

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 55 (1964)
Heft: 20

Artikel: Besondere Eigenschaften und Anwendungen von Nickel und Nickel-Legierungen für die Elektrotechnik : magnetische Eigenschaften
Autor: Mager, A.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-916779>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 22.02.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Nennspannung	Leistung	P = 100 %	P = 75 % ¹⁾	P = 50 %	P = 25 %
245 kV	k_1	0,45	0,385	1,43	1,43
	u_1	177 kV	100 kV	372 kV	372 kV
	t_1	0,067 ms	0,0188 ms	0,1 ms	0,05 ms
	s_1	1,75 kV/μs	5,33 kV/μs	3,72 kV/μs	7,44 kV/μs
	k_2	1,68	1,68	Kein 2. Parameterpaar	
	u_2	437 kV	437 kV		
	t_2	0,55 ms	0,55 ms		
	s_2	0,795 kV/μs	0,795 kV/μs		
420 kV	k_1	0,675	0,385	1,43	1,43
	u_1	300 kV	172 kV	637 kV	637 kV
	t_1	0,3 ms	0,043 ms	0,143 ms	0,0715 ms
	s_1	1,0 kV/μs	3,99 kV/μs	4,45 kV/μs	8,9 kV/μs
	k_2	1,58	1,58	Kein 2. Parameterpaar	
	u_2	704 kV	704 kV		
	t_2	0,96 ms	0,96 ms		
	s_2	0,734 kV/μs	0,734 kV/μs		

Amplitudenfaktoren k_1 und k_2 bezogen auf $U \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}$ 1,3

¹⁾ Abstandkurzschluss 0,75 · 40 kA, $Z_w = 400 \Omega$ bei 245 kV bzw. 300 Ω bei 420 kV

Spannungsverläufe

Tabelle V

Prüfvorschlag				informativ
Nennspannung U_n kV	P = 100 % KK ^{1) 2)} f kHz	P = 75 % AK	P = 50 % KK ²⁾ f kHz	P = 25 % KK ²⁾ f kHz
72,5...170	im Studium	natürliche oder künstliche Leitung	im Studium	im Studium
245	1,0		5,0	10,0
300	0,8		4,0	8,0
420	0,7		3,5	7,0

KK Klemmenkurzschluss; AK Abstandkurzschluss

¹⁾ Bei 100 % Leistung wird empfohlen, einen einfach gedämpften Schwingkreis nach Fig. 18b zu verwenden. Da die Eigenfrequenz bei dieser Schwingung jedoch nicht konstant ist, sollen die Stromkreisconstanten so eingestellt werden, dass der Scheitelwert nach $1/2 f$ erreicht wird.

²⁾ Erdungsfaktor bei 1-poliger Schalterprüfung $\alpha = 1,3$; wobei der Schalterpol entsprechend einer betriebsfrequenten wiederkehrenden Spannung von $\frac{U_n}{\sqrt{3}} \alpha$ geprüft wird; U_n bedeutet die obere Nennspannung. Der Amplitudenfaktor beträgt $1,3 \pm 10\%$

Durch die Prüfung bei Abstandkurzschluss soll einerseits das Schaltvermögen des Schalters bei diesem Schaltfall nachgewiesen werden. Andererseits stellt die Prüfung, wie erwähnt, eine Ergänzung zur Prüfung bei 100-%-Klemmenkurzschlussleistung dar, in jenen Fällen, wo die wirkliche Kurve anfänglich oberhalb der repräsentativen Kurve verläuft.

Das vorgeschlagene Prüfkonzept entspricht bei Klemmenkurzschluss ungefähr den bisherigen Regeln für Wechselstrom Hochspannungsschalter, Publ. 0186.1959 des SEV, jedoch mit 2,5mal höheren Eigenfrequenzwerten. Dazu kommt neu eine Prüfung bei Abstandkurzschluss.

Literatur

- [1] H. Schiller und H. Meyer: Les conditions rencontrées dans les réseaux suisses à 50 kV relatives aux puissances de court-circuit et aux fréquences propres. Bull. SEV 45(1954)13, S. 526...530.
- [2] H. Schiller und P. Baltensperger: Les conditions rencontrées dans les réseaux suisses à 150 kV relatives aux puissances de court-circuit et aux fréquences propres. Bull. SEV 46(1955)22, S. 1065...1067.
- [3] P. Hammarlund: Transient Recovery Voltage Subsequent to Short-Circuit Interruption with Special Reference to Swedish Power Systems. Inge.-Vetens.-Akad. Handl. (1946) 189.
- [4] P. Baltensperger: Statistische Untersuchung über Eigenfrequenzverhältnisse in möglichst vielen Netzen. Bull. SEV 46(1955)11, S. 505...516.
- [5] A. M. el-Araby: Untersuchung der transitorischen wiederkehrenden Spannungen in zwei Hauptabschnitten des schweizerischen Hochspannungsnetzes, gemessen mit einem Netzanalysator. Mitteilung aus dem Hochspannungslaboratorium der ETH, Zürich.
- [6] H. P. Saint-Clair und J. A. Adams: Transient Recovery Voltage Characteristics of Electric-Power Systems. Trans. AIEE 61(1942) Sept. S. 666...669.
- [7] P. Baltensperger: Dernières connaissances acquises dans le domaine des phénomènes de coupure et de l'essai des disjoncteurs. Revue Brown Boveri 49(1962)9/10, S. 381...397.
- [8] Association of Edison Illuminating Companies: Transient recovery voltages on power systems. Prepared by a subject committee of the committee on electric switching and switchgear, New York, N. Y., August 1963.

Adresse der Autoren:

H. Bader, Suiselectra, Basel; Dr. P. Baltensperger, AG Brown, Boveri & Cie., Baden (AG); H. Hartmann, Nordostschweizerische Kraftwerke AG, Baden (AG); A. W. Roth, Sprecher & Schuh AG, Aarau.

Besondere Eigenschaften und Anwendungen von Nickel und Nickel-Legierungen für die Elektrotechnik

Magnetische Eigenschaften

Von A. Mager, Hanau

621.315.54

Nach einer kurzen Betrachtung der Grunderscheinungen des Magnetismus (Bezirksstruktur, magnetische Kristalleigenschaften u. a.) wird ein Überblick über die wichtigsten Eigenschaften der nickelhaltigen Legierungen sowohl für den weichmagnetischen als auch für den hartmagnetischen Anwendungsfall gegeben. Die

Après un bref aperçu des phénomènes fondamentaux du magnétisme (structure locale, propriétés magnétiques des cristaux, etc.), l'auteur traite des propriétés les plus importantes des alliages renfermant du nickel, aussi bien pour aimantation faible, que pour aimantation forte. Il examine ensuite les différentes

verschiedenen Formen magnetischer Bauelemente werden im Zusammenhang mit verschiedenen Anwendungsarten besprochen. Besondere Beispiele sollen neuere Anwendungsmöglichkeiten erläutern.

Einleitung, Übersicht

Nickelhaltige Legierungen haben wegen ihren besonderen magnetischen Eigenschaften in der Elektrotechnik einen breiten Anwendungsbereich gefunden. So werden weichmagnetische nickelhaltige Legierungen vor allem in der Steuer-, Mess- und Regeltechnik vielseitig eingesetzt, weniger dagegen bei der Übertragung hoher elektrischer Leistungen. Hiefür stehen vorzugsweise siliziumlegierte Stähle (Dynamo- und Transformatorenbleche) zur Verfügung. Weiterhin spielt Nickel als Legierungspartner in den hochwertigen Dauermagnetlegierungen eine wichtige Rolle.

Entsprechend dieser Zweiteilung in weichmagnetische und hartmagnetische Legierungen ergibt sich unter Berücksichtigung der gemeinsamen Grundlagen des Ferromagnetismus folgende Gliederung für den Stoff der vorliegenden Abhandlung:

1. Grunderscheinungen des Ferromagnetismus.
2. Weichmagnetische Legierungen.
 - 2.1 Die verschiedenen Legierungen und ihre Eigenschaften;
 - 2.2 Anwendungsformen und besondere Anwendungsbeispiele für weichmagnetische Legierungen;
3. Hartmagnetische Legierungen.
 - 3.1 Eigenschaften von Dauermagnetlegierungen.
 - 3.2 Anwendungen von Dauermagnetlegierungen.

