Eine neue Klasse hartmagnetischer Werkstoffe für Dauermagnete

Autor(en): Bachmann, K.

Objekttyp: Article

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins : gemeinsames Publikationsorgan des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins (SEV) und des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätswerke (VSE)

Band (Jahr): 64 (1973)

Heft 1

PDF erstellt am: 29.05.2024

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-915499

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern. Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek* ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Eine neue Klasse hartmagnetischer Werkstoffe für Dauermagnete

Von K. Bachmann

1. Einleitung

Zu den gebräuchlichen Dauermagnetmaterialien, deren wichtigste die Klasse der Alnico und die der Ferrite sind, hat sich in jüngster Zeit eine neue Materialgruppe gesellt: die Klasse der SECo₅-Magnete (SE = Y, La, Ce, Pr, Nd, Sm und deren Mischungen). Basierend auf diesen intermetallischen Verbindungen lassen sich Dauermagnete herstellen mit bisher nicht erreichten Koerzitivfeldern und Energieprodukten. Sm-Co₅-Magnete mit einem Energieprodukt (*BH*)_{max} = 20 MGsOe sind in mehreren Labors hergestellt worden [1; 2; 3]¹). Aus diesem Material werden bereits Magnete mit einem Energieprodukt von 14...16 MGsOe auf dem Markt angeboten.

Die ersten Untersuchungen an intermetallischen Verbindungen zwischen Seltenen Erden und 3d-Übergangselementen wurden bereits um 1959 gemacht. Damals interessierten vor allem Kristallstruktur und Magnetisierung [4...8]. Das eigentliche Interesse an diesen Verbindungen aber erwachte erst, nachdem G. Hoffer und K. J. Strnat 1966 [9] fanden, dass YCo5 eine extrem hohe Kristallanisotropie besitzt. Darauf setzte an mehreren Laboratorien eine intensive Erforschung solcher intermetallischer Verbindungen ein. Es zeigte sich bald, dass die aussichtsreichsten Verbindungen vom Typ SECo₅ (SE = Y, La, Ce, Pr, Nd, Sm und deren Mischungen) sind [10...13]. Diese Verbindungen haben hohe Sättigungsmagnetisierung, hohe Curie-Temperaturen und eine grosse Kristallanisotropie, sie eignen sich daher zumindest potentiell zur Herstellung von Dauermagneten. Alternativmethoden zur Herstellung von Magneten auf pulvermetallurgischem und schmelzmetallurgischem Wege wurden in mehreren Laboratorien gefunden, wobei die Pulvermagnete die besseren Kennwerte ergeben.

In der vorliegenden Arbeit seien zuerst die Grössen behandelt, welche die magnetischen Eigenschaften eines Dauermagneten beeinflussen. Danach folgt eine Beschreibung der Methoden zur Herstellung von Magneten, und abschliessend werden Anwendungsmöglichkeiten solcher Magnete besprochen.

2. Hartmagnetische Eigenschaften der SECo₅-Verbindungen

Ein Dauermagnet wird durch seine Hysteresekurve charakterisiert, wobei zwei verschiedene Darstellungen verwendet werden: die Magnetisierungsdarstellung (Fig. 1) und die *BH*-Hysteresiskurve (Fig. 2).

Die Magnetisierungsdarstellung eignet sich mehr für die physikalische Beschreibung des Materials, während die *BH*-Hysteresiskurve für alle praktischen Anwendungen gebraucht wird. Zur Charakterisierung von hartmagnetischen Materialien wird oft das Energieprodukt (*BH*)_{max} angegeben (Fig. 2). Für ein Material mit der Sättigungsmagnetisierung 4 πI_s ist das höchste theoretisch erreichbare Energieprodukt:

$$(BH)_{\rm max} = \frac{1}{4} (4 \pi I_{\rm s})^2$$

621.318.12 : 621.318.2

Ein guter hartmagnetischer Werkstoff muss folgende Eigenschaften aufweisen:

a) Hohe Remanenz B_r (d.h. hohe Sättigungsmagnetisierung I_s); b) Hohe Curie-Temperatur;

c) Grosse einachsige magnetische Anisotropie;

d) Hohes Koerzitivfeld $H_{\rm c}$.

