

## D. Permanentmagnetische Materialien

Tabelle D1 zeigt einen Überblick über die wichtigsten dauermagnetischen Materialien, die in industriellen und kommerziellen Applikationen benutzt werden. Abb.D1 zeigt schematische Entmagnetisierungskurven für diese Werkstoffe. Sowohl die Tabelle als auch die Kurven geben lediglich ungefähre Anhaltswerte wieder.

Material	Stärke	Magnetische Stabilität	Thermische Stabilität	Chemische Stabilität	Kosten	Applikationen
Ferrit (1952)	niedrig Br=0.45T	mittel $iH_c=240\text{kA/m}$	Variationen mit T $T_{kBr}=-0.2\%/K$	exzellent	sehr niedrig	hoch qualitative Sensoren, Kleinmotoren, Low level Anwendungen
Alnico (1932)	mittel bis hoch Br=1.0T	niedrig $iH_c=80\text{ kA/m}$	exzellent $T_{kBr}= -0.02\%/K$	gut	moderat bis hoch	Sensoren, Meß-Geräte
NdFeB (1983)	sehr hoch Br=1.3T	exzellent $iH_c=1600\text{ kA/m}$	Variationen mit T $T_{kBr}= -0.13\%/K$	magnetische Verluste durch Oxidation und Korrosion	hoch	permanent magnetische Motoren, langreichweitige Sensoren
SmCo (1968)	hoch Br=1.2T	exzellent $iH_c=900\text{ kA/m}$	exzellent $T_{kBr}= -0.035\%/K$	adäquat	sehr hoch	permanent magnetische Motoren , Sensoren und Meßgeräte

Tabelle D1.: Hartmagnetische Materialien mit typischen Charakteristika und inhärenten Parametern

Das historisch erste dauermagnetische Material für die Massenproduktion von Permanentmagneten, d.h. Alnico, verliert immer mehr an Bedeutung. Dies resultiert hauptsächlich aus seiner niedrigen Stabilität gegen externe Felder und Temperatureinflüsse, welches aus der gebogenen Entmagnetisierungskurve dieser Legierungsklasse resultiert. Hiermit wird Alnico instabil gegenüber irreversiblen Verlusten über den gesamten Bereich möglicher Arbeitspunkte. Zur Anwendung müssen entsprechende Magnete daher durch einen partiellen Entmagnetisierungsprozeß stabilisiert werden, so daß die Arbeitspunkte auf inneren Bereichen der Hysterese liegen, vergl. Teil C. Andererseits zeigt Alnico von allen Werkstoffen die kleinsten reversiblen Änderungen der Flußdichte bei niedriger Scherung oder nach künstlicher Alterung, resultierend aus dem von allen Werkstoffen niedrigsten Temperaturkoeffizienten der Remanenzinduktion. Dies ist der Hauptgrund, daß diese Werkstoffklasse immer noch Verwendung findet, insbesondere bei der Herstellung von Meßinstrumenten wie z.B. in Elektrizitätszählern.

Ferrite sind heutzutage immer noch die populärsten dauermagnetischen Materialien. Ihr niedriger Preis sowie die hohe thermische und gegen Felder adäquate Stabilität machen diesen Werkstoff hoch attraktiv für die Massenproduktion, insbesondere in der Automobil- oder Elektroindustrie. Die J(H)-Kurve weist eine gute Rechteckigkeit auf, welches in einer guten magnetischen Stabilität in diesem Bereich führt. Andererseits ist die Koerzitivfeldstärke und damit die Breite der Hysterese nicht zu groß, so daß das Dauermagnetmaterial relativ leicht beim Magnetisier-

prozeß gesättigt werden kann. Dies macht es möglich, auch sehr kleine und komplizierte Polstrukturen auf der Magnetoberfläche zu erzeugen, was Ferrite als Feldquelle besonders für Sensor- oder magnetische Speicheranwendungen bevorzugt macht. Weiterhin sind Ferrite chemisch sehr stabil, so daß fast alle Langzeitänderungen und Verluste der magnetischen Induktion ausgeschlossen werden können. All diese Gründe machen dieses Material attraktiv, wobei bei der Entwicklung entsprechender Anwendungen i.a. versucht wird, die relative geringe Remanenzinduktion zu kompensieren, um von all den übrigen Vorteilen zu profitieren.

