

Modellversuche zur erdmagnetischen Induktion in
Leitfähigkeitsanomalien

Sonnabend, den 12.10.1963

1. Prinzipelles zu Modellversuchen

Es hat sich gezeigt, daß die Deutung der Erscheinungen, die man mit dem Begriff "Leitfähigkeitsanomalie" beschreibt, doch recht schwierig ist und zu verschiedenen Ansichten über die zugrundeliegenden Ursachen geführt hat. Man ist sich jedoch einig darin, daß es sich um lokale Unterschiede in der elektrischen Leitfähigkeit des Untergrundes handeln muß.

Ein Ansatz zu einer direkten Auswertung der Ergebnisse der erdmagnetischen Registrierungen in Bezug auf eine Trennung von innerem und äußerem Anteil des Magnetfeldes und der Ermittlung der Größe, Lage, Gestalt und Leitfähigkeit der Anomalie ist hier ja zum ersten Mal von Dr. Siebert gezeigt worden. Der umgekehrte Weg, nämlich sich nach Vorgabe der interessierenden Parameter ein Modell zu machen, ist jedoch leichter gangbar. Prinzipell ist es möglich, aufgrund der Maxwell'schen Gleichungen zu jedem induzierten Magnetfeld und zu jedem möglichen Störkörper das induzierte Magnetfeld auszurechnen. Praktisch stößt das jedoch auf große mathematische Schwierigkeiten. So ist es bisher erst für wenige Modelle und Magnetfelder gelungen, das induzierte Feld tatsächlich zu berechnen.

Hier können nun Modellversuche einsetzen. Denn es ist ja mit einigem Geschick möglich, auch komplizierte Magnetfelder experimentell zu erzeugen, wenigstens näherungsweise mit genügender Genauigkeit. Auch in der Gestalt der Modelle ist man kaum Beschränkungen unterworfen. Die Frequenz des induzierenden Feldes kann in weiten Grenzen frei gewählt werden. Lediglich in der Wahl der Leitfähigkeit der Modellkörper bestehen einige Beschränkungen, da man hier ja auf die Leitfähigkeit vorhandener Materialien angewiesen ist. Zur Verfügung stehen hier in erster Linie Metalle, außerdem kommen noch Elektrolyte infrage, jedoch mit Vorbehalt.

Denn deren Leitfähigkeit ist gegenüber der der Metalle doch schon recht gering, außerdem stark temperatur- und konzentrationsabhängig. Leider fehlen in der Leitfähigkeitsskala für die Stufen zwischen Metallen und Elektrolyten geeignete Materialien.

Bei diesen Modellversuchen ergibt sich - ebenso wie auch bei Modellrechnungen - das Problem: Wie lassen sie sich auf die Größenordnungen des in der Natur Beobachteten übertragen? Denn es ist klar, daß die Linsendimensionen des Störkörpers auf ein vernünftiges Laboratoriumsmaß reduziert werden müssen, die Leitfähigkeit muß den vorhandenen Materialien angepaßt werden, und auch die Frequenz des induzierenden Feldes muß erhöht werden, um vernünftige Induktionswerte zu erzielen. Die Art, wie das zu geschehen hat, wird wieder durch die Maxwell'schen Gleichungen gegeben. Setzt man die Maxwell'schen Gleichungen im praktischen System an:

$$\begin{aligned}
\text{I} \quad \text{rot } \vec{H} &= \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{j} \\
\text{II} \quad \text{div } \vec{D} &= \eta \\
\text{III} \quad \text{rot } \vec{E} &= - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \\
\text{IV} \quad \text{div } \vec{A} &= 0
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\vec{D} &= \epsilon \epsilon_0 \vec{E} \\
\vec{H} &= \mu \mu_0 \vec{j}
\end{aligned}$$

und macht folgende hier durchaus sinnvolle Annahmen:

1. Verschiebungsströme werden vernachlässigt, es wird also quasistatisch gerechnet. Das ist zulässig, wenn die Linear-dimensionen des Störkörpers klein sind gegen die Wellenlänge der entsprechenden elektromagnetischen Welle. Dann kann das Glied mit $\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$ weggelassen werden.
2. Die Dielektrizitätskonstante ϵ und die Permeabilität μ sind zeitlich konstant, ebenso die Leitfähigkeit σ .
3. Es treten keine Raumladungen auf ($\eta = 0$).
4. Es gelte überall das Ohmsche Gesetz

$$\vec{j} = \sigma \vec{E}$$

Es kann dann nach der bekannten Methode ein Vektorpotential eingeführt werden durch

$$\vec{A} = \text{rot } \vec{U}, \quad \text{div } \vec{U} = 0$$

und man gelangt nach einigen Schritten zu der Beziehung

$$\Delta \vec{U} + k^2 \vec{U} = 0 \quad \text{mit } k^2 = -i\sigma\mu\omega$$

bei der nur harmonische Anregungen betrachtet werden, was nach dem Satz von Fourier keine Einschränkung der Allgemeinheit ist.

