

DISSERTATION ETH ZÜRICH NO. 20791

**ZUR DETEKTION VON BETONSTAHLBRÜCHEN
MIT DER MAGNETISCHEN STREUFELDMETHODE**

ABHANDLUNG
zur Erlangung des Titels

DOKTOR DER WISSENSCHAFTEN

der

ETH ZÜRICH

vorgelegt von

THOMAS WOLF
Diplomingenieur Bauwesen, Universität Rostock

geboren am 18.09.1980
deutscher Staatsbürger

Angenommen auf Antrag von

Prof. Thomas Vogel, Referent
Prof. Dr. Masoud Motavalli, Korreferent

2012

Kurzfassung

Obgleich eine Vielzahl von zerstörungsfreien Prüfmethode für das Bauwesen existiert, findet sich darunter keine, die den Zustand der Betonstahlbewehrung mit vergleichsweise geringem Aufwand eruieren lässt. Bei der hier vorgestellten magnetischen Streufeldmethode liegt der Fokus auf der Zustandsbeurteilung der Betonstahlbewehrung hinsichtlich vorhandener Brüche. Aufgrund ferromagnetischer Eigenschaften der Bewehrung lassen sich die Gesetzmässigkeiten des Magnetismus auf dieses Baumaterial übertragen und nutzen.

Der Magnetismus ist ein natürliches Phänomen, ohne das ein Leben wie wir es kennen nicht möglich wäre. Das Erdmagnetfeld hält bspw. hochenergetische Teilchen aus dem Weltraum ab und in Generatoren ist die Umwandlung elektrischer in mechanische Energie nur über den Magnetismus möglich. Im ersten Teil der hier vorliegenden Abhandlung gibt ein geschichtlicher Abriss die Stationen der Entdeckungen und des Verstehens des Magnetismus wieder und zeigt auf, wie die Menschheit bis zum 20. Jahrhundert gelernt hat, den Magnetismus vollständig physikalisch und quantenmechanisch zu erklären. Anschliessend wird – soweit es zur Erläuterung der magnetischen Streufeldmethode notwendig erscheint – die Ursache des Magnetismus in fester Materie beschrieben. Darauf aufbauend wird die Berechnung und Darstellung von Magnetfeldern erklärt. Der Untersuchungsschwerpunkt, Brüche in der Betonstahlbewehrung zerstörungsfrei festzustellen, geht mit der Forderung einher, entsprechende Anzeichen eines Bruches zu kennen und ermitteln zu können. Die für einen Bruch charakteristischen Signalmuster werden ebenfalls im ersten Teil vorgestellt.

Im zweiten Abschnitt der Arbeit werden die magnetische Streufeldmethode eingehender beschrieben und die dazu notwendigen Bestandteile erläutert. Neben Magneten und Sensoren wird auch die Datenerfassung eingehender beleuchtet.

Im dritten Abschnitt werden die zum Vergleich mit der Feldtheorie des Magnetismus durchgeführten Versuche vorgestellt. Neben der Beschreibung der Versuchsdurchführung werden Informationen zum jeweiligen Versuchsaufbau gegeben. Zunächst werden die Versuche an einzelnen Bewehrungsstäben und anschliessend die Versuche mit komplexen Bewehrungsanordnungen erläutert.

Den Darstellungen der Versuchsergebnisse im vierten Abschnitt folgt die Auswertung im fünften Teil der Arbeit. Hierbei wird auf die verschiedenen Versuche eingegangen und die während der Versuche aufgetretenen Schwierigkeiten und Probleme genau benannt. Die einflussnehmenden Parameter, die eine Detektion von Brüchen erst ermöglichen, werden im Einzelnen erläutert. Die sich daraus ergebenden Möglichkeiten, aber auch Grenzen der magnetischen Streufeldmethode, werden abschliessend aufgezeigt und beurteilt.

Mit den Schlussfolgerungen im sechsten Abschnitt wird die Anwendbarkeit der Methode diskutiert. Trotz einiger, noch offener Fragestellungen, stellt die magnetische Streufeldmethode ein probates Mittel zur zerstörungsfreien Zustandserfassung der Betonstahlbewehrung dar. Obwohl Brüche auf diese Weise erkannt werden konnten, ist die Methode lediglich eines von vielen Werkzeugen der in der Praxis tätigen Ingenieure. Zur Steigerung der Detektionsrate im Allgemeinen und speziell bei komplexen Bewehrungsanordnungen sind vom jetzigen Standpunkt aus betrachtet weitere Forschungs- und Entwicklungsschritte notwendig.

Abstract

Although there is a variety of non-destructive testing methods in the field of civil engineering, they all require much effort to determine the state of the reinforcement. The present doctoral thesis focuses on assessing the condition of the reinforcement by determining the amount of existing breaks with the magnetic flux leakage method. Due to the ferromagnetic properties of the reinforcement, the laws of magnetism apply to this building material.

Magnetism is a natural phenomenon. Without magnetism, life as we know it would not be possible. For example, the geomagnetic field shields us from high-energy particles from outer space and in generators magnetism enables electrical energy to be converted into mechanical energy. In the first part of the present thesis a historical summary illustrates the different stages during the discovery of magnetism and outlines how humankind learned to explain magnetism based on physics and quantum mechanics. Subsequently, the cause of magnetism in solid matters is discussed as far as needed to understand the magnetic flux leakage method. Based on the principles of magnetism, the computation and visualization of magnetic fields is described. This study is focused on the non-destructive identification of breaks in reinforcement bars as well as recognizing and identifying signs of failure. The characteristic signal patterns for breaks are also presented in the first part.

In the second part, the magnetic flux leakage method and the components of the measurement system are described in detail. Besides the magnets and sensors, the data acquisition is thoroughly examined.

The third section presents the test series, which were carried out to validate the method. Besides a description of the experiments, information on each experimental setup is given. First, the tests on single reinforcing bars and then the tests with more complexly arranged reinforcing elements are explained.

The evaluation of the experimental results, which are represented in the fourth part, follow in the fifth part of the work. The different tests are discussed in detail and the difficulties and problems encountered during the tests are named. The controlling parameters, which allow the detection of breaks, are discussed in detail. The resulting possibilities and limitations of the magnetic flux leakage method are conclusively demonstrated and assessed.

Within the conclusions in the sixth section, the applicability of the method is discussed. Despite some remaining open questions, the magnetic flux leakage method is an effective instrument for the non-destructive condition assessment of reinforcing bars. Although breaks were able to be detected this way, the method is only one of many tools for engineers in practice. From the current point of view further research and development steps are necessary to increase the detection rate in general as well as for complex arrangements of reinforcing elements.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Problemstellung	1
1.2	Zielsetzung	1
1.3	Abgrenzung	2
1.4	Verständigung	2
2	Grundlagen	5
2.1	Stand des Wissens und der Entwicklung	5
2.1.1	Anwendungen im Stahlbau	5
2.1.2	Detektion von Spannstahlbrüchen	6
2.1.3	Entwicklung bildgebender Verfahren	6
2.1.4	Anwendung für Betonstahl	7
2.2	Magnetismus	7
2.2.1	Geschichte des Magnetismus	7
2.2.2	Physikalische Grundlagen	9
2.2.3	Magnetfelder	16
2.2.4	Charakteristische Kurvenverläufe und -signale	23
2.3	Magnetische Streufeldmethode	27
2.3.1	Prozedere	27
2.3.2	Magnet	28
2.3.3	Sensor	29
2.3.4	Kalibrierung	31
2.3.5	Messwagen	32
2.3.6	Datenerfassung	33
3	Versuche	37
3.1	Vorversuche	37
3.1.1	Intakter und gebrochener Bewehrungsstab	37
3.1.2	Bewehrungslayouts	38
3.1.3	Gegenüberstellung von Ermüdungs- und Verformungsbrüchen	41
3.2	Umgebungsfelder	41
3.2.1	Versuchsaufbau	42
3.2.2	Versuchsdurchführung	42
3.3	Hauptversuch am Stahlbetonrahmen	43
3.3.1	Versuchsaufbau	44
3.3.2	Versuchsdurchführung	44
3.3.3	Versuchsabschluss	47
4	Versuchsergebnisse	49
4.1	Vorversuche	49
4.1.1	Versuch zum Abstandsverhalten	49
4.1.2	Versuch zum Bruchflächenabstand	51
4.1.3	Versuch zu Bewehrungsstößen	54

4.1.4	Versuch zum Stablängeneinfluss	57
4.1.5	Bewehrungslayouts	59
4.1.6	Gegenüberstellung von Ermüdungs- und Verformungsbrüchen	63
4.2	Umgebungsfelder	66
4.3	Hauptversuch am Stahlbetonrahmen	68
4.3.1	Vorhandene Brüche	68
4.3.2	Vergleich von detektierten und vorhandenen Brüchen	69
4.4	Automatische Suche nach Bruchsignalen	71
5	Beurteilung der Versuchsergebnisse	77
5.1	Detektierbarkeit von Betonstahlbrüchen	77
5.2	Kurvenverläufe und Charakteristika der Bruchsignale	77
5.3	Fehler bei der Bruchdetektion	78
5.4	Genauigkeit der Bruchdetektion	79
5.5	Einfluss der Brucheigenschaften	79
5.5.1	Art des Bruchs	79
5.5.2	Einfluss des Bruchflächenabstandes	79
5.5.3	Einfluss der Bruchoberflächen	80
6	Schlussfolgerungen	81
6.1	Erkenntnisse	81
6.2	Folgerungen	82
6.3	Weiterer Forschungsbedarf	82
	Bezeichnungen	85
	Literatur	89
	Dank	93
	Lebenslauf	95
Anhang A	Kenndaten der verwendeten Geräte	97
Anhang B	Magnetfeldsimulationen	99
Anhang C	Umgebungsfelder	105
Anhang D	Abstandsverhalten	109
Anhang E	Bruchflächenabstand	111
Anhang F	Bruchsignale	113

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

Im Zuge einer Forschungsarbeit zur Untersuchung des Ermüdungsverhaltens von Stahlbetonbrücken am Institut für Baustatik und Konstruktion (IBK) der ETH Zürich ergab sich der Bedarf, Betonstahlbrüche an einem Stahlbetonrahmen zerstörungsfrei zu detektieren. Zunächst wurden bereits etablierte zerstörungsfreie Prüfmethode wie Durchstrahlungsverfahren und Potentialfeldmessung in Betracht gezogen, dann aber als zu aufwendig und gesundheitsgefährdend für die am Versuch beteiligten Personen eingestuft oder als indirekte Methode ausgeschlossen.

Die magnetische Streufeldmethode hat sich bei der Bruchlokalisierung in Spanngliedern bereits bewährt und sollte nun bei der Detektion von Brüchen in der Betonstahlbewehrung getestet werden. Neben etlichen kleineren Versuchen, die mehrheitlich der Konfiguration der verwendeten Geräte und Messinstrumente dienten, wurde die Anwendung der Methode im Grossversuch angestrebt.

Da es auch ohne die Kenntnis über die vorherige Schadensentwicklung eines Bauteils möglich ist, den Ist-Zustand der Bewehrung hinsichtlich eventueller Brüche festzustellen, wurde die Methode auf ihre Anwendbarkeit beim Betonstahl hin untersucht. Ihr wird das Potential zugestanden, dem Ingenieur in Zukunft als ein mögliches Werkzeug bei der Zustandserfassung von Stahl- und eventuell Spannbetonbauteilen zur Verfügung zu stehen.

1.2 Zielsetzung

Diese Abhandlung hat zum Ziel, die für eine erfolgreiche Detektion von Betonstahlbrüchen notwendigen theoretischen Grundlagen wiederzugeben und die für ein Messsystem benötigten Bestandteile aufzuzeigen.

Im ersten Teil wird die Theorie des Magnetismus und die der elektromagnetischen Felder erläutert und die für die Berechnung einfacher Magnetfelder notwendigen Gleichungen und Eingangswerte vorgestellt.

Anschliessend folgt eine Einführung in die magnetische Streufeldmethode, die zudem aufzeigt, welche grundlegenden Bestandteile für ein Messsystem zur Erfassung von magnetisch remanenten Magnetfeldern notwendig und geeignet sind. Magnete und Sensoren werden ihren physikalischen bzw. messtechnischen Eigenschaften nach beurteilt und die für das Messsystem infrage kommenden Bestandteile zusammengestellt.

Die Erkennung von Brüchen in der Betonstahlbewehrung setzt voraus, dass man Kenntnis über die Muster der im Bauwesen gängigsten Bewehrungsanordnungen wie bspw. Kreuzungen, Stösse, Abbiegungen etc. hat, um diese von typischen Bruchsignalmustern unterscheiden zu können. Anhand geeigneter Versuchsanordnungen wird die Ermittlung charakteristischer Messwerte ermöglicht, um diese für spätere Auswertungen heranziehen zu können.

Eine graphische Auswertung der gewonnenen Messwerte soll den Ingenieuren ein praxistaugliches Werkzeug zur Verfügung stellen, anhand dessen (vor Ort) eine Aussage über das Vorhandensein eines Bruches bzw. einer Fehlstelle getroffen werden kann.

Langfristig wird auf diesem Weg eine zerstörungsfreie Detektion von Brüchen und Schadstellen von im Verbund wirkender Betonstahlbewehrung angestrebt.

1.3 Abgrenzung

Die vorliegende Arbeit beschränkt sich auf den Festkörpermagnetismus im Allgemeinen und den Ferromagnetismus im Speziellen. Der durch die Bewegung von Elektronen innerhalb elektrischer Leiter hervorgerufene Magnetismus wurde hingegen nicht untersucht.

Magnetfelder unterliegen dem Superpositionsprinzip, womit die durchgeführten Messungen stets von umgebenden Magnetfeldern beeinflusst wurden. Eine Aussage über die tatsächlich vorhandenen absoluten Messwerte konnte demnach nicht angestellt werden, weshalb die hier vorgestellten, einheitenbehafteten Resultate mehrheitlich qualitativ beurteilt wurden.

Darüber hinaus wurden die vorgestellten, einheitenbehafteten Resultate in letzter Instanz mehrheitlich qualitativ beurteilt, da die Magnetfelder dem Superpositionsprinzip unterworfen sind und Messungen stets von umgebenden Magnetfeldern beeinflusst wurden bzw. werden.

Die zur Erklärung des Magnetismus notwendige Quantenmechanik wurde nur soweit besprochen, wie sie für das Verständnis des Festkörpermagnetismus notwendig und sachdienlich ist.

1.4 Verständigung

Namen von Personen sind generell kursiv geschrieben, wohingegen Fachwörter nur bei ihrer ersten Nennung im Text kursiv geschrieben sind. Im Folgenden werden in dieser Arbeit vorkommende Fachwörter und Konventionen definiert und erläutert.

Der Begriff *Magnetismus* wird in technischen Wörterbüchern [5] definiert als „*Lehre vom magnetischen Feld*“. Der Duden [49] definiert den Magnetismus als „*Gesamtheit der magnetischen Erscheinungen*“. In der Zeit vor dem 19. Jahrhundert wurde er als Bezeichnung für das scheinbar geheimnisvolle Wirken und das Zusammenspiel der Naturkräfte genutzt.

Bei Magnetfeldern ist zu unterscheiden, ob es sich um einwirkende oder resultierende Felder handelt. Im Detail wird dies in Kapitel 2.2.2 besprochen. Der Magnetismus ist zudem generell zeit- und ortsabhängig (vierdimensional). Da jedoch in dieser Arbeit nur ruhende Materie bzw. der Magnetismus von Festkörpern beschrieben wird, kann die Zeit als einflussnehmende Variable vernachlässigt werden.

Die verbliebene Ortsabhängigkeit wird durch die entsprechende Notation ausgedrückt, die in diesem

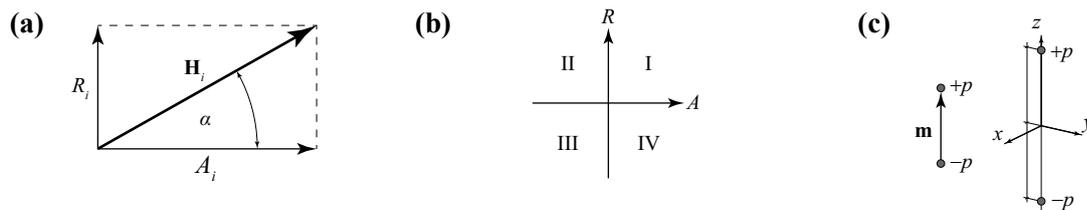


Bild 1.1 (a) Komponentenerlegung eines Vektorpfeils; (b) Konvention zur Einteilung der Quadranten; (c) vektorielles Dipolmoment \mathbf{m} (nach *Leuchtmann* [30]).

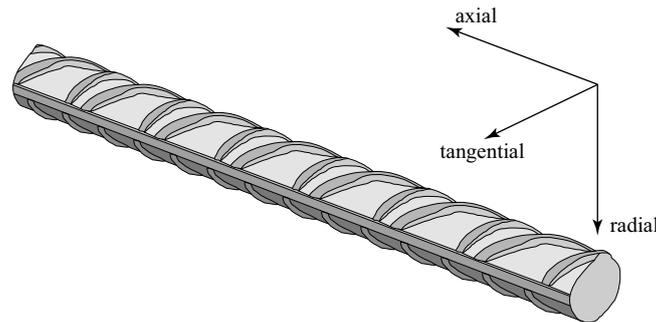


Bild 1.2 Bezeichnung der drei Raumkomponenten des Magnetfeldes am Bewehrungsstab.

Fall auf den sonst oftmals verwendeten Vektorpfeil oberhalb einer Variablen verzichtet und stattdessen die Variable selbst in aufrechter und fettgedruckter Schrift zeigt. Darüber hinaus sind auch richtungsrelevante Variablen (z. B. Drehimpuls, Spin u.a.m.) mit dieser Schreibweise versehen.

Magnetfelder erstrecken sich in alle drei Raumrichtungen (dreidimensional) und werden üblicherweise mit Hilfe von Vektorpfeilen und/oder Feldlinien graphisch dargestellt. Dabei zeigt der Vektorpfeil am jeweiligen Raumpunkt in die Wirkungsrichtung des Magnetfeldes und die Länge und/oder Dicke des Pfeils gibt die Stärke des Magnetfeldes qualitativ wieder.

Die messtechnische Erfassung des Magnetfeldes erfolgt komponentenweise, d. h. für jede Raumrichtung (vgl. Bild 1.2) werden die Stärke und das Vorzeichen erfasst. Sind die notwendigen Angaben, d. h. Stärke und Vorzeichen zweier bzw. dreier Magnetfeldkomponenten für einen Raumpunkt bekannt, kann mittels der in Bild 1.1 (a) dargestellten Komponentenzerlegung eines Vektorpfeils dessen Richtung und Länge bestimmt werden. Als Vorzeichenkonvention dient die in Bild 1.1 (b) gezeigte Anordnung der Quadranten. Sämtliche Orts- und Richtungsangaben erfolgen in kartesischen Koordinaten.

Bei der mathematischen Ermittlung von Magnetfeldern eines oder mehrerer Dipole wurde die Anordnung der magnetischen Probepole wie in Bild 1.1 (c) angenommen.

2 Grundlagen

2.1 Stand des Wissens und der Entwicklung

Im Bereich der zerstörungsfreien Prüfung von Werkstoffen und Bauteilen stehen mittlerweile etliche Methoden zur Verfügung, die auf den unterschiedlichsten physikalischen Grundlagen fussen, wodurch sich für jede Methode ein spezifisches Anwendungsgebiet herausgebildet hat. *Krieger* [28] und *McCrea et al.* [34] gehen auf die einzelnen Methoden vertiefender ein und beleuchten dabei neben den Schallverfahren (Impact-Echo, Ultraschall und Schallemission) auch die optischen Verfahren (Endoskopie, Lichtwellenleiter etc.). Darüber hinaus werden die Durchstrahlungsprüfungen (Röntgen- bzw. Gammastrahlung) und die elektrischen Verfahren (Potentialdifferenzenmessung etc.) beschrieben. Ebenso werden die magnetischen Verfahren (u.a. Wechselfeld-Verfahren, magnetische Streufeldmethode, mikromagnetische Vorspannungsmessung) erläutert. Auf die magnetische Streufeldmethode wird im Folgenden detaillierter eingegangen, da sie die Grundlage des hier vorgestellten Forschungsthemas ist.

2.1.1 Anwendungen im Stahlbau

Die magnetische Streufeldmethode hat ihren Anfang in den 30er Jahren des 20. Jahrhunderts. Sie kann damit zu einer der ältesten Prüfmethoden gezählt werden. Erste Einsatzgebiete magnetischer Prüfverfahren waren zunächst reine Werkstoffprüfungen, wie man sie heute bspw. bei der Prüfung an Flugzeugen (Radfelgen, Rumpf, Turbinenschaufeln etc.) kennt (*Krause* [27] und *Muslih* [38]). Die Untersuchungen von Pipelines, bei denen sowohl nach Schäden in den Rohrwänden (siehe *Altschuler et al.* [1], *Atherton et al.* [2] und *Babbar et al.* [3]) als auch in den Schweißnähten gesucht wird, bilden ein grosses Einsatzgebiet der magnetischen Streufeldmethode. Bei der Erzeugung und Verarbeitung von Metallwerkstoffen wird diese Prüfmethode heute international vielfältig angewandt.

Bei der Entwicklung und Anwendung auf Magnetismus basierender ZfP-Verfahren zur Detektion von Schad- bzw. Bruchstellen an Stahlbauteilen wurden verschiedene Ansätze verfolgt. *Kloster* [24] führt hier einerseits die Magnetpulver (MP)-Prüfung auf, die durch *Peterson et al.* [41] detaillierter erläutert wird, und andererseits die mittels Sonden durchgeführte Prüfung, auf die *Förster* [15] und *Heptner et al.* [17] eingehen.

Im Gegensatz zum MP-Verfahren, bei dem der Prüfer in die Lage versetzt wird, bei ferromagnetischen Werkstoffen einen verhältnismässig sicheren Nachweis von Inhomogenitäten und Fehlstellen zu erbringen, muss bei einem Einsatz der magnetischen Streufeldmethode an Stahlbetonbauteilen der Zustand des Bauteilinneren erfasst werden können. Das MP-Verfahren liefert neben den unbestreitbaren Vorteilen jedoch nur einen qualitativen Fehlernachweis, mit dem noch keine Aussage über die Fehler-tiefe angestellt werden kann. Durch die hinzukommende geringe Tiefenwirkung sind nur erfahrende Prüfer in der Lage, weiter von der Oberfläche entfernt liegend Fehler festzustellen.

Ein auf Sonden basierendes Verfahren macht sich den Umstand zunutze, dass magnetische Wechsel-felder Wirbelströme im zu prüfenden Objekt induzieren. Durch Einschlüsse und Risse ändert sich die magnetische Permeabilität innerhalb des Werkstoffs und kann über die Wirbelstromdichte festgestellt werden. An der *EMPA* gehören die Wirbelstromprüfung wie auch die magneto-induktive Seilprüfung zum angebotenen Leistungsumfang an ZfP-Verfahren *Bergamini et al.* [4] und *Lüthi* [32].

2.1.2 Detektion von Spannstahlbrüchen

Zur Detektion von Spannstahlbrüchen wird die magnetische Streufeldmethode in den USA seit Beginn der 1980er Jahre und in Deutschland seit Ende der 1980er Jahre verwendet (vgl. *Scheel* [48]).

Bei der Spannstahlbruchortung kommen im Wesentlichen zwei Verfahren zum Tragen, welche sich in der Anordnung der Sensoren und im Zeitpunkt der Magnetfeldmessung unterscheiden. Die Sensoren können einerseits nahe dem Magneten bzw. zwischen dessen Jochenden angeordnet und andererseits weit vom Magneten entfernt bzw. völlig unabhängig von diesem positioniert werden. Daraus ergeben sich die Möglichkeiten die Magnetfeldmessung direkt während der Magnetisierung oder aber daran anschliessend durchzuführen. In beiden Fällen spricht man von der magnetischen Streufeldmethode, da sich Fehlstellen und Risse durch Störsignale im Magnetfeld äussern, die mit Sensoren detektiert werden können.

Kommt es zu einer räumlichen oder zeitlichen Trennung von Magnetisierung und Magnetfeldmessung, wird auch vom Remanenzmagnetismus (RM)-Verfahren gesprochen, da dann lediglich das vom Prüfkörper ausgehende, verbliebene (remanente) Magnetfeld erfasst wird.

Bereits im Jahr 1985 haben *Kusenberger et al.* [29] ein Patent zur Bruchdetektion bei Spanndrähten angemeldet. Für die Detektion von Querspanngliedern in Fahrbahnplatten wurde in den letzten Jahren an der TU Berlin und dem Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren ein fahrbarer, jochförmiger Elektromagnet und ein Rotor mit in den Rotorenden integrierten *Hall*-Sensoren entwickelt (siehe *Szielasko* [51]). Diese Apparatur ermöglicht eine Magnetisierung von 3.5 m breiten (Fahrbahn-)Streifen und eine anschliessende, kontinuierliche Magnetfeldmessung über ebendiese Breite. In den Arbeiten von *Hillemeier* und *Scheel* ([18], [19], [20] und [47]) werden das RM-Verfahren und damit durchgeführte Feldversuche ausführlich beschrieben.

In den Dissertationen von *Kloster* [24] und *Scheel* [46] sind darüber hinaus detaillierte Informationen zu den verwendeten Geräten (Magnete, Sensoren, etc.) und den Versuchsanordnungen festgehalten.

Sawades Forschungsarbeiten beziehen sich ebenfalls auf die magnetische Streufeldmethode, wobei sein Hauptaugenmerk auf der Erstellung mathematischer Modelle liegt (siehe *Sawade et al.* [44] und [45]). Ähnlich der *FE*-Methode werden die ferromagnetischen Bauteile in Elemente unterteilt, mit Hilfe der Magnetostatik die notwendigen Beziehungen zwischen den Elementen definiert und ein Algorithmus für das Gleichungssystem bereitgestellt. Bei Kenntnis der Einflussparameter konnten gute Übereinstimmungen mit in Versuchen gemessenen Streufeldern erzielt werden. Die Methode hat sich kommerziell jedoch noch nicht durchgesetzt.

2.1.3 Entwicklung bildgebender Verfahren

Gaydecki und weitere befassen sich neben der Weiterentwicklung von Messeinrichtungen auch mit bildgebenden Verfahren zur Darstellung magnetischer Felder und der Erhöhung der Bildschärfe durch gezielte Anordnung von Sensoren bzw. Sensor-Arrays (*Gaydecki et al.* [16] und *Quek et al.* [43]).

Virmani [55] wie auch *Makar et al.* [33] gehen in ihren Veröffentlichungen auf die magnetische Streufeldmethode ein und weisen dabei auf die Weiterentwicklung von Magneten, Sensor-Einrichtungen und Software hin. *Mietz et al.* [36] vergleichen die Ergebnisse der mit der magnetischen Streufeldmethode durchgeführten Untersuchungen an ausgebauten Brückenteilen zweier verschiedener Institute (*MPA Stuttgart* und *TU Berlin*) miteinander, um die Praxistauglichkeit der Methode näher zu beleuchten.

2.1.4 Anwendung für Betonstahl

Gegenüber anderen ZfP-Verfahren hat die magnetische Streufeldmethode den Vorteil, dass der Beton für die Untersuchungen keinerlei dämpfenden oder abschirmenden Einfluss aufweist, sofern keine ferromagnetischen Bestandteile eingearbeitet wurden. Bei dieser Methode ist der kritische Punkt vielmehr der Abstand zwischen der zu untersuchenden Bewehrung und dem Sensor. Da die Bewehrungsüberdeckung beim Betonstahl konstruktionsbedingt generell geringer ausfällt als beim Spannstahl, sollte dies die Untersuchungen erleichtern.

Während der Literaturrecherche konnten etliche Quellen gefunden werden, in denen Schädigungen an der Betonstahlbewehrung auf Korrosion zurückgeführt wurden (siehe hierzu *Braml et al.* [7] und *Jungwirth et al.* [23]). *Miyagawa* untersuchte in Verbindung mit der Alkali-Aggregat-Reaktion (AAR) aufgetretene Betonstahlbrüche, die aber nur in Kombination mit Korrosionsvorgängen auftraten (siehe *Miyagawa et al.* [37]). Schädigungen der Betonstahlbewehrung, die nicht in Zusammenhang mit Korrosion genannt wurden, konnten für Brückenbauwerke nicht gefunden werden.

2.2 Magnetismus

2.2.1 Geschichte des Magnetismus

Mit der Entdeckung des Eisenerzes mehrere Jahrtausende vor Christus stiess man unweigerlich auch auf eine spezielle Form des Erzes, das die chemische Struktur Fe_3O_4 aufweist. Das Besondere an diesem Erz ist seine magnetische Eigenschaft, die ihm letztlich auch den Namen *Magnetit* (Magneisenstein, engl. *lodestone*) eintrug. *Thales von Milet* schilderte bereits 600 vor Christus seine Entdeckungen mit *Bernstein* (griech. $\epsilon\lambda\epsilon\kappa\tau\rho\nu$ [elektron]) und dem Magnetit. Er wies bei beiden auf die von ihnen ausgehenden geheimnisvollen Kräfte hin und stellte einen Zusammenhang zwischen diesen her, der erst 2'400 Jahre später verstanden und erklärt werden konnte (siehe *Meyer* [35]). *Alexander Neckam*, *Guyot de Provins* und *Jacques de Vitry* begannen im 12. Jahrhundert Theorien über die Ausrichtung von drehbar gelagerten Magnetiten auszuarbeiten. Sie hatten erkannt, dass die so gelagerten Magnetite bzw. auch Eisennadeln, welche mit Magnetiten magnetisiert wurden, sich immer wieder in eine Richtung einstellten. *Peter der Pilger von Maricourt* (lat. *Petrus Peregrinus de Maricourt*) sammelte 1269 in seinem Werk *Epistola de Magnete* die bis anhin gewonnenen Erkenntnisse, fasste sie zusammen, führte auf der Basis dieser dann Experimente mit Magnetiten und magnetisierten Eisennadeln durch und stellte die These unterschiedlicher (Magnet-)Pole auf (siehe *Smith* [50]). Der *Brief der Magnete* wird als eines der wichtigsten Werke des Mittelalters angesehen und gilt als Geburtsstunde der Erforschung des Magnetismus.

William Gilbert veröffentlichte 1600 sein Werk *Über den Magneten, Magnetische Körper und den großen Magneten Erde* (lat. *De Magnete, Magnetisque Corporibus, et de Magno Magnete Tellure*). Darin widerlegt er systematisch anhand von Experimenten den bis zu diesem Zeitpunkt vorherrschenden Irrglauben über Magnetite. Ähnlich wie *Peter der Pilger* untersuchte *Gilbert* die *magnetische Polarität* und fand heraus, dass bei einer Teilung des magnetisierten Materials abermals je zwei Pole an jedem neuen Teilstück vorhanden sind. Durch das Zusammentragen aller bislang bekannten Erkenntnisse auf dem Gebiet des Magnetismus erarbeitete er sich eine Wissensbasis, mit der er durch die Kombination von Fakten herausfand, warum die Magnetite bzw. magnetisierten Eisennadeln sich stets ausrichteten. Seiner Ansicht nach musste die Erde selbst ein riesiger Magnet sein (siehe *Verschuur* [54]).

1660 baute *Otto von Guericke* die erste Elektrisiermaschine zur Erzeugung elektrischer Spannung mittels Ladungstrennung. Er erkannte, dass geladene Gegenstände sich nicht nur anziehen sondern auch abstossen können. 1746 entdeckte *Pieter van Musschenbroek* bei einem Unfall während eines Experiments die Möglichkeit, elektrische Ladung in einem Gefäss, der „*Leidener-Flasche*“, zu speichern. Um 1785 beschrieb *Charles-Augustin de Coulomb* mittels einer Drehwaage die Kraft, welche zwischen elektrischen Ladungen besteht. Er fand heraus, dass diese Kraft zum Quadrat des Abstandes abnimmt. Auf diesem Wege war es erstmals möglich die elektrische Ladung zu messen. *Luigi Galvani* bemerkte 1786 bei einem seiner Experimente an Froschbeinen, dass sich diese bewegten, wenn er deren Muskeln mit einem durch seine Elektrisiermaschine geladenen Skalpell berührte. Bedeutender jedoch ist wohl sein Versuch an Froschbeinen, die er an einem vertikal ausgerichteten, vom Boden isolierten Draht befestigte und einen weiteren Draht am Bein anbrachte, welcher in einen Schacht hinabführt. Sobald es in der näheren Umgebung blitzte, fing das Bein zu zucken an, bevor noch der Donner zu hören war. Er schlussfolgerte daraus, dass Blitze eine Form von Elektrizität sein müssen. *Alessandro Volta* wiederholte die *Galvani*-Experimente, setzte jedoch statt der Elektrisiermaschine die „*Leidener-Flasche*“ ein, wodurch er erkannte, dass die Elektrizität nicht von den Froschbeinen herührte, sondern durch verschiedenartige Metalle hervorgerufen werden konnte. Der Grundstein für die *Galvanische-Zelle* (Batterie) war gelegt.

Die Batterie wurde daraufhin rege genutzt und kam u.a. auch bei *Hans Christian Ørsted* zur Anwendung. Zu dieser Zeit waren viele Wissenschaftler der Meinung, dass Elektrizität und Magnetismus zwei eigenständige Erscheinungen sind, die nicht miteinander verknüpft sind. *Ørsted* hingegen glaubte fest daran, dass es eine Verbindung zwischen beiden gibt. Im Jahre 1820 erbrachte er vor Publikum den Beweis, dass ein elektrisch durchflossener Draht ein Magnetfeld erzeugt, welches in seinem Experiment eine nahe dem Draht angeordnete Kompassnadel auslenkte. Diese richtete sich nach Abschalten des Stromes wieder dem Erdmagnetfeld entsprechend aus. Daraus leitete er ab, dass stromdurchflossene Leiter von konzentrisch angeordneten Magnetfeldern umschlossen sind.

André Marie Ampère war zunächst skeptisch gegenüber den Berichten und Erkenntnissen *Ørsteds* und wiederholte das beschriebene Experiment. Den Einfluss des Erdmagnetfeldes eliminierte er jedoch durch die geschickte Anordnung weiterer Magnete, woraufhin sich die Kompassnadel nicht nur durch das Magnetfeld des stromführenden Leiters auslenken liess, sondern sich ziemlich genau senkrecht zur Längsachse des Leiters ausrichtete. In weiteren Versuchen zeigte er, dass sich parallel angeordnete Stromleiter bei gleichgerichteter Stromrichtung anziehen und sich bei entgegengesetzter Stromrichtung abstossen. Diese Entdeckung fasste er vereinfacht formuliert so zusammen, dass ein Magnetfeld durch ein ihm proportionalen elektrischen Strom hervorgerufen werden kann und die Magnetfeldrichtung mit der des Stromes eine Rechtsschraube bildet. Dies ist heute als *Ampère'sches Gesetz* bekannt (siehe *Verschuur* [54]).

Michael Faraday folgerte aus den Experimenten *Ørsteds* und *Ampères*, dass stromführende Leiter ein kreisförmiges Magnetfeld aufbauen und so einen Monopol solange in eine Rotationsbewegung um den Leiter versetzen, solange der Strom fliesst. In einem Versuch konnte er dies demonstrieren; und legte letztlich den Grundstein zur Entwicklung des Elektromotors. Durch ihn wurden erstmals für verschiedene Anordnungen von Magneten systematisch die zugehörigen Verteilungen der Eisenpartikel festgehalten, die letztlich die Richtung und die Stärke der Magnetfelder der Magneten veranschaulichen. Aus seinem Versuch von 1821 zog er den Schluss, dass, wenn ein stromführender Leiter ein Magnetfeld erzeugt, ein Magnetfeld auch Strom erzeugen könne. In einem Versuch gelang es ihm erstmalig den Beweis für die elektromagnetische Induktion zu erbringen. In diesem Zuge erkannte er, dass sich für eine stetige Induktion das Magnetfeld fortwährend ändern muss, es sich also um ein zeitabhängiges Phänomen handelt. Überdies konnte er zeigen, dass Licht und Magnetismus zwei physikalisch miteinander korrelierende Phänomene sind. Seine Experimente mit polarisiertem Licht wie auch mit mag-

netischen Materialien führten zu der These, dass es *Kraftlinien* und *Felder* zwischen magnetischen Polen geben muss. Er sprach in diesem Zusammenhang das erste Mal von einem *magnetischen Feld*.

Die These der Kraft- und Feldlinien beflügelte *James Clerk Maxwell* alle bislang entdeckten Phänomene zusammenzutragen; auch solche, die augenscheinlich nichts mit der Elektrizität oder dem Magnetismus zu tun hatten. Die Kräfte der *Gravitation*, der *Elektrizität* und des *Magnetismus* waren bspw. über ein umgekehrt quadratisches Abstandsgesetz beschreibbar. Wärme, Elektrizität und Magnetismus erweckten den Anschein, als würden sie fließen. Derlei Kombinationen trieben ihn an, Begriffe wie *Fluss* und *Feldlinien* einzuführen und sie mit dem Feld-Konzept zu verbinden. Die mathematische Beschreibung von Feldern ermöglichte es ab diesem Zeitpunkt magnetische Eigenschaften näher zu betrachten, ohne auf die hervorrufende Quelle näher eingehen zu müssen. Für sein Feld-Konzept nahm er sich weiterer Begriffe an, die bis heute ihre Gültigkeit haben. Dazu zählen das *Potential*, der *Vektor*, der *Gradient*, die *Divergenz* und die *Rotation*. Der Zusammenhang von elektrischen Strömen und Feldlinien wurde für *Maxwell* ersichtlich, als er die eben aufgezählten Begriffe zwischen 1861 und 1864 mittels Gleichungen miteinander verknüpfte. Später wurden diese vereinfacht und die vier fundamentalsten Gleichungen untrennbar mit seinem Namen verbunden – die *Maxwell-Gleichungen*. Darin sind erstmals auch die Zeit als Variable und die Lichtgeschwindigkeit als Konstante festgeschrieben.

Im August 1879 erfuhr *Heinrich Rudolf Hertz*, dass er einen von *Hermann von Helmholtz* ausgelobten Preis für den experimentellen Nachweis der bei der Elektrizität nicht vorhandenen Trägheit gewonnen hatte. *Helmholtz* selbst, bekannt geworden durch die unterschiedlichsten naturwissenschaftlichen Versuche und Erkenntnisse, ist heute vielen durch die *Helmholtzspule* bekannt. Mit dem Bau des ersten Oszillators war es *Hertz* möglich, die Form der *elektromagnetischen Welle* zu bestimmen. Über die ermittelten Werte der Wellenlänge und der Frequenz konnte er die Ausbreitungsgeschwindigkeit bestimmen, die gleich gross ist, wie die des Lichts.

Zu Beginn des 20. Jahrhunderts begann man zu verstehen, wie die Materie aufgebaut ist. Mit der Entwicklung des Atommodells konnte nun auch der Magnetismus des Magneteisensteins erklärt werden, der auf den komplexen Zusammenhängen der Elektronen beruht. Warum aber der Magnetismus über Distanzen wirkte, in denen keine Materie vorhanden war, konnte bis dato noch nicht erklärt werden. Die *Maxwell-Gleichungen* mit dem Feld-Konzept sind für diese Fragestellung nicht ausreichend. *Richard Feynman* entwickelte in den 1950er Jahren das mathematische Gerüst der Quantenelektrodynamik, womit schliesslich auch erklärt werden konnte, wie die verschiedenen Kräfte des Elektromagnetismus über unterschiedlichste Distanzen wirken können (siehe *Verschuur* [54]).

2.2.2 Physikalische Grundlagen

Ursache des Magnetismus

Aus Kapitel 2.2.1 geht bereits hervor, dass der Magnetismus auf die Ursache zurückgeführt werden kann, dass jede Bewegung einer elektrischen Ladung ein (*erregendes*) *Magnetfeld* \mathbf{H} (auch als *magnetische Feldstärke* bezeichnet) erzeugt. Diese Ladungsbewegung kann einerseits mittels des Flusses eines elektrischen Stroms durch ein definiertes Gebiet innerhalb eines beliebig gearteten Mediums hervorgerufen werden oder andererseits auf die Stoffeigenschaften bestimmter Reinstoffe (chem. Elemente), bei denen die Konstellation der Elektronen ein Magnetfeld bewirkt, zurückgeführt werden. Im Zuge dieses Forschungsthemas wurde der Elektromagnetismus nicht untersucht, sondern mit dem aus den Stoffeigenschaften resultierenden Permanentmagnetismus gearbeitet, auf den im Folgenden ausführlicher eingegangen wird.

Der bereits von *Thales von Milet* beobachtete Magnetismus gewisser Eisenerze ist durch den Aufbau des Atoms und im Speziellen durch dessen Konfiguration erklärbar, wobei gezielt die Eigenschaften

und die Konstellation der Elektronen betrachtet werden müssen. Eine vollumfängliche Erklärung des Phänomens Magnetismus kann nur über die Quantenmechanik erfolgen, die in dieser Arbeit aufgrund der Komplexität nicht behandelt wird. Der Magnetismus als Stoffeigenschaft lässt sich auf zwei Ursachen herunterbrechen, wobei zunächst näher auf den Aufbau des Atoms eingegangen wird.

Vereinfachend wird an dieser Stelle der halbklassische Ansatz nach *Niels Bohr* gewählt und das *Atom* als aus dem *Atomkern* und der *Atomhülle* bestehend angenommen. Der grösste Teil der Gesamtmasse des Atoms wird durch seinen nur wenige Femtometer ($1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$) grossen Kern ausgemacht, der die positiv geladenen *Protonen* p^+ und die elektrisch neutralen *Neutronen* n beherbergt. Ihn umkreisen in rund 100'000 fm Entfernung die elektrisch negativ geladenen *Elektronen* e^- (siehe *Tipler et al.* [52]), die letztlich nur 0.3% der Atommasse ausmachen. Die Anzahl der Protonen wird im Periodensystem der Elemente durch die *Kernladungs-* oder *Ordnungszahl* Z angegeben. Entsprechend der Kernladungszahl ist die Atomhülle mit derselben Anzahl Elektronen gefüllt. Von aussen betrachtet ist das Atom demnach elektrisch neutral, da Protonen genauso stark positiv geladen ($+e$) sind wie Elektronen negativ ($-e$).

Nach der Repetition des *Bohr'schen* Atommodells gilt das Hauptaugenmerk nun den Magnetismus hervorrufenden Ursachen. Eine der beiden Ursachen beruht auf der Rotation des Elektrons um seine eigene Achse, die als Vereinfachung oftmals für den *Elektronenspin* s herangezogen wird. Der Spin sorgt dafür, dass um das Elektron herum ein Magnetfeld etabliert wird. In diesem Fall spricht man vom Elementarmagnet, da keine kleinere Einheit eines Magneten bekannt ist. Die zweite Ursache beruht auf der kreisförmigen Bewegung der Elektronen um den Atomkern und hängt vom *Drehimpuls* (*Bahndrehimpulsquantenzahl* l) ab. Die Kreisbahn entspricht hierbei der grössten Aufenthaltswahrscheinlichkeit aller Elektronen einer Elektronenschale unter Berücksichtigung diskreter Energiestufen innerhalb der Atomhülle. Elektronen, die mit diesem empirisch ermittelten und dem später durch die *Schrödinger-Gleichungen* belegten Abstand den Kern umkreisen, strahlen keine Energie ab. Bei einer vollbesetzten Schale etablieren sich zwar Magnetfelder der einzelnen Elektronen, die aber bei gegenseitiger Überlagerung aufgehoben werden und kein äusserlich feststellbares Magnetfeld bilden. Hingegen bewirkt der Drehimpuls der Elektronen um den Atomkern bei einer nicht vollbesetzten Schale die Ausbildung eines solchen Magnetfeldes. Bei dieser Konfiguration spricht man von *ungepaarten Elektronen*, wie sie bei Übergangsmetallen, z. B. Fe, Co und Ni, Seltene Erden und deren Legierungen vorkommen.

Sobald sich ein Magnetfeld bildet, muss es damit einhergehend nach heutigem Erkenntnisstand auch eine Quelle und eine Senke geben, also Orte, an denen das Magnetfeld aus einem Medium in ein anderes wechselt. Bei einer Quelle tritt das Feld aus dem betrachteten Medium aus, wohingegen es bei einer Senke wieder eintaucht. Quelle und Senke bilden gedanklich eine Achse, um die herum sich ein magnetisches Moment ausbildet. Dieses Moment rührt von der Bahnbewegung des Elektrons her und kann über die Verknüpfung mit dem *Drehimpuls* \mathbf{L} eines Teilchens halbklassisch erklärt werden. *Tipler* stellt die Herleitung sehr anschaulich dar, wobei er für das magnetische Moment in allgemeiner Form die Gleichung (2.1) nutzt (siehe *Tipler et al.* [52]).

$$\boldsymbol{\mu} = \frac{q}{2m} \mathbf{L} \quad [\text{Am}^2] \quad (2.1)$$

Durch Einsetzen des *reduzierten Planck'schen Wirkungsquantums* \hbar , der Elektronenmasse m_e und der Elementarladung e kommt er mit Hilfe des *Bohr'schen Magnetons* μ_B auf die Gleichung (2.2), die das magnetische Moment eines Elektrons für dessen Bahnbewegung angibt.

$$\boldsymbol{\mu}_l = -\mu_B \frac{\mathbf{L}}{\hbar} \quad [\text{Am}^2] \quad (2.2)$$

Im Gegensatz dazu fällt das magnetische Moment des Elektronenspins um den *Landé-Faktor* $g \approx 2$ (der genaue Wert liegt aufgrund quantentheoretischer Gegebenheiten bei $g \cong 2.00232$) grösser aus und ist durch Gleichung (2.3) bestimmt. Der Bahndrehimpuls wird hier durch den *Spindrehimpuls* \mathbf{S} ersetzt, welcher sich aus dem *Spinoperator* $\hat{\mathbf{S}}$ und dem *reduzierten Planck'schen Wirkungsquantum* zusammensetzt $\mathbf{S} = \hat{\mathbf{S}}\hbar$.

$$\mu_s = -g\mu_B \frac{\mathbf{S}}{\hbar} \quad [\text{Am}^2] \quad (2.3)$$

Beide Drehimpulse lassen sich zu einem *Gesamtdrehimpuls* \mathbf{J} addieren, wobei der Bahndrehimpuls gegenüber dem Spindrehimpuls der Elektronen einen bedeutend geringeren Einfluss auf die Magnetisierung bzw. Magnetisierbarkeit eines Materials hat (siehe *Kneller* [25]). Infolge der grossen Kernmasse ergibt sich gegenüber den Elektronen ein vielfach kleinerer Kernspinimpuls, dessen Wirkung in dieser Betrachtung vernachlässigt wird.

