



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni DATEC

Bundesamt für Strassen
Office fédéral des routes
Ufficio federale delle Strade

Detektion von Betonstahl- brüchen mit der magnetischen Streifelfeldmethode

**Détection de ruptures dans l'armature avec la méthode
de contrôle par flux de fuite magnétique**

**Detection of reinforcement breaks with the magnetic flux
leakage method**

**Eidgenössische Technische Hochschule, Zürich
Institut für Baustatik und Konstruktion (IBK)
Dr. Thomas Wolf, Dipl.-Ing.
Prof. Thomas Vogel, dipl. Bauing. ETH/SIA**

**Forschungsauftrag AGB 2009/006 auf Antrag der
Arbeitsgruppe Brückenforschung (AGB)**

Der Inhalt dieses Berichtes verpflichtet nur den (die) vom Bundesamt für Strassen beauftragten Autor(en). Dies gilt nicht für das Formular 3 «Projektabschluss», welches die Meinung der Begleitkommission darstellt und deshalb nur diese verpflichtet.

Bezug: Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Le contenu de ce rapport n'engage que l' (les) auteur(s) mandaté(s) par l'Office fédéral des routes. Cela ne s'applique pas au formulaire 3 «Clôture du projet», qui représente l'avis de la commission de suivi et qui n'engage que cette dernière.

Diffusion: Association suisse des professionnels de la route et des transports (VSS)

Il contenuto di questo rapporto impegna solamente l' (gli) autore(i) designato(i) dall'Ufficio federale delle strade. Ciò non vale per il modulo 3 «conclusione del progetto» che esprime l'opinione della commissione d'accompagnamento e pertanto impegna soltanto questa.

Ordinazione: Associazione svizzera dei professionisti della strada e dei trasporti (VSS)

The content of this report engages only the author(s) commissioned by the Federal Roads Office. This does not apply to Form 3 «Project Conclusion» which presents the view of the monitoring committee.

Distribution: Swiss Association of Road and Transportation Experts (VSS)



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni DATEC

Bundesamt für Strassen
Office fédéral des routes
Ufficio federale delle Strade

Detektion von Betonstahl- brüchen mit der magnetischen Streifelfeldmethode

**Détection de ruptures dans l'armature avec la méthode
de contrôle par flux de fuite magnétique**

**Detection of reinforcement breaks with the magnetic flux
leakage method**

**Eidgenössische Technische Hochschule, Zürich
Institut für Baustatik und Konstruktion (IBK)
Dr. Thomas Wolf, Dipl.-Ing.
Prof. Thomas Vogel, dipl. Bauing. ETH/SIA**

**Forschungsauftrag AGB 2009/006 auf Antrag der
Arbeitsgruppe Brückenforschung (AGB)**

Impressum

Forschungsstelle und Projektteam

Projektleitung
Prof. Thomas Vogel

Mitglieder
Dr. Thomas Wolf

Begleitkommission

Präsident
Dr. Martin Käser

Mitglieder
Dr. Fritz Hunkeler
Dr. Walter Kaufmann
Prof. Dr. Albin Kenel
Dr. Manuel Alvarez
Dr. Kerstin Pfyl-Lang

Antragsteller

Arbeitsgruppe der Brückenforschung (AGB)

Bezugsquelle

Das Dokument kann kostenlos von <http://www.mobilityplatform.ch> heruntergeladen werden.

Inhaltsverzeichnis

	Impressum	4
	Zusammenfassung	7
	Résumé	9
	Summary	11
1	Einleitung	13
1.1	Hintergrund für die Untersuchungen	13
1.2	Projektziele	13
1.3	Begleitkommission	14
2	Grundlagen	15
2.1	Stand des Wissens und der Entwicklung	15
2.2	Magnetismus	17
2.2.1	Geschichte des Magnetismus	17
2.2.2	Physikalische Grundlagen	19
2.2.3	Magnetfelder	26
2.3	Magnetische Streufeldmethode	28
2.3.1	Prozedere	28
2.3.2	Magnet	30
2.3.3	Sensor	30
2.3.4	Kalibrierung	32
2.3.5	Messwagen mit Drehgeber	33
2.3.6	Datenerfassung	34
2.3.7	Messwertcharakteristika	37
3	Versuche	41
3.1	Vorversuche	41
3.1.1	Intakter und gebrochener Einzelstab	41
3.1.2	Bewehrungslayouts	42
3.1.3	Gegenüberstellung von Ermüdungs- und Verformungsbrüchen	44
3.2	Umgebungsfelder	45
3.2.1	Versuchsaufbau	45
3.2.2	Versuchsdurchführung	46
3.3	Hauptversuch an einem Stahlbetonrahmen	46
3.3.1	Versuchsaufbau	46
3.3.2	Versuchsdurchführung	47
3.3.3	Versuchsabschluss	50
4	Versuchsergebnisse	51
4.1	Vorversuche	51
4.1.1	Versuch zum Abstandsverhalten	51
4.1.2	Versuch zum Bruchflächenabstand	52
4.1.3	Versuch zu Bewehrungsstößen	55
4.1.4	Bewehrungslayouts	58
4.1.5	Gegenüberstellung von Ermüdungs- und Verformungsbrüchen	63
4.2	Umgebungsfelder	65
4.3	Hauptversuch am Stahlbetonrahmen	67
4.3.1	Vorhandene Brüche	67
4.3.2	Vergleich von detektierten und vorhandenen Brüchen	67
4.3.3	Automatische Suche nach Bruchsignalen	70

5	Beurteilung der Versuchsergebnisse	73
5.1	Detektierbarkeit von Betonstahlbrüchen	73
5.2	Kurvenverläufe und Charakteristika der Bruchsignale	73
5.3	Fehler bei der Bruchdetektion	74
5.4	Genauigkeit der Bruchdetektion	74
5.5	Einfluss der Brucheigenschaften	74
5.5.1	Art des Bruchs	74
5.5.2	Einfluss des Bruchflächenabstandes	74
5.5.3	Einfluss der Bruchoberflächen	75
6	Folgerungen	77
6.1	Erkenntnisse	77
6.2	Weiterer Forschungsbedarf	78
7	Verdankungen	79
	Anhänge	81
	Bezeichnungen	89
	Literaturverzeichnis	93
	Projektabschluss	97
	Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen	100

Zusammenfassung

Für das Forschungsthema "Ermüdungsverhalten von Stahlbetonbrücken" wurde 2008 am *Institut für Baustatik und Konstruktion* (IBK) der ETH Zürich ein Versuch an einem Stahlbetonrahmen geplant. Es wurde nach einer Methode gesucht, um bereits während der Versuchsphase den Zustand der Betonstahlbewehrung zerstörungsfrei feststellen zu können. Zu diesem Zeitpunkt war am IBK nur die Schallemissionanalyse als zerstörungsfreies Prüfverfahren (ZfP) verfügbar, die jedoch aufgrund der zu erwartenden Störgeräusche bei diesem Versuch nicht alleinstehend eingesetzt werden konnte. Die magnetische Streufeldmethode (mSF-Methode), die an anderen Forschungseinrichtungen bis dato für die Detektion von Spanngliedbrüchen eingesetzt worden war, bot sich an, diese Aufgabe zu übernehmen. Durch eine erste Literaturrecherche sowie die Durchführung kleinerer Versuche mit Permanentmagneten und analogen Messgeräten stellte sich heraus, dass die mSF-Methode für die Bruchdetektion an Betonstahl geeignet ist.

Nachdem der Entscheid gefällt war, die mSF-Methode im Zuge des Ermüdungsversuchs einzusetzen, wurde zunächst eine eingehende Literaturrecherche durchgeführt. Die Recherche diente dazu, sich über die von anderen Ingenieuren und Forschungsstellen eingesetzten Magnete und Sensoren zu informieren, sowie deren Vorgehensweisen bei der Detektion von Spanngliedbrüchen zu verstehen. Ausserdem konnte durch das Literaturstudium die Geschichte des Magnetismus, beginnend mit der Entdeckung des Eisenerzes mehrere Jahrtausende vor Christus bis zur Entwicklung der Maxwell-Gleichungen in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts, nachvollzogen werden.

Für eine erfolgreiche Anwendung der mSF-Methode ist ein grundlegendes Verständnis des Magnetismus unabdingbar. Die Einarbeitung in die Theorie hat zum Verstehen, wie der Magnetismus bereits auf atomarer Ebene zustande kommt, und sich durch Aneinanderfügen mehrerer Elementarmagnete immer stärkere Magnetfelder erzeugen lassen, beigetragen. Hierbei wurde jedoch nur der Magnetismus, der aus fester Materie hervorgeht, genauer beleuchtet. Der Elektromagnetismus hingegen wurde nicht eingehender untersucht.

Nachdem ein Grundverständnis für den Magnetismus vorhanden war, wurden weitere Versuche geplant, die u.a. auch dazu beitragen konnten, selbst ein Gefühl im Umgang mit Permanentmagneten zu bekommen. Die Versuche wurden ausserdem dazu genutzt, einen für die geplante Anwendung passenden Sensor zu finden. Die erwarteten Feldstärken der zu erfassenden Magnetfelder haben schliesslich entscheidend zur Wahl des verwendeten Magnetometers beigetragen.

Bei den ersten Versuchen wurde das Magnetometer noch von Hand geführt, so dass eine präzise Verknüpfung von Messwert und Ort noch nicht möglich war. Mit dem Entwurf und dem Bau eines Messwagens konnte dieses Problem behoben werden. Durch die Kombination des Magnetometers mit einem Drehgeber war es ab diesem Zeitpunkt möglich, jedem Messwert eine genaue Position zuzuordnen. Für die Steuerung und die Datenerfassung wurde ein eigenes Programm geschrieben, welches es erlaubt, bereits während der Messung einen ersten Eindruck vom Zustand der Bewehrung zu bekommen.

Ein weiterer Schritt in der Entwicklung des Messsystems war die Entwicklung von Software-Routinen, mit deren Hilfe die Messwerte schnell eingelesen, aufbereitet und am Bildschirm bzw. auf dem Drucker in Form von Kurvenverläufen ausgegeben werden können. Die Visualisierung der Messwerte durch Kurvenverläufe bot sich an, da so der Zustand des Bewehrungsstabes sofort grob beurteilt werden kann.

Bei der Durchführung der Versuche hat sich schon früh herausgestellt, dass eine ausreichende und homogene Magnetisierung nur erreicht werden kann, wenn der Bewehrungsstab wiederholte Male mit dem Permanentmagneten überstrichen wird. Anfängliche Störsignale, die infolge nicht ausgerichteter Elementarmagnete innerhalb des Bewehrungsstabes auftraten, konnten so beseitigt werden.

Mit der entwickelten Messapparatur wurden alle weiteren Versuche durchgeführt. Für die anfänglichen Versuche an intakten wie auch an gebrochenen Bewehrungsstäben wurde ein Versuchsstand konzipiert, auf dem die Bewehrungsstäbe wiederholte Male an der gleichen Position montiert werden konnten. Auf diese Weise konnte gezeigt werden, dass die Messungen unter den gleichen Bedingungen reproduzierbar sind.

In Vorbereitung auf den Hauptversuch am Stahlbetonrahmen wurden Versuche durchgeführt, bei denen der Einfluss verschiedener Parameter untersucht werden konnte. Neben dem Abstand des Magnetometers zum zu untersuchenden Bewehrungsstab, wurde der Einfluss des Bruchflächenabstandes genauer betrachtet. Unter anderem wurden verschiedene Bewehrungsanordnungen geprüft und der Einfluss der Bruchursache auf die Messungen mit der mSF-Methode eruiert. Mit den anschliessenden Simulationen konnte nachgewiesen werden, dass die aus den Messungen gewonnenen Resultate plausibel sind und gut mit den Simulationen übereinstimmen.

Versuche zur Erfassung der umgebenden Magnetfelder haben gezeigt, dass die Überlagerung der von den Bewehrungsstäben ausgehenden Magnetfelder mit den umgebenden Magnetfeldern dazu führt, dass die Messwerte einen Versatz erhalten, der über die Messstrecke nicht konstant sein muss. Diese Art der Überlagerung erschwert eine Auswertung der Messwerte und kann mitunter dazu führen, dass Brüche nicht in jedem Fall entdeckt werden.

Sofern die Messbedingungen gewisse Voraussetzungen erfüllen, können Brüche in der Betonstahlbewehrung detektiert werden. Als kritische Punkte haben sich im Wesentlichen der Abstand zwischen dem zu untersuchenden Bewehrungsstab und dem Sensor wie auch der Bruchflächenabstand erwiesen. Bei einer ungünstigen Kombination von grossem Messabstand und kleinem Bruchflächenabstand besteht die Möglichkeit, dass vorhandene Brüche nicht detektiert werden.

Die Durchführung des Hauptversuchs am Stahlbetonrahmen, der für die Untersuchung des Ermüdungsverhaltens an Stahlbetonbrücken erstellt wurde, hat das Potential wie auch die Schwachpunkte der mSF-Methode aufgedeckt. Durch den vor Versuchsbeginn festgelegten, grossen Abstand zwischen Sensor und Bauteiloberfläche, hat sich in der Folge herausgestellt, dass nicht alle Bewehrungsbrüche detektiert werden konnten. Bei den visuell detektierten Brüchen hingegen, die immerhin zwei Drittel aller vorhandenen Brüche umfassen, hat sich jedoch gezeigt, dass die Detektion funktioniert und zudem mit einer Lokalisierungsgenauigkeit von einigen Zentimetern Abweichung sehr gute Resultate liefert. Der Hauptversuch hat aber auch gezeigt, dass das momentan verwendete Magnetometer nur langsame Messfahrten zulässt.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass Brüche in der Betonstahlbewehrung mit der mSF-Methode mit mittlerer Wahrscheinlichkeit detektiert und genügend genau lokalisiert werden können. Dies gilt bislang jedoch nur für die kontrollierten Bedingungen im Labor. Für eine Anwendung im Feld bedarf es weiterer Untersuchungen im Labor, wobei man sich hier auf Bewehrungsanordnungen konzentrieren sollte, die bislang noch nicht ausführlich untersucht werden konnten. Auch bietet sich hier eine Kombination aus Versuchen und Simulationen an.

Résumé

En 2008, un test sur cadre en béton armé a été planifié à l'*Institut für Baustatik und Konstruktion* (IBK) de l'EPF Zurich pour le sujet de recherche "Comportement à la fatigue des ponts en béton armé". Une méthode était recherchée pour déterminer l'état de l'armature du béton de manière non-destructive déjà durant la phase d'essai. L'analyse d'émission acoustique était la seule méthode de test non-destructive disponible à ce moment à l'IBK. Dus aux bruits parasites attendus avec ce procédé, son application seule n'est pas satisfaisante. La méthode de contrôle par flux de fuite magnétique utilisée jusqu'ici sur d'autres projets de recherche pour la détection de rupture dans les câbles de précontrainte pourrait être appliquée. Grâce à une première recherche dans la littérature et de petits tests avec des aimants permanents et des appareils de mesure analogues, il s'avère que la méthode de contrôle par flux de fuite magnétique peut être utilisée pour la détection de ruptures dans l'armature.

Tout d'abord, la compréhension de l'utilisation d'aimants et de senseurs ainsi que les procédures pour la détection de ruptures de câble de précontrainte a été approfondie à travers la littérature venant d'autres ingénieurs et centres de recherche. En plus, l'histoire du magnétisme, de la découverte du minerai de fer plusieurs siècle avant Jésus Christ jusqu'au développement des équations de Maxwell dans la deuxième moitié du 19^e siècle, a été étudiée dans la documentation.

Une compréhension approfondie du magnétisme est absolument nécessaire pour l'application correcte de la méthode de contrôle par flux de fuite magnétique. La théorie a apporté la compréhension de la création du magnétisme au niveau de l'atome et l'intensification du champ magnétique par l'assemblage de plusieurs aimants élémentaires. Pourtant, seul le magnétisme issu de la matière solide a été étudié. En revanche, l'électromagnétisme n'a pas été travaillé.

Avec la connaissance détaillée du magnétisme, de nouveaux tests ont pu être planifiés. Ceux-ci apportaient en même temps une intuition sur l'utilisation d'aimants permanents. Les tests furent également utilisés pour la sélection de senseurs adaptés à l'application finale. Le magnétomètre a été sélectionné en fonction de l'intensité du champ magnétique attendu.

Un lien précis entre les mesures et la position n'était pas encore possible car les premiers tests avec le magnétomètre se sont effectués à la main. Ce problème fut surmonté par la construction d'un charriot de mesure. La combinaison du magnétomètre avec un transmetteur de vitesse de rotation a permis de donner à chaque mesure sa position précise. Un programme a ensuite été écrit pour le contrôle et la saisie de données. Il permettait déjà pendant la mesure d'avoir une première impression sur l'état de l'armature.

La prochaine étape était le développement d'une routine informatique afin de lire, travailler et sortir les résultats sous forme de courbe, sur l'écran ou par imprimante. La visualisation des mesures à l'aide de courbes permet une évaluation rapide de l'état des armatures.

Lors des tests, il a été conclu rapidement que pour atteindre une magnétisation suffisante et homogène, des passages répétés avec un aimant permanent sur la barre d'armature étaient nécessaires. Les signaux perturbés initiaux, dus aux aimants élémentaires non alignés à l'intérieur de l'armature, ont pu ainsi être annulés.

Tous les tests ont ensuite été mis en exécution avec le développement de l'appareillage de mesure. Pour les premiers tests sur barres d'armature intactes et endommagées, une aide a été construite afin de poser les barres dans la même position pour tous les tests. De cette manière, la reproduction exacte des résultats pour les mêmes conditions a été vérifiée.

En préparation de l'essai principal sur le cadre en béton armé, les tests ont été effectués

en tenant compte de différents paramètres en tant que facteurs d'influence. La distance entre les magnétomètres ainsi que l'influence de la distance entre les aires de rupture ont été considérées. Plusieurs dispositions d'armature ont également été testées. L'influence de la cause de la rupture sur les mesures avec la méthode de contrôle par flux de fuite magnétique a pu être identifiée. Finalement, avec la mise en œuvre des simulations, il a pu être montré que les résultats venant des mesures étaient plausibles et concordaient bien avec les simulations.

Les essais pour la saisie du champ magnétique environnant ont montré que les champs magnétiques venant des barres d'armatures se superposaient avec les champs environnants. Le décalage obtenu dans les valeurs de mesures n'est pas forcément constant sur toute la longueur de mesure. Cette superposition rend le traitement des mesures difficiles. Ainsi, une rupture dans l'armature pourrait ne pas être détectée.

Pour autant que les conditions de mesures remplissent certaines exigences, les ruptures dans l'armature du béton armé peuvent être détectées. Les points critiques se sont révélés être la distance entre les barres d'armature testées et les senseurs, ainsi que la distance entre les zones de rupture. La combinaison défavorable d'une grosse distance de mesure et de petites distances entre les zones de rupture pourrait ne pas révéler les ruptures existantes.

L'exécution de l'essai principal sur le cadre en béton armé, construit à la base pour l'étude du comportement à la fatigue des ponts en béton armé, a démontré le potentiel et les faiblesses de la méthode de variation du champ magnétique. La grande distance, définie avant l'essai, entre les senseurs et la surface de l'élément n'a pas permis de détecter toutes les ruptures. Par contre, il a été montré que pour les ruptures détectées visuellement, la détection fonctionne pour le 2/3 des ruptures existantes. Les résultats étaient très bons avec une précision de localisation de quelques centimètres. L'essai principal a montré que le magnétomètre utilisé permettait uniquement une vitesse de mesure lente.

Finalement, les ruptures dans l'armature du béton armé peuvent être détectées avec une probabilité moyenne et localisées de manière suffisamment précise avec la méthode de contrôle par flux de fuite magnétique. Ceci n'est dès lors valable que pour les conditions de tests en laboratoire. Pour une application sur le terrain, de nouveaux essais en laboratoire sont nécessaires. La disposition de l'armature n'a pas été encore étudiée de manière détaillée et nécessiterait de plus amples recherches. La prochaine étape serait une combinaison des tests et des simulations.

Summary

For the research topic "Fatigue of reinforced concrete bridges" a test with a concrete frame was planned at the *Institute of Structural Engineering* (IBK) of ETH Zurich in 2008. A method was looked for to evaluate the condition of the reinforcement by non-destructive means during the testing phase. At that time, only acoustic emission analysis was available at the institute as a non-destructive testing method, which due to the expected background noise could not be used on its own for this purpose. The magnetic flux leakage (MFL) method, which has been used so far at other research institutions to detect breaks of post-tensioning tendons, appeared to be more suitable for this purpose. A first literature review and the performance of some small trials with permanent magnets and analogue measuring equipment showed that the MFL-method is applicable to detect breaks of reinforcing steel bars.

Once the decision has been taken to apply the MFL-method in the course of the fatigue test, the literature review was extended. The aim was to get information on the magnets and sensors used by other engineers and research institutions and to understand their procedures to detect tendon breaks. The literature review also served to retrace the history of magnetism, starting with the detection of iron ore some centuries B.C. until the development of Maxwell's equations in the second half of the 19th century.

A fundamental comprehension of magnetism is essential for a successful application of the MFL-method. Immersion into the theory has contributed to the understanding how magnetism functions at an atomic level and how by further assembling of several elementary magnets still stronger magnetic fields can be obtained. In this respect, only magnetism arising from solid matters has been covered, while electro magnetism has not been treated in more detail.

Once the basic comprehension was given, more tests were planned among others to get a sense of handling permanent magnets. The trials were also used to find an adequate sensor for the planned application. The expected intensities of the magnet fields to be recorded contributed substantially to the final choice of the magnetometer to be applied.

For the first tests, the magnetometer was still guided by hand, which impeded an accurate relation between measured value and location. This problem could be solved by design and construction of a measurement vehicle. By combining the magnetometer with a rotation encoder, it became possible to assign an exact position to any measured value. A specific program was written for control and data acquisition that enables to get a first impression of the condition of the reinforcement already during the measurement.

A further step in the development of the measuring system was the development of software routines to quickly record, process and display the measured values as curves on a screen or a printer. The visualization by means of curves makes sense because like this the condition of the reinforcing bar can be roughly evaluated on the spot.

While executing the tests, it turned out quickly that a sufficient and homogeneous magnetisation can only be achieved by repeatedly running the permanent magnet along the reinforcing bar. Like this, initial disturbing signals due to not aligned elementary magnets within the reinforcing bar could be removed.

All further tests have been executed with the described measuring system. A test rig was developed for the primary trials on both, intact and broken reinforcing bars in order to be able to mount them repeatedly in the same position. In this way it could be demonstrated that under equal conditions the measurements are reproducible.

To prepare the large scale test with the concrete frame, trials have been executed to investigate the influence of different parameters. The distance between the magnetometer and the examined reinforcing bar as well as the influence of the gap of the fracture faces were explored in detail. Among others, different reinforcement layouts have been ana-

lysed, and the influence of the failure mode on the measurements with the MFL-method has been determined. The subsequent simulations showed that the results gained from the measurements are plausible and coincide with the simulations.

Trials to capture the surrounding magnetic field have shown that the superposition of the fields originating from the magnetized reinforcing bars with those of the environment lead to an offset in the measured values that does not need to be constant over the measured length. This kind of superposition complicates the analysis of the measurements and can sometimes lead to a situation where breaks are not detected in every case.

Breaks of the reinforcement can be detected provided that the measuring conditions fulfil certain preconditions. The distances between the reinforcing bar to be examined and the sensor, as well as between the fracture faces have proven to be the essential crucial issues. Existing breaks might not be detected for an unfavourable combination of large measuring distance and small fracture gap.

The execution of the large scale test with the concrete frame that has been built to research fatigue behaviour unveiled both, the potential and shortcomings of the MFL-method. The large distance between sensor and surface of the specimen that had been determined before the test had started led to the result that not all reinforcement breaks could be detected. The visually detected breaks, however, covering $\frac{2}{3}$ of all existing breaks, showed that detection works and provides a good accuracy of localization with deviations of some few centimetres. The main test also showed that the magnetometer used at present allows only slow movements during measurements.

In summary, breaks in reinforcement are subject to detection with a medium probability and localized with sufficient accuracy. Up to now, this applies only for controlled conditions of a lab environment. For field applications, further laboratory tests are necessary focusing on reinforcement layouts that have not been extensively covered so far. The combination of tests and simulations has the largest potential.

1 Einleitung

1.1 Hintergrund für die Untersuchungen

Im Zuge einer Forschungsarbeit zur Untersuchung des Ermüdungsverhaltens von Stahlbetonbrücken am IBK der ETH Zürich stellte sich der Bedarf ein, Brüche einzelner Bewehrungsstäbe zerstörungsfrei an einem Stahlbetonrahmen zu detektieren. Zunächst wurden bereits etablierte zerstörungsfreie Prüfverfahren 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 auch 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 Projektziele

Im Forschungsgesuch wurden folgende, nach Themen gegliederte Projektziele festgehalten:

Identifikation geeigneter Messsystembestandteile

Die grundlegenden Bestandteile eines Messsystems zur Erfassung von magnetisch remanenten Streufeldern bilden die Magnete und Sensoren. Diese müssen nach ihren physikalischen bzw. messtechnischen Eigenschaften beurteilt werden, um anhand dessen eine Auswahl der zu verbauenden Bestandteile zu treffen.

Erkennung typischer Muster in den Messwerten für verschiedene Bewehrungskonfigurationen

Die Erkennung von Brüchen in der Betonstahlbewehrung setzt voraus, dass man Kenntnis über Messwertmuster der gängigsten Bewehrungsanordnungen wie bspw. Kreuzungen, Stösse, Abbiegungen etc. hat, um diese von typischen Bruchsignalmustern unterscheiden zu können. Anhand geeigneter Bewehrungsanordnungen müssen charakteristische Muster in den Messwerten erkannt werden, um sie für spätere Auswertungen heranziehen zu können.

Entwicklung einer graphischen Messwertdarstellung

Für die Auswertung der Messwerte soll eine graphische Ausgabe angestrebt werden, um dem Ingenieur ein praxistaugliches Werkzeug zur Verfügung zu stellen, anhand dessen (vor Ort) eine Aussage über das Vorhandensein eines Bruches bzw. einer Fehlstelle getroffen werden kann.

Langfristig soll auf diesem Weg eine zerstörungsfreie Detektion von Brüchen und Schadstellen von im Verbund liegender Betonstahlbewehrung angestrebt werden.

1.3 Begleitkommission

Das Forschungsprojekt wurde von der Begleitkommission AB betreut, die sich aus folgenden Mitgliedern und projektbezogenen Gästen zusammensetzte:

Begleitkommission AB

- Dr. sc. techn. M. Käser, Baudirektion / TBA, Zürich, (Vorsitz)
- Dr. sc. techn. F. Hunkeler, Technik und Forschung im Betonbau (TFB AG), Wildegg
- Dr. sc. techn. W. Kaufmann, dsp Ingenieure & Planer AG, Greifensee
- Prof. Dr. sc. techn. A. Kenel, Hochschule für Technik HSR, Rapperswil
- Dr. sc. techn. M. Alvarez, ASTRA, Bern
- Dr. sc. techn. K. Pfyl-Lang, Baudirektion / TBA, Zürich

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 1995] und [McCrea 2001] 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 (Potentialdifferenzmessung etc.) beschrieben. Ebenso werden die magnetischen Verfahren (u.a. Wechselfeld-Verfahren, mSF-Methode, mikromagnetische Vorspannungsmessung) erläutert. Auf die mSF-Methode wird im Folgenden detaillierter eingegangen, da sie die Grundlage des hier vorgestellten Forschungsprojektes bildet.

Anwendungen im Stahlbau

Die magnetische Streufeldmethode hat ihren Anfang in den 30er Jahren des 20. Jahrhunderts. Sie kann damit zu einer der ältesten Prüfmethode 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 2000] und [Muslih 2005]). Die Untersuchungen von Pipelines, bei denen sowohl nach Schäden in den Rohrwänden (siehe [Altschuler 1994], [Atherton 1987] und [Babbar 2003]) als auch in den Schweißnähten gesucht wird, bilden ein grosses Einsatzgebiet der mSF-Methode. 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 2008] führt hier einerseits die Magnetpulver (MP)-Prüfung auf, die durch [Peterson 1946] detaillierter erläutert wird und andererseits die mittels Sonden durchgeführte Prüfung, auf die [Heptner 1972] und [Förster 1955] 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 mSF-Methode 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 Fehlertiefe angestellt werden kann. Durch die hinzukommende geringe Tiefenwirkung sind nur erfahrende Prüfer in der Lage, weiter von der Oberfläche entfernt liegend Fehler festzustellen.

Ein sondenbasiertes Verfahren macht sich den Umstand zunutze, dass magnetische Wechselfelder 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 [Lüthi 2008].

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 [Scheel 2006].

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 un-

abhängig 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 mSF-Methode, 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 zum Teil vom Remanenzmagnetismus (RM)-Verfahren gesprochen, da dann lediglich das vom Prüfkörper ausgehende, verbliebene (remanente) Magnetfeld erfasst wird.

Bereits im Jahr 1985 hat [Kusenberger 1985] 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 [Szielasko 2006] entwickelt. 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 1999], [Hillemeier 2002], [Hillemeier 2003] und [Scheel 1997] werden das RM-Verfahren und damit durchgeführte Feldversuche ausführlich beschrieben.

