

Werkstoffe und Werkstoffprüfung im Bauwesen

Festschrift zum 60. Geburtstag von H.-W. Reinhardt



Werkstoffe und Werkstoffprüfung im Bauwesen

Festschrift zum 60. Geburtstag von Prof. Dr.-Ing. H.-W. Reinhardt

- Herausgeber: Dr.-Ing. Christian Große
Institut für Werkstoffe im Bauwesen
Universität Stuttgart
Pfaffenwaldring 4
70550 Stuttgart
Tel.: 0711/685-6786
Fax: 0711/685-6797
eM@il: grosse@iwb.uni-stuttgart.de
<http://iwb.uni-stuttgart.de>
- Redaktion: Simone Stumpp
Markus Krüger
Christian Große
- Titel: Jutta Reinhardt - Künstlerische Vorlage
Markus Krüger - Titelgestaltung
- Fotografien: Edith Ries, Monika Bauer, u. a.
- Sponsoren: Dyckerhoff Zement GmbH, Wiesbaden
E. SCHWENK Zementwerke KG, Ulm
Heidelberger Zement AG, Heidelberg
Industrieverband Steine und Erden Bad.-Württ. e. V., Fachgruppe Sand und Kies
Lafarge Zement: Wössinger Zement GmbH, Walzbachtal
Liapor
MC-Bauchemie Müller GmbH & Co., Bottrop
Philipp Holzmann Bautechnik GmbH, Neu-Isenburg
Südwestzement GmbH, Stuttgart

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme

Christian Große (Hrsg.):

Werkstoffe und Werkstoffprüfung im Bauwesen – Festschrift zum
60. Geburtstag von H.-W. Reinhardt. – Hamburg: Libri BOD, 1999
ISBN 3-89811-172-5

Vorwort

Am 28. November 1999 wird Herr Prof. Dr.-Ing. Hans-Wolf Reinhardt 60 Jahre alt. Dieser Festtag bietet für die Autorinnen und Autoren dieses Buches die Gelegenheit, sich für die jederzeit gute Zusammenarbeit und die konstruktive wissenschaftliche Betreuung durch Prof. Reinhardt im Laufe der letzten Jahre zu bedanken. Seit 1990 leitet er das Institut für Werkstoffe im Bauwesen (IWB) der Universität Stuttgart und die Forschungs- und Materialprüfungsanstalt (FMPA) Baden-Württemberg, Otto-Graf-Institut. So erklärt sich auch, daß die meisten Autoren dieser Festschrift zu etwa gleichen Teilen Mitarbeiter von IWB und FMPA sind oder waren. Dieses „Autorenkollektiv“ demonstriert damit die gute Zusammenarbeit zwischen den beiden Partnerinstitutionen und nimmt quasi die Ereignisse vorweg, die mit der geplanten Wiedereingliederung der FMPA in die Universität unmittelbar bevorstehen.

Die Vielzahl der in dieser Schrift behandelten Forschungsthemen spiegelt Prof. Reinhardts universelles Fachwissen, wie auch überhaupt sein Interesse für sehr viele Bereiche der bauingenieur-wissenschaftlichen Forschung wieder. Einen wesentlichen Beitrag zu den Erfolgen dieser Forschungsprojekte leistete er in den letzten neun Jahren nicht nur durch seine administrativen Tätigkeiten als Direktor bzw. Ordinarius, sondern ganz wesentlich durch seine ruhige, ausgeglichene aber immer auch sachlich kritische Art, die für alle Mitarbeiter die Zusammenarbeit mit ihm sehr angenehm gemacht hat. Deswegen verbinden die Autorinnen und Autoren den Dank für die bisherige erfolgreiche Zusammenarbeit mit dem aufrichtigen Wunsch, auch in Zukunft viele wissenschaftliche Projekte gemeinsam gestalten zu können.

An dieser Stelle sei von Seiten des Herausgebers allen Autorinnen und Autoren für die bereitwillige Erstellung der Manuskripte gedankt. Die vollständig elektronische Anfertigung der Manuskripte forderte von vielen ein besonders hohes Maß an Flexibilität. Ganz besonders muß die Mitarbeit von Frau Simone Stumpp erwähnt werden, die mit großer Geduld und in Fleißarbeit das endgültige Layout erstellt hat. Dank gebührt auch Herrn Dipl.-Ing. Markus Krüger für die redaktionelle Mitarbeit, Frau Jutta Reinhardt für die Bereitstellung des Titelbildes sowie den Sponsoren (siehe Titellinnenseite) für die Übernahme der Druckkosten, ohne die dieser Band nicht entstanden wäre.