In dem links stehenden Laplace-Operator stecken nun die Lineardimensionen des Störkörpers darin, rechts stehen die elektrischen Konstanten. Sollen nun die Lineardimensionen des Störkörpers verkleinert werden, so muß das rechts stehende Produkt der elektrischen Konstanten mit demselben Faktor vergrößert werden, damit U ungeändert bleibt. Es muß also bei jeder solchen Transformation gelten:

$$\sqrt{\epsilon \omega \mu} \cdot a = \text{const.},$$

wie es sich auch im Falle des unendlich langen Kreiszylinders explizit durch die Rechnung ergibt. Im Falle des Zylinders ist a der Radius; bei anderen Modellen ist a irgendeine andere Lineardimension. Da die Störkörper bei der Transformation ähnlich bleiben, spielt es keine Rolle, welche Koordinate speziell gewählt wird. Eine eindeutige Zuordnung ist jedoch nicht möglich, da nur das Produkt $\sqrt{\epsilon \omega \mu} \cdot a$ konstant sein muß.

2. Die Modellversuche

Zunächst war die Frage zu klären: Hat es überhaupt Zweck, solche Modellversuche durchzuführen, reicht die Meßgenauigkeit aus und lassen sich die interessierenden Effekte überhaupt mit einigermaßen handlichen Modellen nachbilden? Es lag nahe, dazu die Messungen am Modell mit den Ergebnissen von Rechnungen zu vergleichen. Dazu wurde der Zylinder gewählt, da hierzu die Ergebnisse durch eine Arbeit von KERTZ vorlagen.

Zunächst sei kurz die bisher benutzte Meßanordnung beschrieben: Ein Generator liefert eine sinusförmige Wechselspannung, die in einem Kraftverstärker verstärkt wird. Damit wird eine Helmholtz-Spule gespeist zur Erzeugung eines homogenen magnetischen Feldes. Diese bildet mit einer Kapazität C zusammen einen auf Resonanz abgestimmten Schwingkreis, so daß im Verstärker keine Blindleistung aufgebracht werden muß und Verzerrungen der Sinusform wirksam unterdrückt werden.

Die Überlagerung von induziertem und induzierendem Feld wird mit drei kleinen Induktionsspulen (Sonde) abgetastet, die aufeinander senkrecht stehen und so die drei Magnetfeldkomponenten H_x , H_y und H_z abtasten. Die Ausgangsspannung dieser Spulen wird nach Betrag und Phase gemessen, beide bezogen auf das induzierende Feld, dem die relative Amplitude 1 und die Phase 0 zugeordnet wird.

Gemessen wird jeweils ein Profil über den Störkörper, das parallel zum induzierenden Feld verläuft, hier in x-Richtung.

Nun einige Meßergebnisse:

Figur 1 (s.S.147) zeigt ein Profil über einen Zylinder aus Aluminium mit einem Radius von 4 cm bei einer Frequenz von 280 Hz. Es treten nur die X- und die Z-Komponente auf, die Y-Komponente verschwindet im Rahmen der Meßgenauigkeit. Die ausgezogenen Linien stellen die gemessenen, die gestrichelten die berechneten Werte dar. Es ergab sich doch eine recht gute Übereinstimmung. Ein entsprechendes Bild ergibt die Phasenmessung. (s.Fig. 2, S.148)

Liegt das Profil in der Ebene der Zylinderachse, so sieht das Bild anders aus. Die Amplitude zeigt hier bei Annäherung an den Zylinder einen starken Abfall, die Phase geht zu negativen Werten. Das bedeutet hier ein Vorseilen der induzierten Spannung vor der induzierenden. Auch hier zeigt sich eine gute Übereinstimmung zwischen berechneter und gemessener Kurve. (s. Fig. 3, S.149)

Weitere Messungen an einem vom Zylindermodell abweichenden Körper wurden an einer Messinglatte vorgenommen. Fig. 4 (S.150) zeigt die Meßergebnisse der hochkant im Feld stehenden Latte. Die Kurven haben dieselbe Struktur wie beim Zylinder. Bei der flach liegenden Latte in Fig. 5 (S.151) fällt jedoch die sehr kleine X-Komponente auf, die Z-Komponente hat ihre Maxima wieder in der Nähe der Kanten der Latte. Das zeigt sich noch deutlicher in der Fig. 6 (S.152) wo eine dünne Aluminiumplatte als Modellkörper gewählt wurde. Auch hier sind wieder die Spitzen der Z-Komponente über den Kanten der Platte, dazwischen weder in der X-, noch in der Z-Komponente wesentliche Amplituden.

Bei plattenförmigen Modellen zeigt sich also der Haupteffekt in der Z-Komponente und am Rande der Platte, und die X-Komponente nimmt mit wachsender Plattengröße ab. Das ist nicht unvernünftig denn eine in x- und y-Richtung unendlich ausgedehnte Platte wäre magnetisch überhaupt nicht feststellbar, wenn das induzierende Feld parallel zur Plattenoberfläche verläuft (vgl. auch die Figuren von Schmucker).

