

Zum paramagnetischen Verhalten von Palladium-Eisen- und Palladium-Eisen-Wasserstoff-Legierungen

H. FRIESKE und M. MAHNIG *

Institut für Physikalische Chemie der Universität Münster

(Z. Naturforsch. **24 a**, 1801—1806 [1969]; eingegangen am 31. August 1969)

On the Paramagnetic Behavior of Palladium-Iron and Palladium-Iron-Hydrogen Alloys

An evaluation for the paramagnetic susceptibilities of Pd/Fe and Pd/Fe/H alloys is proposed which accounts for the filling of the bands by electrons from the iron atoms. The susceptibilities are split into a "band" and an "iron" contribution, the latter of which exhibits Curie-Weiss behavior. Reevaluation of Gerstenberg's data yields a magnetic moment of $5.9 \mu_B$ per iron atom.

For hydrogenated Pd/Fe alloys the coupling constant characteristic of the "iron" contribution to the susceptibility could be split into two contributions as well, of which the "d-band" contribution depends only on the electron concentration; the limiting values for high electron concentrations are proportional to the iron content of the alloy.

Both separations indicate again that every Fe atom donates 3 electrons into the delocalized states of the alloy.

The magnetic moment found here, however, is not in agreement with results derived from neutron diffraction experiments.

Das thermodynamische Verhalten der Legierungen von Pd mit Metallen¹ sowie mit Wasserstoff²⁻⁴ konnte gedeutet werden unter der Annahme, daß diese Legierungspartner Elektronen zur Besetzung von Zuständen im 4d- und 5s-Band der Legierung zur Verfügung stellen. Die dadurch bewirkte Verschiebung der Fermi-Grenze liefert einen Beitrag zum chemischen Potential der gelösten Stoffe. Mit dieser Vorstellung stimmt überein, daß die von den etwa 0,5 Elektronenlücken im 4d-Band herrührende, paramagnetische Suszeptibilität des reinen Pd durch Zusatz von Metallen wie Ag, Al, Sn, Ti, Mo⁵⁻⁷ vermindert wird in dem Maße, wie die Lücken im d-Band aufgefüllt werden. Analog verhalten sich die auf Zwischengitterplätzen eingebauten Zusätze Wasserstoff^{5, 8, 9} und Bor¹⁰. In einer Untersuchung der Isomerieverschiebung der Mössbauer-Absorption von Fe und Sn in Pd-Legierungen konnte die Verschiebung der Fermi-Grenze durch zugesetzten Wasserstoff ebenfalls nachgewiesen werden¹¹. Die erwähnten elektronischen Eigenschaften (Elektronen-

term des chemischen Potentials, paramagnetische Suszeptibilität, Isomerieverschiebung) lassen sich jeweils einheitlich darstellen als Funktion einer „Elektronenkonzentration“ n_e ¹, welche definiert ist als Zahl der zusätzlich eingebrachten Elektronen je Metallatom:

$$n_e = \frac{z_i N_i + z_j N_j}{N_i + N_{Pd}} = z_i x_i + z_j n_j$$

Hierin bedeuten N_k die Anzahl der Atome der Komponente k in der Mischung, z_k ihre Wertigkeit (z. B. $z_{Ag} = 1$, $z_H = 1$, $z_B = 3$); x_i ist der Molenbruch von Substitutionskomponenten i (Metallen), n_j der Besetzungsgrad der Oktaederlücken mit Zwischengitterkomponenten j (Wasserstoff bzw. Bor).

1. Frühere Untersuchungen zum System Pd/Fe/H

Das magnetische Verhalten der Pd-Legierungen mit Fe, Co und Mn steht in gewissem Gegensatz zu dem der eingangs erwähnten Systeme, da diese Zusätze die Suszeptibilität erhöhen⁷; schon bei Ge-

Sonderdruckanforderungen erbeten an H. FRIESKE, Institut für Physikalische Chemie der Universität Münster, D-4400 Münster (Westf.), Schloßplatz 4.

* Zur Zeit University of Minnesota, School of Mineral and Metallurgical Engineering, Minneapolis, Minn. 55455, U.S.A.

