

Amplituden für kohärente Neutronen-Streuung gemessen an chemischen Verbindungen

L. KOESTER und K. KNOPF

Reaktorstation Garching der Technischen Universität München

(Z. Naturforsch. 27 a, 901—905 [1972]; eingegangen am 23. März 1972)

Coherent Neutron Scattering Amplitudes Obtained from Chemical Compounds

Utilizing the small angle scattering of slow neutrons by Christiansen-filters we could determine with a good accuracy the scattering amplitudes of powders by comparing with wellknown liquids. Investigations on powders of halides and sulfates yielded coherent scattering amplitudes of the bound atoms (in 10^{-13} cm):

$$\begin{aligned} a(\text{Na}) &= 3.63 \pm 0.02; & a(\text{K}) &= 3.71 \pm 0.02; \\ a(\text{Rb}) &= 7.08 \pm 0.02; & a(\text{Cs}) &= 5.42 \pm 0.02; \\ a(\text{Ti}) &= 8.89 \pm 0.02; & a(\text{Br}) &= 6.77 \pm 0.02; \\ \text{and } a(\text{I}) &= 5.28 \pm 0.02. \end{aligned}$$

The scattering amplitudes of the liquids and the elements as standards are based on directly determined amplitudes from gravity-mirror measurements.

1. Einleitung

Die Streuung von Neutronenstrahlen an Materie hat in der Vergangenheit für die Untersuchung der Struktur und der inneren Dynamik zahlreicher Festkörper und Flüssigkeiten große Bedeutung gewonnen. Die Leistungsfähigkeit der Methode wird in Zukunft durch den Einsatz stärkerer Neutronenquellen (Hochflußreaktoren) und durch Weiterentwicklung der experimentellen Technik sicherlich so weit gesteigert werden, daß mit einer erfolgreichen Anwendung auch auf angrenzenden Gebieten der Naturwissenschaften und der Technik gerechnet werden kann.

Bei dieser Entwicklung hat es sich gezeigt, daß häufiger die Genauigkeit nicht mehr befriedigt, mit der die Grundgrößen für die Streuung von Neutronen an isolierten Atomen bekannt sind. Eine dieser Größen ist die Amplitude des Atoms für kohärente Neutronenstreuung, die Streulänge a (cm). Aus diesem Grunde wurden neuartige Methoden für die Präzisionsmessung von Streulängen angewendet, zum Beispiel von C. G. SHULL¹ die Bragg-Reflexion von Neutronen an perfekten Kristallen und die Reflexion von Neutronen im Schwerkraft-Refraktometer nach MAIER-LEIBNITZ^{2,3}. Beide Verfahren sind nur für spezielle Elemente geeignet. Die große Genauigkeit des Schwerkraft-Refraktometers für Messungen an Flüssigkeiten ließ sich durch Ver-

Sonderdruckanforderungen an Priv.-Doz. Dr. L. KOESTER, Reaktorstation Garching der Techn. Universität München, Physik-Department, D-8046 Garching bei München.

gleichsmessungen zwischen Pulvern und Flüssigkeiten mit Hilfe der Kleinwinkelstreuung von Neutronen an Christiansen-Filters⁴ auch für die Messung an Festkörpern nutzen. Damit bot sich die Möglichkeit für eine genaue Messung der Streulänge fast aller Elemente. Wir haben sie früher⁵ für Messungen an pulverförmigen Metallen genutzt. Die vorliegende Arbeit ist eine Fortsetzung dieser Untersuchungen und eine Ausdehnung auf Messungen an pulverförmigen chemischen Verbindungen.

Wir können im folgenden zeigen, daß auch bei der Anwendung von Verbindungen die Streulängen der in ihnen vorkommenden Elemente mit systematischer Sicherheit und mit guter Genauigkeit bestimmbar sind.