Im wesentlichen sollen dabei die Nickel-Eisen-Legierungen im Vordergrund der Betrachtung stehen, wobei jedoch auf eine allzu scharfe Abgrenzung gegen die nicht oder wenig nickelhaltigen Legierungen verzichtet wurde.

1. Grunderscheinungen des Ferromagnetismus

Untersucht man die Metalle hinsichtlich ihres magnetischen Verhaltens (z. B. Kraftwirkung im inhomogenen Feld eines Elektromagneten), so findet man, dass nur relativ wenige metallische Elemente und einige Legierungen starke magnetische Effekte zeigen. Von den metallischen Elementen sind das vor allem die Metalle der Eisengruppe: Eisen, Kobalt und Nickel, ferner einige seltene Erden. Diese jedoch nur bei tiefen Temperaturen, lediglich das Gadolinium kommt mit einem Curiepunkt von ca. 16°C noch in den Bereich der Zimmertemperatur.

Neben Legierungen der drei ferromagnetischen Grundmetalle beobachtet man noch andere Zusammensetzungen, die starke magnetische Effekte aufweisen, obwohl die Legierungsbestandteile für sich allein nicht ferromagnetisch sind. Beispiele hiefür sind die Heuslerschen Legierungen (MnCuSn oder MnCuAl und MnBi). Starke magnetische Effekte zeigen auch eine Reihe von Verbindungen, vor allem gewisse Oxyde, z. B. Ferrite (ferrimagnetische Werkstoffe).

In allen Fällen ist ein Metall der Übergangsgruppe beteiligt, d. h. Elemente oder Ionen, bei denen innere Elektronenschalen nicht vollständig aufgefüllt sind. Ferro- oder Ferrimagnetismus können allem Anschein nach immer nur dann auftreten, wenn unkompensierte atomare magnetische Momente vorliegen.

Zunächst führen freie atomare Momente nur zur Erscheinung des Paramagnetismus mit sehr geringen magnetischen Effekten. Die leichte Magnetisierbarkeit der in der Technik üblichen Werkstoffe lässt sich nur verstehen, wenn

formes de composants magnétiques, en relation avec leurs emplois. Des exemples illustrent de nouvelles possibilités d'applications.

man annimmt, dass innerhalb von Mikrobereichen oder den sog. Weißschen Bezirken die atomaren magnetischen Momente schon ohne ein äusseres Magnetfeld weitgehend parallel zueinander ausgerichtet sind. Diese Ausrichtung beruht auf quantenmechanisch zu verstehenden Austauschkopplungen zwischen den atomaren magnetischen Momenten. In diesem Fall spricht man von ferromagnetischen Werkstoffen.

Die Austauschwechselwirkungen können auch zu einer antiparallelen Ausrichtung der atomaren magnetischen Momente führen, z. B. in aufeinanderfolgenden Atomschichten; es ergibt sich dann ein schwach magnetischer Werkstoff (Antiferromagnetismus).

Bei den ferrimagnetischen Werkstoffen sind zwar die magnetischen Momente innerhalb eines Mikrobereiches antiparallel eingestellt, jedoch überwiegt dabei das magnetische Moment der einen Richtung, so dass eine resultierende Gesamtmagnetisierung entsteht. Fig. 1 zeigt Beispiele für die verschiedenen Ordnungszustände der atomaren magnetischen Momente. Oberhalb einer gewissen Temperatur, der Curietemperatur bei den ferromagnetischen bzw. ferrimagnetischen Werkstoffen oder der sog. Néel-Temperatur bei den antiferromagnetischen Werkstoffen, stellt sich die statistische Richtungsverteilung ein (siehe Fig. 1d).

Während man früher annahm, dass bei den drei stark magnetischen Grundmetallen Eisen, Nickel, Kobalt eindeutig eine ferromagnetische Ordnung vorliegt, ist man heute nicht mehr ganz sicher, ob nicht auch bei diesen Metallen antiparallele Komponenten eine Rolle spielen. Besonders im technisch bedeutsamen NiFe-System scheinen antiferromagnetische Teilordnungen eine gewisse Rolle zu spielen [1]¹⁾.

Mit Hilfe der modernen Neutronenbeugungstechnik ist es in einer Reihe von Fällen, vor allem bei ferrimagnetischen Verbindungen gelungen, Aufschlüsse über die Anordnungen der magnetischen Momente (im wesentlichen der Elektronenspins) zu erhalten. Komplizierte Spinanordnungen wurden mit diesen neuen Methoden besonders bei den seltenen Erden gefunden (z. B. Spiralanordnungen, [2; 3]).

Die von Pierre Weiss vorausgesagten Mikrobereiche können heute mit der Methode der Bitterstreifen [4; 5] direkt sichtbar gemacht werden. Fig. 2 zeigt ein Beispiel solcher Magnetisierungsbereiche an der Oberfläche eines SiFe-Blech.

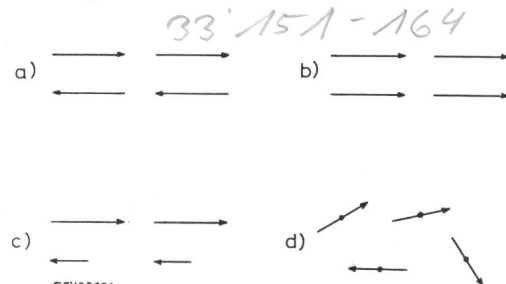


Fig. 1

Ordnungszustände atomarer magnetischer Momente

- a) antiferromagnetische Ordnung; b) ferromagnetische Ordnung;
c) ferrimagnetische Ordnung; d) paramagnetische Anordnung (statistische Richtungsverteilung)

¹⁾ Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

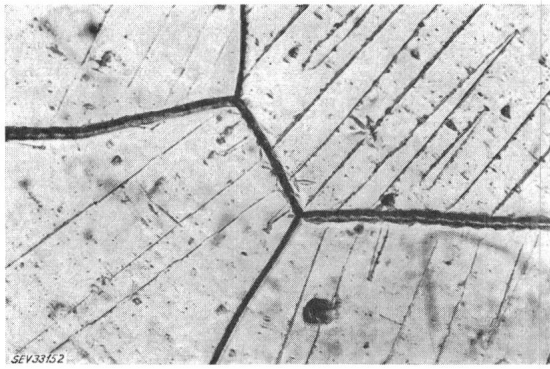


Fig. 2

Mikrobereiche der Magnetisierung auf der Oberfläche eines SiFe-Blech
Die dünneren gestreckten Linien sind die Spuren der Blochwände, die dickeren Linien sind Kristallkorgrenzen (nach D. Ganz [6])
Vergrößerung ca. 200fach

Die sog. Methode der Bitterschen Streifen beruht darauf, dass man durch Aufbringung eines ferromagnetischen feinverteilten Kolloids (magnetische Eisenoxydteilchen in Wasser) die Trennwände oder Blochwände [7] zwischen zwei Weißschen Bezirken sichtbar machen kann. Beobachtet man die Bereichsstrukturen unter dem Mikroskop bei gleichzeitiger Anwendung eines Magnetfeldes, so kann man feststellen, dass die Ummagnetisierung durch eine Verschiebung dieser Blochwände vor sich geht. Bereiche, die mit ihrer Magnetisierungseinrichtung günstig zum angelegten Magnetfeld orientiert sind, verschieben sich auf Kosten der ungünstig orientierten.

Ähnliche Blochwandstrukturen ergeben sich auf der Oberfläche von Nickelkristallen. In Fig. 3 ist neben der Originalaufnahme die schematische Anordnung der Blochwände und der zugehörigen Magnetisierungsrichtung skizziert (Fig. 3a).

Auf kristallographisch einfach orientierten Flächen ergeben sich bestimmte Winkel für die Blochwandstrukturen und für die Magnetisierungsrichtungen. Bei den Blochwänden beobachtet man häufig gewisse Abweichungen von den idealen Richtungen, die durch magnetische Streufelder bedingt sind (wie z. B. bei den dolchartigen Bezirken in Fig. 3; wegen der näheren Deutung sei auf die Spezialliteratur verwiesen).