Inhaltsverzeichnis

Michael Aufrecht	1
Überlegungen zur Produktentwicklung in Managementsystemen der Baustoffindustrie	
Frauke Beckert	10
Gute Lehrer, schlechte Lehrer	
Tobias Bräutigam, Geoffrey Gay, Hermann Schad	17
Landslides in the upper keuper marl of south west Germany and some remedial measures	
Rolf Eligehauen, Hannes Spieth	29
Post-installed rebar connections	
Werner Fuchs, Rolf Eligehausen	42
Zum Kriechverhalten von Verbunddübeln unter Zugbeanspruchung	
Gabriele Grassegger	54
Decay mechanisms of natural building stones on monuments - A review of the latest theories	
Christian Große	82
Grundlagen der Inversion des Momententensors zur Analyse von Schallemissionsquellen	
Christian Große, Bernd Weiler, Alexander Herb, Günther Schmidt, Kai Höfler	106
Advances in ultrasonic testing of cementitious materials	
Dagmar Hansen, Kai Höfler, Günter Krause, Gerhard Volland	117
Untersuchungen zur Diffusionscharakteristik flüchtiger organischer Lösemittel beim Austrag aus Altlasten	
Wolfgang Harre	134
Zur Renaissance des Gußeisens im konstruktiven Ingenieurbau	

Martin Joß	149
Selbstheilung von Beton unter Temperatureinfluß	
Rainer Koch	161
Eine baupraktische Anwendung zur Wiederverwendung von Bauschutt	
Markus Krüger	177
Prüfmethoden zur Untersuchung der Verarbeitbarkeit von selbstverdichtenden Betonen	
Julian Kümmel	192
Ökobilanzen im Bauwesen - die Bedeutung der funktionellen Einheit	
Heiko Lünser	204
Auswahl und Bewertung von Dämmstoffen	
Steffen Lütze, Steffen Ritter, Gerhard Busse	223
Observation of fibre-fibre interactions in single-fibre model samples	
Utz Mayer, Oliver Müller-Marc, Markus Bruckner, Steffen Lettow	235
Untersuchungen zur Schnittkraftumlagerung in Stahlbetonstab-tragwerken nach DIN 1045-1	
Juraj Meszaros, Bernhard Lehr	257
Tragverhalten von Einzelbefestigungen mit chemischen Dübeln unter zentrischer Belastung	
Josko Ožbolt, Utz Mayer, Henrik Vocke, Rolf Eligehausen	272
Das FE-Programm MASA in Theorie und Anwendung	
Arno Pfingstner	294
Porenstruktur von Beton	
Bestimmung von Porenparametern anhand des Eindringverhaltens von n-Decan	
Tassilo Rinder	308
Versuche zum Schwinden von hochfestem Beton	
Roland Rück	319
Stoßbeanspruchung einer vierseitig linienförmig gelagerten Verglasung durch menschliche Körper und Ersatzkörper	

<i>Gottfried Sawade</i>	338
Numerische Modellierung der magnetischen Streufeldmessung zur Ortung von Spannstahlbrüchen	
<i>Joachim Schwarte, Marcus Schreyer</i>	352
Moderne Informationstechnik in der Baustoff-Forschung und -Lehre	
<i>Gerhard E. Völkel</i>	362
Kommentar zur neuen Norm DIN EN 1065; Baustützen aus Stahl mit Ausziehvorrichtung	
<i>Silvia Weber</i>	377
Curing of high strength concrete using lightweight aggregates	
<i>Georg Weiß</i>	392
Demontierbare Gebäude aus Beton	
<i>Shilang Xu</i>	410
Determination of parameters in the bilinear, Reinhardt's nonlinear and exponentially nonlinear softening curves and their physical meanings	
<i>Dieter Zöltzer</i>	425
Sanierung einer PCB-belasteten Schule	
<i>Rudolf Brinkmann</i>	437
Das Primat der Materialforschung für die Konformitätsbewertung	
<i>Autoren</i>	443

Numerische Modellierung der magnetischen Streufeldmessung zur Ortung von Spannstahlbrüchen

GOTTFRIED SAWADE

Forschungs- und Materialprüfungsanstalt Baden-Württemberg, Stuttgart

Einleitung

Die zerstörungs- und berührungsfreie Methode der magnetischen Streufeldmessung ermöglicht die Ortung von Brüchen der Spannbewehrung in Spannbetonbauteilen. Die Bewertung und Interpretation der Meßsignale ist im allgemeinen kompliziert, da die Bruchsignale der Spannstähle von den Signalen der schlaffen Bewehrung (z. B. Querbügel) überlagert werden. Hierzu wurden verschiedenen Analyseverfahren auf empirischer Grundlage entwickelt [1, 2]. Zum besseren Verständnis der Streufeldsignale ist jedoch die mathematische Modellierung des Meßverfahrens erforderlich, um z. B. zur Signalanalyse gemessene Signale mit simulierten Signalen vergleichen zu können. Da bislang kein geeignetes Programm zur Simulation der magnetischen Streufeldmessung an Bewehrungsanordnungen vorhanden war (vgl. [5]) wurde im Rahmen eines Forschungsvorhabens [1] ein entsprechendes mathematisches Modell erstellt und in der Folge weiterentwickelt. Darüber wird nachstehend berichtet.