2. Christiansen-Filter und Meßmethode

Christiansen-Filter bestehen aus der Mischung eines körnigen Pulvers mit einer Flüssigkeit. Durchsetzt ein Strahl langsamer Neutronen eine solche Anordnung, dann wird er zerstreut, wenn die Streupotentiale $N \cdot a$ (für N Atome pro cm^3) von Pulver und Flüssigkeit verschieden sind; sind sie gleich groß, dann verschwindet die Streuung.

Die Streuung geht überwiegend in Vorwärtsrichtung, sie ist eine Kleinwinkelstreuung. Bei unseren Experimenten wird sie durch Ändern des Streupotentials der Flüssigkeit zum Verschwinden gebracht. Die hierfür notwendigen Flüssigkeiten lassen sich durch Mischen von zwei Komponenten herstellen. Hat man die Flüssigkeit gefunden, die das Streupotential des Pulvers exakt kompensiert, dann ist damit das Streupotential des Pulvers bestimmt:

$$N \cdot a \text{ (Pulver)} = N \cdot a \text{ (Flüssigkeit)}.$$



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 digitized 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.

Die angewandte Meßmethode haben wir in einer früheren Arbeit⁵ ausführlich untersucht und beschrieben. Abb. 1 zeigt die Meßanordnung: ein Strahl langsamer Neutronen (mittlere Wellenlänge $13,5 \pm 0,5 \text{ \AA}$, Geschwindigkeit 290 m/sec) aus einem Neutronen-

Verdampfen der Flüssigkeit erfolgte wie auch das Füllen unter Vakuum. Die Filter überstanden einzeln mehr als 20 Flüssigkeitswechsel ohne störende Änderungen im Aufbau der Pulversäule.

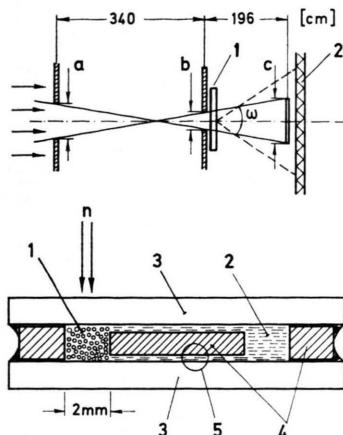


Abb. 1. Meßanordnung. Oberes Bild: Blendensystem und Strahlengang: $a=0,8 \text{ mm}$; $b=0,4 \text{ mm}$; $c=1,1 \text{ mm}$. Unteres Bild: Querschnitt durch Christiansen-Filter; 1: Pulver; 2: Flüssigkeit; 3: Glasplatten; 4: Metallstreifen; 5: Spaltweite $5 \dots 20 \mu\text{m}$.

leiter⁶ des FRM (der FRM ist ein leichtwasser-modierter Reaktor mit einer thermischen Leistung von 4 MW) trifft auf eine Anordnung von zwei schmalen Blenden (a und b) mit einem Strahlverschluß (c), der nahezu vollständig verhindert, daß der durch die Blenden sehr eng gebündelte Neutronenstrahl das Zählrohr (2) erreicht. Von einem Filter (1) hinter der Blende (b) vorwärts gestreute Neutronen können jedoch neben dem Strahlenfänger vorbeifliegen und das Zählrohr treffen.

Zur quantitativen Messung der Streustrahlung eines Filters waren jeweils zwei Messungen erforderlich.

1. Zählung der Neutronen, die das Filter in Vorwärtsrichtung insgesamt durchsetzen, durch Messen ohne Strahlverschluß und
2. alleinige Zählung der aus dem gebündelten Strahl herausgestreuten Neutronen durch Messungen mit Strahlverschluß.

Das Verhältnis beider Zählraten gibt dann den Bruchteil p der vorwärts gestreuten Neutronen.