An weichmagnetischen NiFe-Legierungen gelang es zunächst nicht, solche aufschlussreichen Bitterstreifenbilder zu

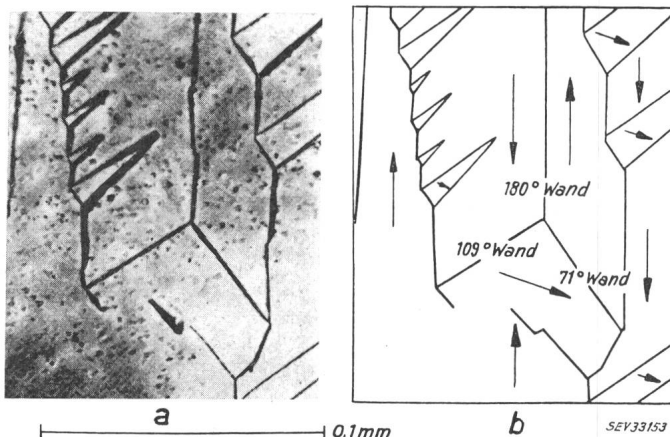


Fig. 3

Blochwandstrukturen auf einem Nickelkristall
nach W. Stephan aus einer Arbeit von Elschner und Andrä [8]
a Originalaufnahme; b schematische Anordnung der Blochwände

erhalten. Erst in neuerer Zeit konnten entsprechende Bereichsstrukturen auch an weichmagnetischen 50-0/oigen NiFe-Legierungen beobachtet werden [9].

Aus Messungen an ferromagnetischen Einkristallen geht hervor, dass die Magnetisierung in der Regel bestimmte feste Richtungen im Kristall einnimmt. Fig. 4 zeigt die verschiedenen Magnetisierungskurven, die sich an einem Nickeleinkristall ergeben, wenn die Magnetisierung in folgenden Richtungen der kubisch-flächenzentrierten Nickeleinkristalle vorgenommen wird:

1. in Richtung der Würfeldiagonalen mit der kristallographischen Bezeichnung [111],
2. in Richtung der Flächendiagonalen [110],
3. in Richtung der Würfelkante [100].

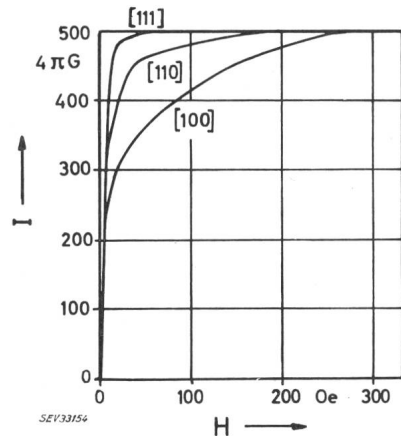


Fig. 4

Magnetisierungskurven von Nickeleinkristallen
gemessen in verschiedenen kristallographischen Richtungen
(nach S. Kaya [10])
I Magnetisierung; H magnetische Feldstärke

Wie Fig. 4 zeigt, lässt sich Nickel in der Richtung der Raumdiagonalen am leichtesten magnetisieren. Erst durch Felder in der Größenordnung von über 200 Oe kann eine vollständige Magnetisierung in Richtung der Würfelkanten erzwungen werden. Ohne ein äusseres Feld wird daher beim Nickel die Magnetisierung vorzugsweise in den [111]-Richtungen liegen. Damit werden die festen Winkelbeziehungen in den Bitterstreifenabbildungen 2 und 3 verständlich (um Streufelder zu vermeiden, bilden die Spuren der Blochwände die Winkelhalbierende zu den angrenzenden Magnetisierungsrichtungen). Bei Eisen und Siliziumeisen ist umgekehrt die Würfelkante die Richtung leichtester Magnetisierbarkeit. Entsprechend diesen Unterschieden ergeben sich verschiedene Wandtypen. Beim SiFe finden sich 180- und 90°-Wände, beim Nickel werden 180- und 71- bzw. 109°-Wände beobachtet (vergl. Fig. 3). Die Tendenz der Magnetisierung, bestimmte Vorzugslagen einzunehmen, beschreibt man mit der sog. magnetischen Kristallenergie K_1 . Im Falle des Eisens und des Silizium-Eisens ist K_1 positiv, hierbei sind die Würfelkanten Vorzugslage. Im Falle des Nickels ist K_1 negativ und damit sind die Raumdiagonalen des Würfels die Vorzugslagen der Magnetisierung. Nähere Einzelheiten über die Abhängigkeit der Kristallenergie von der Legierungszusammensetzung bei den NiFe-Legierungen werden in Abschnitt 2.1 behandelt.

Aus den Einkristallkurven geht auch hervor, dass man beim Magnetisierungsprozess deutlich zwei Abschnitte unter-

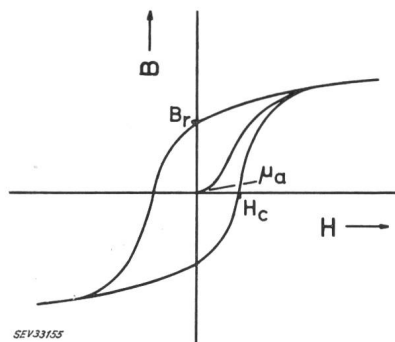


Fig. 5

Typische Hystereseschleife eines polykristallinen ferromagnetischen Materials ohne Vorzugslage

Die eingezeichnete Neukurve ergibt sich, wenn man vom entmagnetisierten Zustand ausgeht

B magnetische Induktion; H magnetische Feldstärke; B_r Remanenz; μ_a Anfangspermeabilität; H_c Koerzitivfeldstärke

scheiden kann. Im steilen Teil der Magnetisierungskurve geschieht die Ummagnetisierung vorzugsweise durch Wandverschiebungen, wie sich durch mikroskopische Beobachtungen an den Bitterstreifenbildern feststellen lässt. Bei einer Magnetisierung in Vorzugsrichtung (z. B. beim Ni in [111]-Richtung) ist der Magnetisierungsvorgang damit praktisch abgeschlossen. Bei einer anderen Orientierung hingegen muss die Magnetisierung zusätzlich aus den Vorzugsrichtungen herausgedreht werden. Dieser Vorgang der Drehung läuft in der Regel nur bei höheren Feldstärken ab. Wie schon erwähnt, sind hierfür beim Nickel ca. 200 Oe erforderlich. Der Magnetisierungsprozess läuft also im allgemeinen in zwei verschiedenen Vorgängen ab, durch Blochwandverschiebungen und durch Drehungen.

Das gilt auch im grossen und ganzen für ein polykristallines Material, jedoch sind dabei die Prozesse nicht mehr so deutlich voneinander getrennt. An einem polykristallinen Material mit regelloser Orientierung findet man daher meist die bekannte abgerundete Form der Hystereseschleife (Fig. 5).

Der Inhalt der Schleifenfläche ist ein Mass für die beim vollständigen Ummagnetisierungsprozess verbrauchte Energie. Die Abschnitte auf der H -Achse bezeichnen die Koerzitivfeldstärke H_c , der Schnittpunkt mit der B -Achse wird als Remanenz B_r bezeichnet. Während bei der Magnetisierungskurve für die Nischeinkristalle die Magnetisierung $B-H$ aufgetragen wurde, ist in Fig. 5 die magnetische Induktion B dargestellt. Bei den weichmagnetischen ferromagnetischen Werkstoffen ist der Unterschied zwischen der Kurve der Magnetisierung $B-H$ und der Kurve der magnetischen Induktion B relativ gering, so dass man im allgemeinen auch in der B -Darstellung von einer Sättigungsinduktion spricht, obwohl eine Sättigung streng genommen nur für die Magnetisierung $B-H$ gilt.

Eine weitere, für die magnetischen Werkstoffe bedeutsame Grösse ist die Magnetostraktion λ . Wird ein ferromagnetischer Werkstoff magnetisiert, so beobachtet man in der Regel eine Veränderung seiner Länge. Die relative Längenänderung bei einer Magnetisierung von sog. unmagnetischen Zustand bis zur magnetischen Sättigung bezeichnet man als Sättigungsmagnetostraktion λ_s . Ist ein Ferromagnetikum mechanischen Spannungen ausgesetzt, so muss beim Magnetisierungsvorgang infolge der Längenänderung durch die

Magnetostraktion Arbeitsleistung gegen die Wirkung dieser Spannungen aufgebracht werden.

Kristallenergie und Magnetostraktion sind nun die für magnetische Weichheit oder Härte entscheidenden Grundkonstanten. Will man einen leicht magnetisierbaren Werkstoff erhalten, so wird man die Energiebeträge, die ein Festhalten bestimmter Magnetisierungsrichtungen bewirken, klein halten, d. h. kleine Kristallenergie, kleine Magnetostraktion, kleine innere Spannungen anstreben.

