



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Energie BFE

WIRTSCHAFTLICHKEIT, ANWENDUNGEN UND GRENZEN VON EFFIZIENTEN PERMA- NENT-MAGNET MOTOREN.

Anhang A

Ausgearbeitet durch

Markus Lindegger, CIRCLE MOTOR AG

Tannackerstrasse 25, CH-3073 Gümligen, www.circlemotor.com, info@circlemotor.ch

Dominique Salathé, Yann Gosteli, Daniel Imgrüth, Damian Zumstein

Hochschule für Technik + Architektur Luzern

Technikumstr. 21, CH-6048-Horw, www.hta.fhz.ch dgsalathe@hta.fhz.ch

Hans-Peter Biner, Blaise Evéquoz, Marc Emery

Hochschule Wallis HEV's

Route du Rawy 47, CH-1950 Sion, www.hevs.ch hpeter.biner@hevs.ch

Anhang A: Magnetwerkstoff-Technologie

Diese Arbeit mit dem Titel „Magnetwerkstoff-Technologie“ bildet den ersten Teil der Projektarbeit „Permanentmagnet-Motor“. Sie dient einerseits als Einarbeitung in das Thema und stellt andererseits eine Zusammenfassung über theoretische Grundlagen, verschiedene Magnetwerkstoffe und den aktuellen Stand der Herstellungsverfahren dar.

Die ersten 2 Kapitel befassen sich einerseits mit der Entwicklung von Permanentmagneten und andererseits mit grundsätzlichen Begriffen und Zusammenhängen unabhängig vom Magnetwerkstoff. Diese Informationen sind wichtig um den nötigen theoretischen Hintergrund zu erhalten und dadurch später die Zusammenhänge in einem realen Magnetkreis zu verstehen.

Jeder Magnetwerkstoff hat auf Grund seiner chemischen Zusammensetzung andere magnetische Eigenschaften und demzufolge ein anderes Einsatzgebiet. Diese Eigenschaften sind in Kapitel 3 beschrieben. Grundsätzlich unterteilt man Magnetwerkstoffe in Hartferritmagnete, Alnico-Magnete und Seltenerd-Magnete (auch Hochenergie-Magnete genannt).

Aus diesen 3 Magnetwerkstoffen ist die Industrie heutzutage im Stande fast alle kundenspezifischen magnetischen Bauteile zu fertigen. Während in der Vergangenheit Permanentmagnete aus den in Kapitel 3 beschriebenen Werkstoffen zum grössten Teil im Sinter- oder Gussprozess hergestellt wurden, so erobern heutzutage kunststoffgebundene Magnete mehr und mehr den Markt. In der Vergangenheit waren solche Dauermagnete eher in technischen low-level Applikationen bekannt. Jedoch ergab sich während der vergangenen 10 Jahre auf diesem Gebiet ein erheblicher Marktzuwachs.

Spezielle Anwendungen erfordern meistens noch eine nachträgliche Behandlung des fertigen Werkstoffes. Durch Beschichten der Oberfläche kann man den Magneten vor Korrosion schützen. Zudem stellt die Beschichtung einen Handlingsschutz dar, der bei gesinterten Magneten auf Grund ihrer spröden Struktur je nach Anwendungsfall sinnvoll sein kann.

Die bei der Produktion verwendete Energie wird als so genannte graue Energie bezeichnet. Dieses Thema wird in einem separaten Dokument behandelt.

Für genauere Informationen über die einzelnen Kapitel verweisen wir auf entsprechende Fachbücher und Internetlinks, welche im Quellenverzeichnis aufgeführt sind.

Inhaltsverzeichnis

1. Entwicklung der Permanentmagnete	3
2. Grundlagen Permanentmagnete	5
2.1. Was ist ein Permanentmagnet	5
2.1.1. Ferromagnetismus.....	6
2.1.2. Paramagnetismus.....	6
2.2. Technische Grundlagen und Begriffe.....	7
2.2.1. Hystereseschleife – Entmagnetisierungskurve	7
2.2.2. Magnetische Kenngrößen	9
2.2.3. Temperatureinfluss	15
3. Übersicht Magnetwerkstoffe.....	17
3.1. Materialien von Permanentmagneten	17
3.1.1. Hartferrit-Magnete.....	17
3.1.2. AlNiCo-Magnete	20
3.1.3. Hochenergie-Magnete	22
3.1.4. Samarium-Cobalt-Magnete (SmCo).....	25
3.1.5. Neodymium-Eisen-Bor-Magnete (NdFeB)	26
3.2. Dauermagnete im Vergleich.....	27
4. Herstellung von Permanentmagneten.....	29
4.1. Herstellungsverfahren	30
4.1.1. Press- und Sinterprozess	30
4.1.2. Kunststoffgebundene Magnete.....	36
4.1.3. Baugruppen mit Permanentmagneten.....	39
5. Korrosionsverhalten, Oberflächenschutz und Beschichtungen	41
5.1. Korrosionsverhalten.....	41
5.2. Oberflächenschutz.....	41
5.3. Beschichtung	42
5.3.1. Beschichtungsarten	42
5.3.2. Eigenschaftsprofil verschiedener Beschichtungen.....	47
Quellenverzeichnis	48

1. Entwicklung der Permanentmagnete

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

Die wirklich industrielle Nutzung von Hartmagneten 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 Flussdichten und der Remanenz, ermöglichten wichtige Fortschritte in der Elektrotechnik. In Geräten der Telephonie, Mikrofonen, Lautsprechern, aber natürlich auch in speziellen Motoren finden wir Bauformen, die sich über Jahrzehnte und zum Teil bis heute erhalten haben. Hauptsächlich aus Kostengründen, die Preise von Kobalt sind eher teuer, 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 Produkte werden auch als keramische oder Oxid-Magnete bezeichnet. Dies deshalb, weil sie aus Barium- oder Strontiumoxid und Eisenoxid durch Sintern eines Presslings aus Pulver oder Feuchtmasse hergestellt werden. Die Ferrite haben heute eine der wirtschaftlich grössten Bedeutungen aller Hartmagnetfamilien. Wir finden sie in unserem täglichen Leben auf Schritt und Tritt. Zum Beispiel finden wir diese in Videogeräten, Haushaltapparaten oder auch als Hilfsmotoren in Autos.

Anfang der siebziger Jahre wurden bei Brown Boveri & Cie in Baden die ersten Seltenerd-Kobalt-Magnete industriell hergestellt. Die Seltenen Erden sind im periodischen System der chemischen Elemente die 15 Lanthanide (siehe Kap. 3.1.3). Die Erzminerale, in welchen die Lanthanide als Gemische in Oxidform vorkommen, finden sich in der Erdkruste zwar nicht gerade häufig, deshalb auch der Name Seltenerd, aber von selten kann man nicht wirklich sprechen. Jedoch ist die Aufbereitung der Seltenerd-Oxide in separierter Form verfahrenstechnisch aufwändig und es sind auch teure Produktionsanlagen erforderlich.

Die Samarium-Kobalt-Magnete (SmCo) sind die erste Generation in der Familie der Seltenerd-Magnete, die sich einen festen Platz in industriellen Anwendungen erobert haben. Sie werden pulvermetallurgisch (siehe Kap. 4.1.1) gefertigt. In ihren magnetischen Energieprodukten ($B \cdot H$)_{max} übertreffen sie sowohl die Ferrite als auch die Alnicos um ein Vielfaches. Bei der zweiten, erst seit wenigen Jahren bekannten Generation handelt es sich um die Neodym-Eisen-Bor-Magnete (NdFeB). Aufgrund ihrer nochmals gesteigerten Energieprodukte und ihrer günstiger erhältlichen Legierungskomponenten ist ihnen sicherlich eine erfolgreiche Zukunft vorauszusagen. Die Abb. 1.1 zeigt die Entwicklung des Energieproduktes von Dauermagneten im Laufe der Zeit.

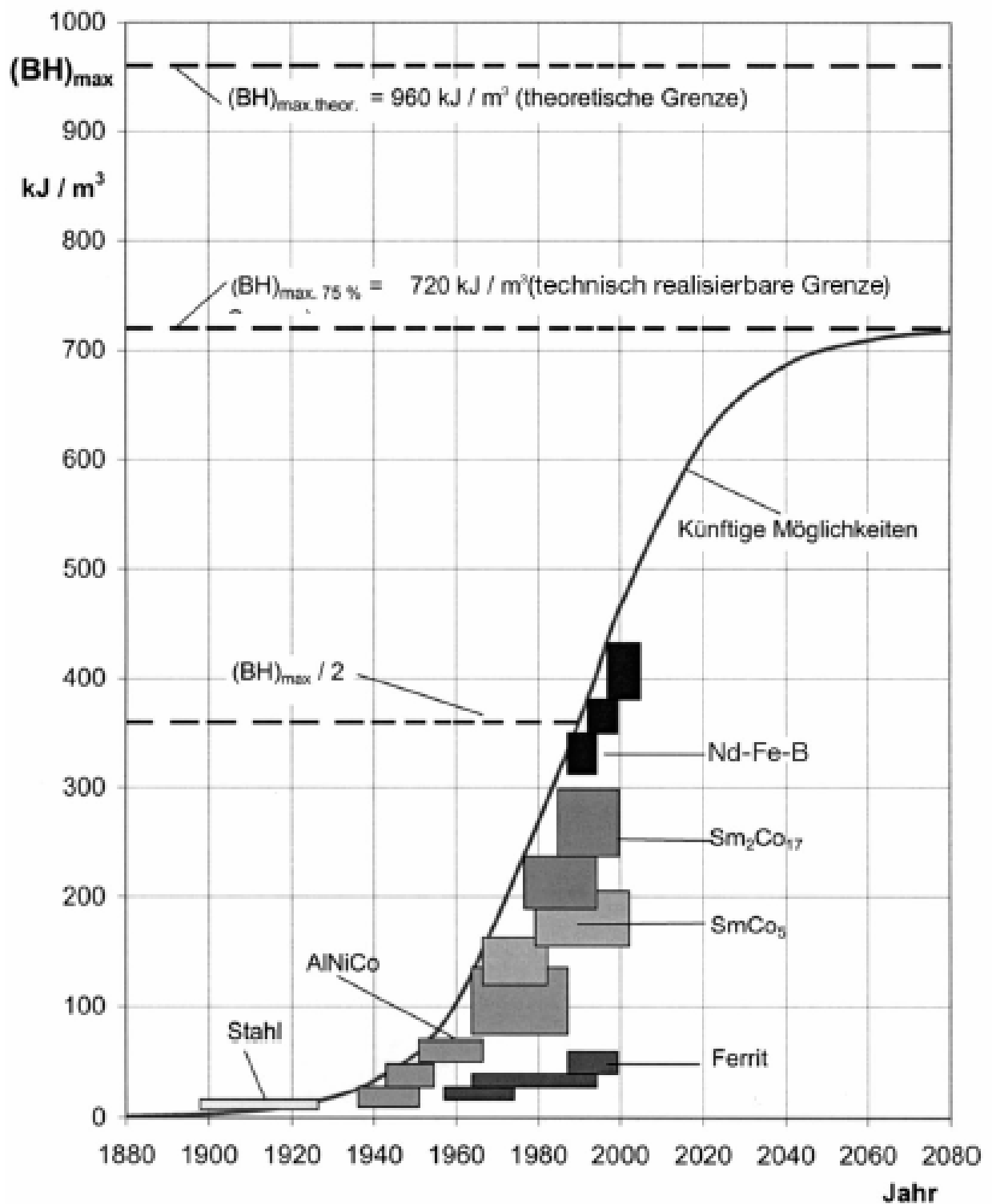


Abb. 1.1

2. Grundlagen Permanentmagnete

2.1. Was ist ein Permanentmagnet

Wie funktionieren Permanentmagnete?

Ein auch als Dauermagnet bezeichneter Permanentmagnet erzeugt Magnetfelder, ohne dass man einen makroskopischen Stromfluss erkennen könnte. Trotzdem arbeitet auch ein Permanentmagnet mit Strom, allerdings muss dieser nicht von außen zugeführt werden. Ein Permanentmagnet besteht aus vielen sehr kleinen Elementarmagneten, die durch eine Ansammlung von Atomen gebildet werden. Bei jedem Atom umkreist mindestens ein Elektron den Atomkern. In Abb. 2.1 ist dies anhand eines Wasserstoffatoms, welches nur ein einziges Elektron besitzt und damit das am einfachsten gebaute Atom darstellt, erläutert.

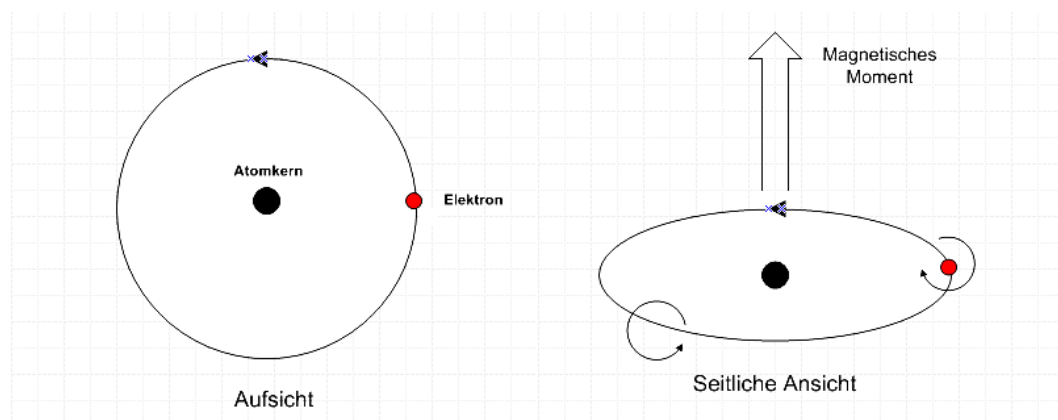


Abb. 2.1: Das Magnetfeld eines Wasserstoffatoms

Dieses eine Elektron wirkt wie ein elektrischer Strom durch z.B. einen Kupferdraht und erzeugt durch seine Bewegung ein magnetisches Feld. Der elektrische Strom ist nichts anderes als sich bewegende Elektronen. Sind Wasserstoffatome nun magnetisch? Nun, das Gas Wasserstoff als Ganzes ist nicht magnetisch, auch wenn die einzelnen Atome Magnetfelder erzeugen und damit magnetisch sind. Der Grund liegt darin, dass Wasserstoffatome sich völlig ungeordnet bewegen und sich daher die Magnetfelder der einzelnen Atome in der Summe kompensieren. Statistisch gesehen sind zu jedem Zeitpunkt genau so viele Magnete in die eine Richtung ausgerichtet wie in die Entgegengesetzte.

2.1.1. Ferromagnetismus

Der Ferromagnetismus¹ ist ein Phänomen von Festkörpern welches dadurch charakterisiert ist, dass elementare magnetische Momente eine gewisse Ordnung aufweisen. Bei bestimmten Materialien (wie z.B. Eisen mit geringen Verunreinigungen) bilden sich kleine Bereiche, in denen die Magnetfelder der Atome in die gleiche Richtung orientiert sind. Man nennt sie Weiss'sche Bezirke oder Domänen. Die Elementarmagnete kann man sich als winzig kleine magnetische Körnchen vorstellen, die selbstverständlich nicht so schön regelmässig geformt sind wie in Abb. 2.2. Da diese Weiss'schen Bezirke nach dem Erkalten der Schmelze zuerst einmal völlig wahllos orientiert sind, heben sich wie bei den Wasserstoffatomen die Magnetfelder der einzelnen Elementarmagnete komplett auf. Legt man aber ein ausreichend grosses magnetisches Feld von Aussen an, so richten sich einige Elementarmagnete entsprechend aus und verbleiben in dieser Stellung auch dann, wenn das äussere Feld verschwindet. Das kann man sich so vorstellen, dass zum Ausrichten der Elementarmagnete eine unterschiedlich hohe Kraft erforderlich ist, die davon abhängt, wie die Elementarmagnete schon im jungfräulichen Zustand ausgerichtet sind und wie sie mit den Nachbarkörnchen "verhakt" sind. Je stärker das äussere Feld ist, desto mehr Weiss'sche Bezirke richten sich entsprechend aus, bis bei einer bestimmten Feldstärke alle Elementarmagnete ausgerichtet sind. Dies wird als Sättigung bezeichnet. Wenn sich die Weiss'schen Bezirke nach dem Abschalten des externen Magnetfelds nicht alle wieder in ihre Ursprungsposition zurückdrehen, hat man einen Permanentmagneten hergestellt.

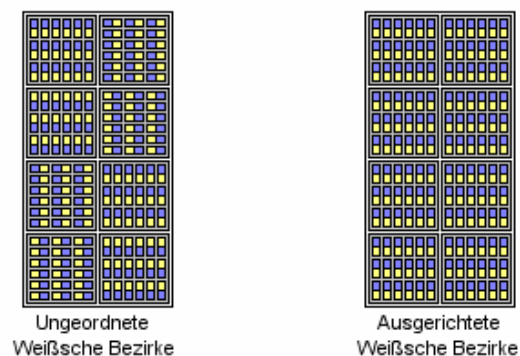


Abb. 2.2

2.1.2. Paramagnetismus

Als paramagnetisch bezeichnet man Substanzen, welche keine Weiss'schen Bezirke und eine positive magnetische Suszeptibilität² besitzen. Die Suszeptibilität beschreibt das Verhalten eines Stoffes in einem externen Magnetfeld. Paramagnetische Materialien magnetisieren sich in einem externen Magnetfeld so, dass sie das Magnetfeld in ihrem Innern effektiv verstärken. Der gegenteilige Effekt – eine Abschwächung des Magnetfeldes – wird als Diamagnetismus bezeichnet.