Der Aufbau des Filters ist im unteren Bild der Abb. 1 dargestellt. Der Raum zwischen zwei Spiegelglasplatten wird durch drei Metallstreifen in zwei Kanäle aufgeteilt. Der Streifen zwischen den Kanälen ist dünner und gibt deshalb zwei Spalte frei, die eine Verbindung zwischen den beiden Kanälen herstellen. Der eine Kanal (ca. 150 mm lang, meistens 1 oder 2 mm dick und 2 mm breit) ist mit dem Pulver gefüllt, in dem anderen wird die Vergleichsflüssigkeit eingefüllt. Sie dringt durch die Spalte in den Pulverraum ein und füllt ihn aus. Die Trocknung des Filters durch

3. Messungen und Meßwerte

Die für die Messungen erforderlichen Flüssigkeiten mit verschiedenem Streupotential sind durch Mischen aus Komponenten hergestellt worden, deren physikalische Daten in Tab. 1 aufgeführt sind.

Tab. 1. Flüssigkeiten für Christiansen-Filter. Alle Werte für eine Temperatur von 20 °C (a direkt gemessen).

Substanz	Dichte [g/cm ³]	Streupotential Na [10 ⁹ /cm ²]
Aethylalkohol	$\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$	$0,78953$
p-Xylol	C_8H_{10}	$0,86131$
Tetrachloraethylen	C_2Cl_4	$1,62251$
Hexadeuterobenzol	C_6D_6 (99% D)	$0,94738$
		$-3,45 \pm 0,02$
		$7,712 \pm 0,004^a$
		$30,414 \pm 0,003^a$
		$53,81 \pm 0,02$

Das angegebene Streupotential wurde entweder direkt und absolut im Neutronen-Schwerkraft-Refraktometer gemessen⁷ oder aus neueren Werten für die Elemente berechnet⁸.

Für die Untersuchungen haben wir Salze überwiegend einwertiger Elemente ausgesucht, weil sie als Ionenkristalle im ganzen genau stöchiometrisch sind. Alle verwendeten Verbindungen (siehe Tab. 2) können wasserfrei im kristallinen Zustand erhalten werden, so daß die grundlegenden Voraussetzungen für zuverlässige Ergebnisse, nämlich die exakte Stöchiometrie und die Abwesenheit von Wasser als Verunreinigung im Prinzip erfüllt sind. Entsprechend ihrer Wasserlöslichkeit jedoch neigen die Salze dazu, Wasser aus feuchter Luft zu adsorbieren. Wir haben diesen Wassergehalt durch den Gewichtsverlust bestimmt, den die Pulver beim Trocknen (105 °C und 200 °C) im Vakuum erleiden. Diese Meßwerte und auch die hier pyknometrisch gemessenen Dichtewerte sind in Tab. 2 eingetragen.

Bei einem Teil der Untersuchungen wurden die Trocknungsverluste erst nach den Messungen im Christiansenfilter bestimmt und bei der Auswertung berücksichtigt (Korrekturen in Spalte 6, Tab. 2).

Nach den Angaben der Hersteller waren die Substanzen hinsichtlich der analysierbaren Verunreinigungen von hoher Reinheit. Die Größe der Verunreinigung durch Gase (Sauerstoff, Stickstoff und Wasserstoff) ist nicht bestimmt worden. Zur Ausschal-

tung auch dieser Unsicherheit haben wir für die Bestimmung der Streulängen von 7 Elementen insgesamt 19 voneinander unabhängige Meßreihen an 17 verschiedenen Verbindungen durchgeführt.

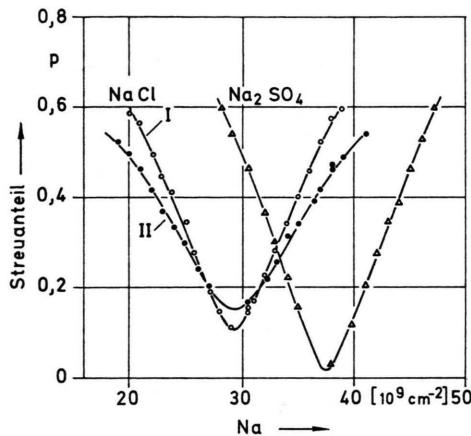


Abb. 2. Streukurven von Natriumsalzen. Filterdicken 1 mm; I: $\text{NaCl} (>99,99\%)$; Korngröße $10 \dots 50 \mu\text{m}$; II: $\text{NaCl} (99,998\%)$; Korngröße $20 \dots 100 \mu\text{m}$.