Günstige hartmagnetische Eigenschaften ergeben sich in der Regel bei grosser Kristallenergie, grosser Magnetostraktion und grossen inneren Spannungen (siehe dazu jedoch auch den Abschnitt 3).

2. Weichmagnetische Legierungen

2.1 Die verschiedenen Legierungen und ihre Eigenschaften

Wie bereits erwähnt, lassen sich gute weichmagnetische Eigenschaften erreichen, wenn Kristallenergie und Magnetostraktion klein sind. Fig. 6 zeigt den Verlauf der magnetischen Kristallenergie K_1 für NiFe-Legierungen in Abhängigkeit vom Ni-Gehalt, ab ca. 30 % Ni.

Während Reineisen einen K_1 -Wert von ca. 450 000 erg/cm³ aufweist, bewegen sich die K_1 -Werte der 30...50-%igen NiFe-Legierungen zwischen 5000 bis etwa 10 000 erg/cm³. Einen Nulldurchgang für die Kristallenergie erhält man unter technisch üblichen Abkühlbedingungen bei ca. 75 % Ni. Für Reinnickel ergeben sich relativ hohe negative K_1 -Werte. Werkstoffe mit relativ günstigen magnetischen Eigenschaften wird man daher bei Nickelgehalten zwischen 30...60 % erwarten, während sich die günstigsten Magnetwerte für Legierungen bei etwa 75 % Ni ergeben sollten.

Da bei einem Nickelgehalt von etwa 80 % auch die Magnetostraktion sehr kleine Werte annimmt (Nulldurchgang der Sättigungsmagnetostraktion bei 81 % Ni), sind bei den ca. 75-%igen NiFe-Legierungen die günstigsten Voraussetzungen für eine gute Magnetisierbarkeit gegeben. Durch Zulegieren von weiteren Legierungsanteilen, wie Cr, Mo, Cu u. a., lassen sich die Verhältnisse noch weiter verbessern (gleichzeitig sehr kleine K_1 - und λ -Werte).

Je leichter sich ein Werkstoff ummagnetisieren lässt, umso grösser ist seine Permeabilität. Als Anfangspermeabili-

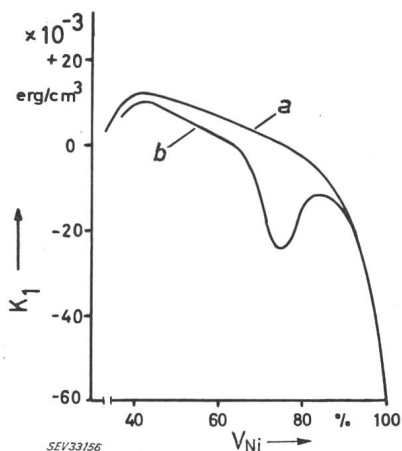


Fig. 6

Verlauf der magnetischen Kristallenergie K_1 von NiFe-Legierungen nach Hall [11]

V_{Ni} Nickel-Gehalt; a abgeschreckte Proben; b langsam gekühlte Proben

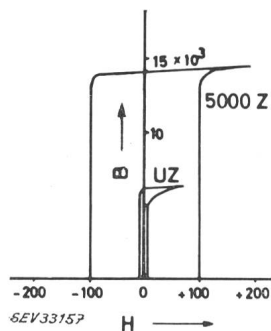


Fig. 7

Typische Rechteckschleifen verschiedener Magnetwerkstoffe

UZ Legierung mit sehr schmaler Rechteckschleife; 5000 Z wie UZ, aber mit höherer Sättigungsinduktion und höherer Koerzitivfeldstärke
 B magnetische Induktion; H magnetische Feldstärke

tät bezeichnet man die Anfangssteigung der Neukurve bei verschwindender Aussteuerung (vergl. Fig. 5). Entsprechend der technischen Anwendung wird die Permeabilität häufig bei 50 Hz und einer Feldstärkeaussteuerung von 5 mOe (Scheitelwert) gemessen.

Höchste Permeabilitätswerte ergeben sich in der Permalloygruppe mit ca. 70...80 % Nickelgehalt und Zusätzen von 0...5 % Cu, 2...5 % Cr bzw. Mo. Die Permeabilitätswerte solcher Materialien bewegen sich zwischen ca. 16 000 bis etwa 350 000. Die Sättigungsinduktionen liegen infolge der hohen Nickelgehalte jedoch relativ niedrig, bei ca. 8 kG. Die Materialien eignen sich daher vorzugsweise für Anwendungen bei geringeren Aussteuerungen, wie sie in der Nachrichtentechnik vorkommen. Höhere Aussteuerungen lassen sich mit den etwa 50-%igen NiFe-Legierungen erzielen. Die Sättigungswerte dieser Legierungen liegen bei etwa 15...16 kG. Die zugehörigen Permeabilitätswerte μ_5 bewegen sich zwischen 2500 und etwa 10 000.

Durch eine Magnetfeld-Sonderbehandlung lassen sich neuerdings auch an den etwa 50-%igen NiFe-Legierungen höhere Permeabilitätswerte von ca. 30 000...80 000 erreichen.

NiFe-Legierungen mit ca. 36 % Ni-Gehalt weisen bei etwa 13 kG wiederum eine etwas niedrigere magnetische Sättigungsinduktion auf. Die Permeabilitätswerte im Anfangsbereich, d. h. μ_5 , liegen zwischen ca. 1600...3000. Die 36-%igen NiFe-Legierungen zeichnen sich vor allem durch eine weitgehend konstante Permeabilität aus.

Wie aus einer Betrachtung des Verlaufs der Neukurve in Fig. 5 hervorgeht, nimmt die Steigung dieser Kurve mit wachsender Aussteuerung zunächst bis auf einen Maximalwert zu; einen entsprechend ansteigenden Verlauf zeigt die Permeabilitätskurve. Während Nickellegierungen mit etwa 75 % Ni-Gehalt und die ca. 50-%igen NiFe-Legierungen jedoch schon im Anfangsteil einen relativ starken Permeabilitätsanstieg aufweisen, können die ca. 36-%igen NiFe-Legierungen zu weit höheren Feldstärken ausgesteuert werden, ehe ein merklicher Anstieg der Permeabilität einsetzt. Besonders für Anwendungen bei hohen Frequenzen ist von Bedeutung, dass die ca. 36-%igen NiFe-Legierungen sich durch einen sehr hohen spezifischen Widerstand auszeichnen (geringerer Wirbelstromeffekt).

Die bisher genannten Werkstoffe weisen im allgemeinen die typische in Fig. 5 gezeigte Form der Hystereseschleife auf. Durch besondere Wärme- und Glühbehandlungen lassen sich Werkstoffe mit rechteckigen Schleifenformen erhalten

(Fig. 7). An etwa 50-%igen Nickeleisen-Legierungen können so fast ideale Rechteckschleifen erreicht werden. Durch besondere Walz- und Glühbehandlung lässt sich bei ihnen eine Kristallausrichtung erzielen. Die Kristallite sind dabei mit ihren Vorzugsachsen längs und quer zur Walzrichtung ausgerichtet, so dass der Ummagnetisierungsprozess wie bei einem Einkristall allein durch Wandverschiebungen bis fast in die Sättigung hinein ablaufen kann. Eine solche Ausrichtung der Kristalle bezeichnet man auch als Textur oder im betrachteten Fall als Würfeltextur, da jeweils Würfelkanten des Kristallgitters parallel zur Oberfläche des Bleches und zur Walzrichtung ausgerichtet sind (über die Auswirkung von Texturen auf die Magnetisierungseigenschaften vergl. [12]).

Weitgehend rechteckige Magnetisierungsschleifen lassen sich auch an geeigneten Legierungen mit ca. 75 % Nickelgehalt erzielen. Sie beruhen nicht auf einer Texturausbildung und zeichnen durch eine besonders schmale Hystereseschleife aus.

NiFe-Legierungen mit ca. 30 % Ni-Gehalt haben relativ niedrige Curiepunkte. Ihre Magnetisierungseigenschaften ändern sich sehr stark mit der Temperatur. Diese Besonderheit kann für bestimmte Anwendungen ausgenutzt werden, z. B. Temperaturkompensation von Magnetkreisen.

