

ISBN 3-88314-797-4

Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin

Forschungsbericht 153

Magnetisches Verhalten von Eisenproben bei mechanischer Wechselbeanspruchung

von Dr.-Ing. Harro Sander* und
Professor Dr.-Ing. Wolfgang-Werner Maennig**

* Autor

** Begründer und Leiter des Forschungsvorhabens sowie Autor

Juli 1988

70 Seiten, 32 Abbildungen

Herausgegeben von der
Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)
Unter den Eichen 87, 1000 Berlin 45
Telefon (030) 8104-1 Telex 183 261 bamb d
Telefax (030) 8 112 029 Teletex 2 627-308 372=bamb

Copyright © 1988 by Wirtschaftsverlag NW
Verlag für neue Wissenschaft GmbH, Bremerhaven

Verlag und Vertrieb:
Wirtschaftsverlag NW
Verlag für neue Wissenschaft GmbH
Postfach 10 11 10, 2850 Bremerhaven 1
Telefon (0471) 46093-95

Kurzfassung

Die Zusammenhänge zwischen magnetischem Verhalten und der Werkstoffschädigung durch Zerrüttung von Eisen werden untersucht mit dem Ziel, diese zur zerstörungsfreien Gewinnung von Informationen über Zerrüttungsvorgänge auszunutzen. Die grundlegenden Untersuchungen erfolgen an dünnen Eisenaufdampfschichten. Die Übertragung der Ergebnisse auf den technischen Maßstab wird durch Eisendrahtproben eingeleitet.

Summary

The relation between the fatigue process and the change of magnetic behaviour of iron is studied with the aim of non-destructive testing of fatigue behaviour. Fundamental investigations are carried out on evaporated thin iron films. The transfer of the results to the technical scale is started with specimens of bulk iron wire.

Stichworte

- Zerrüttung
- Ferromagnetismus
- magnetische Bereiche
- Blochwand
- Kerreffekt
- Magnetowiderstand
- Barkhauseneffekt
- Aufdampfschicht

Inhaltsverzeichnis

Seite

1.	Einleitung	7
1.1	Gegenstand der Arbeit	7
1.2	Lösungsweg	7
2.	Grundlagen	9
2.1	Zerrüttung metallischer Werkstoffe	9
2.2	Ferromagnetische Werkstoffe	11
2.2.1	Magnetische Bereiche	11
2.2.2	Freie Energie eines Ferromagneten	12
2.2.3	Magnetisierungsvorgang	15
2.2.4	Modellmäßige Betrachtung der Blochwandbewegung	16
2.2.5	Nachweis von Rotationsvorgängen durch Magnetowiderstandsmessung	20
2.2.6	Dünne ferromagnetische Schichten	22
3.	Schichtexperimente	24
3.1	Beanspruchungsapparatur	24
3.2	Probenherstellung	25
3.3	Magnetische Meßeinrichtung	26
3.3.1	Magnetfelderzeugung	26
3.3.2	Kerreffekt und Beobachtungsapparatur	26
3.3.3	Magnetowiderstandsmessung	28
3.4	Versuchsdurchführung	29
4.	Versuchsaufbau für Drahtexperimente	30
4.1	Probenform und mechanische Beanspruchung	30
4.2	Beanspruchungsapparatur	31
4.3	Magnetische Meßeinrichtung	31
4.3.1	Externer Induktionseffekt	32
4.3.2	Interner Induktionseffekt	33
4.3.3	Magnetische Meßanordnung	34
5.	Ergebnisse der Schichtexperimente	36
5.1	Magnetische Bereichsstruktur bei Wechselbeanspruchung	36
5.2	Magnetische Hystereseschleife bei Wechselbeanspruchung	38
5.3	Magnetowiderstandsänderung	41
5.4	Barkhauseneffekt	42
5.5	Mechanische Schädigungen	44
6.	Ergebnisse der Versuche mit Drahtproben	47
6.1	Einsinnige Torsionsbeanspruchung	47
6.2	Torsionswechselbeanspruchung	50
7.	Zusammenfassung	60
8.	Ausblick	63
	Dank	63
	Literatur	64

1. Einleitung

Werkstoffzerrüttung infolge mechanischer Wechselbeanspruchung ist der häufigste Versagensgrund bei technischen Konstruktionen /1/. Der Grund dafür ist, daß das Phänomen der Zerrüttung bisher nicht bis in alle Einzelheiten geklärt werden konnte. Daher ist eine zuverlässige Abschätzung der Lebensdauer einer Konstruktion, die im allgemeinen aus einer großen Zahl von Bauteilen verschiedener Werkstoffe und unterschiedlicher Formen besteht, nicht möglich. Das daraus resultierende stets vorhandene Schadensrisiko ließe sich jedoch vermindern, wenn es gelänge, den Vorgang der Materialzerrüttung in den Konstruktionsbauteilen kontinuierlich im normalen Betrieb zu überwachen. Das dadurch mögliche Erkennen von Werkstoffschädigungen würde es gestatten, rechtzeitig wirksame Maßnahmen zur Vermeidung größerer Schäden zu ergreifen.

1.1. Gegenstand der Arbeit

Einen Ausgangspunkt für ein zerstörungsfreies Meßverfahren zur Erkennung von Zerrüttungsschädigungen bietet bei vielen Eisenwerkstoffen der Ferromagnetismus. Da ferromagnetische Werkstoffe wie Eisen, Stahl und Eisen-Nickel-Legierungen in ihrem magnetischen Verhalten empfindlich durch den Gefügestand beeinflusst werden, sollte sich eine Änderung des Werkstoffgefüges infolge Wechselbeanspruchung im magnetischen Verhalten widerspiegeln. Besonders gefügeabhängige magnetische Kenngrößen wie Koerzitivfeldstärke, Suszeptibilität, mittlere Größe und Größenverteilung der Blochwallsprünge beim Barkhausen-Effekt ließen sich daher als Indikatoren für beanspruchungsbedingte Gefügeänderungen meßtechnisch ausnutzen.

Unter diesem Gesichtspunkt war es das Ziel der Untersuchungen, die mechanisch-magnetischen Zusammenhänge für den Fall der mechanischen Wechselbeanspruchung in ihren Grundlagen zu verfolgen.

1.2 Lösungsweg

Die allgemeine Behandlung dieses Problems ist schwierig, da im allgemeinen die im Volumen auftretenden Effekte experimentell nur indirekt oder unvollständig erfaßt werden können. Daher

wurde in zwei ersten Untersuchungsschritten versucht, durch speziell gewählte Probengeometrie die Versuchsbedingungen soweit zu vereinfachen, daß die bei der Zerrüttung auftretenden magnetisch-mechanischen Elementarvorgänge dem Experiment zugänglich werden.

Im ersten Schritt wurden zu diesem Zweck als Proben 100 nm dünne, vielkristalline Eisenschichten verwendet, die durch Bedampfung ebener Plexiglasträger im Vakuum hergestellt werden. Die gegenüber Massivmaterial wesentlich einfachere magnetische Bereichsstruktur gestattet es, mit magnetooptischen Methoden (Kerr-Effekt) die Bereichsstruktur sichtbar zu machen und die Wirkung der Wechselbeanspruchung auf die magnetischen Elementarvorgänge experimentell zu erfassen. Zur mechanischen Beanspruchung der Fe-Schicht wird das Schicht-Träger-System in einer Richtung parallel zur Schichtebene zyklisch mit konstanter Amplitude zug-druck-verformt.

Im zweiten Schritt, der die Verallgemeinerung der an dünnen Schichten gewonnenen Ergebnisse einleiten sollte, wurde das magnetische Verhalten vielkristalliner Fe-Drahtproben untersucht, die durch Wechsel-Torsionsbeanspruchung zerrüttet wurden. Die Drahtproben bestanden aus demselben Material wie das zur Schichtherstellung benutzte Aufdampfmaterial. Die Verfolgung des magnetischen Verhaltens erfolgte mit induktiven Verfahren.

Da über die Dünnschichtexperimente bereits in /2/ ausführlich berichtet wurde, wird über diesen ersten Untersuchungsschritt hier nur eine kurze Darstellung gegeben.

2. Grundlagen

2.1 Zerrüttung metallischer Werkstoffe

Bei schwingender Beanspruchung kann ein Werkstoff schon bei weit geringerer Belastung zu Bruch gehen, als er sie bei statischer Beanspruchung erträgt. Als Richtwert kann in der Praxis bei Stählen mittlerer Festigkeit eine Zug-Druck-Wechselfestigkeit $\sim 0,35 \cdot R_m$ und eine Verdreh-Wechselfestigkeit $\sim 0,30 \cdot R_m$ angesetzt werden. Dabei ist R_m die Maximalspannung bzw. die sogenannte Zugfestigkeit im einsinnigen Zugversuch. Von wesentlichem Einfluß ist die Oberfläche der Probe oder des Bauteils, und zwar um so mehr, je höher die Festigkeit des Werkstoffes liegt. Die Dauerschwingfestigkeit eines ganzen Bauteils ist außer vom Werkstoff und der Belastung in starkem Maße von seiner Gestalt abhängig (Gestaltfestigkeit). Kerben, Querschnittübergänge und Bohrungen sind kritische Stellen des Bauteils, da sie ein starkes Ansteigen der Spannung im Kerbgrund zur Folge haben.

Die schädigende Wirkung einer Wechselbeanspruchung wird mit "Zerrüttung" (fatigue) bezeichnet. Während der gesamten wechselsinnigen Beanspruchung laufen im Werkstoff mikrostrukturelle Vorgänge ab, die bei hinreichend hoher Beanspruchung nach einer endlichen Lastspielzahl zum Bruch führen. Die Erscheinungsformen der Zerrüttung sind sehr vielfältig. Mehrere zusammenfassende Darstellungen über das Zerrüttungsverhalten metallischer Werkstoffe geben den derzeitigen Kenntnisstand wieder /3-9/.

Aufgrund umfangreichen Beobachtungsmaterials läßt sich der Zerrüttungsvorgang grob in drei Phasen zerlegen:

- Wechselver- und -entfestigung,
- Rißkeimbildung,
- Rißwachstum.

Die erste Phase der Ver- und Entfestigung ist durch strukturelle Zustandsänderungen innerhalb des ganzen Probenvolumens gekennzeichnet. Je nach Werkstoff und Werkstoffzustand wird dabei Verfestigung, Entfestigung oder kombinierte Ver- und Entfestigung beobachtet. Diese Vorgänge sind um so ausgeprägter, je größer die Beanspruchungsamplitude ist.

Bei kubischflächenzentrierten (kfz) Metallen ohne Vorverformung setzt mit Beginn der Schwingbeanspruchung eine sofortige Ver-

festigung ein, die in ein mehr oder minder deutliches Plateau übergeht und schließlich in eine zunehmend schärfer werdende Entfestigung und den Bruch einmündet. Dabei ist die Verfestigung der Anfangsphase auf eine rapide Zunahme der Versetzungen und die zunehmende Ausbildung bestimmter Versetzungsstrukturen zurückzuführen.

Eine Folge der Versetzungsstrukturen sind Mikrorisse. Diese bewirken zuerst nochmalige Vermehrung der Versetzungen durch besonders starke plastische Verformung vor den Rißspitzen, dann aber doch nach weiterem Rißwachstum eine zunehmende Schwächung, so daß sich vorübergehend ein Plateau in der Verfestigungskurve ergibt.

Bestimmte Mikrorisse werden zu Makrorissen. Sie schwächen den Werkstoff bzw. die Probe weiter und lassen die übrigen Mikrorisse in einen Spannungsschatten geraten, so daß diese nicht mehr wachsen und auch keinen Beitrag mehr zur Versetzungsvermehrung liefern. Die Folge ist eine zunehmende Entfestigung und schließlich der Bruch /3,9/.

Bei dem kubischraumzentrierten (krz) Baustahl ohne Vorverformung sind höhere äußere Beanspruchungen als bei kfz-Metallen nötig, um wesentliche Veränderungen in der Mikrostruktur zu bewirken, weil in diesem Kristallsystem die im thermodynamischen Gleichgewicht vorhandenen Versetzungen von den Fremdatomen festgehalten werden. Werden notwendige Grenzspannungen überschritten, so kommt es nach einer thermodynamisch-statistisch bedingten Inkubationszeit zu einer deutlichen Entfestigung, die auf einem Losreißen der Versetzungen von den Fremdatomen (vor allem des Kohlenstoffs bei Baustahl) beruht. Erst danach kommt es zu einer Vermehrung der Versetzungszahl, so daß nach Durchschreitung eines Minimums eine Verfestigung einsetzt. Der weitere Verlauf ist dann wie bei den kfz-Metallen.

Erlitt der Werkstoff vor der Schwingbeanspruchung eine quasi-statische Verformung, so werden die dabei gebildeten Versetzungskonfigurationen während der Anfangsphase der schwingenden Beanspruchung erst aufgelöst und gleichzeitig in die für die Zerrüttung typischen Strukturen überführt. Die Auflösung kann mit einer makroskopischen Entfestigung einhergehen /3/.

Die Mikrorißbildung setzt ebenso wie die Entwicklung der speziellen Versetzungsstrukturen meist an der Oberfläche ein. Im sogenannten Rißstadium I entstehen die Mikrorisse bevorzugt in Körnern, in denen hohe Schubspannungen auftreten, die also Hauptgleitebenen unter 45° zur äußeren Beanspruchungsrichtung haben. Auch die Mikrorisse wachsen damit in diesem Stadium in dieser Richtung.

Im Rißstadium II, das mit dem Makroriß grob gleichgesetzt werden kann, erfolgt der Rißfortschritt makroskopisch normal zur äußeren Beanspruchung. Erst Betrachtung mit hoher Auflösung ergibt, daß auch hierbei oft Rißfortschritte unter 45° auftreten, aber bevorzugt mit sehr kurzen Teilstücken, die sich in grober Betrachtung so anordnen, daß der Eindruck eines normalflächigen Rißfortschrittes entsteht. In allen Fällen konzentriert sich der Zerrüttungsvorgang immer mehr auf die Spitzen immer weniger, wachsender Makrorisse.

2.2 Ferromagnetische Werkstoffe

2.2.1. Magnetische Bereiche

Ferromagnetische Werkstoffe sind unterhalb ihrer Curie-Temperatur im allgemeinen bereits ohne äußere Feldeinwirkung in einzelne, homogen magnetisierte Bereiche aufgeteilt. Der Betrag der spontanen Magnetisierung ist in allen Bereichen gleich; die Magnetisierungsrichtung ist von Bereich zu Bereich verschieden. Unter der Voraussetzung ungehemmter Gleichgewichtseinstellung ist die stabile Richtungsverteilung durch den Zustand minimaler freier Energie des gesamten Körpers bestimmt. Der Übergang der Magnetisierungsrichtung eines Bereiches in die eines Nachbarbereiches erfolgt stetig innerhalb dünner, flächenhafter Grenzschichten, die magnetische Wände genannt werden und eine Dicke von ca. 100 nm haben.

Die ortsabhängige Magnetisierung $\vec{I}(\vec{r})$ des ferromagnetischen Körpers läßt sich durch das Vektorfeld

$$\vec{I}(\vec{r}) = I_S \vec{n}(\vec{r}) \quad (2.1)$$

beschreiben. I_S ist darin der bei fester Temperatur als konstant zu betrachtende Betrag der spontanen Magnetisierung; $\vec{n}(\vec{r})$ ist ein mit dem Ort \vec{r} kontinuierlich veränderlicher Richtungsvektor ($|\vec{n}| = 1$). Die pauschale Magnetisierung des Körpers mit dem

Volumen V ergibt sich als Mittelwert zu

$$\bar{\vec{I}} = \frac{\int_V \vec{I}(\vec{r}) \cdot d\tau}{\int_V d\tau} = \frac{I_s}{V} \int_V \vec{n}(\vec{r}) d\tau \quad (2.2)$$

mit $d\tau$ als differentielles Volumenelement.

Da innerhalb eines spontan magnetisierten Bereiches $\vec{n}(\vec{r}) = \text{const}$ ist, treten unter dem Integral nur diskrete Magnetisierungsrichtungen $\vec{n}_i(\vec{r})$ auf, so daß sich Gl. 2.2 vereinfacht zu:

$$\bar{\vec{I}} = \frac{I_s}{V} \sum_i \vec{n}_i v_i \quad (2.3)$$

v_i und \vec{n}_i (Einheitsvektor) sind das Volumen und die Magnetisierungsrichtung des i -ten Bereiches. Die Summation erstreckt sich über alle Bezirke des betrachteten Volumens V . Die im Vergleich zur Bereichsausdehnung sehr dünne Blochwanddicke wird bei der Summation vernachlässigt.

Die Änderung der pauschalen Magnetisierung \vec{I} kann grundsätzlich auf zwei verschiedene Arten erfolgen:

$$d\bar{\vec{I}} = \frac{I_s}{V} \sum_i (\underbrace{\vec{n}_i}_{W} dv_i + v_i d\underbrace{\vec{n}_i}_{R}) \quad (2.4)$$

W: durch Bewegung von Bereichsgrenzen (Wandverschiebung), $dv_i \neq 0$.

R: durch Drehung der Magnetisierung innerhalb der Bereiche (Rotation), $dn_i \neq 0$.

2.2.2. Freie Energie eines Ferromagneten

Die Richtungsverteilung der spontanen Magnetisierung eines Ferromagnetikums im stabilen Gleichgewichtszustand ist durch ein Minimum seiner freien Energie bestimmt. Ein notwendiges Kriterium hierfür ist, daß die Variation der Gesamtenergie bezüglich der Magnetisierungsrichtungen verschwindet:

$$\delta E_{\text{ges}} = 0 \quad (2.5)$$

Die Gesamtenergie setzt sich im wesentlichen zusammen aus Austauschenergie E_A , Kristallenergie E_K , Streufeldenergie E_I , magnetoelastischer Energie E_σ und potentieller Energie E_H im äußeren Magnetfeld.

$$E_{\text{ges}} = E_A + E_K + E_I + E_\sigma + E_H \quad (2.6)$$

Die Austauschenergie bewirkt die spontane Parallelstellung der magnetischen Momente. Sie ist minimal zwischen benachbarten

Spins, wenn diese zueinander parallel sind. Die Austauschwechselwirkungsenergie benachbarter Spins ist

$$E_A = - 2A \cos \phi \quad (2.7)$$

mit der Austauschenergiekonstanten A und dem Winkel ϕ zwischen den Spins.

Die Kristallenergie, die auch als magnetokristalline Energie oder Anisotropieenergie bezeichnet wird, ist dafür verantwortlich, daß die Magnetisierung in einem ungestörten ferromagnetischen Kristall bestimmte kristallographisch ausgezeichnete Richtungen bevorzugt, die Richtungen leichter Magnetisierbarkeit genannt werden (z. B. $\langle 100 \rangle$ bei Fe). Für den einfachen Fall einachsiger Anisotropie ist die Kristallenergiedichte durch den Ausdruck

$$E_K = K \sin^2 \alpha + K' \sin^4 \alpha + \text{Glieder höherer Ordnung} \quad (2.8)$$

definiert. α ist der Winkel zwischen Magnetisierung und Vorzugsrichtung. K und K' sind die Konstanten der Kristallenergie. In den meisten praktischen Fällen genügt bereits K für die Beschreibung der Kristallanisotropie-Energie. Aufgrund der quadratischen Abhängigkeit vom Richtungssinus sind antiparallele Magnetisierungsrichtungen in Bezug auf die Kristallenergie gleichwertig.

Die Streifeldenergie ist die magnetostatische Energie, die von der Feldstärke herrührt, die durch die Magnetisierung eines Körpers aufgebaut wird. Sie ist gleich derjenigen Energie, die die Magnetisierung in dem von ihr selbst erzeugten entmagnetisierenden Feld besitzt. Streufelder werden überall dort erzeugt, wo freie Magnetpole vorhanden sind, wo also $\text{div } \vec{n}(\vec{r})$ von Null verschieden ist. Bei einem homogen magnetisierten Rotationsellipsoid ist das entmagnetisierende Feld \vec{H}_e im Innern des Körpers über den Entmagnetisierungsfaktor N mit der Magnetisierung \vec{I} verknüpft:

$$\vec{H}_e = - \frac{N}{\mu_0} \vec{I} \quad (2.9)$$

Die in diesem Feld gespeicherte Streifeldenergie ist damit

$$E_I = \frac{V \cdot N}{2 \mu_0} \vec{I}^2 \quad (2.10)$$

Die Streifeldenergie ist verantwortlich für die Abhängigkeit ferromagnetischer Eigenschaften von der Form und den Abmessungen einer Probe.

In einem ferromagnetischen Kristall beeinflussen Verzerrungen des Gitters die Magnetisierung. Umgekehrt wird durch Magnetisierungsänderungen das Gitter deformiert. Diese Wechselwirkung zwischen Magnetisierung und Deformation, die mit Magnetostraktion bezeichnet wird, wird durch die magnetoelastische Energie oder Spannungsenergie beschrieben, die ihren Ursprung in der Deformationsabhängigkeit der Kristallenergie hat. Die zum Auslenken der spontanen Magnetisierung aus einer durch eine einachsige mechanische Spannung bedingten Vorzugsrichtung zu leistende Volumenarbeit ist gegeben durch

$$E_{\sigma} = \frac{3}{2} \lambda \sigma \sin^2 \phi = K_{\sigma} \cdot \sin^2 \phi. \quad (2.11)$$

ϕ ist der Winkel zwischen Magnetisierungsrichtung und der mechanisch bedingten Vorzugsrichtung, λ ist die Magnetostraktionskonstante.

Da meist die Gleichgewichtseinstellung der Magnetisierung als Funktion der wirksamen Feldstärke H betrachtet wird, ist es zweckmäßig, die potentielle Feldenergie E_H abzuspalten und alle übrigen Energieterme zur feldunabhängigen Größe E zusammenzufassen.

$$\begin{aligned} E_{\text{ges}} &= E + E_H \text{ mit} \\ E &= E_A + E_K + E_I + E_{\sigma} \end{aligned} \quad (2.12)$$

Die potentielle Energie im wirksamen Magnetfeld ist

$$E_H = - \int_V \vec{H} \cdot \vec{I} \, d\tau = - H I_S \sum_i v_i \cos \phi_i \quad (2.13)$$

mit dem Volumen v_i des i -ten Weiss'schen Bereichs und dem Winkel ϕ_i zwischen der Magnetisierungsrichtung dieses Bezirks und der im Probeninnern vorliegenden Feldrichtung. Die Gleichgewichtsbedingung (2.5) läßt sich mit (2.6), (2.12) und (2.13) in der Form

$$\delta E = \overbrace{H I_S \sum_i \cos \phi_i \cdot \delta v_i}^W + \overbrace{H I_S \sum_i v_i \cdot \delta \cos \phi_i}^R \quad (2.14)$$

darstellen. Dieses ist die Grundgleichung der Magnetisierungsprozesse. Der Anteil W beschreibt die Energieänderung durch Wandverschiebungsprozesse, der mit R bezeichnete Anteil die durch Rotationsvorgänge.

2.2.3. Magnetisierungsvorgang

Im entmagnetisierten Zustand, der z. B. durch Erhitzen und anschließendes Abkühlen unterhalb des Curie-Punktes erzeugt werden kann, ist ein vielkristalliner ferromagnetischer Körper in viele magnetische Bereiche unterteilt. Solange kein äußeres Feld \vec{H} vorhanden ist, sind die Magnetisierungsrichtungen der einzelnen spontan magnetisierten Bereiche statistisch über die energetisch gleichwertigen Vorzugslagen verteilt. Dies sind die sogenannten leichten Richtungen, also z. B. beim Eisen $[100]$, $[010]$, $[001]$ und die Gegenrichtungen dazu: $[\bar{1}00]$, $[0\bar{1}0]$, $[00\bar{1}]$. Eine makroskopische Probe ist wegen der gleich häufig vorkommenden verschiedenen Magnetisierungsrichtungen unmagnetisch. Durch Anlegen eines äußeren Magnetfeldes werden die energetischen Verhältnisse geändert, die die Bereichskonfiguration im feldfreien Zustand bestimmen. Der zur Wiederherstellung des Gleichgewichtes sich vollziehende Magnetisierungsvorgang besteht in dem Übergang der Richtungsverteilung des entmagnetisierten Zustandes in die energetisch begünstigte Richtung des äußeren Feldes. Dabei treten nach Gl. (2.14) zwei wesentlich verschiedene Prozesse auf: Wandverschiebung und Rotation (Abb. 2.1).

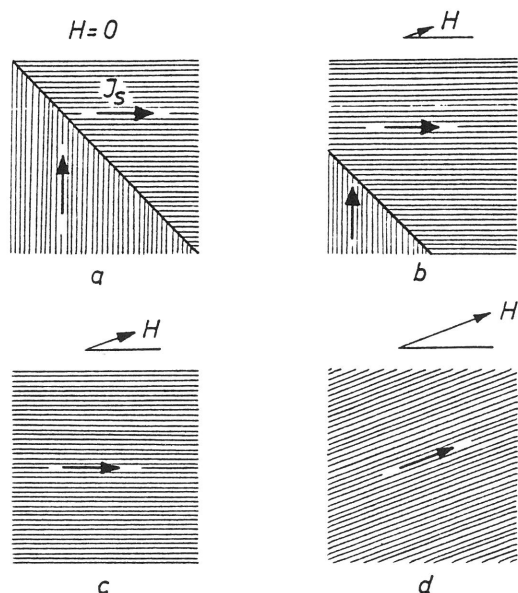


Abb. 2.1
Schema der Magnetisierungsänderung:
Wandbewegung in schwachen,
Rotation in starken Feldern

Durch Wandverschiebung wachsen energetisch günstig zur Feldrichtung orientierte Bereiche auf Kosten ungünstig gelegener: Die Spins klappen an der Wand sukzessive in die neue begünstigte leichte Richtung um, d. h. die Wände zwischen den Bereichen verschieben sich. Dieser Prozeß der Wandverschiebung erfolgt gewöhnlich bei kleinen Feldstärken, auf ihm beruht der steile Anstieg der Magnetisierungskurve (Abb. 2.2).