Die Abb. 2 bis 4 zeigen die Veränderung der Kleinwinkelstreuung (Streuanteil p) von Christianen-Filtern in Abhängigkeit vom Streupotential der Flüssigkeit. Diese Meßreihen an Na-Salzen (Abb. 2), an Tl- (Abb. 3) und Cl-Salzen (Abb. 4) sind cha-

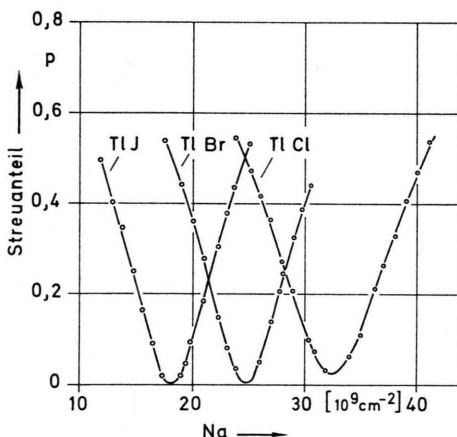


Abb. 3. Streukurven von Thalliumsalzen. Filterdicken 1 mm; Korngrößen in μm : TlJ: 2; TlBr: 5...20; TlCl: 10...20.

rakteristisch für die übrigen Meßreihen. Mit Ausnahme der Messungen an NaCl verschwindet die Streuung bei Gleichheit der Streupotentiale fast vollständig. Beim NaCl kann eine Inhomogenität der Dichte des Pulvers als Ursache der Störung ange-

nommen werden. Die Flanken der Kurven sind unterhalb $p = 0,5$ nahezu linear; ihre Steilheit hängt von der mittleren Dicke der Pulverkörner ab.

Die Lage des Minimums $(N \cdot a)_m$ einer Streukurve wurde durch Auswerten korrespondierender Punkte auf beiden Flanken gefunden und daraus die Streulänge a_m der Verbindung berechnet. Die in Tab. 2, Spalte 5, hierfür gegebenen Fehler sind Standard-Abweichungen. Sie enthalten die experimentellen Unsicherheiten der Streumessungen und der Dichtebestimmungen.

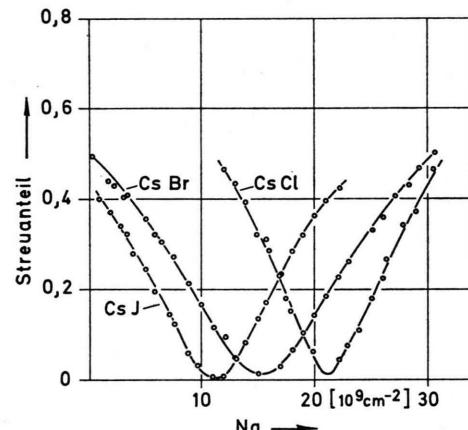


Abb. 4. Streukurven von Caesiumsalzen. Filterdicken 2 mm; Korngrößen in μm : CsJ: 50...150; CsBr: 100...200; CsCl: 30...80.

Die Korrekturen (Spalte 6) für den Wassergehalt sind dagegen klein, so daß sie auf die Größe des Fehlers keinen Einfluß haben.