¹ v. lat.: ferrum = Eisen + v. griech.: magnetis (lithos) = Stein aus Magnesien

² Die Suszeptibilität beschreibt das Verhalten eines Stoffes in einem externen Magnetfeld. Sie ist definiert als die Änderung der Magnetisierung M bei Änderung der magnetischen Feldstärke H. In vielen Fällen ist die Abhängigkeit linear.

2.2. Technische Grundlagen und Begriffe

2.2.1. Hystereseschleife – Entmagnetisierungskurve

Grundsätzlich kommt der Begriff Hysterese aus dem Griechischen und bedeutet, hysteros: hinterher. Er wird auch als Verharrungseffekt bezeichnet. Es ist das Fortdauern einer Wirkung nach Wegfall ihrer Ursache.

Im Zusammenhang mit Magnetismus redet man oft von der Hystereseschleife. Die Hystereseschleife stellt den Verlauf der magnetischen Flussdichte B oder der magnetischen Polarisation J als Funktion der magnetischen Feldstärke H dar. Der erste Quadrant beschreibt das Aufmagnetisierungsverhalten des Werkstoffes. Durch Anlegen einer grossen magnetischen Feldstärke H werden die magnetischen Momente parallel zum äusseren Magnetfeld ausgerichtet. Sind alle magnetischen Momente weitgehend ausgerichtet, spricht man von Sättigungsmagnetisierung oder einfach „Sättigung“.

Der zweite Quadrant der Hystereseschleife beschreibt die Entmagnetisierungskurve. Der Verlauf der Entmagnetisierungskurve und ihre Anfangs- und Endwerte, die Remanenz B_r und die Koerzitivfeldstärke H_c kennzeichnen, neben dem Maximum des Produktes $B \cdot H$, die wesentlichen magnetischen Eigenschaften eines Dauermagneten. Im dritten und vierten Quadranten werden die B -Kurve und die J -Kurve punktsymmetrisch gespiegelt, d. h., die Magnetisierung ist um 180° gedreht.

Magnetische Flussdichte B [T]

Das Verhalten eines Magnetwerkstoffes im Magnetfeld wird durch den Zusammenhang zwischen magnetischer Flussdichte B und magnetischer Feldstärke H , den so genannten $B(H)$ - Schleifen (Abb. 2.3), charakterisiert. Die magnetische Flussdichte B wird in der Praxis, eigentlich fälschlicherweise, oft auch als Induktion bezeichnet. Dies ist fachspezifisch nicht richtig, denn die Induktion ist ein Vorgang und die magnetische Flussdichte eine Kenngrösse. In Abb. 2.3 ist diese Kurve charakterisiert durch die x-Achse, mit der von aussen angelegten magnetischen Feldstärke H und die y-Achse, welche die magnetische Flussdichte im Magneten wiedergibt. Die physikalische Einheit der magnetischen Flussdichte ist [T] oder [Vs/m²].

Magnetische Polarisation J [T]

Obwohl die magnetische Flussdichte und die magnetische Polarisation die gleichen Einheiten besitzen und die Form der Hystereseschleife sehr ähnlich ist, sind diese doch nicht die gleichen Kurven. Die J -Kurve, wie sie kurz genannt wird, beschreibt den Beitrag des Magnetwerkstoffes zur magnetischen Flussdichte und ist abhängig von der von aussen angelegten, magnetischen Feldstärke. Die Flussdichte B und die Polarisation J sind verknüpft durch die Beziehung

$$\vec{B} = \mu_0 * \vec{H} + \vec{J}$$

Der Unterschied zwischen den beiden Kurven sind die Schnittpunkte der H-Achse, d.h. konkret der Punkt der Koerzitivfeldstärke H_c . Der Schnittpunkt mit der B-Achse, die Remanenz B_r und die Remanenzpolarisation J_s , bei stark anisotropen (siehe Kap. 4) Seltenerd-Magneten, sind etwa gleich gross.

$$\vec{B}_r \approx \vec{J}_s$$

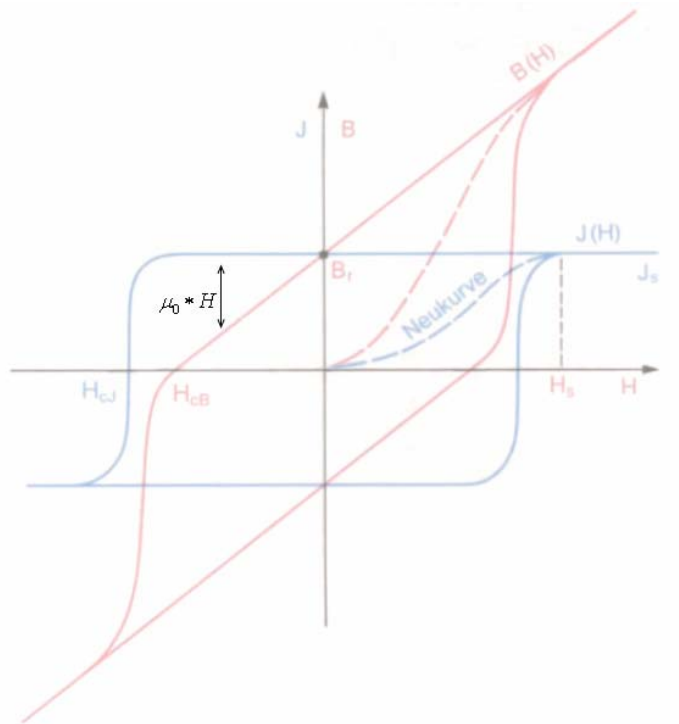


Abb. 2.3

Die vertikale Distanz von der roten B-Kurve zur blauen J-Kurve in einem Arbeitspunkt in der Arbeitshalbebene ist das Produkt $\mu_0 \cdot H$. Da H in dieser Halbebene negativ ist und B positiv ergibt sich gemäss der Beziehung von der Seite 7 für die Polarisation J nach Umstellung der Formel ein grösserer Wert. In Abb. 2.3 ist dies sehr schön ersichtlich.

Neukurve

Die Neukurve beschreibt die magnetische Flussdichte bzw. die magnetische Polarisation, abhängig von der aussen angelegten magnetischen Feldstärke beim ersten Aufmagnetisieren des Magneten.

Entmagnetisierungskurve

Die Entmagnetisierung oder Demagnetisierung ist ein Vorgang, durch den ein Magnet beziehungsweise ein magnetisiertes Material die Magnetisierung ganz oder teilweise verliert. Dieser Vorgang ist durch die Entmagnetisierungskurve beschrieben. Der 2. Quadrant der Hystereseschleife beschreibt das Entmagnetisierungsverhalten des Werkstoffs. Für Dauermagnete, die in der Praxis ausschliesslich im Gegenfeld betrieben werden, werden die wichtigsten Kenngrössen aus der Entmagnetisierungskurve bestimmt.

N.b.: Entmagnetisiert werden Materialien meist durch ein erst starkes, dann abklingendes, magnetisches Wechselfeld, das durch einen mit Wechselstrom durchflossenen Elektromagneten hervorgerufen wird.

2.2.2. Magnetische Kenngrössen

Remanenz B_r [T]

Unter der Remanenz B_r versteht man die in einem geschlossenen Kreis aus einem magnetischen Werkstoff verbleibende Magnetisierung oder Flussdichte, nachdem ein äusseres magnetisierendes Feld abgeschaltet wurde. Der magnetische Werkstoff wurde vorher im geschlossenen Kreis bis zu seiner Sättigung magnetisiert. Die Remanenz ist der Schnittpunkt der Hystereseschleife mit der Ordinate (y-Achse). Bei $H = 0$ [kA/m] ist $B_r = J_r$. Die Remanenz wird in Tesla [T] bzw. Millitesla [mT] angegeben.

Koerzitivfeldstärke H_c

Als Koerzitivfeldstärke H_c bezeichnet man die magnetische Feldstärke, die notwendig ist, um eine ferromagnetische Substanz vollständig zu entmagnetisieren, so dass der resultierende Gesamtfluss bzw. die lokale Flussdichte gleich null ist. Je höher die Koerzitivfeldstärke ist, desto besser behält ein Magnet seine Magnetisierung, wenn er einem Gegenfeld ausgesetzt wird.

Koerzitivfeldstärke H_{cB} [kA/m]

Die Koerzitivfeldstärke H_{cB} ist diejenige magnetische Feldstärke, bei der die magnetische Flussdichte ($B = \mu_0 \cdot H + J$) eines vorher bis zur Sättigung magnetisierten ferromagnetischen Werkstoffes auf 0 zurückgeht. Bei der $B(H)$ - Hystereseschleife ist dies der Schnittpunkt bei der die Kurve sich mit der Abszisse (x-Achse) schneidet ($B = 0T$).

Koerzitivfeldstärke H_{cJ} [kA/m]

Die Koerzitivfeldstärke H_{cJ} ist diejenige magnetische Feldstärke, bei der die magnetische Polarisation J eines vorher bis zur Sättigung magnetisierten ferromagnetischen Werkstoffes auf 0 zurückgeht. Bei der $J(H)$ - Hystereseschleife ist dies der Schnittpunkt bei der die Kurve sich mit der Abszisse (x-Achse) schneidet ($J = 0$ T).

Energiedichte / Energieprodukt

Zu jedem Punkt der Entmagnetisierungskurve kann man das Produkt aus den zusammengehörigen Werten von magnetischer Flussdichte B und Feldstärke H bilden (siehe Abb. 2.4). Dieses Produkt stellt eine Energiedichte dar und durchläuft zwischen Remanenz und Koerzitivfeldstärke einen Höchstwert, die maximale Energiedichte $(B \cdot H)_{\max}$. Je grösser das Produkt, desto kompakter kann der Magnet gebaut werden. Dieser Wert wird üblicherweise zur Bewertung von Dauermagnetwerkstoffen verwendet und hat die Bedeutung eines Qualitätsfaktors. In Abb. 2.7 sind noch Hyperbeln (9) eingezeichnet, bei denen das Produkt $B \cdot H$ konstant ist. Die die B -Kurve tangierende Hyperbel beschreibt die maximale Energiedichte $(B \cdot H)_{\max}$.

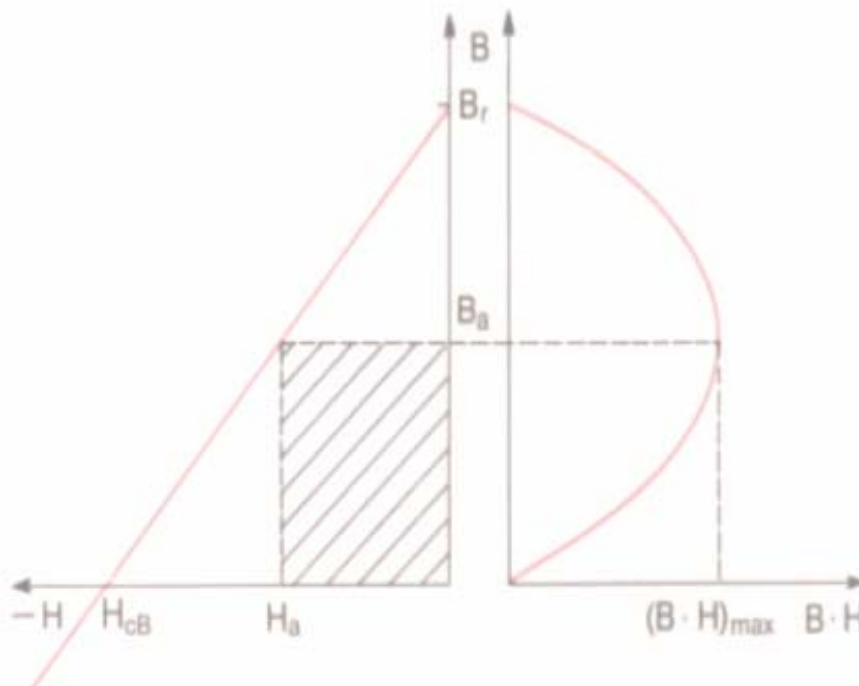


Abb. 2.4

Arbeitsgerade

Die Arbeitsgerade (Abb. 2.5) beschreibt die Eigenschaften des magnetischen Kreises. Ihr Winkel ist abhängig von der Magnetgeometrie und den im Magnetkreis vorhandenen weichmagnetischen³ Flussleitstücken. Wird der Permanentmagnet ohne Eisenumgebung eingesetzt, hängt der Winkel der Arbeitsgeraden nur von der Magnetgeometrie ab. Bei Systemen mit weichmagnetischen Flussleitstücken ist der Winkel der Arbeitsgeraden abhängig vom Verhältnis Luftspalt zur Magnetlänge. Ein von aussen angelegtes Feld (Feldstärke $H \neq 0$) bewirkt eine Parallelverschiebung der Arbeitsgeraden.

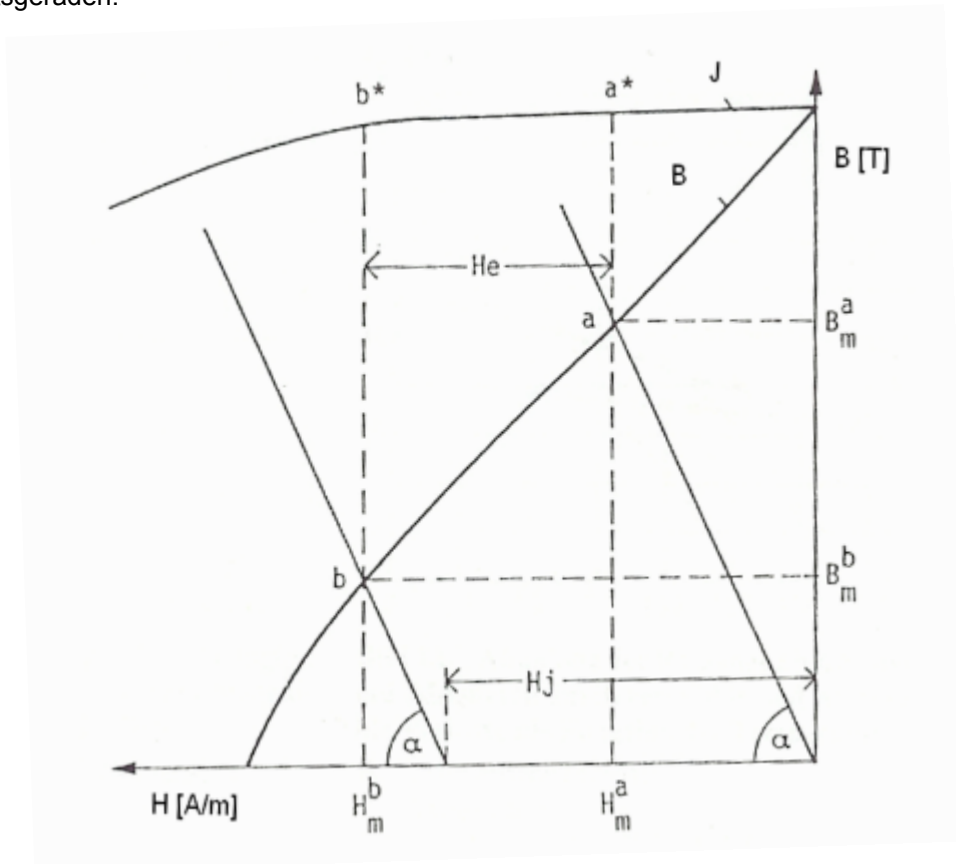


Abb. 2.5

Im dynamischen Fall (z.B. Belastung eines Motors) wirkt ein Gegenfeld H auf den Magnet, so dass die Arbeitsgerade parallel nach links verschoben wird. Ersichtlich ist dies in Abb. 2.5 durch die Strecke H_j . Der Arbeitspunkt im dynamischen Fall ist dann b . Die diesem Arbeitspunkt entsprechende magnetische Polarisation des Magneten ist durch den Punkt b^* gegeben.

³ Weichmagnetische Werkstoffe sind ferromagnetische Materialien, die in einem magnetischen Feld magnetisiert werden können. Diese Magnetisierung kann z.B. durch einen elektrischen Strom in einer stromdurchflossenen Spule erzeugt werden. Weichmagnetische Werkstoffe zeichnen sich durch eine leichte Magnetisier- und Entmagnetisierbarkeit aus.

Arbeitspunkt

Das von den eigenen Polen eines Dauermagneten ausgehende Magnetfeld wirkt entmagnetisierend, da es der Polarisation J entgegengerichtet ist. Das heisst der Fluss welcher durch die Polarisation erzeugt wird, wird eigentlich geschwächt (z.B. durch den Luftspalt) und wirkt deshalb hemmend auf den ursprünglichen Fluss. Der Betriebszustand eines Dauermagneten liegt daher stets im Bereich der Entmagnetisierungskurve. Das zum jeweiligen Betriebszustand gehörende Wertepaar (B_a, H_a) wird als Arbeitspunkt P bezeichnet. Der Arbeitspunkt wird durch den Schnittpunkt der Arbeitsgeraden mit der B -Kurve gebildet. Die Lage von P hängt wie auch die Arbeitsgerade von der Magnetgeometrie bzw. in Magnetkreisen mit weichmagnetischen Flussleitstücken vom Verhältnis Luftspallänge zu Magnetlänge ab.

Ein bestimmtes Volumen eines Dauermagneten wird in statischen Systemen optimal ausgenutzt, wenn der Arbeitspunkt P im $(B \cdot H)_{\max}$ -Punkt liegt. In der Praxis sollte die Scherung im Magnetkreis so gewählt werden, dass der Arbeitspunkt eben dort oder besser knapp oberhalb, d.h. bei etwas kleineren Gegenfeldstärken liegt.