Soweit die "alten" Messungen. Inzwischen ist die Anlage weiter verbessert worden, die Vermessung der Profile erfolgt nicht mehr punktweise mit nachfolgender Reduktion und Auswertung, sondern fotografisch vom Schirm eines Oszillografen.

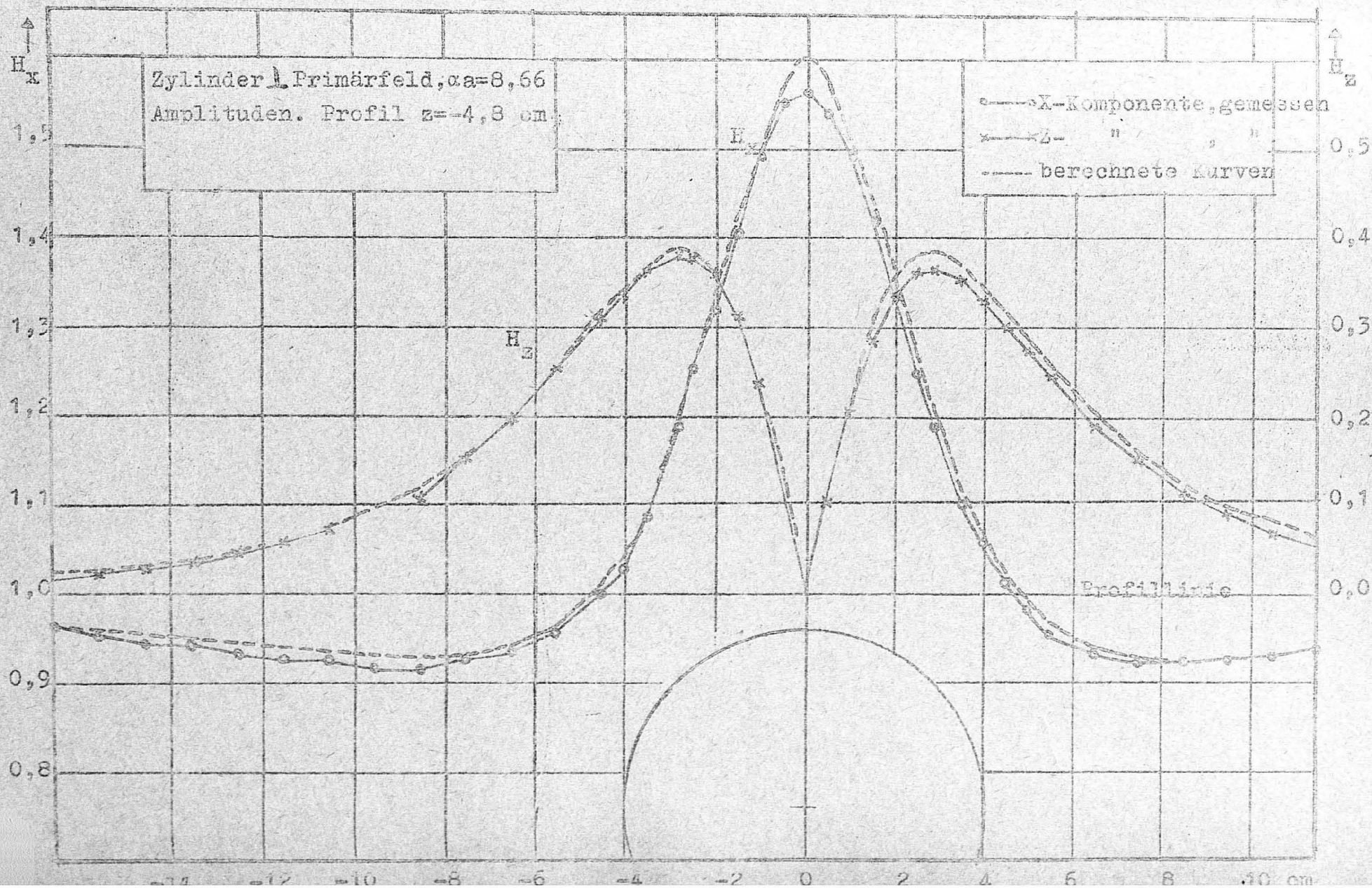
Blockschaltbild s. Fig. 7 (S. 153)

