

### 3.1.5. Werkstoffe mit besonderen magnetischen Eigenschaften

Von R. GRÖSSINGER

Kurzfassung von G. STERK

Die Entwicklung moderner, leistungsstarker Magnete für technische Anwendungen ist ausschlaggebend von den dafür verwendeten Grund- bzw. Werkstoffen und den Herstellungsverfahren abhängig. Der Kenntnisstand und der Anwendungsbereich derartiger Werkstoffe befinden sich in rascher Fortentwicklung.

So konnten entscheidende Durchbrüche für technische Anwendungen, insbesondere bei magnetostruktiven Werkstoffen (magnetische Materialien, die bei Anlegen eines externen Magnetfeldes ihre mechanischen Abmessungen – Länge, Volumen – ändern), erst durch die Verwendung Seltener Erden, zumeist in Verbindung mit Fe, erzielt werden, während vorher vor allem reines Ni verwendet wurde.

In Tabelle 6 sind den magnetischen Werkstoffen die entsprechenden Materialien und die bedeutendsten Verwendungsbereiche gegenübergestellt.

Magnetische Werkstoffe	Materialien	Verwendung
Hartmagnetische Materialien	Bariumferrit, AlNiCo, Sm-Co, Nd-Fe-N	Permanentmagnete, Sensoren, Robotik, Servomotoren, Tomographie
Halbharte magnetische Materialien	Bariumferrit, Gd, Tb-Fe, Co-Legierungen	Magnetische Speichermedien (floppy disc)
Weichmagnetische Materialien	Fe-Ni, Fe-Si, amorphes (Fe, Co) mit B und Si	Trafos, Energieeinsparung, Sensoren, Robotik
Magnetostruktive Materialien	Fe-B, (Tb, Dy)-Fe	Aktuatoren, Sensoren, Ultraschallerzeugung, Verzögerungsleitungen

Tabelle 6: Magnetische Werkstoffe und die wichtigsten Materialien zu ihrer Herstellung sowie die bedeutendsten Verwendungen magnetischer Werkstoffe

Die Herstellung von Magnetwerkstoffen erfolgt im allgemeinen durch Mischen der pulverförmig vorliegenden Ausgangsstoffe bzw. Elemente, dem Verpressen der Mischung mit einem Bindemittel und dem anschließenden Sintern.

## Hartmetallische Werkstoffe (Permanentmagnete)

Permanentmagnete behalten ihren Magnetisierungszustand nach dem Aufmagnetisieren bei. Am verbreitetsten sind Ferrite und AlNiCo-Magnete.

### Ferrite

Ferrite sind die preisgünstigen Permanentmagnete, die den überwiegenden Teil des Marktes decken.

*Strontiumferrite* haben ein höheres Energieprodukt (bis etwa  $32 \text{ kJ/m}^3$ ). Alle Ferrite haben den Nachteil, daß sie keramischer Natur sind und daher kaum mehr bearbeitet werden können. Sie haben aber den Vorteil einer hohen chemischen Stabilität, sodaß es kaum Korrosionsprobleme gibt.

### AlNiCo-Magnete

Die AlNiCo-Magnete haben den Vorteil einer wesentlich höheren Magnetisierung und Korrosionsbeständigkeit sowie einer hohen Einsatztemperatur ( $500^\circ \text{C}$ ), bei der sie verwendet werden können. Nachteilig ist ihr relativ geringer Energieinhalt von nur  $\text{max } 80 \text{ kJ/m}^3$  sowie ihr geringes Koerzitivfeld. Sie sind daher für Miniaturisierungen nicht geeignet.

Ferrite und AlNiCo-Magnete decken rd. 90% des Marktes auf diesem Gebiet ab.

Die neuen und technisch interessanten Magnetwerkstoffe auf Basis *Seltene Erden – 3d-Metalle* weisen zwar um Größenordnungen bessere Kenndaten auf, sie sind aber auch entsprechend teurer.

### Sm-Co-Magnete

Mit den Sm-Co-Magneten wurden erstmals Magnetwerkstoffe entwickelt, deren Koerzitivfeld größer als  $10 \text{ kOe}$  (ca.  $800 \text{ kA/m}$ ) ist. Die zulässige Einsatztemperatur liegt bei  $250^\circ \text{C}$ . Von Nachteil ist, daß diese Werkstoffe sehr korrosionsempfindlich sind. Dies gilt für  $\text{SmCo}_5$  mehr als für die ausscheidungsgehärteten  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ -Materialien. Derartige Magnetwerkstoffe wurden bisher wegen der relativ hohen Rohstoffpreise, vor allem für Sm, für großtechnische Anwendungen kaum herangezogen.

### Permanentmagnete auf Basis Nd-Fe-B

Die besten Permanentmagnete beruhen auf Verbindungen aus einem *3d-Metall mit einer Seltene Erde*, wie  $\text{SmCo}_5$ ,  $\text{Sm}_2(\text{Fe, Co, Cu, Zr})_{17}$ ,  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  usw.