¹ H. BRODOWSKY, Z. Naturforsch. **22 a**, 130 [1967].

² H. BRODOWSKY, Z. Phys. Chem. Frankfurt **44**, 129 [1965].

³ H. BRODOWSKY u. E. POESCHEL, Z. Phys. Chem. Frankfurt **44**, 143 [1965]. — E. POESCHEL, Dissertation, Münster 1964.

⁴ H. BRODOWSKY u. E. WICKE, Engelhard Ind. Tech. Bull. **7**, 41 [1966].

⁵ H. HUSEMANN, Dissertation, Münster 1968.

⁶ J. WUCHER, Ann. Phys. Paris **7**, 317 [1952].

⁷ D. GERSTENBERG, Ann. Phys. Leipzig (7) **2**, 236 [1958].

⁸ B. SVENSSON, Ann. Phys. Leipzig (5) **14**, 698 [1932].

⁹ P. BRILL u. J. VOITLÄNDER, Z. Naturforsch. **24 a**, 1 [1969].

¹⁰ H. HUSEMANN u. H. BRODOWSKY, Z. Naturforsch. **23 a**, 1693 [1968].

¹¹ M. MAHNIG u. E. WICKE, Z. Naturforsch. **24 a**, 1258 [1969]. — M. MAHNIG, Dissertation, Münster 1968.



Dieses Werk wurde im Jahr 2013 vom Verlag Zeitschrift für Naturforschung in Zusammenarbeit mit der Max-Planck-Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften e.V. digitalisiert und unter folgender Lizenz veröffentlicht: Creative Commons Namensnennung-Keine Bearbeitung 3.0 Deutschland Lizenz.

Zum 01.01.2015 ist eine Anpassung der Lizenzbedingungen (Entfall der Creative Commons Lizenzbedingung „Keine Bearbeitung“) beabsichtigt, um eine Nachnutzung auch im Rahmen zukünftiger wissenschaftlicher Nutzungsformen zu ermöglichen.

This work has been digitalized and published in 2013 by Verlag Zeitschrift für Naturforschung in cooperation with the Max Planck Society for the Advancement of Science under a Creative Commons Attribution-NoDerivs 3.0 Germany License.

On 01.01.2015 it is planned to change the License Conditions (the removal of the Creative Commons License condition "no derivative works"). This is to allow reuse in the area of future scientific usage.

halten von weniger als 1% Fe (oder Co) werden die Legierungen bei tiefen Temperaturen ferromagnetisch. Diese Tatsache läßt darauf schließen, daß die Pd-Matrix an der magnetischen Kopplung beteiligt ist.

BURGER, VOGT und WUCHER¹² sättigten Pd/Fe-Legierungen von 1, 3, 5 und 7% Fe mit Wasserstoff und nahmen an, daß auf diese Weise der vom Pd stammende Beitrag zum Paramagnetismus der Legierung unterdrückt wird. Die Suszeptibilität dieser Proben befolgt ein Curie-Weiss'sches Gesetz

$$\chi = N \mu^2 / [3 k (T - \Theta)]. \quad (1)$$

Hierin bedeuten μ das magnetische Moment und N die Anzahl der Eisen-Atome. Bezieht man χ auf 1 Mol Legierung, so ist $N = N_L \cdot x_{Fe}$ zu setzen, bezieht man auf ein Mol Eisen, so ist $N = N_L$.

Aus der Steigung der χ^{-1}/T -Geraden konnte ein magnetisches Moment von $5,9 \mu_B$ pro Fe-Atom abgeleitet werden, was genau dem für Fe^{3+} mit $S = 5/2$ erwarteten Wert entspricht. Die „Wertigkeit“ drei fanden die genannten Autoren auch in den maximal erreichten H-Gehalten bestätigt. Mössbauer-Messungen¹¹ sowie gegenwärtig durchgeführte Untersuchungen der H_2 -Absorption in Pd/Fe-Legierungen sind mit diesem Wert in Einklang.

