

313 | April 1974

SCHRIFTENREIHE SCHIFFBAU

H. Paetzold und H. Sievers

Rißfortschrittsmessung mit Hilfe einer Magnetfeldsonde

TUHH

Technische Universität Hamburg-Harburg

Rißfortschrittsmessung mit Hilfe einer Magnetfeldsonde

H. Paetzold, H. Sievers, Hamburg, Technische Universität Hamburg-Harburg, 1974

© Technische Universität Hamburg-Harburg

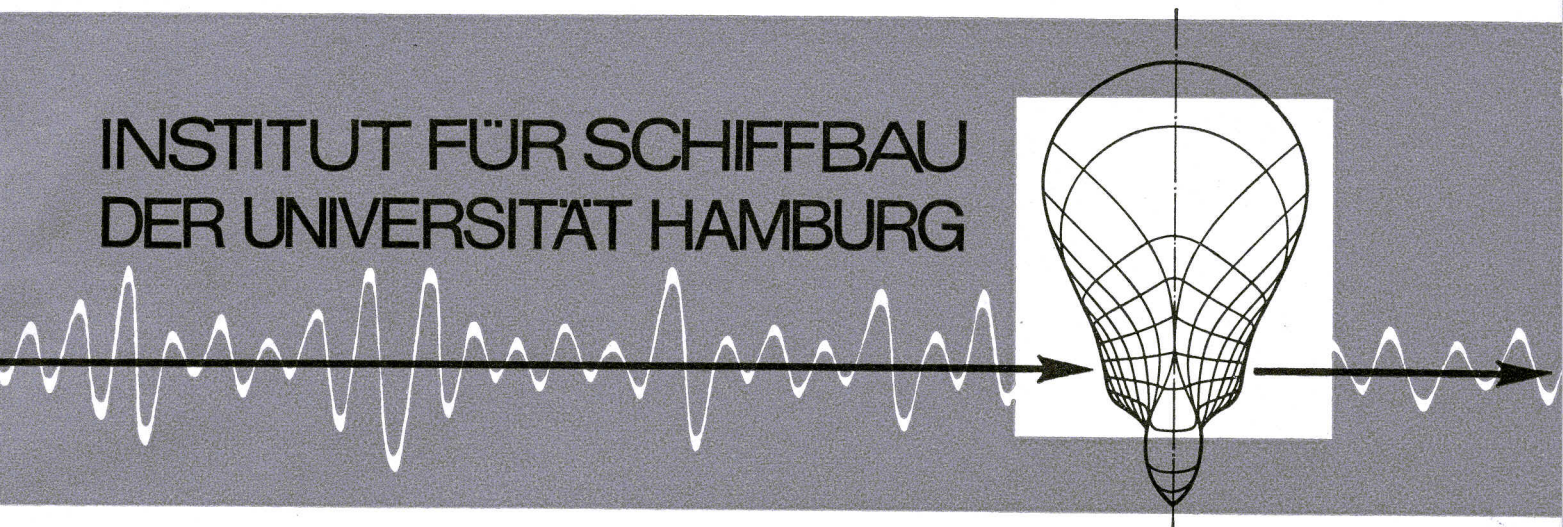
Schriftenreihe Schiffbau

Schwarzenbergstraße 95c

D-21073 Hamburg

<http://www.tuhh.de/vss>

INSTITUT FÜR SCHIFFBAU
DER UNIVERSITÄT HAMBURG

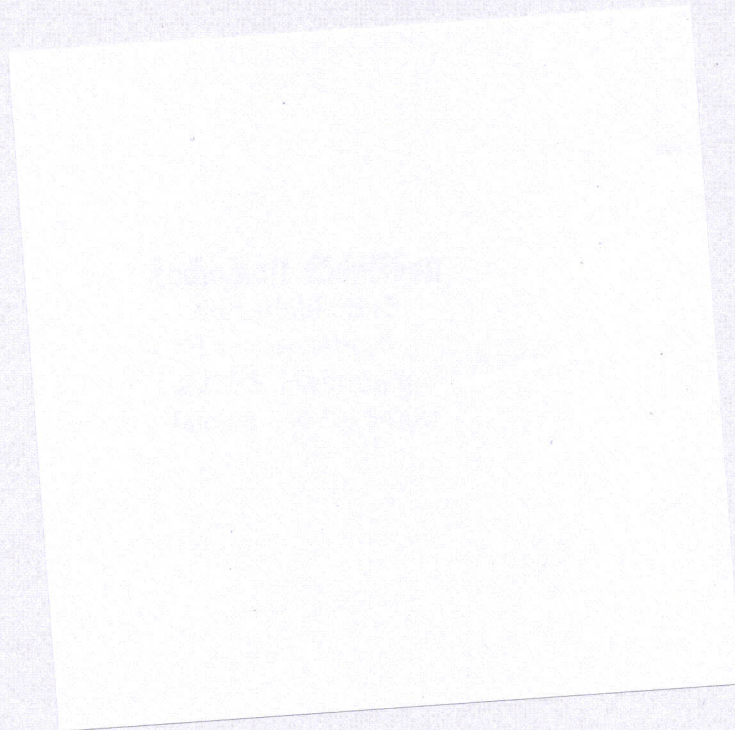


Rißfortschrittsmessung mit Hilfe einer Magnetfeldsonde

H. Paetzold
H. Sievers

Diese Arbeit ist im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 98
"Schiffstechnik und Schiffbau" entstanden und wurde unter
Verwendung der ihm von der Deutschen Forschungsgemeinschaft
zur Verfügung gestellten Mittel gedruckt.

