Apparatur zur Messung des Hall-Effektes und der magnetischen Widerstandsänderung mit Wechselstrom

Autor(en): **Müller, K.A. / Wieland, J.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Helvetica Physica Acta**

Band (Jahr): **27 (1954)**

Heft VII

PDF erstellt am: **25.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-112537

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Apparatur zur Messung des Hall-Effektes und der magnetischen Widerstandsänderung mit Wechselstrom

von **K. A. Müller** und **J. Wieland**

Physikalisches Institut der Eidg. Technischen Hochschule, Zürich.

(28. X. 1954.)

Zusammenfassung: Es wird eine Wechselstromapparatur beschrieben, welche gestattet, Leitfähigkeit, Hallkonstante und magnetische Widerstandsänderung von Proben zu messen, deren Widerstand zwischen 10^{-5} und 10^{2} Ohm liegt. Die kleinste mit der Apparatur feststellbare Spannung beträgt $2 \cdot 10^{-8}$ Volt.

Einführung.

In den letzten Jahren hat sich ein neuer Zweig der Festkörperphysik entwickelt, der sich mit der elektronentheoretischen Deutung thermoelektrischer und galvanomagnetischer Effekte von Halbleitern, speziell intermetallischer Verbindungen befasst. Die hier geschilderte Apparatur wurde zu dem Zwecke gebaut, Leitfähigkeit, Hallkonstante und magnetische Widerstandsänderung solcher Verbindungen zu messen. Proben dieser Verbindungen weisen je nach Temperatur und Art der Verbindung Widerstände zwischen 10^{-5} und 100 Ohm auf. Die auftretenden Hallspannungen betragen zum Teil nur einige Microvolt. Die Hallkonstante wird in der Regel aus Gleichstrommessungen bestimmt[1][2]. Dabei treten an den Hallsonden stets Thermospannungen auf, welche zum Teil durch den Ettingshauseneffekt hervorgerufen werden. Um trotzdem zuverlässige Messungen zu erhalten, ist es notwendig, einerseits bei jeder Messung Probenstrom und Magnetfeld umzupolen, anderseits aber muss die Temperatur der Proben möglichst konstant und homogen sein. Dadurch werden sehr lange Messzeiten bedingt. Um diese Nachteile zu umgehen, wurden an mehreren Orten Wechselstromapparaturen gebaut[3][4][5]. Russel und Wahlig[3]) geben eine Methode zur Messung der Hallkonstanten an, bei welcher das Magnetfeld H mit einer Frequenz ω_1, der durch die Probe fliessende Strom I aber mit einer Frequenz ω_2 variiert werden. Die mit der Differenz- bzw. Summenfrequenz auftretende Hallspannung wird direkt verstärkt.

Bei der von PELL und SPROULL beschriebenen Apparatur wird die Hallwechselspannung ebenfalls direkt verstärkt, jedoch das Magnetfeld bei einem konstanten Absolutwert alle 6 Sekunden umgepolt.

Diese Methoden bedingen beide eine Eichung des Verstärkers, welche sich über längere Messzeiten nicht verändern darf. Ausserdem sind bei Halbleitern die Übergangswiderstände zwischen Proben und Sonden zum Teil sehr hoch und schwer abschätzbar. Um Fehlmessungen zu vermeiden, muss daher die Eingangsimpedanz des Verstärkers möglichst hoch gewählt werden.

Im folgenden wird eine *Kompensationsmethode* beschrieben, die von diesen Nachteilen frei ist. Bei dieser Methode braucht der Verstärker nicht geeicht zu werden, und die Übergangswiderstände setzen, falls sie mit der Eingangsimpedanz des Verstärkers vergleichbar sind, lediglich die Empfindlichkeit der Apparatur herunter.

Messmethode.

In Fig. 1 ist das Prinzipschema dargestellt.