Kenngrossen des Magnetismus

In beiden Fällen, dem Bahn- und dem Spindrehimpuls, bildet sich ein *magnetischer Dipol* (siehe Bild 2.1) aus, dessen Stärke jeweils durch das *magnetische Dipolmoment* $\mathbf{m} = p \mathbf{d}$ bestimmt ist, wobei p der theoretisch angenommene magnetische Monopol und \mathbf{d} der gerichtete Abstand der Ladungen ist.

Die beschriebenen Magnetfelder unterschiedlichen Ursprungs überlagern sich und bilden unter der Voraussetzung freier Elektronen ein gesamthaft stärkeres Magnetfeld. Ein makroskopisches Magnetfeld kann erst festgestellt werden, wenn Elementarmagnete in grosser Zahl vorhanden sind. Für die Etablierung eines solchen Magnetfeldes müssen sich die Elementarmagnete ausrichten und parallel stellen. Hierfür sorgt die sogenannte *Austauschwechselwirkung* (siehe *Ilbach et al.* [22]) unter den Elektronenspins; ein Effekt quantenmechanischen Ursprungs.

Da Werkstücke bzw. Magneten beliebige Formen haben können, gelingt die Übertragung der Darstellung eines Elementarmagneten auf diese makroskopische Ebene nicht. Um einen dem Material typischen magnetischen Zustand ausdrücken zu können, wurde die *Magnetisierung* bzw. die *magnetische Dipoldichte* \mathbf{M} eingeführt (Gleichung (2.4)).

$$\mathbf{M} = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta V} \sum_j \mathbf{m}_j \quad \left[\frac{\text{A}}{\text{m}} \right] \quad (2.4)$$

Kneller umschreibt die Magnetisierung als magnetisches Moment pro Volumeneinheit eines Körpers (siehe *Kneller* [25]).

Wirkt dann ein Magnetfeld auf ein mit Materie gefülltes Volumen, so hat dies eine Magnetisierung zur Folge. Die Magnetisierung ist demnach proportional zum erregenden Magnetfeld und kann durch Gleichung (2.5) beschrieben werden.

$$\mathbf{M} = \chi_m \mathbf{H} \quad \left[\frac{\text{A}}{\text{m}} \right] \quad (2.5)$$

Hierin ist χ_m die *magnetische Suszeptibilität* und gilt als dimensionsloser Proportionalitätsfaktor zwi-

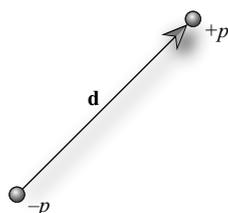


Bild 2.1 Magnetischer Dipol

schen erregendem Magnetfeld und Magnetisierung.

Nachdem das erregende Magnetfeld und die Magnetisierung bekannt sind, wird auf der Materialseite ein weiteres Feld eingeführt. Die dieses Feld hervorrufende Grösse heisst *magnetische Induktion \mathbf{B}* (oder *magnetische Flussdichte*) und ist über

$$\operatorname{div} \mathbf{B} = 0 \tag{2.6}$$

und

$$\mathbf{B} = \mu_0 (\mathbf{H} + \mathbf{M}) = \mu_0 (1 + \chi_m) \mathbf{H} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H} = \mu \mathbf{H} \quad \left[\frac{\text{N}}{\text{Am}} = \text{T} \right] \tag{2.7}$$

definiert.

Gleichung (2.7) gilt in der dargestellten Form sowohl für Felder im Vakuum als auch für Materie. Zwischen dem erregendem Magnetfeld \mathbf{H} und der magnetischen Induktion \mathbf{B} ist eine direkte Proportionalität vorhanden. Der Faktor μ steht für die *Permeabilität der Materie* und kann in die Anteile μ_0 (*Permeabilität des Vakuums* bzw. *Induktionskonstante*) und μ_r (*relative Permeabilität*) aufgespalten werden. Die Induktionskonstante ist mit $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ N/A}^2$ gegeben.

Arten des Magnetismus

Der Magnetismus in Materie lässt sich grob in die fünf Kategorien *Dia-*, *Para-*, *Ferro-*, *Antiferro-* und *Ferrimagnetismus* unterteilen.

Die diamagnetische Eigenschaft lässt sich allen Reinstoffen mit vollständig abgeschlossenen Elektronenschalen zuordnen, zu denen die Edelgase, Salze u. a. m. zählen. Anfängliche Vermutungen, dass derlei Stoffe nicht magnetisiert werden könnten, wurden mit Hilfe von Versuchen widerlegt. Man erkannte stattdessen, dass ein externes Magnetfeld ein entgegen gerichtetes magnetisches Moment induziert, womit die magnetische Suszeptibilität negativ ($\chi_m < 0$) wird.

Dem gegenüber steht der Paramagnetismus, der bei Reinstoffen mit wenigstens einer nicht vollständig abgeschlossenen Elektronenschale ein permanentes, magnetisches Moment hervorruft. Als zusätzliche notwendige Bedingung gilt, dass es zwischen den Elementarmagneten keine bzw. nur eine schwache Wechselwirkungen gibt, so *Kneller* [25]. Die magnetische Suszeptibilität ist mit $\chi_m > 0$ positiv.

Der Ferromagnetismus ähnelt dem Paramagnetismus insofern, als dass auch hier mindestens eine Elektronenschale nicht vollständig abgeschlossen sein darf. Die Wechselwirkung zwischen den Elekt-

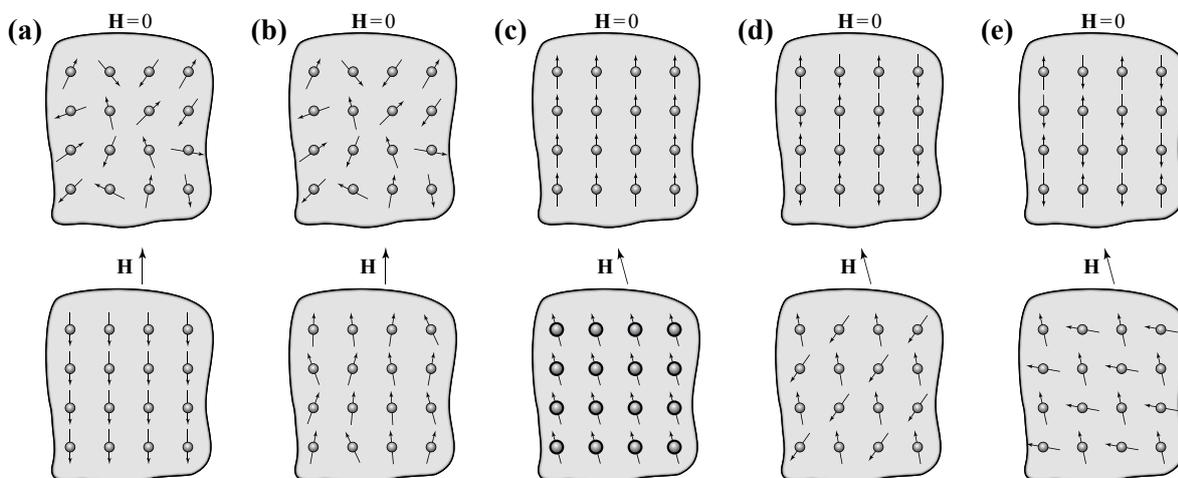


Bild 2.2 Elementarmagnetausrichtung ohne (oben) und mit (unten) äusserem Magnetfeld für (a) diamagnetische, (b) paramagnetische, (c) ferromagnetische, (d) antiferromagnetische und (e) ferrimagnetische Materialien.

ronen bzw. deren Spins ist in diesem Fall jedoch stark ausgeprägt und bewirkt folglich eine Parallelstellung der Elementarmagnete über die Atomgrenzen hinaus. Ohne erregendes Magnetfeld entsteht in grösseren Gebieten der Kristallgitterstruktur eine homogene (*spontane*) Magnetisierung $\mathbf{M}_s(T)$. Heptner gibt für eine starke Wechselwirkung zwischen den Elektronenspins eine festgelegte Kristallgitterstruktur, wie sie nur in fester Materie vorkommt, als Voraussetzung an (siehe hierzu Heptner *et al.* [17]). Flüssige oder gasförmige Ferromagnetika sind nicht bekannt. Die magnetische Permeabilität ferromagnetischer Materialien liegt bei $\mu_r = 10^2 \dots 10^6$.

Beim Antiferromagnetismus richten sich die Elementarmagnete stets antiparallel zu ihren unmittelbaren Gitternachbarn aus. Bei der Betrachtung antiferromagnetischer Materialien kann deshalb von aussen kein Magnetfeld festgestellt werden, da sich die Felder der Elementarmagnete überlagern und aufheben. Ihm können dennoch ferromagnetische Eigenschaften zugeschrieben werden, wenn man sich die Kristallgitterstruktur aus zwei Gittereinheiten aufgebaut vorgestellt, bei der die Elementarmagnete innerhalb ihres Gitters stets parallel zueinander ausgerichtet sind. Vergleicht man die Ausrichtung der Elementarmagnete beider Gitter miteinander, so sind diese wiederum antiparallel zueinander. Die Gitter sind bis auf ihre Magnetfeldrichtung identisch.

Der Ferrimagnetismus baut ähnlich dem Antiferromagnetismus auf eine unterteilte Kristallgitterstruktur auf. Ebenfalls gleich ist ihm die antiparallele Ausrichtung der Elementarmagnete der beiden Gitter zueinander. Während jedoch beim Antiferromagnetismus die Stärke der magnetischen Momente jedes einzelnen Elementarmagneten in der Kristallgitterstruktur identisch ist, variiert diese beim Ferrimagnetismus zwischen den beiden Gittern. Dieses Material weist somit eine spontane Magnetisierung auf und verhält sich äusserlich gesehen wie eine Ferromagnetikum.

Die unterschiedlichen Ausrichtungen der Elementarmagnete sind in Bild 2.2 für die oben aufgeführten Arten des Magnetismus dargestellt. Die obere Reihe zeigt die Orientierung ohne den Einfluss des äusseren Magnetfeldes, wohingegen dieser in der unteren Reihe berücksichtigt wurde.

Im Folgenden wird vorwiegend Bezug auf den Ferromagnetismus genommen, da die betrachteten Bauteile dieses Materialtyps Gegenstand sämtlicher Untersuchungen des Forschungsthemas waren.

Entmagnetisierungsfaktor

Die Bilder 2.3 (a) und (b) zeigen exemplarisch, wie die durch die Feldlinien dargestellten Magnetfelder in und um ferromagnetische Körper verlaufen. Bild 2.3 (a) stellt einen intakten Körper dar, in dem das Magnetfeld vom Nord- zum Südpol verläuft. Dem gegenüber steht Bild 2.3 (b), in der ein gebrochener Körper dargestellt ist und in der das Magnetfeld des Luftspalts genau entgegen dem Magnetfeld innerhalb des Körpers (antiparallel) gerichtet ist. Stellt man sich diesen Körper als einen unendlich langen, zylindrischen Körper ferromagnetischen Materials vor, so verläuft das vorhandene Magnetfeld innerhalb des Körpers nahezu homogen über den Querschnitt verteilt. Wird dieser Zylinder an einer frei wählbaren Position durch einen Luftspalt geringer Breite unterbrochen (Bild 2.3 (b)), verläu-

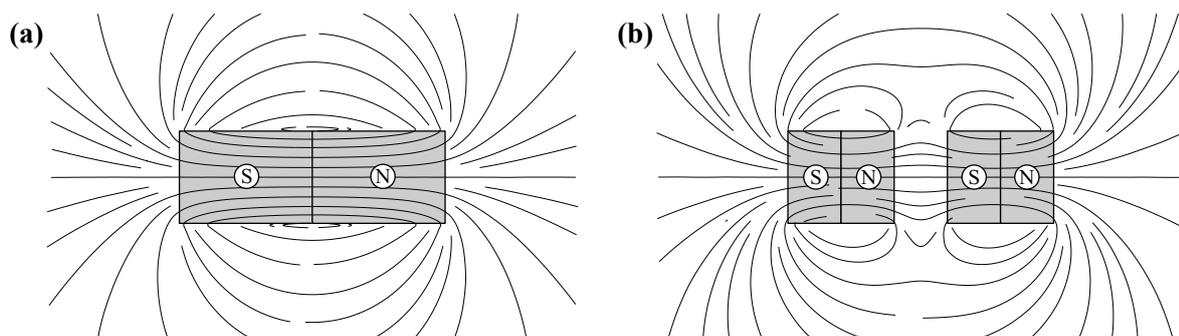


Bild 2.3 Magnetfeld eines (a) intakten und (b) gebrochenen Stabmagneten.

fen die Magnetfeldlinien dort zwar parallel zueinander, jedoch entgegengesetzt (antiparallel) dem Magnetfeld des Kerns. Diesem Magnetfeld schreibt *Brown* eine entmagnetisierende Wirkung zu, die von der Geometrie des betrachteten Bauteils und nicht von dessen Materialeigenschaften abhängt (siehe *Brown* [8]). Sie wird durch den *geometrischen Entmagnetisierungsfaktor* N beschrieben. Folglich tritt die Entmagnetisierung in allen ferromagnetischen Bauteilen auf, die keinen in sich geschlossenen Magnetkreis bilden.

Weiss'sche Bezirke

Weiss [56] postulierte die Hypothese einer Aufteilung des ferromagnetischen Kristalls in Bezirke mit unterschiedlicher Magnetisierungsrichtung (siehe *Heptner et al.* [17]). Die Bildung solcher Strukturen wurde durch *Landau* und *Lifschitz* 1935 durch eine Energiebetrachtung bestätigt. Darin haben sie die Reduzierung der magnetostatischen Energie infolge einer geeigneten Aufteilung in die sogenannten *Weiss'schen Bezirke* dem Anwachsen anderer Energieanteile gegenübergestellt. Sie fanden heraus, dass die Entstehung neuer Bezirke solange andauert, bis kein Energiegefälle mehr feststellbar ist. Daraus folgt eine maximal mögliche Anzahl von Bezirken bei gegebener Energie. Das Material ist bestrebt, die Entmagnetisierungsenergie zu minimieren, also einen minimal-energetischen Zustand herbeizuführen. Innerhalb der Bezirke sind die magnetischen Momente parallel zueinander ausgerichtet, wodurch für den jeweiligen Bezirk aus den sich darin befindlichen Elementarmagnete ein respektables Bezirksmagnetfeld entsteht. Wie aus Bild 2.4 ersichtlich wird, sind die *Weiss'schen Bezirke* durch die sogenannten *Bloch-Wände* klar gegeneinander abgegrenzt, d. h. die Magnetisierung der jeweils angrenzenden Bezirke ändert innerhalb eines Abstandes von ungefähr 10^{-6} bis 10^{-4} cm ihre Vorzugsrichtung (vgl. *Kneller* [25]). Solange kein äusseres Magnetfeld auf das ferromagnetische Material einwirkt, werden sich die Vorzugsrichtungen der *Weiss'schen Bezirke* gemäss Bild 2.4 (a) einstellen. Wird das Material jedoch mit einem Magnetfeld beaufschlagt, so sind die Elementarmagnete bestrebt, ihre Vorzugsrichtung der Richtung des erregenden Magnetfeldes parallel zu stellen (Bild 2.4 (b)). Für diesen Fall wird wieder der minimal-energetische Zustand angestrebt. Die Besonderheit hierbei besteht in der bezirksweisen Umorientierung der Magnetfeldrichtungen, d. h. es richten sich die Magnetfelder kompletter *Weiss'scher Bezirke* aus und nicht nur die einzelner Elementarmagnete.

Temperaturabhängigkeit

Die spontane Magnetisierung ferromagnetischer Materialien hängt wesentlich von der Umgebungstemperatur bzw. der Temperatur des Materials selbst ab. *Heptner* führt an, dass die Wärmebewegung der Atome sich dem ordnenden Effekt der Austauschwechselwirkung entgegenstellt (siehe *Heptner et al.* [17]). Ab einer materialabhängigen Temperatur, der *Curie-Temperatur* T_c , wird die Parallelstellung der Elementarmagnete erschwert und aufgehoben.

Ferromagnetische Materialien nehmen bei Überschreiten dieses Temperaturpunktes paramagnetische Eigenschaften an, wirken demnach äusserlich als nicht magnetisch. Aus Bild 2.5, in der die spontane Magnetisierung von Eisen in Abhängigkeit der Temperatur T dargestellt ist, wird deutlich, dass bei klimabedingten Temperaturen (-20°C bis $+30^\circ\text{C}$) von keiner Schwächung der spontanen Magnetisie-

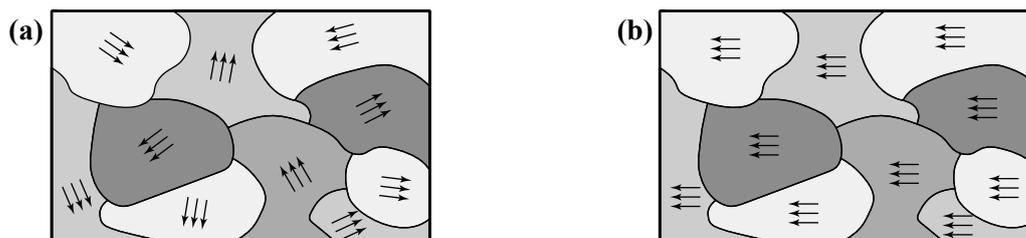


Bild 2.4 Schematische Darstellung der *Weiss'schen Bezirke* im (a) nicht ausgerichteten und (b) ausgerichteten Zustand (nach *Tipler et al.* [52]).

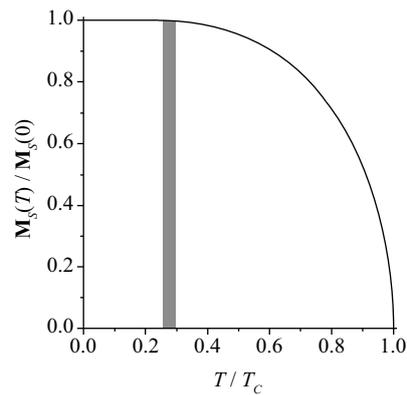


Bild 2.5 Spontane Magnetisierung von Eisen als Funktion der Temperatur (nach Scheel [46]).

nung durch die Wärmebewegung auszugehen ist. Beide Achsen sind normiert, wobei die spontane Magnetisierung auf die *Sättigungsmagnetisierung* $M_s(0)$ am absoluten Nullpunkt $T = 0$ K und die Temperatur auf die *Curie-Temperatur* normiert wurden. Am absoluten Nullpunkt richten sich alle für den Ferromagnetismus verantwortlichen Elektronenspins parallel zueinander aus, wodurch die maximale Stärke des magnetischen Moments erreicht werden kann. Mit Zunahme der Temperatur sinkt die Ausrichtungsrates der Spins, bis die *Curie-Temperatur* erreicht ist, bei der kein magnetisches Moment mehr nachweisbar ist.

Die beschriebene Temperaturabhängigkeit gegenüber der spontanen Magnetisierung wurde im Zuge dieses Forschungsprojekts nicht eingehender untersucht, da sämtliche Versuche unter Laborbedingungen bei einer mittleren Temperatur von ca. 20 °C durchgeführt wurden.

Magnetisierungskurve

Im Folgenden soll der Zusammenhang aus erregendem Magnetfeld \mathbf{H} und resultierendem (remanentem) Magnetfeld \mathbf{B} betrachtet werden, wobei auf Bild 2.6 Bezug genommen wird. Die dargestellte magnetische Hysterese resultiert aus den komplizierten Abhängigkeiten der Permeabilität μ bzw. der Suszeptibilität χ von der absoluten Temperatur T , dem erregenden Feld \mathbf{H} und der magnetischen Vorgeschichte des Materials.

Bei einem ferromagnetischen Körper sind dessen Magnetisierungen der einzelnen *Weiss'schen* Bezirke im jungfräulichen Zustand (Punkt 0) willkürlich und zufallsverteilt orientiert. Wird dieser Körper nun

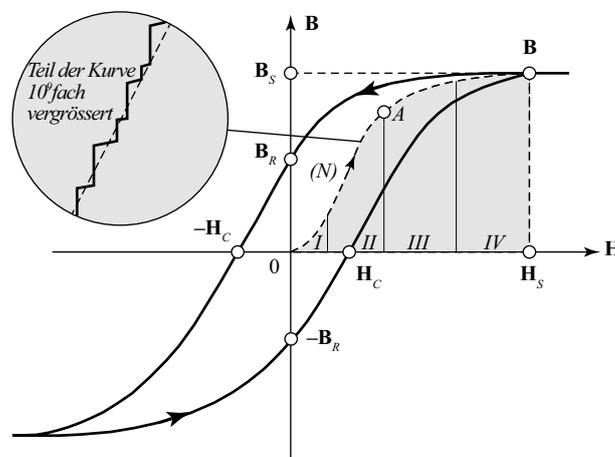


Bild 2.6 Magnetisierungskurve (Hysterese) eines ferromagnetisch weichen Materials (nach Heptner et al. [17]).

mit einem erregenden Feld \mathbf{H} beaufschlagt und die Stärke von \mathbf{H} langsam erhöht, so kommt es zu ersten Magnetisierungsprozessen im Körper. Die Magnetisierung durchläuft dabei die sog. *jungfräuliche Kurve* oder *Neukurve* N .

Die Magnetisierungsprozesse gliedern sich hierbei in vier Vorgänge. Zunächst finden die reversiblen (*I*) und die irreversiblen (*II*) *Blochwand*-Verschiebungen statt, bei denen nur die *Weiss*'schen Bezirke anwachsen, deren Magnetisierungsrichtungen günstiger zum erregenden Feld orientiert sind. Die Bezirke, in denen die Magnetisierungsrichtung ungünstig steht, gehen in die anwachsenden Bezirke über. Dieser Bereich der Neukurve ist durch Unstetigkeiten gekennzeichnet, da die Magnetisierungsrichtung kompletter Bezirke schlagartig umklappt. Diese Klappvorgänge, auch *Barkhausen*-Sprünge genannt, bewirken abrupte Anstiegsänderungen der Neukurve, wie aus der Vergrößerung der Neukurve (eingekreister Bereich in Bild 2.6) ersichtlich wird (vgl. *Blitz* [6]).

Bei einer weiteren Steigerung der Feldstärke \mathbf{H} beginnen die magnetischen Momente der *Weiss*'schen Bezirke sich in dessen Richtung zu drehen (*III*). Sobald sämtliche magnetische Momente gedreht sind und zu \mathbf{H} parallel stehen, wird die *technische Sättigung* \mathbf{B}_S erreicht. Das diese Sättigung hervorruftende (erregende) Feld wird *Sättigungsfeld* mit der *Sättigungsfeldstärke* \mathbf{H}_S genannt (vgl. *Heptner et al.* [17]).

Sobald nach Erreichen des Sättigungspunktes das erregende Feld abgestellt wird, stellen sich die reversiblen Blochwand-Verschiebungen wie auch die Drehprozesse wieder zurück. Die irreversiblen Blochwand-Verschiebungen bleiben bestehen. Sie bewirken letztlich die *remanente (verbleibende) Magnetisierung* \mathbf{B}_R . Soll die remanente Magnetisierung innerhalb des Körpers aufgehoben werden, so muss ein erregendes Feld umgekehrten Vorzeichens aufgebracht werden. Das für die Aufhebung der remanenten Magnetisierung ($\mathbf{B} = 0$) verantwortliche Feld wird als *Koerzitivfeld* mit der *Koerzitivfeldstärke* \mathbf{H}_C bezeichnet.

Bei einer Steigerung der Feldstärke in dieselbe Richtung wird man den zweiten Sättigungspunkt $-\mathbf{B}_S$ und bei Abschaltung des erregenden Feldes das remanente Magnetfeld $-\mathbf{B}_R$ erreichen. Wird erneut ein erregendes Feld positiven Vorzeichens angelegt und dessen Feldstärke gesteigert, so wird die remanente Magnetisierung im Körper abermals auf null zurückgehen. Bei erneutem Anwachsen der Feldstärke auf grössere positive Werte wird der Sättigungspunkt positiven Vorzeichens wiederholt erreicht. Die Neukurve wird dieses Mal nicht mehr durchlaufen, da dies nur vom ersten Magnetisierungsprozess bis zur ersten vollständigen Sättigung des Körpers geschieht.

Ein vollständiger Ummagnetisierungszyklus ist dadurch gekennzeichnet, dass die Feldstärke zunächst von $+\mathbf{H}_S$ zu $-\mathbf{H}_S$ geändert wird und anschliessend wieder von $-\mathbf{H}_S$ zu $+\mathbf{H}_S$. Nach *Heptner* ist die von der Hysterese umschlossene Fläche ein Mass für die während eines Ummagnetisierungszyklus aufzuwendende Arbeit (siehe *Heptner et al.* [17]).

Lässt ein Körper sich leicht ummagnetisieren, so wird er als magnetisch weich eingestuft und entsprechend als magnetisch hart, wenn er sich nur schwer ummagnetisieren lässt. In der Magnetisierungskurve drückt sich dies durch die Form der Hysterese aus, die bei weichem Material eher schmal und bei hartem Material dagegen breiter ausfällt.

2.2.3 Magnetfelder

Von den Erläuterungen zur Magnetisierungskurve ausgehend, sind sämtliche Magnetfelder einer der beiden folgenden Kategorien, nämlich den erregenden Feldern bzw. den remanenten Feldern, zuteilbar.

Zur Berechnung dieser Felder wird auf die *Maxwell*-Gleichungen (2.8) bis (2.11), die an dieser Stelle in Differentialform angegeben sind, zurückgegriffen.

$$\operatorname{rot} \mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = -\frac{\partial}{\partial t} \mathbf{B}(\mathbf{r}, t) \quad (2.8)$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{H}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{J}(\mathbf{r}, t) + \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{D}(\mathbf{r}, t) \quad (2.9)$$

$$\operatorname{div} \mathbf{D}(\mathbf{r}, t) = \varrho(\mathbf{r}, t) \quad (2.10)$$

$$\operatorname{div} \mathbf{B}(\mathbf{r}, t) = 0 \quad (2.11)$$

Da diese jedoch den Elektromagnetismus in allgemeiner Form beschreiben, können aufgrund des hier betrachteten Spezialfalls der Magnetostatik zwei der insgesamt vier Grundgleichungen gestrichen werden. Die Gleichungen (2.9) und (2.11) verbleiben und vereinfachen sich aufgrund des stationären Falls ($t = \text{const}$) zudem noch. Die vereinfachten Gleichungen (2.12) und (2.13) bilden die Grundlage zur Berechnung der stationären Magnetfelder.

$$\operatorname{rot} \mathbf{H}(\mathbf{r}) = \mathbf{J}(\mathbf{r}) \quad (2.12)$$

$$\operatorname{div} \mathbf{B}(\mathbf{r}) = 0 \quad (2.13)$$

Unter der Voraussetzung des Vorhandenseins stationärer Magnetfelder, die bei fester, ruhender Materie vorliegen, können die Magnetfelder analytisch bestimmt werden. Ein Dipol, im einfachsten Fall ein Elektron, weist ein analytisch bestimmbares Magnetfeld auf. Am Beispiel des Elektrons bzw. des aus dem Elektronenspin resultierenden Elementarmagneten wird dies im Folgenden erläutert. Bild 2.7 zeigt für den allgemeinen Fall die Ermittlung des Magnetfeldes eines Dipols am Punkt $\mathbf{r} - \mathbf{r}'$.

Den mathematischen Zusammenhang zeigt Gleichung (2.14) (aus *Leuchtmann* [30]).

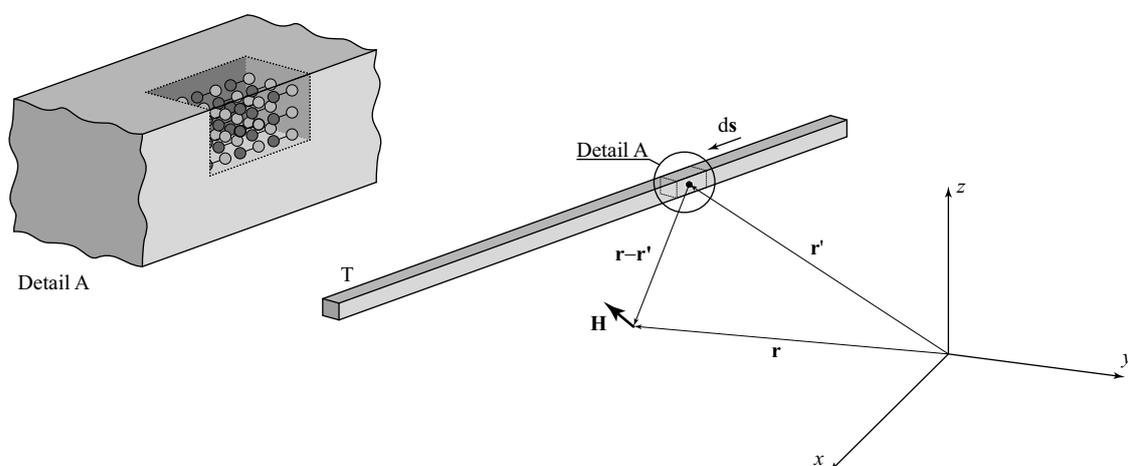


Bild 2.7 Magnetfeld eines innerhalb des ferromagnetischen Materials T liegenden Dipols am Punkt $\mathbf{r} - \mathbf{r}'$.

$$\lim_{\substack{\mathbf{d} \rightarrow 0 \\ p \rightarrow \infty}} \mathbf{H} = \frac{p\mathbf{d}}{4\pi\mu_0} \lim_{\mathbf{d} \rightarrow 0} \frac{1}{\mathbf{d}} \left(\frac{\left(x, z - \frac{\mathbf{d}}{2}\right)}{\sqrt{x^2 + \left(z - \frac{\mathbf{d}}{2}\right)^2}} - \frac{\left(x, z + \frac{\mathbf{d}}{2}\right)}{\sqrt{x^2 + \left(z + \frac{\mathbf{d}}{2}\right)^2}} \right) \quad \left[\frac{\text{A}}{\text{m}} \right] \quad (2.14)$$

Hierzu wird das in Gleichung (2.3) angegebene magnetische Moment eines Elektrons und der von *Kohlrausch* [26] angegebene *Elektronenradius* r_e (siehe Gleichung (2.15)) herangezogen.

$$r_e = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 m_e c^2} \quad [\text{m}] \quad (2.15)$$

Das magnetische Moment eines Elektrons entspricht dem Ausdruck $p\mathbf{d}/\mu_0$ und kann direkt in Gleichung (2.14) eingesetzt werden. Der angegebene Abstand \mathbf{d} der *Monopole* p kann vereinfachend mit $d = 2 \cdot r_e$ angenommen werden, womit sich Gleichung (2.14) zu Gleichung (2.16) vereinfacht und das Feld für beliebig im Raum gewählte Punkte berechnet werden kann.

$$\mathbf{H}_j = \frac{\mu_s r_e}{8\pi} \left(\frac{\left(x, z - r_e\right)_j}{\sqrt{x^2 + \left(z - r_e\right)_j^2}} - \frac{\left(x, z + r_e\right)_j}{\sqrt{x^2 + \left(z + r_e\right)_j^2}} \right) \quad \left[\frac{\text{A}}{\text{m}} \right] \quad (2.16)$$

Beispielhaft ist in Bild 2.8 (a) das Magnetfeld eines einzelnen Dipols dargestellt. Die Feldlinien geben den Verlauf des Magnetfeldes um die beiden Pole wieder, wohingegen die Vektorpfeile die Richtung des magnetischen Flusses angeben. Da in diesem Fall die Vektorpfeile normiert sind, zeigen sie jedoch nicht die Stärke des Magnetfeldes an. Die normierte Darstellung der Vektorpfeile wurde nur für die graphische Wiedergabe gewählt. Vorab wurden an den eingezeichneten Schnitten **A-A** bis **C-C** (siehe Bild (2.8) (b)-(d)) die Vektorpfeile, wie in Kapitel 1.4 bereits erklärt wurde, zerlegt und jeweils in Form von Kurvenverläufen dargestellt. Aus den Kurvenverläufen geht hervor, wie sich die Magnetpole mit geringer werdendem Beobachtungsabstand deutlicher abzeichnen.

Die Ermittlung des Magnetfeldes zweier Dipole erfolgt gleichermassen wie die eines einzelnen Dipols. Das Magnetfeld jedes einzelnen Dipols wird ermittelt und, da Magnetfelder dem Superpositionsprinzip gehorchen, zu einem Gesamtmagnetfeld aufaddiert. Somit können beliebig viele Dipole positioniert und deren Felder superponiert werden (vgl. Gleichung (2.17)).

$$\mathbf{H} = \sum_{j=1}^N \mathbf{H}_j \quad \left[\frac{\text{A}}{\text{m}} \right] \quad (2.17)$$

Das Magnetfeld zweier Dipole ist in Bild (2.9) (a) dargestellt. Gegenüber dem Feld eines einzelnen Dipols kann das Streufeld zwischen den beiden Dipolen deutlich erkannt werden. In den Schnitten **A-A** bis **C-C** (siehe Bild (2.9) (b)-(d)) ist die räumliche Trennung der Dipole anhand der charakteristischen Kurvenverläufe ebenfalls gut erkennbar.

Der betrachtete Dipol eines Elektrons stellt die kleinste Einheit eines Magnetfeldes dar, das so kaum registriert würde. Das ist jedoch nur das Magnetfeld eines einzelnen Elektrons bzw. dessen Elektronenspins. Das respektable Magnetfeld eines Ferromagnetikums wie Eisen entsteht aber aus dem Zusammenspiel des in Kapitel 2.2.2 bereits erwähnten Gesamtdrehimpulses eines Elektrons, welcher sich aus dem Elektronenspin und dem Bahndrehimpuls des Elektrons ergibt. Das Magnetfeld des Gesamtdrehimpulses führt aber nur zu einem makroskopisch erfassbaren Magnetfeld, wenn dazu eine Vielzahl von Einzelfeldern superponiert werden.

Bei einer genaueren Betrachtung des Elementes Eisen gibt die Atommasse (vgl. Gleichung (2.18), Wieser *et al.* [57]) Aufschluss darüber, wie viele Atome pro Raumvolumen vorhanden sind, wenn für Eisen die stoffspezifische Dichte von $\rho_{\text{Fe}} = 7.874 \text{ g/cm}^3$ angesetzt wird.

$$m_{\text{Fe}} = 55.845 \cdot u = 55.845 \cdot 1.660538921 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 9.273 \cdot 10^{-26} \text{ kg} \quad (2.18)$$

$$n = \frac{\rho_{\text{Fe}}}{m_{\text{Fe}}} = \frac{7874 \text{ kg/m}^3}{9.273 \cdot 10^{-26} \text{ kg}} = 8.49 \cdot 10^{19} \frac{\text{Atome}}{\text{mm}^3} \quad (2.19)$$

Die Division der stoffspezifischen Dichte durch die Atommasse ergibt somit einen Wert von $n \approx 8.49 \cdot 10^{19}$ (siehe Gleichung (2.19)). Die Anzahl von Atomen pro Volumeneinheit gibt jedoch noch keinen Aufschluss darüber, wie viele Elektronen einen Beitrag zum makroskopischen Magnetfeld liefern. Hierzu muss die Elektronenkonfiguration herangezogen werden. Diese gibt näherungsweise an, wie die Elektronen innerhalb der Atomhülle verteilt sind (siehe Demtröder [12]). Die Verteilung der Elektronen wird letztlich durch das *Pauli*-Prinzip (siehe Kneller [25] und Pauli [40]) und die *Hund*'schen Regeln [21] präziser beschrieben.

Das Fe-Atom hat eine Kernladungszahl von $Z = 26$ und somit 26 Elektronen in der Atomhülle. Da nur unvollständig besetzte Elektronenschalen bzw. Orbitale einen Beitrag zum makroskopischen Magnetfeld liefern, sind nur die beiden äusseren Schalen mit den höchsten Energieniveaus relevant. Letztlich rufen aber nur die Elektronen der 3. Unterschale der 3. Elektronenschale ($3p^6$) ein nach aussen hin feststellbares Magnetfeld hervor. Auf dieser Schale sind insgesamt sechs Elektronen angeordnet, von denen zwei ein Elektronenpaar bilden und es sich bei den übrigen vier um sogenannte ungepaarte Elektronen handelt.

Elektronen, die ein Paar bilden, heben sich in ihrem magnetischen Moment auf, da ihre Elektronenspins antiparallel gestellt sind. Auf vollständig besetzten Elektronenschalen sind nur Elektronenpaare zu finden, weshalb diese mit der eben gelieferten Begründung keinen Einfluss auf das äussere Magnetfeld haben. Multipliziert man nun die Anzahl der Atome pro Volumeneinheit n mit der Anzahl der ungepaarten Elektronen pro Atom, so erhält man näherungsweise die Anzahl von Elektronen, die an der Etablierung des makroskopischen Magnetfeldes beteiligt sind. Wird dieser Wert dann anschliessend noch mit dem *Bohr*'schen Magneton multipliziert, erhält man das Dipolmoment pro Volumeneinheit (vgl. Gleichung (2.20)).

$$\mathbf{m}_{DV} = 4 \cdot n \mu_B = 3.1 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Am}^2}{\text{mm}^3} \quad (2.20)$$

Es wird angenommen, dass ein definiertes Volumen, wie zuvor beschrieben, mit einem Ferromagnetikum gefüllt ist und das Volumen an beliebiger Stelle vollständig durchtrennt wird. Für diesen Fall kann ein Magnetfeld, wie es in Bild 2.9 (a) gezeigt wird, festgestellt werden. An der Trennstelle, die als Bruch angesehen werden kann, bildet sich ein erkennbares Streufeld aus.

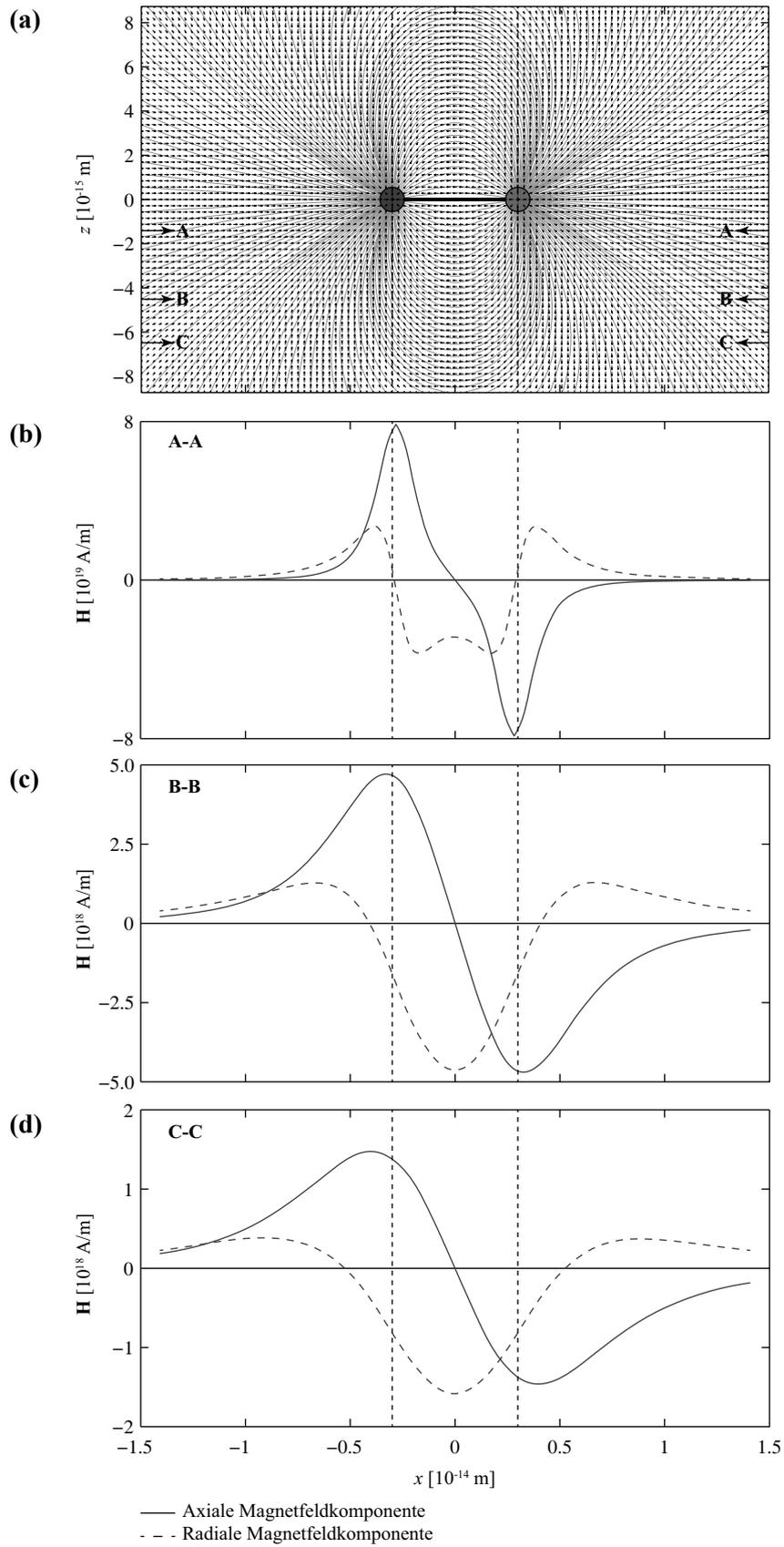


Bild 2.8 (a) Graphische Darstellung des Magnetfeldes eines Dipols mit eingezeichneten Feldlinien und normierten Vektorpfeilen. Ausgewählte Schnitte (b)-(d) zeigen den Verlauf der Axial- und Radialkomponente des Magnetfeldes.

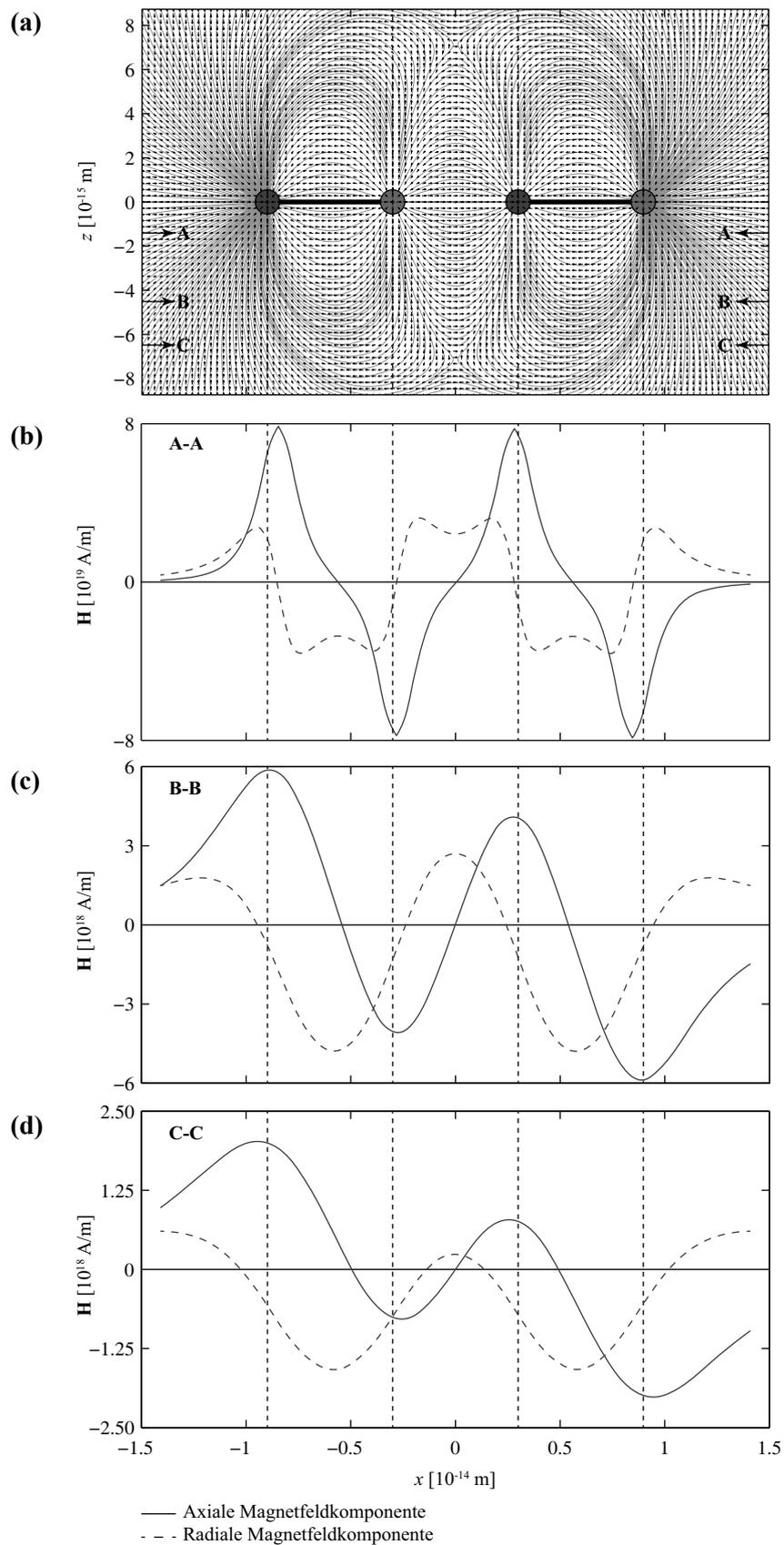


Bild 2.9 (a) Graphische Darstellung des Magnetfeldes zweier Dipole mit eingezeichneten Feldlinien und normierten Vektorpfeilen. Ausgewählte Schnitte (b)-(d) zeigen den Verlauf der Axial- und Radialkomponente des Magnetfeldes.

