichte ist entsprechend kleiner. Aus dem Verlauf der Meßkurve läßt sich auf die Richtung der Magnetisierungsfahrt schließen.

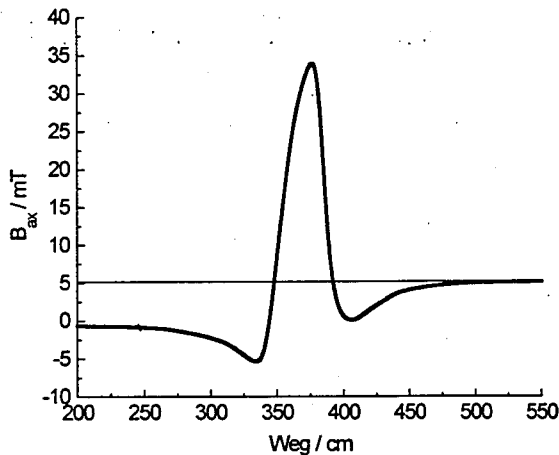


Abb. 2-36. Der Verlauf der axialen Komponente der magnetischen Flußdichte am Ende eines Überlappungsstoßes in Abhängigkeit der Position des Magneten. Durchmesser der überlappenden Bewehrungsstäbe BSt 420 S: $d = 12$ mm. Fahrtrichtung: West; $I_S = 3,75$ A, $c_{S0} = 5$ cm

Erst bei der Magnetisierungsfahrt, bei der der Spulenstrom nur noch $I_S = 3,75$ A beträgt, ist

das Streufeld des Magneten zu schwach, um die durch das Nutzfeld magnetisierten Bereiche wieder umzumagnetisieren (Abb. 2-36).

Die gemessene Flußdichte nach der letzten Magnetisierungsfahrt mit positiven Spulenstrom $I_S = 0,1$ A am Stoßende ist mit $B_{ax13} = 7,2$ mT relativ klein (Abb. 2-37).

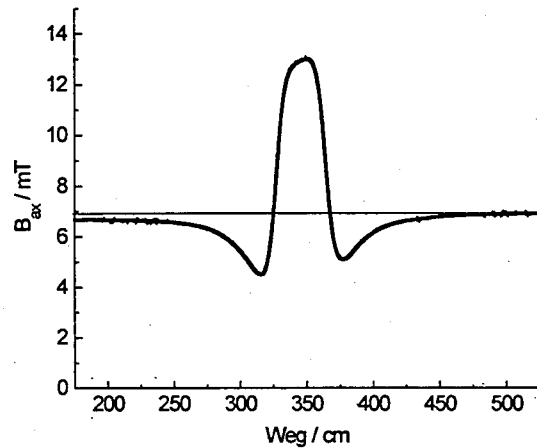


Abb. 2-37. Der Verlauf der axialen Komponente der magnetischen Flußdichte am Ende eines Überlappungsstoßes in Abhängigkeit der Position des Magneten. Durchmesser der überlappenden Bewehrungsstäbe BSt 420 S: $d = 12$ mm. Fahrtrichtung: West; $I_S = 0,1$ A, $c_{S0} = 5$ cm

Polt man das Feld des Jochmagneten um (negativer Spulenstrom I_S) und steigert die Leistung des Magneten langsam von Magnetisierungsfahrt zu Magnetisierungsfahrt, so sinkt die Restflußdichte zunächst betragsmäßig. Bei der Magnetisierungsfahrt mit $I_S = -3,75$ A ist das Nutzfeld des Magneten stark genug, um trotz des Streufelds eine Umpolung der Magnetisierung des Betonstahls zu bewirken (Abb. 2-38).

Bei Steigerung des Spulenstroms auf $I_S = -5$ A ist das Streufeld bereits wieder so stark, daß

es die Magnetisierungsrichtung des Betonstahls bestimmt (Abb. 2-39).

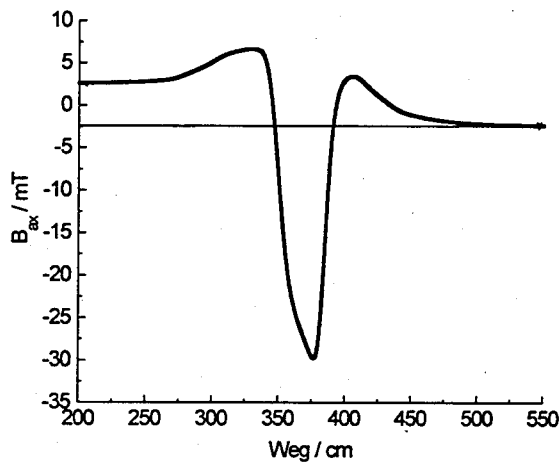


Abb. 2-38. Der Verlauf der axialen Komponente der magnetischen Flußdichte am Ende eines Überlappungsstoßes in Abhängigkeit der Position des Magneten. Durchmesser der überlappenden Bewehrungsstäbe BSt 420 S: $d = 12$ mm. Fahrtrichtung: West; $I_s = -3,75$ A, $c_{s0} = 5$ cm

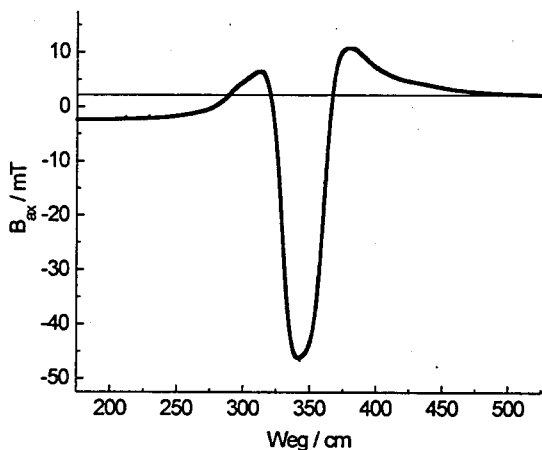


Abb. 2-39. Der Verlauf der axialen Komponente der magnetischen Flußdichte am Ende eines Überlappungsstoßes in Abhängigkeit der Position des Magneten. Durchmesser der überlappenden Bewehrungsstäbe BSt 420 S: $d = 12$ mm. Fahrtrichtung: Ost; $I_s = -5$ A, $c_{s0} = 5$ cm

Endende Längsbewehrung

Eine an Bauwerken häufig anzutreffende Bewehrungskonstellation ist die, daß Verankerungen der Sahlbetonlängsbewehrung zwischen der Betonoberfläche und einem Spannglied liegen (Abb. 9-8). Eine solche Verankerung wurde nachgebildet, indem ein Bewehrungsstab Stahl I $\varnothing = 25$ mm an einem Ende zu einem Haken umgebogen wurde. Die Länge des Stabs beträgt 120 m. Er ist parallel zur Fahrtrichtung des Magneten in einem Abstand (simulierte Betondeckung) von $c = 4$ cm zur Unterseite des Magneten angeordnet.

In der ersten Meßreihe an diesem Bewehrungsstab wurde die Hallsonde an dem gekrümmten Ende des Stabs gemäß Abb. 2-40 positioniert. Das gekrümmte Ende des Bewehrungsstabs zeigte in Richtung Osten.

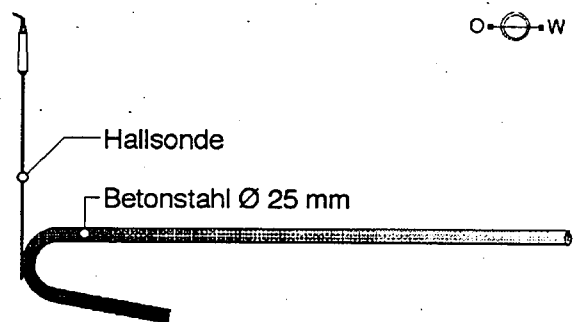


Abb. 2-40. Skizze zur Positionierung der Hallsonde an der äußeren gekrümmten Fläche des zum Haken umgebogen Endes eines Bewehrungsstabs. Die Richtungen sind oben rechts angegeben.

Begonnen wurde wieder mit einer Magnetisierungsfahrt bei voller Leistung des Magneten ($I_s = 25$ A). Vor der Magnetisierungsfahrt war der Bewehrungsstab undefiniert magnetisiert. Die magnetische Flußdichte am Meßpunkt war dem Nutzfeld des Magneten vor der Magnetisierungsfahrt entgegengerichtet.

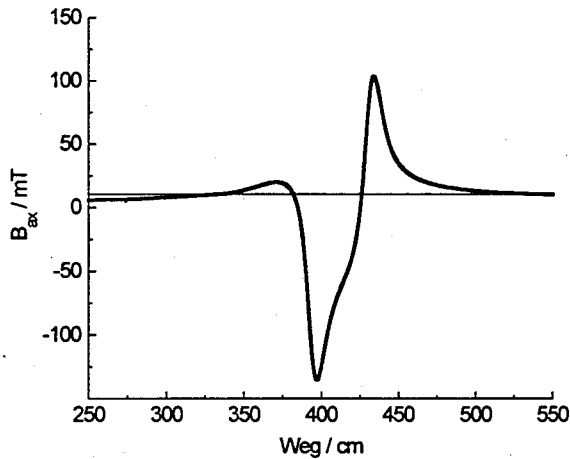


Abb. 2-41. Der Verlauf der radial aus dem gekrümmten Ende eines Bewehrungsstabs austretenden Komponente der magnetischen Flußdichte in Abhängigkeit der Position des Magneten. Durchmesser des Bewehrungsstabs : $d = 25$ mm. Fahrtrichtung: Ost; $I_s = 25$ A, $c_{s0} = 4$ cm

Den Verlauf der magnetischen Flußdichte in Abhängigkeit der Position des Magneten zeigt Abb. 2-41. Hier sieht man sehr deutlich, wie sich der magnetische Fluß von einer Spule des Magneten zur anderen größtenteils auf dem Weg des geringsten magnetischen Widerstand verläuft. Die Richtung der magnetischen Restflußdichte am Meßpunkt nach der Magnetisierungsfahrt wird durch das Streufeld des Magneten bestimmt.

Während die Stärke des Streufelds des Elektromagneten, das der Bewehrungsstab nach dem Nutzfeld erfährt, die Magnetisierung M am Ende des Bewehrungsstabs bestimmt, ist der Einfluß des zuerst wirkenden Streufelds gering. Der magnetische Fluß kann sich, wenn sich der Magnet in dem Bereich befindet, in dem das zweite Streufeld wirkt, nicht mehr über den Bewehrungsstab schließen. Daraus resultiert, daß die Streufelder stärker werden.

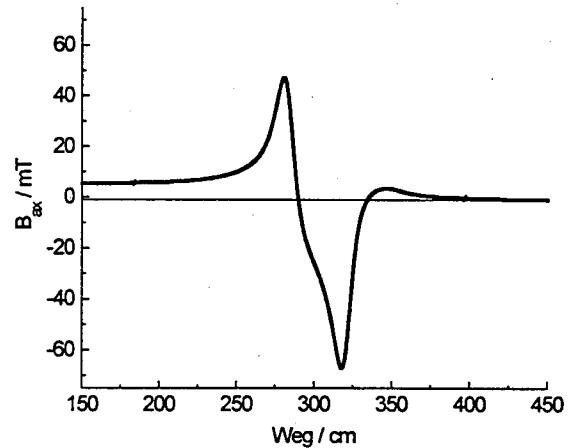


Abb. 2-42. Der Verlauf der radial aus dem gekrümmten Ende eines Bewehrungsstabs austretenden Komponente der magnetischen Flußdichte in Abhängigkeit der Position des Magneten. Durchmesser des Bewehrungsstabs: $d = 25$ mm. Fahrtrichtung: West; $I_s = 7,5$ A, $c_{s0} = 4$ cm

Abb. 2-42 zeigt den Verlauf der Magnetisierung am gekrümmten Ende des Stabs in Abhängigkeit von der Position des Magneten, der mit einem Spulenstrom $I_s = 7,5$ A betrieben wird. Der Elektromagnet wird in Richtung Westen über das Spannglied geführt, über dem der untersuchte Bewehrungsstab angeordnet ist.

Die durch das erste Streufeld erzeugte Flußdichte am Meßpunkt ist groß, denn die Spulen des Elektromagneten befinden sich nicht über dem Bewehrungsstab. Sobald sich die vordere Spule über dem Bewehrungsstab befindet, ändert sich das Vorzeichen der gemessenen Flußdichtekomponente. Das Nutzfeld wirkt. Nachdem die hintere Spule das Stabende überfahren hat, wirkt dort erneut das (positive) Streufeld des Elektromagneten. Es ist jedoch wesentlich kleiner als das Streufeld, das zuerst gewirkt hat, weil der größte Anteil des magnetischen Flusses jetzt über den Bewehrungsstab

fließen kann. Der magnetische Kreis (Jochmagnet und Bewehrungsstab) ist jetzt besser geschlossen und produziert kleinere Streufelder als in der Anordnung zuvor, als der magnetische Kreis nur aus dem Jochmagneten bestand. Die Restflußdichte des Bewehrungsstabs wird am Meßpunkt deshalb auch von dem Nutzfeld bestimmt. Sie ist klein und negativ.

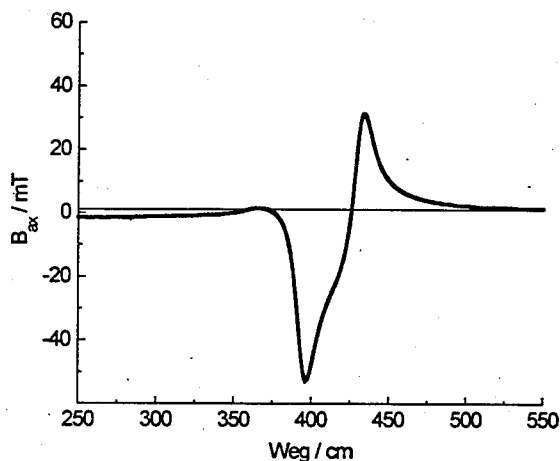


Abb. 2-43. Der Verlauf der radial aus dem gekrümmten Ende eines Bewehrungsstabs austretenden Komponente der magnetischen Flußdichte in Abhängigkeit der Position des Magneten. Durchmesser des Bewehrungsstabs : $d = 25$ mm. Fahrtrichtung: West; $I_s = 5$ A, $c_{s0} = 4$ cm

Wie der Verlauf der magnetischen Flußdichte, an der gleichen Stelle gemessen, aussieht, wenn der Bewehrungsstab vom Magneten in entgegengesetzter Richtung überfahren wird, zeigt Abb. 2-43. Der Spulenstrom ist geringer ($I_s = 5$ A) als in der vorherigen Abbildung, dennoch ist aufgrund der Fahrtrichtung das Streufeld, stark genug, um die Richtung der Magnetisierung des Bewehrungsstabs in der Umgebung der Meßstelle nach durchgeführter Magnetisierungsfahrt zu bestimmen.

Das zuletzt, also nach dem Nutzfeld, wirkende Streufeld ist relativ stark, weil der magnetische Kreis weniger geschlossen ist. Befindet sich der Magnet in dem Bereich, in dem er zuletzt mit seinem Streufeld auf das Ende des Bewehrungsstabs wirkt, kann sich der magnetische Fluß nicht über einen magnetischen Leiter zwischen den Spulen über den Bewehrungsstab schließen.

Die magnetische Flußdichte am Ende eines Bewehrungsstabs ist also nicht nur von der Magnetisierung des Stabs vor der Magnetisierungsfahrt und dem gewählten Spulenstrom, sondern auch von der Fahrtrichtung des Jochmagneten abhängig.

Nach Durchführung der gesamten Magnetisierungsprozedur ist die gemessene Restflußdichte am gekrümmten Ende des Bewehrungsstabs mit $B_{||} = 1$ mT klein, verglichen mit der Restflußdichte, die nach einer Magnetisierungsfahrt mit voller Leistung ($I_s = 25$ A) gemessen wird (Abb. 2-41).

Die Messung der magnetischen Flußdichte am kurzen Ende des Bewehrungsstabs $\varnothing = 25$ mm (Abb. 2-44) bei voller Magnetisierungsleistung ($I_s = 25$ A) zeigt Abb. 2-45.

Die gemessene Flußdichte bleibt während der gesamten Magnetisierungsfahrt klein, da diese Stelle in keiner Position des Jochmagnet Bestandteil eines besonders wirksamen fast geschlossenen magnetischen Kreises ist.

Die Richtung der Magnetisierungsfahrt spielt hier hinsichtlich des Vorzeichens der nach dem Abschluß der Magnetisierung gemessenen Restflußdichte die entscheidende Rolle, wie der Vergleich der Abb. 2-45 mit der Abb. 2-46

zeigt, in der der Verlauf der magnetischen Flußdichte während einer Magnetisierungsfahrt mit einem Spulenstrom von $I_s = 15$ A in entgegengesetzte Richtung dargestellt ist.

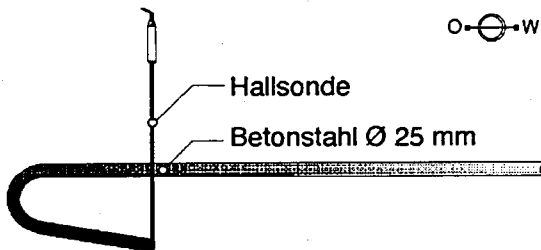


Abb. 2-44. Skizze zur Positionierung der Hallsonde an dem kurzen Ende eines mit einem Haken zur Verankerung versehenen Bewehrungsstabs. Die Richtungen sind oben rechts angegeben.

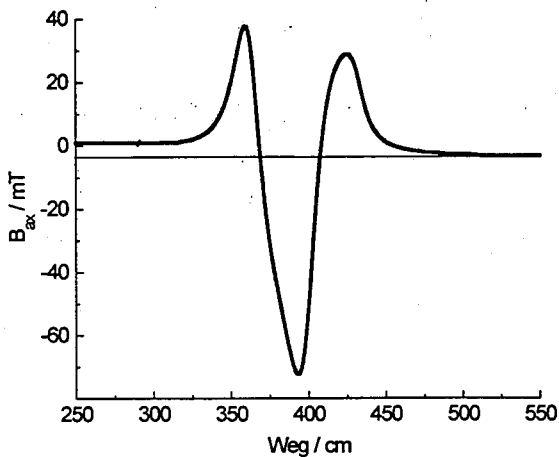


Abb. 2-45. Der Verlauf der aus dem gekrümmten Ende eines Bewehrungsstabs stirnseitig austretenden axialen Komponente der magnetischen Flußdichte in Abhängigkeit der Position des Magneten. Durchmesser des Bewehrungsstabs : $d = 25$ mm. Fahrtrichtung: Ost; $I_s = 25$ A; $c_{s0} = 4$ cm

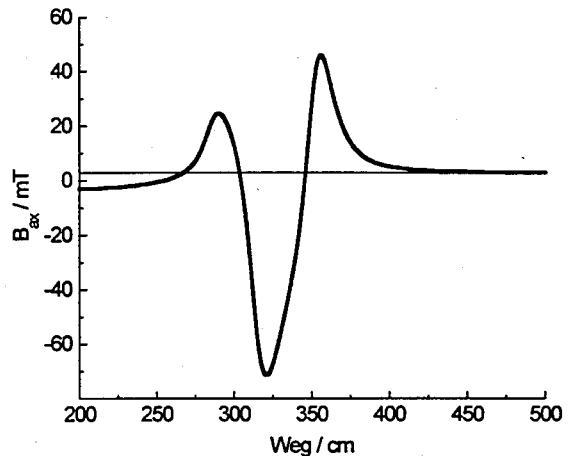


Abb. 2-46. Der Verlauf der aus dem gekrümmten Ende eines Bewehrungsstabs stirnseitig austretenden axialen Komponente der magnetischen Flußdichte in Abhängigkeit der Position des Magneten. Durchmesser des Bewehrungsstabs : $d = 25$ mm. Fahrtrichtung: West; $I_s = 15$ A; $c_{s0} = 4$ cm

Bei der ersten Magnetisierungsfahrt mit $I_s = 25$ A (Abb. 2-45) wird, wenn das Streufeld der ersten Spule an der Meßstelle wirkt, eine größere magnetische Flußdichte $B_{||}$ gemessen als bei der Einwirkung des zweiten Streufelds auf den Stab an der Meßstelle. Umgekehrt ist es bei der zweiten Messungen mit $I_s = 15$ A (Abb. 2-46), bei der der Magnet die entgegengesetzte Fahrtrichtung hat.

Die Begründung für diesen Verlauf ist im wesentlichen die gleiche wie bei der vorherigen Anordnung. Nähert sich der Jochmagnet in Richtung Osten der Meßstelle, erzeugt die erste Spule ein stärkeres Streufeld als die zweite, weil sich bei der Wirkung des ersten Streufelds das Nutzfild nur über einen halb so großen Stabquerschnitt zwischen den Spulen schließen kann, als wenn das zweite Streufeld wirkt, sich der Jochmagnet also über dem Ha-

ken und damit über „zwei“ Stäben befindet. Der magnetische Streufluß ist umso größer, je kleiner der magnetische Fluß zwischen den Spulen ist.

Die betragsmäßig maximale Flußdichte des Nutzfelds während der Magnetisierungsfahrten wird dann erreicht, wenn sich beide Spulen über dem kurzen Ende des Hakens befinden. Bei einer Magnetisierungsfahrt in Richtung Osten ist das der Fall, wenn sich die zweite Spule kurz vor dem Meßpunkt befindet (Abb. 2-45), bei einer Magnetisierungsfahrt in Richtung Westen dann, wenn die erste Spule sich kurz hinter der Meßstelle befindet (Abb. 2-46).

Der Verlauf der durch die Streufelder erzeugten magnetischen Flußdichte ist ebenfalls von der Fahrtrichtung abhängig.

Bei einer Magnetisierungsfahrt in Richtung Osten (Abb. 2-45) erzeugt die durch das erste Streufeld erzeugte Flußdichte einen steilen Anstieg, weil bei der Annäherung des Magneten an die Meßstelle Luft, also ein schlechter magnetischer Leiter, zwischen dem Magneten und der Meßstelle liegt. Die durch das zweite Streufeld erzeugte Flußdichte fällt nicht so steil ab, weil bei der Entfernung des Magneten von der Meßstelle ein guter magnetischer Leiter (Stahl) zwischen dem Magneten und der Meßstelle befindet. Bei einer Magnetisierungsfahrt in Richtung Westen zeigt aus den gleichen Gründen das erste Streufeld einen flachen Anstieg, während das zweite steil abfällt (Abb. 2-46).

Entscheidend ist, daß nach jeder, mit sukzessive abnehmendem Spulenstrom I_s , durchgeführten Magnetisierungsfahrt die gemessene Restflußdichte zunächst das Vorzeichen je

nach Fahrtrichtung, wegen der unterschiedlichen Stärke der zuletzt wirkenden Streufelder, wechselt (Abb. 2-45 und Abb. 2-46). Je nach Fahrtrichtung des Magneten ist die Richtung der magnetischen Restflußdichte vom Nutzfeld oder vom Streufeld bestimmt.

Ab einer bestimmten Magnetisierungsleistung, die unter anderem von der Betondeckung abhängt, wird dann, je nach Fahrtrichtung des Magneten eine relativ große oder fast verschwindende magnetische Restflußdichte gemessen wird (Abb. 2-47 und Abb. 2-48).

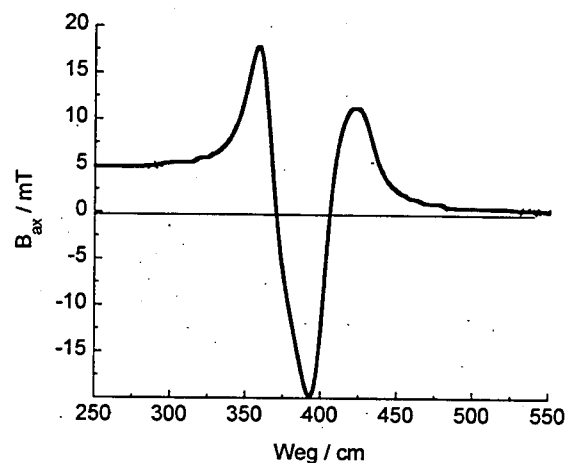


Abb. 2-47. Der Verlauf der aus dem gekrümmten Ende eines Bewehrungsstabs stirnseitig austretenden axialen Komponente der magnetischen Flußdichte in Abhängigkeit der Position des Magneten. Durchmesser des Bewehrungsstabs : $d = 25$ mm. Fahrtrichtung: Ost; $I_s = 5$ A, $c_{s0} = 4$ cm

Die bei kleinen Magnetisierungsleistungen, also am Ende eines Zyklus gemessenen Restflußdichten haben das gleiche Vorzeichen wie das Streufeld des Magneten. Der Betrag der Flußdichte an dem kurzen Ende ist nach Abschluß der Magnetisierung mit $|B| \leq 2$ mT klein. Wird das Feld des Elektromagneten umgepolt,

wechselt die gemessene Restflußdichte bereits bei kleinen Magnetisierungsleistungen das Vorzeichen.

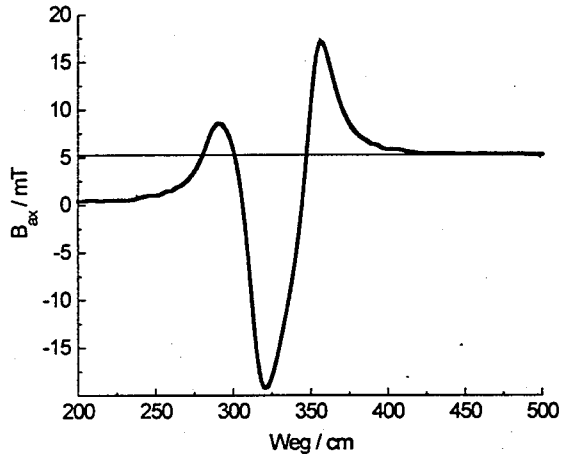


Abb. 2-48. Der Verlauf der aus dem gekrümmten Ende eines Bewehrungsstabs stirnseitig austretenden axialen Komponente der magnetischen Flußdichte in Abhängigkeit der Position des Magneten. Durchmesser des Bewehrungsstabs : $d = 25$ mm. Fahrtrichtung: West; $I_s = 3,75$ A, $c_{sü} = 4$ cm

Schließlich wurde an dem gekrümmten Stab $\varnothing = 25$ mm auch die Flußdichte an der Stirnfläche des langen Endes während und nach den Magnetisierungsfahrten gemessen (Abb. 2-49).

Abb. 2-50 zeigt den Verlauf der Flußdichte in Abhängigkeit der Position des Magneten bei voller Magnetisierungsleistung $I_s = 25$ A. Er gleicht im Wesentlichen dem Verlauf der Flußdichte während einer Magnetisierungsfahrt gemessen am gekrümmten Ende des Stabs (Abb. 2-41).

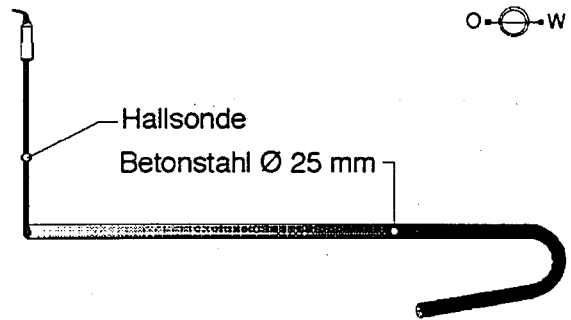


Abb. 2-49. Skizze zur Positionierung der Hallsonde am Ende eines Bewehrungsstabs. Die Richtungen sind oben rechts angegeben.

Die nach Abschluß der Magnetisierungsfahrten gemessenen Restflußdichten sind bei hohen Magnetisierungsleistungen durch die Richtung des Streufelds bestimmt (Abb. 2-50 und Abb. 2-51).

Bei Magnetisierungsfahrten mit mittleren Spulenströmen entscheidet die Fahrtrichtung des Elektromagneten über das Vorzeichen der am Stabende gemessenen Flußdichte. Die Richtung der magnetischen Restflußdichte wird je nach Fahrtrichtung vom Nutzfeld oder vom Streufeld bestimmt.

Bei geringen Magnetisierungsleistungen bestimmt schließlich das Nutzfeld das Vorzeichen der Restflußdichte (Abb. 2-52). Der Betrag der Restflußdichte nach Abschluß des Magnetisierungszykluses ist kleiner als $|B_E| \leq 5$ mT, und damit sehr viel kleiner als der Wert bei maximaler Magnetisierungsleistung (Abb. 2-50). Wird der Elektromagnet umgepolt, wechselt das Vorzeichen der Restflußdichte bereits bei kleinen Magnetisierungsleistungen ($I_s \leq 2,5$ A) (Abb. 2-53).

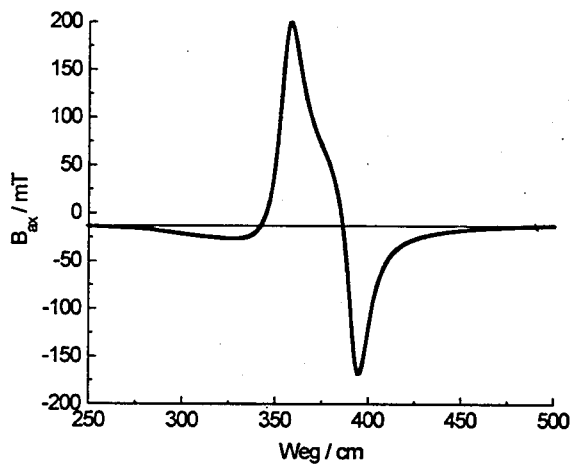


Abb. 2-50. Der Verlauf der aus der Stirnfläche des Endes eines Bewehrungsstabs austretenden axialen Komponente der magnetischen Flußdichte in Abhängigkeit der Position des Magneten. Durchmesser des Bewehrungsstabs : $d = 25$ mm. Fahrtrichtung: Ost; $I_s = 25$ A, $c_{s0} = 4$ cm

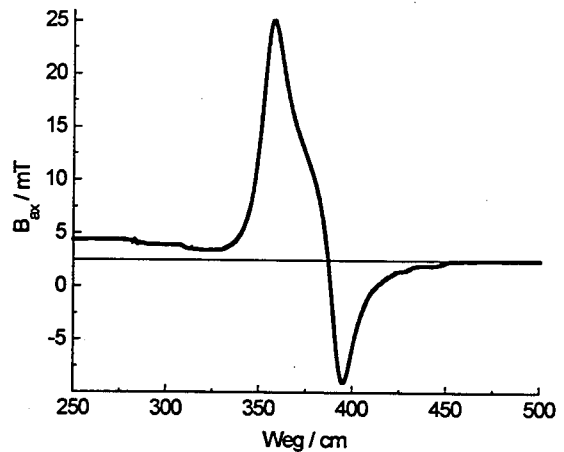


Abb. 2-52. Der Verlauf der aus der Stirnfläche des Endes eines Bewehrungsstabs austretenden axialen Komponente der magnetischen Flußdichte in Abhängigkeit der Position des Magneten. Durchmesser des Bewehrungsstabs : $d = 25$ mm. Fahrtrichtung: Ost; $I_s = 25$ A, $c_{s0} = 4$ cm

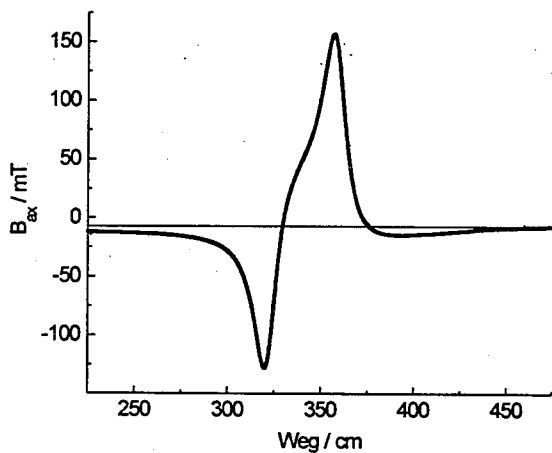


Abb. 2-51. Der Verlauf der aus der Stirnfläche des Endes eines Bewehrungsstabs austretenden axialen Komponente der magnetischen Flußdichte in Abhängigkeit der Position des Magneten. Durchmesser des Bewehrungsstabs : $d = 25$ mm. Fahrtrichtung: West; $I_s = 15$ A, $c_{s0} = 4$ cm

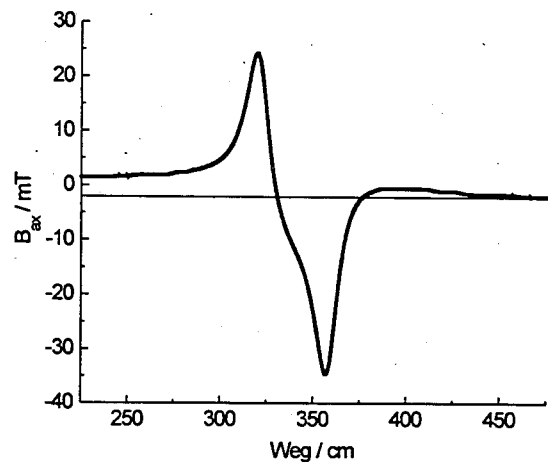


Abb. 2-53. Der Verlauf der aus der Stirnfläche des Endes eines Bewehrungsstabs austretenden axialen Komponente der magnetischen Flußdichte in Abhängigkeit der Position des Magneten. Durchmesser des Bewehrungsstabs : $d = 25$ mm. Fahrtrichtung: West; $I_s = 15$ A, $c_{s0} = 4$ cm

Bügelbewehrung

Zuletzt wurde der magnetische Fluß an einer Bügelbewehrung während und nach einer Magnetisierungsfahrt gemessen. Der Durchmesser des Bügels (BST 500 S) betrug $d = 12$ mm. Die Hallsonde wurde tangential zur Mantelfläche eines Bügel, zum Magneten hin gerichtet, positioniert (Abb. 2-54).

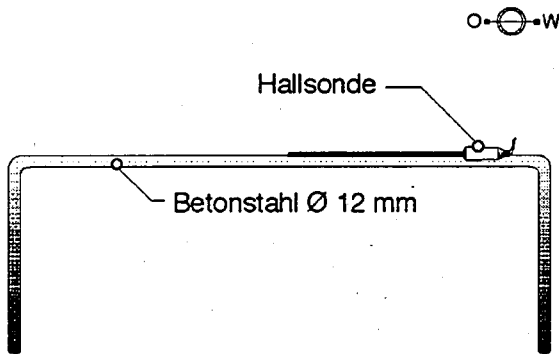


Abb. 2-54. Skizze zur Positionierung der Hallsonde an der Mantelfläche eines Bügels aus BSt 500 S. Die Richtungen sind oben rechts angegeben.

Die simulierte Betondeckung betrug $c_{B0} = 3$ cm. Abb. 2-55 zeigt die am Bügel gemessene Flußdichte während einer Magnetisierungsfahrt mit einem Spulenstrom von $I_S = 15$ A. Der Bügel liegt quer zur Fahrtrichtung des Magneten. Er wird zunächst von der ersten Spule in eine Richtung (negative Flußdichte) magnetisiert. Wird der Bügel von der zweiten Spule, die ein magnetisches Feld mit umgekehrten Vorzeichen erzeugt, überfahren, kehrt sich auch die Magnetisierung des Bügel um.

Die gemessene Restflußdichte hat nach der Magnetisierungsfahrt einen positiven Wert. Wird daraufhin in umgekehrter Fahrtrichtung magnetisiert, erfährt der Bügel zuletzt ein negatives Magnetfeld durch den Elektromagneten, so daß die am Bügel gemessene Flußdichte

nach der Magnetisierungsfahrt ebenfalls negativ ist. Die Richtung der Restflußdichte am Meßpunkt hängt nur von der Richtung der Magnetisierungsfahrt ab.

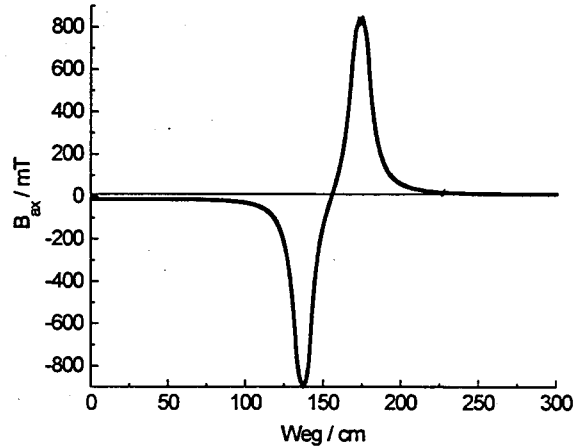


Abb. 2-55. Der Verlauf der aus der Mantelfläche eines Bügels austretenden radialen Komponente der magnetischen Flußdichte in Abhängigkeit der Position des Magneten. Durchmesser des Bügels : $d = 12$ mm. Fahrtrichtung: Ost; $I_S = 15$ A, $c_{B0} = 3$ cm

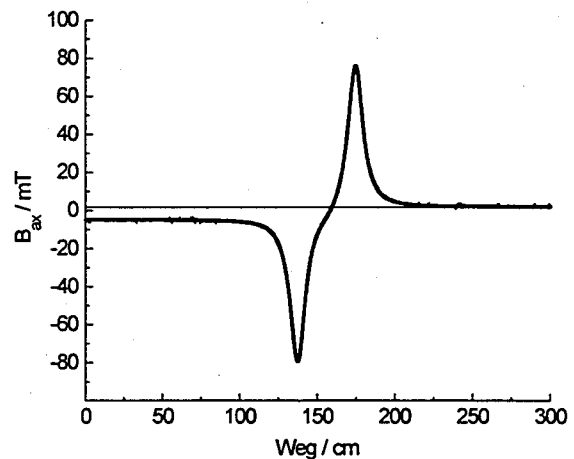


Abb. 2-56. Der Verlauf der aus der Mantelfläche eines Bügels austretenden radialen Komponente der magnetischen Flußdichte in Abhängigkeit der Position des Magneten. Durchmesser des Bügels : $d = 12$ mm. Fahrtrichtung: Ost; $I_S = 0,9$ A, $c_{B0} = 3$ cm

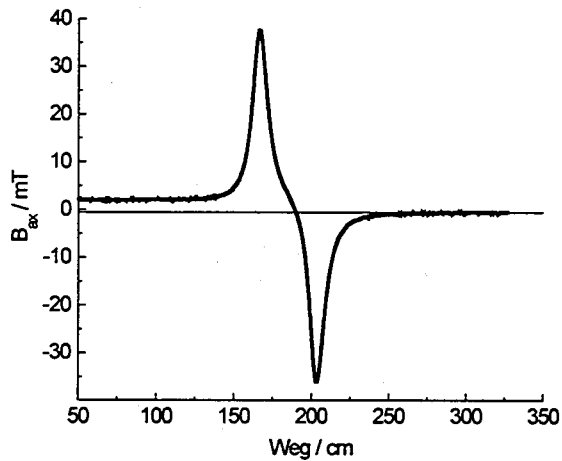


Abb. 2-57. Der Verlauf der aus der Mantelfläche eines Bügels austretenden radialen Komponente der magnetischen Flußdichte in Abhängigkeit der Position des Magneten. Durchmesser des Bügels : $d = 12$ mm. Fahrtrichtung: West; $I_S = 0,4$ A, $c_{B0} = 3$ cm

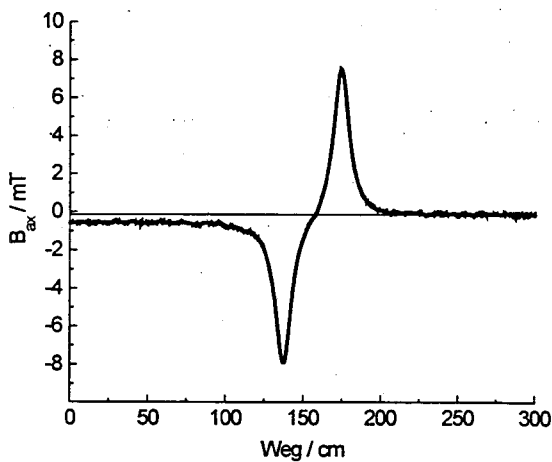


Abb. 2-58. Der Verlauf der aus der Mantelfläche eines Bügels austretenden radialen Komponente der magnetischen Flußdichte in Abhängigkeit der Position des Magneten. Durchmesser des Bügels : $d = 12$ mm. Fahrtrichtung: Ost; $I_S = 0,1$ A, $c_{B0} = 3$ cm

Der BÜgel wird bei jeder Magnetisierungsfahrt zweimal ummagnetisiert. Da die Fahrten mit sukzessive abnehmendem Spulenstrom I_S durchgeführt werden, wird der BÜgel auf klas-

sische Weise bei der Durchführung des Magnetisierungsprozedur abmagnetisiert.

Die Abb. 2-56 bis Abb. 2-58 zeigen die am BÜgel gemessene Flußdichte während der drei letzten Fahrten. Die nach Abschluß des Magnetisierungsprozesses verbleibende Magnetisierung des BÜgels, die gemessene Restflußdichte beträgt $|B_E| < 0.2$ mT, ist also sehr klein und hängt im wesentlichen nur noch von dem Feld benachbarter Ferromagnetika ab.

2.3 Die Untersuchung des Bruchsignals

2.3.1 Der Versuchsstand und die Proben

Da bei den meisten bisher bekanntgewordenen Schadensfällen vergüteter Spannstahl eingebaut war, wurden als Proben vergütete Spannstähle der Festigkeitsklasse 1420 / 1570, rund, gerippt mit dem Durchmesser 7,2 mm gewählt. 16 Stück dieser Stäbe bildeten ein Spannstahlbündel, an dem die Messungen, die in Kap. 2.3.2 bis Kap. 2.3.5 beschrieben werden, durchgeführt wurden.