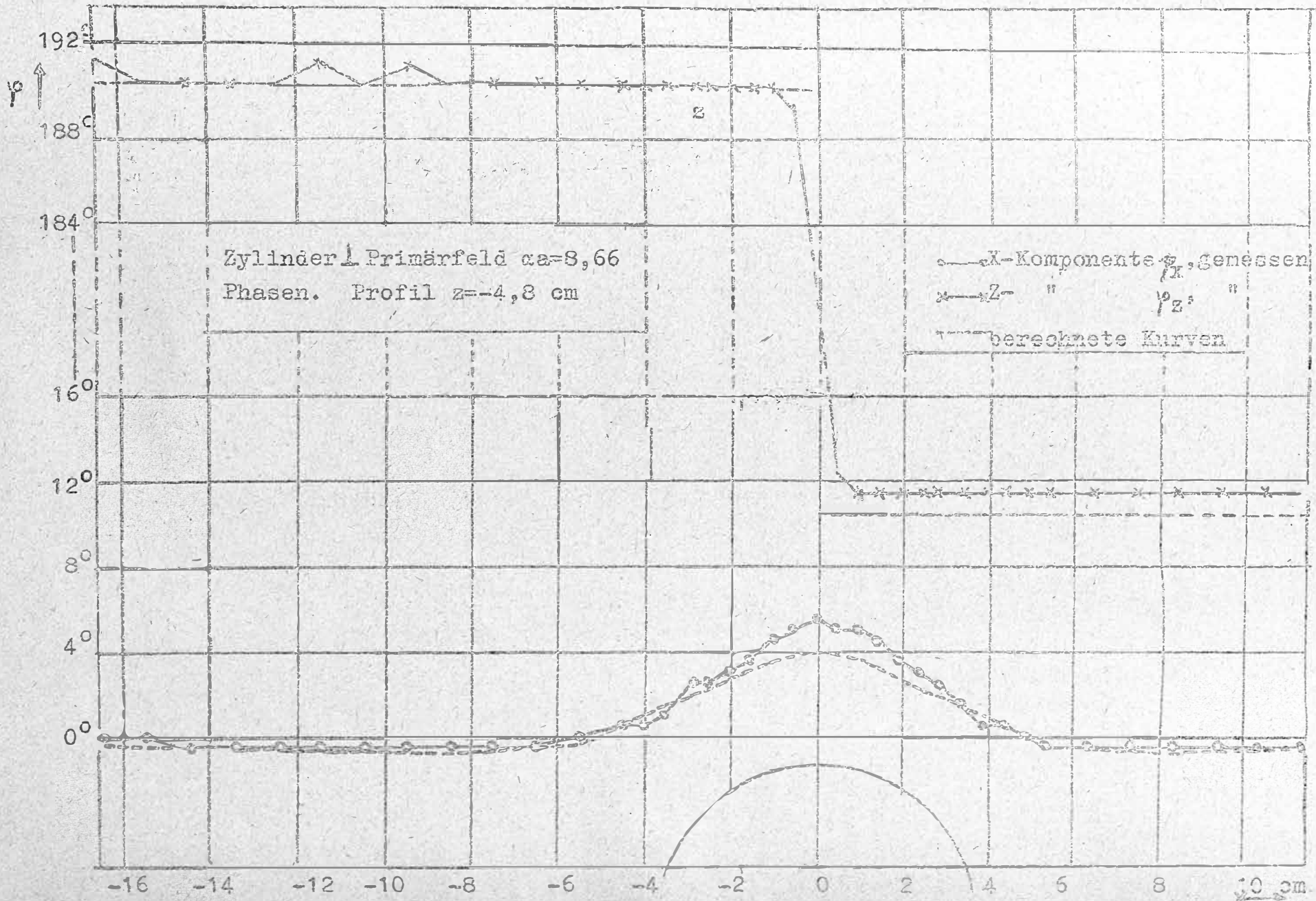
Die Generatorseite ist unverändert.

Die Bewegung der Sonde über das Profil ist fest mit einem Potentiometer gekoppelt, die abgegriffene Spannung dient zur Horizontalablenkung des Oszillografen. Die induzierten Spannungen werden nach Verstärkung zur Amplitudenmessung den Vertikalablenkplatten des Oszillografen zugeführt und die Amplitude in Abhängigkeit vom Ort auf dem Schirm dargestellt und fotografiert. Zur Phasenmessung wird die verstärkte Spannung einem Spannungsbegrenzer zugeführt, der die Sinusspannung in eine symmetrische Rechteckspannung umformt. Dasselbe geschieht in einem zweiten Begrenzer mit einer Bezugsspannung, die am Widerstand R abgegriffen wird. Diese beiden Rechteckspannungen werden nun auf ein UND-Gatter gegeben, das die Eigenschaft hat, nur so lange einen Impuls am Ausgang abzugeben, wie an beiden Eingängen gleichzeitig negatives Potential vorhanden ist. Die Breite dieses Ausgangsimpulses ist also direkt proportional dem Phasenunterschied der beiden Eingangsspannungen. Wird dieser Impuls durch ein RC-Glied geglättet, so erhält man eine Gleichspannung, die dem Phasenunterschied proportional ist. Diese wird zur Phasenmessung ebenfalls auf den Oszillografen gegeben und in Abhängigkeit vom Ort fotografisch registriert. Die fotografierten Bilder können auf Fotopapier übertragen oder am Lesegerät ausgewertet werden.

