

# Gyromagnetischer Effekt einer ferromagnetischen Substanz oberhalb ihres Curiepunktes

Autor(en): **Sueksmith, W.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Helvetica Physica Acta**

Band (Jahr): **8 (1935)**

Heft II

PDF erstellt am: **21.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-110526>

## **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.

# Gyromagnetischer Effekt einer ferro-magnetischen Substanz oberhalb ihres Curiepunktes

von W. Sucksmith.

(2. II. 35.)

*Zusammenfassung.* Das magnetische Moment des Nickel-Atoms in metallischem Nickel ist unterhalb und oberhalb des Curiepunktes verschieden (0,6 resp. 1,6 BOHR'sche Magnetonen). Die Messung des gyromagnetischen Effektes *unterhalb* des Curiepunktes zeigt, dass der Magnetismus des Ni-Atoms nur auf Elektronenspin beruht. Es ist keinerlei Beitrag von Bahnmomenten vorhanden; denn man findet mit grosser Annäherung für den LANDÉ'schen  $g$ -Faktor den Wert  $g = 2,0$ . Die Natur des Atommagnetismus für Ni *oberhalb* des Curiepunktes, ob Bahn- oder Spin-Moment, ist bisher völlig ungeklärt.

In der vorliegenden Arbeit werden Messungen ausgeführt, welche beweisen, dass auch im paramagnetischen Zustand, oberhalb des Curiepunktes, das Nickelatom reinen Spin-Magnetismus aufweist. Es wird der  $g$ -Faktor an ferromagnetischen Ni-Cu-Legierungen oberhalb des Curiepunktes bestimmt. In diesen Legierungen hat das Ni-Atom denselben Magnetismus wie in reinem Nickel und der gefundene Wert  $g = 2$  im paramagnetischen Zustand schliesst den Einfluss von Bahnmomenten aus.

Eine Apparatur zur Messung des gyromagnetischen Effektes an paramagnetischen Substanzen ist vom Autor<sup>1)</sup> früher entwickelt worden, und es sind mit ihr Versuche an verschiedenen paramagnetischen Substanzen aus den Gruppen des Eisens und der seltenen Erden durchgeführt worden. Die Experimente ermöglichen eine Bestimmung des LANDÉ'schen „ $g$ “-Faktors der untersuchten Ionen. Allgemein ergibt sich, dass die magnetische Suszeptibilität sowohl vom Elektronenspin wie auch von den Bahnmomenten herrührt, ganz in Übereinstimmung mit der Theorie des Paramagnetismus nach VAN VLECK.

Bezüglich des gyromagnetischen Effektes an ferromagnetischen Körpern bestehen Diskrepanzen zwischen den Resultaten verschiedener Experimentatoren. BARNETT erhält je nach der untersuchten Substanz gegenüber  $g = 2,00$  um 4—8% kleinere Werte, während die Ergebnisse von vier anderen unabhängigen Messungen, wovon eine vom Verfasser ausgeführt wurde, einen Wert  $g = 2$  ergeben mit einer Genauigkeit von 1—2%<sup>2)</sup>. Darnach wäre

<sup>1)</sup> Proc. Roy. Soc. A. **128**, 276, 1930.

<sup>2)</sup> Eine bemerkenswerte Ausnahme dieses allgemeinen Verhaltens beobachtete COETERIER (Helv. Phys. Acta **5**, 217, 1932) im Falle des anisotropen ferromagnetischen Pyrrhotins mit  $g = 0,66$ .

in Ferromagnetica das Spin-Moment des Elektrons allein massgebend. Es scheint offensichtlich, dass diesen vier unabhängigen Bestimmungen und ihrem Resultat grösseres Gewicht gegeben werden darf, als der BARNETT'schen Messung. Bisher konnte keine befriedigende theoretische Erklärung für diejenigen magnetischen Atommomente der Ferromagnetica gefunden werden, welche sich aus der Sättigungsintensität bei tiefen Temperaturen ergeben. Die Messwerte sind in BOHR'schen Einheiten 2,2, 1,7 und 0,6 für Fe, Co und Ni. Über dem Curiepunkt  $\Theta$  gilt ferner für die paramagnetische Suszeptibilität:  $\chi (T - \Theta) = C$ , wo die CURIE'sche Konstante  $C$  ein Mass für das magnetische Moment des betrachteten Atoms oder Ions ist. Die so erhaltenen  $C$ -Werte konnten weder mit den magnetischen Momenten aus den Messungen bei tiefen Temperaturen noch mit der Elektronen-Struktur der Atome in Einklang gebracht werden. Es erschien daher angebracht, den gyromagnetischen Effekt für eine ferromagnetische Substanz oberhalb des CURIE-Punktes zu messen, um Aufschluss über die Natur des Paramagnetismus in diesem Gebiete zu erhalten.