Alle weichmagnetischen Werkstoffe verlangen eine sorgfältige Schlussglühbehandlung. Die Glühbehandlung dient verschiedenen Aufgaben. Einmal kann damit die gewünschte Kristallausbildung erzielt werden, zum anderen sorgt sie dafür, dass innere Spannungen, die zu einer Verschlechterung der weichmagnetischen Eigenschaften führen, weitgehend abgebaut werden. Da die thermische Behandlung auch die K_1 -Werte beeinflusst (Fig. 6), können über diese Größe auch die Magnetisierungseigenschaften entscheidend verändert werden. Wenn die Glühungen vorzugsweise in einer Wasserstoff-Atmosphäre durchgeführt werden, wird in vielen Fällen gleichzeitig eine Reinigungsbehandlung bewirkt. (Über den Einfluss von Fremdstoffen auf die Eigenschaften weichmagnetischer Werkstoffe vergl. [13] und [14].)

2.2 Anwendungsformen und besondere Anwendungsbeispiele für weichmagnetische Legierungen

Beim Einsatz von weichmagnetischen Metallen und Legierungen für Wechselstromanwendungen ist zu beachten, dass im Magnetmaterial Wirbelströme induziert werden. Die Verwendung von Massivmaterial beschränkt sich daher auf vorwiegend statische Anwendungen, wie sie z. B. bei Relais, Polschuhen und dgl. vorkommen. Ohne störende Wirkung sind die Wirbelströme auch bei Abschirmgehäusen aller Art. Für höhere Felder und geringere Anforderungen an die Abschirmwirkung genügen Reineisen oder SiFe, bei höheren Ansprüchen an die Abschirmwirkung wird man auf die 50...75-%igen NiFe-Legierungen übergehen. Bei allen anderen Wechselstromanwendungen muss das Material je nach Höhe der Frequenz mehr oder weniger fein unterteilt werden. Für Netzfrequenzanwendungen genügen in der Regel gestanzte Bleche oder Bänder von 0,1...0,3 mm Dicke. Da für den Einfluss der Wirbelströme ausser der Blechdicke auch die Permeabilität des Materials massgebend ist, sind für weichmagnetische Spitzenmaterialien mit den höchsten Permeabilitätswerten die dünneren Abmessungen des angegebenen Dickenbereichs zu wählen. Die mit einfachen Modellvor-

stellungen berechnete Grenzfrequenz für ein Sinken der Permeabilität auf 70 % des Ausgangswertes ergibt sich zu:

$$f_g = \frac{\varrho}{\mu d^2} \cdot 10^6 \quad [\text{Hz}]$$

worin der spezifische Widerstand ϱ in $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$, die Blechdicke d in mm und die Permeabilität μ als relativer Wert einzusetzen sind. Die Werte für den spezifischen Widerstand der technisch wichtigen weichmagnetischen NiFe-Legierungen bewegen sich zwischen 0,45...0,75 $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$. Da die Grenzfrequenz dem Quadrat der Blechdicke umgekehrt proportional ist, lässt sich der Anwendungsbereich der magnetischen Legierungen bis zu sehr hohen Frequenzen erweitern, wenn man d genügend klein wählt. Die vorstehende theoretische Beziehung für die Grenzfrequenz gilt jedoch nur bis zum Auftreten von merklichen Spinrelaxations-Effekten [15; 16]. Durch den Übergang auf ultradünne Bänder mit Dicken bis zu 3 μm lassen sich experimentell ermittelte Grenzfrequenzen bis zu ca. 10 MHz bei den 36-%igen NiFe-Legierungen und bis etwa 1 MHz bei den hochpermeablen ca. 75-%igen NiFe-Legierungen erreichen.

Eine andere Möglichkeit, die Wirbelstromeffekte durch eine feine Unterteilung des Materials herabzusetzen, bietet die Anwendung von pulverförmigen Magnetmaterial. So können z. B. Eisen- oder weichmagnetische Nickeisen-Pulver mit Hilfe von Kunststoffen zu sog. Massekernen gepresst werden.

Die Massekerne spielen eine wichtige Rolle bei der Pulpinisierung der Fernsprechleitungen. In Europa sind sie weitgehend durch andere Materialien (Ferrite) verdrängt worden, während sie in den Vereinigten Staaten noch im grossen Umfang eingesetzt werden. Bei diesen sog. Verbundwerkstoffen lassen sich infolge des Scherungseinflusses jedoch nur Permeabilitätswerte bis in der Grössenordnung von etwa 100 erreichen.

Die idealen magnetischen Eigenschaften lassen sich an weichmagnetischen Werkstoffen nur in vollständig geschlossenen Magnetkreisen ermitteln. Die praktischen Magnetkreise weisen fast stets eine gewisse Scherung auf. Die magnetisch idealen Formen sind der Stanzringkern oder der

Ringbandkern. Luftspalte im Magnetkreis bewirken infolge ihres hohen magnetischen Widerstandes eine starke Herabsetzung der effektiven Permeabilität eines Magnetkernes. Um einen geschlossenen Ringkern zu bewickeln, ist jedoch ein erhöhter Wickelaufwand erforderlich. Für viele technische Anwendungen wird man daher einen geringen Luftspalt in Kauf nehmen, um das Kernmaterial nachträglich in eine fertig bewickelte Spule einsetzen zu können.

Bekannt sind die in der Kleintransformatorentechnik üblichen Stanzteile, wie M-, EI- und U-Bleche (Fig. 8). Für kleinere Übertrager und Transformatoren wurden diese Typen neuerdings durch die EE-Reihe ergänzt. Um einen kleinen effektiven Luftspalt zu erhalten, werden diese Bleche wechselseitig geschichtet. So kann der magnetische Fluss den Luftspalt eines Stanzbleches auf dem Umweg über das Nachbarblech umgehen. Da die Abstände zwischen den einzelnen Blechen relativ gering sind und ausserdem der Übergangsquerschnitt sehr gross ist, ergeben sich damit relativ günstige Scherungsverhältnisse. Der Scherungseinfluss ist keinesfalls zu vernachlässigen, er macht sich besonders bei kleinen Blechpaketen, bei dickeren Blechen und bei höheren Permeabilitäten bemerkbar [17]. Bei der EE-Reihe ist infolge der geringen Überlappungslänge der wechselseitig geschichteten Bleche der Scherungseinfluss besonders hoch.

Eine gewisse Scherung tritt auch bei den Ringbandkernen auf. Sie ist jedoch in den meisten Fällen zu vernachlässigen [20].

Die Scherung ist nicht in allen Fällen von nachteiliger Wirkung. Durch die Herabsetzung der effektiven Permeabilität kann entsprechend der Beziehung für die Grenzfrequenz auch ein dickeres Material für höhere Frequenzen eingesetzt werden. Zugleich werden die Remanenz und die Ummagnetisierungsverluste herabgesetzt. Es ist z. B. ein richtig dimensionierter Luftspalt in den Anwendungsfällen erforderlich, wenn neben der Wechselstrom-Aussteuerung ein Gleichfeld zur Wirkung kommt (z. B. Siebdrosselspule, Ausgangstransformator für Eintaktschaltung u. a.). In diesen Fällen wird man bei Stanzteilen eine nicht wechselseitige Schichtung der Bleche vornehmen.

Da die Handhabung von Stanzteilen in der Regel relativ unbequem ist, wurden in neuerer Zeit komplette Kernbauelemente entwickelt. Ein weiterer Grund für die Entwicklung neuer Kernformen ist die Einführung von typischen Materialien mit einer Vorzugslage in Walzrichtung [19]. Eine geeignete Bauform entsteht durch Auftrennung z. B. eines durch Kunstharz gebundenen Ringbandkernes mit Hilfe des Trennschleifverfahrens. Man erhält so einen Schnittbandkern. Durch sorgfältige Bearbeitung der Trennflächen können die effektiven Luftspalte bei dieser Kernform sehr klein gehalten werden. Häufig geht man dabei von einer ovalen oder rechteckigen Bandkernform aus, so dass sich nach dem Trennen die beiden Hälften des Schnittbandkernes bequem in den fertig bewickelten Spulenkörper einsetzen lassen. Die Kernhälften können dabei entweder durch Verklebung oder mit Hilfe eines Spannbandes zusammengehalten werden. Die Typenreihen der Schnittbandkerne sind an die entsprechenden Blechkernnormen angepasst.