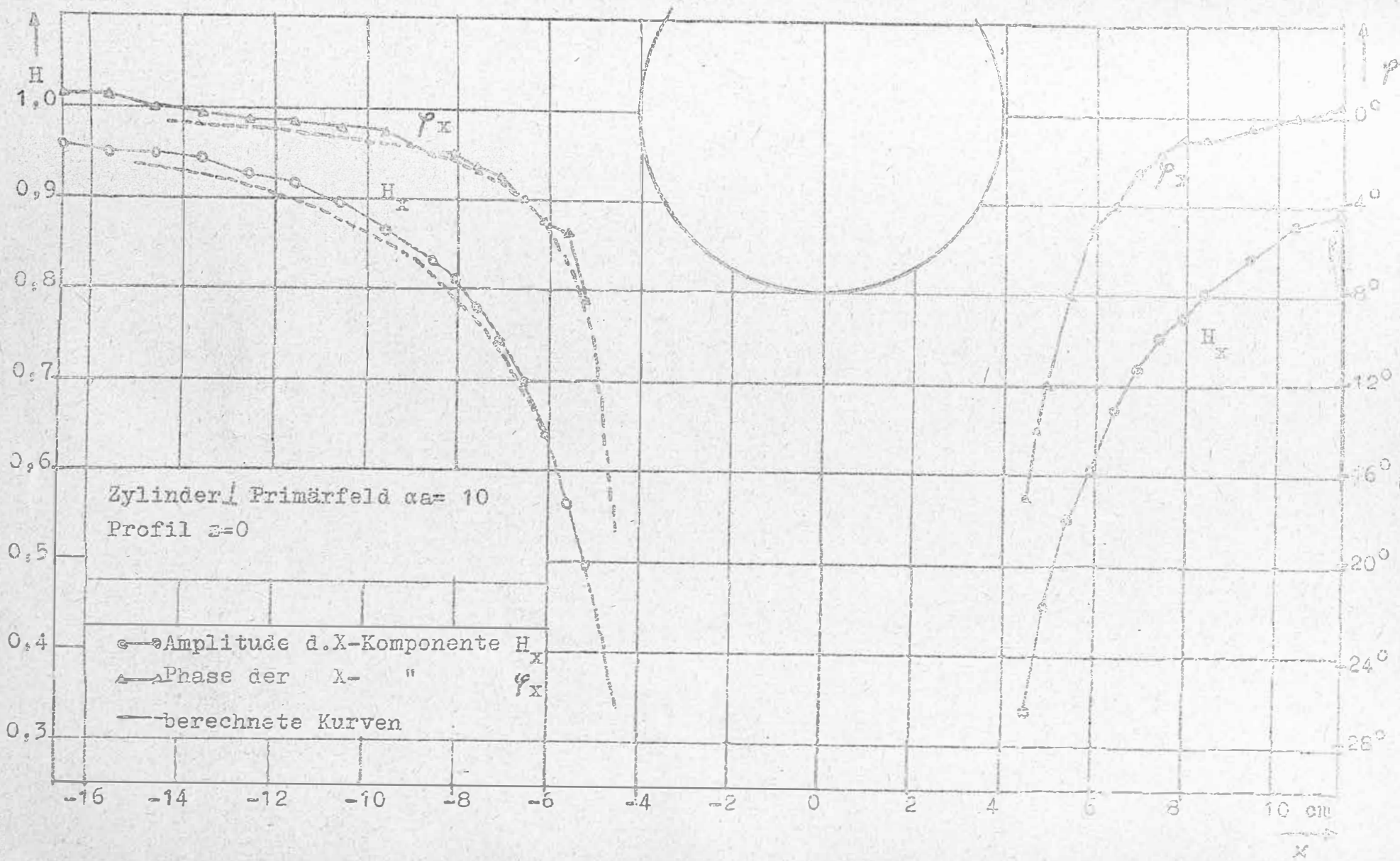
Durch dies Verfahren ist es jedoch möglich, in kurzer Zeit viele Messungen durchführen zu können, da alle erforderlichen Amplituden- und Phasenreduktionen schon bei der Aufnahme berücksichtigt werden können und das zeitraubende grafische Darstellen entfällt.

Leider ist die Anlage erst vor wenigen Tagen fertig geworden, so daß neue Messungen damit noch nicht vorliegen. Auch eine Kontrolle der damit zu erzielenden Genauigkeit steht noch aus, sie dürfte jedoch gegenüber der alten Methode erheblich besser sein, da u. a. die zeitliche Konstanz der in die Messung eingehenden Parameter keine so große Rolle mehr spielt.