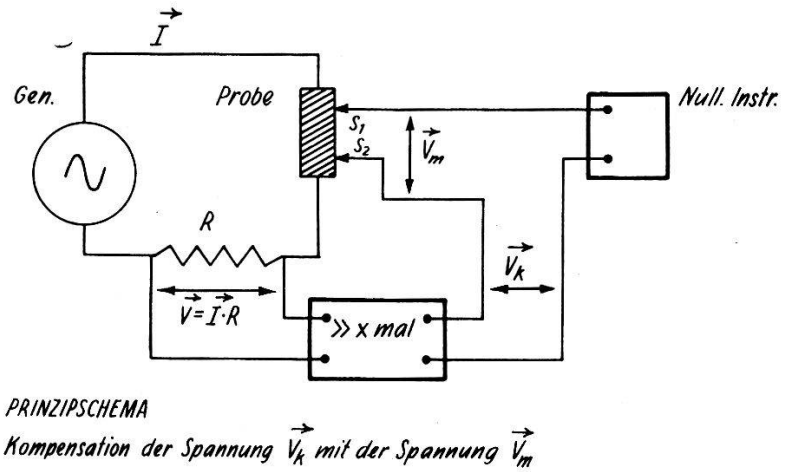

Fig 1.

Man kompensiert die zwischen den Sonden S_1 und S_2 auftretende Wechselspannung $\vec{V}_m$ mit einer bekannten Spannung $\vec{V}_k$ gleicher Frequenz und entgegengesetzter Phase. Die Spannung $\vec{V}_k$ wird über einen Abschwächer am bekannten Widerstand R abgegriffen.

Für die Widerstandsmessung gilt:

$$\vec{V}_m = R_p(H)\cdot\vec{I} \qquad \vec{V}_k = x\cdot R\cdot\vec{I} \qquad R_p(H) = R\cdot x \text{ (Ohm)}$$

R_p = Probenwiderstand $\qquad$ $\vec{I}$ = Probenstrom
H = Magnetfeld $\qquad$ x = Abschwächungsfaktor.

Für die Messung der Hallkonstanten gilt:

$$\vec{V}_m = \frac{R_H}{d} \cdot \vec{I} \cdot H = \vec{V}_k \qquad R_H = \frac{R \cdot x}{H} \cdot d \frac{(\text{Volt} \cdot \text{cm}^2)}{\text{Amp.}^2}.$$

d = Dicke der rechteckigen Probe in Richtung des Magnetfeldes.
R_H = Hallkonstante.

Man erkennt daraus, dass die Messung von R_p und R_H unabhängig von dem durch die Probe fliessenden Strom ist*). Der Strom muss jedoch stets so klein gehalten werden, dass sich die Probe nicht erwärmt. (Maximale Belastung einer Probe von 12 × 3 × 1 mm zirka 1/100 Watt.)

Fig. 2 zeigt die Anordnung der Sonden.

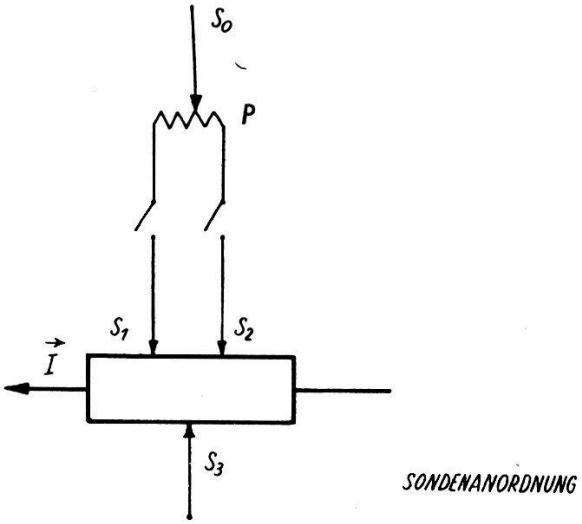

Fig. 2.

Zur Widerstandsmessung wird die Spannung über den Sonden S_1 und S_2 abgegriffen, Sonde S_3 wird nicht benützt. Zur Messung des Halleffektes werden die Sonden S_1 und S_2 durch ein hochohmiges Potentiometer P verbunden. Damit ist es möglich, die Spannung zwischen S_0 und S_3 bei abgeschaltetem Magnetfeld auf Null abzugleichen.

Frequenz und Empfindlichkeit.

Die Apparatur arbeitet bei einer Frequenz von 73 Hz. Zur Wahl dieser Frequenz waren 3 Gesichtspunkte massgebend: Erstens darf die Frequenz nicht mit einer harmonischen der Netzfrequenz

*) Auf diese Möglichkeit der Messung weisen J. J. Donoghue und W. P. Eatherly[4]) hin.