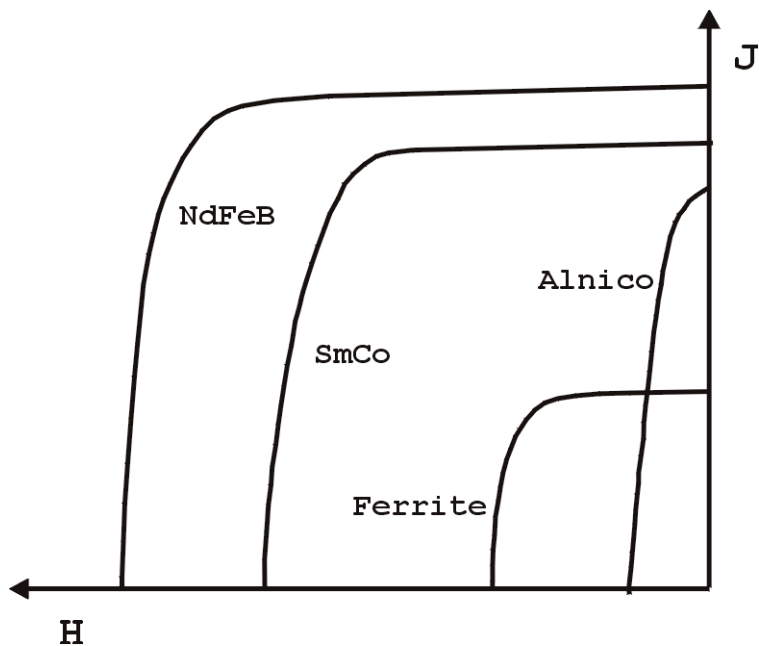


Abb.2:  $J(H)$ -Kurve für die bekanntesten permanentmagnetischen Materialien, schematisch

Falls sehr hohe dauermagnetische Felder benötigt werden, werden Selten-Erd basierte Materialien wie SmCo oder NdFeB appliziert, die die höchsten Remanenzwerte liefern. Z.B. sind heute mit gesinterten NdFeB-Magneten Remanenzinduktionen über 1.5T herstellbar. Insbesondere in gesinterten Selten-Erd-Magneten ist die Entmagnetisierungskurve meist rechteckförmig. Zusammen mit der hohen Koerzitivfeldstärke dieser Werkstoffe ergibt sich hiermit eine hohe magnetische Stabilität, insbesondere gegen magnetische Verluste. Dies macht diese Magnete insbesondere für permanentmagnetisch erregte Motoren interessant. Andererseits kann die hohe Koerzitivität aber auch ein Hindernis bei der Herstellung komplizierter magnetischer Strukturen darstellen, was auch zur Entwicklung von Materialien mit niedrigem  $jH_c$  führte. Ein oftmals entscheidender Nachteil von NdFeB ist dessen Tendenz, einen Teil des ursprünglichen magnetischen Flusses mit der Zeit zu verlieren. Dies wird hauptsächlich durch Prozesse wie Oxidation und Korrosion bewirkt und führt oft zu der Notwendigkeit, die Magnetoberfläche mit kostensteigernden Beschichtungen aus Metall oder Kunststoff zu versehen.

SmCo ist ein Material mit exzellenten Eigenschaften in fast allen technischen Bereichen. Sein einziger Nachteil kann in seinem sehr hohen Preis gesehen werden, welcher hauptsächlich durch den hohen Co-Anteil verursacht wird. Eine hohe Remanenzinduktion kombiniert mit einer guten Rechteckigkeit und einer hohen Koerzitivfeldstärke machen den Magneten sehr stabil gegen thermische oder feldbedingte Verluste. Auch ist die chemische Stabilität gut, so daß hier keine

Beschichtungen gegen Korrosion und Oxidation notwendig sind. Die reversiblen Variationen der Felder bei Temperaturänderungen sind hier fast so klein wie im Fall von Alnico. Insofern ist SmCo technisch sowohl für Motoren als auch für Sensorsysteme interessant.

Neue Materialien wie SmFeN durchdringen langsam den Markt, können jedoch immer noch nicht vollständig bezüglich ihrer technischen Eigenschaften beurteilt werden. Generell ist SmFeN in der Remanenzinduktion vergleichbar mit NdFeB, während die Koerzitivfeldstärke in der Nähe der von Sm<sub>2</sub>Co<sub>17</sub> liegt. Probleme mit der thermischen Stabilität bei hohen Temperaturen wurden über längere Zeit als Hauptnachteil dieser Materialien angesehen. Momentan ist SmFeN nur in Pulverform zur Herstellung kunststoffgebundener Magnete verfügbar.

Während in der Vergangenheit die Magnete aus oben beschriebenen Werkstoffen zum größten Teil als Sinter- oder Gußmagnete hergestellt wurden, welche in Tabelle D1 durch exemplarische Werte charakterisiert sind, so erobern heutzutage die kunststoffgebundenen 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 15 Jahre auf diesem Gebiet ein erheblicher Marktzuwachs. Kunststoffgebundene Magnete bestehen aus einer mehr oder weniger homogenen Verteilung von Magnetpulvern in einer Kunststoffmatrix, was bedeutet, daß z.B. 60% des Volumens mit Magnetpulver ausgefüllt sind und die Zwischenräume aus Polyamid, Epoxyharz. o.ä. gebildet werden. Einer der großen Vorteile besteht in der Verwendbarkeit der Herstellverfahren der Kunststoffindustrie, welches zur Massenproduktion geometrisch auch kompliziertester Dauermagnete bei geringen Kosten führt. Weitere interessante Eigenschaften sind die hohe Vielfalt inhärenter magnetischer Strukturen, die in kunststoffgebundenen Magneten hergestellt werden können und zu einer hohen Variabilität bei den realisierbaren externen Feldverteilungen führen. Nachteilig im Vergleich zu gesinterten oder gegossenen Permanentmagneten ist die geringere Remanenzinduktion.