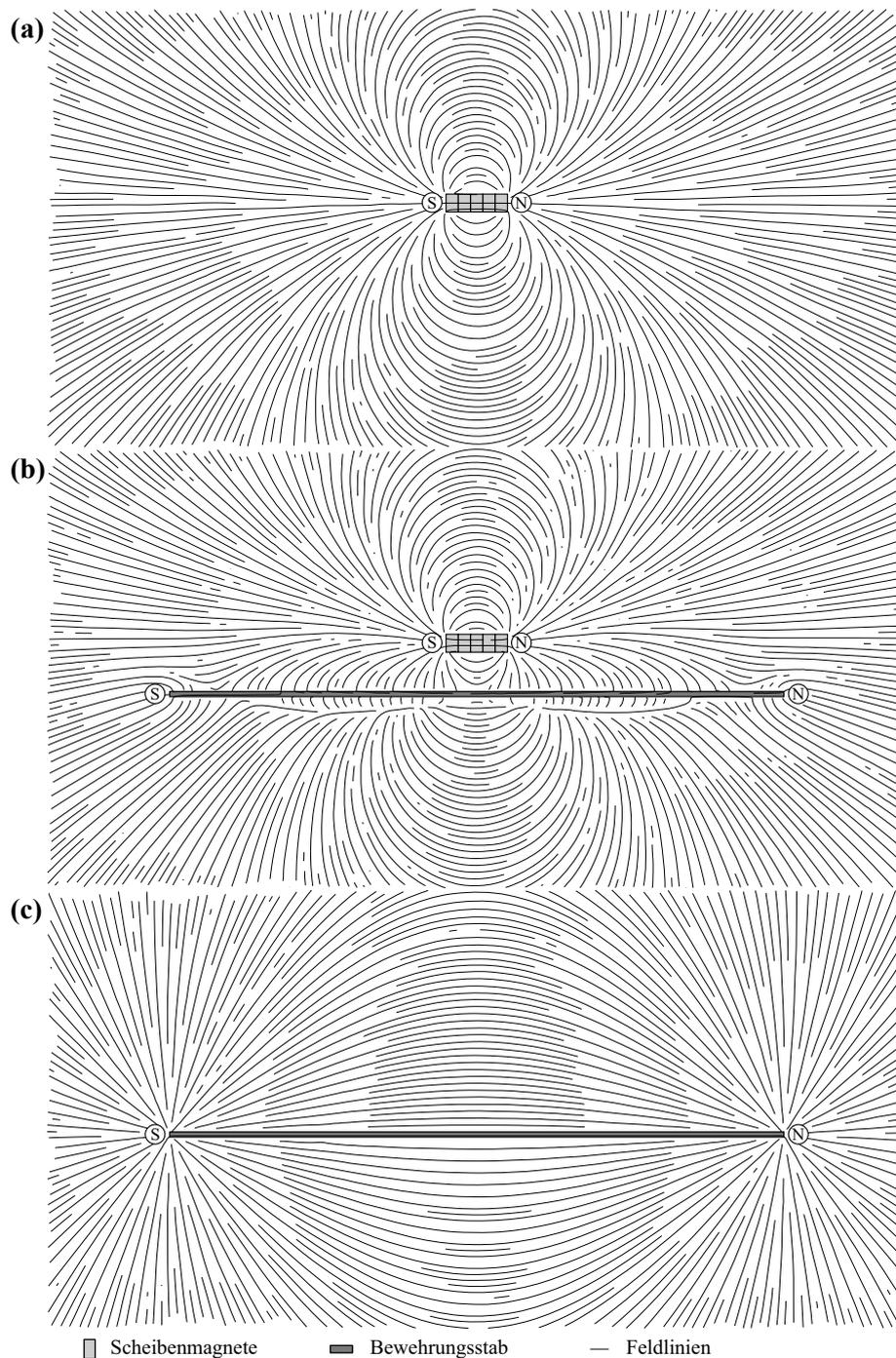


Bild 2.10 Visualisierungen von Magnetfeldern (a) eines einzelnen Permanentmagneten, (b) eines Permanentmagneten mit einem Bewehrungsstab in unmittelbarer Nähe und (c) eines einzelnen Bewehrungsstabes (erstellt mit *Comsol* [11]).

Einen ähnlichen Ansatz verfolgt auch *Pak* in seiner Arbeit, wobei er konsequent Monopole verwendet. Damit wird es ihm möglich, das Magnetfeld abschnittsweise zu bestimmen. An Stellen geometrischer Änderungen oder bei der Änderung der ferromagnetischen Eigenschaften der betrachteten Probe beginnen bzw. enden die von ihm betrachteten Abschnitte. Die genaue Vorgehensweise sowie sämtliche Herleitungen können der Arbeit von *Pak* [39] entnommen werden.

Für die numerische Lösung der Magnetfelder und deren Visualisierung wird die kommerzielle Software *Comsol 4.2a* von *Comsol AB* (Stockholm) verwendet. Bei der Eingabe kann angesichts vorhandener Symmetrien auf eine dreidimensionale Modellierung verzichtet und stattdessen im zweidimen-

sionalen Raum gearbeitet werden. Eine Reduzierung des Bildausschnittes aufgrund von Achsensymmetrien findet nicht statt. Für die Modellierung werden innerhalb von *Comsol* entsprechend der durchzuführenden Auswertung die jeweiligen *Shape Functions* der FE-Methode vorgewählt. Beim hier betrachteten Fall, wurde das skalare Vektorpotential ermittelt, womit einhergehend quadratische *Lagrange-Shape-Functions* verwendet werden. Bei der Netzgenerierung kamen tetraedrische Elemente mit 10 Knoten zum Einsatz. Weitere Informationen zu den Einstellungen in *Comsol* können dem Anhang A entnommen werden.

Die Bilder 2.10 (a)-(c) zeigen die Magnetfelder für einen einzelnen Permanentmagneten (a) bzw. einen Bewehrungsstab (c) und darüber hinaus für die Kombination von Permanentmagnet und Bewehrungsstab (b). Das vom Permanentmagneten ausgehende Magnetfeld wird als erregendes Feld angesehen, wohingegen das Magnetfeld des Bewehrungsstabes als remanentes Feld betrachtet wird. Das Magnetfeld beliebigen Ursprungs kann sich ungestört im Raum ausbreiten, solange kein Material mit einer grösseren magnetischen Leitfähigkeit (Permeabilität) als der des umgebenden Mediums in dessen Feld eingebracht wird (vgl. Bild 2.10 (a)). Bringt man ein magnetisches Material in dieses Magnetfeld ein, wird es sich den Weg der grössten Permeabilität suchen und sich bevorzugt innerhalb dieses Materials fortpflanzen. Dies geht aus Bild 2.10 (b) hervor.

Ist dieses Material ferromagnetischer Natur – wie es im Stahlbetonbau beim Bewehrungsstahl überwiegend der Fall ist – wird sich ein remanentes Magnetfeld im und um den Bewehrungsstab zeigen, nachdem ein genügend grosser Abstand zum Permanentmagneten hergestellt wurde (Bild 2.10 (c)).

Das hier dargestellte Magnetfeld eines intakten Bewehrungsstabes weist ebenso typische Charakteristiken auf, wie dasjenige eines gebrochenen Bewehrungsstabes (vgl. Bild 2.3). Die prägnantesten Merkmale gehen von den Polen des jeweiligen Magnetfeldes aus, da diese als Orte mit Extremwerten der Magnetfeldstärke aufgefasst werden können. An den Polen verdichten sich die Feldlinien derart stark, wie sie es nur in diesem Bereich des Magnetfeldes tun. Je geringer der Abstand zwischen den Feldlinien ist, desto grösser ist die magnetische Induktion bzw. Flussdichte, und damit einhergehend fallen die Kräfte infolge der magnetischen Induktion dort am grössten aus.

2.2.4 Charakteristische Kurvenverläufe und -signale

Für die Auswertung der Versuchsdaten ist die Kenntnis der charakteristischen Muster in den Verläufen der Messwerte notwendig. Die Messwerte werden stets komponentenweise erhoben, d. h. sie geben die Stärke des Magnetfeldes in der jeweiligen Raumrichtung an (vgl. Bild 1.1 (a)). Für die Darstellung eines Vektorfeldes müssen aus den gemessenen Komponenten mit dem Satz des *Pythagoras* der Betrag und mit der Tangens-Winkelfunktion der Winkel der Resultierenden des Magnetfeldes \mathbf{H} für den jeweiligen Ort berechnet werden. Der Betrag gibt die Länge des Vektorpfeils und der ermittelte Winkel die Richtung an.

Bevor die typischen Signale eines Bruches besprochen werden, noch einige Hinweise zu den Verläufen. Die Messwerte können infolge einer unterschiedlichen Magnetisierung variieren. Wurde zwischen zwei Messungen mit einer anderen Feldstärke magnetisiert, so können sich die Verläufe in der Amplitude unterscheiden. Hierbei muss beachtet werden, dass ein Unterschied nur feststellbar ist, wenn $|\mathbf{H}_{i+1}| > |\mathbf{H}_i|$ ist. Darüber hinaus sind die Messwerte mit der Magnetisierungsrichtung verknüpft, womit sie um die x -Achse gespiegelt sein können.

Im Folgenden werden die Verläufe eines intakten Bewehrungsstabes von $l = 1$ m, wie sie in Bild 2.11 zu sehen sind, besprochen. Den Verläufen liegt qualitativ das in Bild 2.3 (a) gezeigte Magnetfeld zugrunde. Die Messwerte wurden in einem Abstand von rund 78 mm zum Bewehrungsstab erfasst. Bei der Axial- wie auch der Radialkomponente sind neben den Verläufen der Messungen auch die einer

Comsol-Simulation und einer analytischen Lösung auf Grundlage von Gleichung (2.14) hinterlegt.

Die Tangentialkomponente weist diese zusätzlichen Verläufe nicht auf, da nur zweidimensional modelliert wurde. Aufgrund der komplizierten Evaluation der materialspezifischen Eigenschaften der beim Versuch verwendeten Bewehrungsstäbe, konnten für die Simulation, respektive die analytische Lösung

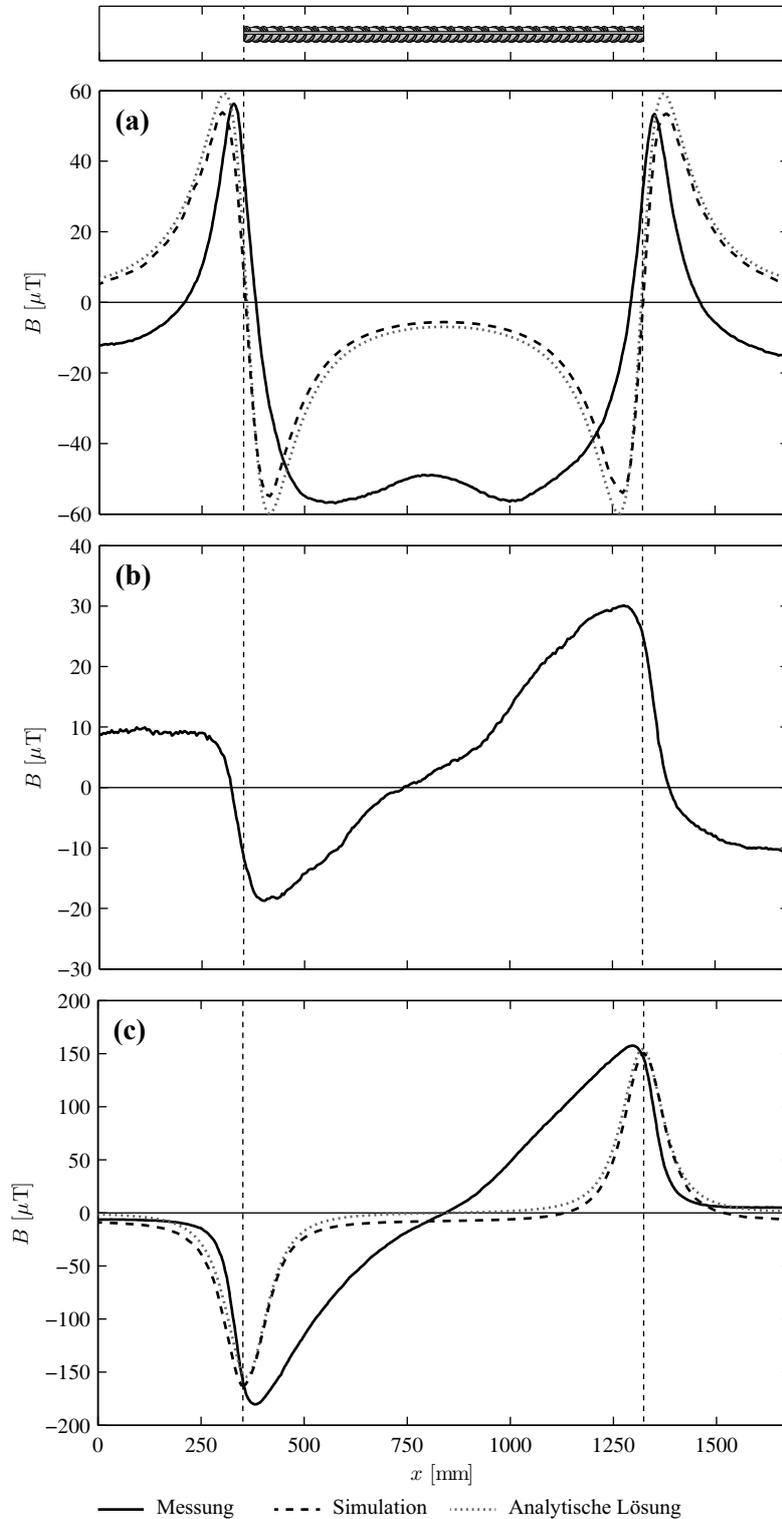


Bild 2.11 Typische Kurvenverläufe eines intakten Bewehrungsstabes mit (a) der Axial-, (b) der Tangential- und (c) der Radialkomponente.

diesbezüglich nur Annahmen (siehe Anhang A) getroffen werden. Bei einer Variation der Magnetisierungsstärke liesse sich statt eines einzelnen Kurvenverlaufs eine Kurvenschar bzw. ein Bereich möglicher Kurvenverläufe darstellen. Da dieses Vorgehen jedoch nur zu einer Stauchung bzw. Dehnung der Kurvenverläufe entlang der Ordinatenachse führt, wurde darauf verzichtet. Berücksichtigt man diese

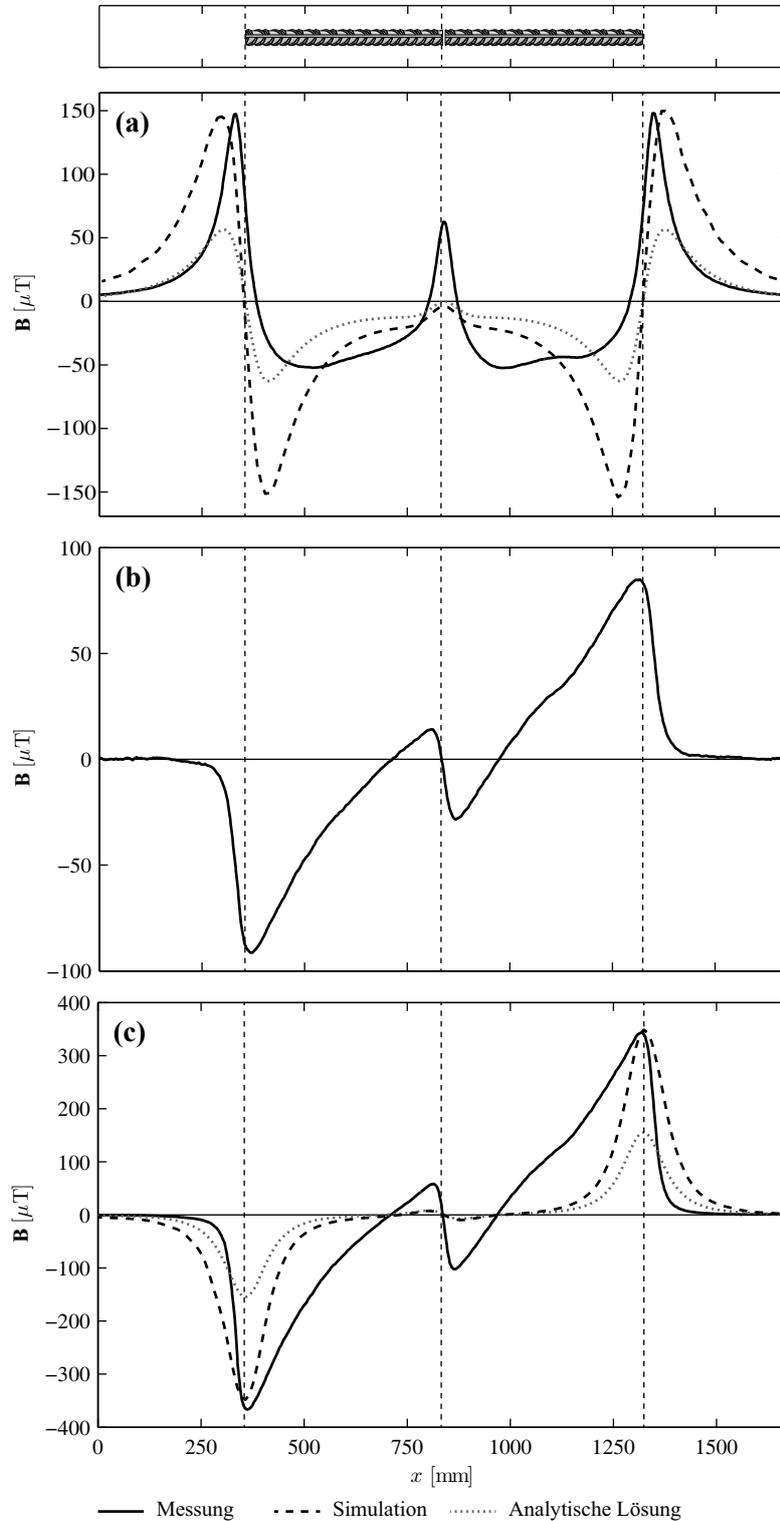


Bild 2.12 Typische Kurvenverläufe eines gebrochenen Bewehrungsstabes für (a) die Axial-, (b) die Tangential- und (c) die Radialkomponente.

Umstände, kann die Übereinstimmung der Verläufe an den neuralgischen Punkten eines Bewehrungsstabes (Stabanfang und -ende, Bruchposition) als gut eingestuft werden. Durch die fehlende Kenntnis über die genauen Materialeigenschaften der jeweiligen Bewehrungsstäbe waren keine Anpassungen der magnetischen Permeabilität in der Simulation möglich. Dem entsprechend konnte zwischen der Messung und der Simulation keine bessere Übereinstimmung der Kurvenverläufe in den Bereichen zwischen den neuralgischen Punkten eines Bewehrungsstabes erreicht werden.

Der zuoberst dargestellte Bewehrungsstab veranschaulicht die Situation, wobei der Lage der Stabenden besonderes Augenmerk zukommt. Die Stabenden sind den Polen eines Stabmagneten gleichzusetzen, womit dort die grössten Feldstärken erwartet werden müssen. Bild 2.3 (a) bestätigt dies. Die Vektorpfeile stehen an den Stabenden im materialfreien Raum senkrecht zur Stabachse, weshalb es keine Axialkomponente geben darf und sich die Stärke des Feldes vollständig aus der Radialkomponente ergeben muss. Die Verläufe der Simulation veranschaulichen dies in den Bildern 2.11 (a) und (c) deutlich. Die Axialkomponente hat an den Stabenden Nulldurchgänge, wohingegen in der Radialkomponente Extremwerte festgestellt werden können.

Mit diesen Erkenntnissen kann der Umkehrschluss gezogen werden, dass Extrema in den Verläufen auf Pole oder wie hier auf Stabenden hinweisen. Geht man gedanklich einen Schritt weiter und vereinfacht den Bruch eines Bewehrungsstabes auf das Vorhandensein zweier Stabenden, deren Abstände zueinander minim sind, so wird man die Extrema als Anzeichen eines Bruches interpretieren können. Beispielhaft sind in Bild 2.12 Verläufe für einen gebrochenen Bewehrungsstab von $l = 1$ m dargestellt, bei dem der Bruch genau in der Mitte der Stablängsachse lag. Neben den Verläufen der Messung sind ebenfalls die einer Simulation bzw. die einer analytischen Lösung dargestellt. Die Verläufe ähneln denen des intakten Bewehrungsstabes mit dem Unterschied, dass sich an der Bruchstelle lokale Extrema in den Verläufen zeigen.

Betrachtet man die Bruchstelle genauer (siehe Bild 2.13), kann man bei der Axialkomponente die Ausbildung eines lokalen Extremums erkennen, welches in der Radialkomponente von zwei weiteren Extrema unterschiedlicher Vorzeichen umschlossen wird. Der Vorzeichenwechsel zeigt an, dass sowohl eine Senke als auch eine Quelle des Magnetfeldes entstanden sind. Mittig zwischen diesen beiden ist die Radialkomponente Null, d. h. nur die Axialkomponente ist für die Stärke und Richtung des Feldes verantwortlich. Die Tangentialkomponente wird nicht explizit besprochen, verhält sich aber ähnlich wie die Radialkomponente. Vergleicht man die Komponentenstärken untereinander, so fällt die Radialkomponente gegenüber der Axialkomponente grösser aus. Die Bruchsignale wurden auch messtechnisch erfasst und sind in Anhang F hinterlegt.

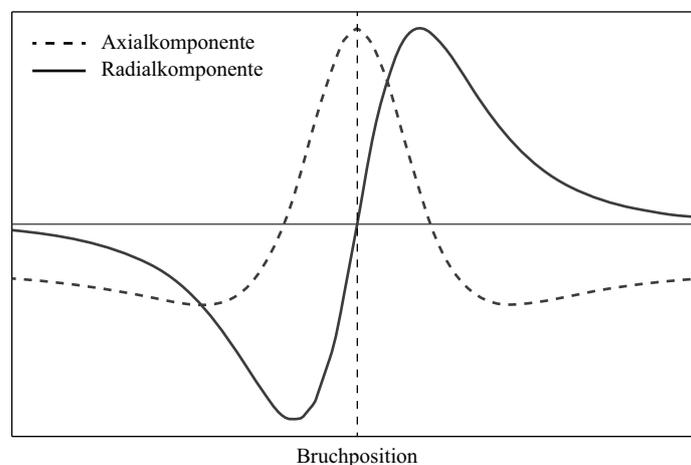


Bild 2.13 Kurvenverläufe an einer Bruchstelle für die Axial- und die Radialkomponente.

2.3 Magnetische Streufeldmethode

Im Folgenden werden die für die magnetische Streufeldmethode notwendigen Bestandteile und Abläufe genauer betrachtet. Neben der generellen Abfolge der durchzuführenden Schritte wird auf die verwendeten Magnete und Sensoren eingegangen, sowie die Kalibrierung der Sensoren erläutert. Das Kapitel endet mit den Erläuterungen zur Datenerfassung und -speicherung.

2.3.1 Prozedere

In Kapitel 2.2.2 wurde bereits darauf hingewiesen, dass ein magnetisches Material sich nur im jungfräulichen Zustand befindet, wenn es bis anhin mit keinem erregenden Magnetfeld in Kontakt kam. Dies kann bei einer einbetonierten Bewehrung nicht vorausgesetzt werden, da das Ausgangsmaterial der Bewehrung während des Produktionsprozesses bzw. die Bewehrung selbst durch magnetische Hebevorrichtungen transportiert worden sein kann. Darüber hinaus kann die Bewehrung auch durch andere Magnetfelder beeinflusst bzw. durch mechanische Einwirkungen belastet worden sein, wodurch eine gestörte Magnetisierung die Folge wäre. Durch die fehlende Kenntnis über die magnetische Vorgeschichte der Bewehrung, muss vor einer Erfassung des Ist-Zustandes eine Magnetisierung durchgeführt werden. Dieser Vorgang ist derart zu realisieren, dass sämtliche, vorab stattgefundenen Magnetisierungen überschrieben und eine gerichtete Magnetisierung herbeigeführt wird. Während des Magnetisierungsvorgangs wird der Bewehrungsstab, wie in Bild 2.10 dargestellt, einem erregenden Magnetfeld ausgesetzt.

Dieses Feld stammt von einem Permanentmagneten, der der Längsachse des Bewehrungsstabes entlang verfahren wird, wobei dessen Längsachse parallel zu der des Bewehrungsstabes gerichtet sein muss (siehe Bild 2.15 (a)). In diesem Fall sorgt hauptsächlich die axiale Komponente des Erregerfeldes für die Ausrichtung der *Weiss*'schen Bezirke innerhalb des Bewehrungsstabes. In Bild 2.14 ist linkerhand zu erkennen, dass die *Weiss*'schen Bezirke noch zufallsverteilt orientiert sind, wohingegen rechterhand – nach der bereits erfolgten Überfahrt mit dem Magneten – diese bereits dem erregenden

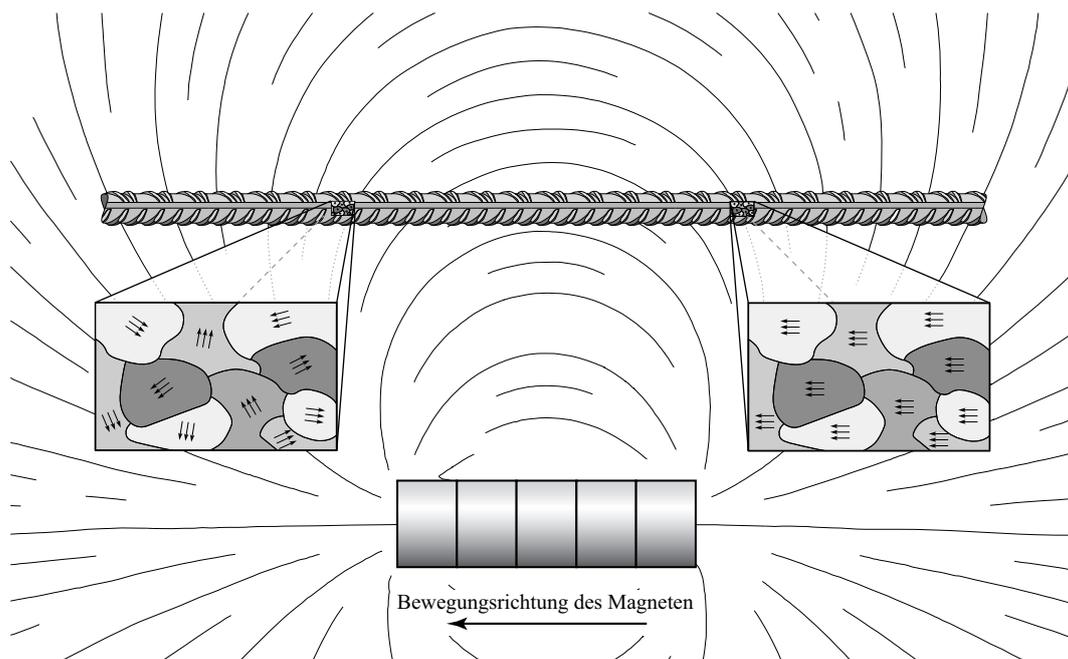


Bild 2.14 Schematische Darstellung des Magnetisierungsvorgangs.

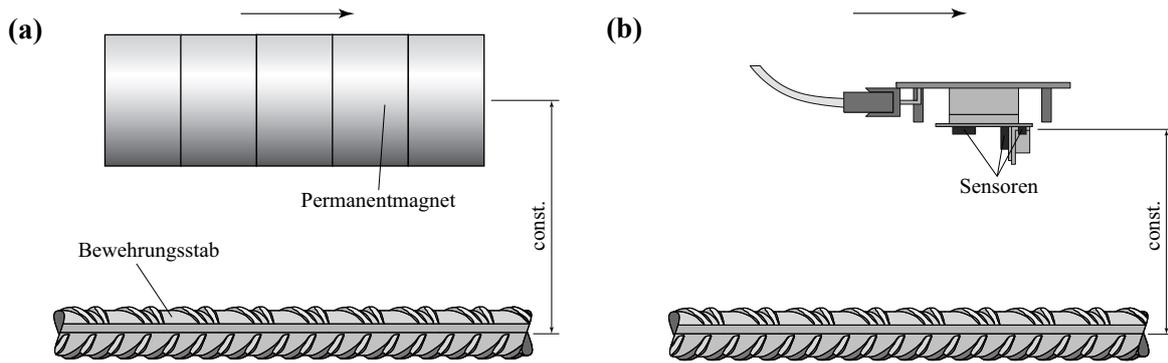


Bild 2.15 Anordnung von (a) Magnet und Bewehrungsstab bzw. (b) Sensoreinheit und Bewehrungsstab.

Magnetfeld parallel gerichtet sind. Für eine hinreichende Magnetisierung ist es erforderlich die Überfahrten zu wiederholen. Während der Versuche hat sich gezeigt, dass der Permanentmagnet drei Mal über die Bewehrungsstäbe geführt werden muss und nach einer Drehung um 180° , so dass Nord- und Südpol vertauscht sind, weitere drei Überfahrten durchgeführt werden müssen.

Nach Abschluss der Magnetisierung wird der Magnet möglichst ohne Drehung um eine seiner Achsen vom Bewehrungsstab entfernt und so platziert, dass dessen Magnetfeld die nachfolgenden Messungen nicht beeinflusst. Aus Bild 2.15 (b) geht hervor, dass der Sensor, wie zuvor schon der Magnet, entlang der Stabachse verfahren und zur Erfassung der axialen, tangentialen und radialen Magnetfeldkomponente eingesetzt wird. Ein geeigneter Abstand zwischen Bewehrungsstab und Sensor ist vorab zu ermitteln. Aus Bild 2.15 (b) geht hervor, dass die Stärke des Magnetfeldes stark vom Ort abhängt. Je dichter also der Sensor entlang des Bewehrungsstabes geführt werden kann, desto höher aufgelöst kann die Magnetfeldstärke an den einzelnen Messpunkten erfasst werden.

Die erfassten Messwerte werden innerhalb der Sensoreinheit umgewandelt und mit Hilfe eines Kabels zum Messcomputer übertragen. Dies kann entweder kontinuierlich oder aber in zuvor definierten Intervallen geschehen. Im Computer werden die Daten gesammelt, gespeichert und in Echtzeit bereits graphisch auf einem Monitor ausgegeben. Die Ingenieure werden so in die Lage versetzt, schon während der Messung den Zustand des Bewehrungsstabes grob abzuschätzen.

2.3.2 Magnet

Als Verursacher des Erregerfeldes kommt bei den Versuchen ein aus fünf separaten Scheibenmagneten zusammengesetzter Permanentmagnet zum Einsatz. Die Scheibenmagnete haben einen Durchmesser von $\varnothing = 35$ mm und eine Dicke von $t = 20$ mm. Weitere Angaben können dem Anhang A entnommen werden. Der Permanentmagnet wurde wie in Bild 2.16 dargestellt, mit Kunststoffkabelbindern auf einen Abstandhalter aus Holz montiert. Der Einsatz des Abstandhalters bewirkte bei den Magnetisierungsvorgängen des Hauptversuchs eine Minimierung der in der Bügelbewehrung etablierten Magnetfelder. Der Schwerpunktabstand des Magneten zur zu magnetisierenden Bewehrungslage ist vorab zu rund $s = 15$ cm gewählt worden. Dieser setzt sich aus dem in Bild 2.16 gezeigten Abstand von $s_M = 13.2$ cm und der noch zu addierenden Bewehrungsüberdeckung von $c_{nom} = 1.5$ cm zusammen.

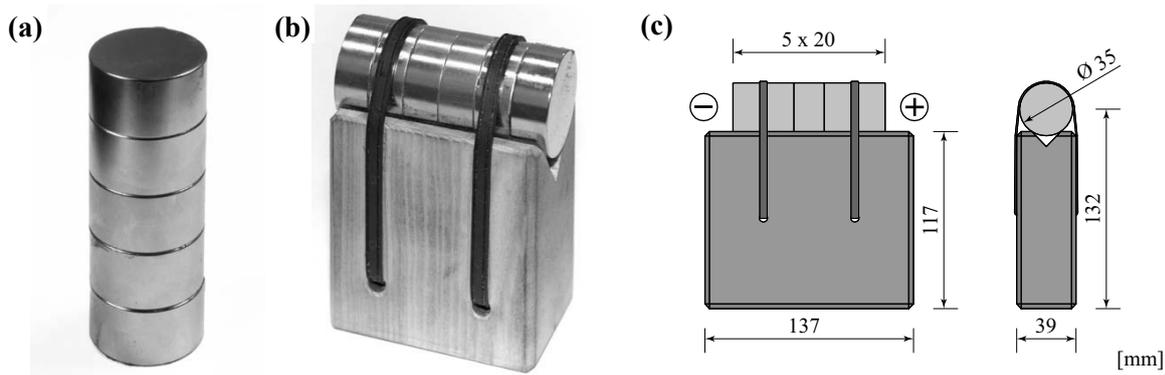


Bild 2.16 (a) Fünf aneinandergefügte Scheibenmagnete; (b) und (c) Scheibenmagnete montiert auf einen Abstandhalter.

2.3.3 Sensor

Für die messtechnische Erfassung der Magnetfelder steht das mit Induktionsspulen arbeitende dreiaxiale Magnetometer *MicroMag3* von [42] zur Verfügung. Die verwendeten Induktionsspulen sind in einen Oszillator-Schaltkreis integriert (vgl. Bild 2.17 (a)). Die Spule (Bild 2.17 (b) und (c)) ist mit einem magnetischen Kern hochpermeablen Materials versehen, um eine Verstärkung des Magnetfeldes herbeizuführen. Ohne eine Änderung der Spulenlage oder des Stromes I erfolgt keine Induktion \mathbf{B} , womit nicht auf die Magnetfeldstärke \mathbf{H} zurückgeschlossen werden könnte. Durch das Einbinden eines Oszillators in den Schaltkreis wird die Spule mit einem Strom gleichen Betrags, aber alternierender Richtung versorgt. Nach *Tumanski* [53] und *Zijlstra* [58] wird die Spule ohne äusseres Magnetfeld bei einem definierten Strom eine eindeutige Oszillator-Frequenz aufweisen. Sobald sich die Spule in einem Magnetfeld befindet, wird sich die Induktion ändern und damit einhergehend auch die Oszillator-Frequenz. Vom Hersteller ist bekannt, dass der zu wählende Parameter ps dazu dient, die Anzahl der zu messenden Perioden festzulegen. Über die Periodendauer kann die Frequenz ermittelt, die Induktion bestimmt und somit die Stärke des äusseren Magnetfeldes errechnet werden.

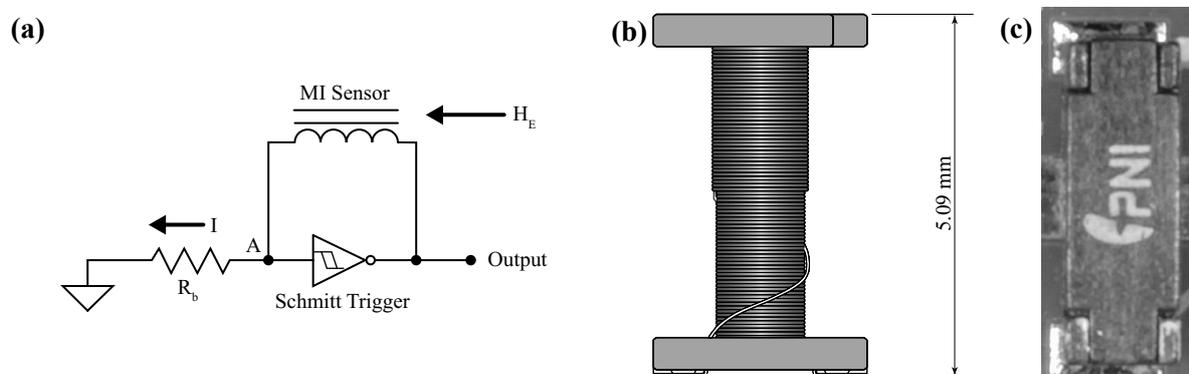


Bild 2.17 (a) Schaltplan für Induktionsspule (nach *Leuzinger* [31]); (b) Wicklung der Induktionsspule (nach *PNI* [42]); (c) Induktionsspule auf *MicroMag3*.

$$t = \left[\left(\frac{1}{f} \right) \left((ps + 16) \cdot 2 \right) \right] \cdot n_s \quad (2.21)$$

Die Oszillation des Stromes und das Zählen der Periodendauer wird durch einen ASIC (engl. *application-specific integrated circuit*) gesteuert. Der Vorteil dieses Messsystems liegt in der digitalen Ausgabe der gemessenen Werte. Die ausgegebenen Messwerte sind entsprechenden Magnetfeldstärken proportional, liegen jedoch einheitenlos vor. Dies bedingt eine Übertragung der einheitenlosen Werte, welche in Abschnitt 2.3.4 eingehender diskutiert wird, in Werte mit Einheit. Aus dem hier verwendeten ASIC ergibt sich zudem die Einschränkung, dass die drei Induktionsspulen bei jedem Messvorgang nacheinander (seriell) angesteuert und ausgelesen werden. Von *PNI* ist für die Berechnung eines kompletten Messdurchlaufs über alle drei Spulen Gleichung (2.21) angegeben, die bis auf die empirische Ermittlung der Oszillator-Frequenz f aus der Theorie der digitalen Logik hergeleitet ist. Bei einer typischen Oszillator-Frequenz von $f = 175$ kHz, einer gewählten Periodenanzahl von $ps = 512$ und einer Spulenanzahl von $n_s = 3$ ergibt sich somit eine ungefähre Messdauer von $t \cong 18.1$ ms. Nach Herstellerangaben sollte diesem Wert ein zusätzlicher Zeitpuffer hinzugefügt werden, um vollständige Messdurchläufe zu gewährleisten.

Das eingesetzte Magnetometer ist mit drei Induktionsspulen bestückt, die orthogonal zueinander stehen. Hierbei liegen die Spulen zur Erfassung der axialen und tangentialen Magnetfeldkomponente in einer Ebene, auf der die Spule für die radiale Komponente orthogonal steht (vgl. Bild 2.18 (a)). Im Zuge der hier durchgeführten Messungen bedingt ein Abgleich unter den Messwerten der drei Magnetfeldkomponenten eine genaue Ortsangabe der einzelnen Spulen. In Bild 2.18 (b) sind auf dem Print des *MicroMag3* von links nach rechts die Spulen für die axiale, radiale und tangentiale Magnetfeldkomponente zu erkennen. Der *MicroMag3* wird stets translatorisch über die Oberfläche des zu untersuchenden Objekts verfahren, wobei die Tangentialkomponente zuerst erfasst wird. Verschiebt man den *MicroMag3* entlang der Oberfläche, so kann nach 4.68 mm die Radial- bzw. nach weiteren 10.44 mm die Axialkomponente erfasst werden. Eine Kompensation der räumlich unterschiedlich angeordneten Induktionsspulen erfolgt nur in Verschiebungsrichtung und nicht orthogonal dazu, da der Einfluss dieses Versatzes als minim erachtet wird.

Weitere Angaben zum *MicroMag3* und den verwendeten Induktionsspulen können dem Anhang A entnommen werden.

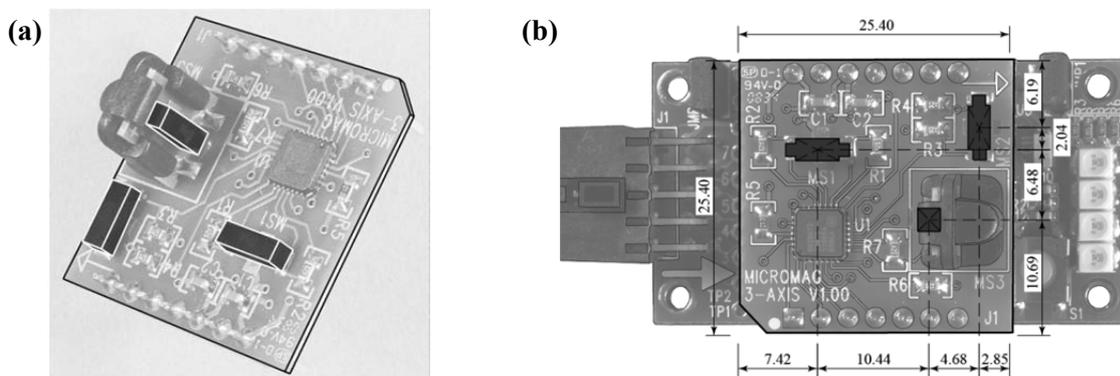


Bild 2.18 (a) Dreiaxialer *MicroMag* mit hervorgehobenen Induktionsspulen; (b) auf CommBoard montierter *MicroMag* mit eingezeichneter Vermessung. Angaben in mm.

2.3.4 Kalibrierung

Da die Messwerte des *MicroMag3* einheitenlos ausgegeben werden, musste eine Kalibrierung durchgeführt werden. Ziel der Kalibrierung war die Ermittlung von Übertragungsfunktionen, mittels derer die einheitenlosen Messwerte in Werte mit der Einheit Tesla übertragen werden können. Die Übertragungsfunktion gilt grundsätzlich nur für jeweils eine Spule und der dann gewählten Periodenanzahl ps . Mit den drei verbauten Induktionsspulen und acht möglichen Werten für die Periodenanzahl ergäben sich $3 \cdot 8 = 24$ Übertragungsfunktionen. Die Spule für die Erfassung der Tangentialkomponente wurde jedoch nicht berücksichtigt, da der Einfluss der Tangentialkomponente als vernachlässigbar eingestuft wurde. Somit verbleiben noch $2 \cdot 8 = 16$ Übertragungsfunktionen.

Für die Erzeugung eines definierten Magnetfeldes wurde eine Helmholtzspule verwendet, wie sie in Bild 2.19 (a) schematisch dargestellt ist. Die Besonderheit dieser Spulenanordnung liegt in dem zwischen den Zentren der Spulen über einen relativ grossen Bereich konstanten Magnetfeld (vgl. Bild 2.19 (b)). Der Kurvenverlauf zwischen den gestrichelten Linien zeigt die Magnetfeldstärke zwischen den beiden Spulen. Burkhardt [10] konnte mittels Gleichung (2.22) den jeweils an der Spannungsquelle der Helmholtzspule einzustellenden Wert für die Stromstärke bei gegebener Magnetfeldstärke ermitteln. Für den *MicroMag3* gilt laut PNI der Messbereich von $-1'100 \mu\text{T} \dots 50 \mu\text{T} \dots +1'100 \mu\text{T}$, der hier auch zugleich den Definitionsbereich $\mathbf{H}_{\min} \dots \Delta\mathbf{H} \dots \mathbf{H}_{\max}$ darstellt. Die Stromstärken sind entsprechend der zugehörigen Werte des Definitionsbereichs protokollarisch festgehalten worden. Die verwendete Spule weist eine Windungszahl von $N = 30$ und einen Radius von $R = 200 \text{ mm}$ auf. Die Position zwischen den Spulen kann zu $-50 \leq z \leq +50$ gewählt werden.

$$I = \frac{H}{\frac{8 \cdot N \cdot \mu_0}{5 \cdot \sqrt{5} \cdot R} - \frac{1152 \cdot N \cdot \mu_0 \cdot z^4}{625 \cdot \sqrt{5} \cdot R^5}} \quad (2.22)$$

Der *MicroMag3* wurde auf dem Ablagetisch zwischen den Spulen fixiert, so dass die Spule der Axial- bzw. Radialkomponente auf Höhe der Spulenzentren zu liegen kam. Des Weiteren wurde die Axial- bzw. Radialspule jeweils so ausgerichtet, dass sie mit ihrer Längsachse parallel zur dargestellten x -Achse der Spule verlief. Anschliessend konnte dem Protokoll folgend die jeweilige Stromstärke eingestellt und nach einer kurzen Wartezeit der Ausgabewert des *MicroMag3* abgelesen werden. Dieser Vorgang wurde für beide Induktionsspulen und den möglichen Werten der Periodenzahl durchgeführt. Die gewonnenen Daten konnten graphisch dargestellt (vgl. Bild 2.20), eine Funktion eingelegt und an die Messwerte angeglichen werden.

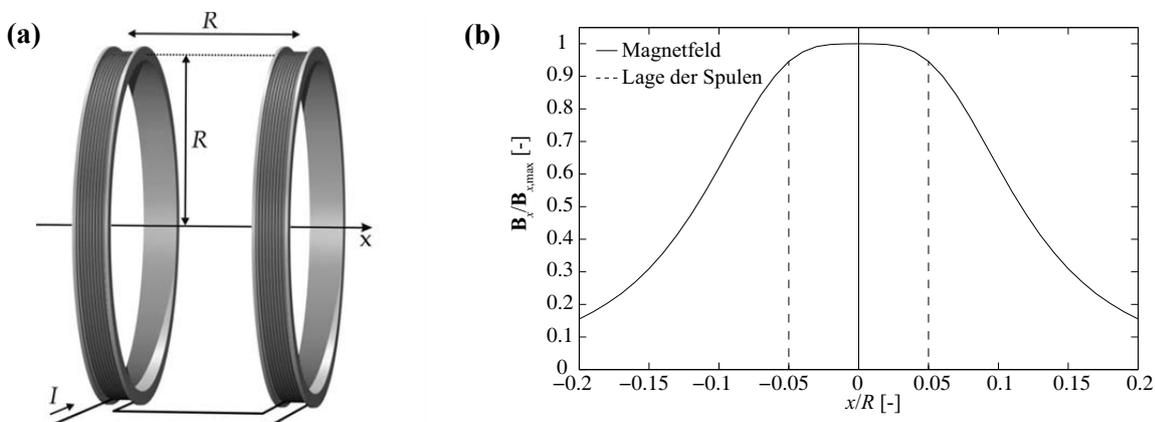


Bild 2.19 (a) Schematische Darstellung einer Helmholtzspule; (b) Magnetfeldverteilung der für die Kalibrierung genutzten Helmholtzspule.

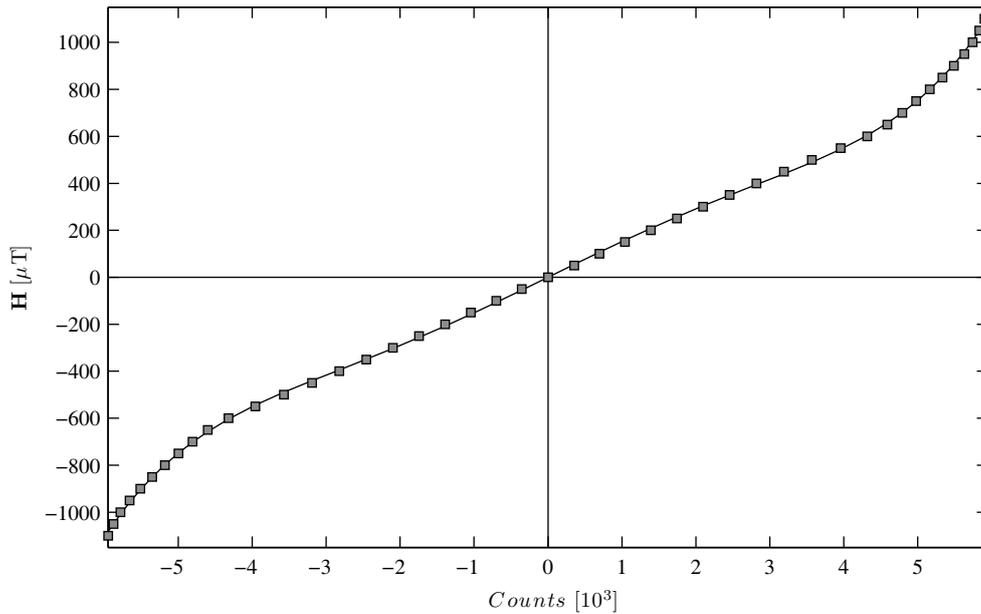


Bild 2.20 Kalibrierwerte mit eingelegter Überföhrungsfunktion für die Axialspule bei einer Messung von 512 Perioden.

Die erhaltene Überföhrungsfunktion konnte anschliessend derart genutzt werden, dass als Eingangswerte der Funktion die einheitenlosen Messwerte des *MicroMag3* eingegeben und die entsprechenden Werte der Magnetfeldstärke in Tesla errechnet wurden.