In Pd/Fe-Legierungen ohne Wasserstoff kann die gemessene Suszeptibilität nur mit Hilfe eines Modells in die Anteile der Komponenten aufgespalten werden. GERSTENBERG⁷ versuchte dies, ohne die Bandauffüllung durch Elektronen des Fe zu berücksichtigen, und erhielt magnetische Momente zwischen $4,94$ und $5,26 \mu_B$ pro Fe-Atom (siehe Tab. 2), was mit dem von BURGER und Mitarbeitern angegebenen Wert nur schlecht übereinstimmt.

2. Auswertung der Ergebnisse für Pd/Fe-Legierungen

Voranstehend wurde eine Reihe von Befunden aufgeführt, die darauf schließen lassen, daß jedes Fe-Atom drei Elektronen in die Bänder der Legierung einbringt. Es soll nun ein Verfahren zur Auswertung der am System Pd/Fe gemessenen paramagnetischen Suszeptibilitäten angegeben werden, welches diese Tatsachen berücksichtigt.

Für alle homogenen Pd-Legierungen mit solchen Legierungspartnern, die keine eigenen magnetischen Momente einbringen, lassen sich die gemessenen Suszeptibilitäten mit guter Näherung einheitlich als Funktion der eingangs definierten Elektronenkonzentration darstellen^{5, 7}. Sinngemäß kann man beim System Pd/Fe versuchen, die Suszeptibilität darzustellen als additiv zusammengesetzt aus einem von der Elektronenkonzentration abhängenden „Bandanteil“ χ_B (Wertigkeit $z_{Fe} = 3$) und einer „Zusatzsuszeptibilität“ χ_{Fe} , die den lokalisierten Momenten der Eisenionen zuzuschreiben ist:

$$\chi = \chi_B(n_e, T) + \chi_{Fe}. \quad (2)$$

Mit dieser Vorstellung wurden die von GERSTENBERG⁷ erhaltenen Meßdaten neu ausgewertet. Der Bandanteil der Suszeptibilität wurde für verschiedene Temperaturen interpoliert aus Messungen an Pd/Ag-Legierungen^{5, 6, 13, 14}; Tab. 1 gibt einen Auszug aus diesen Daten wieder, deren Genauigkeit auf $\pm 2\%$ geschätzt wird.

T [°K]	$\chi_{Pd/Ag}(x_{Ag}) = \chi_B(n_e)$ $x_{Ag}=n_e=0$	0,03	0,09	0,15	0,21	Korrekturfaktor
293	597	503	388	303	232	0,973
400	493	429	342	273	211	0,945
500	420	371	306	247	192	0,933
600	363	326	273	223	174	0,939
700	321	292	245	202	158	0,935
800	288	265	223	184	145	0,924
900	261	242	205	169	134	0,920
1000	239	222	189	157	124	0,916

Tab. 1. Suszeptibilitäten von Pd/Ag-Legierungen, interpoliert nach^{5, 6, 13, 14}.

Die von GERSTENBERG für reines Pd ($n_e = 0$) angegebenen Werte liegen um 5 bis 8% niedriger als die in Tab. 1 aufgeführten. Um eine konsistente Auswertung zu ermöglichen, wurden die Werte aus Tab. 1 mit einem solchen (nur von der Temperatur abhängigen) Faktor multipliziert, daß die Zahlen für reines Pd jeweils mit dem von GERSTENBERG angegebenen Wert übereinstimmten. Dieser Korrekturfaktor ist in der letzten Spalte von Tab. 1 angegeben. Die so ermittelten, den magnetischen Momenten des Eisens zuzuschreibenden Zusatzsuszeptibilitäten sind in Abb. 1 reziprok gegen die Temperatur aufgetragen. Die Werte werden außer in der Nähe der Curie-Punkte gut durch Curie-Weiss'sche Geraden

¹² J. P. BURGER, E. VOGT u. J. WUCHER, C. R. Acad. Sci. Paris **249**, 1480 [1959].

¹³ E. KRONQVIST, Arkiv Fysik **10**, 49 [1955].

¹⁴ E. VOGT, E. OEHLER u. W. TREUTMANN, Ann. Phys. Leipzig (7) **18**, 168 [1966].