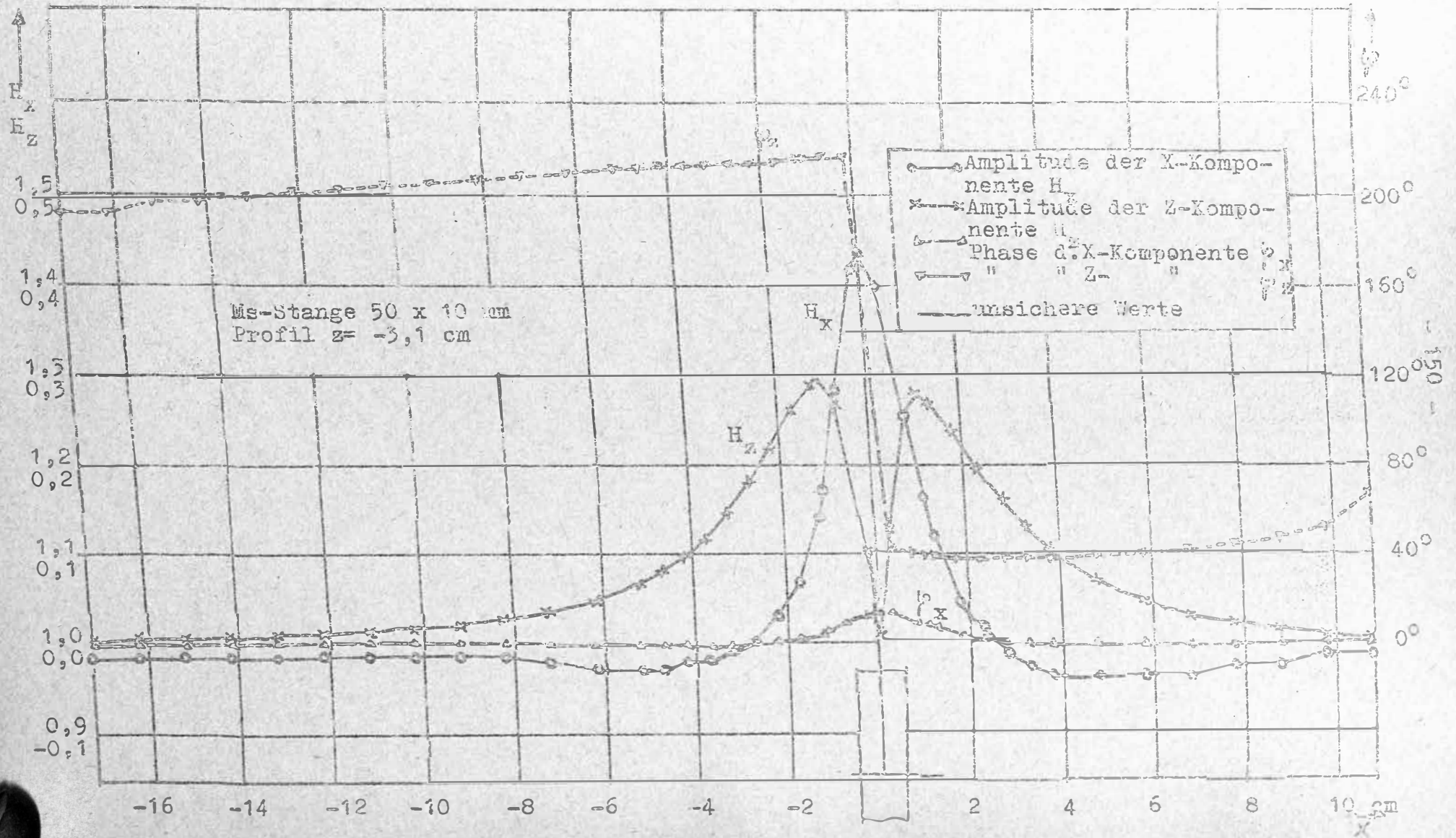


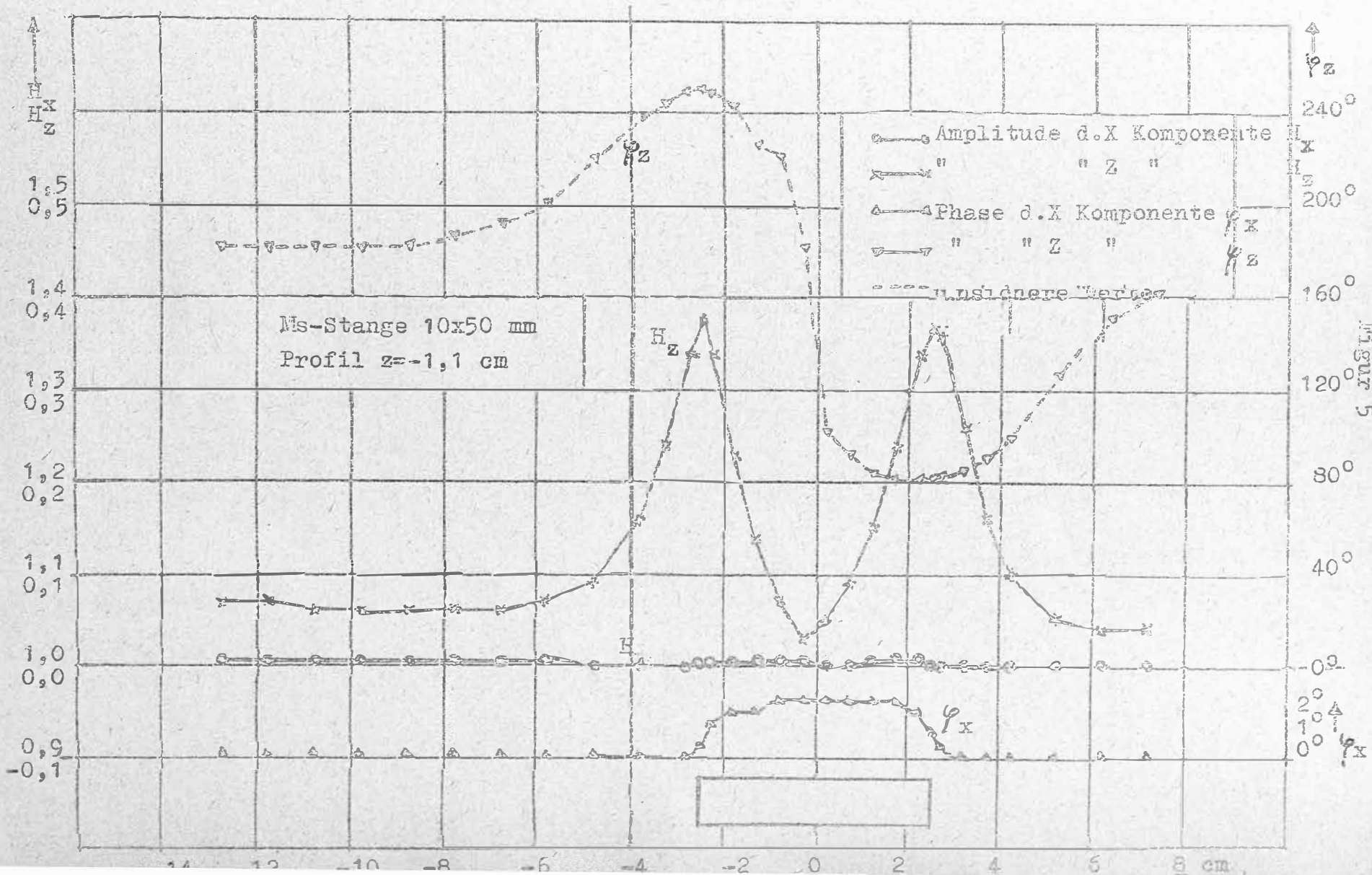