Betrachtet man zur Abschätzung des Entmagnetisierungsfaktors N (Kap.1.6.1) die 16 eng aneinanderliegenden Spannstahlstäbe als einen einzigen, so muß ihm ein Durchmesser von $d_{\text{eff}} = 4 \cdot 7,2 \text{ mm} = 28,8 \text{ mm}$ zugeordnet werden. Die Länge der Spannstahlbündel, an denen die Messungen durchgeführt wurden betrug etwa 10 m, so daß sich ein Verhältnis der Länge zum Durchmesser von $p \approx 350$ ergibt. Der Entmagnetisierungsfaktor ergibt sich für dieses Dimensionsverhältnis zu $N(p) \approx 0,00004$ (Abb. 1-1). Die Auswirkung dieses Entmagnetisierungsfaktors auf die Stärke der Bruchsignal ist durch Gleichung 1.6-12 gegeben. Bei der gewählten Spanngliedlänge kann er vernachlässigt werden. Bei einer Spanngliedlänge von 5 m wäre er etwa viermal so groß.

Für die Messungen zum Abschirmeffekt des Hüllrohrs (Kap 2.3.4) wurde ein handelsübliches Hüllrohr, hergestellt kalt gewalzten, wen-

delförmigen Stahlblechbändern mit einer Dicke von $d_w = 0,35 \text{ mm}$. Der Außendurchmesser beträgt $d_a = 53 \text{ mm}$.

2.3.2 Die Anzahl und die Lage der Brüche in einer Querschnittsfläche bei verschiedenen Betondeckungen

Die Versuche wurden durchgeführt, um Aussagen darüber zu machen, mit welcher Genauigkeit der Schädigungsgrad eines Spannglieds (Querschnittsschwächung) aus dem Bruchsignal abgeleitet werden kann. Die Versuchsergebnisse erlauben außerdem Aussagen über die Nachweisgrenzen von Spanndrahtbrüchen.

Die Brüche der Spannstähle wurden simuliert, indem die Stäbe getrennt, die Trennflächen plangedreht und die Stabenden wieder dicht zusammengefügt wurden. Anfangs wurden die Trennflächen mit Sekundenkleber zusammengeklebt. Aufgrund der großen Momente, die selbst beim vorsichtigen Hantieren mit den Stäben in diesen wirken, brachen die geklebten Stellen ständig. Es wurde deshalb dazu übergegangen, die Stäbe an den Trennflächen mit dünnwandigen Schrumpfschläuchen zusammenzufügen. Diese Technik erwies sich als wesentlich stabiler und es wurde das gleiche Ziel erreicht, nämlich, daß sich die Trennflächen der Stäbe berührten. Ein Nachteil dieser Methode ist es, daß die gebrochenen Stähle in der direkten Umgebung der Bruchstelle keinen direkten Kontakt zu benachbarten intakten Spanndrähten haben. Der magnetische Streufluß an der Bruchstelle kann nicht in dem Maße wie beim direkten Kontakt der Stähle

über die benachbarten Stäbe fließen, ist also in anderen Bereichen des Raumes größer. Daraufhin wurde auch diese Methode verworfen. Die Spannglieder wurden schließlich so präpariert, daß die einzelnen Stäbe im Spannglied fixiert wurden, indem ein Schrumpfschlauch um alle 16 Stäbe geschrumpft wurde, nachdem die zusammengehörigen Trennflächen sich berührten und sich exakt gegenüber lagen. Alle verwerteten Messungen wurden an Spanndrahtbündeln durchgeführt, in denen die Brüche nach der letztgenannten Methode präpariert wurden.

Stahlbetonbewehrung wurde bei der Durchführung dieser Meßreihe nicht in den Versuchstand eingebaut. Die Spannstahlbündel befanden sich nicht in einem Hüllrohr.

Variiert wurde die Anzahl der aufgetrennten Stäbe und die Lage der „Bruchstellen“ im Spannstahlbündel sowie die Betondeckung. Es wurden Spannglieder untersucht, die einen, zwei, drei, vier und fünf getrennte Stäbe enthielten, deren „Bruchstellen“ in einem Querschnitt liegend angeordnet wurden.

Die Magnetisierung der Spannglieder erfolgte immer, ausgehend von einem undefinierten magnetischen Zustand des Spannstahlbündels, von der Oberfläche des Obertischs aus. Auf ihr wurde der in Kap. 2.1.2 beschriebene elektrische Jochmagnet entlang des Spannglieds verfahren. Es wurde die in Kap. 2.2 erläuterte Magnetisierungsprozedur durchgeführt, um die maximale Restfeldmagnetisierung des Spannstahlbündels zu erreichen.

Für die Messung der magnetischen Flußdichte wurde der in Kap. 2.1.4 beschriebene Meßwagen verwendet.

Das präparierte Spanndrahtbündel wurde vor Durchführung einer Meßreihe auf dem Untertisch des Versuchstands (Kap. 2.1.1) angeordnet und befestigt. Auf dem Obertisch wurden der Elektromagnet und der Meßwagen geführt. Jede präparierte Bruchstellenanordnung im Spannglied wurde nach dem Schema untersucht, das in dem Flußdiagramm in Abb. 2-59 dargestellt ist.

1. Der Startwert der Betonüberdeckung (Abstand zwischen der Oberfläche des Obertischs und der Oberkante des Spannstahlbündels) betrug $c = 165 \text{ mm}$.
2. Die simulierte Betondeckung des Spannglieds wurde auf c eingestellt. Die Magnetisierungsprozedur wurde durchgeführt und daraufhin die magnetische Flußdichte gemessen.
3. Das Spannglied wurde auf eine Betondeckung von $c' = 45 \text{ mm}$ gebracht. Die magnetische Flußdichte wurde dann, ohne erneute Magnetisierung, gemessen.
4. Das Spannglied wurde auf eine Betondeckung $c := c - 20 \text{ mm}$ gebracht. Ohne Magnetisierung wird eine Messung der Flußdichte durchgeführt.

Dann wurde mit der im Schritt 4 um 20 mm reduzierten Betonüberdeckung wieder bei Schritt 2 begonnen. War eine Betondeckung von $c = 45 \text{ mm}$ erreicht, wurde ausschließlich Schritt 2 durchgeführt. Vor jedem neuen Aufmagnetisieren wurde die Richtung der Magnetisierung des Spannstahlbündels umgepolt. Es befand sich damit vor dem Aufmagnetisieren immer in einem magnetisch undefinierten Zustand.

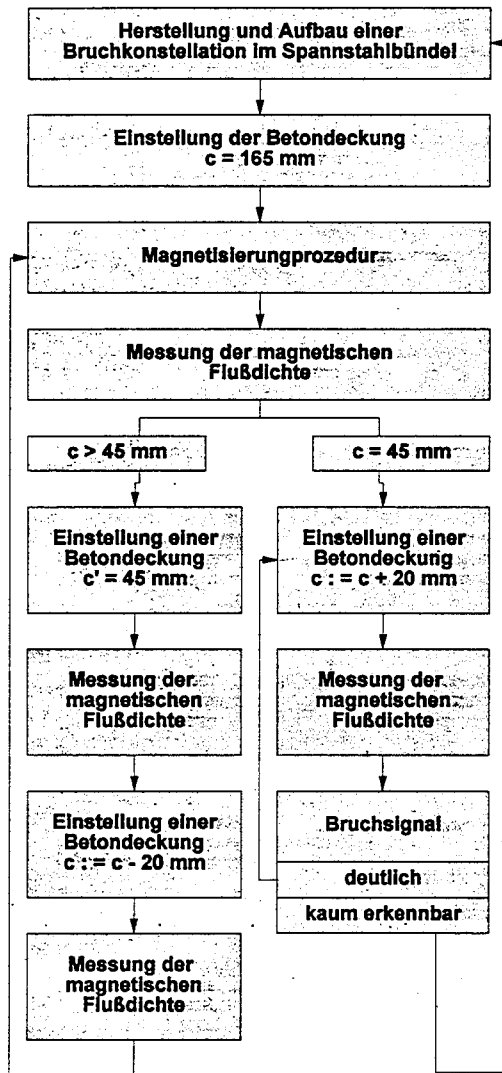


Abb. 2-59 Flußdiagramm zur Untersuchung der Abhängigkeit des Bruchsignals von der Betondeckung, der Anzahl der Brüche in einem Querschnitt und der Lage der Brüche innerhalb eines Querschnitts.

Nachdem das Spannglied bei einer Betondeckung von $c = 45 \text{ mm}$ magnetisiert und die Flußdichte gemessen war, wurde die Betondeckung sukzessive um $\Delta c = 20 \text{ mm}$ erhöht und ohne erneute Magnetisierung die Flußdichte bei den unterschiedlichen Betondeckungen gemessen.

Durch diesen Ablauf erhielten wir für jede untersuchte „Bruchkonstellation“ Meßdaten, die sowohl Aussagen über die räumliche Veränderung des Bruchsignals des magnetisierten Spannglieds erlauben, als auch Aussagen darüber, ob der Magnetisierungsprozeß unabhängig von der Betondeckung (bis 240 mm) zu einer maximalen (remanenten) Magnetisierung des Spannglieds führt.

Prinzipieller Verlauf der Meßkurven

Der prinzipielle Verlauf der magnetischen Flußdichte entlang eines remanent magnetisierten Spanndrahtbündels wird exemplarisch an den Meßkurven in Abb. 2-60 erläutert. Es handelt sich um Rohdaten, die abgesehen von der Umrechnung der elektronisch verstärkten Hallspannung U_H auf die magnetische Flußdichte keiner Bearbeitung unterzogen wurden.

Bei der in Abb. 2-60 dargestellten Messung war ein gebrochener Draht in dem Spannstahlbündel angeordnet. Die Bruchstelle lag auf der Seite des Bündels, die der simulierten Betonoberfläche zugewandt war. Die Betondeckung des Spannstahlbündels betrug $c = 45 \text{ mm}$.

Die Abszisse ist die Wegachse und gibt die Entfernung vom Startpunkt der Meßfahrt an. Sie bezieht sich auf beide Ordinaten. Auf der oberen Ordinate ist die axiale Komponente der magnetischen Flußdichte B_{ax} aufgetragen, die in einer Entfernung von 15 mm von der „Betonoberfläche“ gemessen wird. Die axiale Komponente liegt parallel zur Fahrtrichtung des Meßwagens und somit parallel zur Achse des Spannstahlbündels. Sie hat an der Bruchstelle, bei 447 cm hinter dem Startpunkt der Meßfahrt, ein Minimum. Das ist immer dann so, wenn die Pole (Enden) des aufmagnetisierten

Spannstahlbündels Maxima dieser Flußdichte-komponente erzeugen. Wäre das Spannglied entgegengesetzt magnetisiert oder wäre der Meßwagen und damit die Hallsonden umgedreht worden, so würden die Endpole des Spanndrahtbündels Minima und der Bruch ein Maximum der axialen Komponente der magnetischen Flußdichte erzeugen.

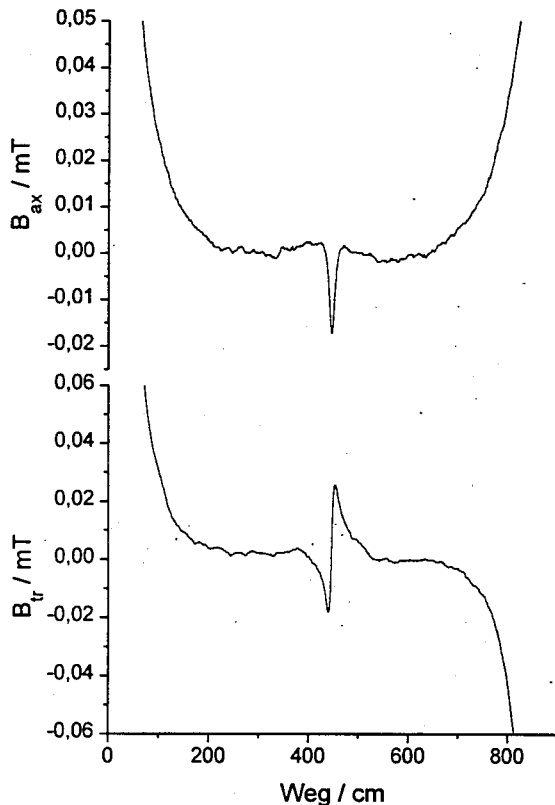


Abb. 2-60 Die axiale und transversale Komponente der magnetischen Flußdichte entlang eines magnetisierten Spannstahlbündels (16 Stäbe) bei einer Betondeckung von $c = 45$ mm. Ein einzelner Stab ist „gebrochen“. Dieser Stab liegt auf der Seite, die der Betonoberfläche zugewandt ist. Die Magnetisierung erfolgte bei der gleichen Betondeckung wie die Messung der Flußdichte.

Die untere Ordinate gibt die Werte der transversalen Komponente der Flußdichte B_{tr} . Diese Komponente liegt parallel zur Normalen der

Fläche auf dem der Meßwagen bewegt wird. Bei konstanter Betondeckung liegt diese Komponente transversal zur Spanngliedachse. Die transversale Komponente wird in einer Höhe von 11 mm über der Betonoberfläche gemessen. Den Polwechsel an der Bruchstelle beschreibt der Kurvenverlauf dieser Komponente anschaulich durch das Minimum auf das ein Maximum folgt. Die Bruchstelle liegt bei dem Wendepunkt zwischen diesen Extrema. Wäre das Spannstahlbündel entgegengesetzt magnetisiert, würde die Meßkurve im Bereich der Bruchstelle ein Maximum, gefolgt von einem Minimum, zeigen. Die durch die Bruchstelle erzeugte Dipolverteilung ist entgegengesetzt zu der Dipol, die das Spannstahlbündel als ganzes besitzt, orientiert. Die Orientierung des Meßwagens beeinflusst den Verlauf der Meßkurve dieser Komponente nicht

Der Einfluß der Betondeckung

Die Stärke des Bruchsignals nimmt mit zunehmender Entfernung von seiner Ursache ab. Im praktischen Einsatz ist die Entfernung der Meßsonden von der Bruchstelle nach unten durch die Betondeckung beschränkt.

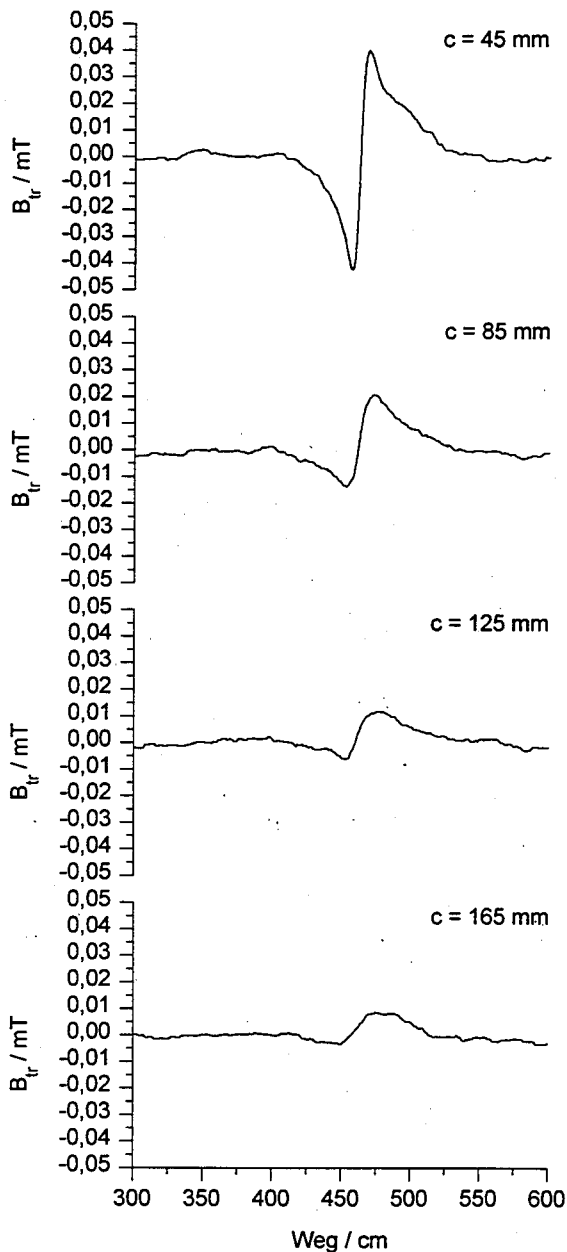


Abb. 2-61 Die transversale Komponente der magnetischen Flußdichte B_{tr} entlang eines magnetisierten Spannstahlbündels mit 16 Spanndrähten von denen 3 Stück aufgetrennt sind. Die „Bruchstellen“ liegen in einem Querschnitt auf der Seite, die der „Betonoberfläche“ zugewandt ist. Die Meßkurven zeigen exemplarisch, wie die Stärke des Bruchsignals mit zunehmender Betondeckung abnimmt. Die Breite des Signals wächst mit der Betondeckung.

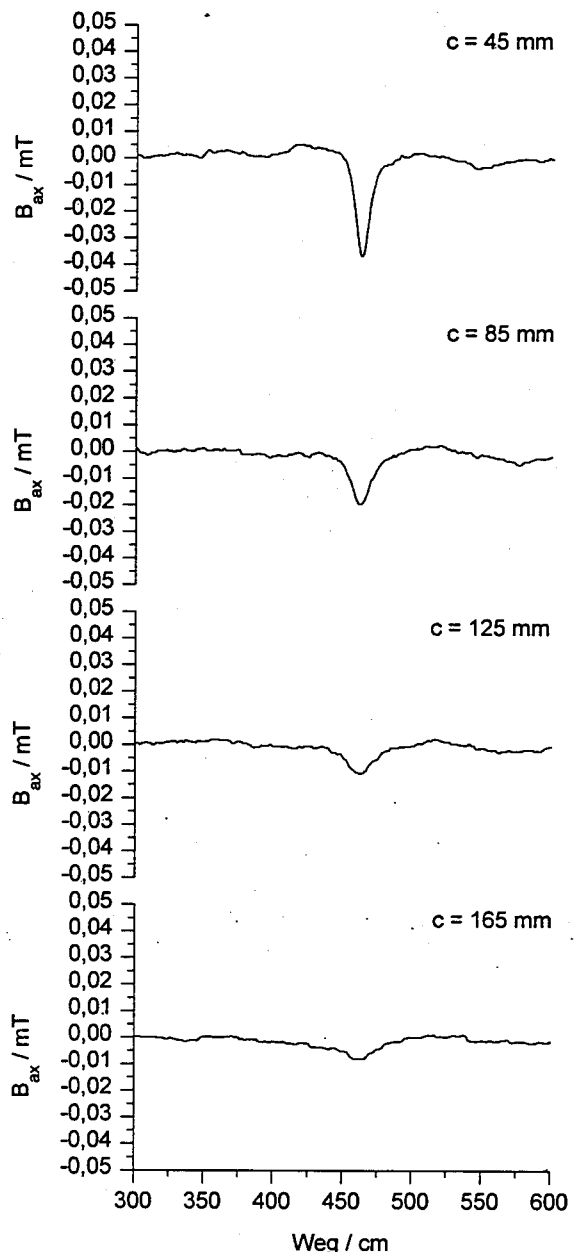


Abb. 2-62 Die axiale Komponente der magnetischen Flußdichte B_{ax} entlang eines magnetisierten Spannstahlbündels mit 16 Spanndrähten von denen 3 Stück aufgetrennt sind. Die „Bruchstellen“ liegen in einem Querschnitt auf der Seite, die der „Betonoberfläche“ zugewandt ist. Die Meßkurven zeigen exemplarisch, wie die Stärke des Bruchsignals mit zunehmender Betondeckung abnimmt. Die Breite des Signals wächst mit der Betondeckung.

Abb. 2-61 und Abb. 2-62 zeigen exemplarisch die Abnahme der Bruchsignalstärke (BSS) mit zunehmender Betondeckung. Dargestellt ist die transversale Komponente der magnetischen Flußdichte B_{tr} (Abb. 2-61) und die axiale Komponente B_{ax} (Abb. 2-62) in einem Bereich von 300 cm bis 600 cm, gemessen vom Startpunkt der Messung und der Magnetisierung. Die entsprechenden Messungen wurden an einem Spannstahlbündel mit drei gebrochene Stäben, die auf der Seite des Spannstahlbündels liegen, die der Betonoberfläche zugewandt ist, durchgeführt.

Die Signalbreite (SB) nimmt mit zunehmender Betondeckung c zu.

Das Spannstahlbündel wurde vor der Messung bei einer simulierten Betondeckung von $c = 45$ mm aufmagnetisiert. Dann wurde die Betondeckung vor der Durchführung der jeweiligen Messung verändert. Es wurde nicht erneut magnetisiert. An der Anordnung der Bruchstelle im Spannstahlbündel wurde zwischen den Messungen ebenfalls nichts geändert. Die Abnahme der magnetischen Streuflußdichte ist ausschließlich auf die Vergrößerung der Betondeckung zurückzuführen. Eine eventuelle Abnahme der Restfeldmagnetisierung kann nicht die Ursache sein.

Wegen der Abnahme der Signalstärke mit zunehmender Betondeckung, verringert sich die Nachweisbarkeit von Spannstahlbrüchen mit zunehmender Betondeckung. Jenachdem, wie dicht und regelmäßig die Stahlbetonbewehrung verlegt ist, liegt die Nachweisgrenze für den Bruch eines einzelnen Spanndrahts mit einer Querschnittsfläche von $A = 40 \text{ mm}^2$, der in einem Spannglied aus 16 Einzeldrähten auf

der Seite liegt, die von der Betonoberfläche abgewandt ist, bei etwa $c \approx 150$ mm.

Der Grund für diese Nachweisgrenze ist nicht eine unzureichende Empfindlichkeit der Hallsonden, sondern der Hintergrund der Störsignale. Dieser Hintergrund läßt sich jedoch auch mit empfindlicheren Sonden, wie beispielsweise SQUIDs nicht ausblenden.

Um das Ausmaß der Schädigung eines Spannglieds aus dem Bruchsignal abschätzen zu können, wurden einfache phänomenologische Gesetze für charakteristische Größen des Bruchsignals aufgestellt. Die Parameter, die das Bruchsignal beeinflussen, das von Spanndrahtbrüchen, die in einer Querschnittsfläche des Spannglieds liegen, sind:

- die Betondeckung des Spannglieds
- die Anzahl der gebrochenen Stäbe
- die Lage der Bruchstellen innerhalb eines Spanngliedquerschnitts
- die Querschnittsfläche der Spanndrähte
- die Anzahl der Spanndrähte in einem Spannglied
- die Bruchweite (Abstand der Bruchflächen zueinander)
- die magnetischen Eigenschaften des Spannstahls

Die Magnetisierung eines Spannglieds ist bei der von uns verwendeten Magnetisierungsprozedur immer maximal. Innerhalb der untersuchten Grenzen der Betondeckung ist die Magnetisierung des Spannglieds unabhängig von der Betondeckung (Abb. 2-63 und Abb. 2-64).

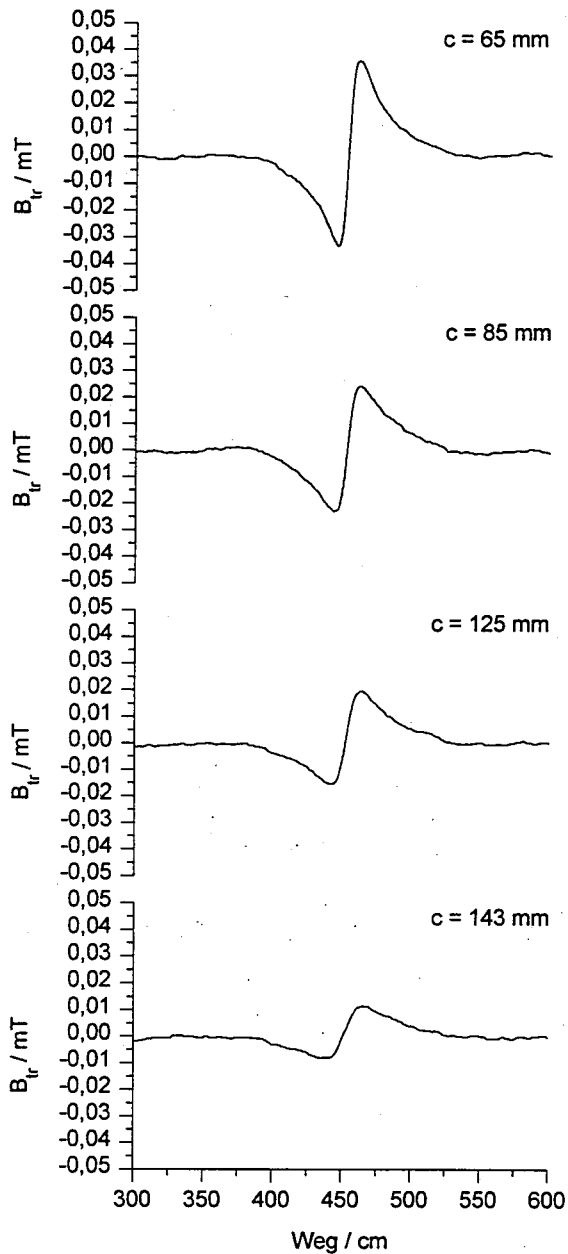


Abb. 2-63 Die transversale Komponente der magnetischen Flußdichte B_{tr} entlang eines magnetisierten Spannstahlbündels mit 16 Spanndrähten von denen 4 Stück aufgetrennt sind. Die „Bruchstellen“ liegen in einem Querschnitt auf der Seite, die der „Betonoberfläche“ zugewandt ist. Die Meßkurven zeigen das Bruchsignals bei zunehmender Betondeckung, wenn die Magnetisierung bei einer Betondeckung von $c = 45$ mm erfolgte.

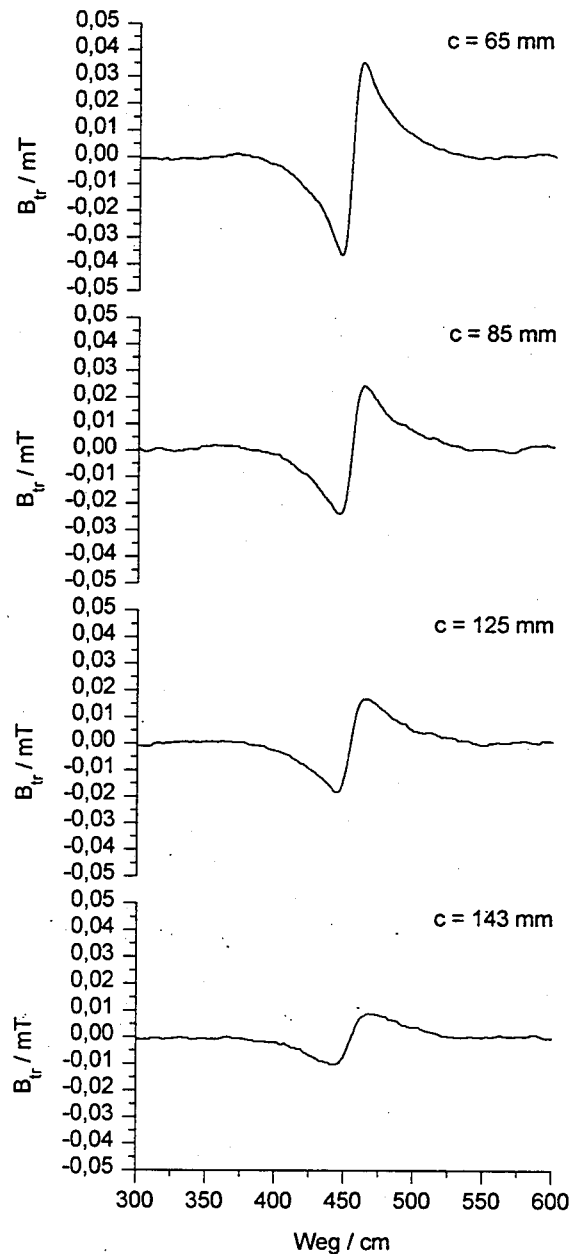


Abb. 2-64 Die transversale Komponente der magnetischen Flußdichte B_{tr} entlang eines magnetisierten Spannstahlbündels mit 16 Spanndrähten von denen 4 Stück aufgetrennt sind. Die „Bruchstellen“ liegen in einem Querschnitt auf der Seite, die der „Betonoberfläche“ zugewandt ist. Die Meßkurven zeigen das Bruchsignals bei zunehmender Betondeckung, wenn die Magnetisierung bei der gleichen Betondeckung wie die Messung durchgeführt wurde.

Abb. 2-63 und Abb. 2-64 zeigen exemplarisch, daß die Form und Stärke der Bruchsignale nicht davon abhängen aus welchem Abstand des Magneten zum Spannstahlbündel letzteres aufmagnetisiert wurden. In dem Beispiel sind vier von 16 Spanndrähten gebrochen. Die Bruchstellen liegen auf der der Betonoberfläche zugewandten Seite. Abb. 2-63 zeigt das Bruchsignal bei verschiedenen Betondeckungen, wenn das Spannstahlbündel bei einer Betondeckung von $c = 45$ mm aufmagnetisiert wurde. Abb. 2-64 zeigt das Bruchsignal des gleichen Spannstahlbündels mit nicht veränderter Bruchstellenanordnung bei den gleichen Betondeckungen, wenn das Aufmagnetisieren bei der selben Betondeckung wie die Messung der Restflußdichte durchgeführt wurde.

Die Unterschiede der Signale, die bei der gleichen Betondeckung gemessen wurden, sind geringfügig. Ein Einfluß der Magnetisierung des Spannglieds auf das Bruchsignal muß deshalb nicht genauer untersucht werden. Es kann nach den Ergebnisse der durchgeführten Messungen davon ausgegangen werden, das ein Spannglied nach der Durchführung der Magnetisierungsprozedur bei Betondeckungen bis zu mindestens $c = 250$ mm remanent magnetisiert ist.

Die phänomenologischen Gesetze für das Bruchsignal ergeben sich aus der Analyse der transversalen Komponente der Streuflußdichte. Bei der transversalen Komponente sind die Begriffe Bruchsignalstärke (BSS) und Signalbreite klar definierbar.

Die Bruchsignalstärke BSS wird als der Betrag der Differenz des Maximum $B_{tr,max}$ und des

Minimum $B_{tr,min}$ der remanenten transversalen Streuflußdichte definiert:

$$BSS(c, v_i) = |B_{tr,max} - B_{tr,min}| \quad (2.3.2-1)$$

Die Bruchsignalstärke BSS ist abhängig von der Betondeckung c und anderen Parametern v_i .

In der Abb. 2-65 sind die Größen BSS und SB an einem Beispiel graphisch dargestellt.

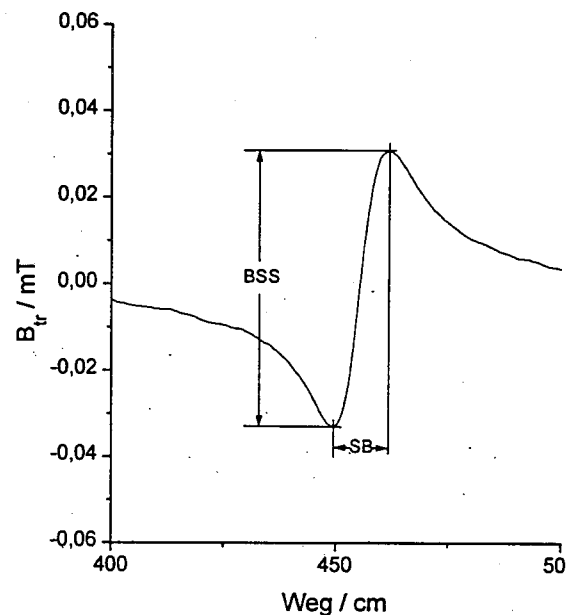


Abb. 2-65 Darstellung der Definition der Größen Bruchsignalstärke (BSS) und Signalbreite (SB) am Beispiel des Bruchsignals, das zwei aufgetrennte Stäbe in einem Spannstahlbündel (16 Stäbe) bei einer Betondeckung von $c = 45$ mm erzeugen. Die „gebrochenen“ Stäbe liegen auf der Seite, die der „Betonoberfläche“ zugewandt ist.

Die Signalbreite SB wird als Betrag der Wegdifferenz Δx_{MM} zwischen dem Minimum und dem Maximum der remanenten transversalen Streuflußdichte definiert:

$$SB(c, v_i) := |\Delta x_{MM}| = |x_{\max} - x_{\min}| \quad (2.3.2-2)$$

mit $B_{tr}(x_{\max}) = B_{tr,\max}$ und

$$B_{tr}(x_{\min}) = B_{tr,\min}$$

Die Signalbreite SB ist ebenfalls abhängig von der Betondeckung c und weiteren Parametern v_i .

Die funktionelle Abhängigkeit der Bruchsignalstärke BSS von der Betondeckung c wurde zuerst untersucht.

Es wurde ein Produktansatz gewählt:

$$BSS(c, v_i) = \frac{A(v_i)}{(c + \delta)^e} \quad (2.3.2-3)$$

mit δ : Differenz zwischen dem minimalen Abstand Hallsonde - Bruchstelle und der Betondeckung

$A(v_i)$: Eine Funktion der anderen Parameter v_i

und $e \in \mathbb{Q}$.

Die Differenz δ zwischen dem minimalen Abstand Hallsonde - Bruchstelle und der Betondeckung ergibt sich als Summe des Abstands der Hallsonde von der Betonoberfläche und dem mittleren Abstand der Brüche von der Oberkante des Spannstahlbündels. Für Brüche, die auf der Seite liegen, die der Betonoberfläche zugewandt ist, wurde ein $\delta_o = 15$ mm angenommen. Für die auf der abgewandten Seite liegenden Brüche wurde ein $\delta_u = 45$ mm gewählt.

Der Exponent e beschreibt den räumlichen Abfall der Bruchsignalstärke und wurde aus diesem Grund als unabhängig von den anderen Parametern angenommen. Insbesondere

ist er von der Lage und der Anzahl der Brüche unabhängig.

Die Funktion $A(v_i)$ beschreibt die Abhängigkeit der Bruchsignalstärke BSS(c, v_i) von allen anderen Parametern v_i außer der Betondeckung.

Durch Variation von $A(v_i)$ wurde die Funktion BSS(c, v_i) (2.3.2-3) den Meßdaten angepaßt (Minimierung der Fehlerquadrate). Der Exponente e wurde vorgegeben. Die besten Kurvenanpassungen erhält man für $e = 1.75$, wobei e in Schritten von $\Delta e = 0.25$ variiert wurde. Die Kurvenverläufe der Funktion

$$BSS(c, v_i) = \frac{A(v_i)}{(c + 15 \text{ mm})^{1.75}} \quad (2.3.2-4)$$

für Brüche, die auf der Seite liegen, die der Betonoberfläche zugewandt ist, und die entsprechenden Meßwerte sind in Abb. 2-66 dargestellt.

Für die Brüche, die auf der von der Betonoberfläche abgewandten Seite liegen, gilt

$$BSS(c, v_i) = \frac{A(v_i)}{(c + 45 \text{ mm})^{1.75}} \quad (2.3.2-5)$$

Auch diese Funktion paßt sich den Meßwerten gut an (Abb. 2-67).

Die nächste Frage war, wie $A(v_i)$ von den anderen Parametern v_i abhängt. In den Untersuchungen, die in diesem Abschnitt beschrieben werden, wurde außer der Betondeckung die Anzahl und die Lage der Bruchstellen variiert. Die unterschiedliche Lage der Bruchstellen wird in der Formel (2.3.2-3) zumindest teilweise bereits dadurch berücksichtigt, daß unterschiedliche Werte δ für unterschiedlich gelegene Bruchstellen eingesetzt werden. Die Diffe-

renz $\Delta\delta = \delta_u - \delta_u$ ist etwas kleiner als der Durchmesser des Spannstahlbündels.

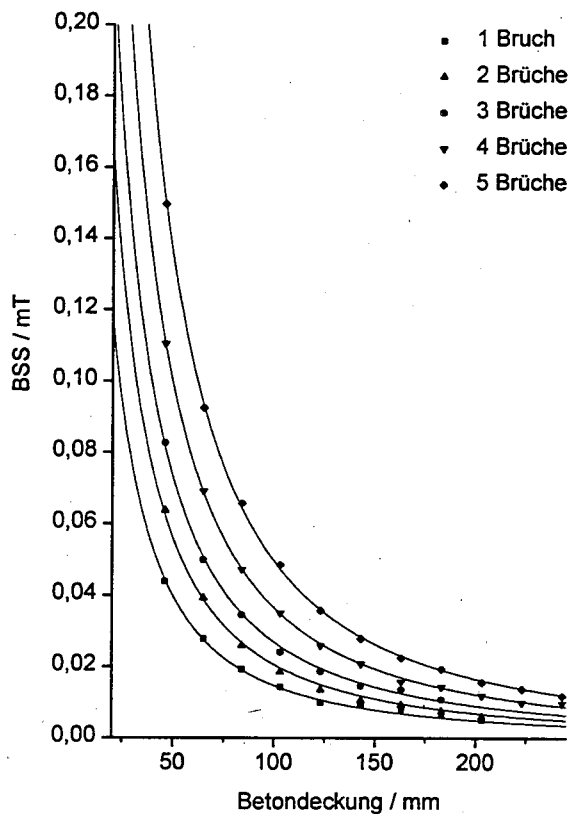


Abb. 2-66 Die Bruchsignalstärke BSS in Abhängigkeit von der Betondeckung für Brüche, die auf der Seite des Spannstahlbündels liegen, die der Betonoberfläche zugewandt sind. Die fünf Kurven zeigen den in Gleichung (2.3.2-4) gegebenen Zusammenhang für verschiedene Parameter A. Die Punkte stehen für Meßwerte. Der Parameter A wurde so gewählt, daß sich die beste Kurvenanpassung an die jeweils zusammengehörenden Meßwerte ergibt.

Wie sich das transversale Bruchsignal von Brüchen, die auf der Seite des Spannstahlbündels liegen, die der Betonoberfläche abgewandt ist, von dem Signal unterscheidet, das Brüche erzeugen, die auf der zugewandten Seite liegen, zeigen die Abb. 2-68 und Abb. 2-69 am Beispiel von fünf Brüchen in einer Querschnittsfläche.

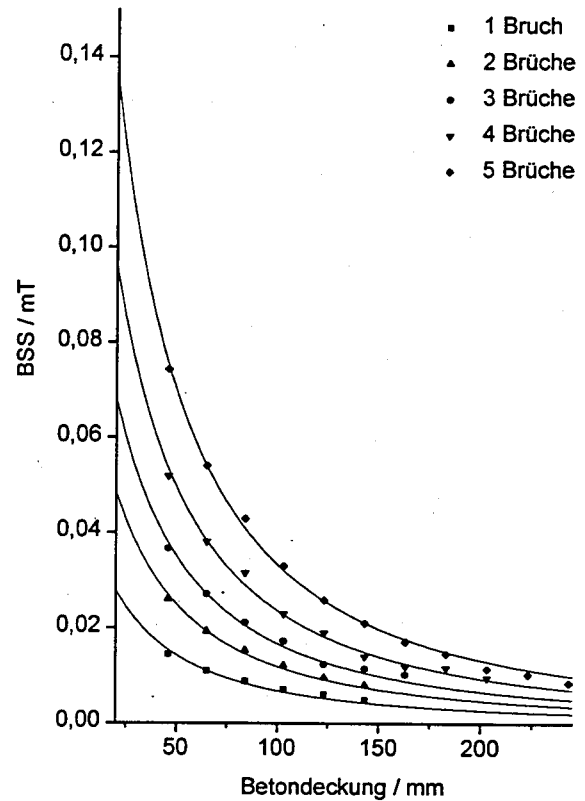


Abb. 2-67 Die Bruchsignalstärke BSS in Abhängigkeit von der Betondeckung für Brüche, die auf der Seite des Spannstahlbündels liegen, die der Betonoberfläche abgewandt sind. Die fünf Kurven zeigen den in Gleichung (2.3.2-5) gegebenen Zusammenhang für verschiedene Parameter A. Die Punkte stehen für Meßwerte. Der Parameter A wurde so gewählt, daß sich die beste Kurvenanpassung an die jeweils zusammengehörenden Meßwerte ergibt.

Bei kleinen Betondeckungen ist der Unterschied der Bruchsignalstärken sehr groß. Brüche, die auf der Seite liegen, die der Betonoberfläche zugewandt ist, erzeugen bei einer Betondeckung von $c = 45$ mm Signale mit einer fast doppelt so großen Stärke wie Brüche auf der abgewandten Seite. Der Unterschied nimmt mit zunehmender Betondeckung ab.

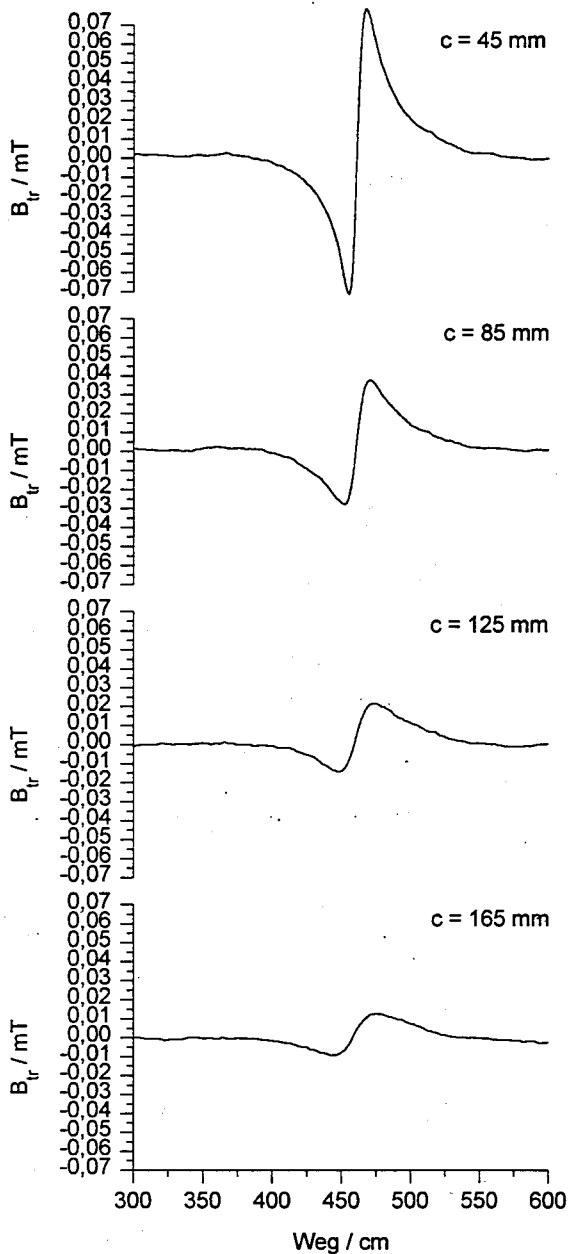


Abb. 2-68 Die transversale Komponente der magnetischen Flußdichte B_{tr} entlang eines magnetisierten Spannstahlbündels mit 16 Spanndrähten von denen 5 Stück aufgetrennt sind. Die „Bruchstellen“ liegen in einem Querschnitt auf der Seite, die der „Betonoberfläche“ zugewandt ist. Die Meßkurven zeigen das Bruchsignal bei zunehmender Betondeckung.