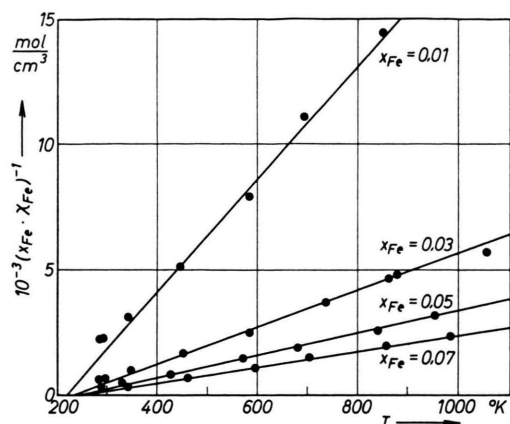


Abb. 1. Reziproke Zusatzsuszeptibilität („Eisenanteil“) für verschiedene Eisengehalte (nach Meßwerten aus ⁷).

wiedergegeben. Tabelle 2 stellt die aus den Kurven entnommenen Parameter denen gegenüber, die von GERSTENBERG selbst angegeben wurden. In guter Übereinstimmung mit den Befunden von BURGER,

x_{Fe}	diese Arbeit		GERSTENBERG ⁷	
	$\mu_{Fe} [\mu_B]$	$\Theta [^\circ K]$	μ_{Fe}	Θ
0,01	5,93	220	4,94	238
0,03	5,92	235	5,26	253
0,05	5,94	250	5,21	273
0,07	5,97	260	5,08	288

Tab. 2. Curie-Weiss-Parameter für den „Eisenanteil“ der Suszeptibilität in Pd/Fe-Legierungen.

VOGT und WUCHER ¹² an Wasserstoff-gesättigten Legierungen ergibt sich jetzt auch hier für das Eisen ein magnetisches Moment von $5,9 \mu_B$; auch streuen die Werte weniger als bei GERSTENBERGS Auswertung.

3. Pd/Fe/H-Legierungen

3.1. Meßergebnisse

Die eigenen Untersuchungen wurden durchgeführt an Pd-Legierungen mit 9% Fe (bezogen von der Firma Degussa) sowie mit 5 und 3% Fe (im Induktionsofen unter Argon erschmolzen). Die Suszeptibilitäten wurden nach der Faraday-Methode gemessen an einem Magneten V 3700 (Varian) mit Gradienten-Polschuhen, kombiniert mit einer Mikrowaage (Sartorius Mod. 1801). Während der Messung befanden sich die Proben in Glasgefäßen unter konstantem Wasserstoff-Druck; die Einzelheiten der experimentellen Anordnung und Versuchsdurchführung entsprechen weitgehend den in ⁵ beschriebenen und können der Diplomarbeit ¹⁵ entnommen werden.

Die Abbildungen 2 bis 4 zeigen die im zugänglichen Temperatur- und Druckbereich erhaltenen Meßwerte (korrigiert um den Diamagnetismus der Atomrümpfe). Die von BURGER ¹⁶ für Raumtem-

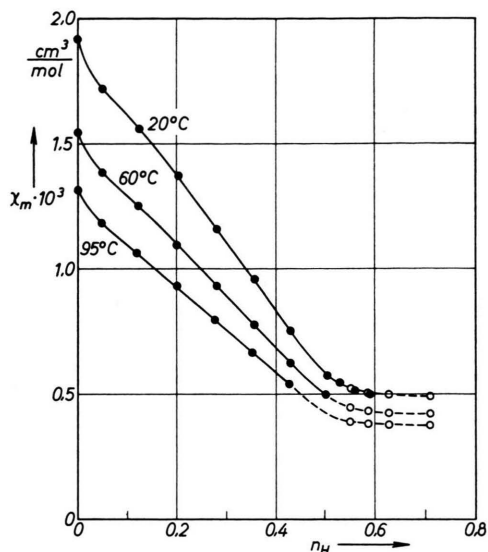


Abb. 2. Paramagnetische Suszeptibilität als Funktion des Wasserstoff-Gehaltes, 3% Fe. o Meßpunkte von BURGER, VOGT und WUCHER ¹².