RISSFORTSCHRITTSMESSUNG MIT HILFE
EINER MAGNETFELDSONDE



von Dipl.-Ing. Hans Paetzold
techn. Ang. Hartmut Sievers

I N H A L T S Ü B E R S I C H T

	Seite
1. Einleitung	2
2. Verschiedene Methoden der Rißfortschrittsmessung	3
3. Rißmessungen mit der Magnetfeldsonde	4
3.1. Arbeitsweise der Magnetfeldsonde	4
3.2. Voraussetzungen für eine genaue Messung	6
3.3. Meßmethode mit der stationären Sonde	7
3.4. Meßmethode mit der verfahrbaren Sonde	8
3.5. Weiterverarbeitung der Meßdaten	9
4. Zusammenfassung	10
5. Anhang	11

1. Einleitung

Die Bruchmechanik geht davon aus, daß in einer Konstruktion schon bei der Fertigung Risse oder Fehlstellen z.B. in Form von Härterissen und Lunkern in Schweißnähten vorhanden sind. Werden solche Bauteile dynamisch beansprucht, so kann sich der Riß bis zu der kritischen Größe ausbreiten, bei dem der Zusammenbruch des Bauteils eintritt. Deshalb ist es sehr wesentlich für die Abschätzung der Lebensdauer, Kenntnisse über das Rißfortschrittsverhalten zu erlangen.

Die Auftragung der Rißgeschwindigkeit $\frac{da}{dN}$ über der Schwingbreite des Spannungsintensitätsfaktors ΔK im doppellogarithmischen Netz ergibt nach Paris und Erdogan [1] eine Gerade:

$$\frac{da}{dN} = C \cdot \Delta K^m$$

Um diese Gleichung der Bruchmechanik auf ihre Anwendbarkeit für die im Schiffbau üblichen Werkstoffe zu überprüfen und um eine Entwicklung eines Rechenmodells zur Lebensdauervorhersage für beliebige Belastungsfolgen zu ermöglichen, ist es erforderlich, den Rißverlauf fortlaufend zu überwachen und zu registrieren.

Es mußte eine hinreichend genaue zerstörungsfreie Meßmethode entwickelt werden, die den Rißverlauf während des Versuches ohne Stillstand der Prüfmaschine aufzeichnet und die mit Rücksicht auf große Probenzahlen und mehrtägige Probenlaufzeiten bei schiffbaulichen Lastkollektiven weitgehend automatisiert ist.

2. Verschiedene Methoden der Rißfortschrittsmessung

Auf der Suche nach einem geeigneten Rißmeßverfahren wurde zunächst auf die in der Literatur erwähnten Methoden zurückgegriffen und kritisch auf eine Anwendbarkeit für unsere Probleme hin durchleuchtet.

Angeregt durch die Veröffentlichung von Fuchs [2] und Betz [3] wurde ein vorhandenes einfaches Ultraschallgerät mit Hilfe der Transversalwellentechnik zur Rißmessung an Flachproben eingesetzt. Kurzzeitmessungen brachten ausreichende Ergebnisse. Doch bei mehr als sechsständiger Probenlaufzeit gab es infolge einer zunehmenden Dämpfung des Rißechos Schwierigkeiten. Durch Temperaturdriften des Gerätes traten außerdem Nichtlinearitäten während der Messung auf, die nur durch den Einsatz eines wesentlich teureren Gerätes hätten behoben werden können. Hinzu kommt, daß beim Einsatz der Ultraschalltechnik auf Strukturmodelle große Probleme der Echodeutung bestehen.

Recht genaue Messungen sind mit dem Meßmikroskop möglich. Dieses Verfahren kommt für uns nicht infrage, da Betriebsfestigkeitsversuche für den Schiffbau mit Geradlinienkollektiv Laufzeiten von mehr als fünf Tagen ergeben, so daß ein unzumutbarer Beobachtungsaufwand entstünde, zumal der Versuch für jede Messung unterbrochen werden müßte. Auch hier wäre der Einsatz bei Strukturmodellen problematisch.

Magnetpulver- und Farbeindringverfahren, wie sie bei statischen Untersuchungen verwendet werden, eignen sich für dynamische Rißfortschrittsmessungen nicht. Beide Verfahren arbeiten mit Flüssigkeiten, die in den Riß eindringen, dort eventuell korrodierend wirken und somit das Rißverhalten beeinflussen.

Die von Grünberg [4] durchgeführte Methode der Rißmessung mit Dehnungsmeßstreifen- und Meßgittertechnik wurde nicht weiter versucht, da bereits an anderen Forschungsstätten negative Erfahrungen gemacht wurden. Eine Anwendung auf Strukturmodelle erscheint uns hier schwierig.

Weiterhin ist das Verfahren von Förster [5] bekannt, welches in der Luftfahrt bei den regelmäßigen Inspektionen der Flugzeuge angewendet wird.

Neuerdings wird von Betz [6] ein Potentialsondenverfahren angewandt.

3. Rißmessungen mit der Magnetfeldsonde

3.1 Arbeitsweise der Magnetfeldsonde

Das Magnetfeldsondensystem besteht aus einem Elektronikteil und der Sonde, in der sich eine aktive und eine passive Spule (Fig. 1) als Zweige einer Vollbrückenschaltung befinden. Die Ergänzungshalbbrücke, der Oszillator und der Demodulator sind im Elektronikteil zusammengefaßt. Änderungen im Brückenkreis werden von diesem Elektronikteil in eine analoge Gleichspannung als Ausgangssignal umgewandelt.

Die passive Spule der Sonde ist nach außen hin abgeschirmt und dient zur Temperaturkompensation der Brücke. Unter der Sondenunterseite baut die aktive Spule ein Magnetfeld auf, das sich von der Unterseite der Sonde über den Luftspalt bis zur Probenoberfläche erstreckt. Die meßtechnisch nutzbare Spaltgröße zwischen der Sondenunterseite und der Probenoberfläche ist von dem Sonden-durchmesser abhängig, der bei der hier verwendeten Sonde wenige Millimeter beträgt.

Befindet sich im Einflußbereich des Magnetfeldes die Metalloberfläche einer Probe mit konstantem Abstand zur Sonde, so ergibt sich ein gleichbleibendes Ausgangssignal der Vollbrückenschaltung. Wird dieser homogene Zustand z.B. durch einen Dauerriß an der Metalloberfläche, der in den Einflußbereich des Magnetfeldes gelangt ist, gestört, ändert sich durch den Riß das Luftvolumen zwischen der Sondenunterseite und Metalloberfläche. Das ursprüngliche Verhältnis der Permeabilitätswerte zwischen Luft und Stahl wird durch die Luftvolumenänderung verschoben und beeinflusst die Induktanz der aktiven Spule. Das Brückengleichgewicht wird verschoben, was gleichzeitig mit der Änderung des Ausgangssignals verbunden ist. Damit besteht eine Analogie zwischen der Verschiebung des Brückengleichgewichts und der Rißlängenänderung.

