

## Ein Beitrag zum Antiferromagnetismus des kubisch flächenzentrierten Eisengitters

RUDOLF KOHLHAAS, WOLF DIETER WEISS  
und HEINZ FABRITIUS

Institut für Theoretische Physik der Universität Köln,  
Abteilung für Metallphysik, und Thyssen-Röhrenwerke,  
Werk Düsseldorf, Metallurgische Abteilung  
(Z. Naturforsch. 21 a, 1514—1515 [1966]; eingeg. am 8. August 1966)

Das Temperaturverhalten der magnetischen Suszeptibilität von ferro- und antiferromagnetischen Stoffen oberhalb ihrer magnetischen Umwandlungstemperatur wird auch heute noch häufig mit Hilfe der Molekularfeldtheorie als erster Näherung in der Theorie der lokalisierten Spindmomente durch das CURIE-WEISS-Gesetz

$$\chi = C / (T - T_C) \quad (1)$$

beschrieben und gedeutet.  $\chi$  ist dabei die spezifische magnetische Suszeptibilität,  $C$  die CURIE-Konstante aus deren Größe man das mittlere magnetische Moment an jedem Gitterplatz bestimmen kann,  $T$  die absolute Temperatur und  $T_C$  eine charakteristische Temperatur, die bei ferromagnetischen Stoffen positiv und mit der paramagnetischen CURIE-Temperatur identisch ist; bei antiferromagnetischen Stoffen besitzt  $T_C$  einen negativen Wert. Bei starker Gültigkeit des CURIE-WEISS-Gesetzes müßte demnach der Temperaturverlauf des Kehrwertes der magnetischen Umwandlungstemperatur eine strenge Gerade ergeben. Bei Eisen, Kobalt und Nickel sowie zahlreichen Legierungen dieser Metalle ergeben sich bei dieser Auftragung jedoch erheblich gekrümmte Kurven.

Dieser Sachverhalt ist besonders beim k.f.z.  $\gamma$ -Eisen offensichtlich. Die mutmaßliche magnetische Umwandlung muß bei Temperaturen liegen, bei denen das k.f.z. Gitter nicht mehr stabil ist, so daß eine direkte Messung nicht möglich ist. Will man also die Art der magnetischen Spinordnung des k.f.z. Eisengitters erschließen, so ist man auf Extrapolationen über geeignete Legierungsserien angewiesen, bei denen die k.f.z. Struktur auch bei tiefen Temperaturen existiert. Wendet man nun trotz obiger Einwände das CURIE-WEISS-Gesetz auf das reine  $\gamma$ -Eisen an, so erhält man stark negative Werte für  $T_C$ , wie u. a. KOHLHAAS<sup>1</sup> ausgeführt hat; dies deutet auf eine antiferromagnetische Spinordnung bei tiefen Temperaturen hin.

Stärkere Beweiskraft hat bei der Ausdeutung der Temperaturabhängigkeit der magnetischen Suszeptibilität eine andere Auswertemethode, die von KOCH und ARROTT<sup>2</sup> sowie von DANIELIAN<sup>3</sup> angegeben wurde. Diese Methode basiert auf der Voraussetzung, daß die Molekularfeldtheorie als Näherung in der Theorie der lokalisierten Spindmomente zur Beschreibung des magnetischen Verhaltens oberhalb des CURIE-Punktes nicht ausreicht. Ein besserer Ausdruck für den Temperaturgang der magnetischen Suszeptibilität oberhalb der

magnetischen Umwandlung stellt folgende unendliche Reihe dar:

$$1/\chi = \sum_{n=1}^{\infty} (T/C) (1 + \lambda_n/T^n). \quad (2)$$

Die  $\lambda_n$  sind hierbei noch Funktionen der Gitterstruktur, des magnetischen Moments an jedem Gitterplatz und der Art der Wechselwirkung zwischen diesen Momenten. Für  $n=1$  folgt aus Gl. (2) das CURIE-WEISS-Gesetz.

Ausgehend von Gl. (2) empfehlen die oben genannten Autoren,  $1/\chi T$  gegenüber  $1/T$  graphisch aufzutragen. Bei dieser Auftragung ergibt sich die zur Bestimmung des magnetischen Moments wichtige Konstante  $1/C$  als Abszissenabschnitt.

Zusammen mit theoretischen Rechnungen von DANIELIAN<sup>3</sup>, die für ein kubisch flächenzentriertes Gitter mit Spin 1/2 und verschiedener Art von HEISENBERG-Wechselwirkung ausgeführt wurden, ist diese Auftragung ein besseres Hilfsmittel zur Bestimmung der in k.f.z. Stoffen herrschenden Spinwechselwirkung. Abb. 1 a zeigt das Schema der theoretisch berechneten Kurven nach DANIELIAN<sup>3</sup> in der  $1/\chi T - 1/T$ -Auftragung.