Dazu kommen noch einige weitere wichtige Faktoren, wie zum Beispiel Korrosionsbeständigkeit, Temperaturkonstanz, wirtschaftlich tragbare Material- und Herstellungskosten. Die





$4\pi I_{\rm s}$	Sättigungsmagnetisierung				
1-1	nonconcerts Monasticianus				

$4\pi I_{\rm s}$	remanente Magnetisierung
$B_{\rm r}$	Remanenz
	77

 $_{I}H_{c, B}H_{c}$ Koerzitivfeld in der Magnetisierungs- bzw. BH-Darstellung

¹) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

Magnetische Eigenschaften einiger SECo5-Verbindungen

Material	YCo5	LaC05	CeCo ₅	CeMMCo ₅ ¹⁾	PrCo ₅	SmC05
$\begin{array}{ll} 4\pi I_{\rm s} & [{\rm Gs}] \\ {\rm T_c} & [^0{\rm C}] \\ H_{\rm A} & [{\rm kOe}] \\ K_1 & [10^7{\rm erg}/{\rm cm}^3] \\ (BU) & {\rm theoretical} \end{array}$	$ \begin{array}{c} 10\ 600 \\ 648 \\ \approx 130 \\ \approx 5,5 \end{array} $	9090 567 ≈ 175 $\approx 6,3$	7700 374 170210 5,26,4	≈8900 495 180195 6,46,9	12 000 612 145210 6,910,0	9 650 724 210290 8,111,2
[MGsOe] $_{I}H_{c}$ [Oe]	28,1 6 700	20,6 3600	14,8 2800	19,8 4750	36,0 5 750	23,4 25 000

¹) CeMM = Cer-Mischmetall; eine Mischung von 55 % Ce mit anderen Seltenen Erden.

ersten drei der angegebenen Grössen: Sättigungsmagnetisierung, Curie-Temperatur und magnetische Anisotropie, sind Eigenschaften der Kristall-Einheitszelle der Verbindung. Das Koerzitivfeld und der ganze Verlauf der Hysteresekurve dagegen sind abhängig von der kristallinen Struktur der makroskopischen Probe.

Fig. 3 zeigt die Sättigungsmagnetisierung bei Zimmertemperatur und die Curie-Temperatur der SECo₅-Verbindungen. Den Hauptbeitrag zur Sättigungsmagnetisierung liefern in diesen Verbindungen die durch ferromagnetische Kopplung parallel gerichteten magnetischen Momente der Kobalt-Atome. In den Verbindungen mit Y und den sog. leichten Seltenen Er-





den (La bis Sm) richtet sich ausserdem auch das Moment der Seltenen Erde parallel zu den Co-Momenten aus, während in den Verbindungen mit den schweren Seltenen Erden (Eu bis Lu) eine antiparallele Einstellung vorliegt [8; 15]. Die SECo₅-Verbindungen der schweren Seltenen Erden eignen sich daher nicht als Magnetmaterial. Im folgenden beschränken wir uns auf die SECo₅-Verbindungen mit Y und den leichten Seltenen Erden.

Tabelle I

Ein hervorragendes Merkmal der SECo5-Verbindungen ist ihre grosse Kristallanisotropie [9; 10; 12; 16], die offenbar auf der hexagonalen Kristallstruktur (Fig. 4) und der grossen Spin-Bahnkopplung der Seltenen Erdatome beruht. Die Richtung leichter Magnetisierung liegt längs der hexagonalen Achse. Eine Ausnahme bildet NdCo5. Hier liegt die Richtung leichter Magnetisierung nur oberhalb 290 ºK längs der c-Achse [15; 16]. Die Kristallanisotropie lässt sich durch das Anisotropiefeld H_A beschreiben. Das Anisotropiefeld ist das Feld, das benötigt wird, um die Magnetisierung aus der Richtung der leichten Magnetisierung heraus in eine magnetisch harte Richtung zu drehen. In Tabelle I sind Anisotropiefeld H_A und die wichtigste Anisotropiekonstante $K_1 = \frac{1}{2} H_A I_s$ für Zimmertemperatur angegeben. In dieser Tabelle sind ausserdem die Sättigungsmagnetisierung bei Zimmertemperatur, die Curie-Temperatur sowie das theoretisch erreichbare Energieprodukt zusammengestellt.