Figur 2
 148



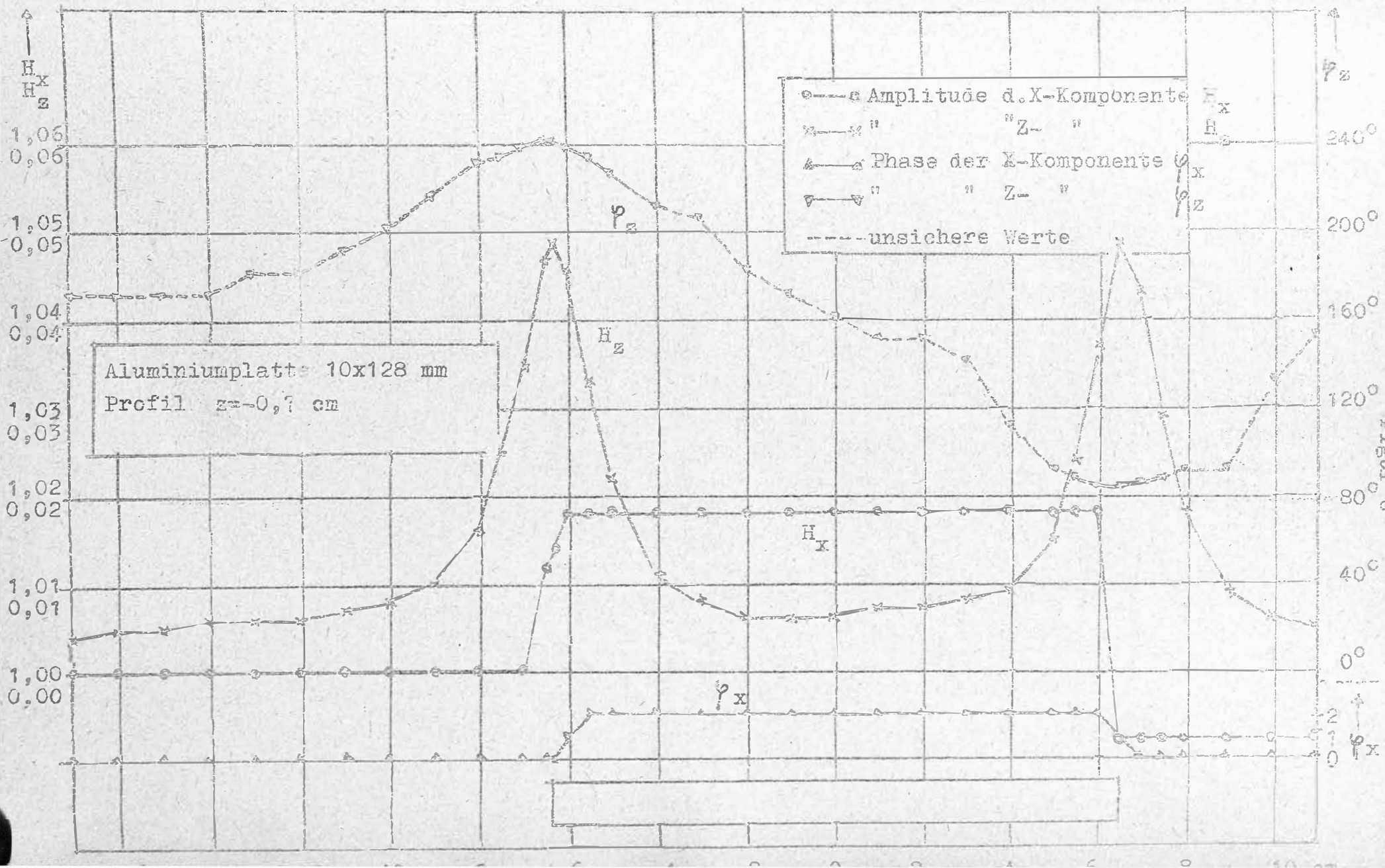
Figur 3