4. Streulängen

Streulängen für die atomaren Bestandteile der Verbindungen lassen sich aus dem System der gemessenen molekularen Streulängen berechnen, wenn mindestens zwei atomare Streulängen bekannt sind. Wir legten die folgenden Streulängen zugrunde, die mit dem Neutronen-Schwerkraft-Refraktometer am FRM absolut und mit hoher Geschwindigkeit gemessen worden sind:

$$\begin{aligned} a(\text{SO}_4) &= 26,06 \pm 0,03 \text{ fm} \quad (\text{aus } ^8 \text{ und } ^9) \\ a(\text{Cl}) &= 9,580 \pm 0,002 \text{ fm} \quad ^7 \\ a(\text{S}) &= 2,847 \pm 0,001 \text{ fm} \quad ^9 \\ a(\text{O}) &= 5,804 \pm 0,007 \text{ fm} \quad ^8. \end{aligned}$$

Zur Auswertung für die Halogenide Brom und Jod wurden die Differenzen der molekularen Streulän-

Tab. 2. Meßwerte. Die Literaturwerte für die Dichte (Spalte 4) wurden den einschlägigen Handbüchern entnommen. Klammern in Spalte 7 bedeuten Trocknung des Pulvers vor der Streumessung und Messung an der getrockneten Substanz (a wahrscheinlich Oxidation des Pulvers).

Nr.	1 Verbin- dung	2 Reinheit [g/g %]	3 Dichte g · cm ⁻³ (20°C) pyknom. gemessen	4 Literatur	5 Streulänge (fm) d. Moleküls gemessen	6 Korrekt. enthalten	7 Trocknungs- verlust [10 ⁻⁴ g/g]
1	NaCl	> 99,99	2,160 ± 0,001	2,1648 ± 0,0004	13,21 ± 0,02	+ 0,01	7
2	NaCl	99,998	2,1591 ± 0,0003		13,21 ± 0,02	—	(7)
3	Na ₂ SO ₄	> 99,99	2,6620 ± 0,0005	2,664 ± 0,003	33,32 ± 0,04	—	(3)
4	Na ₂ SO ₄	> 99,99	2,6618 ± 0,0004		33,27 ± 0,04	—	(3)
5	KCl	> 99,99	1,9855 ± 0,0007	1,9868 ± 0,0002	13,29 ± 0,03	—	0,8
6	KBr	> 99,99	2,745 ± 0,005	2,75	10,47 ± 0,04	+ 0,01	3
7	KJ	> 99,99	3,121 ± 0,003	3,13	8,99 ± 0,02	+ 0,01	2
8	K ₂ SO ₄	99,9	2,663 ± 0,001	2,662	33,49 ± 0,03	—	(1,2)
9	RbCl	> 99,95	2,810 ± 0,006	2,807	16,66 ± 0,05	+ 0,01	1
10	RbBr	> 99,95	3,343 ± 0,002	3,365 ± 0,008	13,88 ± 0,02	—	0,6
11	RbJ	> 99,95	3,5531 ± 0,0014	3,558 ± 0,003	12,34 ± 0,03	+ 0,01	1,3
12	CsCl	> 99,99	3,9865 ± 0,0010	3,9841 ± 0,0024	14,99 ± 0,03	—	0,3
13	CsBr	> 99,99	4,451 ± 0,001	4,44	12,17 ± 0,02	—	(3)
14	CsJ	> 99,99	4,525 ± 0,002	4,523	10,68 ± 0,03	+ 0,01	2
15	Cs ₂ SO ₄	> 99,99	4,241 ± 0,002	4,243	36,98 ± 0,05	—	(6)
16	TlCl	p.A. > 99	7,0148 ± 0,0006	7,0146 ± 0,0020	18,48 ± 0,02	—	(-5)a
17	TlBr	> 99	7,450 ± 0,003	7,552	15,64 ± 0,03	+ 0,04	9
18	TlJ (α)	> 99,9	7,074 ± 0,004	α: 7,29; β: 7,09	14,20 ± 0,03	—	1
19	PbSO ₄	99,8	6,303 ± 0,003	6,29	35,44 ± 0,05	+ 0,02	(O ₂)a

gen zum entsprechenden Chlorid gebildet. Das gibt jeweils 4 Werte für $a(\text{Br} - \text{Cl})$ und $a(\text{J} - \text{Cl})$ und daraus die atomaren Streulängen, deren Werte in den Zeilen 2 und 3 der Tab. 3 gegeben sind.