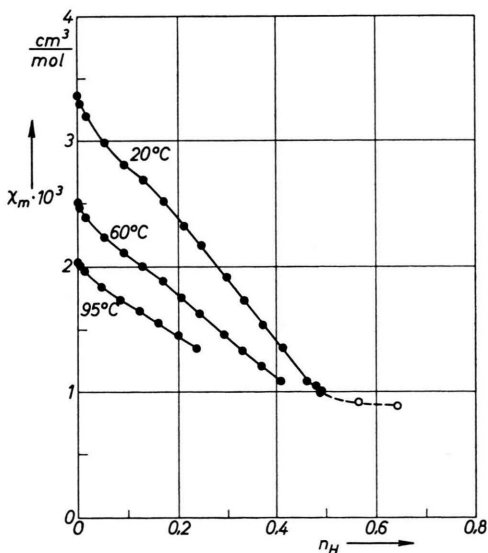


Abb. 3. Paramagnetische Suszeptibilität als Funktion des Wasserstoff-Gehaltes, 5% Fe. o Meßpunkte nach ¹².

¹⁵ H. FRIESKE, Diplomarbeit, Münster 1969.

¹⁶ J. P. BURGER, J. Phys. Radium **23**, 530 [1962].

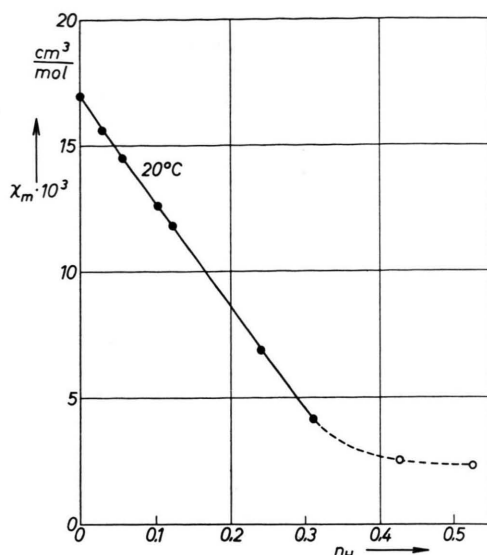


Abb. 4. Paramagnetische Suszeptibilität als Funktion des Wasserstoff-Gehaltes, 9% Fe. \circ Meßpunkte nach den Ergebnissen von ¹² extrapoliert.

peratur angegebenen Werte stimmen mit diesen Daten überein. Die in die Abbildungen eingetragenen offenen Kreise kennzeichnen Meßpunkte von BURGER, VOGT und WUCHER ¹² bzw. aus solchen extrapolierte Werte (9% Fe); sie schließen sich gut an die eigenen Messungen an.

Wie die Diagramme zeigen, erniedrigt Wasserstoff-Zusatz die Suszeptibilität der Legierungen beträchtlich. Zunächst fallen die Suszeptibilitäten steil und mit steigendem Wasserstoff-Gehalt praktisch linear ab; oberhalb von $n_e \approx 0,6$ werden sie durch weitere Wasserstoff-Zugabe nur noch geringfügig vermindert.

3.2. Auswertung

Das in Abschnitt 2 erläuterte Auswerteverfahren wurde auch auf die Messungen an Wasserstoff-haltigen Legierungen angewendet. Leider war der zugängliche Temperaturbereich nicht groß genug, um aus einer Auftragung analog Abb. 1 das magnetische Moment des Eisens in der Legierung ermitteln zu können. (Die Messungen werden zur Zeit mit einer hierfür geeigneten neuen Anordnung auf einen größeren Temperatur- und Druckbereich ausgedehnt.) Ferner lagen die Temperaturen noch zu nahe an den Curie-Punkten, wo sich Abweichungen vom Curie-Weiss-Verhalten bemerkbar machen, wie sie in Abb. 1 bei niedrigen Temperaturen erkennbar sind und in Abb. 5 noch einmal skizziert wurden. Aus