In den Dissertationen von [Kloster 2008] und [Scheel 1997] sind darüber hinaus detaillierte Informationen zu den verwendeten Geräten (Magnete, Sensoren, etc.) und den Versuchsanordnungen festgehalten.

Sawades Forschungsarbeiten beziehen sich ebenfalls auf die mSF-Methode, wobei sein Hauptaugenmerk auf der Erstellung mathematischer Modelle liegt (siehe [Sawade 1999] und [Sawade 2007]). 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 jedoch kommerziell noch nicht durchgesetzt.

Entwicklung bildgebender Verfahren

Gaydecki und andere 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 1994] und [Quek 2008]).

[Virmani 2000] wie auch [Makar 2001] gehen in ihren Veröffentlichungen auf die mSF-Methode ein und weisen dabei auf die Weiterentwicklung von Magneten, Sensoreinrichtungen und Software hin. [Mietz 2005] vergleicht die Ergebnisse der mit der mSF-Methode durchgeführten Untersuchungen an ausgebauten Brückenteilen zweier verschiedener Institute (MPA Stuttgart und TU Berlin) miteinander, um die Praxistauglichkeit der Methode näher zu beleuchten.

Anwendung für Betonstahl

Gegenüber anderen ZfP-Verfahren hat die mSF-Methode 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 2009] und [Jungwirth 1986]). [Miyagawa 2006] untersuchte in Verbindung mit AAR aufgetretene Betonstahlbrüche, die aber nur in Kombination mit Korrosionsvorgängen auftraten. 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* (Magneteisenstein, 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 2400 Jahre später verstanden und erklärt werden konnte [Meyer 1971]. *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 hierzu [Smith 1992]). Dieser *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 [Verschuur 1993].

1660 baute *Otto von Guericke* die erste Elektriziermaschine 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 Elektriziermaschine 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 Elektriziermaschine die "Leidener Flasche" ein, wodurch er erkannte, dass die Elektrizität nicht von den Froschbeinen herrührte, 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 gäbe. 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 *Ampèresches* Gesetz bekannt [Verschuur 1993].

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 veranschaulichten. 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 für eine stetige Induktion sich 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 magnetischen Materialien führten zu der These, dass es Kraftlinien und Felder zwischen magnetischen Pole 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 *Helmholtz-Spule* 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 Magnetisensteins 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 50er Jahren des 20. Jahrhunderts das mathematische Gerüst der Quantenelektrodynamik, womit schliesslich auch erklärt werden konnte, wie die verschiedenen Kräfte des Elektromagnetismus über unterschiedlichste Distanzen wirken können [Verschuur 1993].

2.2.2 Physikalische Grundlagen

Ursache des Magnetismus

Aus Kapitel 2.2.1 geht bereits hervor, dass der Magnetismus auf eine Ursache zurückgeführt werden kann, nämlich der, 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 Forschungsauftrages 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 diesem Bericht 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^- (s. [Tipler 2004]), 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 *Bohrschen* 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* \mathbf{s} herangezogen wird. Der Spin sorgt dafür, dass ein Magnetfeld um das Elektron herum etabliert wird. 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 2004] stellt die Herleitung sehr anschaulich dar, wobei er für das magnetische Moment in allgemeiner Form die Gleichung (2.1) nutzt.

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

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

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

Im Gegensatz dazu fällt das magnetische Moment des Elektronenspins um den *Landé-Faktor* $g \approx 2$ (der genaue Wert liegt aufgrund quantentheoretischer Gegebenheiten bei $g \approx 2.00232$) grösser aus und ist durch Gleichung (2.3) bestimmt. Der Bahndrehimpuls wird hier durch den *Spindrehimpuls* \mathbf{S} ersetzt.

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

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 [Kneller 1962]. 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* (s. Abbildung 2.1 (a)) 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 gros-

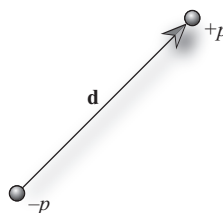


Abb. 2.1 Magnetischer Dipol

ser Zahl vorhanden sind. Für die Etablierung eines solchen Magnetfeldes müssen sich die Elementarmagnete ausrichten und parallel stellen. Hierfür sorgt die sogenannte Austauschwechselwirkung [Ilbach 2009] 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 1962] umschreibt die Magnetisierung als magnetisches Moment pro Volumeneinheit eines Körpers.

Wirkt dann ein Magnetfeld auf Materie, 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 zwischen 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

$$\text{div} \mathbf{B} = 0 \quad (2.6)$$

und

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

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 1962]. 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 Elektronen 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 1972] gibt für eine starke Wechselwirkung zwischen den Elektronenspins eine festgelegte Kristallgitterstruktur, wie sie nur in fester Materie vorkommt, als Voraussetzung an. 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 Abbildung 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

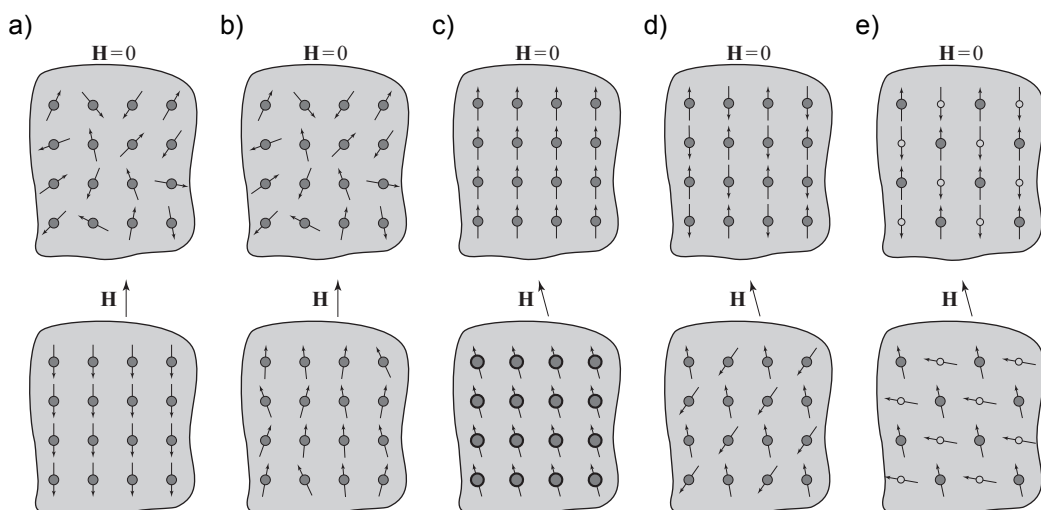


Abb. 2.2 Elementarmagnetausrichtung ohne (oben) und mit (unten) äusserem Magnetfeld für (a) diamagnetische, (b) paramagnetische, (c) ferromagnetische, (d) antiferromagnetische und (e) ferrimagnetische Materialien.

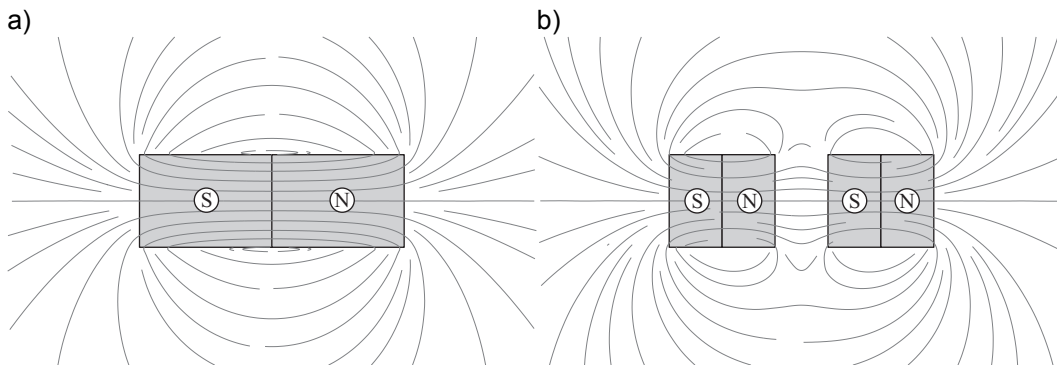


Abb. 2.3 Magnetfeld eines (a) intakten und (b) gebrochenen Stabmagneten.

Reihe berücksichtigt wurde.

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

Entmagnetisierungsfaktor

Die Abbildungen 2.3 (a) und (b) zeigen exemplarisch, wie die durch die Feldlinien dargestellten Magnetfelder in und um ferromagnetische Körper verlaufen. Abbildung 2.3 (a) stellt einen intakten Körper dar, in dem das Magnetfeld vom Nord- zum Südpol verläuft. Dem gegenüber steht Abbildung 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 (vgl. Abbildung 2.3 (b)), verlaufen die Magnetfeldlinien dort zwar parallel zueinander, jedoch entgegengesetzt (antiparallel) dem Magnetfeld des Kerns. Diesem Magnetfeld schreibt [Brown 1962] eine entmagnetisierende Wirkung zu, die von der Geometrie des betrachteten Bauteils und nicht von dessen Materialeigenschaften abhängt. 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 1907] postulierte die Hypothese einer Aufteilung des ferromagnetischen Kristalls in Bezirke mit unterschiedlicher Magnetisierungsrichtung [Heptner 1972]. 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

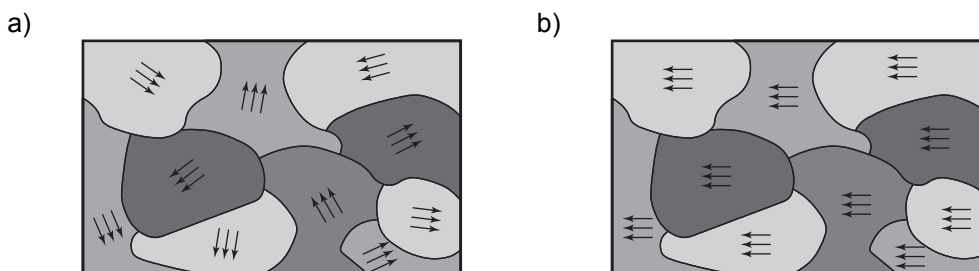


Abb. 2.4 Schematische Darstellung der Weiss'schen Bezirke im (a) nicht ausgerichteten und (b) ausgerichteten Zustand (nach [Tipler 2004]).

ausgerichtet, wodurch für den jeweiligen Bezirk aus den sich darin befindlichen Einzelfeldern der Elementarmagnete ein respektables Bezirksmagnetfeld entsteht. Wie aus Abbildung 2.4 ersichtlich wird, sind die Weiss'schen Bezirke durch die sogenannten Bloch'schen Wände oder Blochwände 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 1962]). Solange kein äusseres Magnetfeld auf das ferromagnetische Material einwirkt, werden sich die Vorzugsrichtungen der Weiss'schen Bezirke gemäss Abbildung 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 (Abbildung 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 1972] führt an, dass die Wärmebewegung der Atome sich dem ordnenden Effekt der Austauschwechselwirkung entgegenstellt. 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 Abbildung 2.5 (a), 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 Magnetisierung 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 Ausrichtungsrate 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 Forschungsauftrages 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 (remanenten) Magnetfeld \mathbf{B} betrachtet werden, wobei auf Abbildung 2.6 Bezug genommen wird. Die dargestellte magnetische Hysterese resultiert aus den komplizierten

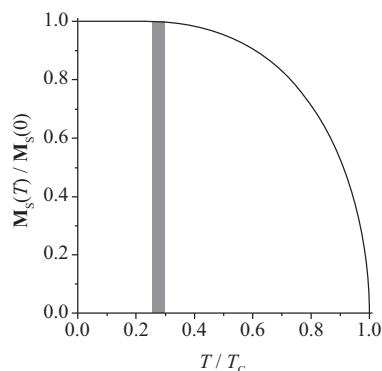


Abb. 2.5 Spontane Magnetisierung von Eisen als Funktion der Temperatur (nach [Scheel 1997]).

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 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 1991]).

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 hervorrufende (erregende) Feld wird *Sättigungsfeld* mit der *Sättigungsfeldstärke* \mathbf{H}_S genannt (vgl. [Heptner 1972]).

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-Wandverschiebungen 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

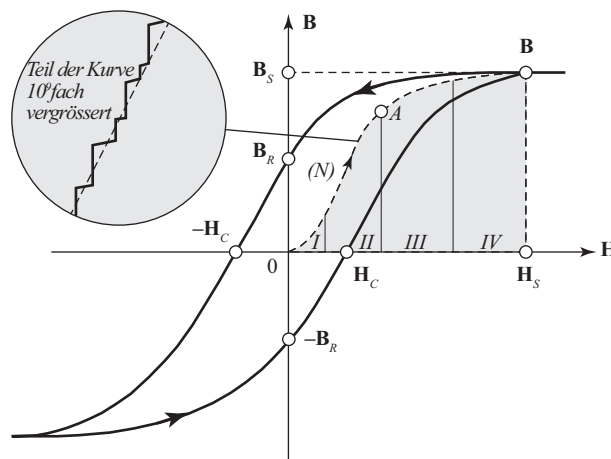


Abb. 2.6 Magnetisierungskurve (Hysterese) eines ferromagnetisch weichen Materials (nach [Heptner 1972]).

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 1972] ist die von der Hysterese umschlossene Fläche ein Mass für die während eines Ummagnetisierungszyklus aufzuwendende Arbeit.

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. Da diese jedoch den Elektromagnetismus in allgemeiner Form beschreiben, können aufgrund des hier betrachteten Spezialfalls der Magnetostatik zwei der insgesamt vier Grundgleichungen gestrichen werden.

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

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

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

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

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.

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

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

Für die Berechnung und Visualisierung der Magnetfelder wird die kommerzielle Software *Comsol 4.2a* von *Comsol AB* (Stockholm) verwendet. Bei der Eingabe kann angesichts vorhandener Symmetrien auf eine 3-dimensionale Modellierung verzichtet und stattdessen im 2-dimensionalen Raum gearbeitet werden. Eine Reduzierung des Bildausschnittes aufgrund von Achsensymmetrien findet nicht statt.

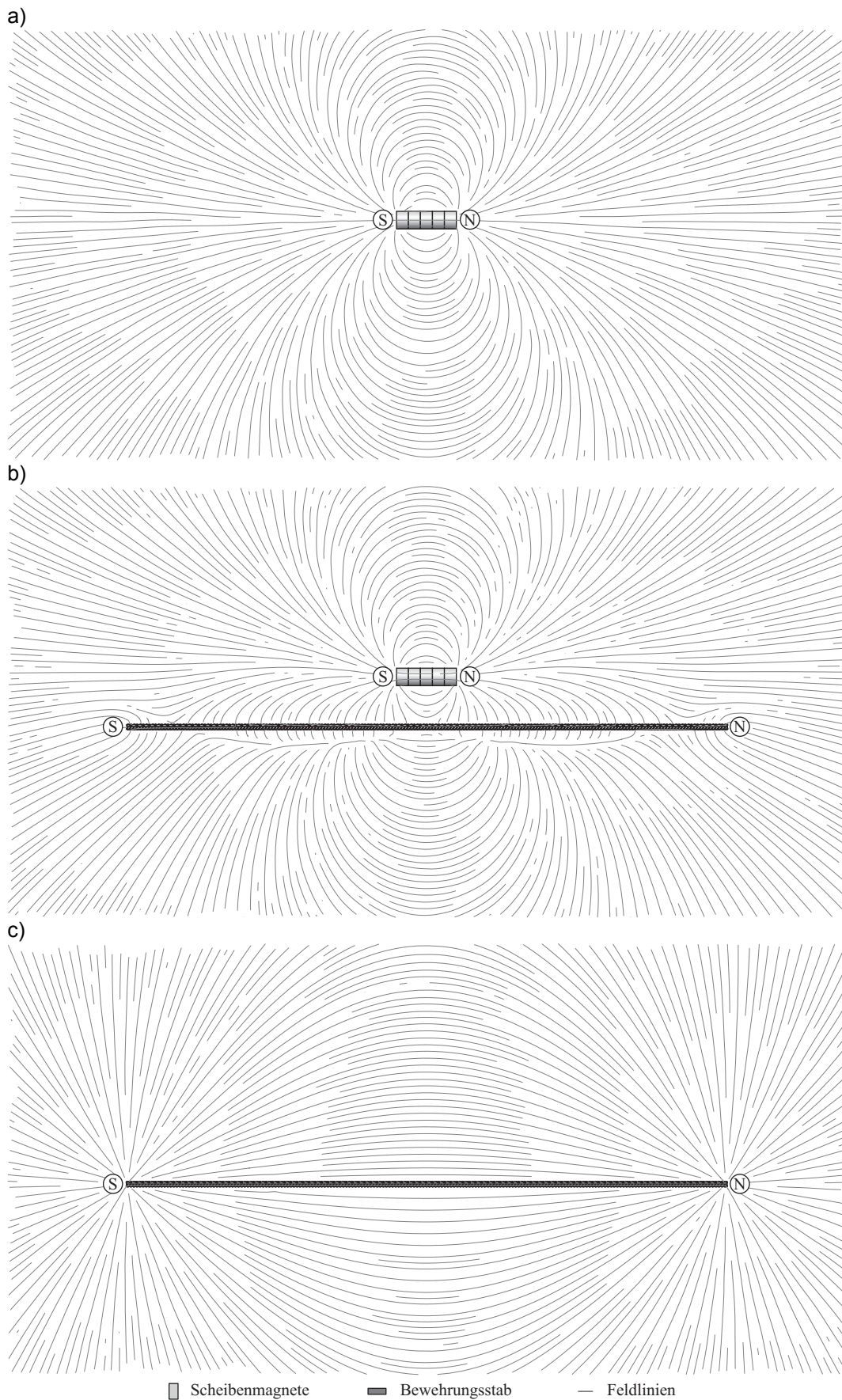


Abb. 2.7 Visualisierungen von Magnetfeldern (a) eines Permanentmagneten, (b) eines Permanentmagneten mit einem Bewehrungsstab in unmittelbare Nähe und (c) eines Bewehrungsstabes (erstellt mit [Comsol 2011]).

Die Abbildungen 2.7 (a) bis (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 verteilen, solange kein Material mit einer grösseren magnetischen Leitfähigkeit (Permeabilität) als der des umgebenden Mediums in dessen Feld eingebracht wird (vgl. Abbildung 2.7 (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 Abbildung 2.7 (b) hervor.

Ist dieses Material ferromagnetischer Natur – wie es im Stahlbetonbau beim Bewehrungsstahl überwiegend der Fall ist – wird sich ein remanentes Magnetfeld in und um den Bewehrungsstab zeigen, nachdem ein genügend grosser Abstand zum Permanentmagneten hergestellt wurde (Abbildung 2.7 (c)).

Das hier dargestellte Magnetfeld eines intakten Bewehrungsstabes weist ebenso typische Charakteristiken auf, wie jenes, eines gebrochenen Bewehrungsstabes (vgl. Abbildung 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.

2.3 Magnetische Streufeldmethode

Im Folgenden werden die für die mSF-Methode 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. Nach einer Besprechung der Datenerfassung und -speicherung schliesst das Kapitel mit dem Aufzeigen der für die Anwendung dieser Methode charakteristischen Muster innerhalb der Messwerte für typische Bewehrungsanordnungen des Stahlbetonbaus ab.

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 getreten ist. Dies kann bei einer eingelegten 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 Abbildung 2.8 dargestellt, einem erregenden Magnetfeld ausgesetzt.

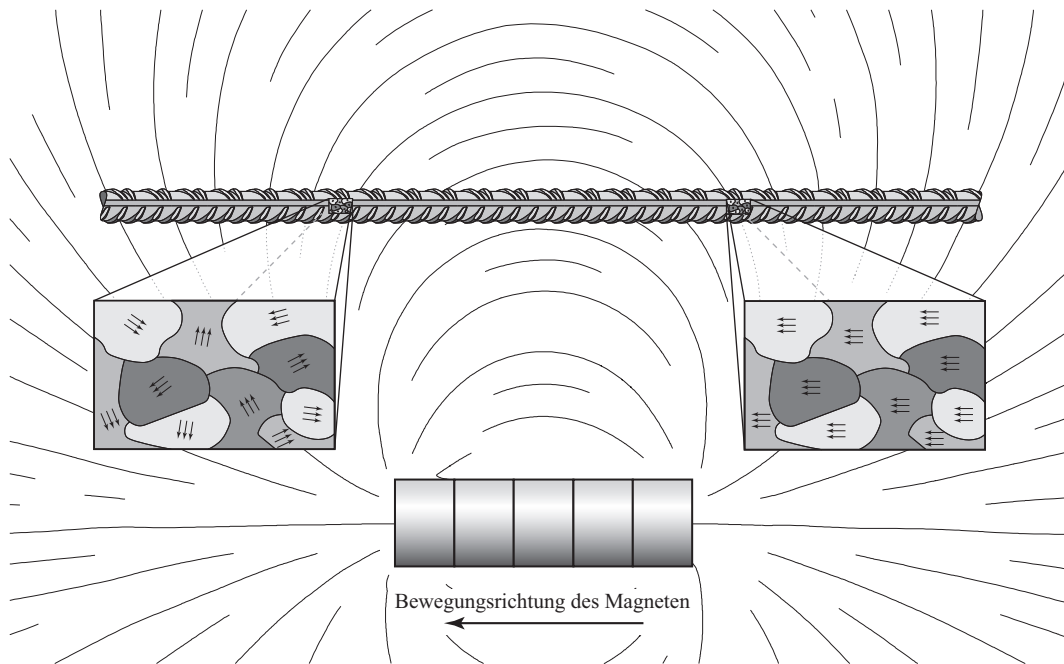


Abb. 2.8 Schematische Darstellung des Magnetisierungsvorgangs.

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 Abbildung 2.9 (a)). In diesem Fall sorgt hauptsächlich die axiale Komponente des Erregerfeldes für die Ausrichtung der Weiss'schen Bezirke innerhalb des Bewehrungsstabes. In Abbildung 2.8 ist linkerhand zu erkennen, dass die Weiss'schen Bezirke noch zufallsverteilt gerichtet sind, wohingegen rechterhand – nach der bereits erfolgten Überfahrt mit dem Magneten – diese bereits dem erregenden 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 Abbildung 2.9 (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 Abbildung 2.3 (b) geht hervor, dass die Stärke des Magnetfeldes stark vom Ort abhängt. Je dichter also der Sensor entlang des Bewehrungsstabes geführt werden kann,

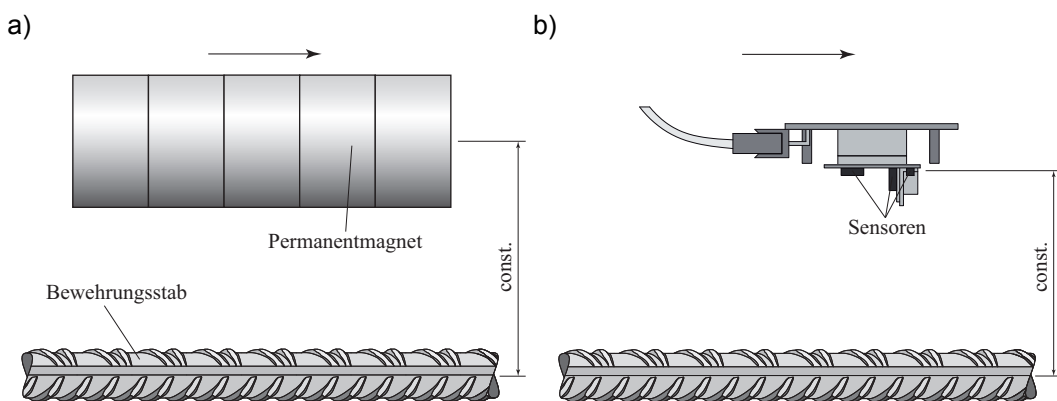


Abb. 2.9 Anordnung von (a) Magnet und Bewehrungsstab bzw. (b) Sensoreinheit und Bewehrungsstab.

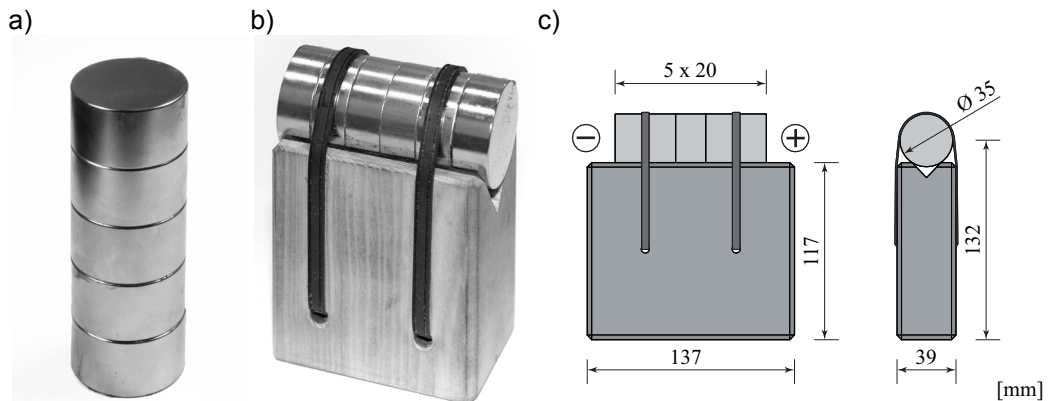


Abb. 2.10 (a) Fünf aneinandergefügte Scheibenmagnete; (b) und (c) Scheibenmagnete montiert auf einen Abstandhalter.

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 I entnommen werden. Der Permanentmagnet wurde wie in Abbildung 2.10 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 Abbildung 2.10 gezeigten Abstand von $s_M = 13.2$ cm und der noch zu addierenden Bewehrungsüberdeckung von $c_{nom} = 1.5$ cm zusammen.

2.3.3 Sensor

Für die messtechnische Erfassung der Magnetfelder steht das mit Induktionsspulen arbeitende dreiaxiale Magnetometer *MicroMag3* von [PNI 2009] zur Verfügung. Die verwendeten Induktionsspulen sind in einen Oszillator-Schaltkreis integriert (vgl. Abbildung 2.11 (a)). Die Spule (Abbildungen 2.11 (b) und (c)) ist mit einem magnetischen Kern hochpermeablen Materials versehen, um eine Verstärkung des Magnetfeldes herbeizuführen. Ohne eine Änderung der Spulenanlage 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 2007] und [Zijlstra 1967] 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.

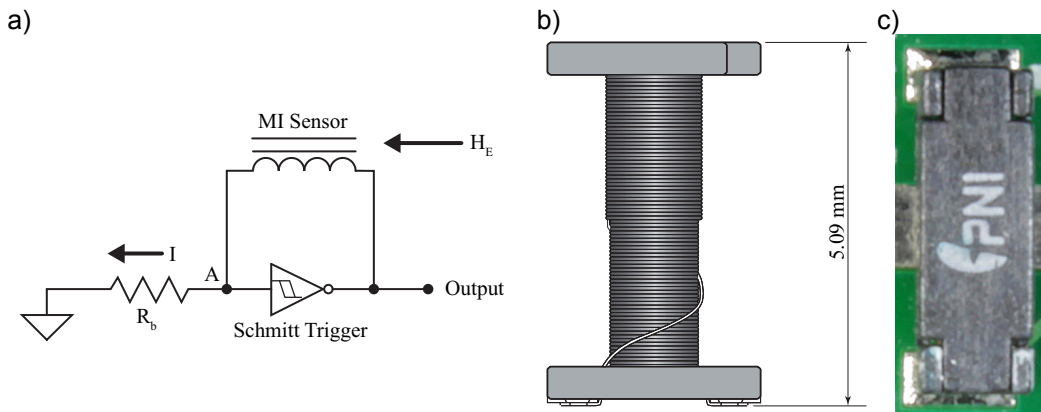


Abb. 2.11 (a) Schaltplan für Induktionsspule (nach [Leuzinger 2010]); (b) Wicklung der Induktionsspule (nach [PNI 2009]); (c) Induktionsspule auf MicroMag3.

Die Oszillation des Stromes und das Zählen der Periodendauer werden 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 solche 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 (2.14) 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 $t \approx 18.1$ ms. Nach Herstellerangaben sollte diesem Wert ein zusätzlicher Zeitpuffer hinzugefügt werden, um vollständige Messdurchläufe zu gewährleisten.

$$t = \left[\left(\frac{1}{f} \right) \left((ps + 16) \cdot 2 \right) \right] \cdot n_s \quad (2.14)$$

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. Abbildung 2.12 (a)). Im Zuge der hier durchgeführten Messungen bedingt ein Abgleich unter den Messwerten der drei Magnetfeldkomponenten eine genaue Ortsangabe der einzelnen Spulen. In Abbildung 2.12 (b) sind auf dem Print des

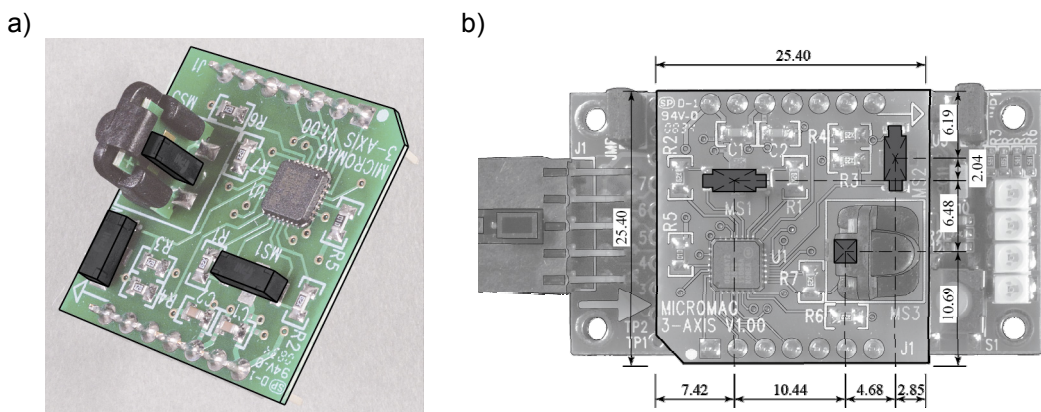


Abb. 2.12 (a) Dreiaxialer MicroMag mit hervorgehobenen Induktionsspulen; (b) auf CommBoard montierter MicroMag mit eingezeichneter Vermessung.