Bei dieser Auswertung über die Differenzen kann sich der Einfluß gleichwertiger Verunreinigungen, etwa nicht erfaßter Wassergehalt, aufheben. Nicht gleichartige Verunreinigungen würden Schwankungen zwischen den einzelnen Resultaten hervorrufen. Aus der Tatsache, daß die aufgetretenen Schwankungen nicht größer sind als aus den experimentellen Meßfehlern berechnet, schließen wir, daß der

Einfluß unerkannter Verunreinigungen nicht größer als der angegebene Fehler sein wird.

Mit den auf diesem Wege gewonnenen Werten für Br und J und zusammen mit dem Cl- und SO₄-Wert wurden aus den molekularen Streulängen die Werte für die Metallatome berechnet. Sie sind in den Zeilen 4 bis 8 der Tab. 3 zusammengestellt. Auch hier stimmen die beobachteten Schwankungen der Ergebnisse mit dem experimentellen Meßfehler überein. Unsicherheiten durch unbekannte Verunreinigungen sind also über den Meßfehler hinaus nicht zu erwarten.

Tab. 3. Streulängen gebundener Atome.

Nr.	Ele- ment	Streulänge pro Atom (fm) gemessen in Verbindung mit				Mittelwert	Literatur
		K	Cs	Rb	Tl		
1	Cl	(Bezugswert)				9,580 ± 0,002	7
2	Br	6,76 ± 0,05	6,76 ± 0,04	6,80 ± 0,06	6,75 ± 0,03	6,7 ± 0,2	10
3	J	5,27 ± 0,04	5,27 ± 0,04	5,26 ± 0,06	5,31 ± 0,04	5,2 ± 0,2	10
	Cl	Br	J	SO ₄	Bezugswert:	26,06 ± 0,03	
4	Na	3,632 ± 0,015	—	—	3,62 ± 0,02	3,63 ± 0,02	3,5 ± 0,2
5	K	3,71 ± 0,03	3,70 ± 0,04	3,70 ± 0,03	3,72 ± 0,02	3,71 ± 0,02	3,7
6	Rb	7,08 ± 0,05	7,11 ± 0,03	7,06 ± 0,04	—	7,08 ± 0,02	7,0
7	Cs	5,41 ± 0,03	5,40 ± 0,03	5,40 ± 0,04	5,46 ± 0,03	5,42 ± 0,02	5,5 ± 0,2
8	Tl	8,89 ± 0,02	8,87 ± 0,03	8,92 ± 0,04	—	8,89 ± 0,02	8,9
9	Pb	—	—	—	9,39 ± 0,06	9,404 ± 0,004	15

Die Messung an Bleisulfat (Zeile 9) diente Vergleichszwecken. Sie stellt eine Verbindung der Ergebnisse zur Streulänge von Blei her, die aus Messungen des freien Wirkungsquerschnitts mit großer Genauigkeit berechnet worden ist¹⁵.

Die Gegenüberstellung der Meßergebnisse mit den Literaturwerten in Tab. 3 zeigt eine gute Überein-

stimmung aller Daten. Die neuen Ergebnisse haben Unsicherheiten von weniger als $\pm 1\%$ (absolute Standardabweichung $\pm 0,02$ fm) und sind damit mindestens zehnmal genauer als die älteren Werte. Sie sind frei von prinzipiellen Korrekturen.

Der Betriebsmannschaft des FRM danken wir für stete Hilfsbereitschaft.