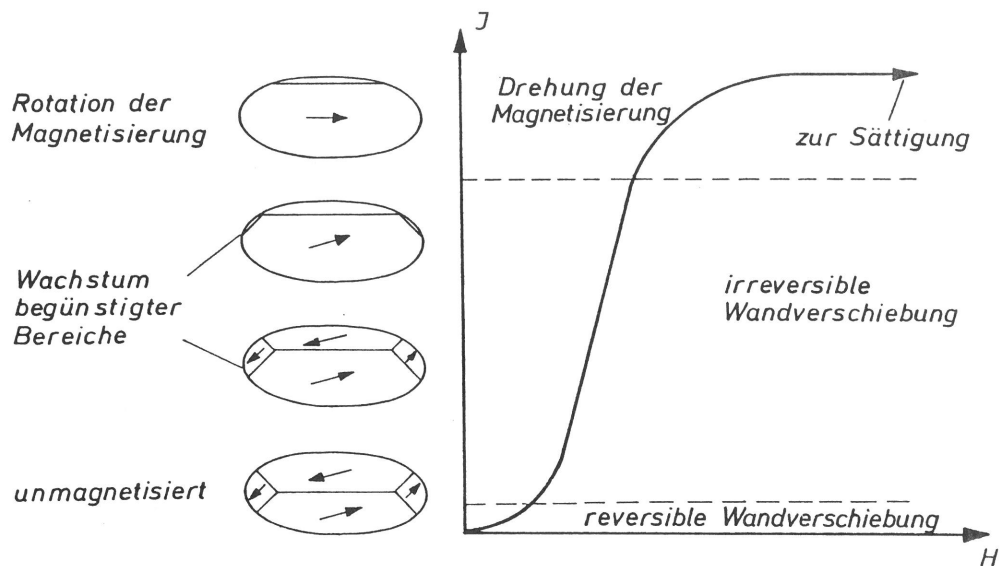


Abb. 2.2

Bereichskonfiguration und Verteilung der dominierenden Magnetisierungsprozesse längs der Neukurve

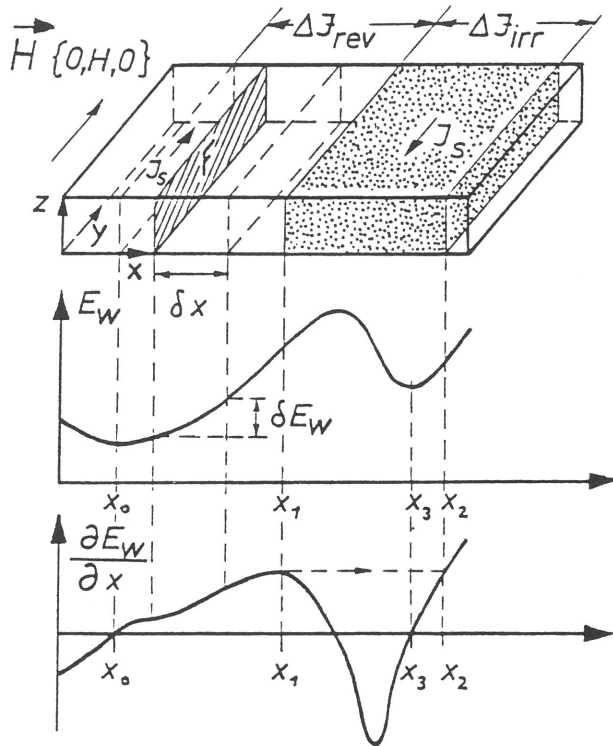
Sind die Wandbewegungsvorgänge abgeschlossen, ohne daß der Zustand der Sättigung in Feldrichtung erreicht ist, so erfolgt bei weiterer Felderhöhung die Magnetisierungsänderung durch Rotation. Diese Drehprozesse erfordern höhere Feldstärken als eine Wandverschiebung, da das zur leichten Richtung zurückdrehende Anisotropiefeld überwunden werden muß (in Fe und Ni $\approx 10^2 \text{ A/cm}$). Während der Wandbewegungsvorgänge erfolgt selbstverständlich auch eine Rotation, jedoch ist bei den meisten massiven Materialien die kristalline Anisotropie so groß, daß der durch Rotation bedingte Ummagnetisierungsanteil klein wird gegenüber dem durch die Wandverschiebung bedingten.

In einem Ferromagnetikum mit Eigenspannungen mit ihren örtlichen Schwankungen, aber auch mit anderen Gitterstörungen, wie z. B. Einschlüsse unmagnetischer Fremdstoffe, erfolgt die Magnetisierungszunahme im allgemeinen sowohl durch reversible als auch durch irreversible Prozesse. Der irreversible Anteil zur Gesamtmagnetisierung ist im wesentlichen auf irreversible Wandbewegung (Barkhausensprünge) zurückzuführen, die sich aufgrund der Wechselwirkung der Blochwände mit Gitterstörungen ergibt, während die Drehprozesse überwiegend reversibel erfolgen.

2.2.4. Modellmäßige Betrachtung der Blochwandbewegung

Der Ummagnetisierungsvorgang durch 180° -Blochwand-Verschiebung wird an einem schematischen Modell veranschaulicht. Dazu wird

gemäß der Abbildung 2.3 a ein rechteckiger Ausschnitt einer flachen Probe mit einachsiger Anisotropie parallel zur y-Achse betrachtet, in dem unter dem Einfluß eines äußeren Magnetfeldes \vec{H} eine einzige, ebene 180°-Blochwand der Fläche F parallel zu sich selbst verschoben wird.



- Blochwandmodell mit reversiblen und irreversiblen Verschiebungsanteilen als Funktion von H
- willkürlich angenommener Verlauf der Wandenergie E_w über dem Ort x
- Verlauf des zugehörigen Gradienten $\frac{\partial E_w}{\partial x}$ in Abhängigkeit von x

Abb. 2.3
Modell zur Berechnung der Gleichgewichtsfeldstärke einer ebenen 180°-Blochwand

Der zur Feldrichtung günstig orientierte Bereich wächst dabei auf Kosten des ungünstig orientierten. Die energetischen Verhältnisse werden bei reversibler Versuchsführung durch die Grundgleichung der Magnetisierungsprozesse 2.14 beschrieben, die sich bei vernachlässigtem Rotationsbeitrag für das betrachtete Modell mit nur zwei Bereichen antiparalleler Magnetisierung zu

$$\delta E = H I_s (\cos \varphi_1 \cdot \delta v_1 + \cos \varphi_2 \cdot \delta v_2) \quad (2.15)$$

vereinfacht. Mit $\cos \varphi_1 = 1$ und $\cos \varphi_2 = -1$ für die links und rechts der Wand liegenden Bereiche und mit $\delta v_1 = -\delta v_2 = F \cdot \delta x$ ergibt sich

$$\delta E = 2 H I_s F \delta x \quad (2.16)$$

Daraus folgt für die Feldstärke, die die Wand an der Stelle x im Gleichgewicht hält:

$$H(x) = \frac{1}{2 I_s F} \cdot \frac{\partial E(x)}{\partial x} \quad (2.17)$$

Die Gleichgewichtsfeldstärke ist durch den Gradienten der Energie E bestimmt. Ein willkürlich angenommener Verlauf der Energie, die aufgrund innerer Spannungen und Störungen des Schicht-

aufbaues örtlichen Schwankungen unterliegt, ist in der Abbildung 2.3b dargestellt; den Gradienten des Energieverlaufs zeigt die Abbildung 2.3c. Die Ortsabhängigkeit der Energiefunktion wurde so gewählt, daß sich der Bewegungsablauf einer Blochwand unter dem Einfluß eines zeitproportional wachsenden Magnetfeldes und die dabei auftretenden charakteristischen Erscheinungen, wie z. B. Barkhausensprünge, veranschaulichen lassen. Im Ausgangszustand bei der Feldstärke $H = 0$ befindet sich die Wand an der Stelle x_0 im stabilen Gleichgewicht, das durch ein relatives Minimum der Wandenergie E_W gekennzeichnet ist. Mit stetig wachsender Feldstärke verschiebt sie sich reversibel bis x_1 . Da der Gradient der Wandenergie in diesem Intervall monoton ansteigt, ist die vom Feld geleistete Arbeit gleich der Zunahme der Wandenergie, so daß die Gleichgewichtsbedingung 2.17 erfüllt ist. Bei x_1 hat der Energiegradient ein relatives Maximum. Da er mit weiter wachsendem x zunächst abnimmt, ist die Gleichgewichtsbedingung nicht mehr erfüllt, so daß die folgenden Wandlagen instabil sind. Die Wand springt spontan ohne weitere Erhöhung der Feldstärke mit einer Geschwindigkeit, die im wesentlichen durch Wirbelströme bestimmt wird, bis zum Punkt x_2 , an dem der Gradient der Wandenergie den gleichen Wert hat wie zu Beginn des Sprunges, so daß die Wand sich wieder in einer stabilen Gleichgewichtslage befindet. Diese irreversiblen Wandbewegungen, bei denen die Gleichgewichtsbedingung nicht mehr erfüllt ist, sind die Barkhausensprünge. Da während eines solchen Sprunges durch die Ummagnetisierung der Bereiche mehr Energie gewonnen wird als zur Erhöhung der Wandenergie aufgewendet wird, läuft dieser Vorgang spontan ab. Wird das Feld abgeschaltet, so kehrt die Wand nicht zur Anfangslage x_0 zurück, sondern sie bewegt sich in das nächstgelegene Energieminimum x_3 . Die mikroskopischen irreversiblen Wandsprünge sind eine Ursache der Hysterese.

Der Ausdruck $K_H = 2 H I_S F$ in Gleichung (2.16) kann als magnetostatische Kraft auf die Blochwand, in Normalenrichtung der Wand wirkend (x -Richtung), interpretiert werden; die Größe $p_H = 2 H I_S$ als Druck des Feldes. Das Wechselwirkungspotential E , das durch lokale Störungen in der Schicht ortsabhängig ist, übt auf die magnetische Wand eine rüchtreibende Kraft $K_E = - \frac{\partial E(x)}{\partial x}$ aus. Bei reversibler Wandverschiebung gilt $K_H + K_E = 0$.

Die Gleichgewichtsfeldstärke, nach der die quasistatische Verschiebung einer einzigen ebenen Blochwand erfolgt, ist nach

Gleichung 2.17 durch den Energiegradienten bestimmt. Der örtliche Verlauf dieser Potentialfunktion ist durch die Realstruktur der Probe gegeben. Ändert sich infolge der zerrüttenden Wirkung der Wechselbeanspruchung der Gefügezustand der Probe, so resultiert daraus eine Modifikation des "Energiegebirges". Dadurch wird eine Änderung derjenigen magnetischen Eigenschaften bewirkt, die im wesentlichen durch Wandverschiebungsprozesse bestimmt werden.

Die zu einem Maximum des Energiegradienten gehörige Feldstärke wird Grenzfeldfläche genannt (lokale Koerzitivfeldstärke):

$$H_0 = \frac{1}{2I_s F} \left(\frac{dE}{dx} \right)_{\max} \quad (2.18)$$

Sie ist diejenige Feldstärke, die die magnetische Wand von einem Bewegungshindernis löst, d. h. die einen irreversiblen Barkhausensprung auslöst. Die magnetische Wand befindet sich an einer solchen Stelle des Energiegebirges im indifferenten Gleichgewicht ($d^2E/dx^2 = 0$). Die Mittelung der Grenzfeldstärken über den von der Wand umzumagnetisierenden Probenbereich liefert die pauschale Koerzitivfeldstärke des betrachteten Gebietes:

$$H_C = \bar{H}_0 = \frac{1}{2I_s F} \left| \frac{dE}{dx} \right|_{\max} \quad (2.19)$$

Dieses ist die Grundgleichung der Theorien der Koerzitivkraft. Zur Berechnung der Koerzitivfeldstärke ist damit die Kenntnis des durch die Realstruktur bestimmten Verlaufes des Energiegradienten notwendig. Daher sind solche Berechnungen nur für sehr vereinfachte schematische Modelle ausführbar. So gibt es verschiedene Theorien, die entweder die Eigenspannung (Kondorsky, Kersten), die Einschlüsse (Kersten) oder die entmagnetisierende Wirkung von Inhomogenitäten (Néel) als primäre Ursache für die Behinderung der Wandbewegung ansehen. Die Zielsetzung dieser Theorien war die Deutung der magnetischen Kennwerte aus bekannten Gefügezuständen.

Hier ist die Fragestellung umgekehrt: Die magnetischen Kennwerte lassen sich experimentell ermitteln, unbekannt ist der durch Wechselbeanspruchung sich ändernde Gefügezustand der Probe. Die Gleichung 2.18 bietet die Möglichkeit, durch Messung magnetischer Kennwerte, die im wesentlichen durch Wandbewegungsvorgänge

bestimmt sind, Informationen über die Veränderung des Gefügestandes in Zerrüttung befindlicher Proben zu erhalten.

2.2.5 Nachweis von Rotationsvorgängen durch Magnetowiderstandsmessung

Wird ein vielkristalliner ferromagnetischer Körper von einem elektrischen Strom durchflossen, so tritt aufgrund der Lorentzkraft die Magnetisierung mit den bewegten Leistungselektronen in Wechselwirkung. Der spezifische Widerstand wird dadurch anisotrop. Ist der Körper in spontan magnetisierte Bereiche vom Volumen v_i unterteilt, so läßt sich der pauschale spezifische Widerstand beschreiben durch die Gleichung /10/:

$$\rho(\varphi) = \rho_{\perp} + (\rho_{\parallel} - \rho_{\perp}) \cdot \overline{\cos^2 \varphi} = \rho_{\perp} + (\rho_{\parallel} - \rho_{\perp}) \frac{\sum_i \cos^2 \varphi_i \cdot v_i}{\sum_i v_i} \quad (2.20)$$

Dabei sind ρ_{\perp} und ρ_{\parallel} die spezifischen Widerstände der senkrecht und parallel zur Stromrichtung homogen bis zur Sättigung magnetisierten Probe. φ_i ist der Winkel, den die makroskopische Stromflußrichtung mit dem Magnetisierungsvektor des i -ten Bereiches einschließt. Aufgrund dieser Wechselwirkung zwischen Strom und Magnetisierung lassen sich durch Widerstandsmessung Informationen über den Magnetisierungsvorgang der Probe gewinnen. Die durch Magnetisierung möglichen Änderungen des spezifischen Widerstandes ergeben sich aus dem totalen Differential der Gleichung 2.20:

$$d\rho = (\rho_{\parallel} - \rho_{\perp}) \frac{1}{\sum_i v_i} \cdot \left(\overbrace{\sum_i (\cos^2 \varphi_i \cdot dv_i)}^W - \overbrace{\sum_i v_i \sin 2\varphi_i \cdot d\varphi_i}^R \right) = d\rho_W + d\rho_R \quad (2.21)$$

Die durch $dv_i \neq 0$ gegebene Widerstandsänderung $d\rho_W$ ist den Wandverschiebungsprozessen zuzuordnen, die durch $d\varphi_i \neq 0$ gegebene Änderung $d\rho_R$ den Rotationsprozessen.

Für den in der Abb. 2.4 dargestellten Spezialfall, daß die Um-magnetisierung durch 180°-Wandverschiebung erfolgt, - dieser Fall liegt bei dünnen Fe-Schichten mit ausgeprägter einachsiger Richtungsanisotropie vor - ergibt sich aus Gleichung 2.20 für den spezifischen Widerstand

$$\rho_{180^\circ W} = \rho_{\perp} + (\rho_{\parallel} - \rho_{\perp}) \frac{v_+ + v_- + \int \cos^2 \varphi \cdot d\tau}{v_+ + v_- + v_W} = \rho_{\perp} - \frac{1}{2} (\rho_{\parallel} - \rho_{\perp}) \frac{v_W}{v_+ + v_- + v_W} \quad (2.22)$$

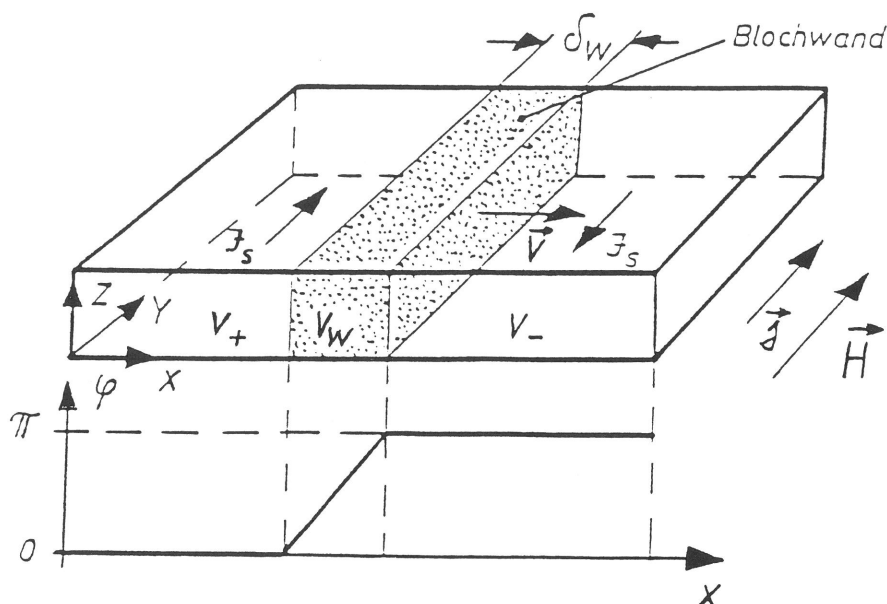


Abb. 2.4

Zur Berechnung der Magnetowiderstandsänderung in einer schichtförmigen Probe mit uniaxialer Anisotropie

v_+ und v_- sind die parallel bzw. antiparallel zur Stromrichtung magnetisierten Volumina, v_w ist das Gesamtvolumen der an der Ummagnetisierung beteiligten Wände. Für den Richtungswechsel der Magnetisierung innerhalb der Wand wurde nach Abbildung 2.4 ein linearer Ansatz verwendet.

Eine Widerstandsänderung ergibt sich, wenn sich das von den Wänden eingenommene Volumen während der Ummagnetisierung ändert:

$$d\rho_{180^\circ W} = -\frac{1}{2} \frac{\rho_{\parallel} - \rho_{\perp}}{v_+ + v_- + v_w} \cdot dv_w = -\frac{1}{2} (\rho_{\parallel} - \rho_{\perp}) \frac{v_w}{v_+ + v_- + v_w} dn_w \quad (2.23)$$

dn_w ist dabei der Faktor, um den sich das Wandvolumen ändert. Da bei dünnen Fe-Schichten im allgemeinen nur wenige Wände bei der Ummagnetisierung auftreten (Größenordnung 1 ... 10), ist diese Widerstandsänderung wegen des geringen Volumenanteils der Wände ($v_w/[v_+ + v_- + v_w] \approx 3 \cdot 10^{-6}$) um mehr als drei Größenordnungen geringer als die Widerstandsänderung durch Rotation in den Bereichen. Daher ist beim Auftreten von Rotationsvorgängen neben den 180° -Wandverschiebungen die Widerstandsänderung in guter Näherung durch den Rotationsterm der Gleichung 2.21 gegeben:

$$d\rho_R = -(\rho_{\parallel} - \rho_{\perp}) \cdot \frac{1}{\sum_i v_i} \cdot \sum_i \sin 2\varphi_i \cdot d\varphi_i \cdot v_i = -(\rho_{\parallel} - \rho_{\perp}) \overline{\sin 2\varphi_i \cdot d\varphi_i} \quad (2.24)$$

Die lineare Abhängigkeit des Widerstandes vom mittleren Quadrat des Richtungskosinus (Gl. 2.20) und die daraus resultierende

Unabhängigkeit vom Richtungssinn der Magnetisierung ermöglicht es, im betrachteten Spezialfall Rotationsprozesse experimentell durch Widerstandsmessung nachzuweisen.

2.2.6 Dünne ferromagnetische Schichten

Ferromagnetische Körper, deren Abmessungen in einer Dimension mit der mittleren Größe der magnetischen Elementarbereiche des entsprechenden Massivmaterials vergleichbar sind, werden als dünne Schichten bezeichnet. Diese Schichten zeigen aufgrund ihrer Geometrie und der dadurch bedingten besonderen Energieverhältnisse ein gegenüber dem Massivmaterial abweichendes Verhalten. Dieses ist für ein Material mit hoher Magnetisierung aber relativ geringer Anisotropie (Fe, Ni, Co) durch folgende Eigenschaften ausgezeichnet:

- Die Magnetisierung ist parallel zur Schichtebene orientiert;
- die magnetischen Wände stehen senkrecht zur Schichtebene und gehen durch die Schicht hindurch, so daß beide Seiten der Schicht dieselbe Magnetisierungsstruktur zeigen.

Die Ausrichtung der Magnetisierung parallel zur Schichtebene ist energetisch darin begründet, daß dabei die magnetostatische Energie stärker reduziert wird als andere Energieanteile anwachsen, so daß sogar eine Abnahme der Gesamtenergie resultiert. Denn eine sich senkrecht zur Schichtebene einstellende Magnetisierungskomponente hätte wegen der dabei auf den Schichtoberflächen erzeugten magnetischen Polbelegung ein starkes Streufeld und damit einen hohen Anteil magnetostatischer Energie zur Folge.

Das durch senkrecht zur Schichtebene stehende Wände, die normal durch die Schicht hindurchgehen, ausgezeichnete Verhalten wird als das sog. Einbereichsverhalten in einer Richtung bezeichnet /12/. Die Magnetisierung ist in Richtung normal zur Schichtebene in der Schicht örtlich konstant und gleich der Sättigungsmagnetisierung, d. h. die Schicht ist in Normalenrichtung ein Einbereich.

Eine Bereichsunterteilung durch parallel zur Schichtebene liegende Wände ist energetisch nicht möglich, da unterhalb einer bestimmten Schichtdicke die dem Volumen proportionalen Energie-

anteile (Anisotropieenergie, Feldenergie) nicht mehr ausreichen, die der Fläche proportionale schichtdickenunabhängige Wandenergie aufzubringen.

Bereichsuntersuchungen werden durch die Dünnschichtexperimentiertechnik auf zweidimensionale Probleme reduziert; dieses ist eine erhebliche Vereinfachung der Verhältnisse gegenüber denen bei Untersuchungen an massiven Proben. Da in vielkristallinen Aufdampfschichten die Kristallitgröße sehr klein ist (mit ≈ 10 nm wesentlich kleiner als im entsprechenden Massivmaterial), und da die Kristallitorientierung regellos ist, wirkt sich die Kristallanisotropie (siehe 2.2.2) nur wenig auf die Magnetisierungsrichtung aus. Wegen der starken magnetischen Austausch- und Streufeldkopplung zwischen den Kristalliten bewirkt die Kristallenergie lediglich Kleinwinkelinhomogenitäten der Magnetisierungsrichtung, die als Magnetisierungsriffelung (ripple) bezeichnet werden.

Die magnetische Anisotropie, die in dünnen Schichten die Magnetisierungsrichtung mitbestimmt, ist auf Eigenspannungen zurückzuführen. Eigenspannungen erster und zweiter Art werden durch den i. a. mit hohen Fehlerdichten versehenen Schichtaufbau bewirkt, Eigenspannungen dritter Art rühren vom Herstellungsprozeß her, da das Aufdampfen mit Temperaturerhöhungen verbunden ist und Schicht und Träger i. a. verschiedene thermische Ausdehnungskoeffizienten haben.

Wird während der Schichtherstellung ein homogenes Magnetfeld parallel zur entstehenden Schicht angelegt, so kann dadurch eine magnetfeldinduzierte uniaxiale Anisotropie parallel zur Magnetfeldrichtung erzeugt werden. Für die Magnetisierung gibt es in derartig hergestellten Schichten nur zwei stabile Richtungseinstellungen, die einander antiparallel sind. Die Bereichsgrenzen sind 180° -Wände. Die gesamte Schicht verhält sich magnetisch ähnlich wie ein einachsiger Einkristall. Die Ummagnetisierung parallel zur leichten Richtung erfolgt durch Keimbildung am Schichtrand oder an anderen Inhomogenitäten und Ausbreitung der Keime durch Blochwandverschiebung. Bei örtlich schwankender Richtungsanisotropie treten Rotationsprozesse bei der Ummagnetisierung auf.

3. Schichtexperimente

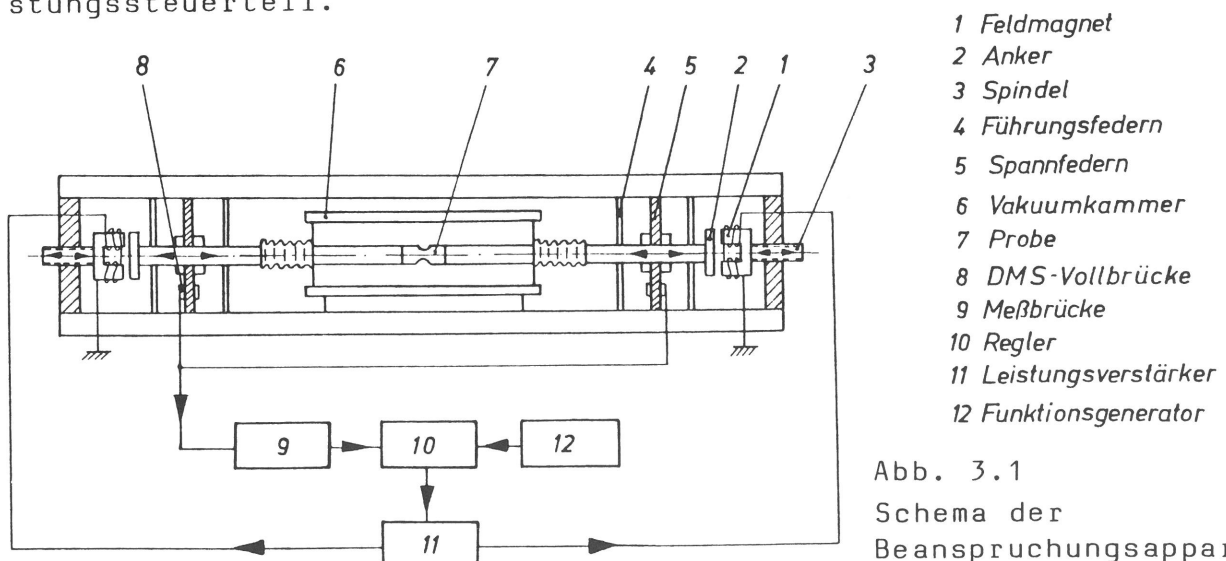
Gemäß Abschnitt 1 ist es das Ziel der Untersuchungen, die Veränderungen der magnetischen Eigenschaften von Eisen infolge der Zerrüttung seines Gefüges durch mechanische Wechselbeanspruchungen und damit den Fortschritt der Zerrüttung selbst zu studieren. Nach den Ausführungen im Abschnitt 2 sind dafür dünne Schichten prädestiniert. Sie haben die einfachsten ferromagnetischen Strukturen und erlauben so am besten physikalische Aufschlüsse mittels des Studiums der Wandverschiebungs- und Rotationsprozesse.

Die zyklische Zug-Druck-Beanspruchung allein einer 100 nm dicken freitragenden Fe-Schicht parallel zu einer in der Schichtebene liegenden Richtung ist in definierter Weise schwer möglich. Daher wird die Beanspruchung hier über einen ebenen Kunststoffträger, auf dem die Schicht durch Adhäsionskräfte haftet, in die dünne Schicht eingeleitet.

Als Probe wird im folgenden stets das Verbundsystem Fe-Schicht - Träger bezeichnet, obwohl das eigentliche Versuchsobjekt die auf dem Träger haftende Schicht ist.

3.1 Beanspruchungsapparatur

Die Zug-Druck-Beanspruchung der Probe im Vakuum wird durch eine elektromagnetisch angetriebene Belastungsapparatur aufgebracht. Der Grundaufbau dieser Anlage ist schematisch in Abb. 3.1 dargestellt. Er besteht im wesentlichen aus der Belastungseinrichtung mit Vakuumkammer, der Meß- und Regeleinrichtung und dem Leistungssteuerteil.



Die Belastungseinrichtung, bestehend aus den Elektromagneten 1,2 und den Führungs- und Spannfedern 4,5 ist außerhalb der Vakuumkammer 6 innerhalb eines starren Rahmens angeordnet. Das Einspann- und Belastungsgestänge ist vakuumdicht mittels Metallfederbälgen aus der Vakuumkammer herausgeführt und mit den beiden äußeren Erregersystem verbunden. Die für die Zugbeanspruchung der Probe notwendigen Kräfte werden von den Elektromagneten 1,2 aufgebracht, die für die Druckbelastung erforderlichen von vorgespannten Blattfedern 5.

Die Meß- und Regeleinrichtung besteht aus einer DMS-Vollbrücke 8 auf den Spannfedern 5 als Meßwertaufnehmer, dem Meßverstärker 9 und dem Regelverstärker 10 mit Sollwertgeber 12 (Abb. 3.1). Bei einer Dehnung der Probe wird das Einspanngestänge verschoben. Die sich dabei durchbiegenden Federn bewirken eine Brückenverstimmung, die der Verschiebung der Einspannzangen und damit der Probendehnung proportional ist.

Der Regelverstärker 10 (Abb. 3.1) vom PI-Typ führt den Sollwert-Istwert-Vergleich durch und liefert die Steuerleistung für den Leistungsverstärker 11. Der Sollwert wird von einem Funktionsgenerator 12 vorgegeben.