In dynamischen Systemen mit sich ändernden Arbeitsgeraden sollte die Scherung so gewählt werden, dass der Arbeitspunkt des Dauermagneten stets im geradlinigen Bereich der Entmagnetisierungskurve bleibt, um eine hohe Stabilität gegen Fremdfeld- und Temperatureinflüsse sicherzustellen (Abb. 2.6). Wird der Luftspalt in einem Magnetsystem vergrössert, so verschiebt sich der Arbeitspunkt zu höheren Gegenfeldstärken hin, z.B. von P_1 nach P_2 . Das heisst dass die „Steilheit“ der Arbeitsgerade sinkt. Wird die Änderung wieder rückgängig gemacht, so wird der ursprüngliche Arbeitspunkt P_1 nur dann wieder erreicht, wenn P_2 im geradlinigen Teil der Entmagnetisierungskurve liegt. Befindet sich P_2 jedoch, wie in Abb. 2.5 dargestellt, unterhalb des „Knies“ (Krümmung) in der Entmagnetisierungskurve, so treten irreversible Effekte auf.

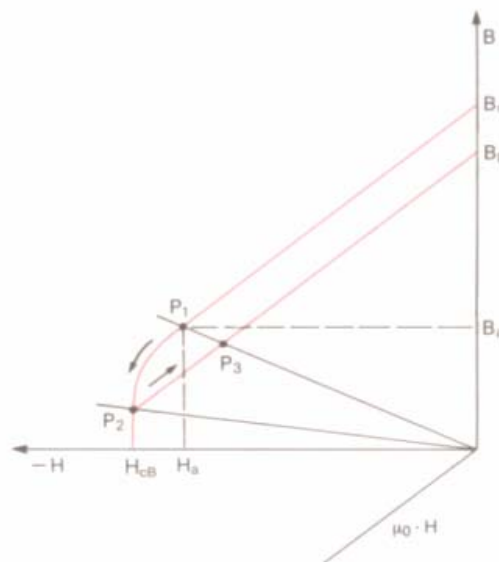


Abb. 2.6

Der Arbeitspunkt verschiebt sich auf einer inneren Rücklaufkurve bis zum Punkt P3 mit einer entsprechend niedrigeren magnetischen Flussdichte. Jedoch bleibt der Punkt P3 auf der ursprünglichen Arbeitsgeraden. Die Steigung dieser Rücklaufkurve wird als permanente Permeabilität bezeichnet.

Bei sehr grossen Spitzenlasten bei einem Motor (z.B. Spitzenlast = 10 * Nominallast) kann dieser neue dynamische Arbeitspunkt, infolge des hohen Gegenfeldes H, sogar im 3. Quadranten der Hysteresekurve, d.h. bei negativen magnetischen Flussdichten B zu liegen kommen. Damit wird der Fluss umgekehrt, da $\Phi = B * A$. Dort sollte der Motor nicht betrieben werden.

Da in einem Motor der Arbeitspunkt je nach Belastung ändert, wird anstelle des „statischen“ Qualitätsfaktor ($B * H$) ein neuer Qualitätsfaktor ($J * H$) definiert. Dieser dynamische Qualitätsfaktor ist das ($J * H$)_{max} Produkt. ($J * H$)_{max} kann als das grösst-mögliche Rechteck unter der J-H-Kurve beschrieben werden. Das maximale Drehmoment M_{\max} eines Motors (bei konstantem Strom) ist direkt proportional zu diesem ($J * H$)_{max} Wert. In Abb. 2.3 wäre dies einem Rechteck eingepasst unter die blaue J-Kurve.

Dimensionsverhältnis h:D

Ergänzend zu Abb. 2.7 sind die Hilfslinien (12) zu erwähnen. Diese sind zur Bestimmung der Arbeitsgeraden von Rundmagneten ohne Eisenumgebung eingezeichnet. Zur Konstruktion der Arbeitsgeraden wird eine Verbindungslinie zwischen dem Nullpunkt des Diagramms und dem Faktor h:D gezeichnet. Der Faktor h:D beschreibt das Verhältnis Höhe zu Durchmesser des Magneten. Dabei ist zu beachten, dass der Winkel der Arbeitsgeraden innerhalb eines Magneten variiert, während die hier aufgeführten Diagramme lediglich Mittelwerte abbilden. Bei sehr kleinem h:D-Verhältnis (< 0,3) sollte man zudem berücksichtigen, dass der Arbeitspunkt im Zentrum des Magneten deutlich niedriger liegt.

Übersicht Hystereseschleife – Entmagnetisierungskurve

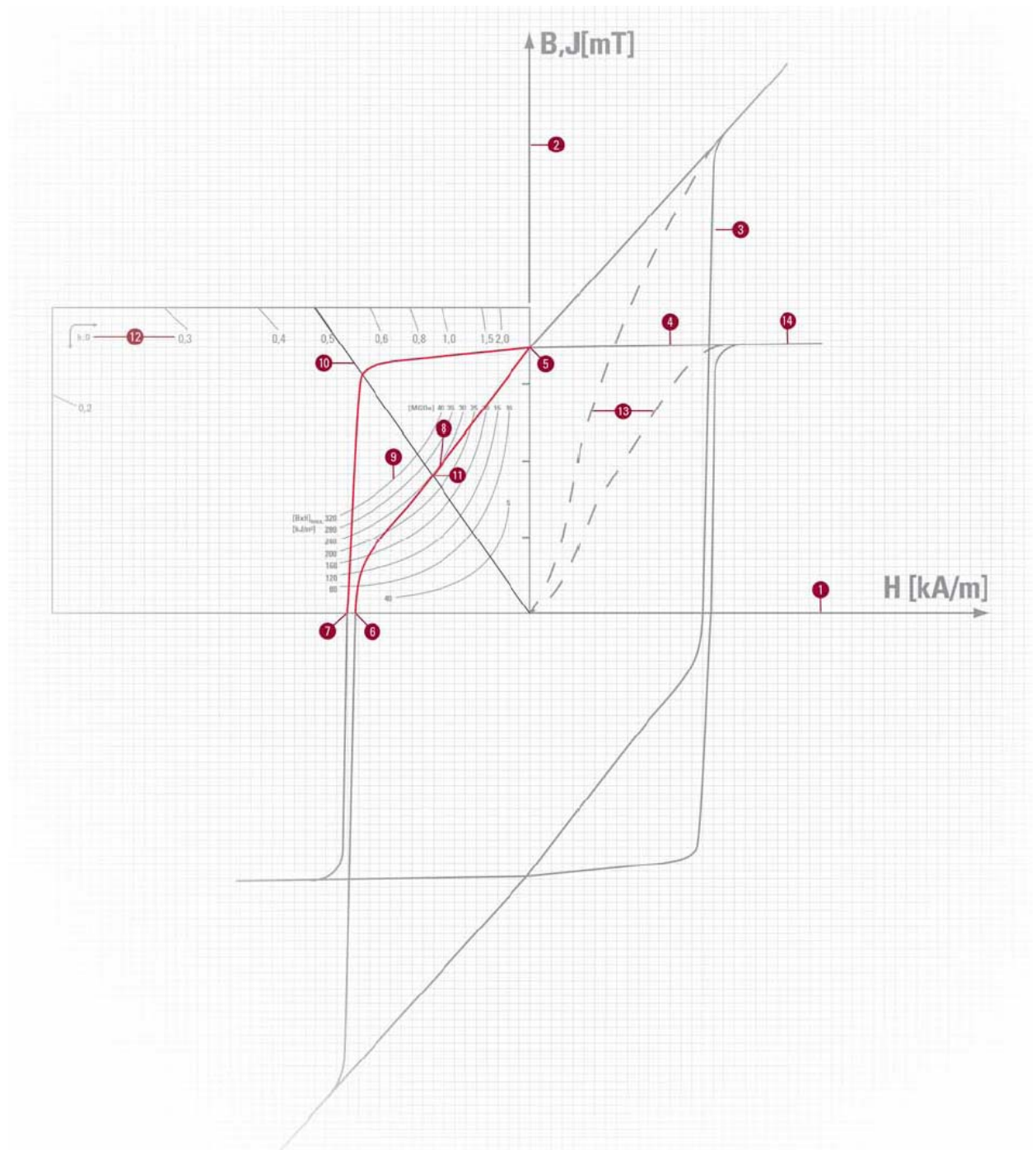


Abb. 2.7

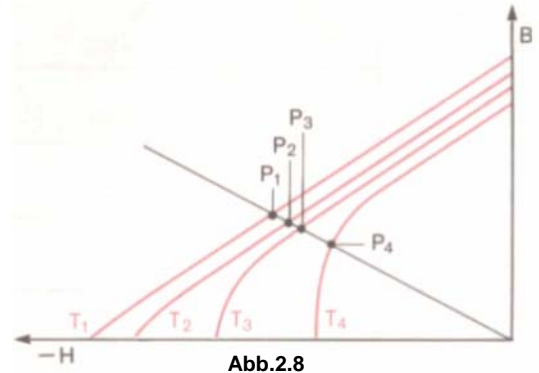
Legende: 1. x-Achse / magnetische Feldstärke H
 2. y-Achse / magnetische Flussdichte B
 magnetische Polarisation J
 3. B-Kurve: magn. Flussdichte B
 4. J-Kurve: magn. Polarisation J

5. Remanenz B_r
 6. Koerzitivfeldstärke H_{cB}
 7. Koerzitivfeldstärke H_{cJ}
 8. Energieprodukt $(B \cdot J)_{\max}$
 9. Hyperbel

10. Arbeitsgerade
 11. Arbeitspunkt
 12. Dimensionsverhältnis
 13. Neukurve
 14. Sättigungspolarisation

2.2.3. Temperatureinfluss

Die Entmagnetisierungskurven von Dauermagneten sind temperaturabhängig. Diese Abhängigkeit wird durch die Temperaturkoeffizienten der Remanenzflussdichte $T_K(B_r)$ und der Koerzitivfeldstärke $T_K(H_cJ)$ bestimmt. Eine Temperaturänderung bewirkt eine Verschiebung des Arbeitspunktes auf der Arbeitsgeraden (Abb. 2.8). Solange der Arbeitspunkt dabei im linearen Bereich der Entmagnetisierungskurve bleibt, ändert sich die Flussdichte reversibel, d.h. nach Abkühlung kehrt die Flussdichte in den ursprünglichen Wert zurück. Andernfalls ist die Änderung der Flussdichte irreversibel (irreversible magnetische Verluste) und ist nur durch Aufmagnetisieren rückgängig zu machen.



Diese Verschlechterungen werden auch als Entmagnetisierungsverluste bezeichnet. Um irreversible Änderungen der Flussdichte bei Temperaturänderungen zu vermeiden, muss sich der Arbeitspunkt im gesamten Temperaturbereich, in dem der Magnet eingesetzt wird, im linearen Abschnitt der Entmagnetisierungskurve befinden. Diese Angaben beziehen sich auf die B-H Hysteresekurve. Bei der J-H Hysteresekurve sind kleine Unterschiede auszumachen.

Diese Unterschiede sollen anhand eines Hartferritmagneten erläutert werden (Abb. 2.9). Bei einem Hartferritmagneten, im Bild Bariumferrit, trocken gepresst und isotrop der Magnetfabrik Schramberg, sinkt die Remanenz sowohl bei der J-Kurve, wie auch bei der B-Kurve mit steigender Temperatur. Mit fallender Temperatur steigt die Remanenz. Umgekehrt verhält sich die Koerzitivfeldstärke. Diese steigt mit steigender Temperatur in Richtung Ursprung des Koordinatensystems bei der B-Kurve.

(lineare Kurven) und sinkt wiederum mit fallender Temperatur. Anders sieht es aus bei den J-Kurven. Hier sinkt die Koerzitivfeldstärke bei steigender Temperatur, jedoch betragsmässig angeschaut steigt sie, aber eben ins Negative. Mit fallender Temperatur steigt die Koerzitivfeldstärke wieder in Richtung Ursprung oder betragsmässig ergibt sich ein kleinerer Wert.

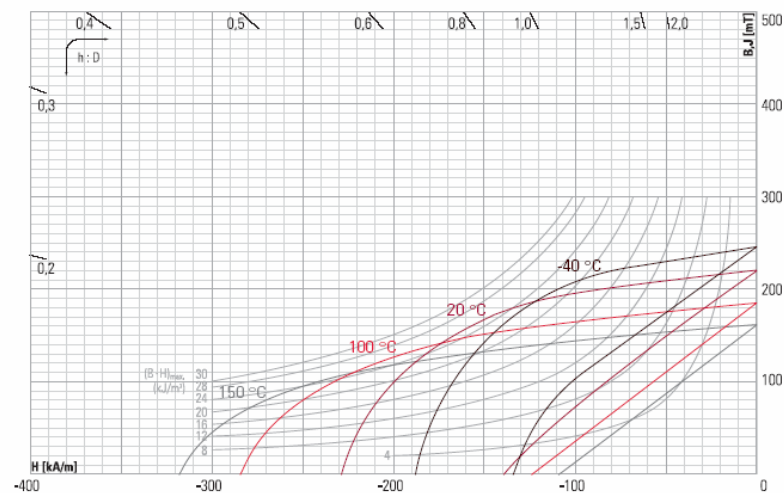


Abb. 2.9

Curie-Temperatur

Die Temperatur, ab der die ferromagnetische Ordnung mit den Weisschen Bezirken verschwindet, wird als Curie-Temperatur T_C (nach Pierre Curie) bezeichnet.

Ein Ferromagnet verliert seine spontane Magnetisierung, wenn er über seine Curie-Temperatur erhitzt wird. Das heisst, durch Erwärmen auf Temperaturen oberhalb der Curie-Temperatur T_C lässt sich ein Dauermagnet völlig entmagnetisieren. Die magnetische Ordnung wird bei hohen Temperaturen aufgebrochen, die Ferromagneten sind dann nur noch paramagnetisch. Nach Abkühlung auf die Ausgangstemperatur kann der alte Magnetisierungszustand durch erneutes Aufmagnetisieren wieder hergestellt werden, wenn bei der Erwärmung keine Gefügeänderungen aufgetreten sind. Etwas unterhalb dieser Temperatur erlangt der Ferromagnet wieder seine ferromagnetischen Eigenschaften zurück, d.h. er zeigt eine spontane Magnetisierung auch ohne angelegtes äusseres Feld.

Oberhalb der Curie-Temperatur zeigt das Material nur noch paramagnetisches Verhalten, d.h. das Material wird durch ein äusseres Feld magnetisiert, verliert seine Magnetisierung aber bei Abschalten des Magnetfelds wieder. Bei der Curie-Temperatur T_C macht der Magnet einen Phasenübergang von der paramagnetischen in die ferromagnetische Phase durch.

Die Curie-Temperatur einiger typischer Magnet-Werkstoffe ist:

- Cobalt 1121°C
- Eisen 766°C
- Nickel 360°C

3. Übersicht Magnetwerkstoffe

3.1. Materialien von Permanentmagneten

3.1.1. Hartferrit-Magnete

Hartferrit-Magnete sind die weltweit am häufigsten eingesetzten Magnet-Werkstoffe. Bariumferrit und Strontiumferrit sind Sinterwerkstoffe der Metalloxyde BaO_2 bzw. SrO_2 in Verbindung mit Fe_2O_3 . Barium und Strontium gehören zu den Erdalkalimetallen. Weiter wollen wir hier nicht auf diese Erdalkalimetalle eingehen. Dazu verweisen wir auf Fachliteratur. Diese Rohstoffe stehen in grossen Mengen zur Verfügung und sind billig. Die Magnete werden isotrop und anisotrop hergestellt.

Isotrope Magnete haben in allen Richtungen etwa gleiche magnetische Werte und können so in allen Achsrichtungen magnetisiert werden. Sie haben eine geringe Energiedichte und sind vergleichsweise billig.

Anisotrope Magnete werden in einem Magnetfeld hergestellt und erhalten dadurch eine Vorzugsrichtung der Magnetisierung. Gegenüber isotropen Magneten ist die Energiedichte um ca. 300% höher. Die Koerzitivfeldstärke ist im Verhältnis zur Remanenz hoch.

