

# 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: **17.09.2024**

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.

# Eine neue Klasse hartmagnetischer Werkstoffe für Dauermagnete

Von K. Bachmann

621.318.12 : 621.318.2

## 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  $\text{SECo}_5$ -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.  $\text{SmCo}_5$ -Magnete mit einem Energieprodukt  $(BH)_{\max} = 20 \text{ MGsOe}$  sind in mehreren Labors hergestellt worden [1; 2; 3]<sup>1)</sup>. 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  $\text{YCo}_5$  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  $\text{SECo}_5$  (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 $\text{SECo}_5$ -Verbindungen

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

Die Magnetisierungsdarstellung eignet sich mehr für die physikalische Beschreibung des Materials, während die  $BH$ -Hysteresekurve 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  $4\pi I_s$  ist das höchste theoretisch erreichbare Energieprodukt:

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

<sup>1)</sup> Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

Ein guter hartmagnetischer Werkstoff muss folgende Eigenschaften aufweisen:

- Hohe Remanenz  $B_r$  (d.h. hohe Sättigungsmagnetisierung  $I_s$ );
- Hohe Curie-Temperatur;
- Grosse einachsige magnetische Anisotropie;
- Hohes Koerzitivfeld  $H_c$ .

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

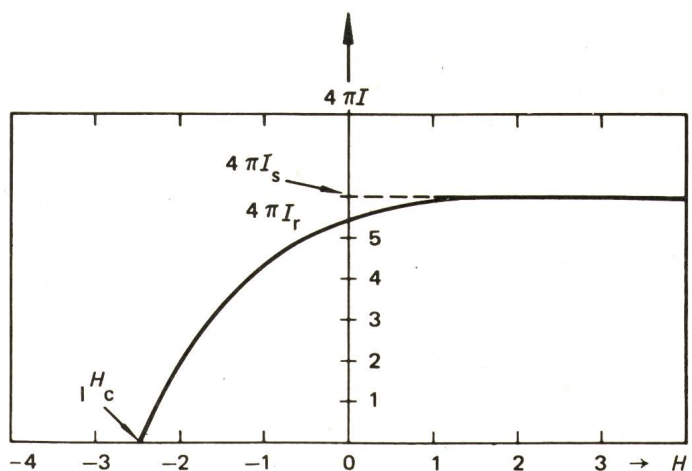


Fig. 1  
Magnetisierungsdarstellung  
(siehe auch Fig. 2)

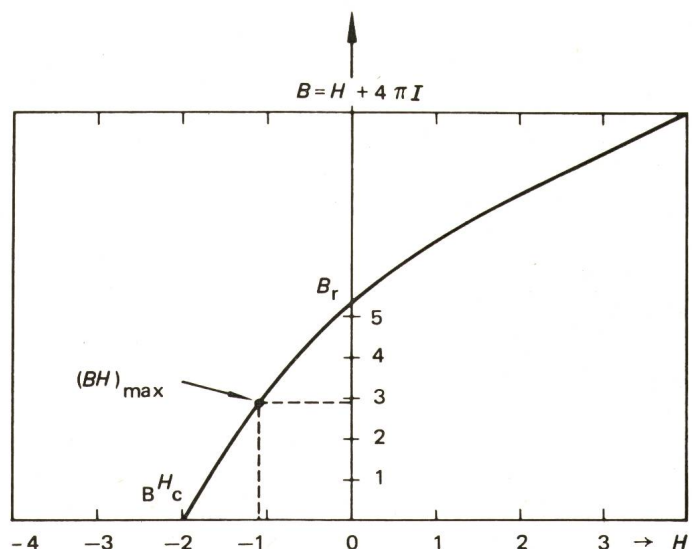


Fig. 2  
Hysteresekurve

Der Zusammenhang zwischen den Darstellungen von Fig. 1 und Fig. 2 ist im Gaußschen Mass-System durch  $B = 4\pi I + H$  gegeben.