MicroMag3 von links nach rechts die Spulen für die axiale, radiale und tangential 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 II entnommen werden.

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.

$$I = \frac{H}{\frac{8 \cdot N \cdot \mu_0}{5 \cdot \sqrt{5} \cdot R} - \frac{1152 \cdot N \cdot \mu_0 \cdot x^4}{625 \cdot \sqrt{5} \cdot R^5}} \quad (2.15)$$

Für die Erzeugung eines definierten Magnetfeldes wurde eine *Helmholtz*-Spule verwendet, wie sie in Abbildung 2.13 (a) schematisch dargestellt ist. Die Besonderheit dieser Spulenanordnung liegt in dem über einen relativ grossen Bereich konstanten Magnetfeld, zwischen den Zentren der Spulen (vgl. Abbildung 2.13 (b)). Der Kurvenverlauf zwischen den gestrichelten Linien zeigt die Magnetfeldstärke zwischen den beiden Spulen. [Burkhardt 2006] konnte mittels Gleichung (2.15) den jeweils an der Spannungsquelle der Helmholtzspule einzustellende 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

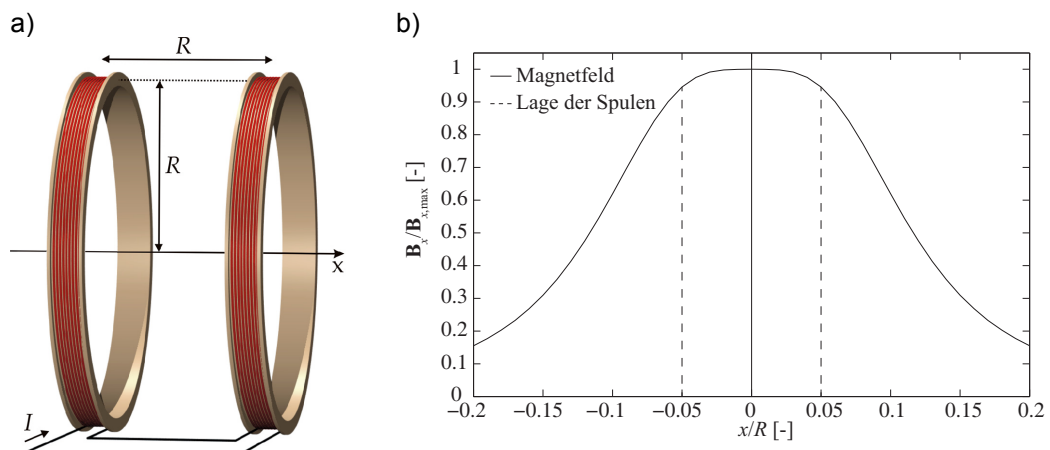


Abb. 2.13 (a) Schematische Darstellung einer Helmholtz-Spule; (b) für Kalibrierung genutzte Helmholtz-Spule.

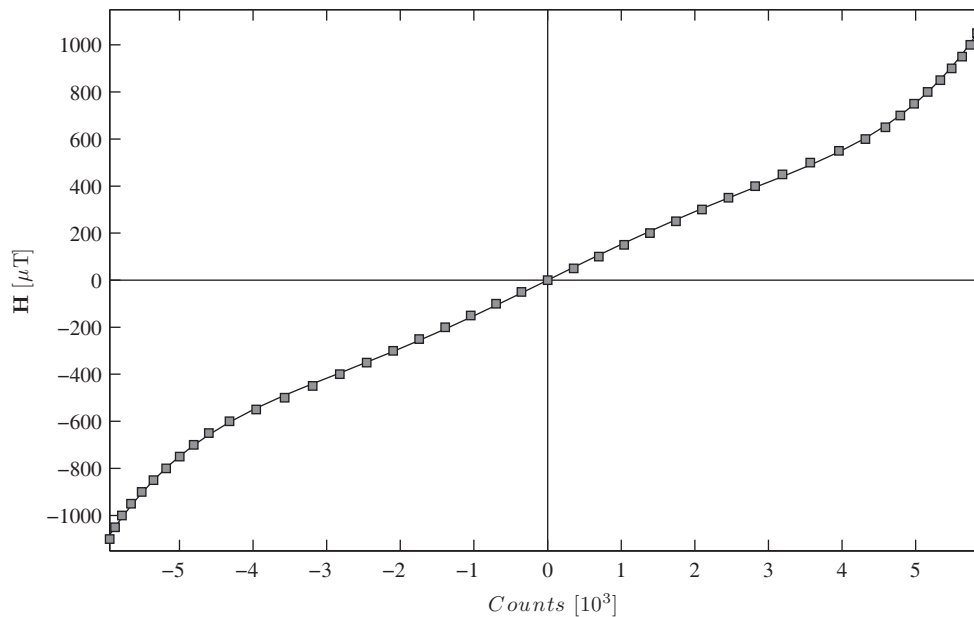


Abb. 2.14 Kalibrierwerte mit eingelegter Übertragungsfunktion für die Axialspule bei einer Messung von 512 Perioden.

$R = 200$ mm auf. Die Position zwischen den Spulen kann zu $-50 \leq x \leq +50$ gewählt werden.

Der *MicroMag3* wurde auf dem Ablagetisch zwischen den Spulen so fixiert, dass die Spule der Axial- bzw. Radialkomponente auf Höhe der Spulenzentren zu liegen kam. Des Weiteren wurde die Axial- bzw. Radialspule dann 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. Abbildung 2.14), eine Funktion eingelegt und an die Messwerte angeglichen werden.

Die erhaltene Übertragungsfunktion 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 Übertragungsfunktionen der Axialspule zur Überführung der tangentialen Werte genutzt.

2.3.5 Messwagen mit Drehgeber

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 allerdings das Konzept eines kabelgebundenen Messwagens weiterverfolgt. Der Messwagen nimmt einerseits den *MicroMag3* und andererseits einen auf der Vorderachse montierten Drehgeber auf (vgl. Abbildung 2.15). 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

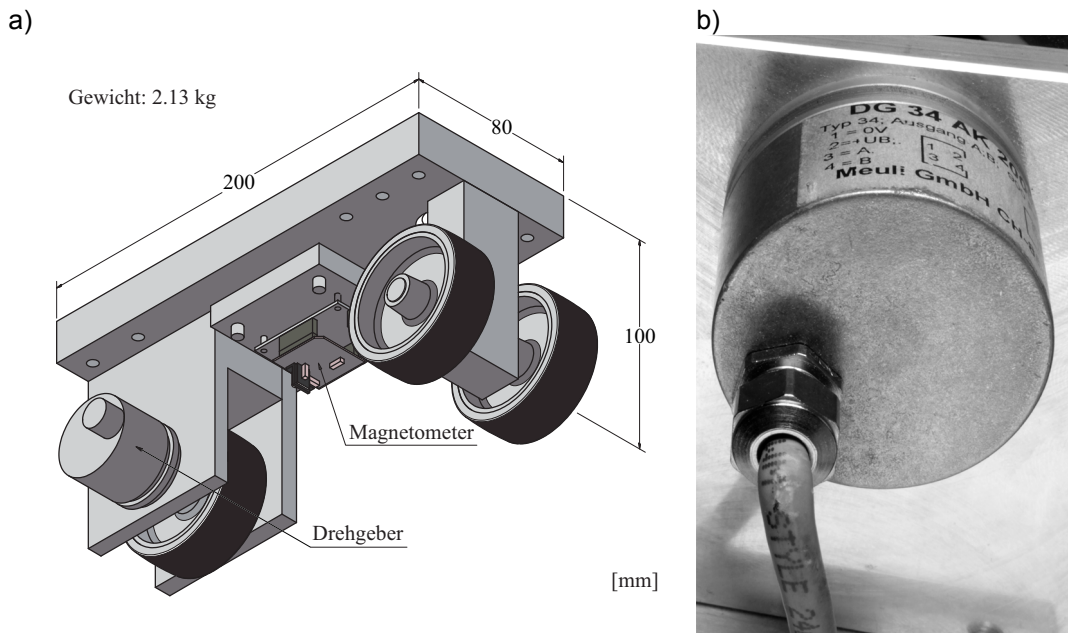


Abb. 2.15 (a) Messwagen; (b) Drehgeber

genaue Positionserfassung ermöglicht wird. Weitere Angaben über den Drehgeber können Anhang III 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 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 orientierten Bauteiloberfläche möglich.

Magnetometer wie auch Drehgeber sind kabelgebunden und benötigen beide eine externe Stromversorgung. 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 Datenleitungen für den Drehgeber benötigt. Die Wahl des Schnittstellensteckers fiel auf einen LPT-Stecker, der über 25 Kontakte verfügt; also genügend Anschlussmöglichkeiten für künftige Ausbaustufen bereithält. Zudem ist eine falsche Polung mit diesem Stecker nicht möglich.

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 Magnetometer 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**ngineering **W**orkbench) von *National Instruments* zurückgegriffen. Ein Vorteil bei der Verwendung dieser Programmierumgebung ist die leichte Integration von Sensoren und Messgebern, die direkt angesprochen bzw. abgegriffen werden können.

Zur Vereinfachung und besseren Übersichtlichkeit wird mit sogenannten Virtuellen Instrumenten (VIs) – Programmeinheiten – gearbeitet. Hierin lassen sich die Anschlüsse der Sensoren und Geräte nachempfinden und logische Schaltungen zwischen diesen realisieren. Neben der Übergabe der Steuerbefehle, die bspw. das Magnetometer anweisen einen Messdurchgang durchzuführen, enthalten die VIs u.a. Ausgabebereiche, in denen die aktuellen Messwerte dargestellt werden. Durch Verbinder, den elektrischen Leitern nachempfunden, werden Verbindungen zwischen den einzelnen Elementen herge-

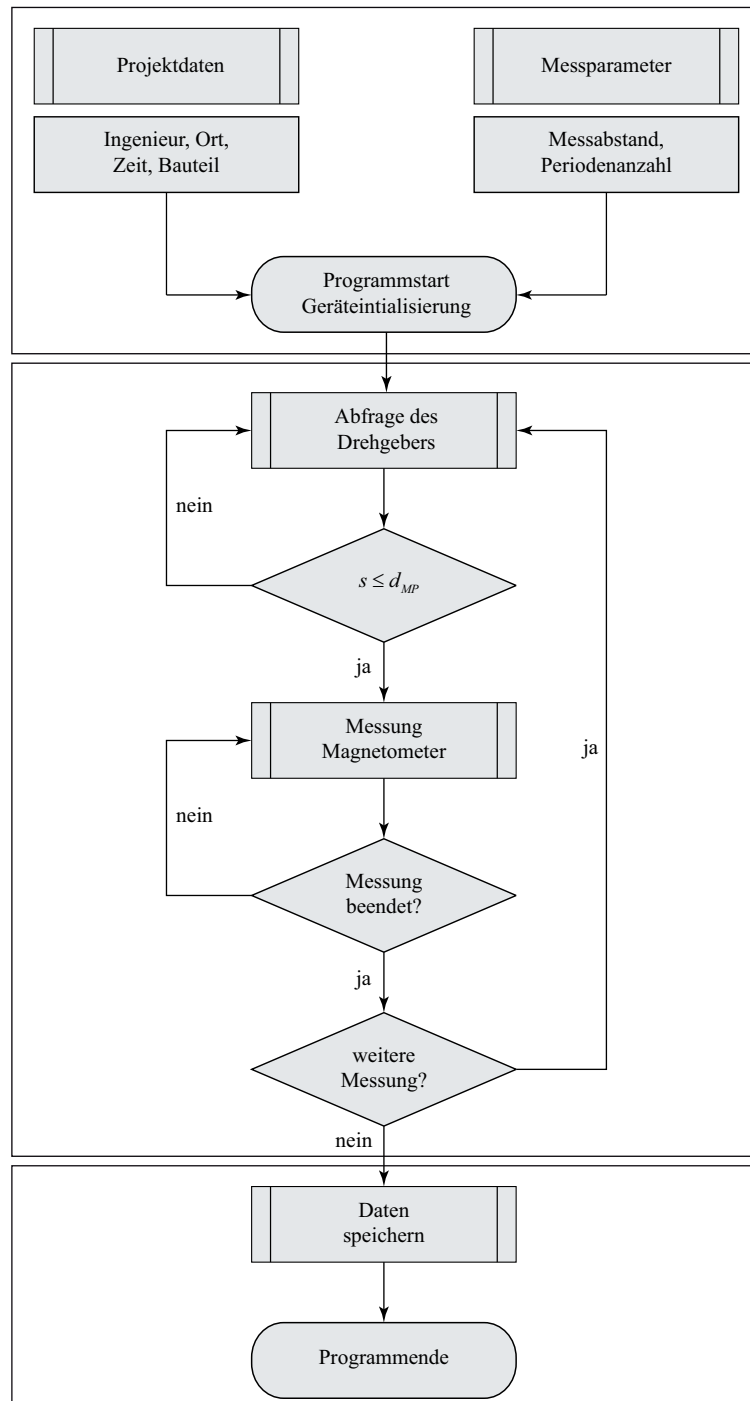


Abb. 2.16 Ablaufdiagramm der Datenerfassung in LabVIEW.

stellt, 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. Abbildung 2.16). 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 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 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.

2.3.7 Messwertcharakteristika

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. Abbildung 2.17 (a)). Felder werden üblicherweise in Vektorform dargestellt. Für diese Darstellungsform müssen aus den gemessenen Komponenten mit dem Satz des *Pythagoras* der Betrag und über die 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 variieren mit der Magnetisierung, so dass die Verläufe sich in der Amplitude unterscheiden können, sofern zwischen den Messungen mit unterschiedlicher Feldstärke aufmagnetisiert wurde. 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 Abbildung 2.18 zu sehen sind, besprochen. Den Verläufen liegt qualitativ das in Abbildung 2.3 (a) gezeigte Magnetfeld zugrunde. Die Messwerte wurden in einem Abstand von rund 150 mm zum Bewehrungsstab erfasst. Bei der Axial- wie auch der Radialkomponente sind neben den Verläufen der Messungen auch die einer Magnetfeldsimulation hinterlegt. Für die Tangentialkomponente waren keine Simulationsdaten verfügbar, da es sich lediglich um eine zweidimensionale Simulation handelte. Aufgrund der komplizierten Evaluation der materialspezifischen Eigenschaften der beim Versuch verwendeten Bewehrungsstäbe konnten für die Simulation diesbezüglich nur Annahmen getroffen werden. Berücksichtigt man diesen Umstand, kann die Übereinstimmung der Verläufe als gut eingestuft 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. Abbildung 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 Abbildungen 2.18 (a) und (c) deutlich. Die Axialkomponente hat an den Stabenden Nulldurchgänge und bei der Radialkomponente können dort Extremwerte festgestellt werden. Die Verläufe der Messungen sind aufgrund von Ungenauigkeiten leicht verkürzt, weshalb sie nicht vollständig mit denen der Simulation übereinstimmen. Genauere Abklärungen zur Ursache dieser Diskrepanzen müssen u.U. in einem Folgeprojekt abgeklärt werden. Bei einem in axialer Richtung längeren Bewehrungsstab würden sich die Messwerte zwischen den Stabenden stärker der Null annähern, wie es andeutungsweise bereits aus den gezeigten Verläufen ablesbar ist.

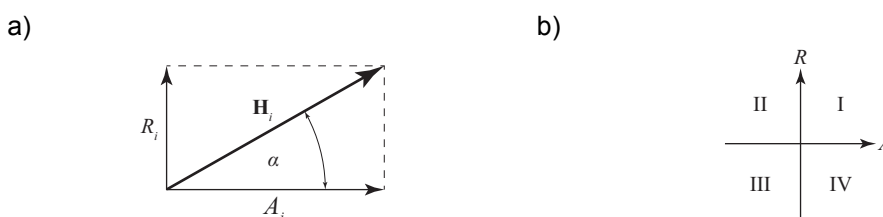


Abb. 2.17 (a) Komponentenzerlegung eines Vektorpfeils; (b) Konvention zur Einteilung der Quadranten

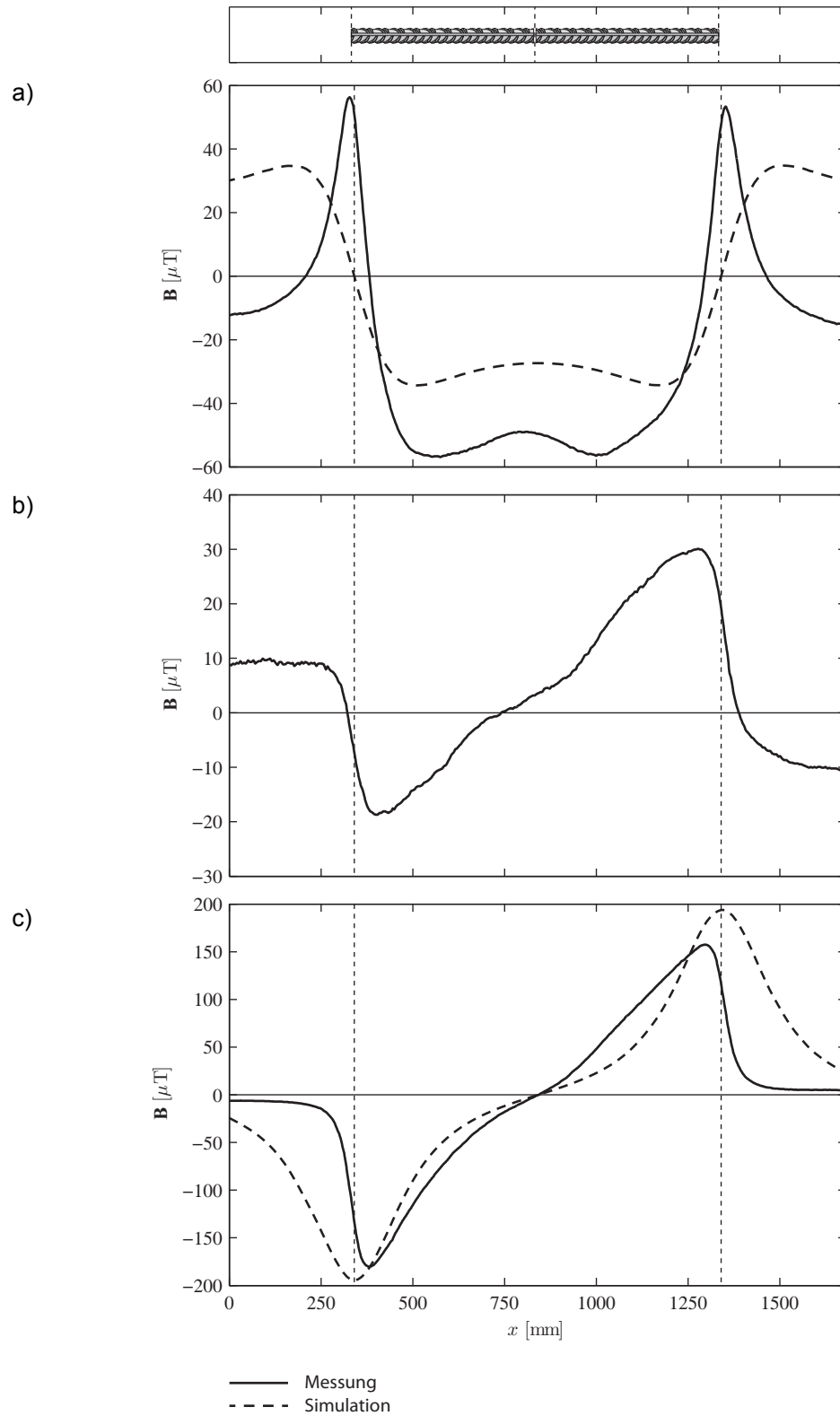


Abb. 2.18 Typische Kurvenverläufe eines einzelnen Bewehrungsstabes mit (a) der Axial-, (b) der Tangential- und (c) der Radialkomponente.

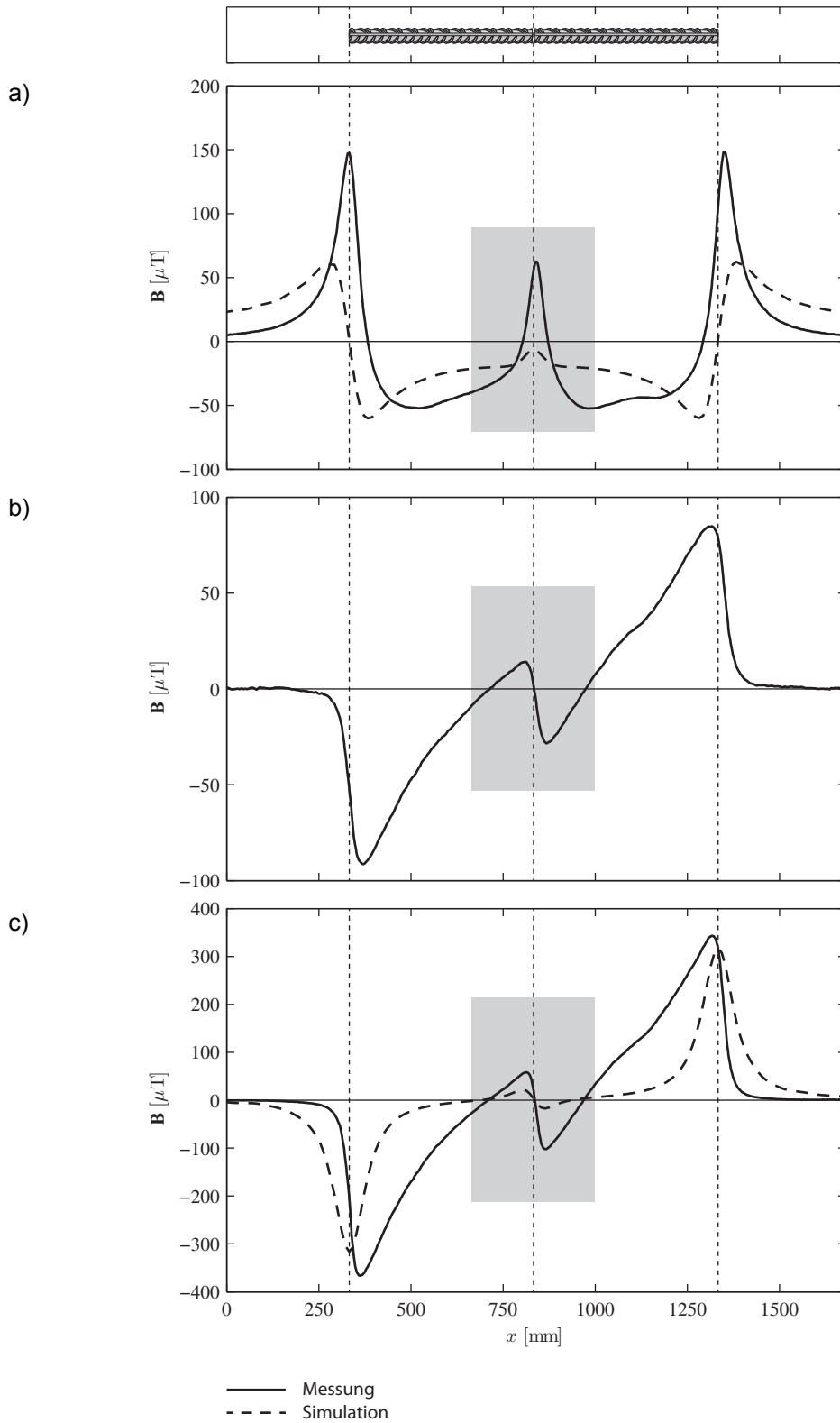


Abb. 2.19 Typische Kurvenverläufe an der Bruchstelle eines Bewehrungsstabes für (a) die Axial-, (b) die Tangential- und (c) die Radialkomponente.

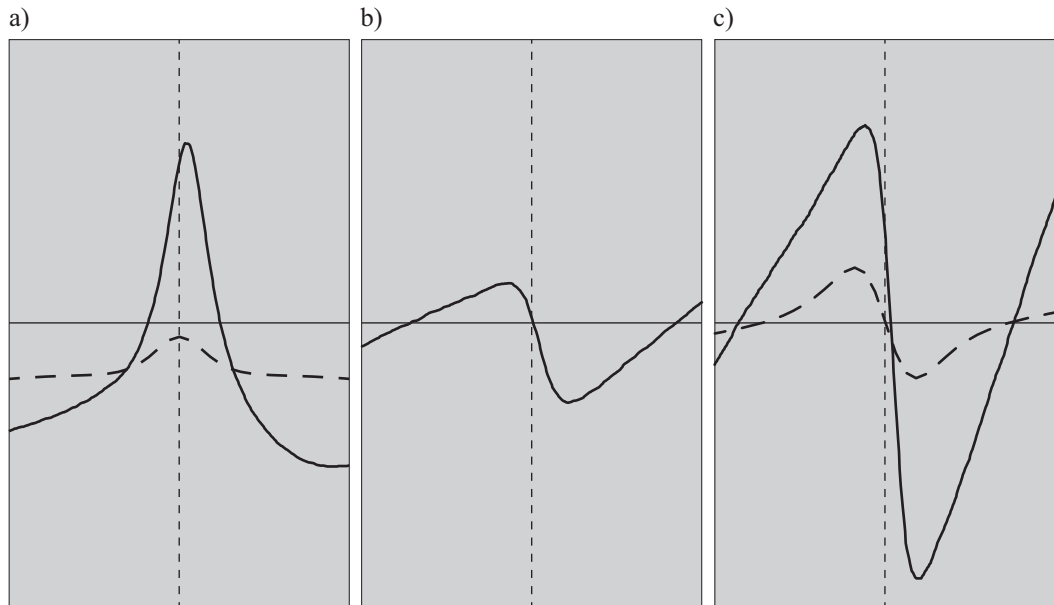


Abb. 2.20 Vergrösserte Darstellungen der typischen Kurvenverläufe an der Bruchstelle für (a) die Axial-, (b) die Tangential- und (c) die Radialkomponente.

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 mit minimalem Abstand zueinander, so wird man die Extrema auch als Anzeichen eines Bruches interpretieren können. Beispielhaft sind in Abbildung 2.19 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 abermals die einer Simulation dargestellt. Die Verläufe ähneln denen des intakten Bewehrungsstabes mit dem Unterschied, dass sich an der Bruchstelle lokale Extrema in den Verläufen zeigen (hervorgehoben durch grauen Bereich).

Betrachtet man die Vergrösserungen der hervorgehobenen Bereiche, die in den Abbildungen 2.20 alle die gleiche Skalierung der Feldstärke aufweisen, stellt man fest, dass sich die anteilmässige Zusammensetzung der Resultierenden des Erregerfeldes ändert, indem die Axialkomponente kleiner wird und mittig, an der Bruchstelle, ihr Minimum hat. Dem gegenüber weist die Radialkomponente an den zum Bruch gehörenden Stabenden lokale Extremwerte wechselnder Vorzeichen auf. Dieser 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 genauso wie die Radialkomponente.

Vergleicht man die Komponentenstärken untereinander, so fällt die Radialkomponente gegenüber den anderen beiden stets grösser aus. Der Unterschied zur Axialkomponente ist klein und wesentlich geringer, als der zur Tangentialkomponente. Der Einfluss der Tangentialkomponente ist daher genau zu prüfen und eventuell zu vernachlässigen.

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 mSF-Methode an einem Stahlbetonrahmen geschildert.

3.1 Vorversuche

Die Vorversuche, insbesondere die an den Einzelstäben, dienen 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, dienen einem Abgleich der tatsächlich vorgefundenen Gegebenheiten mit den durch die Theorie des Magnetismus prognostizierten.

3.1.1 Intakter und gebrochener Einzelstab

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.

Die Stäbe wurden während der Untersuchung möglichst fern anderer Ferromagnetika und anderer Magnetfeldquellen positioniert, um Einflüsse dieser Felder gering zu halten. Die in Abbildung 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.