Da bei sämtlichen Messungen die Tangentialkomponente stets mit erfasst wurde, zeigte sich über die Versuche hinweg, dass diese u. U. mitgenutzt werden kann. Vereinfachend wurden die Überföhrungsfunktionen der Axialspule zur Überföhrung der tangentialen Werte genutzt.

2.3.5 Messwagen

Für die Verknüpfung der Messwerte des *MicroMag3* mit der jeweiligen Messposition bedurfte es eines Positionierungssystems, welches einfach handhabbar und zugleich flexibel einsetzbar sein sollte. Nach ersten Überlegungen, ein Schienen basiertes System zu installieren, wurde jedoch das Konzept eines kabelgebundenen Messwagens weiterverfolgt. Der Messwagen nimmt einerseits den *MicroMag3* und andererseits einen auf der Vorderachse montierten Drehgeber auf (vgl. Bild 2.21). Der Drehgeber stammt von der Firma *Meuli Sensortechnik GmbH* (Weiningen) und arbeitet mit einer optischen Abtastung, wodurch störende Einflüsse auf die Magnetfeldmessungen reduziert werden können. Pro Umdrehung werden 2'000 Impulse geliefert, wodurch eine dem Zweck entsprechend genaue Positionserfassung ermöglicht wird. Weitere Angaben über den Drehgeber können Anhang A entnommen werden.

Beim Bau des Messwagens wurden ausschliesslich nicht ferromagnetische Materialien verwendet, d. h. es kamen Kunststoff, Aluminium und Messing zum Einsatz. Räder und Drehgeber sind fix am Messwagen montiert, demgegenüber ist der *MicroMag3* höhenverstellbar angebracht. Über Messinggewindestangen kann der Abstand zur Bauteiloberfläche zwischen 0 und 45 mm variiert werden.

Der Messwagen ist antriebslos, muss also mit der Hand verfahren werden. Die Impulse des Drehgebers werden in eine äquivalente translatorische Strecke umgerechnet. Diese Werte werden einerseits als Positionsangabe und andererseits als Messauslöser (engl. *trigger*) für den *MicroMag3* genutzt. Mit der bereits erwähnten Dauer eines Messvorgangs ergibt sich eine maximal fahrbare Geschwindigkeit

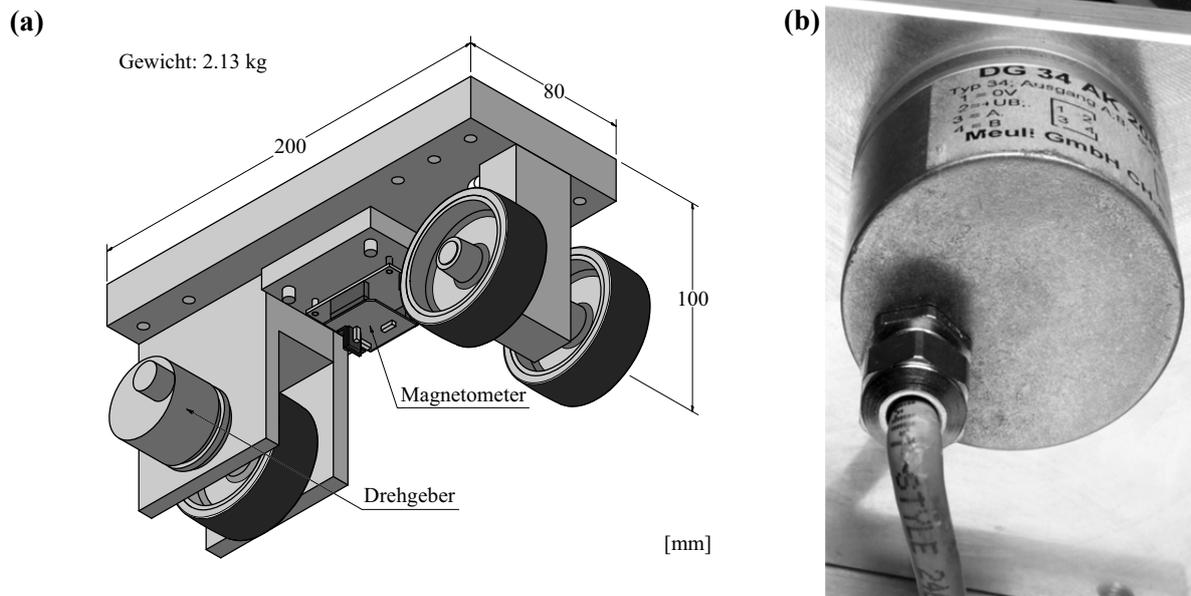


Bild 2.21 (a) Messwagen; (b) Drehgeber

von rund $V = 5 \text{ cm/s}$, bei der noch alle Messpunkte erfasst werden können. Der Messpunkt-
abstand wurde zu $s_{MP} = 5 \text{ mm}$ gewählt. Messungen sind mit dem Wagen an jeder beliebig im Raum orientier-
ten Bauteiloberfläche möglich.

Magnetometer wie auch Drehgeber sind kabelgebunden und benötigen beide eine externe Stromver-
sorgung. Die Geräte waren ursprünglich mit je einem eigenen Kabel versehen, über das sie mit dem
PC verbunden wurden. Mit der Montage am Messwagen wurden diese Kabel gekürzt und auf eine
Schnittstelle gelegt. Die Stromversorgung für den *MicroMag3* wurde direkt auf dem Messwagen in
Form einer 9 V-Blockbatterie realisiert, wohingegen der Drehgeber über den PC mit Strom versorgt
wird. Neben den vier Datenleitungen des *MicroMag3*, wurden weitere vier Datenleitung für den Dre-
geber benötigt. Die Wahl des Schnittstellensteckers fiel auf einen LPT-Stecker, der über 25 Kontakte
verfügt; also genügend Anschlussmöglichkeiten für künftige Ausbaustufen bereithält. Zudem wird
eine falsche Polung mit diesem Stecker verhindert.

2.3.6 Datenerfassung

Neben der vom Hersteller mitgelieferten Software zur Kommunikation mit dem *MicroMag3*, wurde
hauptsächlich ein selbst geschriebenes Programm zur Erfassung der Messdaten genutzt. Das von *PNI*
verfügbare Programm *CommBoard Studio* (Version 10) erfüllt alle Anforderungen, um das Magneto-
meter steuern, dessen Daten erfassen und speichern zu können. Da es sich jedoch nicht anpassen oder
automatisieren lässt, war die Programmierung eines eigenen Programms unumgänglich. Hierbei wurde
auf die graphische Programmierumgebung **LabVIEW** (**L**aboratory **V**irtual **I**nstrumentation **E**ngineer-
Ing **V**orkbench) von *National Instruments* zurückgegriffen. Ein Vorteil bei der Verwendung dieser
Programmierungsumgebung ist die leichte Integration von Sensoren und Messgebern, die direkt angespro-
chen bzw. abgegriffen werden können.

Zur Vereinfachung und besseren Übersichtlichkeit wird mit sogenannten Virtuellen Instrumenten (*VI*s)
– Programmeinheiten – gearbeitet. Hierin lassen sich die Anschlüsse der Sensoren und Geräte nach-
empfinden und logische Schaltungen zwischen diesen realisieren. Neben der Übergabe der Steuerbe-
fehle, die bspw. das Magnetometer anweisen einen Messdurchgang durchzuführen, enthalten die *VI*s
u. a. Ausgabereiche, in denen die aktuellen Messwerte dargestellt werden. Durch Verbinden, den

elektrischen Leitern nachempfunden, werden Verbindungen zwischen den einzelnen Elementen hergestellt, über die die Kommunikation und Datenweitergabe erfolgt. Mittels dieser Elemente konnten die komplexen Abläufe koordiniert und den Erfordernissen der Datenerfassung angepasst werden.

Der Programmablauf gliedert sich in Abschnitte (vgl. Bild 2.22). Im ersten Teil werden Informationen über das zu untersuchende Bauteil, den Ort und den Prüfer eingetragen. Ausserdem werden die Einstellungen für den *MicroMag3* und für den Drehgeber überprüft und ggf. angepasst. Sind alle Informationen eingegeben und die Parameter eingestellt, wird das Programm gestartet. Nach dem Anlegen einer Datei mit einem Dateinamen, der aus den eingegebenen Informationen generiert wurde, erfolgt

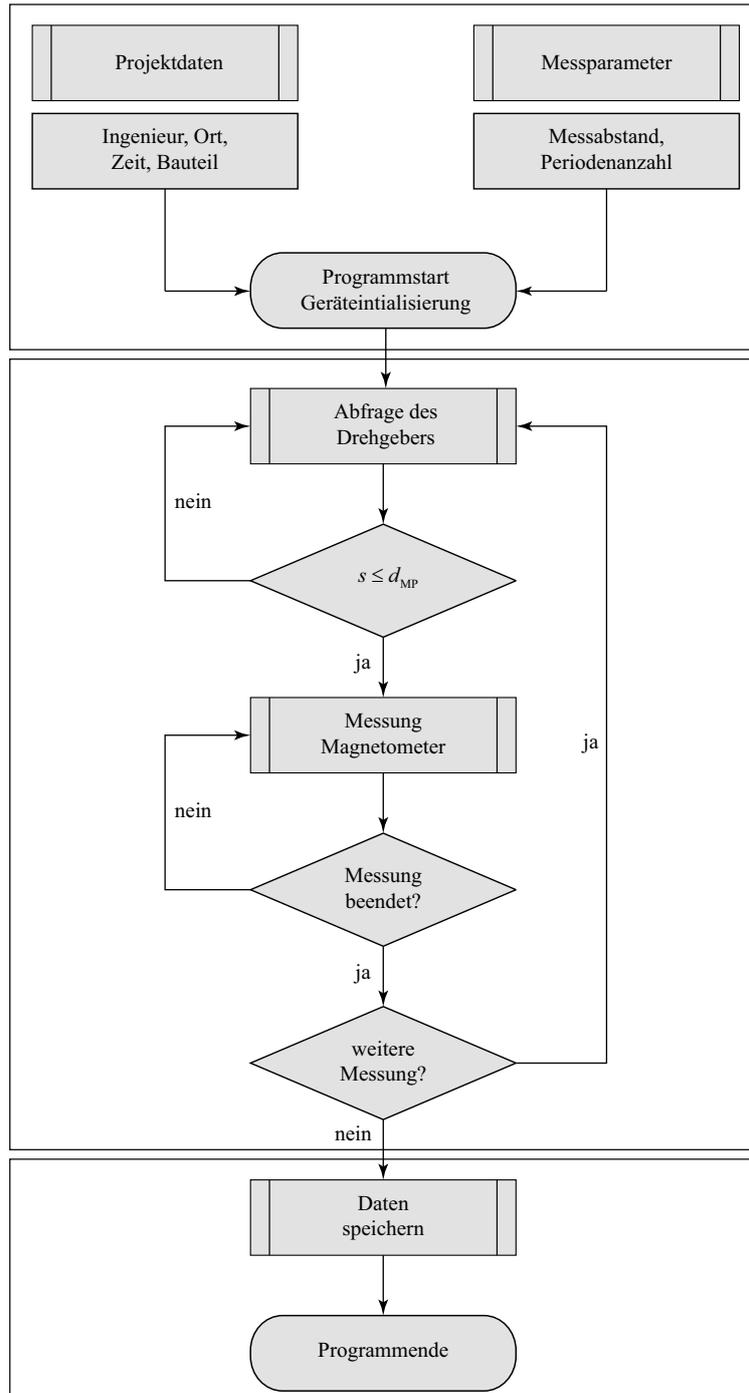


Bild 2.22 Ablaufdiagramm der Datenerfassung in **LabVIEW**.

die Initialisierung des Magnetometers. Das Programm wechselt anschliessend in eine Logik-Schleife, die solange durchlaufen wird, bis der Anwender diese beendet. Innerhalb der Schleife, wird der Drehgeber kontinuierlich ausgelesen und die aktuelle Position erfasst. Zeitgleich wird überprüft, ob der zuvor eingegebene Messabstand bereits erreicht wurde. Ist dies der Fall, wird eine Messung mit dem *MicroMag3* ausgelöst. Andernfalls wird die Position solange ausgelesen, bis der zurückgelegte Weg gleich bzw. grösser dem Messabstand ist. Nach Auslösen einer Magnetometer-Messung werden die Spulen, wie bereits beschrieben, der Reihe nach angesteuert, die Messwerte ausgelesen und direkt auf dem Monitor in einem Diagramm dargestellt.

Nach der Beendigung des Programms werden die erfassten Daten neben dem binären auch im ASCII-Format gespeichert. Sämtliche Informationen, welche vor Programmbeginn eingegeben wurden, werden im Kopf der angelegten Datei abgelegt. Die Messwerte sind im ASCII-Format vierspaltig angeordnet, wobei die Messposition in der ersten Spalte, die Messwerte der Axialkomponente in der zweiten, die der Tangentialkomponente in der dritten und die der Radialkomponente in der vierten Spalte zu finden sind.

Der vorgegebene Messabstand dient im hier verwendeten Programm als Richtwert, da dieser Wert nur erreicht werden kann, wenn das Magnetometer genau um den Messabstand verfahren und während der Messung dort gehalten wird. Der Wagen wird jedoch bei der Messung kontinuierlich verfahren, wodurch sich geringfügig abweichende Messpositionen ergeben. Diese werden bei der Auswertung berücksichtigt und korrigiert.

3 Versuche

Dieses Kapitel widmet sich den in diesem Forschungsprojekt durchgeführten Versuchen, die im Aufbau und der Durchführung genauer beschrieben werden. Zunächst werden die Versuche an Einzelstäben bzw. einfachen Bewehrungsanordnungen behandelt und anschliessend auf die Problematik der umgebenden Felder und deren Einflüsse auf die magnetisch sensitiven Messungen eingegangen. Abschliessend wird die Anwendung der magnetischen Streufeldmethode an einem Stahlbetonrahmen geschildert.

3.1 Vorversuche

Die Vorversuche, insbesondere die an den Einzelstäben, dienten der Einarbeitung des Projektbearbeiters in das Forschungsthema. Der Umgang mit dem Permanentmagneten wurde dabei ebenso geübt, wie das Positionieren und Verfahren des Sensors entlang eines Bewehrungsstabes. Weitere Versuche an Einzelstäben, die in diesem Bericht nicht beschrieben werden, dienten einem Abgleich der tatsächlich vorgefundenen Gegebenheiten mit den durch die Theorie des Magnetismus prognostizierten.

3.1.1 Intakter und gebrochener Bewehrungsstab

Das Feststellen des Zustandes eines Bewehrungsstabes ist im einfachsten Fall an einem Einzelstab durchführbar. Dem entsprechend wurden zuerst intakte (ungebrochene), nicht einbetonierte Bewehrungsstäbe untersucht, magnetisiert und deren remanentes Magnetfeld erfasst. In einem zweiten Schritt wurden weitere Bewehrungsstäbe derart präpariert, dass sie mittig mit einer Säge durchtrennt und ebenso magnetisiert sowie deren Magnetfelder erfasst wurden.

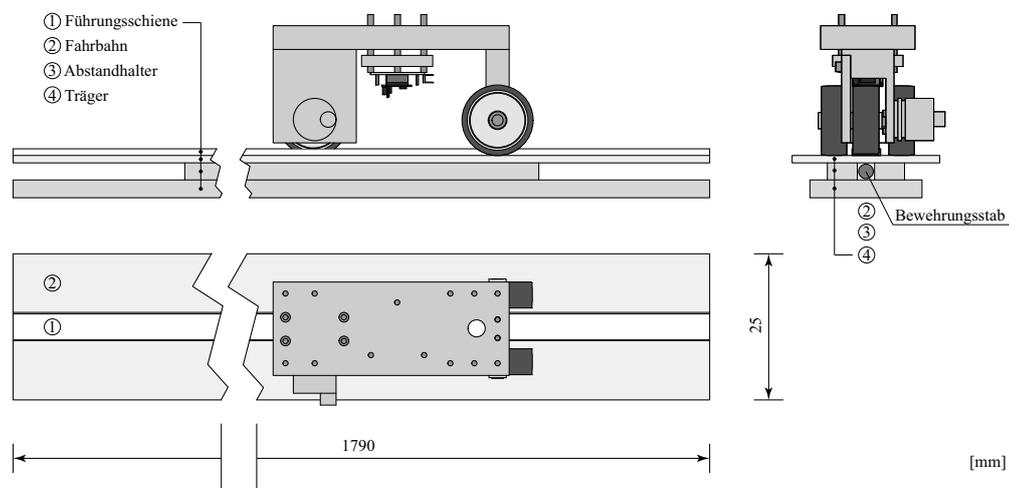


Bild 3.1 Versuchsaufbau für die Untersuchung von Einzelstäben in Draufsicht und Front- sowie Seitenansicht.

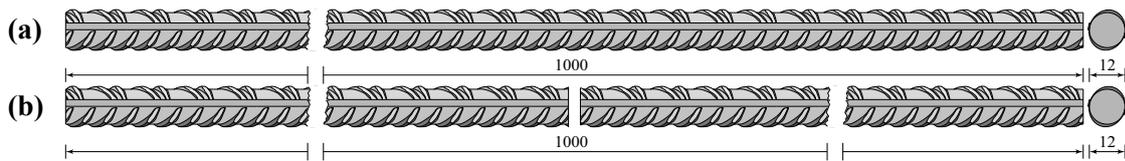


Bild 3.2 (a) Intakter und (b) gebrochener Bewehrungsstab. Abmessungen in mm.

Die Stäbe wurden während der Untersuchung möglichst fern anderer Ferromagnetika und anderer Magnetfeldquellen positioniert, um Einflüsse dieser Felder gering zu halten. Die in Bild 3.1 dargestellte befahrbare Konstruktion ermöglichte das Einlegen intakter wie auch gebrochener Bewehrungsstäbe, ohne diese fix montieren zu müssen. Sie wurde auf rund 80 cm hohen Holzböcken abgelegt. Die Fahrbahn aus Plexiglas, auf der die Führungsschiene angebracht ist, kann vom Träger bzw. den Abstandhaltern abgenommen werden. Der Bewehrungsstab wird zwischen den Abstandhaltern eingelegt, bei kleineren Durchmessern bedarfsweise zusätzlich geklemmt und die Fahrbahn anschliessend wieder aufgelegt. Die Parallelstellung von Bewehrungsstab und Führungsschiene des Vorderrades ist durch Bohrungen und eingelassene Schrauben gegeben, die die Fahrbahn stets in derselben Position halten und ein Verrutschen verhindern.

Die intakten Bewehrungsstäbe (vgl. Bild 3.2 (a)) variierten im Durchmesser zwischen 3 und 14 mm und wurden auf eine Länge von $l = 1$ m zugeschnitten. Neben den Informationen über die Feldstärkeverteilung entlang des Bewehrungsstabes kann so auch die Abhängigkeit der Feldstärke vom Durchmesser abgelesen werden. Bei den gebrochenen Einzelstäben (vgl. Bild 3.2 (b)) variiert der Durchmesser zwischen 6 und 12 mm. Der Bruch wurde künstlich hergestellt, indem der Bewehrungsstab mit einer elektrischen Eisensäge in Stabmitte durchtrennt wurde.

Dem in Kapitel 2.3.1 beschriebenen Prozedere entsprechend wurden die Bewehrungsstäbe magnetisiert, deren Magnetfelder mit Hilfe des *MicroMag3* komponentenweise erfasst und zur weiteren Auswertung auf dem PC gespeichert.

3.1.2 Bewehrungslayouts

In Stahlbetonbauteilen kommen Einzelstäbe selten vor, so dass die Notwendigkeit einer Untersuchung von Bewehrungsanordnungen bestand. Begleitend zum Grossversuch, der in Kapitel 3.3 näher erläutert wird, wurde die dortige Bewehrungsanordnung nachgebaut. Zu diesem Zweck wurde ein Rahmen aus Holz gefertigt, wie er in Bild 3.3 zu sehen ist. Dieser wird an eingearbeiteten Aussparungen (siehe Bild 3.4) lediglich ineinander gesteckt. Die insgesamt sechs Holme weisen Nuten auf, in die die Bewehrungsstäbe eingelegt, stets genau positioniert und zudem beliebig ausgetauscht werden können, da sie nicht fix miteinander verbunden werden müssen. Neben 25 Stäben in der unteren Lage können noch sieben Bewehrungsstäbe in der oberen Lage eingelegt und so die Bewehrungsverhältnisse innerhalb eines realen Bauteils nachgebildet werden.

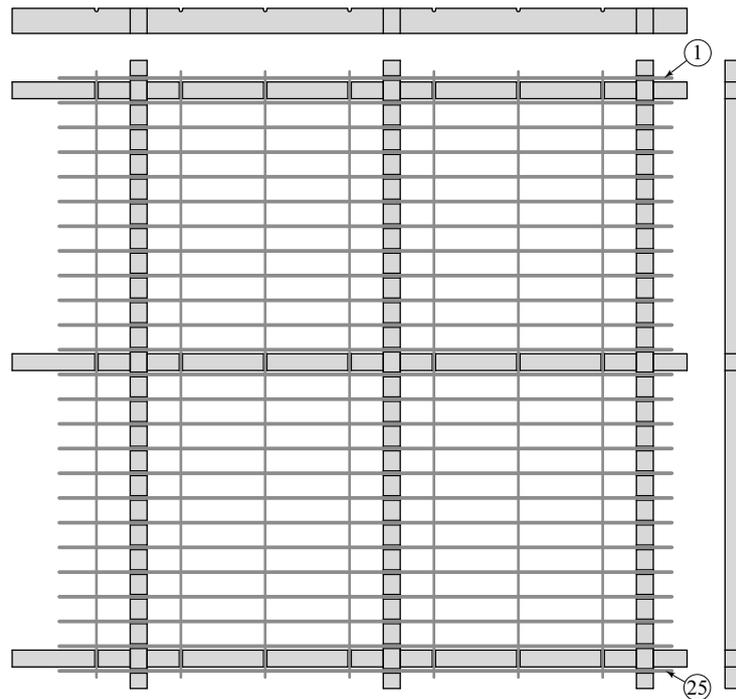


Bild 3.3 Holzrahmen zur Aufnahme und Positionierung von Bewehrungsstäben.

Die Bewehrungsstäbe hatten in der oberen Lage einen Durchmesser von $\varnothing = 8$ mm und in der unteren Lage einen von $\varnothing = 10$ mm. In der oberen Lage waren sämtliche Bewehrungsstäbe intakt, wohingegen die der unteren Lage zum Teil durchtrennt bzw. mit einer Nut versehen waren. Genauere Informationen darüber können dem Bild 3.5 entnommen werden. Stab (a) wurde an Position 4, Stab (b) an Position 8 und Stab (c) an Position 12 eingelegt. Der Stab (d) wurde zweimal hergestellt und an den Positionen 22 und 25 eingelegt. Die Stäbe der oberen Lage waren an beiden Enden und die der unteren Lage nur an einem Ende abgebogen. Den oberen Abschluss bildete eine aufgelegte Plexiglasscheibe mit einer Stärke von $t = 8$ mm.

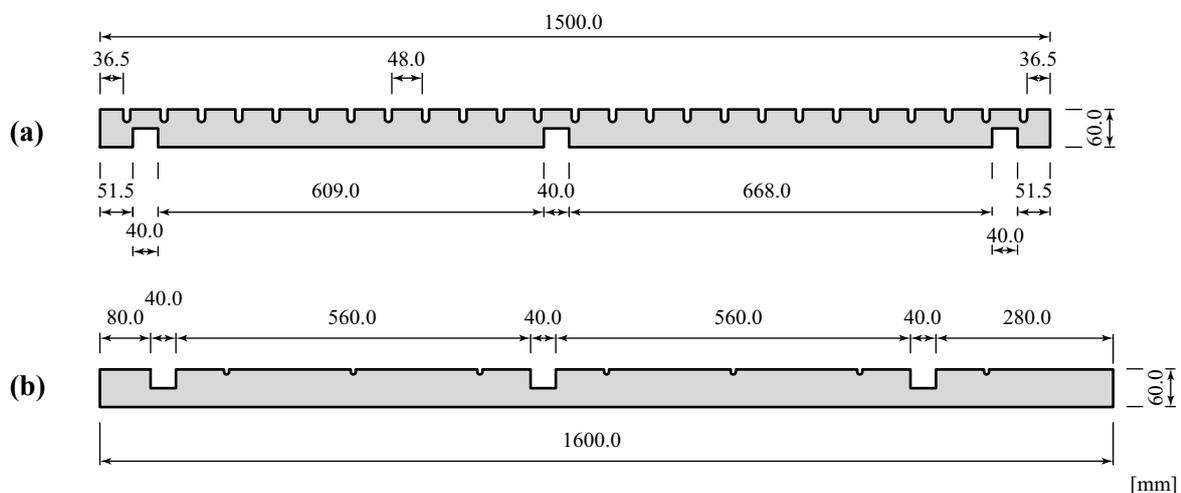


Bild 3.4 Ansicht der Holme für die Aufnahme (a) der unteren und (b) der oberen Bewehrungslage.

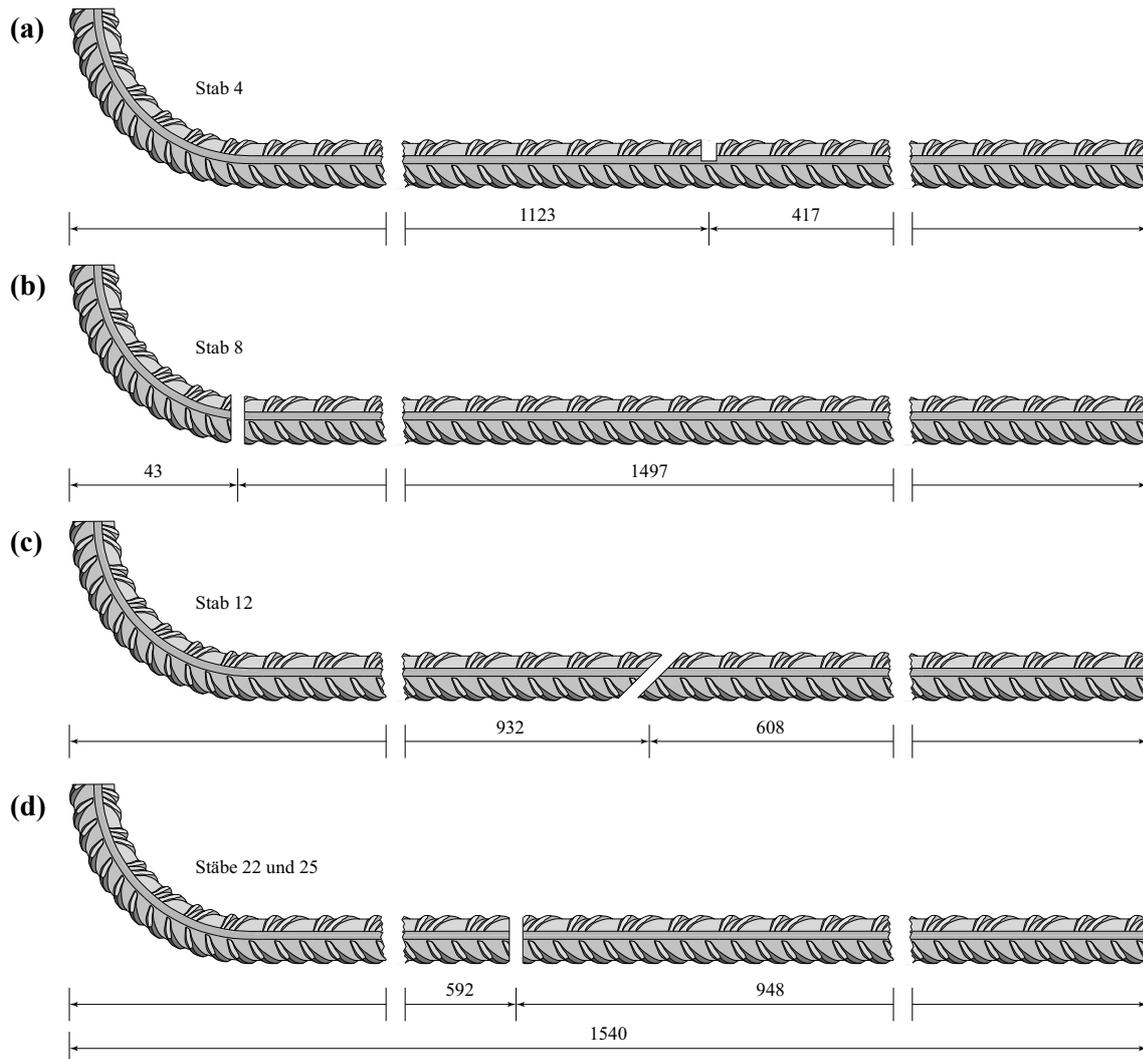


Bild 3.5 Bewehrungsstab (a) mit eingearbeiteter Nut; (b) mit Bruch direkt an der Abbiegung; (c) mit zur Längsachse schräggestellten Bruchflächen; (d) mit senkrecht zur Längsachse stehenden Bruchflächen. Abmessungen in mm.

Während des Versuchs wurden mehrere Messserien durchgeführt, bei denen einerseits mit eingelegerter und andererseits ohne eingelegte, obere Bewehrungslage gemessen wurde. Darüber hinaus wurden die Messungen derart variiert, dass die Plexiglasscheibe zum einen direkt auf den Holzrahmen gelegt und zum anderen Abstandhalter aus Holz zwischen Rahmen und Scheibe gestellt wurden. Für die Magnetisierung kam der bereits auf einen Abstandhalter montierte Permanentmagnet zur Anwendung, der über die Plexiglasscheibe verfahren wurde. Die Erfassung des Magnetfeldes erfolgte mit dem Messwagen. Die im vorigen Kapitel beschriebene Fahrbahn wurde hierzu auf die Plexiglasscheibe gelegt, darauf ausgerichtet und anschliessend eine Messfahrt durchgeführt.

Mit den genannten Versuchsanordnungen ergeben sich gesamthaft vier Messserien, die wiederum aus zwei Messdurchläufen bestanden. Der erste Messdurchlauf stellt die Nullmessung dar, bei der alle Bewehrungsstäbe intakt waren. Anschliessend wurden die Stäbe an den zuvor genannten Positionen gegen die geschädigten Stäbe ausgetauscht und der zweite Messdurchlauf durchgeführt. Mit dem Tausch der Bewehrungsstäbe, bzw. den zuvor genannten Variationen in der Versuchsdurchführung, kann der Unterschied des Magnetfeldes an der Bruchstelle eruiert und der Einfluss der Querbewehrung sowie des unterschiedlichen Messabstandes bestimmt werden.

3.1.3 Gegenüberstellung von Ermüdungs- und Verformungsbrüchen

In Vorbereitung auf den Hauptversuch, der in Kapitel 3.3 beschrieben wird, wurden Ermüdungs- und Verformungsbrüche untersucht, um im Voraus eine Aussage darüber anstellen zu können, ob beide Brucharten mit der hiesigen Methode detektiert werden können.

Neben sechs Bewehrungsstäben für die Zugversuche wurden weitere sechs Stäbe für die Ermüdungsversuche vorbereitet. Alle Stäbe wurden auf eine Länge von $l = 2.64$ m zugeschnitten, welche sich aus der maximal einspannbaren Länge der verwendeten Universalprüfmaschine ergab. Für die Ermüdungsversuche wurden die Stabenden der sechs Bewehrungsstäbe in je 20 mm lange Metallhülsen eingeklebt, um die aus den Klemmbacken der Prüfmaschine aufgebrachte Kraft besser über den Umfang des Stabes zu verteilen und die Kerbwirkung an der Einspannstelle zu minimieren. Nach drei erfolgreich gebrochenen Bewehrungsstäben wurde die Testserie gestoppt, so dass Tabelle 3.1 lediglich die Messwerte dreier Ermüdungstests zeigt.

Für die Zugversuche wurden die Bewehrungsstäbe ohne Hülsen eingespannt und verformungsgesteuert bis zum Bruch belastet, wobei die Zugkraft und der Kolbenweg der Prüfmaschine gemessen wurden. Bis zum Erreichen der Fließgrenze betrug der Zugspannungszuwachs $7.35 \text{ N}/(\text{mm}^2 \cdot \text{s})$, der nach einer nicht genauer spezifizierten Zeitspanne verzehnfacht und bis zum Bruch beibehalten wurde. Diese Versuchsserie wurde ebenfalls nach drei erfolgreichen Brüchen beendet.

Nachdem beide Versuchsserien abgeschlossen waren, wurden die Bruchflächen der sechs Bewehrungsstäbe einerseits frontal und andererseits von der Seite fotografiert. Bei den seitlichen Aufnahmen wurde jeder Bewehrungsstab mit seinen Bruchflächen so zusammengelegt, dass der Abstand zwischen den Bruchflächen minimal war.

3.2 Umgebungsfelder

Das Magnetfeld der Erde bzw. auch Felder anderer Herkunft, wie z. B. stromführende Leiter oder permanent magnetisiertes Material, können die durchzuführenden, magnetisch sensiblen Messungen beeinflussen oder gar behindern. Zur Feststellung des Einflusses anderer als bei der Messung erwünschter Magnetfelder wurde ein Versuch durchgeführt. Dieser diente der Erfassung des sowohl stets vorhandenen umgebenden Magnetfeldes selbst, wie auch des aus der Superposition von Umgebungs- und Bewehrungsstabfeld hervorgehenden Magnetfeldes. Basierend auf der Tatsache, dass Magnetfelder dem Superpositionsprinzip gehorchen, kann darüber hinaus durch Subtraktion der Magnetfelder das verbleibende Magnetfeld des Bewehrungsstabes bestimmt werden.

	Stab 1	Stab 2	Stab 3
\varnothing_{eff} [mm]	9.46	9.45	9.48
F_{inf} [kN]	4.22	4.21	2.80
F_{sup} [kN]	21.78	21.75	27.60
$\Delta\sigma_s$ [N/mm ²]	250	250	315
Zyklen [-]	407'895	160'927	385'019

Tab. 3.1 Messwerte der Ermüdungsversuche.

3.2.1 Versuchsaufbau

Zur Erfassung des Magnetfeldes in einer zum Boden parallelen Ebene wurde ein Versuchsstand errichtet, wie er in Bild 3.6 zu sehen ist. Der Versuchsstand setzt sich im Wesentlichen aus einer aus Holz bestehenden Bodenplatte und zwei Abstandhaltern zusammen. Die unteren Abstandhalter waren dabei ebenfalls aus Holz und die oberen aus Stein. Die Fahrbahn wurde auf die oberen Abstandhalter gelegt und dort, wie zuvor schon die Abstandhalter auf der Bodenplatte, zentriert.

Vor dem Aufbau des Versuchsstandes wurden am Boden Markierungen angebracht, die einerseits den Mittelpunkt des Aufbaus kennzeichneten und andererseits einen gedachten Vollkreis in 30°-Abschnitte unterteilten. Diese Einteilung wurde gewählt, weil sie die Magnetfeldverteilung in der Ebene noch gut zu veranschaulichen vermag und darüber hinaus eine feinere Teilung zwar eine höhere Auflösung aber qualitativ keinen zusätzlichen Informationsgehalt mit sich gebracht hätte.

3.2.2 Versuchsdurchführung

Bei der Bestimmung der Magnetfelder von Bewehrungsstäben, wurden sowohl ein intakter wie auch ein gebrochener Bewehrungsstab untersucht. Somit waren drei Messdurchläufe pro gewählter Ebenenrichtung notwendig. Zunächst wurde ohne Bewehrungsstab, dann am intakten und abschliessend am in der Mitte gebrochenen Bewehrungsstab gemessen, wobei die beiden Bewehrungsstäbe jeweils eine Gesamtlänge von $l = 1'000 \text{ mm}$ hatten. Hierbei wurde der gebrochene Stab mit einem durchtrennten Bewehrungsstab nachgestellt. Jeder Messdurchlauf wurde zur Bestätigung der Reproduzierbarkeit der Messresultate drei Mal wiederholt.

Mit Versuchsbeginn wurde der Versuchsaufbau so ausgerichtet, dass die Längsachse der Fahrbahn zur 0°-Markierung am Boden parallel stand. Der Messwagen wurde dann auf die Fahrbahn gestellt, wobei er immer nur in eine Richtung der Fahrbahn verfahren wurde. Die Messung begann jedes Mal an dem Ende der Fahrbahn, dem die aktuelle Richtungsmarkierung am Boden am nächsten lag. Nach Beendi-

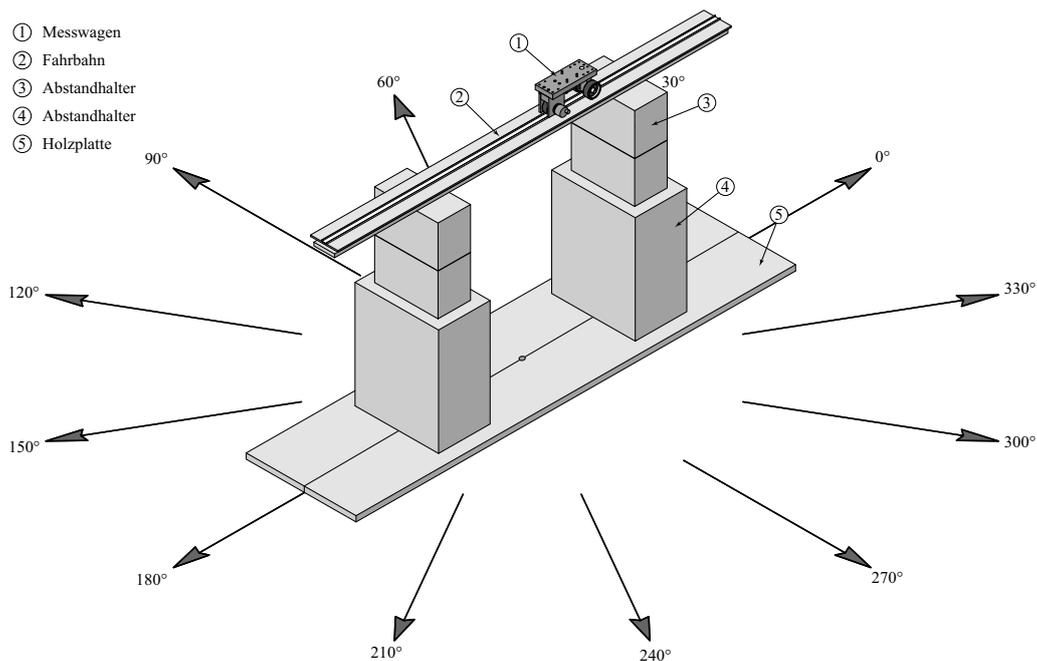


Bild 3.6 Drehbarer Versuchsaufbau.

sen A1, A2 und A3 im Kanton Aargau realisiert wurden, in einer Datenbank erfasst [14]. Durch Vergleich verschiedener Parameter, wie bspw. Baujahr, Brückentyp und Abmessungen, konnten diejenigen Brücken eruiert werden, die am häufigsten vorkommen und das höchste Alter aufweisen. Von diesen Brücken wurden Mittelwerte der Bauwerksgeometrie wie auch des Bewehrungsgehaltes und der Bewehrungsanordnung bestimmt und anhand dieser Werte ein Versuchskörper erstellt. Im Versuchsstand wurde der Versuchskörper durch ein hydraulisches System, bestehend aus zwei 400 kN Zylindern und einem Pulsator, zyklisch belastet. Die Spannungsdifferenz in der Bewehrung der äusseren Rahmenecken wurde vorderhand auf $\Delta\sigma_s = 220 \text{ N/mm}^2$ festgelegt, womit sie über der Dauerfestigkeit des verwendeten Stahls lag. Daraus resultierte eine Belastungsdifferenz von $\Delta F = 100 \text{ kN}$.

3.3.1 Versuchsaufbau

Der zu untersuchende Stahlbetonrahmen ist in Bild 3.7 schematisch dargestellt. Er hatte eine Länge von $l = 3.85 \text{ m}$, eine Breite von $b = 1.50 \text{ m}$ und eine Höhe von $h = 2.50 \text{ m}$. Die Bewehrungsüberdeckung für die zu untersuchenden Bewehrungsstäbe betrug $c_{nom} = 15 \text{ mm}$. Über die Breite des Versuchskörpers waren in Längsrichtung 25 Bewehrungsstäbe angeordnet. In den beiden äusseren Rahmenecken sind je ein horizontal und ein vertikal gerichtetes Messfeld abgegrenzt worden, in denen Messungen mit der magnetischen Streufeldmethode durchgeführt worden sind. Die horizontalen Messfelder hatten je eine Länge von $l = 50 \text{ cm}$ und die vertikalen je eine Länge von $l = 70 \text{ cm}$.

Obwohl die Soll-Lage der Bewehrungsstäbe bereits aus Plänen bekannt war, mussten diese aufgrund von Fertigungsungenauigkeiten während der Herstellung des Stahlbetonrahmens nochmals einzeln genau lokalisiert werden. Mit einem Permanentmagneten wurde dazu die Lage jedes Stabes erfasst und durch Bleistiftlinien an der Bauteiloberfläche kenntlich gemacht.

Für die Reproduzierbarkeit der Messfahrten wurde eine Führungsschiene benutzt, die mit Hilfe von Klettbindern am Stahlbetonrahmen sowohl in horizontaler als auch vertikaler Richtung angebracht werden konnte. Die Positionierung der Führungsschiene erfolgte über darin vorhandene Löcher, die zur Deckung mit den Bleistiftlinien gebracht wurden.

Weiterführende Informationen zum Stahlbetonrahmen können dem Versuchsbericht von *Fehlmann et al.* [13] entnommen werden.

3.3.2 Versuchsdurchführung

Während geplanter Versuchspausen, in denen u.a. Deformetermessungen am Rahmen durchgeführt wurden, konnten die Messungen der magnetischen Streufeldmethode realisiert und der Zustand der Bewehrung in den äusseren Rahmenecken evaluiert werden. Die Messungen wurden nach 0.200, 2.000, 2.311, 2.484, 2.572 und 2.665 Millionen Lastwechseln im Messfeld 300 durchgeführt. Die Messfelder 100, 200 und 400 wurden nur nach 0.200, 2.000, 2.484 und 2.665 Millionen Lastzyklen durchgemessen.

Vor jedem Messdurchgang wurde das betreffende Feld vollständig magnetisiert. Das anfängliche Verfahren, den jeweiligen Stab zu magnetisieren und anschliessend direkt auszumessen, funktionierte nicht, da stets Störsignale der noch nicht magnetisierten Nachbarstäbe erfasst wurden. Daraufhin wurden zunächst alle Bewehrungsstäbe des Messfeldes mit je drei Überfahrten des Permanentmagneten magnetisiert. Dieser wurde, nachdem alle Stäbe drei Überfahrten erfahren hatten, um 180° gedreht, so dass die Pole getauscht waren. Drei weitere Überfahrten folgten, bis die Bewehrungsstäbe eine gleichmässige Magnetisierung aufwiesen (vgl. Bild 3.8).

Der Messwagen wurde daraufhin beim jeweiligen Bewehrungsstab so positioniert, dass die Fahrt von der Rahmenecke beginnend gestartet werden konnte. Die Unterkante des Lagersitzes lag dabei auf der Rahmenkante auf, wobei das Vorderrad Kontakt zur Rahmenkante hatte. Auf diese Weise konnte über alle 25 Bewehrungsstäbe hinweg sichergestellt werden, dass stets derselbe Startpunkt verwendet wurde und die Messungen zueinander nicht parallel verschoben waren. Der Messwagen wurde mit konstanter Geschwindigkeit über die Bauteiloberfläche verfahren und nach Erreichen der Messfeldgrenze wurde die Messung gestoppt. Pro Messfeld und Messdurchgang wurden alle Bewehrungsstäbe einmal durchgemessen. Der bzw. die mittleren Stäbe eines Messfeldes konnten teilweise nicht durchgemessen werden, da dort an der Bauteiloberfläche induktive Wegaufnehmer fest montiert waren.

Während des Ermüdungsversuchs erfolgten insgesamt sieben Messdurchgänge, die vollständig nur im Messfeld 300 durchgeführt wurden. Grosse Risse im Beton wurden als Anzeichen für eine hohe Spannungskonzentration im Betonstahl gewertet, die wiederum ermüdungsrelevante Folgen haben kann. Die Felder 100, 200 und 400 wurden nur vier Mal durchgemessen, da bei diesen Feldern keine grossen Risse im Beton verzeichnet werden konnten, was bei Feld 300 hingegen der Fall war. Eine detaillierte Zusammenstellung aller Messdurchgänge und der erfassten Bewehrungsstäbe pro Messfeld enthält Tabelle 3.2.

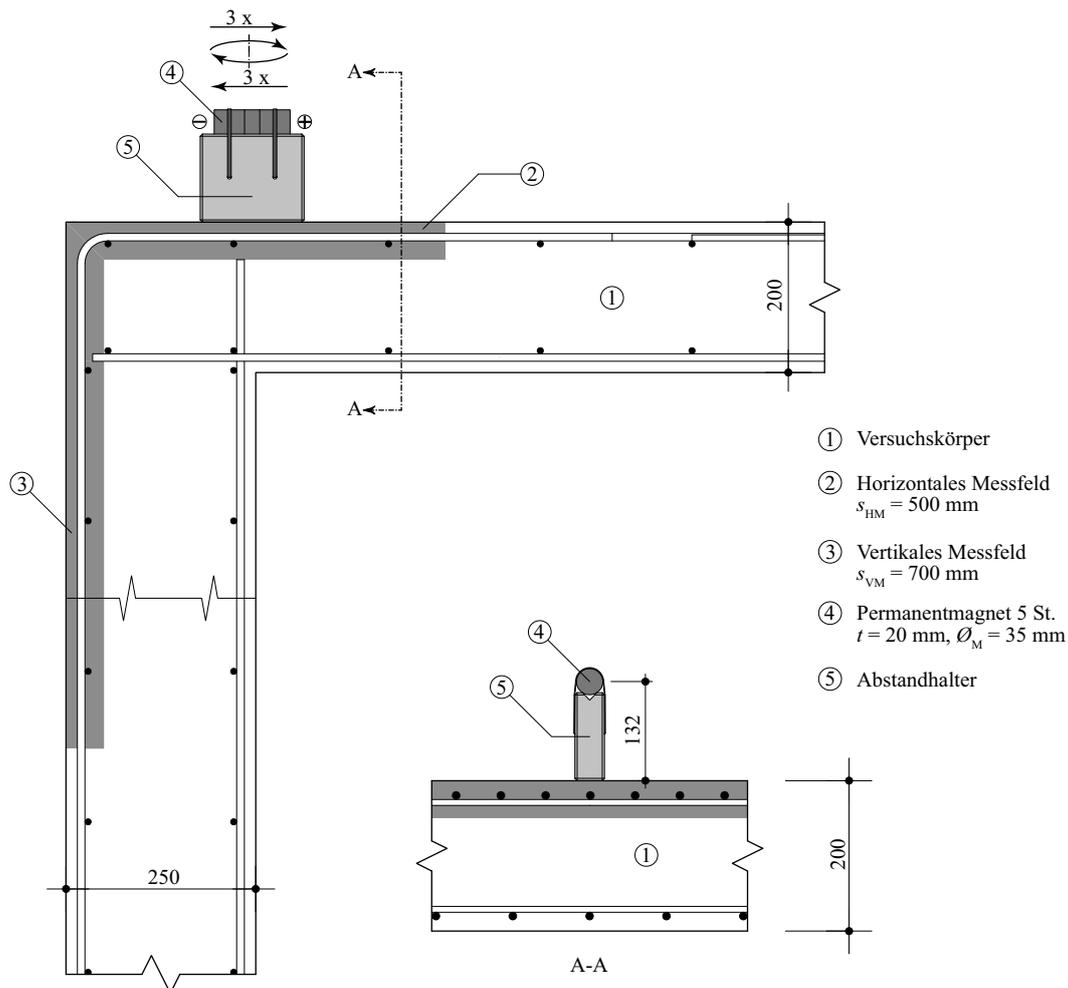


Bild 3.8 Schnitt einer Rahmenecke mit eingezeichneten Messfeldern (grau) und Permanentmagnet.