übereinstimmen. Zweitens muss das Produkt aus der Arbeitsfrequenz und der Einstellzeit des Ettingshauseneffektes gross sein gegenüber eins. Drittens darf die Frequenz nicht zu hoch gewählt werden, da sonst die Kompensation durch kapazitive Ströme erschwert wird.

Die Gleichheit der Spannungen $\vec{V}_k$ und $\vec{V}_m$, bekannter Frequenz, wird mittels eines Nullinstrumentes angezeigt. Dies geschieht in der Regel dadurch, dass man die Spannung $\vec{V}_k - \vec{V}_m$ verstärkt und mit einem Kathodenstrahloszillographen oder Röhrenvoltmeter nachweist. Die Grenze der Empfindlichkeit ist im wesentlichen durch die Rauschspannung der ersten Verstärkerstufe gegeben, da es stets gelingt, Brummspannungen genügend klein zu halten oder herauszufiltern.

Die Rauschspannung ist normalerweise gegeben[6]) durch:

$$\overline{V^2} = 4kTR \cdot \Delta f \qquad R = R_{\text{eing.}} + R_{\text{acq.}}$$

k = Boltzmannsche Konstante T = absolute Temperatur
R = Eingangs- und Äquivalenter Rauschwiderstand der ersten Stufe
Δf = Bandbreite des Verstärkers.

Es ist zu beachten, dass bei der gewählten Frequenz von 73 Hz dieser Wert infolge des Funkeleffektes überschritten wird.

Die am Nullinstrument auftretende Spannung ist nicht nur frequenzmässig bekannt, sondern sie besitzt auch eine konstante Phase gegenüber der Generatorspannung. Wir haben aus diesem Grunde einen Phasendiskriminator verwendet[7]). Dies hat den Vorteil, dass man keinen sehr schmalbandigen Vorverstärker braucht, und dass die Nullanzeige mittels eines Microampèremeters erfolgen kann, das den Nullpunkt in der Mitte der Skala hat.

Das Prinzipschema des Phasendiskriminators ist in Fig. 3 dargestellt.

$V' \cdot e^{i(\omega_0 t + \varphi')}$ ist die bereits vorverstärkte Spannung, welche auf Null abzugleichen ist.

$V'' \cdot e^{i(\omega_0 t + \varphi'')}$ die vom RC-Generator gelieferte Referenzspannung.

Mit $R \cdot C \gg 2\pi/\omega_0$, ω_0 Arbeitskreisfrequenz, R hochohmig, erhält man für die Spannung zwischen den Punkten A und B, falls $V' < V''$ ist:

$$V_{AB} = V' \text{ mit } \varphi' = \varphi'' \qquad V_{AB} = -V' \text{ mit } \varphi' = \varphi'' \pm \pi$$

$$|V_{AB}| < V' \text{ für } \begin{cases} \varphi'' < \varphi' < \varphi'' + \pi \\ \varphi'' > \varphi' > \varphi'' - \pi. \end{cases}$$

Bei der gebauten Apparatur ist $\varphi' \cong \varphi''$, so dass kein Schaltelement zur Schiebung der Phase benötigt wird.

Für $V' > V''$ ist jedoch bei $\varphi' = \varphi''$ $V_{AB} \cong V''$. Da V'' zeitlich konstant ist, bedeutet dies, dass das Microampèremeter nicht überlastet werden kann, falls sein Maximalstrom durch $\pm |V''|/R$ gegeben ist.

Die Einstellzeit $\tau \sim R \cdot C/2$ des Diskriminators wurde zu 3 Sekunden festgelegt und entspricht somit einer Rauschbandbreite von $^1/_3$ Hz. Bei dieser Bandbreite beträgt die Empfindlichkeit

