

Über die Sättigungsmagnetostriktion von Eisen-Silicium-Einkristallen mit 4,4 Gew.-Proz. Si zwischen Raumtemperatur und Curie-Punkt

HANS VAN KEMPEN, RUDOLF KOHLHAAS
und HEINRICH LANGE

Institut für Theoretische Physik der Universität Köln,
Abteilung für Metallphysik
(Z. Naturforschg. 21 a, 1512—1513 [1966]; eingeg. am 8. August 1966)

Das von GOLDMAN¹ eingeführte Verfahren, mit Hilfe von Dehnungsmeßstreifen die Magnetostriktion zu ermitteln, ermöglicht heute Untersuchungen bis nahezu 900 °C. Es ist das Ziel der hier vorgelegten Notiz, Meßergebnisse über die Temperaturabhängigkeit der Magnetostriktionskonstanten $h_1 \dots h_5$ an Eisen-Silicium-Einkristallproben mit 4,4 Gew.-Proz. Silicium zwischen Raumtemperatur und 850 °C mitzuteilen, aus denen sich die Sättigungsmagnetostriktion λ_{100} , λ_{110} und λ_{111} in den kristallographischen Hauptachsen rechnerisch gewinnen läßt, und sie zur Diskussion zu stellen.

Die Messungen wurden an „schiffchenförmig“ ausgearbeiteten Blechen von 80 mm Länge, 17 mm Breite und 0,35 mm Dicke (Material mit Goss-Textur) ausgeführt, wie sie MELLENTIN und LANGE² für magnetometrische Untersuchungen angegeben haben und bereits von JAENSCH und KOHLHAAS³ bei magnetostriktiven Messungen benutzt wurden, da Probenformen dieser Gestalt sich homogen magnetisieren lassen. Zur Messung wurde ein Amplitudenmodulations-Trägerfrequenzverfahren mit sehr niedriger Trägerfrequenz (1,5 Hz) angewendet. Dabei bewirken nur die magnetfeldabhängigen Eigenschaften der Probe eine Modulation. Störungen statistischer Art — darunter fallen sämtliche Arten von Driften — konnten somit ausgeschieden werden. Magnetfeldabhängige Störgrößen wie der magnetokalorische Effekt und die Änderung des elektrischen Widerstandes der Dehnungsmeßstreifen im Magnetfeld (magnetoresistance) wurden durch geeignete Kompressionschaltungen eliminiert. Über Einzelheiten der Meßtechnik und der Elektronik werden VAN KEMPEN und LANGE⁴ an anderer Stelle berichten.

Eine Darstellung der magnetostriktiven Gestaltsänderung von Einkristallen mit kubischer Gitterstruktur ist mit Hilfe der Magnetostriktionskonstanten $h_1 \dots h_5$ im Zustand der magnetischen Sättigung aus der von BECKER und DÖRING⁵ angegebenen Beziehung möglich. Wenn die [100]-Richtung die leichte Richtung für die Magnetisierung ist, läßt sich schreiben:

$$\begin{aligned} \lambda_{\beta}^x &= h_1 (\alpha_1^2 \beta_1^2 + \alpha_2^2 \beta_2^2 + \alpha_3^2 \alpha_1^2 - \frac{1}{3}) \\ &+ 2 h_2 (\alpha_1 \alpha_2 \beta_1 \beta_2 + \alpha_2 \alpha_3 \beta_2 \beta_3 + \alpha_3 \alpha_1 \beta_3 \beta_1) \\ &+ h_3 \cdot s \\ &+ h_4 (\alpha_1^4 \beta_1^2 + \alpha_2^4 \beta_2^2 + \alpha_3^4 \beta_3^2 + \frac{2}{3} \cdot s - \frac{1}{3}) \\ &+ 2 h_5 (\alpha_1 \alpha_2 \alpha_3^2 \beta_1 \beta_2 + \alpha_2 \alpha_3 \alpha_1^2 \beta_2 \beta_3 + \alpha_3 \alpha_1 \alpha_2^2 \beta_3 \beta_1) \end{aligned} \quad (1)$$

¹ J. E. GOLDMAN, Phys. Rev. **72**, 529 [1947]; J. Phys. Radium **12**, 471 [1951].