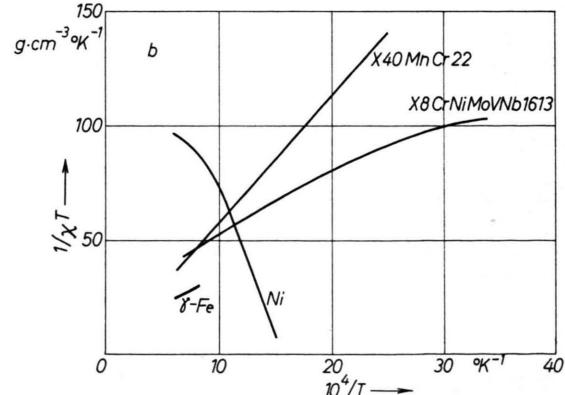
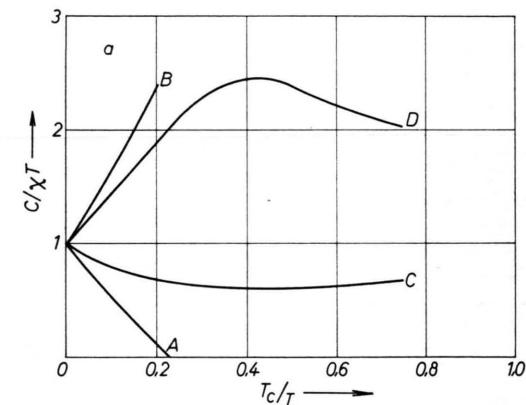


Abb. 1.  $1/\chi T - 1/T$  Auftragung bei verschiedener Art von Spin-Wechselwirkung. a) Theoretische Kurven nach DANIELIAN<sup>3</sup>, b) Experimentelle Kurven. (Genaue Erläuterung im Text.)

<sup>1</sup> R. KOHLHAAS, Arch. Eisenhüttenwes. 36, 437 [1965].

<sup>2</sup> F. B. KOCH u. A. ARROTT, Bull. Amer. Phys. Soc. 7, 263 [1962].  
<sup>3</sup> A. DANIELIAN, Proc. Phys. Soc. London 80, 981 [1962].



Hierbei bedeutet *Kurve A* reine ferromagnetische Wechselwirkung; *Kurve B* reine antiferromagnetische Wechselwirkung; *Kurve C* ferromagnetische Wechselwirkung zwischen den nächsten Nachbarn und antiferromagnetische zwischen übernächsten; *Kurve D* antiferromagnetische Wechselwirkung zwischen nächsten Nachbarn und ferromagnetische zwischen übernächsten Nachbarn. Aus den Kurven A und B geht somit deutlich hervor, daß bei ferromagnetischer Wechselwirkung eine positive und bei antiferromagnetischer Wechselwirkung eine negative Steigung auftritt. Bei den Kurven C und D zeigt das Vorzeichen der Steigung an, welche Art der Wechselwirkung in einem bestimmten Temperaturbereich vorherrscht.

Die Nutzanwendung des eben Dargestellten auf eigene Messungen an reinem Eisen, Nickel und zwei austenitischen Eisenwerkstoffen zeigt Abb. 1 b. Hier

$T$ in °C	950	1000	1040	1100
$\chi$ in $10^{-6} \text{ cm}^3/\text{g}$	26,8	26,6	26,4	26,0
$T$ in °C	1200	1300	1350	
$\chi$ in $10^{-6} \text{ cm}^3/\text{g}$	25,4	24,7	24,4	

Tab. 1. Massensuszeptibilität  $\chi$  eines reinen Eisens (0,009% C, 0,001% Si, 0,0029% O, 0,002% N, 0,003% P, 0,004% S, 0,002% Al) in der  $\gamma$ -Phase nach KOHLHAAS<sup>1</sup> bei verschiedenen Temperaturen  $T$ .

<sup>4</sup> E. I. KONDORSKII u. V. L. SEDOV, J. Appl. Phys. Suppl. 31, 331 [1960].

sind nach dem oben geschilderten Verfahren die Temperaturabhängigkeiten der Suszeptibilität von Nickel und  $\gamma$ -Eisen nach KOHLHAAS<sup>1</sup>, eines Manganstahls X40MnCr22 (21,75% Mn, 3,55% Cr) und eines Chrom-Nickel-Stahls X8CrNiMoVNb 1613 (16,1% Cr, 14,2% Ni, etwa 5% sonstige) aufgetragen. Für das  $\gamma$ -Eisen werden in Tab. 1 einige Zahlenwerte mitgeteilt.

