Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 81 (1990)

Heft: 15

Artikel: Dauermagnete : neue Entwicklung und Anwendungen

Autor: Weinmann, Dietmar

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-903142

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: 10.07.2025

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

Dauermagnete – neue Entwicklungen und Anwendungen

Dietmar Weinmann

In den letzten 15 Jahren konnte die volumenbezogene Leistungsdichte der Dauermagnete nahezu verdoppelt werden. Dieser Fortschritt eröffnete für Magnete viele neue Anwendungsgebiete und schuf die Voraussetzung für verbesserte Systemkonfigurationen. Ohne die modernen Seltenerd-Dauermagnete wären die heutigen bürstenlosen Gleichstrommotoren für die Automatisierungs- und Robotertechnik und die extrem leistungsfähigen Schrittmotoren und Linearantriebe für Computer-Peripheriegeräte kaum denkbar.

Au cours des dernières années, on a réussi à quasi doubler la densité volumique de puissance des aimants permanents. Ce progrès a ouvert à ces aimants de nombreux domaines d'utilisation nouveaux, et engendré les conditions pour l'amélioration de la configuration des systèmes. Sans les aimants modernes à terres rares, il n'aurait guère été possible de rejoindre le niveau atteint dans le domaine des moteurs à courant continu sans balais pour les techniques d'automatisation et les robots ou des moteurs pas à pas et les entraînements linéaires extrêmement efficients pour périphériques d'ordinateur.

Adresse des Autors:
Dr. *Dietmar Weinmann*, Ugimag Recoma AG, 5242 Lupfig

Dauermagnete

Ein Dauermagnet, auch Permanent- oder Hartmagnet genannt, ist ein ferromagnetischer Körper, welcher ohne Einwirkung von elektrischem Strom dauernd ein magnetisches Feld aufrechterhalten kann. Im Idealfall sollten weder magnetische Gegenfelder noch erhöhte Temperaturen noch mechanische oder andere Umwelteinflüsse sein Magnetfeld irreversibel verändern. Diesen idealen Dauermagnet gibt es allerdings nicht. Im praktischen Anwendungsfall gilt ein Dauermagnet um so besser, je höher sein erzeugtes Magnetfeld ist und je grösseren Widerstand er gegen entmagnetisierende Magnetfelder oder erhöhte Temperaturen zu leisten vermag.

Im Hinblick auf die Anwendung kann man Dauermagnete definieren als passive Komponenten oder Bauteile, die ihre industrielle Anwendung als Energiewandler in verschiedenen technischen Vorrichtungen finden (Bild 1). Im Vergleich zu Elektromagneten, also stromdurchflossenen Spulen, weisen Dauermagnete Vorteile auf bezüglich:

- volumenbezogener Leistungsdichte (z.B. in Motoren bis zu einigen kW)
- Ansprechzeit (keine Reaktionen gemäss Lenzschem Gesetz)
- thermischer Effizienz (keine Erwärmung wie in stromdurchflossenen Leitern)
- Flexibilität in der geometrischen Anordnung (Form und Dimension).

Die aufsehenerregende Entwicklung der Dauermagnete in den letzten 15 Jahren hat die volumenbezogene Leistungsdichte extrem anwachsen lassen, so dass Dauermagnete in einigen Anwendungen heute bereits mit Supraleiterspulen konkurrieren. Diese Verbesserung der Magnetwerkstoffe war in den letzten Jahren der Anstoss für neue, verbesserte Systemkonfigurationen und ermöglichte neue Anwendungsgebiete für Dauermagnete.

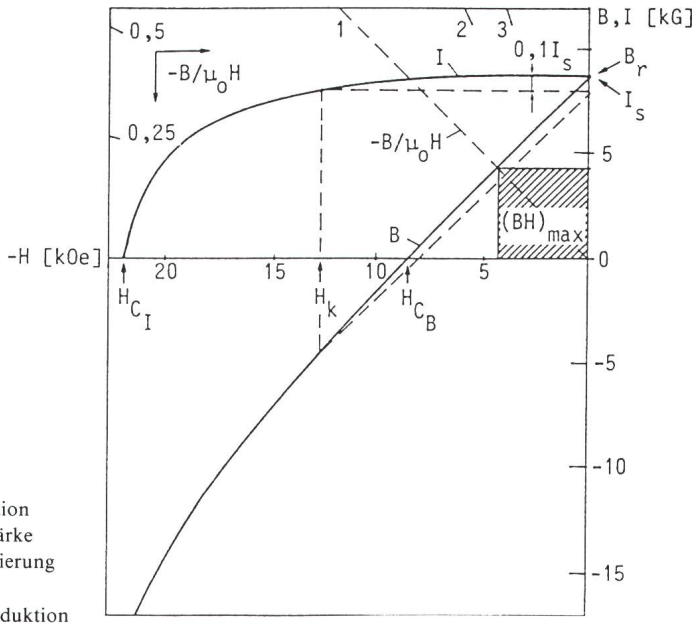
Begriffe aus der Magnettechnik

Ein Magnet ist durch seine Hysteresekurve (I-H-Kurve; I = Magnetisierung, H = magnetische Feldstärke) charakterisiert. Für technische Zwecke besser geeignet ist die Entmagnetisierungskennlinie (B-H-Kurve; B = magnetische Induktion). Diese beiden Kennlinien sind in Bild 2 für einen Dauermagnet dargestellt. Der Arbeitspunkt (B,H) eines Magnets ergibt sich aus dem Schnittpunkt der Arbeitsgeraden $-B/\mu_o H$ = konstant und der Entmagnetisierungskennlinie. Die Steigung der Arbeitsgeraden hängt von der Magnetkreisgeometrie ab. Bei einem langen Magnet und kleinem Luftspalt nähert sich der Arbeitspunkt dem Remanenzpunkt B_r, bei einem kurzen Magnet und grossem Luftspalt dem Punkt H_{cB} auf der Abszissenachse (Koerzitivfeldstärke). Auch ist es möglich, durch externe magnetische