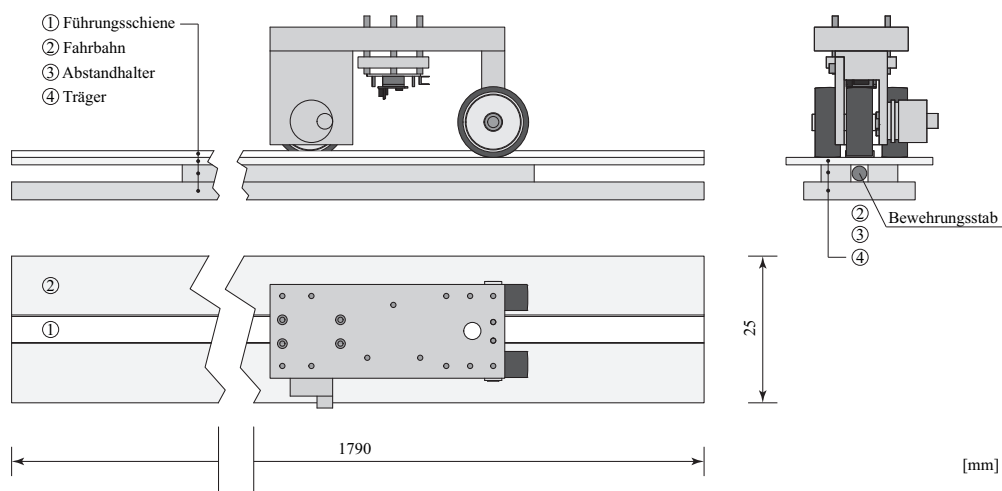


Abb. 3.1 Versuchsaufbau für die Untersuchung von Einzelstäben in Draufsicht und Front- sowie Seitenansicht.

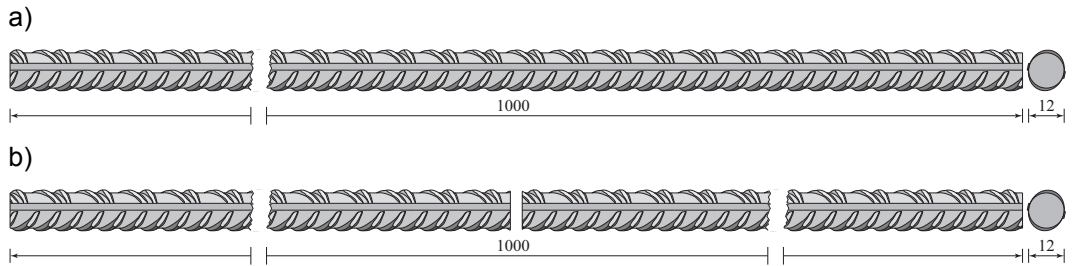


Abb. 3.2 (a) Intakter und (b) gebrochener Bewehrungsstab. Abmessungen in mm.

Die intakten Bewehrungsstäbe 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 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 Abbildung 3.3 zu sehen ist. Dieser wird an eingearbeiteten Aussparungen (siehe Abbildung 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.

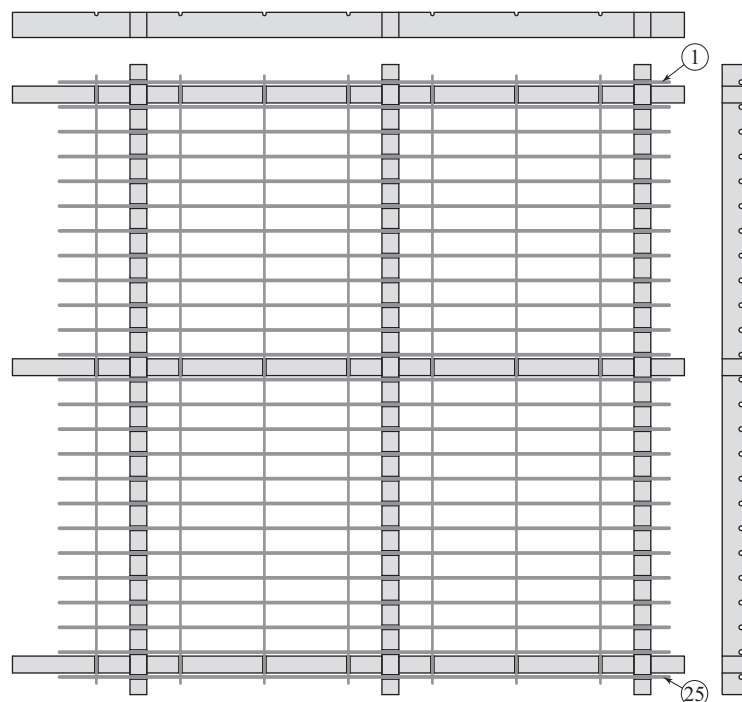


Abb. 3.3 Holzrahmen zur Aufnahme und Positionierung von Bewehrungsstäben.

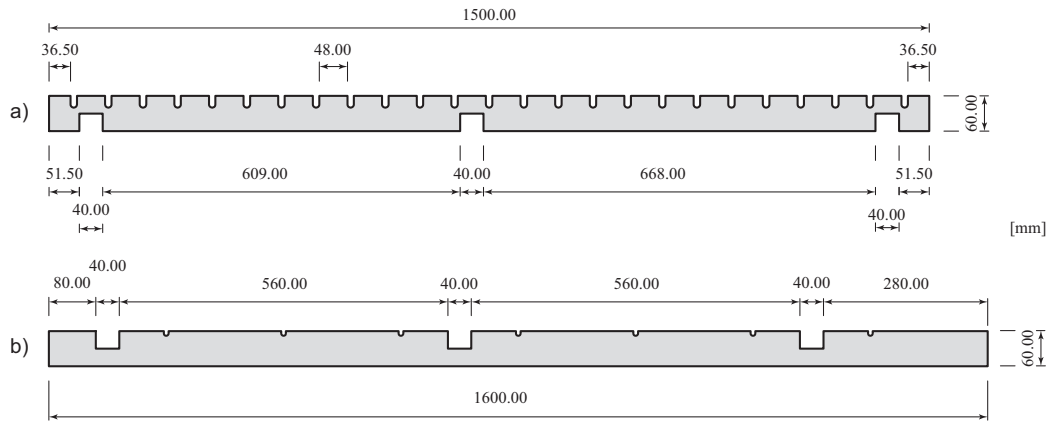


Abb. 3.4 Ansicht der Holme für die Aufnahme (a) der unteren und (b) der oberen Bewehrungslage.

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.

Die Bewehrungsstäbe hatten in der oberen Lage einen Durchmesser von $\varnothing = 8$ mm und

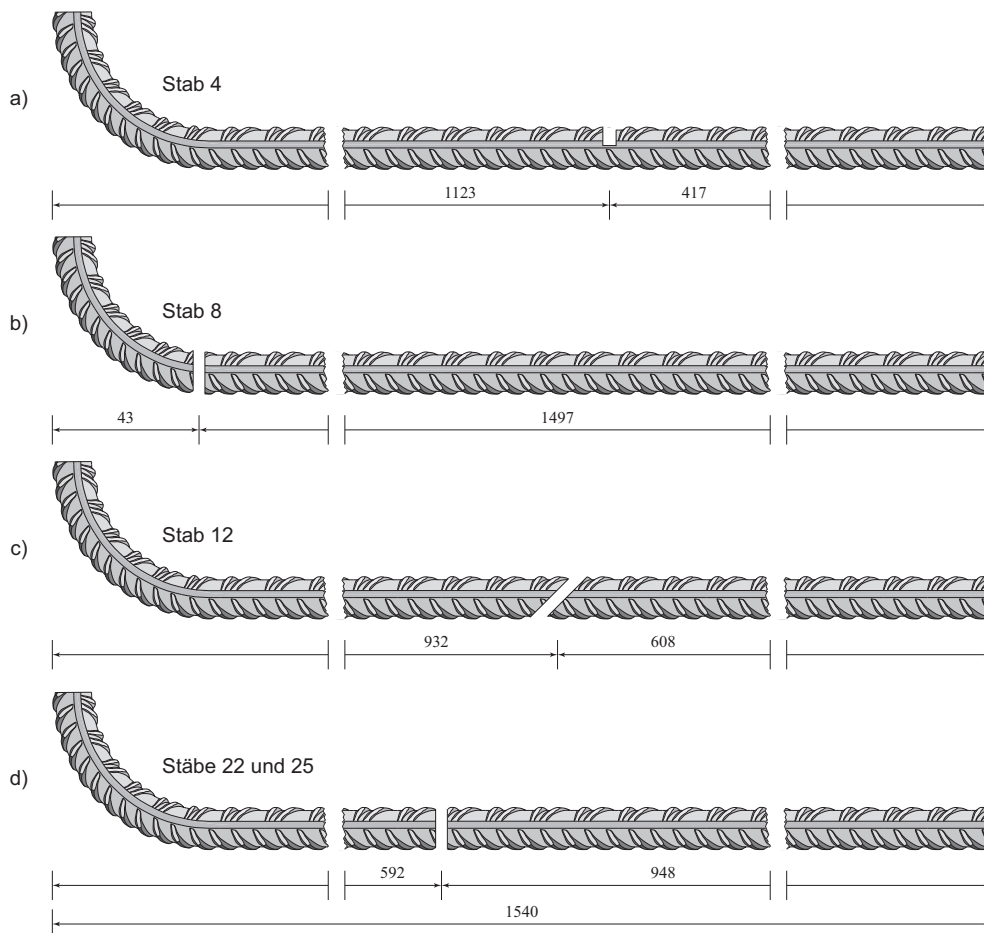


Abb. 3.5 Bewehrungsstab (a) mit eingearbeiteter Nut; (b) mit Bruch direkt an der Abbiegung; (c) mit zur Längsachse schräggestellten Bruchflächen; (d) mit senkrecht zur Längsachse stehenden Bruchflächen. Abmessungen in mm.

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 der Abbildung 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.

Während des Versuchs wurden mehrere Messserien durchgeführt, bei denen einerseits mit eingelegter 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 zu 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 beurteilen 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 Klemmba-cken 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. Die dabei aufgetretene Variation bei den bis zum Eintritt des Bruchs benötigten Zyklen wurde nicht eingehender untersucht, da es bei diesem Forschungsprojekt nur ein Interesse am Ermüdungsbruch bzw. den dadurch entstandenen Bruchflächen selbst gab.

Für die statischen Zugversuche wurden die Bewehrungsstäbe ohne Hülsen eingespannt und verformungsgesteuert bis zum Bruch belastet. Dabei wurden die Zugkraft und der Kolbenweg der Prüfmaschine gemessen.

Tab. 3.1 Messwerte der Ermüdungsversuche.

	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

Bis zum Erreichen der Fließgrenze betrug der Zugspannungszuwachs $7.35 \text{ N}/(\text{mm}^2 \cdot \text{s})$, der anschliessend 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.

3.2.1 Versuchsaufbau

Zur Erfassung des Magnetfeldes in einer zum Boden parallelen Ebene wurde ein Versuchsstand errichtet, wie er in Abbildung 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

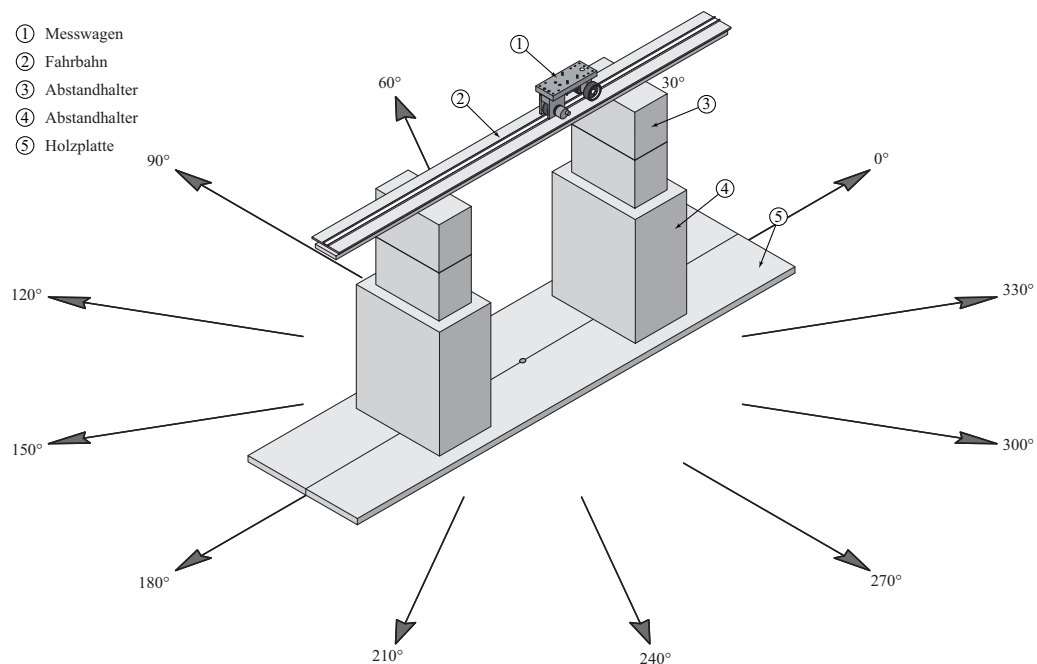


Abb. 3.6 Drehbarer Versuchsaufbau.

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 gewählte Ebenenrichtung notwendig. Zunächst wurde ohne Bewehrungsstab, dann am intakten und abschliessend am in der Mitte gebrochenen Bewehrungsstab gemessen. Die beiden Bewehrungsstäbe hatten jeweils eine Gesamtlänge von $l = 1'000$ mm. Der gebrochene Stab wurde 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 anschliessend auf die Fahrbahn gestellt und stets in dieselbe Richtung der Fahrbahn verfahren. Die Messung begann jedes Mal an dem Ende der Fahrbahn, dem die aktuelle Richtungsmarkierung am Boden am nächsten lag. Nach Beendigung der drei Messdurchläufe wurde der gesamte Versuchsaufbau um 30° weitergedreht. Diese Prozedur wurde insgesamt zwölf Mal durchgeführt. Durch die Drehung des Versuchsaufbaus wurden für jede Strecke Hin- und Rückfahrten durchgeführt.

3.3 Hauptversuch an einem Stahlbetonrahmen

Die Durchführung des Hauptversuchs wurde durch ein ebenfalls am IBK durchgeführtes Forschungsprojekt zur Untersuchung des Ermüdungsverhaltens von Stahlbetontragwerken ermöglicht. Bei diesem Projekt wurden sämtliche einfeldrigen Rahmenbrücken, die im Zuge des Baus der Nationalstrassen A1, A2 und A3 im Kanton Aargau realisiert wurden, in einer Datenbank erfasst [Fehlmann 2012]. 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. Der Spannungswechsel in der Bewehrung der äusseren Rahmenecken wurden vorderhand auf $\Delta\sigma_s = 220$ N/mm² festgelegt, womit sie über der Dauerfestigkeit des verwendeten Stahls lag. Daraus resultierte eine Belastungsdifferenz von $\Delta F = 100$ kN.

3.3.1 Versuchsaufbau

Der zu untersuchende Stahlbetonrahmen ist in Abbildung 3.7 schematisch dargestellt. Er hatte eine Länge von $l = 3.85$ m, eine Breite von $b = 1.50$ m und eine Höhe von $h = 2.50$ m. Die Bewehrungsüberdeckung für die zu untersuchenden Bewehrungsstäbe betrug $c_{nom} = 15$ 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 mSF-Methode durchgeführt worden sind. Die horizontalen Messfelder hatten je eine Länge von $l = 50$ cm und die vertikalen je eine Länge von $l = 70$ 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 Klettbändern 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 selbst können dem Versuchsbericht [Fehlmann 2011] entnommen werden.

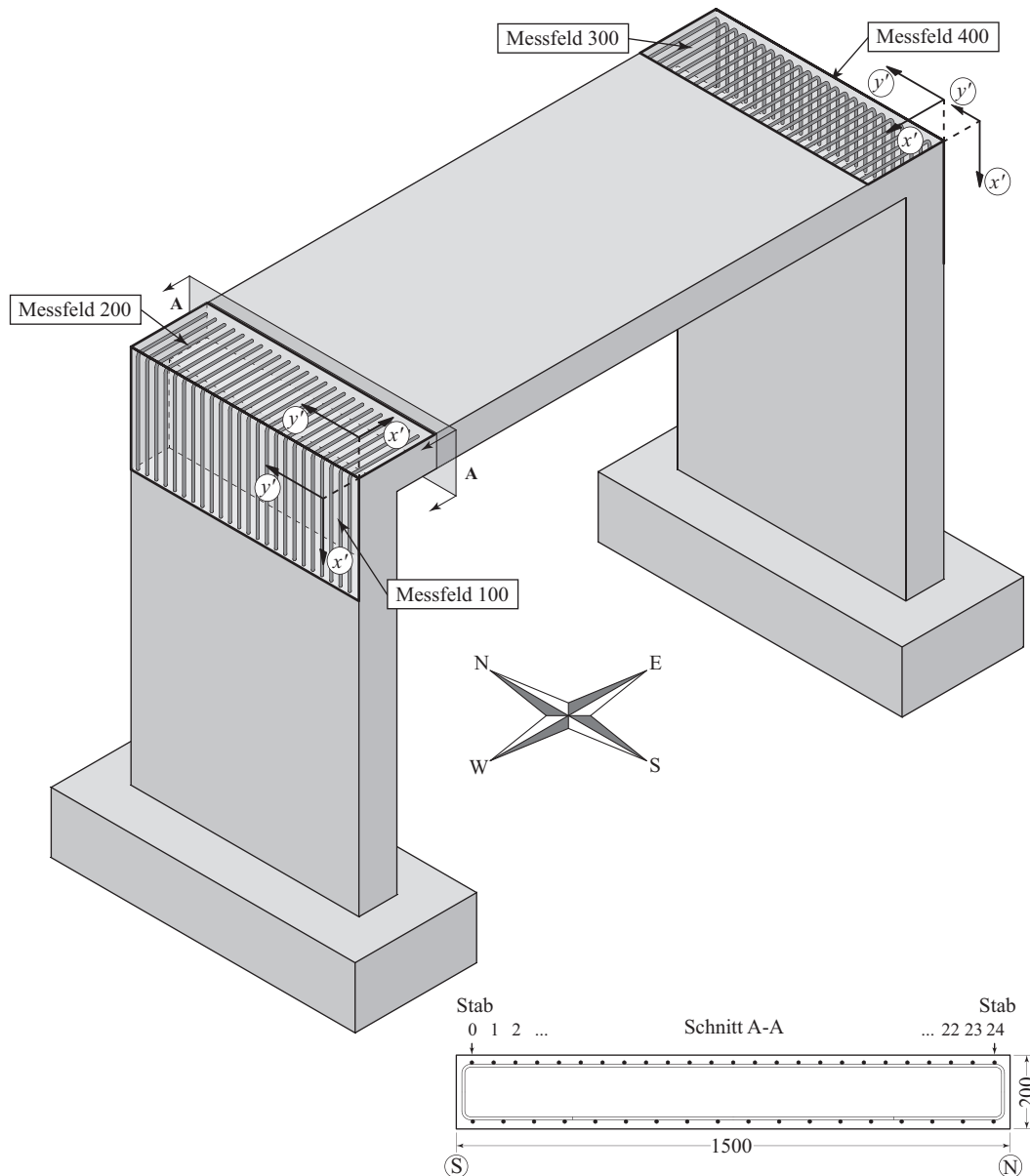


Abb. 3.7 Stahlbetonrahmen mit von der mSF-Methode untersuchten, markierten äusseren Rahmenecken. Abmessungen in mm.

3.3.2 Versuchsdurchführung

Während geplanter Versuchspausen, in denen u.a. Deformermessungen am Rahmen durchgeführt wurden, konnten die Messungen der mSF-Methode 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. Abbildung 3.8).

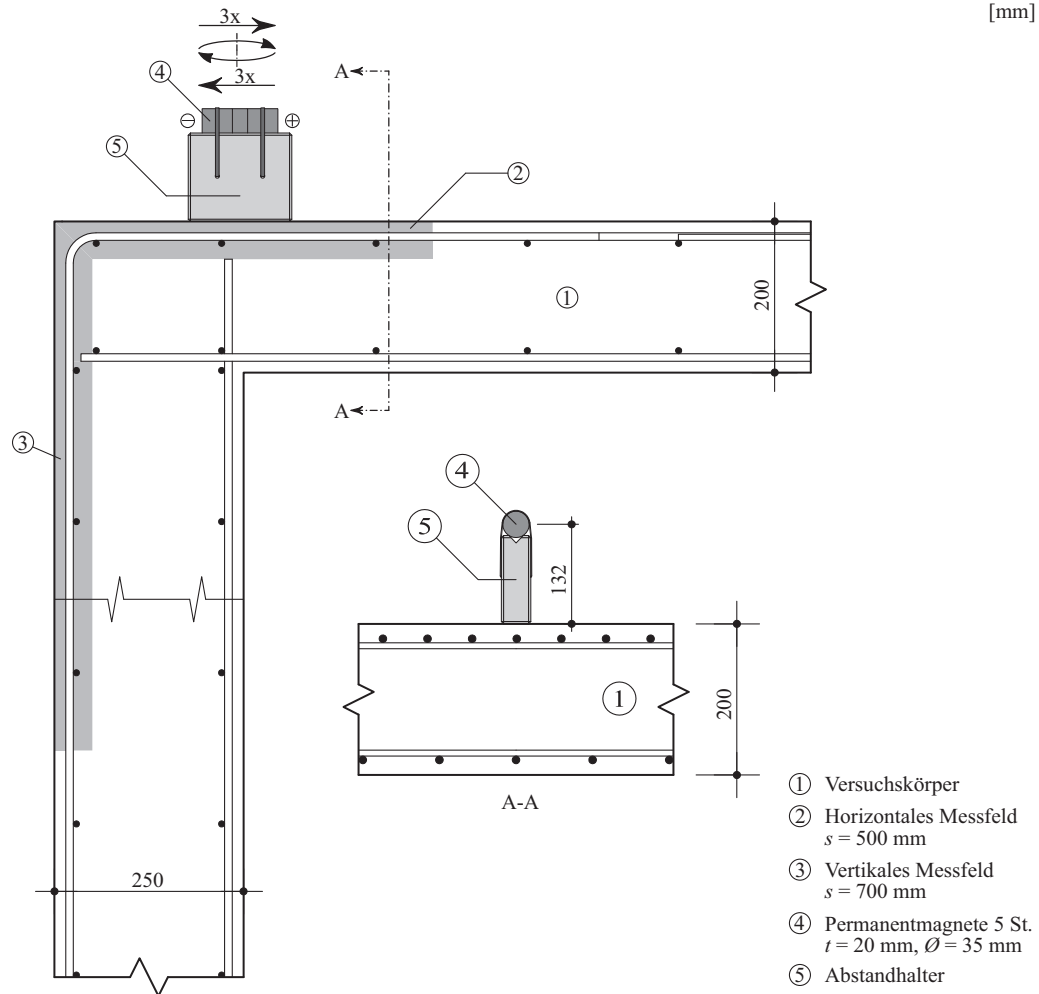


Abb. 3.8 Schnitt einer Rahmenecke mit eingezeichneten Messfeldern (grau) und Permanentmagnet.

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.

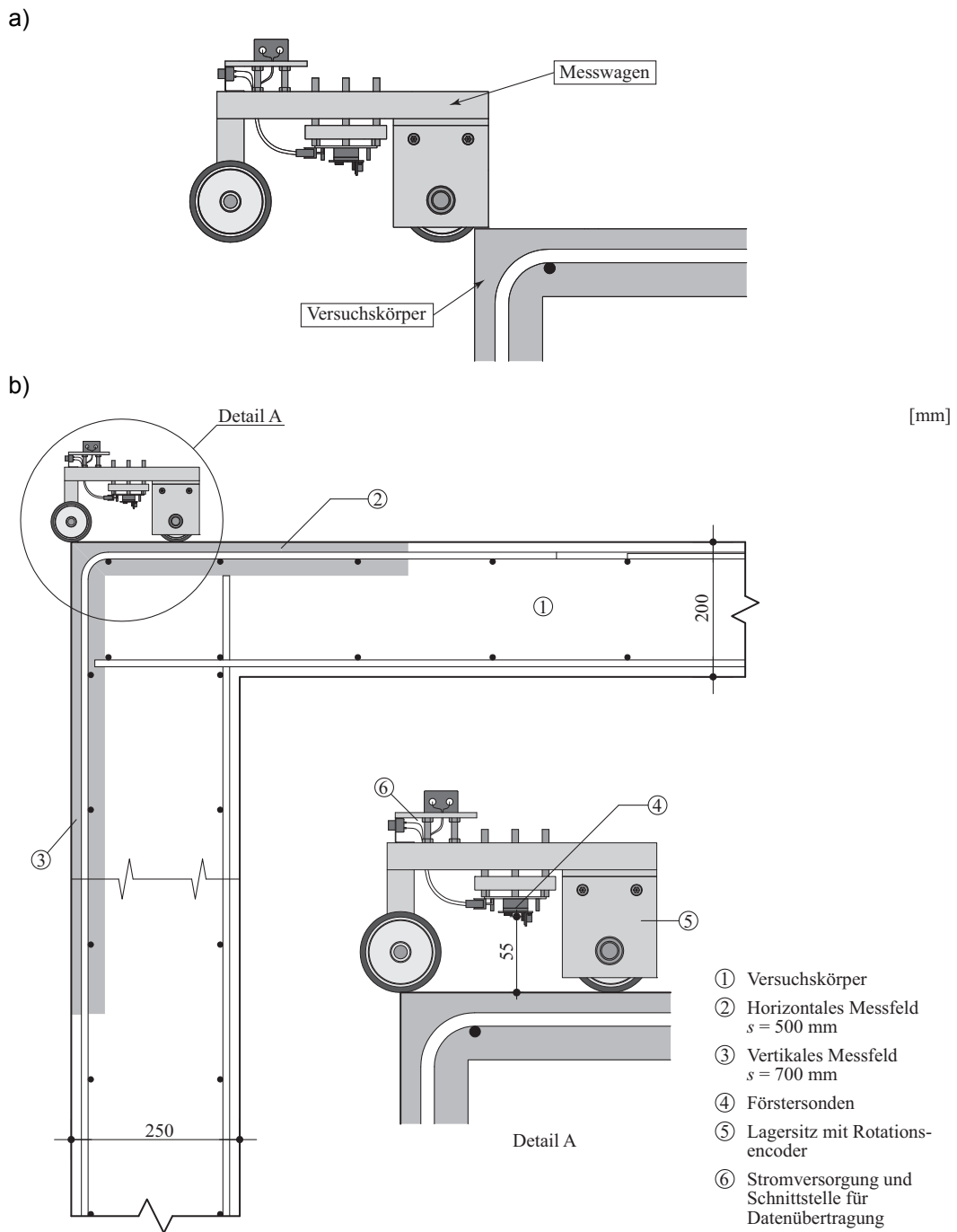


Abb. 3.9 (a) Positionierung des Messwagens zu Messbeginn; (b) Schnitt einer Rahmenecke mit eingezeichneten Messfeldern (grau) und Messwagen.

Tab. 3.2 Messdurchgänge der Messfelder.

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

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 mSF-Methode wurde dann 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 2011]). 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

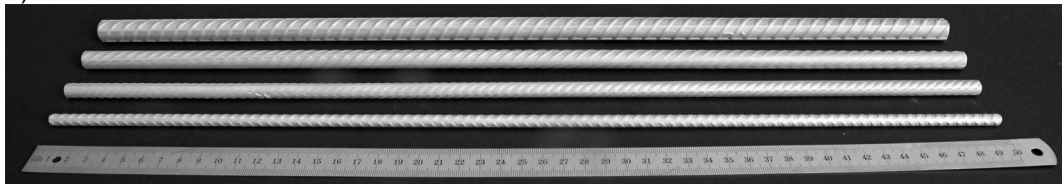
Die Vorversuche umfassen eine Reihe von Einzelversuchen, von denen nur einige detaillierter besprochen werden. Die abgebildeten Resultate stellen deshalb nur eine Auswahl der wichtigsten Versuche dar.

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 Abbildung 4.1) und in Abbildung 4.2 exemplarisch die Ergebnisse für den Bewehrungsstab mit $\varnothing = 6$ mm dargestellt. Die insgesamt zehn Messungen pro Durchmesser unterscheiden sich lediglich im Abstand, mit dem der *MicroMag3* über 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 $1/r^3$, 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.

a)



b)

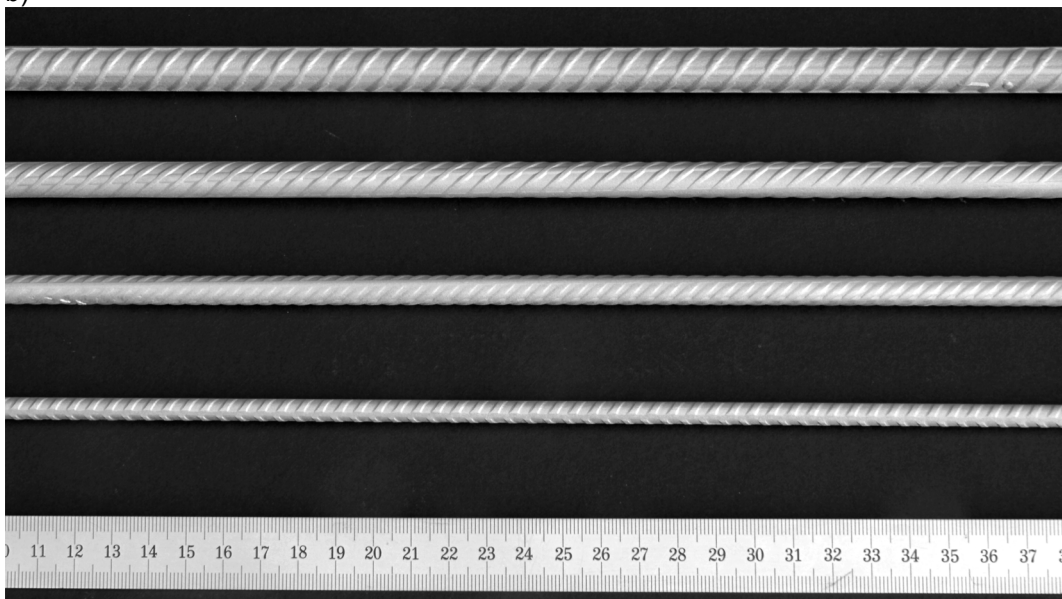


Abb. 4.1 Bewehrungsstäbe der Durchmesser 6, 8, 10 und 12 mm in (a) der Ansicht und (b) der Draufsicht.