Figur 2 zeigt, wie stark das Ausgangssignal der Sonde von dem Abstand zwischen der Sondenunterseite und der Probenoberfläche beeinflusst wird. In dem Diagramm bedeutet der Abstand 1 eine große und der Abstand 4 eine kleine Entfernung von der Probenoberfläche.

Ändert sich bei angerissener Probe die äußere Belastung, so ändert sich ebenfalls die Größe der Rißatmung. Das bedeutet einen Sprung im Sondenausgangssignal bei zunächst konstanter Rißlänge, da sich das Luftvolumen unter der Sonde ändert. Dieser Effekt behindert bisher den Einsatz des Verfahrens bei den Mehrstufenversuchen. Der Rißfortschritt wird innerhalb einer Laststufe korrekt gemessen. Aber infolge der Sprünge zu Beginn der nächsten Laststufe ergibt sich beim Registrieren der Meßwerte keine durchgehende Rißfortschrittskurve. An der Lösung dieses Problems wird zur Zeit gearbeitet.

Nach unseren Erfahrungen erscheint die Magnetfeldsonde wegen der hohen Oszillatorfrequenz von 1 MHz gegenüber der Arbeitsfrequenz der Prüfmaschinen von maximal 100 Hz für Rißfortschrittsmessungen während der dynamischen Modellprüfung recht gut geeignet. Sie gewährleistet eine gute Empfindlichkeit und Genauigkeit der Messung.

Das Magnetfeldsondensystem reagiert schon auf sehr kleine Anrisse oder Rißfortschritte. Das Verhältnis des kleinsten Signals aus Rißfortschritten zu dem Störsignal aus Abstandsvibrationen zwischen der Probe und der Sonde beträgt etwa 15 : 1. Man erkennt hieran, daß Vibrationen der Prüfmaschinen nur sehr geringen Einfluß auf das Meßsignal haben.

Temperaturschwankungen der Umgebung bis ca. 10 - 15°C beeinträchtigen die Genauigkeit der Messung kaum. Das Temperaturdriften verursacht eine Nichtlinearität, die kleiner als 1% ist (siehe Fig. 3).

3.2 Voraussetzung für eine genaue Messung

Um eine genaue Messung durchführen zu können, sind im folgenden die Voraussetzungen genannt, die erfüllt werden sollten:

- a) Der Abstand zwischen der Probe und der Sonde muß während der gesamten Versuchsdauer konstant sein.
- b) Die Probenoberfläche und die Sondenunterseite müssen parallel zueinander ausgerichtet sein.
- c) Die Eigenfrequenz der Sondenhalterung muß wesentlich außerhalb der Eigenfrequenz der Prüfmaschine liegen.

- d) Es ist anzustreben, die Meßwerte stets beim Amplitudenmaximum der Belastung abzufragen.
- e) Unterbrechungen des Versuchsablaufs der Prüfmaschine beeinflussen die Meßwertaufzeichnungen ungünstig.
- f) Die Anrißstelle und der Rißverlauf sollten möglichst bekannt sein.

3.3 Meßmethode mit der stationären Sonde

Sind die räumlichen Verhältnisse an einem Strukturmodell beengt, so kann für die Rißmessung eine stationäre Sonde eingesetzt werden. Die Sondenhalterung ist dabei sehr steif auszuführen und so an dem Modell zu befestigen, daß die Sonde über dem zu erwartenden Rißgebiet steht. Der erforderliche konstante Abstand muß sicher gewährleistet sein.

Bei den Messungen wird das Signal jeweils nach einer bestimmten Lastwechselzahl abgefragt, wobei der Abfrageimpuls vom Lastwechselzähler der Prüfmaschine getaktet wird.

Wird die stationäre Sonde z.B. über der Stelle, an der ein Anriß zu erwarten ist, postiert, erhöht sich das Ausgangssignal der Sonde beim Erscheinen eines makroskopischen Anrisses an der Oberfläche. Durch die Abfrageimpulse vom Lastwechselzähler ist die Lastwechselzahl bis zum Anriß festgestellt.

Vergrößert sich der Riß, wächst auch das Ausgangssignal. Bei der stehenden Sonde ergibt sich zunächst nur eine qualitative Rißkurve. Die gemessenen Werte des Ausgangssignals können der jeweiligen Rißlänge zugeordnet werden, wenn Eichversuche an Proben aus dem gleichen

Material bei verschiedenen Belastungshöhen durchgeführt werden.

Die Genauigkeit der Messung hängt vom Sondendurchmesser, dem Ausgangssignal am Anfang und am Ende einer Messung und der gemessenen Ausgangssignalerhöhung ab. Damit wird der Rißfortschritt durch eine Funktion des Sondendurchmessers und des Ausgangssignals beschrieben.

Mit den vorhandenen Geräten kann unter normalen Versuchsbedingungen eine Meßgenauigkeit von $\pm 10\mu\text{m}$ für das Rißwachstum an der Oberfläche erreicht werden.

3.4 Meßmethode mit der verfahrbaren Sonde

Die Methode, die Sonde entsprechend dem Rißfortschritt zu verfahren, bietet sich für Modellformen an, bei denen die Materialoberfläche im Rißbereich keine Unebenheiten und Hindernisse aufweist.

Die Sonde wird senkrecht an einer Verschiebespindel befestigt, die von einem Getriebemotor über eine biegsame Welle angetrieben wird. (Fig. 4). Die Antriebswelle verstellt gleichzeitig mit dem Verfahren der Sonde durch eine Übersetzung ein Meßpotentiometer, dessen Ausgangswerte vor Versuchsbeginn in hundertstel Millimeter geeicht werden. Es ist somit eine direkte Abhängigkeit zwischen der Sondenstellung an der Rißspitze und dem Ausgangssignal des Meßpotentiometers vorhanden.