Bild 1
Einsatzbereiche von Dauermagneten als Energiewandler

ENERGIEUMWANDLUNG	ANWENDUNGSBEISPIELE
o elektrisch / mechanisch	o Motoren, Aktuatoren, Lautsprecher, Messinstrumente
o mechanisch / elektrisch	o Generatoren, Tachos, Mikrofone, Messinstrumente
o mechanisch / mechanisch	o Kupplungen, Lager, Fixiersysteme
o elektrisch / elektrisch	o Mikrowellentechnik, Kernresonanzsysteme

Bild 2
Kennlinien eines Dauermagneten (B-H und I-H Kurven)



I Magnetisierung
B magnetische Induktion
H magnetische Feldstärke
I_s Sättigungsmagnetisierung
B_r Remanenz
H_{cB} Koerzitivfeld der Induktion
H_{cI} Koerzitivfeld der Magnetisierung
H_k kritische Feldstärke (Feldstärke, bei der die Magnetisierung noch 0,9 I_s beträgt)
$(BH)_{max}$ maximales Energieprodukt
$-B/\mu_o H$ Arbeitsgerade
$B=\mu_o H+I$, wobei $\mu_o=4\pi\cdot 10^{-7}\ \frac{T}{A/m}$

Felder den Arbeitspunkt eines Magneten zu variieren.

Das sog. Energieprodukt in einem festen Arbeitspunkt (B,H) ist die Rechteckfläche $B\times H$. Der Arbeitspunkt mit dem dazugehörigen maximalen Energieprodukt liegt bei Magneten mit geradliniger Entmagnetisierungskennlinie bei $-B/\mu_o H = 1$. Das maximale Energieprodukt $(BH)_{max}$ eines Dauermagnets hat die Bedeutung eines Qualitätsfaktors. Je höher der Wert $(BH)_{max}$ eines Magnets, desto kleiner ist das benötigte Magnetvolumen, um in einem Nutzluftspalt einen bestimmten magnetischen Fluss zu erzielen. Der $(BH)_{max}$-Wert eines Magnets wird in kJ/m^3 angegeben.

Chronologie der Entwicklung

Bis in die dreissiger Jahre waren einige martensitisch gehärtete Stahlsorten die einzigen für den Techniker verfügbaren Werkstoffe mit dauermagnetischen Eigenschaften. Die Widerstandskräfte (Koerzitivkräfte) gegen magnetische Gegenfelder dieser Werkstoffe waren recht gering. Deshalb mussten solche Magnete häufig durch erneutes Aufmagnetisieren regeneriert werden.

Die wirkliche, industrielle Nutzung der Hartmagnete wurde durch die Alnico-Magnete eingeleitet. Alnico steht für schmelz- und pulvermetallurgisch hergestellte Produkte auf der Basis von Aluminium-Nickel-Kobalt (AlNiCo)-Legierungen. Diese Magnete mit besonders hohen Werten der magnetischen Induktion oder Remanenz ermöglichten wichtige Fortschritte in der Elektrotechnik. In Geräten der Telephonie, in Mikrophonen, Lautsprechern, aber auch in Messgeräten und Magnetrons oder in speziellen Motoren finden wir Bauformen, die sich über Jahrzehnte zum Teil bis heute erhalten haben. Hauptsächlich aus Kostengründen – man denke an die Preise von Kobalt – ist jedoch der Alnico-Markt seit etwa 15 Jahren rückläufig.

Einen Durchbruch in der Massenanwendung in Konsumgütern schafften die in den fünfziger Jahren aufgekommenen Ferrite. Diese auch als keramische oder Oxid-Magnete bezeichneten Produkte, bestehend aus Barium (Ba)- oder Strontium (Sr)-Oxid und Eisenoxid (Fe_2O_3), werden durch Sintern eines Presslings aus Pulver oder Feuchtmasse hergestellt. Die Ferrite haben heute mit Abstand die grösste wirtschaftliche Bedeutung aller Hartmagnetfamilien. Wir finden sie in unserem täglichen Leben auf Schritt und Tritt: in Lautsprechern und Videogeräten, in Haushaltapparaten, in vielen Hilfsmotoren, von denen wir zum Beispiel in einem heutigen Automobil über ein Dutzend vorfinden.

Anfang der siebziger Jahre wurden bei Brown Boveri & Cie in Baden in Europa die ersten Seltenerd-Kobalt-Magnete industriell hergestellt. Die Seltenen Erden sind die im periodischen System der chemischen Elemente bekannten 17 Lanthanide. Die Erzmineralien, in welchen die Lanthanide als Gemische in Oxidform vorkommen, finden sich in der Erdkruste zwar nicht gerade häufig (Bild 3), aber von selten kann man nicht sprechen. Damit ist allerdings noch nichts ausgesagt über die praktische Verfügbarkeit der einzelnen Elemente. Weil die Aufbereitung der Seltenerd-Oxide in separierter Form verfahrenstechnisch aufwendig ist und teure Anlagen erfordert, ist der Markt dieser Rohstoffe für den Einkäufer nach wie vor ein spezielles Kapitel.

