

Paramagnetismus

Autor(en): **Stössel, Rudolf**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Helvetica Physica Acta**

Band (Jahr): **33 (1960)**

Heft [5]: **Supplementum 5. Beiträge zur Entwicklung der Physik**

PDF erstellt am: **24.04.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-513239>

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.

Paramagnetismus

Von RUDOLF STÖSSEL (Rorschach)

Untersuchungen über Magnetismus standen am Physikalischen Institut der ETH in den Jahren des Wirkens von Prof. PIERRE WEISS (1902–1919) stark im Vordergrund. Er war es, der die grossen Elektromagnete baute (1905), welche dem Institut heute noch wertvolle Dienste leisten. Die Tradition wurde durch E. BAUER und A. PICCARD [1] mit sorgfältigen Messungen der Suszeptibilität paramagnetischer Gase fortgeführt. Das Ansehen des Instituts auf diesem Gebiet wird illustriert durch den Erfolg einer «Magnetischen Vortragswoche» (im Jahre 1927, die von prominenten «Magnetikern», wie LANGEVIN und KAPITZA, besucht wurde.

1905 hat LANGEVIN seine Formel für die Temperaturabhängigkeit der Suszeptibilität paramagnetischer Gase gefunden:

$$\chi = N \left(-\alpha + \frac{\mu^2}{3 k T} \right). \quad (1)$$

Nach dieser Formel setzt sich die Suszeptibilität χ eines paramagnetischen Körpers aus einem diamagnetischen (negativen) und einem paramagnetischen (positiven) Glied zusammen.

Der diamagnetische Anteil ($-N\alpha$) lässt sich durch die Änderungen der Elektronenbewegungen in den Atomen infolge der beim Anlegen des Magnetfeldes auftretenden Induktionsspannungen erklären.

Der paramagnetische Anteil wird dadurch erklärt, dass man dem Atom ein permanentes magnetisches Moment μ zuschreibt. Unter der Einwirkung eines Magnetfeldes H und der gegenseitigen Stösse der Atome entsteht ein resultierendes Moment in der Richtung von H . Das mittlere, in Erscheinung tretende Moment pro Atom hängt von der Temperatur ab. Es ist durch den in Gl. (1) enthaltenen Ausdruck bestimmt:

$$\overline{\mu} = \frac{\mu^2 H}{3 k T} \quad (2)$$

Dieser paramagnetische Term entspricht der von CURIE empirisch gefundenen Tatsache, dass die paramagnetische Suszeptibilität umgekehrt proportional T ist. Deshalb lässt sich durch Messung der Suszeptibilität $\chi(T)$ das magnetische Moment μ der Atome ermitteln.

Derartige experimentelle Bestimmungen von μ sind in grosser Zahl von verschiedenen Autoren ausgeführt worden und zeigen Resultate, welche P. WEISS veranlassten, anzunehmen, das magnetische Moment μ sei immer ein ganzes Multiplum einer universellen elementaren Einheit, des sogenannten Weißschen Magnetons:

$$M_w = 1123,5 \text{ Gauss cm}^3/\text{Mol.}$$

In einem Verhandlungsbericht von 1911 lesen wir in einem Vortrag von PIERRE WEISS: «Ich beabsichtige, zu zeigen, wie man die absoluten Werte der magnetischen Momente von Molekülen bestimmen kann und dass alle diese Momente ein von mir Magneton genanntes gemeinsames Mass besitzen.» Diese Auffassung vertrat er auch noch an einem Vortrag im Jahre 1929 [2] an der ETH.

Seither hat sich aber vieles geändert. Das Bohrsche Atommodell mit seinen Quantenbedingungen trat den Siegeszug an und führte unter anderem zum Bohrschen Magneton, einem universellen magnetischen Elementarmoment, welches in einfacher Weise mit den Grössen e und m (Ladung und Masse des Elektrons) und mit dem Planckschen Wirkungsquantum h zusammenhängt:

$$\beta = \frac{e h}{4 \pi m} = 5585,2 \text{ Gauss cm}^3/\text{Mol.}$$

Dieses Magneton beträgt etwa das Fünffache des Weißschen Magnetons. Die Formel von LANGEVIN musste mit Rücksicht auf die Raumquantelung modifiziert werden. Wie PAULI [3] 1921 zeigte, ist der Faktor $1/3$ im positiven Glied durch einen komplizierten Ausdruck zu ersetzen, welcher vom verwendeten Modell des Moleküls abhängt.

Dann aber haben GOUDSMIT und UHLENBECK 1925 den Elektronenspin entdeckt, und 1926 ist die neue Quantenmechanik veröffentlicht worden. Sonderbarerweise hat sich nach dieser die alte Langevinsche Formel wieder als richtig erwiesen, samt dem Faktor $1/3$, weil in der Wellenmechanik die Mittelwertbildung über die diskreten Orientierungsmöglichkeiten unabhängig von der gewählten Quantisierungsrichtung und äquivalent dem klassischen Mittelwert über eine kontinuierliche Orientierungsverteilung ist (Theorem der spektroskopischen Stabilität). Der Ausdruck μ^2 in Gl. (2) ist dabei durch einen doppelten Mittelwert zu ersetzen, indem die zeitlichen Mittelwerte der magnetischen Momente von allen möglichen Zuständen des Atoms oder Moleküls noch unter Berücksichtigung des Boltzmann-Faktors zu mitteln sind.