Wenn sich durch das Wachsen des Risses das Ausgangssignal der Sonde ändert und dabei ein an einem Niveauschalter eingestelltes Niveau übersteigt, wird der

Motor eingeschaltet und die Sonde soweit verfahren, bis das Ausgangssignal der Sonde unter das Abschaltniveau des Schalters zurückgeht und der Motor abgeschaltet wird. Die Sonde bleibt solange stehen, bis ihr Ausgangssignal das Einschaltniveau wiederum erreicht und die Sonde abermals verfährt.

Beim Einrichten wird die Sonde auf den Rißbereich zentriert und im Abstand so eingestellt, daß im ungeschädigten Bereich das Ausgangssignal bei jedem Versuchsbeginn gleich groß ist. Die Sonde wird dann soweit an die Kerbe herangefahren, bis ihr Ausgangssignal das Abschaltniveau erreicht. Beim Anfahren der Schwingprüfmaschine ist es möglich, daß durch Vibrationen noch kleine Änderungen des Ausgangssignals auftreten. Vor der ersten Abfrage des Potentiometers nach tausend Lastwechseln ist aber eine stabile Ausgangsstellung erreicht.

Die Abfrage der Potentiometerwerte wird genauso durchgeführt, wie sie für die stehende Sonde beschrieben wurde. Auch hier läßt sich das Auftreten des makroskopischen Anrisses einer Lastwechselzahl gut zuordnen.

Die Genauigkeit der Messung hängt im wesentlichen von der Empfindlichkeit des Niveauschalters, der Bestimmung des Schaltniveaus und der Linearität des Meßpotentiometers ab. Eine minimale Schrittlänge von einem hundertstel Millimeter ist im Betrieb erreicht worden.

3.5 Weiterverarbeitung der Meßdaten

Die abgefragten Ausgangssignale der Sonde bzw. des Potentiometers müssen bei beiden Anwendungsarten weiterverarbeitet werden. Mit einem UV- oder einem Tintenschreiber

lassen sich die Werte direkt aufzeichnen. Mit Rücksicht auf die langen Probenlaufzeiten ist aber der Einsatz von Schreibern nicht zu empfehlen, zumal der dabei entstehende Schrieb extrem zu lang ist, manuell ausgewertet und mit verkürztem Maßstab neu aufgetragen werden müßte.

Die weit bessere Lösung ist mit der Digitalisierung der Meßwerte zu erreichen, um entweder einen Digitaldrucker oder eine Lochstreifenstanze einsetzen zu können.

Bisher wurde ein Digitaldrucker zur Meßwertregistrierung verwendet. Nach Ablocken der Meßwerte und der zugehörigen Lastspielzahlen wird die Rißkurve mit Hilfe eines elektronischen Rechners auf einem Plotter erstellt. Der Ersatz des Digitaldruckers durch eine Lochstreifenstanze ist vorgesehen, zumal dann nach einer Speicherung der Meßwerte im Rechner die Messung mit Hilfe verschiedener Auswertprogramme ohne erneute Dateneingabe bearbeitet werden kann (siehe Fig. 4 u. 5).

Figur 6 gibt die Auswertung einer Rißmessung in einer halblogarithmischen Darstellung wieder. Die Messung erfolgte an einer Flachprobe mit geometrischer Innenkerbe aus Schiffbaustahl, Gütegrad A, im Einstufendauerversuch.

4. Zusammenfassung

Durch den Einsatz von Magnetfeldsonden steht dem SFB 98 zur Zeit ein nahezu vollautomatisches Meßverfahren für Rißfortschrittsuntersuchungen bei Einstufen-Dauerversuchen mit hoher Genauigkeit zur Verfügung. Sehr vorteilhaft ist es, daß diese Rißfortschrittsmessungen bei laufender Prüfmaschine

ohne Störung des Versuchsablaufes und ohne Bedienungspersonal für nahezu beliebige Versuchszeiten durchgeführt werden können. Der Einsatz der Magnetfeldsonde als stationäre und verschiebbare Sonde macht die Rißmessung fast unabhängig von der Gestalt der Modelle, wenn die geschilderten Voraussetzungen eingehalten werden. Wird eine Lochstreifenstanze verwendet, kann die Datenerfassung und die weitere Auswertung über einen elektronischen Rechner erfolgen.

Eine Anwendung der Meßmethode für Mehrstufenversuche mit Blockprogramm ist möglich und befindet sich zur Zeit in der Entwicklung. Unser Ziel ist dabei, den Riß während des Betriebsfestigkeitsversuches mit einem Geradlinienkollektiv zu verfolgen und zu registrieren. Bei diesen Versuchen ist der wesentliche Unterschied, daß sich bei jeder Laständerung das Ausgangssignal ändert. Figur 7 zeigt die Erhöhung des Ausgangssignals bei einer Laststeigerung.

Schrifttum

- [1] Paris, P.C.; F. Erdogan
Journal of Basic Engineering, Trans. ASME 85
Series D (1963), S. 528-534

- [2] Fuchs, A.
Untersuchung des subkritischen Rißwachstums
mit Methoden der Bruchmechanik
Materialprüfung 13 (1971) Nr. 6, S. 181-186

- [3] Betz, U.
Zur Rißbildung wechselbeanspruchter Proben
Techn. wiss. Bericht MPA Stuttgart 1970/02

- [4] Grünberg
Messung von Materialermüdung mit Hilfe
von Widerstandssensoren
Micro Mesures Europe, 1968

- [5] Förster, F.
Analyse der zerstörenden Werkstoffprüfung mit
zerstörungsfreiem elektromagnetischem Verfahren
Materialprüfung 12 (1970) Nr. 5, S. 149-156

- [6] Betz, U.
Rißmessungen mit dem Potentialsondenverfahren
Materialprüfung 14 (1972) Nr. 3 S. 73-77