Lastzyklen	Messfelder			
	100	200	300	400
200'000	100:110 113:124	200:210 213:224	300:311 314:324	400:410 413:424
2'000'000	100:110 113:124	200:210 213:224	300:310 314:324	400:411 413:424
2'311'000	-	-	300:311 314:324	-
2'484'000	100:110 113:124	200:210 213:224	300:311 314:324	400:410 413:424
2'541'000	-	-	300:311 314:324	-
2'572'000	-	-	300:311 314:324	-
2'665'000	100:110 113:124	200:210 213:224	300:311 314:324	400:410 413:424

Tab. 3.2 Messdurchgänge an den einzelnen Messfeldern.

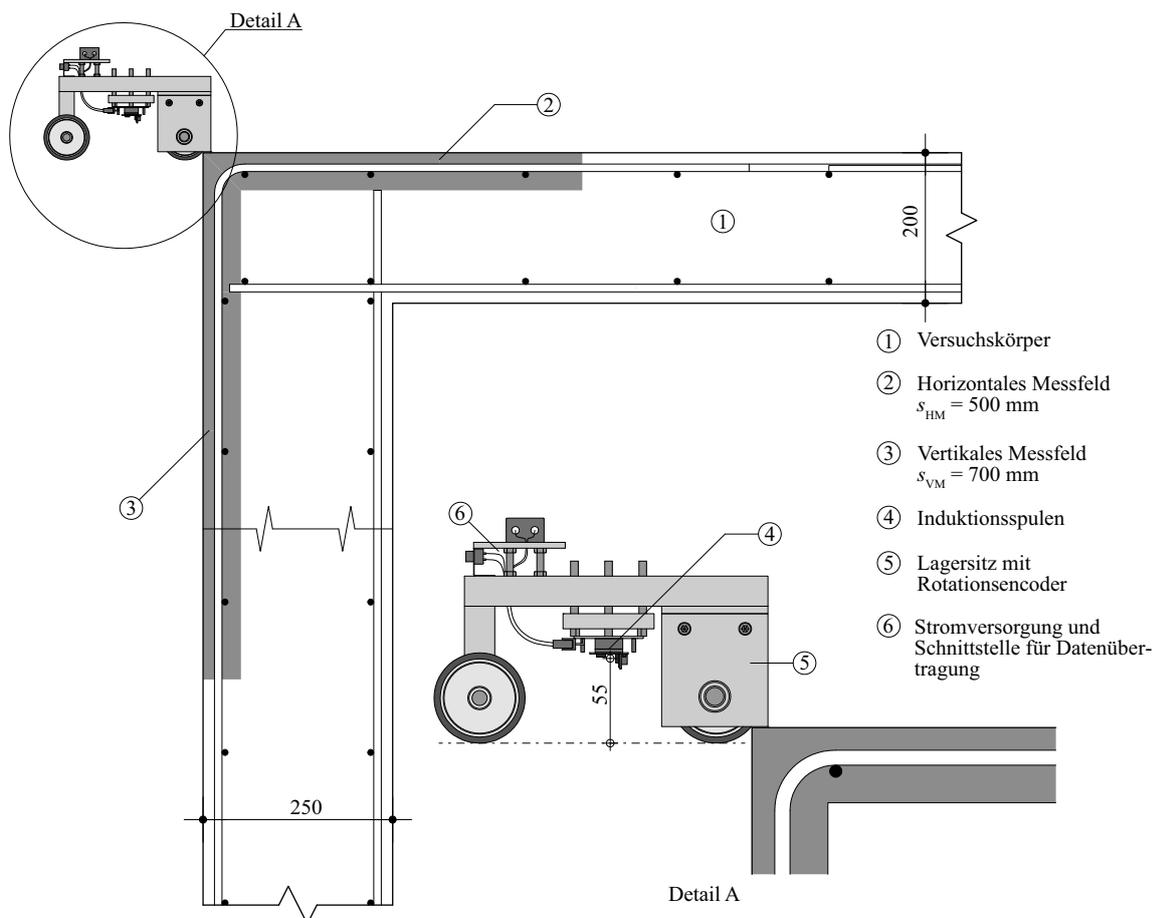


Bild 3.9 Schnitt einer Rahmenecke mit eingezeichneten Messfeldern (grau) und Messwagen mit Positionierung zu Messbeginn.

3.3.3 Versuchsabschluss

Die Steifigkeit des Versuchskörpers nahm zum Ende des Versuchs stark ab, wodurch die vorgegebene Lastamplitude von 95 kN mit der verwendeten Technik nicht mehr aufrecht erhalten werden konnte. Die letzte Messung mit der magnetischen Streufeldmethode wurde nach Erreichen von 2.665 Millionen Lastzyklen durchgeführt.

Nachdem zum Schluss noch ein statischer Versuch zur Bestimmung der Resttragfähigkeit des Rahmens durchgeführt worden war, wurde die Bewehrungsüberdeckung mit Pressluftschlämmern weggespitzt (vgl. *Fehlmann et al.* [13]). Die tatsächlich eingetretenen Brüche der Bewehrungsstäbe wurden mit genauer Positionsangabe und der Angabe über die Art des Bruches protokollarisch festgehalten.

4 Versuchsresultate

Die Resultate der in Kapitel 3 vorgestellten Versuche werden in diesem Kapitel vorwiegend graphisch in Form von Diagrammen präsentiert. Hierbei werden nur die Daten hinterlegt, die einen Versuch am besten repräsentieren. Eine Beurteilung der Versuchsergebnisse folgt anschliessend in Kapitel 5.

4.1 Vorversuche

Die Vorversuche umfassen eine Reihe von Einzelversuchen, von denen nur einige detaillierter besprochen werden. Die abgebildeten Resultate stellen deshalb nur eine Auswahl der wichtigsten Versuche dar.

4.1.1 Versuch zum Abstandsverhalten

In einem dieser Versuche wurde der Einfluss des Abstandes zwischen Bewehrungsstab und *MicroMag3* überprüft. Hierzu wurden intakte Bewehrungsstäbe mit den Durchmessern 6, 8, 10 und 12 mm getestet (siehe Bild 4.1) und in Bild 4.2 exemplarisch die Ergebnisse für den Bewehrungsstab mit $\varnothing = 6$ mm dargestellt. Die Messreihen sind vollständig in Anhang D zu finden. Die insgesamt zehn Messungen pro Durchmesser unterscheiden sich lediglich im Abstand, mit dem der *MicroMag3* über

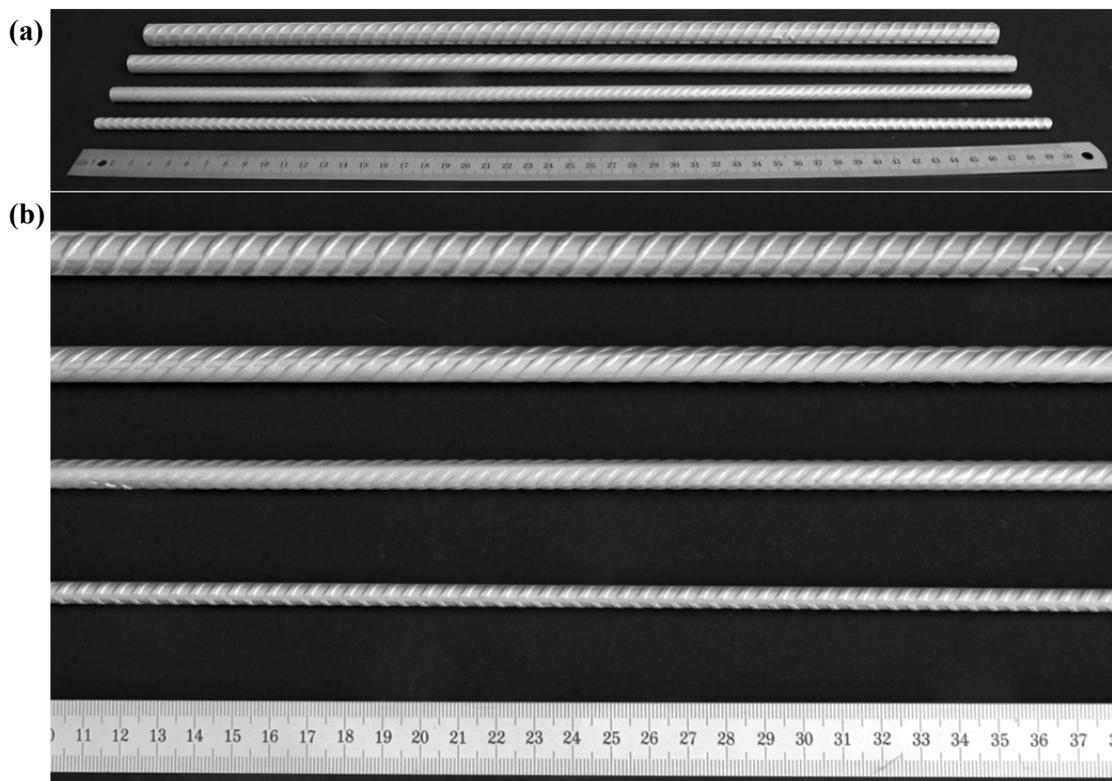


Bild 4.1 Bewehrungsstäbe der Durchmesser 6, 8, 10 und 12 mm in (a) der Ansicht und (b) der Draufsicht.

den Bewehrungsstab geführt wurde. Die angegebenen Abstände sind stets vom Schwerpunkt der Sensoren zur Schwereachse des Bewehrungsstabes gemessen worden.

Die Kurvenverläufe der Diagramme zeigen das aus der Literatur bekannte Abstandsverhalten von $1/r^2$, welches deutlich an den Positionen der lokalen Extremwerte in Erscheinung tritt. An diesen Positionen zeigt sich, dass eine Abnahme des Abstandes in unmittelbarer Nähe zum Bewehrungsstab einen bedeutenderen Einfluss hat, als dies in grösserer Entfernung der Fall ist.

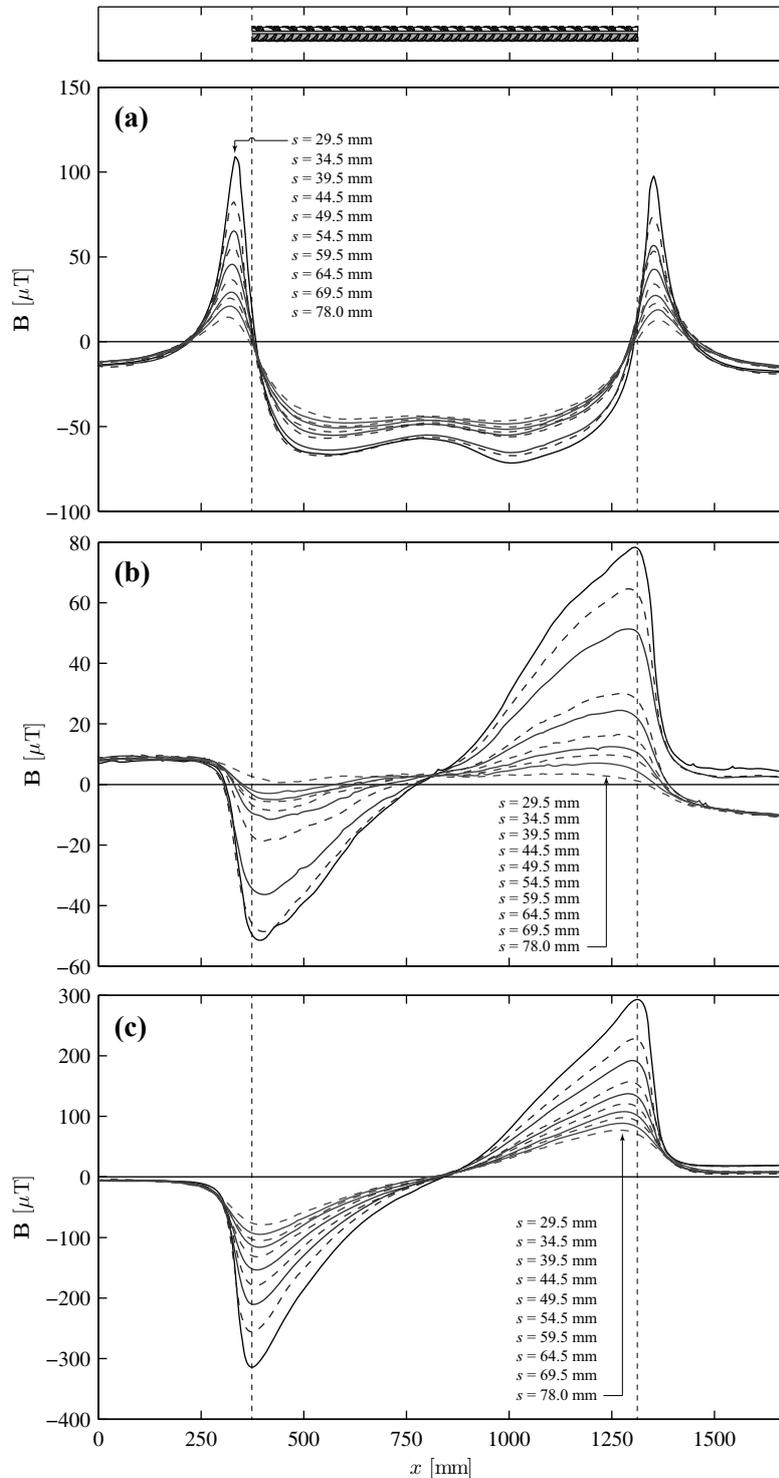


Bild 4.2 Variation des Abstandes zwischen Bewehrungsstab und *MicroMag3* mit (a) der Axial-, (b) der Tangential- und (c) der Radialkomponente.

4.1.2 Versuch zum Bruchflächenabstand

Bei der Detektion von Bewehrungsbrüchen ist neben dem zu berücksichtigenden Abstandsverhalten als weiterer Faktor der Abstand zwischen den Bruchflächen selbst zu beachten. Wie beim vorherigen

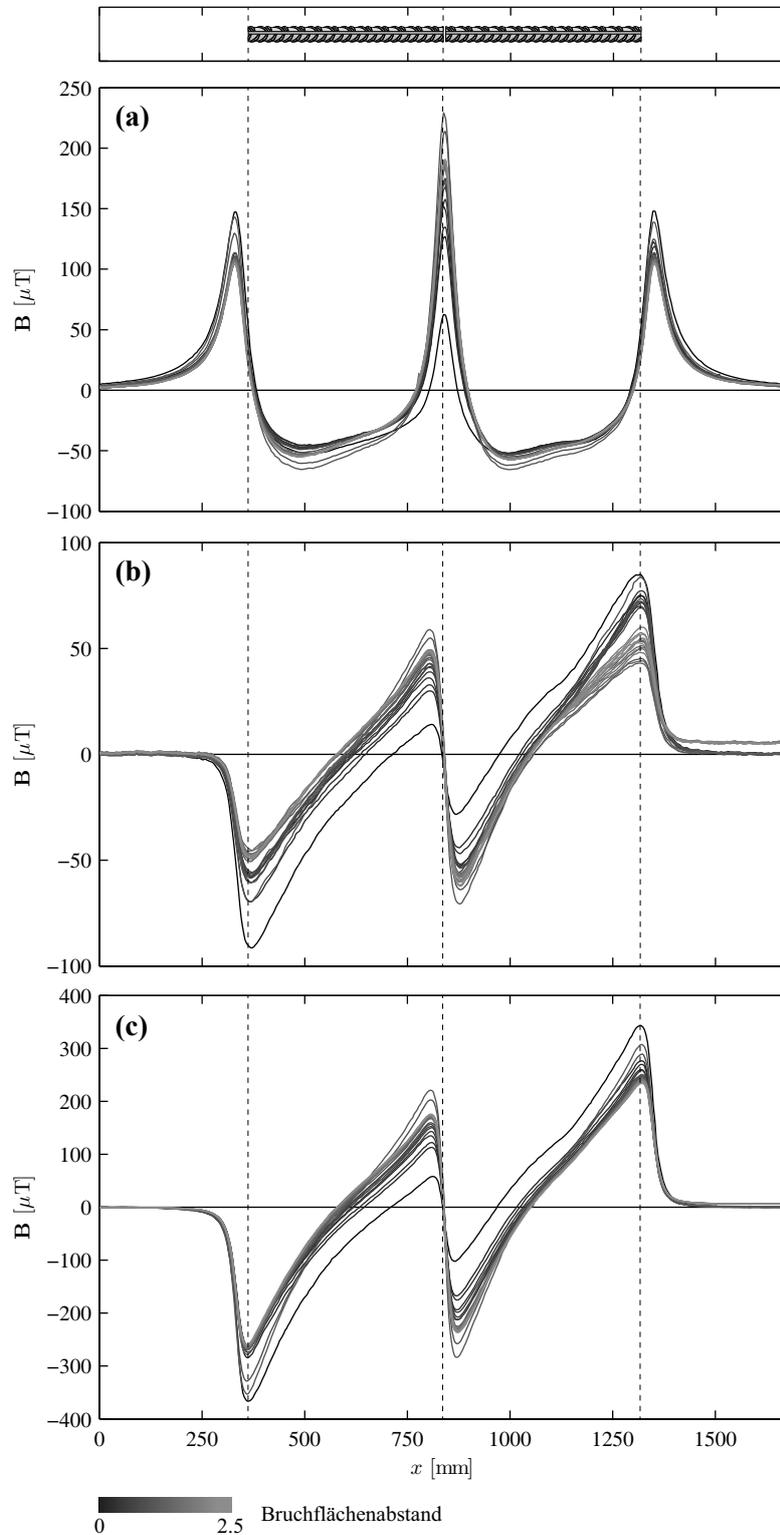


Bild 4.3 Kurvenverläufe für Messungen bei unterschiedlichen Bruchflächenabständen mit (a) der Axial-, (b) der Tangential- und (c) der Radialkomponente.

Versuch wurden auch hier Bewehrungsstäbe mit den Durchmessern 6, 8, 10 und 12 mm untersucht.

Die Brüche wurden durch einfaches Durchtrennen der Bewehrungsstäbe mit einer Trennscheibe erzeugt, womit die Bruchflächen stets senkrecht zur Längsachse des jeweiligen Bewehrungsstabes standen. Die so erzeugten Bruchflächen lagen darüber hinaus parallel zueinander, wodurch vereinfachte und idealisierte Bedingungen geschaffen wurden, die am realen Bauwerk nur selten in dieser Form

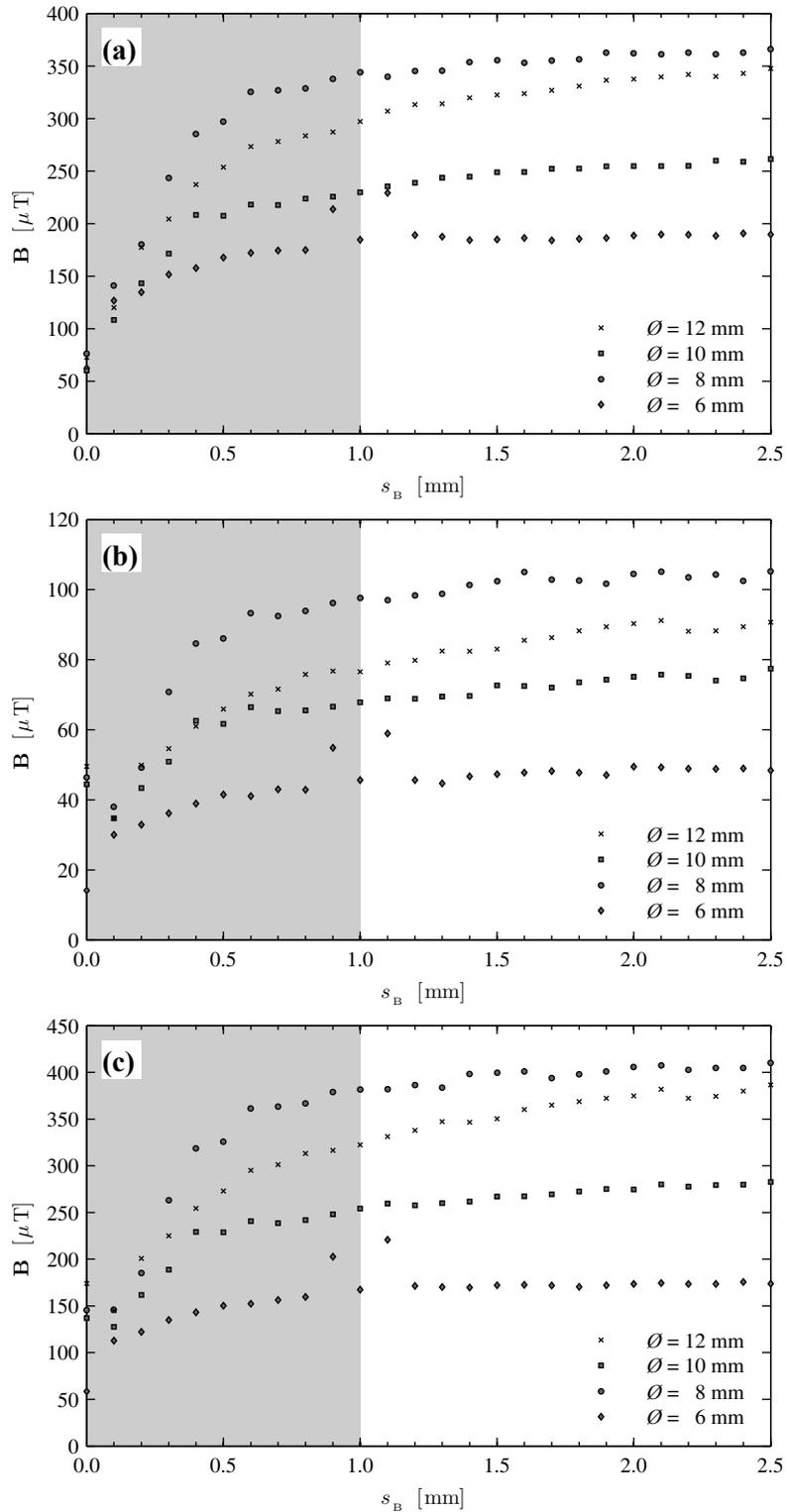


Bild 4.4 Einfluss des Bruchflächenabstandes mit (a) der Axial-, (b) der Tangential- und (c) der Radialkomponente.

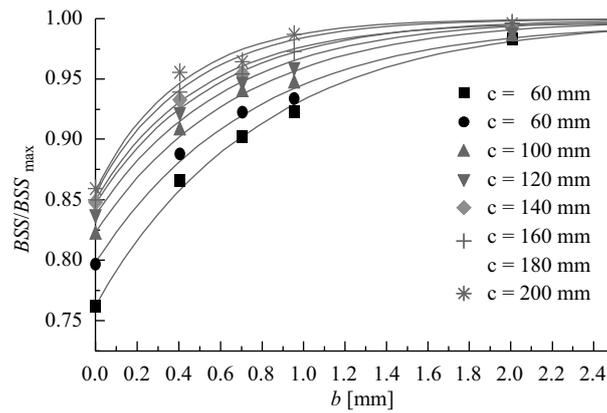


Bild 4.5 Einfluss des Bruchflächenabstandes bei unterschiedlichen Bewehrungsüberdeckungen in normierter Darstellung nach Scheel [46].

auftreten. Eine eingehendere Betrachtung dieser Problematik folgt im Abschnitt über die Zug- und Ermüdungsbrüche.

In Bild 4.3 sind für den Bewehrungsstab mit $\varnothing = 6$ mm die Kurvenverläufe von 26 Messungen dargestellt, bei denen der Abstand der Bruchflächen beginnende bei 0 mm in 0.1 mm Schritten vergrößert wurde. Der Legende entsprechend nimmt die Helligkeit der Grautöne zu je grösser der Abstand zwischen den Bruchflächen ist. Wie bereits Scheel [46] feststellte, sind selbst bei einem nicht mehr feststellbaren Bruchflächenabstand noch Muster eines Bruches in den Kurvenverläufen der Messwerte erkennbar. Die komplette Trennung muss in der Kristallgitterstruktur vorhanden sein, um ein Bruchsignal erfassen zu können.

An der Bruchposition und in deren direkter Umgebung wurden die Kurvenverläufe nach lokalen Extremwerten durchsucht. Bei der Axialkomponente liegt der Extremwert direkt an der Bruchposition, wohingegen bei der Tangential- und Radialkomponente die Extremwerte jeweils seitlich versetzt davon liegen. Die Beträge der Extremwerte wurden herausgeschrieben und je Komponente in ein Diagramm eingezeichnet, wie dies aus den Bildern 4.4 (a)-(c) ersichtlich wird. Pro Diagramm sind die Kurvenverläufe der bereits erwähnten Bewehrungsstäbe mit den Durchmessern von 6 bis 12 mm abgebildet. Die Ursache für die stets grösser ausfallenden Feldstärken in drei Magnetfeldkomponenten des Bewehrungsstabes mit $\varnothing = 8$ mm wird in einer höheren magnetischen Permeabilität des Bewehrungsstabmaterials vermutet. Eine Feststellung der tatsächlichen vorhandenen magnetischen Permeabilitäten der vier untersuchten Bewehrungsstäbe ist nicht erfolgt. In diesem Fall ist eine Betrachtung der relativen magnetischen Feldstärke ausreichend, um die Kurvenverläufe interpretieren zu können.

Für die verschiedenen Bruchflächenabstände ergaben sich die abgebildeten Verläufe, die laut Scheel am ehesten mit Sättigungsfunktionen beschrieben werden können, wie er dies auf ähnliche Weise in seiner Arbeit schon dargestellt hat (siehe Bild 4.5).

Die Messresultate aller Bewehrungsstäbe sind in Anhang E hinterlegt.

4.1.3 Versuch zu Bewehrungsstößen

Der in Bild 4.6 dargestellte Bewehrungsstoss zeigt eine häufig anzutreffende Bewehrungsanordnung, die lediglich in der Länge der Überlappung variiert. In diesem Fall war der Bewehrungsstab in eine

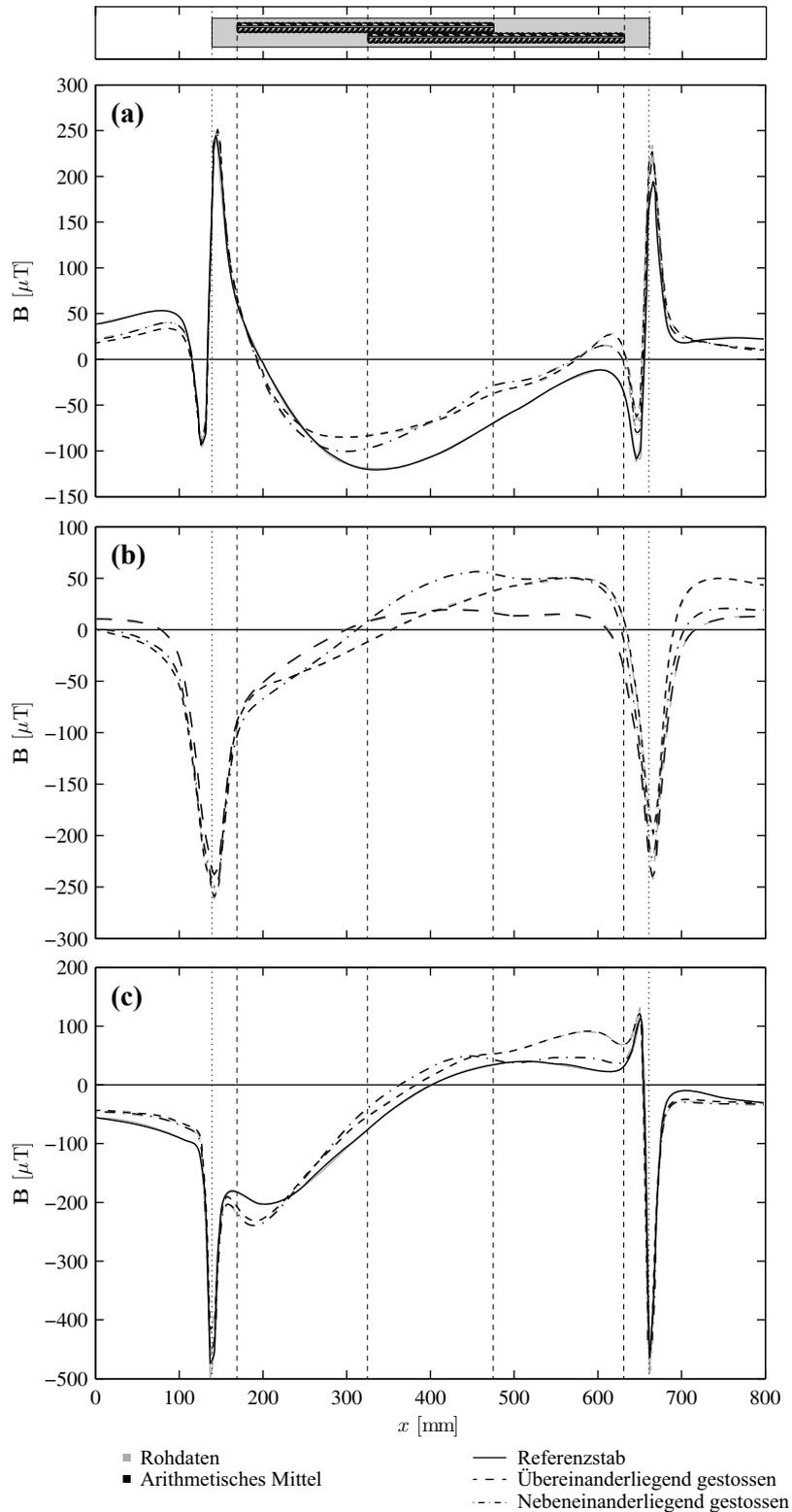


Bild 4.6 Kurvenverläufe aus Messungen an einem gestossenen Bewehrungsstab mit (a) der Axial-, (b) der Tangential- und (c) der Radialkomponente.

Betonplatte einbetoniert, die mit dem grauen Rechteck angedeutet ist. Innerhalb der Diagramme zeigen die grob gestrichelten vertikalen Linien an, welche Position der Bewehrungsanordnung mit welchem Kurvenabschnitt korreliert.

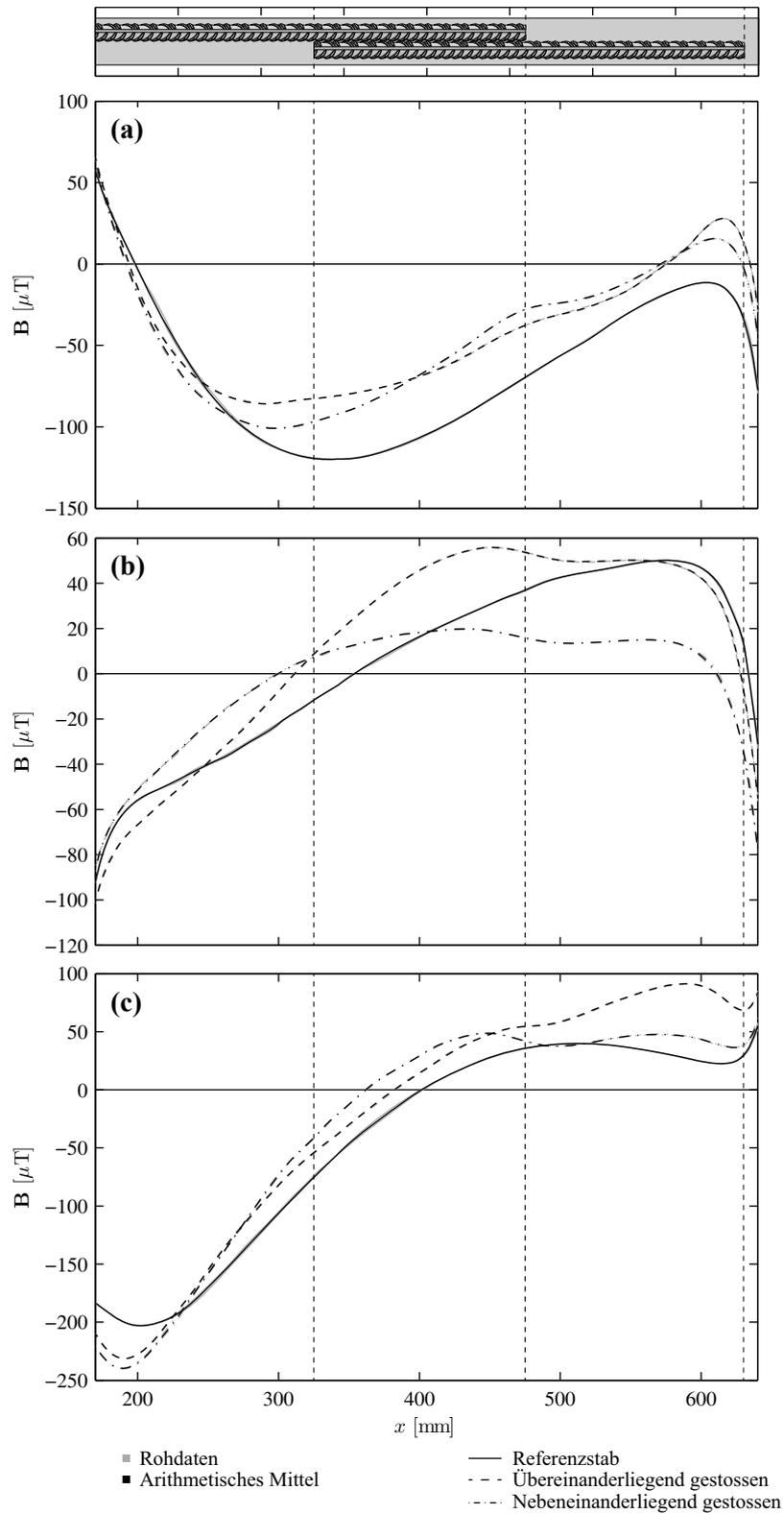


Bild 4.7 Freigestellte Kurvenverläufe aus Messungen an einem gestossenen Bewehrungsstab mit (a) der Axial-, (b) der Tangential- und (c) der Radialkomponente.

Die feiner gestrichelten vertikalen Linien deuten die äusseren Kanten der Stahlbetonplatte an. Bei diesem Versuch erfolgte die Markierung der äusseren Plattenränder teilweise mit kleinen Magneten, welche in die in Bild 3.1 dargestellte Plexiglasfahrbahn eingelassen wurden. Die Kurvenverläufe in Bild 4.6 zeigen deutlich die Signale an den Positionen der Plattenkanten, die aufgrund der Magnetfelder der dort platzierten Magnete grosse Amplituden aufweisen. Für eine genauere Betrachtung der Kurvenverläufe innerhalb der Stahlbetonplatte wurden diese Kurvenverläufe, wie in Bild 4.7 zu sehen ist, freigestellt.

In den Diagrammen sind jeweils die Messung an einem Referenzstab, welcher nicht gestossen war, und die Messungen der beiden gestossenen Varianten – übereinanderliegend und nebeneinanderliegend – dargestellt. Gegenüber dem Referenzstab weisen die Messungen der beiden gestossenen Stäbe erkennbar veränderte Kurvenverläufe im Bereich des Stosses auf. Der übereinanderliegende Stoss zeigt gegenüber dem nebeneinanderliegenden Stoss besser erkennbare Abweichungen zum Referenzstab. Der Sensor wurde in allen Fällen mit rund 30 mm Abstand, also der kleinstmöglichen Distanz zum Bewehrungsstab geführt. Die Signalamplituden fallen im Vergleich zu Versuchen an gebrochenen Bewehrungsstäben (siehe Bild 4.3) bedeutend kleiner aus.

Eine abschliessende Aussage über die Signalmuster von Bewehrungsstössen kann jedoch nur nach einer ausführlichen Parameterstudie und der Durchführung entsprechender Magnetfeldsimulationen gemacht werden.

4.1.4 Versuch zum Stablängeneinfluss

In diesem Abschnitt werden Messungen an intakten wie auch gebrochenen Bewehrungsstäben betrachtet. Die Messungen wurden mit einem Abstand von $s = 29.5 \text{ mm}$ zur Längsachse der Bewehrungsstäbe durchgeführt. Untersucht wurden dabei nur Bewehrungsstäbe des Durchmessers $\varnothing = 6 \text{ mm}$.

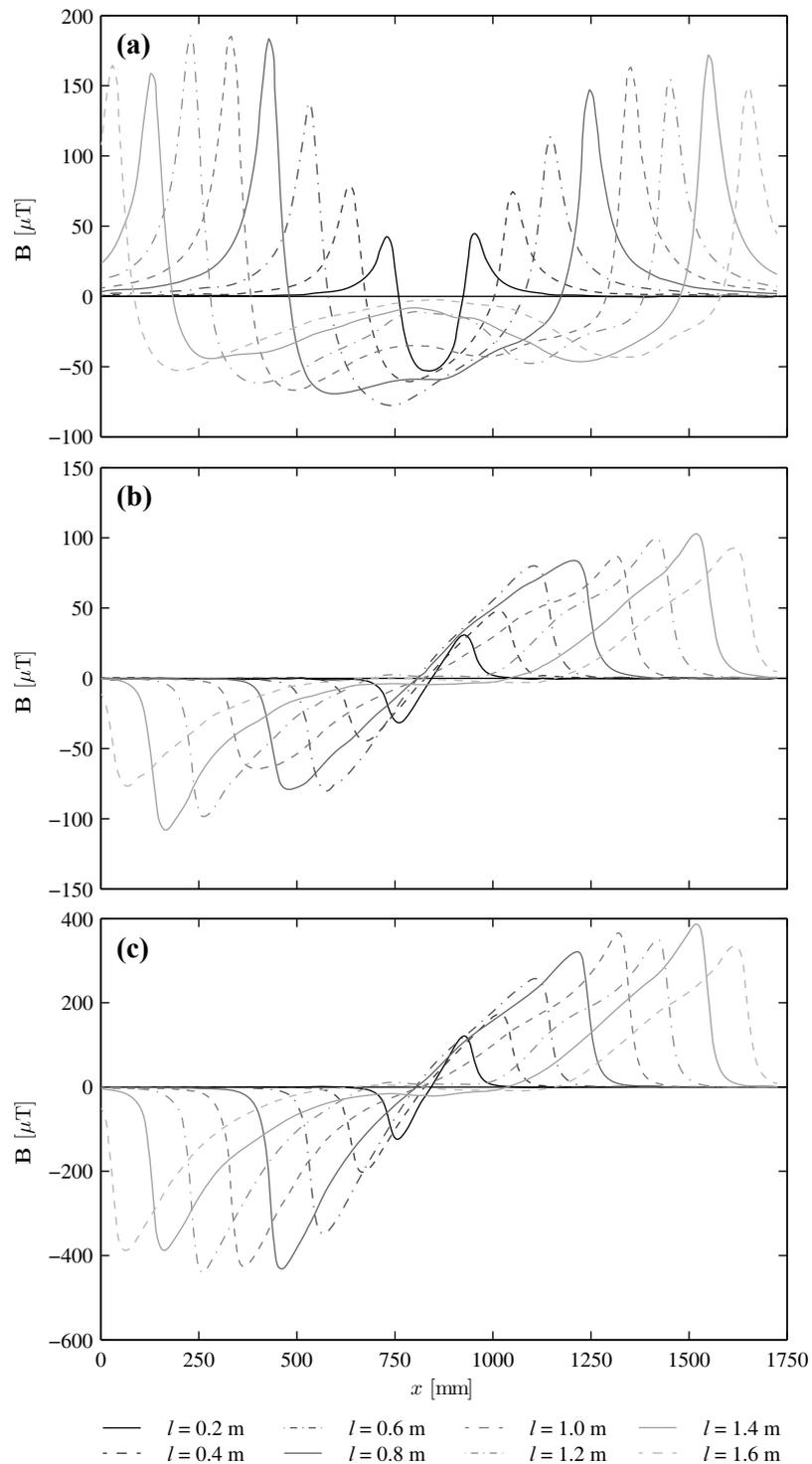


Bild 4.8 Kurvenverläufe der intakten Bewehrungsstäbe variabler Länge für (a) der Axial-, (b) der Tangential- und (c) der Radialkomponente.

Anhand der sich ändernden Stablängen wird aus allen drei Magnetfeldkomponenten ersichtlich, dass mit zunehmender Stablänge einerseits die Stärke des Magnetfeldes an den Stabenden (magnetische Pole) zunimmt und andererseits die Magnetfeldstärke zwischen den Polen gegen Null geht (siehe Bild 4.8 (a)-(c)).

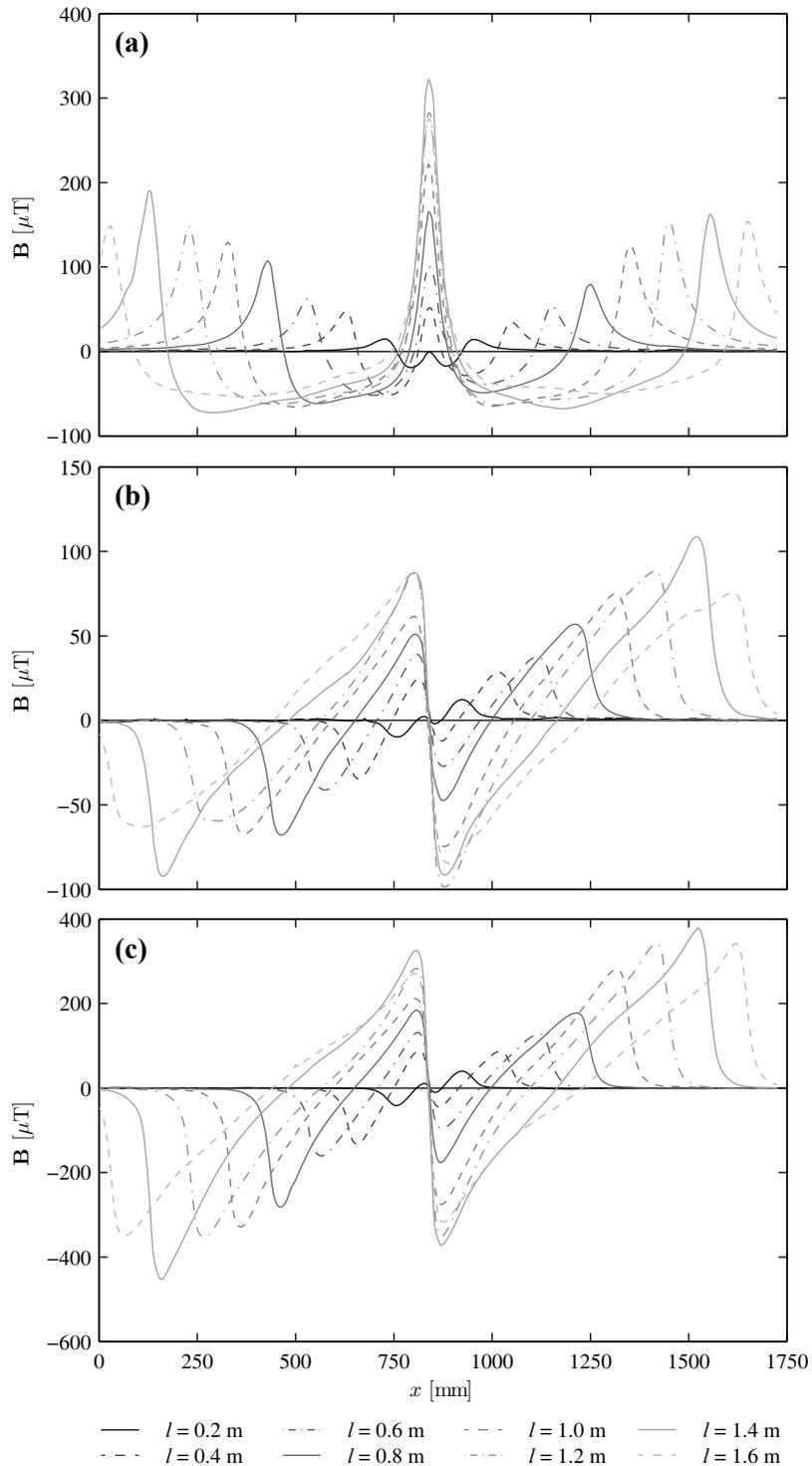


Bild 4.9 Kurvenverläufe der gebrochenen Bewehrungsstäbe variabler Länge für (a) der Axial-, (b) der Tangential- und (c) der Radialkomponente..

Die grössten Amplituden und damit die stärksten Magnetfelder werden in diesem Fall bereits bei einer Stablänge von rund 75 cm erreicht. Das Magnetfeld im Bereich zwischen den Polen, also dem Bereich mit der geringsten Dichte aus der Mantelfläche des Bewehrungsstabes austretender Magnetfeldlinien, geht erst ab rund 1 m Stablänge erkennbar gegen Null. Bei kürzeren Stablängen ist im Vergleich dazu der Einfluss der Pole zu stark.

Bei der Betrachtung der Kurvenverläufe aus den Messungen an den gebrochenen Bewehrungsstäben (siehe Bild 4.9 (a)-(c)) kann ebenfalls erkannt werden, dass ab ca. 75 cm Stablänge die Polstärke nicht mehr zunimmt. Gleiches gilt für das Bruchsignal, welches bis zur selben Stablänge anwächst und nach Überschreiten der Stablänge nicht mehr stärker wird.