- |              |  |
|--------------|--|
| $4\pi I_s$   | Sättigungsmagnetisierung                                     |
| $4\pi I_r$   | remanente Magnetisierung                                     |
| $B_r$        | Remanenz   |
| $H_c, B H_c$ | Koerzitivfeld in der Magnetisierungs- bzw. $BH$ -Darstellung |

Material	$YCo_5$	$LaCo_5$	$CeCo_5$	$CeMMCo_5$ <sup>1)</sup>	$PrCo_5$	$SmCo_5$
$4\pi I_s$ [Gs]	10 600	9090	7700	≈8900	12 000	9 650
$T_c$ [°C]	648	567	374	495	612	724
$H_A$ [kOe]	≈ 130	≈ 175	170...210	180...195	145...210	210..290
$K_1$ [ $10^7$ erg/cm <sup>3</sup> ]	≈ 5,5	≈ 6,3	5,2...6,4	6,4...6,9	6,9...10,0	8,1...11,2
$(BH)_{max}$ theoretisch						
[MGsOe]	28,1	20,6	14,8	19,8	36,0	23,4
$\pm H_c$ [Oe]	6 700	3600	2800	4750	5 750	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 Hystereseurve dagegen sind abhängig von der kristallinen Struktur der makroskopischen Probe.

Fig. 3 zeigt die Sättigungsmagnetisierung bei Zimmertemperatur und die Curie-Temperatur der  $SECo_5$ -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  $SECo_5$ -Verbindungen der schweren Seltenen Erden eignen sich daher nicht als Magnetmaterial. Im folgenden beschränken wir uns auf die  $SECo_5$ -Verbindungen mit  $Y$  und den leichten Seltenen Erden.

Ein hervorragendes Merkmal der  $SECo_5$ -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  $NdCo_5$ . Hier liegt die Richtung leichter Magnetisierung nur oberhalb 290 °K 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  $SECo_5$ -Verbindungen lässt sich ein hohes Koerzitivfeld durch Mahlen unter Luftabschluss erreichen. Aus bis jetzt unbekanntem Gründen erhält man das höchste Koerzitivfeld in  $SmCo_5$  ( $\pm H_c > 20000$  Oe). Die Korngrösse des Pulvers hat einen bedeutenden Einfluss auf das Koerzitivfeld; das höchste Koerzitivfeld erhält man für Korngrössen von einigen  $\mu m$  [13]. In Tabelle I sind die erreichten Koerzitivfelder  $\pm H_c$  für die verschiedenen  $SECo_5$ -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 Weisschen 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  $SmCo_5 \approx 0,3 \mu m$ . 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  $SECo_5$ -Körnern erfolgt daher durch Keimbildung und Wachstum von Bereichen umgekehrter Ma-

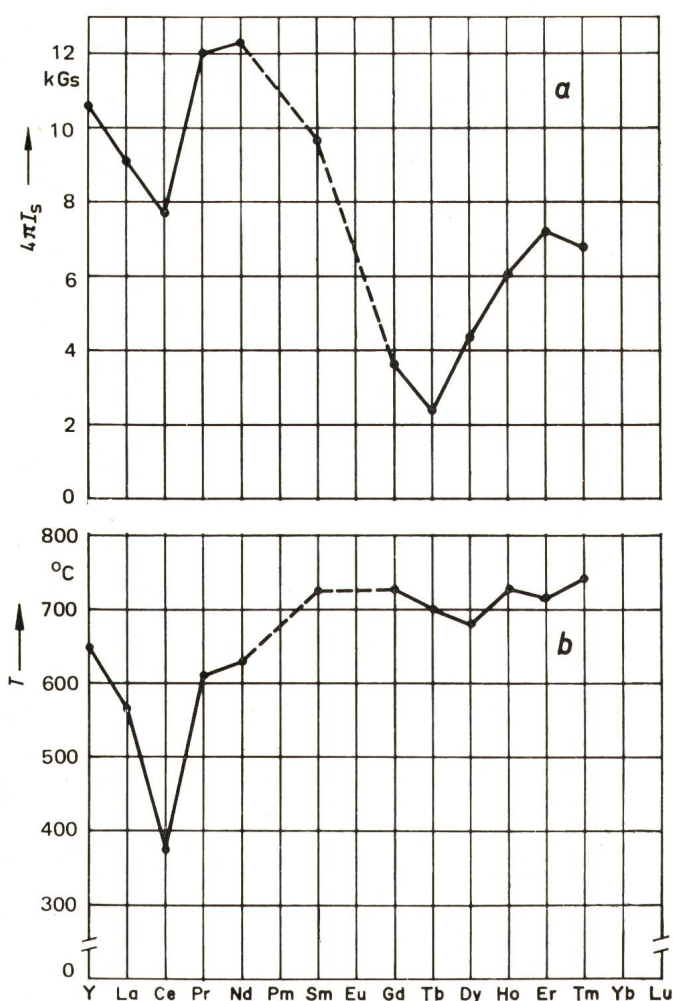


Fig. 3

Sättigungsmagnetisierungen bei Zimmertemperatur (a) [12;14] und Curie-Temperaturen (b) [11;14] der  $SECo_5$ -Verbindungen