Das Koerzitivfeld ist eine strukturabhängige Eigenschaft des kristallinen Zustandes. In den SECo5-Verbindungen lässt sich ein hohes Koerzitivfeld durch Mahlen unter Luftabschluss erreichen. Aus bis jetzt unbekannten Gründen erhält man das höchste Koerzitivfeld in SmCo₅ ($_{\rm I}H_{\rm c} > 20000$ Oe). Die Korngrösse des Pulvers hat einen bedeutenden Einfluss auf das Koerzitivfeld; das höchste Koerzitivfeld erhält man für Korngrössen von einigen µm [13]. In Tabelle I sind die erreichten Koerzitivfelder $_{I}H_{c}$ für die verschiedenen SECo₅-Pulver angegeben. In andern hartmagnetischen Werkstoffen, zum Beispiel Alnico, kann der Ummagnetisierungsprozess mit der Theorie von E.C. Stoner und E.P. Wohlfarth [17] beschrieben werden. Nach dieser Theorie können - aus energetischen Gründen genügend kleine Körner nur aus einem Weißschen Bereich bestehen. Die Ummagnetisierung solcher Einbereichsteilchen erfolgt durch gemeinsame Rotation aller magnetischen Momente des Teilchens. Der kritische Teilchenradius, unterhalb dem das Korn nur aus einem Bereich besteht, ist für SmCo5 $\approx 0{,}3~\mu m.$ Mahlversuche haben jedoch ergeben, dass das höchste Koerzitivfeld für Teilchengrössen von $\approx 10 \ \mu m$ erreicht wird. Zusätzliches Mahlen reduziert das Koerzitivfeld wieder. Der Ummagnetisierungsprozess in SECo5-Körnern erfolgt daher durch Keimbildung und Wachstum von Bereichen umgekehrter Ma-

gnetisierung. Magnetisierungsmessungen an einzelnen 10 µm grossen SmCo₅-Körnern [18; 19; 20] bestätigen diese Ansicht. Eine weitere Bestätigung findet sich darin, dass selbst etwa 10 µm grosse entmagnetisierte Pulverkörner noch aus mehreren Bereichen bestehen [21]. Die Bereichsstruktur auf einem kleinen SmCo5-Korn zeigt Fig. 5. Ähnliche Strukturen finden sich auch in Körnern der anderen SECo5-Verbindungen (SE = Y, La, Ce, Pr, Sm). Ein hohes Koerzitivfeld lässt sich in den SECo5-Körnern erreichen, wenn die Keimung von Bereichen umgekehrter Magnetisierung möglichst erschwert wird und/oder wenn die Bewegung der Blochwände möglichst behindert wird. Die Untersuchungen von J. J. Becker [18] und von H. Zijlstra [19; 20] lassen erkennen, dass offenbar beide Effekte wirksam sind. Die genauen Mechanismen der Keimbildung von magnetischen Bereichen und der Bewegung der Blochwände sind jedoch noch nicht geklärt. Daher können die unterschiedlichen Koerzitivfelder der SECo5-Verbindungen auch nicht gedeutet werden. Es besteht die Hoffnung, dass das Verständnis des Ummagnetisierungsprozesses es ermöglichen wird, ein hohes Koerzitivfeld in allen SECo5-Verbindungen zu erreichen. Dies wäre vor allem wünschenswert



für die wirtschaftlich günstige Mischmetall-Verbindung Ce-MMCo₅, aber auch für PrCo₅, welches das theoretisch höchste Energieprodukt aufweist. (CeMM ist eine natürliche Ceriumreiche Mischung Seltener Erdmetalle.)

3. Magnetherstellung

Als Magnetwerkstoffe kommen in erster Linie die SECo₅-Verbindungen YCo₅, LaCo₅, CeCo₅, PrCo₅ sowie Mischungen dieser Legierungen, zum Beispiel CeMMCo₅, in Frage. Bis jetzt hat man sich besonders eingehend mit SmCo₅ und CeCo₅ befasst. Aus diesen Legierungen lassen sich sowohl schmelzmetallurgisch wie auch pulvermetallurgisch hochwertige Magnete herstellen.