Ein anderes neues Kernbauelement sind die geklebten Blechpakete. Hierbei werden die einzelnen Stanzteile mit Hilfe von Kunstharz zu fertigen Kernpaketen verklebt. Auch hier können ähnlich wie bei den Schnittbandkernen durch

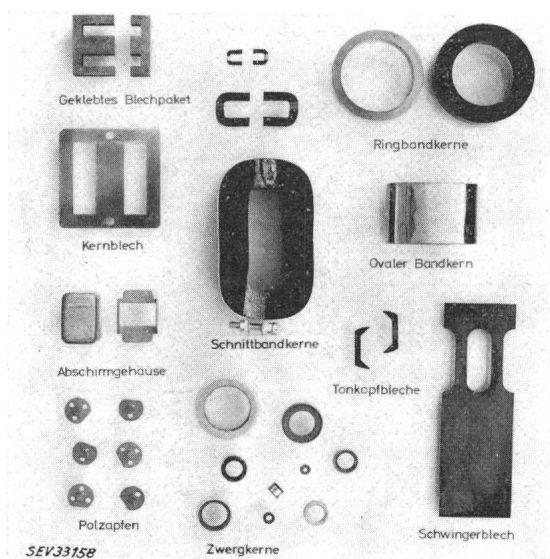


Fig. 8

Anwendungsformen weichmagnetischer Werkstoffe

Massivmaterial, Ringbandkerne, Schnittbandkerne, Stanzteile, Abschirmungen, Schwingen u. a.

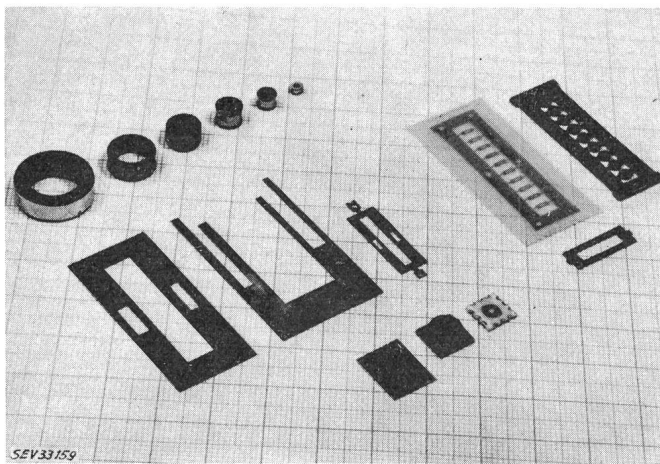


Fig. 9

Anwendungsformen für dünne Bänder
Zwergkerne, Folienkernformen, ferner Tranfluxorformen

entsprechende Feinbearbeitung der Trennflächen sehr geringe effektive Luftspalte eingehalten werden. Andererseits ist es möglich, durch definiert eingeschliffene Luftspalte bestimmte A_L -Werte einzuhalten (der A_L -Wert ist der auf eine Windung bezogene Induktivitätswert des betreffenden Kernes).

Eine Sonderform der geklebten Blechpakete sind die Schwingerpakete. Magnetostruktive Schwinger werden vor allem für industrielle Ultraschall-Waschanlagen, zum Ultraschallbohren und für Ultraschall-Ortungszwecke eingesetzt (Ortung von Fischeschwärmen). Als Material für Schwinger sind vor allem ca. 50-0/ige NiFe-Legierungen, Reinnickel und für höchste Energiekonzentrationen ca. 50-0/ige CoFe-Legierungen im halbharten Zustand geeignet (sie haben günstigere elastische Eigenschaften als weichgeglühtes Material).

Für Hochfrequenz- und Impulsanwendungen wurden besonders angepasste Kernformen entwickelt: Kleine Ringbandkerne mit einem keramischen oder metallischen Träger als Zwerg- oder Rohrkern ferner mit Hilfe der modernen Photoätztechnik hergestellte Folienkerne (Fig. 9).

Während für Netztransformatoren in der Regel gestanzte SiFe-Bleche oder Schnittbandkerne aus orientiertem SiFe-Blech eingesetzt werden, verwendet man die hochwertigen NiFe-Legierungen vorzugsweise in Übertragern, Wandlern und Filtern. Es ist nicht möglich, an dieser Stelle näher auf die zahlreichen und verschiedenartigsten Anwendungen in Nachrichten-, Mess- und Regeltechnik einzugehen. Es soll daher nur noch über einige besondere, technisch wichtige Anwendungen berichtet werden.

Eine besondere Form des Stromwandlers findet seine Anwendung im Fehlerstromschutzschalter. Hin- und Rückleitung eines Verbrauchers werden dabei durch einen Ringbandkern geführt. Bei einwandfrei isoliertem Gerät heben sich die magnetischen Wirkungen von Hin- und Rückleiter im Ringkern auf, es tritt keine Ummagnetisierung ein. Eine defekte Isolierung ruft einen Erdstrom hervor, Hin- und Rückstrom kompensieren sich nicht mehr vollständig, die Differenz bewirkt eine Ummagnetisierung des Kernes und führt so über eine Sekundärwicklung zur Auslösung des Fehlerstromschutzschalters. Da hierbei mit relativ geringen Differenzströmen gearbeitet werden kann, ist diese Schutzanordnung dem bisher üblichen System (Auslösung der vorgeschalteten Schmelz- oder Überstromsicherung durch den

Erdschlußstrom) bei weitem der Vorzug zu geben. Für das neue Schutzsystem genügt eine relativ schwach dimensionierte Hilfserdung. Um eine hohe Empfindlichkeit zu erreichen, wählt man hierzu vor allem etwa 75-0/ige NiFe-Legierungen oder etwa 50-0/ige NiFe-Legierungen mit Sonderbehandlung.

In hermetisch abgeschlossenen Kontaktsätzen für Fernsprechvermittlungszwecke (Schutzgaskontakte) wird eine etwa 50-0/ige NiFe-Legierung für gleichzeitig drei verschiedene Anforderungen verwendet:

1. Weichmagnetisches Material;
2. Federmaterial;
3. Einschmelzlegierung mit einem dem Glas des Schutzröhrchens angepassten Ausdehnungsverhalten.

Materialien mit Rechteckschleifencharakteristik werden u. a. für Magnetverstärker, für Zähl- und Speicherkerne und zur Impulsformung eingesetzt. Für hochempfindliche Magnetverstärker-Eingangsstufen sowie für Zähl- und Speicherkerne (Zwergkerne) werden vorzugsweise Permalloylegierungen mit Rechteckschleife und geringen Ummagnetisierungsverlusten verwendet. Zur Erhöhung der Schaltgeschwindigkeit ist es unter Umständen zweckmässig, Material mit erhöhter Koerzitivfeldstärke einzusetzen.

Ein statisches Steuer- und Speicherelement bilden die sog. Transfluxoren. Es handelt sich dabei um mehrfach geschlossene Magnetkreise, wobei durch Magnetisierungsimpulse im grossen Kreis die Übertragungseigenschaften in einem zweiten gekoppelten Kreis gesteuert werden können (Fig. 9). (Wegen der näheren Erläuterungen sei auf die Spezialliteratur verwiesen [16; 20]).

3. Hartmagnetische Werkstoffe

3.1 Eigenschaften von Dauermagnetlegierungen

Dauermagnetmaterialien weisen im allgemeinen eine grosse mechanische Härte auf. Weichmagnetische Materialien ergaben sich — wie bereits ausgeführt — bei kleiner Kristallenergie, kleiner Magnetostruktion und kleiner innerer Spannung. Daher sollte man erwarten, dass sich die Dauermagnete durch besonders grosse Werte dieser Materialeigenschaften auszeichnen. In gewissem Masse trifft das auch zu,

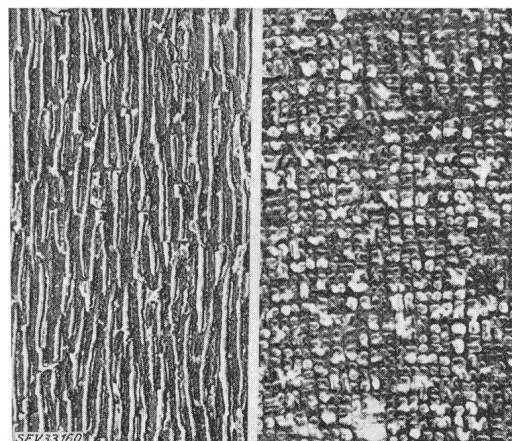


Fig. 10

Die Mikrostruktur in einer AlNiCo-Legierung im Zustand optimaler Dauermagneteigenschaften