3.2 Probenherstellung

Die Herstellung der Probe erfolgt im Vakuum durch Bedampfung eines 1 mm dicken speziell geeigneten Acrylglasträgers mit Eisen. Als Verdampfungsquelle dient eine Wolframdrahtwendel. Die Bemessung der Schichtdicke erfolgt über ihren elektrischen Widerstand, der durch am Träger angebrachte Kontaktierungen während des Bedampfens messend verfolgt wird (Abb. 3.2). Die Wider-

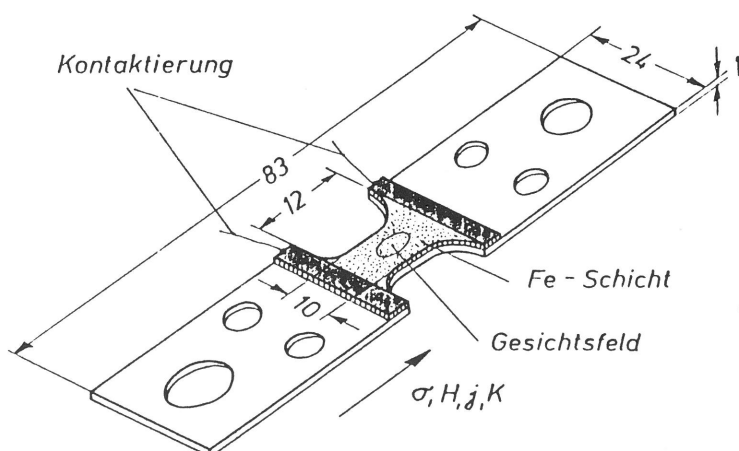


Abb. 3.2
Schichtträger mit Probe und Kontaktierung (Maße in mm)

stand-Dickenrelation wird durch Vielstrahlinterferenz nach Tolansky für den betrachteten Dickenbereich ermittelt.

Zur Verminderung einer Oxidation werden die Fe-Schichten sofort nach ihrer Herstellung mit einer schützenden SiO-Schicht überdampft, deren Dicke so gewählt wird, daß sie gleichzeitig als optisch aktive Schicht (dielektrische $\lambda/4$ -Schicht) die Kerr-Intensität und damit den Kontrast der magnetischen Bereiche bei der Abbildung steigert /11/.

3.3 Magnetische Meßeinrichtung

3.3.1 Magnetfelderzeugung

Das zur Ummagnetisierung der Schichten notwendige Magnetfeld liegt parallel zur Schichtfläche und wird durch Spulenpaare in Helmholtz-Anordnung erzeugt. Zur Erregung der Magnetfeldspulen dient ein stromgeregeltes Versorgungsgerät (Abb. 3.3). Die Stromregelung, die einer Magnetfeldregelung äquivalent ist, bietet gegenüber dem spannungsgesteuerten Betrieb den Vorteil, daß der Einfluß der Spuleninduktivität auf den Feldverlauf (Frequenzgang) weitgehend ausgeschaltet wird.

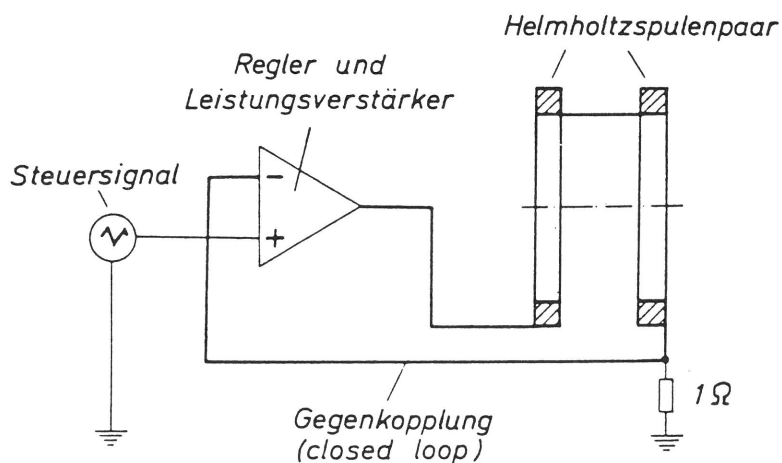


Abb. 3.3
Schaltplan zur
Magnetfelderzeugung

3.3.2 Kerreffekt und Beobachtungsapparatur

Zur Abbildung der in dünnen Fe-Schichten vorliegenden magnetischen Bereichsstruktur wird der magnetooptische Kerr-Effekt ausgenutzt. Dabei wird linear polarisiertes Licht, dessen Polarisationssebene parallel oder senkrecht zur Einfallsebene liegt, von der magnetisierten Metalloberfläche derart reflektiert, daß näherungsweise von einer Drehung der Polarisationssebene gesprochen werden kann /11/. Der von der Größe und Richtung der spon-

tanen Magnetisierung in der reflektierenden Oberfläche abhängige Drehwinkel liegt in der Größenordnung von einigen Bogenminuten.

Im Experiment wird die ferromagnetische Schicht mit einem linear polarisierten Lichtstrahl unter einem Einfallswinkel von 45° beleuchtet. Die magnetische Bereichsstruktur wirkt als Polarisationsobjekt. Die Beobachtung des reflektierten Lichtes durch einen geeignet orientierten Analysator transformiert das Polarisationsobjekt in ein Amplitudenobjekt (magnetische Bezirksstruktur \rightarrow Helligkeitsstruktur), so daß Bereiche unterschiedlicher Magnetisierungsrichtung verschieden hell erscheinen. Ein wesentlicher Vorteil der Kerr-Technik gegenüber anderen abbildenden Verfahren (z. B. Bitterstreifenmethode) ist ihre Trägheitslosigkeit. Magnetisierungsprozesse sind damit sogar dynamisch experimentell erfaßbar.

Die Abb. 3.4 zeigt die Versuchsapparatur mit der experimentellen Anordnung zur magnetooptischen Abbildung Weiss'scher Bereiche. Als Lichtquelle wird eine Xenon-Hochdrucklampe verwendet, die sich durch hohe Leuchtdichte und geringe Intensitätsschwankungen auszeichnet. Optischer Beleuchtungs- und Abbildungsstrahlengang sind durch Anwendung des Köhlerschen Beleuchtungsprinzips voneinander entkoppelt.

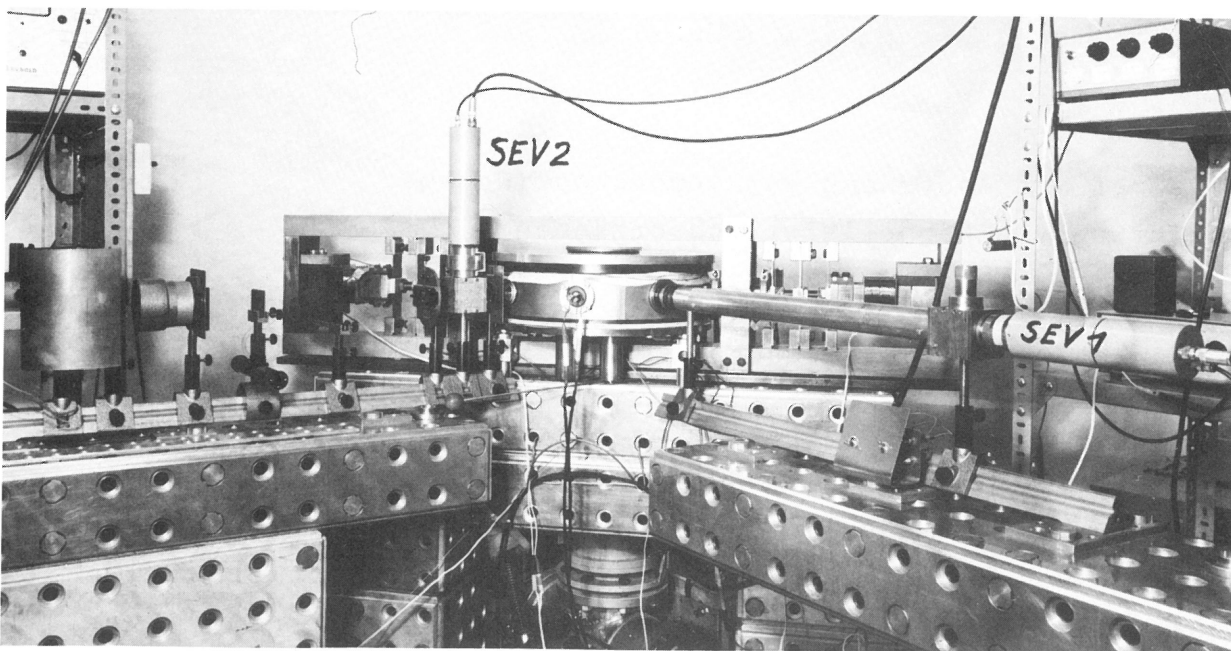


Abb. 3.4
Vakuumkammer, Belastungsapparatur und
optische Meßeinrichtung

Die Beobachtungsapparatur besteht aus Objektiv, Okular, Photomultiplier, Photokamera und schwenkbarem halbdurchlässigem Spiegel (Abb. 3.5). Durch das Okular kann die magnetische Bereichsstruktur bei 45°-Stellung des halbdurchlässigen Spiegels visuell betrachtet werden, gleichzeitig kann wahlweise mit Photomultiplier oder Kamera photometriert oder photographiert werden. Ist eine gleichzeitige visuelle Betrachtung nicht notwendig, so wird der Umlenkspiegel aus dem Strahlengang geschwenkt, so daß sich ein größeres Signal-Rauschverhältnis beim Photometrieren ergibt bzw. kürzere Belichtungszeiten beim Photographieren möglich sind.

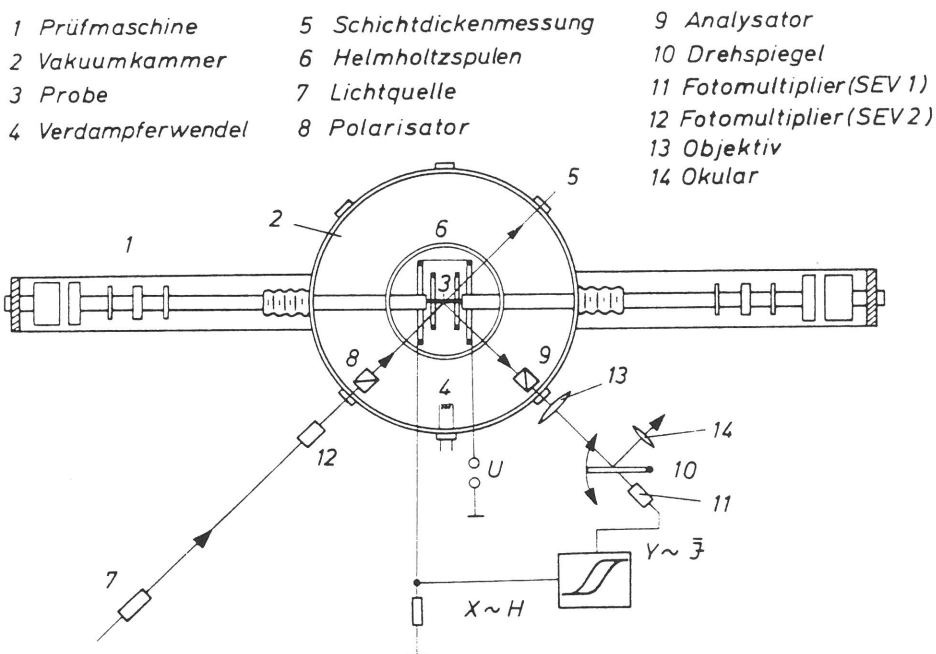


Abb. 3.5

Vakuumkammer mit Anordnung zur magneto-optischen Registrierung von Magnetisierungsvorgängen

3.3.3 Magnetowiderstandsmessung

Bei der Magnetowiderstandsbestimmung wird der elektrische Widerstand der Schicht während eines Ummagnetisierungszyklus gemessen. Dazu wird ein Strom von 1 mA aus einer Konstantstromquelle über Kontaktierungen (s. Abb. 3.2) durch die Schicht geleitet. Die Stromdichte beträgt dabei bezogen auf den Querschnitt einer 100 nm dicken Schicht $j = 1 \text{ A/mm}^2$. Der Schichtwiderstand beträgt ca. 1Ω .

3.4 Versuchsdurchführung

Der Versuch beginnt mit der Herstellung der Probe. Der in die Belastungsapparatur eingespannte kontaktierte Plexiglasträger wird im Vakuum bis zur gewünschten Schichtdicke mit Eisen bedampft. Während des Herstellungsprozesses wird zur Einprägung einer magnetischen Vorzugsrichtung ein parallel zur Trägeroberfläche wirkendes Magnetfeld eingeschaltet.

Nach der Herstellung der Probe werden die Anfangswerte der betrachteten Meßgrößen (Bereichsstruktur, Koerzitivfeldstärke, Magnetowiderstand, elektrischer Widerstand, Barkhauseneffekt, Risse in der Schicht) gemessen und registriert. Anschließend wird die Schicht mit Dehnungsamplituden im Bereich $1 \cdot 10^{-3}$ bis $4 \cdot 10^{-3}$ beansprucht. Die zugehörigen Spannungsamplituden liegen dabei deutlich oberhalb der Streckgrenze $R_{p0,2}$ des Massivmaterials. Infolge der besonderen Schichteigenschaften scheint aber trotzdem die Beanspruchung mit $\epsilon = 10^{-3}$ in der Nähe der Dauerfestigkeit der Schicht zu liegen wie die späteren Ergebnisse zeigen.

Der elektrische Widerstand wird kontinuierlich registriert. Die übrigen Meßwerte werden nach bestimmten Belastungszyklenzahlen bei unbeanspruchter Probe ermittelt. Alle Größen werden bei Zimmertemperatur gemessen, die magnetischen außerdem quasistatisch, so daß Relaxationsvorgänge vernachlässigt werden können.

Die Probe befindet sich von der Herstellung bis zum Ende des Versuches im Vakuum von einem Restdruck $\leq 10^{-4}$ Pa. Nur die für lichtmikroskopische Untersuchungen vorgesehenen Proben müssen nach bestimmten Zyklenzahlen ausgebaut und der Luft ausgesetzt werden.

4. Versuchsaufbau für Drahtexperimente

4.1 Probenform und mechanische Beanspruchung

Als Proben werden 70 cm lange und 1 mm dicke polykristalline Thermo-Eisendrähte (Degussa) verwendet, die zur Geraderichtung um etwa 2 % gereckt und anschließend im Vakuum spannungsfrei gegläht wurden. Das gleiche Drahtmaterial wurde zur Schichtherstellung als Aufdampfmaterial benutzt. Die relativ große Probenlänge wird gewählt, um die entmagnetisierende Wirkung der Probenenden vernachlässigbar klein zu halten, so daß im mittleren Probenbereich ein hinreichend homogenes inneres Magnetfeld erzeugt werden kann. Außerdem soll eine Beeinflussung des magnetischen Verhaltens durch die verspannten Probenenden durch hinreichend große Entfernung von der jeweiligen Meßstelle vermindert werden.

Zum Spannungsarmglühen werden die Drahtproben durch elektrische Widerstandsheizung auf ca. 850°C erwärmt und innerhalb von 3,5 h durch stetige Verminderung der Heizleistung auf Zimmertemperatur abgekühlt.

Als Wechsel-Beanspruchungsart ist bei einer derart schlanken Probe Torsion besonders geeignet.

Für den Scherungsgrad γ im Abstand r von der Achse einer zylindrischen Torsionsprobe gilt

$$\gamma(r) = \frac{r}{l} \phi \quad (4.1)$$

mit Meßstreckenlänge l und Drehwinkel ϕ . Die Wechselversuche werden mit konstanter Drehwinkelamplitude durchgeführt. Dabei wird das zur Drillung notwendige Drehmoment kontinuierlich mitgeschrieben. Das bei der Torsion gemessene Drehmoment ist eine integrale Größe: Alle Volumenelemente vom Probenkern ($r = 0$) bis zum Probenmantel ($r = R$) liefern einen Beitrag dazu. Bei bekanntem Verlauf der Scherspannung über dem Radius $\tau(r)$ berechnet sich das Drehmoment zu

$$D = 2\pi \int_0^R \tau(r) r^2 dr. \quad (4.2)$$

Bei rein elastischer Beanspruchung ergibt sich daraus mit der Schubspannung $\tau = G \cdot \gamma$ (G : Schermodul)

$$D = \frac{\pi}{2} G \frac{R^4}{l} \phi \quad (4.3)$$

4.2 Beanspruchungsapparatur

Die Apparatur zur zyklischen Torsionsbeanspruchung (Abb. 4.1) enthält als Antriebselement einen Scheibenläufermotor, der sich durch feine Polung, geringes Trägheitsmoment und stromproportionales Drehmoment auszeichnet. Die Drahtprobe ist an einer Seite verdrehfest über einen Drehmomentenaufnehmer an einen parallel zur Drahtachse verschiebbaren Halter gekoppelt, der beim Bruch der Probe die Bruchenden voneinander trennt und die Apparatur abschaltet. Das andere Probenende ist mit einem Wellenende des Motors verbunden. Mit einem Drehwinkel­aufnehmer, der an das zweite Wellenende des Motors gekuppelt ist, wird eine dem Torsionswinkel und damit dem Scherwinkel proportionale elektrische Spannung gewonnen, die dem Regelkreis als Istwert zugeführt wird. Als zeitlicher Verlauf der Torsionsbeanspruchung wird die Dreiecksfunktion gewählt. Die größte ausnutzbare Beanspruchungsfrequenz der Apparatur ist amplitudenabhängig. Sie beträgt bei einer Drehwinkelamplitude von $\hat{\phi} = 180^\circ$ ca. 2 Hz.

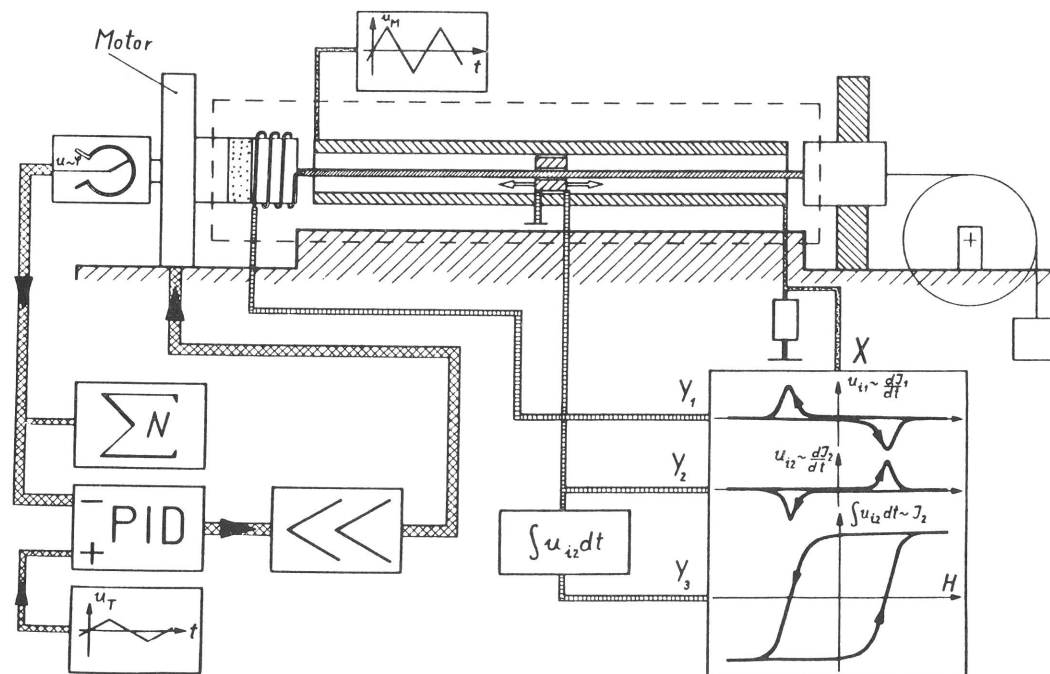


Abb. 4.1

Apparatur zur Torsions-Wechselbeanspruchung langer Drahtproben mit induktivem Meßsystem (schematisch)

4.3 Magnetische Meßeinrichtung

Die Untersuchung des Magnetisierungsverhaltens der Drahtproben erfolgt mit Verfahren, die auf dem Induktionsprinzip beruhen.

Magnetisierungsänderungen der Probe werden dabei durch Magnetfelder bewirkt, die entweder parallel zur Drahtachse durch Erregung einer äußeren konzentrischen Spule oder zirkular durch Stromfluß in Achsenrichtung erzeugt werden. Zur Ausschaltung von Vorgängen, die im wesentlichen durch sekundäre Einflüsse wie Wirbelstrom- und Spindämpfung bestimmt sind, werden vorwiegend niedrige Feldfrequenzen verwendet ($f < 1$ Hz). Lediglich zur Aufnahme von Signalprofilen längs des Drahtes werden höhere Magnetfeldfrequenzen zur Erhöhung der Ortsauflösung benutzt.

Bezüglich des erfaßten Probenvolumens kommen zwei Meßmethoden zur Anwendung, nämlich Integral- und Selektivmessung:

Beim Integralverfahren wird der größte Teil des Probenvolumens bei der Messung erfaßt. Es dient zur Ermittlung des materialspezifischen Verhaltens. Das Verfahren liefert Absolutwerte unter Verzicht auf Ortsauflösung.

Bei der Selektivmessung handelt es sich um ein Verfahren mit hoher Ortsauflösung, wobei über einen nur kleinen Volumenbereich gemittelt wird. Diese Meßmethode liefert das lokale relative Magnetisierungsverhalten der Probe unter Verzicht auf eine homogene Magnetisierung. Sie ist geeignet zum Nachweis beanspruchungsbedingter lokaler Gefügeänderungen.

4.3.1 Externer Induktionseffekt

Beim externen Induktionseffekt handelt es sich um die konventionelle Methode zur Verfolgung von Magnetisierungsänderungen, bei der sich die Drahtprobe axial in einer zylindrischen Erreger- und Meßspulenanordnung befindet (Abb. 4.1). Die pro Meßspulenwindung induzierte Spannung u ist gleich der zeitlichen Ableitung des von der jeweiligen Windung umschlungenen magnetischen Flusses vom Querschnitt A (Gl. 4.4).

H_a ist die von der Erregerspule erzeugte äußere Feldstärke.

$$u = \frac{d\phi}{dt} = - \frac{dB}{dt} da = - (1-N) \frac{dJ}{dt} da - \mu_0 \frac{dH_a}{dt} da \quad (4.4)$$

Um definierte Zusammenhänge zwischen der Induktionsspannung u bzw. dem Fluß ϕ und den spezifischen magnetischen Eigenschaften des Materials herzustellen, müssen Streufeldefekte vermieden

werden. Dieses geschieht dadurch, daß die Spulenwindungen die Probe möglichst nahe umgeben, so daß der Windungsquerschnitt nur wenig größer ist als der Drahtquerschnitt. Wird der Leerspannungsanteil u_0 kompensiert, so ergibt sich bei über den Querschnitt homogenen Verhältnissen und Wirbelstromfreiheit eine zur Magnetisierungsänderung $d\vec{J}/dt$ proportionale Meßspannung u_{ex} (N Entmagnetisierungsfaktor in Achsenrichtung). Die zeitliche Integration dieser Spannung während eines Magnetisierungszyklus liefert bei vernachlässigbarer Entmagnetisierung die Hystereseschleife $\bar{J} = \bar{J}(H)$ (\bar{J} pauschale Magnetisierung, H magnetische Feldstärke), der die magnetischen Kennwerte entnommen werden können.

Da die Signalspannung außerhalb des Probenvolumens in der Meßspule induziert wird, wird dieser Induktionseffekt als "externer Effekt" bezeichnet.

4.3.2 Interner Induktionseffekt

Beim internen Effekt wird zur Messung einer Induktionsspannung keine äußere Meßspule benötigt. Die durch Magnetisierungsänderung induzierte Spannung wird an der leitenden Probe direkt abgegriffen, z. B. an den Probenenden (Abb. 4.2). Ist der Draht mechanisch spannungsfrei und sein Gefügestand homogen

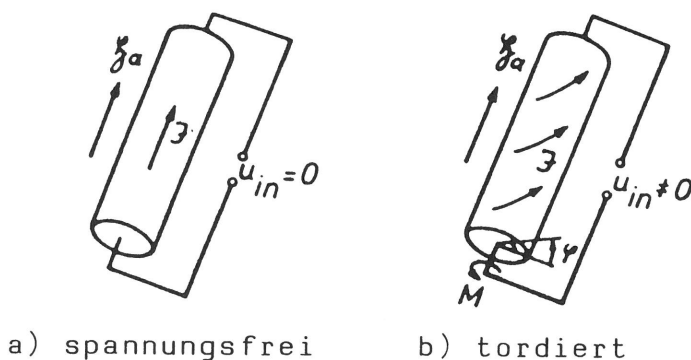


Abb. 4.2
Prinzipskizze zur
Messung der internen
Induktionsspannung u_{in}

(Abb. 4.2a), so entsteht bei der Ummagnetisierung in Achsenrichtung nur eine resultierende Komponente der zeitlichen Magnetisierungsänderung parallel zur Achse, die eine elektrische Feldstärke in Umfangsrichtung induziert. Da keine Längskomponente der Feldstärke vorhanden ist, ist die Signalspannung null. Wird jedoch der Draht tordiert (Abb. 4.2b), so entstehen unter 45° zur Achse magnetostriktiv wirksame Hauptspannungen, so daß die Magnetisierung je nach Vorzeichen der Magnetostruktionskonstan-

ten etwas auf eine dieser 45°-Richtungen zudreht. Die Magnetisierungslinien auf der Drahtoberfläche beschreiben in diesem Zustand Spiralbahnen. Ein in Achsenrichtung wirkendes Wechselfeld bewirkt dann eine Ummagnetisierung in Richtung dieser Spiralbahnen. Die dabei vorhandene zirkulare Komponente der Magnetisierungsänderung induziert eine elektrische Feldstärke in Achsenrichtung, so daß an den Enden eine Signalspannung abgegriffen werden kann. Dieser inverse Magnetostriktionseffekt (Matteucci-Effekt) liefert ein wirksames Mittel zum Nachweis von inneren Spannungen /12/.

4.3.3 Magnetische Meßanordnung

Bei der integralen Messung wird über den größten Teil der Probe gemittelt. Dazu wird ein Spulensystem benutzt, das aus einer 63 cm langen Feldspule von 10 mm Durchmesser besteht, in der sich konzentrisch in der Mitte die Meßspule für den externen Induktionseffekt befindet. Die Meßspule mit 100 Windungen ist 3 mm lang, ihr mittlerer Windungsdurchmesser ist 4 mm.

Da die Magnetfeldspule fast die Länge der Drahtprobe hat und das Dimensionsverhältnis von Durchmesser zu Länge der Probe kleiner als 500 ist, kann angenommen werden, daß die Probe in ihrem mittleren Bereich homogen magnetisiert wird /13/. Die externe Induktionsspannung ist damit charakteristisch für das magnetische Verhalten im mittleren Probenbereich. Die interne Induktionsspannung ergibt sich als Mittelwert längs der Achse über das magnetisierte Probenvolumen, wobei jedoch die Probenenden wegen der Entmagnetisierung einen geringeren Beitrag leisten.

Abb. 4.1 zeigt schematisch die magnetische Meßanordnung und den Signalverlauf. Mit dieser Anordnung wurde versucht, durch möglichst homogene Magnetisierung der Probe mit langer Feldspule unter Verzicht auf eine Ortsauflösung Mittelwerte aus einem möglichst großen Probenbereich zu bekommen.