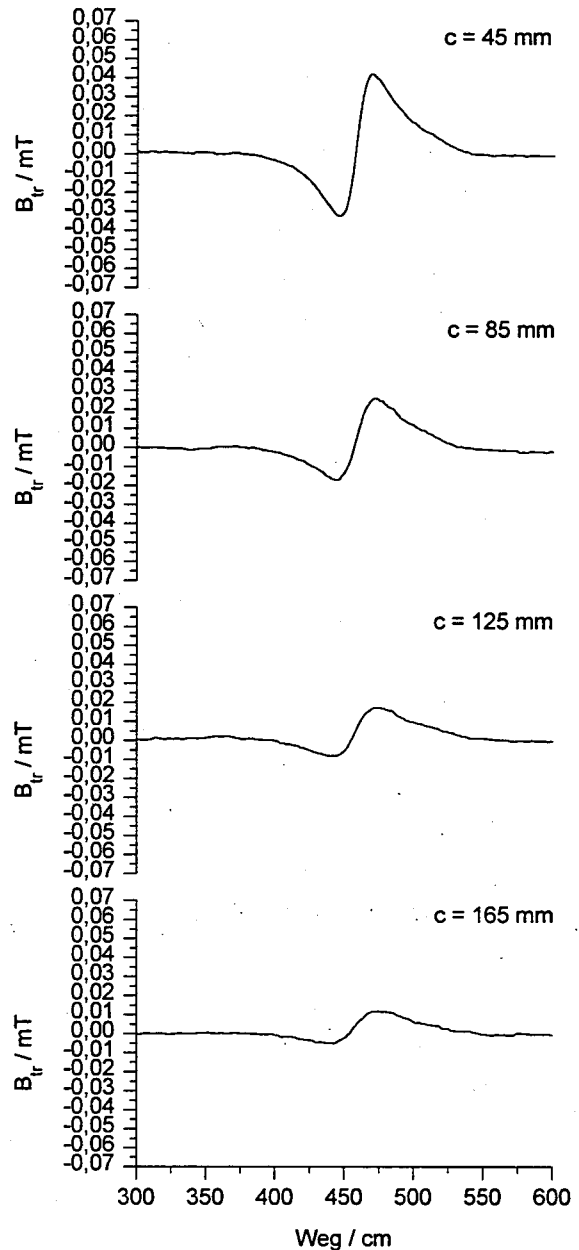


Abb. 2-69 Die transversale Komponente der magnetischen Flußdichte B_{tr} entlang eines magnetisierten Spannstahlbündels mit 16 Spanndrähten von denen 5 Stück aufgetrennt sind. Die „Bruchstellen“ liegen in einem Querschnitt auf der Seite, die der Betonoberfläche abgewandt ist. Die Meßkurven zeigen das Bruchsignal bei zunehmender Betondeckung.

Die Abnahme des relativen Unterschieds zwischen den Bruchsignalen die von Brüchen mit unterschiedlicher Lage in Spanngliedquerschnitt erzeugt werden, deutet bereits darauf hin, daß der unterschiedliche Abstand der Bruchstellen zur Hallsonde einen stärkeren Einfluß hat als eventuelle Abschirmungseffekte.

Trägt man, wie in Abb. 2-70, die aus der Kurvenanpassung von (2.3.2-4) und (2.3.2-5) an die Meßwerte erhaltenen Werte von $A(v_i)$ über die Anzahl der Brüche in einem Querschnitt auf, so erkennt man, daß die Werte für A keine klare Abhängigkeit von der Lage der Brüche sondern ausschließlich von ihrer Anzahl zeigt.

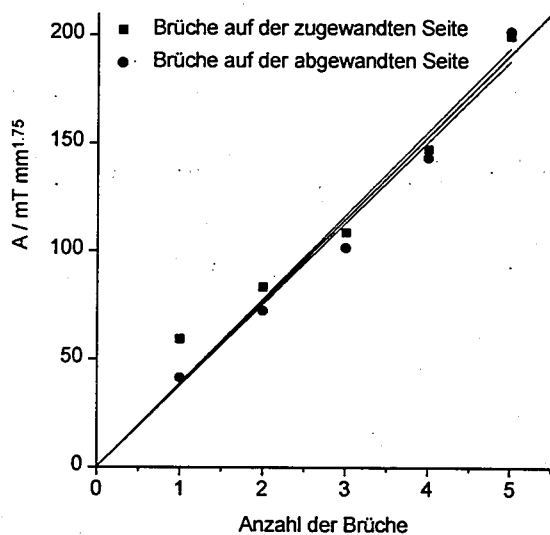


Abb. 2-70 Zusammenhang des Kurvenanpassungsparameters A mit der Anzahl, der in einem Querschnitt gelegenen Brüche.

Wie sich die Anzahl der Brüche auf den Verlauf der gemessenen magnetischen Streuflußdichte auswirkt ist in Abb. 2-71 exemplarisch am Beispiel einer Betondeckung von $c = 105$ mm dargestellt.

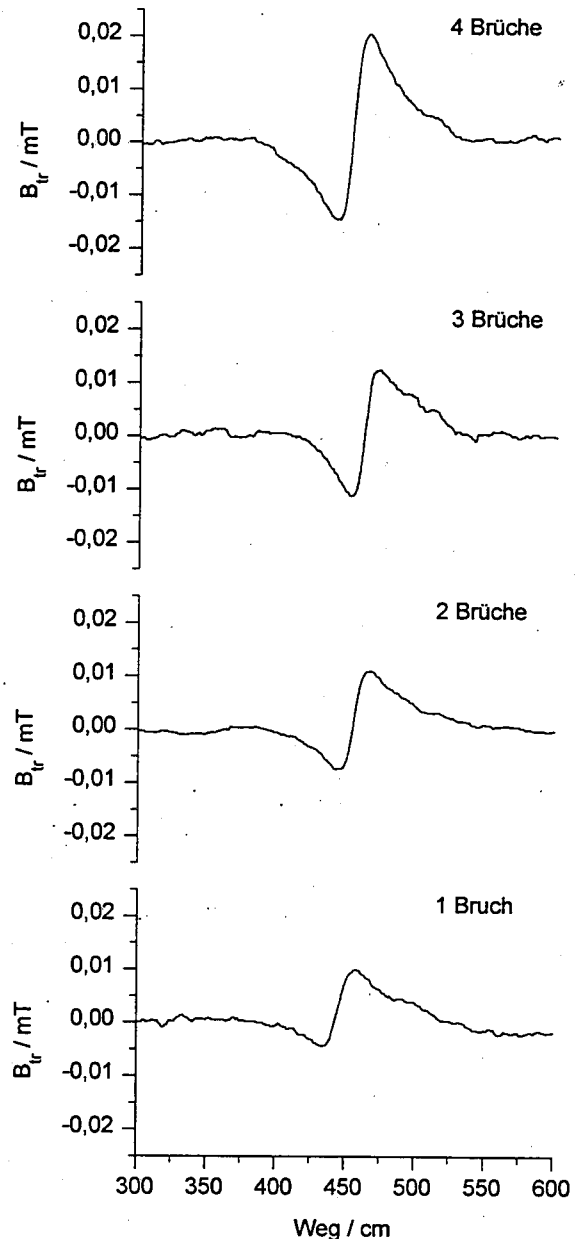


Abb. 2-71 Die transversale Komponente der magnetischen Flußdichte B_{tr} entlang magnetisierter Spannstahlbündel mit 16 Spanndrähten von denen 1, 2, 3 bzw. 4 Stück aufgetrennt sind. Die „Bruchstellen“ liegen in einem Querschnitt auf der Seite, die der „Betonoberfläche“ zugewandt ist. Die Betondeckung beträgt $c = 105$ mm. Die Meßkurven zeigen das Bruchsignal bei abnehmender Querschnittsschwächung des Spannstahlbündels.

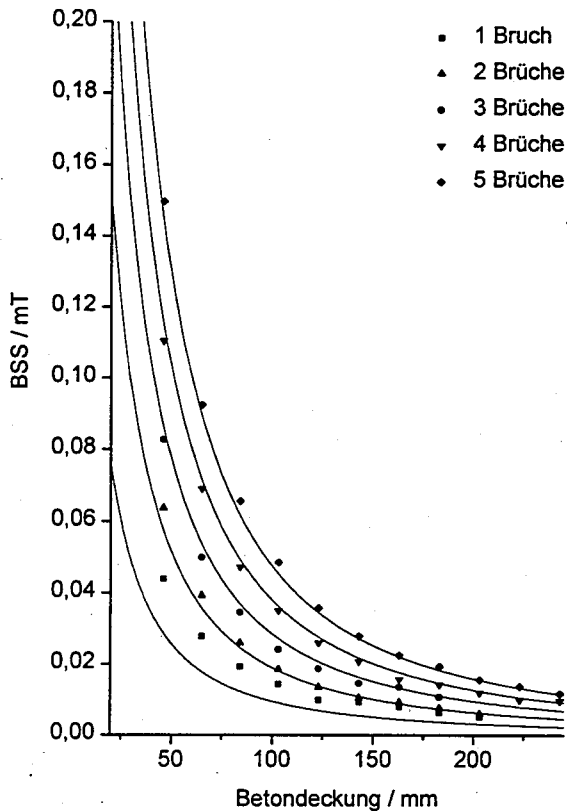


Abb. 2-72 Die Bruchsignalstärke BSS in Abhängigkeit von der Betondeckung für Brüche, die auf der Seite des Spannstahlbündels liegen, die der Betonoberfläche zugewandt sind. Die fünf Kurven zeigen den in Gleichung (2.3.2-6) gegebenen Zusammenhang für verschiedene Parameter B. Die Punkte stehen für Meßwerte. Der Parameter B wurde so gewählt, daß sich die beste Kurvenanpassung an die jeweils zusammengehörenden Meßwerte ergibt.

Die Lage Meßwerte in Abb. 2-70 lassen sich, wenn das Argument hinzugenommen wird, daß die Bruchsignalstärke gleich Null sein muß, wenn keine Brüche vorhanden sind, ausreichend genau durch eine Ausgleichsgerade beschreiben.

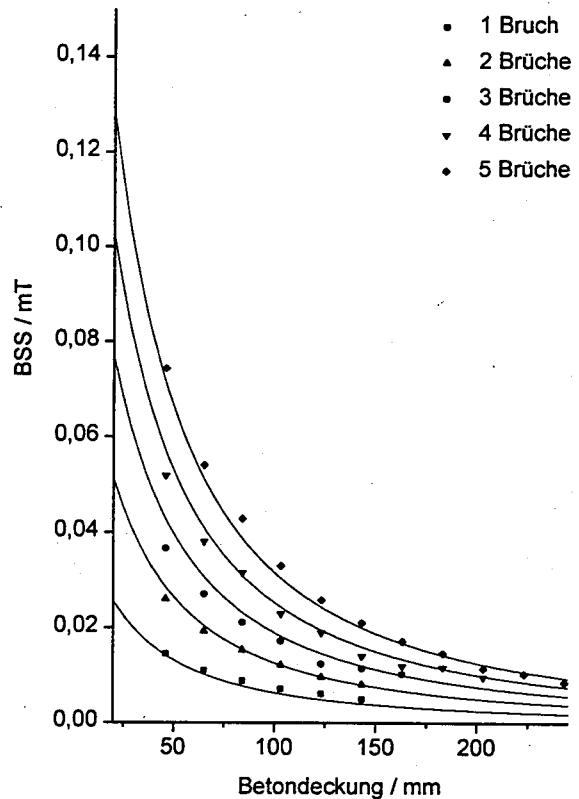


Abb. 2-73 Die Bruchsignalstärke BSS in Abhängigkeit von der Betondeckung für Brüche, die auf der Seite des Spannstahlbündels liegen, die der Betonoberfläche abgewandt sind. Die fünf Kurven zeigen den in Gleichung (2.3.2-7) gegebenen Zusammenhang für verschiedene Parameter B. Die Punkte stehen für Meßwerte. Der Parameter B wurde so gewählt, daß sich die beste Kurvenanpassung an die jeweils zusammengehörenden Meßwerte ergibt.

Die Gerade mit der größten Steigung in Abb. 2-70 ergibt sich für die Werte von A, die sich aus der Kurvenanpassung errechnen lassen, wenn die Brüche auf der Seite des Spannstahlbündels liegen, die der Betonoberfläche zugewandt ist. Die Gerade mit der kleinsten Steigung ergibt sich für die Brüche auf der von der Betonoberfläche abgewandten Seite. Dazwischen liegt die Gerade mit der gemittelten

Steigung, die den Zusammenhang von A mit der Anzahl der Brüche beschreibt:

$$A(v_i) = B(v_i) \cdot n$$

mit n: Anzahl der Brüche in einem Spanngliedquerschnitt

und B(v_i): Ein Wert, der von weiteren Parametern v_i abhängt, aber nicht mehr von der Lage und Anzahl der Brüche und der Betondeckung

Für die Bruchsignalstärke ergibt sich damit der einfache phänomenologische Zusammenhang

$$BSS(c, v_i) = \frac{n \cdot B(v_i)}{(c + 15 \text{ mm})^{1.75}} \quad (2.3.2-6),$$

wenn die Brüche, auf der Seite liegen, die der Betonoberfläche zugewandt ist.

Die entsprechenden Kurvenverläufe sind mit den zugehörigen Meßpunkten in der Abb. 2-72 dargestellt.

Für Brüche, die auf der Seite liegen, die der Betonoberfläche abgewandt ist, ergibt sich

$$BSS(c, v_i) = \frac{n \cdot B(v_i)}{(c + 45 \text{ mm})^{1.75}} \quad (2.3.2-7).$$

Die Kurvenverläufe mit den zugehörigen Meßwerten sind in der Abb. 2-73 dargestellt.

B(v_i) hat unabhängig von der Lage der Bruchstelle den Wert

$$B(v_i) = 38,25 \text{ mT mm}^{1.75}$$

Die beiden Formeln lassen sich zusammenfassen zu

$$BSS(c, v_i) = \frac{n \cdot B(v_i)}{(c + \delta)^{1.75}} \quad (2.3.2-8).$$

Wie die beiden Abbildungen zeigen, läßt sich die Abhängigkeit der Bruchsignalstärke von der Betondeckung c, der Lage der Brüche im Spanngliedquerschnitt (wirkt sich auf den Parameter δ in (2.3.2-8) aus) und der Anzahl der Brüche mithilfe der gewonnenen phänomenologischen Gesetze gut beschreiben. Nur die Bruchsignalstärken, die bei einem Bruch auf der Seite des Spannstahlbündels, die der Betonoberfläche zugewandt ist, gemessen wurden, sind deutlich größer als die entsprechenden Werte, die sich aus (2.3.2-6) ergeben.

Der Grund für diese Abweichung liegt darin, daß die Größe B(v_i) in diesem Fall größer ist als bei den anderen Bruchanordnungen. B(v_i) beschreibt die Abhängigkeit der Bruchsignalstärke von Parametern, die in den in diesem Abschnitt beschriebenen Untersuchungen nicht variiert werden sollten. Die Bruchufer sollten sich bei diesen Untersuchungen berühren und exakt gegenüberliegen. Trotz sorgfältiger Präparierung der Bruchstellen hat sich der Bruch in diesem Fall wahrscheinlich leicht geöffnet. Schon sehr kleine Spalte zwischen den Bruchufern können zu einem starken Anwachsen des Bruchsignals führen. Auf den Einfluß der Bruchweite auf das Bruchsignal wird in Kap. 2.3.3 eingegangen.

Aus der Bruchsignalstärke BSS allein läßt sich, selbst bei bekannter Betondeckung c und wenn alle Parameter v_i, die die Größe B bestimmen, konstant sind, noch nicht auf die Anzahl der Brüche schließen, denn δ ist von der Lage des Bruchs innerhalb des Spannstahlbündels abhängig. Beispielsweise erzeugt ein einzelner Bruch, der auf der Seite des Spannglieds liegt, die der Betonoberfläche zugewandt ist, bei

einer Betondeckung von $c \approx 60$ mm ein Bruchsignal mit der gleichen Stärke wie zwei Brüche auf der gegenüberliegenden Seite.

Eine Differenzierung erlaubt hier die Ermittlung der Signalbreite SB, die in (2.3.2-2) definiert wurde.

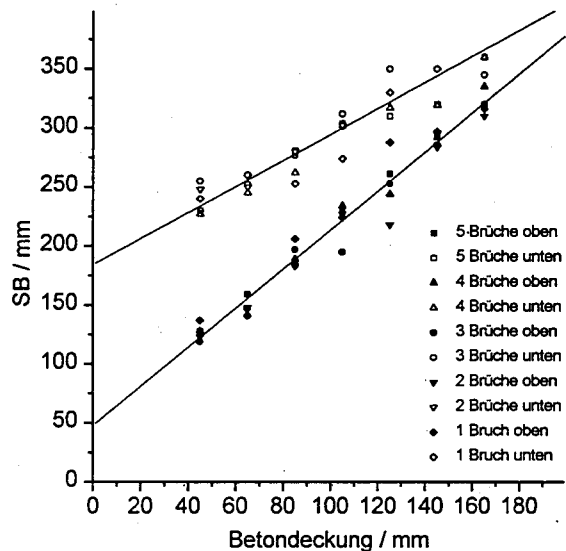


Abb. 2-74 Die Signalbreite SB zeigt keine signifikante Abhängigkeit von der Anzahl der Brüche in einem Spanngliedquerschnitt. Der Einfluß der Betondeckung und der Lage der Brüche im Spanngliedquerschnitt ist deutlich.

Werden die Signalbreiten der Bruchsignale unterschiedlicher Bruchanordnungen über die Betondeckung aufgetragen (Abb. 2-74), so zeichnet sich ein linearer Zusammenhang zwischen den beiden Größen ab. Die Anzahl der Brüche in einer Querschnittsfläche des Spannglieds hat keinen signifikanten Einfluß auf die Signalbreite SB, sehr wohl aber die Lage des Bruchs.

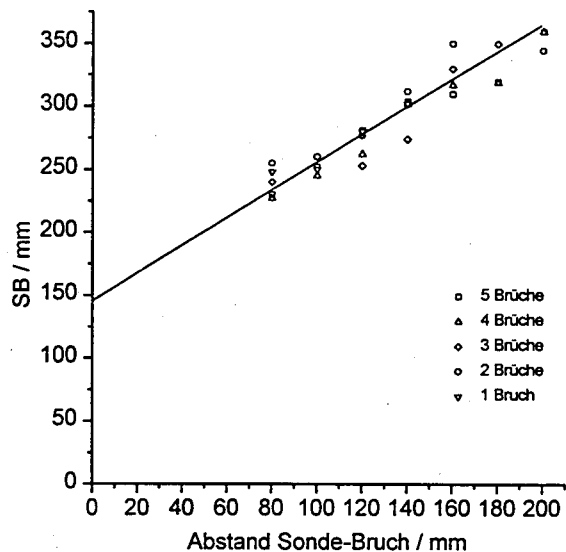


Abb. 2-75 Die Breite des transversalen Bruchsignals, aufgetragen gegen den minimalen Abstand der Hallsonde zu den Bruchstelle(n). Die Bruchstellen liegen auf der von der Betonoberfläche abgewandten Seite.

Die Signalbreite geht nicht mit dem Abstand der Hallsonde zu dem Bruch gegen Null (Abb. 2-75 und Abb. 2-76). Das ist wichtig für die physikalische Interpretation des Bruchsignals, auf die in 4.2 eingegangen wird.

Die Signalbreite SB kann bei der Signalinterpretation dazu genutzt werden, die Lage der Bruchstellen innerhalb eines Spanngliedquerschnitts zu bestimmen. Die Signalbreite ist also mit dem Parameter δ in (2.3.2-8) korreliert. Unbestimmt ist nur noch die Größe $B(v_i)$, die von bisher nicht variierten Parametern v_i abhängt.

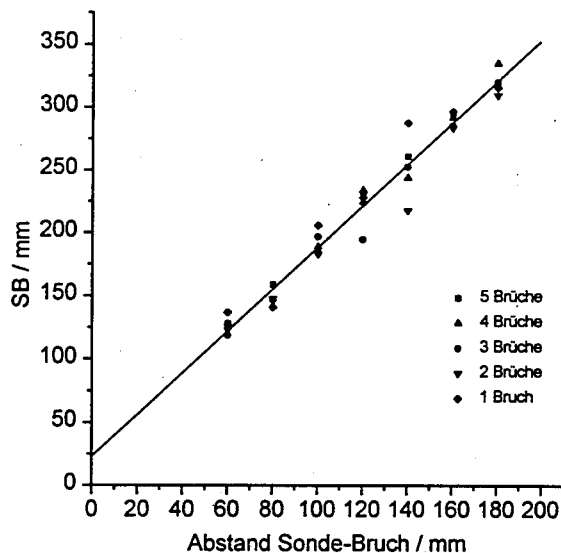


Abb. 2-76 Die Breite des transversalen Bruchsignals, aufgetragen gegen den minimalen Abstand der Hallsonde zu den Bruchstelle(n). Die Bruchstellen liegen auf der der Betonoberfläche zugewandten Seite.

Die bisher nicht variierten Größen sind:

- die Querschnittsfläche der Spanndrähte
- die Anzahl der Spanndrähte in einem Spannglied
- die magnetischen Einschalten des Spannstahls
- die Bruchweite

Der Einfluß der Querschnittsfläche und und der magnetischen Eigenschaften ist Gegenstand des Kap. 2.4. Die Auswirkungen einer unterschiedlichen Anzahl von Spanndrähten ist zwar nicht explizit untersucht worden, läßt sich aber aufgrund der geringen Abschirmung des Signals durch die intakten Stäbe im wesentlichen auf den Parameter δ in Gleichung (2.3.2-8) zurückführen, der bei einer größeren Anzahl von Einzelstäbe in einem größeren Bereich variiert werden muß. Einen Sonderfall spielt

der Bruch eines einzelnen Stabs, der sich nicht in der Umgebung anderer Stäbe befindet. Die Bruchsignalstärke BSS eines gebrochenen Einzelstabs ist größer, da der Streufluß nicht partiell über andere, intakte Stäbe fließen kann (Kap. 2.2.2).

Der Einfluß der Bruchweite auf das Bruchsignal ist Gegenstand des nächsten Kapitels.

2.3.3 Der Einfluß der Bruchweite auf das Bruchsignal

Die Untersuchungen zum Einfluß der Bruchweite bzw. des Abstands der Bruchufer zueinander wurden am gleichen Versuchsstand wie die in Abschnitt 2.3.2 beschriebenen Versuche durchgeführt. Probekörper war ein Spannstahlbündel aus 16 Spanndrähten, von denen zwei präparierte Bruchstellen hatten, die in einen Querschnitt des Bündels auf der Seite angeordnet waren, die zur simulierten Betonoberfläche zeigte.

Zur Einstellung eines definierten Abstands der Bruchfläche wurden Abstandhalter zwischen den Bruchflächen plziert. Dazu eignen sich beispielsweise Papierschnipsel. Unterschiedliche Bruchweiten lassen sich erzeugen, indem die Schnipsel in unterschiedlich dicken Lagen zwischen die Bruchufer gelegt werden und die aufgetrennten Stäbe daraufhin zusammengepreßt und fixiert werden.

Der Einfluß der so einstellbaren Bruchweite auf die Signalstärke ist in Abb. 2-77 dargestellt. Die Streuflußdichte wurde bei einer Betondeckung von $c = 85$ mm gemessen. Die Ordinate in Abb. 2-77 gibt die Stärke des Bruchsignals BSS bei der jeweiligen Bruchweite bezogen auf

die maximale Bruchsignalstärke BSS_{max} an, die bei einer Bruchweite von $b_{max} = 3 \text{ mm}$ erreicht ist. Vergrößert man die Bruchweite über b_{max} hinaus, wächst die Bruchsignalstärke BSS nicht mehr. Bereits bei einer Bruchweite von $b = 0.5 \text{ mm}$ hat die Bruchsignalstärke BSS 80 % von BSS_{max} erreicht.

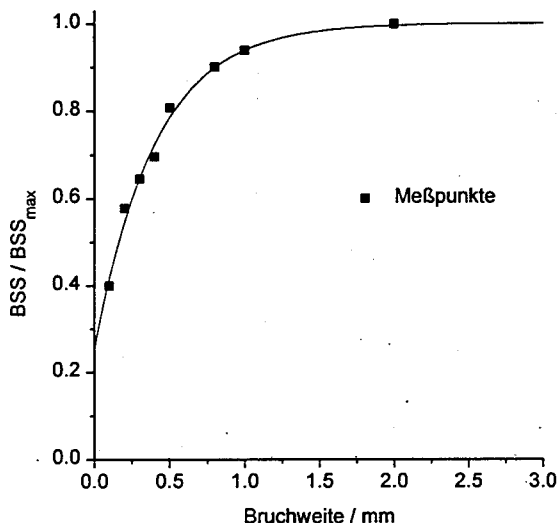


Abb. 2-77 Der Einfluß der Bruchweite auf die Bruchsignalstärke BSS läßt sich mathematisch wie ein Sättigungsprozeß beschreiben. Die Bruchsignalstärke geht nicht mit der Bruchweite gegen Null, denn die Gefügestörung besteht auch bei einer Bruchweite = 0.

Geht die Bruchweite gegen Null geht die die Bruchsignalstärke nicht gegen Null, sondern gegen den endlichen Wert von etwa 0,25 BSS_{max} .

Die Kurve, die den Meßwerten angepaßt wurde ergibt sich aus dem funktionellen Zusammenhang

$$\frac{BBS}{BBS_{max}} = 0,25 - 0,75 \left(1 - \exp\left(\frac{x}{0,4\text{mm}}\right) \right)$$

Nimmt man die aufgetrennten Stäbe als ein magnetisch homogenes Material an, müßte die

Bruchsignalstärke BSS mit der Bruchweite b gegen Null gehen, wie eigene und von anderen durchgeführte numerische Rechnungen (natürlich) [ZAT], [DOB] zeigen (Kap.4.2). Unsere numerischen Berechnungen wurden auf Grundlage der Maxwell'schen Gleichungen durchgeführt, wobei die magnetische Permeabilität $\mu_{Spannstahl}$ als konstant angenommen wurde. Ergebnis ist, daß die Bruchsignalstärke BSS linear mit der Bruchweite abnimmt. Das steht in klarem Widerspruch zu den Ergebnissen unserer experimentellen Untersuchungen. Die Ursachen dieser Widersprüche werden in Kap.4.2 erläutert.

Für die Spanndrahtbruchortung folgt aus den experimentellen Ergebnissen, daß auch die Ortung von Anbrüchen bei ausreichend starker Querschnittsschwächung möglich ist.

Auf der anderen Seite ergibt sich auch eine Schwierigkeit. Der Schluß von der Stärke des Bruchsignals BSS auf den Schädigungsgrad des Spannglieds bzw. auf die Anzahl der in einem Querschnittsbereich des Spannglieds gebrochenen Stäbe ist nur möglich bei der Annahme einer Bruchweite. Die sich einstellende Bruchweite nach einem Spannstahlbruch ist jedoch nicht in engen Grenzen einzuschätzen. Sie ist von schwer faßbaren Bedingungen in der Umgebung der Bruchstelle bestimmt. Der Verbund des gebrochenen Stabs mit dem Verpreßmörtel ist eine Randbedingung. Auch die Reibungskraft der Spanndrähte untereinander und die mechanische Spannung der Drähte spielen eine Rolle.

Auf die Signalbreite SB hat die Bruchweite bei einer Betondeckung von mehr $c = 30 \text{ mm}$ keinen meßbaren Einfluß.

2.3.4 Der Abschirmeffekt des Hüllrohrs

Das Hüllrohr in dem das Spannstahlbündel im Spannbeton mit nachträglichem Verbund verlegt ist, besteht in der Regel aus gewelltem ferromagnetischem kalt gewalztem Blech. Ferromagnetike haben im Vergleich zu anderen Stoffen eine vergleichsweise hohe magnetischen Permeabilität. Das Hüllrohr schirmt deshalb das Bruchsignal nach außen hin partiell ab.

Die Wandung des Hüllrohrs ist jedoch zu dünn um das Streufeld eines Spanndrahtbruchs so stark zu schwächen, daß eine Detektion nicht mehr möglich wäre. Vielmehr vermindert sich die Signalstärke BSS nur um bis zu etwa 20 % gegenüber einer Messung, die am Spanndrahtbündel ohne Hüllrohr durchgeführt wird. Die Abnahme der Bruchsignalstärke ist in den meisten Fällen geringer als 20 %. Die Lage der Bruchstelle relativ zum Hüllrohr führt zu einer gewissen Streuung.

Die Signalbreite vergrößert sich um einen Faktor von bis zu 1,5. Das Bruchsignal wird insgesamt etwas unschärfer, wie Abb. 2-78 exemplarisch zeigt.

Der Effekt der teilweisen Abschirmung hat damit, gegenüber anderen Effekten, wie der starken Veränderung der Bruchsignalstärke BSS mit der Bruchweite, nur eine relativ geringe Auswirkung.

Beachtet werden muß die Vergrößerung der Signalbreite SB, wenn bei der Analyse des Signals auf die Lage der Brüche innerhalb des Querschnitts eines Spannglieds geschlossen werden soll.

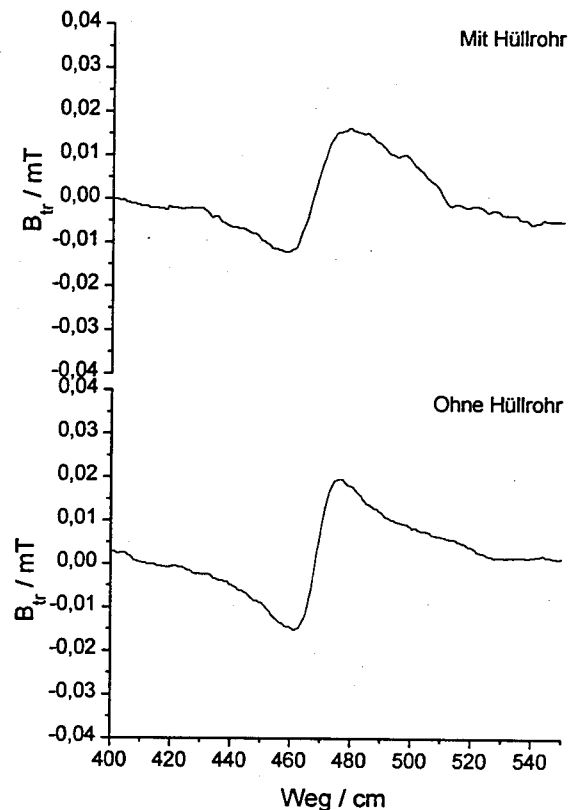


Abb. 2-78 Das Bruchsignal (transversale Komponente der Flußdichte), das bei zwei Brüchen, die auf der zur Betonoberfläche hin gerichteten Seite liegen, mit und ohne Hüllrohr gemessen wird. Die Betondeckung beträgt $c = 65 \text{ mm}$. Die Wanddicke des Hüllrohrs beträgt $d = 0,35 \text{ mm}$.

2.3.5 Das Bruchsignal von nebeneinander liegenden Bruchstellen

Die Fragestellung bei dieser Versuchsreihe war, wie weit Bruchstellen von einander entfernt sein müssen, damit die Signale der einzelnen Bruchstellen auflösbar sind bzw. wie sich die einzelnen Signale entlang der Spanngliedachse nahebeieinanderliegender Brüche überlagern.

Die Versuche wurden wiederum an dem Spannstahlbündel, bestehend aus 16 vergüteten Einzeldrähten mit dem Durchmesser $\varnothing = 7,2$ mm durchgeführt. Sieben Drähte der 16 Drähte wurden aufgetrennt und so in das Bündel eingebaut, daß die Bruchstellen in verschiedenen Abständen entlang der Achse des Bündels zueinander lagen.

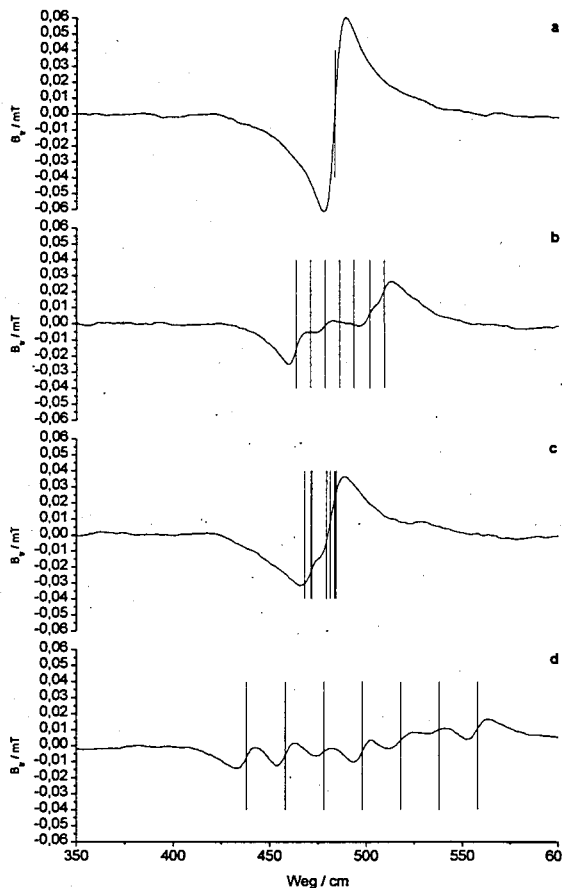


Abb. 2-79 Die transversale Komponente der Flußdichte, hervorgerufen durch 7 gebrochene Drähte (von 16) in verschiedenen Bruchstellenanordnungen. Die Betondeckung beträgt $c = 65$ mm. Die Lage der Bruchstellen ist durch die vertikalen Linien gegeben.

Um eine Vorstellung von der Veränderung des Bruchsignals mit zunehmendem Abstand der Bruchstellen voneinander zu bekommen werden

4 Meßkurven mit unterschiedlichen Bruchstellenanordnungen in Abb. 2-79 gezeigt.

Bei der Messung a in Abb. 2-79 sind die sieben Bruchstellen in einem Spanndrahtbündelquerschnitt angeordnet. Es resultiert ein normales Bruchsignal.

In der Messung b wurden die Brüche so angeordnet, daß der Abstand zu nächsten Bruchstelle jeweils 9 cm betrug. Bei dieser Anordnung löschen sich die Bruchsignale zwischen der negativen Flanke des ersten Bruch und der positiven Flanke des letzten Bruchs fast vollständig aus. Dieser Fall kann, wenn Bruchstellen über einen längeren Bereich homogen (mit konstantem Abstand zueinander) verteilt sind zu Fehlinterpretationen führen. Dieser kritische Abstand ist, wie die Signalbreite (Kap. 2.3.2),

In der Messung c sind die Bruchstellen auf einer Länge von 20 cm zufällig verteilt. Das Bruchsignal hat in diesem Fall wieder einen charakteristischen Verlauf. Es ist eine leichte Modulation entsprechend der Bruchstellenverteilung zu erkennen.

In der Messung d sind die Bruchstellen so angeordnet, daß der Abstand einer Bruchstelle zu benachbarten 20 cm beträgt. Trotz der homogenen Bruchstellenverteilung sind die einzelnen Bruchsignale bei diesem Abstand wieder auflösbar.

Der am schwierigsten interpretierbare Fall ist die Anordnung wie im Fall b. Eine über einen langen Weg homogen verteilte Bruchanordnung führen aufgrund der Überlagerung der einzelnen Bruchsignale zu einem Verlauf der an der Betonoberfläche gemessenen magnetischen Streuflußdichte, die nicht auf Brüche hindeutet. Der Extremfall wäre ein pulverisier-

tes Spannglied - Bruchsignale würden nicht auftreten. Daß Bruchstellen in eingebauten Spanngliedern derart homogen verteilt sind, ist aber sehr unwahrscheinlich. Bei einer Schwankung der „Bruchdichte“ treten aber wiederum bruchartige Signale auf.

2.4 Die Untersuchung der magnetischen Eigenschaften der Bewehrung

2.4.1 Der Versuchsaufbau und die Proben

Spannstahl und Betonstahl unterscheiden sich in einer wichtigen magnetischen Eigenschaft. Die Koerzitivfeldstärke H_C von Spannstahl ist höher als die von Betonstahl. Das wird bei der Spannstahlbruchortung gezielt genutzt. Um genaue Werte der Koerzitivfeldstärke H_C von Spannstählen unterschiedlicher Herstellungsart und unterschiedlicher Hersteller sowie von Betonstählen zu erhalten wurden knapp 120 Spannstahlproben, die uns die Hersteller zur Verfügung stellten, und 13 Betonstahlproben untersucht.

Der Versuchsaufbau ist in Abb. 2-80 schematisch dargestellt. Eine Photographie des Aufbaus zeigt Abb. 9-6.

In der Spule, die in Kap. 2.1.3 beschrieben wurde, konnten die Spannstahlproben einem Magnetfeld H von 1000 Acm^{-1} bis 1000 Acm^{-1} ausgesetzt werden. Oberhalb der Längsachse der Magnetisierungsspule wurde eine Hallsonde zur Messung der transversalen Komponente (relativ zur Spule) der magnetischen Flußdichte B_T positioniert. Zur Messung der Flußdichte wurde das in Kap. 2.1.5 beschriebene stationäre Feldstärkenmeßgerät eingesetzt.

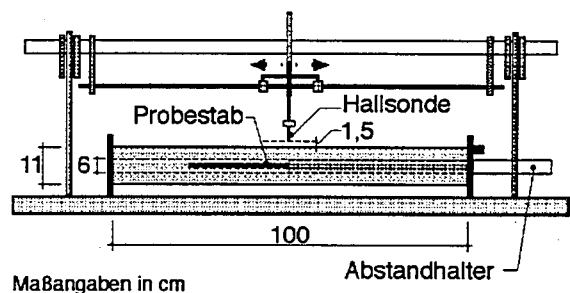


Abb. 2-80 Skizze des Versuchsaufbaus zur Bestimmung der Koerzitivfeldstärke von Stahlproben. Die Proben befinden sich in einer Spule. Die Hallsonde ist so positioniert, daß keine transversal zur Spule gelegene Flußdichtekomponente bei leerer aber stromdurchflossener Spule meßbar ist.

Die Hallsonde wurde zentral über der Spulenachse an den Punkt gebracht, an dem die von der (leeren) Spule erzeugte Flußdichte B_S exakt parallel zur Spulenachse gerichtet ist. An dem Meßpunkt der Hallsonde wurde von dieser im empfindlichsten Bereich, selbst bei Vollast der Spule, die Flußdichte $B_T = 0$ gemessen. Vorher wurde ein Nullabgleich der Hallsonde am Ort der Messung bei einem Spulenstrom von $I_S = 0$ durchgeführt. Die in diesem Bereich gemessene Flußdichte, hervorgerufen durch das magnetische Erdfeld und die magnetischen Felder der Ferromagnetika in der Umgebung, wurde also abgezogen.

Nachdem die Hallsonde positioniert war, wurde ein Probestab in die Spule gebracht und dort so positioniert, daß eine Stirnfläche des Stabs genau unter der Hallsonde lag. Die bei dieser Anordnung mit der Hallsonde gemessene Flußdichte kann nur von der Magnetisierung M_P des Probestabs ausgehen.

Wird der Probestab durch das magnetische Feld in der Spule bis über die Feldstärke hinaus magnetisiert, bei der alle irreversiblen Prozesse abgelaufen sind, und das Magnetfeld der Spule daraufhin von der maximalen Feldstärke auf Null zurückgefahren, so behält der Probestab seine remanente Magnetisierung M_R . Die Hallsonde mißt eine magnetische Flußdichte, die proportional zu der remanenten Magnetisierung des Probestabs ist. Wird in der Spule dann ein magnetisches Feld entgegengesetzter Richtung erzeugt, nimmt die Magnetisierung des Probestabs M_P ab. Wenn das Magnetfeld der Spule die Koerzitivfeldstärke $M H_C$ der Probe erreicht, ist dessen Magnetisierung $M_P = 0$. Die mit der Hallsonde gemessene Flußdichtekomponente hat einen Nulldurchgang.

Der Koerzitivfeldstärke $M H_C$ wurde ein weiterer Index (M) hinzugefügt, weil es sich hier um die Koerzitivfeldstärke H_C bezüglich der Magnetisierung M des Probekörpers handelt und nicht bezüglich der Flußdichte B in dem Körper (Kap. 1.6.1) Die Koerzitivfeldstärke $M H_C$ ist von der Probenlänge unabhängig, denn das entmagnetisierende Feld H_{ent} (Gleichung (1.6.9)) ist proportional zur Magnetisierung des Stabs, die aber an dieser magnetischen Feldstärke $M(M H_C) = 0$ ist.

Wichtig für eine genaue Bestimmung von $M H_C$ ist, daß der Stab sich in einem möglichst homogenen magnetischen Feld befindet. Bei der verwendeten Spule nimmt die Feldstärke von der Spulenmitte, wo sich das eine Ende des Stabs befindet, bis zum anderen Ende des Stabs um etwa 0,6 % ab (Abb). Das magnetische Feld in der Spule ist damit für unsere Zwecke ausreichend homogen.