Das schmelzmetallurgische Verfahren wurde von E. A. Nesbitt und Mitarbeitern [22] und unabhängig davon von Y. Tawara und H. Senno [23] entwickelt. Nach diesem Verfahren ersetzt man 20...35% des Co durch Cu und erhält somit Legierungen vom Typ SmCo₅- $_x$ Cu_x. Diese Legierungen werden erschmolzen, abgeschreckt und hernach bei niedrigen Temperaturen einer Anlassbehandlung unterworfen. Untersuchungen



Fig. 5 Magnetische Bereichsstrukturen (mit der Kerr-Technik sichtbar gemacht) auf SmCo₅-Pulverkorn

haben gezeigt, dass im System SmCo5-xCux bei der Anlassbehandlung um 500 °C ein Zerfall des übersättigten SmCo5-SmCu₅-Mischkristalles auftritt, wobei ein Co-reicher Sm(Co-Cu)5-Mischkristall und ein Cu-reicher Sm(CoCu)5-Mischkristall entsteht [34]. Mit diesem Verfahren lassen sich ohne weiteres Koerzitivfelder $_{I}H_{c}$ von über 20000 Oe erreichen, wobei das Koerzitivfeld abhängig ist von der chemischen Zusammensetzung, von der Abkühlungsgeschwindigkeit, vom Ausrichtungsgrad der Co-reichen Mischkristallphase sowie von der Anlassbehandlung. Die magnetische Sättigung und damit auch das maximale Energieprodukt liegen infolge der Kupferzugabe niedriger als bei reinem SmCo5. Durch Zulegieren von Eisen konnte E.A. Nesbitt et al. [25...27] den Sättigungswert im System Sm-Co-Cu und Ce-Co-Cu erhöhen. Die Abhängigkeit der magnetischen Eigenschaften von der chemischen Zusammensetzung im System Ce-Co-Cu-Fe zeigt Fig. 6.

Um eine erhöhte Sättigungsmagnetisierung zu erhalten, wurden auch andere SE-Co-Cu-Systeme, vor allem das Pr-Co-Cu-System, untersucht [28]. Bis heute gelang es jedoch nur in den Systemen Sm-Co-Cu und Ce-Co-Cu, gute hartmagnetische Eigenschaften zu erhalten. Tabelle II gibt eine Übersicht über die Kennwerte der besten schmelzmetallurgisch hergestellten Magnetmaterialien.

Ein weiteres Problem bei der schmelzmetallurgischen Herstellung von Dauermagneten besteht in der Erzielung einer geordneten Ausscheidung der magnetischen Mischkristallphase. Eine solche geordnete Ausscheidung könnte durch gerichtete Erstarrung der Schmelze erreicht werden.

Das pulvermetallurgische Verfahren geht zurück auf Arbeiten von K.J. Strnat und Mitarbeitern. Nach diesem Verfahren wird die SECo₅-Verbindung erschmolzen, gemahlen, magnetisch ausgerichtet, gepresst und eventuell nachträglich

Magnetische Kennwerte von einigen schmelzmetallurgisch hergestellten Magnetmaterialien

				abelle 1
Legierung	Br	вH _c	(BH) _{max}	Refe-
	Gs	Ое	MGsOe	renz
$\begin{array}{c} \text{Sm } \text{Co}_{3,5} \ \text{Cu}_{1,5} \\ \text{Ce}_{1,05} \ \text{Co}_{4,25} \ \text{Cu}_{0,75} \\ \text{Sm } \text{Co}_{3,5} \ \text{Cu}_{1,35} \ \text{Fe}_{0,4} \\ \text{Ce } \text{Co}_{3,8} \ \text{Cu}_{0,9} \ \text{Fe}_{0,5} \\ \text{Sm}_{0,75} \ \text{Ce}_{0,25} \ \text{Co}_{3,3} \ \text{Cu}_{1,2} \ \text{Fe}_{0,5} \end{array}$	5900	5600	8,2	[24]
	6000	3250	8	[23]
	6400	4000	8,8	[25]
	6330	5200	9,8	[27]
	7070	5000	12,3	[29]