Simulationsmodell

Grundlagen

Bei der magnetischen Streufeldmessung wird das zu untersuchende Bauteil mit einem Magnetfeld H_o beaufschlagt, das im Bauteil (d. h. in der Bewehrung) eine Magnetisierung \underline{M} erzeugt. Das magnetische Streufeld H_s wird durch diese Magnetisierung erzeugt. Defekte und Fehlstellen in der Bewehrung (wie z. B. Brü-

che) sind örtliche Störungen der Bauteil-Magnetisierung, und können anhand charakteristische Anomalien des magnetischen Streufeldes erkannt werden (s. Bild 1).

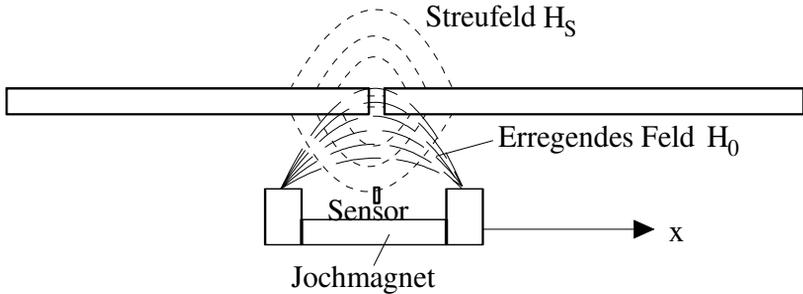


Bild 1: Prinzip der magnetischen Streufeldmessung zur Ortung von Spannstahlbrüchen

Zur Messung des Streufeldes wird ein Prüfkopf, der eine Magnetisiervorrichtung (Jochmagnet) sowie Magnetfeldsensoren enthält, längs der Spannbewehrung bewegt. Die Messung des magnetischen Streufeldes erfolgt sowohl im aktiven Feld (während des Einwirkens des äußeren erregenden Feldes), sowie als Restfeldmessung, wobei das Magnetfeld des im Bauteil nach dem Ausschalten der Magnetisiervorrichtung verbliebenen remanenten Magnetisierung gemessen wird.

Für die Simulation der magnetischen Streufeldmessung an Bewehrungsanordnungen wurde das Rechenmodell auf der Grundlage der Magnetostatik entwickelt. Geht man davon aus, daß das erregende Magnetfeld durch eine Magnetisiervorrichtung vorgegeben ist, so ist die Stromdichte im gesamten Volumen gleich Null. Die Ausgangsgleichungen lauten dann nach [6]:

$$\underline{B} = \mu_0 \cdot (\underline{H} + \underline{M}) \quad (1)$$

$$\text{div } \underline{B} = 0 \quad (2)$$

$$\text{rot } \underline{H} = 0 \quad (3)$$

Hierbei ist \underline{B} die magnetische Induktion, \underline{H} die magnetische Feldstärke und \underline{M} die Magnetisierung der ferromagnetischen Bewehrung. μ_0 ist die magnetische Permeabilität des Vakuums. Die magnetische Feldstärke \underline{H} setzt sich additiv aus der

Feldstärke \underline{H}_0 der Magnetisiervorrichtung, die sich an der Position x_h befindet und der magnetischen Streufeldstärke \underline{H}_S infolge der ferromagnetischen Bauteile zusammen:

$$\underline{H}(x, y, z) = \underline{H}_S(x, y, z) + \underline{H}_0(x - x_h, y, z) \quad (4)$$

Wegen der Wirbelfreiheit der magnetischen Feldstärke H_S wird diese aus einem magnetischen Potential ψ erhalten:

$$\underline{H}_S(x, y, z) = -\text{grad } \psi \quad (5)$$

Setzt man diese Beziehung in Gl. (2) ein, so ergibt sich folgende Integralgleichung zur Bestimmung des magnetischen Potentials [6]:

$$\psi(x, y, z) = -\frac{1}{4\pi} \int_V \frac{\text{div } \underline{M}(x', y', z')}{\sqrt{(x - x')^2 + (y - y')^2 + (z - z')^2}} dV \quad (6)$$

Zwischen der Magnetisierung M und der magnetischen Feldstärke H besteht eine Beziehung in Form eines konstitutiven Materialgesetzes. Dieses wird auf empirischem Wege erhalten. Zur Berücksichtigung des für ferromagnetische Materialien typischen hysteretischen Verhaltens wird das Stoffgesetz in inkrementeller Form nach [3, 4] wie folgt angesetzt:

$$d\underline{M} = \underline{\chi} \left(\underline{H}, \frac{d\underline{H}}{dt}, \underline{M} \right) \cdot d\underline{H} \quad (7)$$

Hierbei ist χ die differentielle Suszeptibilität, die eine Funktion der momentanen Magnetisierung, des magnetischen Feldes und der zeitlichen Feldänderung ist.