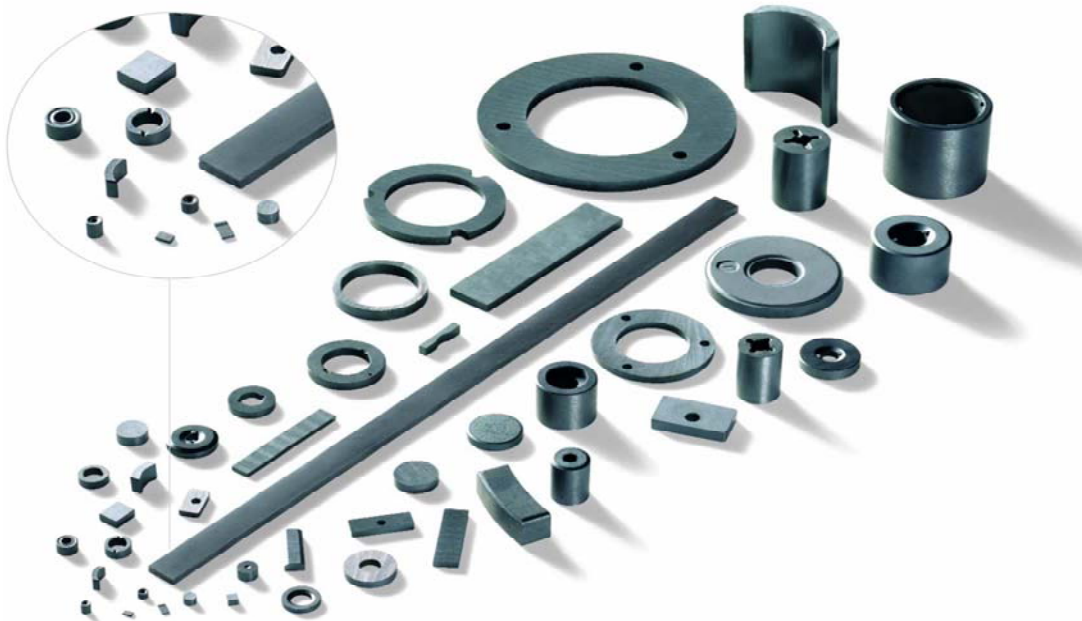


Abb. 3.1

Hartferrite haben einen relativ hohen Temperaturkoeffizienten der Remanenz von ca. 0,2% pro °C und können von -40°C bis ca. +200°C eingesetzt werden. Sie sind hart und spröde, aber auch unempfindlich gegen Oxidation, Witterungseinflüsse und viele Chemikalien. Eine Bearbeitung ist nur mit Diamantwerkzeugen möglich. Ihr niedriger Preis sowie die hohe thermische und gegen Felder gute Stabilität machen diesen Werkstoff hoch attraktiv für die Massenproduktion, insbesondere in der Automobil- oder Elektroindustrie.

Übersicht Hartferritmagnete

Historie

Entwicklung: Ende der 40er Jahre

Einsatz: Anfang der 50er Jahre

Rohstoffvorkommen

Die wesentlichen Bestandteile der Hartferritmagnete sind Eisenoxid und Barium- bzw. Strontiumcarbonat. Eisenoxid und die Erdalkalien Barium und Strontium sind in der Natur in ausreichenden Mengen vorhanden. Eisenoxid entsteht bei der industriellen Verarbeitung von Stahl.

Rohstoffgewinnung

Eisenoxid und Erdalkalien: aus der Natur durch Tagbau.

Eisenoxid industriell: Warm gewalztes Stahlblech wird gebeizt. Das beim Beizen entstehende Eisenchlorid wird anschliessend in Eisenoxid umgewandelt. Die Erdalkalien werden industriell zu Barium- und Strontiumcarbonat aufbereitet.

Einsatztemperatur

ca. -40°C - $+250^{\circ}\text{C}$ (abhängig von Temperatur und Form)

Curie-Temperatur

450°C

Herstellungsverfahren

Press- und Sinterprozess in oxidierender Atmosphäre

Herausragende Eigenschaften

Hartferritmagnete zeichnen sich besonders aus durch:

- günstigen Rohstoff
- sehr gute Korrosions- und chemische Beständigkeit
- leichte Magnetisierbarkeit

Temperaturverhalten

Als Beispiel eines Hartferritmagneten ist hier ein Strontiumferrit, trocken gepresst und anisotrop der Magnetfabrik Schramberg, abgebildet. Man sieht im Bild sehr schön, dass mit steigender Temperatur bei der J-Kurve, wie auch bei der B-Kurve die Remanenz abnimmt. Die Koerzitivfeldstärke nimmt bei der B-Kurve mit steigender Temperatur zu und fällt mit sinkender Temperatur (betragsmässige Zunahme). Bei der J-Kurve nimmt die Koerzitivfeldstärke mit steigender Temperatur ab, d.h. betragsmässig zu.

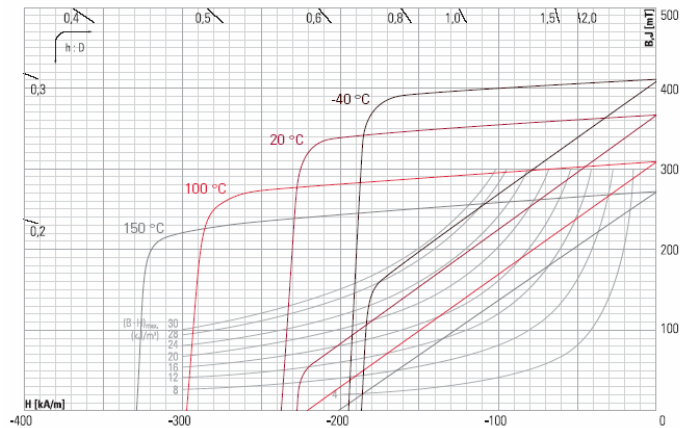


Abb. 3.2

Formgebungsmöglichkeiten

Ring-, Rund-, Segment- und Vierkantmagnete sind die gebräuchlichsten Formen presstechnisch hergestellter Dauermagnete. Darüber hinaus können auch Sonderformen hergestellt werden.

Mechanische Eigenschaften

Als keramische Werkstoffe reagieren Ferrite spröde und empfindlich gegen Schlag- und Biegebelastung. Unter Schlagbeanspruchung treten leicht Absplitterungen auf. Bearbeitungsverfahren, wie Schleifen und Trennen, sind wegen der grossen Härte (Mohs⁴ 6 - 7) nur mit Diamantwerkzeugen möglich. Wasserstrahlschneiden ist ebenfalls möglich.

⁴ Härte ist der mechanische Widerstand, den ein Körper dem Eindringen eines anderen, härteren Körpers entgegensetzt. Durch das exemplarische Zuordnen von Zahlenwerten für ausgewählte Minerale entstand eine relative Härteskala, die Mohs-Skala, die in der Mineralogie in weitem Gebrauch ist. Angaben zur Härte von Mineralen beziehen sich immer auf die Mohs-Skala, falls nichts anderes angegeben ist.

3.1.2. AlNiCo-Magnete

AlNiCo-Magnete sind metallische Legierungsmagnete aus Aluminium, Nickel, Cobalt sowie Eisen, Kupfer und Titan.

AlNiCo wurde vor über 50 Jahren entdeckt und ist der älteste noch verwendete Magnetwerkstoff. Im Vergleich zu den neuen Magnetwerkstoffen haben AlNiCo-Magnete eine geringe Koerzitivfeldstärke bei einer relativ hohen Remanenz. Deshalb müssen AlNiCo-Magnete eine grosse Länge in Magnetisierungsrichtung haben, um als offene Magnete eine einigermaßen gute Entmagnetisierungsbeständigkeit zu haben. Das heisst, runde Magnete bedingen die Stabform. Die notwendige Stabform, das heisst der grosse Abstand der Pole, ist bei der Betätigung von Reedschaltern günstig. AlNiCo-Magnete werden fast nur anisotrop hergestellt. Wegen der Verteuerung von Cobalt und der geringen Koerzitivfeldstärke ist die Verwendung von AlNiCo-Magneten rückläufig.

Übersicht AlNiCo-Magnete

Historie

Entwicklung: Ende der 30er Jahre

Einsatz: Anfang der 40er Jahre

Rohstoffvorkommen

Die Hauptlegierungsbestandteile Aluminium, Nickel, Cobalt, Eisen, Kupfer und Titan sind in der Natur vorhanden.

Rohstoffgewinnung

Die AlNiCo sind Legierungen aus den im Namen erwähnten Bestandteilen Aluminium, Nickel und Cobalt.

Einsatztemperatur

ca. -270°C bis über $+400^{\circ}\text{C}$

Curie-Temperatur

$700 - 850^{\circ}\text{C}$

Herstellungsverfahren

AlNiCo-Magnete werden in einem metallurgischen Press-Sinter-Prozess oder Guss-Prozess hergestellt.

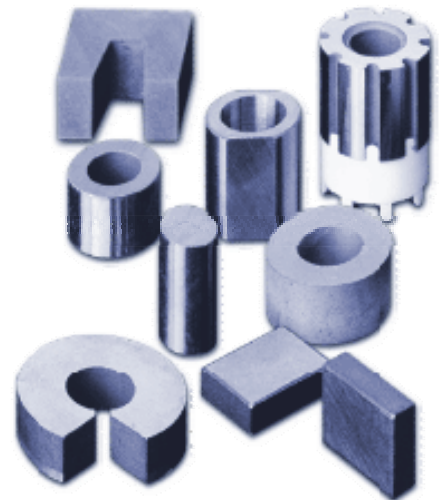


Abb. 3.3

Herausragende Eigenschaften

AlNiCo-Magnete zeichnen sich besonders aus durch:

- kleiner Temperaturkoeffizient
- sehr gute Korrosionsbeständigkeit; dadurch meist keine Oberflächenbeschichtung nötig
- grosser Temperatureinsatzbereich

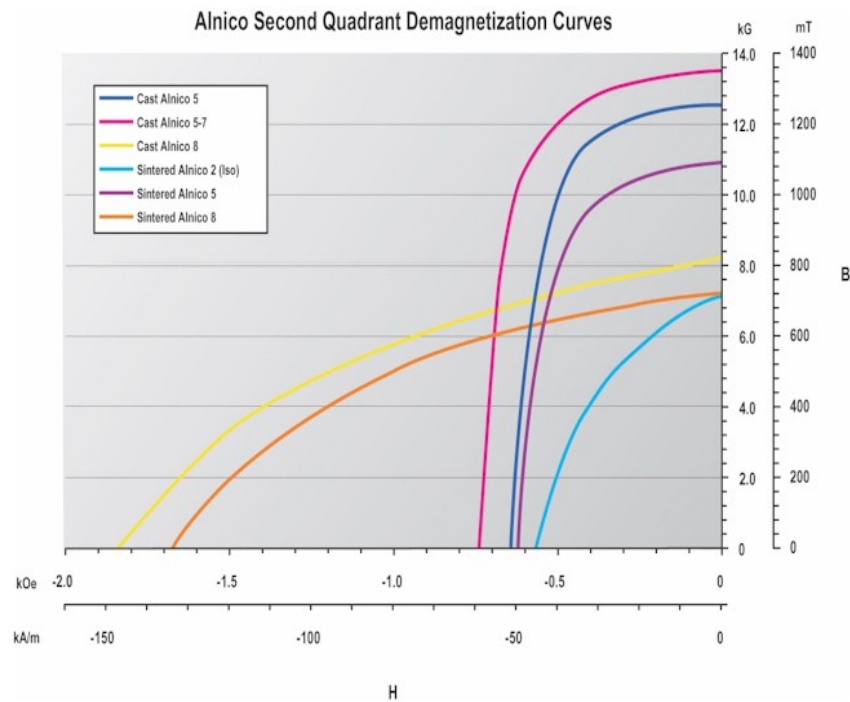


Abb. 3.4

Temperaturverhalten

AlNiCo-Magnete haben einen kleinen Temperaturkoeffizienten von nur 0.02% pro °C und, wie oben beschrieben, einen grossen Temperatureinsatzbereich von - 270°C bis über + 400°C. Sie werden deshalb dort verwendet, wo bei grossen Temperaturschwankungen ein konstantes Magnetfeld benötigt wird.

Formgebungsmöglichkeiten

Oft werden AlNiCo-Magnete in Stabform hergestellt. Mit geeigneten Werkzeugen sind aber auch hier keine Grenzen in der Formgebung gesetzt, wie das Bild anschaulich beweist.

Mechanische Eigenschaften

Hohe Härte (Cobalt) sowie die stengelkristalline Charakteristik des Werkstoffs schränken die Bearbeitungsmöglichkeiten ein. Trennschnitt mit Diamantscheiben und Funkenerosionsverfahren bieten sich für die Formgebung nach der Fertigung an.

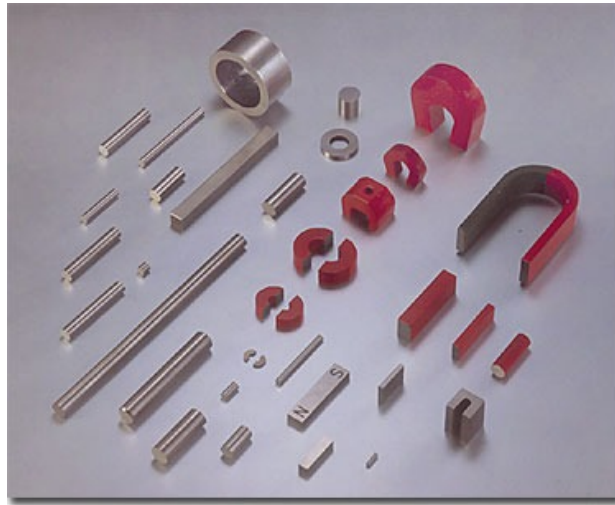


Abb. 3.5

3.1.3. Hochenergie-Magnete

Als Hochenergie-Magnete werden Dauermagnete aus den seltenen Erden bezeichnet. Diese Materialien zeichnen sich durch ihr hohes Energieprodukt von über 300 kJ pro Kubikmeter aus. Von praktischer Bedeutung sind dabei folgende Materialien:

- Samarium-Cobalt (SmCo)
- Neodymium-Eisen-Bor (NdFeB)

Wesentliche Verkleinerungen von Magnetsystemen oder erheblich höhere magnetische Energien bei gleicher Baugrösse, gegenüber den herkömmlichen Magnetwerkstoffen wie Bariumferrit oder AlNiCo, sind möglich.

Bei gleichem Energieinhalt muss ein Bariumferrit-Magnet ein 6x grösseres Volumen haben. Um in 1mm Entfernung von der Polfläche ein Feld von 100mT zu erzeugen, muss ein Bariumferrit-Magnet ca. 25x grösser sein als ein Samarium-Cobalt-Magnet (SmCo). Das Energieprodukt von NdFeB ist sogar noch einmal ca. 40% höher als bei dem im Beispiel genannten Samarium-Cobalt-Magnet.

Nachstehend ein Vergleich der Energieprodukte $(B \cdot H)_{\max}$ einiger Magnetwerkstoffe:

Kunststoffgebundenes Bariumferrit, anisotrop	12 kJ/m ³
Hartferrit, gesintert, anisotrop (SrFe)	32 kJ/m ³
AlNiCo 500	40 kJ/m ³
Kunststoffgebundenes SmCo	64 kJ/m ³
Kunststoffgebundenes NdFeB	96 kJ/m ³
Samarium-Cobalt (SmCo)	225 kJ/m ³
Neodymium-Eisen-Bor (NdFeB)	360 kJ/m ³

Was sind "Seltene Erden"?

Die Seltenen Erden, auch Lanthanide genannt, sind die 15 Elemente mit der Atomzahl 57 bis 71 im periodischen System der Elemente. Sie stellen ein siebentel aller Elemente dar, die in der Natur vorkommen. Von wirtschaftlicher Bedeutung sind z. B. Cerium (Ce) für die Glasherstellung oder Stahlproduktion. Lanthanum (La) für die Röntgenfilmherstellung und auch für die Herstellung von Katalysatoren für die Abgasbehandlung. Europium (Eu) für die Sichtbarmachung der roten Farbe in TV-Bildröhren. Samarium (Sm) und Neodymium (Nd) für die Herstellung von Magnetwerkstoffen mit höchstem Energieprodukt. Samarium ist nur mit einem geringen Anteil in den Seltenen Erden enthalten. Die Aufarbeitung mit einem hohen Reinheitsgrad ist sehr aufwändig. Der Anteil von Neodymium in den Seltenen Erden ist höher.

Die aufwändige Verarbeitung bis zum fertigen Magnet bedingt einen höheren Preis der Magnete aus den Seltenen Erden gegenüber den herkömmlichen Dauermagnetwerkstoffen. Bei Samarium-Cobalt-Magneten enthält ausserdem noch der teure Werkstoff Cobalt (Co). Durch den höheren Preis sind bei grossvolumigen Anwendungen meist preisliche Grenzen gesetzt.

Übersicht Seltenerd-magnete

Historie

Entwicklung SmCo: Mitte der 60er Jahre
Einsatz: Ende der 60er Jahre / Anfang der 70er Jahre

Entwicklung NdFeB: Anfang der 80er Jahre
Einsatz: Mitte der 80er Jahre

Rohstoffvorkommen

Die wesentlichen Bestandteile bei SmCo sind Samarium und Cobalt, bei NdFeB Neodym und Eisen. Die Seltenerdmetalle Samarium und Neodym sind in Form von Erzen vorhanden und sind im Periodensystem den seltenen Erden zugeordnet. Cobalt ist als natürlicher Rohstoff ebenfalls in ausreichenden Mengen vorhanden.

Rohstoffgewinnung

Neodym, Samarium und Cobalt werden in verschiedenen Gebieten der Erde abgebaut.

Einsatztemperatur

SmCo: ca. 250°C – 350°C (abhängig von Form und Abmessung)

NdFeB: ca. 80°C – 220°C (abhängig von Form und Abmessung)

Curie-Temperatur

SmCo: ca. 720°C

NdFeB: ca. 310°C

Herstellungsverfahren

- Sinterprozess
- Kunststoffgebundene Magnete

Herausragende Eigenschaften

Seltenerd-magnete weisen eine sehr hohe Energiedichte auf und finden immer dann ihren Einsatz, wenn höchste Kräfte bzw. höchste magnetische Flussdichten auf kleinstem Raum gefordert sind. Durch die hohen Energiedichten ist eine Miniaturisierung z.B. im Bereich Sensortechnik oder eine Reduzierung der Baugruppengrösse z.B. im Motorenbau möglich.