Die Samarium-Kobalt-Magnete (SmCo-Magnete) sind die erste Generation in der Familie der Seltenerd-Magnete, die sich einen festen Platz in industriellen Anwendungen erobert haben. Sie werden pulvermetallurgisch

Div. chemische Elemente	Lanthanide
Ni (80)	Ce (46)
Sn (40)	La (28)
Co (25)	Nd (24)
Pb (16)	Sm (6,5)
Ag (0,1)	Pr (5,5)

Bild 3 Vorkommen einiger Elemente in der Erdkruste
In Klammer: Konzentration in ppm

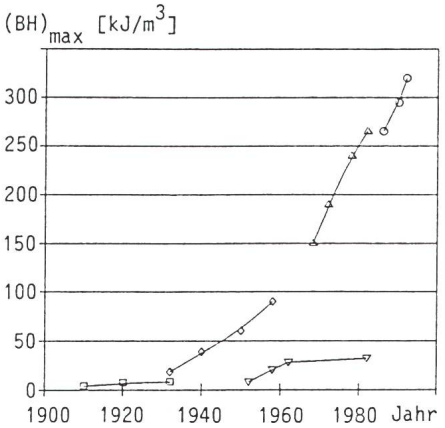


Bild 4 Entwicklung des magnetischen Energieproduktes $(BH)_{max}$ im Laufe der Zeit
$(BH)_{max}$ magnetisches Energieprodukt bei 20 °C
magn. Stähle
Ferrite
Neodym Eisen Bor
Alnicos
Samarium Kobalt

gefertigt. In ihren magnetischen Energieprodukten $(BH)_{max}$ übertreffen sie sowohl die Ferrite als auch die Alnicos um ein Vielfaches. Bei der zweiten, erst seit knapp sechs Jahren bekannten Generation handelt es sich um die Neodym-Eisen-Bor-Magnete (NdFeB-Magnete). Aufgrund ihrer nochmals gesteigerten Energieprodukte und ihrer günstiger erhältlichen Legierungskomponenten kann man ihnen eine bedeutungsvolle Zukunft voraussagen. Bild 4 zeigt die Entwicklung des Energieprodukts von Dauermagneten im Laufe der Zeit.

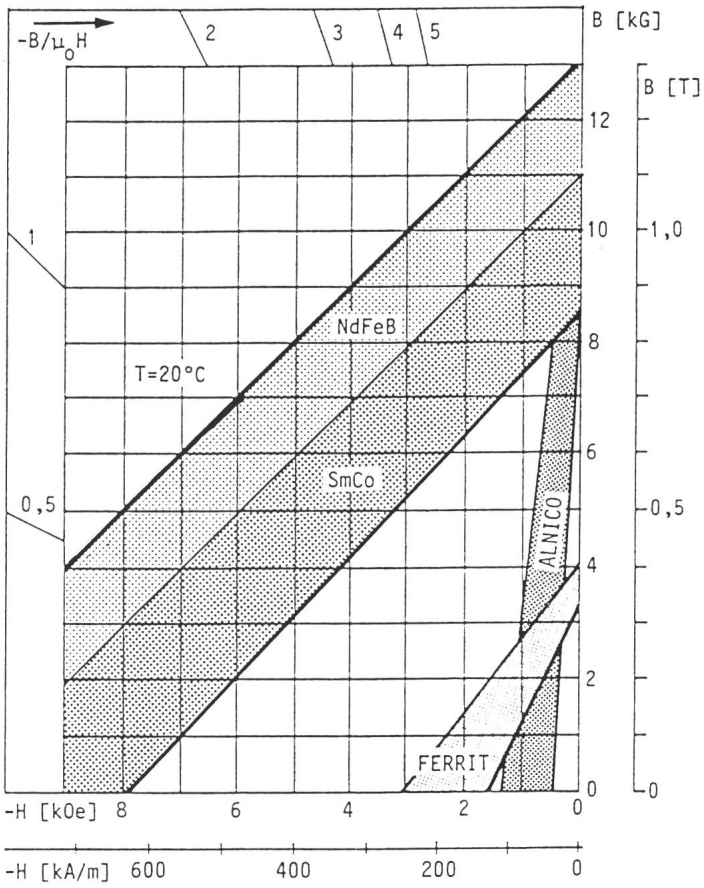


Bild 5
Entmagnetisierungskennlinienbereiche, *B (H)* der heute wichtigsten Dauermagnetfamilien

Kriterien für den Einsatz von Dauermagneten

In manchen Produkten kann man Dauermagnete als Schlüsselkomponenten identifizieren, welche neue technische oder wirtschaftliche Perspektiven eröffnen konnten. Als Beispiele seien erwähnt die:

- kleinen Schrittmotoren in Analogquarzuhren
- schnellsten Schritt- und Linearmotoren in Computerperipheriegeräten
- drehmomentstärksten Stell- oder Schrittmotoren in Robotern oder Werkzeugmaschinen
- Dauermagnetkupplungen zur berührungslosen Übertragung von Kräften und Drehmomenten in chemischen Pumpen und Autoklaven
- leistungsstarken Elektronenstrahl-Unduliersysteme für die Nachrichtentechnik in der Luft- und Raumfahrt
- sichersten Lagerungen für Ultrazentrifugen.

Die diversen Eigenschaften eines Hartmagnets werden nicht in allen Fällen gleich gewichtet. Anhand der Hysteresekurve (Bild 2) wird versucht, die grundlegenden Aspekte aufzuzeigen:

- Je grösser das maximale Energieprodukt $(BH)_{max}$, desto kompakter kann ein System mit vorgegebener Leistung gebaut werden.
- Je höher die Remanenz B_r, desto grösser sind die Kräfte beziehungsweise die Drehmomente, welche durch die Magnete übertragen werden können.
- Je grösser die Koerzitivfeldstärke H_{cJ}, desto widerstandsfähiger ist das Magnetsystem gegen Entmagnetisierung und desto grösser wird der mögliche Arbeitsbereich des Magnets.
- Je «rechteckiger» oder «geradliniger» die $B(H)$-Kennlinie, desto kleiner sind die Verluste bei dynamischer Beanspruchung des Magnets.