Eine solche Untersuchung würde bei einer ferromagnetischen Substanz, z. B. Nickel, Messungen bei über  $400^{\circ}$  C erfordern, was völlig ausserhalb der heutigen experimentellen Möglichkeiten liegt. Bei Verwendung von Nickel-Kupfer-Legierungen bietet sich die Möglichkeit, oberhalb des Curiepunktes zu arbeiten und dort den  $g$ -Faktor dieses Ferromagnetikums zu bestimmen. Nickel und Kupfer sind in allen Verhältnissen in Form einer festen Lösung mischbar. Ihre magnetischen Eigenschaften sind von ALDER<sup>1)</sup> untersucht worden. Das Zufügen von Kupfer senkt den Curiepunkt des Nickels, sodass eine Legierung mit 35% Ni-45% Cu den Curiepunkt schon ungefähr bei Zimmertemperatur hat. Zudem ist für Legierungen mit 50 bis 100% Nickel das magnetische Moment pro Nickelatom in der Nähe des Curiepunktes unabhängig von der Konzentration, d. h. im paramagnetischen Zustand besitzt also das Nickelatom dieser Legierungen die gleichen magnetischen Eigenschaften wie im reinen Nickel.

Die Messapparatur unterscheidet sich nur wenig von der vom Verfasser früher beschriebenen<sup>2)</sup>, und es sei für alle Details auf diese Arbeit verwiesen. Ein dünnes Glasrohr mit der fein pulverisierten Substanz hängt an einem Quarzfaden in einer Magnetspule und wird durch Wechselstrom von „rechteckiger“ Form magnetisiert. Die Frequenz wird auf Resonanz mit der Eigenfrequenz des Systems abgestimmt. Die Schwingungszeit beträgt

<sup>1)</sup> ALDER, Diss. Zürich.

<sup>2)</sup> Proc. Roy. Soc. A. **133**, 179, 1931.

etwa 2 Sekunden. Die Apparatur wird evakuiert, um die Dämpfung der Schwingung passend klein halten zu können. Die gyromagnetischen Impulse schaukeln dann die Amplitude zu einem messbaren Werte auf. Die Methode, welche erst eine fehlerfreie Messung des  $g$ -Faktors möglich macht, hat die Eigenschaft, dass alle experimentellen Fehler, welche von dem unvermeidlichen *horizontalen* Moment des Präparates herrühren, von selbst herausfallen. Weil der gyromagnetische Effekt nur durch eine *Änderung* des magnetischen Momentes verursacht wird, ist er  $90^\circ$  phasenverschoben gegenüber den genannten Störungen, und nur die gyromagnetischen Dralländerungen können die Amplitude vergrößern. Ein Kriterium für das Fehlen aller Störungen ist das Minimum der Resonanzamplitude. Ein weiteres Kriterium liefert die Tatsache, dass die Amplitude in Phase mit dem magnetisierenden Strom sein muss, sofern sie nur durch gyromagnetische Impulse entsteht. Die experimentelle Anordnung erlaubt diese Bedingung mit aller Schärfe einzustellen, sodass für paramagnetische Substanzen die Störeffekte automatisch mit Sicherheit unterdrückt sind.

Für schwach ferromagnetische Substanzen können jedoch zwei weitere Fehlerquellen auftreten, welche falsche Ergebnisse verursachen würden. Es sind das permanente (nicht mit dem Felde wechselnde) horizontale Momente und die Hysterese des Präparates, welche selbst in schwach magnetischen Legierungen wirksam ist. Diese Effekte können folgendermassen berücksichtigt werden. Der magnetisierende Strom habe die Form  $J = J_0 \sin \omega t$ . Das magnetische Moment der Probe hat dann wegen der Hysterese die Grösse  $M = M_0 \sin (\omega t + \delta)$ , wo  $\delta$  die Phasenverschiebung wegen der Hysterese bedeutet. Der gyromagnetische Effekt wird