Natürlich haben sich sogleich viele Forscher – oft mit gutem Erfolg – der neuen Lehre bedient. So hat 1928 VAN VLECK [4] eine quantenmechanische Berechnung der Suszeptibilität von paramagnetischen Gasen herausgebracht und gefunden, dass das magnetische Moment von Stick-

oxyd (NO) im Gegensatz zu Sauerstoff (O_2) nicht konstant ist, sondern sich mit der Temperatur verändert. Die scheinbare Zahl der Bohrschen Magnetonen Θ/β ist 0 für $T = 0$, wächst mit steigender Temperatur und nähert sich asymptotisch dem Werte 2. Das Verhalten weicht also vom Curieschen Gesetz ab, wonach $\chi = C/T$ und C eine Konstante sein sollte.

Nach VAN VLECK ist

$$\chi = \frac{N \Theta^2}{3 k T} \quad (3)$$

und Θ eine von T abhängige Grösse:

$$\Theta^2 = 4 \beta^2 \frac{1 - e^{-x} + x e^{-x}}{x + x e^{-x}} \quad \text{mit} \quad x = \frac{h \Delta v}{k T} = \frac{173,2}{T}. \quad (4)$$

An dieser Stelle griff P. SCHERRER, der sich sonst in jener Zeit hauptsächlich mit der Röntgenphysik beschäftigte, das Thema auf und führte die Tradition der «magnetischen Forschung» im Physikalischen Institut der ETH etwas fort. Durch die Theorie von VAN VLECK war nämlich die Möglichkeit gegeben, durch eine magnetische Messung eine quantenmechanische Rechnung experimentell zu verifizieren und damit einen Beitrag zur Bestätigung der damals noch neuen Quantenmechanik zu geben. Dies war offenbar der Anreiz, der SCHERRER dazu führte, die zwei im folgenden beschriebenen experimentellen Arbeiten an paramagnetischen Gasen aufzunehmen. Sein Institut war besonders geeignet dazu, denn es verfügte aus dem Erbe von P. WEISS über den erwähnten grossen Magneten. Für jene Zeit war dieser ein ansehnliches Instrument, konnte er doch bei einem Strom von 60 Ampère 200 000 AW aufbringen und einer Kraft von 2000 kg zwischen den Polen standhalten.

So baute SCHERRER zusammen mit J. AHARONI [5] eine Apparatur auf, welche mit einer kleinen Präzisionswaage den Auftrieb eines Quarzkörpers zu ermitteln gestattete, der zwischen den Polen des Magneten in einem paramagnetischen Gase (NO oder O_2) hing. Wenn nun der Magnet eingeschaltet wurde, verdichtete sich das paramagnetische Gas zwischen den Polen und verdrängte den Quarzkörper. Die Methode stellte eigentlich einen Ausbau einer alten Idee von FARADAY dar und zeigte in experimenteller Hinsicht eine Reihe schöner Feinheiten. Nachher hat der Verfasser in Zusammenarbeit mit SCHERRER [6] die Apparatur weiter entwickelt und die Messungen bis zu Temperaturen von $T = 135,5^\circ \text{ K}$, d. h. bis nahe an den Siedepunkt von NO vorgetrieben.

Ergänzende Messungen bei höheren Temperaturen wurden ungefähr zur gleichen Zeit von BITTER [7] ausgeführt. Bei allen drei Arbeiten weichen die Messresultate sehr wenig von den theoretisch erwarteten Grössen ab. Somit bildete das Experiment tatsächlich eine willkommene Stütze der neuen Quantenmechanik.

Wir hatten zum Abschluss die Freude, dass P. WEISS, den wir von unserem Vorhaben unterrichtet hatten, gegen Ende der Messungen eilends hergereist kam, sich von den Resultaten überzeugte und damit nach Norwegen weiterfuhr, wo er an einem Kongress darüber berichtete, noch ehe die Veröffentlichung geschah¹⁾.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] E. BAUER und A. PICCARD, J. Phys. *1*, 97 (1920).
- [2] P. WEISS, Helv. phys. Acta *2*, 283 (1929).
- [3] W. PAULI, Z. Phys. *6*, 319 (1921).
- [4] J. H. VAN VLECK, Phys. Rev. *31*, 587 (1928).
- [5] J. AHARONI und P. SCHERRER, Z. Phys. *58*, 749 (1929).
- [6] R. STÖSSEL und P. SCHERRER, Ann. Phys. *10*, 393 (1931).
- [7] BITTER, Proc. nat. Acad. Wash. *15*, 638 (1929).
- [8] E. LIPS, Helv. phys. Acta *7*, 537 (1934).
- [9] E. LIPS, Helv. phys. Acta *8*, 247 (1935).
- [10] F. GALAVICS, Helv. phys. Acta *12*, 581 (1939).

¹⁾ Die paramagnetischen Untersuchungen fanden später eine Fortsetzung. LIPS [8, 9] studierte die Suszeptibilität von zweiwertigen Chromsalzen und kurz darauf in Fortsetzung der Arbeit von STÖSSEL die Temperaturabhängigkeit des Paramagnetismus von festem Stickoxyd (NO) im Temperaturbereich 63° bis 90° K. Im Jahre 1939 folgten Messungen des gyromagnetischen Effekts an Legierungen Mangan-Antimon und Eisen-Selen durch GALAVICS [10].