Als Vergleich dieser Eigenschaften sind in Bild 5 die Entmagnetisierungskennlinien der wichtigsten Dauermagnetfamilien aufgetragen. Als zusätzlicher, nicht aus der Hysteresekurve ablesbarer Aspekt muss noch die Temperaturstabilität in Betracht gezogen werden. Dabei sind drei verschiedene Phänomene zu unterscheiden:

- die reversiblen Änderungen der Magnetisierung I in Funktion der Temperatur, ausgedrückt durch einen Temperaturkoeffizienten α (ppm/°C). Eine Klassifizierung der wichtigsten Dauermagnete bezüglich thermischer Stabilität dieser Art zeigt Bild 6.
- die irreversiblen, aber durch erneutes Aufmagnetisieren in einem genügend starken äusseren Magnetfeld

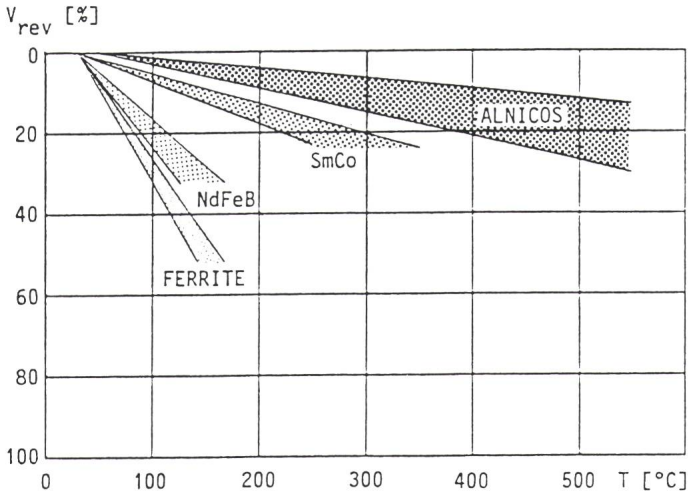


Bild 6
Klassifizierung von Dauermagneten bezüglich thermischer Stabilität
V_{rev} reversible Verluste von $(BH)_{max}$

rekuperierbaren Änderungen der Magnetisierung in Abhängigkeit der Temperatur.
- die irreversiblen Änderungen der Magnetisierung, verursacht durch metallurgische oder chemisch-strukturelle Veränderungen im Werkstoff. Diese Änderungen können nicht durch erneutes Aufmagnetisieren rückgängig gemacht werden.

Betrachten wir zuerst die Entmagnetisierungskennlinien (zweiter Quadrant der B(H)-Kurve) der vier Magnetfamilien Alnico, Ferrite, Samarium-Kobalt- und Neodym-Eisen-Bor-Magnete (Bild 5). NdFeB-Magnete stehen klar an der Spitze. Eine ganz andere Rangfolge ergibt sich jedoch aus dem stark vereinfachten Diagramm der thermischen Stabilität in Bild 6. Hier sind die Alnicos unschlagbar. Die wichtigsten technischen Daten für diese vier heute im Einsatz befindlichen Magnetfamilien sind in Bild 7 zusammengefasst.

Magnetfamille	bei T=20 °C	bei T=150 °C
Ferrite	100	55
Alnico	25	23
Neodym Eisen Bor	20	12
Seltenerd Kobalt	10	9

Bild 8 Klassifizierung von Dauermagneten nach dem Kriterium $(BH)_{max}$ × Volumen/Preis

verwendeten Magnets optimiert werden, so dass der sinnvollste Vergleich bei der Auswahl des geeignetsten Magnetwerkstoffes jener der Gesamtkosten eines Systems ist.

Um trotzdem eine gewisse Vorstellung von den Kosten zu haben, soll die Grösse «maximales Energieprodukt × Magnetvolumen/Preis» für die verschiedenen Dauermagnetwerkstoffe verglichen werden (s. Bild 8). Diese Grösse wurde für Ferritmagnete (bei T = 20 °C) zu 100 normiert. Aus Bild 8 geht hervor, dass Ferrite um etwa eine Grössenordnung mehr «Energieumwandlungskraft» pro Franken leisten als die rund zehnmal stärkeren Seltenerd-Kobalt- oder NdFeB-Magnete. Allerdings lässt sich mit diesen neuen Werkstoffen, innerhalb des gleichen Bauvolumens, ein etwa zehnmal leistungsfähigeres System bauen oder bei gleicher Leistung das Bauvolumen um einen Faktor 10 reduzieren. Auch die Alnico-Magnete bleiben aufgrund ihrer hervorragenden thermischen Stabilität in gewissen Anwendungen die optimalste Lösung.

Magnete in Motoren

Die bemerkenswerte Verbesserung der Magnetwerkstoffe in den letzten 15 Jahren hat dazu geführt, dass in einer Vielzahl bürstenloser Gleichstrommotoren Seltenerd-Magnete mit grossem Erfolg eingesetzt werden. Etwa ein Drittel dieser modernen Dauermagnete werden heute in Servomotoren eingesetzt. Somit ist die Motorenindustrie heute die wichtigste Anwenderin von Seltenerd-Magneten. Die Wachstumsraten auf diesem Gebiet sind überdurchschnittlich.

In einem Dauermagnetmotor bewegt sich der Arbeitspunkt $-B/\mu_o H$ der Magnete während des Betriebs in einem bestimmten Arbeitsbereich (s. Bild 9). Im unbelasteten Fall ist der Arbeitspunkt der Magnete nur von der Motorgeometrie abhängig (Luftspalt, Magnetdicke und Magnetform, Nutenzahl). Der mittlere Arbeitspunkt ergibt sich aus dem Schnittpunkt a der Arbeitsgeraden $-B_m^a/\mu_o H_m^a$ mit der Induktionskurve $B(H)$ des verwendeten Magnetmaterials. Die diesem Arbeitspunkt entsprechende Magnetisierung des Magnets ist in Bild 9 durch den Punkt a^* gekennzeichnet. Dabei gilt:

	Ferrit	Alnico 5	Alnico 8	Recoma 20	Recoma 28	Refema 33	Ugistab 255 H	Ugistab 215 XH
B_r [T]	0,37	1,25	0,8	0,9	1,07	1,22	1,17	1,06
H_{cI} [kA/m]	240	53	119	2000	1300	1200	1350	1990
$(BH)_{max}$ [kJ/m³]	25	40	40	160	225	260	255	215
ϱ [g/cm³]	4,8	7,2	7,2	8,2	8,3	7,5	7,5	7,5
$\alpha(B_r) = \Delta B_r/B_r \times \Delta T$ [% × K⁻¹]	-0,2	-0,02	-0,012	-0,045	-0,03	-0,11	-0,11	-0,11
Max. Betriebstemperatur [°C]	150	550	550	250	350	80	120	180
Magnetisierungsfeldstärke [T]	1,2	0,2	0,2	2,0	5,0	2,0	2,0	2,0
Spez. elektr. Widerstand [μ Ω cm]	∞	47	58	54	90	150	150	150

Bild 7 Technische Daten für verschiedene werkzeuggepresste Dauermagnete

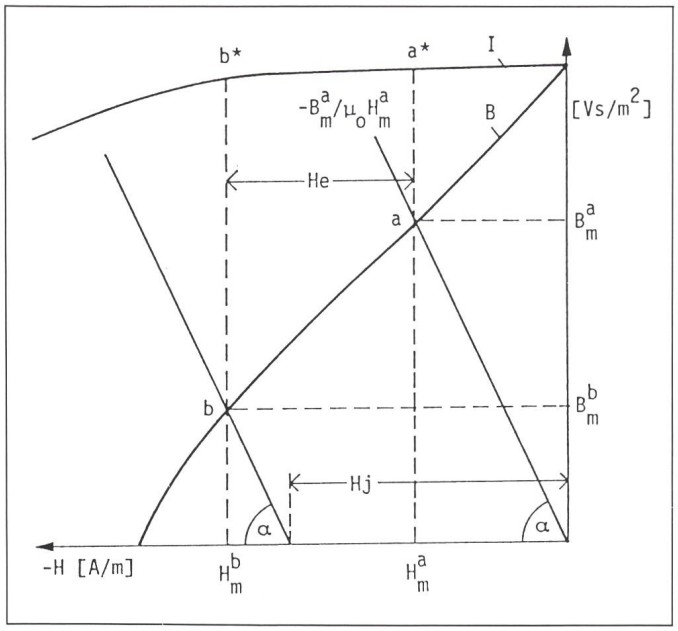
Ungefähre chemische Zusammensetzungen: Recoma 20: $SmCo_5$; Recoma 28: Sm_2Co_{17}; Refema 33: $Nd_{15}Fe_{67,5}B_8Al_{0,5}$; Ugistab 255H: $Nd_{15}Fe_{67,5}Co_5V_4B_8Al_{0,5}$; Ugistab 215XH: $Nd_{13,5}Dy_{1,5}Fe_{67,5}Co_5V_4B_8Al_{0,5}$.

Recoma: Eingetragenes Warenzeichen für Dauermagnete auf der Basis von Seltenen Erden und Kobalt der Firmen Aimants Ugimag S.A., Frankreich, und Ugimag Recoma AG in Lupfig, Schweiz.

Refema und Ugistab: Eingetragene Warenzeichen für Dauermagnete auf der Basis von Neodym-Eisen-Bor der Firma Aimants Ugimag S.A., hergestellt nach Lizenz der Firma Sumitomo Special Metals Co. Ltd.

Neben diesen technischen Aspekten für die Auswahl des für einen bestimmten Anwendungsfall optimalen Dauermagnets ist natürlich der wirtschaftliche Gesichtspunkt von grosser Bedeutung. Stück- oder Kilopreise zu vergleichen ist nicht sehr sinnvoll. Der einzelne Magnetkreis sollte entsprechend den Eigenschaften des jeweils

Bild 9
Arbeitspunkt im Magnetkreis



a für statischen Magnetkreis
b für dynamischen Magnetkreis
H_e zusätzliches Gegenfeld, vom Strom i verursacht (dynamisch)
H_m^a eigenes entmagnetisierendes Feld des Magneten (statisch)
H_j Verschiebung der statischen Arbeitsgeraden infolge des Stromes *i*
$H_m^b = H_m^a + H_e$

$-B_m^a/\mu_o H_m^a \sim l_m A_g / l_g A_m$

$\alpha = \text{arc tg}\,(B_m^a/\mu_o H_m^a)$

wobei
μ_o = $4\pi \times 10^{-7}$ Tm/A
l_m = Magnetdicke (in Magnetisierungsrichtung)
A_g = Luftspaltfläche
l_g = Luftspaltlänge (Distanz Magnetoberfläche-Eisenoberfläche)
A_m = Magnetquerschnittsfläche

Im dynamischen Fall (Belastung des Motors) wirkt ein Gegenfeld *H* auf den Magnet, so dass die Arbeitsgerade um H_j parallel verschoben wird. Der Arbeitspunkt des Magnets im dynamischen Fall ist dann der Punkt *b*. Die diesem Arbeitspunkt entsprechende Magnetisierung des Magnets ist in Bild 9 durch den Punkt *b** gekennzeichnet. Dabei gilt $H_j \sim Ni/l_m$, wobei

N = Windungszahl der Kupferwicklung
i = Stromstärke

Das zusätzliche, vom Strom herrührende Gegenfeld H_e kann berechnet werden zu:

$H_e = Ni / [(\mu_m l_g A_m / A_g) + l_m]$

μ_m = Permeabilität des verwendeten Magnetmaterials (bei Seltenerd-Magneten $\mu_m = 1$)

Bei sehr grossen Spitzenlasten (z.B. Spitzenlast = 10 × Nominallast) kann dieser neue dynamische Arbeitspunkt *b*, infolge des hohen Gegenfeldes H_e, sogar im 3. Quadranten der Hysterese-Kurve (s. Bild 2), d.h. bei negativen Induktionen *B* liegen.