- ¹ C. G. SHULL, Phys. Rev. Letters **21**, 1585 [1968].
- ² H. MAIER-LEIBNITZ, Z. Angew. Phys. **14**, 738 [1962].
- ³ L. KOESTER, Z. Physik **182**, 328 [1965]; **198**, 187 [1967].
- ⁴ L. KOESTER u. H. UNGERER, Z. Physik **219**, 300 [1969].
- ⁵ L. KOESTER u. K. KNOPF, Z. Naturforsch. **26 a**, 391 [1971].
- ⁶ H. MAIER-LEIBNITZ u. T. SPRINGER, Ann. Rev. Nucl. Sci. **16**, 207 [1966].
- ⁷ L. KOESTER u. W. NISTLER, Phys. Rev. Letters **27**, 956 [1971].
- ⁸ W. DILG, L. KOESTER u. W. NISTLER, Physics Letters **36 B**, 208 [1971].
- ⁹ W. D. TRÜSTEDT, Z. Naturforsch. **26 a**, 400 [1971].
- ¹⁰ C. G. SHULL u. E. O. WOLLAN, Phys. Rev. **81**, 527 [1951].
- ¹¹ G. E. BACON u. J. S. PLANT, Z. Kristallographie **126**, 460 [1968]. — G. M. BROWN u. L. A. WALKER, Acta Cryst. **20**, 220 [1966].
- ¹² F. WANG u. D. COX, Acta Cryst. **A 26**, 377 [1970].
- ¹³ D. E. COX u. V. J. MINKIEWIEZ, Acta Cryst. **A 27**, 494 [1971].
- ¹⁴ LE ROY HEATON u. S. S. SIDHU, Phys. Rev. **105**, 216 [1957].
- ¹⁵ W. DILG u. H. VONACH, Z. Naturforsch. **26 a**, 442 [1971].

Zur Theorie der Jordan-Nachwirkung

ARTUR HAHN

Institut für Werkstoffe der Elektrotechnik der Ruhr-Universität Bochum

(Z. Naturforsch. **27 a**, 905—916 [1972]; eingegangen am 9. November 1971)

Theory of Thermally Activated Relaxation in Ferromagnets

The theory of the thermally activated relaxation process in a ferromagnet, leading to the phenomenon of Jordan-type aftereffect, is reinvestigated. The analysis is based on a more general statistical approach than the concept of a macroscopic free energy as a function of a macroscopic state variable usually employed in this field. Within the simplest possible model analytical results are obtained, leading to a re-establishment of the usual concept for small systems and its break-down for systems larger than a critical size. For large systems asymptotic results are obtained differing qualitatively from those of the conventional scheme. The most important result is a temperature-independent viscosity coefficient S_V , defined by Eq. (3) of the text.

I. Einleitung

Die vorliegende Untersuchung soll einen Beitrag liefern zur Theorie langsamer Relaxationsprozesse in ferromagnetischen Systemen, die das Verhalten beim magnetischen Kriechen im Zeitbereich von der Größenordnung Sekunden oder auch in entsprechend niederfrequenten Wechselfeldern bestimmen. Dieses als Jordan-Nachwirkung bezeichnete Verhalten hat eine umfangreiche Literatur und es sei hier auf zwei neuere Monographien zu diesem Thema^{1, 2} und auf einen insbesondere die bisherigen theoretischen Ansätze kritisch darstellenden zusammenfassenden Aufsatz³ hingewiesen. Im Vordergrund des Interesses

der vorliegenden Untersuchung steht dabei die Temperaturabhängigkeit der von NÉEL⁴ und STREET und WOOLLEY⁵ eingeführten Nachwirkungskonstanten.

Das Gebiet der Jordan-Nachwirkung ist physikalisch charakterisiert durch eine experimentelle Zeitskala τ , welche die charakteristische Zeit τ_0 für dissipative Bewegungen des Spinsystems in Richtung auf das thermodynamische Gleichgewicht um viele Zehnerpotenzen übertrifft, so daß nicht nur $\tau/\tau_0 \gg 1$, sondern darüber hinaus

$$\log(\tau/\tau_0) \gg 1 \quad (1)$$

näherungsweise erfüllt ist. Da τ_0 charakteristisch von der Größenordnung 10^{-9} s ist, findet man, bei τ im Bereich von Sekunden, für den natürlichen Logarithmus auf der linken Seite von (1) etwa 20.