Günstiger sind Permanentmagnete auf Basis Nd-Fe-B, wie z.B.  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ . Man versucht nun die thermischen Eigenschaften, insbesondere mittels Substitution durch Dy oder Tb, aber auch durch Al und Ga zu verbessern.

Eine hohe magnetische Anisotropie bei den magnetischen Werkstoffen wurde erst durch den *Einbau Seltener Erden* erreicht. Vor allem kommen die leichteren Seltene Erden, wie Ce, Pr, Nd und Sm, in Frage, da bei diesen das magnetische Moment parallel mit dem des Fe bzw. Co koppelt.

In allen derartigen Magnetwerkstoffen dienen die 3d-Metalle (Fe, Co) der Erreichung einer hohen Ordnungstemperatur. Infolge der relativ hohen Remanenz und

des hohen Koerzitivfeldes (lineare B-H-Kurve im 2. Quadranten), eignen sie sich besonders für Miniaturisierungen, sind aber auch sehr korrosionsanfällig.

Für **neue Entwicklungen** bei Permanentmagneten scheinen Verbindungen wie Seltene Erden-Fe-Ti und Zr-(ThMn<sub>12</sub>) aber auch Seltene Erden-Fe-C oder auch mit N, insbesondere Sm<sub>2</sub>Fe<sub>17</sub>N<sub>x</sub>, erfolgversprechend zu sein.

### Halbharte magnetische Werkstoffe

Darunter versteht man magnetische Werkstoffe, deren Koerzitivfeld maximal 3 kOe (300 kA/m) ist, deren Magnetisierung möglichst hoch ist und die um Raumtemperatur leicht einstellbare magnetische bzw. magnetooptische Eigenschaften aufweisen.

Die Anwendung liegt im Bereich der **magnetischen Speichermedien** (Floppy discs, Winchester). Da die erreichbare Datendichte für die Computerindustrie von großer Bedeutung ist, handelt es sich hier um einen Markt von hochgesteckten Erwartungen. Für das Jahr 2000 erwartet man 3,5"-Discs mit 10 Gbits. Dies würde eine Erhöhung des derzeitigen Standards um einen Faktor 24 (!) bedeuten. Prototypen magneto-optischer Discs gibt es bereits.

Als Grundstoffe hierfür kommen Bariumferrit in Frage, aber noch mehr Hoffnung ruht auf den Gd, Tb-Fe, Co-Legierungen.

### Weichmagnetische Werkstoffe

Weichmagnetische Werkstoffe haben geringe Ummagnetisierungsverluste, was für eine Verwendung in Wechselfeldern, z.B. bei Transformatorenblechen von Bedeutung ist. Zu diesen zählen:

**Mumetall**, eine Fe-Ni-Legierung, wird als magnetisches Abschirmmaterial verwendet. Nachteilig ist, daß dieses Material seine weichmagnetischen Eigenschaften verliert, wenn es mechanisch bearbeitet wird. Dann ist eine komplizierte Wärmebehandlung erforderlich.

**Al-Si-Bleche** werden als Transformatorenbleche verwendet, sind jedoch für höhere Frequenzen infolge der Wirbelstromverluste nicht geeignet.

Als künftig interessante weichmagnetische Werkstoffe sind hervorzuheben:

**Amorphe Werkstoffe** wie z.B. Fe<sub>80</sub>B<sub>20</sub>, Co<sub>80</sub>B<sub>20</sub> und (Fe, Co)<sub>80</sub>(B, Si)<sub>20</sub>. Sie haben geringere Verluste und eignen sich auch für höhere Frequenzen. Bei den amorphen Materialien können infolge der Vielzahl der möglichen Zusammensetzungen die magnetischen Eigenschaften stark variiert werden. Dennoch lassen sich drei Substanzklassen unterscheiden:

- Fe<sub>80</sub>B<sub>20</sub>: mit hoher Sättigungsinduktion (Bs~1,3 T) und großer positiver Magnetostraktion,
- Co<sub>80</sub>B<sub>20</sub>: mit mittlerer Sättigungsinduktion (Bs~0,8 T) und negativer mittlerer Magnetostraktion,
- Gemischte Systeme: mit hoher Permeabilität, aber verschwindend kleiner Magnetostraktion.

Ein wesentlicher Vorteil der amorphen Systeme ist, daß diese lückenlos mischbar sind, wodurch gezielt Magnetwerkstoffe entwickelt werden können.

*Mikrokristalline Fe-Si-Werkstoffe (Sendai-Legierungen)*, die ebenfalls für hohe Frequenzen geeignet sind.

*Nanokristallines „Finement“* ist ein neues Material, eine Eisen-Metalloid-Legierung. Das entsprechende mikrokristalline Gefüge wird durch Beigabe von Cu und Nb erreicht, die Sättigungsinduktion kann bis zu 1,7 T erreichen.

Bei weichmagnetischen Werkstoffen bemüht man sich, *neue Substanzen* zu finden, die bessere Eigenschaften als das derzeit verwendete Fe-Si haben. Zielrichtung ist vor allem eine Anwendung bei höheren Frequenzen, da der Wirkungsgrad eines Transformators bei höheren Frequenzen besser ist. Moderne Schaltnetzteile von Computersystemen arbeiten bei höheren Frequenzen, um Gewicht und Energie zu sparen.