Da in einem Servomotor der Arbeitspunkt je nach Belastung des Motors ändert, wird anstelle des «statischen» Qualitätsfaktors $(BH)_{max}$ ein neuer dynamischer Qualitätsfaktor $(IH)_{max}$ definiert (s. Bild 10). $(IH)_{max}$ kann als das grösstmögliche Rechteck unter der $I(H)$-Kurve beschrieben werden. Es kann abgeleitet werden, dass das maximale Drehmoment M_{max}, welches von einem Motor (bei konstantem Strom) produziert werden kann, direkt proportional zu diesem $(IH)_{max}$-Wert des verwendeten Magnetmaterials ist:

$M_{max} \sim (IH)_{max}$

Es gibt zwei hauptsächliche Kriterien für die Auswahl des optimalen Magnetmaterials für ein spezifisches Motordesign:

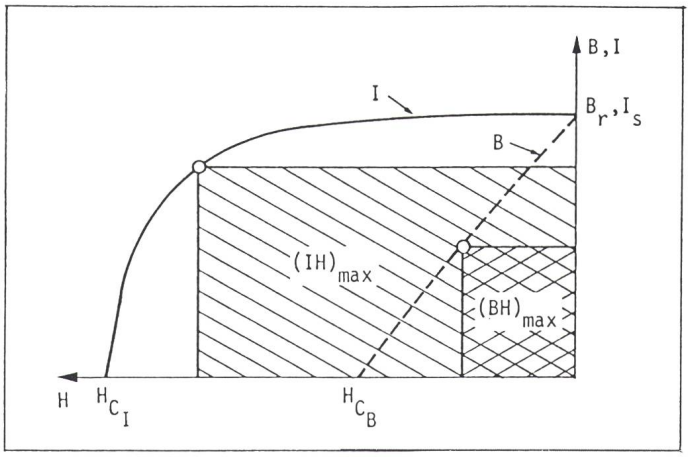
- den wirtschaftlichen Aspekt: Energie/Kosten (Joule/Franken)
- den technischen Aspekt: Energie/Gewicht (Joule/kg)

In den Bildern 11 und 12 sind diese beiden Aspekte für verschiedene Magnetmaterialien für dynamische Motoranwendungen (d.h. $[IH]_{max}$) miteinander verglichen, und zwar bei Magnettemperaturen von 20 °C und 150 °C.

Die Ferritmagnete zeichnen sich durch hohe Energie/Kosten-Werte aus. Falls Volumen und Gewicht nicht die entscheidenden Aspekte sind, ergibt sich bei Verwendung von Ferritmagneten ein kostengünstiger Motor (Automobilindustrie, Haushaltgeräte). Falls hingegen ein möglichst kleines Volumen und Gewicht sowie gute dynamische Eigenschaften und ein hoher Wirkungsgrad des Motors die wesentlichen Kriterien sind, wird die Wahl auf einen Seltenerd-Magneten mit hohen Energie/Gewicht-Werten fallen (Roboter, Werkzeugmaschinen, Computerperipheriegeräte, militärische Anwendungen).

In den meisten modernen, bürstenlosen Gleichstrommotoren für die Robotertechnik und Werkzeugmaschinen

Bild 10
Die Qualitätsfaktoren $(BH)_{max}$ und $(IH)_{max}$



$(BH)_{max}$ maximales statisches Energieprodukt
$(IH)_{max}$ maximales dynamisches Energieprodukt

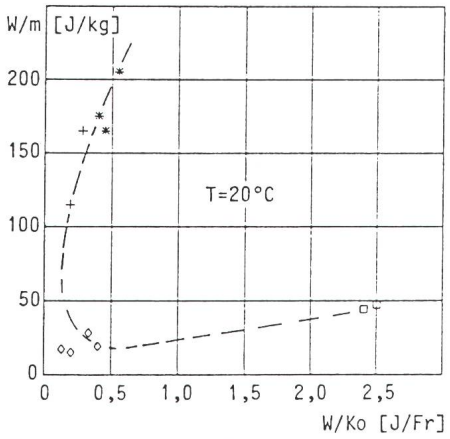


Bild 11 Spezifische Energie in Abhängigkeit von Energie/Kosten für verschiedene Dauermagnetfamilien bei T=20°C

W magnetische Energie $(IH)_{max} \cdot V$
V Magnetvolumen
W/m Spezifische Energie
W/Ko Energie/Kosten
+ SmCo
✳ NdFeB
□ Ferrite
◇ Alnicos

Werte für den Einsatz der Magnete bei T=20 °C

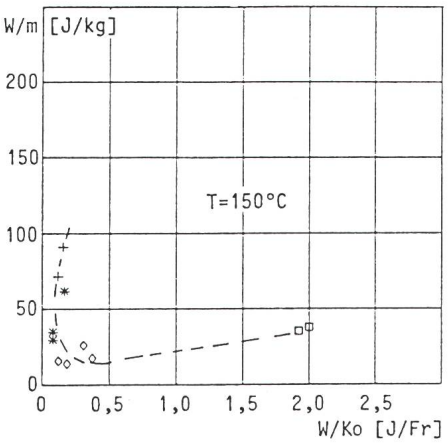


Bild 12 Spezifische Energie in Abhängigkeit von Energie/Kosten für verschiedene Dauermagnetfamilien bei T=150 °C

W Magnetische Energie $(IH)_{max} \cdot V$
V Magnetvolumen
W/m Spezifische Energie
W/Ko Energie/Kosten
+ SmCo
✳ NdFeB
□ Ferrite
◇ Alnicos

Werte für den Einsatz der Magnete bei T=150 °C

ist das Spitzendrehmoment etwa 2- bis 5mal höher als das nominale Drehmoment. Deshalb liegt der tiefste Arbeitspunkt des Magnets selten oder nie in