Zur Klärung der Frage, ob sich die Zerrüttung gleichmäßig über die gesamte Probenlänge erstreckt oder ob sich der Schädigungsprozeß im fortgeschrittenen Stadium auf einige Stellen konzentriert, ist eine derart mittelnde Anordnung nicht geeignet. Daher wurden unter Verzicht auf homogene Magnetisierung Versuche mit kurzen, längs der Drahtachse verschiebbaren Feldspulen-

ordnungen durchgeführt (Abb. 4.3). Diese Spulensysteme werden, auf einen Schlitten montiert, durch Motorantrieb mit einer Geschwindigkeit von ca. 0,5 cm/s parallel zur Drahtachse verschoben. Die Anordnung a besteht aus einer 2 cm langen Feldspule mit 192 Windungen und einer konzentrischen Meßspule von 1 cm Länge und 600 Windungen im Innern. Die Signalspannungen werden von dem Probenbereich induziert, der sich im Wirkungsbereich der Feldspule befindet. Das laterale Auflösungsvermögen dieser Spulenanordnung beträgt ca. 1 cm.

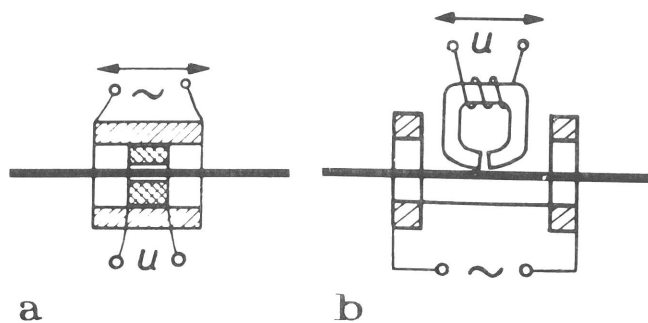


Abb. 4.3
Induktive Meßsysteme zum
Nachweis lokaler Änderungen
des Magnetisierungsverhaltens

Eine wesentliche Steigerung der örtlichen Auflösung wird durch die in Abb. 4.3b dargestellte Anordnung erreicht. Sie besteht aus einem Magnetbandtonkopf mit 2 μm Spaltbreite als Meßsystem und einem Feldspulenpaar. Im Gegensatz zur Anordnung a wird hier jedoch das Streufeld nahe der Oberfläche gemessen. Durch Abstandsänderung des Tonkopfes von der Drahtoberfläche kann die örtliche Auflösung im Bereich von 5 μm ... 1 mm variiert werden.

5. Ergebnisse der Schichtexperimente

Die eigentliche Probe ist nach Abb. 3.2 der mit Eisen bedampfte mittlere Teil des Trägers. Der betrachtete Probenausschnitt (Gesichtsfeld in Abb. 3.2) beträgt etwa 20 bis 25 mm², das ist ungefähr 1/5 des bedampften und taillierten Probenbereiches.

Beansprucht wird in der mit σ bezeichneten Richtung, parallel zur Längsrichtung des Trägers. Parallel zur Beanspruchungsrichtung sind die zur Ummagnetisierung notwendige magnetische Feldstärke H , der elektrische Strom j zur Messung des elektrischen Widerstandes und die mittlere Richtung leichter Magnetisierbarkeit K , die sog. leichte Richtung.

Unter Feldeinfluß wird bei sehr homogenen Proben durch parallel zur leichten Richtung verlaufende 180°-Wände ummagnetisiert, die sich senkrecht zur Beanspruchungsrichtung bewegen. Durch Zerrüttung entstehende Risse verlaufen makroskopisch senkrecht zur Beanspruchungsrichtung.

5.1 Magnetische Bereichsstruktur bei Wechselbeanspruchung

Die durch Ummagnetisierung bis zum H_C -Punkt erzeugte Bereichsstruktur ändert sich nach Abb. 5.1 deutlich mit wachsender Zyklenzahl. Sie wird im Ausgangszustand durch wenige relativ gerade Wände gebildet. Die Bereichsstruktur entsteht in diesem Fall durch Keimbildung am Schichtrand und Wachstum der Keime durch Wandbewegung. Die parallel zum Feld magnetisierten Bereiche bewegen sich daher von außen kommend in das Gesichtsfeld hinein. Da die Schicht sehr homogen ist, bleiben die Wände bei ihrer Bewegung gerade.

Durch Wechselbeanspruchung entsteht eine verformungsbedingte inhomogene Spannungsanisotropie, die sich der einachsigen Schichtanisotropie überlagert. Dies hat zur Folge, daß die Wandbeweglichkeit lokal schwankt, so daß es zu stärkeren Wandverbiegungen kommt ($N = 10^4$). Mögliche Ursache für diesen Effekt könnte eine beanspruchungsbedingte Vermehrung der Fehlstellen im kristallinen Gitteraufbau, insbesondere eine Zunahme der Leerstellen und Versetzungen sein, was schließlich zur Ribbildung führt.

Nach größeren Zyklenzahlen entstehende Risse beeinflussen in

zweifacher Weise das magnetische Verhalten: Sie wirken als Hindernisse für die Wandbewegung und führen dadurch zu einer Erhöhung der Koerzitivfeldstärke. Als starke Inhomogenitäten begünstigen sie aufgrund ihres Streufeldes die Keimbildung. Dadurch entstehen Bereichsinseln innerhalb des Gesichtsfeldes. Dies führt bei hoher Rißdichte zu einer zerfaserten Bereichsstruktur.

Zusätzlich wird mit wachsender Zyklenzahl eine Verminderung des Abbildungscontrastes beobachtet. Das deutet darauf hin, daß neben den Wandbewegungsvorgängen auch Rotationsprozesse bei der Ummagnetisierung auftreten.

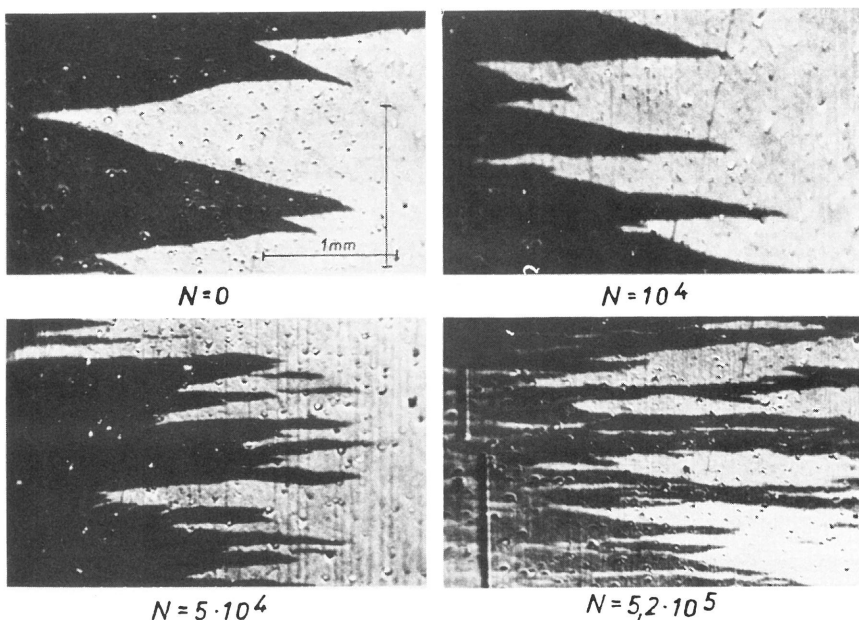


Abb. 5.1
Magnetische
Bereichskonfiguration
nach verschiedenen
Belastungszyklen
mit $\hat{\epsilon} = 2 \cdot 10^{-3}$

Die in Abb. 5.1 dargestellten Schichtzustände können symbolisch folgendermaßen gekennzeichnet werden: $|K| \gg |\lambda| \cdot |\sigma|$ für den Ausgangszustand, d. h. die magnetische Schichtanisotropiekonstante K ist betragsmäßig groß im Vergleich zur Spannungsanisotropiekonstanten $|\lambda| \cdot |\sigma|$ (λ Magnetostruktionskonstante); $|K| \ll |\lambda| \cdot |\sigma|$ für den Zerrüttungszustand, d. h. hier bestimmt die inhomogene Spannungsanisotropie im wesentlichen das magnetische Verhalten.

Diese Auflösung der anfangs definierten Bereichsstruktur in die zerfaserte Struktur bei der geschädigten Schicht könnte bildhaft als Zerrüttung der magnetischen Struktur bezeichnet werden, d.h. das mechanische Zerrüttungsgeschehen spiegelt sich im magnetischen Erscheinungsbild wider.

5.2 Magnetische Hystereseschleife bei Wechselbeanspruchung

Durch Photometrieren der Bereichsabbilder während der Ummagnetisierung läßt sich das pauschale Magnetisierungsverhalten ermitteln. Es ist gegeben durch die vollausgesteuerte Hystereseschleife, die den Zusammenhang zwischen einem auf die Probe wirkenden äußeren Magnetfeld und der zum Feld parallelen Komponente der pauschalen Magnetisierung beschreibt.

Wechselbeanspruchung bewirkt eine Änderung der Hystereseschleife (Abb. 5.2). Im Ausgangszustand ($N = 0$) ist sie auffallend rechteckig. Die Flanken verlaufen steil, und die Sättigungsmagnetisierung ist gleich der Remanenz. Dies ist typisch für dünne Fe-Schichten, die sich wesentlich homogener verhalten als massives Material. Nach vielen Zyklen ($N = 2 \cdot 10^5$ und größer mit $\hat{\epsilon} = 2 \cdot 10^{-3}$, also im Zustand erheblich kumulierter Zerrüttung) wird als wesentliche Änderung eine Zunahme der Koerzitivfeldstärke und eine Abnahme der Flankensteilheit und Remanenz beobachtet.

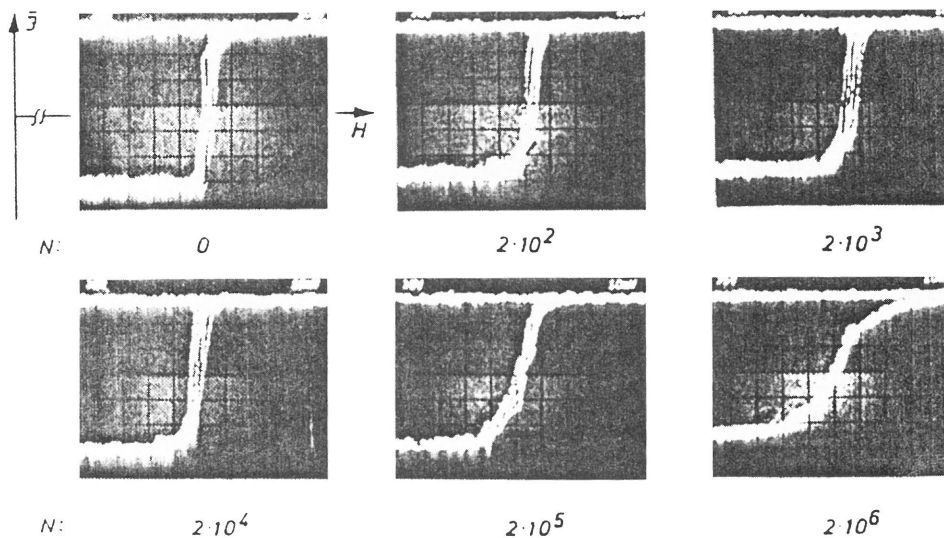
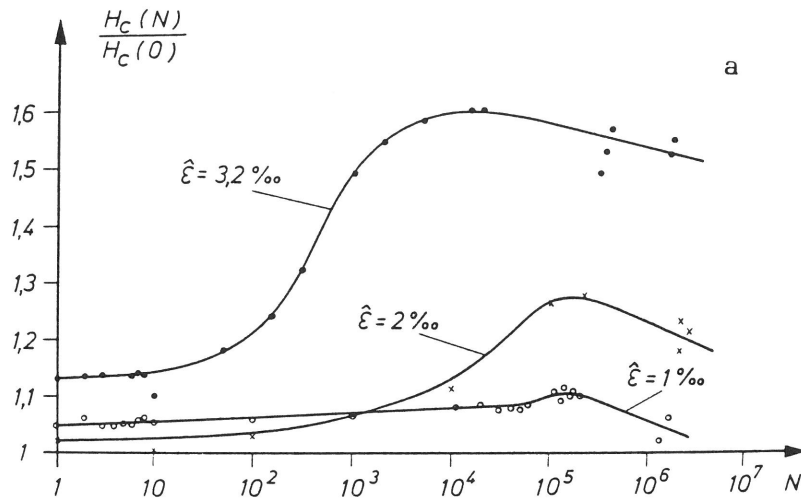


Abb. 5.2

Rechte Flanke der Hystereseschleife nach verschiedenen Zyklenzahlen bei Beanspruchung mit $\hat{\epsilon} = 2 \cdot 10^{-3}$

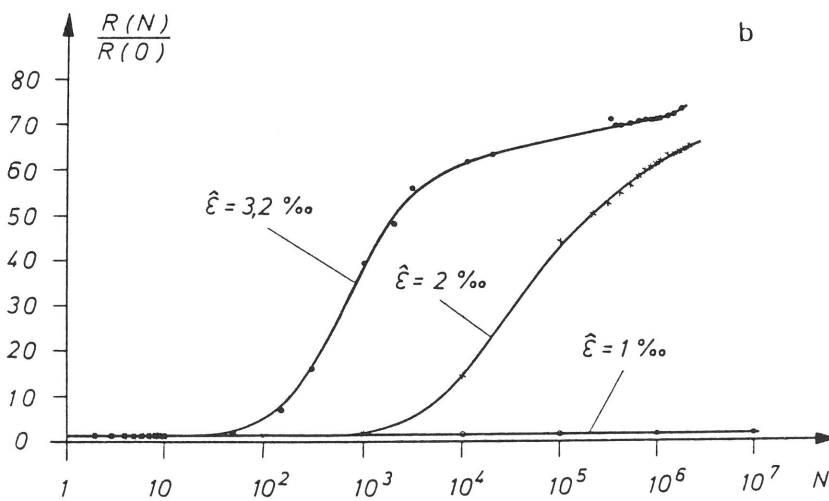
Das Anwachsen der Koerzitivfeldstärke bedeutet, daß der Ummagnetisierungsvorgang durch die zunehmende inhomogene Verformung erschwert wird. Die Verminderung der Flankensteilheit deutet auf eine wachsende Streuung der lokalen Koerzitivfeldstärke hin, d. h. die Probe wird in ihrem magnetischen Verhalten inhomogener. Die verminderte Remanenz zeigt das Auftreten von Rotation bei der Ummagnetisierung an. Die Zunahme der Rotationsprozesse wurde zusätzlich durch Magnetowiderstandsmessung nachgewiesen.

Die Koerzitivfeldstärke ist als Hauptkennwert der Hysterese-
schleife in Abb. 5.3a für drei verschiedene Dehnungsamplituden
als Funktion der Beanspruchungszyklenzahl dargestellt. Sie
steigt zunächst flach, dann stärker, erreicht bei einer bestimm-
ten Zyklenzahl einen Maximalwert und fällt danach mit weiter
wachsenden Zyklenzahl. Der Anstieg und sein Wendepunkt liegen
bei umso kleineren Zyklenzahlen, je größer die mechanische
Schwingbeanspruchung $\hat{\epsilon}$ ist. Für $\hat{\epsilon} = 3,2$ o/oo liegt auch das
Maximum deutlich früher.



a

Abb. 5.3
Koerzitivfeldstärke (a)
und elektrischer Widerstand
(b), jeweils auf den
Anfangswert bezogen,
als Funktion der
Belastungszyklenzahl bei
verschiedenen
Dehnungsamplituden



b

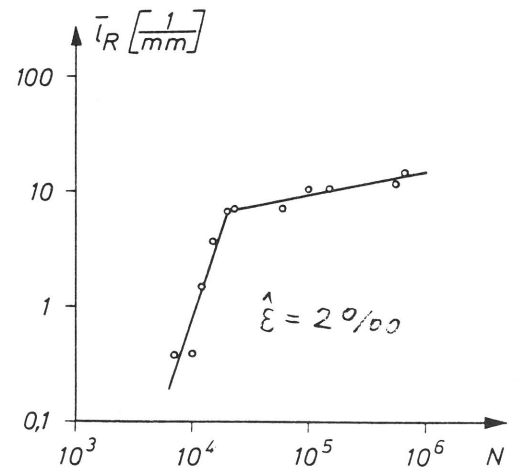


Abb. 5.4
Mittlere Rißlänge pro
Flächeneinheit als Funktion
der Zyklenzahl einer
wechselbeanspruchten
Fe-Schicht

Dieser Verlauf läßt sich besser verstehen, wenn gleichzeitig
zwei weitere Meßgrößen betrachtet werden, nämlich der elektri-
sche Widerstand (Abb. 5.3b) und die mittlere Rißlänge pro mm²
(Abb. 5.4). Der Widerstand bleibt konstant, solange die Koerzi-
tivfeldstärke flach ansteigt. Mit dem Beginn des Steilanstieges
der Koerzitivfeldstärke beginnt auch der Widerstand zu steigen.
Aus dem Verlauf des flächenbezogenen mittleren Rißlänge ist zu

erkennen, daß dies die Zyklenzahl ist, bei der die Rißlänge rapide zunimmt.

Der Verlauf der Koerzitivfeldstärke kann damit folgendermaßen gedeutet werden: Im Ausgangszustand und bei nur schwacher Schädigung wird durch reine Wandbewegung ummagnetisiert. Die Koerzitivfeldstärke ist dann gleich der Wandbewegungsfeldstärke. Der flache Anstieg entsteht infolge Erschwerung der Wandbewegung durch Anisotropieschwankungen. Gebiete erhöhter Druckeigenspannung wirken dabei als Bewegungshindernisse.

Der stärkere Anstieg der Koerzitivfeldstärke wird hier am Beispiel $\hat{\epsilon} = 2 \cdot 10^3$ in den Abb. 5.3 und 5.4 diskutiert. Nach den Ausführungen unter 2.1 kommt es im kubischraumzentrierten Eisen erst nach einer deutlichen Entfestigung zu einer Vermehrung der Versetzungen. Die Abb. 5.3a und b lassen die Deutung zu, daß diese etwa ab 10^3 Zyklen erheblich wird. Aus der Zunahme der Versetzungszahl heraus kommt es etwa ab $8 \cdot 10^3$ Zyklen zur Rißbildung, Abb. 3.4. Allerdings tritt etwa ab $2 \cdot 10^4$ Zyklen nur noch eine geringe Vermehrung der mittleren Rißlänge pro Flächeneinheit auf, während Widerstand und Koerzitivfeldstärke weiter ansteigen. Dabei wächst hier der Widerstand ständig an, während die Koerzitivfeldstärke bei etwa $2 \cdot 10^5$ ein ausgeprägtes Maximum hat. Die anhaltende Zunahme des Widerstandes läßt sich so deuten, daß die Versetzungsdichte in den Schichtbereichen zwischen den Rissen weiter zunimmt. Dies ist naheliegend, weil die Eisenschicht auf den Träger aufgedampft ist und weiterhin dessen Deformationen ausgesetzt ist. Eine Ablösung der Schicht wurde nicht beobachtet. Der Anstieg der Koerzitivfeldstärke ist auf die Rißbildung und auf die Zunahme der Versetzungszahl zurückzuführen, welche die Wandbewegungen behindern. Allerdings erleichtern die Risse auch die Keimbildung, so daß mehr Wände am Magnetisierungsprozeß beteiligt werden. Dies wird in Abb. 5.1 deutlich erkennbar. Die Zunahme der Zahl der Wände bewirkt eine Verminderung der Koerzitivfeldstärke. Im gleichen Sinn wirken Rotationsprozesse, die mit wachsender Inhomogenität zunehmen. Das Maximum im H_C -N-Verlauf bei etwa $2 \cdot 10^5$ Zyklen ist daher die Stelle, bei der das Ansteigen der Wandbewegungsfeldstärke durch die H_C -vermindernde Wirkung der Keimbildungs- und Rotationsvorgänge kompensiert wird. Während vor dem Maximum überwiegend Wandbewegungsvorgänge das magnetische Verhalten bestimmten,

Überwiegt nach dem Maximum der Einfluß der Keimbildungs- und Rotationsvorgänge. Offenbleiben muß dabei, ob zusätzlich zwischen den gemäß Abb. 5.4 nachgewiesenen Makrorissen auch noch zunehmend Mikrorisse auftraten. Ihre Wirkung wäre dann tendenziell so wie die der Makrorisse.

5.3 Magnetowiderstandsänderung

Wird eine dünne Fe-Schicht nicht nur durch 180°-Wandverschiebung, sondern auch durch Rotation ummagnetisiert, so wird der elektrische Widerstand aufgrund der Wechselwirkung zwischen den Leitungselektronen und der Magnetisierung durch den Magnetisierungsvorgang beeinflusst. Der beim Durchlaufen der magnetischen Hystereseschleife gleichzeitig über dem Magnetfeld aufgezeichnete elektrische Widerstand ändert sich daher bei den Feldstärken, bei denen die Ummagnetisierung auch durch Rotationsprozesse bedingt wird.

In Abb. 5.5 sind Hystereseschleife und Magnetowiderstandssignal einer Fe-Schicht im Ausgangszustand und nach Wechselbeanspruchung dargestellt. Deutlich erkennbar ist die größere Widerstandsmodulation nach der Wechselbeanspruchung. Die Hystereseschleife zeigt die bereits beschriebene Gestaltsänderung: Verminderung der Flankensteilheit, Abrundung im Bereich der Einmündung in die Sättigung.

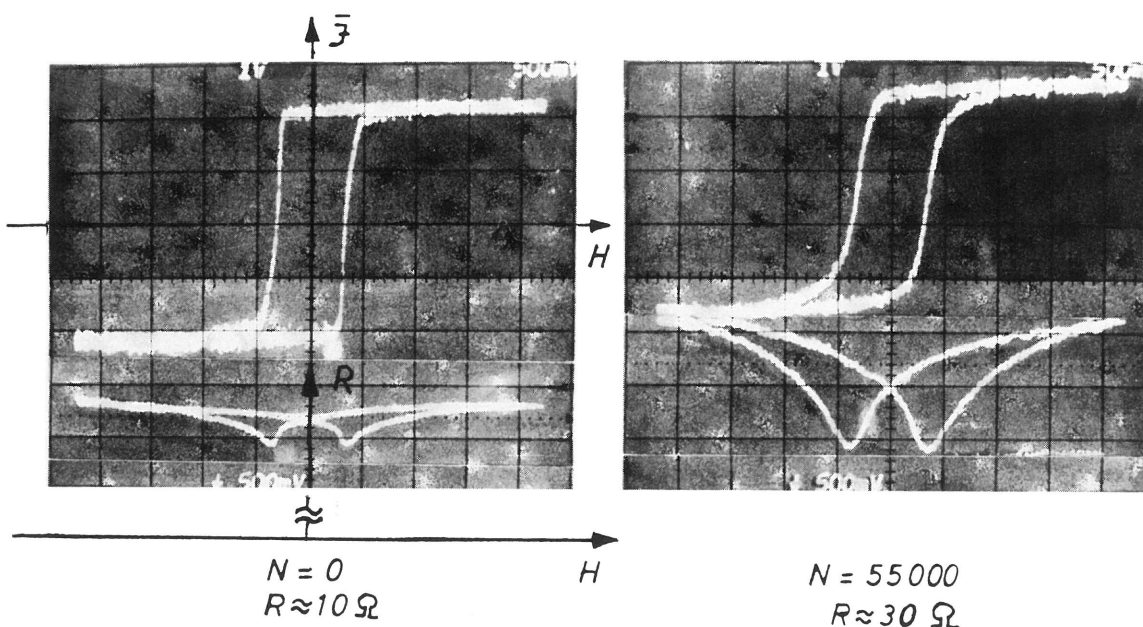


Abb. 5.5
 Magnetische Hystereseschleife $\bar{J} = \bar{J}(H)$ und Magnetowiderstandsänderung $\Delta R = \Delta R(H)$ nach verschiedenen Belastungszyklenzahlen $\hat{\epsilon} = 3 \cdot 10^{-3}$; $R: 1 \text{Skt.} \hat{=} 10 \text{ m} \Omega$.

Das Auftreten einer magnetischen Widerstandsänderung bereits bei unbeanspruchter Probe wird auf die stets vorhandenen Fehlstellen zurückgeführt. Mit fortschreitender Zerrüttung treten dann besonders starke Inhomogenitäten als Folge der örtlich lokalisierten Verformungsvorgänge auf /9/. Das führt sowohl zu einer stark erhöhten mittleren Fehlstellenzahl als auch zu großen lokalen Unterschieden der Fehlstellendichte. Als Folge beider Effekte nimmt der Rotationsanteil der Ummagnetisierung und damit auch die Magnetowiderstandsänderung zu.

5.4 Barkhauseneffekt

Die bisher betrachteten Ergebnisse beschreiben das pauschale Verhalten der Probe. Es handelte sich dabei im wesentlichen um diejenigen Eigenschaften, die sich in der Magnetisierungskurve widerspiegeln.

Informationen über das lokale Schichtverhalten lassen sich durch Ausnutzung einer magnetischen Wand als Sonde gewinnen. Aufgrund der Wechselwirkung der Wand mit Störungen des Schichtgefüges, insbesondere mit Eigenspannungen, findet eine Beeinflussung der Wandbewegung statt. Die Untersuchung der Bewegung einer einzelnen Wand ermöglicht daher Rückschlüsse auf die Anzahl und Anordnung der Störungen.

Voraussetzung zur Benutzung einer magnetischen Wand als Sonde ist, daß die Störungsverhältnisse in der Schicht so gering sind, daß eine einzelne Wand erzeugt werden kann, die sich durch Feldeinfluß in reproduzierbarer Weise über die Schicht bewegen läßt (Abb. 5.6). Dafür geeignete Schichten konnten durch Verfeinerung der Herstellungsbedingungen erzeugt werden. Bei steigendem Magnetfeld H verschiebt sich die Blochwand zugunsten des dunklen Bereiches bis zur völligen Ummagnetisierung der Probe. Durch Photometrieren des in Abb. 5.5 dargestellten Bereichsbildes läßt sich die pauschale Magnetisierung als Funktion des monoton steigenden Magnetfeldes, d. h. die rechte Flanke der Hystereseschleife gewinnen. Da die Wandbewegungsfeldstärke infolge Störungen des Schichtgefüges ortsabhängig ist, bewegt sich die Wand trotz stetig steigender Feldstärke nicht stetig, sondern sprunghaft. Diese diskontinuierliche Magnetisierungsänderung unter dem Einfluß einer kontinuierlichen Feldänderung ist der Barkhauseneffekt. Bei ausreichender Meßempfindlichkeit betrachtet zeigt

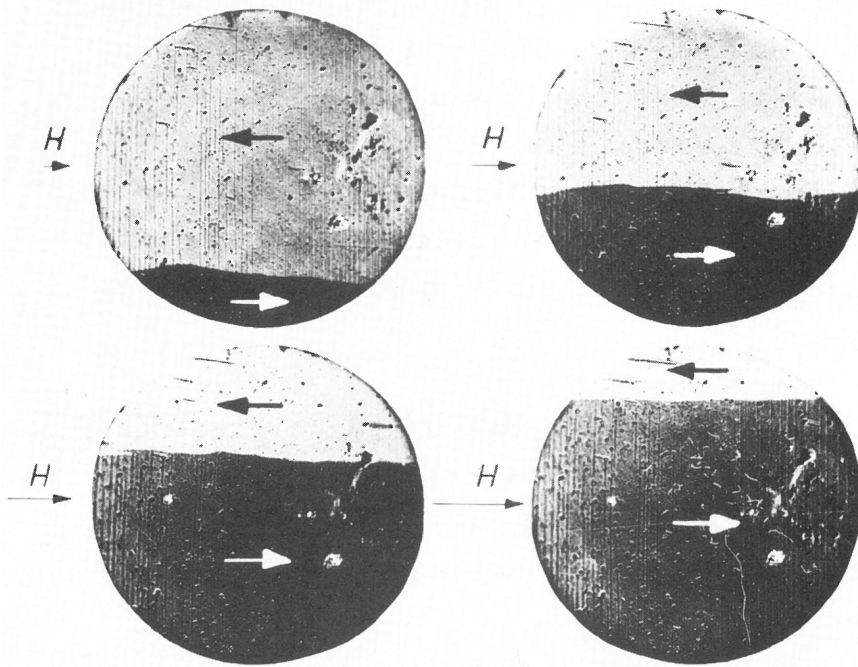


Abb. 5.6
Ummagnetisierung
einer Fe-Schicht
durch
Blochwandverschiebung

die Flanke der Hystereseschleife daher einen treppenförmigen Verlauf.