gnetisierung. Magnetisierungsmessungen an einzelnen 10  $\mu\text{m}$  grossen  $\text{SmCo}_5$ -Körnern [18; 19; 20] bestätigen diese Ansicht. Eine weitere Bestätigung findet sich darin, dass selbst etwa 10  $\mu\text{m}$  grosse entmagnetisierte Pulverkörner noch aus mehreren Bereichen bestehen [21]. Die Bereichsstruktur auf einem kleinen  $\text{SmCo}_5$ -Korn zeigt Fig. 5. Ähnliche Strukturen finden sich auch in Körnern der anderen  $\text{SECo}_5$ -Verbindungen ( $\text{SE} = \text{Y, La, Ce, Pr, Sm}$ ). Ein hohes Koerzitivfeld lässt sich in den  $\text{SECo}_5$ -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  $\text{SECo}_5$ -Verbindungen auch nicht gedeutet werden. Es besteht die Hoffnung, dass das Verständnis des Ummagnetisierungsprozesses es ermöglichen wird, ein hohes Koerzitivfeld in allen  $\text{SECo}_5$ -Verbindungen zu erreichen. Dies wäre vor allem wünschenswert

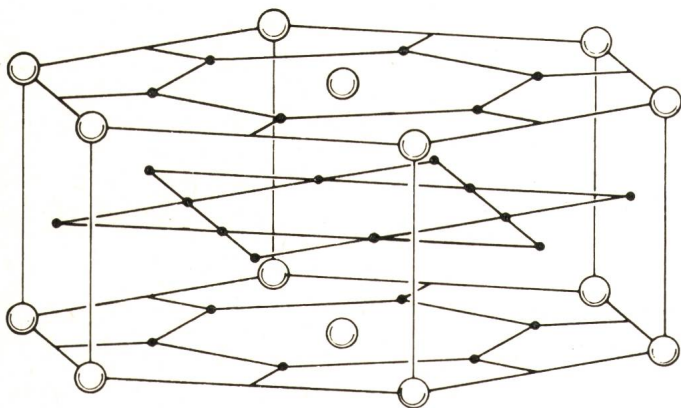


Fig. 4  
Hexagonale Einheitszelle der  $\text{SECo}_5$ -Verbindungen

○ Seltene Erde  
● Kobalt

für die wirtschaftlich günstige Mischmetall-Verbindung  $\text{CeMMCo}_5$ , aber auch für  $\text{PrCo}_5$ , welches das theoretisch höchste Energieprodukt aufweist. ( $\text{CeMM}$  ist eine natürliche Ceriumreiche Mischung Seltener Erdmetalle.)

### 3. Magnetherstellung

Als Magnetwerkstoffe kommen in erster Linie die  $\text{SECo}_5$ -Verbindungen  $\text{YCo}_5$ ,  $\text{LaCo}_5$ ,  $\text{CeCo}_5$ ,  $\text{PrCo}_5$  sowie Mischungen dieser Legierungen, zum Beispiel  $\text{CeMMCo}_5$ , in Frage. Bis jetzt hat man sich besonders eingehend mit  $\text{SmCo}_5$  und  $\text{CeCo}_5$  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  $\text{SmCo}_{5-x}\text{Cu}_x$ . Diese Legierungen werden erschmolzen, abgeschreckt und hernach bei niedrigen Temperaturen einer Anlassbehandlung unterworfen. Untersuchungen

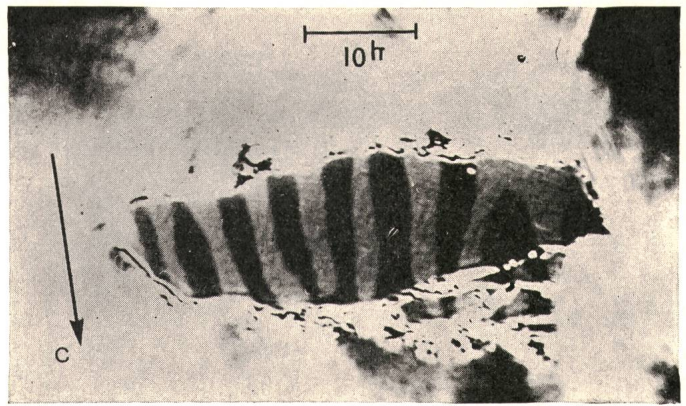


Fig. 5  
Magnetische Bereichsstrukturen (mit der Kerr-Technik sichtbar gemacht) auf  $\text{SmCo}_5$ -Pulverkorn