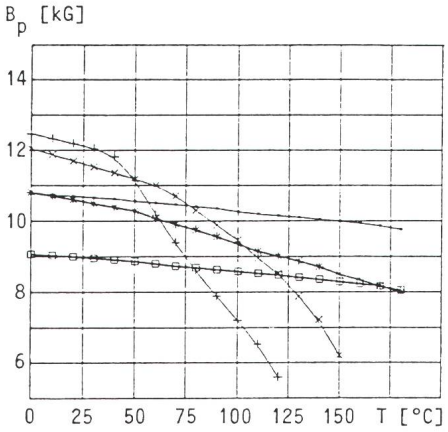


Bild 13 Abnahme der Remanenz bei Seltenerd-Magneten durch reversible und irreversible Verluste als Funktion der Temperatur

B_p magnetische Induktion
T Temperatur
tiefster Arbeitspunkt: $-B/\mu_0 H$=0,5

Recoma 20 — Ugistab 215XH
Ugistab 255H — Refema 33
Recoma 28

der Nähe des $(IH)_{max}$-Punktes. Meistens liegt der tiefste Arbeitspunkt im dynamischen Fall bei einer momentanen Überlast des Motors bei etwa $-B/\mu_0 H$ = 0,5 (s. Punkt *b* in Bild 9).

In Bild 13 ist die Abnahme der Remanenz als Funktion der Temperatur von verschiedenen Seltenerd-Magneten aufgetragen. Dabei wurden sowohl die reversiblen als auch die irreversiblen Magnetisierungsverluste der einzelnen Magnetqualitäten berücksichtigt, unter der Annahme, dass der tiefste Arbeitspunkt $-B/\mu_0 H$ = 0,5 ist. Durch den Einfluss der Temperatur wird der ursprüngliche Wert B_r auf den Wert B_p reduziert. Der reversible Anteil von B_p kann mit Hilfe des jeweiligen $\alpha(B_r)$-Wertes (s. Bild 7) berechnet werden.

Aus Bild 13 ist ersichtlich, dass es extrem von der maximalen Magnettemperatur abhängt, mit welchem Magneten noch der grösste Magnetfluss erzeugt werden kann. Bei Motoren der Klasse F (T_{max} = 150 °C) ist der Recoma-28-Magnet der leistungsstärkste Magnetwerkstoff. Da aber in diesen Motoren (grosse Serien) die Magnete erst im montierten Zustand magnetisiert werden sollten, ist der Einsatz von Recoma 28 wegen der erforderlichen hohen Magnetisierungsfeldstärke (s. Bild 7) problematisch. Meistens wird deshalb in solchen Grossserien ein $SmCo_5$-Magnet (Recoma 20) eingesetzt. Gegenüber einem solchen Recoma 20-Magnet aber sind heute die besten NdFeB-Magnete, wie die Ugistab 215XH-Qualität für Temperaturen bis 150 °C, überlegen (s. Bild 13).

Heutiger Stand und Aussichten

Die Entdeckung der hartmagnetischen Eigenschaften von $Nd_2Fe_{14}B$ erfolgte 1982 unabhängig voneinander durch Forscherteams der beiden Industriegruppen General Motors (Koon, Croat) und Sumitomo Special Metals (Sagawa). In ungleich stärkerem Masse als die Ende der sechziger Jahre veröffentlichten Ergebnisse von $SmCo_5$-Magneten hat diese Neuigkeit eine grosse Aktivität in Forschungs- und Entwicklungslabors ausgelöst. Hunderte von Veröffentlichungen über Darstellungen und Eigenschaften von NdFeB sind in den letzten fünf Jahren erschienen. Die Gründe dafür dürften folgende sein:

- Von beiden Entdeckerfirmen wurde die Neuigkeit vorerst gut behütet. Es verging etwa ein Jahr nach der Patentanmeldung, bis die Neuigkeit als wirkliche Sensation angekündigt wurde, vorerst nur von Sumitomo.
- Dass die markante Verbesserung der magnetischen Eigenschaften (Erhöhung von $[BH]_{max}$ um rund 20%) bei Verwendung von kostengünstigeren Rohmaterialien im Vergleich zu Sm und Co gelang, wurde gewissermassen als Doppelsensation empfunden. Eisen anstelle von Kobalt zu verwenden war bisher ein Traum gewesen. Bei den 2/17-Typen von SmCo waren allerdings in der Legierung bereits 15 ... 20% Fe zusammen mit etwa 50% Co zu finden. Das Nd stach noch mehr hervor: Mit einem gegenüber Sm deutlich häufigeren Vorkommen und bisher ohne grosse Nachfrage für andere Anwendungen (bisher fast nutzloses Nebenprodukt der Seltenerd-Aufbereitung) versprach es einen Erdrutsch in den Gestehungskosten. In manchen Zukunftsszenarien wird davon gesprochen, dass Nd-Magnete eine ähnlich grosse wirtschaftliche Bedeutung erlangen werden wie die Ferrite.

Die bereits erwähnte geringe Temperaturstabilität sowie eine manchmal erhöhte Anfälligkeit gegen Korrosion waren vorerst eindeutige Schwachpunkte von NdFeB-Magneten, so dass es zuerst nicht zu einer sehr raschen

und umfassenden Substitution der SmCo-Magnete in deren angestammten Anwendungsgebieten kam. Die wichtigsten Ziele in der Weiterentwicklung von NdFeB bestanden daher in der Erhöhung der Curie-Temperatur, in der Verbesserung der Koerzitivfeldstärke vergleichbar zu SmCo sowie in der Verbesserung des Korrosionshaltens. Das erste Ziel wurde durch Zulegieren von Co erreicht, das zweite durch Zugabe anderer Seltenerd-Metalle, hauptsächlich Dy anstelle von Nd. Dadurch sind sich die beiden Typen der Seltenerd-Magnete sowohl bezüglich Zusammensetzung als auch bezüglich magnetischer Eigenschaften wieder nähergerückt.

