

Thermische Ausdehnung von Metallen bei tiefen Temperaturen

Doctoral Thesis

Author(s):

Andres, Klaus

Publication date:

1964

Permanent link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-000090551>

Rights / license:

In Copyright - Non-Commercial Use Permitted

Prom. Nr. 3455

Thermische Ausdehnung von Metallen bei tiefen Temperaturen

Von der

EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN
HOCHSCHULE IN ZÜRICH

zur Erlangung
der Würde eines Doktors der
Naturwissenschaften
genehmigte

PROMOTIONSARBEIT

vorgelegt von

KLAUS ANDRES

Dipl. Phys. E.T.H.
von Roggwil (BE)

Referent: Herr Prof. Dr. P. Grassmann
Korreferent: Herr Prof. Dr. J. L. Olsen

Druck: Konrad Triltsch, Graphischer Großbetrieb, Würzburg

Es wurde die thermische Ausdehnung von einigen reinen Metallen im Temperaturgebiet zwischen 1,5° und 12° K gemessen. Die folgenden Metalle (mit Ausnahme von Tantal alle in polykristallinem Zustand) wurden untersucht: Al, Pb, Pt, Mo, Ta, W, Mg, Cd, Re, Ti, La, Ce, Nd, Gd, Yb. In Übereinstimmung mit der theoretischen Erwartung setzt sich der thermische Ausdehnungskoeffizient $\beta = 1/V(\partial V/\partial T)$ [V = Volumen, T = Temperatur] bei genügend tiefen Temperaturen aus einem linear mit der Temperatur variierenden Elektronenanteil und einem kubisch mit der Temperatur variierenden Gitteranteil zusammen.

Im supraleitenden Zustand (Pb, Ta, La) wird der Elektronenanteil stark verändert. Die seltenen Erdmetalle Gd, Ce und Nd weisen negative Anomalien im Ausdehnungskoeffizienten auf, welche mit dem Ferro- bzw. Antiferromagnetismus dieser Substanzen zusammenhängen.

Die Resultate werden diskutiert auf Grund der Theorien der Kristallgitter-Dynamik und der Metallelektronik.

Le coefficient de dilatation thermique de quelques métaux purs a été mesuré dans le domaine de température de 1,5° à 12° K. Les métaux suivants, tous à l'état polycristallin à l'exception du Tantal, ont été étudiés: Al, Pb, Pt, Mo, Ta, W, Mg, Cd, Re, Ti, La, Ce, Nd, Gd, Yb. A des températures suffisamment basses, le coefficient de dilatation thermique $\beta = 1/V(\partial V/\partial T)$ [V = volume, T = température] se compose, en accord avec la théorie, d'un terme linéaire en T , dû aux électrons, et d'un terme cubique en T , attribuable au réseau cristallin.

A l'état supraconducteur (Pb, Ta, La) le terme dû aux électrons se comporte différemment. Les métaux de terres rares Gd, Ce et Nd présentent, dans le coefficient de dilatation, des anomalies négatives qui dépendent du ferro- ou de l'antiferromagnétisme de ces substances, selon le cas.

Les résultats sont discutés à l'aide de la théorie dynamique du réseau cristallin et la théorie des métaux.

The thermal expansion coefficients of the following metals in the temperature region between 1,5° and 12° K have been measured: Al, Pb, Pt, Mo, Ta, W, Mg, Cd, Re, Ti, La, Ce, Nd, Gd, Yb. Except for tantalum all the specimens were polycrystalline. It is found in accordance with theoretical prediction that the coefficient of thermal expansion $\beta = 1/V(\partial V/\partial T)$ [where V = volume, T = temperature] at sufficiently low temperatures is composed of an electronic component varying linearly with temperature, and a lattice component varying as the cube of the temperature.

The electronic component is strongly modified in the superconducting state (Pb, Ta, La). The rare earth metals Gd, Ce and Nd have negative anomalies in their expansion. These are connected with the ferro- and antiferromagnetism of these substances.

The results are discussed on the basis of lattice dynamics and the theory of electrons in metals.

I. Einleitung

GRÜNEISEN [1—9] hat schon früh experimentell gezeigt, daß für Festkörper mit kristalliner Struktur der thermische Ausdehnungskoeffizient über einen weiten Temperaturbereich proportional der spezifischen Wärme ist. Er führte das dimensionslose Verhältnis

$$\gamma = \frac{\beta \cdot V}{\kappa \cdot C_v}$$

$[\beta = \frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_T = \text{Volumenausdehnungskoeffizient}, \kappa = -\frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial p} \right)_T = \text{isotherme Kompressibilität}, C_v = \text{spezifische Wärme bei konstantem Volumen}, V = \text{Volumen}]$, den sogenannten Grüneisenparameter, ein und zeigte, daß dieser Parameter bei nicht zu tiefen Temperaturen eine für jeden Kristall charakteristische Konstante ist.

In metallischen Kristallen werden nicht nur die Atomkerne, sondern auch die Leitungselektronen thermisch angeregt, und dieser Umstand führt zu einer zusätzlichen „elektronischen“ thermischen Ausdehnung. Es zeigt sich, daß der thermische Ausdehnungskoeffizient von Metallen bei Temperaturen unterhalb etwa $\Theta/20$ [$\Theta = \text{Debye-Temperatur}$] meistens als Summe eines linear mit der Temperatur variierenden Elektronenanteils und eines kubisch mit der Temperatur variierenden Gitteranteils dargestellt werden kann:

$$\beta = \beta_e + \beta_g = AT + BT^3.$$

Die spezifische Wärme eines Metalls setzt sich ebenfalls aus einem Gitter- und einem Elektronenanteil zusammen. In Metallen läßt sich daher sowohl ein Grüneisenparameter des Gitters als auch ein Grüneisenparameter der Elektronen definieren.

Die Temperatur, bei welcher die beiden Anteile β_e und β_g miteinander vergleichbar sind und sich experimentell trennen lassen, liegt für die meisten Metalle zwischen $\Theta/100$ und $\Theta/50$, d. h. zwischen etwa 1°K und 10°K . Messungen der thermischen Ausdehnung im Bereich von 300°K bis zu Temperaturen von $\Theta/20$ existieren bereits für viele Metalle, so zum Beispiel für Aluminium [10, 11, 12], Kupfer [11, 13], Silber [11], Gold [11], Eisen [11], Nickel [11], Indium [14], Blei [15], Yttrium [16], Zink [16], Thallium [16]. Messungen unterhalb $\Theta/20$ sind dagegen erst in neuerer Zeit ausgeführt worden [17, 18, 19, 20, 21]. Die vorliegende Arbeit soll zur Erweiterung dieses Datenmaterials beitragen. Sie befaßt sich mit der Messung des Ausdehnungskoeffizienten einiger Metalle zwischen $1,5^\circ$ und 12°K , hauptsächlich im Hinblick auf die Bestimmung des Elektronenanteils an der Ausdehnung. Die untersuchten Metalle sind Aluminium, Blei, Platin, Molybdän, Tantal, Wolfram, Magnesium, Cadmium, Rhenium, Titan, sowie die seltenen Erdmetalle Lanthan, Cerium, Neodymium, Gadolinium und Ytterbium.

Der folgende zweite Abschnitt ist der Beschreibung der Apparatur gewidmet. Der dritte Abschnitt enthält eine Zusammenfassung der Theorie, es wird hier auf