haben gezeigt, dass im System  $\text{SmCo}_{5-x}\text{Cu}_x$  bei der Anlassbehandlung um 500  $^\circ\text{C}$  ein Zerfall des übersättigten  $\text{SmCo}_5$ - $\text{SmCu}_5$ -Mischkristalles auftritt, wobei ein Co-reicher  $\text{Sm}(\text{Co-Cu})_5$ -Mischkristall und ein Cu-reicher  $\text{Sm}(\text{CoCu})_5$ -Mischkristall entsteht [34]. Mit diesem Verfahren lassen sich ohne weiteres Koerzitivfelder  $1H_c$  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  $\text{SmCo}_5$ . 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  $\text{SECo}_5$ -Verbindung erschmolzen, gemahlen, magnetisch ausgerichtet, gepresst und eventuell nachträglich

Magnetische Kennwerte von einigen schmelzmetallurgisch hergestellten Magnetmaterialien

Tabelle II

Legierung	$B_r$ Gs	$BH_c$ Oe	$(BH)_{\text{max}}$ MGsOe	Referenz
$\text{Sm Co}_{3,5} \text{Cu}_{1,5}$	5900	5600	8,2	[24]
$\text{Ce}_{1,05} \text{Co}_{4,25} \text{Cu}_{0,75}$	6000	3250	8	[23]
$\text{Sm Co}_{3,5} \text{Cu}_{1,35} \text{Fe}_{0,4}$	6400	4000	8,8	[25]
$\text{Ce Co}_{3,8} \text{Cu}_{0,9} \text{Fe}_{0,5}$	6330	5200	9,8	[27]
$\text{Sm}_{0,75} \text{Ce}_{0,25} \text{Co}_{3,3} \text{Cu}_{1,2} \text{Fe}_{0,5}$	7070	5000	12,3	[29]

Material	Kompaktierungsverfahren	$B_r$ Gs	$BH_c$ Oe	$(BH)_{max}$ MGsOe	Referenz
SmCo <sub>5</sub>	Hydrostatisches Pressen	9300	9000	20,2	[1]
SmCo <sub>5</sub>	Sintern	9000	9000	20	[2]
SmCo <sub>5</sub>	Flüssig-Phase-Sintern	8450	7500	17,6	[3]
Sm <sub>0,5</sub> Pr <sub>0,5</sub> Co <sub>5</sub>	Flüssig-Phase-Sintern	9960	6800	23,0	[3]
Sm <sub>0,5</sub> CeMM <sub>0,5</sub> Co <sub>5</sub>	Flüssig-Phase-Sintern	7800	6700	15,2	[3]

noch gesintert. Um einen Magneten mit möglichst hohem Energieprodukt zu erhalten, ist es nötig, das SmCo<sub>5</sub>-Pulver möglichst gut zu verdichten. K.H. Buschow und Mitarbeiter [30; 31; 1] entwickelten eine Technik, die es gestattet, SmCo<sub>5</sub>-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, SmCo<sub>5</sub>-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 SmCo<sub>5</sub>-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-

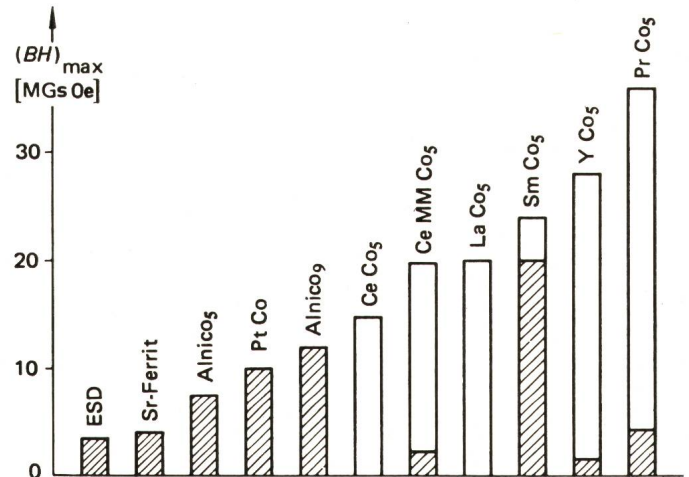


Fig. 7  
Vergleich des Energieproduktes der besten handelsüblichen Dauermagnete und der SmCo<sub>5</sub>-Verbindungen (bisher erreichte Werte sind schraffiert)