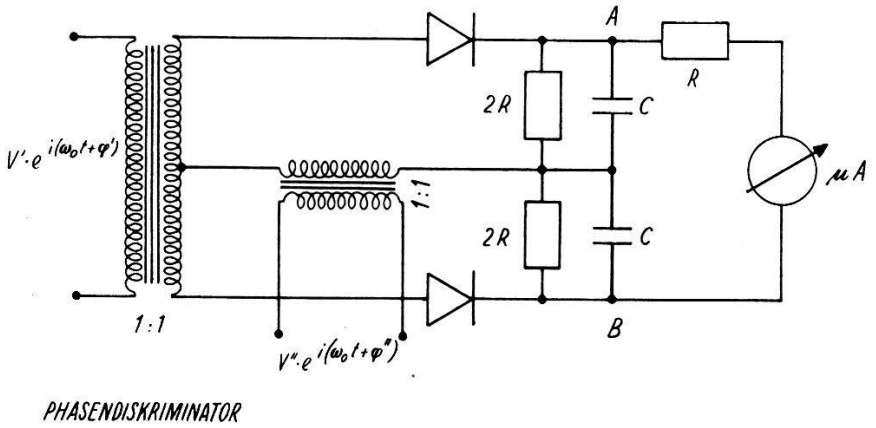

Fig. 3.

10^{-7} Volt. Zur Erreichung der höchsten Empfindlichkeit wird das Microampèremeter durch ein aperiodisch gedämpftes Galvanometer ersetzt. Bei einer Einstellzeit von 10 Sekunden können so noch Spannungen von $2 \cdot 10^{-8}$ Volt nachgewiesen werden.

Blockschema.

Das Blockschema der auf dem geschilderten Prinzip beruhenden Apparatur zeigt Fig. 4.

Zur Erzeugung der Wechselspannung dient ein *RC*-Generator. Dem Kraftverstärker, dessen Leistung 20 Watt beträgt, können Ströme bis zu 1 Ampère entnommen werden. Der Normalwiderstand wurde mit Rücksicht auf die niederohmigen Proben auf 1 Ohm festgelegt; er ist als Potentiometer ausgeführt mit total 20%iger Abschwächung, d. h. zwischen 0,8 und 1 Ohm regulierbar.

Es folgt die Transformatorstufe als elektrische Trennung. Die Primärseite des Transformators ist mit einem Umpoler versehen, um die Kompensation auch beim Vorzeichenwechsel des Halleffektes zu ermöglichen. Anschliessend folgt ein Stufenabschwächer von 20% von Stufe zu Stufe. Der Dezimalabschwächer mit 6 Stufen

10^0—10^{-6} ist der Kathodenwiderstand eines Kathodenfolgers. Damit gelingt es, eine Beeinflussung des 20%-Abschwächers zu vermeiden.

Um bei Abschwächung Null eine Verstärkung von 1 und keine Phasenschiebung zu erhalten, wurde ein Differenzdetektor als Abgleich- und Kontrollelement gebaut (D.D. Fig. 4).

Ebenfalls im Blockschema eingezeichnet ist die Schalteinheit, mit der die Apparatur von Halleffekts- auf Widerstandsmessung

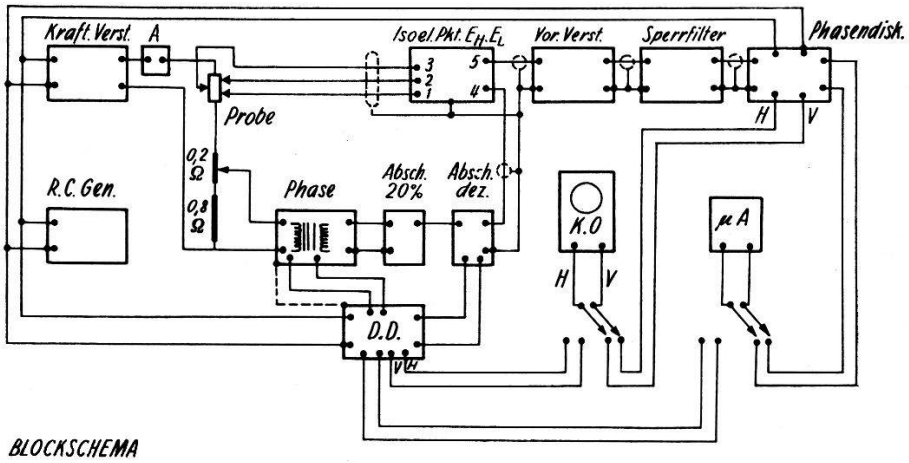

Fig. 4.