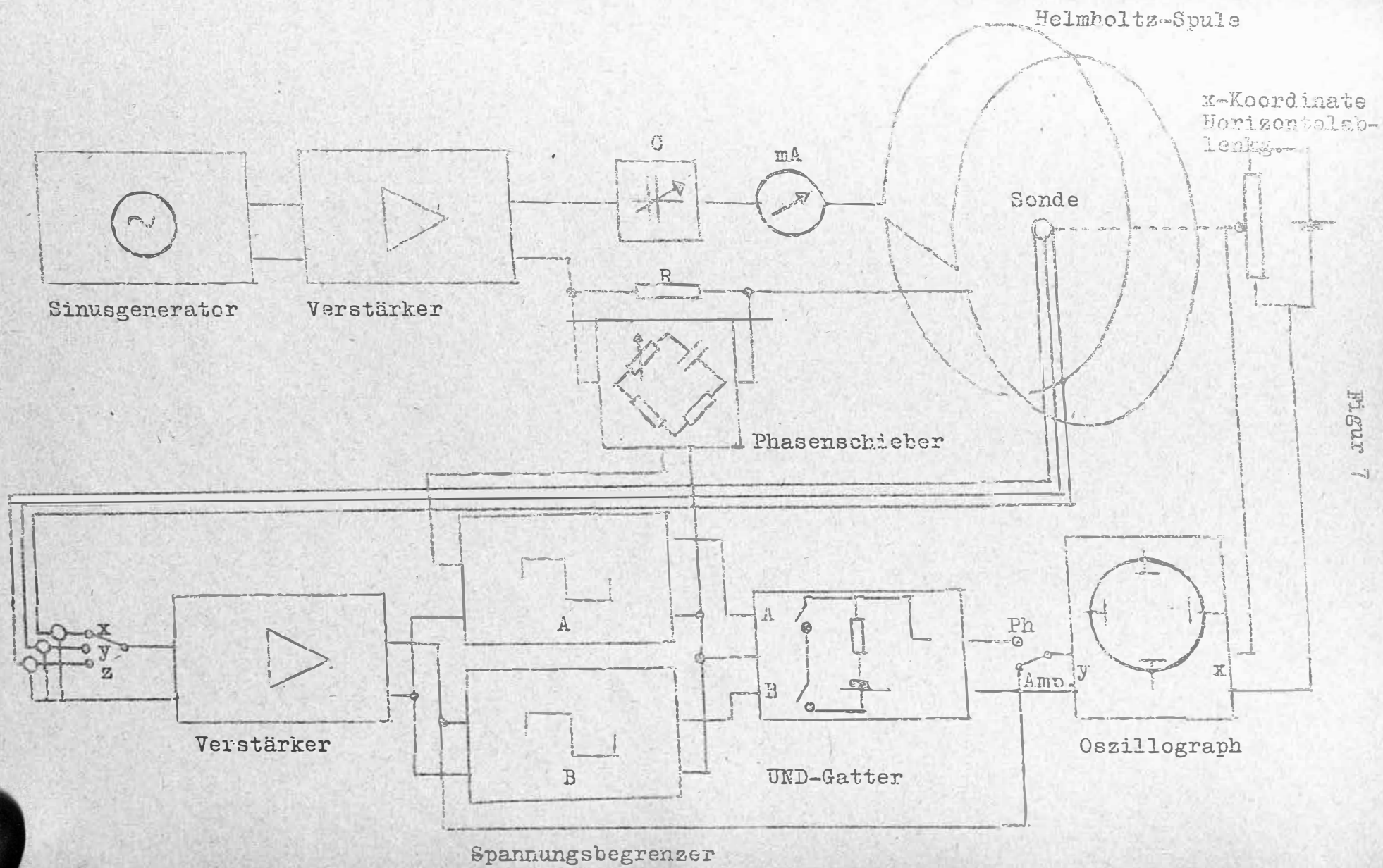
Figur 4





151 -
Figur 5





Figur 7
- 153 -