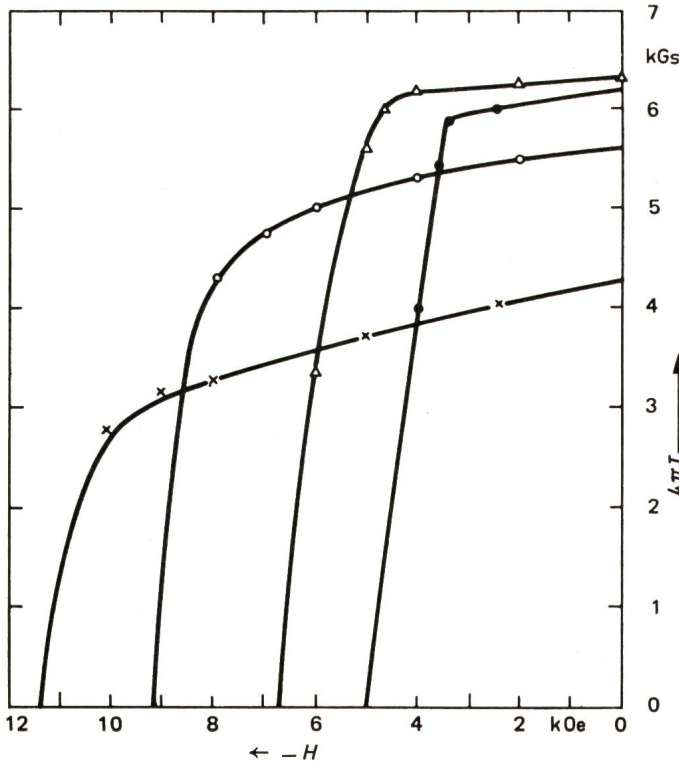


Fig. 6  
Entmagnetisierungskurven von Ce-Co-Cu-Fe-Legierungen mit verschiedenen Kupfergehalten nach E.A. Nesbitt [27]

- △ Ce Co<sub>3,8</sub> Cu<sub>0,9</sub> Fe<sub>0,5</sub>  $(BH)_{max} = 9,8$  MGsOe
- Ce Co<sub>3,75</sub> Cu<sub>0,75</sub> Fe<sub>0,5</sub>  $(BH)_{max} = 9,0$  MGsOe
- Ce Co<sub>3,4</sub> Cu<sub>1,2</sub> Fe<sub>0,5</sub>  $(BH)_{max} = 7,4$  MGsOe
- × Ce Co<sub>2,9</sub> Cu<sub>1,7</sub> Fe<sub>0,5</sub>  $(BH)_{max} = 4,1$  MGsOe

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 SmCo<sub>5</sub>-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 SmCo<sub>5</sub>-Magnete. Tabelle IV gibt einen Überblick über die Kostenverhältnisse. Es ist offenkundig, dass die SmCo<sub>5</sub>-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 Kennwerten aus dem viel billigeren CeMMCo<sub>5</sub>-Material herzustellen, wird sich ein bedeutend grösseres Anwendungsgebiet eröffnen. Die SmCo<sub>5</sub>-Magnete eignen sich dank ihrer nahezu idealen Hysteresekurve besonders gut für dynamische Anwendungen wie zum Beispiel in Permanentmagnetmotoren. Der Einsatz von SmCo<sub>5</sub>-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