Temperaturverhalten

Unter Temperatureinflüssen zeigen Seltenerd-magnete ein verändertes magnetisches Verhalten. Die Remanenz und die Koerzitivfeldstärke sinken mit steigender Temperatur und steigen mit fallender Temperatur. Die Vorgänge sind reversibel. Der Temperaturkoeffizient von SmCo wird mit 0.04% pro °C angegeben. Derjenige von NdFeB ist mit 0.12% pro °C höher. Durch die Reduzierung der Koerzitivfeldstärke bei hohen Temperaturen können Magnete mit tiefliegendem Arbeitspunkt und/oder magnetischen Gegenfeldern einen bleibenden Magnetisierungsverlust erleiden.

Formgebungsmöglichkeiten

Ring-, Rund-, Segment- und Vierkantmagnete sind die gebräuchlichsten Formen presstechnisch hergestellter Dauermagnete. Darüber hinaus können auch Sonderformen hergestellt werden – am besten schon beim Pressen, da eine nachträgliche Formgebung (mit Bohrungen, Fasen, Kerben, Senkungen usw.) nur durch aufwändige Bearbeitungsverfahren mit Diamantwerkzeugen möglich ist. Dabei ist zu beachten, dass die Magnete nur in Pressrichtung hergestellt werden können. Da bei anisotropen Magneten die Magnetisierungsrichtung der Pressrichtung entspricht, können Bohrungen, Fasen, Kerben, Senkungen usw. auch nur in Magnetisierungsrichtung angebracht werden.



Abb. 3.6

Mechanische Eigenschaften

Seltenerd-magnete reagieren spröde gegen Schlag- und Biegebelastung. Bearbeitungsverfahren wie Schleifen und Trennen sind wegen der spezifischen Härte nur mit Diamantwerkzeugen möglich. Bearbeitungsverfahren wie Erodieren oder Wasserstrahlschneiden sind ebenfalls möglich.

3.1.4. Samarium-Cobalt-Magnete (SmCo)

SmCo ist ein Material mit exzellenten Eigenschaften in fast allen technischen Daten. Sein einziger Nachteil kann in seinem sehr hohen Preis gesehen werden, welcher hauptsächlich durch den hohen Co-Anteil verursacht wird. Des Weiteren sind diese Magnete sehr hart und spröde, d.h. also brüchig, was sich als Nachteil herausstellen kann. Bei der Verarbeitung der Magnete ist deshalb Vorsicht geboten. Eine hohe Remanenzflussdichte kombiniert mit einer guten Rechteckigkeit der Entmagnetisierungskurve und einer hohen Koerzitivfeldstärke machen den Magneten sehr stabil gegen thermische oder feldbedingte Verluste. Die Einsatztemperatur ist im Vergleich mit NdFeB wesentlich höher. Auch ist die chemische Stabilität gut, so dass hier keine Beschichtungen gegen Korrosion und Oxidation notwendig sind. Um dieses Stabilitätsverhalten nach Wunsch zu verbessern, sind metallische Beschichtungen oder Kunststoffbeschichtungen angebracht. Die reversiblen Effekte bei Temperaturänderungen sind hier fast so klein wie im Fall von AlNiCo. Die Magnete verhalten sich bei geringen Temperaturen relativ beständig gegen Feuchtigkeit, Lösungsmittel, Laugen, Schmiermittel und neutrale Schadgase. Säuren und Salzlösungen greifen die Magnete jedoch an. Insofern ist SmCo technisch sowohl für Motoren als auch für Sensorsysteme interessant.

Temperaturverhalten SmCo

Als Beispiel ist hier in Abb. 3.7 die B- und J-Kurve eines anisotropen SmCo₅ Magneten abgebildet, welche von der Magnetfabrik Schramberg hergestellt werden. Sehr schön ersichtlich ist hier das veränderte magnetische Verhalten unter Temperatureinflüssen. Die Remanenz sinkt mit zunehmender Temperatur wie wir es schon bei den Ferriten gesehen haben. Im Gegensatz zu den Ferriten steigt hier bei den SmCo-Magneten die Koerzitivfeldstärke der B-Kurve, wie auch bei der J-Kurve, mit steigenden Temperaturen in Richtung Ursprung des Koordinatensystems.

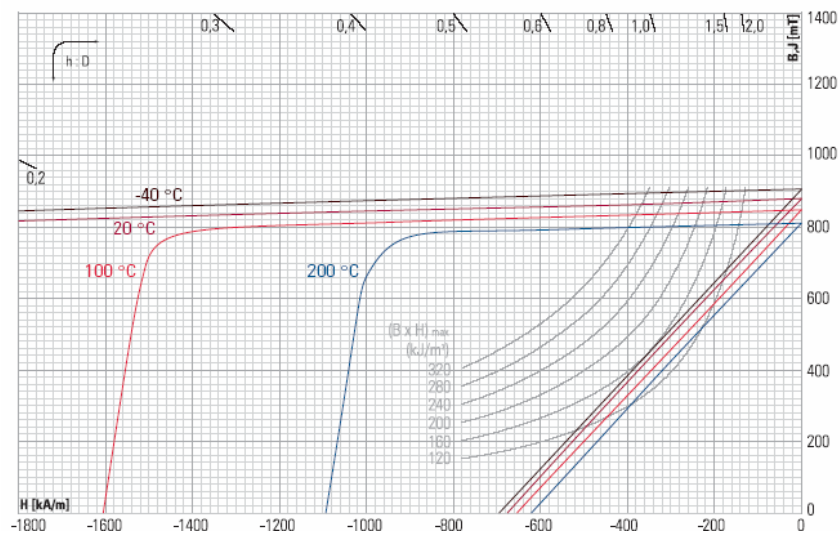


Abb. 3.7

Betragsmässig gesehen ist es jedoch eine Abnahme, was von grösserem Interesse ist. Diese Prozesse sind reversibel. Durch die betragsmässige Reduzierung der Koerzitivfeldstärke bei hohen Temperaturen können Magnete mit tiefliegendem Arbeitspunkt und/oder magnetischen Gegenfeldern einen bleibenden Magnetisierungsverlust erleiden.

3.1.5. Neodymium-Eisen-Bor-Magnete (NdFeB)

Gegenüber den SmCo-Magneten ist das Energieprodukt der NdFeB-Magneten um ca. 40% höher. Sehr schön ersichtlich ist das an der rechteckigen Form der J-Kurve und den nochmals höheren Werten der Remanenz und der Koerzitivfeldstärke. Sowohl neue technische Lösungen werden dadurch ermöglicht, als auch eine Reduzierung des Magnetmaterialeinsatzes bei gleicher Leistung des Systems. Dies bietet die Möglichkeit der Miniaturisierung des gesamten Systems. Das spezifische Gewicht ist niedriger und die mechanische Festigkeit viel besser. Das spezifische Gewicht der SmCo-Magnete bewegt sich im Bereich von 8.3 g/cm³. Dasjenige von NdFeB im Bereich von 7.5 g/cm³. Als Nachteil der NdFeB-Magnete kann die chemische Beständigkeit angegeben werden. NdFeB-Magnete oxidieren stärker in feuchter Atmosphäre als SmCo. NdFeB lösen sich sogar in Wasser langsam auf. Magnete aus NdFeB sind auch nicht beständig gegen anorganische Säuren und Laugen. Deshalb ist hier eine Oberflächenbeschichtung unumgänglich und NdFeB-Magnete sollten trocken gelagert werden. Die Magnete werden durch galvanisches Verzinnen oder Vernickeln gegen Korrosion geschützt. Als Oberflächenschutz bietet sich oft Materialbezüge auf Zinn-, Zink- und Nickel-Basis an. Unter Umständen eignen sich auch Lack- und Kunststoffbeschichtungen. Hierbei ist jedoch zu berücksichtigen, dass die magnetischen Eigenschaften durch gewisse Beschichtungsmaterialien reduziert werden. Jüngste Fortschritte in der Weiterentwicklung des Materials haben jedoch das Korrosionsproblem bereits erfolgreich entschärft.

Nach diesen genannten Nachteilen haben NdFeB-Magnete gegenüber SmCo-Magneten noch ein weiterer Vorteil. Die Rohstoffe für NdFeB-Magnete sind auf Grund grösserer Verfügbarkeit bedeutend günstiger, da der Anteil von Neodym in Seltenerdmetallerzen um ein Vielfaches höher ist als der von Samarium.

Temperaturverhalten NdFeB

In Abb. 3.8 abgebildet sind die Entmagnetisierungskurven eines anisotropen NdFeB-Magneten von der Magnetfabrik Schramberg. Ähnlich wie bei den SmCo-Magneten sehen wir hier, wie angesprochen, die Rechteckigkeit der J-Kurve, was sich positiv auf das Energieprodukt auswirkt. Des Weiteren sehen wir das gleiche Verhalten bei Temperaturänderungen wie bei den SmCo-Magneten. Das heisst, mit steigender Temperatur sinkt die Remanenz und die Koerzitivfeldstärke nimmt betragsmässig ab.

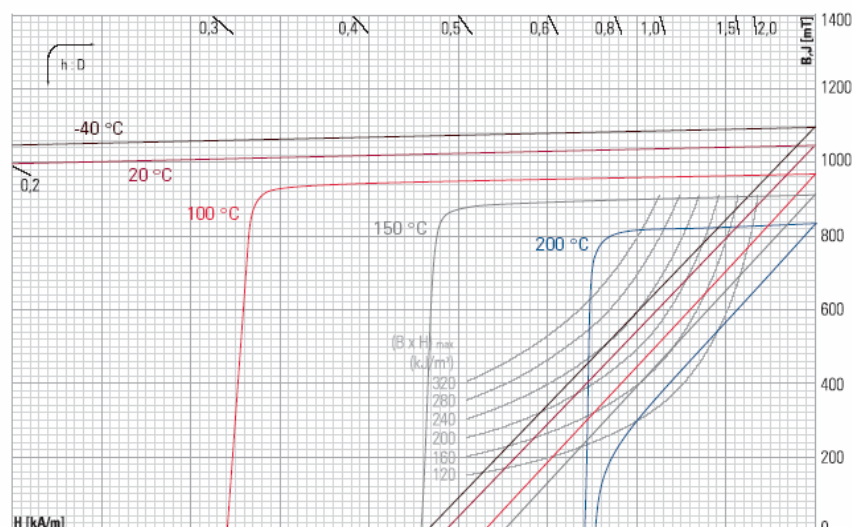
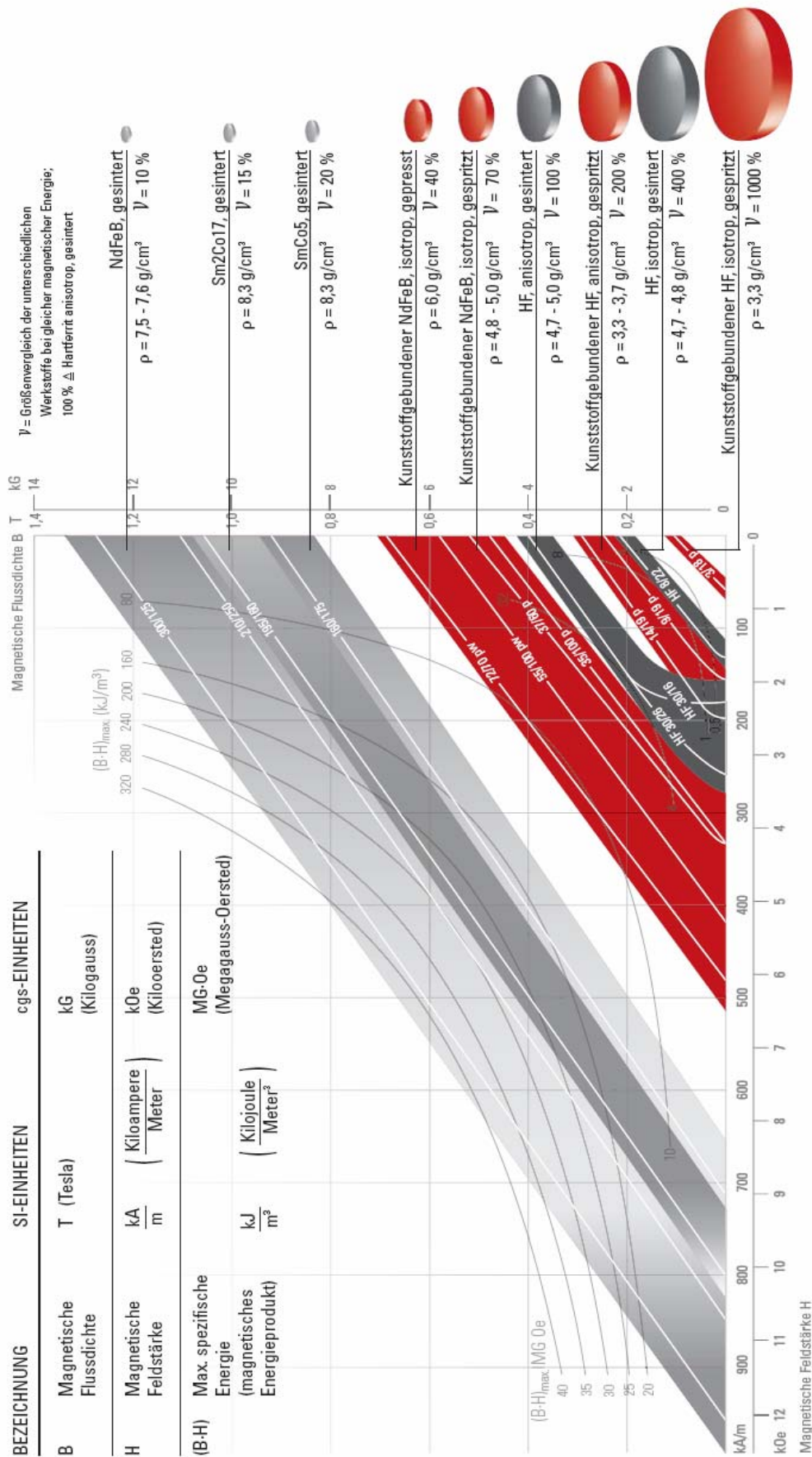


Abb. 3.8

3.2. Dauermagnete im Vergleich



Die magnetischen Eigenschaften von Dauermagneten lassen sich mit Hilfe ihrer Entmagnetisierungskurven bestimmen und vergleichen. Im Rahmen der Messung setzt man Magnete äusseren magnetischen Feldern aus. Sie reduzieren die magnetische Flussdichte und die magnetische Polarisation im Magnetwerkstoff.

Metallische (Seltene Erden), keramische (Ferrite) und kunststoffgebundene Magnete repräsentieren ganz spezifische magnetische Bereiche. So unterscheiden sich z.B. gesinterte, anisotrope NdFeB-Magnete und anisotrope Hartferrite und diese sich wiederum von den kunststoffgebundenen, isotropen Hartferriten jeweils um das Zehnfache Ihres Energieproduktes.

Material	Stärke	Magnetische Stabilität	Thermische Stabilität	Chemische Stabilität	Kosten	Applikationen
Ferrit (1952)	niedrig $B_r = 0.45 \text{ T}$	mittel $H_c = 240 \text{ kA/m}$	Variation mit T $T_{kBr} = -0.2 \text{ \% / K}$	exzellent	sehr niedrig	hoch qualitative Sensoren, Kleinmotoren
Alnico (1932)	mittel bis hoch $B_r = 1.0 \text{ T}$	niedrig $H_c = 80 \text{ kA/m}$	exzellent $T_{kBr} = -0.02 \text{ \% / K}$	gut	gut	Sensoren, Messgeräte
NdFeB (1983)	sehr hoch $B_r = 1.3 \text{ T}$	exzellent $H_c = 1600 \text{ kA/m}$	Variation mit T $T_{kBr} = -0.13 \text{ \% / K}$	Magnetische Verluste durch Oxidation und Korrosion	hoch	Permanentmagnet-Motoren, Sensoren
SmCo (1968)	hoch $B_r = 1.2 \text{ T}$	exzellent $H_c = 900 \text{ kA/m}$	exzellent $T_{kBr} = -0.035 \text{ \% / K}$	genügend	sehr hoch	Permanentmagnet-Motoren, Sensoren, Messgeräte

4. Herstellung von Permanentmagneten

Die Magnetindustrie ist heutzutage in der Lage fast jedes kundenspezifische magnetische Bauteil zu liefern. Dies gilt nicht nur für die magnetischen Eigenschaften, sondern auch für Form und Oberflächenschutz. Grundsätzlich unterscheidet man folgende Permanentmagnetprodukte.

Hartferritmagnete

- Bariumferrit
- Strontiumferrit

Seltenerd-magnete

- Samarium-Cobalt
- Neodym-Eisen-Bor

Kunststoffgebundene Magnete

- Kunststoffgebundenes Hartferrit
- Kunststoffgebundenes Samarium-Cobalt
- Kunststoffgebundenes Neodym-Eisen-Bor

Unabhängig vom Magnetwerkstoff und vom Herstellungsverfahren können Permanentmagnete in zwei verschiedene Kategorien eingeteilt werden.

Isotrope Magnete

Isotrope Magnete haben keine Vorzugsrichtung. Da die Ausrichtung ihrer Elementarmagnete statistisch verteilt ist, können sie in beliebiger Richtung magnetisiert werden. Allerdings werden hierbei jeweils nur diejenigen magnetischen Kristalle magnetisiert, die in Magnetisierungsrichtung ausgerichtet sind.

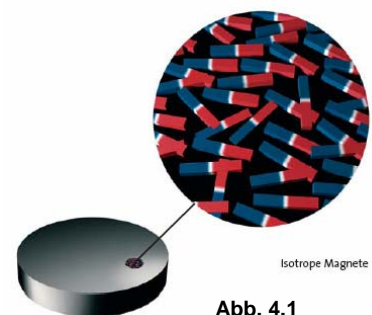


Abb. 4.1

Anisotrope Magnete

Anisotrope Magnete werden in einem Magnetfeld gepresst bzw. gespritzt und eine Mehrzahl der Elementarmagnete dadurch in die spätere Magnetisierungsrichtung gedreht. Sie haben in der Vorzugsrichtung sehr gute magnetische Eigenschaften und erreichen im Vergleich zu isotropen Magneten annähernd den doppelten magnetischen Fluss.