Diese Feinstruktur der Flanke ändert sich durch Wechselbeanspruchung (Abb. 5.7). Im Ausgangszustand sind wenige Stufen geringer Breite vorhanden. Mit wachsender Zyklenzahl nehmen die Zahl und die Breite der Stufen zu. Die Sprunghäufigkeit der Wand pro Flankendurchlauf wächst, d. h. die Zahl der Haftstellen für die magnetische Wand wird durch Wechselbeanspruchung vergrößert.

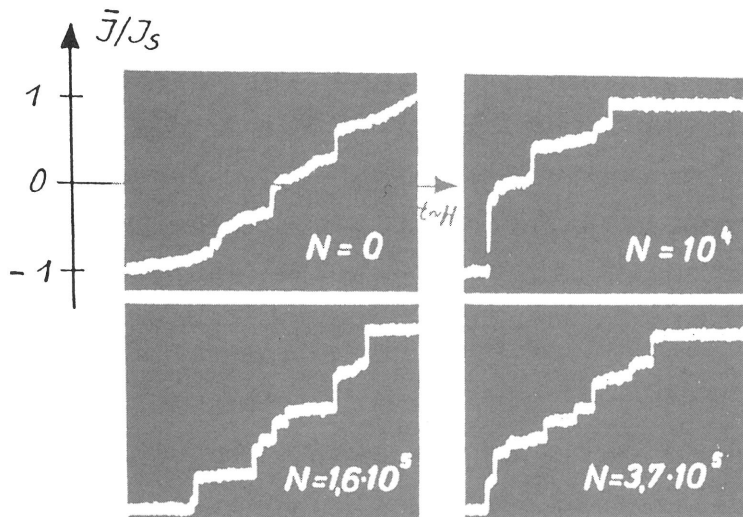


Abb. 5.7
Ummagnetisierung einer
Fe-Schicht nach
verschiedenen
Belastungszyklen
mit $\dot{\epsilon} = 2 \cdot 10^{-3}$

Da die pauschale Magnetisierung bei dieser Versuchsführung dem Ort der Wand proportional ist, ist die Stufenhöhe ein Maß für den Abstand der wirksamsten Wandbewegungshindernisse. Die Stufenbreite ist gleich der Zusatzfeldstärke, die notwendig ist, um

die Wand vom Hindernis zu befreien. Die Gesamtfeldstärke, bei der die Wand das Hindernis überwindet, ist die lokale Wandbewegungsfeldstärke. Da sich die Wand bei jedem Magnetisierungszyklus in annähernd gleicher Weise bewegt, werden teilweise reproduzierbare Sprünge beobachtet. Die Barkhausensprünge, die als Einzelereignisse im allgemeinen nicht reproduzierbar sind, treten bei der geschädigten Probe oft beim gleichen Wert der pauschalen Magnetisierung auf.

Durch gleichzeitige visuelle Betrachtung des Ummagnetisierungsvorganges wurde sichergestellt, daß die Magnetisierungsänderung durch Verschiebung einer einzigen magnetischen Wand erfolgte. Die magnetische Wand läßt sich also zur Feststellung von Materialinhomogenitäten einsetzen.

5.5 Mechanische Schädigungen

Die lichtmikroskopische Betrachtung zerrütteter Fe-Schichten zeigt vorwiegend quer zur Beanspruchungsrichtung verlaufende Risse, deren Dichte mit wachsender Beanspruchung ($\hat{\epsilon}$, N) zunimmt. Die Risse verlaufen über weite Strecken auffallend gerade und parallel zueinander. Ihr mittlerer Abstand ist über große Flächenbereiche konstant.

Die Rißausbildung nach verschiedenen Zyklenzahlen bei einer Dehnungsamplitude von $\hat{\epsilon} = 3$ o/oo ist in Abb. 5.8 dargestellt. Die Rißdichte als Funktion der Zyklenzahl wächst für diese Amplitude nach einer Potenzfunktion $\rho = 0,74 N^{0.15}$ (ρ : Anzahl der Risse pro mm parallel zur Beanspruchungsrichtung). Jedes Teilbild von Abb. 5.8 wurde nach Versuchen von einer anderen Probe hergestellt. Die Schichten befanden sich jeweils während der gesamten Beanspruchungszeit bis zu den angegebenen Zyklenzahlen im Vakuum.

Über die Mikrovorgänge, die diese Rißbildung bewirken, ist bisher relativ wenig bekannt. Ganz allgemein sind die Deformationsvorgänge in dünnen polykristallinen Aufdampfschichten verschieden von denen im massiven Material. Sie werden bestimmt durch die hohen Defektdichten und die geringen Korngrößen. Die für aufgedampfte Schichten charakteristische Versetzungsdichte beträgt z. B. 10^{10} bis $10^{12}/\text{cm}^2$ /14/. Aufgrund dieser hohen Versetzungsdichte wird das Deformationsgeschehen vorwiegend

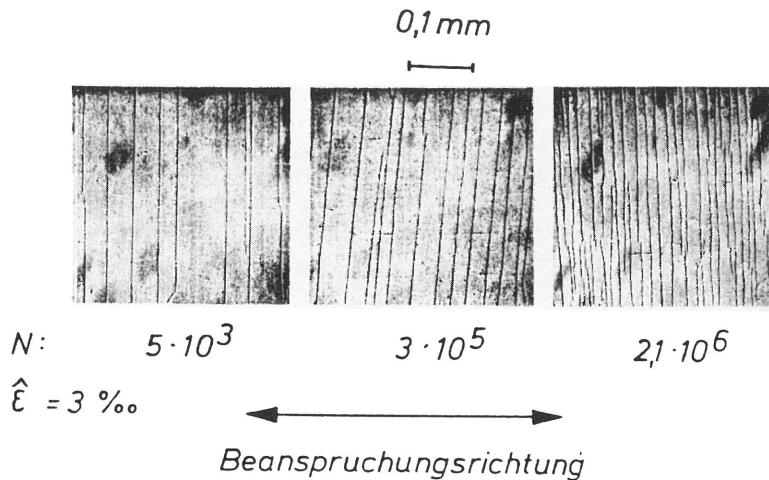


Abb. 5.8
 Rißausbildung in
 Fe-Schichten nach
 Wechselbeanspruchung
 mit $\hat{\epsilon} = 3 \text{ ‰}$

durch Wechselwirkungsprozesse zwischen vorhandenen Versetzungen bestimmt. Rekombinations- und Dipolbildungsvorgänge können dabei eine wichtige Rolle spielen /15/. Insbesondere beeinflussen in polykristallinen Schichten Diffusionsvorgänge, die ein Korn-grenzengleiten bewirken, den Deformationsvorgang /16, 17/.

Risse beeinflussen das Magnetisierungsverhalten, indem sie als Wandbewegungshindernisse wirken und indem sie die Keimbildung erleichtern. Solange sich die Risse bei der entlasteten Probe wieder soweit schließen, daß für die Keimbildung keine hinreichend großen Streufelder entstehen, behindern sie nur die Wandbewegung, so daß die Koerzitivfeldstärke erhöht wird. Schließen sich die Risse dagegen bei weiter fortgeschrittener Zerrüttung nicht mehr, so wirken sie aufgrund ihres größeren Streufeldes als Quellen für die Keimbildung. Das Schließen der Risse bei weiter fortgeschrittener Zerrüttung könnte durch Oxidation oder Ablösen der Schichten an den Rißufern erschwert werden.

Der Zerrüttungsprozeß kann bei dünnen Schichten, die über einen Träger beansprucht werden, bis zu wesentlich höheren Schädigungen verfolgt werden als bei massiven Proben. Während bei einer Massivprobe der Zerrüttungsversuch beendet ist, sobald ein Riß die Probe in zwei Teile trennt, können in der Schicht mehrere durch die gesamte Probe gehende Risse existieren, ohne daß sich die Beanspruchungsverhältnisse in den rißfreien Schichtgebieten wesentlich ändern. Lediglich in einem Streifen von der Breite der Krafteinleitungslänge (Trägerschicht) zu beiden Seiten des Risses weicht die Beanspruchung vom näherungsweise einachsigen Zug-Druck-Typ ab.

Aufgrund der unterschiedlichen Beanspruchungsbedingungen bei dünnen Schichten und beim massiven Material kann ein Maximum im H_c -N-Verlauf, wie es bei dünnen Schichten nach Abb. 5.3a festgestellt wurde, bei Massivproben nicht erwartet werden, da der das Maximum verursachende hohe Schädigungsgrad nicht erreicht wird.

6. Ergebnisse der Versuche mit Drahtproben

Reine Torsion ist eine Beanspruchungsart, die durch einen zweiachsigen Spannungszustand mit entgegengesetzt gleichen Hauptspannungen gekennzeichnet ist. Da wegen der inhomogenen Spannungsverteilung über den Querschnitt die Randspannung nur im elastischen Fall aus dem Torsionsmoment berechnet werden kann, wird als Maß für die Beanspruchung im folgenden stets die an der Probenoberfläche auftretende Scherwinkelamplitude $\hat{\gamma}$ angegeben. Alle Versuche werden bei Zimmertemperatur durchgeführt. Solange keine anderen Angaben gemacht werden, beträgt die Frequenz des magnetischen Wechselfeldes 0,1 Hz, die Feldaussteuerung etwa das Zehnfache der Koerzitivfeldstärke, die im Ausgangszustand ca. 0,3 A/cm beträgt.

6.1 Einsinnige Torsionsbeanspruchung

Zur Prüfung des magnetischen Verhaltens der Probe bei einsinniger Verformung sind in Abb. 6.1 internes und externes Induktionssignal sowie die durch Integration aus dem externen Signal gewonnene Hystereseschleife als Funktion des Magnetfeldes (nach Abb. 4.1) dargestellt. Beanspruchungsparameter ist der Scherwinkel γ . Die Abhängigkeit des internen Signals u_{intern} von der statischen Scherung $\hat{\gamma}$ ist deutlich größer als die des externen Signals u_{ex} . Die Koerzitivfeldstärke nimmt mit wachsender Scherung zu, die Flankensteilheit der Hystereseschleife nimmt ab. Wird die Probe nach Erreichen des im vierten Teilbild dargestellten Zustandes entlastet ($\gamma = 0$), so stellt sich wieder das durch das erste Teilbild gekennzeichnete magnetische Verhalten ein. Die Induktionssignale verhalten sich bezüglich der Scherung reversibel, solange elastisch verformt wird. Eine Umkehr der Torsionsrichtung bewirkt beim internen Induktionssignal eine Spiegelung an der Mittelsenkrechten: Das externe Signal ist unabhängig vom Richtungssinn.

Treten bei höheren Beanspruchungen plastische Deformationen auf, so ist nach Rückgang auf $\gamma = 0$ durch verbleibende innere mechanische Spannungen das Magnetisierungsverhalten geändert. Dieses spiegelt sich aufgrund der großen Spannungsempfindlichkeit am auffälligsten im internen Signalverlauf wider, jedoch zeigen auch die externe Signalspannung und die daraus resultierende Hystereseschleife deutliche Veränderungen. Die plastische De-

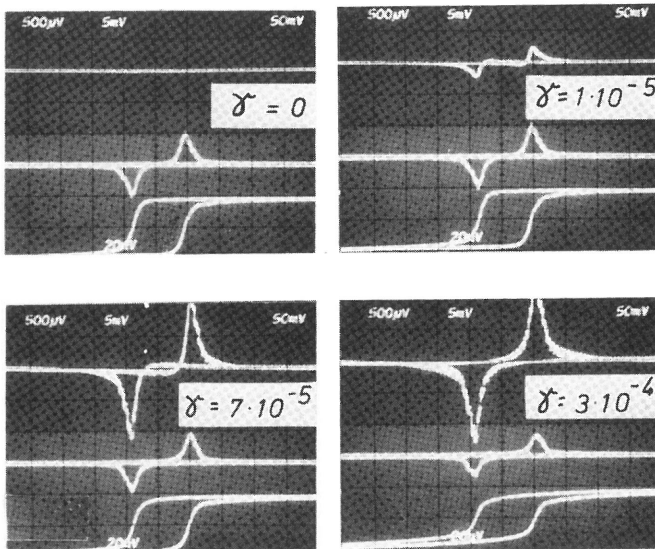


Abb. 6.1
Induktionssignale als Funktion der Feldstärke und Hystereseschleife bei verschiedenen einsinnigen Torsionsbeanspruchungen

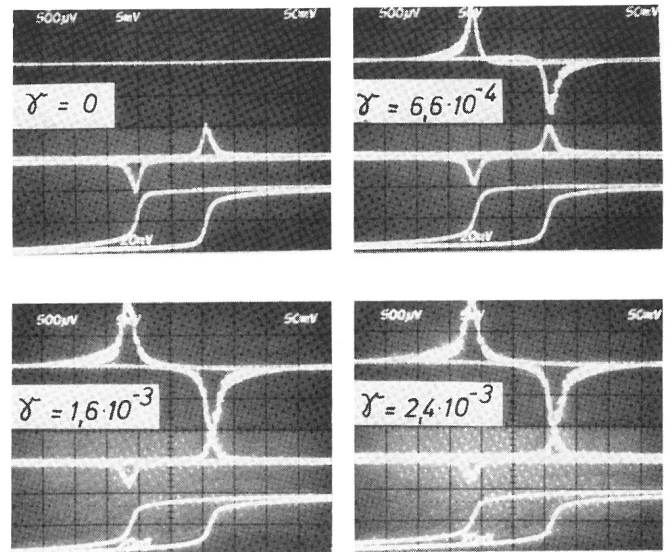


Abb. 6.2
Induktionssignale als Funktion der Feldstärke und Hystereseschleife nach verschiedenen einsinnigen Beanspruchungen $\hat{\gamma}$, gemessen bei $\gamma = 0$

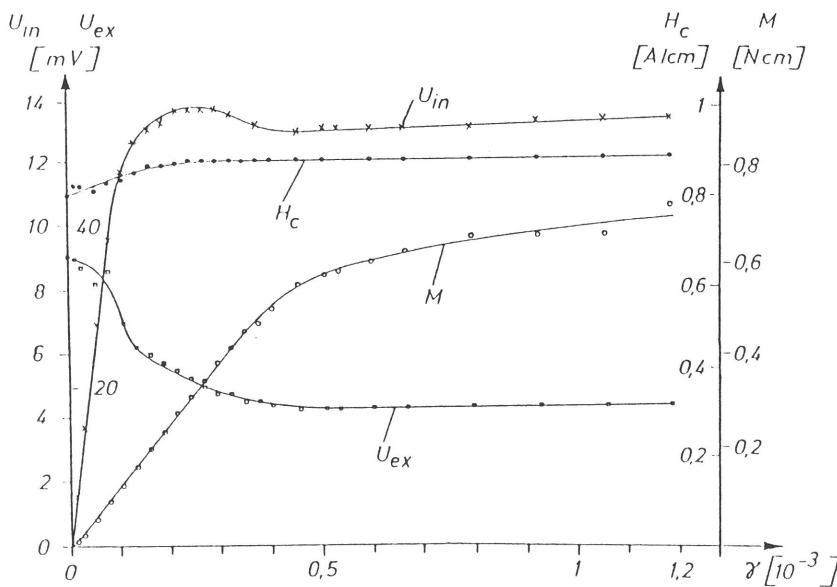


Abb. 6.3
Mechanisches Moment M und magnetische Meßgrößen als Funktion der Scherung γ

formation bewirkt eine Hysterese der Induktionssignale bezüglich der Scherung. In Abb. 6.2 ist dieses Verhalten der scherungsfreien Probe dargestellt, nachdem sie zuvor bis zu dem im jeweiligen Einzelbild angegebenen Scherungswert beansprucht wurde.

In der Abb. 6.3 sind die Extremwerte der Induktionssignale und die Koerzitivfeldstärke als Funktion der Scherung während eines Viertelzyklus dargestellt, ausgehend vom unverformten Zustand der Probe. Neben den magnetischen Kennwerten ist als mechanische Kenngröße der Verlauf des Moments eingetragen. Das Moment steigt

im elastischen Bereich proportional zur Scherung und ändert sich nach Überschreiten der Fließgrenze nichtlinear. Das interne Induktionssignal zeigt ebenfalls einen linearen Anstieg bei kleinen Scherungen. Der Linearitätsbereich dieser Größe endet jedoch bereits bei kleineren Scherungen als bei der mechanischen Kenngröße; u_{in} durchläuft anschließend ein Maximum und mündet etwa im Bereich der mechanischen Elastizitätsgrenze in einen fast scherungsunabhängigen Verlauf.

Das externe Induktionssignal fällt von einem Maximalwert im unverformten Zustand auf einen konstanten Wert. Die Einmündung in den scherungsunabhängigen Verlauf erfolgt auch hier bei dem Scherwinkel, bei dem an der Drahtoberfläche die Fließgrenze überschritten wird.

Diese Meßgrößenverläufe können folgendermaßen gedeutet werden: Bei $\gamma \approx 0,1 \cdot 10^{-3}$ beginnen plastische Verformungen in der Randzone des Drahtes. Dadurch werden Inhomogenitäten in der Spannungsverteilung in der Drahtprobe bewirkt, die von den magnetischen Signalen u_{in} und u_{ex} empfindlich angezeigt werden, die jedoch am integralen mechanischen Moment noch nicht auflösbar sind. Mit weiter zunehmender Scherung nehmen die plastischen Verformungen in der Randzone zu, die Verteilung wird gleichmäßiger, so daß die magnetischen Signale einen konstanten Wert annehmen. Für $\gamma \geq 0,4 \cdot 10^{-3}$ wird die plastische Verformung auch am mechanischen Moment erkennbar, das zunehmend stärker hinter dem elastisch-linearen Anstieg zurückbleibt.

Den Verlauf der gleichen Meßgrößen über einen größeren Beanspruchungsbereich, zusätzlich mit den Entlastungsverläufen (erster Beanspruchungs-Halbzyklus) zeigt Abb. 6.4.

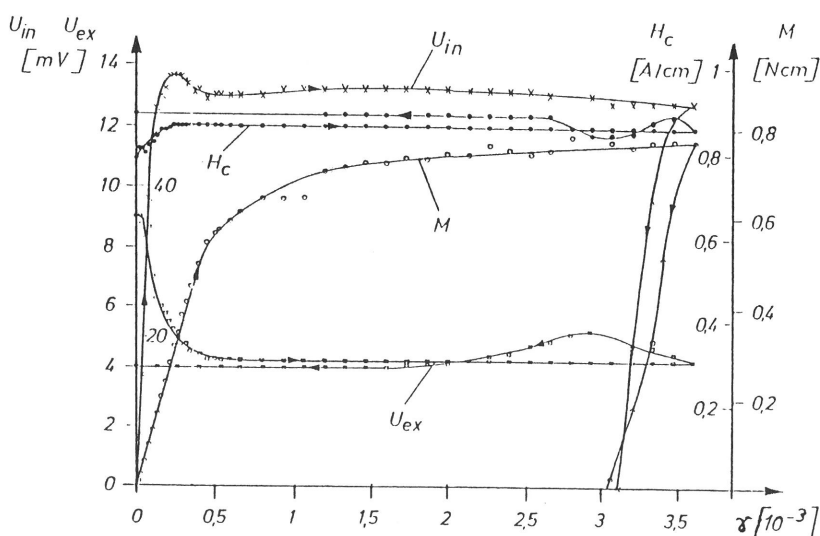


Abb. 6.4
Verlauf der magnetischen Kenngrößen als Funktion der Scherung bei Belastung bis $\gamma = 3,5 \cdot 10^{-3}$ und Entlastung

Alle magnetischen Größen erleiden sowohl im makroskopisch momentfreien als auch im scherungsfreien Zustand Änderungen gegenüber dem Anfangszustand. Die Koerzitivfeldstärke ist geringfügig angestiegen, die Amplitude des externen Signals ist stark verringert. Das Maximum des externen Signals, das bei Entlastung ($\gamma \approx 3 \cdot 10^{-3}$) auftritt, kennzeichnet den Zustand geringster Spannungsenergie an der Stelle des Nulldurchgangs des Moments. Die Koerzitivfeldstärke zeigt in diesem Bereich ein schwaches Minimum, das aber noch oberhalb des Anfangswertes liegt.

6.2 Torsionswechselbeanspruchung

Der zeitliche Verlauf der Induktionssignalamplituden während der ersten beiden Beanspruchungszyklen bei dreiecksförmig vorgegebener Scherung γ ist in Abb. 6.5 dargestellt. Gleichzeitig wurde als mechanische Größe das Torsionsmoment M der Drahtprobe, das mit einem Momentaufnehmer gemessen wurde, aufgezeichnet. Die Frequenz des magnetisierenden Wechselfeldes betrug dabei 20 Hz, die Feldaussteuerung das Dreifache der Koerzitivfeldstärke.

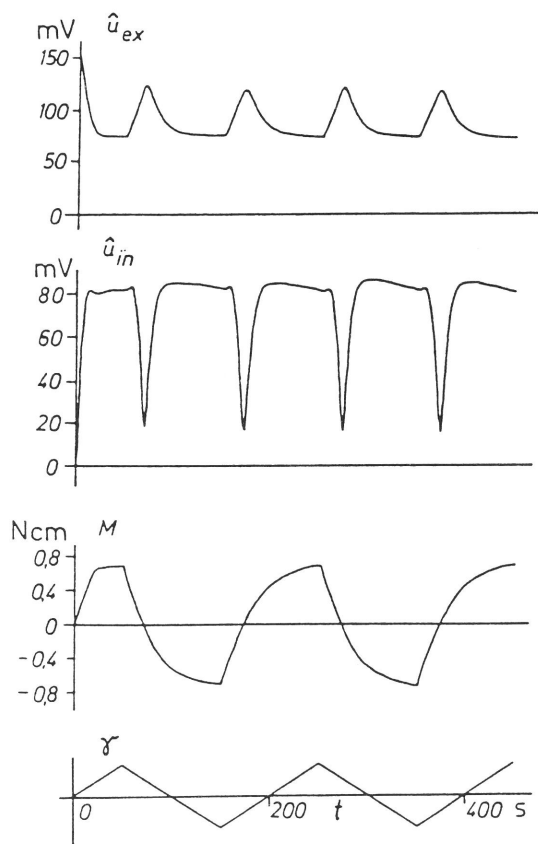


Abb. 6.5
Zeitlicher Verlauf der Induktionssignalamplituden und des Torsionsmomentes während der ersten beiden Belastungszyklen mit $\hat{\gamma} = 1,2 \cdot 10^{-3}$, Frequenz 5 mHz

Die stärksten Signaländerungen ereignen sich während des ersten Belastungshalbzyklus. Die den spannungsarmen Zustand charakterisierenden Maxima von u_{ex} und Minima von u_{in} erscheinen nach dem

ersten Viertelzyklus beim Momentennulldurchgang, d. h. vor dem Richtungswechsel der Scherung. Die Abnahme der Maxima von u_{ex} mit wachsender Zyklenzahl bedeutet, daß zur Ummagnetisierung der Probe ein größeres Feldstärkeintervall erforderlich ist, d. h. die Probe wird magnetisch inhomogener. Die Ursache dafür können innere Spannungen sein, die wegen der über den Querschnitt inhomogenen Beanspruchung insbesondere im randnahen Material entstehen. Das Nichtverschwinden von u_{in} beim Momentennulldurchgang ist eine Bestätigung dafür, daß nach überelastischer Beanspruchung auch im makroskopisch spannungsfreien Zustand ($M = 0$) innere Spannungen vorhanden sind.

Die auf die Schubspannung τ bezogene Spannungsempfindlichkeit der externen Signalspannung ist beim Momentennulldurchgang null, die der internen Signalspannung ist maximal. Das interne Signal ist damit zum Nachweis kleinster Spannungen geeignet.

Die magnetostruktive Beeinflussung der remanenten Magnetisierung durch die mechanische Torsionsbeanspruchung allein ohne Magnetfeldeinwirkung zeigt die Abb. 6.6. Dargestellt ist das interne Induktionssignal über dem Torsionsgrad. Die Scheramplitude beträgt $\gamma \approx 10^{-3}$. Das Signalmaximum tritt bei einem Zehntel des Beanspruchungsmaximums auf. Die mechanische Beanspruchung bewirkt eine Änderung der Gesamtenergie nach Gleichung 2.6 durch den Spannungsenergieterm (Gl. 2.11). Die Gleichgewichtslage der Magnetisierung ändert sich daher während eines Beanspruchungszyklus und erzeugt ein Induktionssignal.

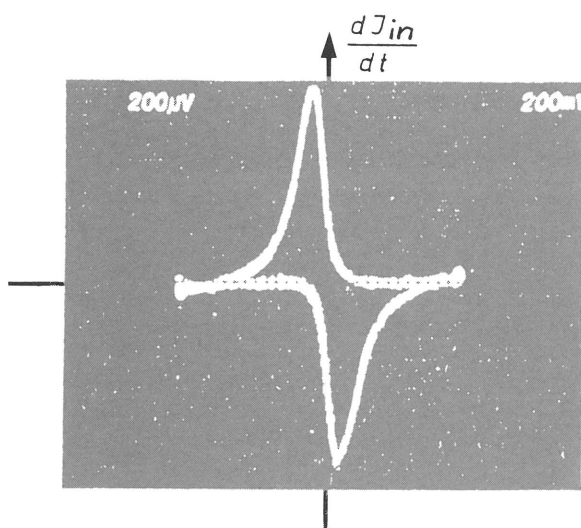


Abb. 6.6
Beanspruchungsinduziertes internes Induktionssignal ($\gamma \approx 10^{-3}$)

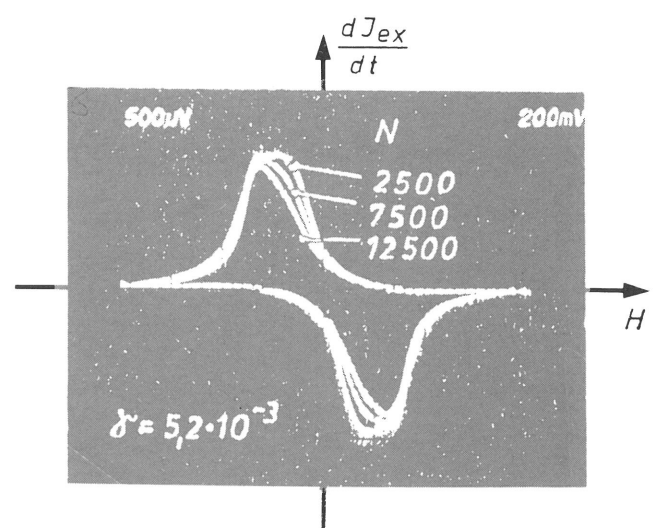


Abb. 6.7
Externes Induktionssignal nach $N = 2500, 7500$ und 12500 Beanspruchungszyklen der Scheramplitude $\hat{\gamma} = 5,2 \cdot 10^{-3}$ ($N_B = 14000$)

Die Änderung der Koerzitivfeldstärke durch Torsionswechselbeanspruchung läßt sich aus dem externen Induktionssignalverlauf ermitteln. Da im allgemeinen die magnetische Hystereseschleife beim Nulldurchgang der Magnetisierung (H_c -Punkt) am steilsten verläuft, ist die Koerzitivfeldstärke gleich der zum Extremwert des Induktionssignals gehörigen Feldstärke (s. 4.3.1).