² K. MELLENTIN u. H. LANGE, Z. Metallk. **46**, 450 [1955].

³ P. JAENSCH u. R. KOHLHAAS, Z. Angew. Phys. **15**, 246 [1963].

⁴ H. VAN KEMPEN u. H. LANGE, Z. Angew. Phys., demnächst.

mit der Abkürzung

$$s = (\alpha_1^2 \alpha_2^2 + \alpha_2^2 \alpha_3^2 + \alpha_3^2 \alpha_1^2).$$

In dieser Formel stellt λ_{β}^x die relative Längenänderung eines Einkristalles in Richtung β bezüglich der kubischen Achsen dar, wenn α die Magnetisierungsrichtung ist. Die α_i und β_i sind die entsprechenden Richtungskosinusse. h_1 und h_2 beschreiben nach TATSUMOTO und OKAMOTO⁶ einen quasi-Dipol-Dipol-, h_4 und h_5 einen quasi-Quadrupol-Quadrupol-Wechselwirkungsanteil; h_3 ist der Kristallanteil der Volumenmagnetostriktion. Bei der hier verwendeten Meßmethode wird die Differenz der Längenänderung zwischen longitudinaler und transversaler Magnetisierungsrichtung für verschiedene kristallographische Ebenen gemessen und anschließend mit Gl. (1) verglichen. Bei den hier benutzten Einkristallproben mit Goss-Textur erweist sich die Auswertung der Meßergebnisse als besonders günstig. In der neueren Literatur findet man weitere rechnerische Einzelheiten in der Arbeit von RADELOFF⁷, die sich mit

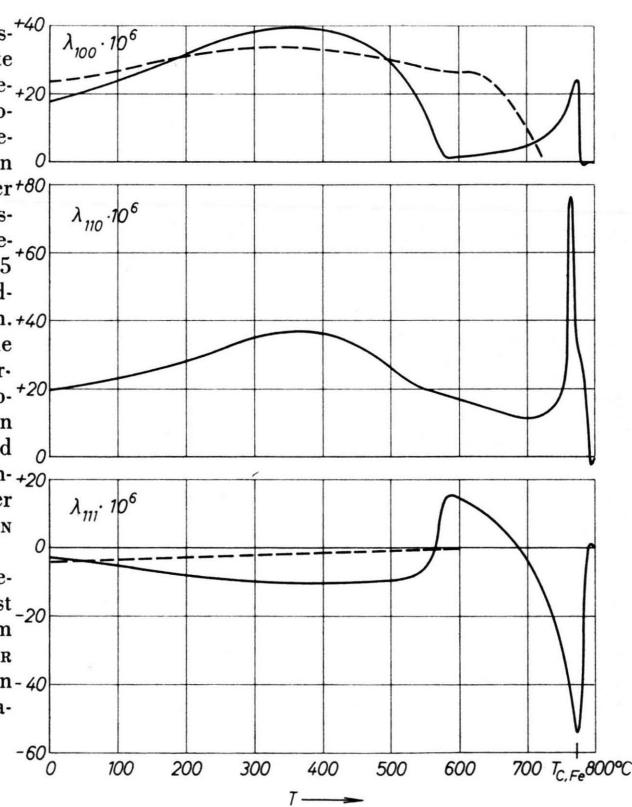


Abb. 1. Temperaturabhängigkeit der Sättigungsmagnetostriktion λ_{100} , λ_{110} und λ_{111} von Fe-Si-Einkristallen mit 4,4 Gew.-Proz. Si. Gestrichelte Kurven nach TATSUMOTO und OKAMOTO⁶ (3,8 Gew.-Proz. Si).

⁵ R. BECKER u. W. DÖRING, Ferromagnetismus, Verlag Springer, Berlin 1939.

⁶ E. TATSUMOTO u. T. OKAMOTO, J. Phys. Soc. Japan **14**, 1588 [1959].