diesem Grunde kann aus den vorliegenden Messungen die Konstanz des magnetischen Momentes des Eisens über den gesamten Bereich der Elektronenkonzentration nicht hergeleitet werden. Da jedoch sowohl bei sehr hohen ¹² als auch bei sehr niedrigen Elektronenkonzentrationen (Abschnitt 2) übereinstimmend $5,9 \mu_B$ gefunden wurde, kann dieser Wert auch für den Zwischenbereich als gültig angesehen werden. Hiermit ist die Steigung der χ^{-1}/T -Geraden bekannt, und man kann aus den Meßwerten die Achsenabschnitte „paramagnetische Curie-Temperatur“ Θ_p bzw. „Kopplungskonstante“ K gewinnen (Abb. 5), in denen sich die Kopplung zwischen den magnetischen Momenten bemerkbar macht. Abbildung 6 zeigt die jeweils auf 1 Mol Fe bezogenen Kopplungskonstanten, wie sie aus den bei 20 °C

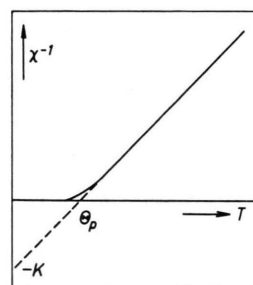


Abb. 5. Reziproker Eisenanteil der Suszeptibilität von Pd/Fe/H-Legierungen (schematisch).

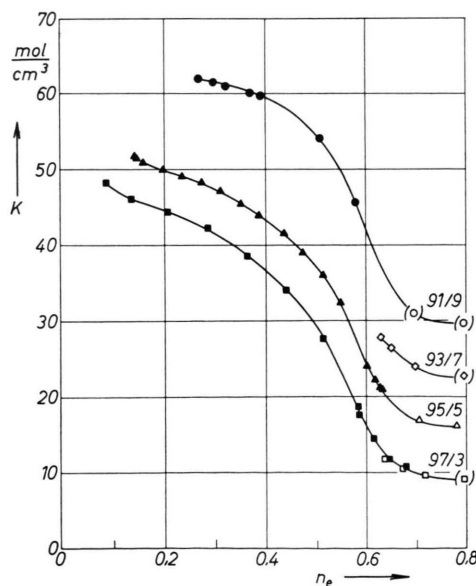


Abb. 6. Kopplungskonstanten des Eisenanteils (offene Symbole nach Meßwerten aus ¹²; eingeklammert: extrapolierte Werte).

gemessenen Werten erhalten wurden. Ähnlich wie bei den Suszeptibilitäten (Abb. 2–4) beobachtet man auch hier zunächst einen starken Abfall; bei Elektronenkonzentrationen zwischen 0,6 und 0,7 biegen die Kurven dann zu Grenzwerten um. Diese Grenzwerte sind proportional zum Fe-Gehalt, wie Abb. 7 an den Kopplungskonstanten für $n_e = 0,8$ zeigt. Da die Kopplungskonstanten auf 1 Mol Fe bezogen sind, bedeutet dies, daß die Grenzwerte

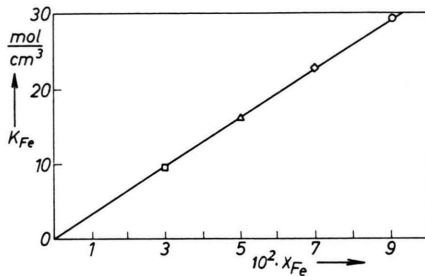


Abb. 7. Grenzwerte der Kopplungskonstanten für hohe Elektronenkonzentration.

zur Zahl der Fe-Fe-Paare proportional sind. Man wird daher diesen Anteil der Wechselwirkung der Eisenmomente untereinander zuzuschreiben haben, wobei allerdings ein Beitrag durch Polarisation der Elektronen im 5s-Band nicht ausgeschlossen werden kann.

Die Restanteile, die nach Subtraktion der Grenzwerte von den Kurven in Abb. 6 übrig bleiben, lassen sich weitgehend zur Deckung bringen, wie Abb. 8 zeigt. Dieser „d-Band-Anteil“ gibt die Kopplung über Lücken im 4d-Band wieder.