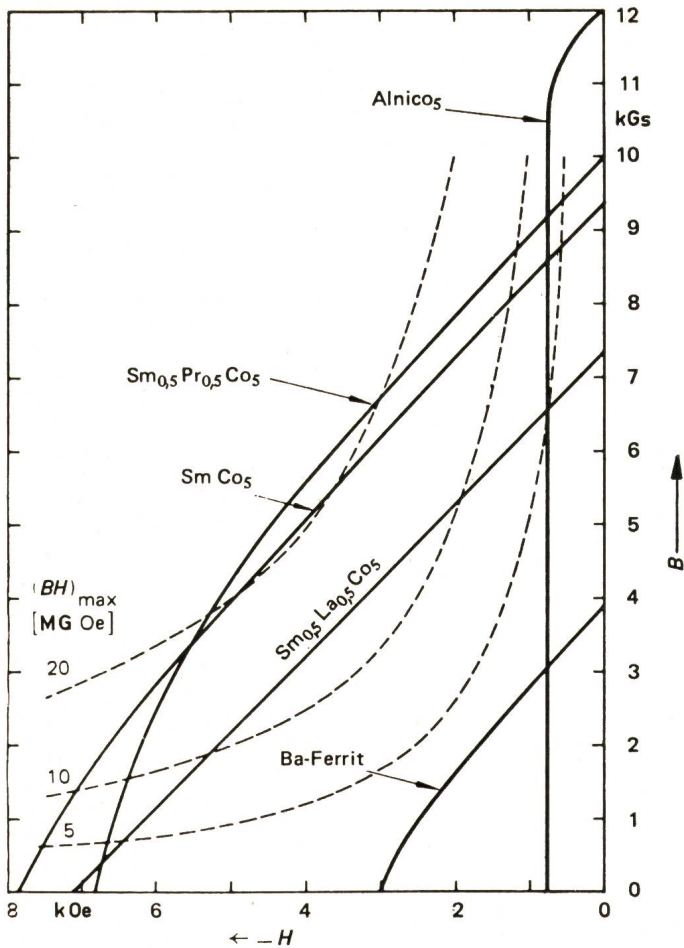


Fig. 8

**Entmagnetisierungskurven konventioneller Dauermagnete und einiger  $SECo_5$ -Pulvermagnete**

Die Entmagnetisierungskurve des  $SmCo_5$ -Magneten stammt aus [1] die der  $Sm_{0,5}Pr_{0,5}Co_{0,5}$ - und  $Sm_{0,5}La_{0,5}Co_5$ -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  $SECo_5$ -Verbindungen**

Tabelle IV

Magnetmaterialien		Preis sFr./kg	
Handels- übliche Magnete	Sr-Ferrit	3...5	} Material- plus Fertigungs- kosten
	Alnico	10...300	
	ESD	12...150	
	PtCo	35 000...40 000	
$SECo_5$ - Magnet- materialien	$YCo_5$	400	} Materialpreis
	$CeCo_5$	300	
	$CeMMCo_5$	50	
	$PrCo_5$	600	
	$SmCo_5$	800	

**Literatur**

- [1] F. F. Westendorp and K. H. J. Buschow: Permanent magnets with energy products of 20 million Gauss Oersteds. Solid State Communications 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 additions. J. Applied Physics 30(1959)3, p. 365...367.
- [5] J. H. Wernick and S. Geller: Transition element-rare earth compounds with  $Cu_5Ca$  Structure. Acta Crystallographica 12(1959)-, 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, p. 123...130 + 131...137.
- [7] E. A. Nesbitt a. o.: Magnetic moments of compounds of cobalt with rare-earth elements having a  $Cu_5Ca$  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 neue Gruppe aussichtsreicher Dauermagnetwerkstoffe. Kobalt -(1967) 36, 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  $CaZn_5$  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.
- [15] R. Lemaire: Magnetische Eigenschaften intermetallischer Verbindungen des Kobalts mit seltenen Erdmetallen und Yttrium. Kobalt -(1966) 32, S. 117...124.
- [16] E. Tatsumoto a. o.: Saturation magnetic moment and crystalline anisotropy of single crystals of light rare earth cobalt compounds  $RCo_5$ . 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.
- [19] H. Zijlstra: Coercivity and wall motion. Trans. IEEE MAG-6(1970)2, p. 179...181.
- [20] H. Zijlstra: Hysteresis measurements on  $RCo_5$  micro-particles. Journal de Physique, Supplement 32(1971)-, p. C1-1039...C1-1040.
- [21] K. Bachmann, A. Bischofberger and F. Hofer: Magnetic domain patterns in small single crystal  $SmCo_5$  particles. J. Materials Science 6(1971)2, p. 169...170.
- [22] E. A. Nesbitt a. o.: New permanent 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.
- [24] F. Hofer: Physical metallurgy and magnetic measurements of  $SmCo_5$ - $SmCu_5$  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.: 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 properties of  $PrCo_5$ - $PrCu_5$  alloys. Applied Physics Letters 17(1970)5, p. 196...197.
- [29] E. A. Nesbitt a. o.: Cast permanent magnets of the  $Co_5RE$  type with a  $(BH)$  exceeding 12 million G-Oe. Applied Physics Letters 16(1970)8, 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  $SmCo_5$  permanent magnets. J. Applied Physics 40(1969)10, p. 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.