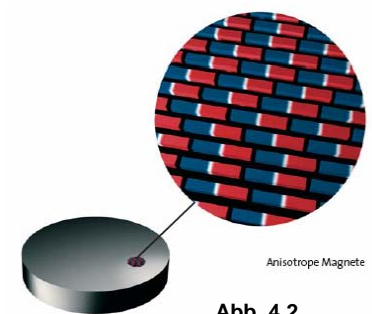


Abb. 4.2

Eine Magnetisierung senkrecht zur Vorzugsrichtung ist bei anisotropen Magneten jedoch nicht möglich.

4.1. Herstellungsverfahren

Kunststoffgebundene Magnete sind aufgrund ihrer vielfältigen Formgebungsmöglichkeiten äusserst attraktiv, während gesinterte Magnete in der Regel noch durch Trennschleifen, Erodieren, oder Schleifen zu einem massgenauen Formteil bearbeitet werden müssen, ermöglicht die Herstellung der gebundenen Magnete durch Spritzgiessen, Pressen oder Extrudieren Toleranzen, die eine weitere Bearbeitung überflüssig machen. Zusätzlich bieten Kunststofftechniken ohne wesentlichen Mehraufwand eine grössere Vielfalt an Gestaltungsmöglichkeiten, so dass z.B. andere Bauteile bereits bei der Herstellung integriert werden können. Solche Kombinationen werden als Baugruppen bezeichnet.

Im folgenden Kapitel werden die beiden Herstellungsverfahren Sinterprozess und kunststoffgebundene Magnete erklärt. Zusätzlich werden in Kapitel 4.1.3 kurz die Produktionsmöglichkeiten von Baugruppen angeschnitten. Fertige Baugruppen ab Werk sind heutzutage je nach Komplexität für den Kunden eine sehr interessante Alternative, um Montagekosten einzusparen (z.B. Motorenrotor mit aufgespritztem Magnetwerkstoff).

4.1.1. Press- und Sinterprozess

Der Obergriff für dieses Verfahren wird Pulvermetallurgie genannt. Unter Pulvermetallurgie versteht man die mechanische Verdichtung von Metallpulvern in Formwerkzeugen und der anschliessenden Sinterung bei hohen Temperaturen zu Fertigteilen. Dies geschieht unterhalb des Schmelzpunktes und ermöglicht unter Umgehung des Schmelzprozesses die Herstellung kompakter, nahezu dichter Körper.

Die Sintertechnik ist der zentrale Technologieschritt der Pulvermetallurgie. Dabei werden im Zusammenwirken von Diffusion und Oberflächenspannung bei erhöhter Temperatur aus porösen Pulverpresslingen kompakte, für die Weiterverarbeitung geeignete metallische Teile hergestellt. Dieser Herstellungsprozess kann sowohl mit Hartferrit als auch mit Seltenerdmetallen durchgeführt werden. Da sich diese Verfahren in einzelnen Punkten unterscheiden, werden diese in den folgenden Abschnitten separat beschrieben.

Hartferritmagnete

Hartferritmagnete werden aus Eisenoxid und Barium- bzw. Strontiumcarbonat hergestellt. Dazu werden die einzelnen Rohstoffe nach Rezeptur gemischt, granuliert und vorgesintert, wobei über verschiedene Zwischenphasen eine so genannte Hexaferritphase entsteht. Das vorgesinterte Granulat wird gemahlen und kann anschliessend nass oder trocken im Magnetfeld (anisotrop) oder ohne Magnetfeld (isotrop) gepresst und gesintert werden. Als keramischer Werkstoff besitzt Hartferrit hinsichtlich Härte und Sprödigkeit die entsprechenden mechanischen Eigenschaften. Eine Bearbeitung z.B. durch Schleifen mittels Diamantscheiben oder durch Wasserstrahlschneiden ist möglich.

Die gebräuchlichsten Formen wie Ring-, Rund-, Segment- und Vierkantmagnete werden presstechnisch hergestellt. Darüber hinaus können auch Sonderformen hergestellt werden – am besten schon beim Pressen, da eine nachträgliche Formgebung (mit Bohrungen, Fasen, Kerben, Senkungen usw.) nur durch aufwändige Bearbeitungsverfahren mit Diamantwerkzeugen möglich ist. Dabei ist zu beachten, dass diese nur in Pressrichtung vorgenommen werden können. Da bei anisotropen Magneten die Magnetisierungsrichtung der Pressrichtung entspricht, können Bohrungen, Fasen, Kerben, Senkungen usw. auch nur in Magnetisierungsrichtung angebracht werden. Die unterschiedlichen Herstellprozesse (nass oder trocken gepresst) haben direkt Auswirkungen auf die magnetischen Eigenschaften beim gesinterten Hartferritmagnet (Abb. 4.4).

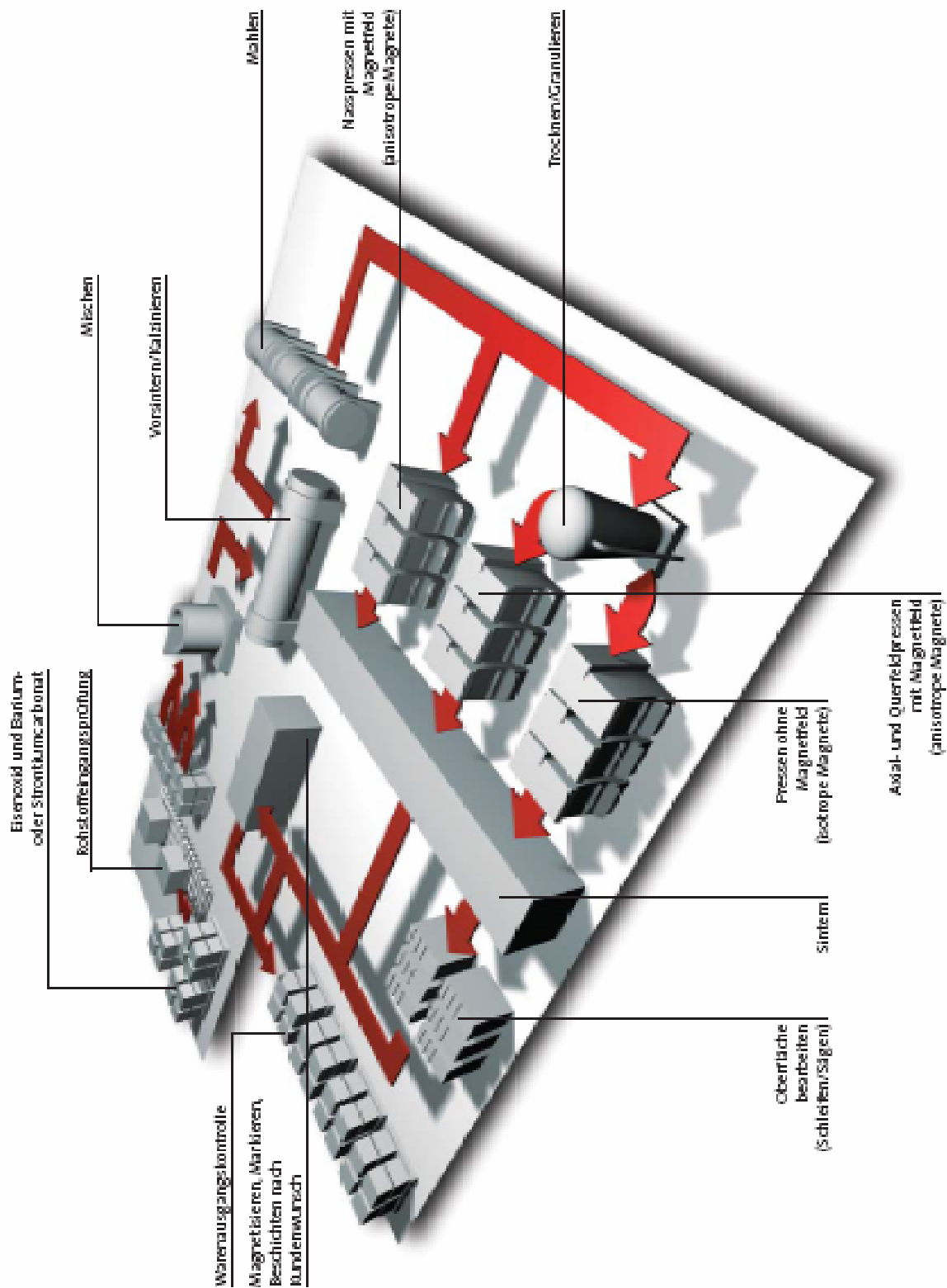


Abb. 4.3: Prozessablauf für die Herstellung von Hartferritmagneten

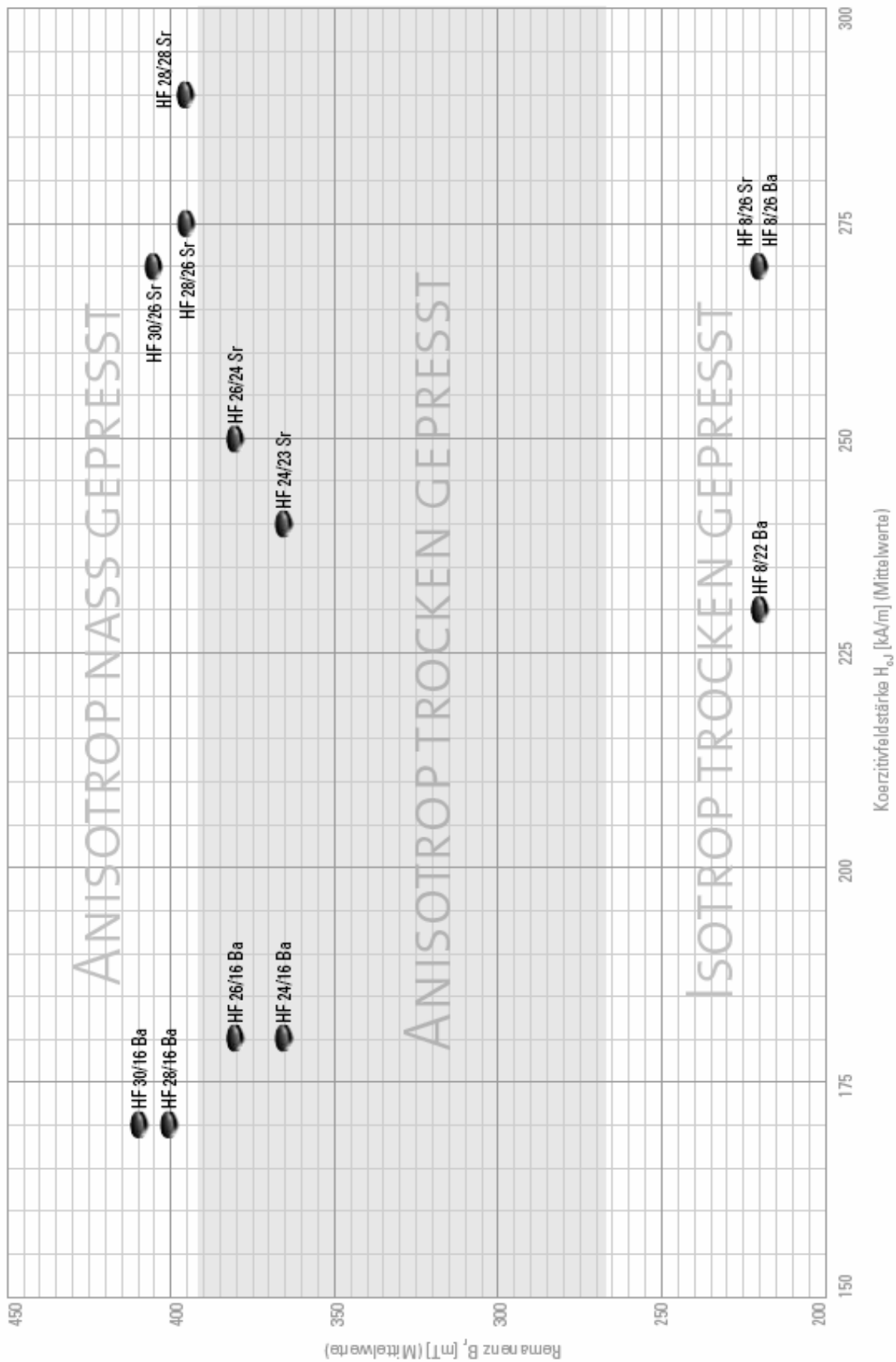


Abb. 4.4

Seltenerdmagnete



Abb. 4.5

Seltenerdmagnete bestehen hauptsächlich aus intermetallischen Verbindungen von Seltenerd-metallen (Samarium, Neodym) und Übergangsmetallen (z. B. Cobalt, Eisen). Im Unterschied zu Hartferritmagneten erfolgt das Mahlen, Pressen und Sintern unter Schutzgas-Atmosphäre. Die Magnete werden entweder im Ölbad (isostatisch) oder im Werkzeug (axial oder diametral) gepresst. Danach lassen sie sich z.B. durch Schleifen an Diamantscheiben weiterbearbeiten.

Seltenerdmagnete werden entweder aus isostatisch gepressten Rohmagneten geschnitten bzw. im Quersfeld (h-Material) oder im Axialfeld (w-Material) gepresst. Die unterschiedlichen Herstellungsarten wirken sich auf die magnetischen Eigenschaften aus (siehe Abb. 4.6). So weisen die h-Materialien eine etwas höhere Remanenz (B_r) auf. Die Koerzitivfeldstärke (H_{cJ}) ist identisch. Im Allgemeinen erfüllen jedoch die im Axialfeld gepressten Typen die gestellten Anforderungen und können bei grösseren Stückzahlen kostengünstiger hergestellt werden.

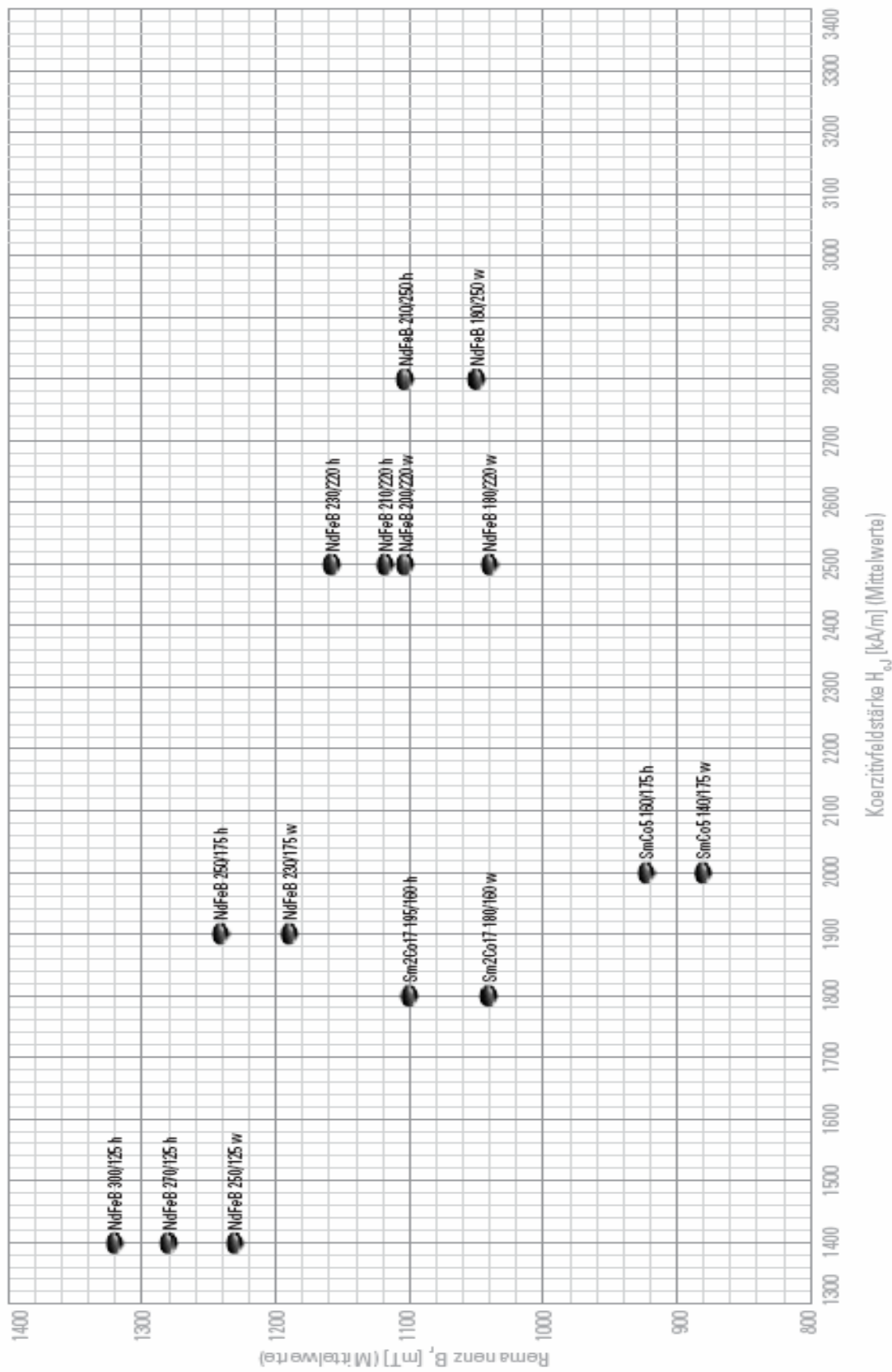


Abb. 4.6

4.1.2. Kunststoffgebundene Magnete

Der Trend zu kunststoffgebundenen Magnetwerkstoffen ist eindeutig. Dabei werden Hartferrit- oder Seltenerd-Magnetpulver in thermoplastischen oder duroplastischen Kunststoffen eingebettet. Auf speziellen Anlagen werden die Magnetpulver mit dem Kunststoff vermischt. Das daraus gewonnene Granulat wird auf modifizierten Spritzgiessmaschinen verarbeitet. Bei der Formgebung der Magnete bieten sich ähnliche Möglichkeiten wie bei technischen Kunststoffteilen. Ein weiterer Vorteil der kunststoffgebundenen Magnete ist, dass Einlegeteile wie Wellen oder Buchsen mitverarbeitet werden können. Der Kunde erhält eine fertige Baugruppe, die er direkt in sein Produkt einsetzen kann.