- Es handelt sich dabei um magnetfeldgeglühtes Material mit Stengelkristallisation
- a Bildebene parallel und b Bildebene senkrecht zur Feldrichtung während der Wärmebehandlung
Vergrösserung ca. 50 000fach

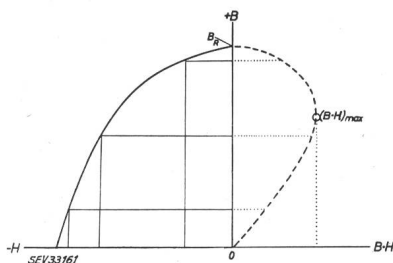


Fig. 11

Entmagnetisierungskurve (2. Quadrant der Hystereseschleife) eines Dauermagneten

Bildung des Energieproduktes nach $B \cdot H$ (gestrichelt),
optimaler Arbeitspunkt

aber die hervorragenden Eigenschaften moderner Dauermagnete beruhen im wesentlichen auf einem anderen Effekt. Durch feine Ausscheidungen oder Aufteilung in kleine Teilchen erreicht man es bei diesen Materialien, dass die Wandverschiebungen blockiert sind. Alle hochwertigen Dauermagnete enthalten daher feindispers verteilte Inhomogenitäten. Ein Beispiel für eine solche Struktur einer AlNiCo-Legierung zeigt Fig. 10 in einer elektronenmikroskopischen Aufnahme nach *De Jong, Smeets und Haanstra* [21].

Während man bei weichmagnetischen Werkstoffen vorwiegend mit geschlossenen Magnetkreisen arbeitet, dienen die Dauermagnete in der Regel dazu, in bestimmten Luftvolumen ein möglichst starkes Feld zu erzeugen. Man hat es daher im allgemeinen mit relativ stark gescherten Kreisen zu tun, bei denen ein erheblicher Teil der magnetischen Kraftlinien den Luftraum durchsetzen soll. Die Pole, die an den Begrenzungsflächen zwischen Magnetmaterial und Luftraum auftreten, sind dem remanenten Magnetismus entgegengerichtet und versuchen durch ihr Gegenfeld, die Magnetisierung im Dauermagneten zu verringern. Der Dauermagnet soll daher einen möglichst grossen Widerstand gegen eine Ummagnetisierung aufweisen, d. h. man braucht eine möglichst hohe Koerzitivfeldstärke. Andererseits darf auch die Remanenz nicht zu tief liegen, wenn man eine hohe Flussdichte erzielen will.

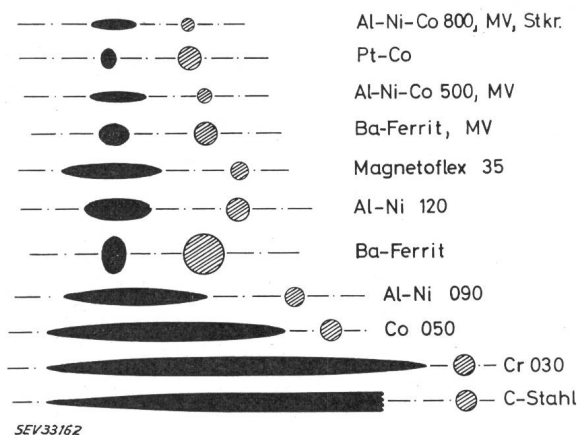


Fig. 12

Relative Grösse von optimal gesicherten rotationselliptischen Dauermagneten gleichen Energieinhaltes für verschiedene typische Magnetwerkstoffe
links: Längsschnitte (schwarz ausgefüllt); *rechts:* Querschnitte (schraffiert)

MV magnetische Vorzugslage durch Magnetfeldglühung; *Stkr.* Stengelkristallisation

Bei Dauermagneten interessiert besonders der Teil der Hystereseschleife, der im 2. Teil des Quadranten liegt, d. h. bei positiven Induktionswerten und negativen Feldstärkewerten. Fig. 11 zeigt schematisch eine solche Magnetisierungskurve. Bei sehr starker Scherung erhält man eine verhältnismässig niedrige Induktion, der Magnet wird nicht vollständig ausgenutzt. Eine ähnlich geringe Ausnutzung ergibt sich bei zu kleiner Scherung. Man erhält zwar eine hohe Remanenz, muss aber den Magneten unnötig lang dimensionieren. Der Magnetkreis ist optimal dimensioniert, wenn das Produkt aus zugehöriger Arbeitsinduktion und -Feldstärke ein Maximum ergibt. In Fig. 11 sind entsprechende Wertepaare eingetragen, die Fläche der davon begrenzten Rechtecke gibt unmittelbar die jeweils erzielten $B \cdot H$ -Produkte an. Rechts in der Figur ist der entsprechende Verlauf der $B \cdot H$ -Kurve eingezeichnet. Bei optimaler Scherung erhält man ein maximales Energieprodukt $(B \cdot H)_{max}$. Der entsprechende optimale Arbeitspunkt ist auf der $B \cdot H$ -Kurve durch einen kleinen Kreis eingezeichnet.

Die Magnetstähle der früheren Zeit wiesen relativ geringe Koerzitivfeldstärken auf. Man brauchte lang-ausgedehnte Magnetformen mit relativ geringem Querschnitt. Eine typische Form für diese nach heutigen Begriffen relativ schwachen Magnete ist der Hufeisenmagnet. Die heutigen Magnetformen sind wesentlich kürzer und gedrungener.

Eine genaue Berechnung der Scherungskonstanten technisch üblicher Magnetkreise ist im allgemeinen nicht möglich. Theoretisch einfach lassen sich jedoch die Scherungsverhältnisse an Rotationsellipsoiden bestimmen. In Fig. 12 sind in anschaulicher Darstellung solche optimal dimensionierten Ellipsoidformen für verschiedene typische Werkstoffe zusammengestellt. Alle dargestellte Ellipsoide haben den gleichen magnetischen Energieinhalt. Die Grösse der Ellipsoide ist für die einzelnen Materialien entsprechend gewählt ²⁾. Die Darstellung gibt zugleich einen eindrucksvollen Überblick über die Entwicklung der Dauermagnetwerkstoffe zu immer kleineren Dimensionen.

Eine Zusammenstellung von Entmagnetisierungskurven für verschiedene AlNi- und AlNiCo-Dauermagnetwerkstoffe zeigt Fig. 13. Die optimalen Arbeitspunkte sind wiederum durch kleine Kreise im Kurvenverlauf eingezeichnet.

Die hartmagnetischen AlNi-Legierungen enthalten 12...13 % Al, 22...28 % Ni (der Rest ist Fe) und erreichen Güteprodukte um $1 \cdot 10^6$ G-Oe. Die Zusammensetzungen der AlNiCo-Legierungen liegen etwa im folgenden Bereich: 7...13 % Al, 13...28 % Ni, 12...30 % Co, ferner evtl. Zusätze

²⁾ Das Dimensionsverhältnis der Ellipsoide ergibt sich aus dem Entmagnetisierungsfaktor mit Hilfe der Gleichungen:

$$H_i = \frac{-N}{4\pi} I \quad \text{und} \quad I = B - H_i$$

worin die Werte für den Arbeitspunkt einzusetzen sind:

$$B = B_{arb.} \quad - \quad H_i = H_{arb.}$$

(Arbeitsfeldstärke als positiver Wert eingesetzt.) Der Entmagnetisierungsfaktor muss also gemäss:

$$\frac{N}{4\pi} = \frac{H_{arb.}}{B_{arb.} + H_{arb.}}$$

gewählt werden.

Für den Zusammenhang zwischen Entmagnetisierungsfaktor und dem Dimensionsverhältnis $1/d$ können entsprechende Kurvendarstellungen aus den Lehrbüchern des Magnetismus benützt werden [22; 23; 24].

Das Volumen der Ellipsoide ist jeweils umgekehrt proportional dem maximalen Energieprodukt.

