

KfK 4765  
August 1990

# **Elektro-magnetische Untersuchungen zur Detektion von innen- und außenseitigen Schadstellen an Stahlrohren**

**O. Fromhein, H. Günther, W. Lindl, O. Müller, J. Ottes  
Hauptabteilung Datenverarbeitung und Instrumentierung**

**Kernforschungszentrum Karlsruhe**



KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

Hauptabteilung Datenverarbeitung und Instrumentierung

KfK 4765

Elektro-magnetische Untersuchungen zur Detektion von  
innen- und außenseitigen Schadstellen an Stahlrohren

O. Fromhein, H. Günther, W. Lindl,  
O. Müller, J. Ottes

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

Als Manuskript gedruckt  
Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH  
Postfach 3640, 7500 Karlsruhe 1

ISSN 0303-4003

**Zusammenfassung:**

Für die Zwecke der Pipeline-Überwachung werden elektro-magnetische Meß-Methoden mit der Zielvorstellung untersucht, riß- und lochartige Materialfehler in der Wandung und an der außenseitigen Oberfläche des Rohres einschließlich ihrer Ortskoordinaten zu detektieren, wobei die Meß-Anordnung im Innern des Rohres vorangetrieben wird. Streufluß-, Remanenz- und Fernfeld-Wirbelstrom-Messungen werden hinsichtlich der Detektierbarkeit von künstlichen Fehlern miteinander verglichen und damit ihre Einsatzgrenzen für die obige Aufgabenstellung behandelt.

**The detection of outside corrosion defects of pipelines by electro-magnetic means****Abstract:**

Different electro-magnetic methods are investigated for the purpose of pipeline-inspection. The detection of corrosion induced cracks and pits within the tube wall and at the outside of the tube including their location parameters measured from the inside of the tube are of main interest. Measurements on the basis of conventional eddy-current methods and flux-method are compared with the remote field eddy-current method with respect of the detectivity of artificial defects. And finally because of the different constraints a possible but limited implementation of such a vehicle is discussed.

# Inhaltsverzeichnis

	Seite
Einleitung	2
1. Streufluß-Messungen mit lokaler Magnetisierung	3
1.1 Differenzsonde	3
1.2 Spule mit Dauermagnet-Vormagnetisierung	5
1.3 Remanenz-Messung mit Tonkopf-Sonde	5
2. Streufluß-Messungen mit zentraler Feldversorgung	6
2.1 Messungen im Hauptfeld	6
2.2 Messungen mit zentraler Magnetisierung außerhalb des Hauptfeldes	8
3. Schlußfolgerungen	12
4. Literaturzusammenstellung	14

## Elektro-magnetische Untersuchungen zur Detektion von innen- und außenseitigen Schadstellen an Stahlrohren.

O.Fromhein, H.Günther, W.Lindl, O.Müller, J.Ottes, HDI-2

Mit diesem Bericht sollen die zahlreichen Untersuchungen zum Thema der ortsselektiven Detektion von Korrosion mit elektro-magnetischen Meßverfahren an ferro-magnetischen Rohren zu einer übersichtlichen Darstellung zusammengefaßt werden.

Die eigentliche Zielvorstellung bestand darin, ein mobiles Innenrohr-Sondensystem zu entwickeln, das sich im flüssigen oder gasförmigen Fördergut mit annähernd gleicher Geschwindigkeit fortbewegt, um Innenfehler und auch Außenfehler einschließlich ihrer Ortskoordinaten zu erfassen. Für die Bestimmung und Katalogisierung von Restwandstärken in Pipelines ist bereits ein sehr erfolgreich arbeitendes Meßsystem mit Hilfe von Ultraschall-Techniken entwickelt worden (1). Da sich trotzdem immer wieder sehr schwierige und gefahrenträchtige Korrosionszustände ergeben, bei denen sich kein Echosignal auswerten läßt, sollte eine weitere Meßmethode die Informationslücke schließen, bzw. die Daten der Ultraschall-Messung für eine umfassende Interpretation der Fehlergeometrien ergänzen.

Diese Situation stellte sich vor allem bei rißartigen Strukturen an der Oberfläche und in der Wandung des Rohres und bei lochartigen Wanddicken-schwächungen.

In der Untersuchungsphase stand zunächst nicht die Klassifizierung der Fehler und deren quantitative Beschreibung im Vordergrund, sondern ausschließlich ihre Detektierbarkeit.

Damit der ergänzende Charakter der elektro-magnetischen Meßmethode voll zum Tragen kommt, müssen sich die Einsatzbedingungen im ganzen Umfang nach denen der Ultraschall-Meßtechnik orientieren. Das gilt vor allem für die Meßgeschwindigkeit, die zur Zeit bis zu 100 cm/sec betragen kann, und für die Registrierung des Fehlerortes zum Zweck der eindeutigen Lokalisierung der Schadstelle.

In den Jahren zuvor war bereits eine automatische Messanlage mit Rechnersteuerung unter anderem für die Erfassung von Materialeigenschaften über die gesamte Oberfläche von nichtmagnetischen Hüllrohren entwickelt worden (2). Die Realisierung erfolgte durch Messung der komplexen Ausgangsspannung einer Differenz-Tastspule. Auf der Basis dieser Erfahrungen erschien es zunächst aus physikalischen Gründen unmöglich zu sein, mit einem magnetischen Messverfahren auf der gegenüberliegenden Seite befindliche fehlerhafte Stellen durch eine Rohrwand aus ferro-magnetischem Material "hindurchmessen" zu können. Unabhängig vom Einfluß des Skin-Effektes werden magnetische Feldlinien beim Übergang in ein höher permeables Medium nach dem Brechungsgesetz von der Flächennormalen weggebrochen, d.h. sie verlaufen praktisch parallel zur Trennschicht und dringen nur geringfügig in das Medium ein.

Trotz dieser ungünstigen Perspektive wurden einige Experimente verabreitet, um mit gebotener Sorgfalt die Grenzen der bekannten Verfahren einander gegenüberzustellen und um die Leistungsfähigkeit des in verschiedenen Veröffentlichungen (3,4) bekannt gewordenen sogenannten Fernfeldwirbelstrom-Verfahrens nachzuvollziehen, und zwar zunächst an kurzen Rohrstücken (Länge 100cm, Durchmesser 110 mm, Wandstärke 4mm) mit Durchgangs- und Sacklöchern.

## **1. Streufluß-Messungen mit lokaler Magnetisierung**

### **1.1. Differenzsonde**

Die Instrumentierung der Meßeinrichtungen wurde größtenteils aus vorhandenen Geräten zusammengestellt, nur die notwendige Sensor-Technik wurde in speziellen Fällen durch eigene Entwicklungen realisiert. Die Gestaltung der Sonde mußte ein Kompromiß sein zwischen örtlicher Fehlerauflösung, Eindringtiefe und relativer Unempfindlichkeit gegenüber Abstandsänderungen. Je höher die örtliche Fehlerauflösung sein soll, desto kleiner sind die Abmessungen der Spule bzw. des Ferrit-Stiftes und damit entsprechend gering wird die Eindringtiefe des magnetischen Feldes. Allein der Geometriefaktor bewirkt schon eine wesentliche Abschwächung des magnetischen Feldes, z.B. in einer Entfernung von einem Durchmesser beträgt die Feldstärke nur noch etwa 10 Prozent in Relation zu dem Wert an der Ferrit-Oberfläche (5). Durch eine parallele Anordnung von zwei Spulen mit Ferrit-Kernen in einer gemeinsamen Erregerspule wurde der Einfluß von Abstandsänderungen minimal gehalten (Abbildung 1).

Das physikalische Meßprinzip ist bekannt und in zahlreichen Veröffentlichungen beschrieben (6). Durch die Erregerspule wird ein magnetisches Feld in die Rohrwandung eingekoppelt. Es entstehen Wirbelströme, die ihrerseits ein Magnetfeld erzeugen, das sich dem Erregerfeld überlagert. Das resultierende Feld wird von den Meß-Spulen empfangen und als Spannung der weiteren Meßanordnung zugeführt.

Die Instrumentierung und Meßanordnung sind in Abbildung 2 wiedergegeben. Wegen der begrenzten Rohrlängen wurde die mobile Meßeinrichtung bis etwa 30cm/sec ausgenutzt. Die Ergebnisse und Untersuchungsparameter dieser Versuchsserie sind in Abbildung 3 dargestellt und können folgendermaßen zusammengefaßt werden. Mit etwa 80dB konnte der Einfluß des Erregerfeldes im Sensor-Signal abgeschwächt werden. Daher konnte neben der sehr selektiven Lock-In-Technik als Nachweismethode auch eine schmalbandige Spannungsmessung verwendet werden. Wegen der differenzierenden Eigenschaften der Sonde ist in dem Signalverlauf kein formgetreues Abbild der Lochgeometrie möglich. Die Ränder großer Löcher sind durch einen doppelten Differenzimpuls markiert, was durch den Abstand der Ferritstifte bedingt wird. Bei kleineren Löchern überlagern sich die Meßeffekte beider Spulen mit der Tendenz gegenseitiger Abschwächung. Obwohl die Differenzsonde Fehlersignale in der Größenordnung von einigen Millivolts liefert und die untere Grenze der Meßfrequenz bis zum Erreichen der Rohrwanddicke nach dem Kriterium der äquivalenten Leitschichtdicke für den Skin-Effekt ausgewählt wurde, konnten außenliegende Fehler mit diesem Verfahren nicht detektiert werden.

Entsprechend verliefen Versuche längs einer Umfangslinie im Innern von einem 28 Zoll Rohr (drehbares Rohrstück, Wandstärke 8mm). Die Darstellung in Abbildung 4a bestätigt die Verwendungsmöglichkeit der obigen Sonde für die ortsselektive Detektion von innenliegenden Oberflächenfehlern bei Meßgeschwindigkeiten bis zu 50cm/s.

In diesem Zusammenhang sollen auch Messungen mit der Differenzsonde an einem Aluminium-Rohr vergleichbarer Dimensionen nicht unerwähnt bleiben. Da die hohe relative Permeabilität bei einem ferromagnetischen Rohr entscheidend dazu beiträgt, die Eindringtiefe des magnetischen Feldes zu begrenzen, bzw. die Rückwirkung außenliegender Schadstellen zu bedämpfen, sind bei einem Aluminium-Rohr mit gleichartigen künstlichen Fehlern bessere Ergebnisse zu erwarten. Wie das Meßergebnis in Abbildung 5 belegt, konnten außenliegende Längs- und Querschlitz von der Innenseite her mit großem Signalpegel und bei einer erwarteten höheren Meßfrequenz (ca. 500 Hz) detektiert werden. Die Folgerung für ferro-

magnetisches Rohrmaterial wäre die bereichsweise magnetische Sättigung (7).

## 1.2. Spule mit Dauermagnet-Vormagnetisierung

Die angestrebte Vergrößerung der Eindringtiefe durch immer niedrigere Erregerfrequenzen führte schließlich zu der Idee, das Magnetfeld durch einen Permanentmagneten zu erzeugen. Die Konstruktion der Sonde enthält einen relativ breiten Dauermagneten mit einer konzentrischen Luftspule. Alle in die Rohrwand eintretenden Feldlinien erfahren eine Ablenkung, wie es das Brechungsgesetz bestimmt, sie magnetisieren das Rohrmaterial und erzeugen je nach Größe der Fehlstellen unterschiedliche Induktionen. Sie verlassen schließlich die Rohrwand wieder und kehren zum Gegenpol des Magneten zurück. Bei einer Bewegungsänderung wird in der Luftspule eine Ausgangsspannung induziert, die von der Geschwindigkeit und der vorhandenen Remanenz abhängt.

Das Ergebnis ist deshalb bemerkenswert, da der meßtechnische Aufwand außerordentlich gering ist (Abbildung 4b). Im Vergleich zu den vorausgegangenen Darstellungen sind fast alle eingebrachten Fehler erkennbar, allerdings sind auch weitere Maxima vorhanden, deren physikalische Ursache auf andere Unterschiede in den Materialeigenschaften zurückzuführen sind, die in diesem Zusammenhang nicht weiter betrachtet werden sollen.

## 1.3 Remanenz-Messung mit Tonkopf-Sonde

Mit einem Vorgriff auf eine spätere Versuchseinrichtung für ein 30 Zoll Rohr sollen auch die Ergebnisse der Remanenz-Messungen in diesem Zusammenhang dargestellt werden. In dieser Versuchsserie wurde der Bereich der Meß-Spur durch einen starken Permanentmagneten, bzw. der ganze Rohrumfang durch ein Gleichfeld wie in der Versuchsanordnung von Abbildung 10 vormagnetisiert und anschließend die eigentliche Messung ausgeführt. Durch die Vormagnetisierung werden alle fehlerhaften Stellen in einen unterschiedlichen Remanenzzustand gebracht. Solange dieser erhalten bleibt, liefert schon eine einfache Magnetspule mit Ferrit-Kern ein Abbild des unterschiedlich gespeicherten magnetischen Flusses.

Da neben der Abbildungstreue von künstlichen Oberflächen-Fehlern auch die maximal mögliche Meß-Geschwindigkeit von Bedeutung war, wurden

zunächst Geschwindigkeitsuntersuchungen an durchgehenden Bohrungen vorgenommen. In Abbildung 6 ist das Ergebnis am Beispiel von Bohrungen mit einer Tonkopf-Sonde wiedergegeben. Die Messungen wurden bis zu einer Geschwindigkeit von 70cm/s betrieben. Allerdings ist mit dieser Wahl bereits der Wert weit überschritten, bei dem die künstlichen bzw. die bekannten Fehler eindeutig identifizierbar sind. Das Hauptinteresse der Untersuchungen liegt in der Detektierbarkeit von außenliegenden Fehlern. Wie in der Abbildung 7 zu sehen ist, sind auch Sacklöcher nachweisbar. Das Auswertekriterium ist bei dieser Methode nur auf die Amplitudeninformation beschränkt und daher stark von der Meß-Geschwindigkeit abhängig. Das Verfahren ist damit auch äußerst anfällig gegenüber solchen Material-Änderungen, die noch keinen eigentlichen Material-Fehler beinhalten. Diese reinen Amplituden-Auswertungen wurden zunächst zugunsten von solchen Verfahren zurückgestellt, die auch Phasen-Informationen auszuwerten erlauben.

Die weiteren Überlegungen zielten darauf ab, das einwirkende magnetische Wechselfeld effektiver in das auszumessende Medium einzukoppeln und vor allem die Sonde aus der Einflußzone des primären Magnetfeldes herauszubringen.

## **2. Streufluß-Messungen mit zentraler Feldversorgung**

### **2.1. Messung im Hauptfeld.**

Die Meßanordnung nach Abbildung 8 ermöglicht die direkte Kopplung des Magnetfeldes in einen größeren Teilbereich der angrenzenden Rohrwand. Eine zentrale Erregerspule erzeugt das erforderliche Magnetfeld, das über Polschuhe in das ferro-magnetische Rohr geleitet wird.

Zur Deutung des Feldverlaufs im Rohrabschnitt zwischen den Polschuhen soll von der idealisierten Vorstellung ausgegangen werden, daß ein zur Grenzfläche paralleles Magnetfeld über eine unendlich ausgedehnte Grenzfläche vom luftleeren Raum in ein hochpermeables Medium eindringt. Aus den Maxwell'schen Gleichungen läßt sich für einen periodischen Vorgang folgende Gesetzmäßigkeit für die magnetische Feldstärke ableiten :

$$h(t,x) = H_0 \exp(-x/a) \cos(\omega t - x/a) \quad (1)$$

wobei mit  $a$  die äquivalente Leitschichtdicke bzw. die Dämpfungskonstante,  $x$  die Eindringtiefe,  $H_0$  die magnetische Feldstärke an der Oberfläche,  $\omega$  die Frequenz und  $t$  die Zeit definiert sind.