### Magnetostriktive Werkstoffe

Das sind magnetische Materialien, die beim Anlegen eines externen Magnetfeldes ihre mechanischen Abmessungen ändern (Länge, Volumen). Für technische Anwendungen soll diese Änderung möglichst groß sein.

*Weichmagnetische amorphe Materialien auf Basis  $Fe_{80}B_{20}$*  eignen sich gut für magnetostriktive Sensoren. Auch für magnetostriktive Ultraschwinger wäre diese Legierungsgruppe infolge ihres hohen magnetoelastischen Kopplungsfaktors denkbar.

Die hohe Magnetostriktion von Werkstoffen auf Basis  $(Tb, Dy)Fe_2$  eröffnet völlig neue Möglichkeiten zum Entwurf von Sensoren bzw. Aktuatoren mit hoher Reaktionsgeschwindigkeit und großer Stellkraft. Die Anwendungen reichen von aktiven Schwingungsdämpfern über Ventiltriebe bis zu neuartigen Linearmotoren.

### Rohstoffe für magnetische Werkstoffe

Für magnetische Werkstoffe sind vor allem die Metalle **Eisen** und **Kobalt** nach wie vor von entscheidender Bedeutung.

Als Veredlungskomponenten werden insbesondere **Nb, Cu, V, Ti, Si** und **B** verwendet.

Eine besondere Bedeutung kommt den **Seltenen Erden**, wie **Samarium, Neodymium, Praseodymium, Terbium** und **Dysprosium** zu.

### Herstellungstechnologien

Neben der Zusammensetzung kommt bei magnetischen Werkstoffen den Herstellungstechnologien eine entscheidende Bedeutung zu. So hat sich die neue Technologie zur Herstellung bestimmter magnetischer Werkstoffe „*rapidly quenched*“

sehr gut bewährt, mit der z.B. in einem Arbeitsgang von der Schmelze her dünne magnetische Folien energiesparsam hergestellt werden können. Bei der in Österreich entwickelten „Melt-spinning“-Technik wird die Metallschmelze auf ein rotierendes Kupferrad gespritzt und auf diese Weise ein, entweder mikrokristalliner oder amorpher, glasartiger Zustand der Atome eingefroren. Man kann somit die Eigenschaften des Materials durch die Wahl der Abschreckbedingungen weitgehend beeinflussen. Die so entstehenden Proben können entweder lange dünne Folien sein oder auch kleine Splitter, die dann auch pulvermetallurgisch weiterverarbeitet werden können.

Im Hinblick auf die in Österreich vorhandenen einschlägigen Möglichkeiten der Forschung und Entwicklung und die bereits erzielten Erfolge erscheint es angebracht, sowohl die Suche nach und die Entwicklung von neuen magnetischen Werkstoffen als auch die Entwicklung neuer Herstellungstechnologien stärker voranzutreiben.

### Literatur-Auswahl

- (1) BOLL, R.: Weichmagnetische Werkstoffe; Herausgeber: Vakuumschmelze GmbH, 4. Auflage 1990.
- (2) CROAT, J. J., HERBST, J. F., LEE, R. W., & PINKERTON, F. E.: Pr-Fe and Nd-Fe based materials: A new class of high performance permanent magnets; J. Appl. Phys. 55, 1984.
- (3) DE MOOIJ, B., & BUSCHOW, K. H. J.: A new class of ferromagnetic Materials  $RFe_{10}V_2$ ; Philips J. Res. 42, 1987.
- (4) HERZER, G.: Proc. Int. Conf. Soft Magn. Mat. 7: Wolfson Centre for Magn. Technol. Cardiff 1986.
- (5) Proc of 12<sup>th</sup> Int. Workshop on rare-earth-magnets and their application, Canberra, Australia, 1992.
- (6) RICHARDSON, M. W., FALANDER, M., & FEREDYN, A. B.: New materials for the rapid conversion of electric energy to mechanical motion; Proc. of ERA Conf., Chapt. 2, London 1989.
- (7) SAGAWA, M., FUJIMURA, S., TOGAWA, M., YAMAMOTO, H., & MATSUURA, Y.: New materials for permanent magnets on a base of Nd and Fe; J. Appl. Phys. 55, 1984.
- (8) VAZQUEZ, M., FERNENGEL, W., & KRONMÜLLER, H.: The Effect of Tensile Stresses on the Magnetic Properties of  $Co_{58}Fe_5Ni_{10}Si_{11}B_{16}$  Amorphous Alloys; Phys. stat. sol. (a) 80, 1983.
- (9) YOSHITSAWA, Y., OGUMA, S., & YAMAUCHI, X.: New Fe-based soft magnetic alloys composed of ultrafine grain structure; J. Appl. Phys. 64, 1988.

### **3.2. Beurteilung der Verfügbarkeit von Lagerstätten bzw. Vorkommen mineralischer Rohstoffe in Österreich im Hinblick auf neue Anwendungsbereiche und neue Produkte**

Die drei Teiluntersuchungen des 2. Teilschrittes ergaben folgende Aussagen.