Die Abb. 6.7 zeigt drei jeweils nach verschiedenen Beanspruchungszyklen ineinander gezeichnete externe induktive Meßsignale. Die Koerzitivfeldstärke nimmt mit wachsender Zyklenzahl zu. Gleichzeitig nimmt die Signalhöhe ab. Dies bedeutet für

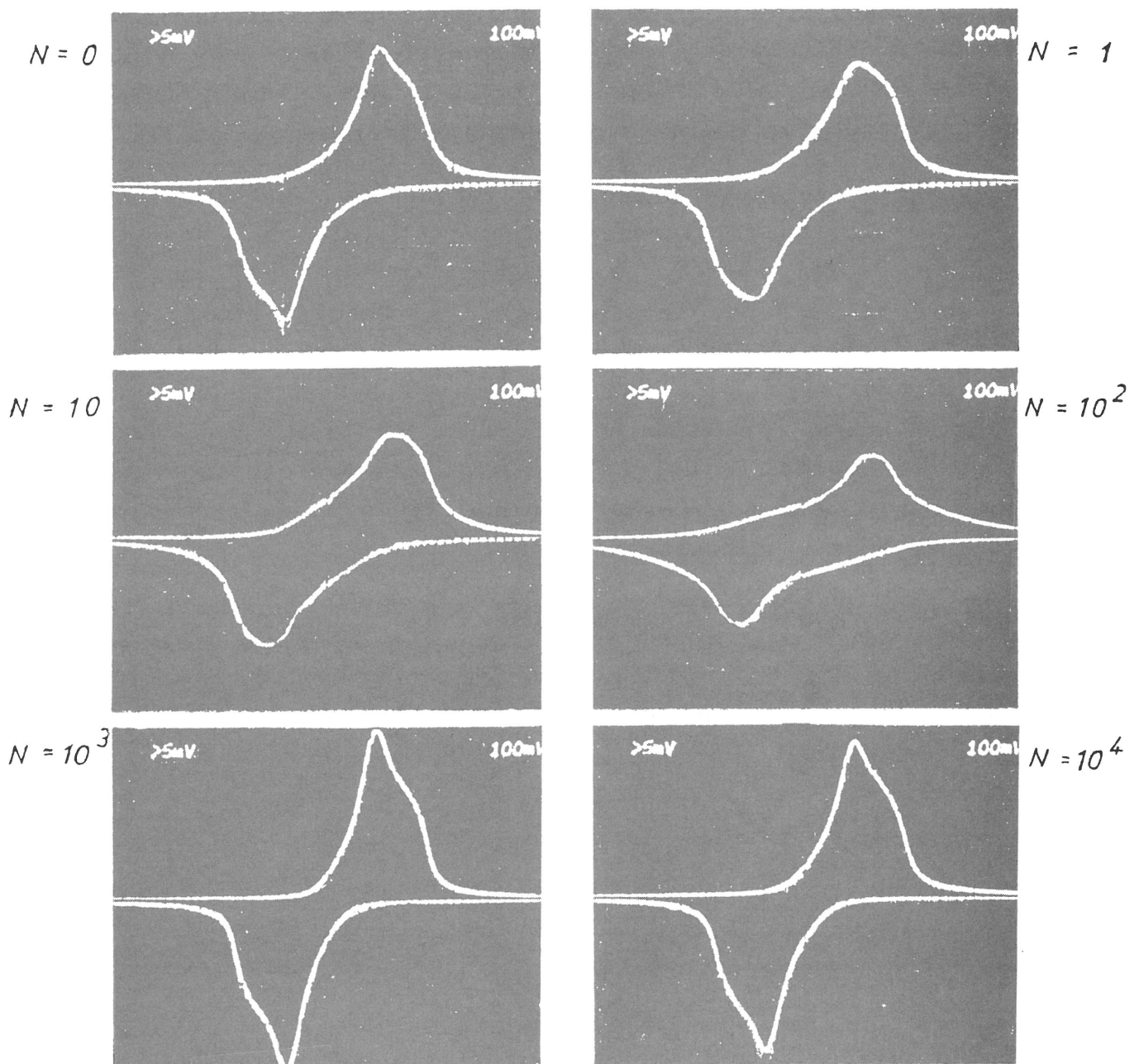


Abb. 6.8
Externes Induktionssignal nach verschiedenen Beanspruchungszyklen
zahlen mit $\hat{\gamma} = 3,4 \cdot 10^{-3}$ ($N_B = 13700$)

Berichtigung

Die Änderung der Koerzitivfeldstärke durch Torsionswechselbeanspruchung läßt sich aus dem externen Induktionssignalverlauf ermitteln. Da im allgemeinen die magnetische Hystereseschleife beim Nulldurchgang der Magnetisierung (H_C -Punkt) am steilsten verläuft, ist die Koerzitivfeldstärke gleich der zum Extremwert des Induktionssignals gehörigen Feldstärke (s. 4.3.1).

Die Abb. 6.7 zeigt drei jeweils nach verschiedenen Beanspruchungszyklenzahlen ineinander gezeichnete externe induktive Meßsignale. Die Koerzitivfeldstärke nimmt mit wachsender Zykluszahl zu. Gleichzeitig nimmt die Signalhöhe ab. Dies bedeutet für

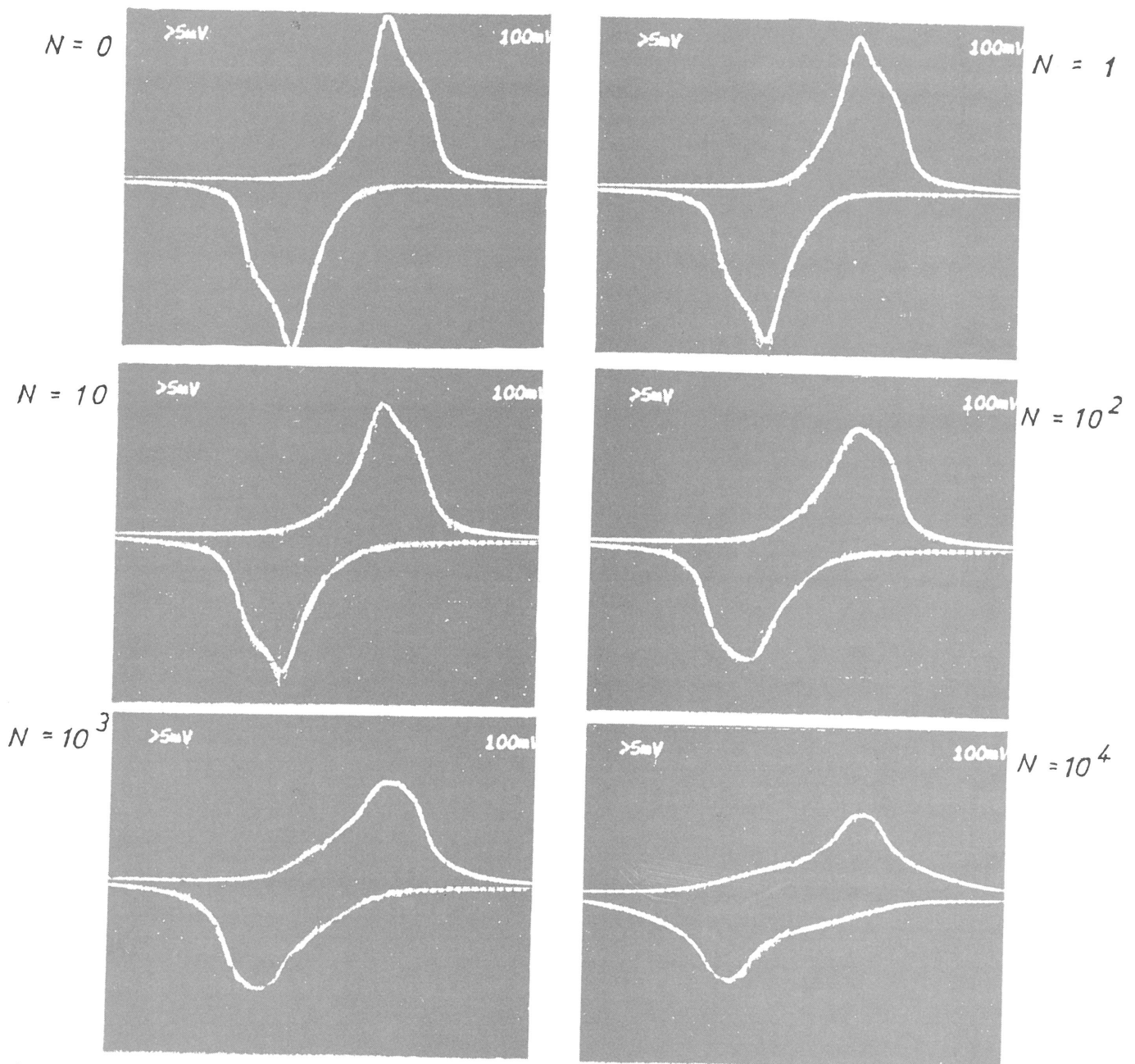


Abb. 6.8
Externes Induktionssignal nach verschiedenen Beanspruchungszyklenzahlen mit $\hat{\gamma} = 3,4 \cdot 10^{-3}$ ($N_B = 13700$)

die durch Integration aus dem Induktionssignal gewinnbare Hystereseschleife eine Abnahme ihrer Flankensteilheit, d. h. das zur Ummagnetisierung notwendige Feldstärkenintervall steigt mit wachsender Zyklenzahl.

Die Abb. 6.8 zeigt in Einzelbilddarstellung die Veränderung des externen Induktionssignalverlaufs während der Torsionswechselbeanspruchung. Die Höhe der Signalextremwerte nimmt während der Zerrüttung mit wachsender Zyklenzahl ab. Der für den Ausgangszustand charakteristische Signalverlauf bleibt bis etwa $N = 10$ erhalten. Nach 100 Beanspruchungszyklen ist der nach Durchlaufen der Extremwerte auftretende Vorzeichenwechsel der Krümmung verschwunden. Die gesamte Abnahme der Extremwerte bis zum Bruch beträgt 55 %.

Der Verlauf der Amplitude des internen Induktionssignals als Funktion der Zyklenzahl für zwei Beanspruchungsamplituden ist in der Abb. 6.9 dargestellt.

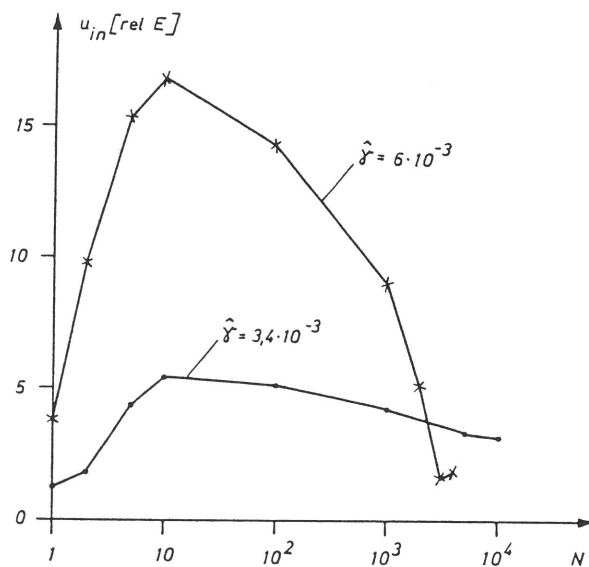


Abb. 6.9
Internes Induktionssignal als Funktion der Beanspruchungszyklenzahl bei zwei verschiedenen Amplituden

Auffallend am Kurvenverlauf ist das Auftreten eines Signalmaximums bei beiden Beanspruchungsamplituden. Der Vergleich mit Abb. 6.8 zeigt, daß das interne Induktionssignal durch die Zerrüttung eine wesentlich größere Änderung erfährt als das externe Induktionssignal. Das interne Induktionssignal ist der empfindlichere Indikator für Zerrüttungsvorgänge in makroskopischer Betrachtung, also unter Verzicht auf Ortsauflösung.

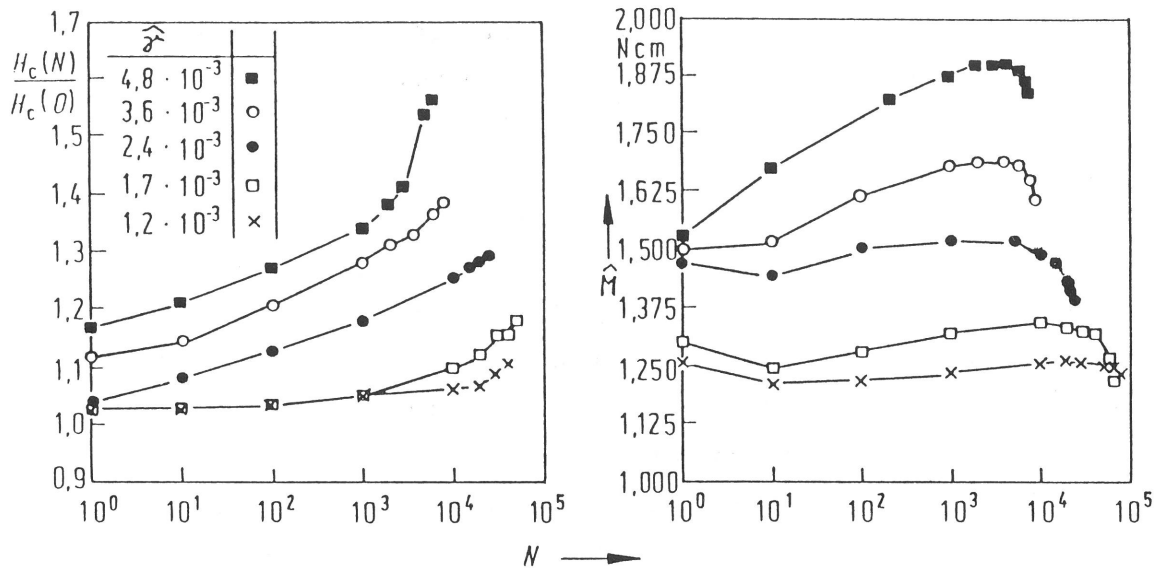


Abb. 6.10

Koerzitivfeldstärke H_c und Torsionsmomentamplitude \hat{M} als Funktion der Zyklenzahl N ($\hat{\gamma}$ Scheramplitude)

Koerzitivfeldstärke und Amplitude des Torsionsmomentes als Funktion der Zyklenzahl bei 5 verschiedenen Beanspruchungsamplituden von bis zum Bruch beanspruchten Proben wird in der Abb. 6.10 dargestellt. Die Koerzitivfeldstärke wurde im momentfreien Zustand ermittelt.

Zur Feineinstellung des spannungsarmen Zustandes wurde die hohe Empfindlichkeit des internen Induktionssignals gegenüber Torsionsspannungen ausgenutzt, d. h. es wurde jeweils bei minimalem internen Induktionssignal gemessen.

Die Amplitude des Torsionsmomentes als Funktion der Zyklenzahl durchläuft einen Maximalwert, der um so ausgeprägter und bei kleineren Zyklenzahlen erscheint, je größer die Beanspruchungsamplitude ist. Es findet zunächst eine Wechselverfestigung und dann bis zum Bruch eine Entfestigung durch Rißfortschritt statt.

Die Koerzitivfeldstärke steigt bis zum Bruch monoton an, und zwar um so stärker, je größer die Beanspruchungsamplitude ist, d. h. der Werkstoff erfährt magnetisch eine Verfestigung bis zum Bruch. Die Behinderung der Magnetisierungsprozesse wächst mit steigender Zyklenzahl aufgrund zunehmender Werkstoffschädigung. Die Zunahme der Steigung der $H_c(N)$ -Kurven vor dem Bruch deutet darauf hin, daß sich der Mechanismus der Behinderung der Magnetisierungsvorgänge ändert. Die Ursache dafür sind Mikro-

risse, die auch lichtmikroskopisch beobachtet wurden. Der Beginn der Rißvorgänge, d. h. Entstehung und Wachstum, könnte daher aus einer derartigen Anstiegsänderung erkannt werden.

Zur Beantwortung der Frage, wie frühzeitig sich die spätere Bruchstelle durch magnetische Messungen lokalisieren läßt, wurde der Verlauf der externen Signalamplitude als Funktion des Ortes längs der Drahtachse nach verschiedenen Zyklenzahlen N aufgezeichnet (Abb. 6.11).

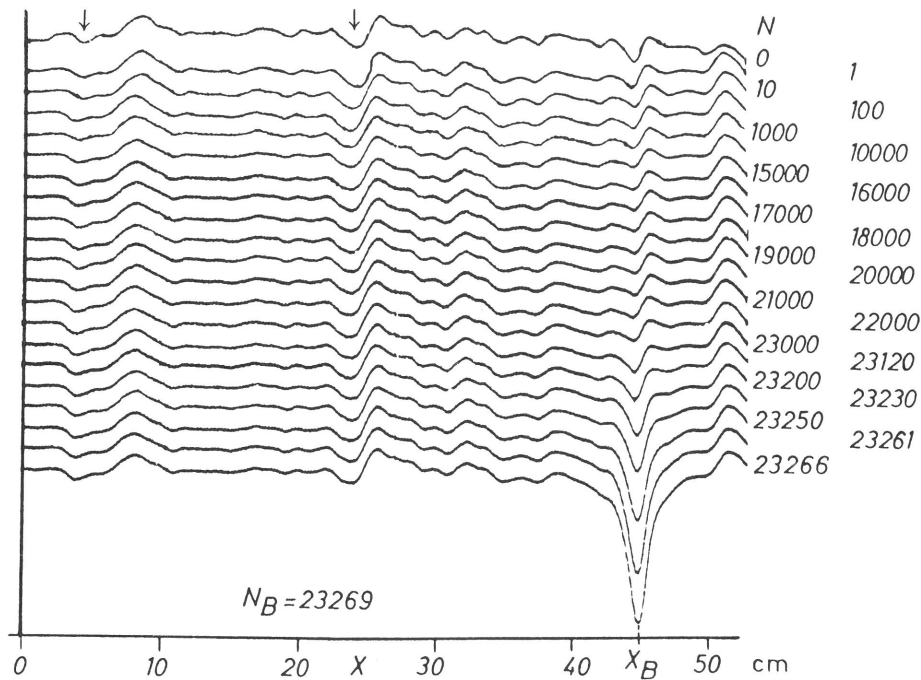


Abb. 6.11

Externe Induktionssignalprofile nach verschiedenen Zyklenzahlen einer mit $\hat{\gamma} = 2,4 \cdot 10^{-3}$ beanspruchten Probe längs der Drahtlänge x gemessen mit einer Spulenanordnung gemäß Abb. 4.3a

x_B = effektive Bruchstelle nach 23 266 Zyklen

↓ = vermutliche, weitere potentielle Bruchstellen mit Wirksamkeit nach noch höheren Zyklenzahlen

Dazu wurde die Spulenanordnung nach Abb. 4.3a benutzt. Die Magnetisierungsfrequenz betrug 31 Hz. Um eine Überdeckung der Signalprofile zu vermeiden, wurden diese untereinander in etwa gleichen Abständen aufgezeichnet. Der Absolutwert der Signalamplitude kann daher der Darstellung nicht entnommen werden. Als Ergebnis zeigt sich, daß eine deutliche Profiländerung an der späteren Bruchstelle erst wenige Zyklen vor dem Bruch auftritt. Da zu diesem Zeitpunkt die Bruchstelle bereits bei mikroskopi-

scher Betrachtung erkennbar ist, ist die starke Signaländerung hauptsächlich auf die entmagnetisierende Wirkung der feinen Risse in der Oberflächenschicht zurückzuführen. Der Vergleich der zur Zyklenzahl 0 und 1 gehörigen Profile zeigt, daß sich in der Umgebung der Bruchstelle bereits nach dem ersten Zyklus deutliche Änderungen zeigen. Das gibt zu der Vermutung Anlaß, daß diese Stelle aufgrund ihrer Kornorientierung und ihres Gefügestandes besonders zerrüttungsbruchgefährdet ist.

Die vergleichende Betrachtung des Signalprofils erlaubt die Annahme, daß auch an den 2 zusätzlich markierten Stellen potentiell ein Bruch hätte auftreten können. An der Stelle x_B waren die zum Bruch führenden Vorgänge deutlich schneller. Wesentlich dabei ist, daß nach dieser Darstellung potentielle Bruchstellen bereits ohne mechanische Beanspruchung erkannt werden könnten.

Eine Meßanordnung nach Abb. 4.3b läßt theoretisch eine höhere Auflösung erwarten, weil bei ihr der Luftspalt zwischen den Polschuhen kleiner gehalten werden kann als die Länge der Meßspule gemäß Abb. 4.3a. Andererseits wird mit der Anordnung nach Abb. 4.3b nur ein austretendes Streufeld gemessen, während mit Abb. 4.3a die axiale Komponente der Magnetisierungsänderung erfaßt wird. Diese dürfte meist größer sein.

Die Ergebnisse der Untersuchungen mit der Meßanordnung nach 4.3b zur Erfassung der Veränderung austretender Streufelder sind in Abb. 6.13 dargestellt.

Die Hüllkurven der hellen Signalprofile entsprechen den Kurven der Abb. 6.11. Das Streufeldgebirge im Ausgangszustand kommt zustande durch die unterschiedlichen Kornorientierungen und geometrische Unregelmäßigkeiten auf der Oberfläche längs des Drahtes sowie durch unterschiedliche Spannungen nach Betrag und Richtung. Ändert sich einer dieser Einflußfaktoren während der Wechselbeanspruchung, so wird dadurch das Streufeldgebirge gegenüber dem Ausgangszustand verändert.

Nach 100 Beanspruchungszyklen ist eine deutliche Profiländerung zu erkennen, die sich über einen größeren Probenbereich erstreckt. Nach 60 000 Zyklen ist an der mit N_{B1} im oberen Ausgangsprofil bezeichneten Stelle eine deutlich erkennbare Spitze

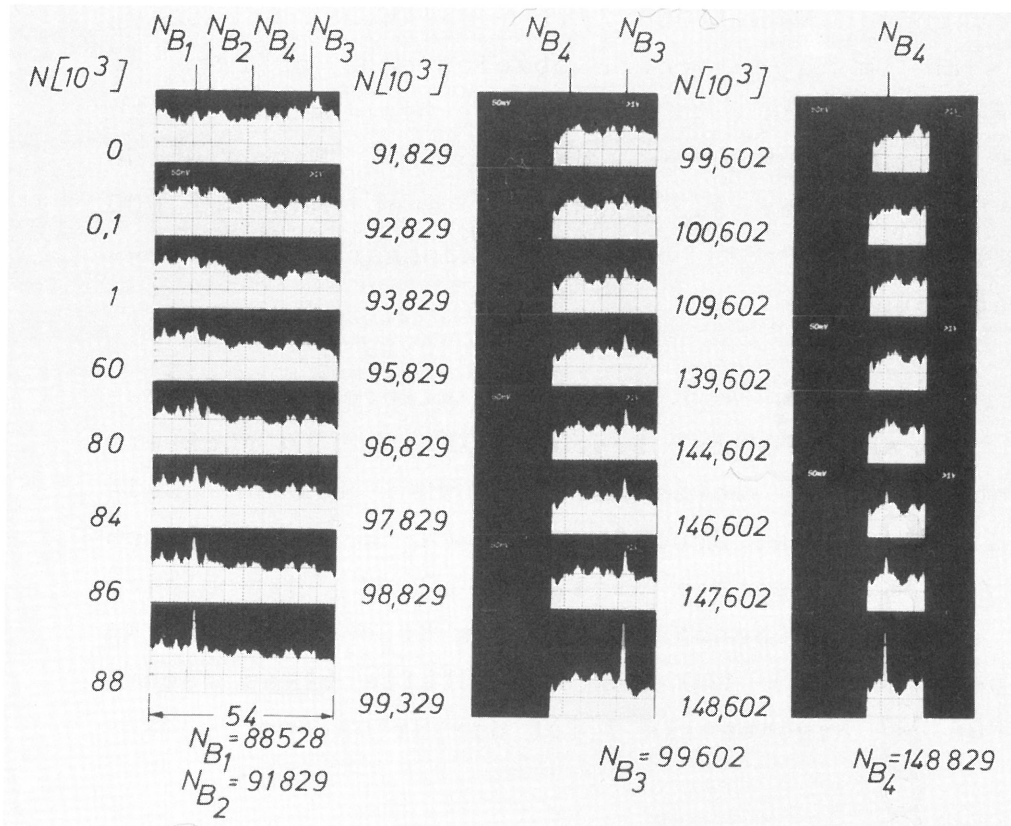


Abb. 6.12

Externe Induktionssignalprofile nach verschiedenen
 Zyklenzahlen einer mit $\hat{\gamma} = 1,2 \cdot 10^{-3}$ beanspruchten
 Drahtprobe, gemessen mit einer Spulenanordnung
 gemäß Abb. 4.3b

← 54 → = erfaßte Meßlänge [cm]

aus dem Gebirge herausgewachsen. Die Höhe dieser Spitze wächst
 mit steigender Zyklenzahl bis nach $N_{B_1} \approx 88\,000$ Zyklen die Probe
 an dieser Stelle bricht. Die Bruchstelle kündigt sich hier
 bereits nach 68 % der Bruchlastspielzahl durch eine lokale
 Profiländerung an.

Nach dem ersten Bruch wurde das längere Probenstück mit gleicher
 Scheramplitude weiterbeansprucht. Der zweite Bruch erfolgte nahe
 der Einspannstelle etwa 3000 Zyklen später. Da der Trägerschlitten
 für die Meßsonde nicht so nah an die Einspannstelle heran-
 gefahren werden konnte, wurde diese 2. Bruchstelle profilmäßig
 nicht erfaßt.

Die nach dem zweiten Bruch vorliegende längere Restprobe wurde
 nun bis zum 3. Bruch weiterbeansprucht, der nach $N_{B_3} \approx 100\,000$
 Zyklen eintrat. Diese Bruchstelle ist bereits 1000 Zyklen nach

dem 2. Bruch zu erkennen. Nach 2000 Zyklen der Weiterbeanspruchung wurde die sich im Signalprofil abzeichnende spätere 3. Bruchstelle lichtmikroskopisch untersucht. Die Oberfläche zeigte bereits deutliche Verformungsspuren. Nach dem 3. Bruch wurde wieder weiterbeansprucht. Der 4. Bruch ist erst nach 40 000 Zyklen Weiterbelastung am Profilverlauf erkennbar, also etwa 9000 Zyklen vor dem Bruch.

In kritischer Betrachtung von Abb. 6.12 ist allerdings festzustellen, daß sich die auftretenden Bruchstellen nur in rückverfolgender Betrachtung etwas vorzeitig erkennen lassen. Beispielsweise sind links von der Bruchstelle 1 ($N_B = 88\ 000$) noch bei $N = 60\ 000$ Zyklen 2 weitere Stellen markant, die gleich "bruchverdächtig" aussehen. Ebenso ist an der Bruchstelle 4 ($N_B = 149\ 000$) noch bei fast $N = 140\ 000$ eine Stelle etwas rechts davon markanter. Für die Bruchstelle 3 ist die Situation tendenziell gleich.