Das magnetische Feld erfährt also beim Eindringen in das permeable Medium eine Dämpfung und Phasendrehung. Entsprechendes gilt für die elektrische Stromdichte:

$$s(t,x) = S_0 \exp(-x/a) \cos(\omega t - x/a - 3\pi/4) \quad (2)$$

$$\text{bzw. } s(t,x) = S_0 \exp(-x/a) \sin(\omega t - x/a - \pi/4) \quad (2a)$$

$$\text{mit } S_0 = H_0 \sqrt{2/a}$$

Dieser Vorgang breitet sich mit einer endlichen Geschwindigkeit aus, die aus den obigen Gleichungen formal hergeleitet werden kann.

$$v = \omega a = 2\pi f a = (4\pi f / \mu \sigma)^{1/2} \quad (3)$$

Wenn man für die Eindringtiefe die entsprechende Bestimmungsformel substituiert, ist letztlich die Ausbreitungsgeschwindigkeit von den Materialkonstanten, nämlich der relativen Permeabilität und der elektrischen Leitfähigkeit, und von der Frequenz abhängig. Allerdings ist damit das Problem noch nicht gelöst, da diese Werte für den aktuellen Fall bekannt sein müssen. Zunächst soll nur darauf verwiesen werden, daß mit der Gleichung (1) ein experimenteller Weg für die Bestimmung der äquivalenten Leitschichtdicke und der dazugehörigen Frequenz gegeben ist. Die Aufgabe läuft darauf hinaus, die Frequenz zu bestimmen, bei der die Phasenverschiebung der magnetischen Feldstärke zwischen Innen- und Außenwand gerade 57,3 Grad beträgt. Obige Gleichungen haben eine gewisse Ähnlichkeit mit den Vorgängen auf einer schwach verlustbehafteten Leitung, bei der allerdings die Phasenlage durch den Leitungsabschluß bestimmt wird. Magnetische Feldstärke und Stromdichte unterscheiden sich dagegen durch die ungewöhnliche Phasenlage von  $3\pi/4$ .

Im Bereich zwischen den Polschuhen dürften die Gleichungen eine gute Basis für die Bestimmung der optimalen Frequenz und der äquivalenten Leitschichtdicke sein. Die magnetischen Feldlinien an der Innenseite der Rohrwand werden daher nur von den Materialfehlern an der inneren Oberfläche beeinflusst. Rückwirkungen von außenliegenden Fehlern müßten daher wegen der Quellenfreiheit magnetischer Wirbelfelder außerhalb des Hauptfeldes feststellbar sein, also außerhalb des Bereiches, der durch die Polschuhe bestimmt ist. Die folgenden Betrachtungen werden auf die besondere Sondenposition bei der Detektion außenliegender Fehler näher eingehen. Doch zunächst noch einige Anmerkungen zu den Meßergebnis-

sen aus dem Bereich zwischen den Polschuhen. Als Sondentyp hat sich ein normaler Tonkopf, wie er in der Audiotechnik gebräuchlich ist, optimal bewährt.

Die in Abbildung 9 wiedergegebenen Ergebnisse sind an einem 9 Zoll Rohr mit 4mm Wandstärke gewonnen worden. Bei einem Erregerstrom von 0.5A und 250Hz waren Bohrungen mit einem sehr guten Signal-zu-Rauschverhältnis darstellbar, wobei der Verstärkungsfaktor für die Signallaufbereitung etwa 60dB betrug.

Die ortsselektive Detektion außenliegender Sacklöcher erbrachte keine auswertbaren Ergebnisse. Die weiteren Untersuchungen konzentrierten sich daher auf Messungen außerhalb des Hauptfeldes.

## **2.2. Messungen mit zentraler Magnetisierung außerhalb des Hauptfeldes.**

Angeregt wurde diese Meßanordnung durch die Veröffentlichungen zum Thema Fernfeldwirbelstrom-Methode (3,4). Das Magnetfeld wird durch eine Luftspule mit möglichst großem Durchmesser erzeugt, so daß eine berührungsfreie Bewegung durch das Rohr gewährleistet ist (Abbildung 10). Das Sensorelement ist in einiger Entfernung zur Spule in geringem Abstand zur Rohrinnenfläche angebracht. Die elektronische Ausrüstung zur Signalverarbeitung konnte bis auf kleine Veränderungen von den bisherigen Versuchen übernommen werden, so daß vergleichende Untersuchungen ohne Zeitverzug möglich wurden. Die in den Veröffentlichungen teilweise dargebotene physikalische Interpretation der Detektion außenliegender Materialfehler erfuhr oft Hilfestellung aus dem Bereich der Phänomene und ließ damit auch Skepsis aufkommen. In der Zwischenzeit sind allerdings Modellrechnungen für die Feldverteilung der magnetischen Feldstärke nach der Finite-Element-Methode (8) ausgeführt worden. Sie erlauben den Hinweis, daß tatsächlich ein wenn auch schwacher Meßeffect für außenliegende Materialfehler physikalisch nachweisbar ist.

Zunächst bestand das Ziel darin, mit einem mobilen Meßsystem die beschriebenen Versuche am Beispiel künstlicher Materialfehler in dem bereits verwendeten Rohrstück (4 Zoll, 4mm Wandstärke, 1m Länge) nachzuvollziehen. Gemessen wurde mit einer ortsselektiven Tonkopf-Sonde, die sich aus Vergleichsmessungen als optimale Lösung herausgestellt hatte. Die Ergebnisse (Abbildung 11) waren hinsichtlich ihrer Qualität für die Darstellung außenliegender Fehler überraschend gut, so daß weitere Versuche mit einem besseren Bezug zu realen Testbedingungen geplant wurden. Es entstand eine Meßanordnung nach Abbildung 10 für den Einsatz in einem 27

Zoll Rohr mit 10mm Wandstärke und 7m Länge. Hiermit war auch die Möglichkeit gegeben, alle interessierenden Parameter zu optimieren.

Obwohl die Computer-Simulationen der Feldverteilungen zum Zeitpunkt der Versuche nicht bekannt waren, scheint es zweckmäßig zu sein, diese Ergebnisse als Hintergrundinformation für die folgenden Darstellungen mit zu betrachten (8).

Das Feld der Erregerspule ohne die Rückwirkung durch das umschließende Rohr hätte einen ellipsoidalen Verlauf wie in Abbildung 12. Durch den Einfluß eines nur permeablen Materials würden sich die Feldlinien entsprechend den Stetigkeitsbedingungen in der Rohrwand konzentrieren. Im Fall der zusätzlichen Leitfähigkeit erfolgt eine Beeinflussung durch das Magnetfeld der induzierten Wirbelströme (Abbildung 13). In jedem Fall müssen die Feldlinien geschlossen sein und die, die schließlich doch noch unter Wahrung der Stetigkeitsbedingungen aus dem Rohr heraustreten, sind für den gewünschten Meßeffect verantwortlich; sie durchlaufen allerdings den Bereich der Rohrwand noch einmal.

Vor dem eigentlichen Meß-Einsatz mußten zunächst einige wichtige Betriebsparameter, wie Frequenz, Abstand zwischen Erregerspule und Sonde, minimale Durchflutung und Meß-Geschwindigkeit, bekannt sein. Für die folgenden Versuchsreihen wurde eine Serie von Löchern längs einer Mantellinie angebracht, die nach der Optimierung durch eine weitere Serie von Sacklöchern ergänzt wurden (siehe Abbildung 19). Zur rechnerischen Bestimmung der optimalen Arbeitsfrequenz fehlten die notwendigen Angaben über die Materialkonstanten für die Permeabilität und die Leitfähigkeit. Richtwerte aus Tabellenwerken ergaben keine gute Übereinstimmung mit den meßtechnisch gefundenen Werten. Aus der Darstellung von Abbildung 14 ist zu entnehmen, daß die größten Werte für die Phase an den Fehlerstellen zwischen den Frequenzen von 6 Hz und 40 Hz mit einem flachen Maximum bei 14 Hz liegen.

Die optimale Position der Meßsonde war zunächst vor der Veröffentlichung der Feldberechnungen nach den Angaben von T.R.Schmidt gewählt worden (3). Durch ergänzende Versuche konnten die Angaben bestätigt werden. Danach ergab die Variation des Abstandes zwischen Sensor und Erregerspule ein flaches Maximum zwischen 1.4 und 2 d (Abbildung 15). Der schräge Versatz der Kurven ist durch die Anordnung von Sensor und Erregerspule bedingt, da bei gleicher Startposition des Meß-Schlittens auch die Entfernung zum ersten Fehler abnimmt.

In der ersten Phase der Untersuchungen kam es darauf an, überhaupt Signale von markanten Fehlern zu erhalten, und das wurde zunächst mit ei-

nem allmählich vertieften Sägeschlitz erreicht. Auffallend war der Umstand, daß die Signalpegel in der Größenordnung von  $\mu$ Volts liegen und daher noch eine erhebliche Verstärkung erfahren müssen, bevor sie ausgewertet werden können. Die Steigerung der Empfindlichkeit war daher das weitere Ziel.

Nachdem die bestmögliche Sensor-Position (1,5d) und die wirkungsvollste Erregerfrequenz (14Hz) bestimmt worden sind, bleibt noch an einstellbaren Parametern der Strom durch die Erregerspule, also die Durchflutung, übrig. Diese Frage gewinnt für den Fall der netzunabhängigen Versorgung besondere Bedeutung, da ein Kompromiß zwischen Fehler-Detektierbarkeit, also Strombedarf, und Einsatzdauer gesucht werden muß. Eine nachträgliche Erhöhung der Windungszahl wäre auch denkbar gewesen, nur wegen des größeren Aufwandes ist darauf verzichtet worden. Es war zu erwarten, daß bei der größten Durchflutung auch das beste Signal-zu-Rausch-Verhältnis gemessen wird. In der Abbildung 16 wird diese Vermutung auch bestätigt. Der Abstand des Sensors zur Rohrwand kann leider nicht beliebig klein gemacht werden. Je größer die Entfernung, desto geringer wird die gemessene Amplitude und damit auch die Bestimmung der Phase, wobei allerdings die örtliche Auflösung nach Abbildung 17 nicht entscheidend schlechter wird. Selbst bei einem Abstand von 8mm ist der außenliegende Schrägschlitz noch deutlich erkennbar.

Die bisherigen Optimierungsversuche waren zunächst darauf ausgerichtet, ein möglichst gut funktionierendes Meßsystem zu erhalten. Die mobile Meß-Einrichtung wurde zu dem Zweck gerade so schnell bewegt, daß kein verfälschender Einfluß erkennbar war. Die eigentliche Zielvorstellung sollte ein mobiles Meß-System mit Geschwindigkeiten um 100cm/s sein. Mit den laufenden Verbesserungen bei der Auswahl der Sensoren und deren Anpassung an den Vorverstärker konnte die Meß-Geschwindigkeit von zunächst 0,4cm/s auf etwa 4cm/s gesteigert werden. Die in der Darstellung von Abbildung 18 ausgewiesene Kurve für 6 cm/s enthält bereitszusätzliche Fehler-signale, und ein 3mm Loch ist gerade noch gut erkennbar. Es erhebt sich die Frage, was praktisch überhaupt an Meß-Geschwindigkeit erreicht werden kann, zumal eine theoretische Bestimmung nach Gleichung 3 von der Kenntnis der Materialeigenschaften ausgeht, was nicht gegeben ist. Bei einer Auswertung eines mit Störungen behafteten Meß-Signals sollte das ganze System je nach Genauigkeitsanforderung einer Einwirkzeit von mehreren Perioden ausgesetzt sein. Kritisch wird es im Bereich der kleinsten Fehlergeometrie ( 3mm). Über die Meß-Zeit von nur einer Periode (Erregerfrequenz 14Hz) ergibt sich rechnerisch eine maximale Geschwindigkeit von

4,2cm/s. Diese Überlegung läßt keine weitere Steigerung der Geschwindigkeit zu, es sei denn, man akzeptiert Zufallsergebnisse.

In Abbildung 19 ist schließlich das Ergebnis der Optimierungen durch die Detektion der zusätzlich angebrachten außenliegenden Sacklöcher zusammengefaßt.

Nach Abschluß dieser Untersuchungen ergab sich die Möglichkeit ein weiteres "echtes" Rohrstück aus einer Pipeline zu untersuchen, das wegen der mit Kontakt-Ultraschall-Technik entdeckten inneren Risse aussortiert wurde (Durchmesser 10 Zoll, Wandstärke 10mm, Länge 250cm). Da auch in diesem Fall keine Informationen über Materialeigenschaften vorlagen, mußten die Untersuchungsparameter in gleicher Weise durch Versuche bestimmt werden.

Eine erste Orientierungsmessung mit den vom 27 Zoll Rohr bekannten Parametern (Erregerfrequenz 14Hz, Erregerstrom 5A, Sondenabstand 1,5d) erbrachte leider kein verwertbares Fehlersignal als Hinweis für die vorhandenen Risse, so daß zunächst wieder ein künstlicher Fehler in der Form eines 4mm Loches gebohrt werden mußte. Die Variation der Frequenz (Abbildung 20) führte zu einer optimalen Erregerfrequenz von 5,5Hz. Erregerstrom und Sondenabstand wurden nicht verändert.

Erst nach dieser Optimierung wurden die Untersuchungen an verschiedenen künstlichen außenliegenden Fehlern mit Hilfe der Fernfeld-Wirbelstrom-Methode fortgesetzt. In der Abbildung 21 sind die Fehler-signale für mehrere Sacklöcher und für einen Querschlitz bei einer Meßgeschwindigkeit von 2mm/s wiedergegeben. Die Darstellung der Fehlergeometrie in den gemessenen Phasenwerten deckt sich mit den künstlich angebrachten Fehlern, auch wenn die Bezugslinie große, allerdings reproduzierbare Schwankungen durchläuft. Da sich mit zunehmender Rohrtiefe die Bezugslinie stabilisiert, ist diese Beobachtung auf den Einfluß des Rohrfangs zurückzuführen. Die erwähnten inneren Risse konnten auch nach der Optimierung des Meßsystems nicht nachgewiesen werden.

Die Frage nach der flächendeckenden Erfassung von Fehlern wird in Abbildung 22 anschaulich beantwortet. Obwohl alle lochförmigen Fehler auf einer Mantellinie liegen, werden sie noch auf 2 bis 3 Grad daneben liegenden Meß-Spuren detektiert, also breiter dargestellt als sie in Wirklichkeit sind. Dies kann nur zum Teil durch die Breite der Sonde mit 11mm erklärt werden. Offensichtlich erfährt die physikalische Lochgeometrie eine magnetische Aufweitung, die die Möglichkeiten der Fehlerinterpretation von Mehrspurdarstellungen stark beeinträchtigen.

### 3. Schlußfolgerungen

Es war das Ziel dieser Aufgabenstellung, einen zusammenfassenden Überblick über die bisherigen Untersuchungen zum Thema einer mobilen, ortsselektiven Innenrohr-Meß-Einrichtung mit einem magnetischen Meß-Verfahren zu geben. Dabei erwiesen sich die sogenannte Fernfeld-Wirbelstrom-Methode und die Remanenz-Methode als besonders geeignet, um vor allem außenliegende Fehler zu erfassen. Das erstere Verfahren verbindet diese vorteilhaften Eigenschaften mit dem Nachteil, sehr niedrige Signalpegel im  $\mu$ Volt-Bereich zu liefern, und das außerdem noch bei niedrigen Frequenzen, so daß sich nur bescheidene Werte für die Meß-Geschwindigkeit ergeben. Die Remanenz-Methode produziert höhere Signal-Pegel, allerdings abhängig von der Bewegungsänderung, und erlaubt nur eine Amplituden-Auswertung. In jedem Fall benötigen beide Methoden eine pflegende Experimentierhand, und es müßte immer sichergestellt sein, daß sich die Materialeigenschaften, wie relative Permeabilität und elektrische Leitfähigkeit, nicht verändert haben, da sonst die eingestellte Meß-Geschwindigkeit nur noch Zufallsmessungen zur Folge hat.