4.1.5 Bewehrungslayouts

Im Folgenden sind die Diagramme zu den in Bild 3.5 vorgestellten Bewehrungsstäben abgebildet. In jedem Diagramm sind die drei Magnetfeldkomponenten dargestellt, gekennzeichnet durch verschiede-

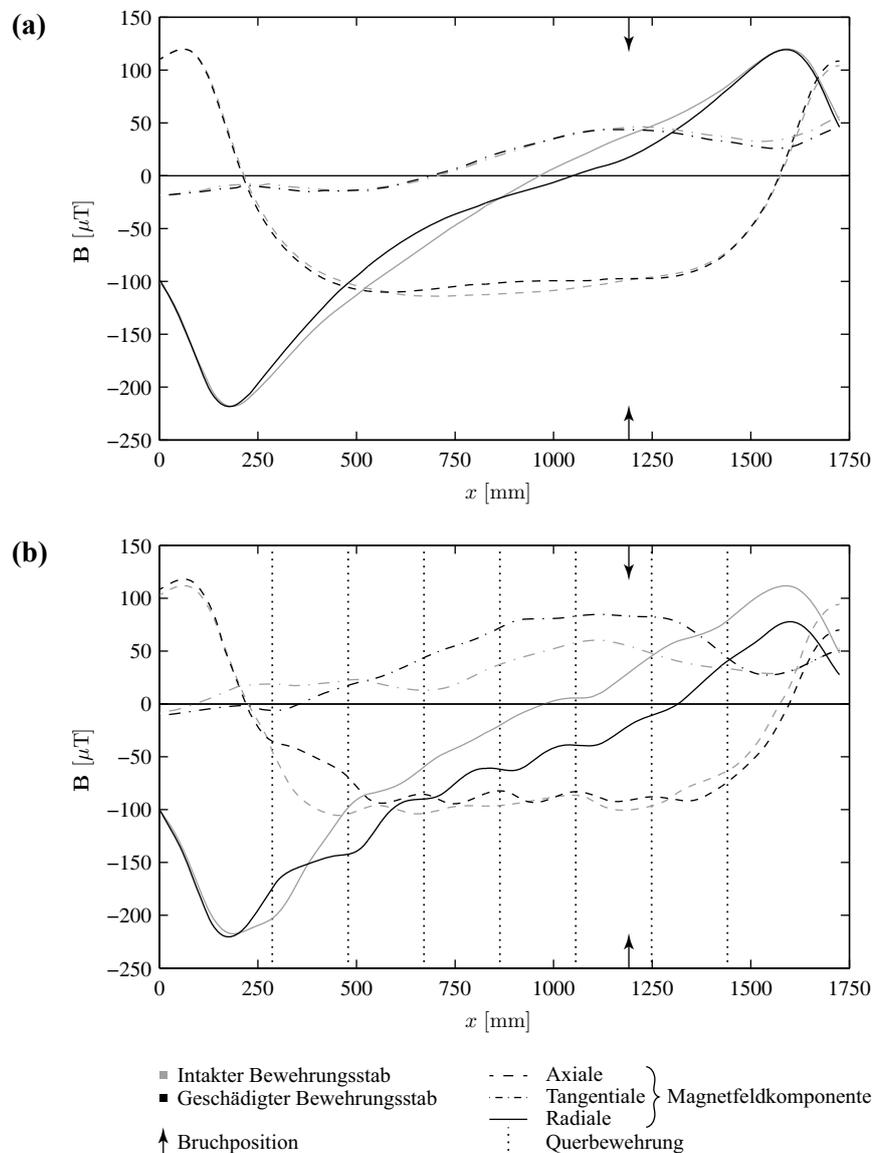


Bild 4.10 Kurvenverläufe am mit einer Nut versehenen Stab 4 bei (a) nicht eingelegter und (b) eingelegter Querbewehrung.

ne Stricharten. Ausserdem sind in jedem Diagramm die Messungen am intakten und am geschädigten Bewehrungsstab dargestellt. Das jeweils obere Diagramm (a) zeigt die Messungen bei nicht eingelegter Querbewehrung und das untere Diagramm (b) die Messungen bei eingelegter Querbewehrung.

Die Positionsangaben der Schädigungen bzw. der Brüche erfolgen nach Bild 3.5. In den Kurvenverläufen ist die jeweilige Position der Schädigung durch vertikal eingezeichnete Pfeile hervorgehoben. Die beiden Positionen decken sich nicht, da die Messungen mit der magnetischen Streufeldmethode ein Stück vor dem Stabanfang begonnen und ein Stück nach dem Stabende beendet wurden. Wird der Stabanfang beim lokalen Minimum der Radialkomponente angenommen und der Effekt des verkürzten Kurvenverlaufs berücksichtigt, kann die jeweilige Position der Schadstelle aus Bild 3.5 entnommen und in den Diagrammen eingezeichnet werden.

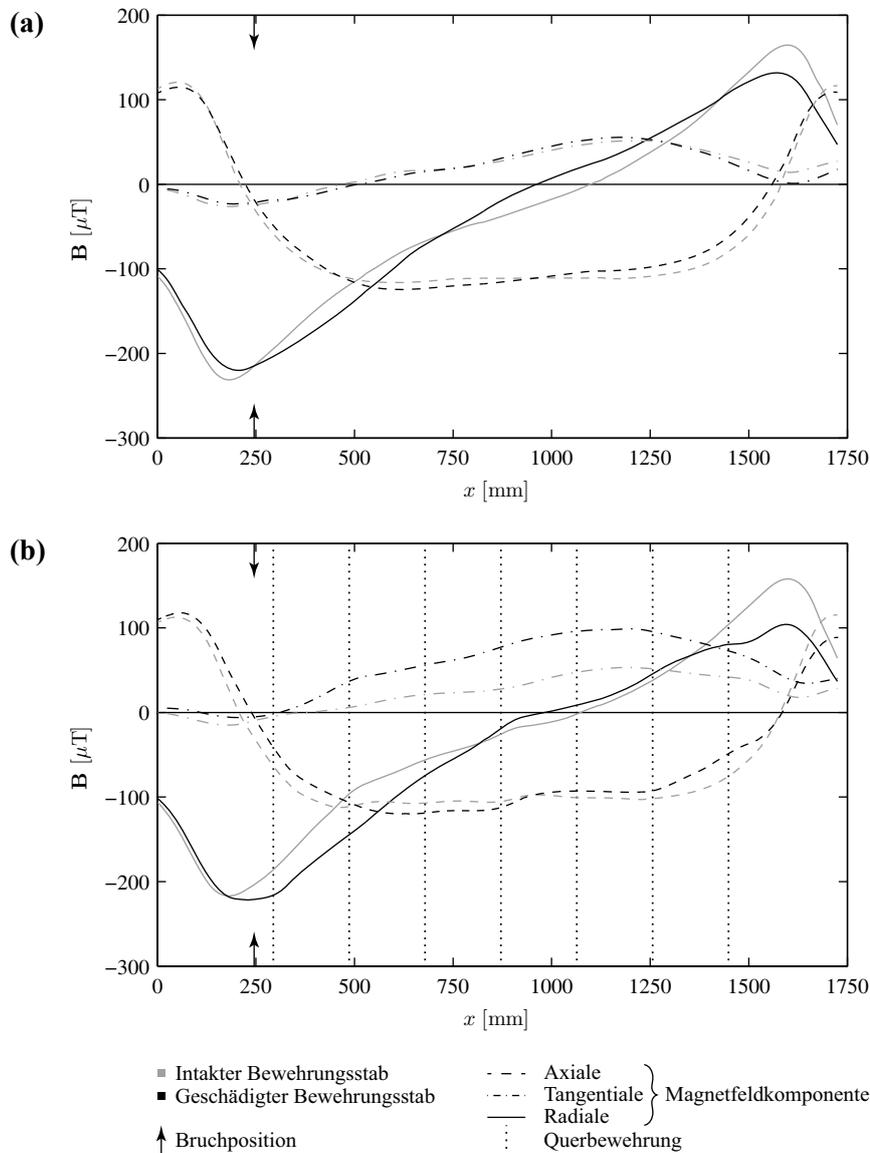


Bild 4.11 Kurvenverläufe des an der Abbiegung gebrochenen Stabes 8 bei (a) nicht eingelegter und (b) eingelegter Querbewehrung.

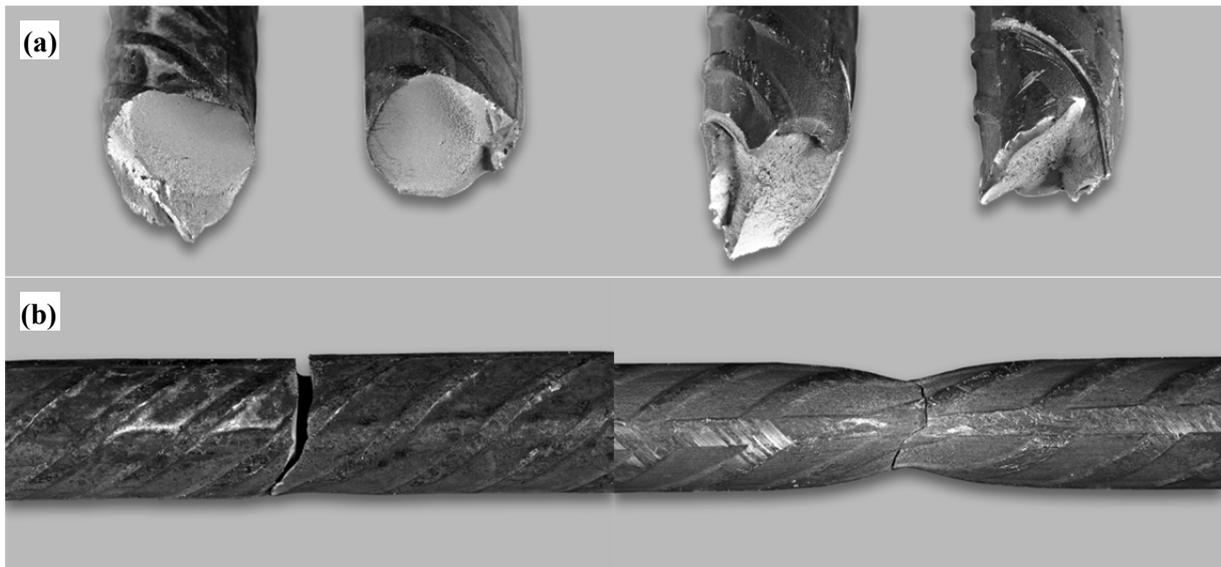


Bild 4.15 (a) Bruchflächen und (b) Ansichten eines Ermüdungsbruchs (links) und eines Verformungsbruchs (rechts).

Legt man die Stabenden wieder so aneinander, dass der Abstand zwischen den Bruchflächen minimal wird, kann ein deutlicher Unterschied zwischen beiden Bruchtypen erkannt werden. Während sich beim Ermüdungsbruch ein sehr gut erkennbarer Luftspalt zwischen den Bruchflächen bildet, ist dieser beim Verformungsbruch vernachlässigbar klein.

Dieser von Auge her sichtbare Unterschied zwischen beiden Bruchtypen ist in den Messungen der magnetischen Streufeldmethode ebenfalls erkennbar. Die Kurvenverläufe des infolge Ermüdung gebrochenen Bewehrungsstabes weisen gegenüber denen des infolge duktilen Versagens gebrochenen Bewehrungsstabes augenfällig grössere Amplituden sowohl an den Stabenden als auch an der Bruchstelle selbst auf. Das bereits in Kapitel 4.1.1 und 4.1.2 beschriebene Abstandsverhalten ist hier einmal mehr feststellbar. Bei entsprechend grösserem Bruchflächenabstand fallen die Beträge der lokalen Extremwerte grösser aus, was Bild 4.16 entnommen werden kann.

Aus den Bildern geht zudem hervor, dass die Messungen an den Bewehrungsstäben mit jeweils gleicher Bruchursache ähnliche Kurvenverläufe aufweisen. Eine der drei Messungen an den infolge duktilen Versagens gebrochenen Bewehrungsstäben wies zwar ähnlich grosse Beträge der Extremwerte auf, jedoch war der Kurvenverlauf atypisch, weshalb er in den Diagrammen des Bildes 4.16 nicht dargestellt wurde.

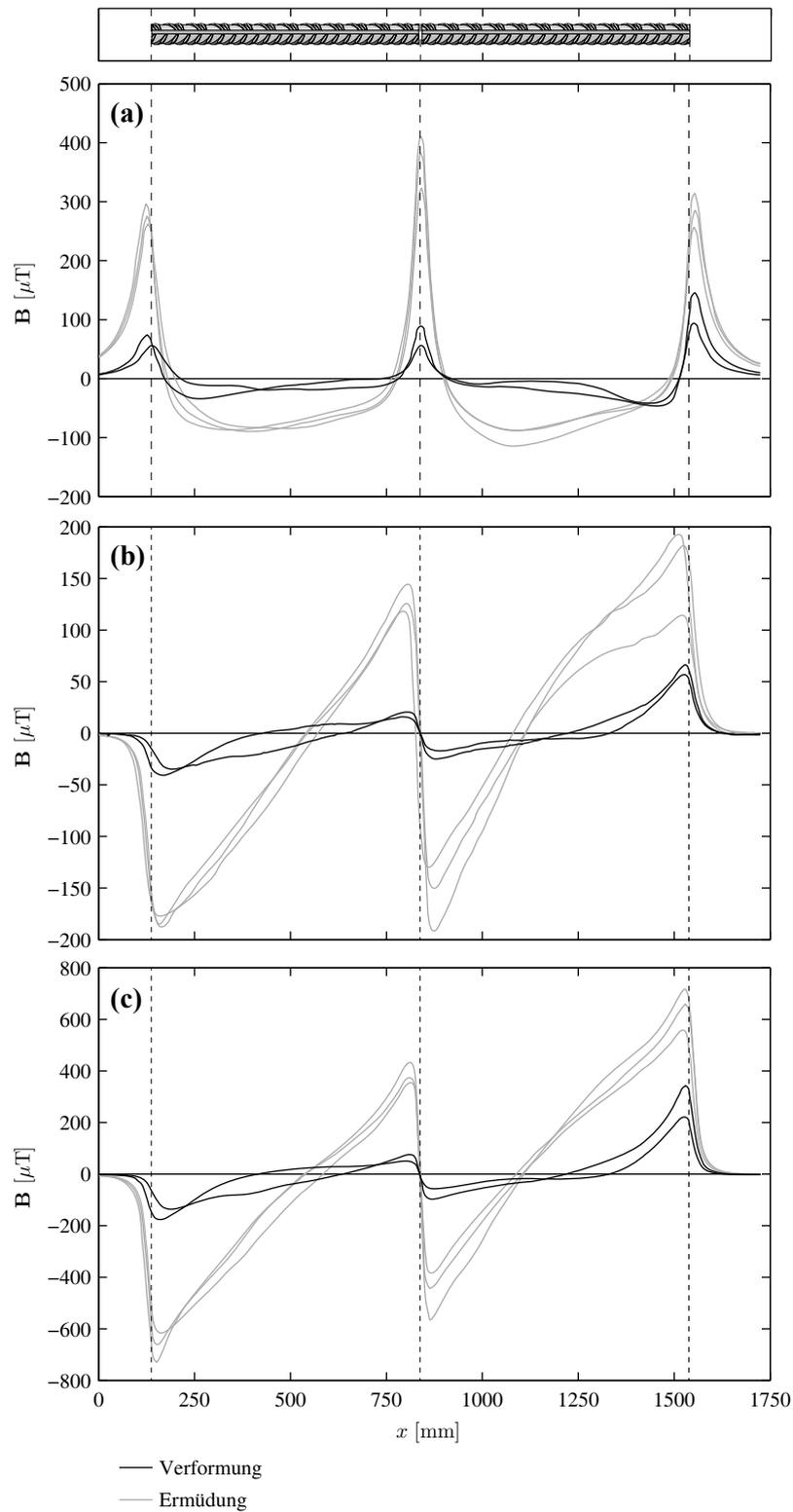


Bild 4.16 Vergleichende Gegenüberstellung der Kurvenverläufe von Messungen an gebrochenen Stäben mit Ermüdungs- bzw. Verformungsbrüchen mit (a) der Axial-, (b) der Tangential- und (c) der Radialkomponente.

4.2 Umgebungsfelder

Die bereits im vorhergehenden Kapitel angedeutete Reproduzierbarkeit von Messungen mit der magnetischen Streufeldmethode, wurde bei den Versuchen zu den Umgebungsfeldern gezielter untersucht. In den Bildern 4.17 (a)-(c) zeigen die grauen Kurvenverläufe die Rohdaten, bei denen das zu untersu-

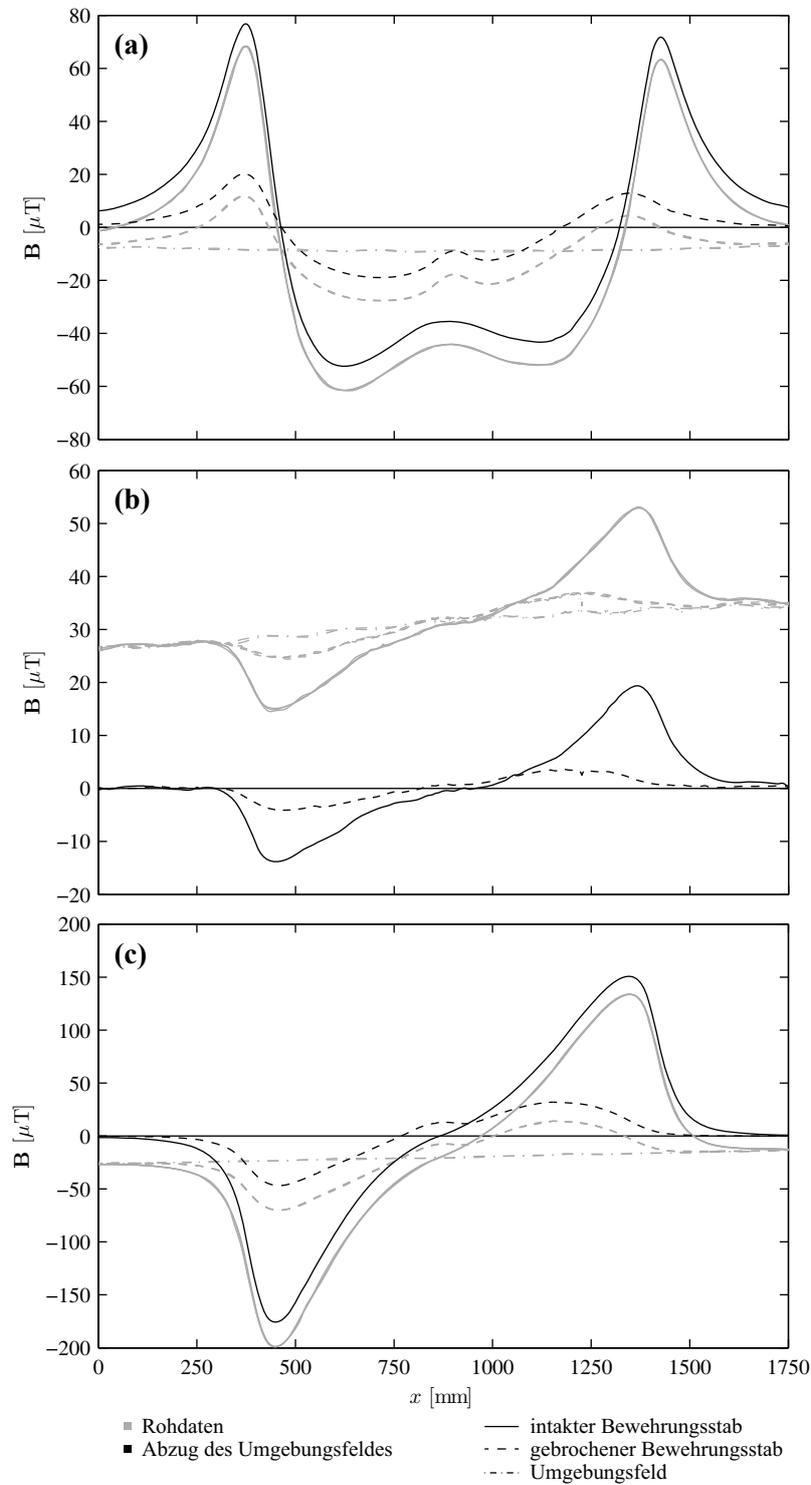


Bild 4.17 Kurvenverläufe für die Erfassung des Umgebungsfeldes bei $\alpha = 0^\circ$ mit (a) der Axial-, (b) der Tangential- und (c) der Radialkomponente.

chende Magnetfeld des Bewehrungsstabes noch mit dem Umgebungsfeld überlagert bzw. das Umgebungsfeld selbst dargestellt ist. In den Kurvenverläufen der Tangentialkomponente (Bild 4.17 (b)) ist gut erkennbar, dass es sich bei den Rohdaten um drei übereinander gezeichnete Verläufe handelt. Die geringen Abweichungen der Verläufe sind ein Anzeichen für die Reproduzierbarkeit der Messungen.

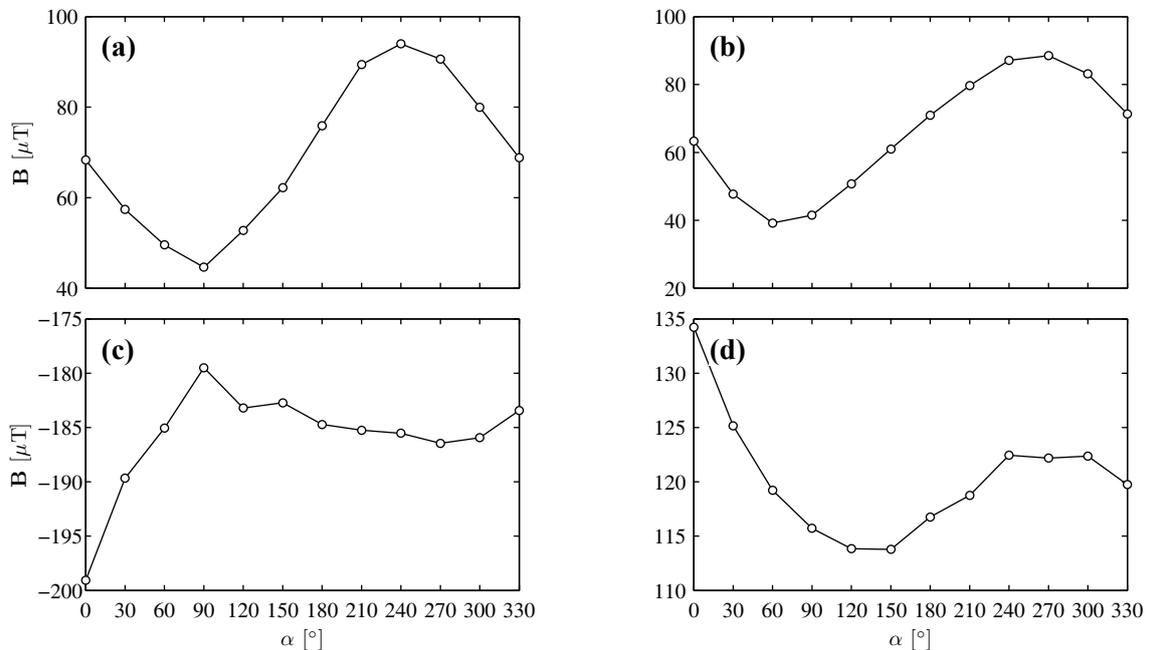


Bild 4.18 Veränderung der Extremwerte beim intakten Bewehrungsstab bei Drehung des Versuchsaufbaus für (a) den linken und (b) den rechten Extremwert der Axialkomponente, sowie (c) den linken und (d) den rechten Extremwert der Radialkomponente.

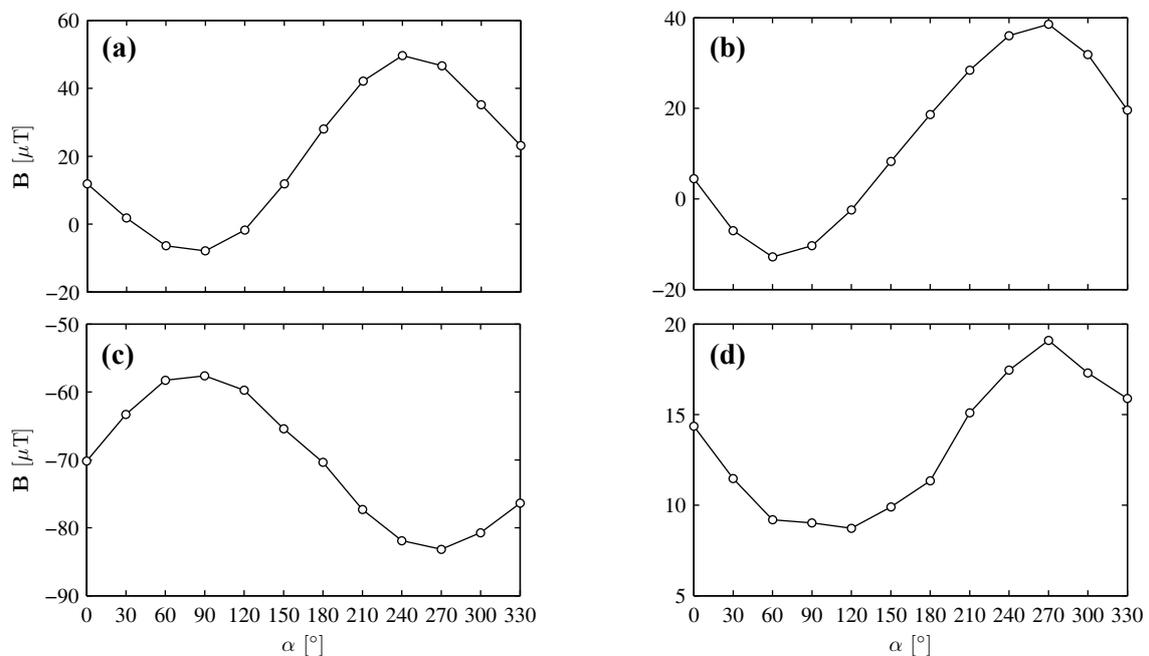


Bild 4.19 Veränderung der Extremwerte beim gebrochenen Bewehrungsstab bei Drehung des Versuchsaufbaus für (a) den linken und (b) den rechten Extremwert der Axialkomponente, sowie (c) den linken und (d) den rechten Extremwert der Radialkomponente.

In den Diagrammen sind als Rohdaten die Messwerte des Umgebungsfeldes, sowie die am intakten und gebrochenen Bewehrungsstab aufgenommenen Messwerte eingezeichnet. Mit der Erfassung des reinen Umgebungsfeldes konnte dessen Einfluss aus den Messungen am intakten und gebrochenen Bewehrungsstab abgezogen werden. Die subtrahierten Messwerte sind schwarz eingezeichnet. Bei allen Verläufen ist zu erkennen, dass nach Abzug des Umgebungsfeldes die Kurvenverläufe entlang der Ordinatenachse verschoben sind und nun die Werte auch Null sind, die mit der Theorie des Magnetismus bereits zu Null vorhergesagt werden.

Der Versuch zeigt darüber hinaus, dass sich die Messungen an ein und demselben Bewehrungsstab unterscheiden, sofern der Versuchsaufbau verschoben oder wie im hiesigen Fall gedreht wird. Der Versuchsaufbau wurde in zwölf 30°-Schritten gedreht, wobei jedes Mal das Umgebungsfeld, sowie die remanenten Magnetfelder des intakten und gebrochenen Bewehrungsstabes ausgemessen wurden. Für den intakten und den gebrochenen Bewehrungsstab wurden anschliessend die Extremwerte der Kurvenverläufe an den Stabenden aus jeder Messung der zwölf Drehschritte ermittelt und graphisch dargestellt, wie in den Bildern 4.18 und 4.19 zu sehen ist. Bis auf die Verläufe der Radialkomponente des intakten Bewehrungsstabes zeigen alle Diagramme einen annähernd sinusförmigen Verlauf. Die Messungen aller zwölf Richtungen, wie sie in Bild 3.6 dargestellt sind, finden sich im Anhang C.

4.3 Hauptversuch am Stahlbetonrahmen

An dieser Stelle werden nur die Resultate des Messfeldes 300 (vgl. Bild 3.7) besprochen, da sich dort bereits früh eine hohe Beanspruchung der Bewehrung durch einen grossen Riss an der Betonoberfläche abzeichnete.

4.3.1 Vorhandene Brüche

Nachdem die Bewehrungsüberdeckung mit Pressluftschlämmern weggespitzt worden war, konnten einerseits die genaue Lage der Bewehrungsstäbe eingemessen und andererseits die Positionen sämtlicher Brüche messtechnisch festgestellt und protokolliert werden. Wie aus Bild 4.20 entnommen werden kann, sind die meisten Brüche in direkter Nähe zum zuvor im Beton vorhandenen Riss entstanden, der sich oberhalb der inneren Stielseite gebildet hatte. Ausnahmen bilden vier Brüche, die in den Abbiegungen der Bewehrungsstäbe entstanden waren (siehe Kreise in Bild 4.20).

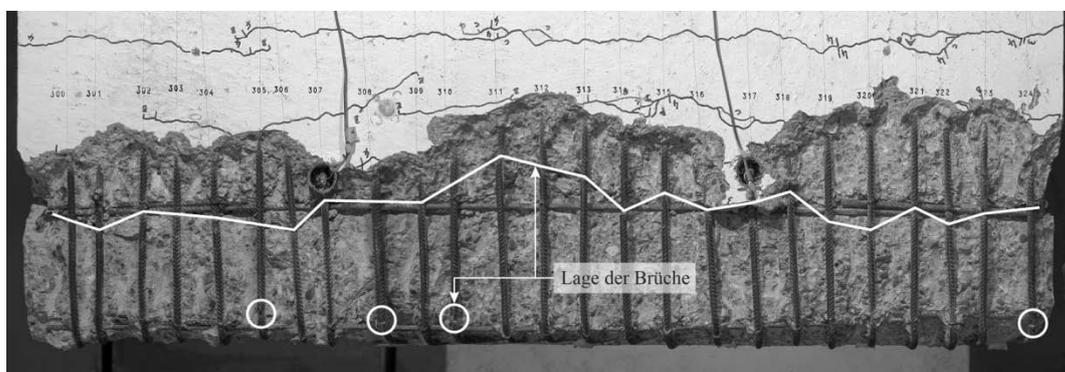


Bild 4.20 Aufsicht Messfeld 300 mit eingezeichneter Lage der Brüche in der oberen Bewehrungslage (aus *Fehlmann et al.* [13]).

Weiterführende Informationen über die Art der festgestellten Brüche sowie deren Zuordnung zum jeweiligen Bewehrungsstab können im Versuchsbericht von *Fehlmann et al.* [13] nachgelesen werden.

4.3.2 Vergleich von detektierten und vorhandenen Brüchen

Für eine Standortbestimmung der magnetischen Streufeldmethode war es unerlässlich, die Messresultate mit der vorhandenen Situation zu vergleichen. Zu diesem Zweck wurde die jeweilige Lage des

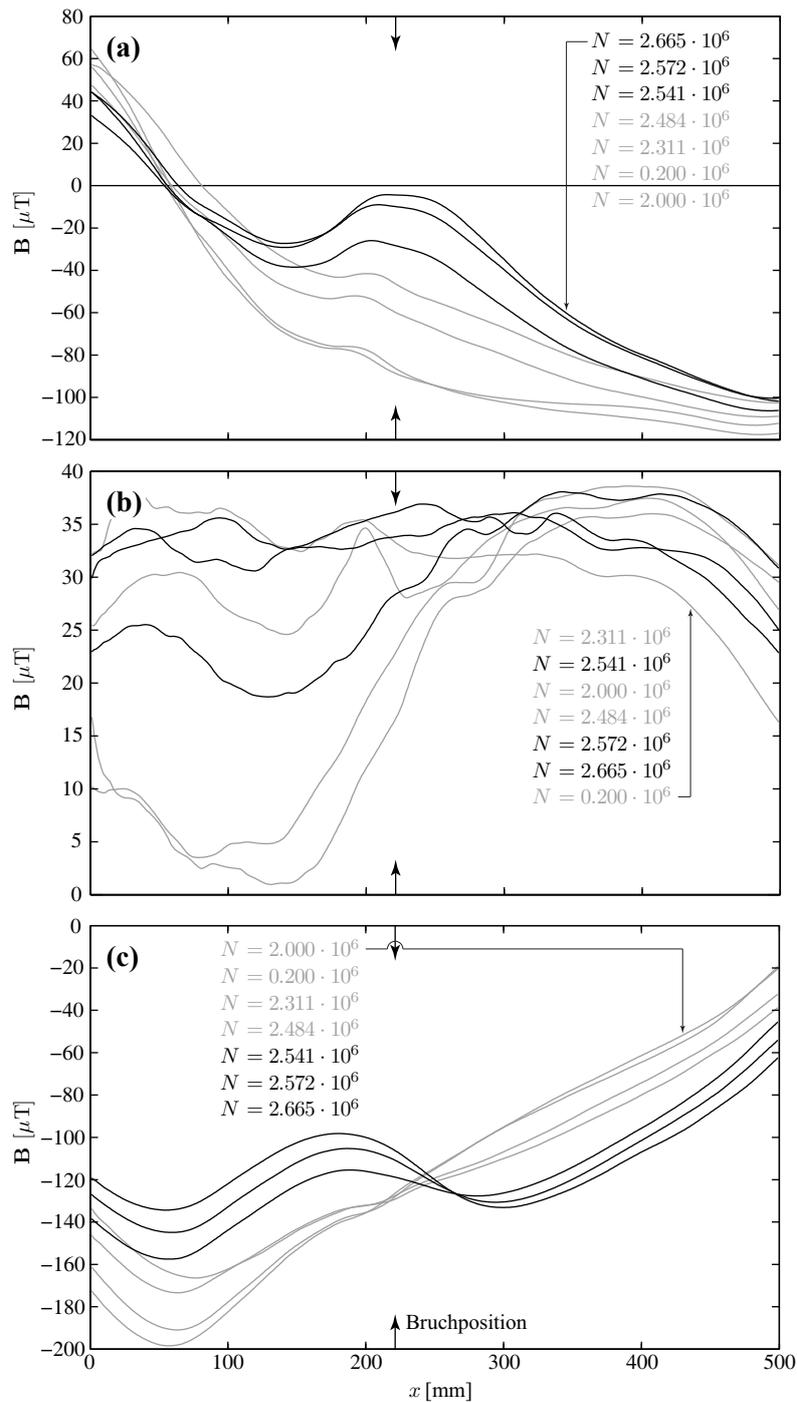


Bild 4.21 Kurvenverläufe der sieben Messdurchgänge für Stab 317 mit (a) der Axial-, (b) der Tangential- und (c) der Radialkomponente.

Brüchen in den Kurvenverläufen kenntlich gemacht (siehe Bild 4.21) und die Messergebnisse der magnetischen Streufeldmethode den tatsächlich vorhandenen Brüchen gegenübergestellt. Im Gegensatz zu den Kurvenverläufen aus Bild 4.21, bei denen das Bruchsignal sehr gut ablesbar ist, zeigt Bild 4.22 exemplarisch die Kurvenverläufe für einen Stab, bei dem kein charakteristisches Bruchsignal erkannt werden kann. In Kapitel 5 werden mögliche Gründe diskutiert, warum Brüche anhand der Kurvenverläufe erkannt bzw. nicht erkannt werden können.

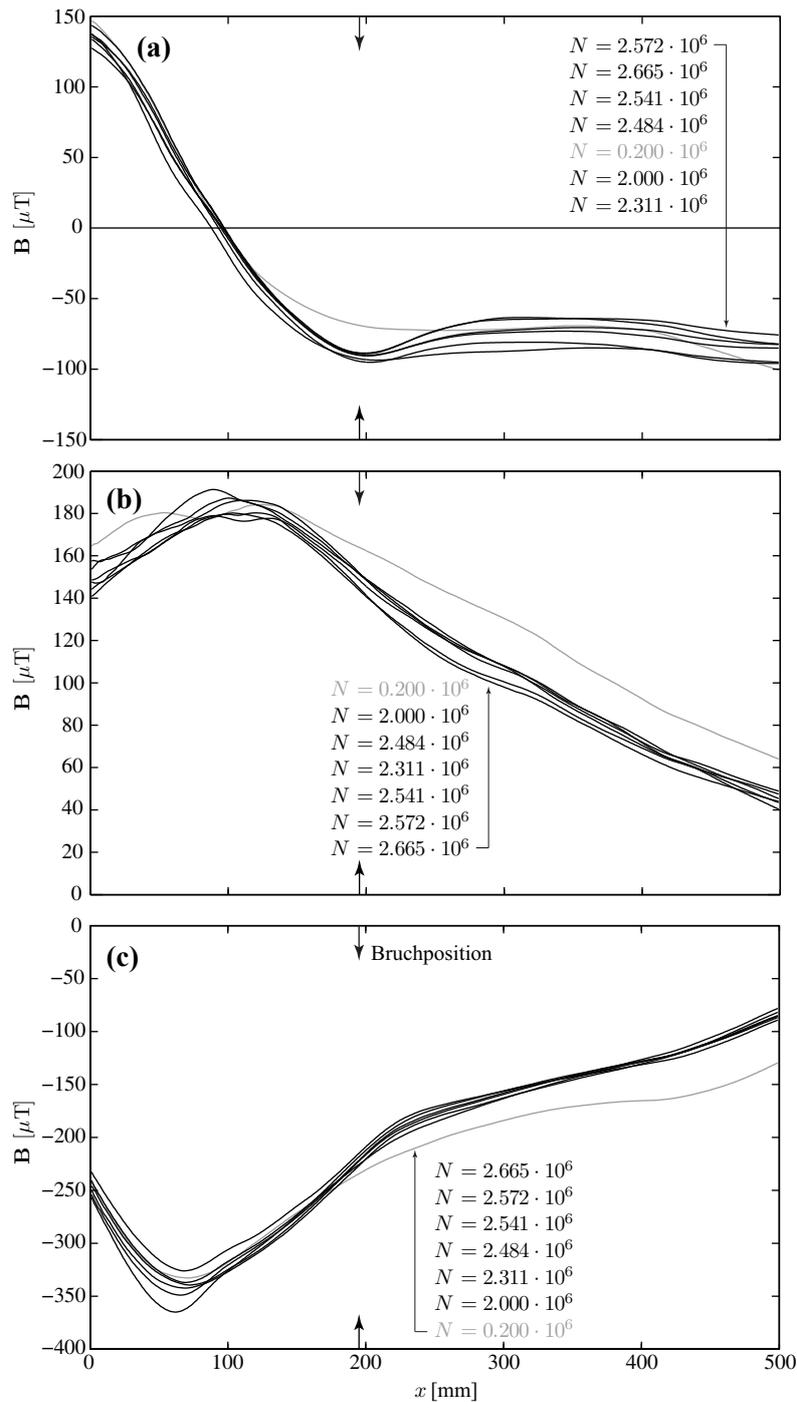


Bild 4.22 Kurvenverläufe der sieben Messdurchgänge für Stab 300 mit (a) der Axial-, (b) der Tangential- und (c) der Radialkomponente.

4.4 Automatische Suche nach Bruchsignalen

In Kapitel 2.2.4 wurde bereits erläutert, dass Bewehrungsbrüche typische Muster in den Messwerten aufweisen. Dieser Umstand ermöglicht eine automatische Suche nach Brüchen. Aus dem Literaturstu-

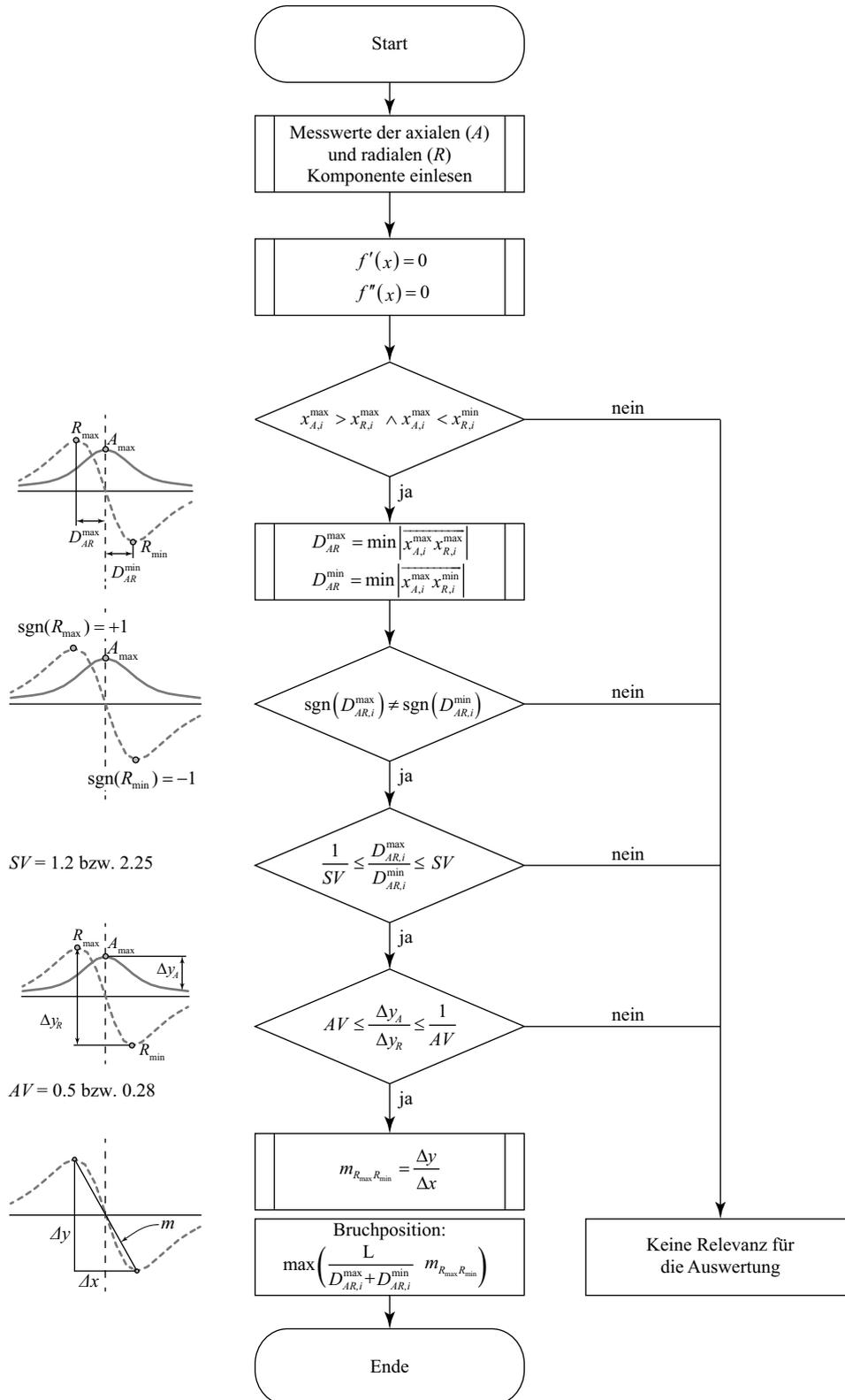


Bild 4.23 Flussdiagramm des Bruchdetektionsalgorithmus.

dium sowie aus Versuchen und Simulationen sind die Charakteristika des Bruchsignals soweit bekannt, dass daraus allgemeingültige Regeln abgeleitet werden konnten. Diese Regeln bilden die Grundlage für den *Bruchdetektionsalgorithmus*, der in Bild 4.23 in Form eines Flussdiagramms dargestellt ist. Zunächst werden die Messwerte der axialen und radialen Komponenten eingelesen, um anschließend die ersten und zweiten Ableitungen bilden zu können. Die Kurvenverläufe sind stets so zueinander orientiert, dass die Positionen der lokalen Extremwerte möglicher Bruchsignale immer in gleicher Abfolge vorliegen. Diese Konstellationen gilt es durch Prüfen der Regeln zu ermitteln. Hierbei werden immer nur noch die Extremwerte weiter untersucht, die einer vorherigen Regel entsprechen haben.

Anfangs werden die Extremwerte der Radialkomponente ermittelt, die zum jeweiligen Extremwert (Maximum bzw. Minimum) der Axialkomponente entlang der Weg-Achse vor bzw. nach diesem liegen. Anschließend werden die Extremwerte der Radialkomponente ermittelt, die den kleinsten Abstand zum jeweiligen Extremwert der Axialkomponente haben. Bei den verbliebenen möglichen Ex-

Versuch		Versuchs-Nr.	Anzahl Messungen	Stab		
				gebrochen	intakt	ohne
Bruchflächenabstand	$\varnothing = 6 \text{ mm}$	①	27	26	-	1
	$\varnothing = 8 \text{ mm}$	②	27	26	-	1
	$\varnothing = 10 \text{ mm}$	③	27	26	-	1
	$\varnothing = 12 \text{ mm}$	④	27	26	-	1
Abstand zwischen Bewehrungsstab-Sensor	$\varnothing = 6 \text{ mm}$	⑤	11	-	11	-
	$\varnothing = 8 \text{ mm}$	⑥	11	-	11	-
	$\varnothing = 10 \text{ mm}$	⑦	11	-	11	-
	$\varnothing = 12 \text{ mm}$	⑧	11	-	11	-
Stablängenvariation	$s = 29.5 \text{ mm}$	⑨	9	8	-	1
	$s = 78.0 \text{ mm}$	⑩	9	8	-	1
	$s = 29.5 \text{ mm}$	⑪	9	-	8	1
	$s = 78.0 \text{ mm}$	⑫	9	-	8	1
Stahlbetonplatte	-	⑬	8	-	8	-
Einfluss des Stabdurchmessers $\varnothing = 3-16 \text{ mm}$	$s_{BM} = 37.5 \text{ mm}$	⑭	7	-	7	-
	$s_{BM} = 152.0 \text{ mm}$	⑮	7	-	7	-
Bewehrungslayout mit Querbewehrung	$s = 67.5 \text{ mm}$	⑯	25	8	17	-
	$s = 47.5 \text{ mm}$	⑰	25	8	17	-
Bewehrungslayout ohne Querbewehrung	$s = 67.5 \text{ mm}$	⑱	25	8	17	-
	$s = 47.5 \text{ mm}$	⑲	25	8	17	-

Tab. 4.1 Übersicht der für den Test des Bruchdetektionsalgorithmus verwendeten Versuchsdaten.

tremwerten wird das jeweilige Vorzeichen nochmals ermittelt und daraufhin geprüft, welche Extremwerte in einem wählbaren Verhältnis der Distanzen D_{AR}^{max} und D_{AR}^{min} um den Extremwert der Axialkomponente liegen.

Abschliessend wird der Anstieg zwischen den lokalen Extremwerten der Radialkomponente ermittelt. Bei den verbliebenen Extremwerten wird nun jeweils die Gesamtlänge der Messstrecke durch die Summe der Abstände der jeweiligen Extremwerte der Radialkomponente geteilt und mit dem vorher ermittelten Anstieg multipliziert. Das Maximum dieser Berechnung wird als Bruchposition vorgeschlagen. Für die Entscheidungsfindung fließen somit der minimale Abstand der Extremwerte um den Extremwert der Axialkomponente wie auch der Anstieg zwischen diesen ein.