Magnetische Kennwerte von einigen pulvermetallurgisch hergestellten Magnetmaterialien

Material	Kompaktierungsverfahren	Br Gs	вH _с Ое	(BH) _{max} MGsOe	Referenz
SmCo5	Hydrostatisches Pressen	9300	9000	20,2	[1]
SmCo5	Sintern	9000	9000	20	[2]
SmCo5	Flüssig-Phase-Sintern	8450	7500	17,6	[3]
Sm0,5 Pr0,5 Co5	Flüssig-Phase-Sintern	9960	6800	23,0	[3]
Sm0,5 CeMM0,5 Co5	Flüssig-Phase-Sintern	7800	6700	15,2	[3]

noch gesintert. Um einen Magneten mit möglichst hohem Energieprodukt zu erhalten, ist es nötig, das SECo₅-Pulver möglichst gut zu verdichten. K.H. Buschow und Mitarbeiter [30; 31; 1] entwickelten eine Technik, die es gestattet, SmCo₅-Pulver bis auf 95% zu verdichten. Die hohe Verdichtung wird in diesem Verfahren dadurch erreicht, dass die Probe hydrostatisch gepresst (Pressdruck 20 kbar) und gleichzeitig uniaxial 15...20% plastisch verformt wird. Eine andere Möglichkeit, ein Pulver hoch zu verdichten, bietet die Sintermetallurgie. D. K. Das [2] gelang es als erstem, SmCo₅-Magnete durch Sintern herzustellen. Ein besonders attraktives Sinterverfahren wurde von D. L. Martin und M. G. Benz [32; 3] entwickelt. Nach diesem Verfahren wird dem SECo5-Pulver ein bei niedrigerer Temperatur schmelzender Seltene Erde-Kobalt-Zusatz zugegeben (Flüssig-Phase-Sintern). Durch die flüssige Phase wird der Sinterprozess stark beschleunigt, und zudem wird eine Verminderung des Koerzitivfeldes, wie sie beim gewöhnlichen Sintern auftritt, vermieden. Ausserdem kann bei diesem Verfahren das Samarium zumindest teilweise durch andere Seltene Erden er-



 $Fe_{0,5}$

Cu_{1.7}

 $(BH)_{\rm max} = 4,1$ MGsOe

x Ce

Co_{2,9}



Tabelle III

setzt werden [3]. Dadurch lassen sich entweder höhere Werte für die Remanenz und das Energieprodukt erreichen (bei Zumischung von Pr), oder der Materialpreis lässt sich reduzieren (bei Zumischung von CeMM). In Tabelle III sind die Kennwerte einiger pulvermetallurgisch hergestellter Magnete angegeben.

4. Anwendungen

Die möglichen Anwendungen von SECo5-Magneten werden einerseits durch die überragenden hartmagnetischen Eigenschaften und andererseits durch die Material- und Fertigungskosten bestimmt. Fig. 7 und 8 zeigen einen Vergleich der Energieprodukte bzw. der Entmagnetisierungskurven der besten handelsüblichen Magnete und der SECo5-Magnete. Tabelle IV gibt einen Überblick über die Kostenverhältnisse. Es ist offenkundig, dass die SmCo5-Magnete primär für Anwendungen in Frage kommen, in welchen ein hohes Energieprodukt bei niedrigem Gewicht oder geringem Volumen erforderlich ist. Solche Anwendungen sind zum Beispiel der Einsatz der Magnete in Wanderfeldröhren, Armbanduhren, Kleinmotoren usw. Falls es jedoch gelingt, Magnete mit guten Kenndaten aus dem viel billigeren CeMMCo5-Material herzustellen, wird sich ein bedeutend grösseres Anwendungsgebiet eröffnen. Die SECo5-Magnete eignen sich dank ihrer nahezu idealen Hysteresekurve besonders gut für dynamische Anwendungen wie zum Beispiel in Permanentmagnetmotoren. Der Einsatz von SECo5-Magneten in Motoren von batteriegespeisten Geräten (Rasierapparate, Filmkameras, Tonbandgeräte usw.) erscheint besonders vielversprechend, weil das höhere Energieprodukt eine Reduktion des Stromverbrauches und daher eine Verlängerung der Lebensdauer der Batterie ermöglicht. Um die magnetischen