Für innenliegende Fehler liegen die Vorteile bei der Streufluß-Methode, da die Sonden Signal-Pegel im mVolt-Bereich erzeugen und die Meß-Frequenzen höhere Arbeitsgeschwindigkeiten erlauben. In den Abbildungen 23 und 24 sind die untersuchten Methoden hinsichtlich ihrer Detektioneigenschaften für Innen- und Außenfehler bei unterschiedlichen Meß-Geschwindigkeiten noch einmal zusammengestellt. In solchen Anwendungsfällen, bei denen die Meßzeit und auch der Aufwand überhaupt keine Rolle spielen, läßt sich die Fernfeld-Wirbelstrom-Methode mit den erwähnten technischen Vorbehalten einsetzen.

Für einen eingeschränkten Einsatzfall bietet eine Kombination der Verfahren in einem Meßaufbau die Möglichkeit, zwischen Innen- und Außenfehlern unterscheiden zu können.

Im Laufe der Entwicklung ist manche Idee geboren worden, die sich teils als Irrweg erwies oder die teils zu einer kleinen Verbesserung geführt hat. Zu der letzten Kategorie gehört die Überlegung, die Verweildauer an einem Fehlerort und damit die Meßzeit künstlich zu verlängern. Man erreicht dieses Ziel, wenn man den Sensor auf dem Meß-Schlitten eine gegenläufige Bewegung ausführen läßt. In der Abbildung 25 sind einige Signalaufzeichnungen mit einem gegenläufigen Sensor zusammengestellt. Eine Steigerung der Schlittengeschwindigkeit im Bereich des 4mm Loches ist immerhin von 4mm/s bis ca 8cm/s erreichbar. Da durch die gegenläufige Bewegung ei-

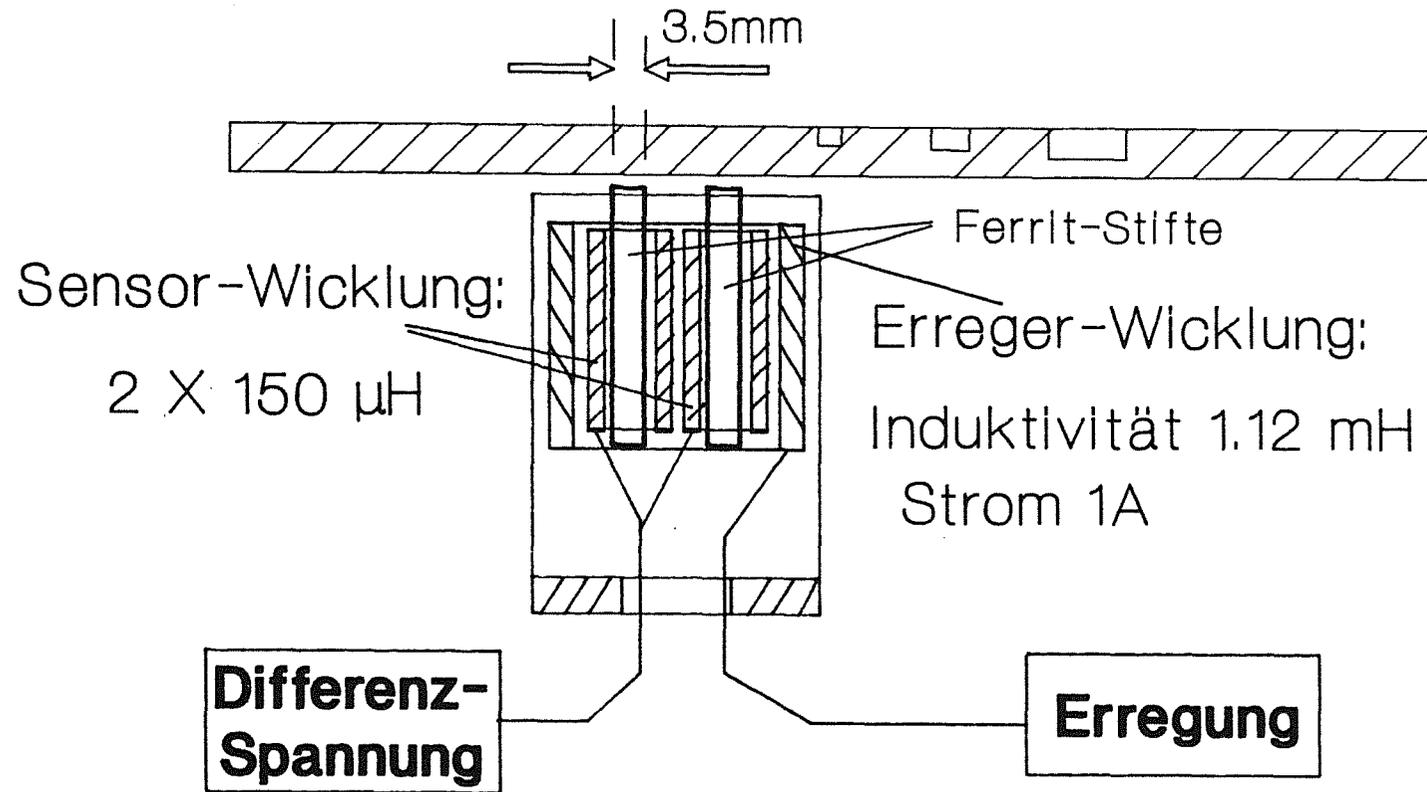
ne entsprechend verkürzte Meßbahn resultiert, müßte ein weiterer Sensor in dem Moment einsatzbereit sein, wenn der vorauseilende am Ende seines Meß-Weges angelangt ist.

Als Schlußfolgerung kann festgestellt werden: Meß-Geschwindigkeiten, die einen Vergleich mit der Ultraschall-Meßtechnik aushalten, sind auf elektromagnetischer Basis leider nicht realisierbar, und somit entfällt eine praktische Verwertung der Ergebnisse für eine unbemannte Sonde mit den angestrebten Eigenschaften.

#### 4. Literaturzusammenstellung.

- ( 1 ) Korrosion frühzeitig erkennen.  
J.G. Ottens, H. Stripf, Elektronik, 26, 1988, S. 66-70.
- ( 2 ) Eine rechnergeführte Vermessungsanlage für die Brennstabprüfung.  
O. Fromhein, KFK-Nachrichten Jg. 12, 1-2/80, S.58-62.
- ( 3 ) The Remote Field Eddy Current Inspection Technique.  
T.R. Schmidt, Materials Evaluation 42, February 1984, S. 225-230
- ( 4 ) History of the Remote Field Eddy Current Inspection Technique.  
T.R.Schmidt, Materials Evaluation 47, January 89, S. 14-22
- ( 5 ) Theoretische und experimentelle Grundlagen der zerstörungsfreien  
Werkstoffprüfung mit Wirbelstromverfahren.  
F.Förster, Zeitschrift für Metallkunde 43.Jahrgang 1952, S. 163-171
- ( 6 ) Elektronik in der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung.  
H. Lutz, Der Elektroniker, Nr. 9/1974, S. EL7-EL13
- ( 7 ) On-Site Examination of Ferritic Steel Tubes in Heat Technique.  
C.N.Owston, British Journal of NDT, July 1985, S. 227-231
- ( 8 ) Finite Element Model for the Remote Field Eddy Current Effect.  
W.Lord,Final Report,International Conference on Remote Field  
Technique,Queen`s University Kingston,1988

# Differenz-Sonde



Primärfeldunterdrückung 80 dB

Abbildung 1

# Meßanordnung für Defektstellensuche mit Differenz-Tastsonde

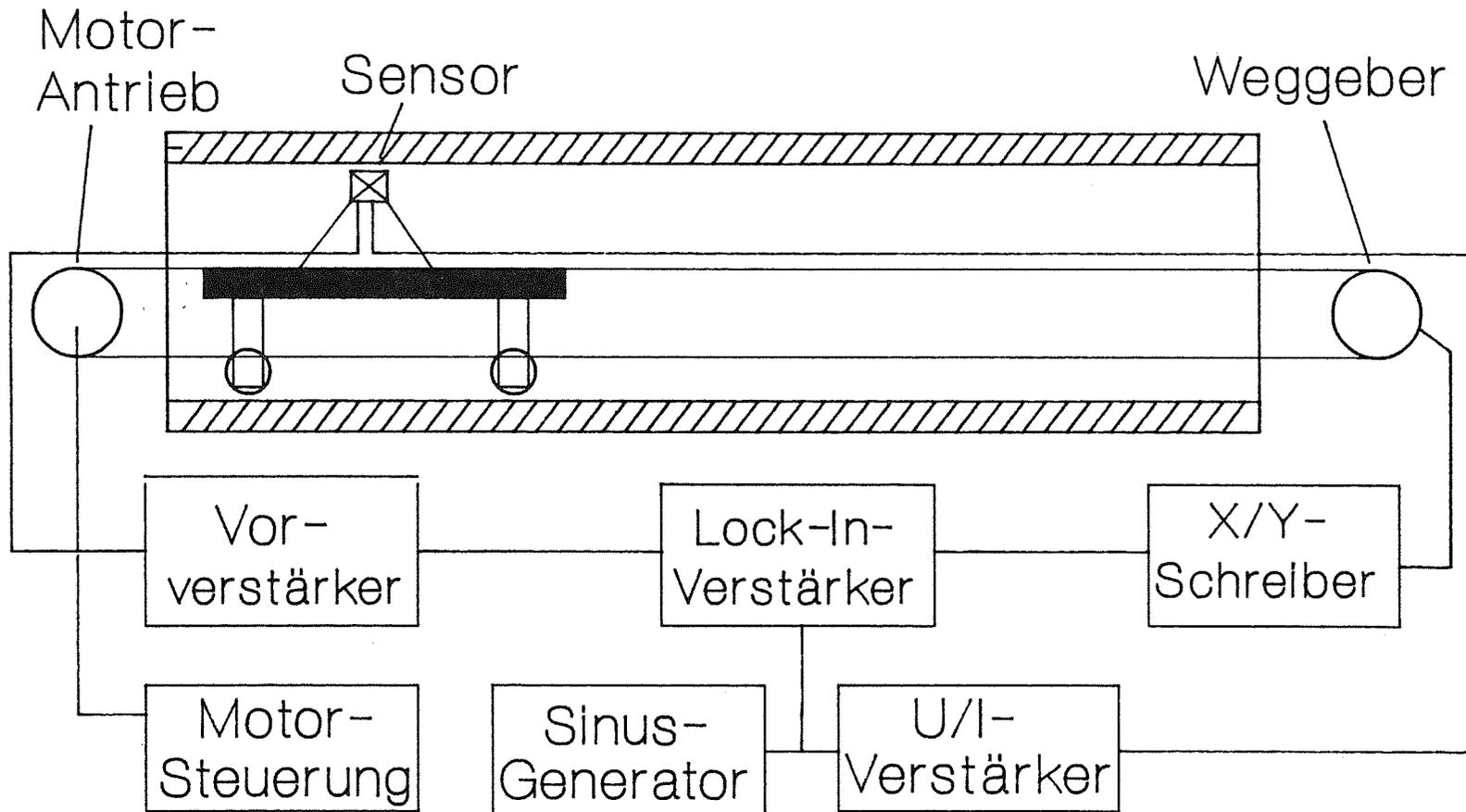
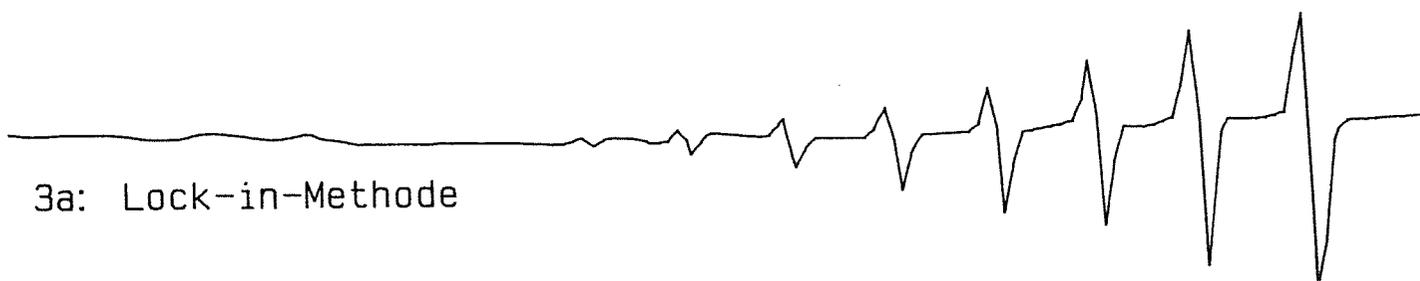
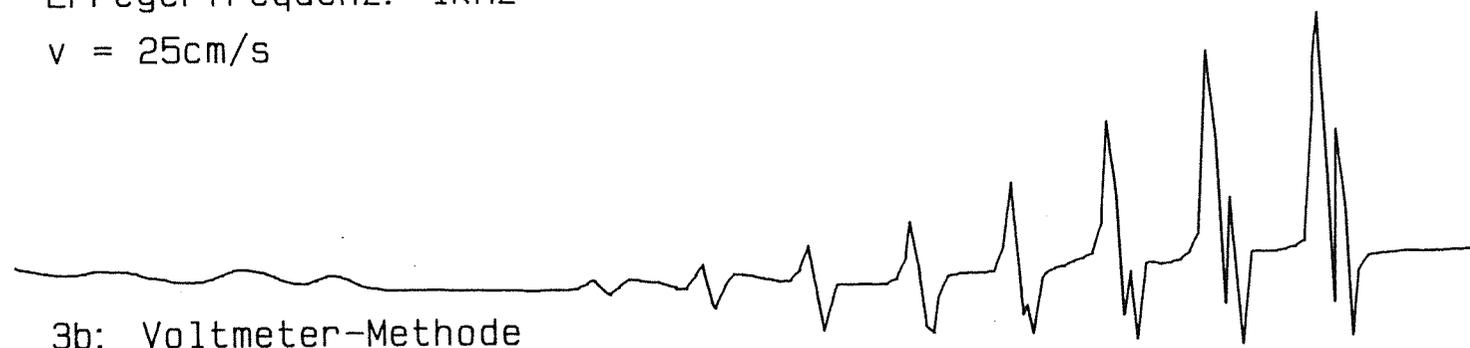