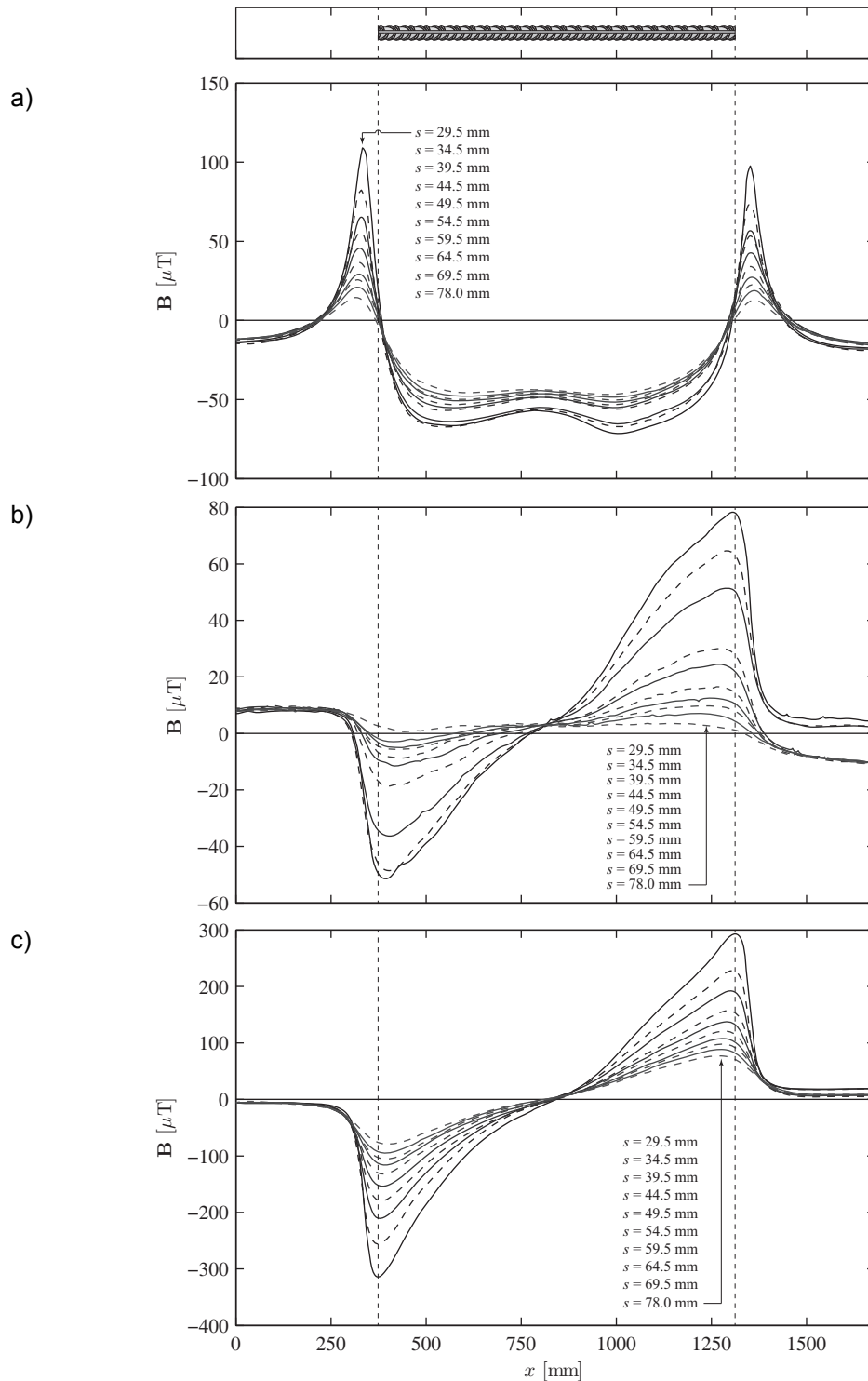


Abb. 4.2 Variation des Abstandes zwischen Bewehrungsstab und MicroMag3 mit (a) der Axial-, (b) der Tangential- und (c) der Radialkomponente.

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

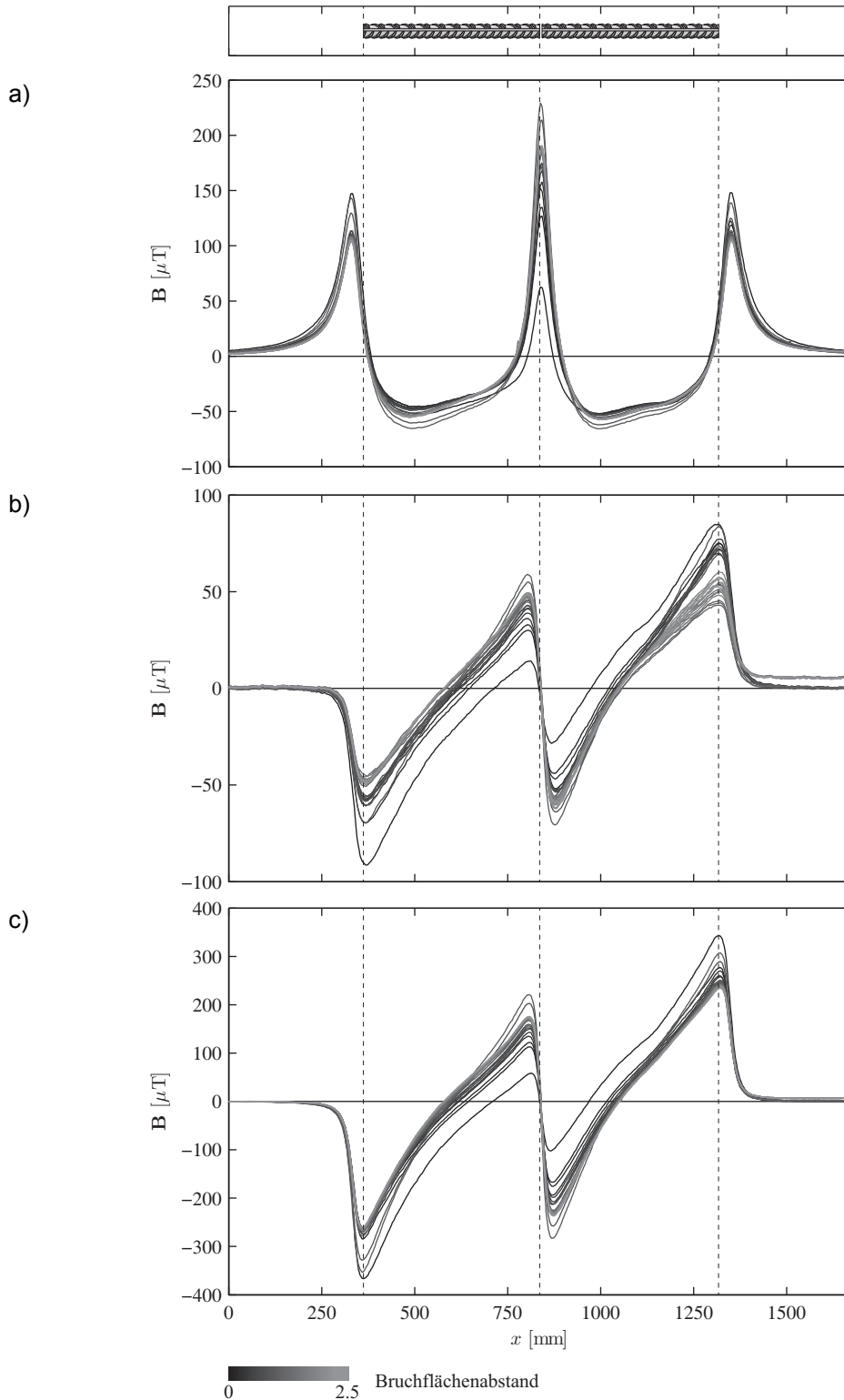


Abb. 4.3 Kurvenverläufe für Messungen bei unterschiedlichen Bruchflächenabständen mit (a) der Axial-, (b) der Tangential- und (c) der Radialkomponente.

In Abbildung 4.3 sind für den Bewehrungsstab mit $\varnothing = 6$ mm die Kurvenverläufe von 26 Messungen dargestellt, bei denen der Abstand der Bruchflächen in 0.1 mm Schritten vergrößert wurde. Der Legende entsprechend werden die Grautöne heller je grösser der Abstand zwischen den Bruchflächen ist. Wie bereits [Scheel 1997] feststellte, sind selbst bei einem nicht mehr feststellbaren Bruchflächenabstand noch Muster eines Bruches in den Kurvenverläufen der Messwerte erkennbar.

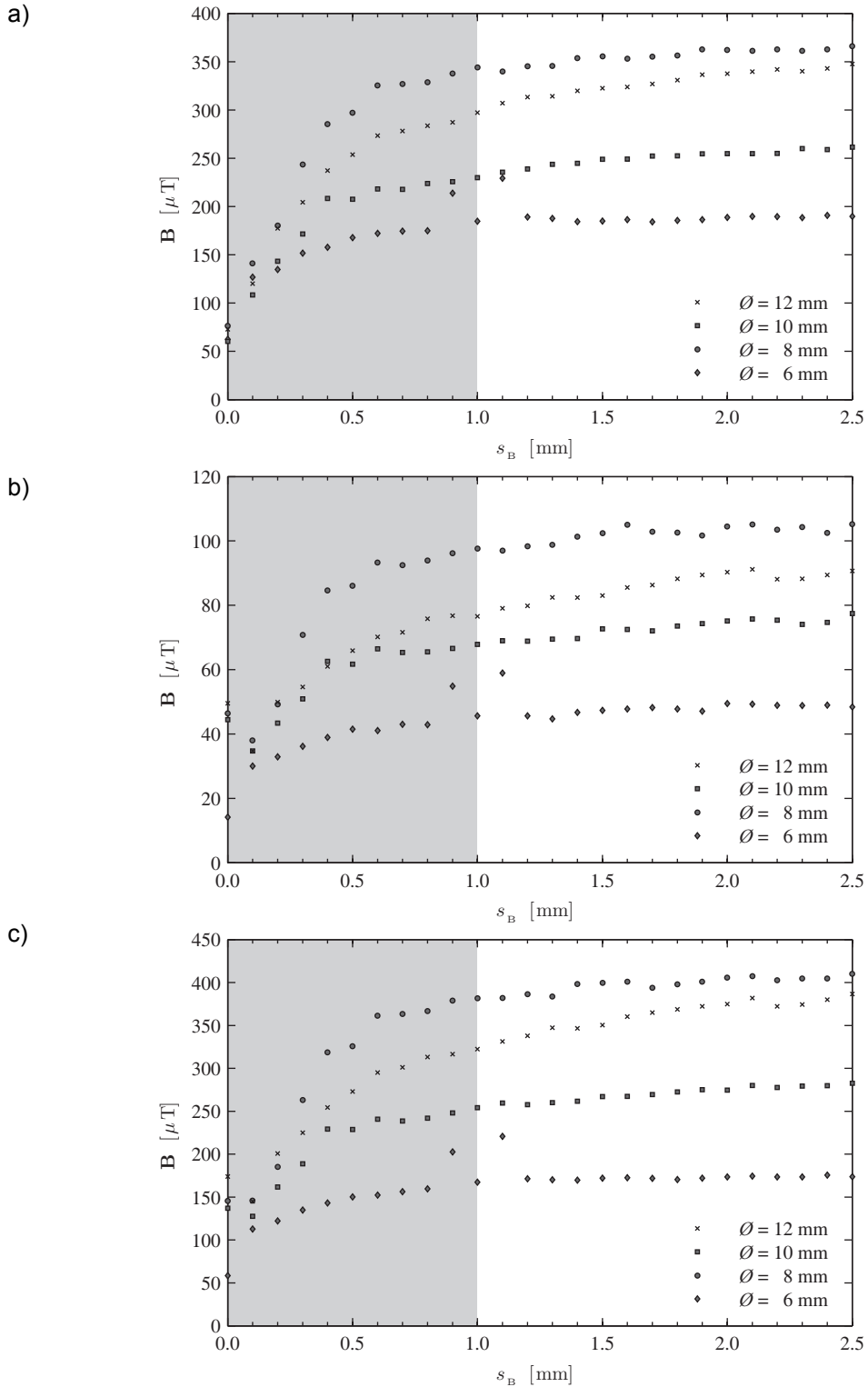


Abb. 4.4 Einfluss des Bruchflächenabstandes mit (a) der Axial-, (b) der Tangential- und (c) der Radialkomponente.

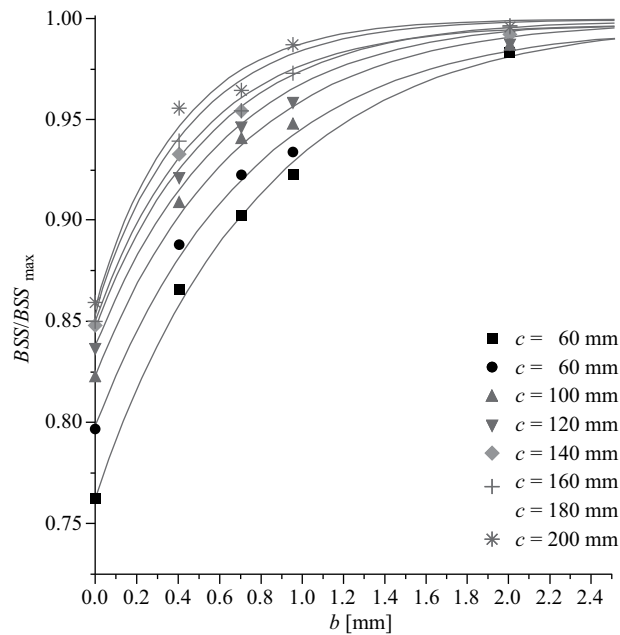


Abb. 4.5 Einfluss des Bruchflächenabstandes bei unterschiedlichen Bewehrungsüberdeckungen in normierter Darstellung nach [Scheel 1997].

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 Abbildungen 4.4 (a) bis (c) ersichtlich wird. Pro Diagramm sind die Kurvenverläufe der bereits erwähnten Bewehrungsstäbe mit den Durchmessern von 6 bis 12 mm abgebildet. Die jeweils höheren Werte in allen drei Magnetfeldkomponenten des Bewehrungsstabes mit $\varnothing = 8$ mm resultieren aus einer höheren magnetischen Permeabilität des Materials.

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 Abbildung 4.5).

4.1.3 Versuch zu Bewehrungsstößen

Der in Abbildung 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 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. Die feiner gestrichelten vertikalen Linien deuten die äusseren Kanten der Stahlbetonplatte an.

Bei diesem Versuch erfolgte die Markierung der äusseren Plattenränder testweise mit kleinen Magneten, welche in die in Abbildung 3.1 dargestellte Plexiglasfahrbahn eingelassen wurden. Die Kurvenverläufe in Abbildung 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 Abbildung 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 nebenei-

inanderliegenden 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 Abbildung 4.3) bedeutend kleiner aus.

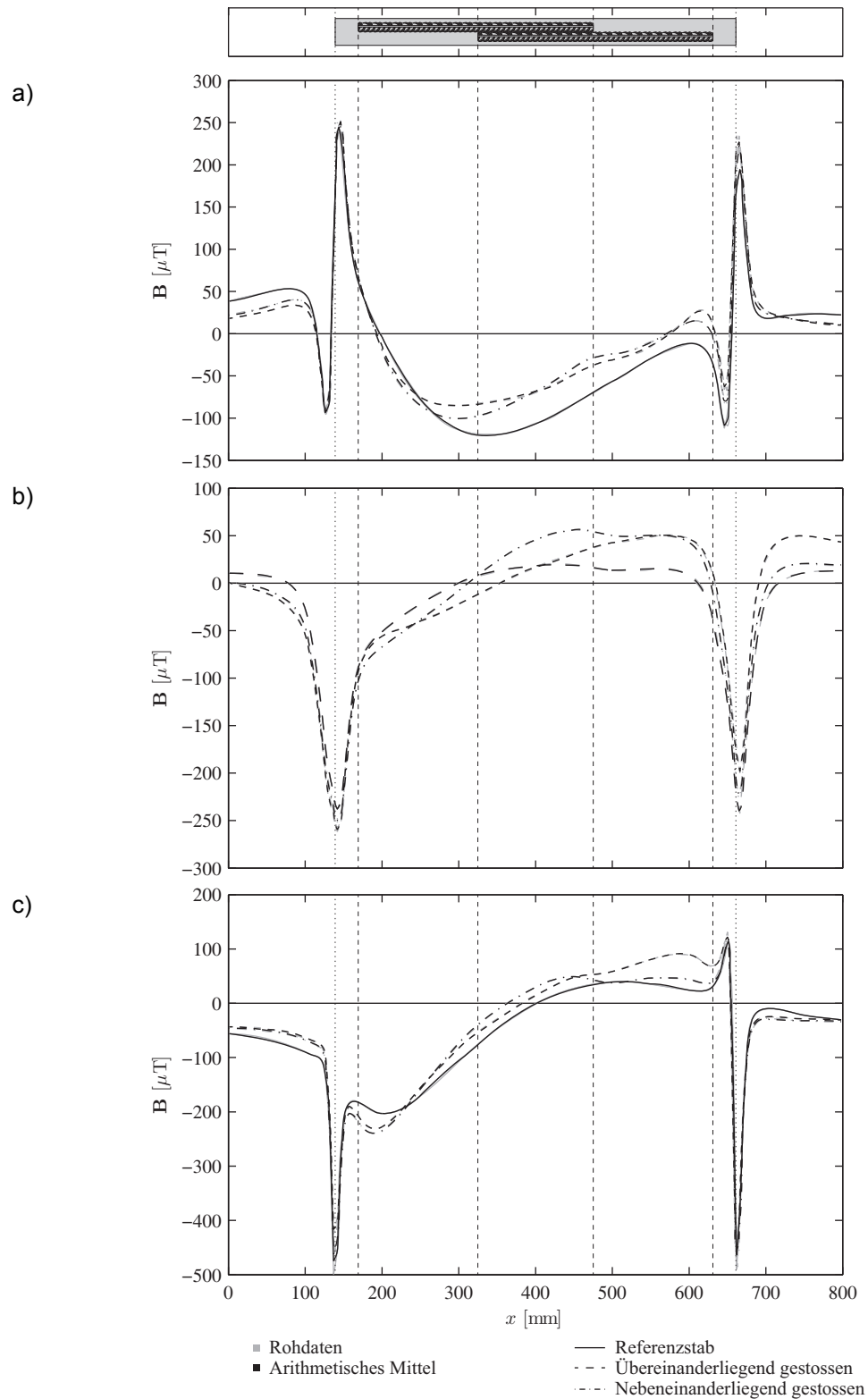


Abb. 4.6 Kurvenverläufe aus Messungen an einem gestossenen Bewehrungsstab mit (a) der Axial-, (b) der Tangential- und (c) der Radialkomponente.

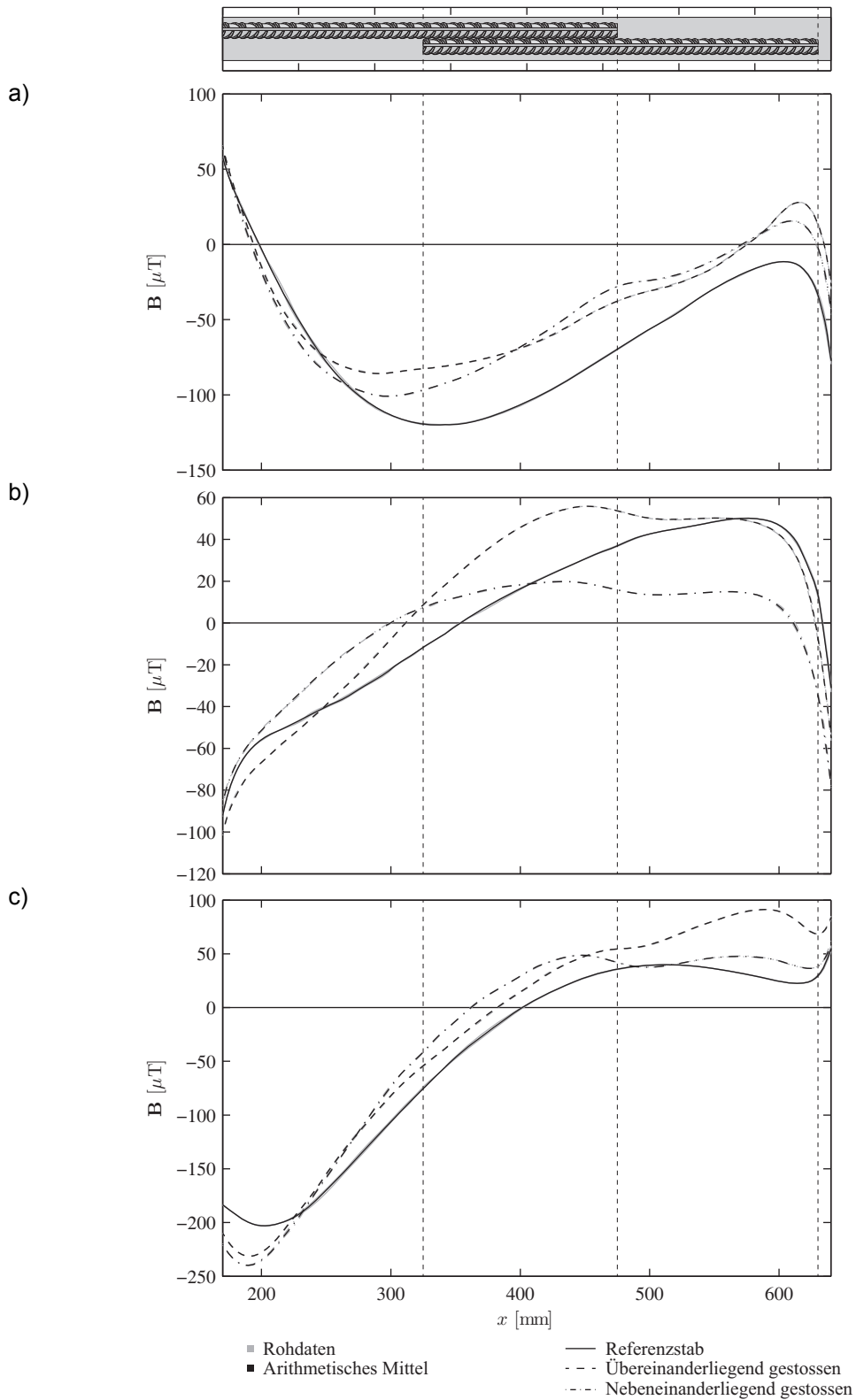


Abb. 4.7 Freigestellte Kurvenverläufe aus Messungen an einem gestossenen Bewehrungsstab mit (a) der Axial-, (b) der Tangential- und (c) der Radialkomponente.

4.1.4 Bewehrungslayouts

Im Folgenden sind die Diagramme zu den in Abbildung 3.5 vorgestellten Bewehrungsstäben abgebildet. In jedem Diagramm sind die drei Magnetfeldkomponenten dargestellt, gekennzeichnet durch unterschiedliche 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 Abbildung 3.5. In den Kurvenverläufen ist die jeweilige Position der Schädigung durch vertikale Pfeile hervorgehoben. Die beiden Positionen decken sich nicht, da die Messungen mit der mSF-Methode ein Stück vor dem Stabanfang begonnen und ein Stück nach dem Stabende beendet wurden. Ausserdem ist der bereits in Kapitel 2.3.7 erwähnte Effekt einer Verkürzung der Kurvenverläufe gegenüber der gemessenen realen Länge des Bewehrungsstabes zu beobachten. Wird der Stabanfang beim lokalen Minimum der Radialkomponente angenommen und der Effekt des verkürzten Kurvenverlaufs berücksichtigt, kann die jeweilige Position der Schadstelle aus Abbildung 3.5 entnommen und in den Diagrammen eingezeichnet werden.

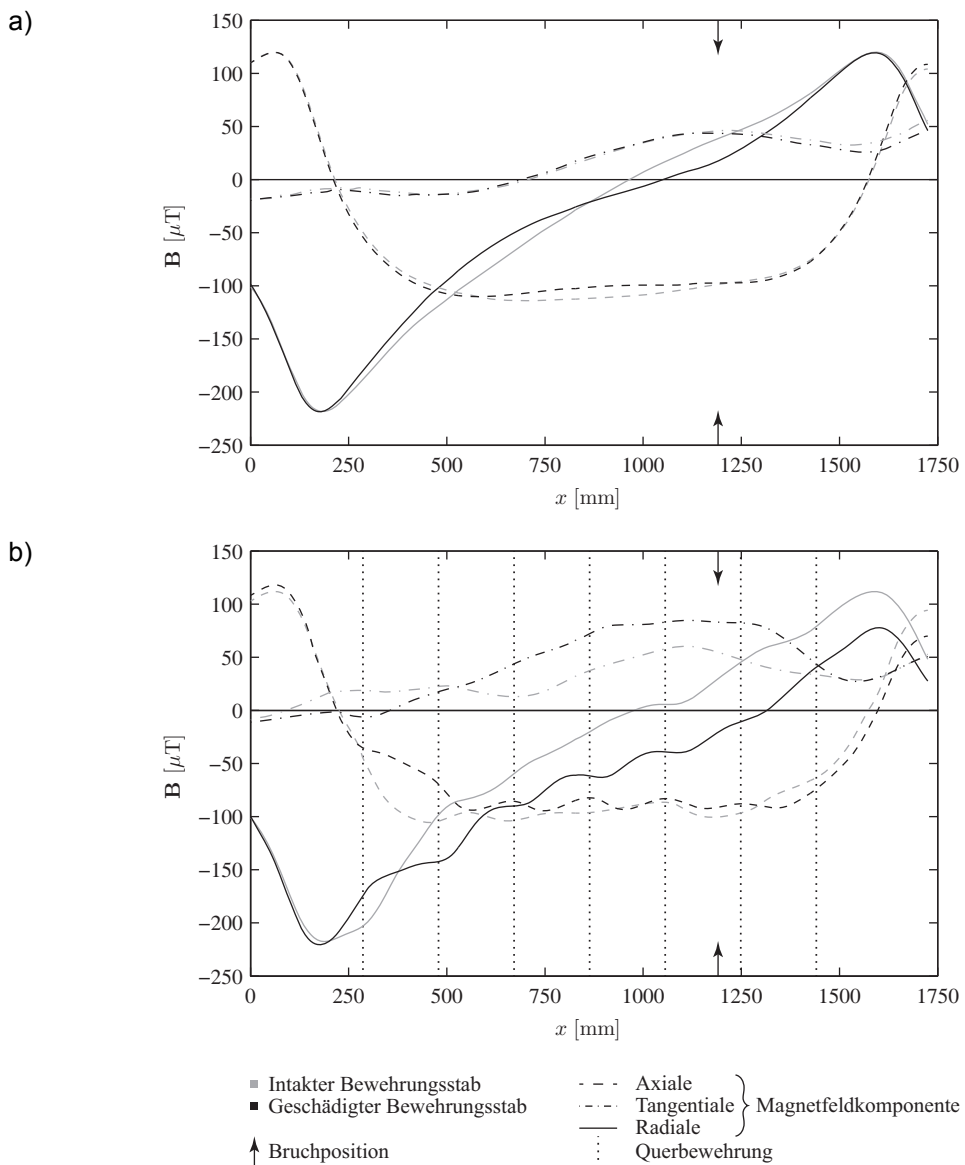


Abb. 4.8 Kurvenverläufe am mit einer Nut versehenen Stab 4 bei (a) nicht eingelegter und (b) eingelegter Querbewehrung.

In Abbildung 4.8 sind die Messungen am mit einer Nut versehenen Stab 4 dargestellt. Mit Kenntnis der Lage der Nut bei $x = 1123 \text{ mm}$ kann man eine leichte Abweichung des Kurvenverlaufs an dieser Stelle erkennen. Ohne diese Kenntnis würde man diese Abweichung übersehen. Dies gilt sowohl bei eingelegter wie auch nicht eingelegter Querbewehrung.

Abbildung 4.9 zeigt die Diagramme des an der Abbiegung gebrochenen Bewehrungsstabes 8. Für diesen Fall kann ebenfalls kein charakteristisches Bruchsignal innerhalb der Kurvenverläufe festgestellt werden. Eine leichte Streckung des Kurvenverlaufs rechts des linksseitigen Extremwerts kann als einziges Anzeichen für eine Anomalie an der Stelle $x = 43 \text{ mm}$ ausgemacht werden.