Gleichzeit zur magnetischen Flußdichte B_T wird der Spulenstrom I_S gemessen, der proportional zur magnetischen Feldstärke H_S im quasihomogenen Bereich der Spule ist.

$$H_S = a I_S \quad (2.4.1-1)$$

Den Zusammenhang zwischen der Stromstärke I_S und der magnetischen Feldstärke H_S im quasihomogenen Bereich der Spule erhält man über die Aufnahme einer Eichgeraden. Dazu wurde in dem quasihomogenen Bereich der Spule eine Hallsonde positioniert, die die axiale Flußdichte B_{ax} in der Spule bei gegebener Stromstärke mißt. Aus der (in Luft) gemessenen axialen Flußdichte kann über den einfachen Zusammenhang

$$H_S = \mu_0^{-1} B_{ax}$$

das Spulenfeld H_S im quasihomogenen Bereich berechnet werden. Der Faktor a aus (2.4.1-1) kann so bestimmt werden und damit aus dem Spulenstrom I_S die magnetische Feldstärke H_S im quasihomogenen Bereich der Spulen berechnet werden.

Zur Bestimmung der Koerzitivfeldstärke $M H_C$ wurde nach folgendem Schema (Abb. 2-81) vorgegangen:

1. Ausrichtung der Hallsonde über der Spule zur Messung der transversal zur Spulenachse gelegenen magnetischen Flußdichtekomponente B_T in einer Entfernung $r = 66$ mm von der Spulenachse.
2. Nullabgleich der über dem Mittelpunkt der Spule positionierten Hallsonde.
3. Verschiebung der Sonde bis die gemessene magnetische Flußdichtekomponente B_T bei maximalem Spulenstrom I_S gleich Null

ist. (Die geometrische Mitte der Spulenachse stimmt nicht exakt mit der magnetischen Mitte überein, da eine ideal homogen gewickelte Spule nicht herstellbar ist.)

4. Einmessen der Position der Hallsonde entlang der Spulenachse. Einstellung des Abstandhalters (Abb. 2-80) auf diese Position.
5. Positionierung eines Probestabs in der Spule, so daß ein Ende des Stabs den Abstandhalter berührt und die entsprechende Stirnfläche exakt unterhalb der Hallsonde liegt.
6. Magnetisierung des Probestabs bis keine irreversiblen Prozesse mehr stattfinden, indem der maximale Spulenstrom ($I_s = 25 \text{ A}$) die Spule durchfließt.
7. Beginn der Messung. Das Feld der Spule wird langsam in entgegengesetzte Richtung zu der vorangegangenen Magnetisierung gesteigert. Nach dem Erreichen der maximalen magnetischen Feldstärke H_s in der Spule, wird das Feld wieder langsam auf Null heruntergeregelt. Die Stromrichtung wird umgepolt. Der Spulenstrom I_s wird bis zum Erreichen der maximalen Feldstärke umgekehrter Richtung gesteigert und daraufhin langsam auf Null zurück geregelt.

Die magnetische Hystereseschleife des Probekörpers wird in Schritt 7 komplett durchfahren. Die in Schritt 6 angegebene Magnetisierung des Probekörpers dient dazu, daß man sich von Beginn der Messung an auf der äußeren Hystereseschleife bewegt (1.6.11.6.1). Die beiden Meßgrößen B_{tr} und I_s wurden über eine A/D-Wandlerkarte zeitgetriggert in einen Meßrechner eingelesen

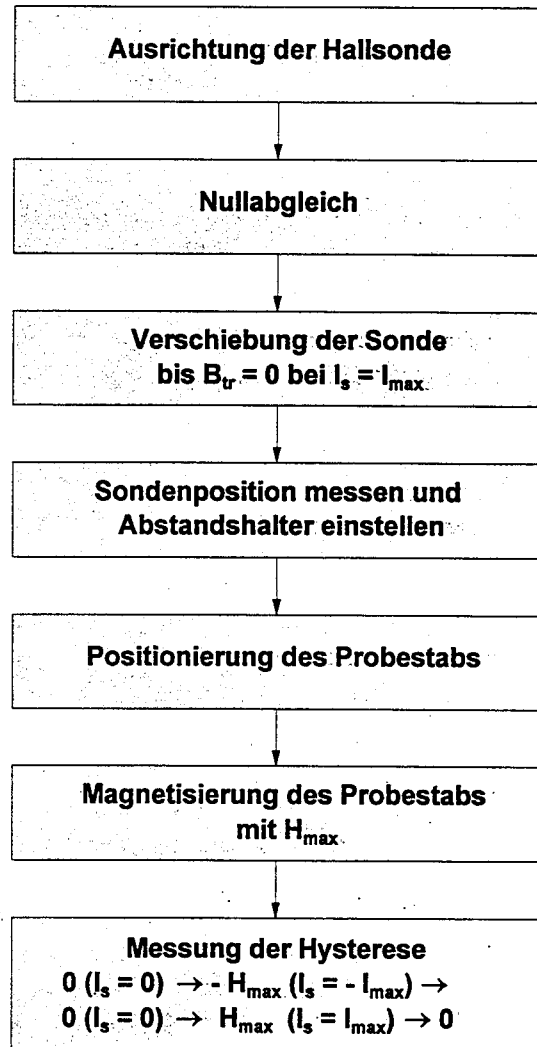


Abb. 2-81 Schematische Darstellung der Messungen der Koerzitivfeldstärke $M H_C$ an verschiedenen Stahlproben.

2.4.2 Die Hysteresen und ihre numerische Bearbeitung

Die gemessenen Hysteresekurven sind aufgrund des Dimensionsverhältnis $p = l/d$ und dem damit verbundenen großen Entmagnetisierungsfaktor N sehr stark geschert. Abb. 2-82 zeigt das Beispiel einer Meßkurve. Diese Kurve gehört zu einem Probekörper aus 7-drähtiger Litze kaltgezogenen Stahls der Festigkeits-

klasse 1460 / 1700 mit einem Durchmesser von 18 mm. Die gemessene probenformunabhängige Koerzitivfeldstärke beträgt in diesem Fall $M H_C = 13,3 \text{ Acm}^{-1}$.

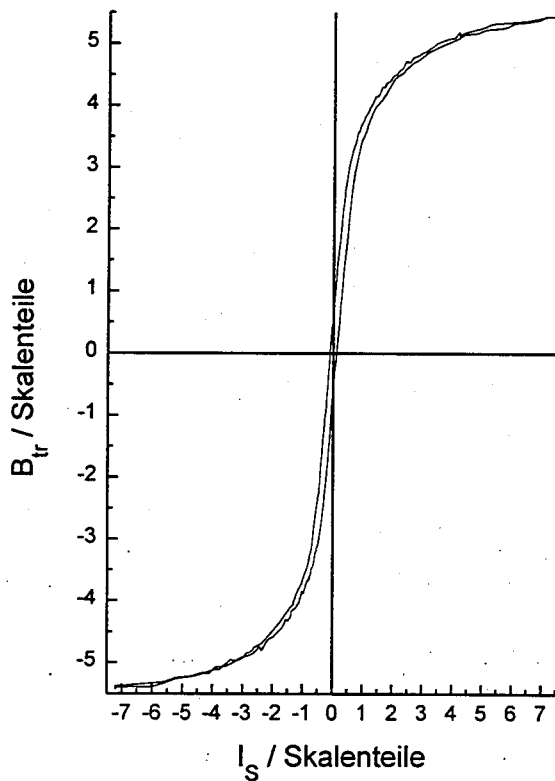


Abb. 2-82 Meßkurve zur Bestimmung der Koerzitivfeldstärke $M H_C$ an Spann- und Betonstahlprobekörpern. Der Probekörper an dem diese Messung durchgeführt wurde, besteht aus 7-drähtiger Litze kaltgezogenen Stahls der Festigkeitsklasse 1460 / 1700 mit einem Durchmesser von 18 mm.

Um die Werkstoffhysterese aus der gemessenen Kurve zu erhalten, muß die Meßkurve zurückgeschert werden. Außerdem wird nicht die Magnetisierung des Probekörpers gemessen sondern nur eine zu ihr annähernd proportionale Flußdichte B_r .

Zum Zurückscheren muß der Entmagnetisierungsfaktor N der Probe bekannt sein (Kap.

1.6.1). Eine Berechnung dieses Faktors grenzt ans Unmögliche wegen der komplizierten Probenform und der ebenfalls komplizierten Abhängigkeit des inneren Entmagnetisierungsfaktors von der Kristallstruktur und der mechanischen Vorbehandlung des Materials. Darüberhinaus ist der Entmagnetisierungsfaktor von der magnetischen Permeabilität μ abhängig, da die Proben nicht die Form eines Ellipsoids haben und die Form der Probe auch nicht angenähert als solche angenommen werden kann. Die magnetische Permeabilität μ wiederum ist eine komplizierte materialabhängige Funktion der magnetischen Feldstärke.

Mit einer Unsicherheit von einigen Prozent läßt sich der Entmagnetisierungsfaktor jedoch auf eine einfache Art ermitteln. Die probenformabhängige Hysterese hat für kleine Magnetisierung also in der Nähe von $M H_C$ einen geradlinigen Verlauf. Die Zunahme von H wird in diesem Bereich nahezu vollständig durch die Zunahme des entmagnetisierenden Felds $H_{ent} = N M$ kompensiert [STE]. Die Werkstoffhysterese schneidet die H -Achse fast senkrecht.

Die an den Probekörpern gemessenen Hysterese werden so zurückgeschert, daß sie die H -Achse senkrecht schneiden. Damit erhält man ein genähertes Maß für die Remanenz der Stähle M'_R . Die nach dieser Methode zurückgescherte und geglättete Hysterese aus Abb. 2-82 zeigt die Abb. 2-83. Die Größe M' wird in Gleichung 2.4.2-1 definiert.

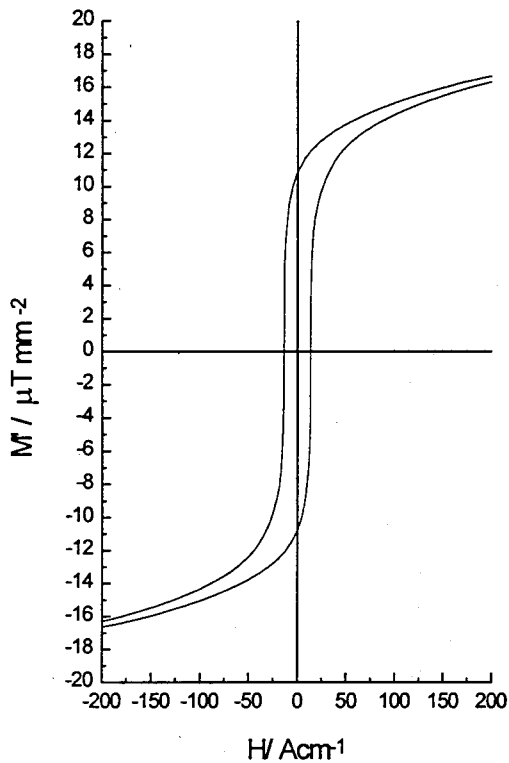


Abb. 2-83 Zurückgescherte und geglättete Kurve, hervorgegangen aus der Meßkurve in Abb. 2-82.
 $M_H C = 13,3 \text{ Acm}^{-1}$;
 $M'_R = 10,6 \text{ μT mm}^{-2}$
 (Probennr.: 39)

Diese Hysteresen kommen den Werkstoffhysteresen, abgesehen davon, daß nicht ganz korrekt zurückgeschert wurde, schon recht nahe. Verglichen werden soll neben der Koerzitivfeldstärke $M_H C$, die Remanenz M_R der verschiedenen Stahlsorten, um zu klären, ob Unterschiede in der Detektierbarkeit von Spannstahlbrüche bei unterschiedlichen Spannstählen bestehen. Fehler von einigen Prozent sind in der Bestimmung dieser Größe tolerierbar.

Die zurückgescherten, geglätteten Hysteresen geben an, welche Flußdichte man bei vorgegebener Feldstärke in einer unendlich langen Spule gemessen hätte, wenn sich in dieser ein halbinendlich langer Probestab (geometrischer

Entmagnetisierungsfaktor $N = 0$) befunden hätte, dessen innerer Entmagnetisierungsfaktor ebenfalls $N_i = 0$ ist. Bei Probekörpern mit unterschiedlichem Querschnitt aus dem gleichen Werkstoff wäre die mit der Hallsonde gemessene Flußdichte B_{tr} annähernd proportional zur Querschnittsfläche des Probestabs.

Um die unterschiedlichen Spannstähle hinsichtlich ihrer Remanenz M_R vergleichen zu können, wird eine Größe M' eingeführt, die proportional zur Magnetisierung der Probekörper M_P ist:

$$M_P \sim M' = \frac{B_{tr}}{d^2} \quad 2.4-1$$

mit d:

- Durchmesser der Probe, wenn die Probe einen kreisförmigen Querschnitt hat,
- $d = 2\sqrt{\frac{A}{\pi}}$, A: Querschnittsfläche der Probe bei nicht kreisförmigem Querschnitt.

Die magnetische Flußdichte dividiert durch d^2 , die bei der remanenten Magnetisierung des Probekörpers, also bei einer magnetischen Feldstärke der Spule von $H_S = 0$ nach vorheriger Aufmagnetisierung, gemessen wird, wird mit M'_R bezeichnet.

$$M'_R = \frac{B_{tr,R}}{d^2} \quad 2.4-2$$

Die Bruchsignalstärke ist bei sonst konstanten Bedingungen linear von M'_R abhängig. Deswegen ist die Kenntnis dieses Werts und eventueller Schwankungen dieses Werts für die Spannstahlbruchortung wichtig.

2.4.3 Die Koerzitivfeldstärke und die Remanenz der Spannstähle

Keine der etwa 120 untersuchten Spannstahlproben zeigte ein abnormes magnetisches Verhalten. In keinem Fall, außer in einem speziellen Fall unter den gereckten und angelassenen Stählen, streuten die Werte $M_H C$ und M'_R von vergleichbaren Stählen um mehr als 5 %. Die Einzelergebnisse finden sich in der Tabelle 8.1 im Anhang I.

Die Herstellungsart der Stähle beeinflusst ihr magnetisches Verhalten. Deswegen werden die Meßergebnisse nach der jeweiligen Herstellungsart gegliedert dargestellt.

Gereckte angelassene Spannstähle

Eine Sonderrolle unter den Spannstählen spielen hinsichtlich ihrer magnetischen Eigenschaften die warmverformten Stähle. Von dieser Spannstahlsorte wurden 10 Proben untersucht.

Obwohl die Form ihrer Hysterese im Vergleich zu den anderen Spannstahlarten den ausgeprägtesten weichmagnetischen Charakter hat (Abb. 2-84), haben diese Stähle vergleichsweise große Koerzitivfeldstärken $M_H C$.

Die Werte der Koerzitivfeldstärke steigen deutlich mit zunehmender Zugfestigkeit (Abb. 2-85). Die Koerzitivfeldstärken verschiedener Proben gleicher Zugfestigkeit schwanken nur geringfügig.

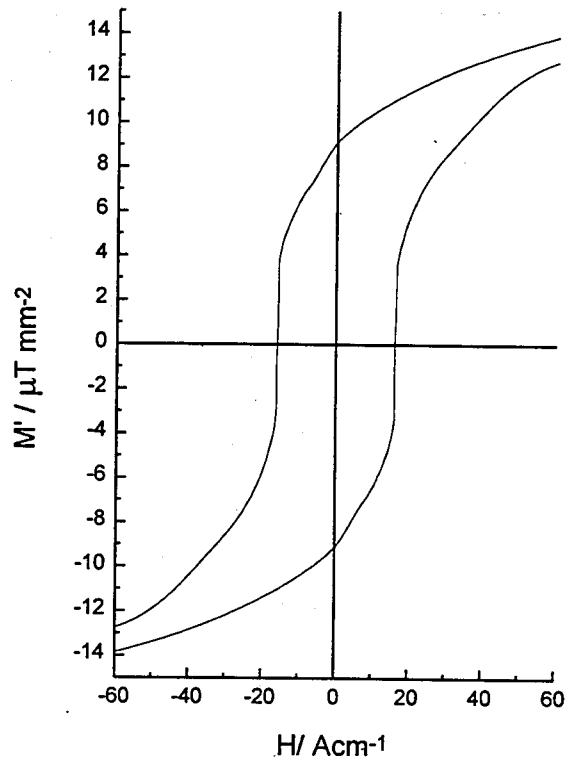


Abb. 2-84 Die Hystereseurve eines Spannstahls, der seine Festigkeit durch Reckung und anschließendes Anlassen erhielt.
 Festigkeitsklasse: 835 / 1030,
 Form: rund mit Gewinde,
 Durchmesser: $d = 26,5 \text{ mm}$,
 $M_H C = 16,0 \text{ Acm}^{-1}$,
 $M'_R = 9,1 \text{ } \mu\text{T mm}^{-2}$,
 (Probennr.: 3).

Die Größe M'_R hingegen ist etwas kleiner ($\approx 10 \%$) als bei den anderen Spannstahlarten. Das gilt allerdings nicht für die Festigkeitsklasse 900 / 1030. Bei einem der beiden Probekörper dieser Festigkeitsklasse wurde sogar ein ausgesprochen hoher Wert für M'_R gemessen. Die Schwankungen von M'_R beträgt etwa $\pm 10 \%$. Die Stähle der Festigkeitsklasse 900 / 1030 haben andere magnetische Eigenschaften als die gereckten und angelassenen Stähle, weil sie zusätzlich oberflächenvergütet wurden.

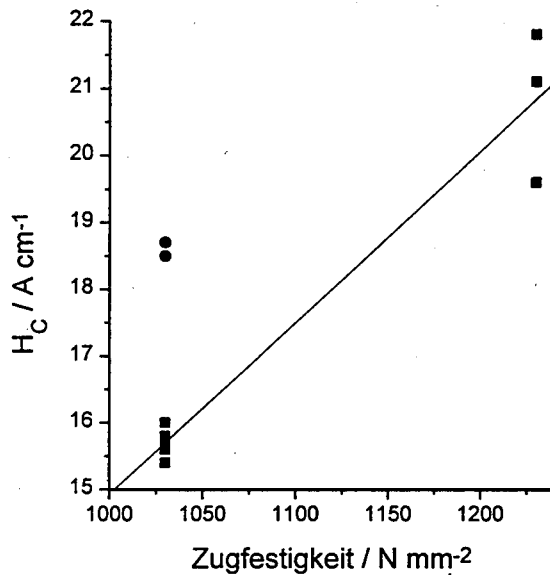


Abb. 2-85 Die Koerzitivfeldstärke der gereckten und angelassenen Spannstähle steigt deutlich mit der Zugfestigkeit. Bei gleicher Zugfestigkeit schwanken die Werte nur geringfügig. Eine Sonderstellung nimmt der Spannstahl mit der Festigkeitsklasse 900 / 1030 ein (•). Er ist oberflächenvergütet.

Die relativ großen Schwankungen der Größe M'_R bei gereckten und angelassenen Spannstählen beeinträchtigen die Detektierbarkeit von Brüchen nicht. Die Quantifizierung des Schadensausmaßes stellt bei Spanngliedern, die mit diesen Stählen hergestellt sind keine Schwierigkeit dar, weil in diese Spannglieder nur ein Spannstahlstab eingebaut ist.

Selbst dann, wenn der Wert für M'_R nur $M'_{R,1} = 8 \mu T \text{ mm}^{-2}$ beträgt, ergibt sich für eine Bruchstelle bei einem Spannstab mit einem Durchmesser von $d_1 = 26 \text{ mm}$ bei sonst gleichen Bedingungen eine Bruchsignalstärke BSS, die der von $n \approx 10$ in einem Querschnitt gebrochenen vergüteten Spannstählen der Festigkeitsklasse 1420 / 1570 ($M'_{R,2} = 10 \mu T \text{ mm}^{-2}$) mit dem Durchmesser

$d_2 = 7,2 \text{ mm}$ entspricht, wie folgende Abschätzung zeigt:

$$n = \frac{d_1^2 M_1'}{d_2^2 M_2'} = \frac{676}{51,84} \frac{8}{10} \approx 10.$$

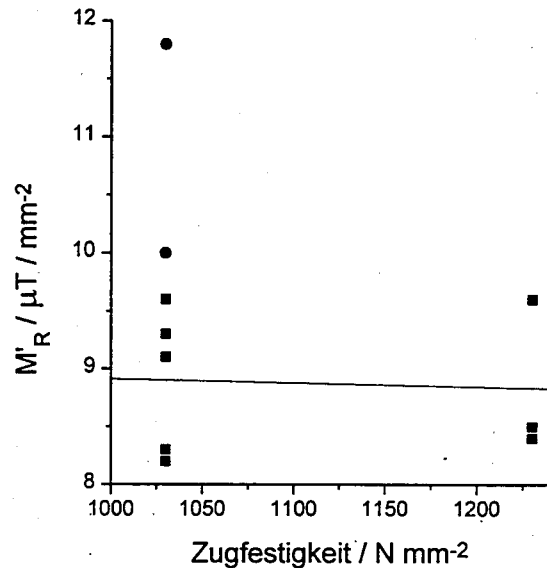


Abb. 2-86 Die Werte von M'_R zeigen bei gereckten und angelassenen Spannstählen keinen signifikanten Zusammenhang mit der Zugfestigkeit. Die zusätzlich oberflächenvergüteten Stähle der Zugfestigkeitsklasse 900 / 1030 (•) zeigen ein besonderes Verhalten: Die Werte für M'_R sind erstens relativ groß und schwanken sehr viel stärker als bei allen anderen Proben.

Kaltgezogene Spannstähle

Kaltgezogene Spannstähle werden in der größten Vielfalt angeboten. Über 100 Proben von Spannstählen dieser Herstellungsart wurden untersucht. Die Schwankungen der Werte für die Koerzitivfeldstärke H_c und für M'_R sind klein.

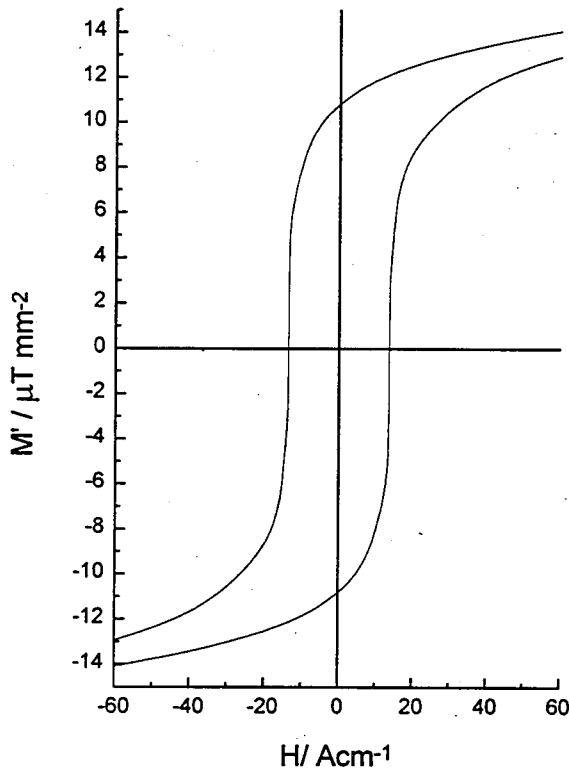


Abb. 2-87 Die Hystereseurve einer 7-dräftigen Spannstahl-Litze der Festigkeitsklasse: 1460 / 1700, Durchmesser: $d = 18 \text{ mm}$, $M_H = 13,3 \text{ Acm}^{-1}$, $M'_R = 10,6 \text{ } \mu\text{T mm}^{-2}$. (Probennummer: 39).

Abb. 2-87 zeigt die Hysterese einer 7-dräftigen Litze, in Abb. 2-88 ist die Hysterese eines Einzeldrahts aufgetragen. Die Hysteresekurven kaltgezogener Stähle ist etwas rechteckförmiger als die anderer Spannstähle, was für einen eher hartmagnetischen Charakter spricht. In den Werten für M_H und für M'_R drückt sich das allerdings nicht aus. M'_R ist im Mittel geringfügig größer als bei den anderen Spannstahlsorten, während die Koerzitivfeldstärke M_H im Mittel etwas geringer ist.

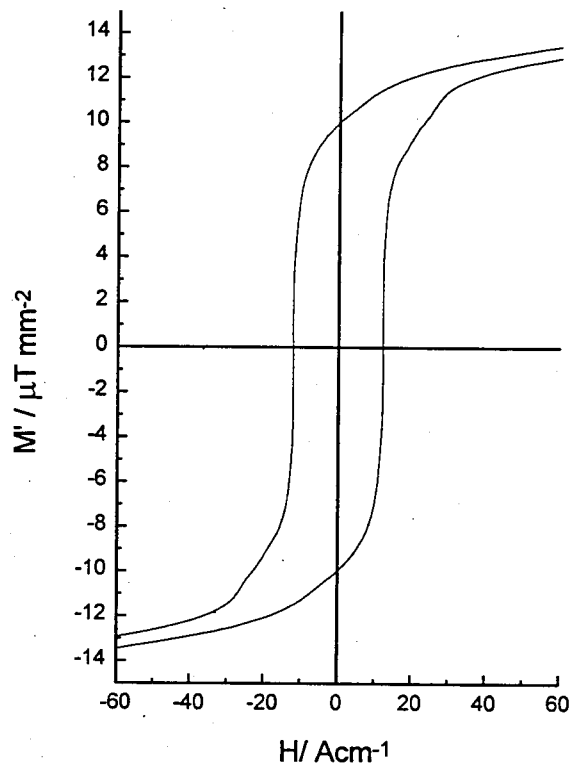


Abb. 2-88 Die Hystereseurve eines kaltgezogenen Einzelstabs der Festigkeitsklasse: 1520 / 1770, Durchmesser: $d = 5 \text{ mm}$, $M_H = 12,3 \text{ Acm}^{-1}$, $M'_R = 10,0 \text{ } \mu\text{T mm}^{-2}$. (Probennummer: 73).

Die Gruppe der kaltgezogenen Spannstähle wird zur Untersuchung eventueller Abhängigkeiten der magnetischen Kenngrößen von der Zugfestigkeit in zwei weitere Gruppen unterteilt. Die Spannstahl-Litzen und die Einzelstäbe werden getrennt betrachtet.

Litzen

Die Abhängigkeit der Koerzitivfeldstärke M_H von der Zugfestigkeit ist schwach ausgeprägt. Im Mittel sinkt die Koerzitivfeldstärke M_H geringfügig mit der Zugfestigkeit (Abb. 2-89). Die Abnahme über den gesamten Zugfestigkeitsbereich ist aber geringer als die Streuung der Koerzitivfeldstärke M_H von Spannstahl-Litzen einer Festigkeitsklasse.

Alle gemessenen Koerzitivfeldstärke liegen in dem Bereich $M_H C = 13,1 \text{ Acm}^{-1} \pm 6 \%$.

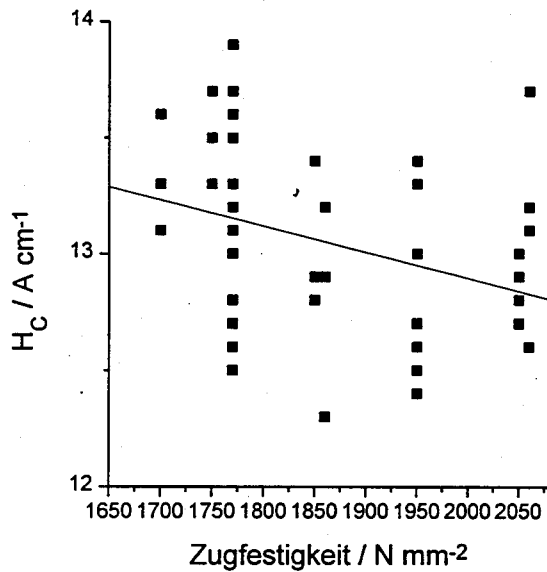


Abb. 2-89 Die Koerzitivfeldstärke von Spannstahlilitzen sinkt im Mittel geringfügig mit der Zugfestigkeit. Die Streuung der Koerzitivfeldstärke bei Stählen einer Festigkeitsklasse ist jedoch stärker als die Abnahme mit der Zugfestigkeit.

Auch die Änderung der Remanenz bzw. des Werts M' mit der Zugfestigkeit ist gering. Im Mittel nimmt sie zwar mit der Zugfestigkeit zu (Abb. 2-90), aber auch in diesem Fall ist die Zunahme über den gesamten Festigkeitsbereich kleiner als die Schwankung der Remanenz von Spannstahlilitzen einer Festigkeitsklasse.

Alle gemessenen Werte für M'_R liegen in dem Intervall $M'_R = 10,55 \mu\text{T mm}^{-2} \pm 9 \%$.

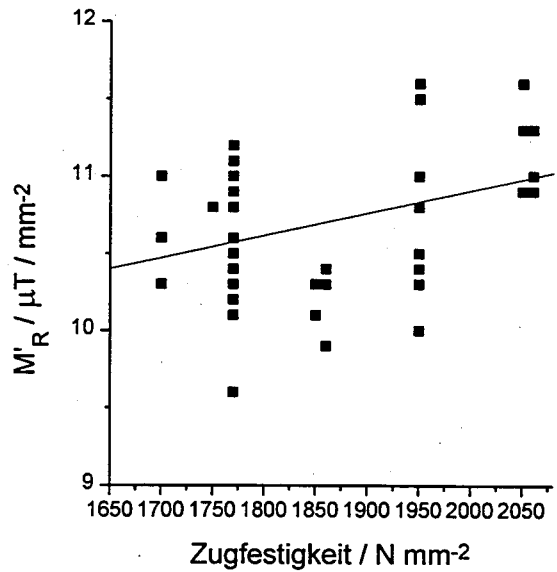


Abb. 2-90 Die Remanenz von Spannstahlilitzen steigt im Mittel geringfügig mit der Zugfestigkeit. Die Streuung der Koerzitivfeldstärke bei Stählen einer Festigkeitsklasse ist jedoch stärker als die Zunahme mit der Zugfestigkeit.

Kaltgezogene Einzeldrähte

Bei den kaltgezogenen Einzeldrähten zeigt sich ein ähnliches Bild wie bei den Litzen. Beide Effekte, die Abnahme der Koerzitivfeldstärke mit steigender Zugfestigkeit und die Zunahme der Remanenz mit der Zugfestigkeit sind jedoch stärker ausgeprägt als bei den Litzen.

Während die Abnahme der mittleren Werte der Koerzitivfeldstärke mit zunehmender Zugfestigkeit noch schwächer ist, als die Streuung dieser Werte für Spannstähle einer Festigkeitsklasse (Abb. 2-91), ist die Zunahme der Remanenz so deutlich (Abb. 2-92),

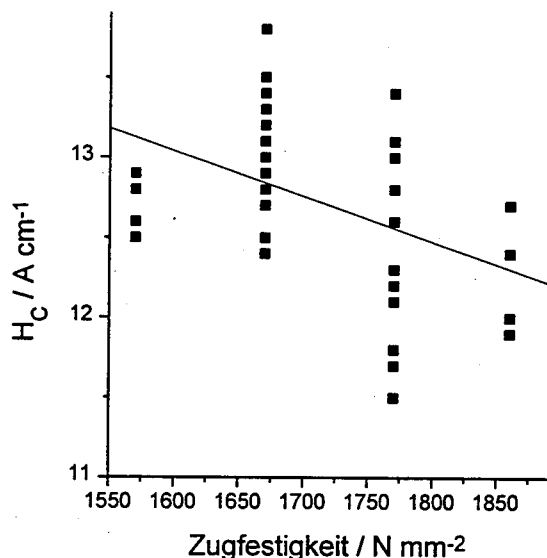


Abb. 2-91 Die Koerzitivfeldstärke von kaltgezogenen Einzelstäben sinkt im Mittel geringfügig mit der Zugfestigkeit. Die Streuung der Koerzitivfeldstärke bei Stählen einer Festigkeitsklasse ist jedoch stärker als die Abnahme mit der Zugfestigkeit.

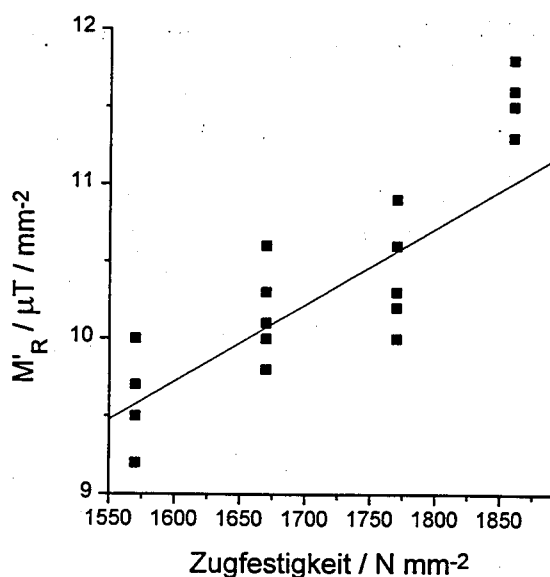


Abb. 2-92 Die Remanenz von kaltgezogenen Einzelstäben steigt im Mittel mit der Zugfestigkeit. Die Zunahme der Remanenz ist stärker als die Streuung der Remanenz bei Stählen einer Festigkeitsklasse.

Alle Meßwerte der Koerzitivfeldstärken von kaltgezogenen Einzelstäben liegen in dem Intervall $M H_C = 12,65 \text{ A cm}^{-1} \pm 9 \%$. Die Werte für M'_R liegen in dem Intervall $M'_R = 10,5 \mu\text{T mm}^{-2} \pm 12 \%$. Ohne Berücksichtigung der in Deutschland zur Zeit nicht zugelassenen Stähle mit einer Zugfestigkeit von mehr als 1770 N mm^{-2} , liegen die gemessenen Werte von M'_R in dem Intervall $M'_R = 10,05 \mu\text{T mm}^{-2} \pm 9 \%$.

Die Koerzitivfeldstärke $M H_C$ der kaltgezogenen Einzelstäbe ist im Mittel etwas kleiner als die der Litzen. Ursachen sind wahrscheinlich zusätzliche Kristallgitterverspannungen durch das Verlitzen. Die mittlere Remanenz unterscheidet sich nicht.

Vergütete Spannstähle

Zur Zeit sind in Deutschland ausschließlich vergütete Spannstähle der Festigkeitsklasse 1420 / 1570 für den Spannbetonbau zugelassen. Entsprechend klein ist die Anzahl der geprüften Probekörper. Zwei Stahlproben sind Neptun N 50 Stäbe, oval, gerippt mit einer Querschnittsfläche von $A = 50 \text{ mm}^2$, die zur Festigkeitsklasse 1320 / 1470 gehören. Dieser Stahl wird zur Zeit nicht produziert. Zwei weitere Stahlproben wurden von den Spannstäben genommen, an denen auch die anderen Untersuchungen durchgeführt wurden (Sigma-Stahl, $d = 7,2 \text{ mm}$, Festigkeitsklasse 1420 / 1570).

Die Hysterese einer dieser Proben ist in Abb. 2-93 dargestellt. Die Kurvenform ist eckiger als die der gereckten und angelassenen Stähle, hat aber einen weicheren Verlauf als die Hysteresen von kaltgezogenem Spannstahl.

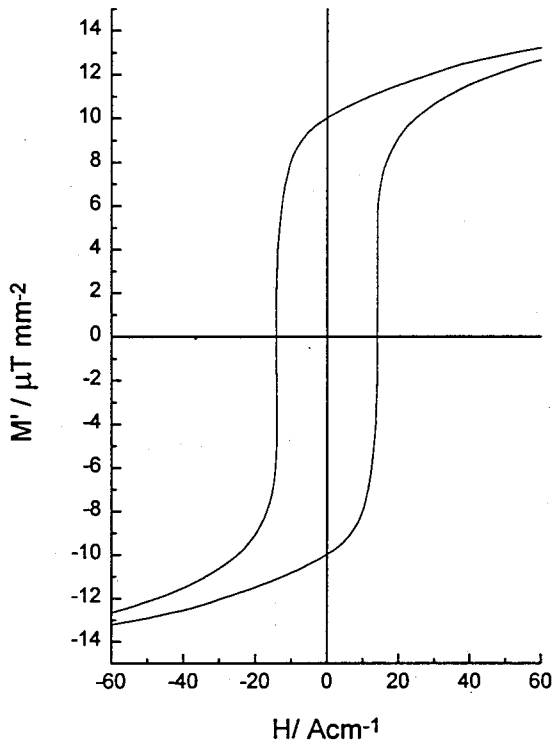


Abb. 2-93 Die Hystereseurve eines vergüteten Spannstahls der Festigkeitsklasse: 1420 / 1570, Durchmesser: $d = 7,2 \text{ mm}$, $M_H C = 14,1 \text{ Acm}^{-1}$, $M'_R = 10,0 \text{ } \mu\text{T mm}^{-2}$. (Probennummer: 113).

Auch hinsichtlich der gemessenen magnetischen Kennwerte $M_H C$ und M'_R liegt der vergütete Spannstahl zwischen dem gereckten und angelassenen Spannstahl und dem kaltgezogenen. Letzterem ist er aber magnetisch sehr viel ähnlicher. Für den Neptunstahl beträgt M'_R bei beiden Proben $M'_R = 10,1 \text{ } \mu\text{T mm}^{-2}$ und die Koerzitivfeldstärke $M_H C = 13,6 \text{ Acm}^{-1}$ und $M_H C = 13,7 \text{ Acm}^{-1}$. Der Sigma-Stahl hat sehr ähnliche Werte. M'_R hat bei beiden Proben den Wert $M'_R = 10 \text{ } \mu\text{T mm}^{-2}$ und die Werte für die Koerzitivfeldstärke sind $M_H C = 13,7 \text{ Acm}^{-1}$ und $M_H C = 14,1 \text{ Acm}^{-1}$.

Eine Stahlprobe aus vergütetem Spannstahl, die einer Eisenbahnschwelle aus Spannbeton

entnommen wurde, hatte eine von den anderen Proben stark abweichende Koerzitivfeldstärke. Die Eisenbahnschwelle wurde bei der Entgleisung eines Zugs zerstört. Der Spannstahl war leicht deformiert und bis auf einen umlaufenden Anriß nicht weiter geschädigt.

Die Hysterese dieser Probe ist in Abb. 2-94 dargestellt. Die Koerzitivfeldstärke dieser Stahlprobe betrug $M_H C = 17 \text{ Acm}^{-1}$. Ob die Deformation des Stabs durch die Entgleisung des Zugs der Grund für diesen hohen Wert ist oder das Kristallgefüge bzw. das Herstellungsverfahren ist nicht klar. Der Stahl wurde in der DDR produziert. Informationen über die Festigkeitsklasse liegen nicht vor.

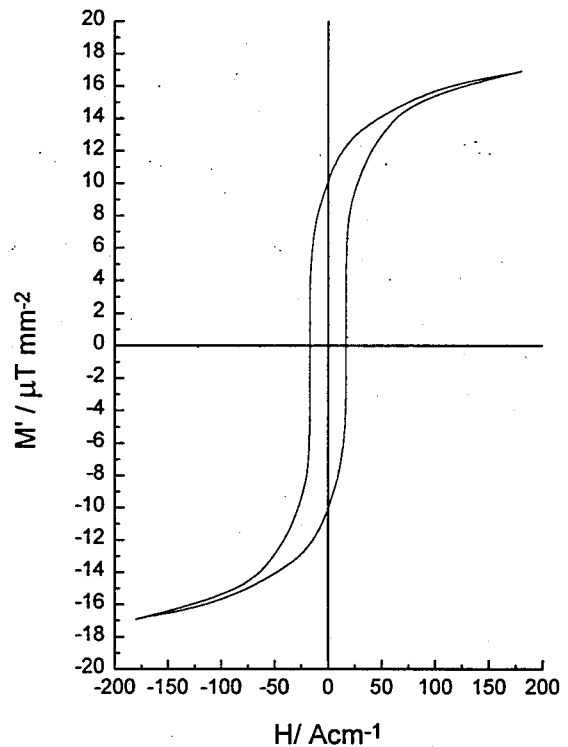


Abb. 2-94 Hysterese eines vergüteten Spannstahls, der aus einer Eisenbahnschwelle aus Spannbeton entnommen wurde.

2.4.4 Die Koerzitivfeldstärken der Betonstähle und eines Hüllrohrblechs

Neben den Spannstahlproben wurden einige Betonstahlproben auf ihre magnetischen Kennwerte untersucht.

Insbesondere die Koerzitivfeldstärke $M_H C$ hängt deutlich von der Zugfestigkeit der Betonstähle ab. Beide Kennwerte $M_H C$ und M'_R schwanken bei Stählen gleicher Festigkeitsklasse stärker als bei den Spannstählen. Die Meßwerte an den einzelnen Proben sind der Tabelle 8.2 im Anhang I zu entnehmen.

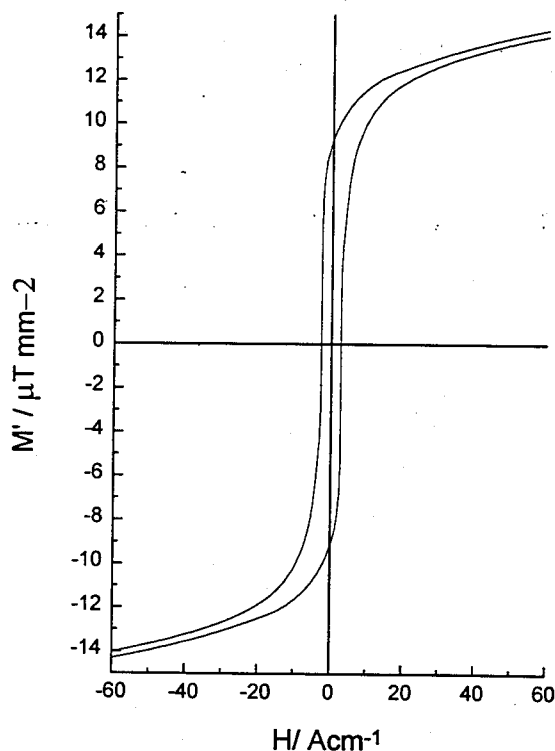


Abb. 2-95 Hysterese eines Betonstahls der Sorte Stahl I. $M_H C = 2,7 \text{ Acm}^{-1}$, $M'_R = 9,2 \mu\text{T mm}^{-2}$, $d = 12 \text{ mm}$ (Probennummer: S3).