Abbildung 2

Erregerfrequenz: 1kHz

$v = 25\text{cm/s}$



Löcher in mm

Wandstärke 4mm

**Abbildung 3**      **Messungen mit der  
Differenz-Sonde**

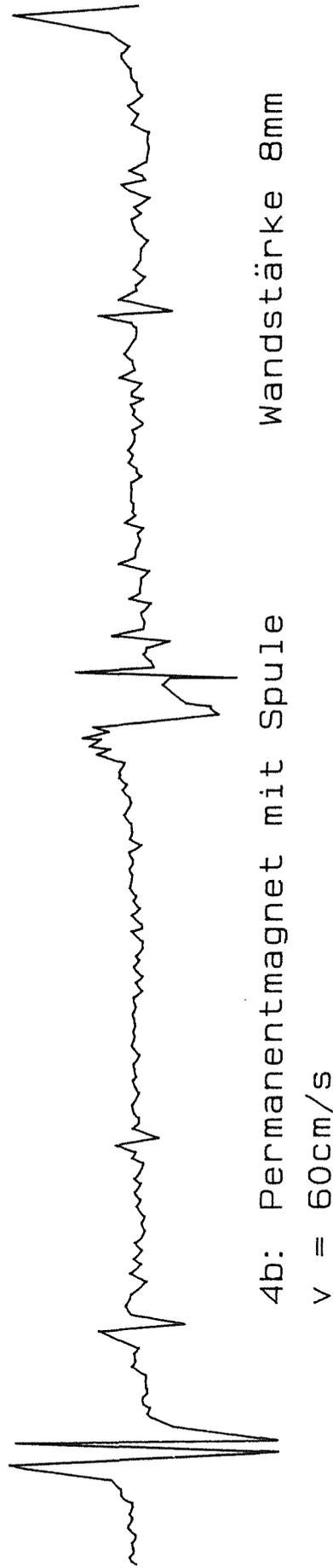
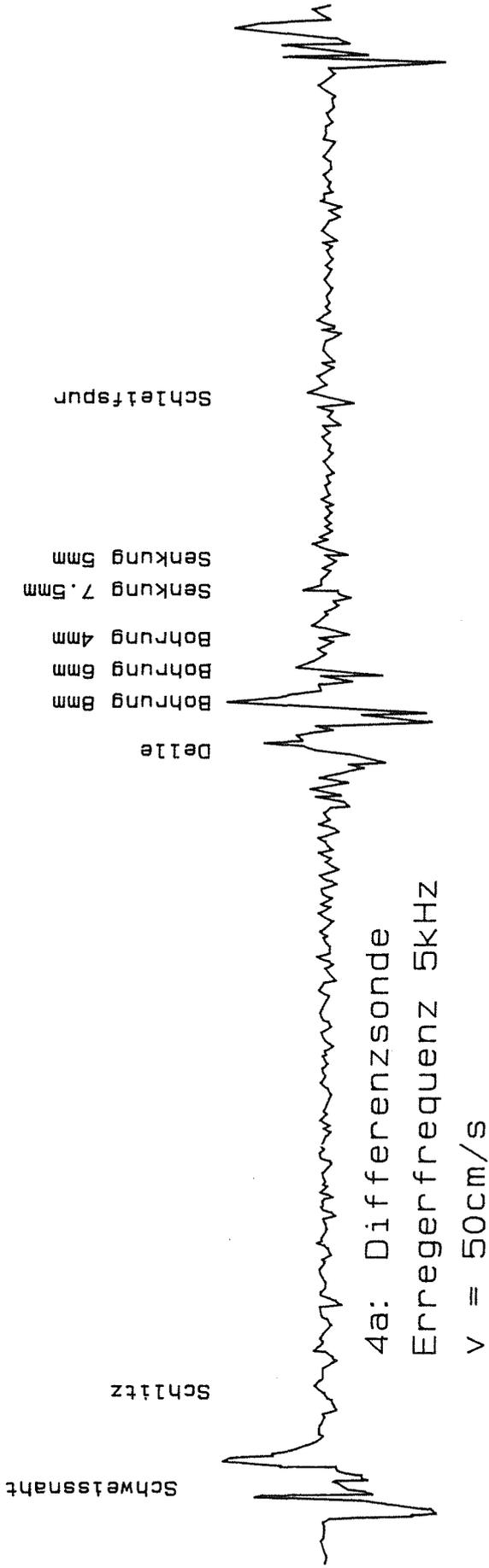
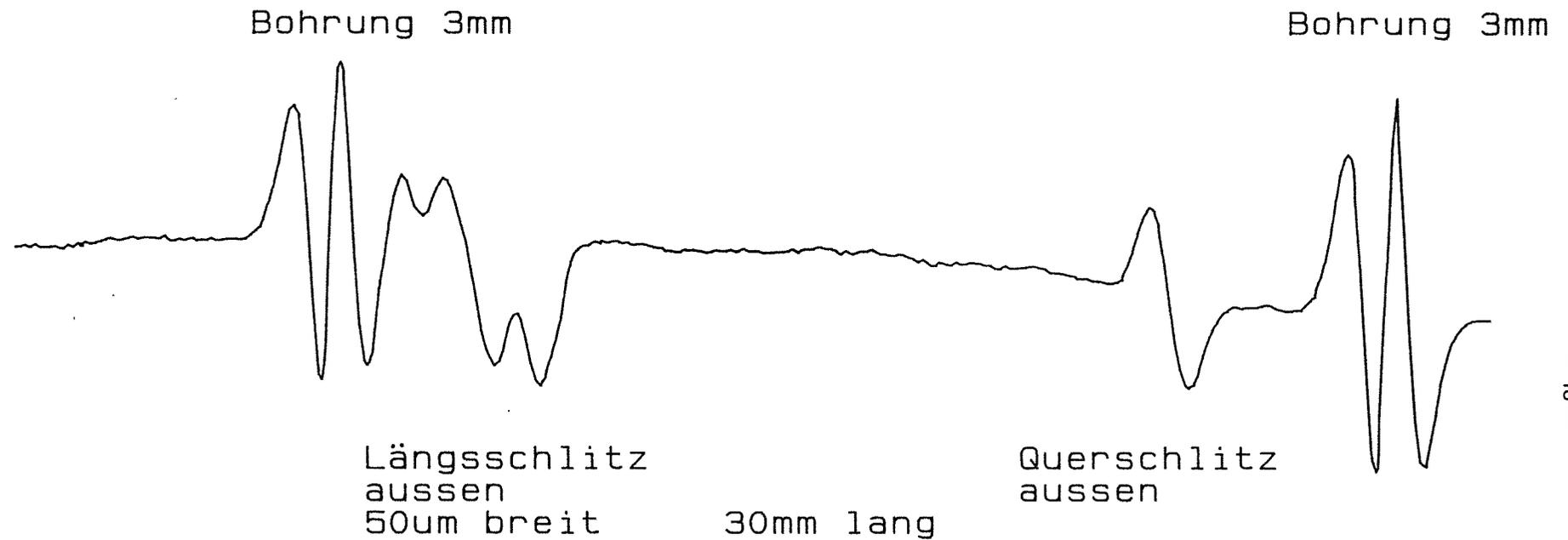


Abbildung 4 Messungen am  
28 Zoll Rohr

# Messungen mit der Differenzsonde

Alu-Rohr Durchmesser 10mm



Geschwindigkeit ca. 20cm/S

Abbildung 5

Aussenfehler am  
Aluminium-Rohr

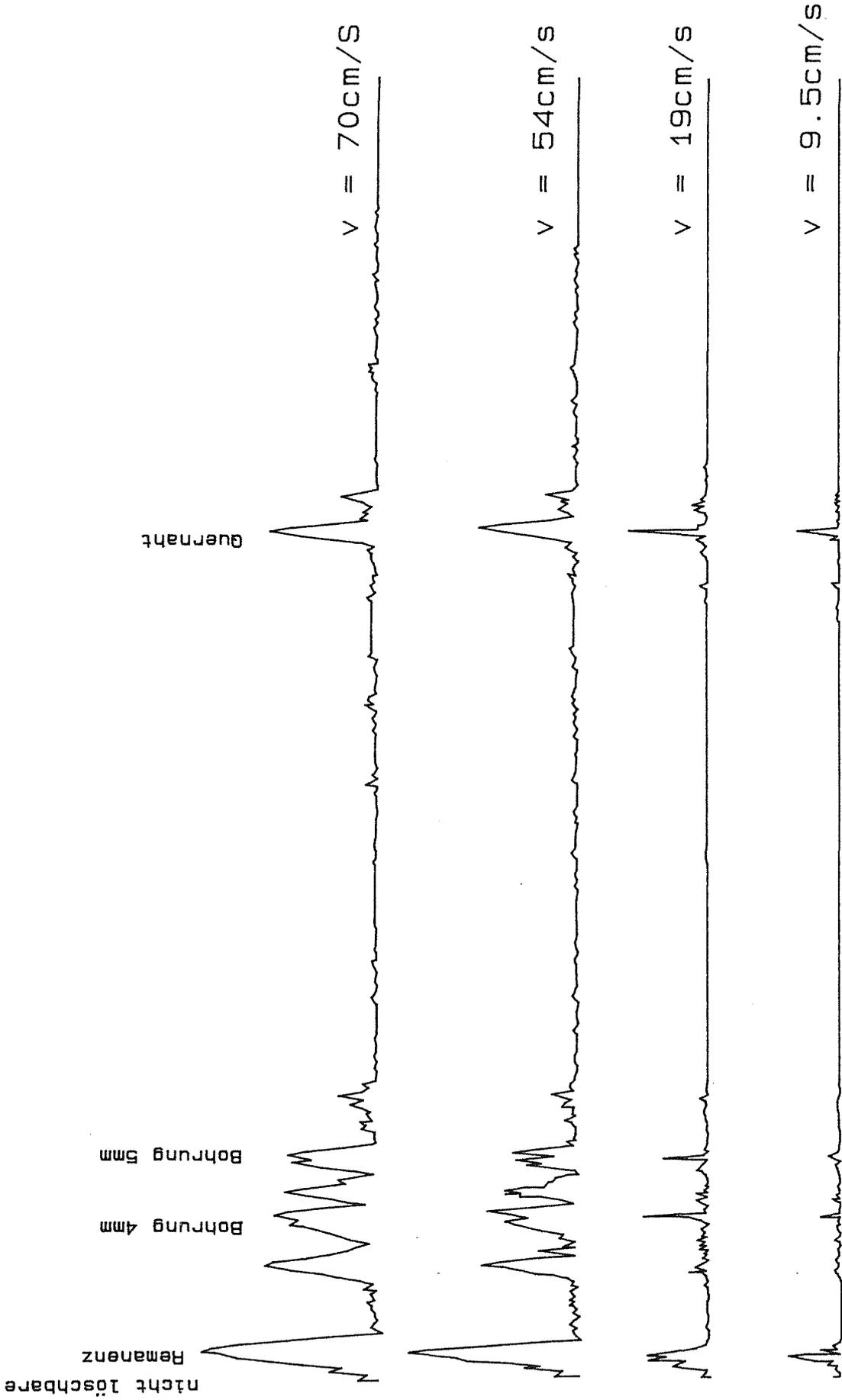
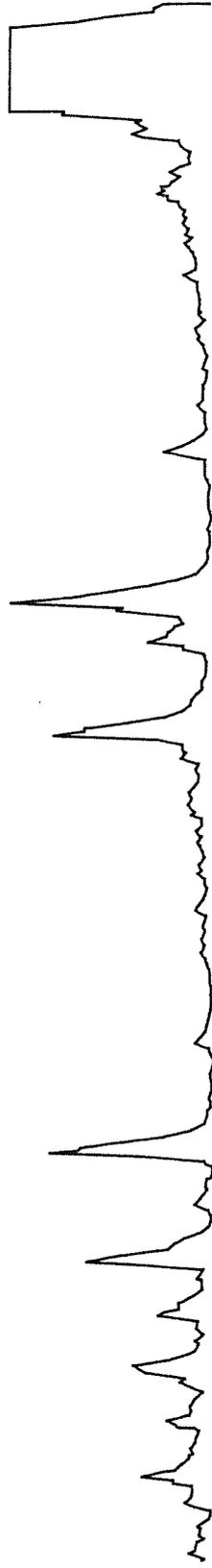


Abbildung 6 Remanenz-Messung  
Geschwindigkeits-Vergleich

Defekstellen wie in Abb. 19



a)  $v = 19 \text{ cm/s}$



b)  $v = 9.5 \text{ cm/s}$

Abbildung 7 Remanenz-Messung

# Meßanordnung für Defektstellensuche Tonkopfsonde und Rohrmagnetisierung

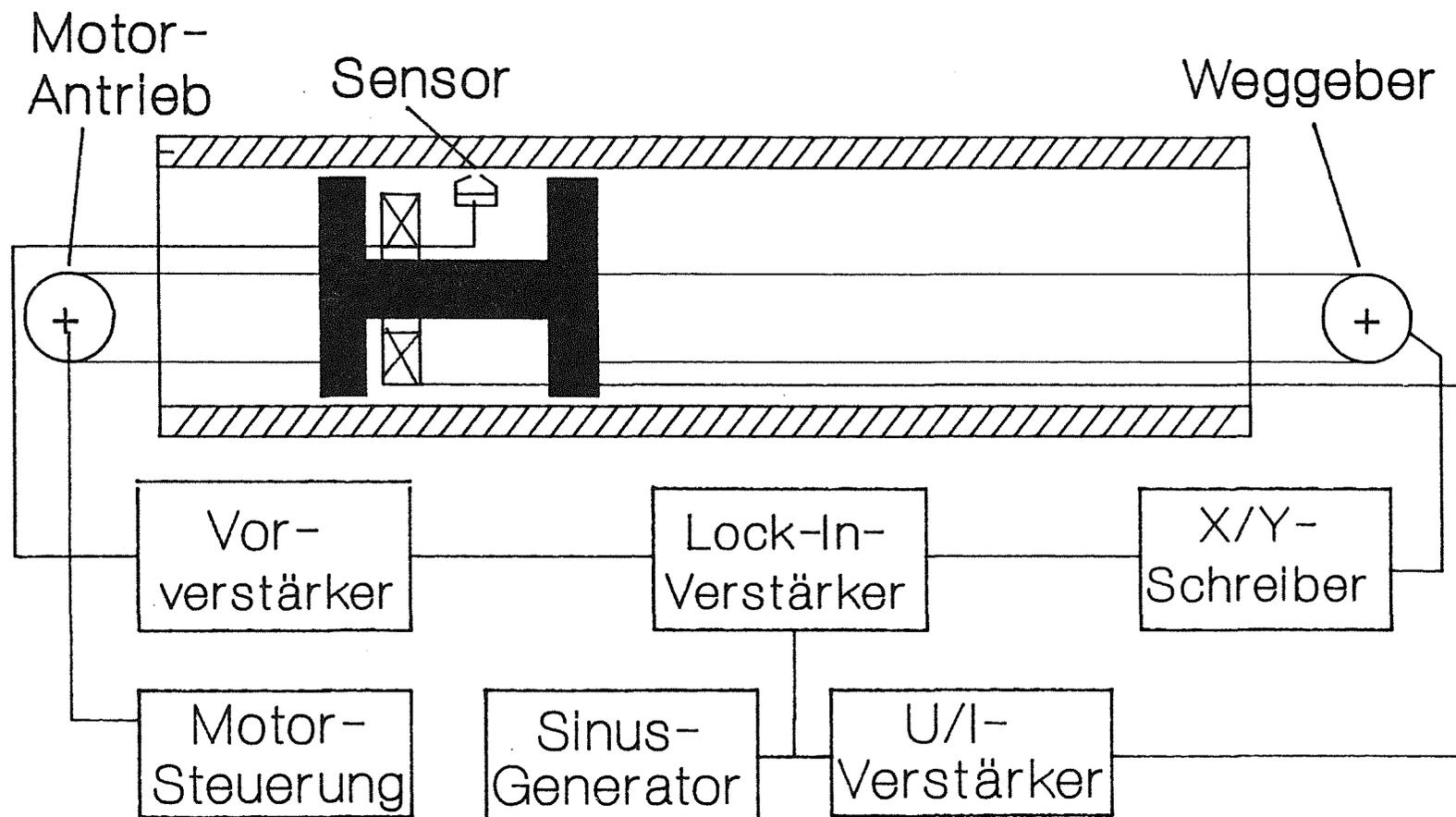


Abbildung 8

Messung zwischen den Polschuhen

Lock-In-Technik            Wandstärke 4mm  
Geschwindigkeit ca. 30cm/s  
Erregung 250 Hz            0.5A