Die kunststoffgebundenen, gespritzten Magnete bestehen aus den Komponenten Magnetpulver (Hartferrit-/Seltenerd-magnete) und thermoplastische Kunststoffe. Kunststoffgranulat und das Magnetpulver werden im Heissknetzer oder Doppelschneckenextruder compoundiert und anschliessend granuliert. Dieser erste Prozessschritt wird Compoundierung genannt.

Bei kunststoffgebundenen Magneten unterscheidet man, abgeleitet vom Herstellungsverfahren, zwei Hauptgruppen.

Gepresste Magnete (p_w^5):

- Isotrope NdFeB-Magnete

Gespritzte Magnete (p^6):

- Isotrope Hartferritmagnete
- Anisotrope Hartferritmagnete
- Isotrope NdFeB-Magnete
- Isotrope SmCo-Magnete
- Anisotrope SmCo-Magnete

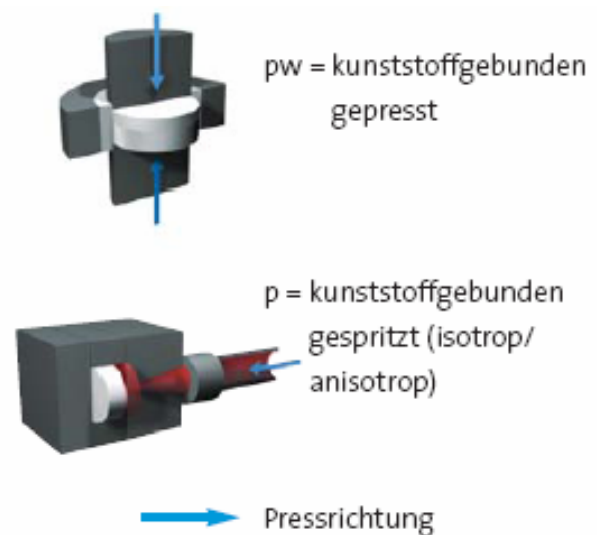


Abb. 4.7

⁵ Bezeichnung nach DIN 17410 für kunststoffgebundene, gepresste Magnetwerkstoffe

⁶ Bezeichnung nach DIN 17410 für kunststoffgebundene, gespritzte Magnetwerkstoffe

Die Tabelle ist ein Auszug aus dem Produktkatalog der Firma *Magnete Schramberg*. Sie zeigt einen Vergleich kunststoffgebundener Magnete bezüglich ihrer magnetischen Kenndaten.

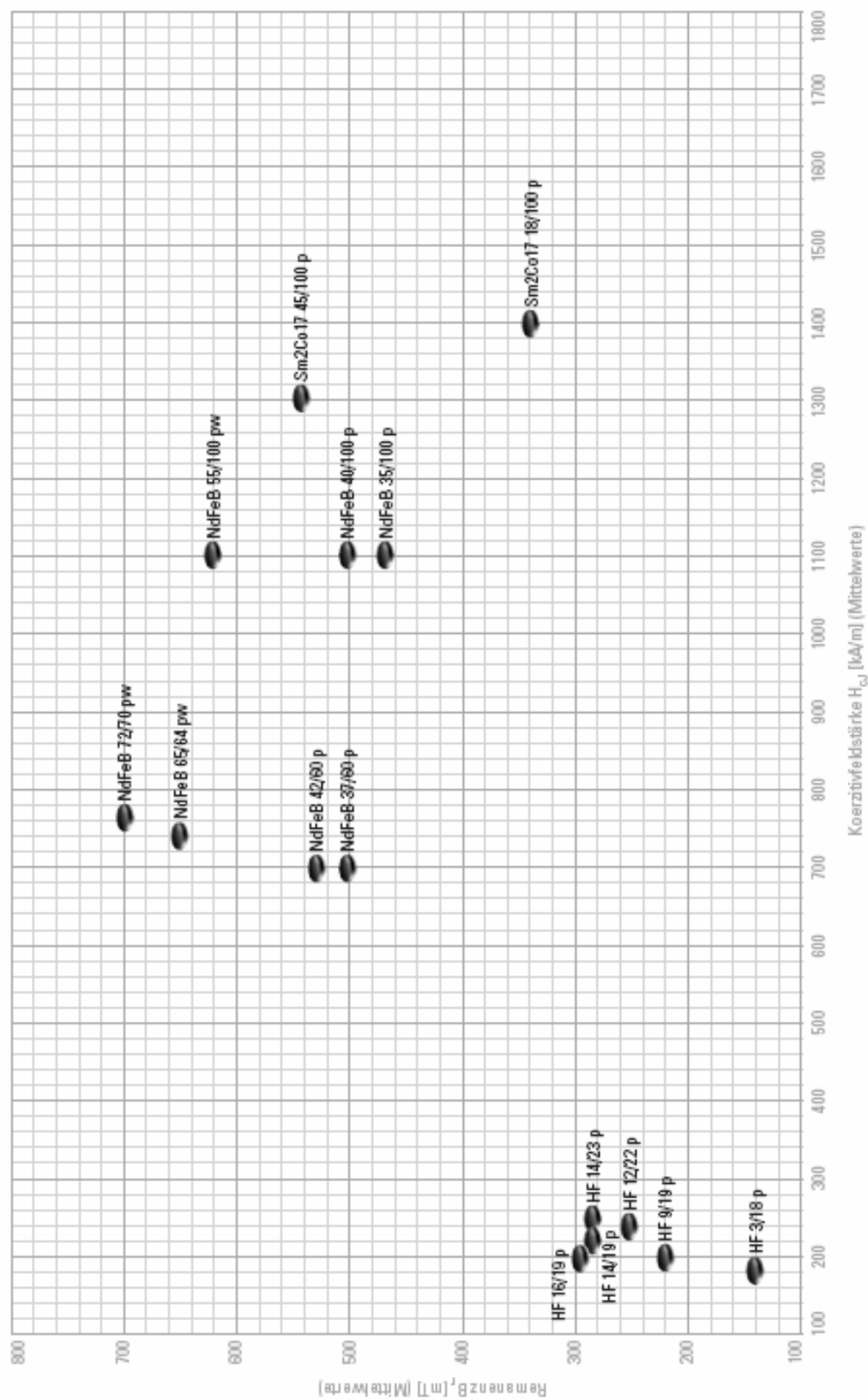


Abb. 4.8

Herstellung und Formgebungsmöglichkeiten von gepressten Magneten (pw)

Kunststoffgebundene NdFeB-Magnete werden axial in Werkzeugen gepresst. Als Kunststoff wird Epoxydharz verwendet. Durch den sehr hohen Füllgrad (97 % NdFeB-Pulver) lassen sich dabei gegenüber kunststoffgebundenen, gespritzten Magneten deutlich höhere magnetische Werte erzielen. Die Werkzeuge sind gegenüber Werkzeugen gespritzter Magnete einfacher und preisgünstiger.

Im Unterschied zu gesinterten Magneten sind bei kunststoffgebundenen, gepressten Magneten bereits wesentlich filigranere Geometrien herstellbar. So können z. B. dünnwandige Ringe mit Durchmesser $\varnothing 20 \times \varnothing 17 \times 5$ mm und Durchmesser-Toleranzen von lediglich ca. $\pm 0,1$ mm gefertigt werden. In der Regel ist danach keine mechanische Bearbeitung mehr erforderlich. Bei besonders hohen Anforderungen können die Magnete allerdings auch auf engere Toleranzen geschliffen werden.



Abb. 4.9

Herstellung und Formgebungsmöglichkeiten von gespritzten Magneten (p)

Gespritzte Magnete sind typische Verbundwerkstoffe, die durch Einbettung von Hartferrit- oder Seltenerd-magnetpulver in thermoplastischen Kunststoffen (Matrixmaterial) entstehen. Dabei bestimmen die Mengenanteile des Magnetpulvers die magnetischen und mechanischen Eigenschaften. Im Fertigungsprozess stellt man zunächst das Magnetcompound her. Dazu werden das Kunststoffgranulat und das Magnetpulver im Heissknetzer oder Doppelschneckenextruder gemischt und anschliessend extrudiert sowie granuliert. Als nächster Schritt folgt die Verarbeitung des Compounds auf modifizierten Spritzgussmaschinen.

Beim Spritzgiessen von anisotropen Magneten wird während des Einspritzens zusätzlich ein Magnetfeld in axialer, radialer, diametraler oder multipolarer Richtung angelegt und die Vorzugsrichtung des Magnetwerkstoffes parallel zur vorgegebenen Orientierung erzeugt.

Bei kunststoffgebundenen, gespritzten Magneten ist in der Regel keine mechanische Bearbeitung des fertigen Spritzteils mehr erforderlich.

Einer der wesentlichen Vorzüge kunststoffgebundener, gespritzter Magnete ist die enorme Formgebungsvielfalt, die das Spritzgussverfahren eröffnet. Im Prinzip sind ähnliche Geometrien wie beim Herstellen von technischen Kunststoffteilen realisierbar. Darüber hinaus macht der hohe Füllgrad (50 - 70 Vol.-%) und der damit verbundene geringe Schwund sehr enge Toleranzen im Vergleich mit normalen Kunststoffteilen möglich.



Abb. 4.10

4.1.3. Baugruppen mit Permanentmagneten

Unter einer Baugruppe versteht man ein „Produkt“, das durch die Weiterverarbeitung von gesinterten oder kunststoffgebundenen Dauermagneten zu einem kundenspezifischen „Magnetsystem“ verarbeitet wird. Die Magnete werden mit anderen technischen Bauteilen, wie Zahnrädern, Flügelrädern, Abschirmtöpfen usw. komplettiert. Die weitere Montage der Baugruppe wird somit wesentlich erleichtert. Die Handhabung oder Verarbeitung von Dauermagneten ist wegen ihrer Sprödigkeit und der zum Teil enormen magnetischen Kräfte jedoch sehr kritisch.

Häufige Herstellverfahren solcher Baugruppen sind:

- Umspritzen oder Ausspritzen
- Mehrkomponenten-Spritzgusstechnik
- Klebtechnik
- sonstige Fügetechniken, wie z. B. Ultraschallschweissen, Heissverstemmen

Umspritzen oder Ausspritzen

Durch das Umspritzen von Einlegeteilen mit Magnetwerkstoff und/oder technischem Kunststoff können Magnete mit Achsen, Buchsen oder anderen Funktionselementen kombiniert werden.

Dies kann durch direktes Auf-, Um- oder Einspritzen von Magnetwerkstoffen (kunststoffgebundene Magnete) oder mit Hilfe von technischen Kunststoffen erfolgen.



Abb. 4.11

Mehrkomponenten-Spritzgusstechnik

Die Mehrkomponenten-Spritzgusstechnik schafft die Voraussetzung, mehrere Kunststoffe trotz unterschiedlicher Materialeigenschaften in einem Spritzgussprozess sicher miteinander zu verbinden. Der Einsatz der Mehrkomponenten-Spritzgusstechnik bietet im Vergleich zu konventionellen Verfahren eindeutige Vorteile:

- Hohe Genauigkeit, da alle Komponenten im gleichen Werkzeug, innerhalb eines Fertigungsschrittes und somit ohne Fügetoleranzen gespritzt werden
- Kombinierbarkeit verschiedener Eigenschaften in einem Bauteil
- Weitreichende Gestaltungsmöglichkeiten (z. B. Miniaturisierung)
- Bessere Verbindungsqualität durch das Verschmelzen der einzelnen Komponenten
- Materialeinsparung beim Magnetcompound
- Reduzierung der Prozessschritte
- Wegfall kostspieliger Handlings



Abb. 4.12

- Preisgünstige Fertigung komplizierter Baugruppen in hohen Stückzahlen

Klebertechnik

Das Kleben von technischen Bauteilen hat sich in den letzten Jahren immer mehr durchgesetzt. So werden heute zum Beispiel Klebeverbindungen unter anderem in den Bereichen Luftfahrt und Fahrzeugtechnik in Serienproduktionen eingesetzt.

Sonstige Fügeverfahren

Für bestimmte Baugruppen sind aus wirtschaftlichen oder technischen Gründen Verbindungstechniken wie z.B. Ultraschallschweißen, Einklipsen, Heissverstemmen und Montage der Klebertechnik vorzuziehen.



Abb. 4.12

5. Korrosionsverhalten, Oberflächenschutz und Beschichtungen

Machen spezielle Anforderungen an den Permanentmagneten einen besonderen Schutz erforderlich, lassen sich mit geringen Einschränkungen sämtliche Magnetwerkstoffe problemlos beschichten. Die verschiedenen Beschichtungen unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Eignung je nach Grundwerkstoff und Anwendungsfall. Eine Universalbeschichtung, die allen potenziellen Anforderungen gleichermassen gut gewachsen ist, konnte bislang noch nicht entwickelt werden.

5.1. Korrosionsverhalten

Seltenerd-Elemente (SE) werden aufgrund ihres stark negativen elektrochemischen Energiepotenzials ($E_0 = -2,2$ bis $-2,5V$) zu den unedlen und damit sehr reaktionsfreudigen Elementen gezählt. Ihre chemische Reaktionsfähigkeit ähnelt der von Erdalkalimetallen wie z.B. Magnesium. So reagieren SE-Metalle beispielsweise unter Normalbedingungen bereits langsam bzw. in der Wärme rasch unter Einfluss von Luftfeuchtigkeit.

Durch Zulegieren ausreichender Mengen von edleren Metallen wie Kobalt kann die Reaktion mit Wasser nahezu unterdrückt werden. Dies ist der Grund, weshalb SmCo bei Auslagerung unter hoher Luftfeuchtigkeit und erhöhter Temperatur lediglich eine leichte Anlauffarbe an der Oberfläche bekommt.

Andere Verhältnisse liegen im Allgemeinen bei NdFeB vor. Die einzelnen Magnetkörner werden von der neodymreichen Phase zusammengehalten und fixiert. Diese Phase macht bis zu 5% des Gesamtvolumens des Werkstoffes aus und verhält sich bei ungeschützten Magneten chemisch ähnlich wie reines Neodym. Als Folge davon setzt bei erhöhter Luftfeuchtigkeit und Temperatur der Korrosionsprozess ein.

Wie und weshalb man die Magnetwerkstoffe bei Auftreten korrosiver Bedingungen wirksam schützen kann, wird in den Kapiteln 5.2 und 5.3 beschrieben.

5.2. Oberflächenschutz

Dauermagnete aus NdFeB und SmCo können unter normalen Umgebungsbedingungen (z.B. Raumtemperatur, Luftfeuchtigkeit bis 50%, keine Betauung) ohne besonderen, zusätzlichen Oberflächenschutz eingesetzt werden. Für eine Vielzahl von Anwendungen ist jedoch die Beschichtung der Magnetoberflächen erforderlich. Hierfür gibt es im Wesentlichen drei Gründe:

Korrosionsschutz

SE-Dauermagnete sind häufig dem chemischen Angriff aggressiver Medien wie z.B. Säuren, Laugen, Salz, Kühlschmiermittel oder Schadgasen ausgesetzt und müssen deshalb geschützt werden. Bei NdFeB reicht bereits die Einwirkung von hoher Luftfeuchtigkeit, Betauung oder Handschweiss aus, um einen korrosiven Angriff einzuleiten. Aus diesem Grund sollte dieser Magnetwerkstoff nur mit geeigneten Handschuhen angefasst werden.

Schutz vor Magnetpartikeln

Besonders bei Sinterwerkstoffen kann das Auftreten von Magnetpartikeln auf der Oberfläche nicht ausgeschlossen werden. Bei bestimmten Anwendungen können solche Partikel zu Funktionsbeeinträchtigungen führen. Daher sollte die Beschichtung eine rückstandsfreie Reinigung der Magnete ermöglichen.

Handlingschutz

Häufig treten bei der Montage oder beim Einsatz von Magneten in Systemen mechanische Belastungen der Werkstoffe auf. Diese können unter Umständen zum Ausbrechen von Magneteilchen, insbesondere im Bereich von scharfen Kanten, führen.

5.3. Beschichtung

5.3.1. Beschichtungsarten

Beschichtungen lassen sich in metallische und organische Beschichtungen unterteilen. Dabei können für spezielle Anforderungen Doppelbeschichtungen aus Metall/Metall, Metall / Lack sowie eine Reihe von Sonderbeschichtungen angewendet werden.

Die Auswahl einer geeigneten Beschichtung richtet sich nach der Korrosionsbeanspruchung oder dem Handlungsschutz im jeweiligen Anwendungsfall.