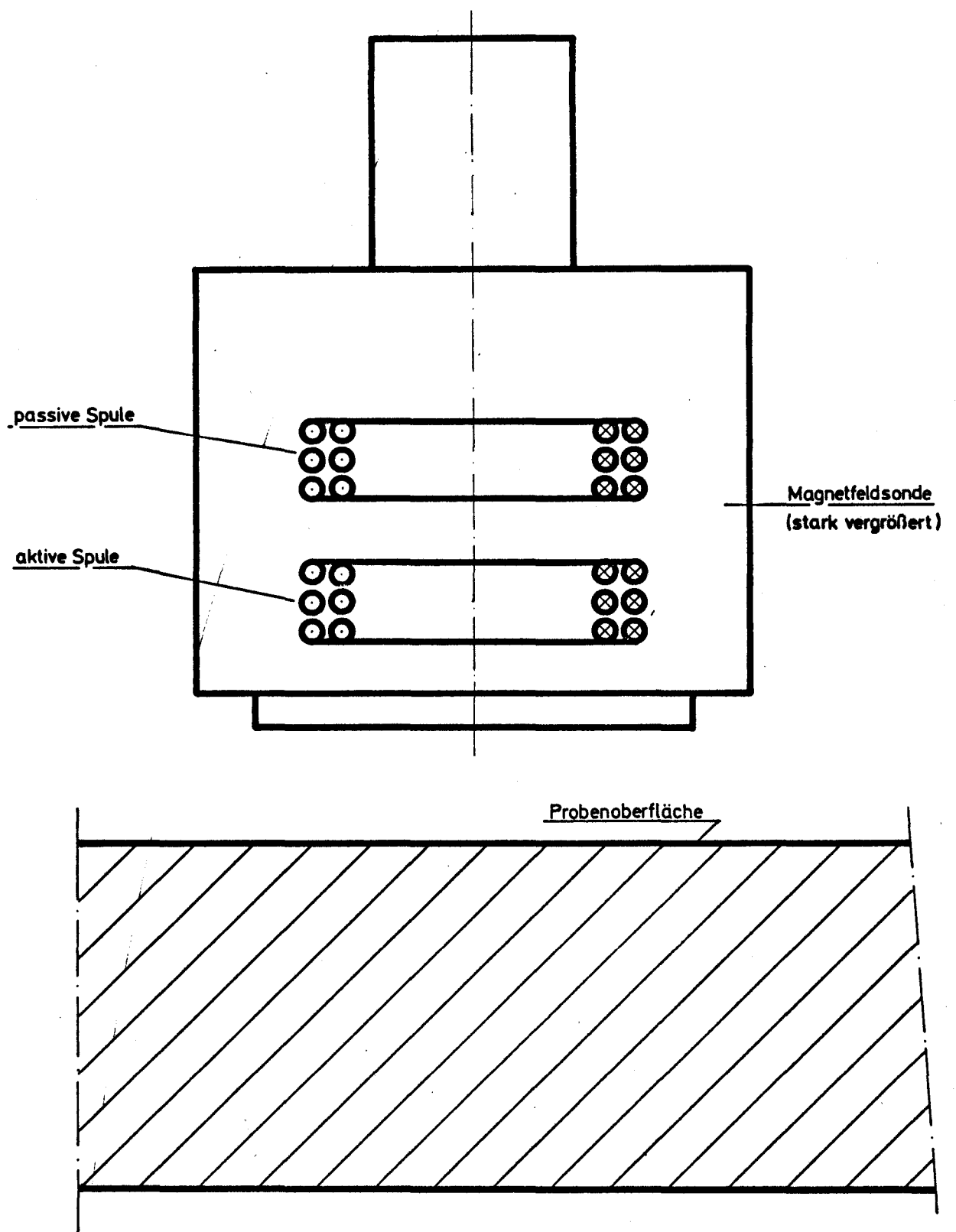


Fig. 1 Aufbau der Magnetfeldsonde (schematisch)

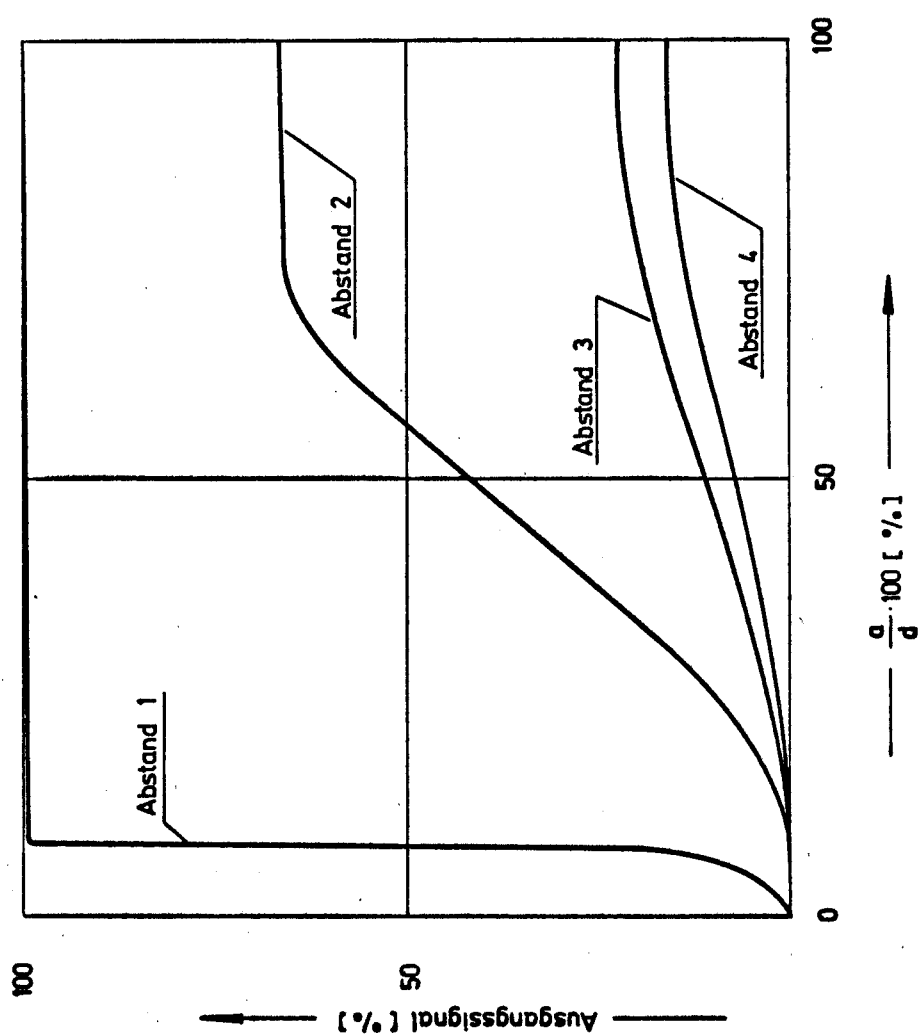
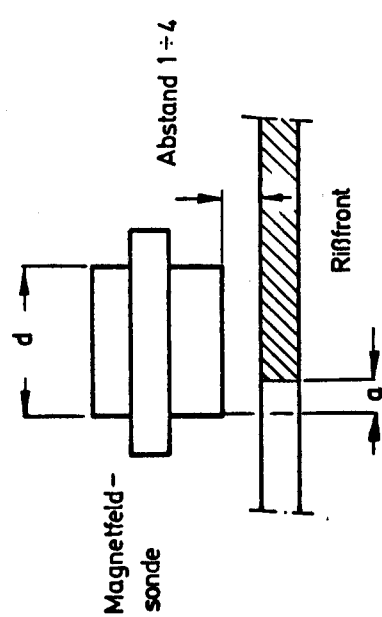