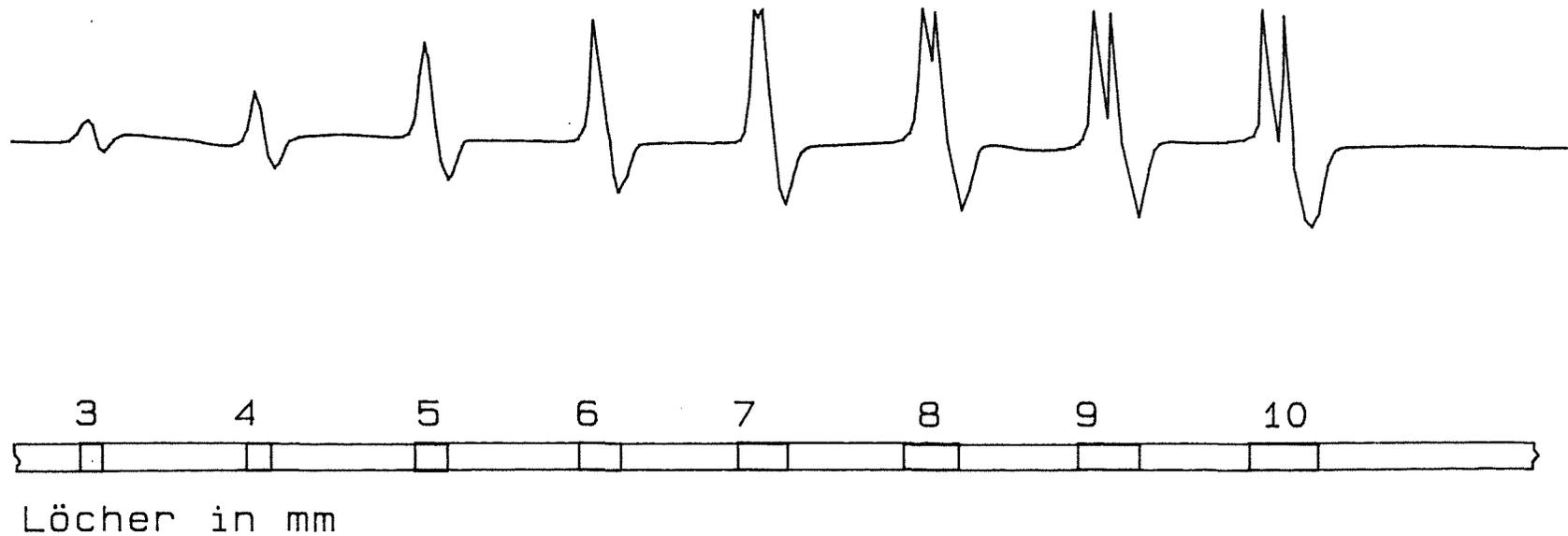


Abbildung 9            Zentrale Magnetisierung

# Meßanordnung für Defektstellensuche nach der FFW-Methode

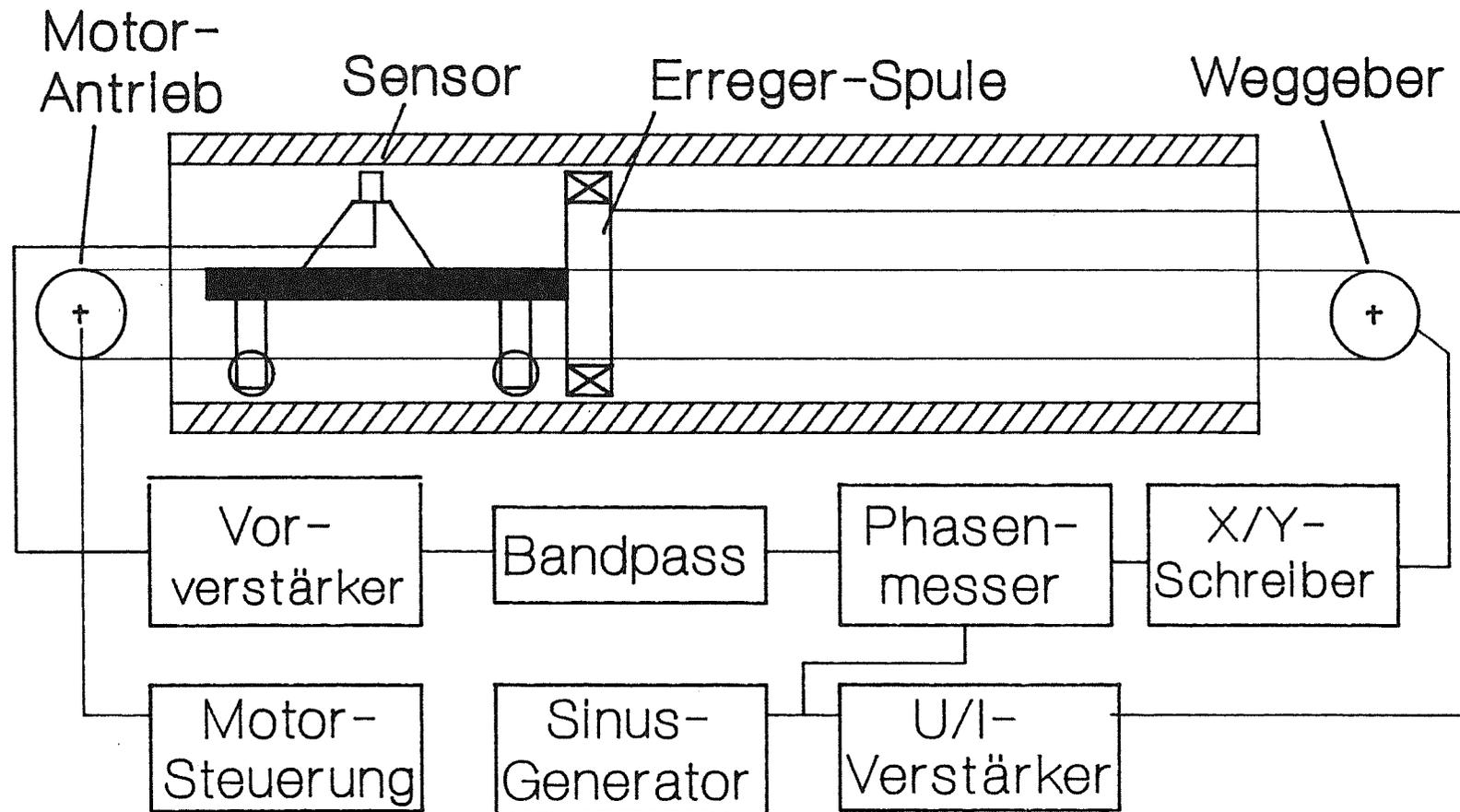


Abbildung 10

Durchmesser 10 cm    Wandstärke 4mm  
Geschwindigkeit  $v = 1\text{cm/s}$

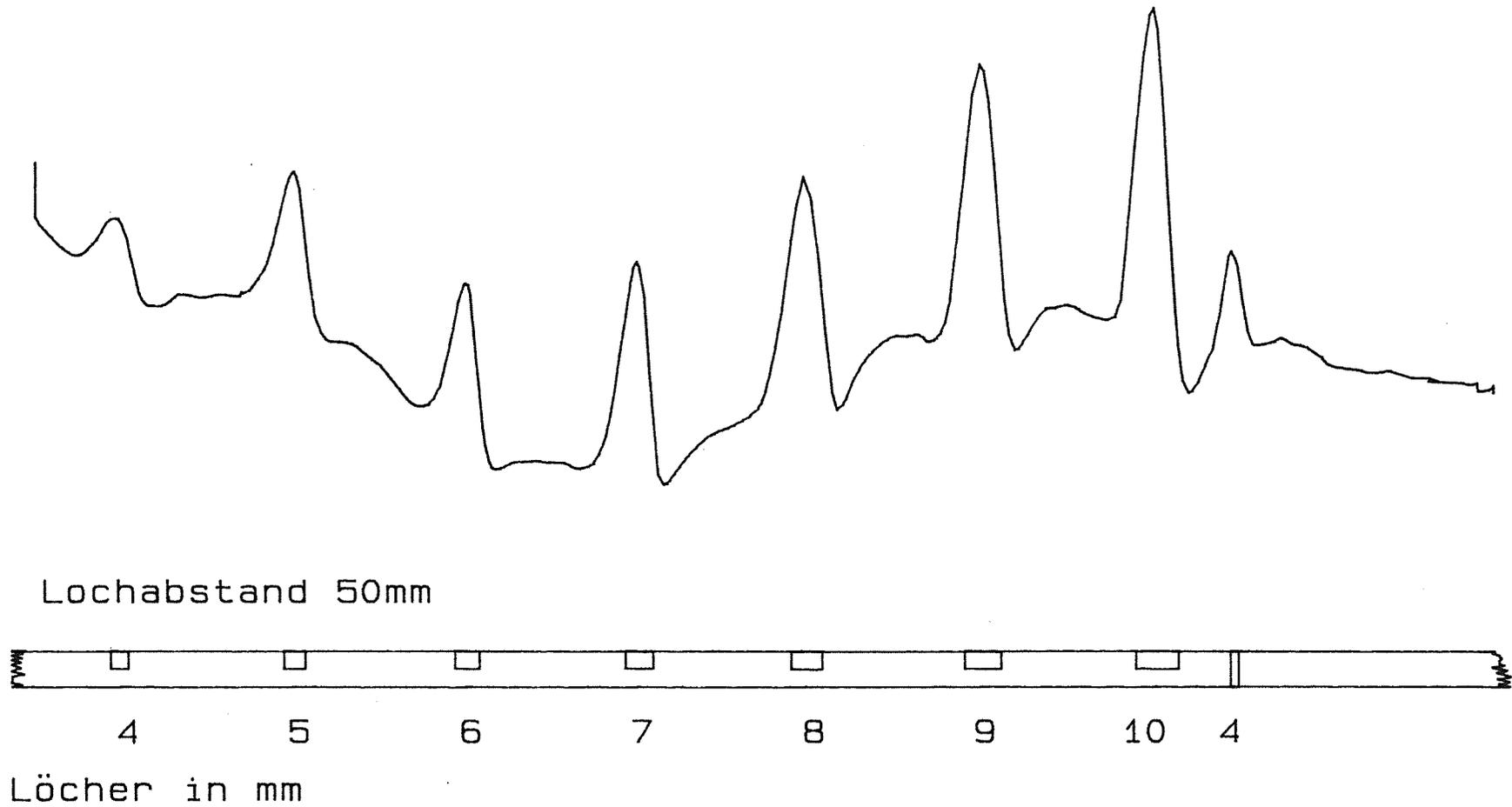


Abbildung 11    Messung von Aussenfehlern  
nach der FFW-Methode

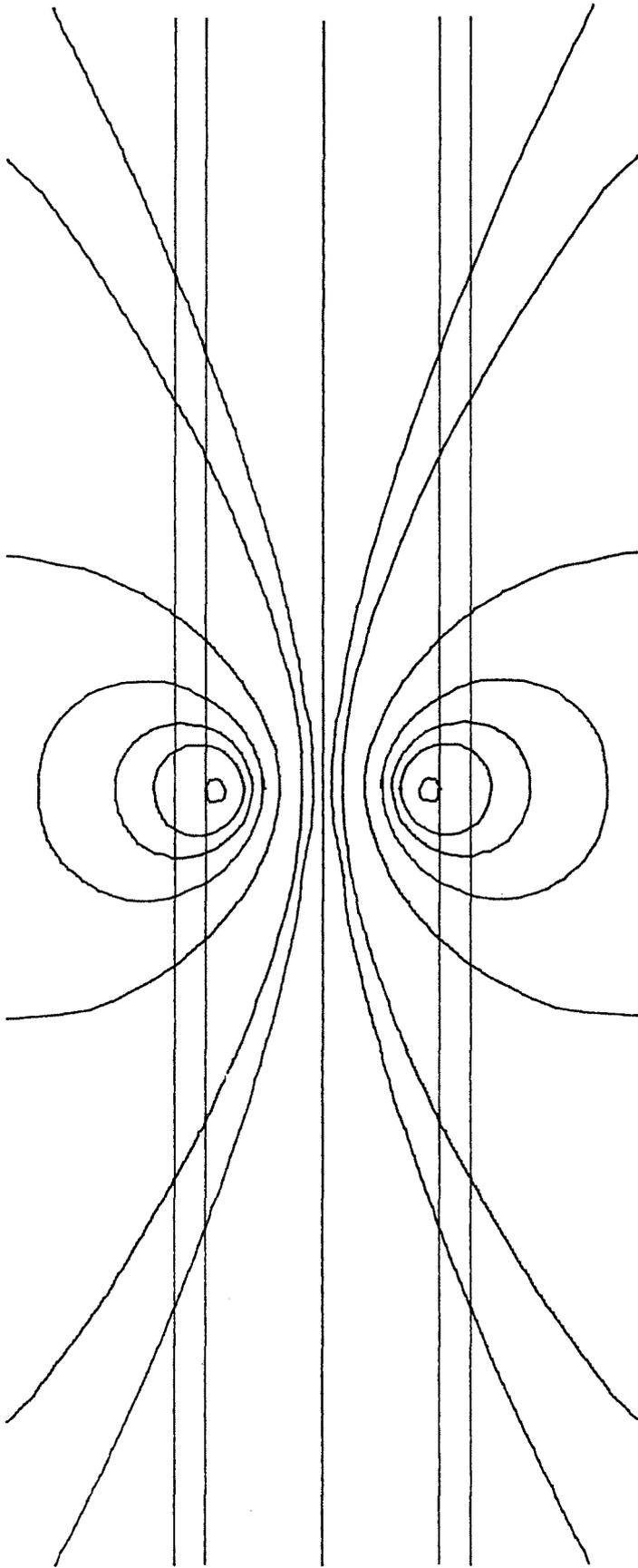


Abbildung 12 Magnetfeld der Spule  
ohne Rohr

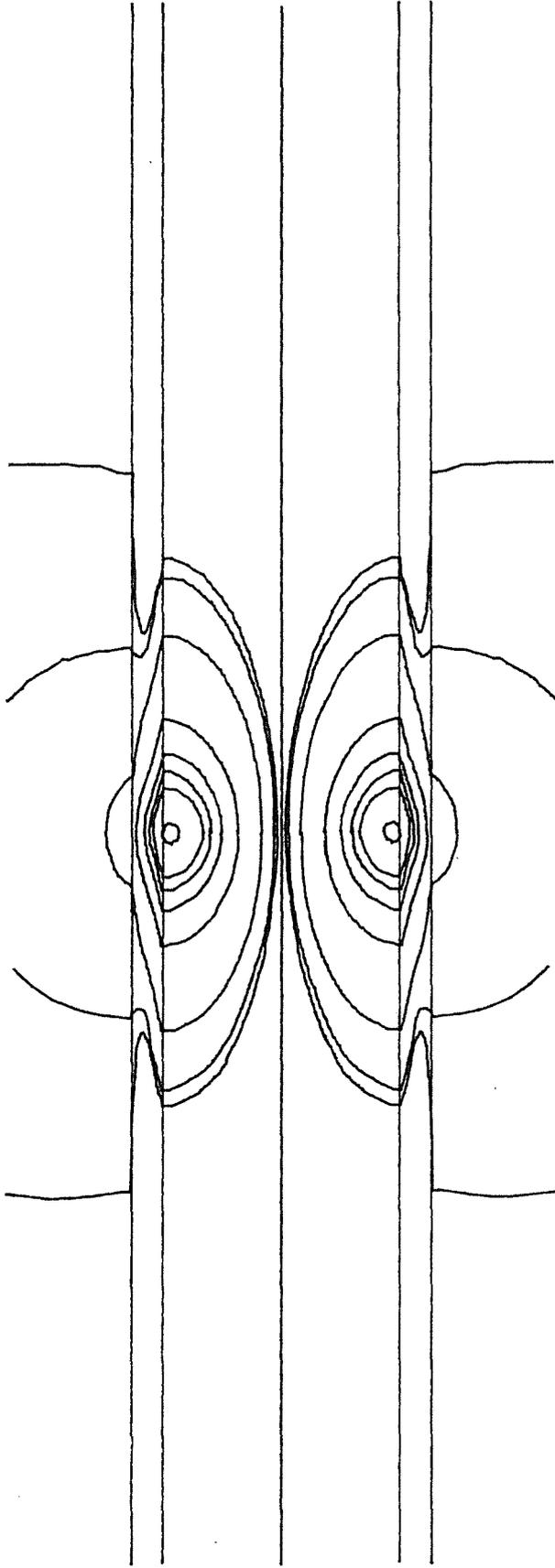