Die Proben aus Stahl I haben eine sehr schlanke Hysterese (Abb. 2-95). Die an 4 Pro-

benkörpern gemessenen Koerzitivfeldstärken lagen alle unter $M_H C = 3,6 \text{ Acm}^{-1}$. Stahl I ist also ausgesprochen weichmagnetisch. Bereits kleine magnetische Feldstärken reichen zum Ummagnetisieren von Betonstahlstäben aus Stahl I.

Die Remanenz unterscheidet sich nicht sehr deutlich von der Remanenz der Spannstähle. Für M'_R wurden Werte um $M'_R \approx 9 \mu\text{T mm}^{-2}$ gemessen.

Eine etwas fülligere Hysterese zeigen die Betonstähle der Sorte BSt 420 S (Abb. 2-96).

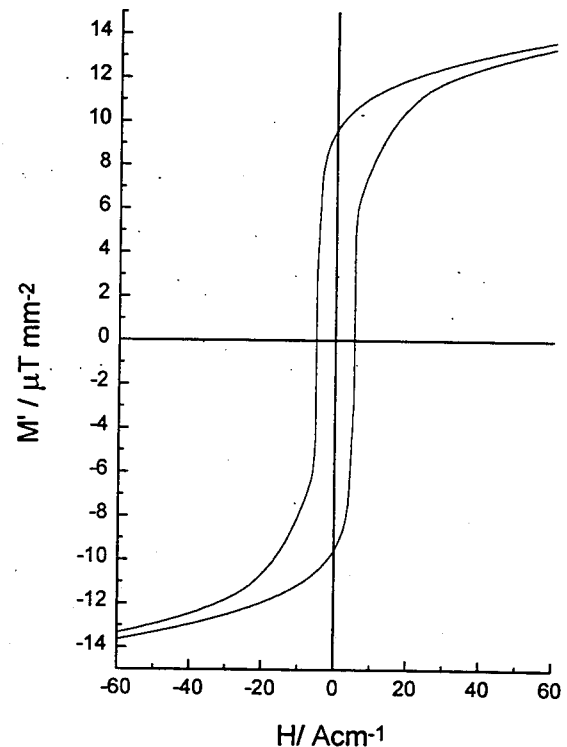


Abb. 2-96 Hysterese eines Betonstahls der Sorte BSt 420 S Rippenortstahl. $M_H C = 5,3 \text{ Acm}^{-1}$, $M'_R = 9,5 \mu\text{T mm}^{-2}$, $d = 12 \text{ mm}$ (Probennummer: S7).

Die an Stäben aus BSt 420 S gemessenen Koerzitivfeldstärken liegen zwischen $M_H C = 3,5 \text{ Acm}^{-1}$ und $M_H C = 5,3 \text{ Acm}^{-1}$. Die Re-

manenz ist ähnlich der von Stahl I, die Werte streuen ebenfalls relativ stark. BSt 420 S Rip-pentorstahl unterscheidet sich hinsichtlich der untersuchten magnetischen Eigenschaften nicht signifikant von einem nicht tordierten BSt 420 S.

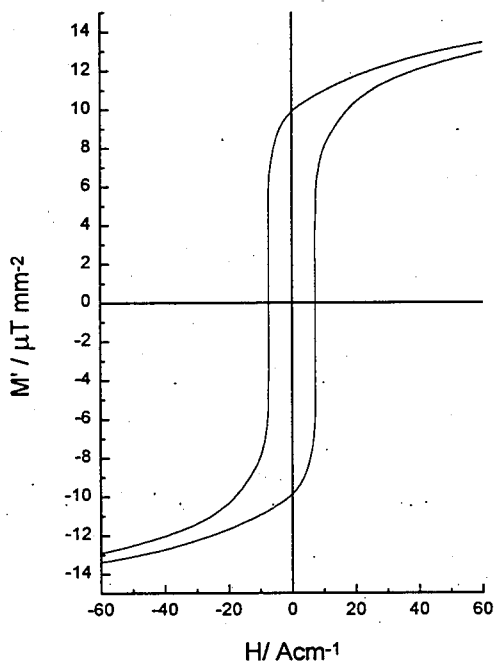


Abb. 2-97 Hysterese eines Betonstahls der Sorte BSt 500 S, $M_H C = 5,3 \text{ Acm}^{-1}$, $M'_R = 9,5 \text{ } \mu\text{T mm}^2$, $d = 12 \text{ mm}$ (Probennummer: S9).

Die Form der Hysterese von Betonstählen der Festigkeitsklasse BSt 500 S sind denen von Spannstählen schon recht ähnlich (Abb. 2-97). Die Werte für die Koerzitivfeldstärke $M_H C$ sind aber auch bei diesem Betonstahl deutlich kleiner als bei Spannstählen. Die Meßwerte liegen zwischen $M_H C = 6,3 \text{ Acm}^{-1}$ und $M_H C = 8,2 \text{ Acm}^{-1}$. Die Werte für M'_R schwanken

recht stark und unterscheiden sich nicht signifikant von den Werten der anderen Betonstähle

2.4.5 Die Bedeutung der Koerzitivfeldstärke und der Remanenz für die Spannstahlbruchortung

Die Ergebnisse der Messung der Koerzitivfeldstärke und des Werts M'_R , der annähernd proportional zur Remanenz der Stähle ist, zeigen, daß die Ergebnisse der anderen Untersuchungen, die an den vergüteten Spannstählen durchgeführt worden sind (Kap. 2.2 und Kap. 2.3), auf andere Spannstähle übertragbar sind.

Zur Abschätzung der Anzahl der Spanndrahtbrüche in einem Spanngliedquerschnitt müssen Unterschiede in der Remanenz des Spannstahls nicht berücksichtigt werden. Eine Sonderrolle spielen hier die gereckten und angelassenen Spannstähle, die aber ohnehin einzeln verlegt sind.

Der Einfluß der magnetischen Materialeigenschaften vergüteter und kaltgezogener Spannstähle auf die Bruchsignalstärke BSS ist beim Bauwerkeinsatz vernachlässigbar. Die Bruchsignalstärke BSS ist also neben den im Kap. 2.3 erörterten Einflüssen nur noch von der Querschnittsfläche der gebrochenen Spanndrähte abhängig und eventuell von den mechanischen Spannungen unter denen sie stehen (Kap. 1.6.3).

Daß die Remanenz der Betonstähle fast genauso hoch ist wie die von Spannstählen, begründet die starken Störsignale, die von ihnen ausgehen. Da sich die Betonstähle aber in der Koerzitivfeldstärke deutlich von Spannstäh-

len unterscheiden, ergeben sich Möglichkeiten, die Störsignale, die von den Betonstählen ausgehen zu schwächen ohne die Bruchsignale nennenswert zu verkleinern. Die in Kap. 2.2 beschriebene Magnetisierungstechnik nutzt unter anderem die unterschiedliche Koerzitivitätsfeldstärke um die Störsignale stark zu verkleinern.

3 Die Bauwerkuntersuchungen

3.1 Die baulichen Randbedingungen

Bei Bauwerkuntersuchungen müssen der Magnet und der Meßwagen mit geeigneten Hilfskonstruktionen möglichst dicht an der Betonoberfläche entlang der Projektion des Spanngliedverlaufs auf diese Fläche geführt werden.

Die Betonoberfläche von der aus die Spannstahlbruchortung durchgeführt werden soll, muß entlang der Projektionslinie des zu untersuchenden Spannglieds zugänglich sein, in dem Sinne, daß ausreichender Raum für die Hilfskonstruktionen zur Verfügung stehen, um den Magneten und den Meßwagen entlang dieser Projektionslinie zu führen.

Das Spannglied muß dabei auf einer ausreichenden Länge magnetisiert werden können, denn in den Polbereichen des magnetisierten Teils des Spannglieds ist eine Interpretation der Meßsignale nicht möglich, da die Flußdichte durch die Polausbildung in diesen Bereichen zu stark ist.

Zwischen einem zu untersuchenden Spannglied und der Betonoberfläche darf kein anderes Spannglied liegen. Ein hinter einem anderen Spannglied liegendes Spannglied könnte mit einem Magneten unserer Größenordnung nicht aufmagnetisiert werden, weil der magnetische Fluß zum größten Teil durch das näher gelegene Spannglied verlief. Um ein Spannglied zu magnetisieren, das hinter einem anderen gelegen ist müßte ein wesentlich größerer

magnetischer Fluß erzeugt werden, wozu ein wesentlich größerer Elektromagnet erforderlich wäre. Gelänge es, das Spannglied aufzumagnetisieren, wären die Streuflüsse die Spannstahlbrüche dieses Spannglieds erzeugen würden an der Betonoberfläche sehr klein. Erstens weil die Betondeckung eines solchen Spannglieds relativ groß ist und zweitens, weil das zwischen der Betonoberfläche und dem untersuchten Spannglied liegende Spannglied den Streufluß teilweise abschirmen würde. Diese Bruchsignale wäre im Hintergrund der Störsignale nur bei sehr starken Schädigungen auflösbar.

Drei Arten der Messungen an Bauwerken sind hinsichtlich der Durchführung zu unterscheiden:

Spannstahlbruchortung von der oberen Betonoberfläche aus

In Kragarmen, in Stützenbereichen von Durchlaufträgern und in Fahrbahnplatten verlaufen Spannglieder in der Nähe der oberen Betonoberfläche. In diesen Fällen reicht für die Führung der Geräte ein mit Peilstab und Wegaufnehmer versehener Handwagen (Abb. 9-9). In diesen Wagen werden die Geräte eingesetzt und dann entlang der zuvor markierten Projektionslinie des zu untersuchenden Spannglieds geführt.

Spannstahlbruchortung von der seitlichen Betonoberfläche aus

Die Spannglieder sind in balkenartigen Tragwerken in der Regel parabelförmig also gekrümmt geführt. Bei relativ kurzen aber hohen

Bauteile ist die Betondeckung zur Bauteilunterseite nur in einem kurzen Bereich kleiner als etwa 15 cm. Eine Untersuchung von der Bauteilunterseite aus würde eine zu kleine Meßlänge ergeben. Die Messung muß dann von der Bauteilseitenfläche aus durchgeführt werden.

Sind Spannglieder übereinander angeordnet ist von der Unterseite ebenfalls nur die untere Lage prüfbar. Von der Seitenfläche aus sind weitere Spannglieder erreichbar.

Eine Messung von der Seitenfläche aus ist auch dann die einzige Untersuchungsmöglichkeit, wenn in die Unterseite des Bauteils Hal-fenschienen oder ähnliches eingelassen sind oder andere Anbauten eine Untersuchung von der Unterseite aus behindern.

Um die Geräte entlang des gekrümmten Ver-laufs der Spannglieder zu führen, wird ein fle-xibles Tragsystem eingesetzt. Hauptbestandteil ist ein dünnwandiges Aluminiumrohr mit einem Außendurchmesser von $d_a = 42,6$ mm, das an Aufhängepunkte mit einem Abstand von $\Delta l = 1$ m am Bauteil befestigt wird. Der Magnet und der Meßwagen können an dieses Rohr angehängt und nach dem Schwebbahnprinzip verfahren werden (Abb. 9-10). Das Rohrsy-tem ist aus Einzelteilen verschiedener Längen endlos zusammensetzbar. Es ist einerseits ausreichend flexibel, um den Spann-gliedkrümmungen folgen zu können und ande-rerseits steif genug sich unter der Last des Magneten nicht zu verwinden. Das Tragsystem kann auch bei Messungen an runden Bautei-len, wie z. B. Tanks eingesetzt werden (Abb. 9-11).

Spannstahlbruchortung von der unteren Betonoberfläche aus

Bei den meisten Spannbetonbauteilen verlau-fen Spannglieder auf einer großen Länge (> 15 m) in der Nähe ($c < 150$ mm) der unteren Betonoberfläche. Als Hilfskonstruktion, zur Durchführung der Messungen von der Bautei-lunterseite aus, wird ein endlos zusammen-setzbares Tragsystem aus Aluminiumfachwerk-trägern verwendet, daß am Bauteil befestigt wird (Abb. 9-12). Auf den Trägern sind Schie-nen installiert auf denen ein Schienenwagen regelbar elektrisch verfahren werden kann. Der Antrieb erfolgt über Zugseile. Der Schienenwa-gen kann den Magneten und den Meßwagen aufnehmen (Abb. 9-13). Verlaufen die Spann-glieder außer in der vertikalen Ebene auch in der horizontalen Ebene gekrümmt, so kann der Schienenwagen durch Einbau einer entspre-chend gekrümmten Führungsschiene dem Spanngliedverlauf folgen (Abb. 9-14).

3.2 Die Lage der Spannglieder

Die Lage der zu untersuchenden Spannglieder muß vor der magnetischen Spannstahtbruchortung hinreichend genau bekannt sein. Was hinreichend genau ist, ist davon abhängig, welche Betondeckung c diese Spannglieder haben und in welchem gegenseitigen Abstand sie angeordnet sind.

Die Geräte, Elektromagnet und Meßwagen, sollten idealerweise exakt entlang der Projektionslinie des zu untersuchenden Spannglieds auf die Betonoberfläche, von der aus gemessen wird, geführt werden. Abweichungen der Trajektorie der Geräte von dieser Linie haben die folgende Effekte:

- Für den Magnetisierungsprozeß bleiben Abweichungen von bis zu 10 cm zur Projektionslinie des Spannglieds ohne negative Auswirkungen auf dessen Magnetisierung, wobei die Nebenbedingung erfüllt sein muß, daß kein anderes Spannglied dem Magneten näher oder annähernd gleich nah gelegen ist. Größere Abweichungen der Fahrlinie des Magneten von der Ideallinie wurden nicht untersucht, weil die Messung der magnetischen Flußdichte engere Grenze setzt.
- Bei Abweichungen der Fahrlinie des Meßwagens von seiner Ideallinie ist der Abfall der Bruchsignalstärke mit zunehmender Entfernung des Sensors von der Quelle des magnetischen Streufelds zu berücksichtigen sowie die Anordnung der einzelnen Hallsonden im Sensorwagen. Jeweils fünf Hallsonden zur Messung der transversalen und der axialen Komponenten der magneti-

schen Flußdichte sind nebeneinander auf einer Breite von 65 mm angeordnet. Bei Abweichungen der Fahrlinie des Meßwagens von der Projektionslinie des Spannglieds auf die Betonoberfläche von mehr als 33 mm liegen also alle Hallsonden neben der Achse des Spannglieds. Jede Abweichung Δ über diese 33 mm hinaus führt, wenn das Spannglied idealisiert als Linie angenommen wird, zur Schwächung des Bruchsignals, das die Sonde mißt, die der Ideallinie am nächsten ist. Der Grad der Schwächung läßt sich unter Beachtung des räumlichen Abfalls des Bruchsignals (Gleichung (2.3.2-8)) mithilfe von (3.2-1) abschätzen zu

$$\frac{BSS(\Delta)}{BSS_{\max}} = \left(\frac{c + \delta}{\sqrt{(c + \delta)^2 + \Delta^2}} \right)^{1,75} \quad 3.2-1$$

mit

$BSS(\Delta)$: Bruchsignalstärke, die die Sonde mißt, die der Ideallinie am nächsten liegt und einen Abstand von Δ zu dieser hat,
 BSS_{\max} : Bruchsignalstärke, die von einer Sonde gemessen würde, die exakt entlang der Projektionslinie geführt wird.
 $c+\delta$: Abstand des Sensors von der Bruchstelle (Kap. 2.3.2).

Die Abschätzung zeigt, daß eine Abweichung der Fahrlinie des Meßwagens von der Ideallinie die gemessene Bruchsignalstärke umso stärker beeinflusst, je kleiner die Betondeckung des Spannglieds ist. Mit zunehmender Betondeckung ist also eine zunehmende Abweichung tolerierbar. Bei kleinen Betondeckungen c sollte die Abweichung nicht mehr als 4 cm betragen. Auch bei der Messung der Flußdichte gilt natür-

lich, daß das benachbarte Spannglied ausreichend weit entfernt sein müssen, damit die von ihnen im Falle von Spannstahlbrüchen ausgehenden Streufelder von den Streufeldern des zu untersuchenden Spannglieds unterschieden werden können.

Wenn größere als die genannten Abweichungen der Lage der Spannglieder von ihrem plangemäßen Verlauf nicht mit hoher Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen werden können bzw. wenn keine verlässlichen Angaben über den Spanngliedverlauf vorliegen, ist die Lokalisierung der Spannglieder vor Durchführung der Spannstahlbruchortung unumgänglich. Vor Beginn der Messungen mit dem Remanenzmagnetismusverfahren werden dann die Spannglieder mit dem Radarverfahren geortet und eingemessen (Abb. 9-15).

Bei Fertigteilbindern kann in der Regel auf eine Radarortung verzichtet werden. Bei Bauteilen, die vorort hergestellt wurden, ist hingegen normalerweise eine Radarortung erforderlich. Das gilt insbesondere, wenn die Spannstahlbruchortung von einer Bauteilseitenfläche dem gekrümmten Verlauf des Spannglieds folgend durchgeführt wird.

Schwankungen in der Betondeckung beeinflussen die Bruchortung, dann, wenn sie nicht zu groß werden, nicht. In der Abschätzung des Schadensumfangs ist die Betondeckung allerdings ein wichtiger Parameter. Abweichungen von der plangemäßen Betondeckung müssen, wenn sie nicht exakt bekannt sind, in die Abschätzungen mit einbezogen werden.

3.3 Der Einfluß der Störsignale

Die Störsignale, die am Bauwerk auftreten, sind hauptsächlich auf die Stahlbetonbewehrung zurückzuführen. Auch andere einbetonierte ferromagnetische Gegenstände, wie Werkzeuge, Nägel, Drähte usw. führen zu Störsignalen. Ob und wann, wo sich letztgenannte Störquellen in Bauteil befinden, ist vor der Untersuchung nicht bekannt. Das gilt aber häufig auch für Störungen, die von der Stahlbetonbewehrung ausgehen. Die Baupläne der zu untersuchenden Bauteile sind gelegentlich nicht mehr auffindbar, so daß keine Informationen darüber vorliegen, wo die Stahlbetonbewehrung gestoßen ist oder wo Bewehrungsstäbe enden. Stöße und Enden der Stahlbetonbewehrung sind eine häufige Ursache für Störsignale. Auch wenn Bewehrungspläne vorliegen, sind die Maße oftmals nur sehr grob eingehalten worden oder es wurde zusätzliche Bewehrung eingebaut, die in den Plänen nicht auftaucht.

Zur Demonstration des Einflusses der Störsignale zeigen wir Kurven aus Labormessungen, die nach wiederholten Magnetisierungsfahrten mit abnehmender Feldstärke gemacht wurden. Die Störsignale sind bereits relativ klein, haben aber noch ihre charakteristischen Formen.

Die Meßkurven zeigen wieder die zur Spanngliedrichtung transversale Komponente der magnetischen Flußdichte, die knapp über der simulierten Betonoberfläche (Oberfläche des Obertischs des Versuchstands (Abb. 9-3)), gemessen wurde.

Abb. 3-1 zeigt die Meßkurve, nachdem eine Magnetisierungsprozedur bis hinab zu kleinen

Spulenströmen des jochförmigen Elektromagneten (Kap. 2.1.2) durchgeführt worden war (Kap. 2.2). Das Maximum am Anfang der Kurve und das Minimum am Ende der Kurve sind auf die Polbereiche des magnetisierten Spannglieds zurückzuführen. Die Betondeckung des Spannglieds beträgt $c = 75$ mm. Es besteht aus 16 vergüteten Spanndrähten mit einem Durchmesser $d = 7,2$ mm.

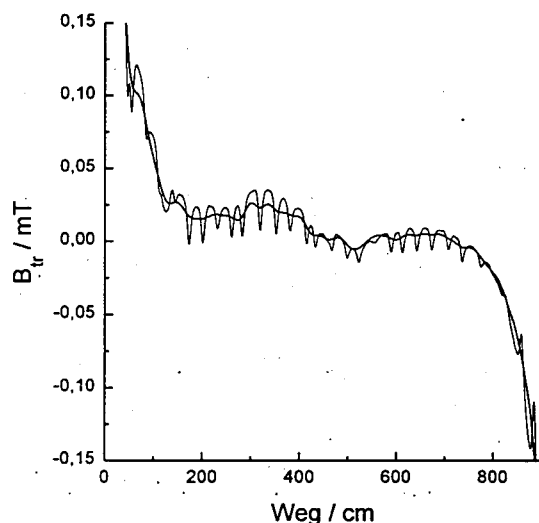


Abb. 3-1 Meßkurve mit Störsignalen, hervorgerufen durch Stahlbetonbewehrung. Die schmalen nach unten gerichteten Peaks werden durch Bügel hervorgerufen. Der Verlauf der Einhüllenden der Kurve wird durch das Spannglied, die Längsbewehrung und Unregelmäßigkeiten in der Bügelanordnung geprägt. Dargestellt ist die Meßkurve im Rohzustand (dünn) und nachdem sie einen Tiefpaßfilter durchlaufen hat (dick).

Die schmalen, nach unten gerichteten Peaks entlang der dünn gezeichneten Kurve sind Störsignale, die von der Bügelbewehrung ausgehen. Die Bügel sind aus einem BSt 550 S mit einem Durchmesser von $d = 6$ mm. Sie haben einem mittleren Abstand von $s \approx 30$ cm. Die

Abstände benachbarter Bügel weichen mehr oder weniger stark von diesem Wert ab, so, wie es an realen Bauteilen der Fall ist. Die Betondeckung der Bügel schwankt zwischen $c = 25$ mm und $c = 35$ mm.

Am Anfang der Meßstrecke befindet sich ein Einzelstab (Stahl I) mit einem Durchmesser von $d = 25$ mm, der im spitzen Winkel zum Spannglied angeordnet ist und eine Betondeckung von etwa $c \approx 40$ mm hat. Er hat eine Länge von $l = 120$ cm. Die Magnetisierung des Bewehrungsstabs ist im dargestellten magnetischen Zustand der Magnetisierung des Spannglieds gleichgerichtet, liegt aber deutlich unter der remanenten Magnetisierung (Kap. 2.2.3). Durch die Magnetisierung des Stabs bildet sich etwa bei 60 cm ein zusätzlicher Nordpol und bei 130 cm ein zusätzlicher Südpol aus. Der Nordpol (positive Flußdichte) macht sich nur durch einen Wendepunkt in der geglätteten Kurve bemerkbar, weil er durch die hohe Flußdichte, hervorgerufen durch das Ende des Spannglieds, überlagert wird.

Zwischen dem Spannglied und der Betonoberfläche sind parallel zum Spannglied zwei weitere Stäbe (BSt 420 S) mit dem Durchmesser $d = 12$ mm angeordnet. Sie haben eine Betondeckung von $c \approx 40$ mm und überlappen sich auf einer Länge von $l = 200$ cm. Der Anfang des Überlappungsstoßes liegt 300 cm hinter dem Startpunkt der Meßfahrt, das Ende 500 cm hinter dem Startpunkt. Die Stäbe sind wie der Einzelstab in diesem Magnetisierungszustand gleichgerichtet dem Spannglied magnetisiert. Die Signale, die der Überlappungsstoß erzeugt, ähneln den Signalen, die ein Einzelstab erzeugt. Es kommt beim Überlap-

pungsstoß allerdings nicht zu einer so starken Polverschiebung bei unterschiedlichen Fahrtrichtungen des Jochmagneten wie beim Einzelstab (Kap. 2.2.3). Der Überlappungsstoß erzeugt bei der Meßkurve in Abb. 3-1 einen zusätzlichen Nordpol etwa bei 310 cm und einen zusätzlichen Südpol etwa bei 510 cm hinter dem Startpunkt der Messung.

Die dick gezeichnete Kurve ist die geglättete Kurve, die sich ergibt, wenn die Meßkurve durch einen Tiefpaß gefiltert wird, d. h. alle Anteile der Meßkurve, die kurzwelliger als vorgegebene Wellenlänge sind gleich Null gesetzt werden (Kap. 5.2.2). Diese Methode ist recht nützlich, um die schmalen Bügelsignale auszublenden. Die längerwelligen Bruchsignale und Störsignale von der Längsbewehrung bleiben erhalten. Diese Kurvenglättung erleichtert die Interpretation enorm, muß jedoch mit einer gewissen Vorsicht angewandt werden, weil spezielle Schwankungen des Bügelabstands auch zu bruchartigen Signalen der geglätteten Kurve führen.

Um die Meßkurve auf Bruchsignale zu untersuchen, muß höher verstärkt werden. Abb. 3-2 zeigt den Ausschnitt der Meßkurve aus Abb. 3-1 auf der Strecke von 150 cm bis 650 cm hinter dem Startpunkt. Die magnetische Flußdichte ist in dieser Abbildung um den Faktor 7,5 gegenüber der vorherigen Abbildung vergrößert dargestellt.

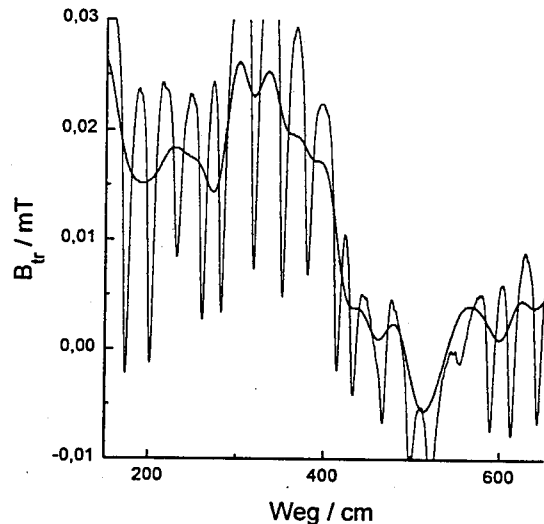


Abb. 3-2 Vergrößerter Ausschnitt der in Abb. 3-1 dargestellten Meßkurve. Das lokale Maximum etwa bei 300 cm und das lokale Minimum bei 500 cm werden durch einen Überlappungsstoß von einer Längsbewehrung zwischen Spannglied und Betonoberfläche hervorgerufen. Dargestellt ist die Meßkurve im Rohzustand (dünn) und nachdem sie einen Tiefpaßfilter durchlaufen hat (dick).

Im folgenden werden wir uns zunächst auf die Diskussion der geglätteten Kurve beschränken. Die Signale des Überlappungsstoßes sind jetzt sehr deutlich erkennbar. Als Bruchsignale kommen eine Reihe von Signalen in diesem Kurvenabschnitt in Frage. Jede Folge eines lokalen Maximums auf ein lokales Minimum ist ein bruchartiges Signal. Dazu gehören auch die Signale, die durch den Stoßanfang und durch das Stoßende erzeugt werden. Bei einiger Erfahrung in der Signalinterpretation erkennt man zwar, daß es sich hier um die Signale eines Überlappungsstoßes handelt, sie könnten aber Bruchsignalen überlagert sein. Außerdem finden sich in diesem Meßkurvenabschnitt weitere bruchartige Signale, deren Ursache noch unklar ist.

Benötigt werden weitere Informationen, die man erhält, indem die magnetische Flußdichtekomponente B_{tr} gemessen wird, wenn sich das Spannbetonbauteil in einem anderen magnetischen Zustand befindet. Genauer gesagt, wird die Magnetisierung der Stahlbetonbewehrung geändert ohne nennenswerte Änderung der Magnetisierung des Spannglieds. Das wird erreicht, indem mit einem entgegengerichteten externen Feld magnetisiert wird, das zu schwach ist, die Magnetisierung des Spannglieds nennenswert zu ändern, aber stark genug ist, die Magnetisierung des Betonstahls aufzuheben oder umzupolen (Kap. 2.2). Die Feldstärke des Magneten so zu wählen, daß die Magnetisierung der Stahlbetonbewehrung exakt aufgehoben wird, ist am Bauwerk nicht möglich, da die Bewehrung keine exakt definierte bzw. bekannte und überall gleiche Betondeckung hat und auch die Koezitivfeldstärke der Betonstähle zu stark schwankt. Die Magnetisierung der Betonstähle stark zu verändern ohne die Magnetisierung des Spannstahls nennenswert zu beeinflussen, ist aber durchaus möglich.

Abb. 3-3 zeigt den Verlauf der transversalen Flußdichtekomponente B_{tr} der gleichen Bewehrungsanordnung in einem anderen magnetischen Zustand. Er wurde, ausgehend von dem vorherigen Zustand (Abb. 3-2), erzeugt, indem die Bewehrungsanordnung mit einem umgekehrt gerichteten externen Feld sukzessive bis herab zu sehr kleinen Feldstärke magnetisiert wurde. Begonnen wurde diese Magnetisierungsprozedur mit einem Spulenstrom von $I_s = -2,5$ A. Die mit diesem Spulenstrom erzeugte Feldstärke im Spannglied reicht nicht

aus um dessen magnetischen Zustand nennenswert zu beeinflussen.

Die Signale des Überlappungsstoßes sind fast verschwunden. Der Endpol des Überlappungsstoßes ist vom Südpol zu einem schwächeren Nordpol geworden. Die Magnetisierung der Stahlbetonbewehrung wurde also erheblich verändert.

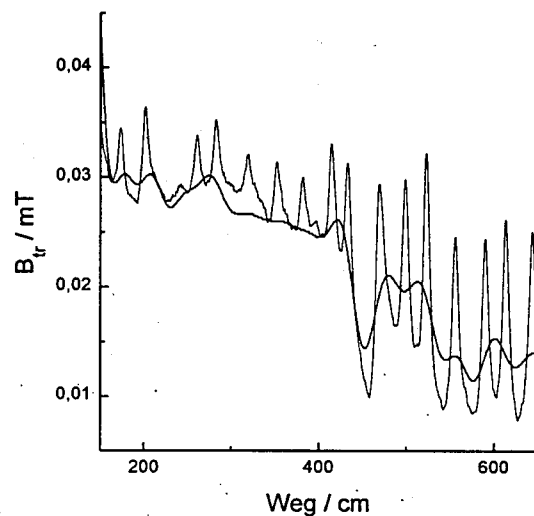


Abb. 3-3 Der Flußdichteverlauf an der Betonoberfläche nachdem die Bewehrungsanordnung mit einem schwachen Gegenfeld magnetisiert wurde. Dargestellt ist die Meßkurve im Rohzustand (dünn) und nachdem sie einen Tiefpaßfilter durchlaufen hat (dick).

In diesem Zustand sind nur noch zwei stärkere bruchartige Signale zu erkennen, eins bei etwa 470 cm und eins bei etwa 580 cm hinter dem Startpunkt. Das zweite Signal wird durch eine Unregelmäßigkeit im Bügelabstand und der Betondeckung der Bügel hervorgerufen. Dafür sprechen erstens die Bügelsignale an sich und zweitens der umgekehrte Verlauf dieses Signals in der Meßkurve in Abb. 3-2, als die Bügel in umgekehrter Richtung magnetisiert waren.

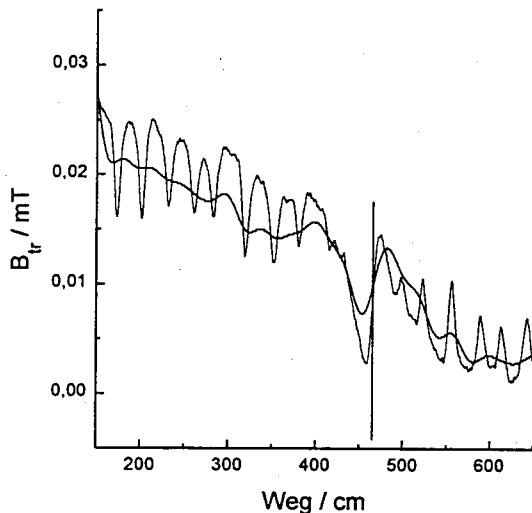


Abb. 3-4 Der Flußdichteverlauf, der sich ergibt, wenn nach der Gegenfeldmagnetisierung die Bewehrungsanordnung einem magnetischen Wechselfeld ausgesetzt wird. Dargestellt ist die Meßkurve im Rohzustand (dünn) und nachdem sie einen Tiefpaßfilter durchlaufen hat (dick).

Um letzte Unklarheiten zu beseitigen, wird eine weitere Meßkurve (Abb. 3-4) aufgenommen, nachdem eine Magnetisierungsfahrt mit einem magnetischen Wechselfeld durchgeführt wurde. Das Wechselfeld nimmt durch die Bewegung des Magneten an einem Punkt des Systems zunächst langsam zu, wird maximal, wenn der Magnet am nächsten ist und nimmt dann langsam ab. Es wirkt damit entmagnetisierend, allerdings nicht auf den Spannstahl, dessen Koerzitivfeldstärke zu hoch ist (Kap. 2.4.5), und der auf seiner gesamten Länge aufmagnetisiert ist (Kap. 2.2.2).

Nur ein bruchartiges Signal bleibt übrig. Der Wendepunkt befindet sich 467 cm hinter dem Startpunkt. An dieser Stelle ist einer der 16 Spanndrähte gebrochen (aufgetrennt). Er liegt auf der Seite des Spannglieds, die der Beton-

oberfläche zu gewandt ist. Dieses Bruchsignal war in der ersten Meßkurve (Abb. 3-2) von dem Signal des Endpolbereich des Überlappungsstoßes stark überlagert worden. Erst die Kenntnis der Flußdichteverteilung eines anderen magnetischen Zustands erlaubte es, auf einen Bruch zu schließen. Die Bügelsignale der letzten Messung (Abb. 3-4) sind ein anschauliches Beispiel dafür, wie sich die Magnetisierungen der Ferromagnetika gegenseitig beeinflussen. Die Magnetisierungsrichtung der Bügel ist nur noch durch das Spannglied und die Längsbewehrung beeinflusst. Die Bügelsignale zeigen bis etwa 400 cm hinter dem Startpunkt nach unten und danach noch oben, entgegengesetzt zur Flußdichtekomponente, die (hauptsächlich) auf das Spannglied zurückzuführen ist. Wegen dieser Wechselwirkung kann die Flußdichte, die durch einzelne Bewehrungsstäbe oder Spannglieder erzeugt wird, auch nicht linear superponiert werden, um den Verlauf der Flußdichte zu erhalten, der entstünde, wenn man diese Einzelteile in einem System arrangiert.

Weitere typische Störquellen sind Enden von Stahlbetonbewehrungsstäben. Sie erzeugen keine Kombination von lokalem Maximum und lokalem Minimum, sondern nur ein lokales Extremum, das, bei gleichem Durchmesser des Betonstahls, gleicher Magnetisierung und gleicher Betondeckung etwas stärker ausgeprägt ist als die Extrema die durch einen Überlappungsstoß erzeugt werden.

Hüllrohrmuffen und Löcher in Hüllrohren erzeugen ebenfalls Störsignale, die allerdings so schwach sind, dass keine Verwechslungsgefahr mit Bruchsignalen besteht.

Einbetonierte Stahlplatten (Ankerplatten) erzeugen starke Störungen. Sind sie nicht sichtbar, werden sie meist beim Magnetisieren entdeckt, weil der Elektromagnet an ihnen haften bleibt. Abgesehen von den technischen Schwierigkeiten beim Magnetisieren sind sie so dick, das sie ein Bruchsignal abschirmen würden. Eine Interpretation der Messung im Bereich der Stahlplatten ist nicht möglich. Das gleiche gilt für einbetonierte Halfenschienen, die sich zwischen dem Elektromagneten bzw. dem Meßwagen und dem zu untersuchenden Spannglied befinden. Koppelstellen von Spanngliedern müssen ebenfalls von der Signalinterpretation ausgenommen werden.

Einbetonierte Nägel, Drähte usw. haben in der Regel eine so kleine räumliche Ausdehnung, daß die Signale durch den Tiefpaß (Kap. 5.2.2) herausgefiltert werden.

Bei der Untersuchung von Deckenplatten auf Spanndrahtbrüche wurden einmal, zwar nicht bruchartigen, aber doch starken, unerklärlichen Signale gemessen. Ursache war Betonstahl, der auf der Oberseite der Platten gelagert wurde, während von der Unterseite aus die Messungen durchgeführt wurden. Gerade bei dünnen Bauteilen sollte die gegenüberliegende Seite auf Störquelle untersucht werden.

Je nach Kompliziertheit der Meßkurven bzw. je nach Anzahl und Stärke der Störsignale ist die Kenntnis unterschiedlicher magnetischer Zustände des Gesamtsystems erforderlich. Je stärker die Störungen, desto größer wird auch der Auswertungsaufwand. Ein Teil dieser Arbeit kann zwar numerisch auf dem Rechner durchgeführt werden, aber in kritischen Fällen kann die Entscheidung, ob ein Signal auf einen

Bruch hindeutet, nicht aus einigen generell gültigen Kriterien abgeleitet werden. Der Programmieraufwand, um allen Kriterien gerecht zu werden, wäre sehr hoch. Entsprechend groß wäre die sich ergebenden Rechenzeit für die Auswertung.

Die Auswertung von Messungen, die an sehr maßhaltig ausgeführten Bauteilen, durchgeführt werden, sind in der Regel nicht aufwendig. Zu diesen Bauteilen gehören zum Beispiel einteilige Fertigteilbinder.

Sind Fertigteilbinder allerdings aus mehreren Abschnitten zusammengesetzt, ist die Signalinterpretation im Bereich der Stoßfugen aufwendig. Hier stößt die Stahlbetonbewehrung der Einzelteile. Allein aufgrund der Menge der stoßenden Längsbewehrung werden hier relativ starke bruchähnliche Signale erzeugt. Die von der Stahlbetonbewehrung erzeugten Signale lassen sich zwar durch geeignete Magnetisierung mit einem Gegenfeld verringern bzw. umkehren, doch es bleibt das Problem der Überlagerung des Signals mit dem eines Spanndrahtbruchs in der Fuge. Gerade die Fugen sind aber die Schwachstellen dieser Bauteile, wenn der Grund für den Spannstahtbruch das Eindringen von korrosionsfördernden Stoffen von außen ist. Die Signale im Bereich solcher Fuge müssen sehr aufwendig analysiert werden. Meßkurven, die in mehreren unterschiedlichen magnetischen Zuständen aufgenommen werden, sind erforderlich.

Besondere Schwierigkeiten können bei der Untersuchung von Querspanngliedern in den Fahrbahnplatten von Brücken auftreten. In einem Fall, es handelt sich dabei um eine

Brücke, die aus den 50er Jahren stammt, verliefen die Querspanngliedern der Fahrbahn, die eigentlich in gleichmäßigem Abstand parallel zueinander hätten angeordnet sein sollen, teilweise in der Fahrbahnebene sehr stark gekrümmt. Werden solche Spannglieder nicht in einem Abstand von maximal 3 m entlang ihrer Trajektorie geortet, ist die Wahrscheinlichkeit hoch, daß man in Bereichen magnetisiert und die magnetische Flußdichte mißt, in denen das Spannglied gar nicht verläuft.

Bei einer anderen Brücke, in der die Querspannglieder sehr regelmäßig angeordnet waren, galt dies nicht für die Stahlbetonbewehrung. Die Abstände der Bewehrungsstäbe schwankten stark. Teilweise lagen sie dicht aneinander. Es gab sehr viele freie Enden von Bewehrungsstäben, die, bei der damals von uns noch angewandten Magnetisierungstechnik, starke Störsignale erzeugten. Die Auswertung der Meßdaten von fast 100 untersuchten Spanngliedern zog sich über mehrere Wochen hin und war nicht fehlerfrei. In einem der Bereiche, in denen der chloridbelastete Beton entfernt werden mußte, fand man einen Spanndrahtbruch, den wir nicht identifiziert hatten. Die Meßkurven zeigten an dieser Stelle zwar ein starkes Signal, das jedoch fälschlicherweise als ein Signal, das von Enden der Stahlbetonbewehrung herrührt, interpretiert wurde. Tatsächlich stießen in unmittelbarer Umgebung der Bruchstelle exakt auf gleicher Höhe zwei Stahlbetonbewehrungsstäbe. Ein dritter Bewehrungsstab überlappte die Bruchstelle und endete knapp hinter ihr (Abb. 9-16). Der Pol, der sich auf der Seite von der Bruchstelle im Spannstahl ausbildet, auf der der Bewehrungsstab endete, ist dem Endpol des Beweh-

rungsstabs entgegengesetzt. Die beiden Pole hoben sich teilweise auf.

Die Magnetisierungstechnik, die zur Zeit der Untersuchung angewandt wurde, unterdrückte die Störsignale nicht ausreichend stark, so daß es zu dieser Fehlinterpretation kam. Damals wurde vier Messungen pro Spannglied durchgeführt. Zunächst wurde der Spannstahl mit- samt der umgebenden Stahlbetonbewehrung aufmagnetisiert und die Flußdichte gemessen. Dann wurde die Magnetisierung der Stahlbetonbewehrung einem magnetischen Wechsel- feld geschwächt und die Flußdichte erneut gemessen. Die Querbewehrung wurde dann durch Umkehr der Fahrtrichtung des Magneten umgepoilt (Kap. 2.2.3) und es wurde eine dritte Messung durchgeführt. Nach erneuter Schwächung der Magnetisierung der Stahlbetonbe- wehrung durch ein magnetisches Wechselfeld wurde die vierte Messung durchgeführt. Das Signal an der Bruchstelle hatte durch die Ent- magnetisierung stark abgenommen, weil es teilweise durch den Betonstahlstoß und das Ende eines Längsbewehrungsstabs erzeugt wurde. Deswegen wurde es als Signal inter- pretiert, daß aus dem Stoß von Stahlbetonbe- wehrungsstäben resultiert. Die damals ange- wandte Magnetisierungstechnik war der Störsi- gnaldichte in einigen Bereichen dieses Bau- werks nicht gewachsen.

Mit der inzwischen angewendeten Magnetisie- rungstechnik sind die Störsignale wesentlich kleiner, weil die Stahlbetonbewehrung nicht so stark magnetisiert wird, während die Magneti- sierung des Spannstahls maximal ist. Darüber hinaus ist es mit der jetzigen Methode möglich, die Stahlbetonbewehrung gezielt zumagne-

tisieren ohne die Magnetisierung des Spannstahls nennenswert zu beeinflussen.

Die jetzige Magnetisierungstechnik hat den Nachteil, daß sie sehr viel aufwendiger ist als die früher angewandte. Während früher vier Magnetisierungsfahrten und vier Meßfahrten pro Spannglied durchgeführt wurden, sind es heute je nach Schwierigkeitsgrad bis zu 30 Magnetisierungsfahrten und 20 Meßfahrten. In der Regel sind es 24 Magnetisierungsfahrten und 13 Meßfahrten. Dieser Nachteil wiegt die Vorzüge der jetzigen Methode allerdings nicht auf, denn die Aussagesicherheit ist in schwierigen Fällen höher.