Der Bruchdetektionsalgorithmus wurde anhand der vorhandenen Messungen aus den hier vorgestellten Versuchen getestet. Tabelle 4.1 zeigt die relevanten Informationen zum jeweiligen Versuch. Die angegebene Anzahl an Messungen wird dabei noch in die entsprechende Anzahl gebrochener und intakter Bewehrungsstäbe aufgeschlüsselt. Sofern kein Bewehrungsstab eingelegt war, wurde dies ebenfalls

Versuchs-Nr	Ⓐ	Ⓑ	Ⓒ	Ⓓ
<i>SV</i>	2.25	2.25	1.20	1.20
<i>AV</i>	0.28	0.50	0.28	0.50
①	26 0 1 0	26 0 1 0	26 0 1 0	26 0 1 0
②	26 0 1 0	26 0 1 0	26 0 1 0	26 0 1 0
③	26 0 1 0	26 0 1 0	26 0 1 0	26 0 1 0
④	26 0 1 0	26 0 1 0	26 0 1 0	26 0 1 0
⑤	0 0 11 0	0 0 11 0	0 0 11 0	0 0 11 0
⑥	0 0 4 7	0 0 11 0	0 0 11 0	0 0 11 0
⑦	0 0 3 8	0 0 11 0	0 0 3 8	0 0 11 0
⑧	0 0 4 7	0 0 11 0	0 0 3 8	0 0 11 0
⑨	8 0 0 1	8 0 1 0	8 0 0 1	8 0 1 0
⑩	7 1 1 0	7 1 1 0	7 1 1 0	7 1 1 0
⑪	0 0 4 5	0 0 8 1	0 0 7 2	0 0 7 2
⑫	0 0 1 8	0 0 3 6	0 0 5 4	0 0 6 3
⑬	2 6 0 0	2 6 0 0	0 8 0 0	0 8 0 0
⑭	0 0 6 1	0 0 7 0	0 0 7 0	0 0 7 0
⑮	0 0 7 0	0 0 7 0	0 0 7 0	0 0 7 0
⑯	4 4 14 3	1 7 15 2	3 5 14 3	1 7 17 0
⑰	4 4 11 6	4 4 14 3	3 5 14 3	3 5 14 3
⑱	2 6 17 0	2 6 17 0	1 7 17 0	1 7 17 0
⑲	3 5 17 0	3 5 17 0	1 7 17 0	1 7 17 0

Ⓐ
2.25
0.28
26 0 1 0

↑

↑

↑

↑

Bruch vorhanden
(Nullhypothese)

Fehler 1. Art

richtige Entscheidung

Fehler 2. Art

kein Bruch vorhanden
(Alternativhypothese)

richtige Entscheidung

Fehler 1. Art

Fehler 2. Art

Tab. 4.2 Übersicht der Resultate des Bruchdetektionsalgorithmus.

festgehalten. 19 Versuchsreihen mit insgesamt 310 Messungen wurden für diesen Test herangezogen, wovon 152 Messungen an gebrochenen und 150 Messungen an intakten Bewehrungsstäben durchgeführt wurden. Acht Messungen wurden ohne eingelegten Bewehrungsstab durchgeführt.

Der Bruchdetektionsalgorithmus ist so ausgelegt, dass er nach Bruchsignalen sucht. Er kann in der hier erläuterten Version nicht unterscheiden, ob eine Messung an einem Bewehrungsstab oder an generell

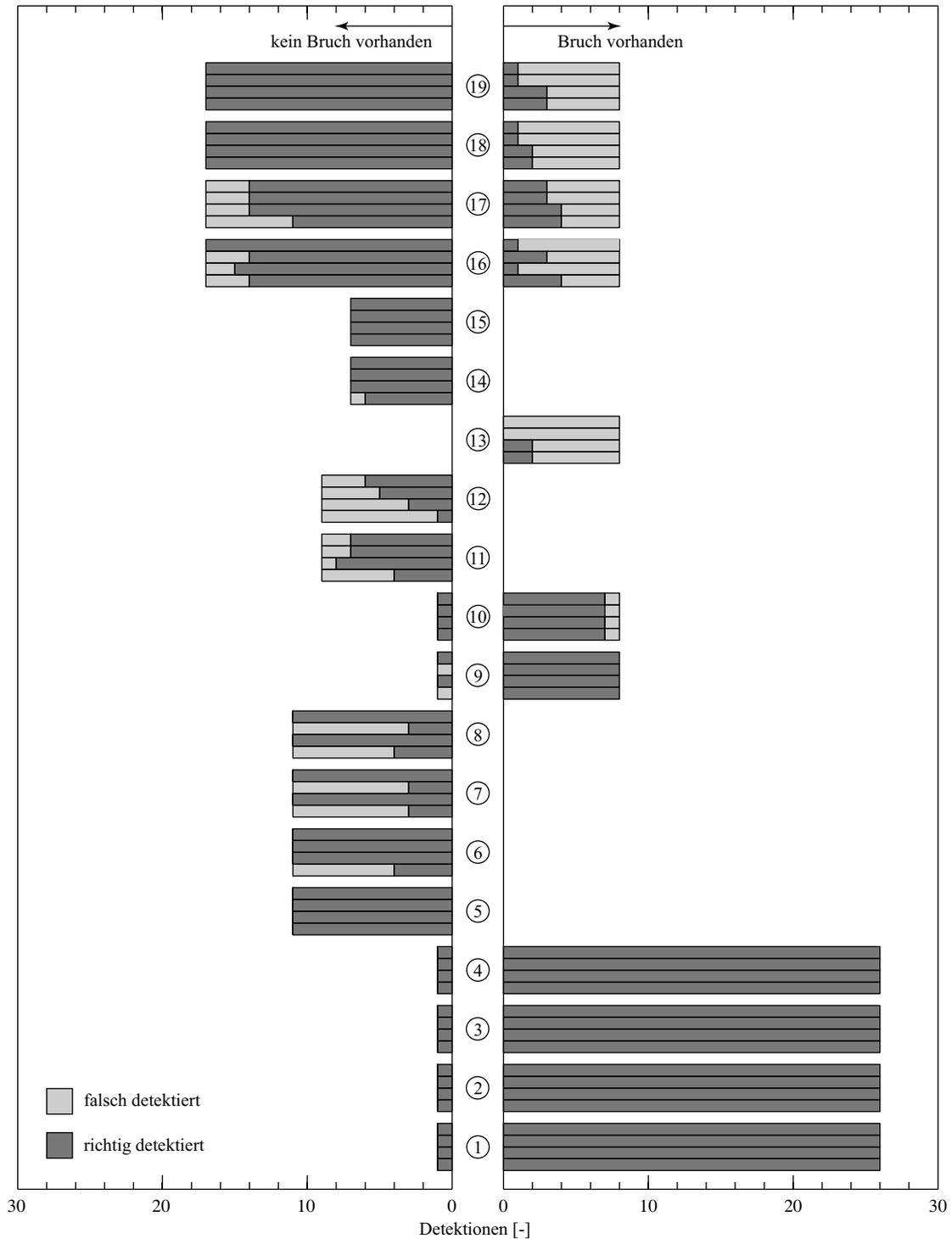


Bild 4.24 Graphische Übersicht aller aus dem Test hervorgegangenen Detektionen des Bruchdetektionsalgorithmus.

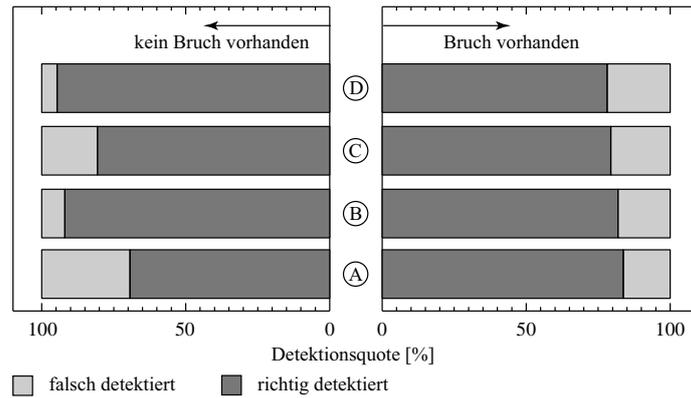


Bild 4.25 Übersicht zu den aus dem Test hervorgegangenen Detektionen des Bruchdetektionsalgorithmus in prozentualer Darstellung.

nicht magnetischen Materialien durchgeführt wurde. Daraus ergibt sich eine Anzahl zulässiger Resultate, die in Tabelle 4.2 gezeigt werden.

Mit den beiden Ausgangszuständen, einerseits der Messung an einem gebrochenen Bewehrungsstab (Nullhypothese) und andererseits der Messung an einem intakten Bewehrungsstab (Alternativhypothese), bleiben vier Zustände, die unterschieden werden können. Die vier Zustände teilen sich in zwei richtige Entscheidungen und zwei falsche Entscheidungen auf, wovon die falschen Entscheidungen als Fehler 1. Art und Fehler 2. Art bezeichnet werden (siehe Brunner et al. [9]). Bei einem gebrochenen Bewehrungsstab kann ein Bruch somit detektiert (richtige Entscheidung) oder nicht detektiert werden (Fehler 1. Art). Ähnliches gilt bei einem intakten Bewehrungsstab. Auf der einen Seite kann festgestellt werden, dass kein Bruch vorhanden ist (richtige Entscheidung) und auf der anderen Seite aber fälschlicherweise ein Bruch detektiert werden (Fehler 2. Art), obwohl dieser real nicht existiert.

Tabelle 4.2 zeigt die Resultate aus dem Test mit dem Bruchdetektionsalgorithmus, bei denen das Symmetrie- und Amplitudenverhältnis (SV bzw. AV) variiert wurde. Beim SV wurden die beiden Werte 1.20 und 2.25 gewählt, und beim AV die Werte 0.28 und 0.50. Die Werte sind vorgängig an Kurvenverläufen eruiert worden, bei denen die Brüche entweder sehr gut oder sehr schlecht feststellbar sind. Die Kombination der Werte des SV s bzw. AV s bilden jeweils eine Zeile in Tabelle 4.2 und sind jeweils mit einem Buchstaben versehen worden.

Bild 4.24 zeigt mittels horizontaler Balkendiagramme die Resultate aus dem Test, wobei nach links abgetragen die Messungen an intakten bzw. nicht eingelegten Bewehrungsstäben und nach rechts die Messungen an gebrochenen Bewehrungsstäben dargestellt sind. Bild 4.25 zeigt die Resultate des Tests auf die jeweils gewählte Kombination von SV und AV bezogen in Prozent.

5 Beurteilung der Versuchsergebnisse

Nachdem die Ergebnisse der wichtigsten Versuche vorgestellt wurden, erfolgt im folgenden Kapitel deren Interpretation. Ausserdem werden – wo dies zweckdienlich erscheint – zusätzlich Informationen gegeben.

5.1 Detektierbarkeit von Betonstahlbrüchen

Die vorliegenden Ergebnisse zeigen deutlich, dass Brüche in der Betonstahlbewehrung mit der hier vorgestellten magnetischen Streufeldmethode unter Laborbedingungen sehr gut detektiert werden können. In den Kapiteln 4.1 und 4.2 wurden jene Versuchsergebnisse vorgestellt, die unter definierten und nachvollziehbaren Bedingungen durchgeführt wurden. Die Messanordnungen lassen eine verhältnismässig leichte Detektion von Brüchen zu, da hier keinerlei störende Einflüsse anderer ferromagnetischer Materialien vorlagen.

Im Gegensatz dazu hat der Versuch am Stahlbetonrahmen zwar gezeigt, dass unter definierten Voraussetzungen bereits Brüche an einem der Realität nahekommenden Bauwerk festgestellt werden können, aber letztlich nicht alle Brüche entdeckt werden konnten. Zwar waren im Messfeld 300 alle Stäbe der oberen Bewehrung gebrochen, jedoch konnten lediglich gut 58 % der Brüche detektiert werden. Dieser Fakt zeigt, dass ein komplizierterer Aufbau der Bewehrung weitere Anpassungen bei den Messeinstellungen erfordert. Als Ursachen für die nicht detektierten Betonstahlbrüchen wird die Kombination aus geringem Bruchflächenabstand und grossem Messabstand angesehen.

5.2 Kurvenverläufe und Charakteristika der Bruchsignale

Sämtliche Versuche haben gezeigt, dass die Darstellung der Messwerte in Form von Kurvenverläufen zur Beurteilung eventuell vorhandener Brüche gut geeignet ist. Diese Tatsache wird explizit betont, da es sich bei Magnetfeldern um Vektorfelder handelt, die üblicherweise mit Vektorpfeilen und/oder Feldlinien visualisiert werden. In der jetzigen Fassung der magnetischen Streufeldmethode werden jedoch nur Daten entlang eines Pfades (vgl. Bild 2.8 (a) und 2.9 (a)) und nicht die einer Fläche messtechnisch erfasst, weshalb eine Darstellung mit Kurvenverläufen als zulässig erachtet wird. Weitere Darstellungsformen sind möglich und sollten auf ihre Anwendbarkeit hin untersucht werden.

Durch die Wahl der Kurvenverläufe ergab sich die Darstellungsweise der für die Brüche charakteristischen Muster. Bild 2.13 zeigt für die axiale und radiale Magnetfeldkomponente die typischen Muster an der Bruchstelle. Mit der momentanen Konfiguration des Magnetometers und der beschriebenen Messprozedur (siehe Kapitel 2.3.1) werden sich die Muster an einer Bruchstelle stets in der beschriebenen Art einstellen. Die Muster können dabei jedoch in der Stärke und der Ausdehnung des Signals variieren, was mitunter dazu führen kann, dass keine Bruchdetektion mehr möglich ist. Dies kann bspw. der Fall sein, wenn der Abstand zwischen Bewehrungsstab und Sensor wie hier mit 67.5 mm zu gross gewählt wurde und in der Folge keine Aussage über das Bruchsignal angestellt werden kann. Dieser Umstand wird bei den nicht detektierten Brüchen am Stahlbetonrahmen als der wahrscheinlichste angesehen. Mit der Absicht, unerwünschte Signale aus der Querbewehrung durch einen mög-

lichst grossen Abstand zwischen Bewehrung und *MicroMag3* zu minimieren, wurde letztlich die Erfassung von Brüchen eingeschränkt bzw. zum Teil auch unmöglich gemacht. Ein minimaler Messabstand ist in diesem Fall zu empfehlen, wobei dieser im hiesigen Fall dann 29.5 mm betragen würde.

Der mit Hilfe der charakteristischen Bruchsignale erarbeitete Bruchdetektionsalgorithmus wurde an insgesamt 310 Einzelmessungen getestet. Bei den Tests wurden die Werte für das Symmetrieverhältnis und das Amplitudenverhältnis variiert. Brüche wurden je nach gewähltem Parameter zu 78 bzw. bis zu knapp 84 % richtig erkannt. Bei nicht vorhandenen Brüchen schwankt die Rate korrekter Detektion zwischen knapp 79 und 95 %. Anhand des Balkendiagramms in Bild 4.25 wird ersichtlich, dass sich die Parametervariationen auf die korrekte Detektion vorhandener Brüche weit weniger stark auswirkt, als bei den nicht vorhandenen Brüchen. Aufgrund der Testergebnisse wird empfohlen, die automatische Bruchdetektion mit zwei Konfigurationen der beiden Parameter durchzuführen. Dies sind die Varianten A und D, mit denen der Bruchdetektionsalgorithmus die Messwerte prüfen sollte. Aus der Variante A gehen die detektierten Brüche hervor, wohingegen die Daten der Variante D Aufschluss über die nicht vorhandenen Brüche geben.

Aus Bild 4.24 geht hervor, dass der Bruchdetektionsalgorithmus mehrheitlich korrekte Detektionen bei Einzelstabversuchen liefert und bei komplizierteren Bewehrungsanordnungen, in diesem Fall gekreuzten Bewehrungsstäben, in der Quote richtig erkannter Brüche abfällt. Der mittlere (13.) Bewehrungsstab, der insgesamt 25 Bewehrungsstäbe dieser Rahmenecke, konnte aufgrund der messtechnischen Einrichtung nicht erfasst werden. Auf die aus den Messungen am Stahlbetonrahmen hervorgegangenen Messwerte angewandt, zeigt der Bruchdetektionsalgorithmus nur neun der vorhandenen 24 Brüche richtig an. Manuell konnten 14 der 24 Brüche als gebrochen erkannt werden. Die Qualität der Messdaten sorgt in diesem Fall für das schlechte Abschneiden des Bruchdetektionsalgorithmus. Der bereits erwähnte Abstand zwischen Bewehrungsstab und *MicroMag3* wird als zu gross angenommen, womit entsprechende Informationen über vorhandene Brüche nicht erfasst wurden.

5.3 Fehler bei der Bruchdetektion

Eine erste Auswertung kann vor Ort erfolgen, nachdem die Messung beendet wurde. Mit Hilfe der dargestellten Kurvenverläufe können die geübten Ingenieure erkennen, ob die Messung plausible Daten geliefert hat oder ob es Unstimmigkeiten gibt und die Messung wiederholt werden muss.

Die bei einem Bruch in den Kurvenverläufen vorhandene, charakteristische Abfolge von Extremwerten reduziert die Möglichkeit einer Fehlinterpretation, kann diese aber nicht vollständig ausschliessen. Zwar besteht die Möglichkeit, Muster anderer Bewehrungsanordnungen innerhalb der Kurvenverläufe als Bruch zu deuten, doch wird die Wahrscheinlichkeit dafür als sehr gering eingestuft. Dem gegenüber ist die Wahrscheinlichkeit höher, vorhandene Bruchmuster in den Kurvenverläufen zu übersehen und somit einen existierenden Bruch nicht zu erkennen. Ist ein Bruchsignal in einem Kurvenverlauf erkennbar, so muss dies auch in den Kurvenverläufen der anderen Magnetfeldkomponenten durch die beschriebene Korrelation der lokalen Extremwerte an der Bruchstelle der Fall sein. Sofern keine Korrelation zwischen den Extremwerten der verschiedenen Kurvenverläufe erkennbar ist, muss davon ausgegangen werden, dass es sich um keinen Bruch handelt.

5.4 Genauigkeit der Bruchdetektion

Bild 4.21 steht stellvertretend für all die Kurvenverläufe der Messungen am Stahlbetonrahmen, bei denen ein Bruch erfolgreich erkannt wurde. Dem Bild kann entnommen werden, dass die tatsächlich vorgefundene Position des Bruches mit der detektierten Position sehr gut übereinstimmt und es Abweichungen von nur wenigen Zentimetern gibt. Dies gilt für alle erfolgreich detektierten Brüche am Stahlbetonrahmen, wie im Versuchsbericht von *Fehlmann et al.* [13] nachgelesen werden kann.

Die hier erzielte Lokalisierungsgenauigkeit wird im Gebiet des Bauwesens als ausreichend eingestuft, da bei Instandsetzungsmassnahmen an der Bewehrung der Beton ohnehin über grössere Bereiche abgetragen werden muss.

5.5 Einfluss der Brucheigenschaften

5.5.1 Art des Bruchs

Der in Kapitel 4.1.6 aufgezeigte Unterschied zwischen Ermüdungs- und Verformungsbrüchen lässt folgern, dass die Art des Bruches Einfluss auf die Messung bzw. Messwerte hat. Im Vergleich zum Ermüdungsbruch liefert die Messung an einem infolge plastischer Verformungen gebrochenen Bewehrungsstabes deutlich kleinere Absolutwerte für die lokalen Extremwerte.

Die Daten zeigen, dass die Messungen stets so nah am Bewehrungsstab durchgeführt werden sollten, wie die lokalen Umstände es zulassen. Durch die bewusste Inkaufnahme eines grösseren Messabstandes sollte den prüfenden Ingenieuren bewusst sein, dass bei den Messungen u. U. wichtige, für die Interpretation relevante Informationen nicht erfasst werden.

Der für die hier vorgestellten Versuche am Stahlbetonrahmen grösser gewählte Messabstand resultiert aus Vorversuchen, bei denen aus der Querbewehrung Störsignale hervorgingen, die zum damaligen Zeitpunkt am einfachsten durch die Vergrösserung des Messabstandes minimiert werden konnten. Nach heutigem Kenntnisstand können diese Störsignale durch den Einsatz von Filtern soweit minimiert werden, dass eine Suche nach Bruchsignalen in den Messwerten selbst bei minimalem Messabstand möglich wird.

5.5.2 Einfluss des Bruchflächenabstandes

Der Vergleich von Ermüdungs- und Verformungsbrüchen hat bereits gezeigt, dass der Abstand der Bruchflächen derart grossen Einfluss hat, dass bspw. durch die Kombination von kleinem Bruchflächenabstand und grossem Messabstand Brüche nicht in jedem Fall detektiert werden können. Ein Vergleich der Ergebnisse aus den Kapiteln 4.1.1 und 4.1.2 unterstreicht diese Aussage.

Darüber hinaus beeinflusst mitunter der Winkel, unter dem die Bruchflächen zur Längsachse des Bewehrungsstabes stehen, die Messungen. Vergleicht man das Bild 4.12 mit Bild 4.13, erkennt man geringfügig grössere Absolutwerte der lokalen Extremwerte für den Bruch, bei dem die Bruchflächen senkrecht zur Längsachse des Bewehrungsstabes stehen (Bild 4.13). Wenn vom Winkel zwischen Bruchfläche und Längsachse des Bewehrungsstabes gesprochen wird, muss sicher auch die Ausrichtung des Bruchflächenpaares zum kürzesten Messabstand berücksichtigt werden (vgl. Bild 5.1).

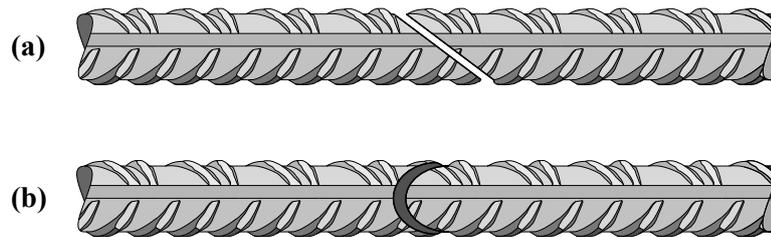


Bild 5.1 (a) Ansicht und (b) Draufsicht eines Bewehrungsstabes mit zur Längsachse schräg stehenden Bruchflächen.

5.5.3 Einfluss der Bruchoberflächen

Die Gegenüberstellung der Bruchflächen in Bild 4.15 zeigt, dass diese ganz unterschiedlich geformt sein können. Die Form der Bruchfläche nimmt somit Einfluss auf den Bruchflächenabstand. Ein Verformungsbruch, mit all den unterschiedlich im Raum orientierten Trennflächen, überlappt aufgrund der plastischen Verformung stärker als ein Ermüdungsbruch. Die daraus resultierenden Unterschiede in den Messungen wurden bereits in den vorhergehenden Kapiteln besprochen.

6 Schlussfolgerungen

Die zusammengetragenen Ergebnisse der verschiedenen Versuche zur magnetischen Streufeldmethode zeigen einerseits, dass Bewehrungsbrüche durch die gezielte Verwendung der magnetischen Eigenschaften der Betonstahlbewehrung detektiert werden können und andererseits, dass eine Detektion bislang nur unter definierten Voraussetzungen erfolgen kann.

Mit der Durchführung verschiedener Laborversuche konnten erste Erfahrungen mit den einzelnen Bestandteilen des Messsystems gemacht werden, wobei die Versuche als Vorbereitung auf den Hauptversuch am Stahlbetonrahmen dienten. Neben der Wahl eines Permanentmagneten zur Magnetisierung der Bewehrung wurde für die Erfassung der Magnetfelder das Magnetometer *MicroMag3* gewählt. Die Datenerfassung am PC erfolgte schliesslich mit einem eigens dafür entwickelten Programm.

6.1 Erkenntnisse

Mit den Vorversuchen konnte gezeigt werden, dass verschiedene Parameter für das erfolgreiche Detektieren von Bewehrungsbrüchen verantwortlich sind. Als einer der wichtigsten einflussnehmenden Parameter wird der Abstand zwischen dem zu untersuchenden Bewehrungsstab und dem magnetfelderfassenden Sensor – in diesem Fall dem *MicroMag3* – angesehen. Die Versuche haben gezeigt, dass der Abstand stets so gering wie möglich zu wählen ist, um die beste Ausgangslage zur Datenerfassung zu schaffen.

Der zweite entscheidende Parameter ist im Falle eines Bruches der Abstand zwischen den Bruchflächen. Je geringer dieser Abstand ausfällt, desto schwächer ist auch das Bruchsignal, welches sich durch die charakteristische Anordnung der verschiedenen lokalen Extremwerte der einzelnen Magnetfeldkomponenten darstellt. Zwar ist selbst dann noch ein Bruchsignal erkennbar, wenn die Bruchflächen direkt aufeinander stehen – diese also einen Bruchflächenabstand von 0 mm haben – doch ist dies nur möglich, wenn man die Messung nah genug an der Quelle des Signals durchführen kann.

Durch das Zusammentragen der bereits angesprochenen charakteristischen Muster an und um eine Bruchstelle herum ist eine Bruchdetektion an Bewehrungsstäben erst möglich geworden. Sämtliche Versuche haben dazu beigetragen, die für einen Bruch charakteristischen Muster in der axialen, tangentialen und radialen Magnetfeldkomponente zu bestimmen. Mit diesem Wissen kann ein Bruch und dessen Position sehr genau aus den Messwerten abgelesen werden.

Weitere einflussnehmende Parameter rühren aus dem zu prüfenden Bewehrungsmaterial und den umgebenden Magnetfeldern her. Beim Bewehrungsmaterial spielt die vorhandene magnetische Permeabilität eine entscheidende Rolle bei der Suche nach Brüchen bzw. bei der Modellierung. Das Material wurde im Rahmen dieser Arbeit jedoch nicht untersucht, womit keine Aussage über die tatsächlich vorhandene magnetische Permeabilität gemacht werden kann.

6.2 Folgerungen

Zum jetzigen Zeitpunkt können mit der magnetischen Streufeldmethode durchaus Brüche an Einzelstäben mit hoher Genauigkeit detektiert werden. Ebenso können definierte Bewehrungsanordnungen auf Brüche hin untersucht werden, sofern die umgebenden Felder vorab bekannt sind und bestenfalls von den eigentlichen Messungen abgezogen werden können.

Sofern kompliziertere Bewehrungsanordnungen zu untersuchen sind, stellen sich bislang Probleme bei der korrekten Erfassung der remanenten Magnetfelder ein, die z. T. eine Interpretation der Messungen bzw. eine Aussage über vorhandene Brüche unmöglich machen. Zum einen fehlen noch gesicherte Erkenntnisse darüber, wie sich Bewehrungsanordnungen (z. B. Stösse oder sich kreuzende Bewehrungsstäbe, etc.) in den Messwerten äussern und zum anderen konnte nicht abschliessend geklärt werden, wie stark sich die Magnetfelder elektrischer Geräte, die sich in der Nähe der Messstelle befinden, bemerkbar machen.

6.3 Weiterer Forschungsbedarf

Für die angestrebte automatisierte Messung bedarf es in verschiedenen Bereichen weiterer Untersuchungen. Zunächst muss geprüft werden, ob sich die unterschiedlichen Bewehrungsanordnungen in den Messwerten so widerspiegeln, wie es im Rahmen dieser Arbeit erkannt wurde. Ebenfalls sollte geprüft werden, ob die Magnetisierung der Bewehrung bis zur vollständigen Sättigung erreicht wird und, falls dies nicht der Fall ist, wie das erreicht werden kann. In diesem Zusammenhang ist zu prüfen, ob u. U. ein Umstieg auf einen Elektromagneten das Gewicht der Magnetfeldquelle zu minimieren vermag.

Der Messabstand zwischen Bewehrungsstab und Sensor wurde mehrfach angesprochen. Sofern dieser Abstand nicht mehr verkleinert werden kann, müsste geprüft werden, ob andere Sensoren zur Erfassung des Magnetfeldes besser geeignet sind bzw. ob die derzeit eingesetzten Spulen angepasst werden können.

Für eine vergleichende Betrachtung der durchgeführten Versuche mit der Theorie wurden in dieser Abhandlung erste Ansätze von Magnetfeldsimulationen präsentiert. In der Simulation von Magnetfeldern wird grosses Potential gesehen, weshalb es sich lohnen würde, sämtliche bereits durchgeführten Versuche durch Simulationen zu bestätigen. Auf diese Weise hätte man bereits eine gute Basis für die Durchführung von Simulationen, welche der zukünftigen Versuchsplanung dienen könnten. Darüber hinaus können Simulationen dazu genutzt werden, Störsignale bekannter Ursachen aus den Messungen zu entfernen. Die analytische Lösung von Magnetfeldgleichungen hat bei einfachen Magnetfeldern bereits gute Resultate geliefert, weshalb dieses Verfahren neben den Simulationen mit kommerzieller Software unbedingt weiter zu verfolgen ist. Bei beiden Verfahren sollten die Hinweise zum Entmagnetisierungsfaktor und der verringerten Dipoldichte an Bruchstellen von *Scheel* [46] und *Pak* [39] berücksichtigt werden.

Zur Visualisierung der Messwerte wurden in Anlehnung an Publikationen anderer auf diesem Gebiet arbeitender Ingenieure Kurvenverläufe eingesetzt, die entlang der Abszissenachse den während der Messung zurückgelegten Weg darstellen und auf der Ordinatenachse die Stärke der jeweiligen Magnetfeldkomponente in Mikrottesla anzeigen. Inwiefern sich zum Zweck der Auswertung andere Darstellungsweisen eignen, muss ggf. genauer betrachtet werden.

Nach Abklärung der hier aufgeführten offenen Punkte, besteht durchaus die Möglichkeit, die magnetische Streufeldmethode an einem realen Bauwerk zu testen. Der Einsatz eines Sensorarrays, welches die Messungen einer grösseren Breite pro Überfahrt ermöglicht, wird für eine Messung in vertretbarer Zeit als notwendig erachtet. Systeme, bei denen die Sensoren in rotierenden Armen installiert wurden (siehe *Szielasko et al.* [51]), sind für die Anwendung bei Arbeiten über Kopf nicht geeignet. Welches System sich für die Aufnahme des Sensors/Sensorarrays eignet, muss in praktischen Tests evaluiert werden. Der bislang eingesetzte Messwagen hat bei den Versuchen im Labor bzw. am Stahlbetonrahmen gut funktioniert, doch ist er aufgrund der zu geringen Verarbeitungsgeschwindigkeit des *MicroMag3* für einen wirtschaftlichen Einsatz nicht geeignet.

Mit dem jetzigen Stand der Entwicklung kann die magnetische Streufeldmethode am realen Bauwerk nur unter dem Aspekt eingesetzt werden, andere Untersuchungen zu begleiten und dabei Erfahrungen bei der Durchführung und Auswertung zu sammeln. Verlässliche Aussagen über das Vorhandensein von Brüchen in der Betonstahlbewehrung komplizierterer Bewehrungsanordnungen können bislang nicht angestellt werden.

Zu Beginn einer Untersuchung am realen Bauwerk sollte zunächst die Lage der Bewehrung bestimmt bzw. mit den vorhandenen Plänen abgeglichen werden. Zu diesem Zweck sollte mit der magnetischen Streufeldmethode ein Verfahren entwickelt werden, mit dem die Lage und Orientierung der im Bauwerk vorhandenen Bewehrung vorgängig festgestellt werden kann. Hierzu werden eine grossflächige Magnetisierung der Bewehrung und das messtechnische Erfassen des Magnetfeldes in Bauteillängs- und querrichtung vorgeschlagen.

Bezeichnungen

Abkürzungen

ASIC	Application-Specific Integrated Circuit
ETH Zürich	Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
FE-Methode	Finite-Element-Methode
IBK	Institut für Baustatik und Konstruktion
LabVIEW	Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench
LPT-Stecker	<i>Line-Printing-Terminal</i> -Stecker
MP-Verfahren	Magnetpulver-Verfahren
RM-Verfahren	Remanenzmagnetismus-Verfahren
ZfP	Zerstörungsfreie Prüfverfahren

Lateinische Grossbuchstaben

A	Axialkomponente	[-]
AV	Amplitudenverhältnis	[-]
B	magnetische Induktion	$\left[\frac{\text{N}}{\text{Am}} \triangleq \text{T} \right]$
B_S	technische Sättigung	$\left[\frac{\text{N}}{\text{Am}} \triangleq \text{T} \right]$
B_R	remanente Magnetisierung	$\left[\frac{\text{N}}{\text{Am}} \triangleq \text{T} \right]$
$(BH)_{\text{max}}$	magnetisches Energieprodukt	$\left[\frac{\text{kJ}}{\text{m}^3} \right]$
D	dielektrische Verschiebungsdichte	$\left[\frac{\text{As}}{\text{m}^2} \right]$
D_{AR}	Abstand zwischen den lokalen Extremwerten der Axial- und Radialkomponente	[mm; cm; m]
E	elektrische Feldstärke	$\left[\frac{\text{V}}{\text{m}} \right]$
$F_{\text{inf}}, F_{\text{sup}}$	Unter- bzw. Oberlast	[kN]
ΔF	Kraftdifferenz	[kN]
H	erregendes Feld; magnetische Feldstärke	$\left[\frac{\text{A}}{\text{m}} \right]$
H_S	Sättigungsfeldstärke	$\left[\frac{\text{A}}{\text{m}} \right]$
H_C	Koerzitivfeldstärke	$\left[\frac{\text{A}}{\text{m}} \right]$
I	Stromstärke	[A]
J	Gesamtdrehimpuls	$\left[\frac{\text{kg m}^2}{\text{s}} \right]$
M	Magnetisierung	$\left[\frac{\text{A}}{\text{m}} \right]$
$M_S(0)$	Sättigungsmagnetisierung am absoluten Nullpunkt ($T = 0 \text{ K}$)	$\left[\frac{\text{A}}{\text{m}} \right]$

Bezeichnungen

$\mathbf{M}_S(T)$	spontane Magnetisierung in Abhängigkeit von der Temperatur	$\left[\frac{\text{A}}{\text{m}} \right]$
N	Entmagnetisierungsfaktor	[-]
	Neukurve	[-]
	Dipolanzahl	[-]
\mathbf{L}	Drehimpuls	$\left[\frac{\text{kg m}^2}{\text{s}} \right]$
R	Radialkomponente	[-]
\mathbf{S}	Spindrehimpuls	[-]
$\hat{\mathbf{S}}$	Spinoperator	[-]
SV	Symmetrieverhältnis	[-]
T	Temperatur	[K]
T_c	Curie-Temperatur	[K]
V	Geschwindigkeit	$\left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$
Z	Kernladungs- oder Ordnungszahl	[-]

Lateinische Kleinbuchstaben

b	Breite	[mm; cm; m]
c	Lichtgeschwindigkeit	$\left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$
c_{nom}	Bewehrungsüberdeckung	[mm; cm; m]
\mathbf{d}	Gerichteter Abstand der Ladungen beim Dipol	[mm; cm; m]
d_{MP}	Abstand zwischen zwei Messpunkten	[mm; cm; m]
e	Elementarladung	$[e = -1.602 \cdot 10^{-19} \text{ C}]$
e^-	Elektron	[C]
f	Frequenz	[Hz]
g	Landé-Faktor	$[g = 2.0032]$
h	Höhe	[mm; cm; m]
i, j	Indizes	[-]
l	Bahndrehimpulsquantenzahl	[-]
	Länge	[mm; cm; m]
\mathbf{m}	magnetisches Dipolmoment	$[\text{Am}^2]$
\mathbf{m}_{DV}	magnetisches Dipolmoment pro Volumeneinheit	$\left[\frac{\text{Am}^2}{\text{mm}^3} \right]$
m_e	Elektronenmasse	$[m_e = 9.1094 \cdot 10^{-31} \text{ kg}]$
m_{Fe}	Atommasse von Eisen	[kg]
m_s	Spinquantenzahl	[-]
$m_{R_{\text{max}}R_{\text{min}}}$	Steigung zwischen zwei Extremwerten der Radialkomponente	[-]
min	Minimalwert	[-]
max	Maximalwert	[-]
n	Neutron	[-]
	Anzahl Atome pro Volumeneinheit	[-]
n_S	Spulenanzahl	[-]
p^+	Proton	[C]
p	magnetischer Monopol	$\left[\frac{\text{N}}{\text{Am}} \triangleq \text{T} \right]$

p	Bezeichnung für die 3. Unterschale einer Elektronenschale	[-]
ps	Periodenzahl	[-]
\mathbf{r}, \mathbf{r}'	Ortsvektor des betrachteten Raumpunktes bzw. Ortsvektor des einwirkenden Raumpunktes	[mm; cm; m]
r_e	Elektronenradius	$[r_e = 2.8179 \cdot 10^{-15} \text{ m}]$
s	Elektronenspin	$\left[\pm \frac{1}{2} \right]$
s	Abstand zwischen Bewehrungsstab und Magnet bzw. Sensor	[mm; cm; m]
s_B	Bruchflächenabstand	[mm; cm; m]
s_M	Abstand zwischen Untersicht des Magnetabstandhalters und Magnet	[mm; cm; m]
s_{MP}	Messpunkt Abstand	[mm; cm; m]
$\text{sgn}()$	Signum- oder Vorzeichenfunktion	[-]
t	Zeit	[s]
	Dicke	[mm; cm; m]
$x_{A,i}, x_{R,i}$	Position der Axial- bzw. Radialkomponente	[mm; cm; m]
$\Delta x, \Delta y$	Differentielle Länge der Abszisse bzw. Ordinate	[mm; cm; m]
x, y, z	Koordinatenrichtungen	[mm; cm; m]

Griechische Buchstaben

α	Winkel in der horizontalen Ebene	[°]
ϵ_0	Elektrische Feldkonstante	$\left[\epsilon_0 = 8.8542 \cdot 10^{-12} \frac{\text{As}}{\text{Vm}} \right]$
μ	Permeabilität der Materie; magnetisches Moment	$\left[\frac{\text{N}}{\text{A}^2} \right]$
μ_0	Permeabilität des Vakuums; Induktionskonstante	$\left[\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{N}}{\text{A}^2} \right]$
μ_B	Bohrsches Magneton	$\left[\mu_B = \frac{eh}{2 \cdot m_e} = 9.3 \cdot 10^{-24} \frac{\text{J}}{\text{T}} \right]$
μ_r	relative Permeabilität	[-]
μ_s	magnetisches Moment eines Elektrons	$\left[\mu_s = 9.2847 \cdot 10^{-24} \frac{\text{J}}{\text{T}} \right]$
ρ	Ladungsdichte	$\left[\frac{\text{As}}{\text{m}^3} \right]$
ρ_{Fe}	Dichte von Eisen	$\left[\rho_{Fe} = 7.874 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right]$
$\Delta \sigma_s$	Spannungsdifferenz im Betonstahl	$\left[\frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right]$
χ_m	magnetische Suszeptibilität	[-]

Sonderzeichen

\emptyset	Durchmesser	[mm; cm; m]
\emptyset_{eff}	effektiver Durchmesser	[mm; cm; m]
\hbar	reduziertes Plancksches Wirkungsquantum	$[\hbar = 1.054 \cdot 10^{-34} \text{ Js}]$

Literatur

- [1] Altschuler, E. und Pignotti, A. (1994). *Nonlinear model of flaw detection in steel pipes by magnetic flux leakage*; NDT & E International; Vol. 28; No. 1; pp. 35-40.
- [2] Atherton, D. L. und Daly, M. G. (1987). *Finite element calculation of magnetic flux leakage detector signals*; NDT International; Vol. 20; No. 4; pp. 235-238.
- [3] Babbar, V. und Clapham, L. (2003). *Residual Magnetic Flux Leakage: A Possible Tool for Studying Pipeline Defects*; Journal of Nondestructive Evaluation; Vol. 22; No. 4; pp. 117-125.
- [4] Bergamini, A. und Christen, R. (2003). *A simple Approach to the Localization of Flaws in large Diameter Steel Cables*; Smart Nondestructive Evaluation and Health Monitoring of Structural and Biological Systems II; Vol. 5047; pp. 243-251; <http://dx.doi.org/10.1117/12.484145>.
- [5] Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften (2012). *Magnetismus*; Geyken, A.; Digitales Wörterbuch der deutschen Sprache; Berlin. www.dwds.de.
- [6] Blitz, J. (1991). *Electrical and magnetic methods of nondestructive testing*; IOP Publishing Ltd.; Bristol; 237 pp.
- [7] Braml, T. und Keuser, M. (2009). *Beurteilung der Tragfähigkeit von geschädigten Stahlbetonbrücken auf der Grundlage der Ergebnisse einer Bauwerksprüfung*; Beton- und Stahlbetonbau; Vol. 104; No. 5; pp. 256-267; <http://dx.doi.org/10.1002/best.200900670>.
- [8] Brown, W. F. (1962). *Magnetostatic Principles in Ferromagnetism*; Series on monographs on selected topics in solid state physics; Vol. 1; North-Holland Publishing Company; Amsterdam; 202 pp.
- [9] Brunner, E., et al. (1975). *Biomathematik für Mediziner : Begleittext zum Gegenstandskatalog*; Heidelberger Taschenbücher; Vol. 164; Springer-Verlag; Berlin etc.; 258 pp.
- [10] Burkhardt, M. P. (2006). *Effects of Pulsed Electromagnetic Field (PEMF) Stimulation on Proliferation and Differentiation of Osteoblast-Like Cells In Vitro*; Diploma Thesis; ETH Zürich; Zürich; 42 pp.
- [11] Comsol Multiphysics (2011). Comsol 4.2a; Zurich; Ver. 4.2.1.110; www.comsol.com.
- [12] Demtröder, W. (2010). *Experimentalphysik 3 Atome, Moleküle und Festkörper, 4., überarbeitete Auflage*; Springer-Verlag, Berlin Heidelberg; 650 pp.
- [13] Fehlmann, P., Wolf, T. und Vogel, T. (2011). *Versuche zum Ermüdungsverhalten von Stahlbetonbrücken*; IBK Bericht; No. 332; Institut für Baustatik und Konstruktion; Zürich; 95 pp.; <http://dx.doi.org/10.3929/ethz-a-006598176>.
- [14] Fehlmann, P. (2012). *Zur Ermüdung von Stahlbetonbrücken*; Dissertation; ETH Zürich; Zürich; 157 pp.; <http://dx.doi.org/10.3929/ethz-a-007110386>.
- [15] Förster, F. (1955). *Ein Verfahren zur Messung von magnetischen Gleichfeldern und Gleichfelddifferenzen und seine Anwendung in der Metallforschung und Technik*; Zeitschrift für Metallkunde; Stuttgart; 14 pp.

- [16] Gaydecki, P. A. und Burdekin, F. M. (1994). *An Inductive Scanning System for Two-Dimensional Imaging of Reinforcing Components in Concrete Structures*; Measurement Scientific Technologies; Vol. 5; pp. 1272-1280.
- [17] Heptner, H. und Stroppe, H. (1972). *Magnetische und magnetinduktive Werkstoffprüfung*; VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie; Leipzig; 446 pp.
- [18] Hillemeier, B. und Scheel, H. (1999). *Neue Methoden der zerstörungsfreien Prüfung im Stahlbeton- und Spannbetonbau*; Fachtagung Bauwerksdiagnose - Praktische Anwendungen Zerstörungsfreier Prüfungen; München; 21.-22. Januar 1999.
- [19] Hillemeier, B. und Scheel, H. (2002). *Non-Destructive Location of Prestressing Steel Fractures in Post-Tensioned and Prestressed Concrete*; Transportation Research Board (TRB) Committee A2C03; Washington D.C., USA; January 16, 2002.
- [20] Hillemeier, B. und Scheel, H. (2003). *Location of Prestressing Steel Fractures in Concrete*; Journal of Materials in Civil Engineering; Vol. 15; No. 3; pp. 228-234; [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2003\)15:3\(228\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2003)15:3(228)).
- [21] Hund, F. (1937). *Symmetrieeigenschaften der Kräfte in Atomkernen und Folgen für deren Zustände, insbesondere der Kerne bis zu sechzehn Teilchen*; Zeitschrift für Physik; Vol. 105; No. 3-4; pp. 1-7; <http://dx.doi.org/10.1007/BF01330147>.
- [22] Ilbach, H. und Lüth, H. (2009). *Festkörperphysik: Einführung in die Grundlagen*; Springer; Berlin; 509 pp.
- [23] Jungwirth, D., Beyer, E. und Grübl, P. (1986). *Dauerhafte Betonbauwerke: Substanzerhaltung und Schadensvermeidung in Forschung und Praxis*; Beton-Verlag; Düsseldorf; 255 pp.
- [24] Kloster, A. (2008). *Aufbau einer Entwicklungsplattform für niederfrequente magnetische Prüfverfahren*; Dissertation; Universität des Saarlandes; Saarbrücken; 138 pp.
- [25] Kneller, E. (1962). *Ferromagnetismus*; Springer; Berlin; 792 pp.
- [26] Kohlrausch, F. (1996). *Praktische Physik - Zum Gebrauch für Unterricht, Forschung und Technik*; B. G. Teubner; Stuttgart; 894 pp.
- [27] Krause, H.-J. (2000). *Application of HTS SQUIDS in Nondestructive Evaluation of Aircraft Parts and Concrete Bridges*; Future Perspectives of Superconducting Josephson Devices; Acquafredda di Maratea; July 1-6, 2000.
- [28] Krieger, J. (1995). *Anwendung von zerstörungsfreien Prüfmethoden bei Betonbrücken*; Brücken- und Ingenieurbau; Heft B 9; Bundesanstalt für Straßenwesen; Bremerhaven; 60 pp.
- [29] Kusenberger, F. N., Lozano, A. S. und Tarver, W. B. (1985). *Magnetic Inspection of Reinforcing Steel using Sensor Array*; United States of America; Patent Number: 4,531,091; 21 pp.; <http://www.freepatentsonline.com/4531091.html>.
- [30] Leuchtman, P. (2005). *Einführung in die elektromagnetische Feldtheorie*; Pearson Studium; 608 pp.
- [31] Leuzinger, A. (2010). *Magneto-Inductive Technology - Overview*; Santa Rosa; PNI Sensor Corporation; 5 pp.
- [32] Lüthi, T. (2008). *Zerstörungsfreie Prüfmethoden*; Dübendorf. http://www.empa.ch/plugin/template/empa/*/8937 (08. November 2012).