⁷ CH. RADELOFF, Z. Angew. Phys. **17**, 247 [1964].



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.

| T in °C | h_1 | h_2 | h_3 | h_4 | h_5 | λ_{100} | λ_{111} | λ_{110} |
|------------------|------------|------------|-----------|------------|------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 0 | + 40,5 | + 10,1 | + 38,6 | - 13,5 | - 44,0 | + 18,0 | - 3,0 | + 20,0 |
| 82 | + 30,6 | + 11,7 | + 45,0 | + 4,5 | - 57,5 | + 23,0 | - 5,0 | + 22,0 |
| 150 | + 15,0 | + 16,6 | + 49,7 | + 27,5 | - 79,8 | + 28,0 | - 6,7 | + 26,0 |
| 219 | - 4,1 | + 24,1 | + 53,2 | + 53,4 | - 109,0 | + 33,0 | - 8,3 | + 29,0 |
| 272 | - 27,4 | + 33,7 | + 55,2 | + 82,5 | - 142,0 | + 37,0 | - 9,1 | + 33,0 |
| 328 | - 45,6 | + 42,4 | + 54,7 | + 104,0 | - 172,0 | + 39,0 | - 10,0 | + 36,0 |
| 383 | - 52,9 | + 45,7 | + 52,6 | + 111,0 | - 183,0 | + 39,0 | - 10,0 | + 36,5 |
| 437 | - 41,7 | + 41,1 | + 50,5 | + 96,6 | - 169,0 | + 37,0 | - 10,0 | + 34,0 |
| 490 | - 9,8 | + 26,4 | + 48,2 | + 56,6 | - 122,0 | + 31,0 | - 9,5 | + 28,0 |
| 542 | + 60,4 | + 3,7 | + 44,0 | - 33,0 | - 44,0 | + 18,0 | - 7,2 | + 20,0 |
| 568 | + 168,0 | - 16,5 | + 50,9 | - 160,0 | + 57,8 | + 6,0 | + 2,0 | + 19,0 |
| 582 | + 249,0 | - 35,3 | + 57,0 | - 246,0 | + 173,0 | + 1,0 | + 15,0 | + 17,5 |
| 593 | + 238,0 | - 33,1 | + 54,2 | - 236,0 | + 168,0 | + 1,2 | + 15,0 | + 17,0 |
| 643 | + 135,0 | - 7,2 | + 25,1 | - 131,0 | + 62,3 | + 2,3 | + 9,0 | + 14,0 |
| 693 | - 17,9 | + 36,4 | - 23,9 | + 23,8 | + 118,0 | + 4,0 | - 2,0 | + 11,0 |
| 741 | - 289,0 | + 137,0 | - 123,0 | + 303,0 | - 510,0 | + 10,0 | - 22,0 | + 15,0 |
| 755 | - 458,0 | + 214,0 | - 197,0 | + 479,0 | - 789,0 | + 14,5 | - 33,0 | + 21,0 |
| 764 | - 397,0 | + 277,0 | - 128,3 | + 426,0 | - 1025,0 | + 19,5 | - 43,0 | + 76,0 |
| 773 | - 268,0 | + 101,5 | 0,0 | + 305,0 | - 543,0 | + 24,0 | - 54,0 | + 32,5 |
| 778 | - 151,0 | + 55,0 | + 50,4 | + 151,0 | - 353,0 | 0,0 | - 42,0 | + 27,5 |
| 783 | - 124,0 | + 62,0 | + 16,8 | + 12,2 | - 279,0 | - 1,0 | - 24,0 | + 25,0 |
| 787 | - 71,7 | + 36,0 | 0,0 | + 71,7 | - 133,0 | 0,0 | - 5,6 | + 12,0 |
| 792 | + 17,0 | - 8,5 | 0,0 | - 17,0 | + 32,0 | 0,0 | + 1,4 | - 2,8 |
| mittlerer Fehler | $\pm 20,0$ | $\pm 12,0$ | $\pm 7,5$ | $\pm 23,0$ | $\pm 34,0$ | $\pm 2,5$ | $\pm 2,5$ | $\pm 8,0$ |

Tab. 1. Magnetostriktionskonstanten $h_1 \dots h_5$ und Sättigungsmagnetostriktion λ_{100} , λ_{111} und λ_{110} von Fe-Si-Einkristallen mit 4,4 Gew.-Proz. Si. Alle Zahlenangaben sind mit 10^{-6} zu multiplizieren.

der Bestimmung der Magnetostriktionskonstanten des Eisens bei Raumtemperatur befaßt. Ferner sei auf das Buch von KNELLER⁸ verwiesen.