Der Mehraufwand ist insgesamt gesehen nicht so hoch, wie es auf den ersten Blick erscheinen mag, da die Installation der Führungssysteme für die Geräte mehr Zeit beansprucht als die Messung an sich. Nur bei der Untersuchung von Spanngliedern in Fahrbahnplatten ist der Mehraufwand nennenswert, weil hier kein Führungssystem installiert werden muß. Gerade in diesem Fall ist die alte Methode jedoch nicht ausreichend, angesichts der zu erwartenden Anzahl und Stärke der Störsignale.

4 Magnetostatische Berechnungen auf Grundlage der Maxwell-Gleichungen

4.1 Die Maxwell-Gleichungen

Die Theorie der elektromagnetischen Erscheinungen wird durch die Maxwell-Gleichungen mathematisch formuliert. Die Gleichungen lauten:

$$\nabla \times \underline{H} = \frac{\partial \underline{D}}{\partial t} + \underline{j} \quad 4.1-1$$

$$\nabla \times \underline{E} = -\frac{\partial \underline{B}}{\partial t} \quad 4.1-2$$

$$\nabla \cdot \underline{D} = \rho \quad 4.1-3$$

$$\nabla \cdot \underline{B} = 0 \quad 4.1-4$$

mit:

H: Magnetische Feldstärke

D: Elektrische Verschiebung, definiert durch

$$\underline{D} = \epsilon_0 \underline{E} + \underline{P}, \text{ mit} \quad 4.1-5$$

P: Polarisation und

ϵ_0 : Dielektrizitätskonstante

j: Stromdichte

E: Elektrische Feldstärke

B: Magnetische Flußdichte, definiert durch

$$\underline{B} = \mu_0 (\underline{H} + \underline{M}), \text{ mit} \quad 4.1-6$$

M: Magnetisierung und

μ_0 : Induktionskonstante

ρ : Elektrische Ladungsdichte.

(Die Magnetisierung M ist hier etwas anders definiert als in Gleichung (1.6-2) in der Einleitung. Physikalisch ändert sich dadurch nichts; für theoretische Betrachtungen ist die Definition in (4.1.6) praktischer.)

Die ersten beiden Gleichungen vereinfachen sich im statischen Fall zu

$$\nabla \times \underline{H} = \underline{j} \quad 4.1-7$$

und

$$\nabla \times \underline{E} = 0. \quad 4.1-8$$

Betrachtet man nur die magnetischen Feldgrößen und nimmt an, daß keine Ströme fließen ($\underline{j} = 0$), bleiben die beiden folgenden Gleichungen übrig:

$$\nabla \times \underline{H} = 0 \quad 4.1-9$$

und

$$\nabla \cdot \underline{B} = 0. \quad 4.1-10$$

In Worten ausgedrückt sagen sie aus, daß die magnetische Feldstärke H keine Wirbel hat, und die magnetische Flußdichte B keine Quellen hat. Die beiden Gleichungen beinhalten keine weiteren Aussagen über die beiden Felder B und H. Die Aussagen der vollständigen Maxwell-Gleichungen sind ähnlich elementar.

Aus Gleichung 4.1-9 ist sofort ersichtlich, daß H in diesem Fall, wie alle wirbelfreien Vektorfelder, auf ein skalares Potential, das magnetostatische Potential Ψ , zurückgeführt werden kann:

$$\underline{H} = -\nabla \Psi. \quad 4.1-11$$

Aus 4.1-10 folgt mit 4.1-6 und 4.1-11 die Differentialgleichung

$$\Delta \Psi = \nabla \cdot \underline{M},$$

mit der Lösung

$$\Psi(\underline{r}) = \frac{1}{4\pi} \iiint \frac{(\nabla \cdot \underline{M})(\underline{r}')}{|\underline{r} - \underline{r}'|} d^3 \underline{r}' \quad 4.1-12$$

oder in Analogie zur Elektrostatik als eine Funktion der magnetischen Ladungsdichte ρ_m und des Orts \underline{r}

$$\Psi(\underline{r}) = \frac{1}{4\pi} \iiint \frac{\rho_m(\underline{r}')}{|\underline{r} - \underline{r}'|} d^3 \underline{r}' \quad 4.1-13$$

Neben den elementaren Aussagen der Maxwell-Gleichungen stecken weitere Zusammenhänge in den Verknüpfungsgleichungen xyz, mit den stoffabhängigen Größen M und P, deren Abhängigkeiten von der Geometrie, dem Spannungszustand und der Vorgeschichte der Materialien bei ferromagnetischen bzw. ferroelektrischen Stoffen äußerst komplex sind. Sie sind noch nicht einmal vollständig verstanden. Weitere Informationen stecken in den Anfangs- bzw. in den Randbedingungen des Systems. Sind die stofflichen Größen und Abhängigkeiten, sowie ausreichend viele Rand- bzw. Anfangsbedingungen bekannt, können die Differentialgleichungen eindeutig gelöst werden und die Felder prinzipiell vollständig berechnet werden. Analytisch ist das nur für sehr spezielle einfache Fälle möglich. Alle anderen Fälle können nur numerisch berechnet werden.

Die Lösung des inversen Problems, die Berechnung der räumlichen Verteilung der magnetischen Quellen $\nabla \cdot \underline{M}(\underline{r})$ aus der Kenntnis des magnetostatischen Potentials $\Psi(\underline{r}')$ bzw. der magnetischen Feldstärke $H(\underline{r}')$ oder der Flußdichte $B(\underline{r}')$ ist nicht möglich, wenn die drei letztgenannten Größen nicht im ganzen räumlichen Gebiet, das die magnetischen Quellen $\nabla \cdot \underline{M}(\underline{r})$ einschließt, bekannt sind. Das magne-

tostatische Potential ist nämlich eine integrale Größe (Gleichung 4.1-12). Verschiedene magnetischen Quellen $\nabla \cdot \underline{M}(\underline{r})$ können das gleiche Potential erzeugen. Da eine invasive Messung der Größen (im Beton) nicht möglich ist kann eine Lösung nur dann konstruiert werden, wenn einschränkende Annahmen über die räumliche Verteilung der magnetischen Quellen $\nabla \cdot \underline{M}(\underline{r})$ gemacht wird. Das ist bei Bauwerksuntersuchungen mit möglich, weil die exakte Kenntnisse der Lage aller Ferromagnetika fehlen.

4.2 Numerische Berechnungen und mathematische Modelle

Für die Feldberechnungen wurde die kommerzielle Software PROFI genutzt.

Der Grundstein für das Programmsystem PROFI (program for calculation of fields) wurde vor ca. 20 Jahren an der Technischen Hochschule Darmstadt gelegt. Von Elektroingenieuren entwickelt, war es in seiner Grundkonzeption für die Entwicklung und Optimierung von Kraftwerksgeneratoren ausgelegt. Das Anwendungsspektrum erstreckt sich heute auf die Berechnung von statischen und zeitabhängigen Magnetfeldern, stationären Wirbelstromfeldern, elektrostatischen Feldern, elektrischen Strömungsfeldern und Temperaturfeldern jeweils in zwei oder drei Dimensionen.

Zur Berechnung elektromagnetischer Feldverteilungen die Maxwell-Gleichungen auf numerischem Wege gelöst. Dazu verwendet das Programmsystem iterative Methoden. Die Genau-

igkeit der Berechnung ist vom Nutzer über die Feinheit der Diskretisierung und Anzahl der Iterierungsschritte festzulegen.

Bei der Berechnung von magnetischen Feldern wird die Software im wesentlichen zur Berechnung geschlossener magnetischer Kreise eingesetzt. Sie ist damit unserer Problemstellung, der Berechnung von Feldern, die durch isolierte ferromagnetische Materie hervorgerufen wird, schlecht angepaßt. Software, die unserer Problemstellung angemessener ist, ist andererseits unseres Wissens nicht im Markt.

Die Maxwell-Gleichungen können sowohl mit der Methode finiter Differenzen als auch der Methode finiter Elemente für die zu berechnende Verteilung von Ferromagnetika gelöst werden.

Das Programmsystem generiert nach Eingabe der Gitterlinien ein Netz, daß so optimiert ist, daß das zugehörige Gleichungssystem eine Blockstruktur aufweist. Zur Lösung dieses Gleichungssystems werden iterative Methoden verwendet, die die Blockstruktur des Gleichungssystems ausnutzen. Es wird das Einzelschrittverfahren nach Gauss-Seidel angewandt, das über die Angabe von Berechnungszyklen oder Abbruchkriterien gesteuert werden kann.

Die Software wurde von uns an einfachen Geometrien getestet. Zunächst wurde versucht, die magnetische Flußdichte in einem Eisenstab und einem elektromagnetischen Joch zu berechnen, die sich in verschiedenen Abständen zu einander befinden, wobei durch die Spulen des Jochs unterschiedliche Stromstärken fließen. Der Stab hatte einen quadratischen Querschnitt der Fläche $a = 4 \text{ cm}^2$. Der

Jochmagnet hatte die Abmessungen des in Kap. 2.1.2 beschriebenen realen Jochmagneten. Die Verteilung des Betrags der magnetischen Flußdichte ist in der Anlage III dargestellt (Abb. 10-1, Abb. 10-2). Der Abstand des Stabs zu den Polschuhen des Magneten betrug 2,5 cm. Die Rechenzeit für diese Simulation betrug auf einer Workstation etwa 8 Stunden.

Das Resultat ist schlecht. Bereits einfache Symmetriebetrachtungen zeigen, daß die Flußdichteverteilung noch weit von der realen Flußdichteverteilung, die sich bei dieser Anordnung einstellt entfernt ist. Messungen der Flußdichte in Bruchstellen von Stählen in Abhängigkeit von der Position des Magneten sind in Kap. 2.2 beschrieben. Aus diesen Messungen läßt sich die wahre Flußdichteverteilung ableiten. Auch bei den anderen durchgeführten Simulationsrechnungen mit anderem Abstand des Magneten zum Stab waren die Ergebnisse ähnlich. Das Programm hat vermutlich Konvergenzprobleme bei offenen magnetischen Kreisen, so daß noch wesentlich längere Rechenzeiten erforderlich sind. Eine Fehlbedienung des Programms ist sehr unwahrscheinlich, da intensiv mit einem Mitarbeiter des Software-Herstellers zusammen gearbeitet wurde.

Nach Abschluß dieses Tests wurde das Feld eines gebrochenen magnetisierten Stabs berechnet. Der Stab hatte eine Seitenlänge von $s = 1 \text{ cm}$. Die Länge betrug $l = 20 \text{ cm}$. Der errechnete Kurvenverlauf der transversalen Komponente der magnetischen Flußdichte bei einer Bruchweite von $\delta = 1,25 \text{ mm}$ in einem Abstand von $z = 10 \text{ cm}$ von dem Stab ist in Abb. 4-1 dargestellt.

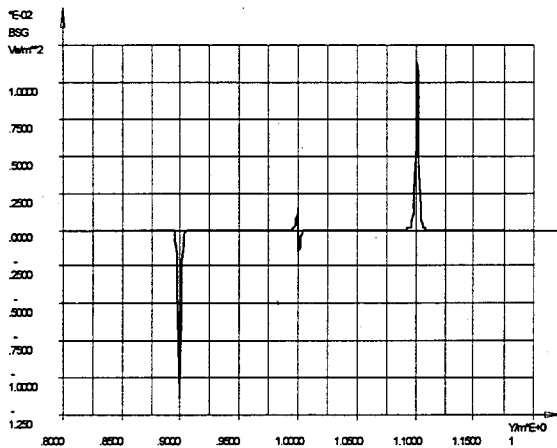


Abb. 4-1 Der berechnete Verlauf der transversalen Komponente der Flußdichte, erzeugt durch einen 20 cm langen, in der Mitte gebrochenen, magnetisierten Stab mit einem quadratischen Querschnitt, $A = 1 \text{ cm}^2$, in einer Entfernung von 10 cm. Die vorgegebene Bruchweite beträgt $\delta = 1,25 \text{ mm}$.

Dieses Ergebnis stimmt nur qualitativ mit den gemessenen Werten überein. Man hätte das gleiche Ergebnis erhalten, wenn man einfach mit vier magnetischen Punktladungen gerechnet hätte. Dieses Problem ist sogar einfach analytisch lösbar. Sowohl die Endpole, als auch der Bruch führen bei der numerischen Simulation zu viel zu schmalen Signalen. Das Bruchsignal ist darüberhinaus viel zu klein. Variiert man die Bruchweite in einem Bereich von $\delta = 0,25 \text{ mm}$ bis $\delta = 4,00 \text{ mm}$, geht die Bruchsignalstärke mit abnehmender Bruchweite annähernd linear gegen Null. Auch das steht in krassem Widerspruch zu den experimentellen Ergebnissen (Kap. 2.3).

Die Ursachen sind sicher nicht, daß die Messungen systematisch falsch durchgeführt wurden und selbstverständlich gelten die Maxwell-Gleichungen. Das Problem besteht vielmehr

darin, daß das ferromagnetische Werkstoffverhalten nicht korrekt berücksichtigt wird. Eine charakteristische Kenngröße ist die magnetische Permeabilität μ . Es reicht bei Berechnungen der Restfelder magnetisierter Proben nicht eine Permeabilität μ , die konstant ist oder in irgendeiner Form von der Feldstärke abhängig ist. Die Permeabilität, die in die Maxwell-Gleichungen eingeht, kann bei einem Ferromagneten gar nicht in einen allgemeingültigen funktionalen Zusammenhang mit anderen magnetischen Größen gebracht werden. Äquivalent dazu ist, daß die Magnetisierung \underline{M} eines endlichen Körpers, die beim Ferromagneten von einer Vielzahl von Faktoren abhängt, unter anderem von seiner Geometrie, die zu einem entmagnetisierenden Feld führt. Das wird bei den Feldberechnung mit der PROFI-Software offensichtlich nicht berücksichtigt, weil die Signale der Pole und der Bruchstelle sonst, wie in der Realität, viel breiter wären.

Werden Felder in geschlossenen magnetischen Kreisen berechnet, die entweder immer in der gleichen Größenordnung oder, noch besser, in der Nähe der magnetischen Sättigung liegen, kann bei bekannten Stoffeigenschaften ein annähernd richtiger, zumindest bereichsweise definierter Zusammenhang zwischen den magnetischen Größen angegeben werden. Für solche Berechnungen mag die benutzte Software sehr leistungsfähig sein. Für unsere Zwecke ist sie unbrauchbar.

Auch andere Forscher haben die Entwicklung theoretischer Modelle zur Berechnung der magnetischen Streufelder an Fehlstellen betrieben. Die Fehler wurden durch Aussparungen in einem homogenen magnetischen Mate-

rial modelliert. Die Begrenzungsflächen der Aussparungen, die nicht parallel zur Richtung des durchflutenden Felds liegen, werden als flächenhafte Dipolverteilungen angenommen, also mit einer magnetischen Flächenladungsdichte beaufschlagt [ZAT]. Das Bruchsignal, das sich bei einer Streufeldmessung bei aktiver Durchflutung ergibt, läßt sich so gut modellieren. Aktive Durchflutung heißt, daß das Werkstück durch einen extern erzeugten magnetischen Fluß Φ während der Messung des Streuflusses durchflutet wird, z. B. indem das Werkstück mit den Polen eines magnetischen Jochs in Kontakt gebracht wird. So entsteht ein quasigeschlossener magnetischer Kreis. Es herrschen ganz andere Bedingungen als bei der Messung des Streufelds einer Fehlstelle, das sich bei remanenter Magnetisierung des Werkstücks ausbildet. Bei aktiver Durchflutung mit einem konstanten magnetischen Fluß Φ , der in einer Größenordnung liegt, bei denen irreversible Magnetisierungsprozesse im Werkstück abgeschlossen sind, kann von einer annähernd homogenen Verteilung der magnetischen Permeabilität μ im Werkstück ausgegangen werden.

Shcherbinin und Pashagin nahmen zusätzlich zur flächenhaften Dipolverteilung eine Volumenverteilung an [SHC]. Sie wurde in der Umgebung der Fehlstelle als konstant angenommen. Eine Vorstellung, die der Dipolverteilung an einer Fehlstelle bei remanenter Verteilung bereits näher kommt. Die Annahme einer exponentiell abfallenden magnetischen Ladungsverteilung müßte ein weiter verbesserter Ansatz sein, wie die Meßwerte der magnetischen Flußdichte, die in der Umgebung einer Bruch-

stelle bei remanenter Magnetisierung aus der Mantelfläche austritt, zeigen (Tabelle 2-1). Mit dieser Modellvorstellung ließe sich sowohl der Verlauf des Bruchsignals, als auch die Abhängigkeit der Bruchsignalstärke von der Bruchweite modellieren (Kap. 2.3.2 und Kap. 2.3.3), wobei die exponentiell abfallende magnetischen Ladungsverteilung natürlich wieder eine Funktion der Bruchweite an sich ist. Die Arbeiten unsererseits dazu sind noch nicht abgeschlossen, aber die Zwischenergebnisse sind vielversprechend.

Ein großer Fortschritt war die Nutzung der Methode der finiten Elemente zur Berechnung der Streufelder [HWA]. Dobmann und Höller [DOB] leiten aus den Maxwell-Gleichungen die Feldgleichungen her, die die Streufeldberechnung mit Hilfe der Methode der finiten Elemente erlaubt. Für die Methode der aktiven Durchflutung stimmen die Ergebnisse gut mit entsprechenden Meßergebnissen überein.

Alle auf den Maxwell-Gleichungen basierenden Berechnungen mit homogener Verteilung der magnetischen Permeabilität im Werkstück, liefern das Ergebnis, daß das Bruchsignal mit abnehmender Bruchweite gegen Null geht. Die Annahme, daß die Bruchweite Null ist, ist gleichbedeutend damit, daß der Bruch gar nicht existent ist. Um Bruchsignale bei remanenter Magnetisierung mathematisch zu beschreiben, müßte die Permeabilitätsänderung in der Umgebung einer Bruchstelle mit einbezogen werden. Deren Berechnung ist aber nicht ohne weiteres möglich, weil sie von zu vielen Parametern, dazu zählt auch die Bruchweite selbst, abhängt. Sie müßte durch die Anpassung der Berechnungsergebnisse an

gemessene Signale bestimmt werden, womit man wieder bei einem halbphänomenologischen Modell angelangt wäre.

Allgemein gilt, daß bei der Berechnung des Felds einer restfeldmagnetisierten Verteilung von magnetisch wechselwirkenden Ferromagnetika derart komplexe Zusammenhänge berücksichtigt werden müssen, das eine numerische Berechnung auch in den nächsten Jahren noch nicht möglich sein wird. Aus zwei Gründen: Der Entwicklungsaufwands einer entsprechenden Software ist sehr hoch und zweitens wäre die Rechenzeiten zu hoch. Man bedenke nur, wie fein elementiert werden müßte, um die Geometrie der magnetisierten Ferromagnetika nicht zu verfälschen, die großen Einfluß auf das resultierende Feld hat. Obwohl die Durchführung der Versuche aufwendig ist, steht der experimentelle Aufwand in keinem Verhältnis zu dem Aufwand, der getrieben werden müßte um das Problem rechnerisch zu erfassen. Allgemeingültige Aussagen lassen sich aber sehr wohl auch aus den Meßergebnissen herleiten.

Einige Detailfragen lassen sich selbstverständlich rechnerisch beantworten. Dem Vorhaben aber, basierend auf den Maxwell-Gleichungen, rechnerische Lösungen für komplexe ferromagnetische Anordnungen zu finden wurde nicht weiter nachgegangen.

Manche Veröffentlichung zu dem Thema Spannstahlbruchortung, enthalten den Versuch einer mathematischen Modellbildung, die aber darauf beschränkt bleibt, daß zwar die magnetostatische Grundgleichungen (Kap. 4.1) angegeben werden, dann aber doch phänomenologisch weitergearbeitet wird, indem die Magne-

tisierungsverteilung aus den Meßdaten gemäß der Best-Fit-Methode, bestimmt wird [SAW1] oder in dem anderen Fall [SAW2], eine Näherung gemacht wird, die einer genaueren Überprüfung nicht standhält.

Wenn dann das erregende Feld eines Jochmagneten durch das zweier magnetische Punktladungen, die an den Mittelpunkten der Unterseite der Füße des Jochs plziert werden, modelliert wird, hat das mit der physikalischen Realität nicht viel zu tun.

Zum Vergleich mit den gemessenen Kurve (Abb. 2-4), die die Feldverteilung des Jochmagneten zeigt (in Luft gilt $B = \mu_0 H$), ist in Abb. 4-2 das magnetische Feld eines Dipols, bestehend aus zwei magnetischen Punktladungen in einem Abstand von 40 cm, dargestellt. Auf den ersten Blick sind die Kurvenverläufe sehr ähnlich. Unterschiede werden deutlich, wenn man die axiale Komponente, in Abb. 2-3 mit B_0 bezeichnet, genauer betrachtet. Im positiven Bereich ist diese Komponente beim Joch viel größer. Dieser Bereich liegt zwischen den Spulen.

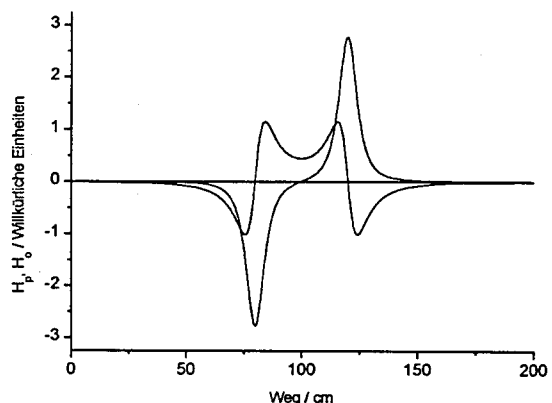


Abb. 4-2 Transversale und axiale Komponente des magnetischen Felds eines 40 cm langen Dipols in einer Entfernung von 6 cm.

Mögen die Unterschiede der Feldverläufe in Abb. 2-4 und in Abb. 4-2 im Vakuum bzw. in Luft gerade noch hinnehmbar sein, so werden die Unterschiede bei der Anwesenheit von Ferromagnetika in der Umgebung sehr groß, da sich dann der magnetische Schluß des Jochs (über seinen Rücken) auswirkt. Dadurch wird der magnetische Fluß größer, was auf eine Vergrößerung der Magnetisierung der Füße und des Rückens des Jochs zurückzuführen ist. Diese Quellen ($\nabla \cdot \underline{M}$) werden vernachlässigt, sind aber gerade der Grund dafür, daß sich die Jochform bei der Spannstahlbruchortung bewährt hat. Die magnetische Polstärke darf nicht als konstant angenommen werden.

5 Die numerische Signalverarbeitung

5.1 Vor- und Nachteile

Die Meßkurven enthalten neben der interessierenden Nutzinformation auch Störsignale, die den Nutzinformationen überlagert sind. Die verschiedenen Rauschprozesse in der Sensorik sind dabei von untergeordneter Bedeutung. Dieses dieses Rauschen stört die Interpretation nicht. Würde das der Fall sein, würde ein numerische Tiefpaß ohne merkliche Informationsverluste der Nutzsignale Abhilfe schaffen. Es sind die von der Stahlbetonbewehrung ausgehenden Störungen, die die Interpretation der Meßkurven erschweren. Auch, wenn die Magnetisierung des Betonstahl durch eine geeignete Magnetisierungstechnik nur relativ klein ist, ist die daraus resultierende magnetische Flußdichte am Sensor immer noch von der Größenordnung der Bruchsignalen weil die Betondeckung der Stahlbetonbewehrung, insbesondere der Bügel kleiner ist.

Um die Nutz- von den Störsignalen zu unterscheiden werden mehrere Messungen durchgeführt, bei dem sich das gesamte System in jeweils unterschiedlichen magnetischen Zuständen befindet (Kap. 3.3). Dabei wird die Magnetisierung des Betonstahls geändert, wobei die Magnetisierung des Spannstahls gleich bleibt. Um die Interpretation der Meßdaten zu erleichtern, kann man sich diverser Mittel der numerischen Signalverarbeitung bedienen. Die bearbeiteten Kurven sind sehr viel übersichtlicher, denn sie haben einen geringeren Informationsgehalt. Idealerweise fehlt aus-

schließlich die Information, die in den Störsignalen enthalten war. Das ist bei den Signalverarbeitungsmethoden, abgesehen von der Addition und Subtraktion zweier Meßkurven nicht der Fall. Es geht immer auch Information des Nutzsignals verloren. Gering gehalten wird dieser Verlust, wenn sehr genau bekannt ist, welche Charakteristik die Nutzsignale haben und sich diese sich diese Charakteristik von der Charakteristik der Störsignale möglichst stark unterscheidet. Man sollte also unbedingt berücksichtigen, in welcher Form Bruchsignale auftreten können. Während die Signale einzelner Brüche eine sehr charakteristische Form haben, weichen die Formen für Brüche, die so angeordnet sind, daß sich die Signale „überlappen“, stark ab (Kap. 2.3.5). Umgekehrt können Störsignale nach einer Signalverarbeitung die Charakteristik von Bruchsignalen haben. Die Signalverarbeitung kann also übertrieben werden und dann zu falschen Ergebnissen führen.

5.2 Die angewandten Methoden

5.2.1 Die Addition von Meßkurven

Eine der einfachsten Formen der Meßdatenverarbeitung ist die Addition zweier Meßkurven, bei denen sich die Vorzeichen der Störsignale oder zumindest einer Gruppe von Störsignalen unterscheiden. Diese Störsignale heben sich dann zumindest näherungsweise auf. Sehr gut anwendbar ist das zum Minimieren der Bügelsignale. Die Bügel und andere Objekte mit einer kleinen Ausdehnung in Spannglied-

richtung sind problemlos umzumagnetisieren, wobei die Magnetisierung der Längsbewehrung erhalten bleibt (Kap. 2.2.3).

Die Addition von Meßkurve, die zwei magnetische Zustände repräsentieren, die sich darin unterscheiden, daß die Stahlbetonbewehrung in Längsrichtung in entgegengesetzte Richtungen magnetisiert ist, führt zu einer Schwächung der Signale, die von dieser Bewehrung ausgehen. Die Verminderung dieser Art der Störsignale ist bei Bauwerkmessungen aber nicht so stark wie bei den Bügelsignalen. Das liegt daran, daß es nicht gelingt bei unbekannter und schwankender Betondeckung, die Magnetisierung so definiert umzudrehen wie bei den Bügel. Die Magnetisierungen unterscheiden sich nicht nur in der Richtung, sondern meist auch im Betrag.

5.2.2 Die Glättung der Meßkurven

Für die Glättung der Meßkurven wird ein numerischer Tiefpaß eingesetzt. Der Algorithmus ist auch als FFT-Glättung bekannt (FFT: Fast Fourier Transform) [PRE]. Die zu glättende Kurve wird mit einer Fourier-Transformation in den reziproken Raum transformiert, also in Wellen unterschiedlicher Längen mit entsprechenden Wichtungen, den sogenannten Fourier-Koeffizienten zerlegt. Der kurzweilige Anteil oberhalb einer vorgegebenen Grenzfrequenz wird herausgeschnitten, indem die entsprechenden Fourier-Koeffizienten gleich Null gesetzt werden. Dann wird mit einer inversen Fourier-Transformation in den Ortsraum zurücktransformiert. Das Resultat ist eine geglättete Kurve. Alle Schwankungen der Meßkurve, die sich auf eine Länge erstrecken, die kürzer

ist, als die vorgegebene Wellenlänge sind herausgefiltert. Je größer die vorgegebene Wellenlänge ist, desto glatter wird die Kurve und desto längerwellige Information verschwindet. Die Wellenlänge darf also nicht so lang sein, daß Bruchsignale herausgefiltert werden. Das Resultat einer Tiefpaßfilterung zeigt Abb. 3-1.

Nach Möglichkeit sollte eine Tiefpaß-Filterung an einer Summenkurve, der Addition zweier Messungen, vorgenommen werden, bei der die Bügelsignale schon fast herausgefallen sind. Die Bügelanordnung, bei der, nach einem relativ großen Bügelabstand, zwei Bügel sehr dicht angeordnet sind, erzeugt, wenn die Bügelsignale noch stark sind, nach der Glättung die Abfolge Minimum-Maximum, ein bruchähnliches Signal.

Die Tiefpaß-Filterung hat sich als sehr nützlich für die Signalinterpretation erwiesen. Die Signale von ferromagnetischen Materialien mit kleiner Ausdehnung in Richtung des Spannglieds, insbesondere die Bügelsignale werden eliminiert. Das Bruchsignal wird zwar auch etwas geglättet, seine Stärke nimmt aber bei angemessen gewählter Grenzfrequenz um nicht mehr als etwa 10 % ab. Die Abnahme der Bruchsignalstärke durch die Tiefpaß-Filterung wird mit zunehmender Signalbreite geringer. Bei einer großen Betondeckung und bei Spannstahlbrüchen, die auf der von der Betonoberfläche abgewandten Seite des Spannglieds liegen ist die Abnahme der Bruchsignalstärke durch die Tiefpaß-Filterung also besonders gering (Kap. 2.3.2).

Ein Nebeneffekt der Tiefpaß-Filterung ist, daß auch jedes andere Rauschen mit einer Frequenz von $\nu > 20 \text{ s}^{-1}$ eliminiert wird. (Diese

Frequenz ist von der Geschwindigkeit des Meßwagens abhängig).

5.2.3 Korrelationsfunktionen

Korrelationsfunktionen eignen sich, um numerisch zu bestimmen, wie ähnlich eine Meßkurve in der Umgebung eines Punkts einer anderen Kurve bzw. Funktion ist. Das Korrelationsprodukt $Mk^C(x)$ der Meßkurve $Mk(x)$ mit einer Vergleichsfunktion $v(x')$ ist definiert durch

$$Mk^C(x) = \int_{-\infty}^{\infty} v(x') Mk(x'+x) dx' \quad 5.2-1$$

Wählt man als Vergleichsfunktion $v(x)$ ein Bruchsignal, mit dem Wendepunkt bzw. der Bruchstelle bei $x=0$ und führt das Korrelationsprodukt mit der Meßkurve aus, so zeigt das Korrelationsprodukt an den Stellen Maxima, an denen der Meßkurvenverlauf auf bruchähnliche Signale hinweist.

Man kann aber auch zwei Kurven miteinander vergleichen, die am untersuchten Spannbeton gemessen wurden, als sich dieser in unterschiedlichen magnetischen Zuständen befand. Ist beispielsweise zwischen den beiden Messungen die Stahlbetonbewehrung ummagnetisiert worden, während die Spannstahlmagnetisierung gleich blieb, kann der gleichgebliebene Anteil der beiden Meßkurven im wesentlichen auf die Magnetisierung des Spannstahls zurückgeführt werden, während die Unterschiede von der unterschiedlichen Magnetisierung der Stahlbetonbewehrung herrühren. Ein Maß für die bereichsweise Ähnlichkeit der beiden Kurven liefert das Korrelationsprodukt, wenn man die Vergleichsfunktion wie folgt definiert:

$$v(x, x') := \begin{cases} Mk_2(x) & \text{wenn } |x - x'| \leq \frac{\Delta l}{2} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

und

$$Mk(x) := Mk_1(x),$$

wobei $Mk_1(x)$ die erste der beiden Meßkurven ist und $Mk_2(x)$ die zweite. Δl gibt die Länge des Bereichs der jeweils verglichen wird.

Bei Maxima dieses Korrelationsprodukts (große Ähnlichkeit der Kurven in einem Bereich der Länge Δl um diesen Punkt) ist die Wahrscheinlichkeit hoch, daß die Flußdichte in diesen Bereichen zu einem großen Teil von der Spannbewehrung herrührt.

Das Korrelationsprodukt läßt sich numerisch einfach berechnen. Es hat große Ähnlichkeit mit dem Faltungsprodukt

$$v(x) * Mk(x) = \int_{-\infty}^{\infty} v(x') Mk(x-x') dx' \quad 5.2-2$$

Ein Vergleich von 5.2 -1 mit 5.2-2 ergibt

$$Mk^C(x) = v(-x) * Mk(x) \quad 5.2-3$$

Das Korrelationsprodukt berechnet sich nach der Formel

$$\begin{aligned} Mk^C(x) &= F^{-1} \{ F \{ v(-x) * Mk(x) \} \} \\ &= F^{-1} \{ F \{ v(-x) \} F \{ Mk(x) \} \}. \end{aligned} \quad 5.2-4$$

Die Fourier-Transformierte F der Faltung zweier Funktionen ist das Produkt der Fourier-Transformierten.

Der Einsatz des Korrelationsprodukts ist ein geeignetes Hilfsmittel der Meßdatenauswertung. Es werden verschiedene vorher mit einem Tiefpaß geglättete Kurven durch Bildung

des Korrelationsprodukts verglichen. Die Kurven die die Korrelationsprodukte bilden haben keinen überschaubaren physikalischen Inhalt. Sie dienen lediglich zum Auffinden bestimmter Bereiche oder Signalformen in den geglätteten Meßkurven.

5.3 Weitere Signalverarbeitungsmethoden

5.3.1 Die numerische Differenzschaltung

Eine andere Arbeitsgruppe, die sich mit der Spannstahlbruchortung beschäftigt, bevorzugt die Benutzung zweier Magnetfeldsonden, die in der Meßvorrichtung hintereinander in einem vorgegebaren Abstand Δl angeordnet sind. Die Sonden sind so geschaltet, daß nur die Differenzflußdichte gemessen wird [SAW1]. Man verspricht sich davon die Unterdrückung periodischer Signale, wie Störsignale durch Bügel. Genaugenommen werden nicht periodische Signale unterdrückt, sondern gleichartige Signale, die den gleichen Abstand zueinander haben wie die beiden Meßsonden.

Diese Differenzschaltung läßt sich problemlos auch numerisch realisieren, wenn nur mit einer Sonde bzw. nebeneinander angeordneten Sonden gemessen wurde. Die Differenzkurve $DMk(x)$ wird aus der Meßkurve $Mk(x)$ gebildet durch die Vorschrift

$$DMk(x) = Mk(x) - Mk(x + \Delta l).$$

Die Bügelabstände und die Betondeckung der Bügel, die einen erheblichen Einfluß auf die Signalstärke hat, schwanken jedoch in realen

Bauteilen zu stark, um die Signalinterpretation durch diese Differenzbildung zu erleichtern. Darüberhinaus hat die Differenzbildung einen schwerwiegenden Nachteil. Bruchsignale, die von Spannstahlbrüchen ausgehen, deren Abstand zueinander etwa gleich dem echten oder dem numerisch simulierten Sondenabstand Δl ist, werden ebenfalls unterdrückt.

5.3.2 Die numerische Verkleinerung des Meßabstands

In einer Veröffentlichung [SAW2] wurde die Möglichkeit des Heranrechnens an einen magnetischen Dipol gezeigt. Bekannt sein muß die Lage des Dipols und eine Komponente der Flußdichte entlang einer Geraden, die parallel zum Dipol liegt. In einer bestimmten Ebene kann dann überall außerhalb des Dipols die Flußdichtekomponente aus der Meßkurve errechnet werden [ROT]. Die Ebene ist dadurch definiert, daß die Dipolachse in ihr liegt und die Gerade, entlang der die Flußdichtekomponente gemessen wurde. Die Feldverteilung in unmittelbarer Nähe des Dipols kann so berechnet werden. Die Methode beruht im wesentlichen auf einer Verstärkung der kurzwelligen Anteile der gemessenen Flußdichte, wenn daraus die Flußdichte an Orten berechnet wird, die näher am Dipol liegen. Die Fourier-Transformierte der Magnetisierung muß zuvor nach der Methode des best fit (Minimierung der Summe der Fehlerquadrate) bestimmt werden.

Zu dem gleichen Ergebnis kommt man mit einer Rechnung im Ortsraum, wenn man die Multipolentwicklung einer beliebigen magnetischen Ladungsverteilung, die sich entlang einer vorgegebenen Achse erstreckt, vor-

nimmt. Das Multipolfeld mit den Multipolmomenten als Fit-Parameter wird dann an die gemessene Flußdichte anpaßt. Je höher die Ordnung 2^n ($n \in \mathbb{N}_0$) eines Multipolmoments, desto stärker fällt das Feld dieses 2^n -Pols räumlich ab. Multipolmomente hoher Ordnung repräsentieren den kurzwelligen Anteil des Signals. Anschaulich ausgedrückt: Fluktuation auf einer kleinen Länge verschmieren mit zunehmender Entfernung des Beobachtungspunkts. Berechnet man den Feldverlauf, den die gefittete Multipolverteilung in einem kleineren Abstand erzeugt, wachsen die Feldanteile eines 2^n -Pols umso stärker, je höher seine Ordnung ist. Das entspricht der stärkeren Wichtung der kurzwelligen Anteile im reziproken Raum.

Das Problem ist, daß der relative Fehler bei der Bestimmung der Multipolmomente aus dem Meßsignal mit größer werdender Ordnung zunimmt, weil das daraus resultierende Feld räumlich stärker abnimmt, als die Multipolfelder kleinerer Ordnung. Im reziproken Raum gilt analog, daß Fehler in der Bestimmung des kurzwelligen Anteils der Fourier-Transformierten der Dipolverteilung beim „Heranrechnen“ auf kleinere Abstände der Feldquellen von der Sonde stärker verstärkt werden, als Fehler in der Bestimmung des langwelligen Anteils. Die Fehler in der Bestimmung des kurzwelligen Anteils hängen bei der Spannstahlbruchortung aber nicht entscheidend vom unterschiedlichen Signal-/Rausch-Verhältnis der benutzten Sonde ab, sondern von den Störsignalen. Deren kurzwelliger Anteil ist, verglichen mit dem kurzwelligen Anteil eines Bruchsignals am Ort der Sonde größer. Die Störquellen haben nämlich größtenteils die

kleinere Betondeckung als das Spannglied; der kurzwellige Anteil ihrer Felder ist räumlich noch nicht so stark abgefallen wie der kurzwellige Anteil des Bruchsignals.

Das kann man sich zu Nutzen machen, indem man den kurzwelligen Anteil der Meßkurve nicht betrachtet (Tiefpaß-Filterung). Mit einer Verstärkung des kurzwelligen Anteils würde man genau das Gegenteil erreichen, nämlich daß die Störsignale hervorgehoben werden.

Das Bruchsignal bei der Spannstahlbruchortung kann mit der Methode des „Heranrechnens“ nicht verstärkt werden, es sei denn, Störsignale fehlen völlig. Das ist aber an Bauwerken nie der Fall. Ihr Anteil aber würde beim Heranrechnen überproportional verstärkt. Das erschwert die Erkennung des Bruchsignals, dessen Anteile an der Meßkurve langwelliger sind als die Anteile der Bügelsignale. Die Behauptung, daß über die Methode des Heranrechnens auch bei größeren Abständen des Prüfkopfs zum Untersuchungsobjekt charakteristische Signalformen von Brüchen festgestellt werden können [SAW2], ist nur dann richtig, wenn ausschließlich das Untersuchungsobjekt Ursache der gemessenen Flußdichte ist bzw. beim Fehlen von Störsignalen. Die Methode ist damit für die Spannstahlbruchortung ungeeignet. Sie scheitert an der Präsenz der Störsignale. Die Methode eignet sich nur zum „Heranrechnen“ an das Bruchsignal, das bei Laborversuchen gemessen wurde, bei denen sich keine anderen Ferromagnetika zwischen Spannglied und Meßsonde befanden.

6 Zusammenfassung

Ziel des Forschungsvorhabens war es, ein Verfahren zur Ortung von Spannstahlbrüchen in metallischen Hüllrohren bis zur Praxistauglichkeit für Bauwerkuntersuchungen zu entwickeln. Genutzt werden sollte der physikalische Effekt, daß an Bruchstellen remanent magnetisierter Spanndrähte magnetische Streufelder entstehen. Die Spannglieder werden mit einem speziell zu diesem Zweck konstruierten Elektromagneten (Kap. 2.1.2) remanent magnetisiert. Der von den Spanndrahtbrüchen ausgehende magnetische Streufluß (Kap. 1.6.4) kann an der Betonoberfläche mit geeigneten Sensoren für die magnetische Flußdichte nachgewiesen werden (Kap. 1.6.5). Störsignale erschweren die Interpretation der Meßergebnisse. Sie werden hauptsächlich durch die ebenfalls magnetisierte Stahlbetonbewehrung verursacht.

Es wurde drei Arten von Laboruntersuchungen durchgeführt.

1. Zur Entwicklung und Optimierung der Magnetisierungstechnik wurde der Verlauf der magnetischen Flußdichte in speziellen Punkten im und am Spannstahlbündel, sowie an speziellen Punkten der Stahlbetonbewehrung während verschiedener Magnetisierungsprozesse (Kap. 2.2) gemessen.
2. Um aus der Analyse eines Bruchsignals auf die Lage der Bruchstellen im Spanngliedquerschnitt und auf den Grad der Schädigung schließen zu können, wurde untersucht, von welchen Parametern die charakteristischen Kennwerte eines Bruchsignals (Kap. 2.3) abhängen.
3. Die Koerzitivfeldstärke und ein Kennwert, der angenähert proportional zur Remanenz ist, wurde an unterschiedlichen Spann- und Betonstahlproben (Kap.2.4) gemessen. Geklärt werden sollten die Frage, ob die Unterschiede, die zwischen den einzelnen Spannstahlsorten hinsichtlich dieser Werte bestehen, beim Magnetisieren und bei der Signalinterpretation berücksichtigt werden müssen. Betonstahlproben wurden ebenfalls untersucht, um mit der Kenntnis ihrer magnetischen Eigenschaften die Stärke und die Richtung der Störfelder über die Art der Magnetisierung gezielt zu beeinflussen.