Numerisches Modell

Bei der Modellierung der Streufeldmessung besteht die Aufgabe darin, das magnetische Streufeld an den Sensoren des Prüfkopfes für jeden Ort x_h des Prüfkopfes zu bestimmen. Hierzu wird angenommen, daß der Ort des Prüfkopfes stetig

verändert wird, so daß x_h als zeitartiger Parameter betrachtet werden kann. Die Gln. (4-7) müssen somit für jede Position x_h des Prüfkopfes gelöst werden. Für die numerische Simulation wird die gesamte Bewehrung des Bauteils durch N stabförmige Elemente mit den Durchmessern d_i und den Längen l_i modelliert. Diese Elemente können orthogonal zu der x-y- oder z-Achse angeordnet sein. Die Mitte der Element befinden sich an den Punkten x_i, y_i, z_i . Es wird vereinfachend angenommen, daß die Orientierung der im Element als konstant angenommene Magnetisierung M_i mit der Richtung der Elementachse übereinstimmt und nur von der magnetischen Feldkomponente H_i in Richtung der Elementachse im Gauss-Punkt (x_i, y_i, z_i) des i-ten Elements beeinflusst wird.

Das Magnetfeld H_i ergibt sich aus der Überlagerung des erregenden Magnetfeldes $H_0(x_i, y_i, z_i)$ und dem Streufeld aller Elemente:

$$H_i = H_0(x_i, y_i, z_i) + \sum_{j=1}^N K_{ij} \cdot M_j \quad (8)$$

Die Koeffizienten K_{ij} werden analytisch aus aus Gl. (6) berechnet. Die Orientierung des Stabelements wird durch die Größen n_{ix}, n_{iy} und n_{iz} gegeben

$$K_{ij} = -\left\langle \left(n_{ix} \frac{\partial}{\partial x}, n_{iy} \frac{\partial}{\partial y}, n_{iz} \frac{\partial}{\partial z} \right), \left(n_{jx}, n_{jy}, n_{jz} \right) \right\rangle \cdot I \quad (9)$$

$$I = \int_{r, \varphi} \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \cdot dr d\varphi$$

R_1 und R_2 sind die Abstände der Punkte der Stirnflächen des j-ten Elements zum Punkt i (s. Bild 2):

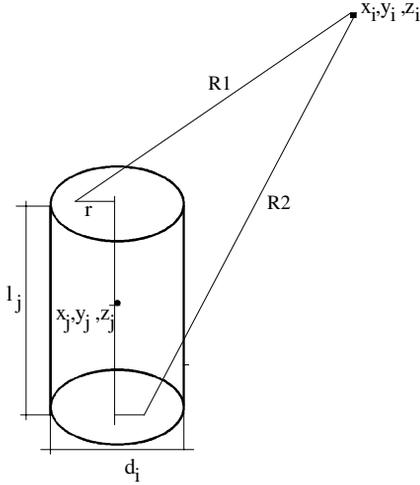


Bild 2: Geometrie der Stabelemente

Die Berücksichtigung des nichtlinearen Stoffgesetzes nach Gl. (7) erfolgt mit einem inkrementellen Verfahren. Jedes Inkrement k entspricht dabei einem Zeitpunkt. Dazu werden im k -ten Inkrement die Zuwächse der Magnetisierung und des Magnetfeldes in jedem Gauss-Punkt in Abhängigkeit von der Änderung des erregenden Feldes ΔH_0 wie folgt bestimmt:

$$\begin{aligned}\Delta H_i^k &= \Delta H_{0i}^k + \sum_j K_{ij} \cdot \Delta M_j^k \\ \Delta M_j^k &= \chi(H_j^{k-1}, H_j^{*k-1}, M_j^{k-1}) \cdot \Delta H_j^k\end{aligned}\quad (10)$$

Dieses Gleichungssystem wird nach ΔH aufgelöst:

$$\Delta H_i^k = \sum_j (\delta_{ij} - K_{ij} \cdot \chi)^{-1} \Delta H_0^k(x_j, y_j, z_j) \quad (11)$$

δ_{ij} ist das Kronecker-Symbol.

Die Änderung ΔH_0 des erregenden Feldes des Prüfkopfes ergibt sich aus der Positionsveränderung des Prüfkopfes (Δx_h) und der Veränderung der Polstärke (ΔP) des Jochmagneten. Die Magnetisierungen der Stabelemente und die Feldstärken in den Gauss-Punkten nach dem k -ten (Zeit) Inkrement ergeben sich wie folgt:

$$\begin{aligned}
 H_i^k &= \sum_{l=1}^k \Delta H_i^l \\
 M_i^k &= \sum_{l=1}^k \Delta M_i^l
 \end{aligned}
 \tag{12}$$

Das magnetische Streufeld am Ort der Meßsensoren wird in Analogie zu Gl. (8) wie folgt berechnet:

$$H_s(x_h - x_s, y, z) = \sum K_{sj}(x_h - x_s, y, z, x_j, y_j, z_j) \cdot M_j^k
 \tag{13}$$

Die Koeffizienten K_{sj} werden ebenfalls analytisch nach Gl. (8) berechnet. Hierbei ist x_s die Position des Sensors in Bezug auf die Jochmitte.