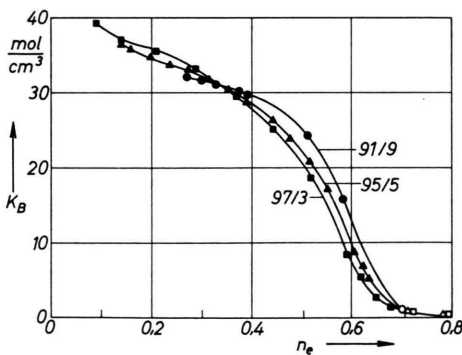


Abb. 8. d-Band-Anteil der Kopplungskonstanten.

4. Diskussion

In den beiden vorangehenden Abschnitten wurde gezeigt, daß auch bei der Behandlung der magneti-

schen Suszeptibilität in Pd/Fe- und Pd/Fe/H-Legierungen die Ergebnisse sinnvoll und konsistent gedeutet werden können, wenn zu ihrer Darstellung die Elektronenkonzentration herangezogen wird.

Von den Suszeptibilitäten der Legierungen wie von den Kopplungskonstanten der „Eisenanteile“ konnte jeweils ein „Bandanteil“ abgespalten werden, welcher für alle Legierungen übereinstimmend verläuft, wenn dem Eisen die „Wertigkeit“ drei zugeschrieben wird. Dadurch konnte die von BURGER, VOGT und WUCHER¹² vorgeschlagene und in der Mössbauer-Untersuchung von MAHNIG und WICKE¹¹ bestätigte Dreiwertigkeit des Eisens erneut gestützt werden.

Ein Befund der Art, daß physikalische Eigenschaften von Legierungen sich gemäß der Elektronenkonzentration ändern, entspricht der Vorstellung des starren Bändermodells (rigid band); er bedeutet jedoch nicht, daß tatsächlich mit einer starren Struktur der Elektronenbänder gerechnet werden muß. Dies ist im einzelnen an anderer Stelle¹¹ diskutiert worden.

Wie schon erläutert, drückt sich in den Grenzwerten der Kopplungskonstanten für hohe Elektronenkonzentrationen die Dipolwechselwirkung der Eisenmomente untereinander aus, wobei ein Beitrag des 5s-Bandes möglich erscheint. Der „d-Band-Anteil“ (Abb. 8) dagegen wird nur verständlich als der Beitrag, den die Lücken im 4d-Band der Legierung liefern.

Dieser Beitrag verschwindet, wie Abb. 8 zeigt, erst bei Elektronenkonzentrationen von $n_e > 0,65$. Untersuchungen der Wasserstoff-Absorption und der paramagnetischen Suszeptibilität an den Systemen Pd/Ag/H^{3,5} und Pd/Sn/H⁵ sowie der Isomeriever-schiebung der Mössbauer-Resonanzen am System Pd/Fe/H¹¹ haben dagegen übereinstimmend ergeben, daß bereits bei $n_e > 0,55$ kein Einfluß von Elektronenlücken im 4d-Band mehr beobachtet werden kann. Eine mögliche Deutung dieser Diskrepanz könnte davon ausgehen, daß bei den genannten anderen Methoden die Zustandsdichte an der Fermi-Grenze (4d- und 5s-Band) wirksam wird, während sich in der Kopplungskonstanten, Abb. 8, die unbesetzten 4d-Zustände allein bemerkbar machen. Wie Rechnungen von HAHN und TREUTMANN¹⁷ zeigen, kann das d-Band durch den Einfluß von Legierungspartnern unter Umständen einen Ausläufer mit ge-

¹⁷ A. HAHN u. W. TREUTMANN, Z. Angew. Phys. **26**, 129 [1969].

ringer Zustandsdichte an der oberen Kante erhalten. Damit wird es möglich, daß auch bei solchen Elektronenkonzentrationen noch unbesetzte d-Zustände vorhanden sind, bei denen die Zustandsdichte an der Fermi-Grenze bereits praktisch auf den niedrigen Wert des s-Bandes abgesunken ist.