Abbildung 13 Magnetfeld der Spule  
mit Rohr

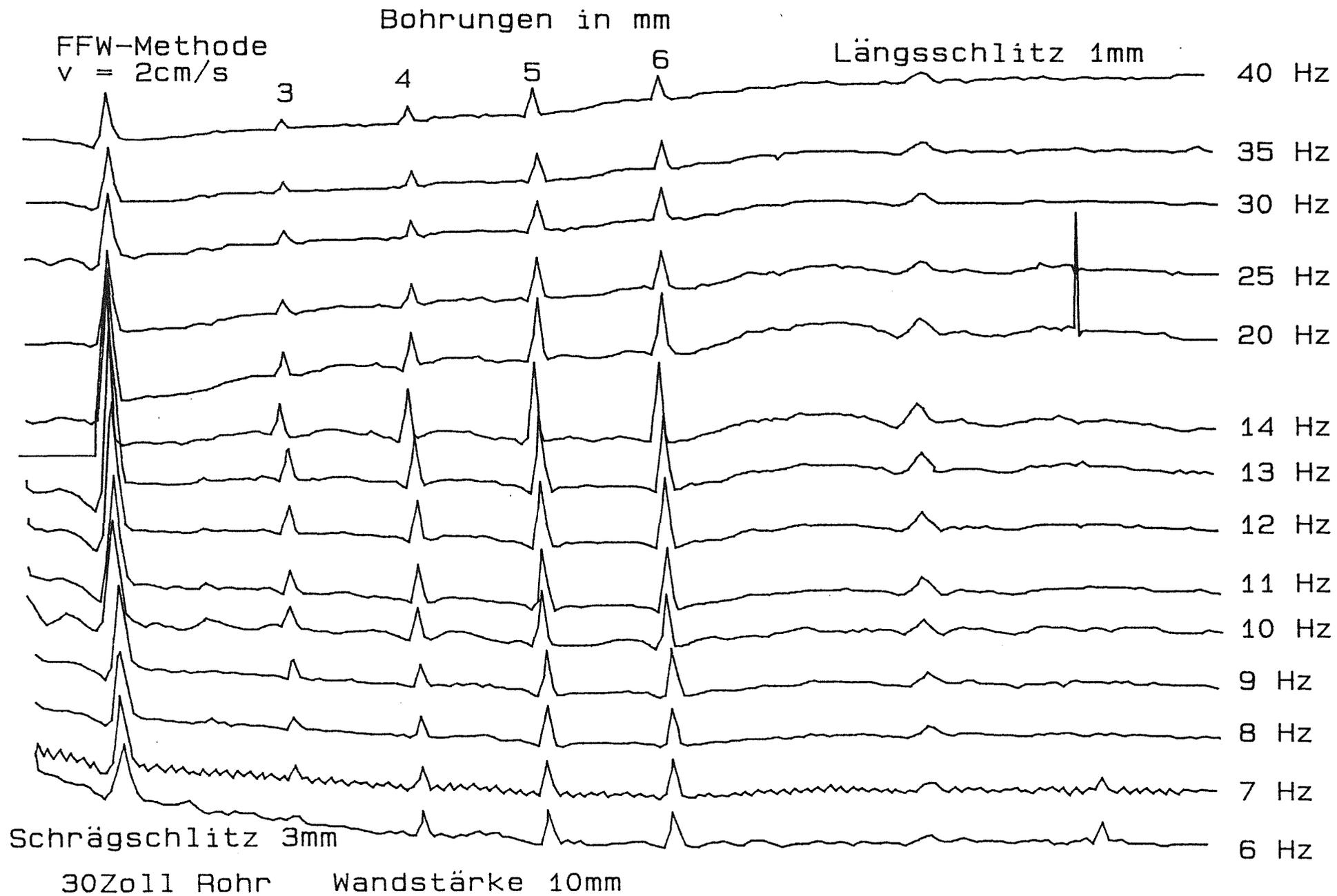


Abbildung 14      Untersuchung zur  
Frequenzabhängigkeit

FFW-Methode  
 $v = 2\text{cm/s}$

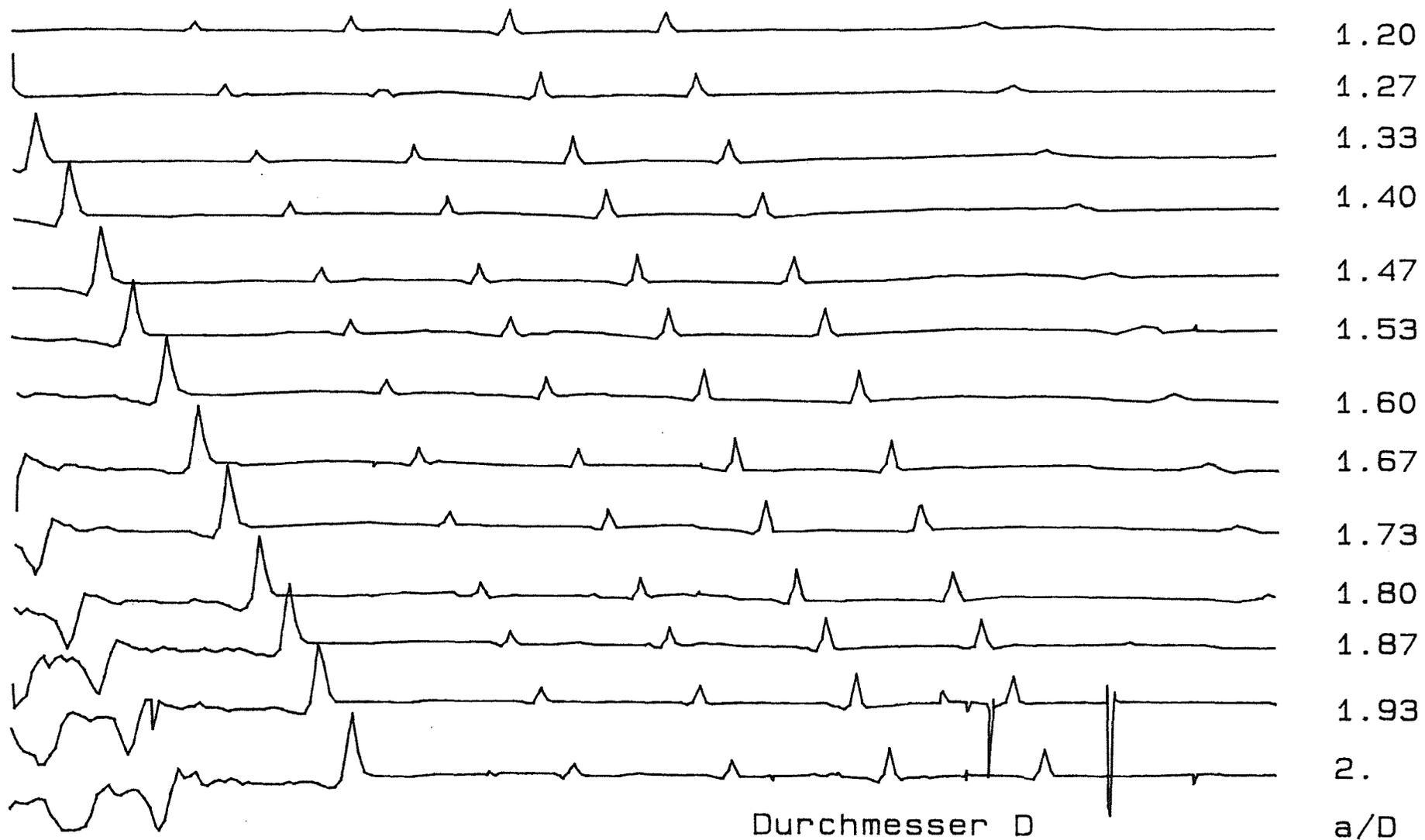


Abbildung 15 Untersuchung zum Abstand a  
Spule - Sensor

FFW-Methode

Windungszahl der Erregerspule 100

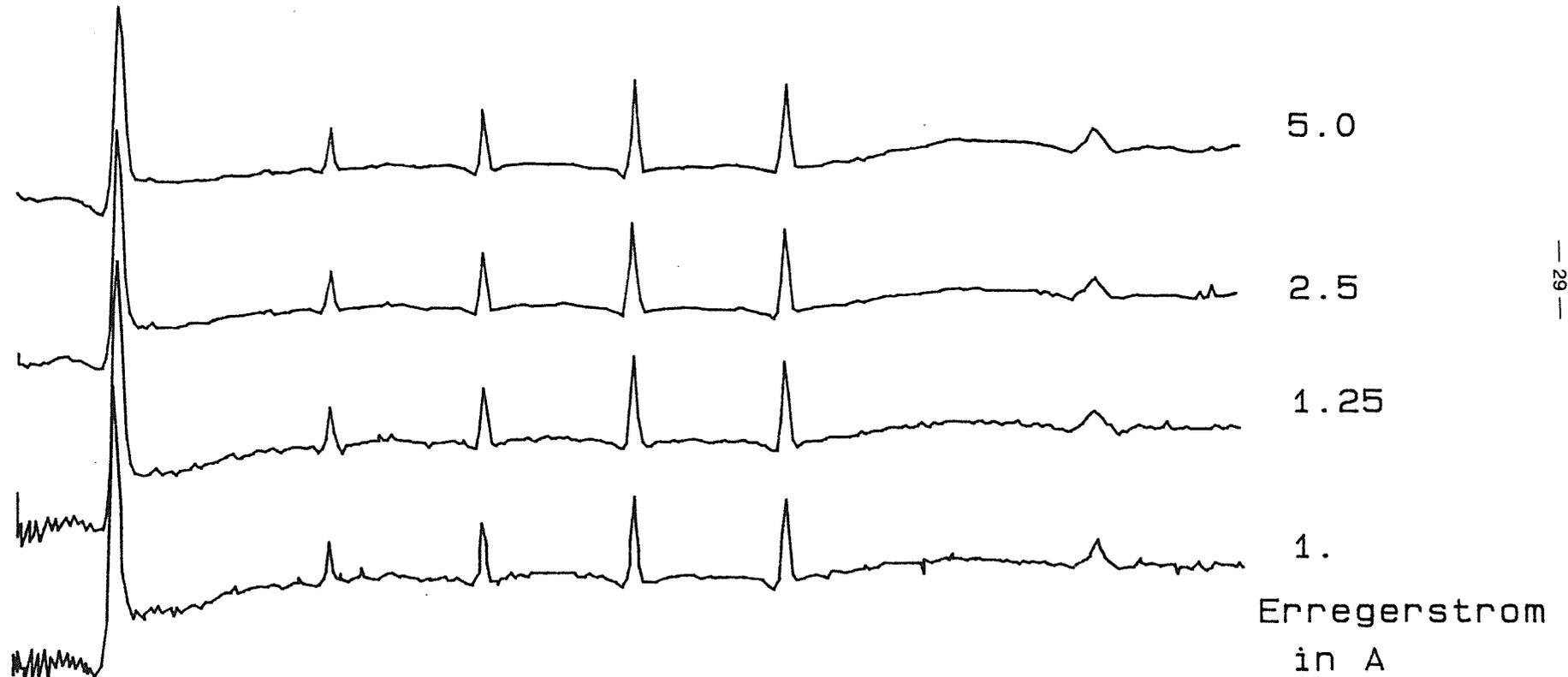


Abbildung 16 Signal-zu-Rauschverhältnis  
und Durchflutung

FFW-Methode

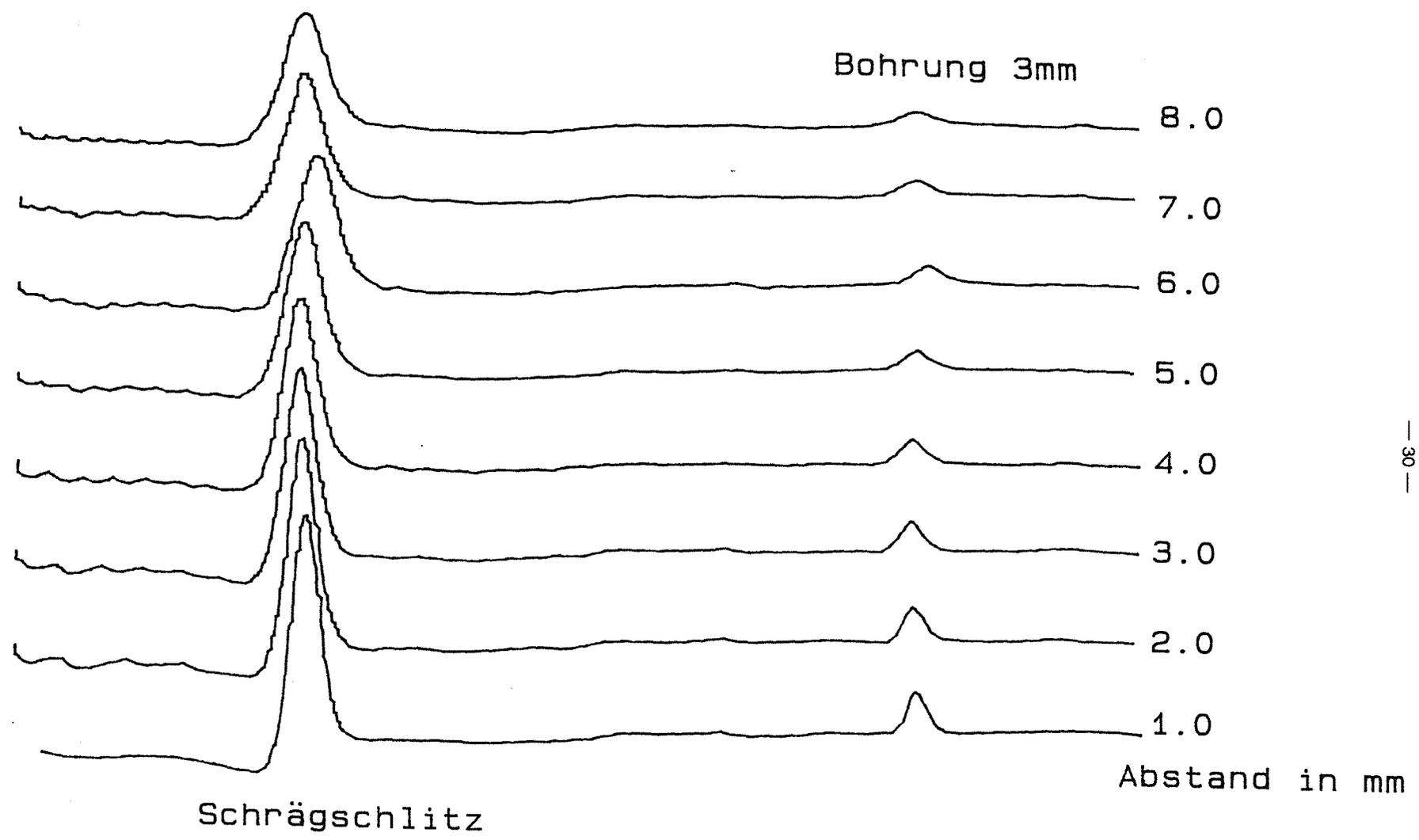
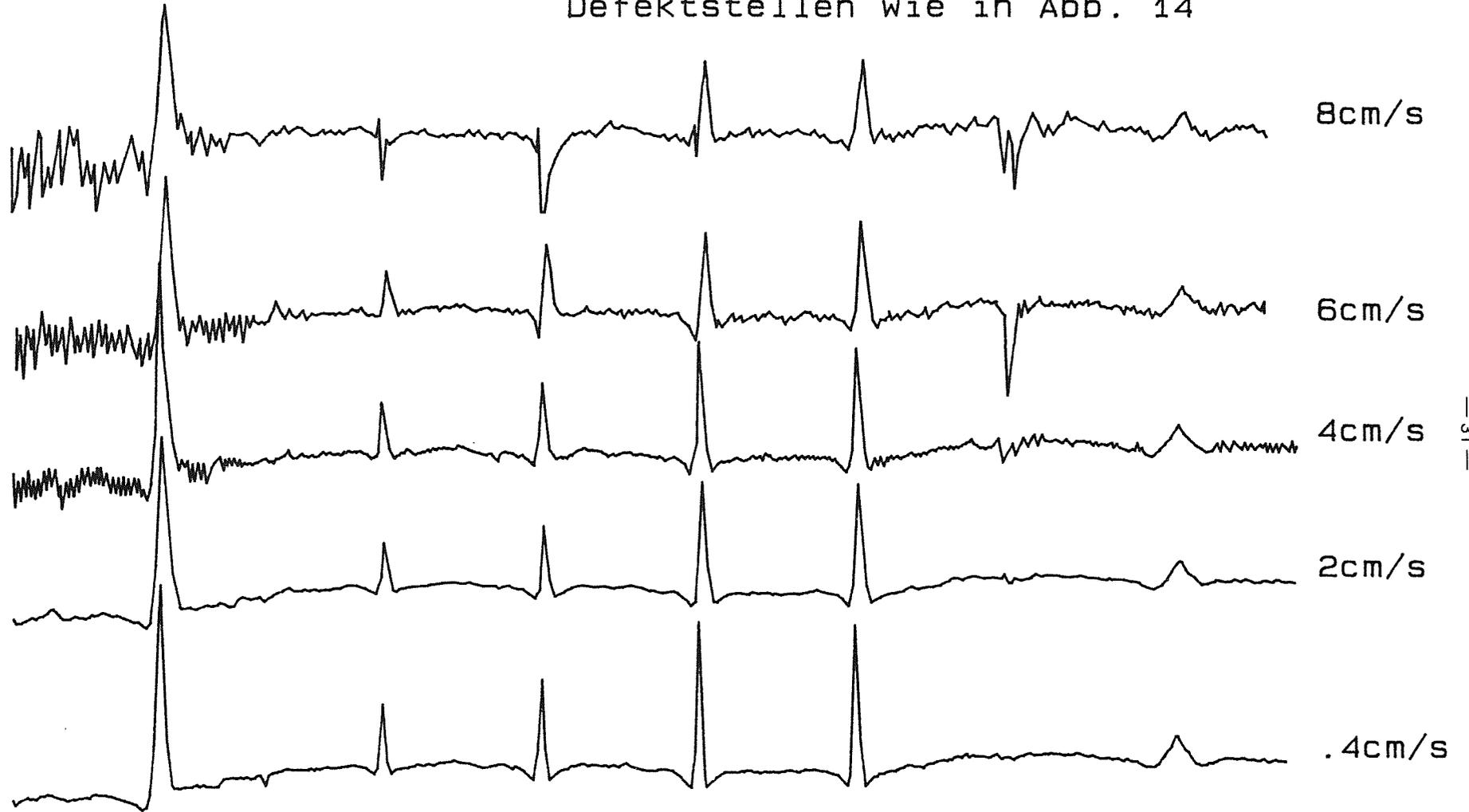