Fig. 2 Einfluß des Sondenabstandes auf das Ausgangssignal bei einem durchlaufenden Riß

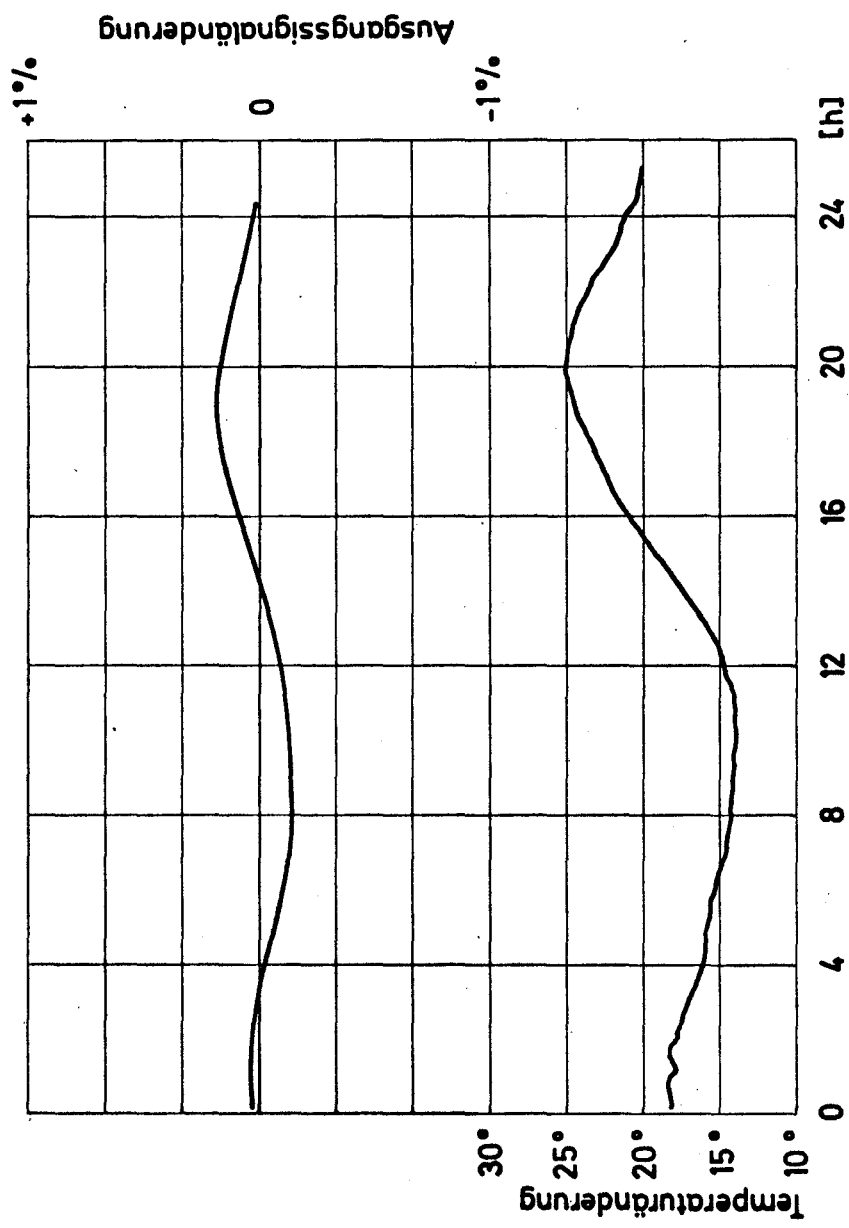


Fig. 3 Temperatureinfluß auf Linearität der Messung