- [33] Makar, J. M. und Desnoyers, R. (2001). *Magnetic Field Technique for the Inspection of Steel Under Concrete Cover*; NDT&E International; Vol. 34; No. 7; pp. 445-456.
- [34] McCrea, A., Chamberlain, D. und Navon, R. (2001). *Automated inspection and restoration of steel bridges—a critical review of methods and enabling technologies*; Automation in Construction; Vol. 11; pp. 351-373.
- [35] Meyer, H. W. (1971). *A history of electricity and magnetism*; MIT Press; Cambridge; 325 pp.
- [36] Mietz, J. und Fischer, J. (2005). *Verifizierung zerstörungsfreier Prüfverfahren zur Detektion von Spannstahlschäden an Spannbetonbauteilen mit nachträglichem Verbund*; Beton- und Stahlbetonbau; Vol. 100; No. 8; pp. 656-663.
- [37] Miyagawa, T., et al. (2006). *Fracture of Reinforcing Steels in Concrete Structures Damaged by Alkali-Silica Reaction -- Field Survey, Mechanism and Maintenance*; Journal of Advanced Concrete Technology; Vol. 4; No. 3; pp. 1-17; <http://dx.doi.org/10.3151/jact.4.339>.
- [38] Muslih, I. M. A. (2005). *Electromagnetic Nondestructive Inspection of Aircraft Structures by Using a Magnetic Flux Leakage Method*; Dissertation; West Virginia University; Morgantown; 153 pp.
- [39] Pak, C.-I. (2010). *Optimierung des Remanenzmagnetismus-Verfahrens zur Stahlbruchortung in Bauwerken – Theoretische Weiterentwicklung*; Dissertation; Technische Universität Berlin; Berlin; 170 pp.
- [40] Pauli, W. E. (1940). *The Connection between Spin and Statistics*; Physical Review; Vol. 58; pp. 716-723.
- [41] Peterson, R. A., Heckle, D. F. und Clarke, J. E. (1946). *Magnetic Particle Inspection - Apparatus and Method*; USA; United States Patent Office; 6 pp.
- [42] PNI Sensor-Corporation (2009). *SmartSens MICROMAG 3*; <http://www.pnicorp.com/products/>.
- [43] Quek, S., et al. (2008). *Modeling Studies on the Development of a System for Real-Time Magnetic-Field Imaging of Steel Reinforcing Bars Embedded Within Reinforced Concrete*; IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement; Vol. 57; No. 3; pp. 571-576; <http://dx.doi.org/10.1109/TIM.2007.911620>.
- [44] Sawade, G. (1999). *Numerische Modellierung der magnetischen Streufeldmessung zur Ortung von Spannstahlbrüchen*; Werkstoffe und Werkstoffprüfung im Bauwesen; Stuttgart; pp. 338-351.
- [45] Sawade, G. und Krause, H.-J. (2007). *Inspection of Prestressed Concrete Members using the Magnetic Leakage Flux Measurement Method - Estimation of Detection Limit*; Advances in Construction Materials; Springer; Berlin Heidelberg; pp. 639-649.
- [46] Scheel, H. (1997). *Spannstahlbruchortung an Spannbetonbauteilen mit nachträglichem Verbund unter Ausnutzung des Remanenzmagnetismus*; Dissertation; Technische Universität Berlin; Berlin; 202 pp.
- [47] Scheel, H. und Hillemeier, B. (1997). *Capacity of the Remanent Magnetism Method to Detect Fractures of Steel in Tendons Embedded in Prestressed Concrete*; NDT&E International; Vol. 30; No. 4; pp. 211-216.
- [48] Scheel, H. (2006). *Spanndrahtbruchortung mit der magnetischen Streufeldmethode*; Beton- und Stahlbetonbau; Vol. 101; No. 8; pp. 614-621; <http://dx.doi.org/10.1002/best.200600490>.

- [49] Scholze-Stubenrecht, W. (2006). *Die deutsche Rechtschreibung*; Duden; Mannheim Leipzig Wien Zürich; 1216 pp.
- [50] Smith, J. A. (1992). *Precursors to Peregrinus: The early history of magnetism and the mariner's compass in Europe*; Journal of Medieval History; Vol. 18; pp. 21-74.
- [51] Szielasko, K., et al. (2006). *High-Speed, High-Resolution Magnetic Flux Leakage Inspection of Large Flat Surfaces*; EC NDT; Berlin; September 25-29, 2006.
- [52] Tipler, P. A. und Mosca, G. (2004). *Physik - Für Wissenschaftler und Ingenieure*; Elsevier GmbH; München; 1388 pp.
- [53] Tumanski, S. (2007). *Induction coil sensors - a review*; Measurement Science and Technology; Vol. 18; pp. 1-16; <http://dx.doi.org/10.1088/0957-0233/18/3/R01>.
- [54] Verschuur, G. L. (1993). *Hidden Attraction*; Oxford University Press; New York; 256 pp.
- [55] Virmani, P. (2000). *Magnetic-Based NDE of Prestressed and Post-Tensioned Concrete Members - The MFL System*; Federeal Highway Administration; Lanham; 4 pp.
- [56] Weiss, P. (1907). *L'hypothèse du champ moléculaire et la propriété ferromagnétique*; Journal de Physique Théorique et Appliquée; Vol. 6; No. 1; pp. 661-690; <http://dx.doi.org/10.1051/jphystap:019070060066100>.
- [57] Wieser, M. E. und Coplen, T. B. (2010). *Atomic weights of the elements 2009 (IUPAC Technical Report)*; Pure Appl. Chem.; Vol. 83; No. 2; pp. 359-396; <http://dx.doi.org/10.1351/PAC-REP-10-09-14>.
- [58] Zijlstra, H. (1967). *Experimental Methods in Magnetism*; Series of monographs on selected topics in solid state physics; Vol. 9; North-Holland Publishing Company; Amsterdam; 236 pp.

Dank

Zunächst schulde ich meinem Referenten und Betreuer Prof. Thomas Vogel für seine Unterstützung, den energischen Diskussionen und nicht zuletzt den mir gewährten grossen Freiheiten während der Realisierung meiner Forschungsarbeit Dank. Prof. Dr. Masoud Motavalli danke ich für das fachliche Gespräch sowie die Übernahme des Korreferats.

Allen Kolleginnen und Kollegen am Institut für Baustatik und Konstruktion möchte ich meinen Dank aussprechen, da ich durch Euch eine sehr angenehme Zeit an der ETH erleben durfte und Ihr mir in fachlichen Diskussionen ermöglicht habt, dazuzulernen. Von Beginn an haben mich die Herren Doktoren Stephan Fricker und Kris Schellenberg am Institut bzw. auf den langen Autobahnfahrten durch die Weitergabe ihrer Erfahrungen fachlich unterstützt und mir den Einstieg ins Doktorat stark erleichtert. Ein ganz besonderer Dank gebührt meinem langjährigen Zimmerkollegen Dr. Patrick Fehlmann, der mich erst auf das Forschungsthema stiess. Die Diskussionen über Versuche und Vektorgraphiken, die wir sowohl im Büro wie auch auf schmalen Pneus führten, werden mir stets in bester Erinnerung bleiben. Für die vielen Anregungen zu den Diagrammen bin ich Dr. Georg Kocur sehr dankbar. Ein Dank für die gute Zusammenarbeit, aber auch den Berichten aus ihren Heimatländern gilt Dr. Sara Ghadimi und Amr Abdellah. Neben dem fachlichen Austausch, haben Gosia Kalicka und Christina Röthlin durch ihre eigene Themenwahl stets für kurzweilige Kaffeepausen gesorgt. Ich danke euch ganz lieb dafür. Emil Honegger hatte immer ein offenes Ohr für mich, wenn es um Fragen des Layouts und der Graphiken ging. Renate Amatore war stets eine grosse Hilfe bei der administrativen Betreuung. Euch beiden danke ich ebenfalls ganz herzlich.

Beim Bau des Messsystems hat mir Dominik Werne mit seinen Ideen und seiner Unterstützung sehr geholfen, weshalb auch Ihm mein Dank gilt. Heutzutage geht nichts mehr ohne Soft- und Hardware, daher bin ich Roberto Pascolo für die sehr gute IT-Betreuung und manch gutem Rat aus diesem Metier überaus dankbar.

Dr. Pascal Leuchtmann wie auch Patrick Leidenberger danke ich für die von Ihnen zur Verfügung gestellte Zeit, in der Sie mir die physikalischen Grundlagen des Elektromagnetismus erklärten.

Für die Teilfinanzierung dieses Forschungsprojekts schulde ich dem Bundesamt für Strassen (ASTRA) ebenfalls Dank.

Bei der Übersetzung der Kurzfassung ins Englische hat mir Clare Burns sprachlich sehr gute Dienste geleistet, wofür ich mich herzlich bei ihr bedanke.

Mein liebster Dank geht an meine Partnerin Doreen, die mich neben der Arbeit stets unterstützte und mich motiviert hat, wenn mich Selbstkritik überkam.

All diejenigen, die zur Entstehung der Arbeit beigetragen haben und hier nicht explizit aufgeführt sind, sei dennoch mein Dank gewiss.

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name: Thomas Wolf
Geburtsdatum: 18. September 1980
Geburtsort: Templin
Nationalität: Deutsch

Ausbildung

1987 – 1993 Grund- und Gesamtschule Templin
1993 – 2000 Gymnasium Templin
10.2000 – 09.2006 Studium des Bauingenieurwesens an Universität Rostock
Abschluss: Diplomingenieur Bauwesen
seit 09.2007 Doktoratsstudium am Departement Bau, Umwelt und Geomatik der
ETH Zürich

Berufliche Tätigkeit

08.2000 – 09.2001 Verschiedene Praktika bei der Dachdecker GmbH Templin
09.2004 Praktikum beim Ingenieurbüro für Hoch- und Tiefbau U. Wolf
10.2006 – 08.2007 Wissenschaftliche Hilfskraft an der Universität Rostock
seit 09.2007 Wissenschaftlicher Mitarbeiter und Assistent am Institut für Baustatik und
Konstruktion der ETH Zürich beim Lehrstuhl Konstruktion und Erhaltung
von Prof. Thomas Vogel

Anhang A Kenndaten der verwendeten Geräte

Vom Hersteller sind folgende Daten über die Scheibenmagnete bekannt.

Typ:	Scheibenmagnet	
Anzahl:	5	
\varnothing :	35	[mm]
t :	20	[mm]
m :	150	[G]
Werkstoff:	NdFeB	
Beschichtung:	Ni-Cu-Ni	
B_R :	1.32 – 1.37	[N/Am]
iH_C :	≥ 955	[kA/m]
$(BH)_{max}$:	342 – 358	[N/m ²]

Tab. A.1 Daten der Magnete.

Vom Hersteller sind folgende Daten über den *MicroMag3* bekannt.

Typ:	Dreiaxiales Magnetometer	
Sensoren:	Induktionsspulen	
Anzahl Sensoren:	3	
Spannung:	5.25	[V]
Messbereich:	$\pm 1'100$	[μ T]
Auflösung:	0.015	[μ T]
Datenstrom:	Digital	

Tab. A.1 Daten des *MicroMag3*.

Periodenanzahl	ASIC [-]	Verstärkung [Counts/ μ T]	Auflösung [μ T]	typ. Abtastzeit [ms]	Kommentar
/32	0	0.523	1.912	0.366	
/64	1	1.047	0.956	0.731	
/128	2	2.094	0.478	1.460	
/256	3	4.188	0.239	2.850	
/512	4	8.375	0.120	5.650	Verwendete Einstellung
/1024	5	16.750	0.060	11.700	
/2048	6	33.500	0.030	23.400	
/4096	7	67.000	0.015	46.800	

Tab. A.2 Wählbare Periodenanzahl (nach *PNI* [42])

Vom Hersteller sind folgende Daten über den Drehgeber bekannt.

Typ:	Drehgeber	
Bezeichnung:	DG 34 AK 2000x24 L C20	
Spannung:	5	[V]
Stromverbrauch:	max. 30	[mA]
Impulse/U:	max. 2000	
Abtastfrequenz:	max. 20	[kHz]
Abtastung:	optisch	

Tab. A.1 Daten des Drehgebers

Anhang B Magnetfeldsimulationen

Die Tabellen B.1 bis B.2 zeigen die für die Magnetfeldsimulationen verwendeten Eingabeparameter. Die Simulationen sind in den Bildern 2.11 und 2.12 hinterlegt.

Comsol bietet zu verschiedenen Themenschwerpunkten Anleitungen an, die Schritt für Schritt erklären, wie man zur entsprechenden Simulation gelangt. In Anlehnung an eine solche Anleitung, die sich der Kraftwirkung eines U-förmigen Permanentmagneten auf ein Eisenstück widmet, wurde die Simulationen für die hier benötigten Bewehrungsstäbe erstellt. Diese Anleitung sind nur für registrierte Benutzer verfügbar. In der Anleitung ist ebenfalls festgehalten, welche physikalischen Grundlagen dazu verwendet wurden. Im Folgenden werden diese in Kurzform wiedergegeben.

Zunächst wird davon ausgegangen, dass der betrachtete Raum stromfrei ist, womit Gleichung (B.1) gilt. Dann wird ein skalares magnetisches Potential V_m eingeführt (vgl. Gleichung (B.2)).

$$\nabla \times \mathbf{H} = 0 \tag{B.1}$$

$$\mathbf{H} = -\nabla V_m \tag{B.2}$$

Mit der Verwendung von Gleichung (2.6) und (2.7) ist es dann möglich das magnetische Potential zu bestimmen, wie es in Gleichung (B.3) zu finden ist.

$$-\nabla \cdot (\mu_0 \nabla V_m - \mu_0 \mathbf{M}_0) = 0 \tag{B.3}$$

<i>Intakt</i> Geometry	<p>Cylinder</p> <table border="1"> <tbody> <tr> <td>Radius</td> <td>0.005 m</td> </tr> <tr> <td>Height</td> <td>1.000 m</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Position</td> </tr> <tr> <td>x</td> <td>0.0 m</td> </tr> <tr> <td>y</td> <td>0.0 m</td> </tr> <tr> <td>z</td> <td>-0.5 m</td> </tr> </tbody> </table>	Radius	0.005 m	Height	1.000 m	Position		x	0.0 m	y	0.0 m	z	-0.5 m	<p>Block</p> <table border="1"> <tbody> <tr> <td>Width</td> <td>1.5 m</td> </tr> <tr> <td>Depth</td> <td>1.0 m</td> </tr> <tr> <td>Height</td> <td>4.0 m</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Position</td> </tr> <tr> <td>Base</td> <td>Center</td> </tr> <tr> <td>x</td> <td>0.0 m</td> </tr> <tr> <td>y</td> <td>0.0 m</td> </tr> <tr> <td>z</td> <td>0.0 m</td> </tr> </tbody> </table>	Width	1.5 m	Depth	1.0 m	Height	4.0 m	Position		Base	Center	x	0.0 m	y	0.0 m	z	0.0 m													
	Radius	0.005 m																																									
Height	1.000 m																																										
Position																																											
x	0.0 m																																										
y	0.0 m																																										
z	-0.5 m																																										
Width	1.5 m																																										
Depth	1.0 m																																										
Height	4.0 m																																										
Position																																											
Base	Center																																										
x	0.0 m																																										
y	0.0 m																																										
z	0.0 m																																										
<i>Gebrochen</i> Geometry	<p>Cylinder 1</p> <table border="1"> <tbody> <tr> <td>Radius</td> <td>0.005 m</td> </tr> <tr> <td>Height</td> <td>0.5 m</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Position</td> </tr> <tr> <td>x</td> <td>0.0 m</td> </tr> <tr> <td>y</td> <td>0.0 m</td> </tr> <tr> <td>z</td> <td>0.00125 m</td> </tr> </tbody> </table>	Radius	0.005 m	Height	0.5 m	Position		x	0.0 m	y	0.0 m	z	0.00125 m	<p>Cylinder 2</p> <table border="1"> <tbody> <tr> <td>Radius</td> <td>0.005 m</td> </tr> <tr> <td>Height</td> <td>0.5 m</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Position</td> </tr> <tr> <td>x</td> <td>0.0 m</td> </tr> <tr> <td>y</td> <td>0.0 m</td> </tr> <tr> <td>z</td> <td>-0.50125 m</td> </tr> </tbody> </table>	Radius	0.005 m	Height	0.5 m	Position		x	0.0 m	y	0.0 m	z	-0.50125 m	<p>Block</p> <table border="1"> <tbody> <tr> <td>Width</td> <td>1.5 m</td> </tr> <tr> <td>Depth</td> <td>1.0 m</td> </tr> <tr> <td>Height</td> <td>4.0 m</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Position</td> </tr> <tr> <td>Base</td> <td>Center</td> </tr> <tr> <td>x</td> <td>0.0 m</td> </tr> <tr> <td>y</td> <td>0.0 m</td> </tr> <tr> <td>z</td> <td>0.0 m</td> </tr> </tbody> </table>	Width	1.5 m	Depth	1.0 m	Height	4.0 m	Position		Base	Center	x	0.0 m	y	0.0 m	z	0.0 m
Radius	0.005 m																																										
Height	0.5 m																																										
Position																																											
x	0.0 m																																										
y	0.0 m																																										
z	0.00125 m																																										
Radius	0.005 m																																										
Height	0.5 m																																										
Position																																											
x	0.0 m																																										
y	0.0 m																																										
z	-0.50125 m																																										
Width	1.5 m																																										
Depth	1.0 m																																										
Height	4.0 m																																										
Position																																											
Base	Center																																										
x	0.0 m																																										
y	0.0 m																																										
z	0.0 m																																										

Tab. B.1 Comsol-Einstellungen für die Geometrien.

<i>Intakt</i> Mesh	Size	Predefined	Finer
	Free Tetrahedral - Size		
	Geometric entity level	Domain	
	Selection	Manual	2
	Element Size Parameters	Maximum element size	0.0035 m
<i>Gebrochen</i> Mesh	Size	Predefined	Finer
	Free Tetrahedral - Size		
	Geometric entity level	Domain	
	Selection	Manual	2, 3
	Element Size Parameters	Maximum element size	0.0035 m

Tab. B.2 Comsol-Einstellungen für die Vernetzung.

<i>Intakt</i> Materials	Luft			
	Geometric entity level	Domain		
	Selection	Manual		1
	Material Contents	Relative permeability	mur	1
<i>Gebrochen</i> Materials	Eisen			
	Geometric entity level	Domain		
	Selection	Manual		2
	Material Contents	Relative permeability	mur	5000
<i>Intakt</i> Materials	Luft			
	Geometric entity level	Domain		
	Selection	Manual		1
	Material Contents	Relative permeability	mur	1
<i>Gebrochen</i> Materials	Eisen			
	Geometric entity level	Domain		
	Selection	Manual		2, 3
	Material Contents	Relative permeability	mur	5000

Tab. B.3 Comsol-Einstellungen für die Materialien.

<i>Intakt</i> Magnetic Fields No Currents (mfnc)	Magnetic Flux Conservation 2		
	Selection	Manual	2
	Magnetic Field		Magnetization
		x	0 A/m
		y	0 A/m
		z	200000 A/m
Zero Magnetic Scalar Potential			
Selection	Manual	1, 2, 3, 4, 5, 12	
<i>Gebrochen</i> Magnetic Fields No Currents (mfnc)	Magnetic Flux Conservation 2		
	Selection	Manual	2, 3
	Magnetic Field		Magnetization
		x	0 A/m
		y	0 A/m
		z	430000 A/m
Zero Magnetic Scalar Potential			
Selection	Manual	1, 2, 3, 4, 5, 18	

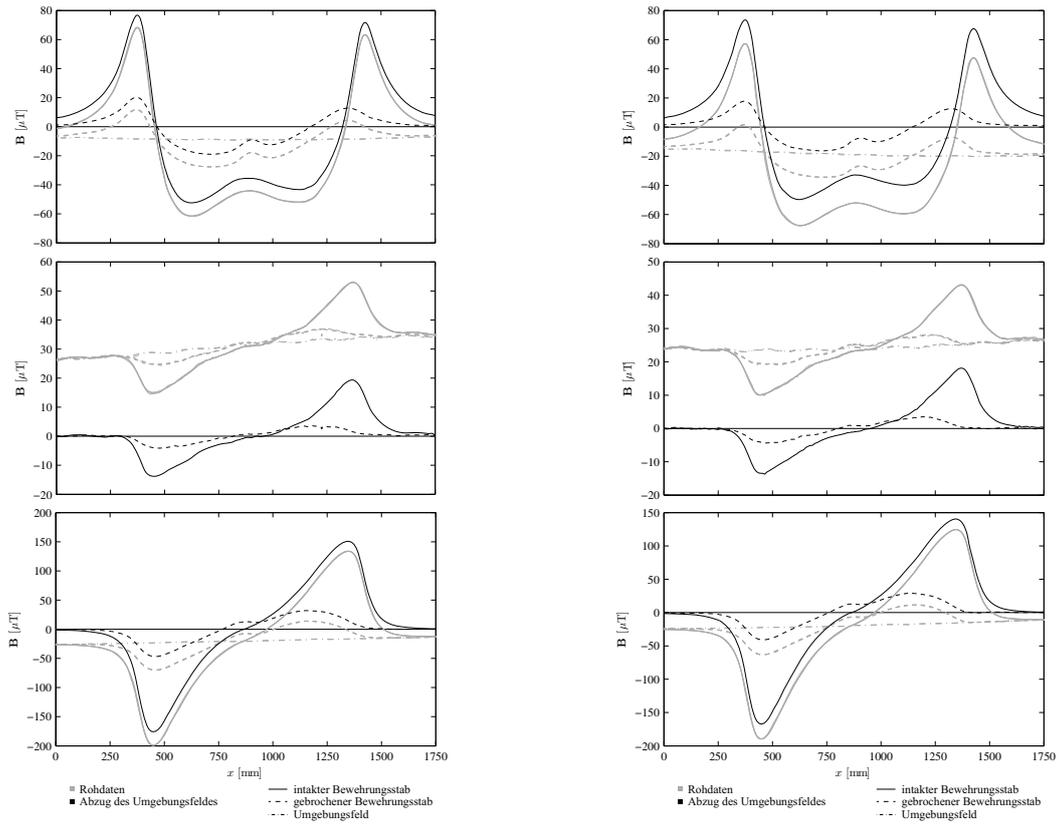
Tab. B.4 Comsol-Einstellungen für die Magnetfelder.

Anhang C Umgebungsfelder

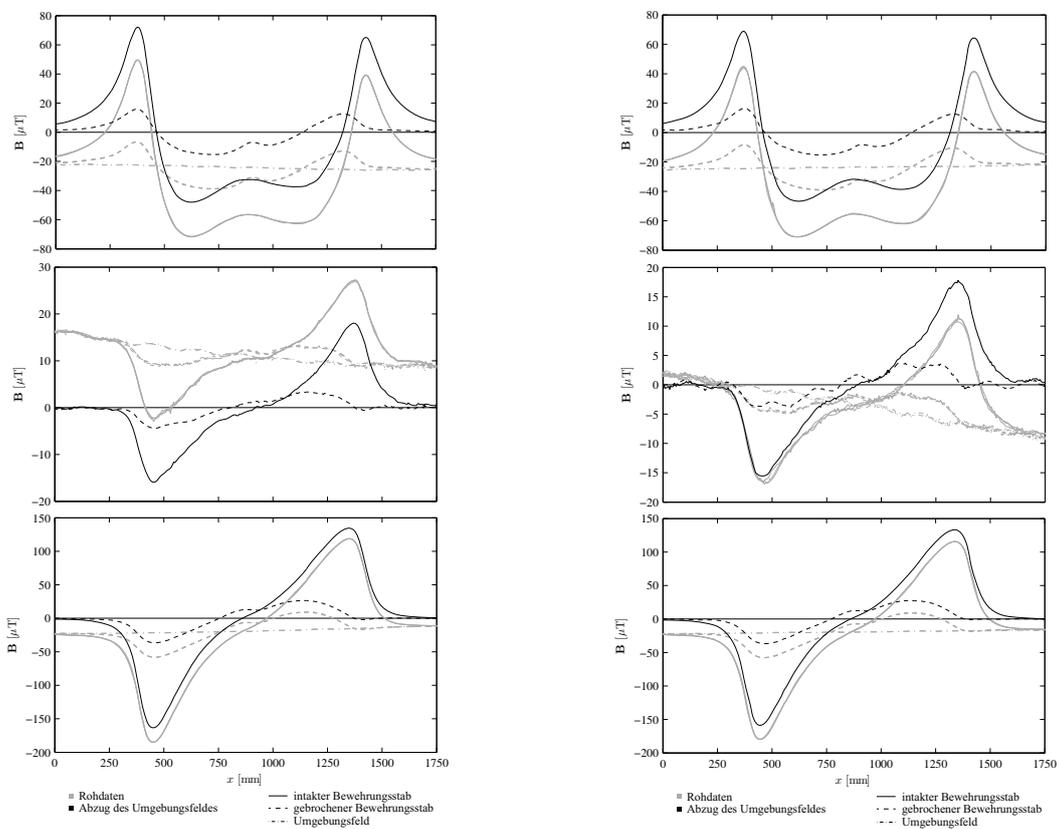
Nachfolgend sind die Messungen mit der magnetischen Streufeldmethode zur Erfassung der Umgebungsfelder für die zwölf Richtungen (vgl. Bild 3.6) in aufbereiteter Form dargestellt.

Von oben nach unten sind die Messungen der axialen, tangentialen und radialen Magnetfeldkomponenten dargestellt.

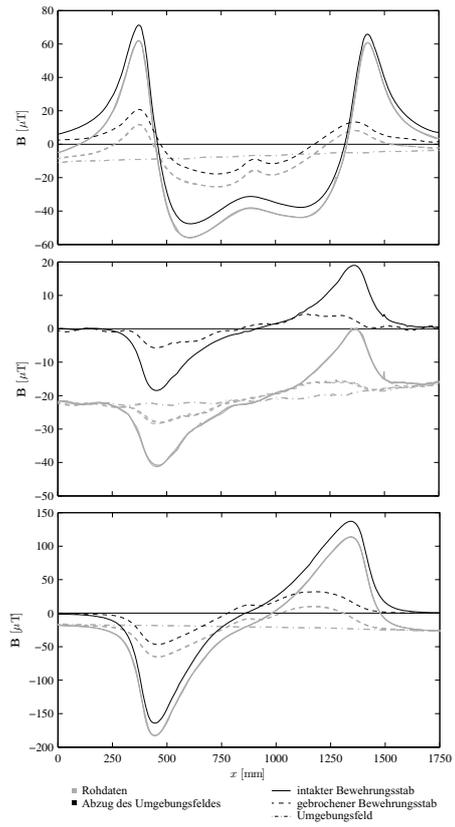
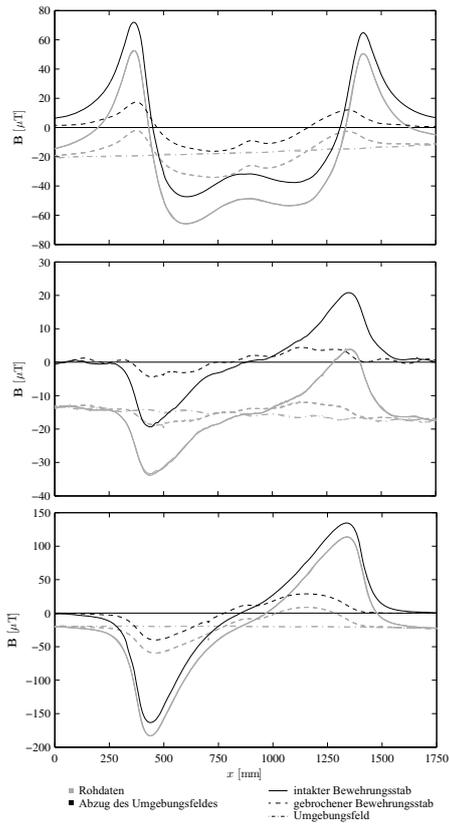
Messresultate für 0° und 30°



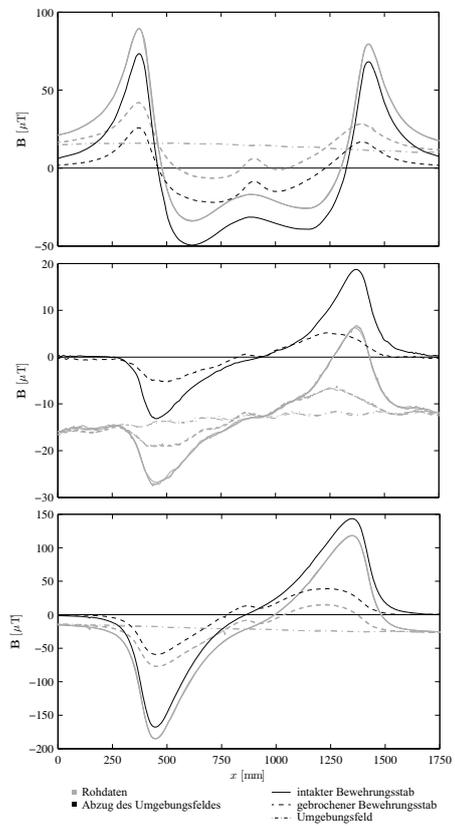
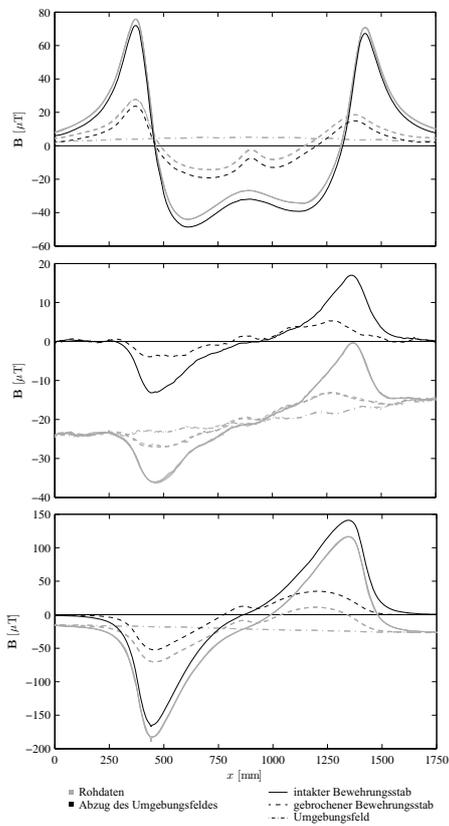
Messresultate für 60° und 90°



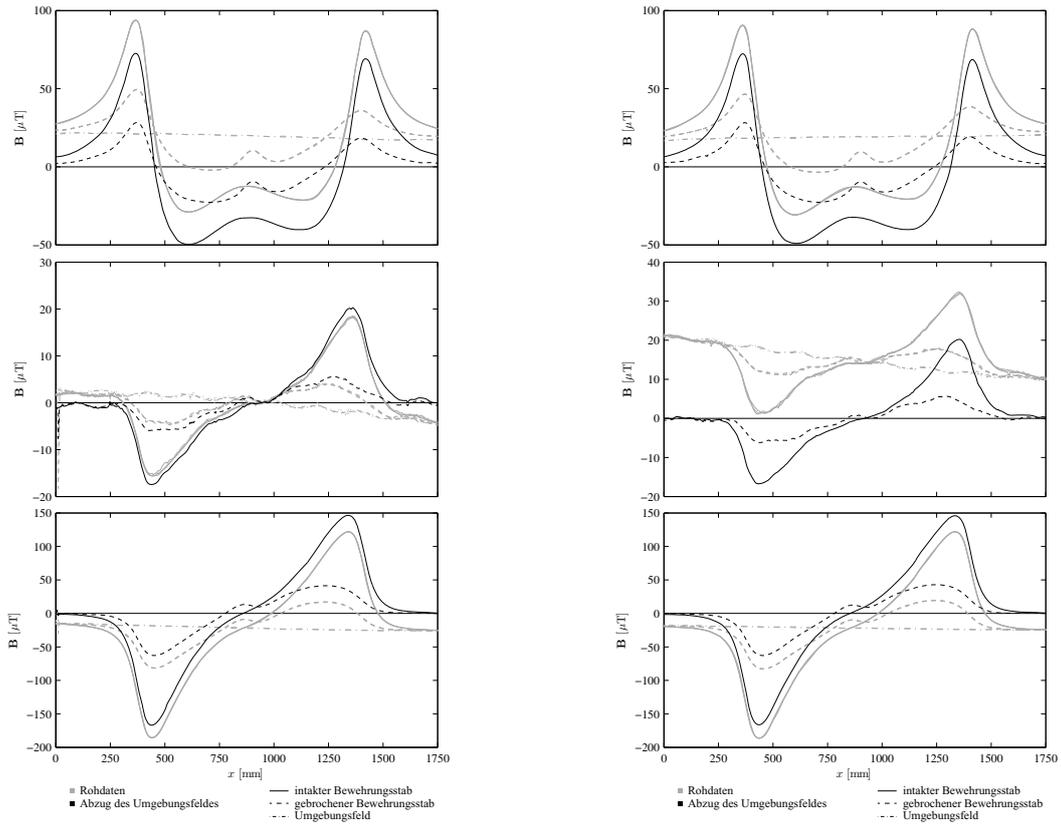
Messresultate für 120° und 150°



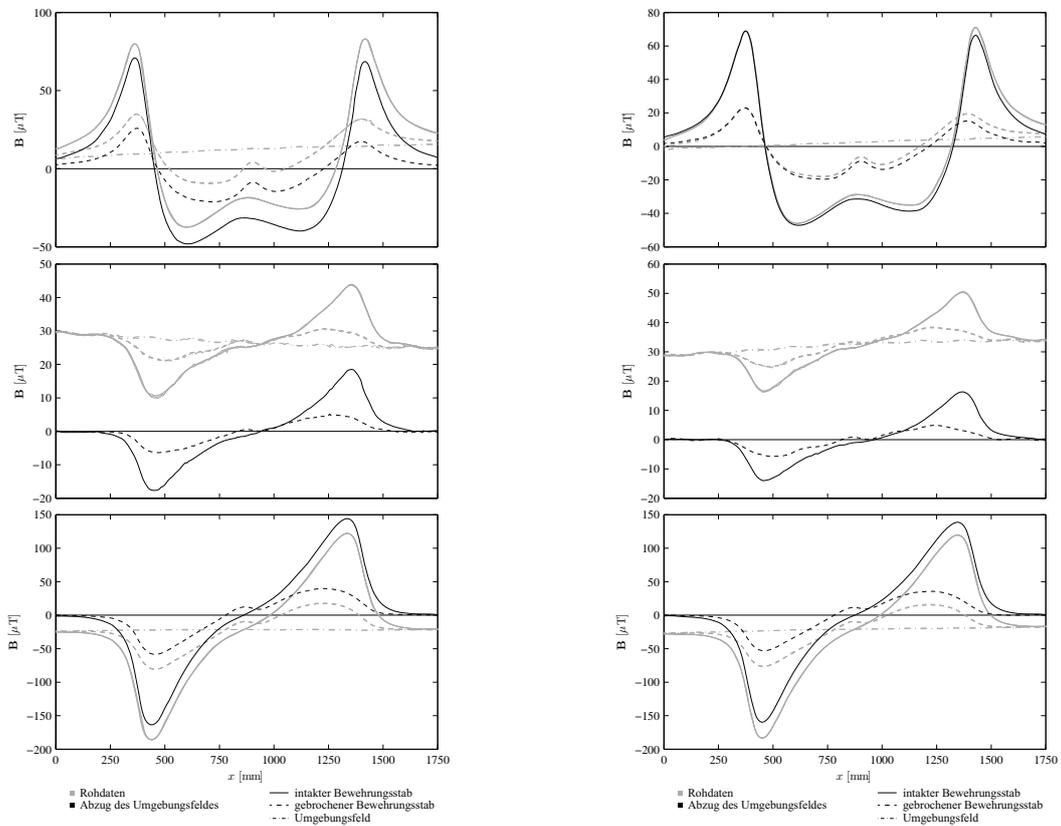
Messresultate für 180° und 210°



Messresultate für 240° und 270°



Messresultate für 300° und 330°

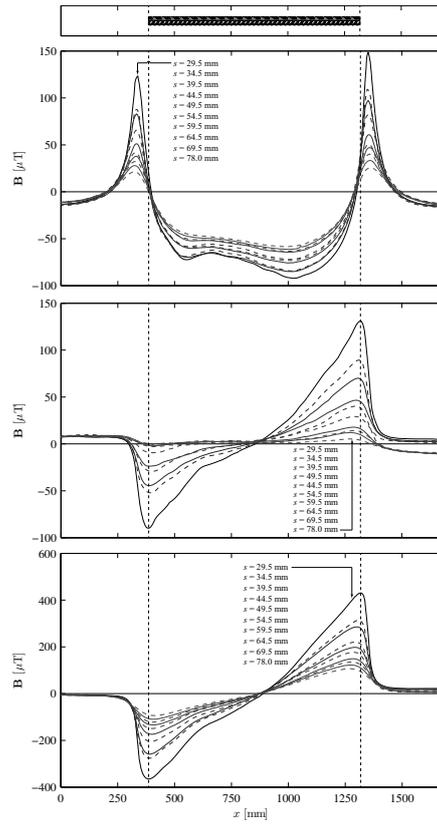
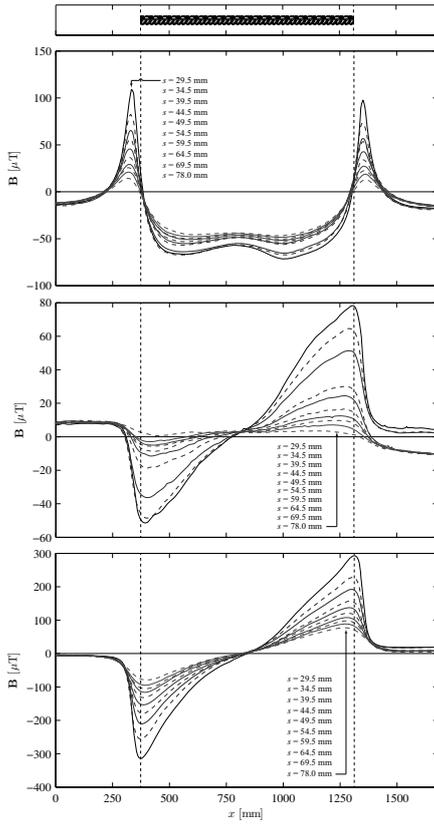


Anhang D Abstandsverhalten

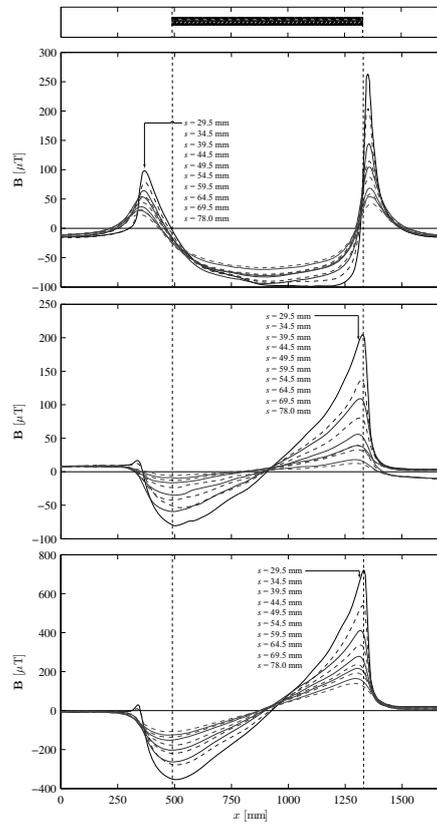
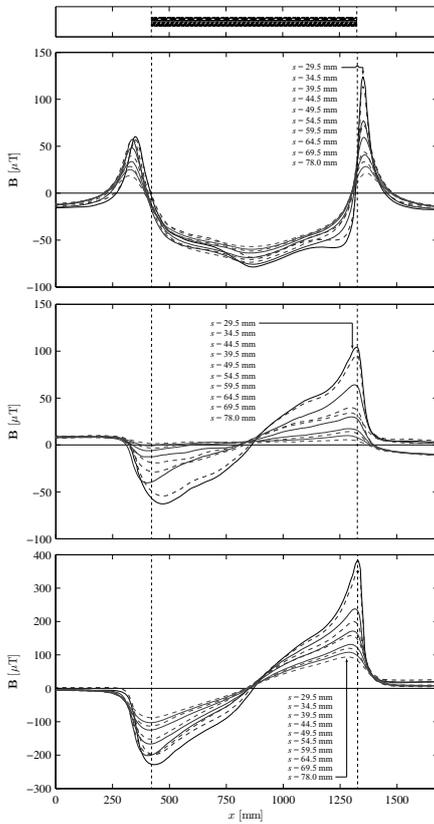
Im Folgenden sind die Messresultate für die Durchmesser $\varnothing = 6-12$ mm gezeigt, in denen der Einfluss des Abstandes zwischen *MicroMag3* und Bewehrungsstab veranschaulicht wird. Nähere Informationen sind in Kapitel 4.1.1 zu finden.

Von oben nach unten sind die Messungen der axialen, tangentialen und radialen Magnetfeldkomponenten dargestellt.

Messresultate für die Stabdurchmesser $\varnothing = 6 \text{ mm}$ und $\varnothing = 8 \text{ mm}$



Messresultate für die Stabdurchmesser $\varnothing = 10 \text{ mm}$ und $\varnothing = 12 \text{ mm}$

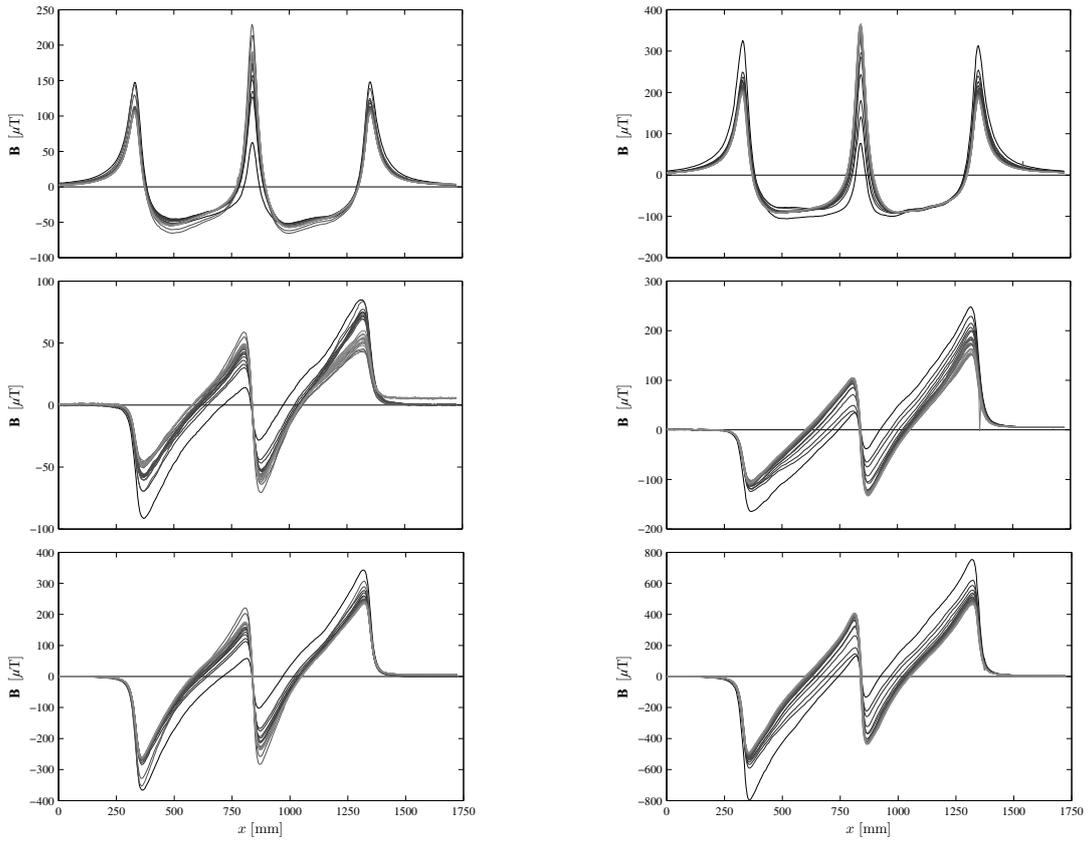


Anhang E Bruchflächenabstand

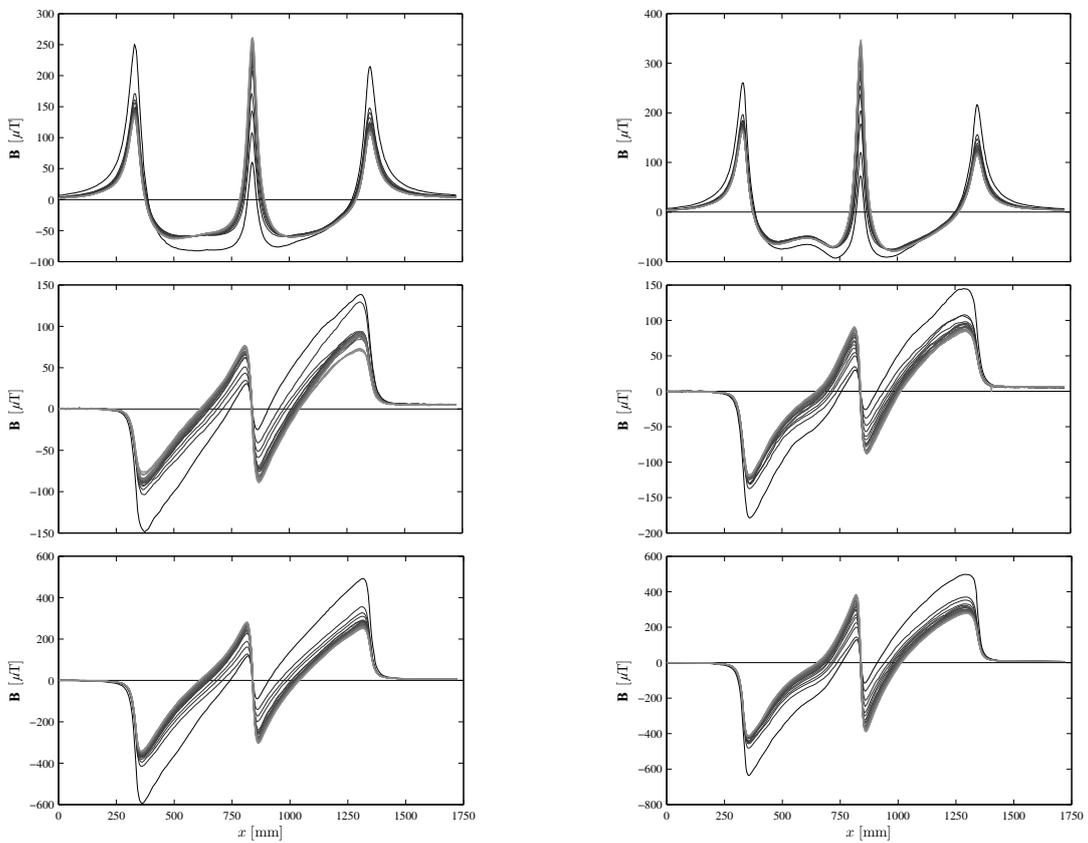
Dieses Kapitel zeigt die Messresultate für die Stabdurchmesser $\varnothing = 6-12$ mm, die den Einfluss des Bruchflächenabstandes widerspiegeln.

Von oben nach unten sind die Messungen der axialen, tangentialen und radialen Magnetfeldkomponenten dargestellt.

Messresultate für die Stabdurchmesser $\varnothing = 6$ mm und $\varnothing = 8$ mm



Messresultate für die Stabdurchmesser $\varnothing = 10$ mm und $\varnothing = 12$ mm



Anhang F Bruchsignale

Nachstehend sind die aus einer Messung hervorgegangenen Bruchsignale dargestellt. Die schwarze durchgezogene Linie zeigt die Messresultate nach Abzug des Umgebungsfeldes.

Von oben nach unten sind die Messungen der axialen, tangentialen und radialen Magnetfeldkomponenten dargestellt.