Schließlich ist noch das erregende Feld \underline{H}_0 zu bestimmen. Hierzu wird vereinfachend angenommen, daß das Feld des Jochmagneten (Jochlänge L) durch die Überlagerung zweier entgegengesetzter magnetischer Pole der Polstärke P dargestellt werden kann[1, 2]:

$$\underline{H}_0 = -P \cdot \text{grad}\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right) \quad ; r_{1,2} = \sqrt{(x_h \mp L/2 - x)^2 + y^2 + (z - z_0)^2}
 \tag{14}$$

z_0 ist ein Höhenoffset, der zur Anpassung von Gl. (14) an reale Felder von Jochmagneten dient. Bei Gl. (14) wird die Rückwirkung des Streufeldes der Bewehrung auf das Eisenjoch der Magnetisiervorrichtung vernachlässigt. Mit dieser Annahme ist die Polstärke P direkt zum Strom des Elektromagneten proportional. Diese Annahme erscheint bei hinreichend großem Querschnitt des Jochs im Vergleich zum Bewehrungsquerschnitt gerechtfertigt.

In Bild 3 ist ein typischer Feldverlauf eines Jochmagneten (Jochlänge 50 cm) aufgetragen

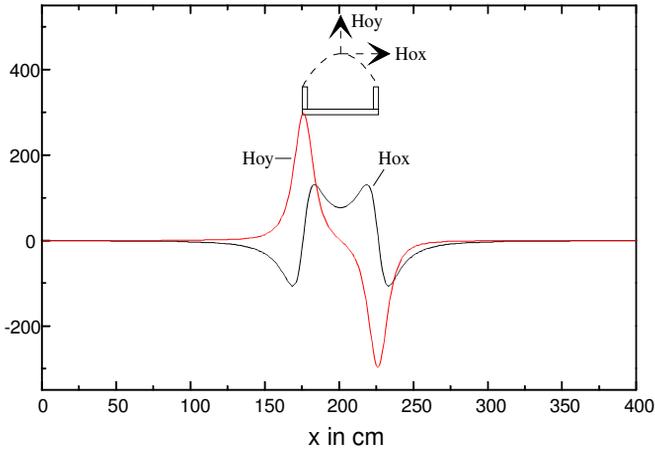


Bild 3: Magnetfeldverteilung in der Umgebung des Prüfkopfes (Abstand zur Mitte des Prüfkopfes 10 cm, $P = 3 \cdot 10^4$ Acm, $z_0 = 0$ cm)

Zur Erstellung des magnetischen Stoffgesetzes wird nach [3, 4] die differentielle Suszeptibilität χ wie folgt bestimmt:

$$\chi = \alpha \cdot \text{sign}(H^*) \cdot (M_s \cdot \tanh(\xi H) - M) + \frac{M_s \cdot \xi}{\cosh^2(\xi H)} \cdot (1 - \gamma \exp(\beta |H|) - \gamma \cdot \exp(-\beta |H|)) \geq 0 \quad (15)$$

H^* ist die zeitliche Änderungsrate der magnetischen Gesamtfeldstärke. In Bild 4 ist eine berechnete Hysteresiskurve für Spannstahl dargestellt. Die Pfeile zeigen den Magnetisierungsverlauf an.

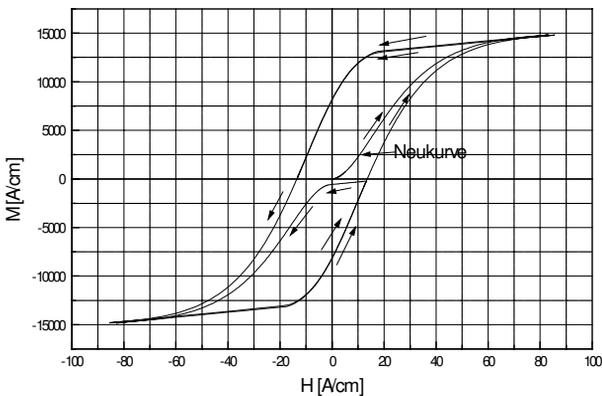


Bild 4: Hysteresiskurve (rechnerische Simulation) von Spannstahl

Die Parameter werden wie folgt angesetzt:

$$\text{Spannstahl: } M_{\infty} = 15000 \text{ A/cm}; \quad \alpha = 0,06; \quad \beta = 0; \quad \gamma = 0,97; \quad \xi = 0,06$$

$$\text{Baustahl: } M_{\infty} = 15000 \text{ A/cm}; \quad \alpha = 0,40; \quad \beta = 0; \quad \gamma = 0,97; \quad \xi = 0,40$$

Auf der Grundlage des oben entwickelten Modells nach den Gln. (8-15) wurde das Rechenprogramm SMFLM (Simulation Magnetic Flux Leakage Measurement) zur Simulation von magnetischen Streufeldmessungen an dreidimensionalen gitterartigen Bewehrungsanordnungen erstellt. Bei diesem Programm wird das magnetische Streufeld ermittelt, das an beliebig wählbaren Meßpunkten im Prüfkopf während einer Meßfahrt längs der x- Achse registriert wird. Die Steuerung des Ortes x_h und der Polstärke P des Prüfkopfes in Abhängigkeit von der Zeit (Inkrement k) wird wie folgt vorgenommen:

1. Fall R1: Des Magnetfeld des Prüfkopfes wird am Beginn der Meßstrecke (x_0) eingeschaltet und am Ende der Meßstrecke (x_1) wieder ausgeschaltet:

$$\begin{aligned} x_h^k &= 0, & 0 \leq k \leq N_1 \\ P^k &= P_1 \cdot \frac{k}{N_1} & 0 \leq k \leq N_1 \\ x_h^k &= x_0 \cdot \left(1 - \frac{k - N_1}{N_2 + N_1}\right) + x_1 \cdot \frac{k - N_1}{N_1 + N_2} & N_1 \leq k \leq N_1 + N_2 \\ P^k &= P_1 & N_1 \leq k \leq N_1 + N_2 \\ x_h^k &= x_1 & N_1 + N_2 \leq k \leq N_1 + N_2 + N_3 \\ P^k &= P_1 \cdot \left(1 - \frac{k - N_1 - N_2}{N_1 + N_2 + N_3}\right) & N_1 + N_2 \leq k \leq N_1 + N_2 + N_3 \end{aligned} \quad (16)$$

2. Fall R2: Der Prüfkopf wird am Beginn der Meßstrecke (x_0) eingeschaltet, fährt die Meßstrecke ab, und fährt mit eingeschaltetem Magnetfeld wieder zum Startpunkt zurück. Das Magnetfeld wird erst am Startpunkt wieder ausgeschaltet:

$$\begin{array}{ll}
 x_h^k = x_0, & 0 \leq k \leq N_1 \\
 P^k = P_1 \cdot \frac{k}{N_1} & 0 \leq k \leq N_1 \\
 x_h^k = x_0 \cdot \left(1 - \frac{k - N_1}{N_2 + N_1}\right) + x_1 \cdot \frac{k - N_1}{N_1 + N_2} & N_1 \leq k \leq N_1 + N_2 \\
 P^k = P_1 & N_1 \leq k \leq N_1 + N_2 \\
 x_h^k = x_1 \cdot \left(1 - \frac{k - N_1 - N_2}{2N_2 + N_1}\right) + x_0 \cdot \frac{k - N_1 - N_2}{2N_1 + N_2} & N_1 + N_2 \leq k \leq N_1 + 2N_2 \\
 P^k = P_1 & N_1 + N_2 \leq k \leq N_1 + 2N_2 \\
 x_h^k = x_0 & N_1 + 2N_2 \leq k \leq N_1 + 2N_2 + N_3 \\
 P^k = P_1 \cdot \left(1 - \frac{k - N_1 - 2N_2}{N_1 + 2N_2 + N_3}\right) & N_1 + 2N_2 \leq k \leq N_1 + 2N_2 + N_3
 \end{array} \tag{17}$$

Die Parameter N_1 - N_3 bestimmen die zeitliche Dichte der Simulation. Die Messung des Streufeldes wird entsprechend Gl. (13) in jedem Zeit-Inkrement k vorgenommen. Bei der Simulation der Restfeldmessung werden die zuvor berechneten Magnetisierungen M_i aller Elemente, die im letzten Zeitinkrement erhalten wurden, eingelesen, und daraus das Restfeldsignale entsprechend Gl. (13) berechnet. In diesem Programm kann die vorhandene remanente Magnetisierungs- und Magnetfeldverteilung der Bewehrung als Anfangswert für einen neuen Berechnungslauf berücksichtigt werden. Damit können die Ummagnetisierung der Bewehrung bei aufeinanderfolgenden Magnetisierungsfahrten des Prüfkopfes bestimmt werden.

Der Vorteil dieses Rechenprogramms im Vergleich mit üblichen Finite-Element-Programmen (z. B. ANSYS,PROFI s. [5]) besteht darin, daß durch die Verwendung der analytisch berechneten exakten Übertragungskoeffizienten nach Gl. (9) nur die Elementierung der ferromagnetischen Bauteile erforderlich ist und somit die Randbedingungen und die Bedingungen im unendlichen automatisch erfüllt sind. Dadurch ist der Speicherbedarf gering, so daß auch relativ umfangreiche 3-D Probleme mit geringer Rechenzeit gelöst werden können. Durch die inkrementelle Vorgehensweise können auch die Nichtlinearitäten infolge des ferromagnetischen Stoffverhaltens problemlos berücksichtigt werden.

Beispiele

Signal eines Querbügels

Nachfolgend wird magnetische Streufeldmessung bei einem einzelnen Querbügel aus Baustahl simuliert und mit Messergebnissen verglichen. Dabei wird vorausgesetzt:

Meßstrecke $x_0 = 0$ cm; $x_1 = 500$ cm, $N_1 = 20$; $N_2 = 2500$; $N_3 = 20$

Polstärke: $P_0 = 30000$ Acm

Bügel: Durchmesser $d = 1$ cm, bei $x = 250$ cm, Länge 50 cm, Abstand zum Prüfkopf 7,0 cm

Es wurden 50 Elemente berücksichtigt.