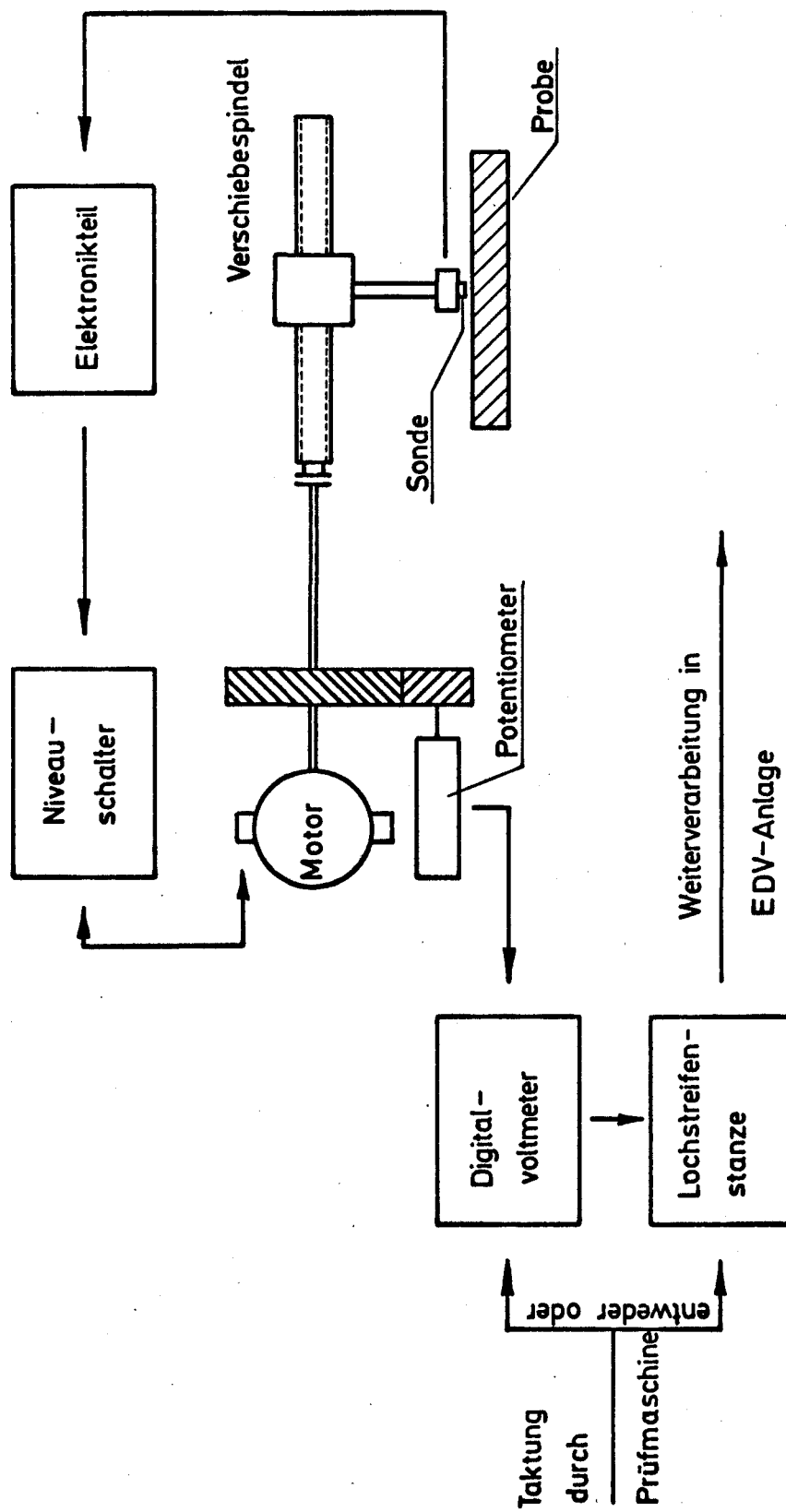


Fig. 4 Meßmethode mit der verfahrenen Magnetfeldsonde (schematisch)

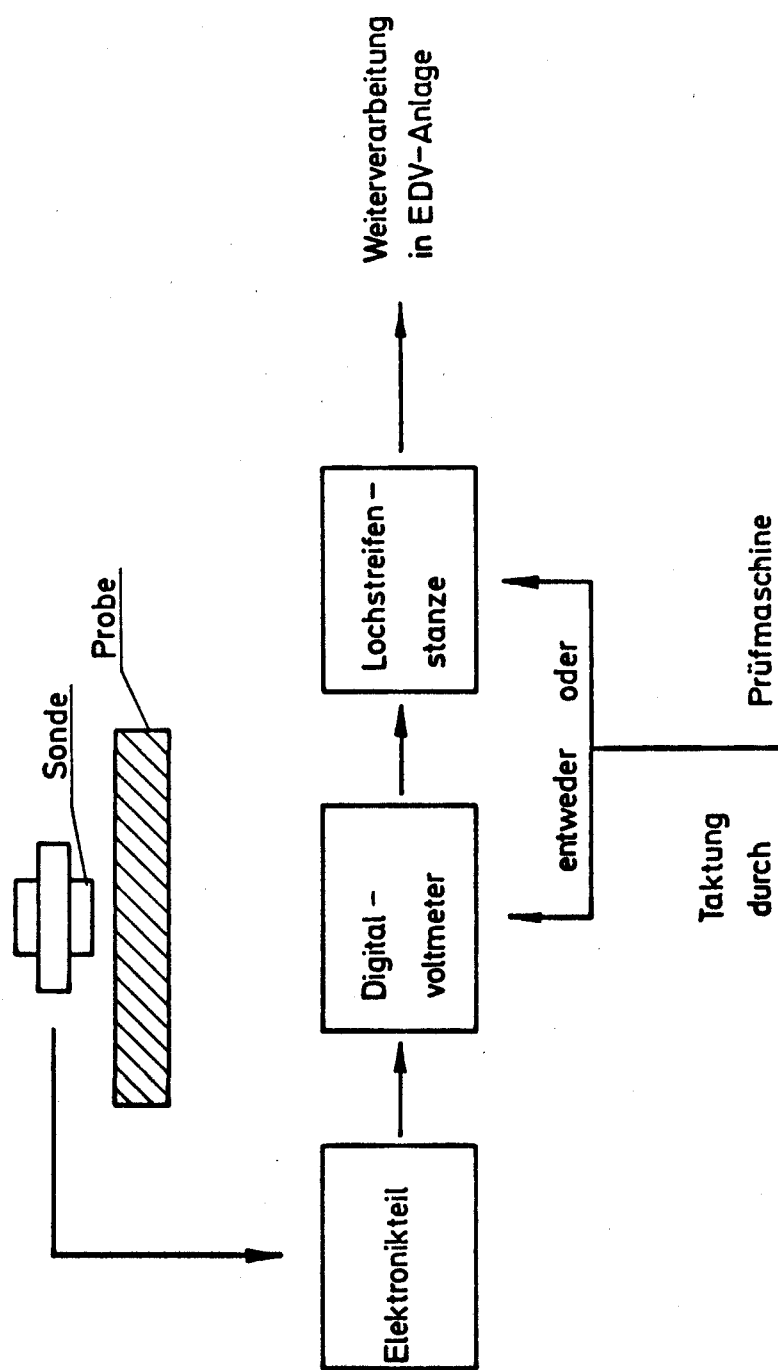


Fig. 5 Meßmethode mit der stationären Magnetfeldsonde (schematisch)