Abbildung 17 Einfluss des Abstands  
Sensor - Wand

FFW-Methode      30 Zoll Rohr      Wandstärke 10mm  
Erregung 15 Hz      5A

Defektstellen wie in Abb. 14



—31—

Abbildung 18      Untersuchung zur  
Mess-Geschwindigkeit

30 Zoll Rohr      Wandstärke 10mm  
Geschwindigkeit  $v = 1\text{mm/s}$   
Erregung 14 Hz      3A

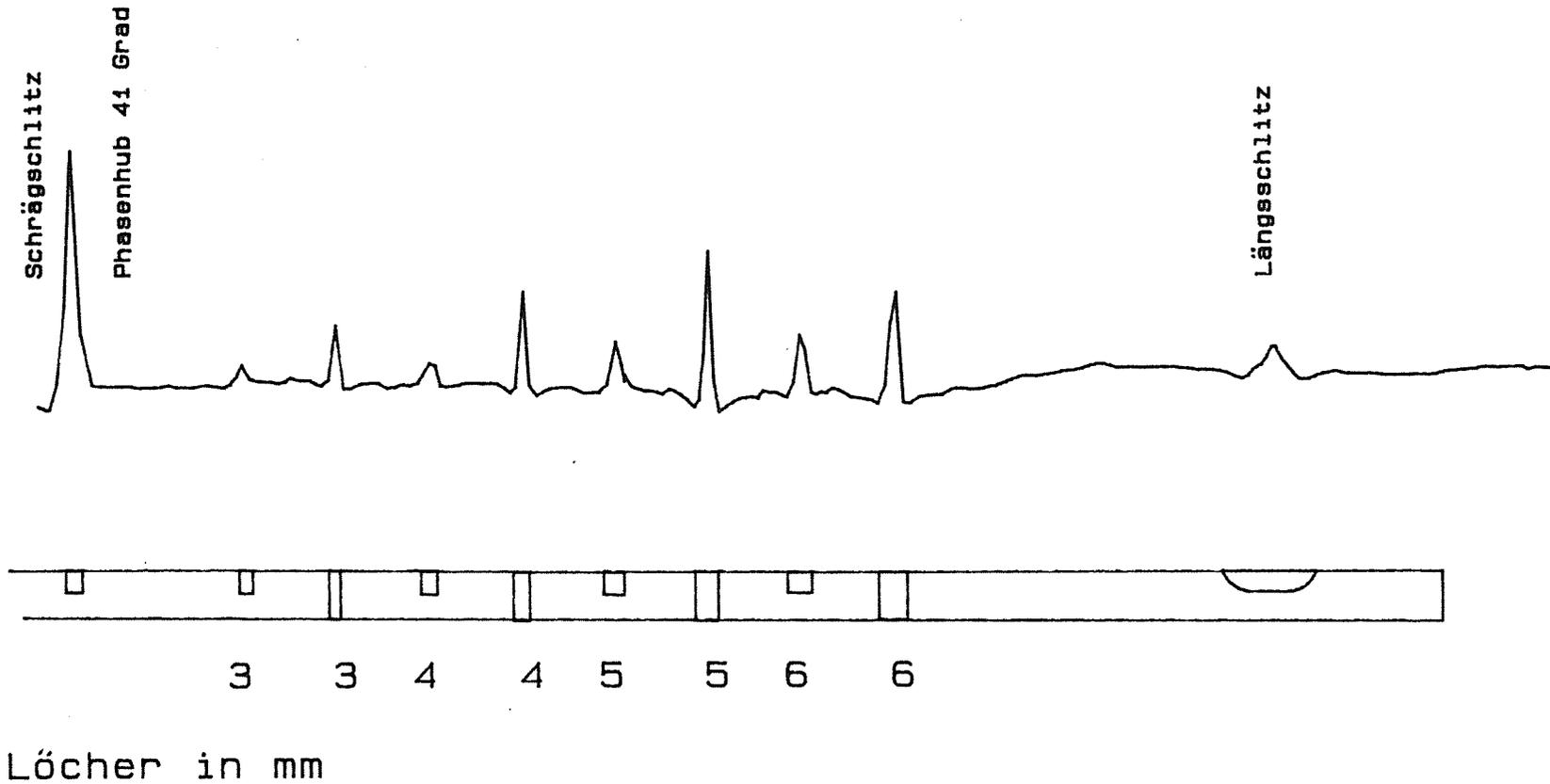
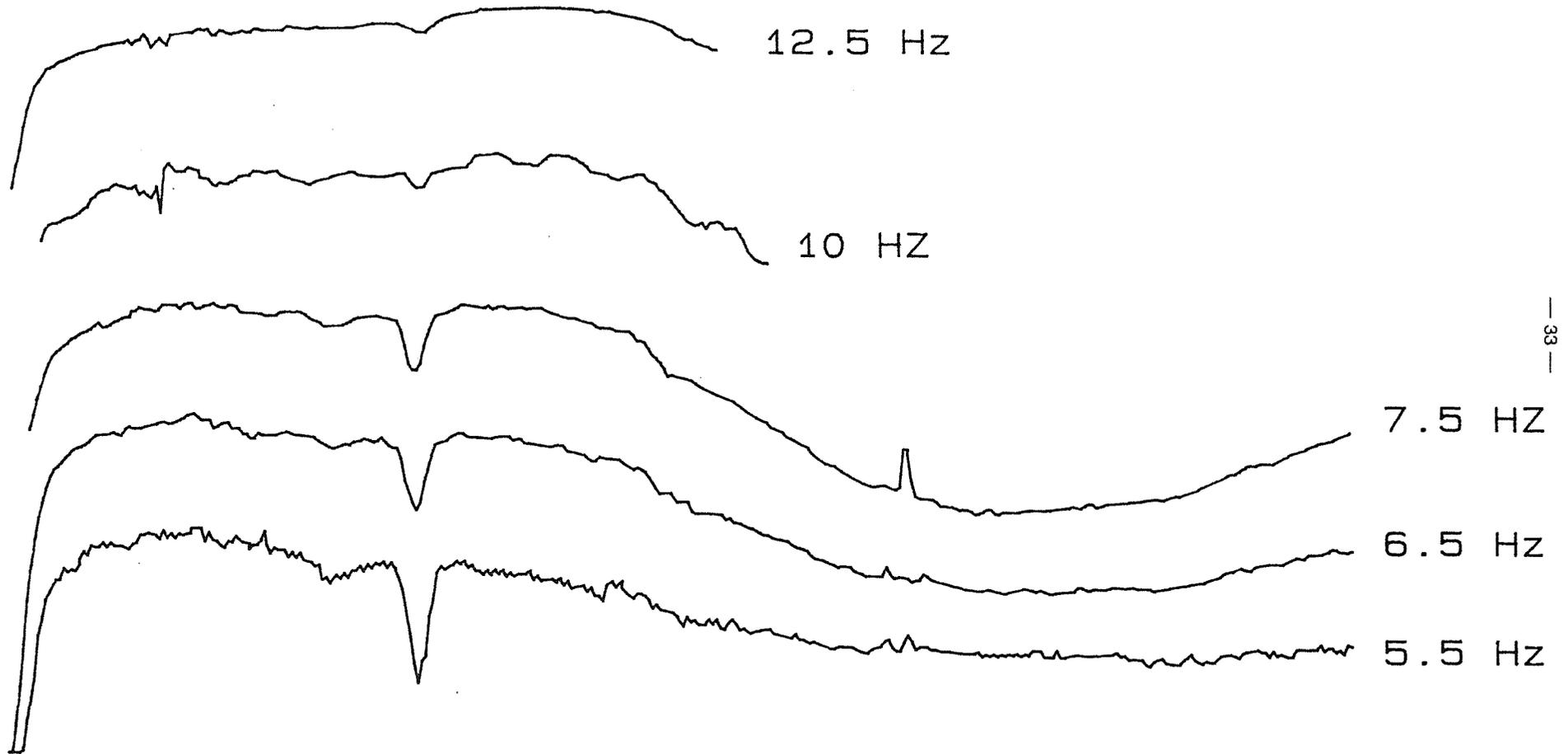


Abbildung 19      FFW-Methode

FFW-Methode

4mm  
Referenzloch



10 Zoll nahtloses Rohr Wandstärke 10mm

Abbildung 20 Untersuchung zur  
Frequenzabhängigkeit

10 Zoll Rohr      Wandstärke 10mm  
Erregung 6 Hz    3A  
Geschwindigkeit  $v = 2\text{mm/s}$

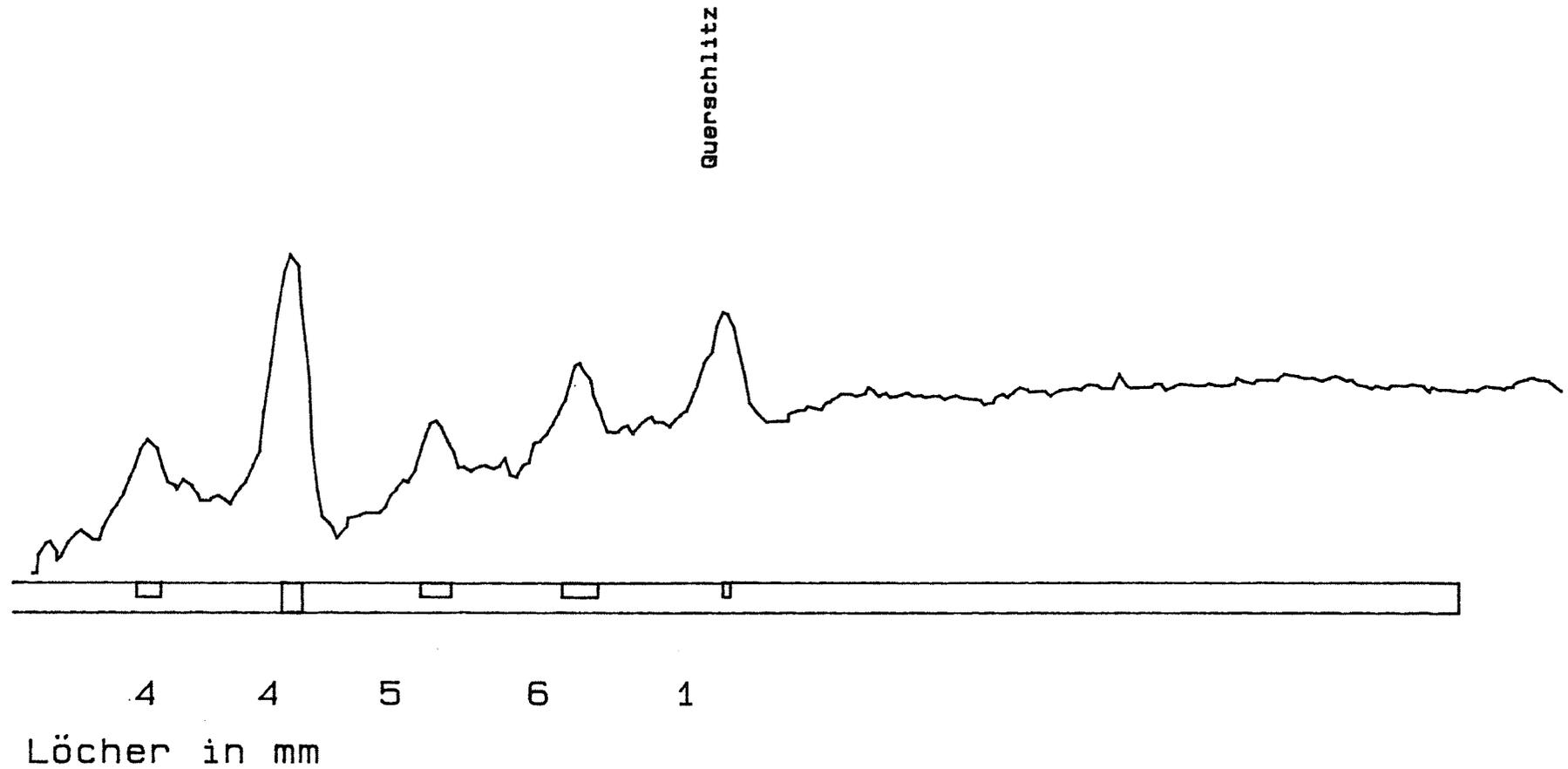
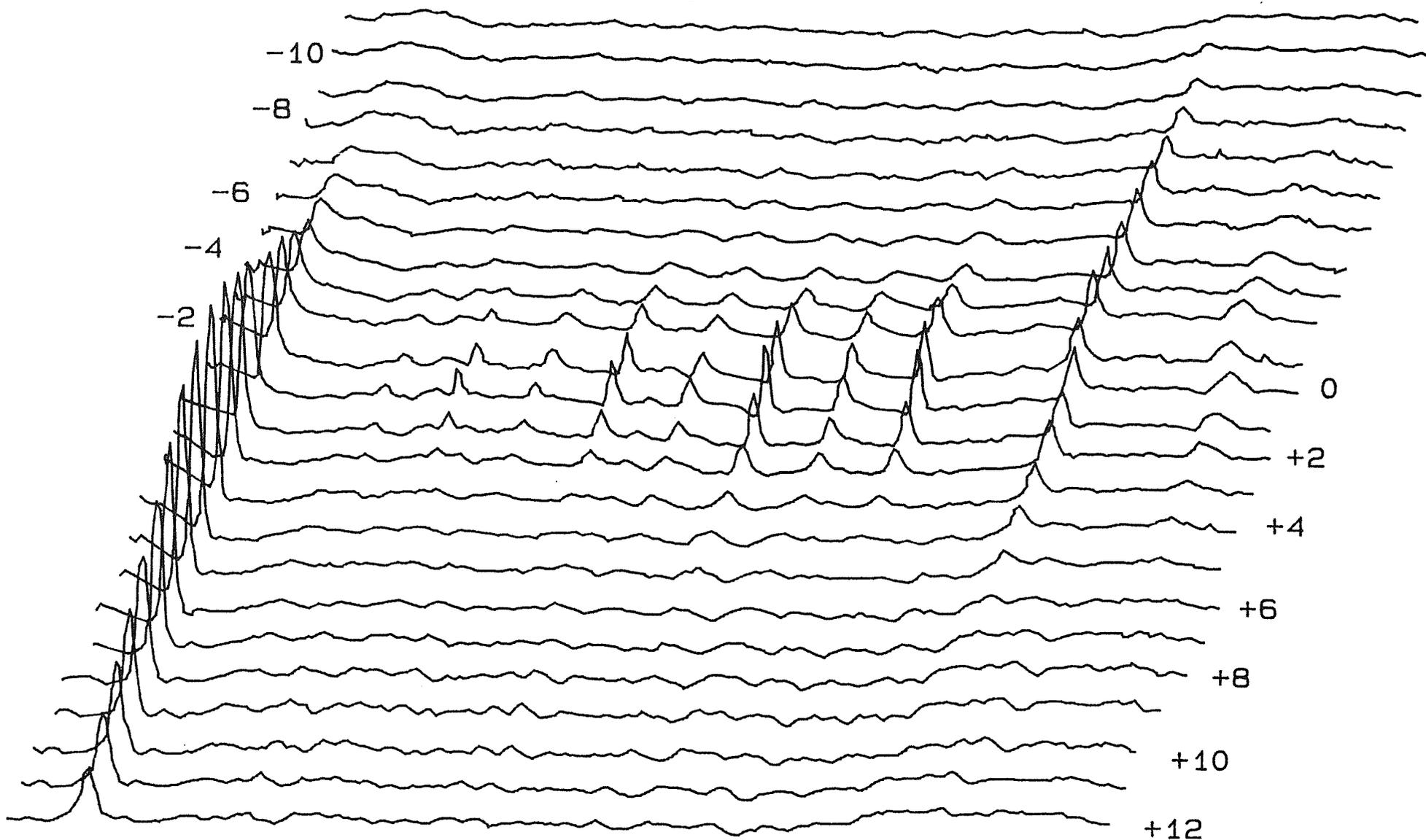