In den Bildern 5, 6 sind die berechneten Streufeldverläufe (x-Komponente des Streufeldes) zusammen mit gemessenen Streufeldverläufen dargestellt:

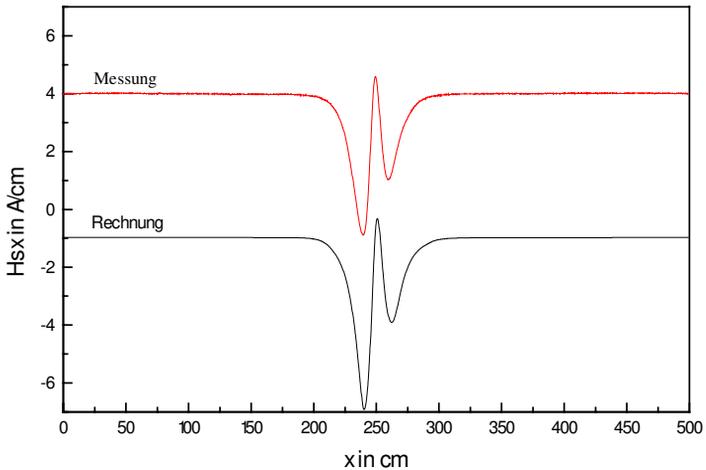


Bild 5: Simulierter Streufeldverlauf (H_x) einer Magnetometermessung bei einem Querbügel, Messung im aktiven Feld

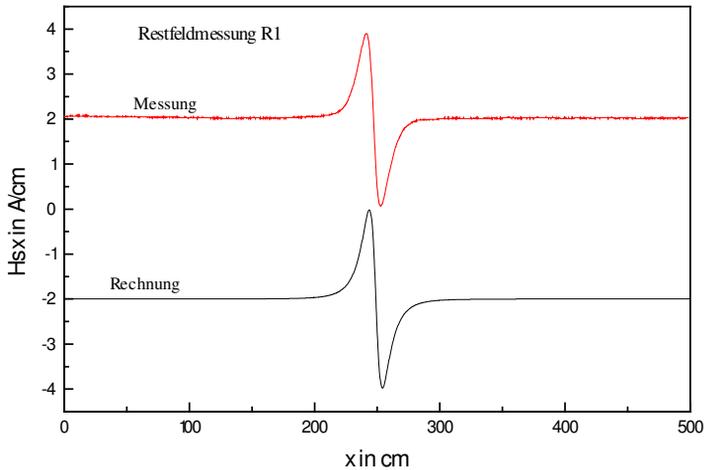


Bild 6: Simulierter Streufeldverlauf (H_x) einer Magnetometermessung, Restfeldmessung R1 (nach Ausschalten der Magnetsiervorrichtung am Ende der Meßstrecke)

Der Vergleich zwischen Messung und Rechnung zeigt eine befriedigende Übereinstimmung. Es wird deutlich, daß der Querbügel bei Messung im aktiven Feld eine deutlich veränderte Signalcharakteristik als bei der Restfeldmessung hat. Die nichtsymmetrische Signalform mit einem Zwischenmaximum (am Ort des Bügels) beruht auf dem Hystereseverhalten bei der Ummagnetisierung während der Vorbeifahrt der Magnetsiervorrichtung. Erst bei sehr hohen Magnetisierungsstärken wird eine symmetrische Signalform erhalten.

Signal eines Spanngliedbruchs

Im nächsten Beispiel wird folgende Bewehrungsanordnung untersucht:

Bügel: Durchmesser $d = 1.2$ cm, Länge 20 cm (Anfang bei $y = -10$ cm, Ende bei $y = 10$ cm)

x - Position / cm	13	36	63	86	113	140	163	188
Abstand zu z_0 / cm	4	4.5	5	6	5.5	4	5	5

Spannglied : Anfang bei $x = 50$ cm, Ende bei $x = 250$ cm, Durchmesser $D = 2.4$ cm, Bruch bei 55 cm, Bruchweite 2 mm, Tiefe (Abstand) zu $z_0 = 10$ cm, Lage bei $y = 0$ cm Spannglied und Querbügel werden in je 5 cm langen Elementen modelliert.

Gesamtzahl der Elemente = 100 Jochmagnet: Jochlänge $L = 45$ cm, $z_0 = 3$ cm, Meßsensor (x-Komponente) mittig bei z_0 Meßstrecke $x_0 = 0$ cm; $x_1 = 200$ cm, $N_1 = 20$; $N_2 = 200$; $N_3 = 20$

Es wurden folgende Meßfahrten simuliert:

Messung	M1	M2	R1	M3	R2
Polstärke bei Hinfahrt /Acm	5000	20000	0	20000	0
Polstärke bei Rückfahrt “	0	0	0	20000	0

Die simulierten Meßsignale sind nachfolgend dargestellt.