$$U = \frac{1}{g} \frac{2 m}{e} \frac{d M}{d t},$$

sodass seine Zeitabhängigkeit durch  $\cos (\omega t + \delta)$  gegeben ist, d. h. er ist um  $(90^\circ + \delta)$  gegenüber dem Strom verschoben. Anders ausgedrückt hat der Strom eine Komponente in Phase mit dem gyromagnetischen Effekt und das permanente horizontale Moment der Probe verursacht infolge dieser Stromkomponente eine Störung, welche mit dem gyromagnetischen Effekt in Phase verläuft. Obwohl diese Wechselwirkung zwischen Strom und permanentem magnetischem Moment stattfindet, beeinflusst sie jetzt die gyromagnetische Amplitude, weil wegen der Hysteresis der gyromagnetische Stoss auf das Präparat gegenüber dem Magnetfeld

phasenverschoben ist; d. h. die Phasendifferenz zwischen gyromagnetischem Effekt und Störung ist jetzt nicht mehr  $90^\circ$ . Für Legierungen mit einer Massen-Suszeptibilität kleiner als  $200 \cdot 10^{-6}$ , d. h. wo  $\chi$  praktisch unabhängig von der Feldstärke ist, war der Hystereseeffekt nicht vorhanden, obschon ein permanentes Horizontalmoment gewöhnlich beobachtet werden konnte. Dieses horizontale Moment verunmöglicht die Messungen nicht, ausser wenn es gross ist und während des Experimentes ändert; eine Erscheinung, welche oft eintrat. Bei Legierungen mit höherer Konzentration ist trotz sorgfältiger Wärmebehandlung die Hysterese unvermeidlich. Sie ist eben eine nicht auszuschliessende Eigenschaft bei ferromagnetischen Körpern, und die Wechselwirkung mit dem permanenten Horizontalmoment liefert stets eine Störung, welche in Phase mit der gyromagnetischen Amplitude steht. Es erscheint mir zur Zeit unmöglich, diese Störung zu beseitigen. Ein Vergleich mit einem Eisenpulverstäbchen der gleichen Abmessungen zeigte, dass das Verhältnis von horizontalem permanentem Moment zur Längsintensität der Magnetisierung bei dieser schwach ferromagnetischen Legierung weit grösser als bei Eisen wird. Für stark ferromagnetische Substanzen, wo die Störung klein im Verhältnis zum gyromagnetischen Effekt ist, kann sie dadurch eliminiert werden, dass die Probe um eine vertikale Achse um  $180^\circ$  gedreht wird und die Messungen wiederholt werden<sup>1)</sup>. Bei der vorliegenden Substanz ist die Störung jedoch zu gross, um die oben genannte Eliminationsmethode zu gestatten, vielleicht infolge des unvermeidlichen Eisengehaltes. Es beträgt z. B. die Magnetisierung einer Cu-Ni-Legierung mit einer Suszeptibilität von  $250 \cdot 10^{-6}$  in einem Feld von 400 Gauss nur 0,1 per Masseneinheit, verglichen mit einer solchen von 200 für Eisen bei nur 100 Gauss. Die unvermeidliche Eisenverunreinigung ( $\sim 1/10\%$ ), selbst in reinsten Metallen, kann also ein magnetisches Moment derselben Grösse, wie das zu untersuchende ergeben<sup>2)</sup>. Schliesslich ist zudem das „permanente“ horizontale Moment während der Versuchsdauer gewöhnlich inkonstant und verunmöglicht daher jegliche Elimination der Störung. Dieses Verhalten schliesst Untersuchungen an Legierungen mit Suszeptibilitäten grösser als  $180 \cdot 10^{-6}$  aus, sodass die Experimente auf Legierungen unterhalb dieser Grenze beschränkt werden mussten. Selbst unter diesen Bedingungen erwiesen sich die meisten Mess-

<sup>1)</sup> Diese Methode war vom Verfasser erfolgreich in früheren Versuchen an ferromagnetischen Substanzen verwendet worden. Proc. Roy. Soc. A, **104**, 499, 1933.

<sup>2)</sup> In früheren Messungen an paramagnetischen Salzen verursachten minimale Eisenverunreinigungen äusserst unangenehme Fehlerquellen.

körper als unbrauchbar trotz grösster Vorsicht, um Verunreinigungen zu vermeiden. Ein sicherer Beweis für die Abwesenheit dieses Störeffektes ist die Linearität zwischen gemessener Amplitude und der Magnetisierungsintensität. Folglich wurden die Messungen einer Probe möglichst mit mindestens zwei oder mehr Werten des magnetisierenden Stromes ausgeführt. Die gyromagnetische Amplitude für diese Substanzen war nie grösser als 1 cm!).