Nickel ist ferromagnetisch mit einem CURIE-Punkt bei 628 °K. Wie zu erwarten ist, zeigt seine Suszeptibilität in der DANIELIAN-Auftragung einen fallenden Verlauf. Der Manganstahl ist antiferromagnetisch mit einem ausgeprägten NÉEL-Punkt bei Raumtemperatur. Hier zeigt die DANIELIAN-Auftragung den nach Abb. 1 a zu erwartenden steigenden Verlauf. Der Chrom-Nickel-Stahl weist in dem Diagramm steigende Tendenz auf. Der hieraus zu schließende Antiferromagnetismus bestätigt Messungen von KONDORSKII und SEDOV<sup>4</sup>, die an einer Cr-Ni-Legierung ähnlicher Zusammensetzung einen NÉEL-Punkt bei etwa 38 °K mittels Suszeptibilitätsmessungen gefunden hatten. Alle diese Ergebnisse beweisen die Gültigkeit der in Abb. 1 a gezeigten theoretischen Untersuchungen von DANIELIAN. Es ergibt sich also fast zwingend aus dem steigenden Verlauf der Kurve für das  $\gamma$ -Eisen, daß dieses bei tiefen Temperaturen, seine Existenz vorausgesetzt, eine antiferromagnetische Spinanordnung besitzt. Extrapoliert man gegen  $1/T = 0$ , so ergibt sich aus der so erhaltenen CURIE-Konstanten ein  $\mu_{\text{eff}}$  von etwa 6,6 Bohrschen Magnetonen.

Herrn Prof. Dr. H. LANGE und Herrn Dir. Dr. E. BAERLECKEN danken wir für die Förderung dieser Untersuchung.

## Der Einfluß eines Magnetfeldes auf die Verbreiterung der Wasserstoff-Linien \*

NGUYEN-HOE, H. W. DRAWIN und L. HERMAN

Groupe de Recherche sur la Fusion,  
Association EURATOM-CEA,  
Centre d'Etudes Nucléaires,  
Fontenay-aux-Roses/France

(Z. Naturforsch. 21 a, 1515–1518 [1966]; eingeg. am 10. Juni 1966)

The profiles of the hydrogen lines have been calculated taking into account the intermolecular electric field, the electronic collisions, and an exterior homogenous magnetic field in which the plasma is imbedded. We considered electron densities  $N$  within the range  $10^{15} \leq N \leq 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  and magnetic field strengths  $H \leq 1.2 \cdot 10^5$  Gauss. For very small magnetic fields our calculated line profiles coincide with the pure STARK profiles recently calculated by GRIEM, KOLB, and SHEN. With increasing magnetic fields, important deviations appear. The typical behaviour of the profiles as function of the magnetic field strength is shown. The calculated profiles have been compared with measured line profiles of  $H_a$ . The comparison of the theoretical profiles with the experimental ones shows a satisfying agreement.

\* Stark gekürzte Veröffentlichung der Rapports EUR-CEA-FC-367 und CEA-R-3057, März 1966.

In allen Arbeiten, die sich bisher mit dem Studium der aus Plasmen abgestrahlten Spektrallinien befaßten, wird das Plasma stets als frei, d. h. keinen äußeren Einflüssen unterworfen betrachtet. Wird das Plasma jedoch einem starken äußeren Magnetfeld ausgesetzt, so verlieren einige für das freie Plasma gemachte Voraussetzungen ihre Gültigkeit, und die unter dem Einfluß eines Magnetfeldes aus einem Plasma abgestrahlten Linienprofile weichen von denen ohne Magnetfeld ab. Die in Gegenwart eines Magnetfelds auftretenden Probleme bei der Berechnung der Profile sind bereits in einer früheren Arbeit diskutiert worden<sup>1</sup>, wobei ebenfalls darauf hingewiesen wurde, daß erweiterte Berechnungen der Linienprofile nötig sind, wenn man durch einen Vergleich von experimentellen mit theoretischen Profilen die Elektronendichte  $N$  eines in einem starken Magnetfeld befindlichen Plasmas mit genügender Genauigkeit erhalten will.

In der hier vorliegenden Arbeit wird kurz über die Berechnung der Profile der Wasserstoff-Linien berichtet, die von einem Plasma emittiert werden, das sich in einem homogenen Magnetfeld befindet, dessen Stärke

<sup>1</sup> H. W. DRAWIN, Report EUR-CEA-FC-101, Fontenay-aux-Roses, Mai 1961.