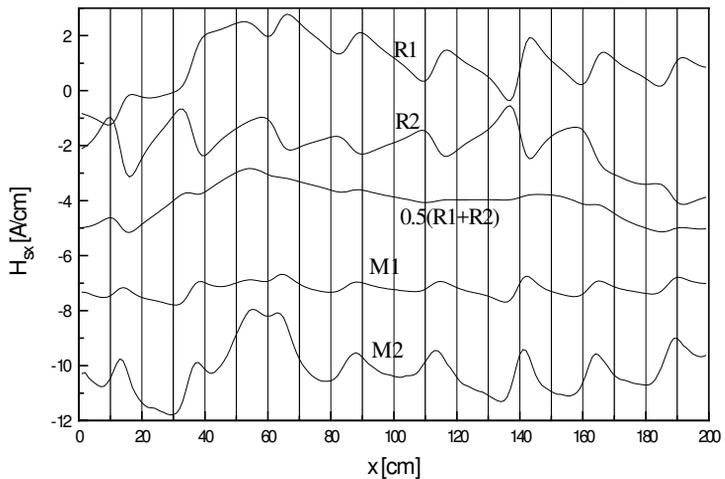


Bild 7: Simulierte Streu- und Restfeldsignale

Es wird ersichtlich, daß das Bruchsignal (Peak bei 55 cm) bei der Meßfahrt M2 im Vergleich zur Meßfahrt M1 überproportional zugenommen hat, und deutlich zu erkennen ist. Das ist auf die magnetische Neukurve von Spannstahl zurückzu-

führen, bei der nennenswerte Zuwächse der Magnetisierung erst bei höheren Feldstärken auftreten. Die Änderung der Signalform bei der Strefeldmessung im aktiven Feld ist ein wichtiger Hinweis für Brüche. In beiden Restfeldsignalen R1 und R2 ist das Bruchsignal nicht zu erkennen, da die Bügelsignale wesentlich stärker sind. Allerdings sind die Bügelsignale der beiden Messungen nahezu invers zueinander, so daß sie sich im Summensignal aufheben und das Bruchsignal dort deutlicher hervortritt.

Zusammenfassung

Durch Modellierung der Bewehrung mit stabförmigen Elementen kann das magnetostatische Problem unter Verwendung analytischer Lösungen durch eine rechen technisch einfache Summationsaufgabe gelöst werden. Hierbei müssen im Gegensatz zu üblichen FE-Programmen nur die ferromagnetischen Bauteile elementiert werden, so daß auch größere Probleme mit geringem Aufwand berechnet werden können. Durch Verwendung eines realitätsnahen hysteretischen Stoffgesetzes des ferromagnetischen Verhaltens kann das nichtlineare Problem der Bestimmung der Bauteilmagnetisierung mit einer inkrementellen Vorgehensweise gelöst werden. Dabei wird die vollständige Magnetisierungsgeschichte berücksichtigt. Somit können mit dem hier entwickelten Verfahren erstmals sowohl Messungen im aktiven Feld- wie auch Restfeldmessungen an Bewehrungsanordnungen simuliert werden.

Die Übereinstimmung mit Messungen ist befriedigend, so daß das Verfahren zur qualitativen Bewertung von Meßabläufen und Meßanordnungen (z. B. Optimierung der Prüfmagnete, der Sensoranordnungen etc.) und zur Signalanalyse (Vergleich Meßsignal und simuliertes Signal) verwendet werden kann. Das Rechenmodell wird weiter entwickelt, wobei die Erweiterung auf schräg orientiert liegende und gekrümmte Elemente sowie die Verbesserung der magnetischen Stoffgesetze im Vordergrund steht.

Literatur

- [1] Sawade, G.: HTSL-Squid in der Bauindustrie. BWFT Abschlußbericht 13N6114 0 1996
- [2] Sawade, G., Straub, J., Krause, H.J., Bousack, H., Neudert, G., Ehrlich, R.: Signal Analysis Methods for the Magnetic Examination of Prestressed Elements. Proceedings of Int. Symposium Non Destructive Testing in Civil Engineering (NDT CE) Berlin 1995, Vol.II, pp 1077-1084
- [3] Hildenbrand, G.: Grundlagen zur nichtlinearen Finite-Element-Berechnung magnetischer Felder ferromagnetischer Werkstoffe. Diplomarbeit Institut für Statik und Dynamik der Luft- und Raumfahrtkonstruktionen der Universität Stuttgart 1992
- [4] Hodgson, M.: Applications of a Theory of Ferromagnetic Hysteresis. IEEE -Transactions on Magnetics, Vol. 24 Nr. 1 (1988), pp.218-221
- [5] Scheel, H.: Spannstahlbruchortung an Spannbetonbauteilen mit nachträglichem Verbund unter Ausnutzung des Remanenzmagnetismus. Dissertation Technische Universität Berlin, 1997
- [6] Sommerfeld, A.: Lehrbuch der theoretischen Physik, Band 3, Berlin 1971



Dr.-Ing. Gottfried Sawade

Leiter des Referats Felsmechanik , felsmechanische Meßtechnik und Kalibrierung

wiss. Mitarbeiter am IWB und FMFA seit 1983

Theoretische und experimentelle Forschungen auf den Gebieten der Bruchmechanik von mineralischen Baustoffen und der zerstörungsfreien Prüfverfahren im Bauwesen.

Redaktion:
Große, Krüger, Stumpp

ISBN 3-89811-172-5