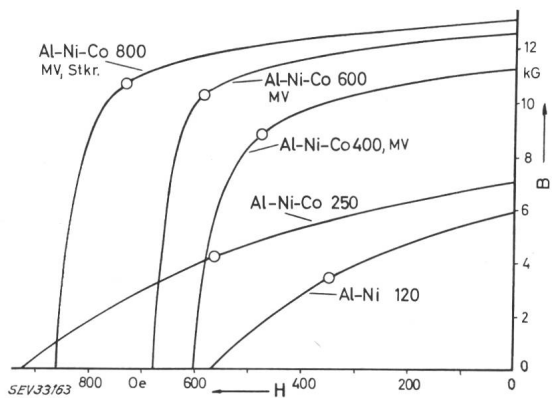


Fig. 13

Entmagnetisierungskurven von AlNi- und AlNiCo-Dauermagnetwerkstoffen

von Cu und Ti (der Rest ist Fe). Die Energieprodukte bewegen sich in der Grösse von ca. $2 \cdot 10^6 \text{ G} \cdot \text{Oe}$. Durch eine Magnetfeldtemperung erreicht man Werte bis zu $5 \cdot 10^6 \text{ G} \cdot \text{Oe}$, durch zusätzliche Kristallausrichtung (Stengelkristallisation durch gerichtete Erstarrung aus dem Guss) können diese Werte bis auf $8 \cdot 10^6 \text{ G} \cdot \text{Oe}$ erhöht werden.

Wie schon erwähnt, lassen sich Dauermagnetlegierungen im allgemeinen nur schwer bearbeiten. Die Formgebung erfolgt daher vorzugsweise durch Giessen oder Sintern.

Abgesehen von wenigen Ausnahmen, z. B. einem Werkstoff aus CuNiFe (z. B. 20 % Ni, 20 % Fe, 60 % Cu) lassen sich die technisch üblichen Dauermagnetlegierungen im ausgehärteten Zustand nur durch Schleifen bearbeiten. Im nicht ausgehärteten Zustand lassen sich noch einige weitere Legierungen verformend verarbeiten, wie z. B. die FeCoV-Legierungen mit einem $(B \cdot H)_{\text{max}}$ -Wert von $1,6 \cdot 10^6 \text{ G} \cdot \text{Oe}$. Aus diesem Grund wurden auf der Grundlage von AlNi- und AlNiCo-Magneten aus Verarbeitungsgründen vielfach die sog. Pressmagnete hergestellt. Es handelt sich dabei um kunstharzgebundene Magnetkörper. Diese gepressten Magnete haben den Vorteil der leichten Formgebung und Bearbeitbarkeit. Allerdings muss man dabei eine erhebliche Einbusse (etwa 30...50 %) am Energieprodukt in Kauf nehmen.

Ebenfalls stösst die Einstellung einer magnetischen Vorzugslage bei diesen magnetischen Verbundwerkstoffen auf erhebliche Schwierigkeiten, so dass ihre praktische Anwendung beschränkt ist.

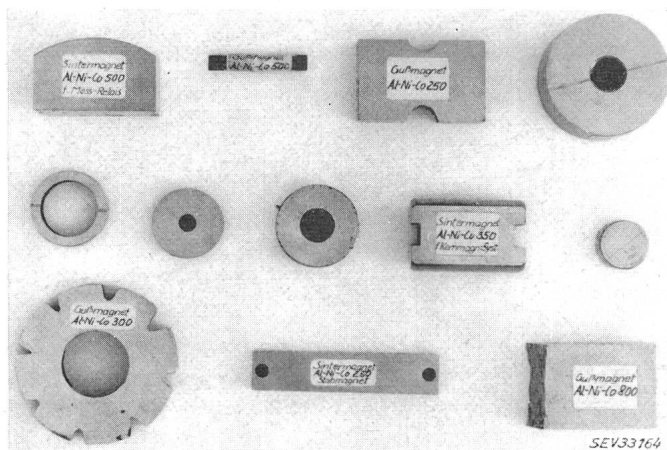


Fig. 14

Verschiedene Anwendungsformen hartmagnetischer AlNi- und AlNiCo-Legierungen

3.2 Anwendungen von Dauermagneten

Einige typische Anwendungsformen für hartmagnetische Legierungen sind in Fig. 14 zusammengestellt. Von den zahlreichen Einsatzgebieten und Anwendungsmöglichkeiten seien hier nur eine beschränkte Auswahl stichwortartig aufgeführt.

1. Zur Lösung von Befestigungs- und Halterungsaufgaben dienen u. a. magnetische Spannplatten, Haftmagnete, magnetische Lagerentlastung (Schwebelager) [25; 26].

2. Für Antriebe und Generatoren werden Polräder als Anker bzw. Dauermagnete zur Felderregung besonders bei kleineren Einheiten eingesetzt. Dauermagnetkopplungen ermöglichen die Übertragung von Drehmomenten, z. B. in abgeschlossene Behälter.

3. In der Messtechnik wurden früher Drehspulmesswerke mit Aussenmagneten ausgerüstet. Die modernen Dauermagnete mit hohen Koerzitivfeldstärke-Werten erlauben den Übergang zu Kernmagnetsystemen. Dabei ist ein zylinderförmiger Magnetkern mit Quermagnetisierung innerhalb der Drehspule angeordnet. Weitere Anwendung in der Messtechnik sind die Zählerbremsmagnete und Magnete für elektrische Uhren, ferner Anzeige-geräte für die Richtung magnetischer Felder (z. B. Kompass).

4. In der Elektroakustik werden heute Lautsprecher an Stelle der elektrischen Erregerspulen meist mit hartmagnetischen Werkstoffen aufgebaut (Topfmagnetsystem); kleinere Permanentmagnete werden in Telephon- und anderen Hörern eingesetzt.

5. Zahlreiche Anwendungen finden Dauermagnete in der Steuer- und Regeltechnik, z. B. bei polarisierten Relais, ferner in Verbindung mit weichmagnetischen Werkstoffen als Impulsgeber zur Stellungsanzeige von bewegten oder rotierenden Teilen, für Drehmeldeanlagen und Drehzahlgeber. Dünne Magnetfolien finden Verwendung für magnetische Karteien und andere hartmagnetische Speicherverfahren.

6. In der Elektronik werden starke Dauermagnete u. a. zur Beeinflussung der Elektronenbahnen bei Magnetron- und Wanderfeldröhren eingesetzt.

4. Schlussbemerkung

Bei fast allen Anwendungen magnetischer Werkstoffe ist die Verflechtung zwischen physikalischen Eigenschaften, metallkundlichen Vorgängen und der Anwendungsform bzw. -Art so eng, dass ein optimaler praktischer Einsatz im allgemeinen nur durch die unmittelbare Zusammenarbeit zwischen Anwender und Materialfachmann erreicht werden kann. Das gilt in besonderem Mass für die hochentwickelten nickelhaltigen Magnetlegierungen sowohl des weichmagnetischen als auch des hartmagnetischen Anwendungsbereichs. Die vorliegende Übersicht soll dazu beitragen, das gegenseitige Verständnis zwischen den Anwendern und den Materialkundigen zu vertiefen.

Literatur

- [1] F. Aßmus: In «40 Jahre Vacuumschmelze AG 1923—1963», Springer-Verlag Berlin — Göttingen — Heidelberg 1964, S. 47...63.
- [2] E. Vogt: Z. angew. Phys. 14 (1962), S. 177.
- [3] E. Vogt: Z. angew. Phys. 15 (1963), S. 371.
- [4] F. Bitter: Phys. Rev. 38 (1931), S. 1903 u. 41 (1932), S. 507.
- [5] L. V. Hamos, P. A. Thiessen: Z. Phys. 71 (1932), S. 442.
- [6] D. Ganz: Arch. Eisenhüttenw. (im Druck).
- [7] F. Bloch: Z. Phys. 74 (1932), S. 295.
- [8] B. Elschner, W. Andrä: Fortschr. Phys. 3 (1955), S. 199.
- [9] C. Greiner: Naturwiss. 48 (1961), S. 617.
- [10] S. Kaya: Sci. Rep. Tôhoku Univ. Ser. I 16 (1928), S. 639.
- [11] R. C. Hall: J. Appl. Phys. 30 (1959), S. 816.
- [12] F. Aßmus: Schweiz. Arch. angew. Wiss. Techn. 25 (1959), S. 290.
- [13] A. Mager: Z. angew. Phys. 14 (1962), S. 230.
- [14] A. Mager: In «40 Jahre Vacuumschmelze AG 1923—1963», Springer-Verlag Berlin — Göttingen — Heidelberg 1964, S. 88... 109.
- [15] R. Boll: Z. angew. Phys. 12 (1960), S. 212.