Im Vergleich der beiden Meßanordnungen muß also festgestellt werden, daß zumindest bei den hier vorliegenden Untersuchungen

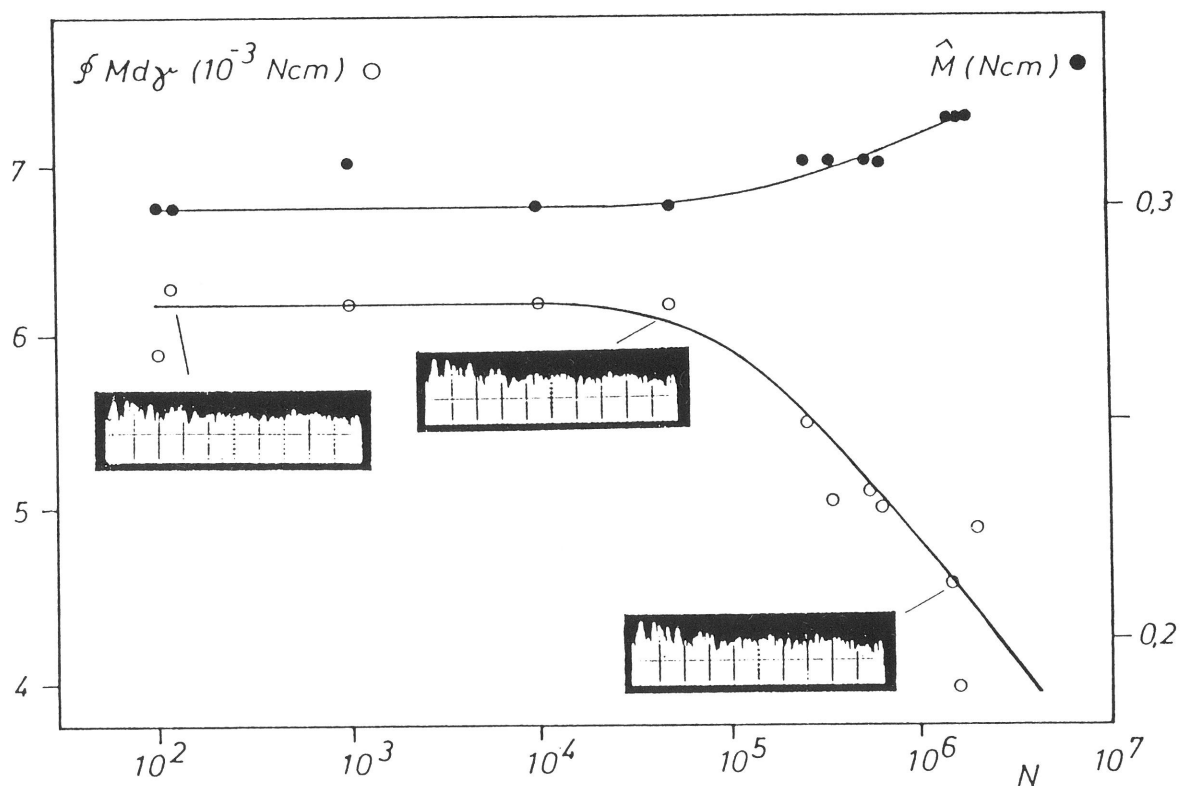


Abb. 6.13

Verformungsarbeit am Einheitsvolumen pro Lastwechsel $\phi M d\gamma$ und Momentamplitude \hat{M} als Funktion der Zyklenzahl. Scheramplitude $\hat{\gamma} = 6,6 \cdot 10^{-4}$

an 1 mm dickerem Draht die Erfassung der axialen Komponente der Magnetisierungsänderung mittels circularer Spule gemäß Abb. 4.3a eine bessere Früherkennung verspricht als die Erfassung der Änderung der magnetischen Streufelder gemäß Abb. 4.3b.

Natürlich ist noch denkbar, daß die technische Ausführung der beiden Meßanordnungen jeweils verfeinert wird. Es ist aber sehr fraglich, ob dadurch die Messung der Streufelder im Sinne einer Früherkennung an dünnen Drähten stärker verbessert werden kann als die Messung der axialen Komponente des Magnetfeldes im Draht. Dies ergibt sich aus Abb. 6.13.

Dort wurde die Verformungsarbeit am Einheitsvolumen pro Lastwechsel $\frac{1}{2} M d \gamma$ und die Momentamplitude \hat{M} als Funktion der Zyklenzahl bei relativ kleiner Scheramplitude ermittelt (Abb. 6.13). Die Aufnahme der mechanischen Hystereseschleifen erfolgte bei isothermer Versuchsführung. Als magnetische Daten wurde das Streufeldprofil nach verschiedenen Beanspruchungszyklenzahlen aufgezeichnet.

Die aus der Zunahme der Momentamplitude bei gleichzeitiger Abnahme der Schleifenfläche ablesbare Verfestigung hat keinen Einfluß auf das Streufeldprofil. Das Streufeldprofil bleibt im wesentlichen bis zum Abbruch des Versuchs nach $N = 2 \cdot 10^6$ Zyklen unverändert. Daraus läßt sich der Schluß ziehen, daß mit der Streufeldsonde lediglich Vorgänge erfaßt werden, die zu einer erheblichen Änderung der geometrischen Gegebenheiten der Probenoberfläche führen wie z. B. makroskopische Risse.

Die Erfassung größerer makroskopischer Risse an Bauteilen über austretende Streufelder ist eine technisch übliche und bewährte Methode. Hier ist zu bedenken, daß der Probenquerschnitt des benutzten Drahtes mit 1 mm Durchmesser sehr gering ist. Über die Erfassung austretender Streufelder nachgewiesene makroskopische Risse nehmen bereits einen sehr erheblichen Teil des Probenquerschnittes ein. An kompakteren Bauteilen oder Proben können die Verhältnisse von nachweisbarer Rißtiefe zu Teilgröße günstiger sein, wenn angenommen wird, daß die absolute Rißgröße für das magnetische Signal bestimmend ist.

7. Zusammenfassung

In wechselbeanspruchten metallischen Werkstoffen laufen bei hinreichend großen Beanspruchungsamplituden innerhalb eines jeden Lastwechsels Verformungsvorgänge ab, die irreversible Veränderungen im Gefügebau bewirken. Da das magnetische Verhalten ferromagnetischer Werkstoffe empfindlich durch Störungen des Gefüges beeinflusst werden kann, sollte der Ferromagnetismus als Indikator für Zerrüttungsvorgänge meßtechnisch ausgenutzt werden können.

Die Verfolgung der Zusammenhänge zwischen dem Magnetisierungsverhalten und einer fortschreitenden Zerrüttung von Reineisenproben wurde hier in zwei Schritten untersucht. Im ersten Schritt wurden 100 nm dünne Fe-Aufdampfschichten als Versuchsobjekte gewählt, deren magnetische Bereichsstruktur besonders einfach ist. Die magnetischen Elementarvorgänge sind dadurch dem Experiment zugänglich.

Die Versuchsdurchführung erfolgte mit einer Apparatur, mit der die Proben im Vakuum durch Bedampfen eines Plexiglasträgers hergestellt, mechanisch parallel zur Schichtebene Zug-Druckbeansprucht werden und magnetooptisch und elektrisch das magnetische Verhalten ermittelt wird.

Nachdem mit den Schichtexperimenten die notwendigen Voraussetzungen für die Ausnutzung des Ferromagnetismus als Indikator für Zerrüttungsvorgänge geschaffen wurden, indem grundlegende Vorgänge erkannt wurden, befaßt sich der zweite Untersuchungsschritt mit der Verallgemeinerung der Ergebnisse. Mit diesem Schritt wurde die Schaffung der hinreichenden Voraussetzungen für die Entwicklung eines praktikablen Prüfverfahrens zur Verfolgung von Zerrüttungsvorgängen eingeleitet. Dazu wurden Fe-Drahtproben von 1 mm Durchmesser und 700 mm Länge untersucht, die durch Wechseltorsion zerrüttet wurden. Die Verfolgung des Magnetisierungsverhaltens dieser Massivproben erfolgt mit induktiven Verfahren. Bezüglich des erfaßten Probenvolumens kommen zwei Meßmethoden zur Anwendung, nämlich Integralmessung und Selektivmessung. Beim Integralverfahren wird das gesamte Probenvolumen erfaßt. Es liefert Absolutwerte unter Verzicht auf Ortsauflösung. Bei der Selektivmessung wird über einen kleinen Volumenbereich gemittelt, so daß durch Verschieben der Meßsonde

längs der Drahtachse das lokale relative Magnetisierungsverhalten der Probe ermittelt werden kann. Die Selektivmessung ist geeignet zum Nachweis beanspruchungsbedingter lokaler Eigenschaftsänderungen der Probe. Sie liefert ein Bild des Schädigungszustandes entlang der Probenlänge.

Die Ergebnisse der Schicht- und Drahtexperimente haben gezeigt, daß sich die beanspruchungsbedingte Änderung des Werkstoffgefüges vor Auftreten der makroskopischen Schädigung im magnetischen Verhalten widerspiegelt. Wie die Drahtexperimente gezeigt haben, ändern sich einige magnetische Kennwerte ebenso empfindlich wie mechanische Kenngrößen. Im Hinblick auf eine praktische Nutzenanwendung des magnetischen Meßverfahrens, nämlich die Früherkennung von Zerrüttungsschädigungen, sind die magnetischen Kennwerte im allgemeinen leichter zerstörungs- und störungsfrei zugänglich als mechanische Kenndaten.

Aus meßtechnischer Sicht ist der innere Induktionseffekt besonders erwähnenswert, da zur Signalabnahme lediglich elektrische Kontakte notwendig sind, die sich in der Praxis auch an geometrisch komplizierten ferromagnetischen Bauteilen bequem anbringen lassen.

Das aus den Schicht- und Drahtexperimenten gewonnene Bild des pauschalen Magnetisierungsverhaltens im Verlauf der Zerrüttung läßt sich folgendermaßen zusammenfassen:

Die Koerzitivfeldstärke steigt monoton mit der Zyklenzahl. Nach Überschreiten der Phase des Rißbeginns und Rißfortschritts vergrößert sich der Anstieg dieser Meßgröße. Die Phase der Rißbildung ist damit aus dem H_C -N-Verlauf erkennbar. Der anfangs flachere H_C -Anstieg ist auf verformungsinduzierte innere mechanische Spannungen, der folgende steilere auf starke Schädigungen wie Risse, zurückzuführen. Das bei dünnen Schichten auftretende Maximum im H_C -N-Verlauf tritt bei massivem Material nicht auf. Dies ist ein spezielles Verhalten der Schichten auf einem Träger, die auch dann weiter beansprucht werden können, wenn Risse durch die Probe gehen, so daß sehr hohe Verformungsgrade erreicht werden.

Die Suszeptibilität, d. h. die Flankensteilheit der magnetischen Hystereseschleife, nimmt monoton mit der Zyklenzahl ab. Gleichbedeutend damit ist der fallende Verlauf des externen Induktionssignals bei Drahtproben. Die Ursache dafür ist die zunehmende Inhomogenität des Werkstoffs.

Durch die selektive Meßmethode bei Drahtproben mit beweglicher Sonde wurde gezeigt, daß sich das Magnetisierungsverhalten lokal ändert.

Die Früherkennbarkeit der späteren Bruchstellen ist von der verwendeten Meßmethode abhängig. Für den hier vorliegenden Fall des 1 mm dicken Eisendrahtes lassen die vom Draht ausgehenden Induktionssignale, die extern von einer circular um den Draht angeordneten Meßspule als Sonde erfaßt werden, praktisch von Anfang an potentielle spätere bruchbegünstigende Orte erkennen.

Dagegen läßt sich bei einer polschuhartigen Meßsonde zur Erfassung der an Rissen aus dem Draht austretenden magnetischen Streufelder die spätere Bruchstelle nur in günstigen Fällen etwa nach 60 % der zum Bruch führenden Lastspielzahl erkennen. Offensichtlich ist die Erfassung makroskopischer Risse über austretende Streufelder erst bei Riß-tiefen wirksam, die schon einen sehr großen Anteil des kleinen Drahtquerschnittes ausmachen.

8. Ausblick

Aus der vorgelegten Arbeit ergibt sich, daß der erwartete Zusammenhang zwischen der mechanischen Zerrüttung von Eisen durch Schwingbeanspruchung und der Änderung seiner magnetischen Eigenschaften besteht und physikalisch und technologisch nachgewiesen ist und genutzt werden kann. Meßtechnische Möglichkeiten wurden an Modellversuchen mit aufgedampften Eisenschichten und dünnen Drähten aufgezeigt. Prinzipiell kommen dafür das Barkhausen-Rauschen, die Erfassung von Induktionssignalen auf der Basis von magnetischen Komponenten in einer Bauteilrichtung und die Erfassung austretender Streufelder in Frage.

Letztere war zwar bei den dünnen Drähten nicht sonderlich erfolgreich, könnte aber bei Bauteilen größerer Abmessungen erheblich besser sein, weil dort die für eine meßbare Änderung der Streufelder notwendige makroskopische Rißtiefe einen sehr viel kleineren Anteil am Bauteilquerschnitt bedeutet und damit solche Risse in einem sehr frühen Stadium des Rißwachstums erkannt werden könnten.

Die gemäß Abb. 6.11 im Hinblick auf die Früherkennung von potentiellen Rissen erfolgreiche Erfassung der axialen Komponente des magnetischen Flusses mittels einer die Drahtprobe umschließenden Spule dürfte in der Praxis bei unregelmäßig geformten Bauteilen und bei kleineren Verhältnissen von Probenlänge zu Probendicke größere Schwierigkeiten bereiten.

Dank

Der ERP-Stelle des Landes Berlin, der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung und der Technischen Fachhochschule Berlin sei für die Förderung dieser Forschungsarbeit herzlich gedankt.

Literatur

- /1/ Kochendörfer, A.
Die Bruchvorgänge in Experiment und Theorie, IV
Z. Metallkunde 62 (1971), 255/69
- /2/ Sander, H.
Magnetisches Verhalten dünner Eisenschichten bei mecha-
nischer Wechselbeanspruchung
BAM-Forschungsbericht 54, Oktober 1978
- /3/ Munz, D.; K. Schwalbe und P. Mayr
Dauerschwingverhalten metallischer Werkstoffe
Werkstoffkunde Bd. 3, Hrsg. E. Macherauch und V. Gerold,
Vieweg 1971
- /4/ Frost, N. E.; K. J. Marsh und L. P. Pook
Metal Fatigue
Oxford University Press 1974
- /5/ Thomson, N. und N. J. Wadsworth
Metal Fatigue
Adv. in Phys. 7 (1958), 72/169
- /6/ Mott, N. F.
Behaviour of Metals under Reversed Stresses
in Dislocations and and Mechanical Properties of Metals
ed. by J. C. Fisher u. a., Wiley, New York 1957, 458/76
- /7/ Macherauch, E.
Das Ermüdungsverhalten metallischer Werkstoffe
Härterei-Techn. Mitt. 22 (1967), 103/15
- /8/ Forsyth, P. J. E.
The Physical Basis of Metal Fatigue
Blackie u. Son Ltd., London, Glasgow, 1969
- /9/ Klaffke, D. und W.-W. Maennig
Deformationsverhalten von Rein- und Reinstaluminium sowie
Cu 99.9 und St37 bei Biegewechselbeanspruchung im
Rasterelektronenmikroskop
BAM-Forschungsbericht 76, November 1980

- /10/ Hellenthal, W.
Schichtdicken- und Temperaturabhängigkeit der Koerzitivkraft von dünnen Nickelaufdampfschichten, gemessen mittels der magnetischen Widerstandsänderung
Z. Naturforschg. 14a (1959), 722/727
- /11/ Kranz, J. und A. Hubert
Die Möglichkeiten der Kerr-Technik zur Beobachtung magnetischer Bereiche
Z. angew. Phys. 15 (1963), 220/32
- /12/ Lambeck, M.
Measuring Mechanical Properties of Ferromagnetic Materials by Internal Induction
J. Magnetism and Magnetic Materials 2 (1976), 300/02
- /13/ Kohlrausch, F.
Praktische Physik 2
Stuttgart, B. G. Teubner, 1968
- /14/ Chopra, K. L.
Thin Film Phenomena
New York, Mc Graw-Hill 1969
- /15/ Gangulee, A. and A. P. Basu
Statistical calculation of dislocation movements in thin films
J. Appl. Phys. 44 (1973), 2032/39
- /16/ Lesnik, A. G. and L. M. Sandler
An Investigation of the Plastic Deformation of Thin Polycrystalline Permalloy Films
Fiz. metal. metalloved 31 (1971), 1220/29
- /17/ Gangulee, A.
Strain-Relaxation in Thin Films on Substrates
Acta Metallurgica 22 (1974), 177/83

Bisher erschienene Forschungsberichte der BAM

- Nr. 1/September 1968
Forschung und Entwicklung in der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM)
Rechenschaftsbericht für den Bundesminister für Bildung und Wissenschaft
- Nr. 2/Juli 1970 (vergriffen)
Zum Problem des Feuchtigkeitsschutzes von Dehnungsmeßstreifen und Halbleitergebern
von Dr.-Ing. Götz Andrae
- Nr. 3/September 1970 (vergriffen)
Über das mechanische Verhalten von Aluminium-Stahl-Freileitungsseilen als Beispiel für Verbundbauteile
von Dr.-Ing. Josef Ziebs
- Nr. 4/Dezember 1970 (vergriffen)
Formbeständigkeit von Holz gegenüber Feuchtigkeit — Grundlagen und Vergütungsverfahren
von Dr. rer. nat. Arno Burmester
- Nr. 5/März 1971
Die Bedeutung der Netzstellenart und der Netzwerkkettendichte für die Beschreibung der elastischen Eigenschaften und des Abbaus von elastomeren Netzwerken
von Dr. rer. nat. Norbert Steiner
- Nr. 6/April 1971
Zur Problematik der Prüfung und Beurteilung des Luftschallschutzes von Bauelementen bei unterschiedlichen Einbaubedingungen
von Prof. Dr.-Ing. Paul Schneider
- Nr. 7/Juli 1971
Chromatographie und chemische Konstitution — Untersuchungen über den Einfluß der Struktur organischer Verbindungen auf das Verhalten bei der Dünnschicht-Chromatographie
von Dr.-Ing. Hans-Joachim Petrowitz
- Nr. 8/November 1971
Zum Spannungs-Dehnungs-Verhalten von Baustählen bei Wechselbeanspruchung
von Dr.-Ing. Helmut Veith
- Nr. 9/November 1971
Untersuchung über die sichernde Wirkung poröser Massen in Acetylenflaschen
von Dr.-Ing. Karl-Heinz Möller
- Nr. 10/Januar 1972
Untersuchungen über die Korngrößenbestimmung mit Ultraschall zur Entwicklung einer für die Praxis geeigneten zerstörungsfreien Meßmethode
von Dr.-Ing. Dietmar Aurich und Prof. Dr. phil. Erich Martin
- Nr. 11/Februar 1972
Beitrag zur Kenntnis der Schnittriefenbildung und Schnittgütwerte beim Brennschneiden
von Dr.-Ing. Hans-Joachim Krause
- Nr. 12/Mai 1972
Über Veränderungen von Nylon-6-Fasern beim Texturieren
von Dir. u. Prof. Dr. rer. nat. Hubert Feuerberg
- Nr. 13/Juni 1972
Festkörpergleitreibung und Verschleiß von Eisen, Kobalt, Kupfer, Silber, Magnesium und Aluminium in einem Sauerstoff-Stickstoff-Gemisch zwischen 760 und $2 \cdot 10^{-7}$ Torr
von Dr.-Ing. Karl-Heinz Habig (Berichter), Prof. Dr.-Ing. Kurt Kirschke, Dr.-Ing. Wolfgang-Werner Maennig und Dipl.-Phys. Harald Tischer
- Nr. 14/Juli 1972
Untersuchungen zur Amplitudenabhängigkeit der Ultraschalldämpfung in Metallen bei 20 kHz
von Eberhard Fischer
- Nr. 15/August 1972
Studie und Probleme der chemischen Edelmetall-Analyse
von Dir. u. Prof. Dr.-Ing. Heinz Pohl
- Nr. 16/August 1972
Über Ausführung und Aussagefähigkeit des Normbrandversuches nach DIN 4102, Blatt 2, im Hinblick auf die Nachbildung natürlicher Schadensfeuer
von Dr.-Ing. Erwin Knublauch
- Nr. 17/August 1972
Aktivierungsanalyse mit schnellen Neutronen, Photonen und geladenen Teilchen
von Dr.-Ing. Peter Reimers
- Nr. 18/Januar 1973
Das Spröbruchverhalten des Baustahles R St 37-2 N in geschweißten Konstruktionen, dargestellt mit Hilfe der Methode des Temperaturvergleiches
von Dr.-Ing. Werner Struck
- Nr. 19/Januar 1973
Die Bestimmung von Grenzflächentemperaturen bei tribologischen Vorgängen
Literaturrecherche von Dipl.-Phys. K. Kaffanke und Dr.-Ing. H. Czichos
- Nr. 20/April 1973
Brandrisiko elektrischer Leitungen und Installationen in Wänden
von Dipl.-Ing. R. Rudolphi
- Nr. 21/Juli 1973
Die kontinuumsmechanische Erfassung des zeitlichen Ablaufs der elastisch-plastischen Dehnungen bei der Zerrüttung
Literaturrecherche von Dipl.-Phys. D. Klaffke und Dr.-Ing. W. Maennig
- Nr. 22/Juli 1973
Untersuchungen für ein Prüfverfahren zur Bemessung der Brandschutzbekleidung von Stahlstützen
von Dipl.-Ing. R. Rudolphi und Dr.-Ing. E. Knublauch
- Nr. 23/November 1973
Reichs- und preußische Landesanstalten in Berlin Ihre Entstehung und Entwicklung als außeruniversitäre Forschungsanstalten und Beratungsorgane der politischen Instanzen
von Prof. Dr. rer. nat. habil. Walter Ruske
- Nr. 24/November 1973
Das Brandverhalten von Holzstützen unter Druckbeanspruchung
von Dipl.-Ing. J. Stanke, Ing. grad. E. Klement und Dipl.-Ing. R. Rudolphi
- Nr. 25/Dezember 1973
Über das Brandgeschehen vor der Fassade eines brennenden Gebäudes unter besonderer Berücksichtigung der Feuerbeanspruchung von Außenstützen
von Dr.-Ing. E. Knublauch
- Nr. 26/August 1974
Der Elektronen-Linearbeschleuniger der BAM — Eigenschaften und erste Anwendungen —
von Dipl.-Ing. P. Jost, Dr.-Ing. P. Reimers und Dr.-Ing. P. Weise
- Nr. 27/August 1974
Untersuchungen zum Schallfeld von Winkelprüfköpfen für die Materialprüfung mit Ultraschall
von Dr.-Ing. Hermann Wüstenberg
- Nr. 28/August 1974
Zum Ablauf von Gasexplosionen in mit Rohrleitungen verbundenen Behältern
von Prof. Dr. rer. nat. Hans-Jürgen Heinrich
- Nr. 29/August 1974
Theorie der dissipativen Luftschalldämmung bei einem idealisotropen porösen Material mit starrem Skelett für senkrechten, schrägen und allseitigen Schalleinfall
von Prof. Dr.-Ing. P. Schneider
- Nr. 30/September 1974 (vergriffen)
The Application of Systems Thinking and Systems Analysis to Tribology
von Dr. Horst Czichos und Dr. Geert Salomon
- Nr. 31/August 1975
Untersuchungen zur Klärung des Verhaltens thermoplastischer Kunststoffe bei Wechseldehnungsbeanspruchung
von Dr.-Ing. Gerhard Fuhrmann
- Nr. 32/September 1975
Ein thermo-elektrisches Netzwerkverfahren zur Berechnung stationärer Temperatur- und Wärmestromverteilungen mit Anwendungsbeispielen
von Dipl.-Ing. Reinald Rudolphi und Dr.-Ing. Bernhard Böttcher
- Nr. 33/November 1975
Die Bestimmung der Temperaturleitfähigkeit von Baustoffen mit Hilfe eines nichtstationären Meßverfahrens
von Dipl.-Ing. Armin Wagner, Dipl.-Phys. Gerhard Kieper und Dipl.-Ing. Reinald Rudolphi
- Nr. 34/Januar 1976 (vergriffen)
Untersuchungen zur Vergütung von Holzwerkstoffen
von Dipl.-Forsting. Dr. rer. sylv. Hans-Joachim Deppe
- Nr. 35/Januar 1976
Der Widerstand von Platten, die als Beplankungsmaterial leichter Wände verwendet werden, gegenüber dem Aufprall harter Körper — Vorschlag für ein Prüfverfahren —
von Dipl.-Ing. Ernst Limberger
- Nr. 36/Januar 1976 (vergriffen)
Wärme- und Feuchtigkeitsleitung in Beton unter Einwirkung eines Temperaturgefälles
von Dipl.-Ing. Jürgen Hundt
- Nr. 37/Februar 1976
Die stoßartige Beanspruchung leichter, nichttragender Bauteile durch einen mit der Schulter gegenprallenden Menschen — Vorschlag für ein Prüfverfahren —
von Dr.-Ing. Werner Struck
- Nr. 38/Juni 1976
Verschleißuntersuchungen an gas-, bad- und ionisiertem Stahl 42 CrMo 4
von Dr.-Ing. Karl-Heinz Habig
- Nr. 39/Juni 1976
Untersuchung der viskoelastischen Eigenschaften von Flüssigkeiten (mit nicht-Newtonschem Fließverhalten) insbesondere bei höherer Scherbeanspruchung
von Prof. Dr.-Ing. K. Kirschke und Dipl.-Phys. G. Kempf
- Nr. 40/Juni 1976
Zum Untergrundabzug bei energiedispersiven Spektren nach verschiedenen Verfahren
von Dr. rer. nat. H. Hantsche
- Nr. 41/Okttober 1976
Optische Eigenschaften cholesterinischer Flüssigkeiten
von Dr. rer. nat. Bernhard Böttcher
- Nr. 42/Okttober 1976
Ermittlung der Mindestzündenergie brennbarer Gase in Mischung mit Luft
von Dr.-Ing. Siegmund Dietlen
- Nr. 43/Okttober 1976
Das Spröbruchverhalten geschweißter Bauteile aus Stahl mit zäh-sprödem Übergang im Bruchverhalten, dargestellt mit Hilfe der Methode des Temperaturvergleiches
von Dr.-Ing. Werner Struck
- Nr. 44/November 1976
Berechnung von räumlichen, linear elastischen Systemen, die aus finiten Stab- und Balkenelementen zusammengesetzt sind, unter Verwendung des Programms „Stab-Werk“
von Dipl.-Ing. W. Matthees
- Nr. 45/Dezember 1976
Untersuchung des Elektrodenverhaltens im Vakuum aufgedampfter Metallschichten
von Dr.-Ing. W. Paatsch
- Nr. 46/Mai 1977 (vergriffen)
Versuchsergebnisse zur Festigkeit und Verformung von Beton bei mehraxialer Druckbeanspruchung Results of Test Concerning Strength and Strain of Concrete Subjected to Multiaxial Compressive Stresses
von Dipl.-Ing. Gerald Schickert und Dipl.-Ing. Helmut Winkler
- Nr. 47/Juni 1977
Bautechnische Einflüsse auf die Tragfähigkeit von Kunststoffdübeln für Fassadenbekleidungen
von Dr.-Ing. Arno Plank
- Nr. 48/Oktober 1977
Setzung von Fundamenten infolge dynamischer Last, angewendet auf die Fundamente einer geplanten Schnellbahn
von Dr.-Ing. U. Holzlöhner
- Nr. 49/Dezember 1977
Untersuchungen zur Anwendung von Mikrowellen in der zerstörungsfreien Prüfung
von Dr.-Ing. Günther Wittig
- Nr. 50/Juni 1978 (vergriffen)
Zur Meßtechnik für die Sicherheitsbeurteilung und -überwachung von Spannbeton-Reaktordruckbehältern
von Prof. Dipl.-Phys. Norbert Czaika, Dipl.-Phys. Norbert Mayer, Dipl.-Ing. Claus Amberg, Dipl.-Ing. Götz Magiera, Dr.-Ing. Götz Andrae und Dipl.-Ing. Winfried Markowski
- Nr. 51/Juni 1978
Auswirkung von chemischen und physikalisch-technologischen Einflußfaktoren auf das Beständigkeitsverhalten von Oberflächenbeschichtungen auf der Basis von Reaktionsbeschichtungsstoffen
von Dr. rer. nat. J. Sickfeld
- Nr. 52/August 1978
Zum Einfluß der Gleitgeschwindigkeit auf das tribologische Verhalten von Werkstoffen hoher Härte bei reiner Festkörperreibung
von Dr.-Ing. Aleksandar Tomov
- Nr. 53/Oktober 1978
Bemessung und Optimierung beheizbarer Straßen- und Brückenbeläge
von Rolf Günter Rohrmann und Reinald Rudolphi