SECo5-Pulvermagnete

Die Entmagnetisierungskurve des SmCo₅-Magneten stammt aus [1] die der Sm_{0.5} Pr_{0.5} Co_{0.5}- und Sm_{0.5} La_{0.5} Co₅-Magnete aus [3]

Eigenschaften des Materials aber auch voll auszunützen, ist es unbedingt erforderlich, dass die Auslegung der ganzen Magnetkreise neu überdacht und unter Berücksichtigung der Entmagnetisierungskurve des verwendeten Materials optimiert wird.

Kostenvergleich zwischen handelsüblichen Magnetmaterialien und SECo₅-Verbindungen Tabelle IV

Magnetmaterialien		Pr sFr	eis ./kg
Handels- übliche Magnete	Sr-Ferrit Alnico ESD PtCo	35 10300 12150 35 00040 000	Material- plus Fertigungs- kosten
SECo ₅ - Magnet- materialien	YCo5 CeCo5 CeMMCo5 PrCo5 SmCo5	400 300 50 600 800	Materialpreis

Literatur

- F. F. Westendorp and K. H. J. Buschow: Permanent magnets with energy products of 20 million Gauss Oersteds. Solid State Communi-cations 7(1969)8, p. 639...640.

- cations 7(1969)8, p. 639...640.
 [2] D. K. Das: Twenty million energy product samarium-cobalt magnet. Trans. IEEE MAG-5(1969)3, p. 214...216.
 [3] D. L. Martin und M. G. Benz: Dauermagnetlegierungen des Kobalts mit seltenen Erdmetallen. Kobalt -(1971)50, S. 10...14.
 [4] E. A. Nesbitt, J. H. Wernick and E. Corenzwit: Magnetic moments of alloys and compounds of iron and cobalt with rare earth metal ad-ditions. J. Applied Physics 30(1959)3, p. 365...367.
 [5] L. W. Wernich and S. Caller, Transition element rare earth com-
- J. H. Wernick and S. Geller: Transition element-rare earth com-pounds with Cu₅Ca Structure. Acta Crystallographica 12(1959)-,
- pounds with Cu₅Ca Structure. Acta Crystanographica 12(1939)-, p. 662...665.
 [6] K. Nassau, L. V. Cherry and W. E. Wallace: Intermetallic compounds between lanthanons and transition metals of the first long period. Journal of Physics and Chemistry of Solids 16(1960)1/2, 120-120-1201. p. 123...130 + 131...137.
- [7] E. A. Nesbit a. o.: Magnetic moments of compounds of cobalt with rare-earth elements having a Cu₅Ca structure. J. Applied Physics Supplement 32(1961)3, p. 342 S...343 S.
- [8] E. A. Nesbitt a. o.: Magnetic moments of intermetallic compounds of transition and rare-earth elements. J. Applied Physics 33(1962)5, p. 1674...1678.
- [9] G. Hoffer and K. Strnat: Magnetocrystalline anisotropy of two yttrium-cobalt compounds. J. Applied Physics 38(1967)3, p. 1377... 1378.
- [10] K. Strnat a. o.: A family of new cobalt-base permanent magnet materials. J. Applied Physics 38(1967)3, p. 1001...1002.
 [11] K. Strnat: Legierungen des Kobalt mit seltenen Erdmetallen, eine eine Gruppe aussichtsreicher Dauermagnetwerkstoffe. Kobalt -(1967)
- 36, S. 119...128.
- 50, S. 119...128.
 [12] W. A. J. J. Velge and K. H. J. Buschow: Magnetic and crystallographic properties of some rare earth cobalt compounds with CaZn₅ structure. J. Applied Physics 39(1968)3, p. 1717...1720.
 [13] J. J. Becker: Permanent magnets based on materials with high crystal anisotropy. Trans. IEEE MAG-4(1968)3, p. 239...249.
 [14] K. J. Strnat: The recent development of permanent magnet materials containing rare earth metals. Trans. IEEE MAG-6(1970)2, p. 182... 190.
- 190.
- [15] R. Lemaire: Magnetische Eigenschaften intermetallischer Verbindun-gen des Kobalts mit seltenen Erdmetallen und Yttrium. Kobalt -(1966) 32, S. 117...124.
 [16] E. Tatsumoto a. o.: Saturation magnetic moment and crystalline ani-
- [16] E. Tatsumoto a. o.: Saturation magnetic moment and crystalline anisotropy of single crystals of light rare earth cobalt compounds RCos. Journal de Physique, Supplement 32(1971)-, p. C1-550...C1-551.
 [17] E. C. Stoner and E. P. Wohlfarth: A mechanism of magnetic hysteresis in heterogeneous alloys. Philosophical Transaction of the Royal Society of London, Series A 240(1946/1948)-, p. 599...642.
 [18] J. J. Becker: Observations of magnetization reversal in cobalt-rare earth particles. Trans. IEEE MAG-5(1969)3, p. 211...214.
 [10] H. Zilierne, Conspiritu end well mation. Trans. Trans. Letter MAG. 6(1970)2
- [19] H. Zijlstra: Coercivity and wall motion. Trans. IEEE MAG-6(1970)2, p. 179...181.
- p. 1/9...181.
 [20] H. Zijlstra: Hysteresis measurements on RCo₅ micro-particles. Journal de Physique, Supplement 32(1971)-, p. Cl-1039...Cl-1040.
 [21] K. Bachmann, A. Bischofberger and F. Hofer: Magnetic domain patterns in small single crystal SmCo₅ particles. J. Materials Science 6(1971)2, p. 169...170.
 [22] E. A. Neshitt a or New permanent in the second sec
- [22] E. A. Nesbitt a. o: New permament magnet materials. Applied Physics Letters 12(1968)11, p. 361...362.
 [23] Y. Tawara and H. Senno: Cerium, cobalt and copper alloy as a permanent magnet material. Japanese J. Applied Physics 7(1968)8, p. 966 967
- 966...967.