Die wesentlichen Ergebnisse der einzelnen Untersuchungsbereiche sind:

1. Die Entwicklung einer Magnetisierungsprozedur, die unabhängig von der Betondeckung, wenn diese kleiner als 30 cm ist, zur remanenten Magnetisierung der Spannstähle führt. Die Kenntnis der Magnetisierungsverteilung in kritischen Punkten der Stahlbetonbewehrung erlaubt die gezielte Erzeugung unterschiedlicher magnetischer Zustände des Spannbetonbauteils zur Unterscheidung der Störsignale von Bruchsignalen (Kap. 3.3).
2. Es konnten phänomenologische Gesetzmäßigkeiten abgeleitet werden, die Rückschlüsse aus einem Bruchsignal auf die Lage der Bruchstellen im Spanngliedquerschnitt und den Schädigungsgrad erlauben (Kap. 2.3.2). Die Bruchsignalstärke ist bei sonst gleichen Bedingungen proportional zur Querschnittsschwächung. Der größte Unsicherheitsfaktor bei der Quantifizierung des Schädigungsgrads ist die Bruchweite,

da sie die Bruchsignalstärke stark beeinflusst. Die Bruchsignalstärke eines Bruchs bei dem der Abstand der Bruchweite 1 mm beträgt, ist um mehr als einen Faktor 3 größer als die eines Bruchs, der sich nicht geöffnet hat (Kap. 2.3.3). Auf die Bruchweite selbst kann aus dem Bruchsignal nicht geschlossen werden. Die Bruchsignalstärke geht nicht mit der Bruchweite gegen Null; schon die Gefügestörung aufgrund eines Bruchs führt zu einem Streufeld, auch wenn die Bruchufer sich nicht voneinander entfernt haben.

Das Hüllrohr führt zu einer Verbreiterung und leichten Abschwächung des Signals. Die Bruchsignalstärke nimmt durch das Hüllrohr um bis zu 20 % ab (Kap. 2.3.4).

Die Überlagerung benachbarter Brüche kann bei homogener Bruchstellenverteilung zur partiellen Auslöschung der Bruchsignale führen. Das kann bei homogener Bruchstellenverteilung über eine größere Spanngliedlänge zu Interpretationsschwierigkeiten führen. Schwankungen in der Bruchstellenverteilung erzeugen wiederum bruchartige Signale (Kap. 2.3.5).

3. Die Streuung der magnetischen Kennwerte verschiedener Spannstahlproben unterschiedlicher Hersteller und unterschiedlicher Herstellungsart kann für die Signalinterpretation vernachlässigt werden (Kap. 2.4.5).

Der Einfluß von Zugspannungen auf die magnetischen Kennwerte wurde von uns nicht untersucht. Bei vergüteten und warmverformten Stählen ohne kristalline Vorzugsrichtung dürfte sich die Vorspannung nicht nennenswert auf die Bruchsignalstärke

auswirken. Bei kaltgezogenen Spannstählen ist eine ausgeprägtere Abhängigkeit der magnetischen Kenngrößen von dem Vorspanngrad zu erwarten. Die Ergebnisse anderer Forschungsprojekte [FAL], in denen diese Thematik behandelt wird, müssen gegebenenfalls bei der Abschätzung des Schädigungsgrads berücksichtigt werden. Die Vorspanngrad wirkt sich eventuell auf die Bruchsignalstärke aus, nicht auf die Bildung eines Streufelds an sich (Kap. 1.6.3).

Die Koerzitivfeldstärken von Spann- und Betonstählen unterscheiden sich stark. Das kann zur Reduzierung der Störsignale genutzt werden (Kap. 3.3).

Mathematische Modelle, die die bei der magnetischen Spannstahlbruchortung stattfindenden physikalischen Prozesse quantitativ richtig beschreiben, existieren bisher nicht (Kap. 4.2). Die elektromagnetischen Felder werden durch die Maxwell-Gleichungen vollständig beschrieben. Die stofflichen und geometrischen Eigenschaften aber, die das magnetische Verhalten ferromagnetischer Körper bestimmen, sind zu komplex, um einfach und allgemeingültig modellierbar zu sein. Für Berechnungen der Feldverteilung sind sie jedoch entscheidend, weil sie die Materialgleichungen bestimmen, die die Feldgrößen in den Maxwell-Gleichungen miteinander verknüpfen (Kap. 4.1).

Die Lösung des inversen Problems, um aus der Feldverteilung außerhalb des Betons auf die Quellen der Streufelder im Bauteil zu schließen, ist prinzipiell nicht möglich (Kap. 4.1).

In Wechselwirkung mit den Laborversuchen wurde das Verfahren bei Bauwerkuntersu-

chungen erprobt. Die Nachweisgrenze für Spannstahlbrüche ist davon abhängig, wie stark die gemessene magnetische Flußdichte von Störsignalen, erzeugt durch die Stahlbetonbewehrung, beeinflusst ist (Kap. 3.3). Bei normaler Bewehrungslage können Brüche einzelner Spanndrähte in remanent magnetisierten Spanngliedern, bis zu einer Betondeckung nachgewiesen werden, die etwa das Zwanzigfache des Drahtdurchmessers beträgt (Kap. 2.3.2). Bei sehr dicht und unregelmäßig verlegter Stahlbetonbewehrung verringert sich diese Nachweisgrenze. Bei fehlender Stahlbetonbewehrung in Laborversuchen liegt die Nachweisgrenze für Brüche einzelner Spanndrähte in Spanngliedern bei einer Betondeckung, die mehr als das Dreißigfache des Drahtdurchmessers beträgt und durch die Empfindlichkeit der eingesetzten Hallsonden begrenzt wird.

Die Empfindlichkeit der Hall-Sonden kann bei Bauwerkuntersuchungen, wegen der unvermeidbar auftretenden Störsignale, nicht voll genutzt werden.

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

Je nach den baulichen Randbedingungen, sind unterschiedliche Hilfskonstruktionen erforder-

lich, um die Geräte entlang des Spanngliedverlaufs zu führen (Kap. 3.1). Die Hilfskonstruktionen ermöglichen die Überprüfung der Spannglieder von der oberen, einer seitlichen und der unteren Bauteiloberfläche aus (Kap. 3.2)..

Die Signalauswertung wird durch die Anwendung verschiedener numerischer Hilfsmittel stark vereinfacht. Der Informationsgehalt der Meßkurven bleibt aufgrund der Störsignale dennoch sehr komplex und erfordert deshalb ein genaues Verständnis der physikalischen Zusammenhänge (Kap. 5.2).

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

Wir danken dem Deutschen Institut für Bautechnik und HOCHTIEF für die finanzielle Förderung des Forschungsvorhabens, das ohne diese Unterstützung nicht möglich gewesen wäre.

7 Literaturverzeichnis

- [BAR] Barton, J. R., Kusenberger, F. N. : 'Detection of defects in the reinforcement of prestressed Concrete bridge members', Colloque International sur la gestion des ouvrages d'art Vol. I, 145 - 150, Paris, 1981
- [BER] Bergander, M. J. : 'Magnetic Flux Leakage Inspection of Wire Rope', Int. Adv. in NDT 9, 113 - 124, Gordon and Breach, 1983
- [COO] Cooper, J. D. et al. : 'Federal Highway Administration Bridge Repair and Rehabilitation Research', Proceedings of the International Bridge Conference Warsaw '94 Vol. 2, 155 - 165, Warschau, 1994
- [CZI] Cziesielski, E.; Marquardt, H. : 'Auffinden korrodierender Bewehrung mit der elektrochemischen Potentialdifferenzmessung', Bautechnik 65 (7), 226 - 232, 1988
- [DIR] Dierkes, G., Franke, L. : 'Electro-Acoustic Testing on Cracks in Prestressing Elements', Proceedings of the International Symposium 'Non-Destructive Testing in Civil Engineering' Vol. 1, 621 - 628, Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e. V., Berlin, 1995
- [DOB] Dobmann, G.; Höller, P. : 'Physical Analysis Methods of Magnetic Flux Leakage' in Research Techniques in Nondestructive Testing IV, 39 - 69, Ed. R. S. Sharpe, Academic Press, 1980
- [DUS] Dussler, E. : Z. Phys. 44, 286, 1927
- [FAL] Falkner, H. et al. : 'Vorspannungsmessungen an Baukonstruktionen', DAfStb Statusseminar „Spannstahl- und Spannbetonforschung“, 16.05.94
- [FLO] Flohrer, C. : 'Zerstörungsfreie Ortung von Spanndrahtbrüchen in Spannbeton-Deckenträgern', VDI-Berichte 1990, 425 - 433, 1990
- [FRA] Franz, A. : 'Die Schäden am Kreuzungsbauwerk Schmargendorf und ihre Bewertung', Beton- und Stahlbetonbau 2, 1980
- [GIM] Gimmel, B. : 'Magnetoelastische Kraftmessung im Spannbeton', IABSE Symposium Lisbon 1989, IABSE-AIPC-IVBH, Zürich, 1989
- [HAR] Harrison, A. : 'Monitoring broken steel cables in moving elastomer belts', J. Phys. E. Sci. Inst. 18, 906, 1985
- [HEC] Heck, C. : Magnetische Werkstoffe und ihre technische Anwendung, Dr. Alfred Hüthig Verlag, Heidelberg, 1975

- [HIL] Hillemeier, B. : 'Das Erkennen von Spanndrahtbrüchen an einbetonierten Spannstählen', Vorträge Betontag 1993, Deutscher Beton-Verein E. V., 1993
- [HWA] Hwang, J. H.; Lord, W. : 'Finite Element Modeling of Magnetic Field / Defect Interaction', ASTM J. Testing Eval. 3, 21 - 25, 1975
- [JIL1] Jiles, D. : 'Review of magnetic methods for nondestructive evaluation', NDT International 21 (5), 311 - 319, 1988
- [JIL2] Jiles, D. : 'Review of magnetic methods for nondestructive evaluation (Part 2)', NDT International 23 (2), 83 - 92, 1990
- [JUN] Jungwirth, D. et al. : 'Dauerhafte Betonbauwerke', Beton - Verlag, Düsseldorf, 1986.
- [KAP] Kapp, H. et al. : 'Integritäts- und Korrosionsprüfungen an Vorspannkabeln in Brückenbauwerken', Forschungsaufträge 83 / 88 und 81 / 90, Eidgenössisches Verkehrs- und Energiewirtschaftsdepartement, Bundesamt für Straßenbau, 1992
- [KNE] Kneller, E. : Ferromagnetismus, Springer-Verlag, Berlin, 1962
- [KOH] Kohlrausch, F. : Praktische Physik Band 2, Teubner, Stuttgart, 1985
- [KRA] Krause, M. et al. : 'Comparisation of Pulse-Echo -Methods for Testing Concrete', Proceedings of the International Symposium 'Non-Destructive Testing in Civil Engineering' Vol. 2, 281 - 289, Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e. V., Berlin, 1995
- [KRI] Krieger, J. : 'Anwendung von zerstörungsfreien Prüfmethode bei Brückenbauwerken', Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Brücken- und Ingenieurbau Heft B 9, 1995
- [KUS1] Kusenberger, F. N.; Barton, J. R. : 'Detection of Flaws in Reinforcing Steel in Prestressed Concrete Bridge Members', Report No. FHWA/RD-81/087, FHWA U. S. Department of Transportation, 1981.
- [KUS2] Kusenberger, F. N.; Birkelbach, R. S. : 'Detection of Flaws in Reinforcing Steel in Prestressed Concrete Bridge Members', Report No. FHWA/RD-83/081, FHWA U. S. Department of Transportation, 1983.
- [LAN] Landau, L. D. , Lifschitz, E. M. : Lehrbuch der theoretischen Physik III Quantenmechanik, Akademie-Verlag, Berlin, 1985
- [MAT] Matt, P. : Zerstörungsfreie Prüfung von Spanngliedern in bestehenden Brückenbauten, Forschungsauftrag 52 / 88, Eidgenössisches Verkehrs- und Energiewirtschaftsdepartement, Bundesamt für Straßenbau, 1988
- [MDS] Merkblatt für die Durchstrahlungsprüfung von Stahlbeton und SPANNBETON; Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung, Berlin, 1990

- [NDT-CE] Proceedings of the International Symposium 'Non-Destructive Testing in Civil Engineering', Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e. V., Berlin, 1995
- [NÜR1] Nürnberger, U.: 'Analyse und Auswertung von Schadensfällen bei Spannstählen', Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik 308, Bundesminister für Verkehr, Abt. Straßenbau, Bad Godesberg, 1980
- [NÜR2] Nürnberger, U.: 'Wasserstoffinduzierte SRK bei Spannstählen - ein lösbares Problem.' Ergebnisse der Werkstofforschung, Bd 2, 57 - 81. Speidel, Magdowski und Uggowitzer ed., Verlag „Thubal - Kain“, Zürich, 1980
- [PÖP] Pöpel, M.; Flohrer, C.: 'Combination of a Covermeter with a Radar System - an Improvement of Radar Application in Civil Engineering', Proceedings of the International Symposium 'Non-Destructive Testing in Civil Engineering' Vol. 1, 737 - 743, Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e. V., Berlin, 1995
- [PRE] Press, W. H. et al.: 'Numerical Recipes in C', Cambridge University Press, Cambridge, 1991
- [ROT] Roth, B. J. et al.: 'Using a magnetometer to image a two-dimensional current distribution', J. Appl. Phys. 65, 361 - 372, 1989
- [SAN] Sansalone, M., Streett, W.: 'Use of the Impact-Echo Method and Field Instrument for Non-destructive Testing of Concrete Structures', Proceedings of the International Symposium 'Non-Destructive Testing in Civil Engineering' Vol. 1, 495 - 502, Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e. V., Berlin, 1995
- [SAW1] Sawade, G. et al.: 'Signal Analysis Methods for the Remote Magnetic Examination of Prestressed Elements' Proceedings of the International Symposium 'Non-Destructive Testing in Civil Engineering' Vol. 2, 1077 - 1084, Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e. V., Berlin, 1995
- [SAW2] Sawade, G. et al.: 'Zur Signalauswertung bei der magnetischen Untersuchung von Spannbetonbauteilen', 30. DAfStb - Forschungskolloquium, 275 - 282; Deutscher Ausschluß für Stahlbeton, Berlin, 1994
- [SCHAU] Schaumburg, H.: Sensoren, Teubner, Stuttgart, 1992
- [SCHLE] Schleipp, S.: 'Elektromagnetische Drahtseilprüfung', Diss. TH Berlin, 1937
- [SCHMI] Schmitz, H.: 'Die Sanierung der Hochstraße im Heerdter Dreieck Düsseldorf', Vorträge Betontag 1979, Deutscher Beton-Verein E. V., 1979
- [SCHUM] Schumann, H.: Metallographie, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1967

- [SCHWI] Schwiering, G. : 'Kreuzungsbauwerk Schmargendorf im Zuge der BAB Ring Berlin', Vorträge Betontag 1987, Deutscher Beton-Verein E. V., 1987
- [SHC] Shcherbinin, V. E., Pashagin, A. I. : Defektoskopiya 10 (4), 106 - 110, 1974
- [STE] Steinhaus, W. : 'Die magnetischen Eigenschaften der Körper' in Handbuch der Physik, Bd. 15: Magnetismus Elektromagnetisches Feld, Springer-Verlag, Berlin, 1927
- [VOL] Volkwein, A. : 'Potential Measurements on Prestressed Concrete Bridges and Required Additional Informations for a Durable Repair', Proceedings of the International Symposium 'Non-Destructive Testing in Civil Engineering' Vol. 2, 887 - 893, Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e. V., Berlin, 1995
- [WEI] Weiss, P. : J. Phys. 6, 661 (1907)
- [ZAT] Zatsepin, N. N.; Shcherbinin, V. E. : 'Calculation of the Magnetostatic Field of Surface Defects, I. Field Topography of Defect Models', Defektoskopiya 2 (5), 385 - 393. 394 - 399, 1966

8 Anhang I - Tabellen

Tabelle 8-1. Magnetische Kennwerte der untersuchten Spannstahlproben

M_{Hc} : Koerzitivfeldstärke
 M_R : Querschnittsbezogene Flußdichte, die annähernd proportional zur Remanenz ist (siehe Erläuterung in Kap. 2.4.2)

Probennummer	Herstellungsart	Festigkeitsklasse Streckgrenze, Zugfestigkeit in N / mm ²	Form	Durchmesser in mm (bei ovalem Querschnitt effektiver Durchmesser)	Hersteller	M_R in $\mu T / mm^2$	M_{Hc} in A / cm
1	gereckt und angelassen	1080 / 1230	rund, Gewinderippen	26.5	Stahlwerk Annahütte	8.5	21.1
2	gereckt und angelassen	835 / 1030	rund, Gewinderippen	32.0	Stahlwerk Annahütte	9.6	15.7
3	gereckt und angelassen	835 / 1030	rund, Gewinderippen	26.5	Stahlwerk Annahütte	9.1	16.0
4	gereckt und angelassen	900 / 1030	rund, Gewinderippen	26.5	Stahlwerk Annahütte	10.0	18.5
5	gereckt und angelassen	900 / 1030	rund, Gewinderippen	32.0	Stahlwerk Annahütte	11.8	18.7
6	gereckt und angelassen	1080 / 1230	rund, glatt	32.0	Stahlwerk Annahütte	8.4	19.6
7	gereckt und angelassen	835 / 1030	rund, glatt	36.0	Stahlwerk Annahütte	9.3	15.8
8	gereckt und angelassen	835 / 1030	rund, glatt	32.0	Stahlwerk Annahütte	8.2	15.6
9	gereckt und angelassen	835 / 1030	rund, glatt	26.0	Stahlwerk Annahütte	8.3	15.4
11	gereckt und angelassen	1080 / 1230	rund, Gewinderippen	32.0	Stahlwerk Annahütte	9.6	21.8
12	kaltgezogen	1570 / 1770	7-drähtige Litzen	15.3	WDI	10.1	12.5
13	kaltgezogen	1570 / 1770	7-drähtige Litzen	15.3	WDI	10.1	12.7
14	kaltgezogen	1570 / 1770	7-drähtige Litzen	15.3	WDI	9.6	12.5
15	kaltgezogen	1570 / 1770	7-drähtige Litzen	15.7	WDI	10.5	12.6
16	kaltgezogen	1570 / 1770	7-drähtige Litzen	15.7	WDI	10.5	13.3
17	kaltgezogen	1570 / 1770	7-drähtige Litzen	15.7	WDI	10.5	13.6
18	kaltgezogen	1570 / 1770	7-drähtige Litzen	12.3	Austria Draht	10.2	13.1
19	kaltgezogen	1570 / 1770	7-drähtige Litzen	12.3	Austria Draht	10.5	13.0
20	kaltgezogen	1570 / 1770	7-drähtige Litzen	12.3	Austria Draht	10.4	12.8
21	kaltgezogen	1570 / 1770	rund, glatt	5.0	Austria Draht	10.6	11.7
22	kaltgezogen	1570 / 1770	rund, glatt	5.0	Austria Draht	10.2	11.8
23	kaltgezogen	1570 / 1770	rund, glatt	5.0	Austria Draht	10.0	11.5
24	kaltgezogen	1570 / 1770	7-drähtige Litzen	15.3	Austria Draht	10.8	13.0
25	kaltgezogen	1570 / 1770	7-drähtige Litzen	15.3	Austria Draht	10.9	13.0
26	kaltgezogen	1570 / 1770	7-drähtige Litzen	15.3	Austria Draht	10.9	13.0
27	kaltgezogen	1570 / 1770	7-drähtige Litzen	12.9	Austria Draht	10.3	13.1
28	kaltgezogen	1570 / 1770	7-drähtige Litzen	12.9	Austria Draht	10.3	13.2
29	kaltgezogen	1570 / 1770	7-drähtige Litzen	12.9	Austria Draht	10.3	13.0
30	kaltgezogen	1670 / 1950	3-drähtige Litzen	4.9	Redaelli	11.6	12.4
31	kaltgezogen	1670 / 1950	3-drähtige Litzen	4.9	Redaelli	11.6	12.4
32	kaltgezogen	1670 / 1950	3-drähtige Litzen	4.9	Redaelli	11.5	12.6
33	kaltgezogen	1670 / 1950	3-drähtige Litzen	4.9	Redaelli	11.6	12.5
34	kaltgezogen	1680 / 1950	7-drähtige Litzen	9.3	Redaelli	10.0	13.4
35	kaltgezogen	1680 / 1950	7-drähtige Litzen	9.3	Redaelli	10.3	12.7
36	kaltgezogen	1680 / 1950	7-drähtige Litzen	9.3	Redaelli	10.3	12.7
37	kaltgezogen	1680 / 1950	7-drähtige Litzen	9.3	Redaelli	10.3	13.3
38	kaltgezogen	1460 / 1700	7-drähtige Litzen	18.0	Redaelli	10.3	13.1
39	kaltgezogen	1460 / 1700	7-drähtige Litzen	18.0	Redaelli	10.6	13.3

Tabelle 8-1. Fortsetzung

Magnetische Kennwerte der untersuchten Spannstahlproben

 M_{Hc} : Koerzitivfeldstärke M'_R : Querschnittsbezogene Flußdichte, die annähernd proportional zur Remanenz ist (siehe Erläuterung in Kap. 2.4.2)

Probennummer	Herstellungsart	Festigkeitsklasse Streckgrenze, Zugfestigkeit in N / mm ²	Form	Durchmesser in mm (bei ovalem Querschnitt effektiver Durchmesser)	Hersteller	M'_R in $\mu T / mm^2$	M_{Hc} in A / cm
40	kaltgezogen	1460 / 1700	7-drähtige Litzen	18.0	Redaelli	10.6	13.6
41	kaltgezogen	1460 / 1700	7-drähtige Litzen	18.0	Redaelli	11.0	13.3
42	kaltgezogen	1500 / 1750	7-drähtige Litzen	18.0	Redaelli	10.8	13.3
43	kaltgezogen	1500 / 1750	7-drähtige Litzen	18.0	Redaelli	10.8	13.5
44	kaltgezogen	1500 / 1750	7-drähtige Litzen	18.0	Redaelli	10.8	13.5
45	kaltgezogen	1500 / 1750	7-drähtige Litzen	18.0	Redaelli	10.8	13.7
46	kaltgezogen	1590 / 1850	7-drähtige Litzen	15.3	Redaelli	10.3	12.8
47	kaltgezogen	1590 / 1850	7-drähtige Litzen	15.3	Redaelli	10.1	13.4
48	kaltgezogen	1590 / 1850	7-drähtige Litzen	15.3	Redaelli	10.3	13.4
49	kaltgezogen	1590 / 1850	7-drähtige Litzen	15.3	Redaelli	10.3	12.9
50	kaltgezogen	1440 / 1670	rund, glatt	7.0	Redaelli	10.3	12.8
51	kaltgezogen	1440 / 1670	rund, glatt	7.0	Redaelli	10.3	12.4
52	kaltgezogen	1440 / 1670	rund, glatt	7.0	Redaelli	10.3	13.0
53	kaltgezogen	1440 / 1670	rund, glatt	7.0	Redaelli	10.3	12.9
54	kaltgezogen	1680 / 1950	3-drähtige Litzen	6.5	Redaelli	11.0	13.3
55	kaltgezogen	1680 / 1950	3-drähtige Litzen	6.5	Redaelli	10.8	12.5
56	kaltgezogen	1680 / 1950	3-drähtige Litzen	6.5	Redaelli	10.5	13.0
57	kaltgezogen	1680 / 1950	3-drähtige Litzen	6.5	Redaelli	10.4	13.0
58	kaltgezogen	1760 / 2050	3-drähtige Litzen	6.0	Redaelli	11.6	12.7
59	kaltgezogen	1760 / 2050	3-drähtige Litzen	6.0	Redaelli	11.3	12.8
60	kaltgezogen	1760 / 2050	3-drähtige Litzen	6.0	Redaelli	10.9	13.0
61	kaltgezogen	1760 / 2050	3-drähtige Litzen	6.0	Redaelli	11.3	12.9
62	kaltgezogen	1770 / 2060	7-drähtige Litzen	6.9	Redaelli	10.9	13.2
63	kaltgezogen	1770 / 2060	7-drähtige Litzen	6.9	Redaelli	11.0	12.6
64	kaltgezogen	1770 / 2060	7-drähtige Litzen	6.9	Redaelli	10.9	13.1
65	kaltgezogen	1770 / 2060	7-drähtige Litzen	6.9	Redaelli	11.3	13.7
66	kaltgezogen	1520 / 1770	rund, glatt	5.0	Redaelli	10.0	13.4
67	kaltgezogen	1520 / 1770	rund, glatt	5.0	Redaelli	10.0	12.6
68	kaltgezogen	1520 / 1770	rund, glatt	5.0	Redaelli	10.3	13.0
69	kaltgezogen	1520 / 1770	rund, glatt	5.0	Redaelli	10.0	13.1
70	kaltgezogen	1520 / 1770	rund, profiliert	5.0	Redaelli	10.3	12.1
71	kaltgezogen	1520 / 1770	rund, profiliert	5.0	Redaelli	10.3	11.8
72	kaltgezogen	1520 / 1770	rund, profiliert	5.0	Redaelli	10.9	12.6
73	kaltgezogen	1520 / 1770	rund, profiliert	5.0	Redaelli	10.0	12.3
74	kaltgezogen	1590 / 1860	rund, profiliert	4.0	Redaelli	11.3	12.7
75	kaltgezogen	1590 / 1860	rund, profiliert	4.0	Redaelli	11.8	11.9
76	kaltgezogen	1590 / 1860	rund, profiliert	4.0	Redaelli	11.6	12.4
77	kaltgezogen	1590 / 1860	rund, profiliert	4.0	Redaelli	11.5	12.0
78	kaltgezogen	1320 / 1570	rund, glatt	9.4	Redaelli	9.7	12.5

Tabelle 8-1. Fortsetzung
Magnetische Kennwerte der untersuchten Spannstahlproben
 M^H_C : Koerzitivfeldstärke
 M^R : Querschnittsbezogene Flußdichte, die annähernd proportional zur Remanenz ist (siehe Erläuterung in Kap. 2.4.2)

Probennummer	Herstellungsart	Festigkeitsklasse Streckgrenze, Zugfestigkeit in N / mm ²	Form	Durchmesser in mm (bei ovalem Querschnitt effektiver Durchmesser)	Hersteller	M^R in $\mu T / mm^2$	M^H_C in A / cm
79	kaltgezogen	1320 / 1570	rund, glatt	9.4	Redaelli	9.7	12.8
80	kaltgezogen	1320 / 1570	rund, glatt	9.4	Redaelli	9.2	12.5
81	kaltgezogen	1320 / 1570	rund, glatt	9.4	Redaelli	9.5	12.6
82	kaltgezogen	1570 / 1770	7-drähtige Litzen	12.7	Trefilunion	10.6	13.6
83	kaltgezogen	1570 / 1770	7-drähtige Litzen	12.7	Trefilunion	11.0	13.2
84	kaltgezogen	1570 / 1770	7-drähtige Litzen	12.7	Trefilunion	11.0	13.7
85	kaltgezogen	1570 / 1770	7-drähtige Litzen	12.7	Trefilunion	10.6	13.5
86	kaltgezogen	1570 / 1770	7-drähtige Litzen	15.2	Trefilunion	11.2	13.9
87	kaltgezogen	1570 / 1770	7-drähtige Litzen	15.2	Trefilunion	11.1	13.5
88	kaltgezogen	1570 / 1770	7-drähtige Litzen	15.2	Trefilunion	11.2	12.7
89	kaltgezogen	1570 / 1770	7-drähtige Litzen	15.2	Trefilunion	11.1	13.1
90	kaltgezogen	1570 / 1770	rund, profiliert	5.0	Trefilunion	10.2	12.6
91	kaltgezogen	1570 / 1770	rund, profiliert	5.0	Trefilunion	10.9	13.0
92	kaltgezogen	1570 / 1770	rund, profiliert	5.0	Trefilunion	10.3	12.8
93	kaltgezogen	1470 / 1670	rund, profiliert	5.0	Trefilunion	10.6	12.5
94	kaltgezogen	1470 / 1670	rund, profiliert	8.0	Trefilunion	10.1	13.5
95	kaltgezogen	1470 / 1670	rund, profiliert	8.0	Trefilunion	9.8	13.1
96	kaltgezogen	1470 / 1670	rund, profiliert	8.0	Trefilunion	10.0	13.3
97	kaltgezogen	1470 / 1670	rund, profiliert	8.0	Trefilunion	10.0	13.3
98	kaltgezogen	1470 / 1670	rund, glatt	7.0	Trefilunion	9.8	13.1
99	kaltgezogen	1470 / 1670	rund, glatt	7.0	Trefilunion	10.0	13.4
100	kaltgezogen	1470 / 1670	rund, glatt	7.0	Trefilunion	10.1	13.4
101	kaltgezogen	1470 / 1670	rund, glatt	7.0	Trefilunion	10.3	13.8
102	kaltgezogen	1470 / 1670	rund, profiliert	7.0	Trefilunion	10.1	13.3
103	kaltgezogen	1470 / 1670	rund, profiliert	7.0	Trefilunion	10.1	12.9
104	kaltgezogen	1470 / 1670	rund, profiliert	7.0	Trefilunion	10.3	12.7
105	kaltgezogen	1470 / 1670	rund, profiliert	7.0	Trefilunion	10.1	13.2
106	kaltgezogen	1590 / 1860	7-drähtige Litzen	12.5	NDI	10.4	12.3
107	kaltgezogen	1590 / 1860	7-drähtige Litzen	12.5	NDI	9.9	13.2
108	kaltgezogen	1590 / 1860	7-drähtige Litzen	15.7	NDI	10.3	12.9
109	kaltgezogen	1470 / 1670	rund, profiliert	7.0	NDI	10.3	13.0
110	kaltgezogen	1570 / 1770	rund, profiliert	5.0	NDI	10.6	12.2
111	kaltgezogen	1375 / 1570	rund, glatt	5.0	NDI	10.0	12.9
112	vergütet	1420 / 1570	rund, gerippt	7.2	Krupp - Sigma	10.0	13.7
113	vergütet	1420 / 1570	rund, gerippt	7.2	Krupp - Sigma	10.0	14.1
114	vergütet	1320 / 1470	oval, gerippt	8.0	F & G Carlswerk	10.1	13.6
115	vergütet	1320 / 1470	oval, gerippt	8.0	F & G Carlswerk	10.1	13.7

Tabelle 8-2. Magnetische Kennwerte der untersuchten Betonstahlproben

M_{Hc} : Koerzitivfeldstärke
 M'_R : Querschnittsbezogene Flußdichte, die annähernd proportional zur Remanenz ist (siehe Erläuterung in Kap. 2.4.2)

Probennummer	Bezeichnung	Durchmesser in mm	M' in $\mu T / mm^2$	M_{Hc} in A / cm
S2	BSt 500 S	12.0	9.2	6.3
S3	Stahl I	12.0	9.2	2.7
S4	Stahl I	7.0	8.7	2.7
S5	Stahl I	7.0	9.0	3.5
S6	BSt 500 S	6.0	10.2	8.2
S7	BSt 420 S	14.0	9.5	5.3
S8	BSt 420 S Rippentorstahl	12.0	7.5	3.5
S9	BSt 500 S	10.0	9.9	7.3
S10	BSt 500 S	10.0	8.4	6.5
S11	BSt 420 S	10.0	8.4	4.2
S12	Stahl I	16.0	9.4	2.6
S13	BSt 420 S Rippentorstahl	19.0	9.2	4.4

9 Anhang II - Photographien

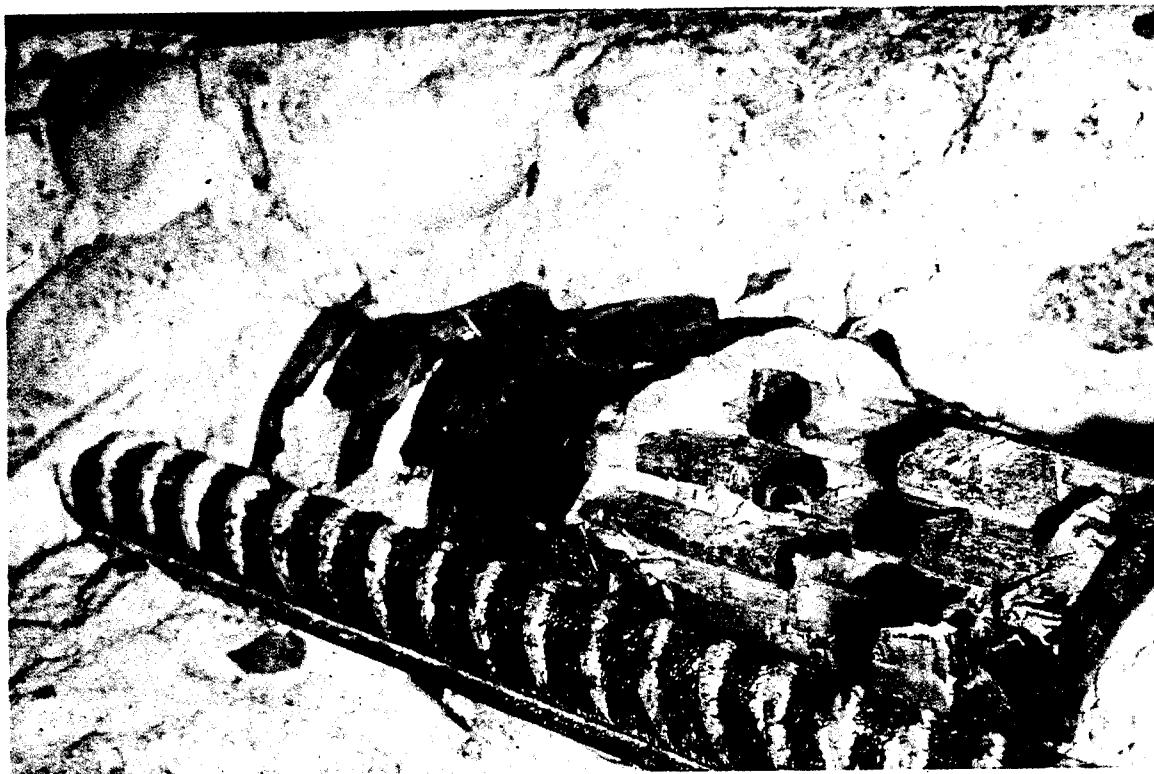


Abb. 9-1. Blick auf die Bruchstelle eines Spannglieds. Die dunklen Stellen der Spannstähle waren bereits vor dem Versagen des Binders gebrochen.

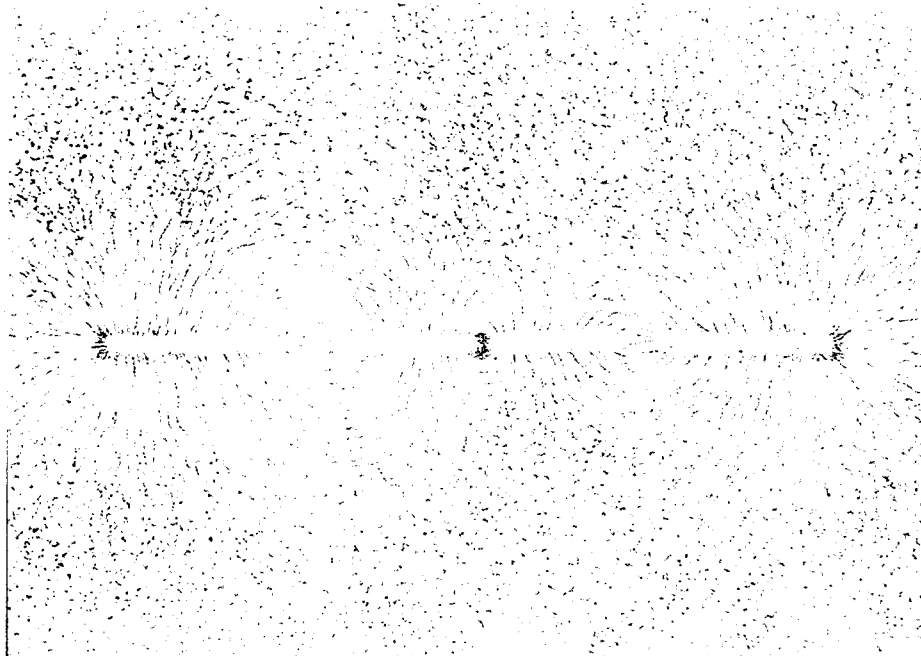


Abb. 9-2. Die Anordnung von Eisenfeilspäne um einen magnetisierten gebrochenen Spanndraht zeigt den Verlauf der magnetischen Feldlinien. In der Umgebung der Bruchstelle treten die Feldlinien fast senkrecht aus dem Stahl aus.

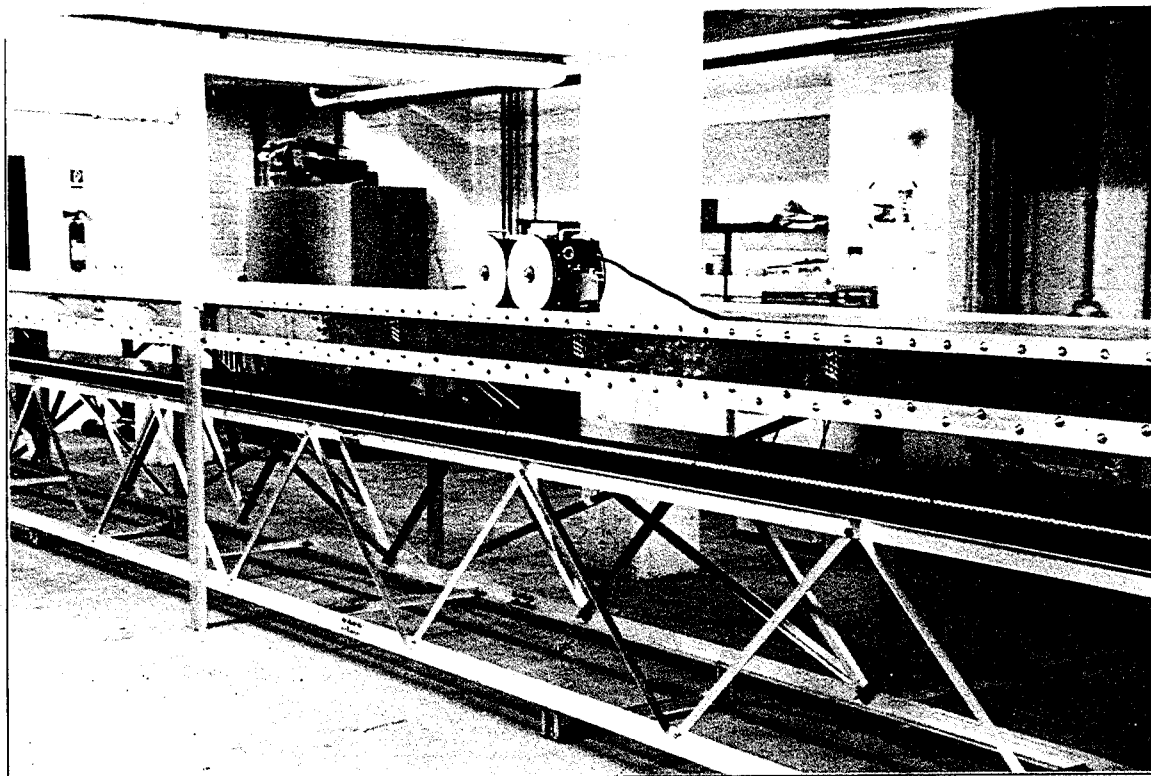


Abb. 9-3. Der Versuchsstand.
Auf dem oberen Tisch können die Geräte entlang des Spanngliedverlaufs geführt werden. Auf dem höhenverstellbaren und herausfahrbaren unteren Tisch können die Spannglieder und eine Stahlbetonbewehrung angeordnet werden.

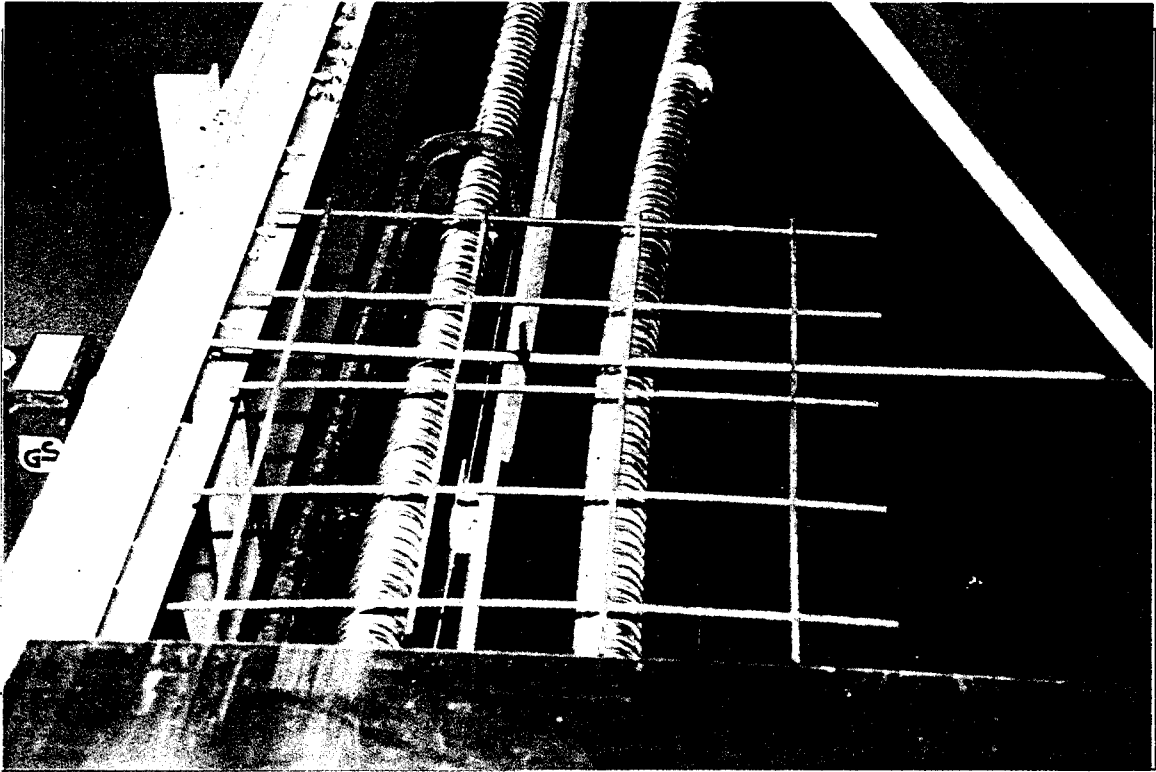


Abb. 9-4. Die Platten des Obertischs des Versuchsstands sind klappbar, so daß auch hier Stahlbetonbewehrung eingebaut werden kann. Die Probespannglieder können dann ausgetauscht werden, ohne daß die Anordnung der Stahlbetonbewehrung verändert werden muß.