Abbildung 21      FFW-Methode

Rohrlänge ca. 650cm



Defektstellen wie in Abb. 19

Spurlage in Grad

FFW-Methode  $v = 0.5\text{cm/s}$

Abbildung 22 Mehrspurige Fehlerdarstellung  
am 30 Zoll Rohr

Defektstellen wie in Abb. 19

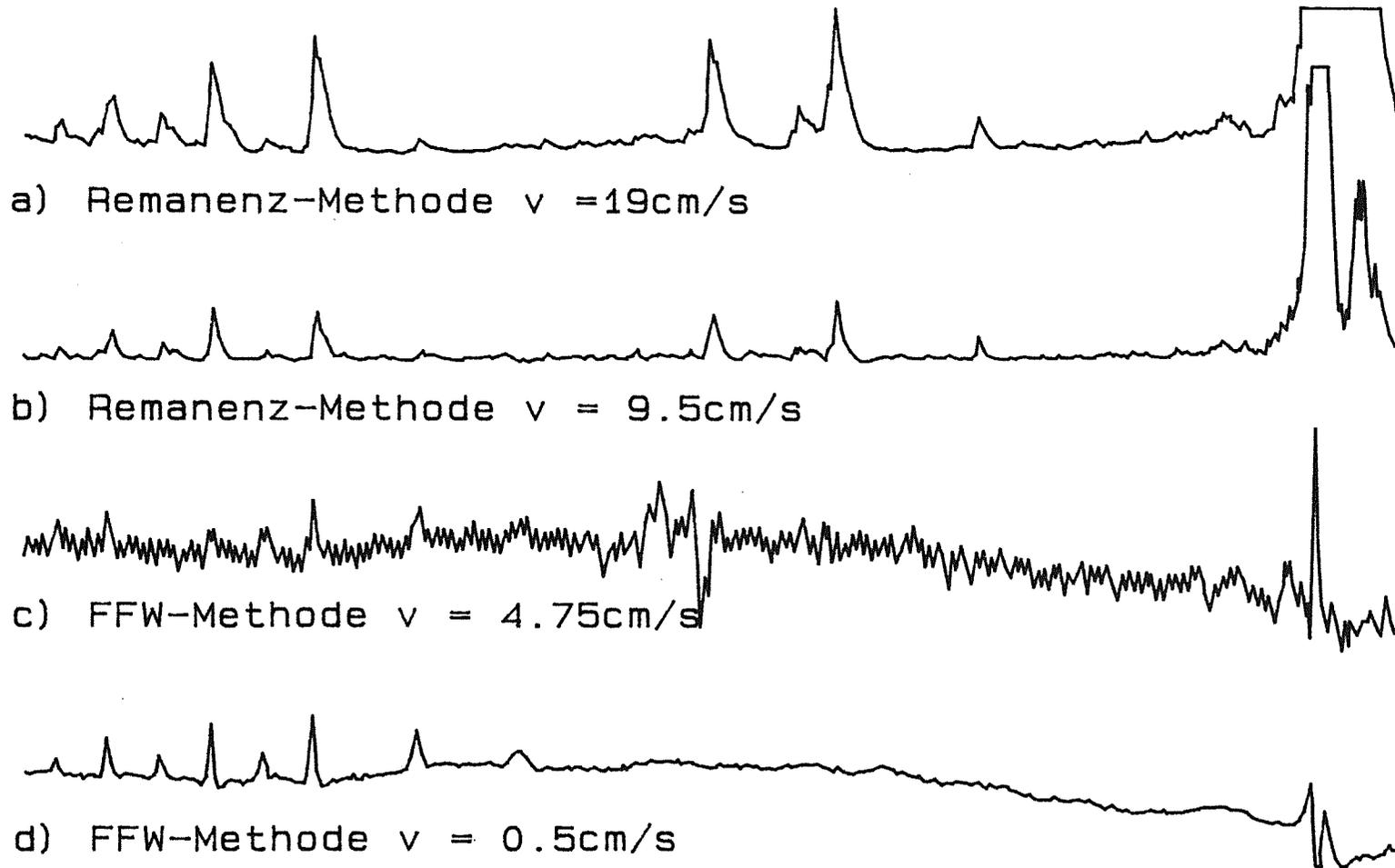


Abbildung 23 Vergleich von FFW-Methode und Remanenz-Messung

Defektstellen wie in Abb. 19

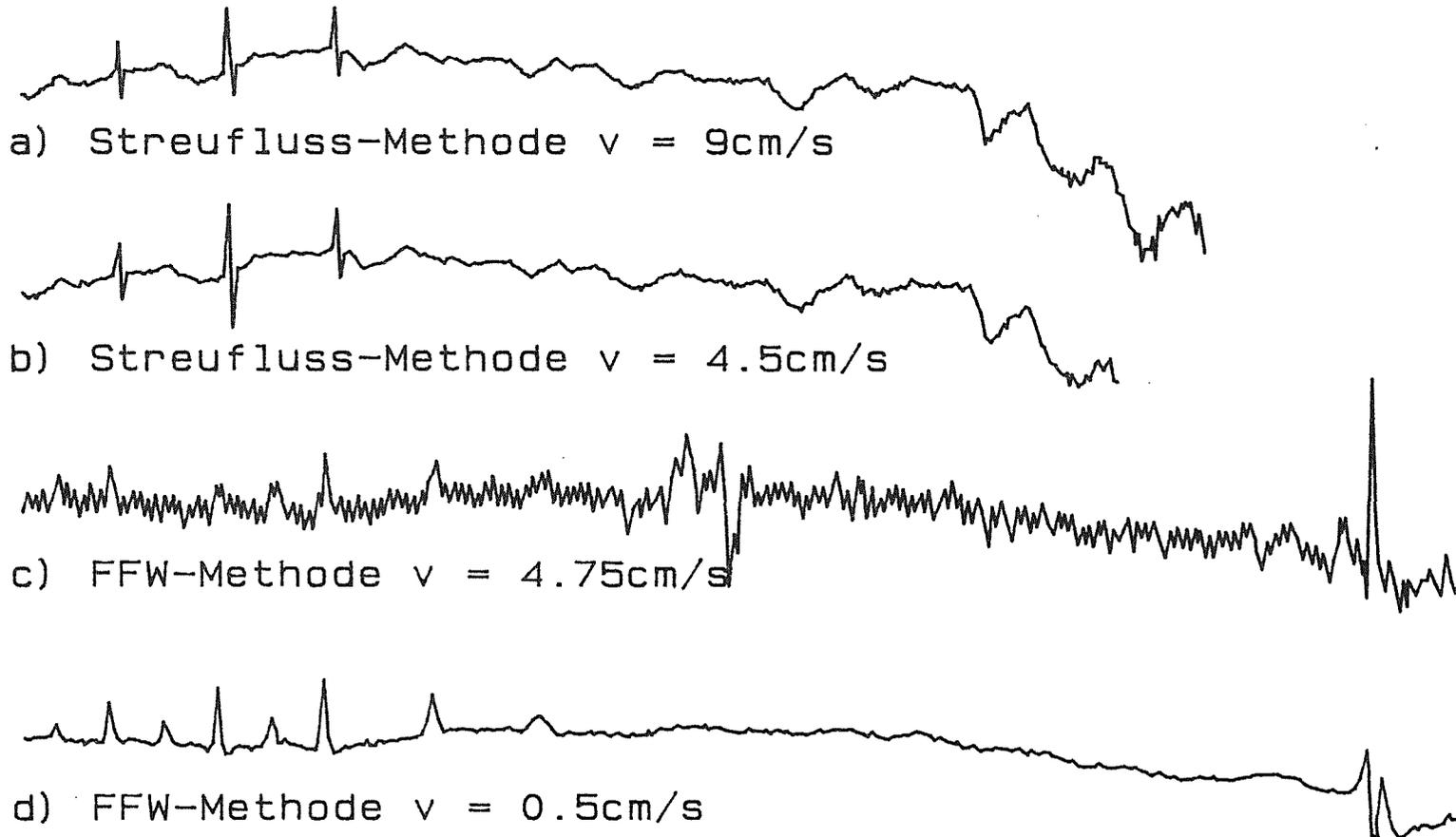


Abbildung 24 Vergleich von FFW-Methode und Streufluss-Methode

# Fehlersignal an einer 4mm Bohrung

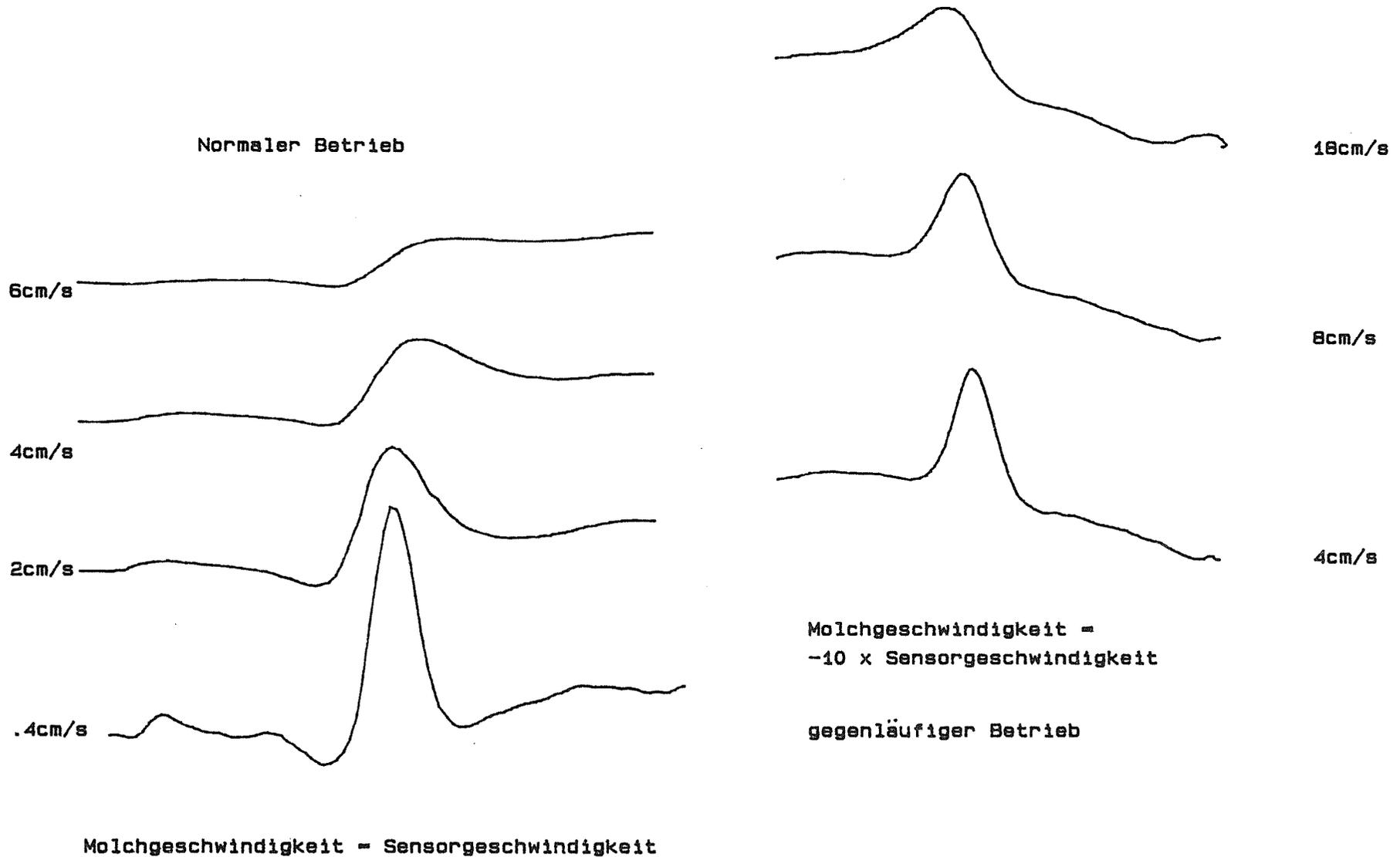


Abbildung 25 FFW-Methode mit gegenläufiger Sensorführung