Der Einfluss der eingelegten Querbewehrung ist bei diesem Stab, der bereits knapp 34 cm von der Abbiegung der Querbewehrung entfernt liegt, kaum mehr auszumachen.

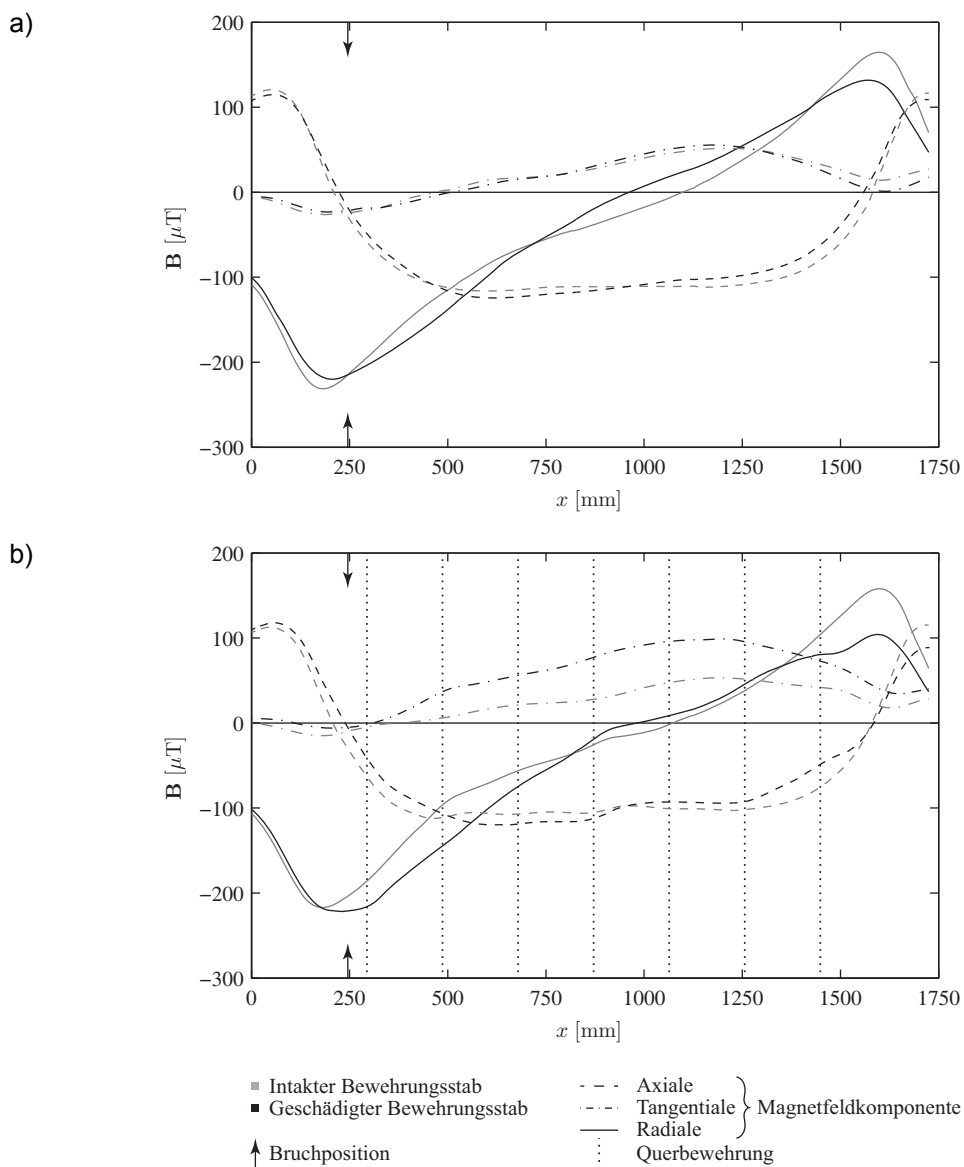


Abb. 4.9 Kurvenverläufe des an der Abbiegung gebrochenen Stabes 8 bei (a) nicht eingelegter und (b) eingelegter Querbewehrung.

Die Messungen am Stab 12, der mit einem schrägen Bruch versehen wurde, sind in Abbildung 4.10 dargestellt. Bei diesem Stab ist die Bruchstelle bei $x = 932$ mm deutlich erkennbar und hebt sich gegenüber der Ausgangsmessung am intakten Bewehrungsstab in den Kurvenverläufen der Axial- wie auch der Radialkomponente gut ab. In der Tangentialkomponente ist hingegen kein Bruchsignal erkennbar.

Gegenüber der Messung bei nicht eingelegter Querbewehrung zeigte sich bei eingelegter Querbewehrung ein geringfügig veränderter Kurvenverlauf, was die Erkennbarkeit des Bruchsignals jedoch nicht einschränkt.

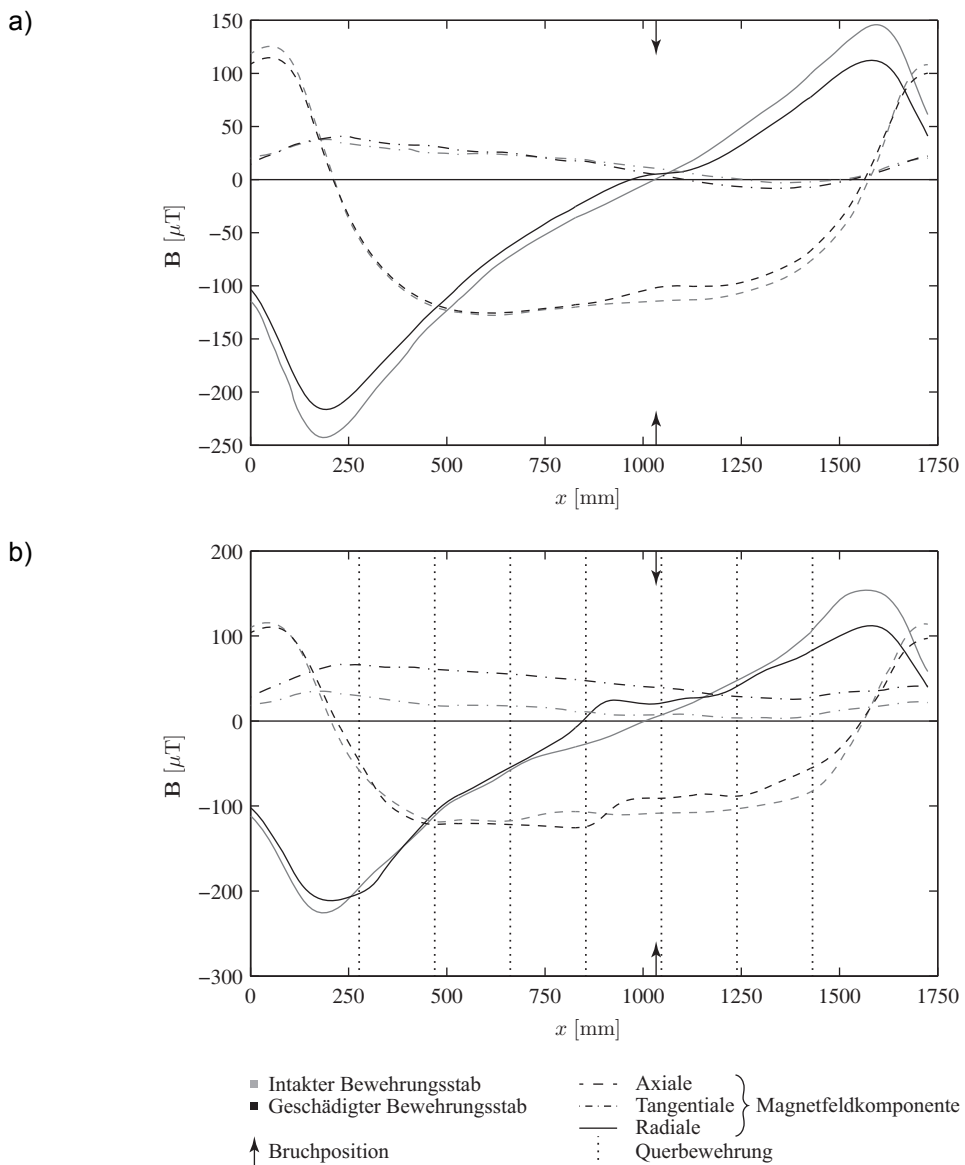


Abb. 4.10 Kurvenverläufe des mit einem schrägen Bruch versehenen Stabes 12 bei (a) nicht eingelegter und (b) eingelegter Querbewehrung.

Gegenüber dem Bruch mit zur Längsachse schräg stehenden Bruchflächen fällt das Bruchsignal bei einem Bruch mit zur Längsachse senkrecht stehenden Bruchflächen deutlicher aus. In diesem Fall zeigt Abbildung 4.11 eine grössere Amplitudendifferenz an der Bruchstelle bei $x = 592$ mm.

Der Einfluss der Querbewehrung tritt nun wieder stärker in Erscheinung und erschwert zunehmend die Suche nach Bruchsignalen. Betrachtet man hier die Tangentialkomponente, so kann jedoch selbst bei eingelegter Querbewehrung die Veränderung des Kurvenverlaufs vom intakten zum gebrochenen Bewehrungsstab gut erkannt werden.

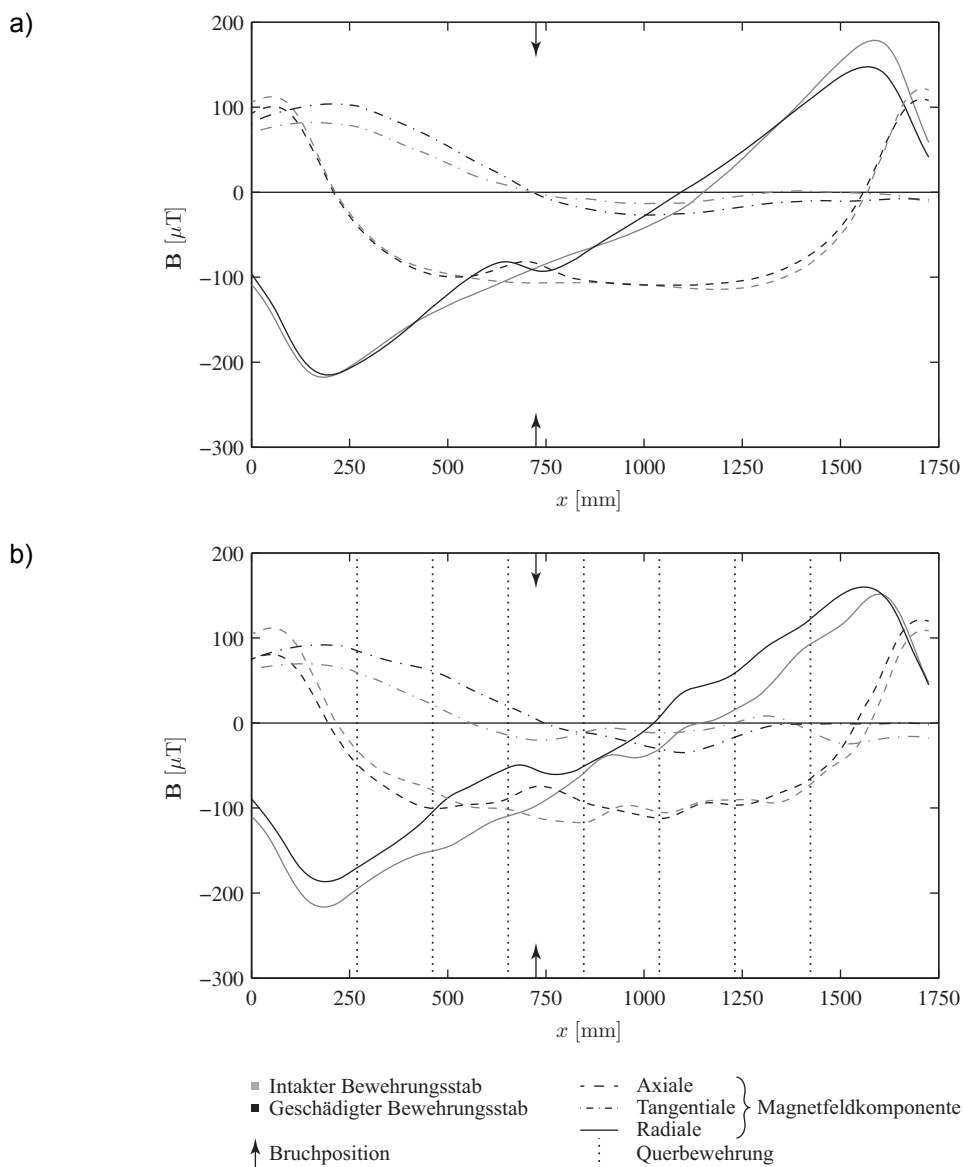


Abb. 4.11 Kurvenverläufe des mit einem geraden Bruch versehenen Stabes 22 bei (a) nicht eingelegter und (b) eingelegter Querbewehrung.

Stab 25 verhält sich ähnlich wie Stab 22 (siehe Abbildung 4.12). Gegenüber Stab 22 hat sich jedoch der Einfluss der Querbewehrung erheblich vergrößert, so dass das Bruchsignal schwerer zu erkennen ist.

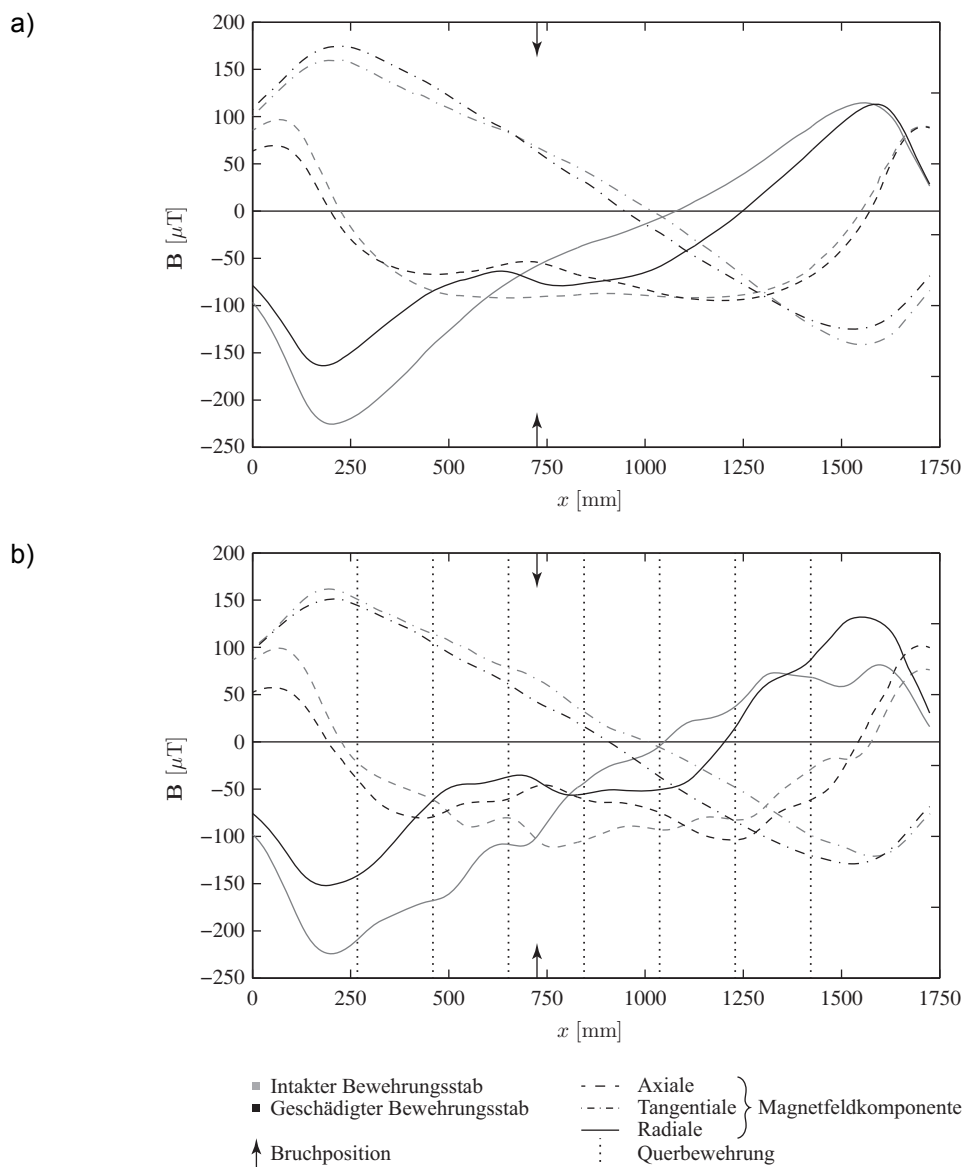


Abb. 4.12 Kurvenverläufe des mit einem geraden Bruch versehenen Stabes 25 bei (a) nicht eingelegter und (b) eingelegter Querbewehrung.

4.1.5 Gegenüberstellung von Ermüdungs- und Verformungsbrüchen

Bei der vergleichenden Betrachtung eines Ermüdungs- und eines Verformungsbruches (siehe Abbildung 4.13) fällt bereits auf, dass sich die Bruchflächen beider Bruchtypen stark voneinander unterscheiden. Die Bruchflächen des Ermüdungsbruches bestehen, wie in [Fehlmann 2012] bereits ausgeführt wurde, aus drei Zonen, von denen der Ermüdungsbruch eher glatt strukturiert ist und eine senkrecht zur Längsachse stehende Trennfläche aufweist. In der Übergangszone wird die Bruchfläche rauer und unregelmässiger und geht dann in die Zone des Restbruches über. Die Rest- oder Verformungsbruchfläche weist dann mehrere Trennflächen unterschiedlicher räumlicher Orientierungen auf. *Fehlmann* weist darauf hin, dass das Material bei dieser Art des Bruches sehr rau wirkt und die plastischen Verformungen, die bei der Entstehung des Bruches auftreten, gut sichtbar sind.

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 den Bruchtypen ist in den Messungen der mSF-Methode 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 ebenfalls feststellbar. Bei entsprechend grösserem Bruchflächenabstand fallen die Beträge der lokalen Extremwerte grösser aus, was Abbildung 4.14 entnommen werden kann.

Aus den Abbildungen 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 der Abbildung 4.14 nicht dargestellt wurde.

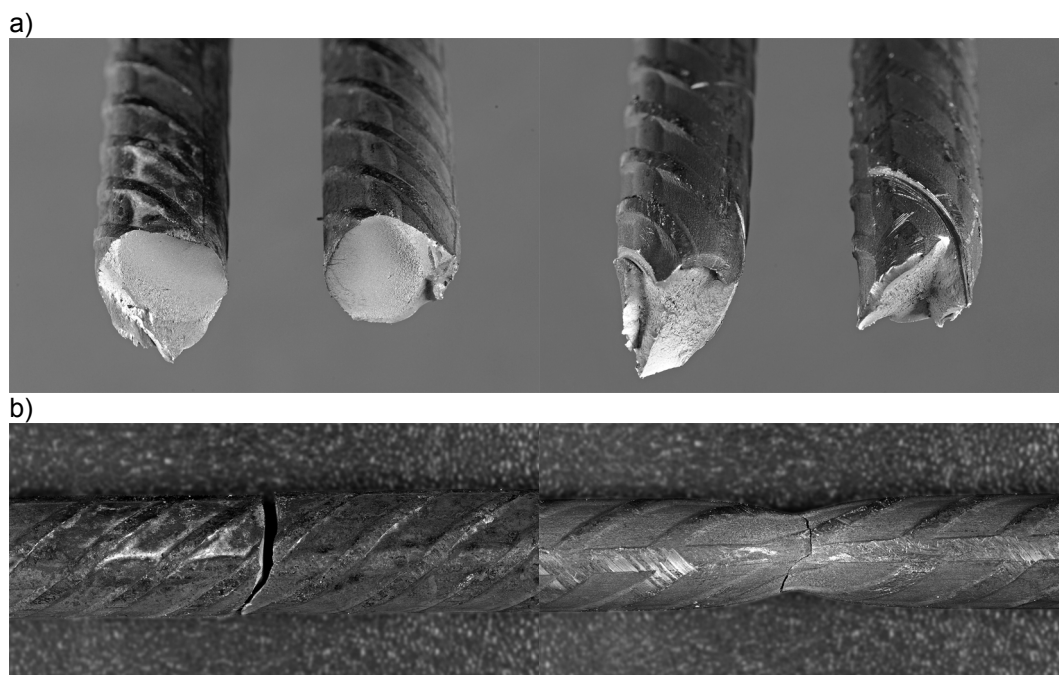


Abb. 4.13 (a) Bruchflächen und (b) Ansichten eines Ermüdungsbruches (links) und eines Zugbruches (rechts).

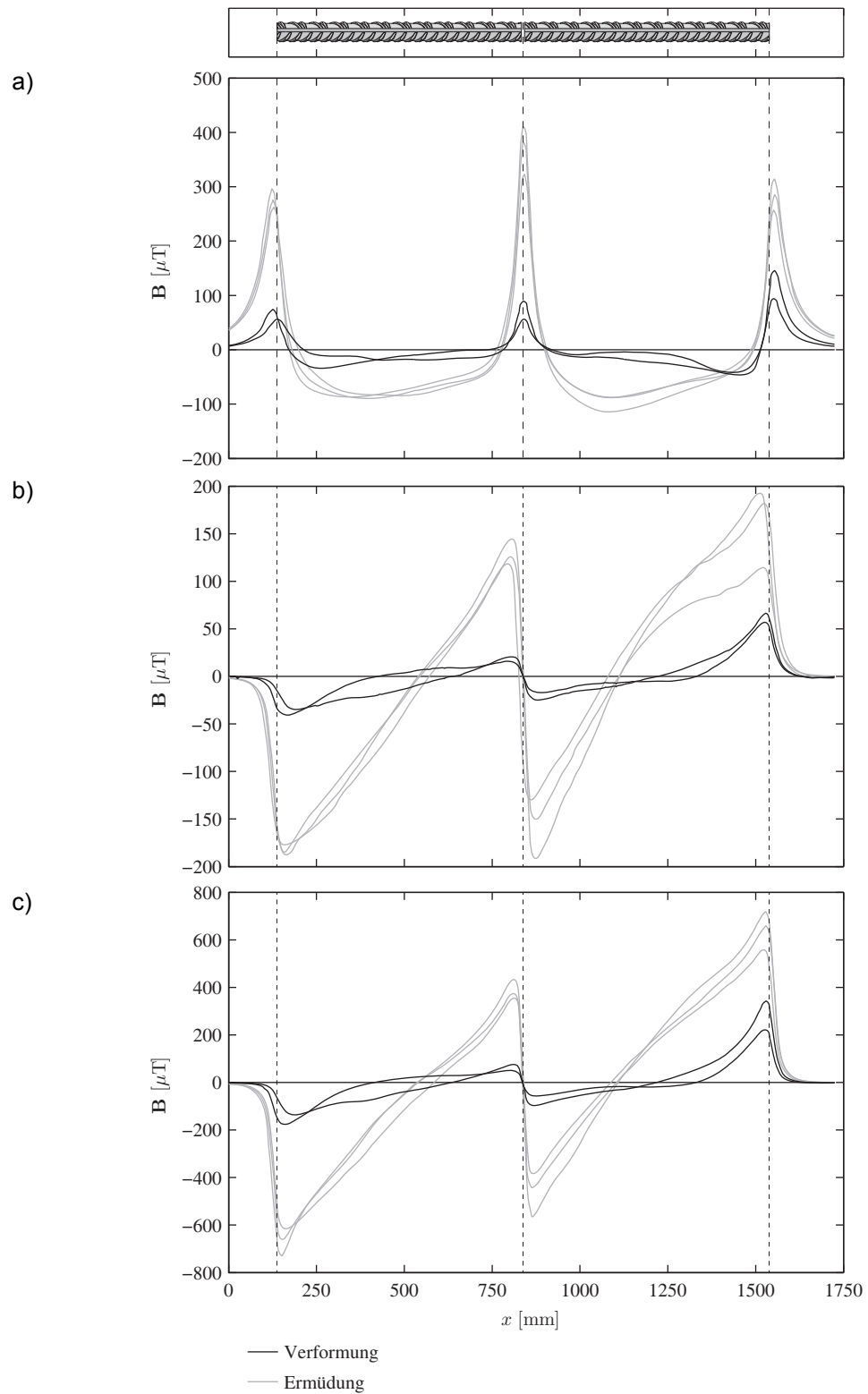


Abb. 4.14 Vergleichende Gegenüberstellung der Kurvenverläufe von Messungen an gebrochenen Stäben mit Ermüdungs- bzw. Verformungsbrüchen mit (a) der Axial-, (b) der Tangential- und (c) der Radialkomponente.

4.2 Umgebungsfelder

Die bereits im vorhergehenden Kapitel angedeutete Reproduzierbarkeit von Messungen mit der mSF-Methode, wurde bei den Versuchen zu den Umgebungsfeldern gezielter untersucht. In den Abbildungen 4.15 (a) bis (c) zeigen die grauen Kurvenverläufe die Rohdaten, bei denen das zu untersuchende Magnetfeld des Bewehrungsstabes noch mit dem Umgebungsfeld überlagert bzw. das Umgebungsfeld selbst dargestellt ist. In den Kurvenverläufen der Tangentialkomponente (Diagramm (b)) ist gut erkennbar, dass es

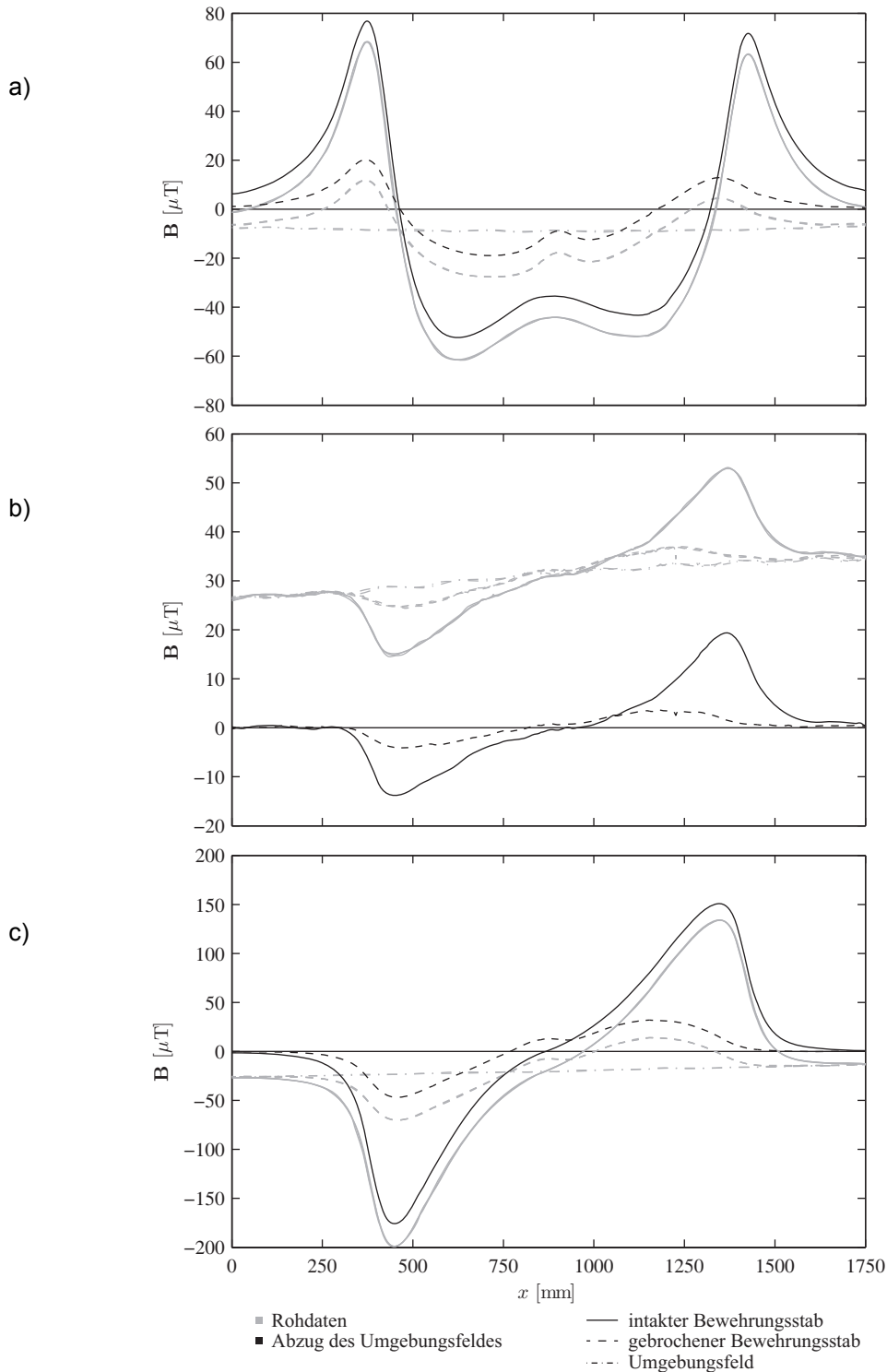


Abb. 4.15 Kurvenverläufe für die Erfassung des Umgebungsfeldes bei $\alpha = 0^\circ$ mit (a) der Axial-, (b) der Tangential- und (c) der Radialkomponente.

sich bei den Rohdaten um drei übereinander gezeichnete Verläufe handelt. Die geringen Abweichungen der Verläufe deuten darauf hin, dass die Messungen reproduzierbar sind.