Metallische Beschichtungen

Metallische Schichten schützen den relativ spröden Werkstoff vor Kantenverletzungen und werden im Allgemeinen galvanisch aufgebracht. Gute galvanische Schichten sind Mehrschichtsysteme, da sie einen höheren Schutz bieten als Einsichts-systeme. Geeignet für SmCo- und für NdFeB-Magnete, zeichnen sie sich durch eine sehr gute Schutzfunktion vor Feuchtigkeit und Dampf aus.

Korrosiven Medien gegenüber sind jedoch Kunststoffbeschichtungen den metallischen Schichten normalerweise überlegen. Kleinteile werden meist als Schüttgut beschichtet, d. h. ohne Kontaktstellen ausgeführt, denn Verletzungen oder Beschädigungen an der metallischen Schicht können, ausser bei Passivschichten, zu beschleunigter Korrosion führen.

Grundsätzlich ist zu beachten, dass eine Nickel-Beschichtung einen „magnetischen Kurzschluss“ auslöst. Die magnetischen Kenndaten (Remanenz B_r , das Energieprodukt $(B \cdot H)_{max}$ und die Koerzitivfeldstärke H_{cB}) werden dadurch um 5 - 7 % reduziert.

Passivierende Deckschichten, wie z. B. Zink, Chrom und Aluminium, sind unedler als das Grundmetall, ziehen den korrosiven Angriff zunächst ausschliesslich auf sich und fungieren als Opferanode. Solange eine deckende Passivschicht vorhanden ist, bleibt das Grundmetall kathodisch vor Korrosion geschützt und die Funktionalität des Bauteils bleibt voll erhalten.

Kleine Defekte oder kleine „offene“ Stellen in der Schicht werden durch die verbleibende Opferschicht in der Nachbarschaft mit geschützt. Ist die Passivschicht weitestgehend oder flächig verbraucht, setzt Grundmetallkorrosion ein.

Galvanisch-Zinn

Galvanisch aufgetragene Zinnschichten sind ein guter Korrosionsschutz gegen Einflüsse von Atmosphäre, Feuchtigkeit sowie von schwachen Säuren und Laugen. Aufgetragene Zinnschichten sind dicht und frei von durchgängigen Poren. Der typische Schichtdickenbereich bei Magneten beträgt 15 - 30 µm. Die Zinnschichten sind in ihrem äusseren Erscheinungsbild silberweiss und schwach glänzend. Im Temperaturbereich von -40 °C bis zum Schmelzpunkt +232 °C werden keine Phasenumwandlungen beobachtet.

Die Beschichtung kann für Kleinteile kostengünstig in der Trommel vorgenommen werden.

Die galvanischen Zinnschichten zeichnen sich insbesondere durch ihre hohe Klimabeständigkeit im Feucht-Warm-Klima (z.B. 85°C/85 % rel. Luftfeuchte) aus, wie sie in der Regel für Elektronikanwendungen gefordert werden. Zinn weist eine hohe Duktilität⁷ auf und ist in einem breiten Schichtdickenbereich nahezu frei von inneren Spannungen und mit hoher Fertigungssicherheit abscheidbar. Es besteht keine Gefahr des Aufreisens oder Abblätterns der Schicht. Mechanische Beanspruchung erzeugt kein Abblättern, sondern führt lediglich zu einer Verformung der Zinnschicht, so dass der Schutz des Magnetwerkstoffes weiterhin gewährleistet ist. Zinnschichten sind rückstandsfrei reinigbar und bilden für viele Klebstoffe einen idealen Haftgrund.

Galvanisch-Nickel

Galvanisch aufgetragene Nickelschichten können alternativ zu Zinn oder als Doppelbeschichtung mit Zinn aufgebracht werden. Auf NdFeB ist ihre Schutzwirkung bei vergleichbarer Schichtdicke der Verzinnung überlegen.

Galvanische Nickelschichten sind hart, abriebfest und können problemlos ohne Rückstände gereinigt werden. Deshalb haben sich diese Schichten heute insbesondere für Reinraumanwendungen durchgesetzt.

Alle diese Eigenschaften machen Galvanisch-Nickel zu einer Universalbeschichtung für Selten-Erd-Dauermagnete, die die meisten Anwendungsfälle abzudecken vermag.

Doppelbeschichtung Nickel/ Zinn

Besonders hohe Korrosionsbeständigkeit wird erzielt, wenn auf die Nickelschicht noch eine Zinnschicht aufgebracht wird. Damit wird z.B. eine Verdoppelung der Standzeiten in Klimatests gegenüber einer gleich dicken Nickel- oder Zinnschicht erreicht. Die Oberflächeneigenschaften entsprechen denen einer Zinnschicht.

IVD - Aluminium (Aluminium gelb chromatisiert)

IVD (= ion vapour deposition) -Aluminium stellt sowohl im Feuchtklima als auch bei Salzsprühbelastung einen ausgezeichneten Korrosionsschutz dar. Die kathodische Schutzwirkung der Aluminiumschicht ermöglicht z.B. einen Dauereinsatz in Wasser. Selbst kleine Fehlstellen in der Beschichtung führen aufgrund des elektrochemischen Schutzes durch Aluminium nicht zu einer erkennbaren Beeinträchtigung des Korrosionsschutzes. Da Aluminium prinzipiell bis ca. 500 °C einsetzbar ist, werden alle Einsatzfälle bei Selten-Erd-Dauermagneten damit abgedeckt. Die Korrosionsfestigkeit dieser Schicht wird durch eine nachfolgende Gelbchromatisierung weiter

⁷ Duktilität ist die Fähigkeit oder das Verhalten eines Werkstoffes, unter Einwirkung äusserer Kräfte zur plastischen und damit dauerhaften Verformung zu neigen, ohne dass dabei Werkstofftrennungen auftreten

verbessert, so dass auch in schwachen Medien eine Schutzwirkung erzielt wird. Auf Grund der hohen Duktilität der Schicht führen mechanische Belastungen ähnlich wie beim Zinn nur zur Verformung der Schicht, ohne dass die Schutzwirkung durch Schichtbeschädigung beeinträchtigt wird. Im Vergleich zu elektrolytisch abgeschiedenen Zinkschichten, die ebenfalls als kathodischer Schutz bei NdFeB eingesetzt werden, hat die IVD - Aluminiumschicht folgende Vorteile:

- Extrem hohe Temperaturbeständigkeit
- Vermeidung von Wasserstoffschädigungen des Magnetmaterials während des Beschichtens
- Keine Bildung loser Weissrostprodukte bei korrosiver Umgebung

Die Beschichtung von Kleinteilen (bis 25g) erfolgt mit IVD - Aluminium im kostengünstigen Trommelprozess. Schwere Teile werden als Gestellware behandelt. Prozessbedingte Haltepunkte werden durch entsprechendes Handling beim Beschichtungsprozess vermieden.

Organische Beschichtungen

Organische Beschichtungen werden nach der Beschichtungstechnologie und dem Schichtwerkstoff unterschieden. Anders als metallische Beschichtungen sind sie für alle Magnettypen geeignet. Nachteilig im Vergleich zu diesen sind die niedrigeren Anwendungstemperaturen und die geringere Beständigkeit gegen Wasserdampf. Von Vorteil ist die bessere Beständigkeit gegen korrosive Medien.

Die widerstandsfähigste und gleichmässigste Schicht ist die kathodische Tauchlackierung (KTL). Allerdings kann sie nur an leitfähigen Magneten ausgeführt werden, und es verbleiben prozessbedingt kleine Kontaktstellen auf dem Magneten. Nasslackierungen und Passivlacke lassen sich auf nahezu allen Magneten aufbringen und bieten einen sehr guten Korrosionsschutz. Prozessbedingt sind jedoch grössere Schichtdicken-Toleranzen notwendig. Für besondere Korrosionsanforderungen kommen auch Zweischichtsysteme aus Passivlack und Decklack in Frage.

Die Teflonschicht ist wegen ihrer Prozesstemperatur von ca. 300 °C und dem vergleichsweise hohen Preis eher ein Nischenprodukt, obwohl sie höchsten Korrosionsschutz, weitgehende Chemikalienbeständigkeit und hohe Temperaturbeständigkeit bietet.

Die Parylenebeschichtung, ein aus der Gasphase abgeschiedener relativ weicher Kunststoff, ist für alle Magnetwerkstoffe geeignet und bildet einen dichten, konturgetreuen und geschlossenen Überzug. Sie ist lebensmittelecht, gewährleistet wirksamen Schutz gegen Feuchtigkeit und macht die Magnete in hohem Masse gegen chemische Einflüsse beständig. Lediglich mechanischen Belastungen kann die Beschichtung nicht ausgesetzt werden.

Kathodische Elektrotacklackierung (KTL)

Elektrotacklacke bilden einen bewährten Korrosionsschutz für Seltenerd-Dauermagnete. Sie sind beständig gegen feuchte Luft, wässrige Medien, im schwach sauren bis schwach alkalischen Bereich und besonders gegenüber Salzlösungen. Daneben zeichnen sich die schwarzen KTL-Schichten durch Abriebfestigkeit (Lackhärte 4H) und eine optimale Haftung zum Grundmaterial aus. KTL-Schichten sind problemlos mit vielen Klebstoffen zu hochfesten Verbindungen verklebbar. Es werden zwei unterschiedliche Verfahren angewendet:

a) Gestellverfahren

Die Kontaktpunkte befinden sich hier meist auf zwei Flächen senkrecht zur Magnetisierungsrichtung und werden in der Regel nachträglich mit Lack verschlossen. Dauertemperatureinsatz dieser KTL-Lackierung ist bis 130°C zulässig. Die Schichtdicke beträgt typisch 15-30 µm.

b) Durchlaufverfahren.

Diese neue Technik ermöglicht die Beschichtung grosser Magnete im kostengünstigen Durchlaufverfahren. Kleinteile unter 4g oder mit einer Auflagefläche < 150 mm² sind aus technischen Gründen nicht beschichtbar. Prozessbedingt befinden sich die Kontaktpunkte ausschliesslich auf der Auflagefläche des Magneten (in der Regel eine Polfläche). Die Haltepunkte werden nicht verschlossen. Daher sollte diese Fläche bei der späteren Montage gezielt als Klebefläche ausgewählt werden. Damit ist der Magnet bei vollflächiger Verklebung optimal korrosionsgeschützt. Bei diesem Verfahren sind typischerweise Schichtstärken von 6-15 µm realisierbar. Der Dauertemperatureinsatz ist bis 150°C möglich, so dass diese Schichten auch für Motorenanwendungen in Frage kommen.

Aluminiumsprühlackierung

Diese neu entwickelte Beschichtung weist ähnlich gute Klima- und Salzsprühbeständigkeit wie IVD - Aluminium auf und bietet damit im Vergleich zur KTL-Lackierung einen verbesserten Korrosionsschutz. Das Anwendungsgebiet wird im Hinblick auf grosse Magnete (> 15g) durch diese sehr kostengünstige Variante mit besten Korrosionsschutzeigenschaften ergänzt. Schon ab einer Schichtdicke von 5 µm werden Langzeitautoklaven- und Salznebeltests problemlos bestanden. Die Beschichtung zeichnet sich im Vergleich zu herkömmlichen Lackierungen durch einen extrem guten Kantenschutz aus. Die Lackmatrix ist hochtemperaturbeständig und kann im Dauereinsatz bis 180°C verwendet werden. Auf Grund der hohen Härte dieser Einbrennlackierung ist die Beschichtung unempfindlich in Hinblick auf mechanische Beschädigungen.

Die Applikationen der Lackierung erfolgt meist auf automatischen Sprühlackieranlagen, die ein hohes Mass an Reproduzierbarkeit und Prozesssicherheit gewährleisten und die Einhaltung enger Mastoleranzen ermöglichen.

Die Aluminiumsprühlackierung kann auch zur Beschichtung kompletter Magnetsysteme vorteilhaft eingesetzt werden. Kleberbehaftete Stellen werden in der Regel problemlos und haftfest mit Lack überdeckt. Im Gegensatz zur IVD - Aluminiumbeschichtung weist diese Sprühlackierung keine elektrische Leitfähigkeit auf.

Parylenebeschichtung

Parylene ist eine Beschichtung, die im Vakuum durch Kondensation aus der Gasphase als porenfreier und transparenter Polymerfilm auf das Substrat aufgetragen wird. Praktisch jedes Substrat-material wie z.B. Metall, Glas, Papier, Lack, Kunststoff, Keramik, Ferrit und Silikon ist mit Parylene beschichtbar. In einem Arbeitsgang können Beschichtungsdicken von 0,1 bis 50µm aufgebracht werden.

Eigenschaften und Vorteile:

- hydrophobe⁸, chemisch resistente Beschichtung mit guter Barrierenwirkung gegenüber anorganischen und organischen Medien, starken Säuren, Laugen, Gasen und Wasserdampf.
- hervorragende elektrische Isolation mit hoher Spannungsfestigkeit und niedriger Dielektrizitätskonstante.
- dünne und transparente Beschichtung mit hoher Spaltgängigkeit, geeignet für komplex gestaltete Substrate auch auf Kanten.
- Beschichtung ohne Temperaturbelastung der Substrate, Beschichtung erfolgt bei Raumtemperatur im Vakuum.
- hoher Korrosionsschutz.
- absolut gleichförmige Schichtausbildung
- temperaturbeständig bis zu 220°C.

⁸ hydrophob = wasserabweisend

5.3.2. Eigenschaftsprofil verschiedener Beschichtungen

Die auf untenstehende Tabelle zeigt einen Eigenschaftsvergleich der wichtigsten Beschichtungen und kann daher bei der Auswahl des Oberflächenschutzes für eine bestimmte Anwendung dienen. Aufgeführt ist jeweils die Mindestschichtdicke der Beschichtungsart. Sie gewährleistet bei den meisten Anwendungen einen ausreichenden Korrosionsschutz. Für höhere Korrosionsschutzanforderungen muss die Schichtdicke entsprechend angepasst werden. Weiterhin ist zu beachten, dass durch unsachgemässe Handhabung die Beschichtung beschädigt werden kann.

	BESCHICHTUNG	TEMP-BEREICH	FUNKTION	EIGNUNG
METALLISCH	Nickel	<200°C	dekorative Schicht, Kantenschutz	Gesinterte Seltenerdmagnete
	Zinn	<160°C	sehr gute Feuchtebeständigkeit	Gesinterte Seltenerdmagnete
	Nickel/Kupfer	<160°C	guter Feuchte- und Korrosionsschutz	Gesinterte Seltenerdmagnete
	Nickel/Zinn	<160°C	guter Feuchte- und Korrosionsschutz	Gesinterte Seltenerdmagnete
	Zink/Chrom	<170°C	guter Feuchteschutz, passiver Korrosionsschutz	Gesinterte Seltenerdmagnete
	IVD - Aluminium	<500°C	ausgezeichnete Klima- und Salzbeständigkeit	Gesinterte Seltenerdmagnete
ORGANISCH	KTL	<150°C	sehr guter Korrosionsschutz	Gesinterte Seltenerdmagnete
	Nasslackierung	<160°C	guter Korrosionsschutz	Gesinterte und kunststoffgebundene Hartferrit- und Seltenerdmagnete
	Passivlack	<160°C	Feuchteschutz, sehr guter Korrosionsschutz	Gesinterte Seltenerdmagnete
	Teflon (PTFE)	<160°C	sehr guter Korrosionsschutz	Gesinterte und kunststoffgebundene Hartferrit- und Seltenerdmagnete
	Parylene (CVD-Polymer)	<220°C	Feuchteschutz, sehr guter Korrosionsschutz, lebensmittelecht	Gesinterte und kunststoffgebundene Hartferrit- und Seltenerdmagnete

Quellenverzeichnis

- Fachliteratur (Bücher, Artikel, etc.)

Produktekatalog Magnete Schramberg
Produktekatalog Bomatec
Produktekatalog IBS Magnet
Sonderdruck aus Bulletin von Dietmar Weinmann:
Dauermagnete – neue Entwicklungen und Anwendungen

- Internetlinks

Magnetfabriken:

www.magnete.de
www.bomatec.ch
www.maurer.ch
www.ibsmagnet.de
www.neorem.fi

Allgemeine Werkstoffinformationen:

www.ndfeb.info/
<http://de.wikipedia.org>

Anhang B:

Betrachtung zur „Grauen Energie“ der Neodym-Eisen-Bor Magnete“.

Bei den Seltenerd-Magneten setzte sich das Neodym durch. Der Grund liegt beim günstigeren Preis und der besseren Verfügbarkeit, als beim Samarium-Cobalt. Der Herstellungsprozess besteht aus der chemischen Reduktion des Neodym-Erz und anschliessender Legierung aller geschmolzenen Ausgangsmetalle. Mechanische Zerkleinerungsprozesse der Legierung ergeben das Grundmaterial, das zum endgültigen Magneten, in einer Form, gesintert wird. Das Herstellungsverfahren kommt ohne hochintensive Energieprozesse aus, wie diese z.B. bei der Elektrolyse des Aluminiums oder beim Ziehen von Siliziumkristallen für monokristalline Solarzellen bekannt sind. Die chemische Formel der Neodym-Magnete lautet $\text{Nd}_2\text{Fe}_{17}\text{B}$. Der Anteil des Eisens überwiegt. Somit kann als Richtgrösse der „Grauen Energie“ etwa die Schmelzenergie von Eisen, 277kJ/kg angenommen werden.

Weitergehende Informationen zum Magnetgrund-Werkstoff Neodym

<http://de.wikipedia.org/wiki/Neodym>