- Nr. 54/Oktober 1978
Magnetisches Verhalten dünner Eisenschichten bei mechanischer Wechselbeanspruchung
von Dr.-Ing. Harro Sander
- Nr. 55/November 1978
Beobachtung und Orientierungsbestimmung der Oberflächenkristallite polykristalliner 99,999 %-Al-Proben bei Biegewechselbeanspruchung
von Dr.-Ing. Dieter Klaffke
- Nr. 56/Januar 1979
Stabilität von Sandwichbauteilen
von Dipl.-Ing. W. Brünner und Prof. Dr.-Ing. C. Langlie
- Nr. 57/März 1979
Untersuchungen an Prüfmitteln für die Magnetpulverprüfung
Investigations on Inspection-Media for Magnetic-Particle-Testing
von Dipl.-Ing. Meinhard Stadthaus
- Nr. 58/März 1979
Ermittlung des Bauteilwiderstandes aus Versuchsergebnissen bei vereinbartem Sicherheitsniveau
von Dr.-Ing. Werner Struck
- Nr. 59/Juli 1979
Ermittlung der Verformungen biegebeanspruchter Stahlbetonbalken mit der Methode der Finiten Elemente unter besonderer Berücksichtigung des Verbundes zwischen Beton und Stahl
von Dr.-Ing. Günther Plauk
- Nr. 60/August 1979
Untersuchungen zur Erfassung der Kaltformbarkeit von Feinblechen beim Strecken
von Dr.-Ing. H. Spreckelmeyer, Dr.-Ing. R. Helms und Dr.-Ing. J. Ziebs
- Nr. 61/Dezember 1979
Beschreibung von Problemen der höheren Farbmetrik mit Hilfe des Gegenfarbensystems
von Dr. Klaus Richter
- Nr. 62/Dezember 1979
Geomagnetobiologisch bedingter Zusammenhang zwischen der Fraßaktivität von Termiten und der Zahl der Sterbefälle
von Dir. u. Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Gerisch und Prof. Dr. habil. Dr. h. c. Günther Becker
- Nr. 63/Dezember 1979
Untersuchungen an Stopfbuchsen von Ventilen und Schiebern für Gase
von Dipl.-Ing. E. Behrend und Dipl.-Ing. J. Ludwig
- Nr. 64/Februar 1980
Ermittlung der Schwingungserregung beim Betrieb schienengebundener Fahrzeuge in Tunneln sowie Untersuchung des Einflusses einzelner Parameter auf die Ausbreitung von Erschütterungen im Tunnel und dessen Umgebung
von Dr.-Ing. Werner Rücker
- Nr. 65/Februar 1980
Untersuchungen über den Einfluß des Spannungszustandes auf bruchmechanische Kennwerte
von Dr.-Ing. Peter Schmidt, Dr.-Ing. Dietmar Aurich, Dr.-Ing. Rolf Helms, Dr.-Ing. Helmut Veith und Dr.-Ing. Josef Ziebs
- Nr. 66/Mai 1980
Auswirkung von Druckentlastungsvorgängen auf die Umgebung
von Dr. rer. nat. Martin Hattwig
- Nr. 67/Mai 1980
Beitrag zur dynamischen Analyse von vorgespannten und vorbelasteten Feder-Masse-Systemen mit veränderlicher Gliederung unter stoßartig Beanspruchung
von Dr.-Ing. Wolfgang Matthees
- Nr. 68/Mai 1980
Oberflächenmeßverfahren unter besonderer Berücksichtigung der Stereomeßtechnik.
Entwicklung eines vollzentrischen Präzisions-Goniometers
von Dr. rer. nat. Dieter Petersohn
- Nr. 69/Juni 1980
Untersuchungen zur Integrität des Liners von Reaktorsicherheitshüllen (Containments) in Stahlbeton- und Spannbetonbauweise
von Dr.-Ing. Frank Buchhardt und Dipl.-Ing. Peter Brandl
- Nr. 70/August 1980 (vergriffen)
Schwellenwerte beim Betondruckversuch
von Dr.-Ing. Gerald Schickert
- Nr. 71/August 1980
Untersuchungen über durch den Boden gekoppelte dynamische Wechselwirkungen benachbarter Kernkraftwerksbauten großer Masse unter seismischen Einwirkungen
von Dr.-Ing. Wolfgang Matthees und Dipl.-Ing. Götz Magiera
- Nr. 72/September 1980
Übertragbarkeit der Ergebnisse von Brandprüfungen am Beispiel von Stahl- und Holzstützen
von Dr.-Ing. Reinald Rudolphi
- Nr. 73/November 1980
Vergleichende Untersuchungen zum Tragverhalten von Klemmkupplungen für Stahlrohrgerüste nach bestehenden deutschen Prüfvorschriften und geplanten europäischen bzw. internationalen Prüfnormen
von Dipl.-Ing. Peter Wegener
- Nr. 74/November 1980
ALGOL-Computerprogramm zur Berechnung zweidimensionaler instationärer Temperaturverteilungen mit Anwendungen aus dem Brand- und Wärmeschutz
von Dr.-Ing. Reinald Rudolphi und Dipl.-Inform. Renate Müller
- Nr. 75/November 1980
Beitrag zur Kenntnis des zeitlichen und örtlichen Druckverlaufs bei der plötzlichen Entlastung unter Druck stehender Behälter und Behälterkombinationen
von Dir. u. Prof. Dr. Hans-Jürgen Heinrich
- Nr. 76/November 1980
Deformationsverhalten von Rein- und Reinstaluminium sowie Cu 99,9 und St 37 bei Biegewechselbeanspruchung im Rasterelektronenmikroskop
von Dr.-Ing. Dieter Klaffke und Prof. Dr.-Ing. Wolfgang-Werner Maennig
- Nr. 77/April 1981
Untersuchung des Verhaltens von Lagerzementen
von Dipl.-Ing. Michael Gierloff und Dr.-Ing. Matthias Maultzsch
- Nr. 78/September 1981
Dynamische Wechselwirkung eines Schienen-Schwellensystems mit dem Untergrund
von Dr.-Ing. Werner Rücker
- Nr. 79/Dezember 1981
Ein Beitrag zur Untersuchung der wasserstoffbeeinflußten Kaltritzung höherfester niedriglegierter Feinkornbaustähle mit dem Implantversuch
von Dr.-Ing. Volker Neumann
- Nr. 80/Dezember 1981
Ursachen des Teileinsturzes der Kongreßhalle in Berlin-Tiergarten
von Dr.-Ing. Arno Plank, Dr.-Ing. Werner Struck und Dr.-Ing. Manfred Tzschätzsch
- Nr. 81/Dezember 1981
Graphisch-rechnerisches Verfahren zum Erfassen der Zündhäufigkeit zündbarer Stoffe; Anwendung auf Datenmaterial aus dem Bereich der Statistik
von Dipl.-Ing. Jürgen Schmidt
- Nr. 82/April 1982
Zur werkstoffmechanischen Beurteilung des Kerbschlagbiegeversuches
Assessment of the mechanical behaviour of materials in the notched bar impact test
von Rolf Helms, Hans-Joachim Kühn und Siegmund Ledworuski
- Nr. 83/Juli 1982
Tribologisches Verhalten von thermoplastischen Kunststoffen
— Kontaktdeformation, Reibung und Verschleiß, Oberflächenuntersuchungen —
von Prof. Dr.-Ing. Horst Czichos und Dr.-Ing. Paul Feinle
- Nr. 84/Juli 1982
Übertragbarkeit der Ergebnisse von Brandprüfungen im Kleinprüfstand (Vergleichsversuche)
von Dipl.-Inform. Renate Müller und Dr.-Ing. Reinald Rudolphi
- Nr. 85/ISBN 3-88314-231-X/Oktober 1982
Technische Materialforschung und -prüfung
— Entwicklungstendenzen und Rahmenvorschläge für ein EG-Programm „Basic Technological Research“ —
Materials Research and Testing
— Development Trends and Outline Proposals for a Community Programme „Basic Technological Research“ —
von Prof. Dr. Horst Czichos
- Nr. 86/ISBN 3-88314-232-8/November 1982
Zur quantitativen Kennzeichnung des Verwitterungsverhaltens von Naturwerksteinen anhand ihrer Gefügemerkmale
von Dr.-Ing. Konrad Niesel und Dr. rer. nat. Peter Schimmelwitz
- Nr. 87/ISBN 3-88314-240-9/Dezember 1982
Einfluß baupraktischer Umgebungsbedingungen auf das Korrosionsverhalten von Spannstählen vor dem Injizieren
von Dr.-Ing. Bernd Isecke und Dr.-Ing. Wolfgang Stichel
- Nr. 88/ISBN 3-88314-254-9/Februar 1983
Untersuchungen zur Ausbreitung von Longitudinalwellen an Oberflächen bei der Materialprüfung mit Ultraschall
von Dr.-Ing. Anton Erhard
- Nr. 89/ISBN 3-88314-263-8/April 1983
Untersuchungen zur Zerfallsfähigkeit von Distickstoffoxid
von Dr. rer. nat. Dietrich Conrad und Dr.-Ing. Siegmund Dietlen
- Nr. 90/ISBN 3-88314-264-6/April 1983
Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen
Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members
von Dr.-Ing. Klaus Brandes, Dipl.-Ing. Ernst Limberger und Dipl.-Ing. Jürgen Herter
- Nr. 91/ISBN 3-88314-265-4/April 1983
Dreidimensionale Analyse von unbewehrtem Beton mit nichtlinear-elastischem Materialgesetz
von Dr.-Ing. Michael Weber
- Nr. 92/ISBN 3-88314-266-2/August 1983
Ausbreitung von Erschütterungen durch den Boden
von Dipl.-Ing. Lutz Auersch
- Nr. 93/ISBN 3-88314-283-2/August 1983
Unterdrückung stick-slip-induzierter Kurvengeräusche schienengebundener Fahrzeuge durch eine physikalisch-chemische Oberflächenbehandlung der Schienen
von Dr. rer. nat. Peter Studt
- Nr. 94/ISBN 3-88314-284-0/August 1983
Untersuchungen der Störschwingungen beim Kerbschlagbiegeversuch und deren Abschwächungen
von Dr.-Ing. Xian-Quan Dong
- Nr. 95/ISBN 3-88314-289-1/August 1983
Über die Fokussierung des Schallfeldes von Ultraschall-Prüfköpfen mit Fresnelschen Zonenplatten
von Dr.-Ing. Manfred Römer
- Nr. 96/ISBN 3-88314-296-4/Oktober 1983
Verbundverhalten zwischen Beton und geripptem Betonstahl sowie sein Einfluß auf inelastische Verformungen biegebeanspruchter Stahlbetonbalken
von Dr.-Ing. Heinz Eitler
- Nr. 97/ISBN 3-88314-297-2/November 1983
Typische Bruchflächenbildung thermoplastischer Kunststoffe nach wechselnder mechanischer Beanspruchung
von Dipl.-Ing. Gerhard Fuhrmann und Prof. Dr. rer. nat. Wolfram Schwarz
- Nr. 98/ISBN 3-88314-312-X/Dezember 1983
Bestimmung des elastischen Verhaltens von Maschinenwaren
— Stretch- und Erholungsvermögen —
von Dr. rer. nat. Edmund Schnabel
- Nr. 99/ISBN 3-88314-317-0/Dezember 1983
Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen
Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members
von Dr.-Ing. Klaus Brandes, Dipl.-Ing. Ernst Limberger und Dipl.-Ing. Jürgen Herter
- Nr. 100/ISBN 3-88314-298-0/Januar 1984
Untersuchungen zur Prüfung von Beton auf Frostwiderstand
von Günter Klamrowski und Paul Neustupny
- Nr. 101/ISBN 3-88314-327-8/Februar 1984
Röntgen- und Gammastrahlen Computer-Tomographie
von Dr.-Ing. Peter Reimers, Dr. rer. nat. Jürgen Goebels, Dr.-Ing. Heinrich Heidt, Dr.-Ing. Hans-Peter Weise und Dipl.-Phys. Kay Wilding
- Nr. 102/ISBN 3-88314-335-9/März 1984
Weiterentwicklung des hydraulischen Kompensationsverfahrens zur Druckspannungsmessung in Beton
von Dr.-Ing. Götz Magiera
- Nr. 103/ISBN 3-88314-328-6/März 1984
Radiographie mit Elektronen aus Metallverstärkerfolien
von Dr.-Ing. Dierk Schnitger
- Nr. 104/ISBN 3-88314-339-1/April 1984
Beeinflussung von Betoneigenschaften durch Zusatz von Kunststoffdispersionen
von Dr.-Ing. Michael Gierloff
- Nr. 105/ISBN 3-88314-345-6/Juni 1984
Beitrag zum Bremsverhalten energieumwandelnder Aufsetzpuffer in Aufzugsanlagen
von Dr.-Ing. Bernd Schulz-Forberg
- Nr. 106/ISBN 3-88314-360-X/Oktober 1984
Setzung von Fundamenten infolge dynamischer Last
von Dr.-Ing. Jan Lehnert

- Nr. 107/ISBN 3-88314-361-8/Oktober 1984
Korrosion von Stahlradiatoren
von Dr.-Ing. Wolfgang Stichel und Jörg Ehreke
- Nr. 108/ISBN 3-88314-363-4/Oktober 1984
Durch Bodenschütterungen angeregte Gebäudeschwingungen — Ergebnisse von Modellrechnungen
von Dipl.-Ing. Lutz Auersch
- Nr. 109/ISBN 3-88314-381-2/Februar 1985
Zur Wirkung der Schruppbehinderung auf den Schweißspannungszustand und das Sprödbruchverhalten von unterpulvergeschweißten Blechen aus St E 460 N
von Dr.-Ing. Mohamed Omar
- Nr. 110/ISBN 3-88314-382-0/Februar 1985
Wasserstoff als Energieträger
von Dr. Hermann Walde (Mitglied des Kuratoriums der BAM i. R.) und Dr. Bernhard Kropp
- Nr. 111/ISBN 3-88314-383-9/Februar 1985
Über den Einfluß der Infiltration auf die detonative Umsetzung von Analex-Sprengstoffen unter Berücksichtigung sicherheitstechnischer Gesichtspunkte
von Dr.-Ing. Kurt Ziegler
- Nr. 112/ISBN 3-88314-409-6/Juli 1985
Zeitstandverhalten und strukturelle Veränderungen von vielfach wiederverarbeiteten Polyethylenen
von Dr.-Ing. Wolfgang Lützwow
- Nr. 113/ISBN 3-88314-410-X/Juli 1985
Untersuchungen zum Frequenzeinfluß auf die Schwingungskorrosion von Offshore-Konstruktionen
von Rolf Helms, Horst Henke, Gerhard Oelrich (BAM, Berlin) und Tetsuya Saito (NRIM, Japan)
- Nr. 114/ISBN 3-88314-419-3/Juli 1985
Neue Verfahren für die Prüfung von Reaktorkomponenten mittels Röntgen- und Gammastrahlen
von Dipl.-Ing. Peter Rose, Dipl.-Ing. Peter Raabe, Dipl.-Ing. Werner Daum und Andreas Szameit
- Nr. 115/ISBN 3-88314-420-7/Juli 1985
Farbempfindungsmerkmal Elementarblau und Buntheitsabstände als Funktion von Farbart und Leuchtdichte von In- und Umfeld
von Privatdozent Dr. Klaus Richter
- Nr. 116/ISBN 3-88314-460-6/Oktober 1985
Theoretische Ermittlung des Wärmedurchgangskoeffizienten von Fensterkonstruktionen unter besonderer Berücksichtigung der Rahmenproblematik
von Dr. rer. nat. Franz-Josef Kasper, Dipl.-Inform. Renate Müller, Dr.-Ing. Reinald Rudolphi und Dr.-Ing. Armin Wagner
- Nr. 117/ISBN 3-88314-468-1/Oktober 1985
Materials Technologies and Techno-Economic Development
A study for the German Foundation for International Development (Deutsche Stiftung für Internationale Entwicklung)
by Prof. Dr. H. Czichos in cooperation with Dr. G. Sievers, Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMFT), Bonn
- Nr. 118/ISBN 3-88314-469-X/Oktober 1985
Brand- und Explosionsgefahren explosionsgefährlicher Stoffe bei Herstellung und Lagerung
Modellversuche mit pyrotechnischen Sätzen und Gegenständen
von Dr. rer. nat. Hartwig Treumann, Dipl.-Ing. Hilmar Andre, Dr. rer. nat. Eduard Blossfeld, Dr. rer. nat. Norbert Pfeil und Ing. grad. Matthias-Michael Zindler
- Nr. 119/ISBN 3-88314-472-X/November 1985
Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen
Versuche an Stahlbetonplatten, Teil I
Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members
Tests on Reinforced Concrete Slabs, Part I
von Dipl.-Ing. Jürgen Herter, Dr.-Ing. Klaus Brandes und Dipl.-Ing. Ernst Limberger
- Nr. 120/ISBN 3-88314-514-9/April 1986
Zerstörungsfreie Korngrößenbestimmung an austenitischen Feinblechen mit Hilfe der Ultraschallrückstreuung
von Dr.-Ing. Andreas Hecht
- Nr. 121/ISBN 3-88 314-530-0/Juni 1986
Versagenskriterien von Stahlgleitpaarungen unter Mischreibungsbedingungen: Einflüsse von Stahlszusammensetzung und Wärmebehandlung
von Dr.-Ing. Paul Feinle und Prof. Dr.-Ing. Karl-Heinz Habig
- Nr. 122/ISBN 3-88 314-521-1/Juli 1986
Entsorgung kerntechnischer Anlagen
von J. Mischke
Sonderkolloquium der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM) am 10. 12. 1985 mit Beiträgen von B. Schulz-Forberg, K. E. Wieser und B. Droste
- Nr. 123/ISBN 3-88 314-531-9/Juli 1986
Physikalisch-chemische Analyse sowie toxische Beurteilung der beim thermischen Zerfall organisch-chemischer Baustoffe entstehenden Brandgase
von Dr. rer. nat. Detlef Rennoch
- Nr. 124/ISBN 3-88 314-538-6/Juli 1986
Zur Anwendung des Impuls-Wirbelstromverfahrens in der zerstörungsfreien Materialprüfung
von Dr.-Ing. Hans-Martin Thomas
- Nr. 125/ISBN 3-88 314-540-8/Juli 1986 (vergriffen)
Untersuchungen zur Wirksamkeit der Brandschutzisolation von Flüssiggas-Lagertanks
von Dr.-Ing. Bernhard Droste und Dipl.-Ing. Ulrich Probst
- Nr. 126/ISBN 3-88 314-547-5/August 1986
Korrosion und Korrosionsschutz von Metallen in Schwimmhallen
von Dr.-Ing. Wolfgang Stichel
- Nr. 127/ISBN 3-88 314-564-5/November 1986 (vergriffen)
Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen
Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members
Versuche an Stahlbetonbalken, Teil I
Tests on Reinforced Concrete Beams, Part I
von / by Dipl.-Ing. Ernst Limberger, Dr.-Ing. Klaus Brandes, Dipl.-Ing. Jürgen Herter und Dipl.-Ing. Klaus Berner
- Nr. 128/ISBN 3-88 314-568-8/November 1986 (vergriffen)
Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen
Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members
Versuche an Stahlbetonbalken, Teil II
Tests on Reinforced Concrete Beams, Part II
von / by Dipl.-Ing. Ernst Limberger, Dr.-Ing. Klaus Brandes, Dipl.-Ing. Jürgen Herter und Dipl.-Ing. Klaus Berner
- Nr. 129/ISBN 3-88 314-569-6/November 1986 (vergriffen)
Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen
Kinetic Load Bearing Capacity of Reinforced Concrete Members under Impact Load
Zugversuche an Betonstahl mit erhöhter Dehngeschwindigkeit
Reinforcing Steel Tension Tests with high strain rates
von / by Dr.-Ing. Klaus Brandes, Dipl.-Ing. Ernst Limberger, Dipl.-Ing. Jürgen Herter und Dipl.-Ing. Klaus Berner
- Nr. 130/ISBN 3-88 314-570-X/November 1986
Einfache Abschätzung der Durchbiegung und der Energieaufnahme von Trägern aus duktilem Material bei Belastung durch eine Einzelkraft
von Dr.-Ing. Werner Struck
- Nr. 131/ISBN 3-88 314-585-8/November 1986
Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen
Kinetic Load Bearing Capacity of Reinforced Concrete Members under Impact Load
Versuche an Stahlbetonplatten, Teil II
Tests on Reinforced Concrete Slabs, Part II
von / by Dipl.-Ing. Ernst Limberger, Dr.-Ing. Klaus Brandes und Dipl.-Ing. Jürgen Herter
- Nr. 132/ISBN 3-88 314-595-5/Januar 1987
Ermittlung der Ursachen von Schäden an bituminösen Dachabdichtungen unter besonderer Berücksichtigung klimatischer Beanspruchungen
von Dipl.-Ing. Christian Herold und Dipl.-Ing. Frank-Ulrich Vogdt
- Nr. 133/ISBN 3-88 314-609-9/Januar 1987 (vergriffen)
Technisch-physikalische Grundlagen zum tribologischen Verhalten keramischer Werkstoffe
von Dipl.-Ing. Mathias Woydt und Prof. Dr.-Ing. Karl-Heinz Habig
- Nr. 134/ISBN 3-88 314-615-3/Februar 1987
Über den Kernstrahlungseinfluß auf Dehnungsmeßstreifen
von Dr. Götz Andree und Gottfried Niessen
- Nr. 135/ISBN 3-88 314-618-8/Februar 1987
Untersuchungen über das Verhalten von Tankcontainern für unter Druck verflüssigte Gase bei Fallbeanspruchungen
von Dipl.-Ing. Jörg Ludwig, Dipl.-Ing. Wolf-Dietrich Mischke und Dipl.-Ing. Armin Ulrich
- Nr. 136/ISBN 3-88314-636-6/April 1987
Untersuchung zur Beurteilung von Brettschichtverleimungen für den Holzbau
von Prof. Dr. rer. silv. Hans-Joachim Deppe und Klaus Schmidt
- Nr. 137/ISBN 3-88314-637-4/Mai 1987
Analyse und Weiterentwicklung bruchmechanischer Versagenskonzepte auf der Grundlage von Forschungsergebnissen auf dem Gebiet der Komponentensicherheit
Projektleiter: Dr. Dietmar Aurich
- Nr. 138/ISBN 3-88314-635-8/Mai 1987
Zur geowissenschaftlichen Einordnung des Gebietes der Bundesrepublik Deutschland und einer sicheren Auslegung technischer Systeme gegen den Lastfall Erdbeben.
von Dipl.-Geol. Michael Dogunke und Dr.-Ing. Frank Buchhardt
- Nr. 139/ISBN 3-88314-658-7/Juni 1987
Numerische Untersuchung zum Verhalten des Hochtemperaturwerkstoffes Nimonic PE 16 unter monotoner und zyklischer Belastung bei Verwendung verschiedener plastischer und viskoplastischer Materialmodelle.
von Dipl.-Ing. Jürgen Olschewski und Sven-Peter Scholz
- Nr. 140/ISBN 3-88314-643-9/Juni 1987
Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen
Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members
von / by Dr.-Ing. Klaus Brandes, Dipl.-Ing. Ernst Limberger und Dipl.-Ing. Jürgen Herter
- Nr. 141/ISBN 3-88314-694-3/Oktober 1987
Zum Einfluß des Sicherheits- und Auslegungserdbebens auf die Bemessung von Kernkraftwerken
von Dr.-Ing. Frank Buchhardt, Dr.-Ing. Wolfgang Mathees, Dr.-Ing. Götz Magiera und Dr.-Ing. Friedrich Mathiak
- Nr. 142/ISBN 3-88314-695-1/Oktober 1987
Sicherheitstechnische Kenndaten und Gefahrezahlen binärer Mischungen aus oxidierenden und verbrennlichen Substanzen
von Dr. rer. nat. Hartwig Treumann, Ing. Günter Krüger, Dr. rer. nat. Norbert Pfeil und Dr. rer. nat. Sigrid von Zahn-Ullmann
- Nr. 143/ISBN 3-88314-701-X/November 1987
Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen
Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members
Experimentelle und numerische Untersuchungen zum Trag- und Verformungsverhalten von Stahlbetonbauteilen bei Stoßbelastung
Experimental and numerical investigations concerning Load Bearing Behaviour of Reinforced Concrete Members under Impact Load
von/by Dr.-Ing. Klaus Brandes, Dipl.-Ing. Ernst Limberger, Dipl.-Ing. Jürgen Herter
- Nr. 144/ISBN 3-88314-702-8/November 1987
Nichtlineare dynamische Berechnungen zum Penetrationsverhalten des AVR-Reaktorgebäudes
von Dr.-Ing. Frank Buchhardt, Dr.-Ing. Götz Magiera, Dr.-Ing. Wolfgang Mathees, Dr.-Ing. Michael Weber, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)
Dr.-Ing. Jürgen Altes, Kernforschungsanlage Jülich GmbH (KFA)
- Nr. 145/ISBN 3-88314-711-7/November 1987
Untersuchung selbstähnlicher Systeme zur Bestimmung von Materialeigenschaften von Reibungsböden
von Dr.-Ing. Ulrich Holzjöhner
- Nr. 146/ISBN 3-88314-714-1/November 1987
Untersuchungen zur Wirksamkeit von Wasserberieselungseinrichtungen als Brandschutzmaßnahme für Flüssiggas-Lagertanks
von Dipl.-Ing. Wolfgang Schön und Dipl.-Ing. Michael Mallon
- Nr. 147/ISBN 3-88314-720-6/Dezember 1987
Lösung dynamischer Biege- und Torsionsprobleme von Stabsystemen aus dünnwandigen elastischen Stäben mit offenem Querschnitt mittels frequenzabhängiger Ansatzfunktionen
von Dipl.-Ing. Hans-Dieter Kleinschrodt
- Nr. 148/ISBN 3-88314-774-5/Mai 1988
Theoretische Untersuchung von Variationsprinzipien für elastoplastisches Materialverhalten sowie Entwicklung und numerische Erprobung von Finite-Element-Verfahren für den ebenen Spannungszustand
von Dipl.-Ing. Wilfried Müller
- Nr. 149/ISBN 3-88314-775-3/Mai 1988
Bestimmung baugruddynamischer Kenngrößen aus der Untersuchung von Bodenproben
von Dr.-Ing. Ulrich Holzjöhner

Nr. 150/ISBN 3-88314-776-1/Mai 1988
**VG3D Zeichenprogramm für die Vektorgraphische
Darstellung dreidimensionaler Strukturen**
von Dr.-Ing. Michael Weber

Nr. 151/ISBN 3-88314-785-0/Juni 1988
**Wechselwirkung starrer und flexibler Strukturen mit
dem Baugrund insbesondere bei Anregung durch
Bodenerschütterungen**
von Dipl.-Ing. Lutz Auersch-Saworski

Nr. 152/ISBN 3-88314-796-6/Juli 1988
**Untersuchung des baulichen Zustandes und der
Tragfähigkeit vorgespannter Riegel von Verkehrs-
zeichenbrücken der Berliner Stadtautobahn**
von Dr.-Ing. Günther Plauk, Dipl.-Ing. Günter
Kretschmann, Dipl.-Ing. Rolf-G. Rohrmann

Nr. 153/ISBN 3-88314-797-4/Juli 1988
**Magnetisches Verhalten von Eisenproben bei mecha-
nischer Wechselbeanspruchung**
von Dr.-Ing. Harro Sander, Professor Dr.-Ing. Wolf-
gang-Werner Maennig