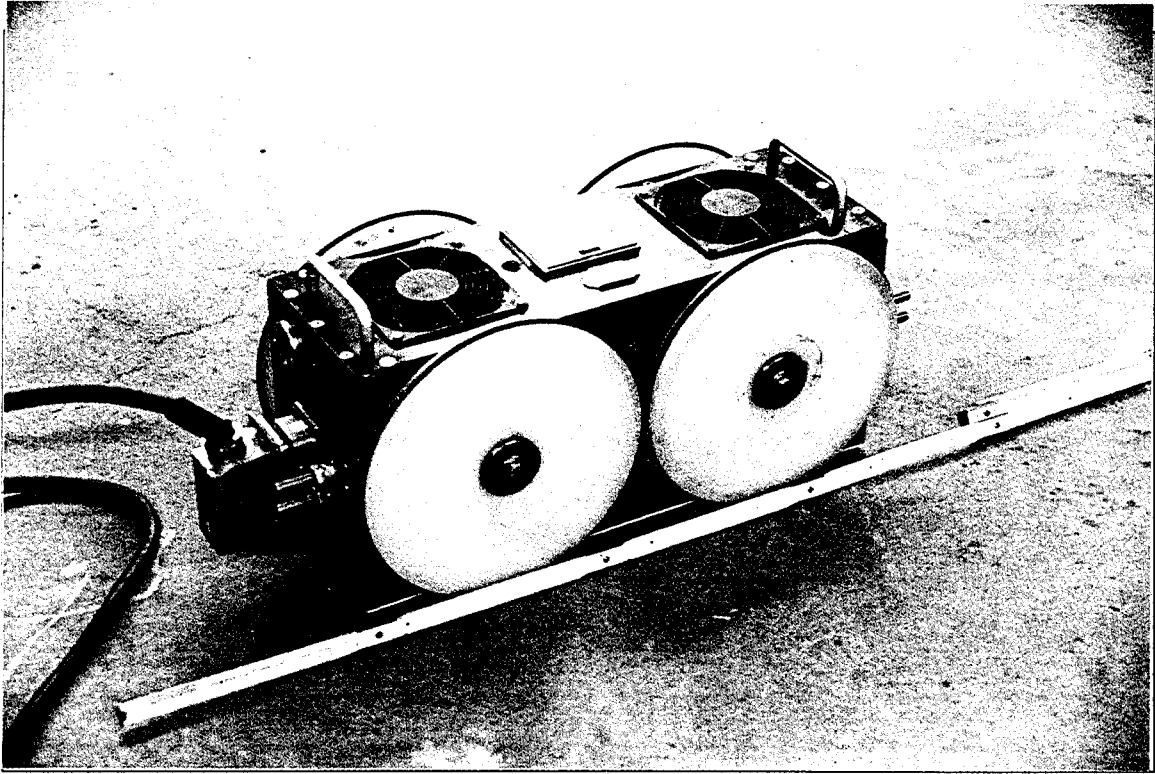


Abb. 9-5. Der mobile Magnet, mit dem die Spannglieder von der Betonoberfläche aus permanent magnetisiert werden. Er wird über eine Steuereinheit regelbar mit Gleichstrom (bis zu 25-A) betrieben. Der Magnet erwärmt sich durch den Betrieb. Deshalb sind zwei Ventilatoren zur Beschleunigung des Wärmeaustauschs eingebaut. Außer an der Steuereinheit wird die Stromstärke auch direkt am Magneten angezeigt.

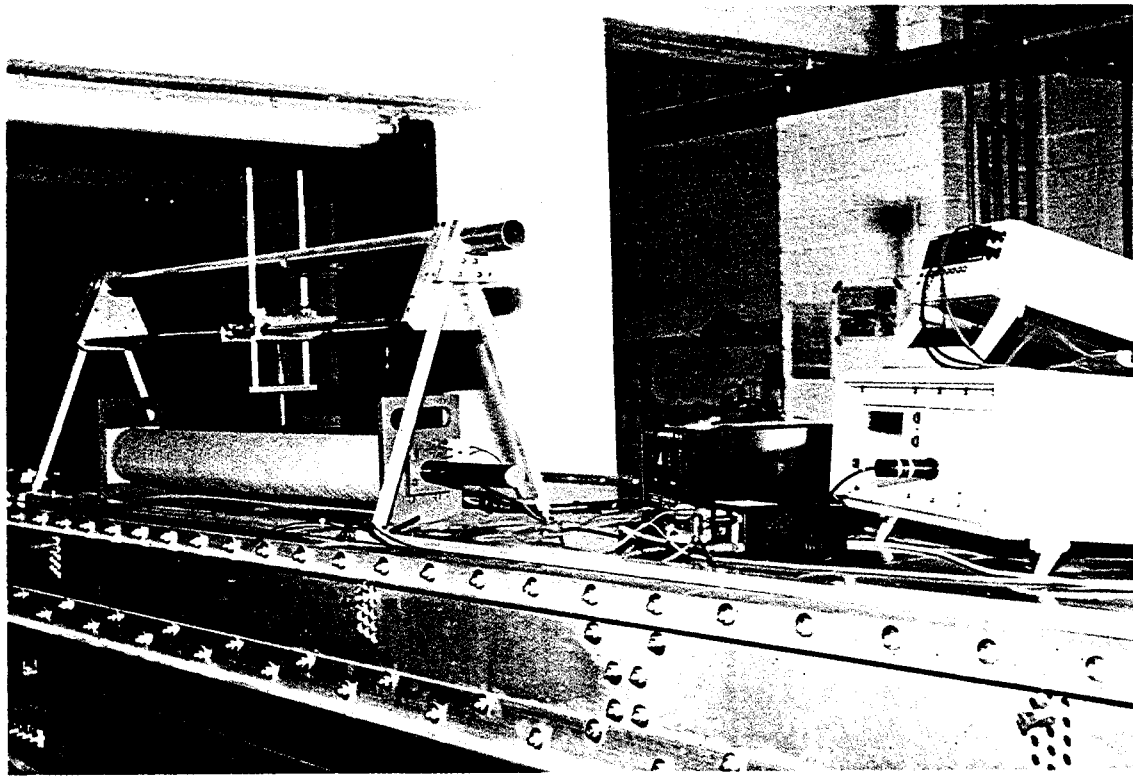


Abb. 9-6. Die stationäre Spule.

Mit dem abgebildeten Versuchsaufbau wurde die Koerzitivfeldstärke M_{HC} der Stahlproben bestimmt. Zentral über der mit grauem Isolierband umwickelten Spule ist die Hallsonde positioniert. Die Komponente der von der leeren Spule erzeugten magnetischen Flußdichte, die parallel zur Achse der Hallsonde gerichtet ist, ist in der eingestellten Sondenposition gleich Null. Rechts stehen das Feldstärkenmeßgerät und das DMM.

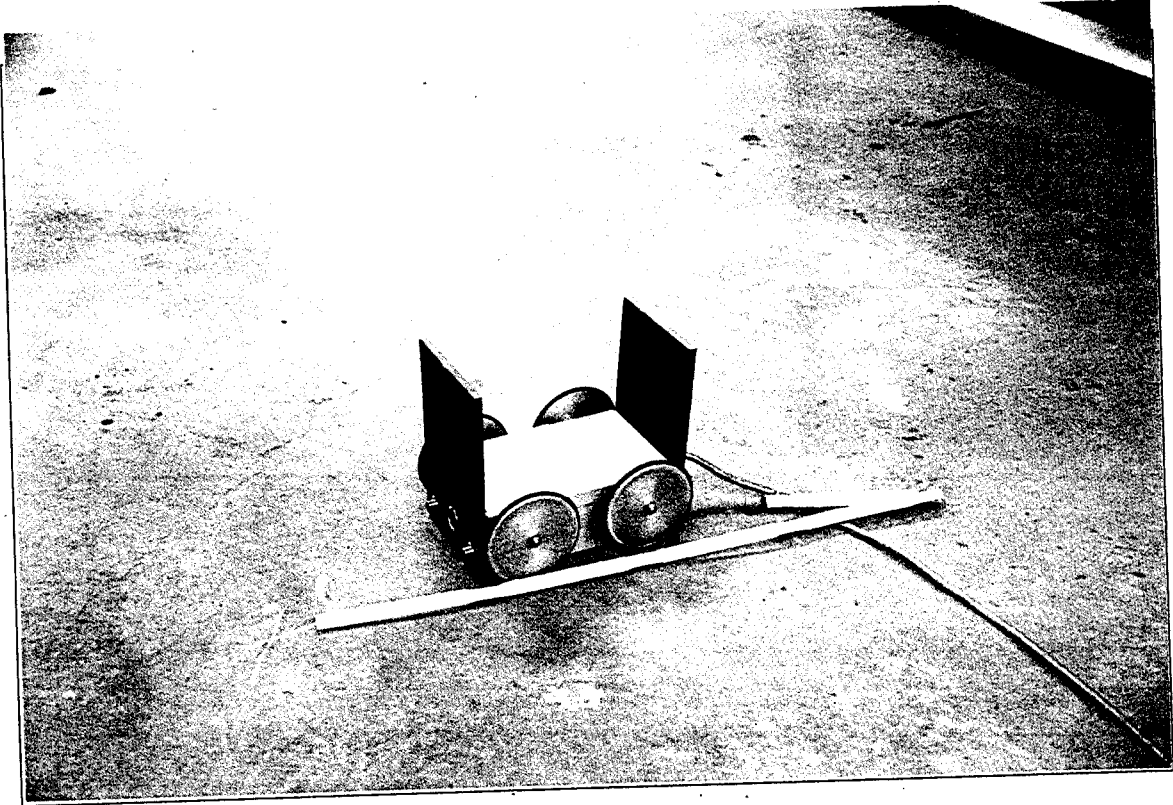


Abb. 9-7. Der Meßwagen.
In dem Gehäuse ist das Hallsonden-Array und der Wegaufnehmer untergebracht, der über eine Achse angetrieben wird. Die Spannungsversorgung und die elektronischen Schaltungen für Verstärkung, Nullabgleich und Temperaturkompensation sind in einer Steuereinheit untergebracht. Von dieser Einheit aus werden die Signale über eine A/D-Wandlerkarte in einen Meßrechner eingelesen und dargestellt.

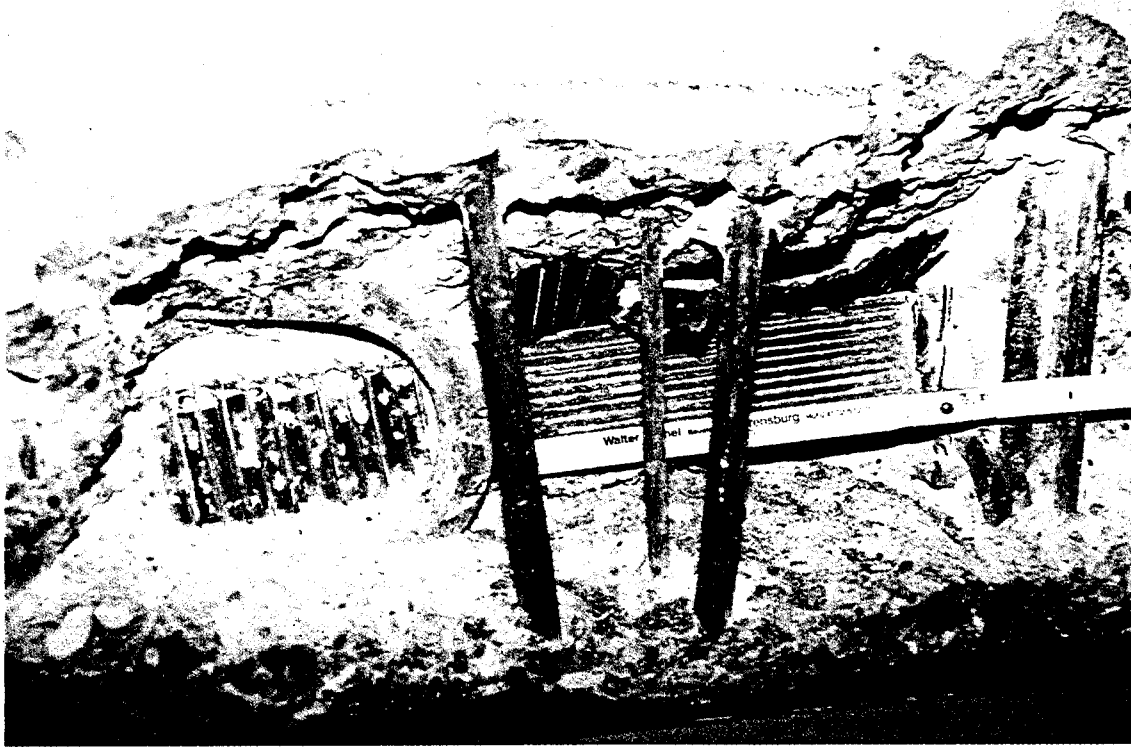


Abb. 9-8. Eine geöffnete Stelle an einem Brückenbauwerk. Zwischen dem Spann-
glied und der Betonoberfläche liegt neben der Querbewehrung das zur
Verankerung umgebogene Ende eines Längsbewehrungsstabs. Eine
schwierige Bewehrungskonstellation, die für die Interpretation der Meß-
kurven genaue Kenntnis darüber verlangt, welche Restfeldmagnetisierun-
gen die einzelnen Bewehrungsstäbe nach den jeweiligen Magnetisierungs-
schritte haben.

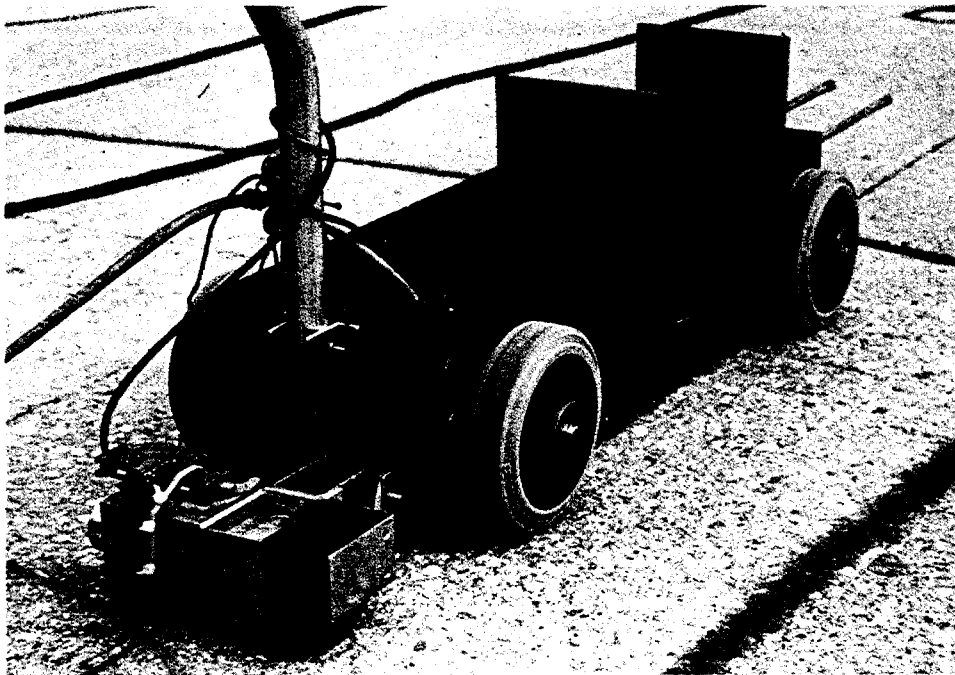
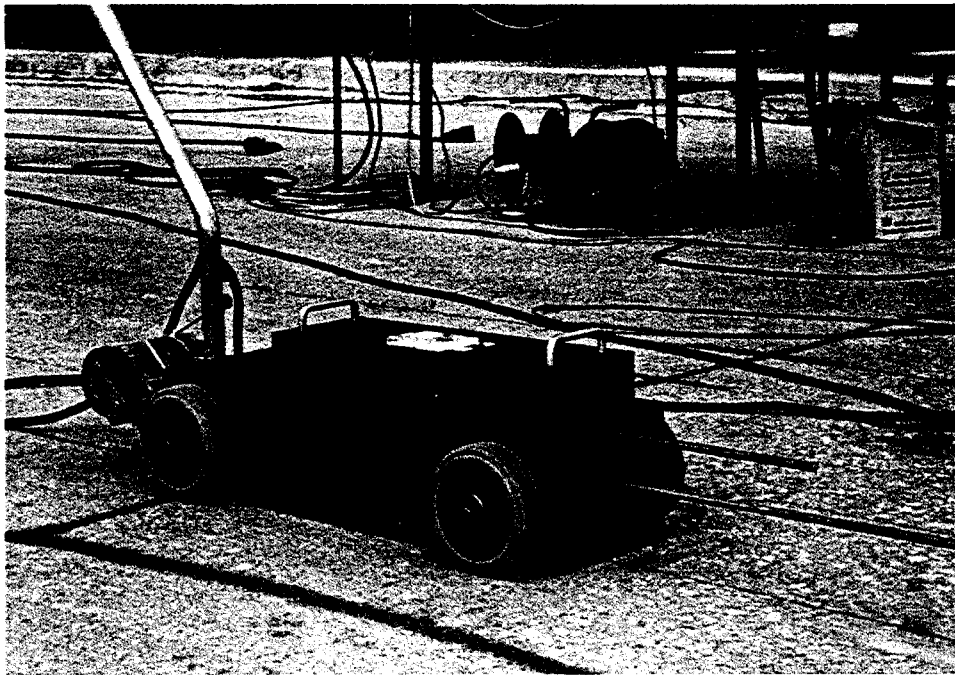


Abb. 9-9. Der Handwagen mit dem die Geräte bei oberliegenden Spanngliedern über die Betonoberfläche gefahren werden. In der Photographie oben ist der elektrische Jochmagnet in den Wagen eingesetzt. In der unteren Photographie zeigt Messung der magnetischen Flußdichte. Im Handwagen befindet sich das Gehäuse mit dem Hallsonden-Array. Hinten am Wagen wird der zurückgelegte Weg über ein Rad aufgenommen.

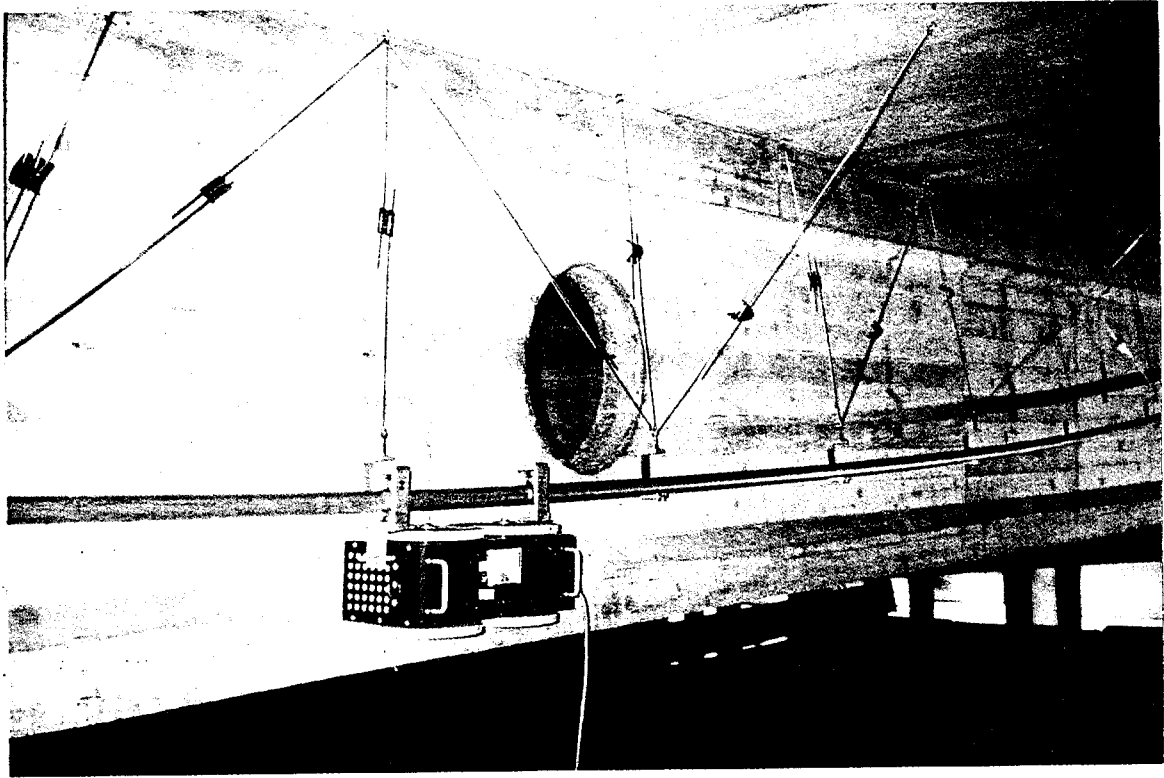


Abb. 9-10. Ein flexibles Aluminiumrohr dient zur Führung der Geräte, wenn die Untersuchung der Spannglieder von der Bauteilseitenfläche aus erfolgt. Dem gekrümmten Verlauf der Spannglieder kann so gefolgt werden. Das System ist andererseits so steif, das es unter der Last des hier abgebildeten Elektromagneten ($m \approx 35 \text{ kg}$) nicht verbiegt.

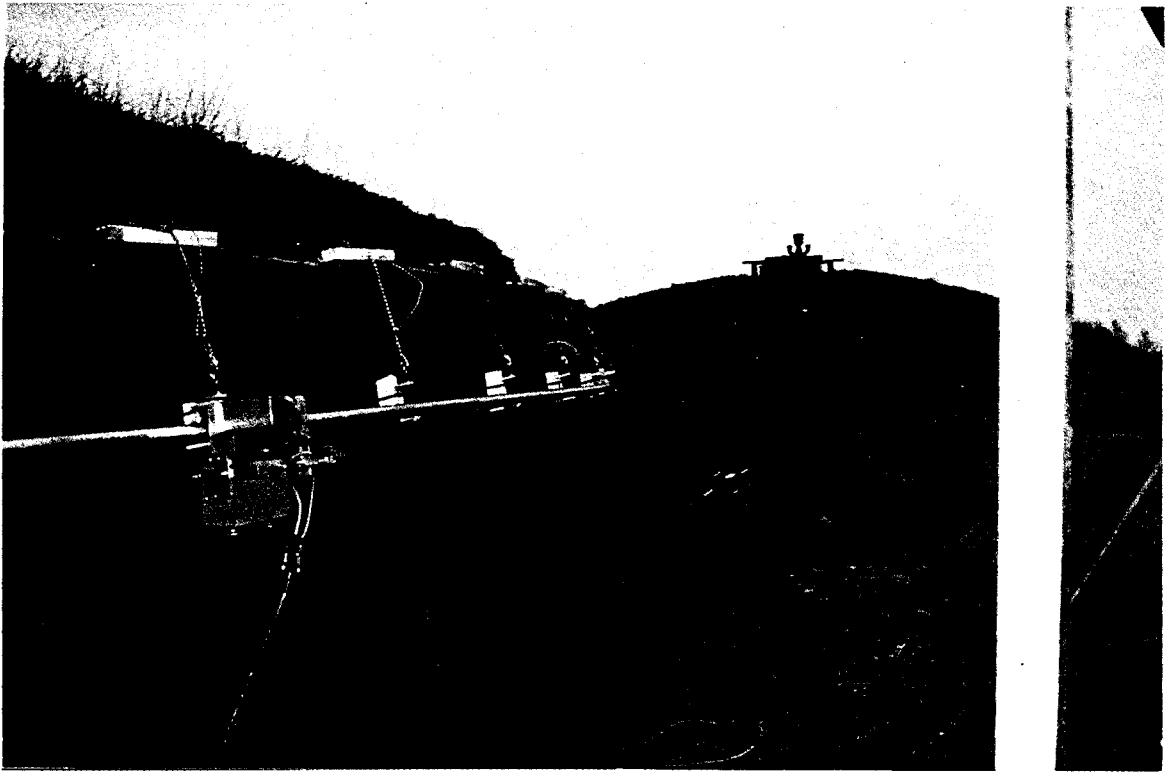


Abb. 9-11. Das Aluminiumrohr eignet sich auch zur Führung der Geräte bei runden Spannbetonbauteilen. Auf der Photographie ist der Meßwagen eingehängt. In dem Aluminiumgehäuse in Höhe der Aufhängung ist der Wegaufnehmer untergebracht.

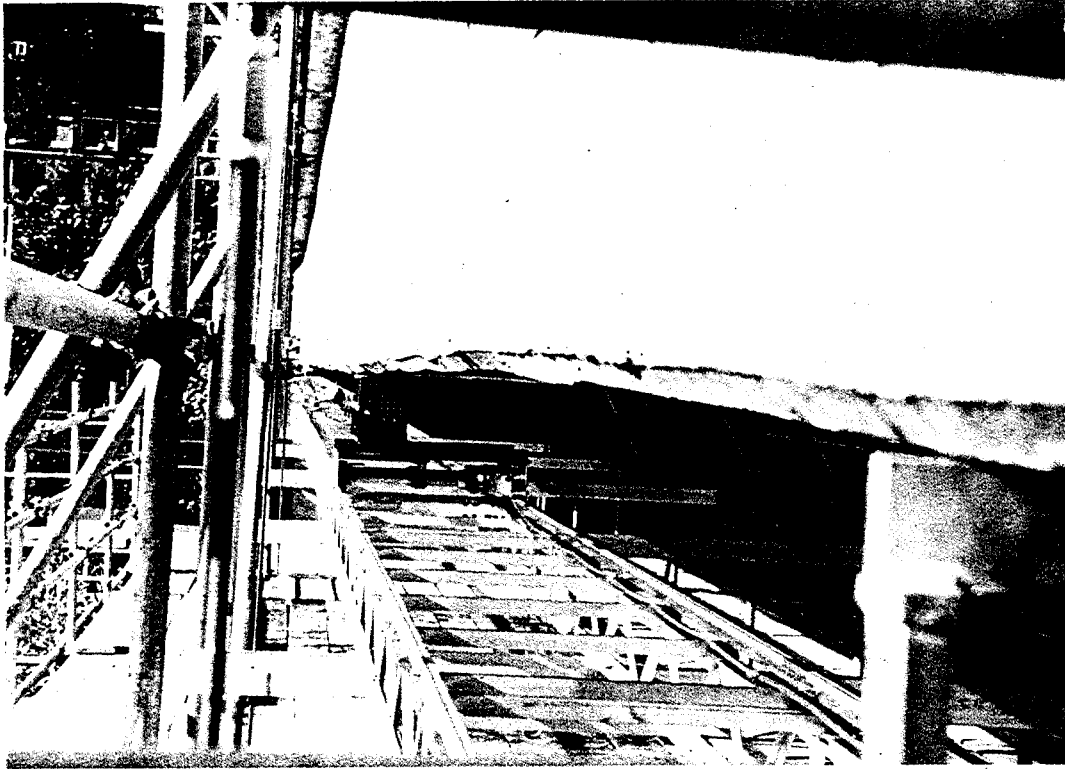


Abb. 9-12. Das Gitterträgersystem zur Führung der Geräte ist unter einem Brückenbauwerk installiert. Es wird eingesetzt, wenn eine Überprüfung der Spannglieder von der Bauteilunterseite aus erfolgt.



Abb. 9-13. Auf dem Gitterträgersystem läuft ein Schienenwagen, der über Zugseile angetrieben wird. Auf dem Schienenwagen werden die Geräte so positioniert, daß sie sich möglichst genau unterhalb der Spanngliedachse bewegen.

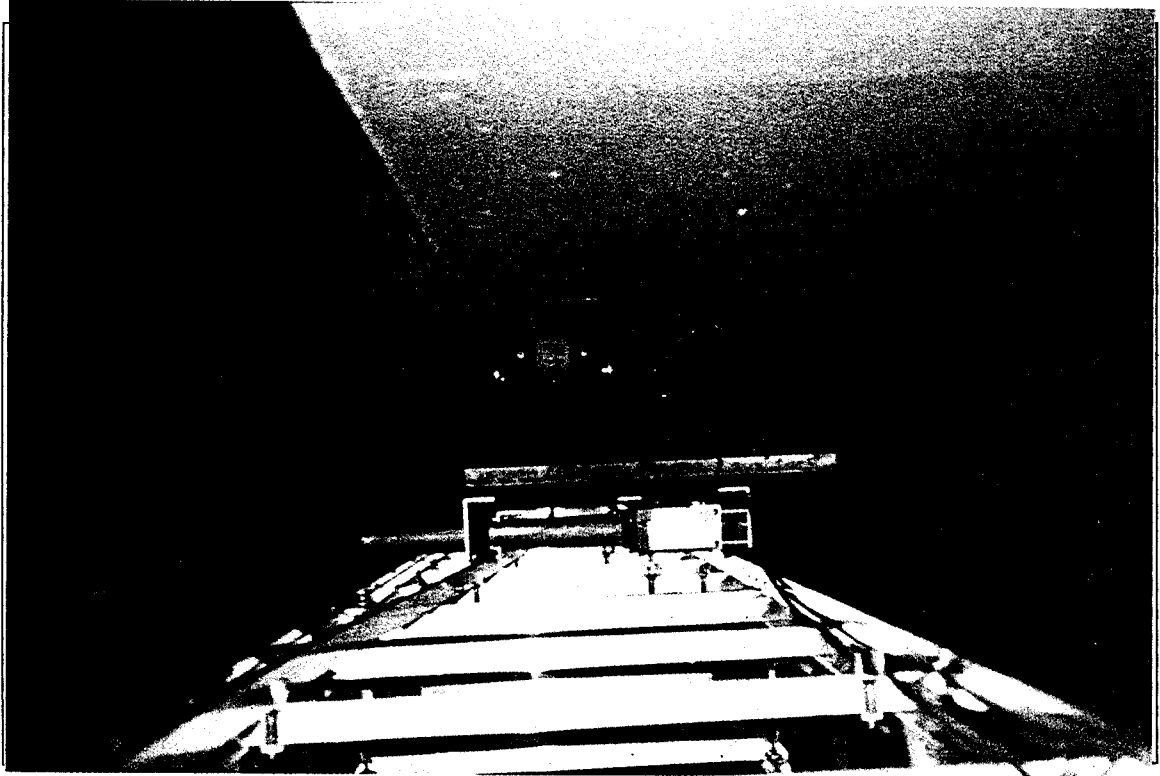


Abb. 9-14. Wenn die von der Bauteilunterseite aus untersuchten Spannglieder horizontal gekrümmt verlaufen, wird die Platte des Schienenwagens (Abb. 9-13), auf dem sich die Geräte befinden, über eine entsprechend dem Spanngliedverlauf gekrümmtem Schiene verschoben.



Abb. 9-15. Die Radarortung der Spannglieder. Wenn keine Bewehrungspläne vorliegen oder mit Abweichungen von den Plänen bei der Bauausführung gerechnet werden muß, wird vor der Spannstahlbruchortung die Lage der Spannglieder geortet.



Abb. 9-16. Bruch eines Querspannglieds in einer Fahrbahnplatte. Das bruchartige Signal wurde fälschlicherweise als von der Stahlbetonbewehrung verursacht angesehen. Direkt neben der Bruchstelle des Spannstahls liegt die Bruchstelle eines Längsbewehrungsstabs. Ein anderer Längsbewehrungsstab endet neben der Bruchstelle und überlappt diese knapp. Bei der damals angewandten Magnetisierungstechnik wurden die Störsignale, die durch die Stahlbetonbewehrung verursacht werden, nicht stark genug unterdrückt.

10 Anhang III - Numerische Simulation der Flußverteilung bei der Magnetisierung mit einem Jochmagneten

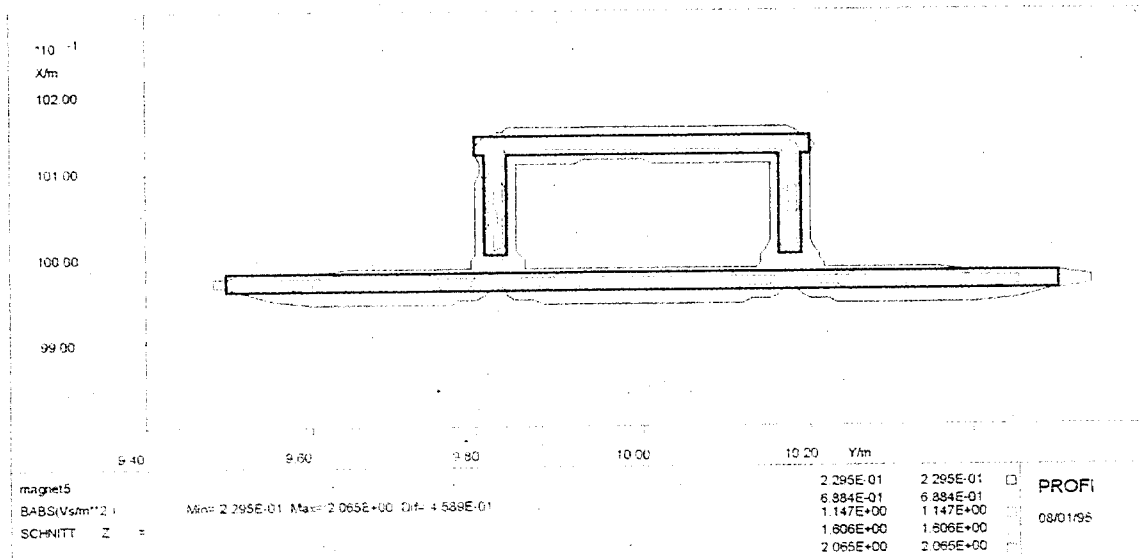


Abb. 10-1 Die Verteilung des Absolutbetrags der magnetischen Flußdichte. Die Anordnung zeigt den Jochmagneten über einem Eisenstab. Einfache Symmetriebetrachtungen zeigen, daß die Werte der Flußberechnung noch weit von ihrer Konvergenz entfernt sind (Kap. 4.2).

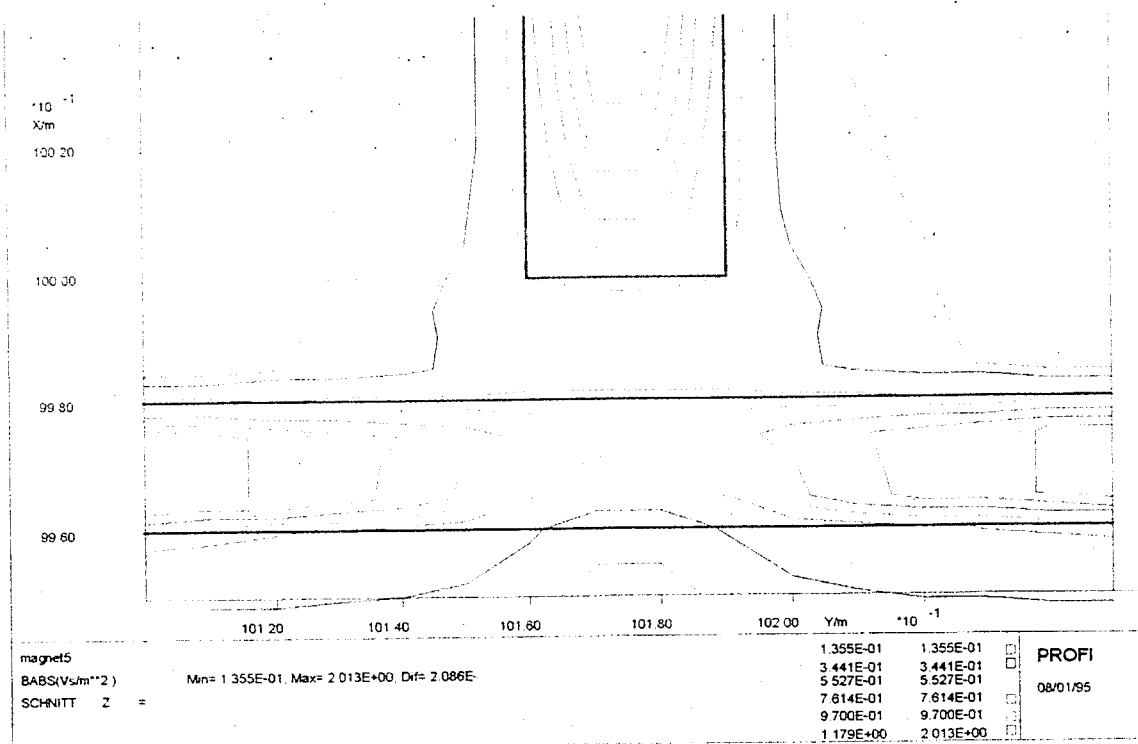


Abb. 10-2 Detail der Abb. 10-1 : Übergang des magnetischen Flusses von einem Fuß des Jochmagneten in den Stab.

11 Anhang IV - Die Vorstellung des Remanenzmagnetismus-Verfahrens auf der Hannover Messe '95

Vom 3. bis zum 8. April 1995 wurde das Remanenzmagnetismus-Verfahren auf der Hannover-Messe der Öffentlichkeit präsentiert. Die Teilnahme an der Messe wurde durch den 'Forschungsmarkt Berlin', einer Initiative von Wissenschaft und Wirtschaft im Auftrag der Senatsverwaltung für Wissenschaft und Forschung, ermöglicht.

Die Verfahrensschritte wurden an einem zu diesem Zweck konstruierten Betonbalken-Modell demonstriert (Abb. 11-1). In dem durchsichtigen aus Plexiglas gefertigten Balken war eine Stahlbetonbewehrung (grün lackiert) und ein Spannglied (rot lackiert) eingebaut. Die Spannstaahlbündel bestanden aus sieben Drähten, von denen einer, zwei bzw. drei gebrochen waren, so daß der Einfluß des Schädigungsgrads auf die Bruchsignalstärke gezeigt werden konnte. Die Spannstaahlbündel konnten von den Besuchern des Stands eingehendig in das Hüllrohr eingebaut werden. Sie konnten dadurch die Lage der Brüche selbst bestimmen. Auf dem Betonbalken-Modell wurden der Elektromagnet und der Meßwagen über das Spannglied geführt werden. Die wegabhängig gemessene magnetischen Flußdichte wurden synchron zur Messung auf einem Monitor dargestellt.

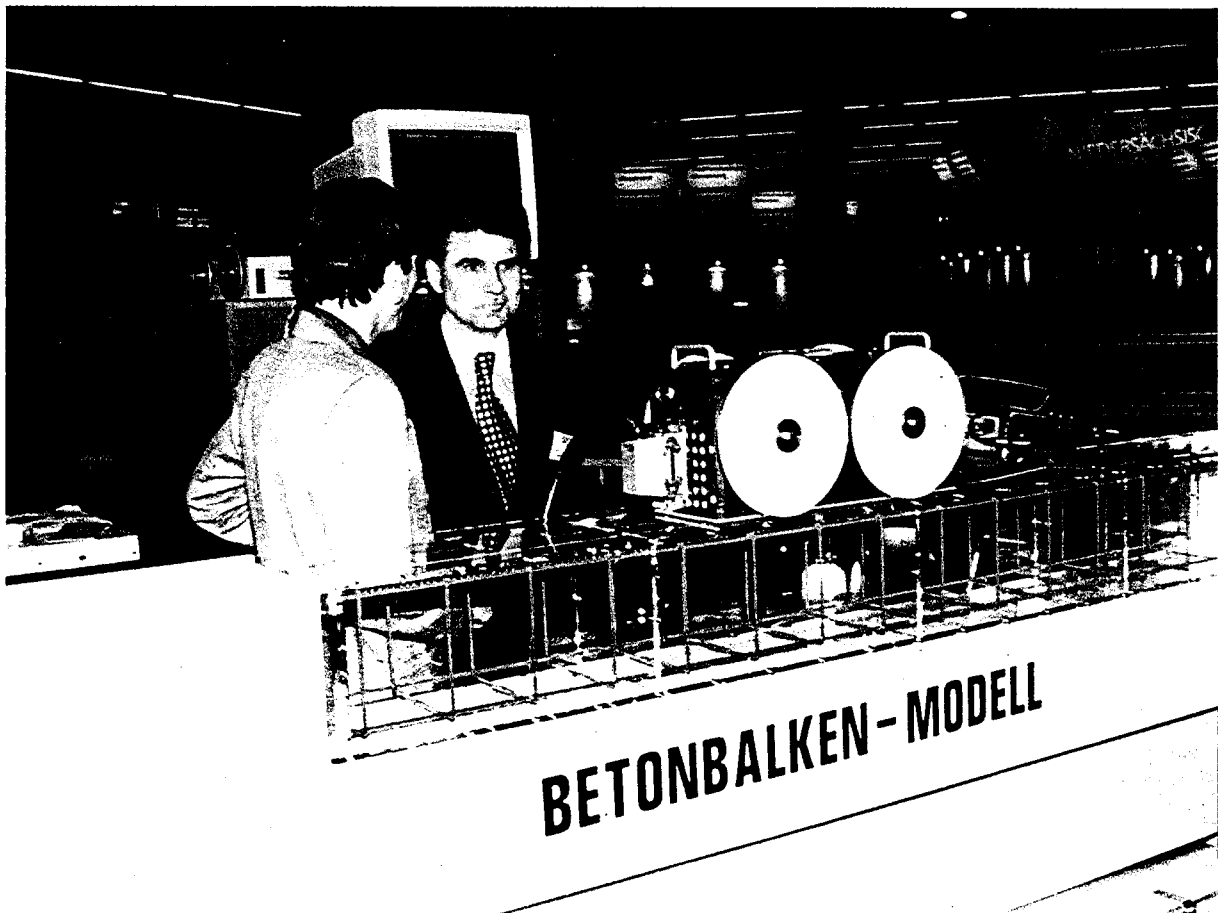


Abb. 11-1 Der Messestand auf der Hannover Messe '95