Schwieriger zu interpretieren ist die Diskrepanz zwischen dem hier gefundenen Moment von $5,9 \mu_B$ und dem Wert von etwa $3 \mu_B$, wie er durch Auswertung der magnetischen Neutronenstreuung an Pd/Fe-Legierungen erhalten worden ist¹⁸⁻²⁰. Allerdings stehen die Ergebnisse der Neutronenstreuung auch noch in anderer Weise in Widerspruch zu den bisherigen Vorstellungen. So erhalten z. B. CABLE u. a.²⁰ aus der Auswertung ihrer Versuche, daß den Pd-Atomen ein eigenes magnetisches Moment zuzu-

schreiben sei, welches sich mit steigendem Fe-Gehalt der Pd/Fe-Legierungen von zunächst 0,15 auf ca. $0,4 \mu_B$ erhöht.

Wie sich diese Aussagen mit der Anschauung vereinbaren lassen, daß beim Palladium Pauli'scher Spinparamagnetismus vorliegt und dieser mit steigender Auffüllung des 4d-Bandes kontinuierlich abnimmt, bleibt eine zunächst noch offene Frage.

Wir danken Herrn Professor Dr. E. WICKE für die Anregung zu dieser Arbeit und sein stetes Interesse an ihrem Fortgang. Herrn Professor Dr. E. VOGT, Marburg, danken wir für die uns freundlicherweise zur Verfügung gestellten Meßwerte von D. GERSTENBERG sowie für wertvolle Hinweise. — Dem Fond der Chemischen Industrie sei gedankt für die allgemeine Unterstützung der Forschungsarbeiten des Institutes, die auch der vorliegenden Untersuchung zugute kam.

¹⁸ S. J. PICKART u. R. NATHANS, J. Appl. Phys. **33**, 1336 [1962].

¹⁹ J. W. CABLE, E. O. WOLLAN u. W. C. KOEHLER, J. Appl. Phys. **34**, 1189 [1963].

²⁰ J. W. CABLE, E. O. WOLLAN u. W. C. KOEHLER, Phys. Rev. **138**, A 755 [1965].

Holographische Untersuchung von schwingenden piezoelektrischen Quarzplatten

H. D. LOHMANN und H. THOLL

Institut für Angewandte Physik der Universität Hamburg

(Z. Naturforsch. **24 a**, 1806—1809 [1969]; eingegangen am 19. August 1969)

The application of holography to the analysis of the vibrations of piezo-electric quartz plates is demonstrated. A series of interference patterns appeared on the vibrating quartz plates as reconstructed by holograms. These patterns were photographed, and the amplitudes of vibration were determined. It is shown that the amplitude of vibration is increased as higher voltages are applied to the quartz. These results are compared with the experimental results of authors using interferometer techniques.

Wie POWELL und STETSON¹ gezeigt haben, ist es möglich, das holographische Verfahren zur Analyse von Schwingungen kleiner Amplitude zu verwenden. Sie untersuchten Eigenschwingungen einer kreisförmigen Metallplatte. Das durch das Hologramm rekonstruierte Bild des schwingenden Objektes enthält ein System von Interferenzstreifen, die Orten mit konstanter Schwingungsamplitude entsprechen und somit Aufschluß über die Form der Schwingung geben. In der vorliegenden Arbeit sind Schwingungen von piezoelektrischen Quarzplatten untersucht worden.

I. Versuchsaufbau

Zur Aufnahme der Hologramme wurde die in Abb. 1 gezeigte Anordnung gewählt. Als Lichtquelle diente ein He-Ne-Laser ($\lambda = 6328 \text{ \AA}$). Durch ein Prisma wird der Laserstrahl geteilt. Der an der Vorderseite des Prismas reflektierte Strahl wird über die Spiegel Sp_1 und Sp_2 und durch eine aufweitende Linse L_1 als Referenzstrahl auf die Hologrammplatte H geleitet. Der durch das Prisma hindurchgehende Strahl wird über die Spiegel Sp_3 und Sp_4 umgelenkt und durch die Linse L_2 zum Objekt-

Sonderdruckanforderungen erbeten an Dr. H. THOLL, Institut für Angewandte Physik der Universität Hamburg, D-2000 Hamburg 36, Jungiusstraße 11.

¹ R. L. POWELL u. K. A. STETSON, J. Opt. Soc. Am. **55**, 1593 [1965].