In den Diagrammen sind als Rohdaten die Messwerte des Umgebungsfeldes, sowie die am intakten und gebrochenen Bewehrungsstab aufgenommen Messwerte eingezeichnet. Mit der Erfassung des reinen Umgebungsfeldes konnte dessen Einfluss aus den Messungen am intakten und gebrochenen Bewehrungsstab abgezogen werden. Die subtra-

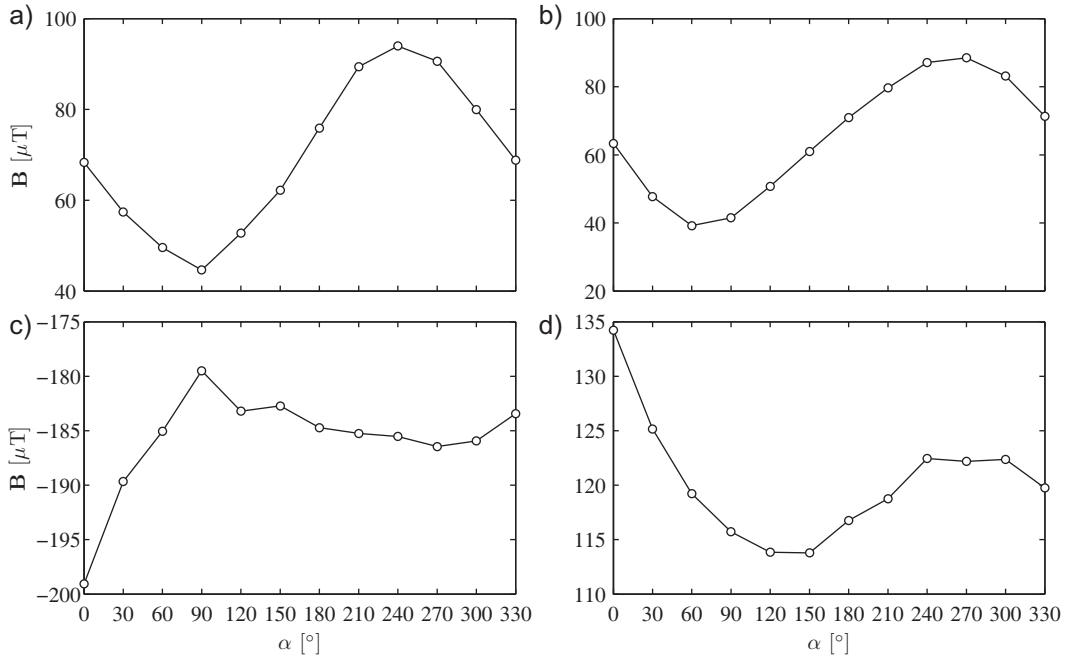


Abb. 4.16 Veränderung der Extremwerte beim intakten Bewehrungsstab bei Drehung des Versuchsaufbaus für (a) den linken und (b) den rechten Extremwert der Axialkomponente, sowie (c) den linken und (d) den rechten Extremwert der Radialkomponente.

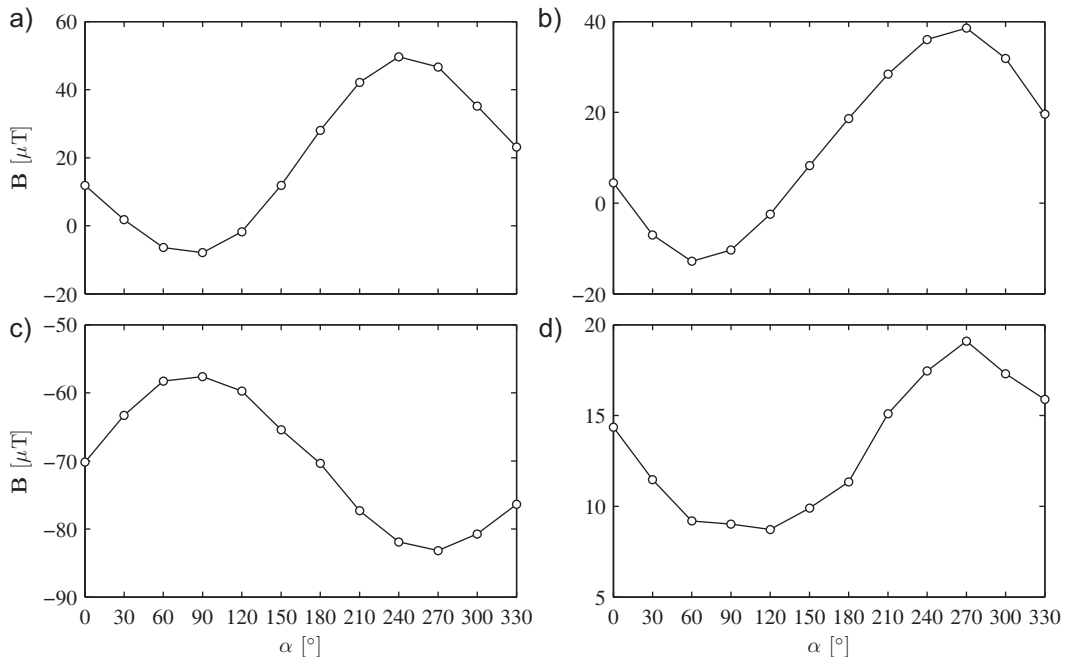


Abb. 4.17 Veränderung der Extremwerte beim gebrochenen Bewehrungsstab bei Drehung des Versuchsaufbaus für (a) den linken und (b) den rechten Extremwert der Axialkomponente, sowie (c) den linken und (d) den rechten Extremwert der Radialkomponente.

hierten 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 Abbildungen 4.16 und 4.17 zu sehen ist. Bis auf die Verläufe der Radialkomponente des intakten Bewehrungsstabes zeigen alle Diagramme einen annähernd sinusförmigen Verlauf.

4.3 Hauptversuch am Stahlbetonrahmen

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

4.3.1 Vorhandene Brüche

Nachdem die Bewehrungsüberdeckung mit Presslufthämmern weggespitzt worden war, konnten einerseits die genaue Lage der Bewehrungsstäbe eingemessen und andererseits die Positionen sämtlicher Brüche messtechnisch festgestellt und protokolliert werden.

Wie aus Abbildung 4.18 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 Abbildung 4.18).

Weiterführende Informationen über die Art der festgestellten Brüche sowie deren Zuordnung zum jeweiligen Bewehrungsstab können in [Fehlmann 2011] nachgelesen werden.

4.3.2 Vergleich von detektierten und vorhandenen Brüchen

Für eine Standortbestimmung der mSF-Methode war es unerlässlich, die Messresultate mit der vorhandenen Situation zu vergleichen. Zu diesem Zweck wurde die jeweilige Lage des Bruches in den Kurvenverläufen kenntlich gemacht (siehe Abbildung 4.19) und die Messergebnisse der mSF-Methode den tatsächlich vorhandenen Brüchen gegenübergestellt.

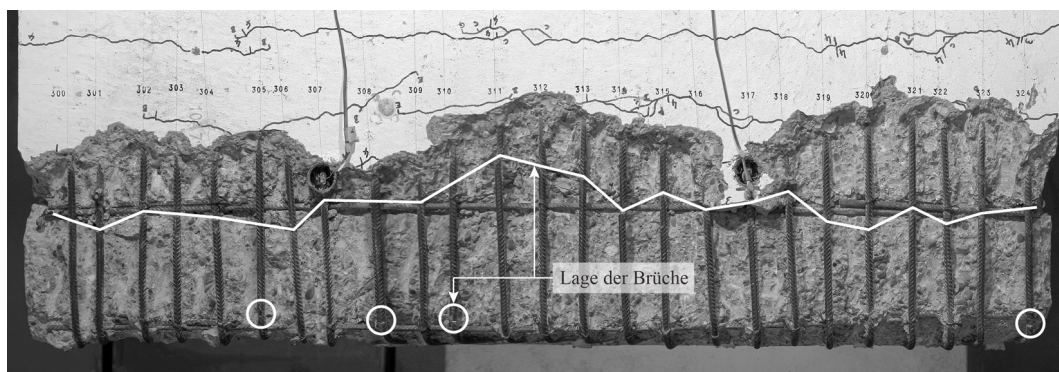


Abb. 4.18 Aufsicht Messfeld 300 mit eingezeichneter Lage der Brüche in der oberen Bewehrungslage [Fehlmann 2011].

Im Gegensatz zu den Kurvenverläufen aus Abbildung 4.19, bei denen das Bruchsignal sehr gut ablesbar ist, zeigt Abbildung 4.20 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.

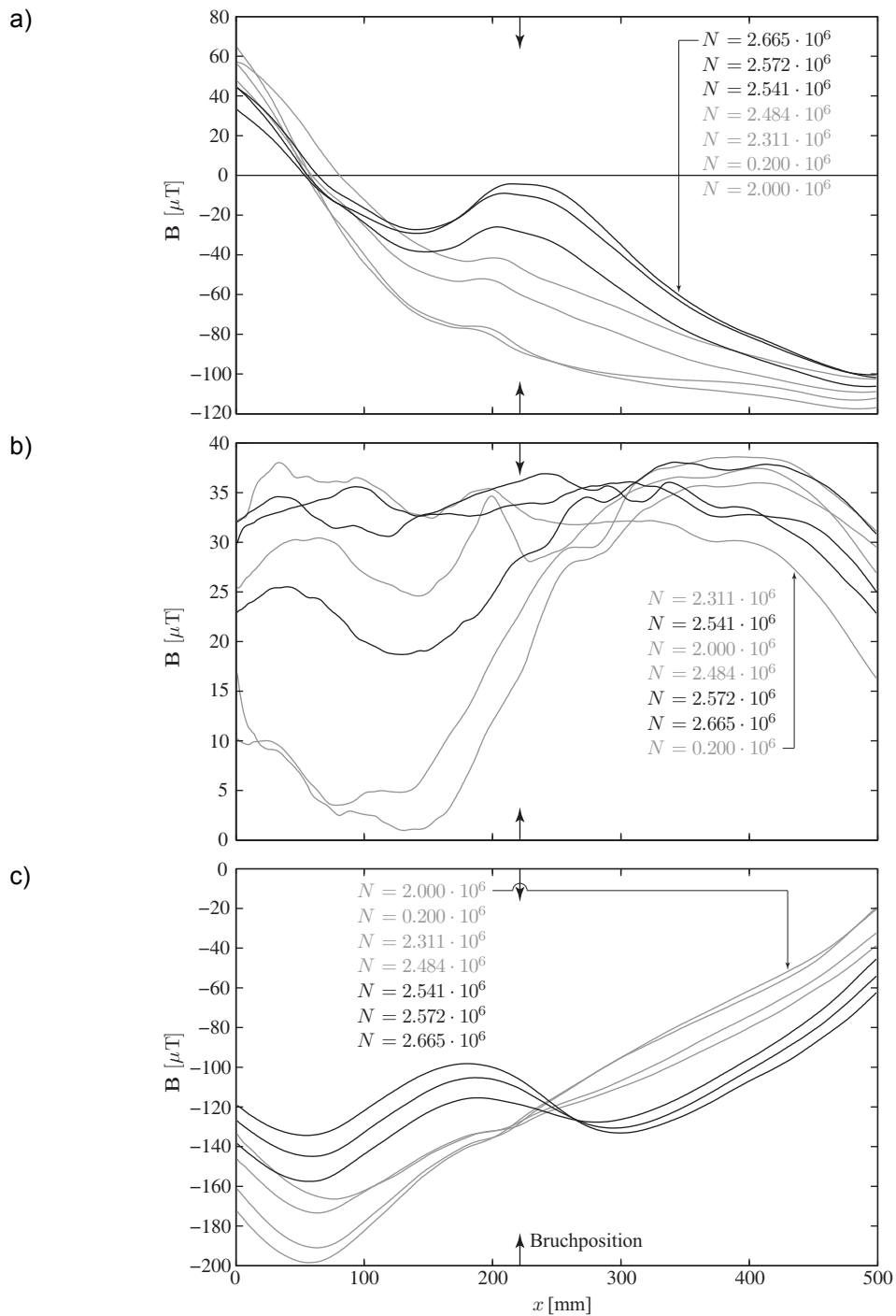


Abb. 4.19 Kurvenverläufe der sieben Messdurchgänge für Stab 317 mit (a) der Axial-, (b) der Tangential- und (c) der Radialkomponente.

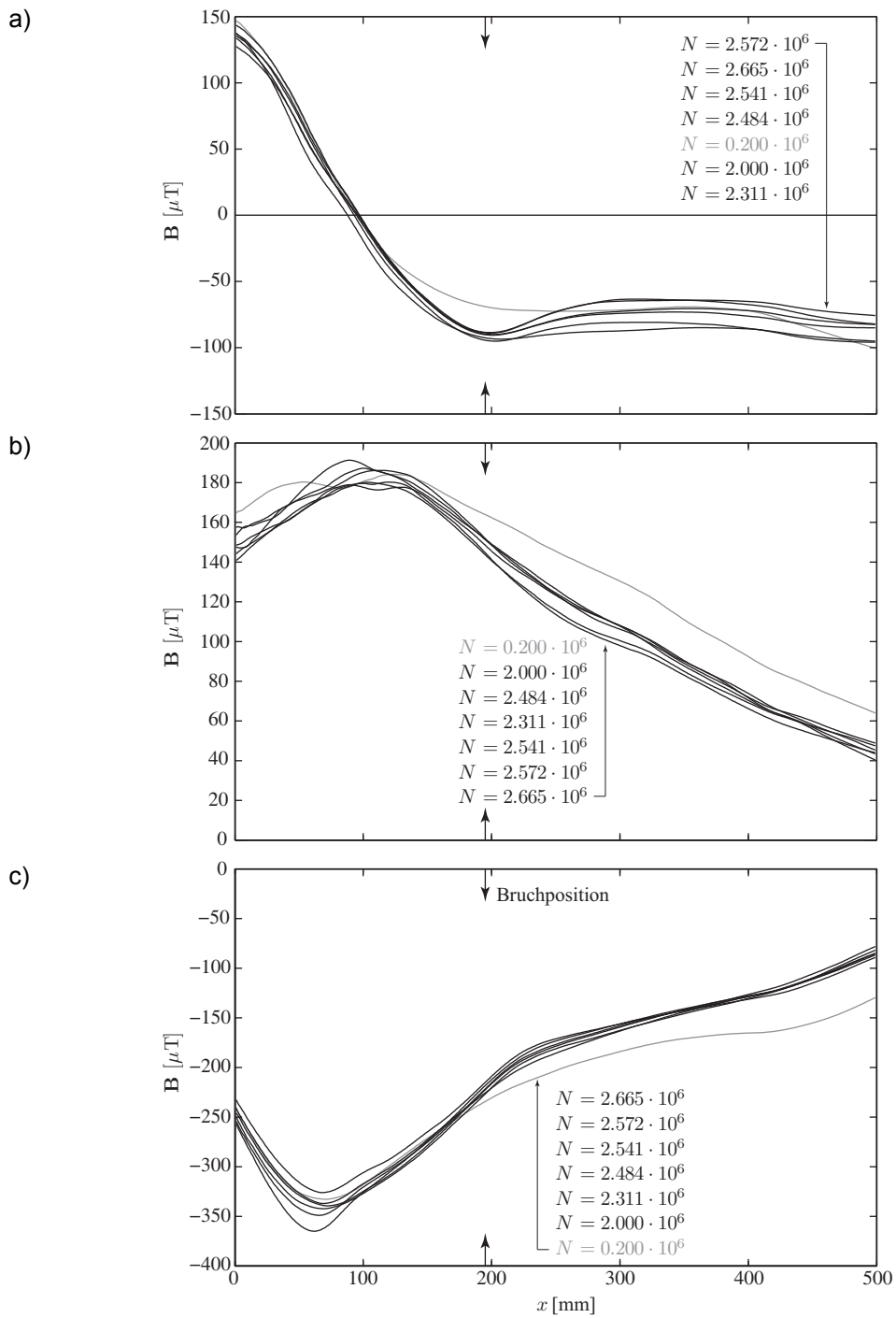


Abb. 4.20 Kurvenverläufe der sieben Messdurchgänge für Stab 300 mit (a) der Axial-, (b) der Tangential- und (c) der Radialkomponente.

4.3.3 Automatische Suche nach Bruchsignalen

Aufgrund der Tatsache, dass Bewehrungsbrüche typische Muster in den Messwerten aufweisen, wird eine automatische Suche nach diesen Mustern möglich. Mit Hilfe des Literaturstudiums sowie durch Versuche und Simulationen sind die Charakteristika des

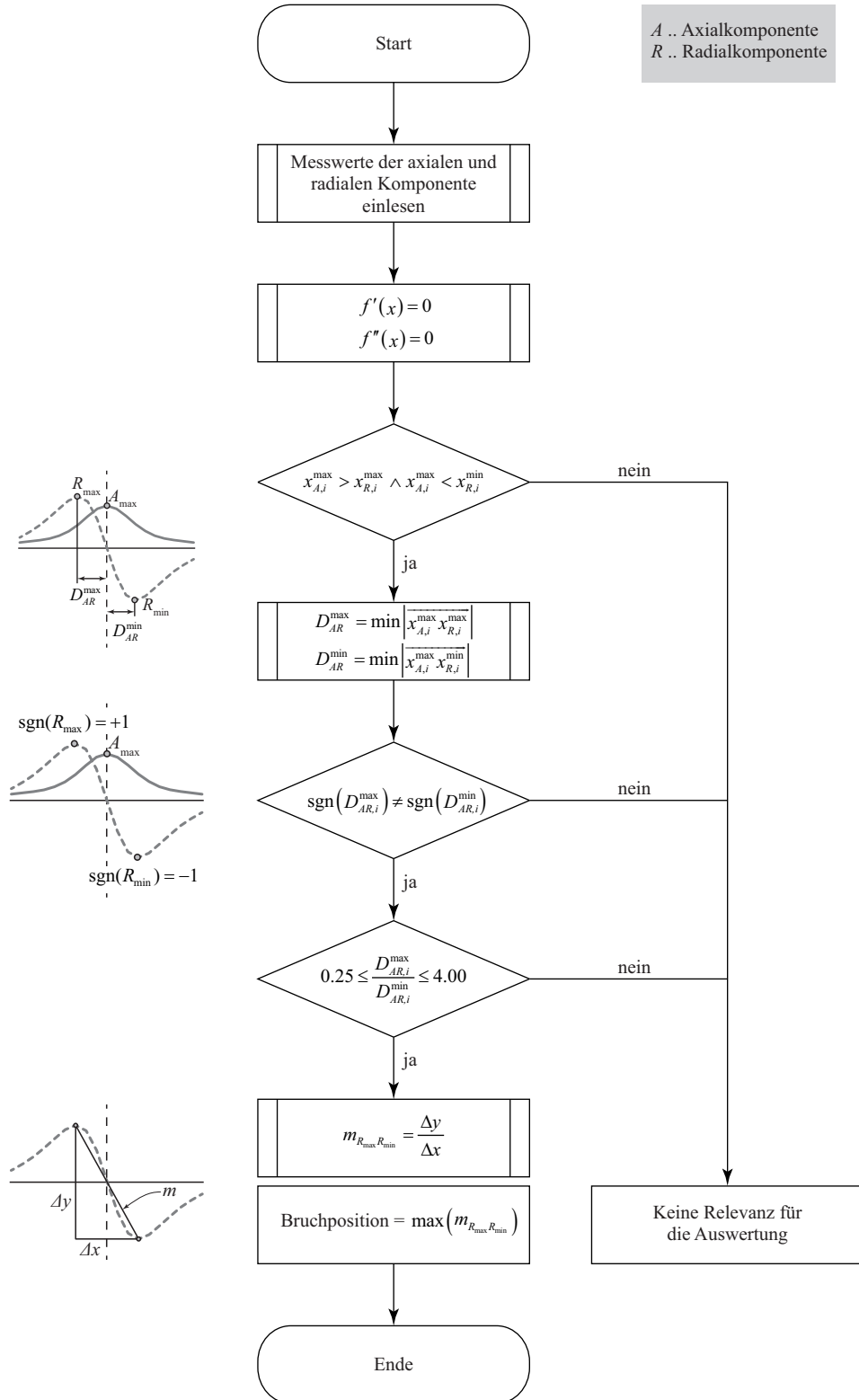


Abb. 4.21 Flussdiagramm des Bruchdetektionsalgorithmus.

Bruchsignals soweit bekannt, dass daraus allgemeingültige Regeln abgeleitet werden konnten. Diese Regeln bilden die Grundlage für den *Bruchdetektionsalgorithmus* (BDA), der in Abbildung 4.21 in Form eines Flussdiagramms dargestellt ist. Nachdem die Messwerte der axialen und radialen Komponenten eingelesen wurden, werden die ersten und zweiten Ableitungen gebildet. Die Kurvenverläufe liegen stets so zueinander, dass die Positionen der lokalen Extremwerte möglicher Bruchsignale stets in gleicher Abfolge vorliegen, was über einen einfachen Grössenvergleich der Positionswerte geprüft wird. Lokale Extremwerte, die diesem Kriterium nicht entsprechen, werden nicht für die weitere Auswertung verwendet. Anschliessend wird ermittelt, welche Extremwerte der Radialkomponente den kleinsten Abstand zum jeweiligen Extremwert der Axialkomponente haben.

Als weiteres Entscheidungskriterium wird wiederum die Reihenfolge der lokalen Extremwerte herangezogen, wobei nun auf die Konstellation von Minimal- und Maximalwerten geschaut wird. Bei den verbliebenen möglichen Werten, wird dann geprüft, ob die lokalen Extremwerte der Radialkomponente annähernd symmetrisch um den lokalen Extremwert der Axialkomponente liegen.

Als abschliessendes Kriterium wird der Anstieg zwischen den lokalen Extremwerten der Radialkomponente ermittelt und der grösste absolute Anstieg als entscheidendes Kriterium

Tab. 4.1 Auflistung der beim Versuch aufgetretenen Brüche und deren Feststellbarkeit.

Stab-Nr.	Bruchtyp	Erkennung anhand der Kurvenverläufe	Ermittlung mit BDA
300	Ermüdung	×	0
301	Ermüdung	×	0
302	Ermüdung	✓	0
303	Ermüdung	✓	0
304	Ermüdung	✓	0
305	Ermüdung	×	1
306	Ermüdung	×	0
307	Ermüdung	×	0
308	Ermüdung	×	1
309	Verformung	✓	0
310	Ermüdung	×	1
311	Ermüdung	✓	1
312	Verformung	–	–
313	Verformung	✓	0
314	Verformung	✓	(1)
315	Verformung	✓	(1)
316	Ermüdung	✓	(1)
317	Ermüdung	✓	(1)
318	Ermüdung	✓	(1)
319	Ermüdung	✓	(1)
320	Ermüdung	✓	(1)
321	Ermüdung	✓	1
322	Ermüdung	✓	0
323	Verformung	✓	0
324	Ermüdung	×	0
	✓ (erkennbar)	16	–
	× (nicht erkennbar)	8	–
	1 (ermittelt)	–	5
	(1) (ermittelt/falsche Pos.)	–	7
	0 (nicht ermittelt)	–	12

um für einen möglichen Bruch gedeutet.

Eine Gegenüberstellung von tatsächlich vorhandenen Brüchen und aus den Kurvenverläufen visuell erkennbaren sowie mit dem BDA feststellbaren Brüchen findet sich in Tabelle 4.1.

Abschliessend kann festgehalten werden, dass anhand der Kurvenverläufe zwei Drittel aller Brüche erkannt werden konnten, wobei dies jedoch nur über die visuelle Auswertung der Verläufe möglich war. Automatisch konnten nur knapp 21% der Brüche richtig ermittelt werden, wobei weitere 29% zwar als Brüche erkannt wurden, die Position aber falsch bestimmt wurde.

5 Beurteilung der Versuchsergebnisse

Nachdem die Resultate der wichtigsten Versuche vorgestellt wurden, wird im folgenden Kapitel deren Interpretation erfolgen. 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 mSF-Methode 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 Messwerte lassen eine verhältnismässig leichte Detektion von Brüchen zu, da hier keinerlei störende Einflüsse anderer ferromagnetischer Materialien vorlagen.

Der Versuch am Stahlbetonrahmen hat einerseits klar gezeigt, dass unter definierten Voraussetzungen bereits Brüche an einem realitätsnahen Bauwerk festgestellt werden können. Zwar waren im Messfeld 300 alle Stäbe der oberen Bewehrungslage gebrochen, jedoch konnten knapp zwei Drittel der Brüche detektiert werden. Dieser Umstand zeigt, dass ein komplizierterer Aufbau der Bewehrung weitere Anpassungen bei den Messeinstellungen erfordert.

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. Zwar ist das Magnetfeld selbst ein Vektorfeld, für das eine Darstellung mit Vektorpfeilen besser geeignet ist, doch wird mit der mSF-Methode stets nur ein kleiner Ausschnitt des Feldes messtechnisch erfasst, weshalb eine Darstellung mit Kurvenverläufen als zulässig erachtet wird. Weitere Darstellungsformen sind möglich und sollten auf ihre Verwendung hin untersucht werden.

Durch die Wahl der Kurvenverläufe ergab sich die Darstellungsweise der für die Brüche charakteristischen Muster. Abbildung 2.20 zeigt für die drei Magnetfeldkomponenten die typischen Muster an der und um die Bruchstelle herum. Mit der momentanen Konfiguration des Magnetometers und der beschriebenen Messprozedur (siehe Kapitel 2.3.1) werden sich die Muster an einer Bruchstelle stets in dieser Art einstellen. Die Muster können dabei jedoch in der Stärke und der Länge 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 zu gross gewählt wurde und in der Folge keine Aussage mehr über das Bruchsignal gemacht 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 möglichst grossen Abstand von Bewehrung und *MicroMag3* zu minimieren, wurde letztlich die Erfassung von Brüchen eingeschränkt bzw. zum Teil auch unmöglich gemacht.

Der mit Hilfe der charakteristischen Bruchsignale erarbeitete Bruchdetektionsalgorithmus kann bei alleiniger Anwendung auf die Messwerte, welche aus den Messungen am Stahlbetonrahmen hervorgegangen sind, nicht überzeugen. Bei der Anwendung des BDAs auf Messwerte anderer Versuche konnten jedoch Detektionsraten von über 90% erreicht werden. Die höhere Erfolgsquote lässt sich durch die für die Entwicklung des BDAs verwendeten Versuchsdaten erklären, auf die dieser anschliessend wieder angewendet wurde.

5.3 Fehler bei der Bruchdetektion

Sobald eine Messung beendet ist, kann eine erste Auswertung direkt vor Ort mit Hilfe der dargestellten Kurvenverläufe erfolgen. Bereits an dieser Stelle kann durch die geübten Ingenieure erkannt werden, ob die Messung plausible Daten liefert 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 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

Abbildung 4.19 steht stellvertretend für all die Kurvenverläufe der Messungen am Stahlbetonrahmen, bei denen ein Bruch erfolgreich erkannt wurde. Der Abbildung kann entnommen werden, dass die tatsächlich vorgefundene Position des Bruches mit der detektierten Position sehr gut übereinstimmt und es nur Abweichungen von wenigen Zentimetern gibt. Dies gilt für alle erfolgreich detektierten Brüche am Stahlbetonrahmen, wie in [Fehlmann 2011] nachgelesen werden kann.

Aus Sicht der Forschungsstelle ist die hier erzielte Lokalisierungsgenauigkeit im Gebiet des Bauwesens insofern ausreichend, als dass 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 4.1.5 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 Bewehrungsstab deutlich kleinere Absolutwerte für die lokalen Extremwerte.

Die Daten zeigen, dass die Messungen stets so nah am Bewehrungsstab durchgeführt werden sollten, wie die 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 fehlen.

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 könnten 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 mehr in jedem Fall detektiert werden können. Ein Vergleich der Ergebnisse aus den Kapiteln 4.1.1

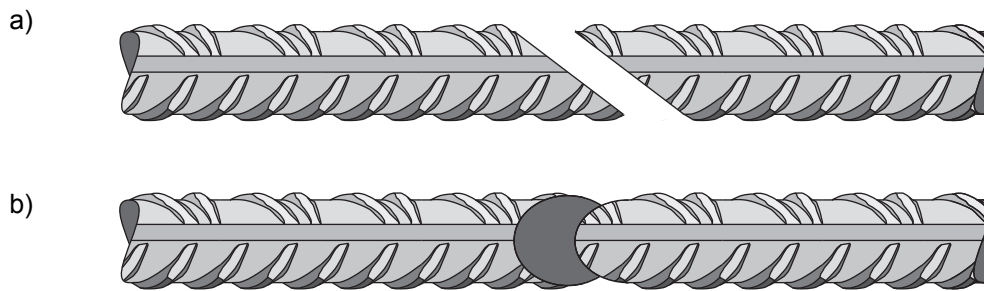


Abb. 5.1 Draufsicht auf die schräg zur Längsachse des Bewehrungsstabes stehenden Bruchflächen mit sich (a) nicht überlappenden und (b) überlappenden Bruchflächen.