In Abb. 1 ist die Temperaturabhängigkeit von λ_{100} , λ_{110} und λ_{111} zwischen Raumtemperatur und etwa 850 °C dargestellt; Tab. 1 bringt eine Zusammenstellung der Meßergebnisse für $h_1 \dots h_5$ (Mittelwerte aus mehreren Meßserien) und die daraus gewonnenen Werte für die Sättigungsmagnetostriktion λ in [100]-, [111]- und [110]-Richtung sowie einen Hinweis auf den mittleren Fehler.

Bis 580 °C entsprechen die Resultate in etwa den theoretischen Erwartungen. Die Magnetostriktionswerte zeigen jedoch bei dieser Temperatur eine Anomalie, welche mit dem Verschwinden der Überstruktur vom Ordnungstyp FeSi in Zusammenhang gebracht werden kann. Darüber hinaus tritt entgegen den bisher bekannten Messungen und theoretischen Erwartungen oberhalb des magnetischen CURIE-Punktes der Fe-Si-Legierung, der bei 720 °C liegt, noch Magnetostriktion mit Extremwerten bei der CURIE-Temperatur des reinen Eisens auf. In der unmittelbaren Umgebung von 770 °C, dem CURIE-Punkte des reinen Eisens, zeigen die gefundenen Magnetostriktionswerte gute Übereinstimmung mit dem von CALLEN und CALLEN⁹ für das reine Eisen errechneten λ_{100} -Gestaltsterm sowohl bezüglich der Größe ($25 \cdot 10^{-6}$ aus der Theorie, $24 \cdot 10^{-6}$ im Experiment) als auch der Steilheit des Abfalls der ge-

messenen Magnetostriktion. In Abb. 1 sind vergleichsweise auch die Ergebnisse von TATSUMOTO und OKAMOTO⁶ für λ_{100} und λ_{111} eingezeichnet.

Es dürfte nicht möglich sein, mit den bisher bekannten Störeffekten die Resultate zwischen 720 und 780 °C als Ergebnis von Störungen zu interpretieren. Als maximaler Temperaturmeßfehler kann höchstens ± 3 °C angenommen werden. Der Einfluß des Magnetowiderstand-Effektes wurde mit einem magnetisch unbeeinflussbaren Probenblech aus Molybdän bei einem Feld von 500 Oe zu weniger als $2 \cdot 10^{-7}$ über den ganzen Temperaturbereich bestimmt. Der magnetokalorische Effekt ist stark feldabhängig. Die Meßwerte oberhalb von 720 °C konnten aber durch Variieren des angelegten Feldes nicht beeinflußt werden. Zudem macht sich der magnetokalorische Effekt, soweit er überhaupt eine Differenzlängenänderung hervorruft, wegen des Abklingens der Wärmetönung als Phasenverschiebung des Signals bemerkbar; vgl. hierzu VAN KEMPEN und LANGE⁴. Diese Phasenlage wurde während der Messung laufend mit einem Oszillographen überwacht. Es konnten dabei keine Abweichungen festgestellt werden. Alle anderen Fehlerursachen sind statistischer Art und können nur die Reproduzierbarkeit der Messungen beeinflussen.

Der Deutschen Forschungsgemeinschaft danken wir für die Förderung dieser Arbeit durch Sach- und Personalmittel.

⁸ E. KNELLER, Ferromagnetismus, Verlag Springer, Berlin/Göttingen/Heidelberg 1962.

⁹ H. B. CALLEN u. E. R. CALLEN, Phys. Rev. **132**, 991 [1963].