Anfang 1990 wurde ein entscheidender Fortschritt bezüglich der Stabilität der NdFeB-Magnete erzielt. Die zur Pechiney-Gruppe gehörende Ugimag, führend in der Herstellung von Permanentmagneten auf der Basis von Seltenen Erden in Europa und den USA, hat eine neue Generation von Neodym-Eisen-Bor-Magneten entwikkelt. Diese neue Generation zeichnet sich durch ein stark verbessertes Korrosionsverhalten sowie durch eine höhere thermische Stabilität aus. Diese Fortschritte sind das Resultat einer intensiven internationalen Zusammenarbeit innerhalb Pechiney zwischen den Forschungsequipen von Ugimag (Frankreich und USA), des internationalen Pechiney-Forschungszentrums von Voreppe (Frankreich), der weltweit in Superlegierungen für die Luftfahrtindustrie führenden Howmet (USA) und der von *M. Sagawa* geleiteten japanischen Firma Intermetallics Co. Ltd.

Die Fortschritte sind erreicht worden durch die Entwicklung von neuen, weniger korrosionsempfindlichen Zusammensetzungen, welche bei entsprechender Verarbeitung Mikrostrukturen ergeben, die ein Ausbreiten der Oxydation verhindern. Zusätzlich wird ein höheres Koerzitivfeld erreicht, welches zu höherer thermischer Stabilität führt (s. Artikel «Nouveaux types d'aimants NdFeB à comportement amélioré vis-à-vis de la corrosion et de la température» von P. Tenaud e.a.[1]). Mit entsprechender Oberflächenbehandlung und -beschichtung versehen, wird diese neue Generation von Neodym-Eisen-Bor-Magneten[1] in den Gebieten Informatik und hochentwickelte Elektromechanik eine schnellwachsende Anwendung finden.

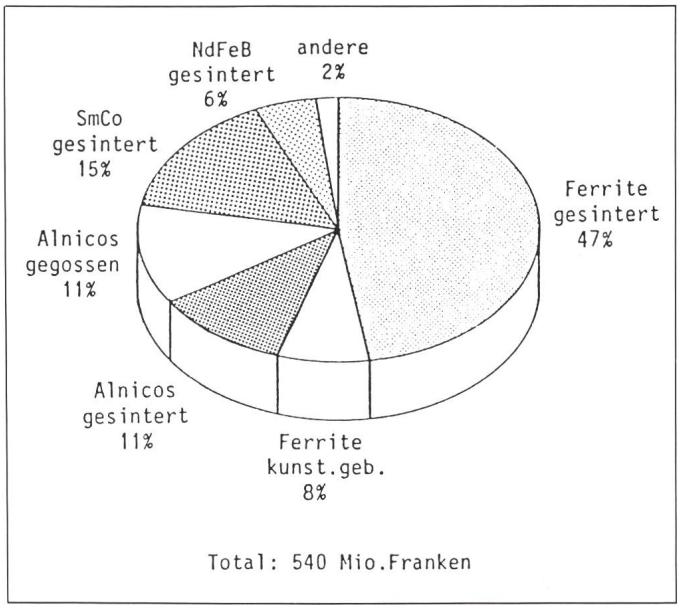
Europäischer Markt für Dauermagnete

Im Jahre 1989 wurden in Europa in verschiedensten Anwendungen und Systemen Dauermagnete im Wert von ungefähr 540 Millionen Franken eingesetzt, was rund 18% der weltweiten Anwendung von Dauermagneten entspricht. Bild 14 stellt die Aufteilung nach verschiedenen Magnetfamilien dar. In den nächsten zehn Jahren dürften die NdFeB-Magnete wertmässig ihren Anteil in Europa bis gegen 40% steigern. Dieser grosse Zuwachs wird durch folgende Anwendungsgebiete ausgelöst:

- Linearmotoren (VCM) für die Lesekopfpositionierung in Computer-Plattenspeichern und Compact-Disc-Geräten
- Linearantriebe und Schrittmotoren in Computerperipheriegeräten und in der Automatisationstechnik
- Bürstenlose Gleichstrommotoren in Robotern und Werkzeugmaschinen
- Magnetkupplungen in Chemiepumpen und Autoklaven sowie Ersatz von hydraulischen und pneumatischen Aktuatoren durch magnetische Linearkupplungen
- Magnetische Lagerung in Massentransport-Systemen (Magnetbahnen)
- Kernspinresonanzgeräte für die Medizin
- Telephonhörer, Mikrophone, Lautsprecher
- Separatoren zum Trennen von magnetisierbaren und unmagnetischen Materialien
- Neue technische Anwendungen, bei denen grosse Volumen von Dauermagneten benötigt werden.

Die Dauermagnete sind ein gutes Beispiel zum Aufzeigen der starken und komplexen Wechselwirkungen zwischen der Werkstoffkunde (Physik/Chemie), der Technologie (industrielle Fertigung) und der Ökonomie (Marktnachfrage). Das jüngste Ereignis mit starker Wirkung war hier eindeutig der Technologiestoss durch die Seltenerd-Magnete. Die Nachfrage nach nochmals verbesserten Qualitäten ist nicht ausgeblieben. Den Magnetproduzenten wird es zweifellos gelingen, dank grossen Entwicklungsanstrengungen Eigenschaften und Herstellverfahren der Dauermagnete noch weiter zu verbessern.

Bild 14
Markt der Dauermagnete in Europa im Jahre 1989



[1] Produktion und Vertrieb solcher Magnete erfolgen unter dem Namen Ugistab in Europa durch Aimants Ugimag (Frankreich), Ugimag Recoma (Lupfig, Schweiz) und I.G.T. Ltd. (England) ab April 1990 und in den USA durch I.G.T. Inc. und Recoma Inc. ab Ende 1990.

Literatur

[1] *P. Tenaud, F. Vial* et *M. Sagawa:* Nouveaux types d'aimants NdFeB à comportement amélioré vis-à-vis de la corrosion et de la température. Bull. SEV/VSE 81 (1990) 15, S. 30...32.