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 Abbildung 4.10 mit Abbildung 4.11, erkennt man geringfügig grössere Absolutwerte der lokalen Extremwerte für den Bruch, bei dem die Bruchflächen senkrecht zur Längsachse des Bewehrungsstabes stehen (Abbildung 4.11). Wenn vom Winkel zwischen Bruchfläche und Längsachse des Bewehrungsstabes gesprochen wird, muss sicher auch die Ausrichtung des Bruchflächenpaares zum kürzesten Messabstand berücksichtigt werden (vgl. Abbildung 5.1).

5.5.3 Einfluss der Bruchoberflächen

Die Gegenüberstellung der Bruchflächen in Abbildung 4.13 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 Folgerungen

Die zusammengetragenen Ergebnisse der verschiedenen Versuche zur mSF-Methode 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 geschriebenen Programm.

Von den in Kapitel 1.2 definierten Projektzielen sind die Identifikation geeigneter Messsystembestandteile und die Entwicklung einer graphischen Messwertdarstellung vollständig umgesetzt worden. Bei der Erkennung charakteristischer Muster in den Messwerten für verschiedene Bewehrungsanordnungen konnten während der Bearbeitung dieses Forschungsprojekts die charakteristischen Muster eines Bruches an einem Bewehrungsstab sehr gut eruiert werden. Typische Muster in den Kurvenverläufen von sich kreuzenden, gestossenen oder abgelenkten Bewehrungsstäben wurden nicht untersucht.

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 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 nur, 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 beeinflussende Parameter sind sicherlich das zu prüfende Bewehrungsmaterial, welches in dieser Forschungsarbeit nicht genauer untersucht wurde, und die umgebenden Magnetfelder, die die eigentlich auszuwertenden Messwerte überlagern.

Zum jetzigen Zeitpunkt können mit der mSF-Methode durchaus Brüche an Einzelstäben mit mittlerer Wahrscheinlichkeit und genügend genauer Lokalisierung 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 noch 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 gewisse Bewehrungsanordnungen (z.B. Stösse oder sich kreuzende Bewehrungsstäbe, etc.) in den Messwerten äussern und zum anderen konnte nicht abschliessend geklärt werden, wie stark sich Magnetfelder elektrischer Geräte in der Nähe der Messstelle bemerkbar machen.

6.2 Weiterer Forschungsbedarf

Für die angestrebte automatisierte Messung bedarf es in verschiedenen Bereichen weiterer Untersuchungen. Zunächst muss untersucht werden, wie sich die unterschiedlichen Bewehrungsanordnungen in den Messwerten widerspiegeln. Dann muss geprüft werden, ob die Magnetisierung der Bewehrung bis zur vollständigen Sättigung erreicht wird und, falls dies nicht der Fall ist, wie dies erreicht werden kann. In diesem Zusammenhang ist zu prüfen, ob u.U. der Umstieg auf Elektromagnete erlaubt, dass das Gewicht des Magneten gering gehalten werden kann.

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 diesem Bericht erste Ansätze von Magnetfeldsimulationen präsentiert. In der Simulation von Magnetfeldern wird grosses Potential vermutet, 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.

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 Ordinateachse die Stärke der jeweiligen Magnetfeldkomponente in Mikrotesla anzeigen. Inwiefern sich zum Zweck der Auswertung andere Darstellungsweisen eignen, müsste ggf. genauer betrachtet werden.

Nach Abklärung der hier aufgeführten offenen Punkte, besteht durchaus die Möglichkeit, die mSF-Methode 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 2006]), 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 mSF-Methode 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 diesem Zweck sollte mit der mSF-Methode zunächst ein Verfahren entwickelt werden, mit dem zuverlässig die Lage und Orientierung der im Bauwerk verlegten Bewehrung festgestellt werden kann. Einer grossflächigen Magnetisierung der Bewehrung sollten orthogonal zueinander verlaufende Messungen folgen, um die Lage der Bewehrung zu bestimmen.

7 Verdankungen

Der vorliegende Bericht wurde im Rahmen des Forschungsprojekts "Experimentelle Untersuchungen zur Detektion von Betonstahlbrüchen mit der magnetischen Streufeldmethode" am Institut für Baustatik und Konstruktion der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich ausgearbeitet.

Für die finanzielle Unterstützung unserer Arbeiten danken wir dem Eidgenössischen Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK) und dem Bundesamt für Strassen (ASTRA).

Der Begleitkommission AB unter der Leitung von Dr. Martin Käser sei an dieser Stelle für die stets konstruktive Kritik gedankt.

Dominik Werne war immer eine wertvolle Hilfe und stand beim Aufbau des Messsystems beratend zur Seite. Für die fortwährend neuen Ideen und Lösungsansätze danken wir ihm. Bei technischen Fragen konnten wir uns an Thomas Jaggi wenden, der auch bei der Herstellung einiger Versuchskörper geholfen hat. Christoph Gisler hat uns durch die Fertigung des Messwagens einen guten Dienst geleistet. Cornelius Senn hat schliesslich die Verknüpfung von Messwagen und Sensoren übernommen und so sichergestellt, dass die Daten letztlich auch am PC angekommen sind.

Für den Aufbau und die Durchführung der Versuche zum Ermüdungsverhalten von Stahlbetonbrücken war Dr. Patrick Fehlmann verantwortlich. Die fachlichen Gespräche mit ihm, wie auch die mit Dr. Stephan Fricker und Dr. Georg Kocur haben wesentlich zum Fortschritt des Forschungsprojekts beigetragen. Die administrativen Aufgaben hat Renate Amatore übernommen. Für die Mitarbeit danken wir den Genannten herzlich.

Anhänge

I	Kenndaten der Magnete	83
II	Kenndaten des <i>MicroMag3</i>.....	85
III	Kenndaten des Drehgebers	87

I Kenndaten der Magnete

Vom Hersteller sind folgende Daten über die Scheibenmagnete bekannt:

Tab. I.1 Daten der Scheibenmagnete		
Formelzeichen/ Bezeichnung	Zahl/Eigenschaft	Einheit
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]

II Kenndaten des *MicroMag3*

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

Formelzeichen/ Bezeichnung	Zahl/Eigenschaft	Einheit
Sensoren :	Induktionsspulen	
Anzahl Sensoren :	3	
Spannung :	5.25	[V]
Messbereich :	$\pm 1 \cdot 100$	[μT]
Auflösung :	0.015	[μT]
Datenstrom :	Digital	

Periodenanzahl	ASIC [-]	Verstärkung [Counts/ μT]	Auflösung [μT]	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	

III Kenndaten des Drehgebers

Vom Hersteller sind folgende Daten über den Drehgeber bekannt:

Tab. III.1 Daten des Drehgebers DG 34 AK 2000x24 L C20		
Formelzeichen/ Bezeichnung	Zahl/Eigenschaft	[Einheit]
Spannung :	5	[V]
Stromverbrauch :	max. 30	[mA]
Impulse/U :	max. 2000	
Abtastfrequenz :	max. 20	[kHz]
Abtastung :	optisch	

Bezeichnungen

Abkürzungen

Begriff	Bedeutung
AAR	Alkali-Aggregat-Reaktion
AGB	Arbeitsgruppe Brückenforschung
ASIC	Application-Specific Integrated Circuit
ASTRA	Bundesamt für Strassen
BDA	Bruchdetektionsalgorithmus
DATEC	Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni
DETEC	Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication
Empa	Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt
EPF	École polytechnique fédérale
ETH Zürich	Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
FE	Finite Elemente
IBK	Institut für Baustatik und Konstruktion
LabVIEW	Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench
LPT-Stecker	Line-Printing-Terminal Stecker
MFL	Magnetic flux leakage
MP	Magnetpulver
MPA	Materialprüfungsanstalt
mSF-Methode	magnetische Streufeldmethode
PNI	Firma, Lieferant von Sensoren
RM	Remanenzmagnetismus
SIA	Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein
TBA	Tiefbauamt
TFB	Technik und Forschung im Betonbau
TU	Technische Universität
UVEK	Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation
VSS	Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute
ZfP	Zerstörungsfreie Prüfverfahren

Lateinische Grossbuchstaben

Begriff	Bedeutung	Einheit
A	Axialkomponente	[-]
B	magnetische Induktion	$\left[\frac{\text{N}}{\text{Am}} = \text{T} \right]$
B_S	technische Sättigung	$\left[\frac{\text{N}}{\text{Am}} = \text{T} \right]$
B_R	remanente Magnetisierung	$\left[\frac{\text{N}}{\text{Am}} = \text{T} \right]$
(BH)_{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	$\left[\frac{\text{V}}{\text{m}} \right]$

Begriff	Bedeutung	Einheit
$F_{\text{inf}}, F_{\text{sup}}$	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>I</i>	Stromstärke	[A]
J	Gesamtdrehimpuls	$\left[\frac{\text{kgm}^2}{\text{s}} \right]$
L	Drehimpuls	[-]
M	Magnetisierung	$\left[\frac{\text{A}}{\text{m}} \right]$
M_s(0)	Sättigungsmagnetisierung am absoluten Nullpunkt ($T = 0 \text{ K}$)	$\left[\frac{\text{A}}{\text{m}} \right]$
M_s(T)	spontane Magnetisierung in Abhängigkeit von der Temperatur	$\left[\frac{\text{A}}{\text{m}} \right]$
<i>N</i>	Entmagnetisierungsfaktor Windungszahl	[-] [-]
L	Drehimpuls	$\left[\frac{\text{kgm}^2}{\text{s}} \right]$
<i>R</i>	Radialkomponente	[-]
<i>R</i>	Radius	[mm; cm; m]
S	Spindrehimpuls	[-]
<i>T</i>	Temperatur	[K]
<i>T_c</i>	Curie-Temperatur	[K]
ΔV	Teilvolumen	[mm ³ ; cm ³ ; m ³]
<i>Z</i>	Kernladungs- oder Ordnungszahl	[-]

Lateinische Kleinbuchstaben

Begriff	Bedeutung	Einheit
<i>b</i>	Breite	[mm; cm; m]
<i>c_{nom}</i>	Bewehrungsüberdeckung	[mm; cm; m]
d	Gerichteter Abstand der Ladungen beim Dipol	[mm; cm; m]
<i>e</i>	Elementarladung	$[e = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ C}]$
<i>e⁻</i>	Elektron	[C]
<i>f</i>	Frequenz	[Hz]
<i>g</i>	Landé-Faktor	$[g = 2.00232]$
<i>h</i>	Höhe	[mm; cm; m]
<i>i, j</i>	Indizes	[-]

Begriff	Bedeutung	Einheit
l	Bahndrehimpulsquantenzahl	[-]
l	Länge	[mm; cm; m]
m	magnetische Dipolmoment	[Am ²]
m	Masse	[kg]
m_e	Elektronenmasse	[kg]
m_s	Spinquantenzahl	[-]
$m_{R_{\max} R_{\min}}$	Steigung zwischen zwei Extremwerten der Radialkomponente	[-]
min	Minimalwert	[-]
max	Maximalwert	[-]
n	Neutron	[-]
n_s	Spulenzahl	[-]
p	magnetischer Monopol	$\left[\frac{N}{Am} = T \right]$
p^+	Proton	[C]
ps	Periodenzahl	[-]
q	elektrische Ladung	[C]
r	Ortsvektor	[mm; cm; m]
r	radiale Koordinate	
s	Elektronenspin	[-]
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]
sgn()	Signum- oder Vorzeichenfunktion	[-]
t	Zeit	[s]
t	Dicke	[mm; cm; m]
v	Geschwindigkeit	$\left[\frac{m}{s} \right]$
$x_{A,i}, x_{R,i}$	Position der Axial- bzw. Radialkomponente	[mm; cm; m]
$\Delta x, \Delta y$	Differentielle Länge der Abszisse bzw. Ordinate	[mm; cm; m]

Griechische Buchstaben

Begriff	Bedeutung	Einheit
α	Winkel in der horizontalen Ebene	[°]
ϵ_0	elektrische Feldkonstante	$\left[\epsilon_0 = 8.8542 \cdot 10^{-12} \frac{As}{Vm} \right]$
μ	Permeabilität der Materie; magnetisches Moment	$\left[\frac{N}{A^2} \right]$
μ_0	Permeabilität des Vakuums; Induktionskonstante	$\left[\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \frac{N}{A^2} \right]$

Begriff	Bedeutung	Einheit
μ_B	Bohrsches Magneton	$\left[\mu_B = \frac{e\hbar}{2 \cdot m_e} = 5.79 \cdot 10^{-5} \text{ eV} \right]$
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	$\left[\frac{\text{As}}{\text{m}^3} \right]$
$\Delta\sigma_s$	Spannungsdifferenz im Betonstahl	$\left[\frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right]$
χ_m	magnetische Suszeptibilität	$[-]$

Sonderzeichen

Begriff	Bedeutung	Einheit
\emptyset	Durchmesser	$[\text{mm}; \text{cm}; \text{m}]$
\emptyset_{eff}	effektiver Durchmesser	$[\text{mm}; \text{cm}; \text{m}]$
\hbar	reduziertes <i>Plancksches</i> Wirkungsquantum	$[\text{mm}; \text{cm}; \text{m}]$

Literaturverzeichnis

- [Altschuler 1994] 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.
- [Atherton 1987] 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.
- [Babbar 2003] 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.
- [Blitz 1991] Blitz, J. (1991). *Electrical and magnetic methods of nondestructive testing*; IOP Publishing Ltd.; Bristol; 237 pp.
- [Braml 2009] 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>.
- [Brown 1962] 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.
- [Burkhardt 2006] 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.
- [Comsol 2011] Comsol Multiphysics (2011). Comsol 4.2a; Zurich; Ver. 4.2.1.110; www.comsol.com.
- [Fehlmann 2011] 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>.
- [Fehlmann 2012] Fehlmann, P. (2012). *Zur Ermüdung von Stahlbetonbrücken*; Dissertation; ETH Zürich; Zürich; 157 pp.; <http://dx.doi.org/10.3929/ethz-a-007110386>.
- [Förster 1955] 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.
- [Gaydecki 1994] 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.

- [Heptner 1972] Heptner, H. und Stroppe, H. (1972). *Magnetische und magnetinduktive Werkstoffprüfung*; VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie; Leipzig; 446 pp.
- [Hillemeier 1999] 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.
- [Hillemeier 2002] 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.
- [Hillemeier 2003] 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)).
- [Ilbach 2009] Ilbach, H. und Lüth, H. (2009). *Festkörperphysik: Einführung in die Grundlagen*; Springer; Berlin; 509 pp.
- [Jungwirth 1986] Jungwirth, D., Beyer, E. und Grübl, P. (1986). *Dauerhafte Betonbauwerke: Substanzerhaltung und Schadensvermeidung in Forschung und Praxis*; Beton-Verlag; Düsseldorf; 255 pp.
- [Kloster 2008] Kloster, A. (2008). *Aufbau einer Entwicklungsplattform für niederfrequente magnetische Prüfverfahren*; Dissertation; Universität des Saarlandes; Saarbrücken; 138 pp.
- [Kneller 1962] Kneller, E. (1962). *Ferromagnetismus*; Springer; Berlin; 792 pp.
- [Krause 2000] 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.
- [Krieger 1995] Krieger, J. (1995). *Anwendung von zerstörungsfreien Prüfmethode bei Betonbrücken*; Brücken- und Ingenieurbau; Heft B 9; Bundesanstalt für Straßenwesen; Bremerhaven; 60 pp.
- [Kusenberger 1985] 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>.
- [Leuzinger 2010] Leuzinger, A. (2010). *Magneto-Inductive Technology – Overview*; Santa Rosa; PNI Sensor Corporation; 5 pp.
- [Lüthi 2008] Lüthi, T. (2008). *Zerstörungsfreie Prüfmethode*; Dübendorf. http://www.empa.ch/plugin/template/empa/*/8937 (08. November 2012).
- [Makar 2001] 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.
- [McCrea 2001] 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.
- [Meyer 1971] Meyer, H. W. (1971). *A history of electricity and magnetism*; MIT Press; Cambridge; 325 pp.
- [Mietz 2005] 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.
- [Miyagawa 2006] 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>.
- [Muslih 2005] 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.
- [Peterson 1946] Peterson, R. A., Heckle, D. F. und Clarke, J. E. (1946). *Magnetic Particle Inspection – Apparatus and Method*; USA; United States Patent Office; 6 pp.
- [PNI 2009] PNI Sensor-Corporation (2009). *SmartSens MICROMAG 3*; <http://www.pnicorp.com/products/>.
- [Quek 2008] 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>.
- [Sawade 1999] Sawade, G. (1999). *Numerische Modellierung der magnetischen Streufeldmessung zur Ortung von Spannstahlbrüchen*; Werkstoffe und Werkstoffprüfung im Bauwesen; Stuttgart; pp. 338-351.
- [Sawade 2007] 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.
- [Scheel 1997] 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.
- [Scheel 1997] Scheel, H. (1997). *Spannstahlbruchortung an Spannbetonbauteilen*

- mit nachträglichem Verbund unter Ausnutzung des Remanenzmagnetismus*; Dissertation; Technische Universität Berlin; Berlin; 202 pp.
- [Scheel 2006] 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>.
- [Smith 1992] 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.
- [Szielasko 2006] Szielasko, K., et al. (2006). *High-Speed, High-Resolution Magnetic Flux Leakage Inspection of Large Flat Surfaces*; EC NDT; Berlin; September 25-29, 2006.
- [Tipler 2004] Tipler, P. A. und Mosca, G. (2004). *Physik – Für Wissenschaftler und Ingenieure*; Elsevier GmbH; München; 1388 pp.
- [Tumanski 2007] 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>.
- [Verschuur 1993] Verschuur, G. L. (1993). *Hidden Attraction*; Oxford University Press; New York; 256 pp.
- [Virmani 2000] Virmani, P. (2000). *Magnetic-Based NDE of Prestressed and Post-Tensioned Concrete Members - The MFL System*; Federal Highway Administration; Lanham; 4 pp.
- [Weiss 1907] 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/jphysap:019070060066100>.
- [Zijlstra 1967] 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.

Projektabschluss



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Formular Nr. 3: Projektabschluss

erstellt / geändert am: 03.12.2012

Grunddaten

Projekt-Nr.: AGB-2009-006
Projekttitel: Experimentelle Untersuchungen zur Detektion von Betonstahlbrüchen mit der magnetischen Streufeldmethode
Enddatum:

Texte

Zusammenfassung der Projektergebnisse:

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 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 auch das Bruchsignal, welches sich durch die charakteristische Anordnung der verschiedenen lokalen Extremwerte der einzelnen Magnetfeldkomponenten darstellt.

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.

Zum jetzigen Zeitpunkt können durchaus Brüche an Einzelstäben mit mittlerer Wahrscheinlichkeit und genügend genauer Lokalisierung detektiert werden. Sofern kompliziertere Bewehrungsanordnungen zu untersuchen sind, stellen sich bislang noch Probleme bei der korrekten Detektion ein.



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

Zielerreichung:

Von den definierten Projektzielen sind die Identifikation geeigneter Messsystembestandteile und die Entwicklung einer graphischen Messwertdarstellung vollständig umgesetzt worden. Bei der Erkennung charakteristischer Muster in den Messwerten für verschiedene Bewehrungsanordnungen konnten während der Bearbeitung dieses Forschungsprojekts die charakteristischen Muster eines Bruches an einem Bewehrungsstab sehr gut eruiert werden. Typische Muster in den Kurvenverläufen von sich kreuzenden, gestossenen oder abgebo- genen Bewehrungsstäben wurden nicht untersucht.

Folgerungen und Empfehlungen:

Für die angestrebte automatisierte Messung bedarf es in verschiedenen Bereichen weiterer Untersuchungen. Zunächst muss untersucht werden, wie sich die unterschiedlichen Bewehrungsanordnungen in den Messwerten widerspiegeln. Dann muss geprüft werden, ob die Magnetisierung der Bewehrung bis zur vollständigen Sättigung erreicht wird und, falls dies nicht der Fall ist, wie dies erreicht werden kann. In diesem Zusammenhang ist zu prüfen, ob u. U. der Umstieg auf Elektromagnete erlaubt, dass das Gewicht des Magneten gering gehalten werden kann.

Nach Abklärung der hier aufgeführten offenen Punkte, besteht durchaus die Möglichkeit, die mSF-Methode 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.

Publikationen:

- Wolf, T. und Vogel, T. (2012). Detection of Reinforcement Breaks: Laboratory Experiments and an Application of the Magnetic Flux Leakage Method, Proceedings, Structural Faults & Repair-2012, Edinburgh, 03-05 July 2012, pp. 1-9.
Fehlmann, P., Wolf, T. und Vogel, T. (2011). Versuche zum Ermüdungsverhalten von Stahlbetonbrücken, IBK Bericht No. 332, ETH Zürich, pp. 95.
Wolf, T., Fehlmann, P., Vogel, T. (2011). First Applications on the Detection of Fatigue Breaks in Bridges with the Magnetic Flux Leakage Method, Proceedings of the First Middle East Conference on Smart Monitoring, Assessment and Rehabilitation of Civil Structures, Dubai, UAE, February 8-10, 2011.
Wolf, T., Vogel, T. (2010). Experimental trials on the detection of reinforcement breaks with the magnetic flux leakage method, Proceedings of the 5th International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management, Philadelphia (PA), USA, July 11-15, 2010.
Wolf, T., Vogel, T. (2010). Detection of reinforcement breaks on large-scale fatigue tests with the magnetic flux leakage method, Proceedings of the 8th fib International PhD Symposium in Civil Engineering, Kgs. Lyngby, Denmark, June 20-23, 2010.
Wolf, T., Vogel, T. (2009). Detection of breaks in reinforcing bars with the magnetic flux leakage method, Proceedings of the 4th International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure, Zurich, Switzerland, July 22-24, 2009.

Der Projektleiter/die Projektleiterin:

Name: Vogel

Vorname: Thomas

Amt, Firma, Institut: Prof., ETH Zürich, Institut für Baustatik und Konstruktion

Unterschrift des Projektleiters/der Projektleiterin:



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Formular Nr. 3: Projektabschluss

Beurteilung der Begleitkommission:

Beurteilung:

Die grundsätzliche Eignung der magnetischen Streufeldmethode zur Detektion von Betonstahlbrüchen konnte unter Laborbedingungen belegt werden.
Die Bestandteile des Messsystems können noch optimiert werden.
Unter idealen Verhältnissen können typische Muster von Brüchen erkannt werden.
Die grafische Messwertdarstellung hat noch Potenzial.
Die gesetzten Ziele wurden weitgehend erreicht und weitere mögliche Schritte wurden aufgezeigt.

Umsetzung:

Für eine Implementierung in der Praxis fehlen noch wichtige Schritte, insbesondere bei der Messapparatur, der Messtechnik, der Datenauswertung und -interpretation.
In einer späteren Phase ist der Einbezug eines Geräteherstellers zu erwägen.

weitergehender Forschungsbedarf:

- Erweiterung der Methode von stabweiser Messung auf flächige Messung.
- Anpassungen beim Messablauf bezüglich Magnetisierung, Sensorik und Darstellung.
- Gleichzeitige Messung und Magnetisierung mit Elektromagnet.

Einfluss auf Normenwerk:

noch nicht abschätzbar

Der Präsident/die Präsidentin der Begleitkommission:

Name: Käser

Vorname: Martin

Amt, Firma, Institut: Baudirektion Kt. Zürich / Tiefbauamt / Abt. Ingenieurstab

Unterschrift des Präsidenten/der Präsidentin der Begleitkommission:

Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen

Forschungsberichte seit 2009

Stand 16.01.2013

Siehe auch <http://www.mobilityplatform.ch>

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Datum
648	AGB 2005/023 & AGB 2006/003	Validierung der AAR-Prüfungen für Neubau und Instandsetzung <i>Validation des essais RAG actuels pour les nouvelles constructions et les ouvrages atteints de RAG</i> Validation of ASR test methods for new and old concrete structures	2011
649	AGB 2008/012	Anforderungen an den Karbonatisierungswiderstand von Betonen <i>Exigences par rapport à la résistance à la carbonatation des bétons</i> Requirements for the carbonation resistance of concrete mixes	2012
650	AGB 2005/010	Korrosionsbeständigkeit von nichtrostenden Betonstählen <i>Résistance à la corrosion des aciers d'armature inoxydables</i> Use of stainless steels in concrete structures	2012
1356	SVI 2007/014	Kooperation an Bahnhöfen und Haltestellen <i>Coopération dans les gares et arrêts</i> Cooperation at railway stations and stops	2011
1359	SVI 2004/003	Wissens- und Technologientransfer im Verkehrsbereich <i>Transfert de savoir et de technologies dans le domaine des transports</i> Know-how and technology transfer in the transport sector	2012
1357	SVI 2007/007	Unaufmerksamkeit und Ablenkung: Was macht der Mensch am Steuer? <i>L'inattention et la distraction: comment se comportent les gens au volant?</i> Driver Inattention and Distraction as Cause of Accident: How do Drivers Behave in Cars?	2012
1360	VSS 2010/203	Akustische Führung im Strassentunnel <i>Guidage acoustique dans les tunnels routiers</i> Acoustical guidance in road tunnels	2012
1361	SVI 2004/043	Innovative Ansätze der Parkraumbewirtschaftung <i>Approches innovantes de la gestion du stationnement</i> Innovative approaches to parking management	2012
1362	SVI 2004/012	Aktivitätenorientierte Analyse des Neuverkehrs <i>Analyse orientée aux activités du trafic induit</i> Activity oriented analysis of induced travel demand	2012

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Datum
1363	VSS 2007/905	Verkehrsprognosen mit Online-Daten <i>Pronostics de trafic avec des données en temps réel</i> <i>Traffic forecast with real-time data</i>	2011
1365	SVI 2004/014	Neue Erkenntnisse zum Mobilitätsverhalten dank Data Mining? <i>De nouvelles découvertes sur le comportement de mobilité par Data Mining?</i> <i>New findings on the mobility behavior through Data Mining?</i>	2011
1367	VSS 2005/801	Grundlagen betreffend Projektierung, Bau und Nachhaltigkeit von Anschlussgleisen <i>Principes de bases concernant la conception, la construction et la durabilité de voies de raccordement</i> <i>Basic Principles on the Design, Construction and Sustainability of Sidings</i>	2011
1369	VSS 2003/204	Retention und Behandlung der Strassenabwasser <i>Rétention et traitement des eaux de chaussée</i> <i>Retention and Treatment of road-water</i>	2012
1370	VSS 2008/404	Dauerhaftigkeit von Betongranulat aus Betongranulat <i>Durabilité de chaussées en béton de granulat de béton</i> <i>Durability of concrete pavements of recycled concrete</i>	2011
1371	ASTRA 2008/017	Potenzial von Fahrgemeinschaften <i>Potentiel du covoiturage</i> <i>Potential of Car Pooling</i>	2011
1373	VSS 2008/204	Vereinheitlichung der Tunnelbeleuchtung <i>D'uniformisation de l'éclairage dans les tunnels</i> <i>Standardization of Tunnel Lighting</i>	2012
1374	FGU 2004/003	Entwicklung eines zerstörungsfreien Prüfverfahrens für Schweissnähte von KDB <i>Développement d'une méthode d'essais non-destructif pour des soudures de membranes polymères d'étanchéité</i> <i>Development of a non-destructive test method for welded seams of polymeric sealing membranes</i>	2012
1375	VSS 2008/304	Dynamische Signalisierungen auf Hauptverkehrsstrassen <i>Signalisations dynamiques sur des routes principales</i> <i>Dynamic signalling at primary distributors</i>	2012
1376	ASTRA 2011/008_004	Erfahrungen im Schweizer Betonbrückenbau <i>Expériences dans la construction de ponts en Suisse</i> <i>Experiences in Swiss Bridge Construction</i>	2012

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Datum
1379	VSS 2010/206_OBF	Harmonisierung der Abläufe und Benutzeroberflächen bei Tunnel-Prozessleitsystemen <i>Harmonisation des processus et des interfaces utilisateurs dans les systèmes de supervision de tunnels</i> <i>Harmonisation of procedures and user interface in Tunnel-Process Control Systems</i>	2012
1380	ASTRA 2007/009	Wirkungsweise und Potential von kombinierter Mobilität <i>Mode d'action et le potentiel de la mobilité combinée</i> <i>Mode of action and potential of combined mobility</i>	2012
1381	SVI 2004/055	Nutzen von Reisezeiteinsparungen im Personenverkehr <i>Bénéfices liés à une réduction des temps de parcours du trafic voyageur</i> <i>Benefits of travel time savings in passenger traffic</i>	2012
1383	FGU 2008/005	Einfluss der Grundwasserströmung auf das Quellverhalten des Gipskeupers im Chienbergtunnel <i>Influence de l'écoulement souterrain sur le gonflement du Keuper gypseux dans le Tunnel du Chienberg</i> <i>Influence of groundwater flow on the swelling of the Gipskeuper formation in the Chienberg tunnel</i>	2012
1386	VSS 2006/204	Schallreflexionen an Kunstbauten im Strassenbereich <i>Réflexions du trafic routier aux ouvrages d'art</i> <i>Noise reflections on structures in the street</i>	2012
1387	VSS 2010/205_OBF	Ablage der Prozessdaten bei Tunnel-Prozessleitsystemen <i>Enregistrement des données de systèmes de supervision de tunnels</i> <i>Data storage in tunnel process control systems</i>	2012