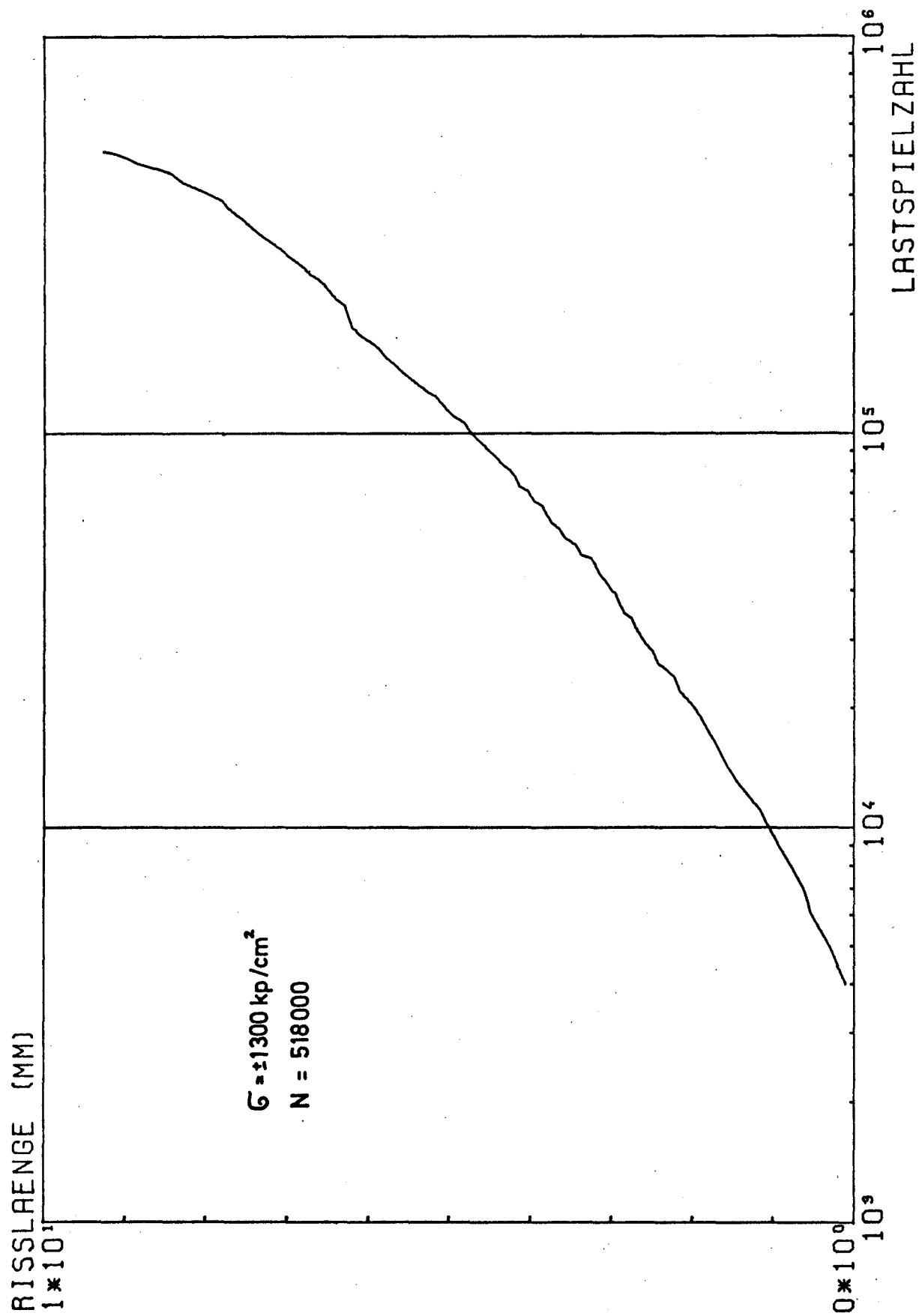


Fig. 6 Rißfortschrittmessung an einer Flachprobe mit Innenkerbe aus Schiffbaustahl Gütegrad A

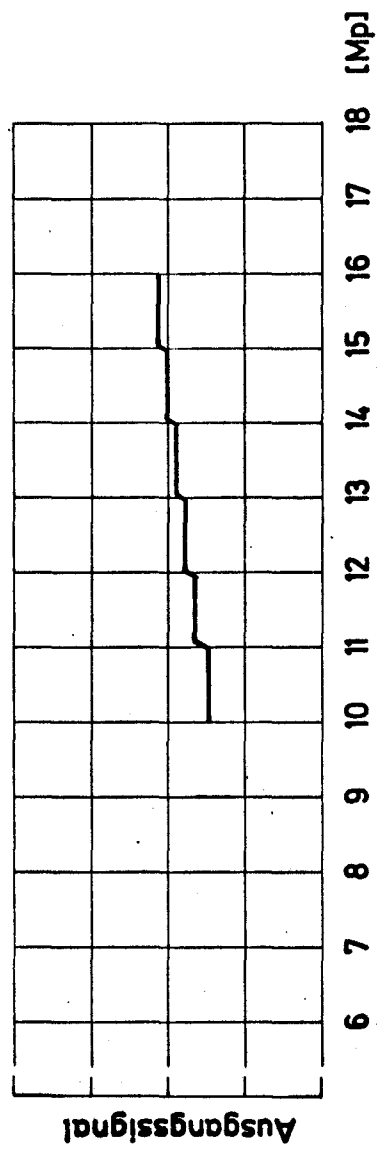


Fig. 7 Änderung des Ausgangssignals bei Lasterhöhung