	Masse $\times 10^3$ g	$J \times 10^6$	$\chi \times 10^6$	$\Theta$	$g_{\text{mittel}}$
1.	26,4	14,7	179	$-14^\circ$ C	1.90 2.00
2.	41,2	24,1	166	$-14^\circ$ C	1,85 1.70
3.	20,2	10,3	134	$-9^\circ$ C	2,1
4.	33,0	17,2	98	$-2^\circ$ C	1,8

Die Ergebnisse von drei verschiedenen Legierungen sind in der Tabelle zusammengestellt. Die Zusammensetzung ist in allen Fällen ungefähr entsprechend 56,5% Ni; die Änderung des Curiepunktes (4. Spalte) mit der Zusammensetzung beträgt  $50^\circ$  je 1% Änderung im Nickelgehalt. Die Legierungen wurden aus elektrolytischem Kupfer (Hilger) und reinem Nickel (Mond) hergestellt und nach dem Giessen bei  $800^\circ$  getempert, bis die Suszeptibilität konstant wurde. Das Metall wurde durch Schleifen an einem Carborundum-Rad pulverisiert und die Teilchen der Legierung magnetisch vom entstehenden Carborundstaub sortiert. (Carborund ist sehr schwach paramagnetisch.) Es wurde gefunden, dass wohl infolge Gitterdeformationen das Schleifen die Suszeptibilität in schwachen Feldern (d. h. 500 Gauss) vermindert, weshalb das Pulver im Hochvakuum bei  $500^\circ$  wieder getempert wurde, bis die Suszeptibilität einen konstanten Wert erreichte. Trotz sorgfältigen Entgasens war der Endwert der Suszeptibilität gewöhnlich höher als derjenige vor dem Pulverisieren, vermutlich wegen leichter Oberflächenoxydation der Kupferteilchen. Dadurch entsteht ein vergrösserter Nickelgehalt. (Eine 60% Ni-40% Cu-Legierung hat eine Massen-Suszeptibilität von  $20 \cdot 10^{-3}$  in einem Feld von 250 Gauss bei Zimmertemperatur.)

Sechs vollständige Messreihen bei verschiedenen Feldern bis 500 Gauss und logarithmischen Dekrementen von 0,003 bis 0,008 wurden durchgeführt und die Mittelwerte von „g“ für jede angegeben. Die ersten beiden Kolonnen sind die Massen und Trägheitsmomente der Versuchskörper, während Spalte 3 und 4

die Massen-Suszeptibilität und den paramagnetischen Curiepunkt bedeuten. Die doppelten  $g$ -Werte in den ersten beiden Zeilen weisen darauf hin, dass die Mess-Körper abgenommen und für die zweite Messung neu aufgehängt wurden. Die Abweichung vom Werte  $g = 2,0$  ist in Anbetracht der Schwierigkeit der Messungen als gering zu betrachten. Die Bahnmomente scheinen also einen sehr kleinen oder keinen Beitrag zum Paramagnetismus dieser Ferromagnetika zu liefern. Weil das Nickel-Ion in diesen Cu-Ni-Legierungen sich verhält wie im reinen Nickel (das Kupfer wirkt nur als Verdünnungsmittel), kann geschlossen werden, dass derselbe  $g$ -Faktor für reines Nickel oberhalb des Curiepunktes vorhanden ist.

Sowohl über wie unter dem Curiepunkt wird der Magnetismus also ausschliesslich durch den Elektronenspin und nicht durch Bahnmomente verursacht. Der Unterschied zwischen den Magnetonzahlen des Nickels über und unter dem Curiepunkt kann also nicht durch das Hinzutreten von Bahnmomenten oberhalb des Curiepunktes erklärt werden, wie dies oft versucht wurde.

Die Messungen wurden im Physikalischen Institut der Eidg. Technischen Hochschule, Zürich, ausgeführt, und ich möchte Herrn Prof. Scherrer meinen besten Dank für die Zurverfügungstellung von Hilfsmitteln und sein stetes Interesse im Verlauf der Arbeit aussprechen.

Zürich, Physikal. Institut der E. T. H.

---