- 966...967.
 [24] F. Hofer: Physical metallurgy and magnetic measurements of SmCo₅-SmCu₅ alloys. Trans. IEEE MAG-6(1970)2, p. 221...224.
 [25] E. A. Nesbitt: New permanent magnet materials containing rare-earth metals. J. Applied Physics 40(1969)3, p. 1259...1265.
 [26] E. A. Nesbitt a. o.: Effect of processing on permanent magnet materials containing rare-earth metals. J. Applied Physics 40(1969)10, p. 4006...4009.
 [27] E. A. Nesbitt a. o.: Eurther means the metal studies of cost
- [27] E. A. Nesbitt a. o.: Further magnetic and thermal studies of cast rare-earth permanent magnets. J. Applied Physics 41(1970)3, p. 1107... 1108
- [28] B. A. Samarin: Magnetic proporties of PrCo₅-PrCu₅ alloys. Applied Physics Letters 17(1970)5, p. 196...197.
 [29] E. A. Nesbitt a. o.: Cast permanent magnets of the Co₅RE type with a (BH) exceeding 12 million G-Oe. Applied Physics Letters 16(1970)8, a 122 2122 2122
- p. 312...313.
- [30] K. H. J. Buschow u. a.: Magnetmaterial mit einem (BH)max-Produkt von 18,5 Millionen Gauss Oersted. Philips Techn. Rdsch. 29(1968) 11/12, S. 376...377.
 [31] K. H. J. Buschow, P. A. Naastepad and F. F. Westendorp: Preparation of SmCo₅ permanent magnets. J. Applied Physics 40(1969)10, p. 4029... 4029...
- 4032
- [32] M. G. Benz and D. L. Martin: Cobalt-samarium permanent magnets prepared by liquid phase sintering. Applied Physics Letters 17(1970) 4, p. 176...177.

Adresse des Autors:

Dr. Kurt Bachmann, Brown Boveri Forschungszentrum, Postfach 85, 5401 Baden.