umgeschaltet wird. Hier erfolgt auch die Einstellung des isoelektrischen Punktes. Die Longitudinalspannungen können in zwei Zehnerpotenzen 10^{-1}—10^{-2} abgeschwächt werden, falls bei der zu messenden Probe der Widerstand zwischen den Sonden S_1 und S_2 1 Ohm überschreiten sollte. Ein Widerstand von 100 Ohm kann noch gemessen werden, jedoch ist diese Spannungsmessung nicht mehr stromlos. Wird Stromlosigkeit auch bei dieser Longitudinalspannungsmessung verlangt, so ist der Normalwiderstand von 1 Ohm auf einen höheren Wert z. B. 1000 Ohm umschaltbar auszuführen.

Das Nullinstrument besteht aus Wechselstromverstärker, Sperrfilter und Phasendiskriminator. Mit dem Wechselstromverstärker kann die Eingangsspannung bis zu einem Faktor 10^6 verstärkt werden. Als Eingangsröhre wurde eine speziell rauscharme EF40 gewählt und ausserdem mit Blei beschwert und auf Schwammgummi gelagert, um das Klingen zu vermeiden.

Der Sperrfilter hat eine Rauschbandbreite von 6 Hz. Ein 50-Hz-Absorptionsfilter ist ebenfalls eingebaut, das die Brummspannungen um einen Faktor 100 heruntersetzt. Mit dem Kathodenstrahloszillographen wird direkt hinter dem Sperrfilter grob kompensiert. Das Microampèremeter wird bei der Feinkompensation

mittels Phasendiskriminator verwendet. Der Abschwächer wird ebenfalls unter Benützung des Differenzdetektors mit Kathodenstrahloszillograph und Microampèremeter abgeglichen.

Wesentlich war bei der gesamten Apparatur das Erdungsproblem. Es wurde peinlich darauf geachtet, dass keine Brummschleifen innerhalb der Erdungsleitungen vorhanden sind. Um einen Erdbrummstrom zu unterdrücken, ist zwischen dem 20%igen und dem Dezimalabschwächer die Erdleitung unterbrochen. Dort addieren sich die Brummspannungen von etwa 100 Microvolt zu der Eingangsspannung des Dezimalabschwächers und sind vernachlässigbar klein.

Messungen.

Mit der beschriebenen Apparatur wurde der Halleffekt und die magnetische Widerstandsänderung von grauem Zinn[8]) und einigen intermetallischen Verbindungen wie Mg_2Si, Mg_2Ge, Mg_2Sn gemessen[9])[10]). Auch die Abhängigkeit des Halleffektes vom Magnetfeld bei Germanium wurde untersucht.

Die Autoren nehmen gerne die Gelegenheit wahr, an dieser Stelle Herrn Prof. Dr. G. Busch für seine anregenden Diskussionen und sein stetes Interesse, sowie Herrn S. R. Arnold für seine umfangreichen vorbereitenden Arbeiten, welche den Bau dieser Apparaturen wesentlich förderten, bestens zu danken.

Unser Dank gehört ferner der Eidg. Stiftung zur Förderung Schweizerischer Volkswirtschaft durch wissenschaftliche Forschung für die Bereitstellung der finanziellen Mittel.

Literatur.

[1]) I. B. Boltaks, J. tech. Physik USSR **20**, 180 (1950).
[2]) E. Justi und G. Lautz, Ztsch. f. Naturf. **7a**, 191ff., 602ff. (1952).
[3]) B. R. Russell und C. Wahlig, Rev. of Sc. Instr. **21**, 1028 (1950).
[4]) J. J. Donoghue und W. P. Eatherly, Rev. of Sc. Instr. **22**, 513 (1951).
[5]) E. M. Pell und R. L. Sproull, Rev. of Sc. Instr. **23**, 548 (1952).
[6]) H. Nyquist, Phys. Rev. **92**, 110 (1928).
[7]) Electronic Instruments Rad. Lab. Ser. M.I.T. Vol. 21, 383 (1948).
[8]) G. Busch und J. Wieland, Helv. Phys. Acta **26**, 697 (1953).
[9]) G. Busch und U. Winkler, Helv. Phys. Acta **26**, 395 (1953)
[10]) G. Busch, F. Hulliger und U. Winkler, Helv. Phys. Acta **27**, 195 (1954).