

Über die Sättigungsmagnetostraktion 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. Naturforsch. 21 a, 1512–1513 [1966]; eingeg. am 8. August 1966)

Das von GOLDMAN¹ eingeführte Verfahren, mit Hilfe von Dehnungsmeßstreifen die Magnetostraktion zu ermitteln, ermöglicht heute Untersuchungen bis nahezu 900 °C. Es ist das Ziel der hier vorgelegten Notiz, Meßergebnisse über die Temperaturabhängigkeit der Magnetostraktionskonstanten $h_1 \dots h_5$ an Eisen-Silicium-Einkristallproben mit 4,4 Gew.-Proz. Silicium zwischen Raumtemperatur und 850 °C mitzuteilen, aus denen sich die Sättigungsmagnetostraktion 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 magneto-metrische 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 magnetfeld-abhängigen Eigenschaften der Probe eine Modulation. Störungen statistischer Art – darunter fallen sämtliche Arten von Driften – konnten somit ausgeschlossen werden. Magnetfeldabhängige Störgrößen wie der magneto-kalorische Effekt und die Änderung des elektrischen Widerstandes der Dehnungsmeßstreifen im Magnetfeld (magnetoresistance) wurden durch geeignete Kompensationsschaltungen 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 Magnetostraktionskonstanten $h_1 \dots h_5$ 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:

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

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}^{α} 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 Volumenmagnetostraktion. 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

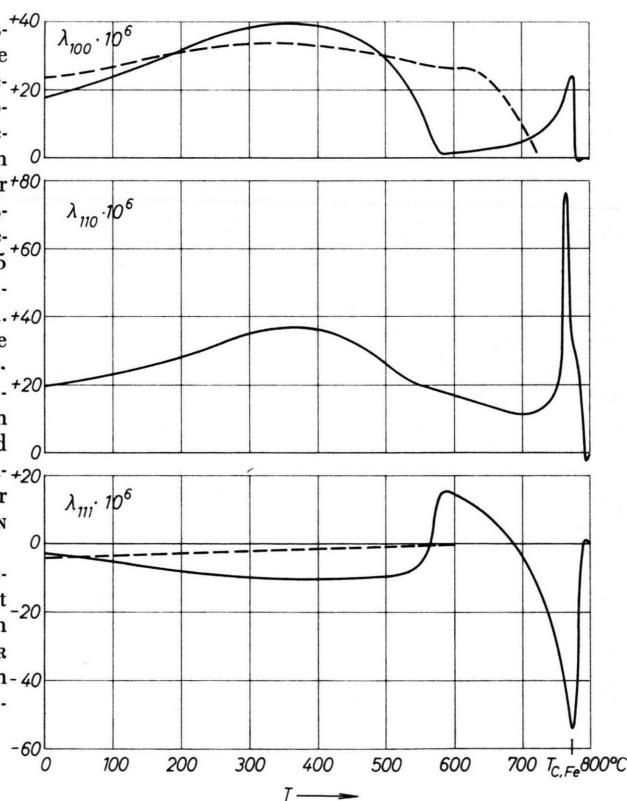


Abb. 1. Temperaturabhängigkeit der Sättigungsmagnetostraktion λ_{100} , λ_{110} und λ_{111} von Fe-Si-Einkristallen mit 4,4 Gew.-Proz. Si. Gestrichelte Kurven nach TATSUMOTO und OKAMOTO⁶ (3,8 Gew.-Proz. Si).

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.

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].



T in $^{\circ}\text{C}$	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. Magnetostruktionskonstanten $h_1 \dots h_5$ und Sättigungsmagnetostruktion 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 Magnetostruktionskonstanten 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 Sättigungsmagnetostruktion 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 Magnetostruktionswerte 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 Magnetostruktion 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 Magnetostruktionswerte 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 Magnetostruktion. 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 $\pm 3^{\circ}\text{C}$ 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].