

Lothar Michalowsky

Alternative weichmagnetische Werkstoffentwicklungen

Wissenschaftliche Mitteilung, vorgetragen in der Klasse Naturwissenschaften am 15.1.2004.

1. Einführende Bemerkungen

Die internationalen Veranstaltungen zu den weichmagnetischen Materialien in den letzten Jahren haben deutlich gezeigt, dass das Potenzial der weichmagnetischen Werkstoffe noch beträchtlich ist, und weitere Werkstoffverbesserungen und insbesondere Bauelementeoptimierungen erwartet werden können. Vielversprechende Ansätze bieten vor allem neue Verfahren in der Technologie der Ferritherstellung, insbesondere in der Pulverpräparation unter Nutzung chemischer und auch physikalischer Reaktionen, die auf folgende Ziele konzentriert werden:

- Reduzierung der Primärkorngrößen in den Bereich < 200 nm
- 6-8-Komponentensysteme
- Sicherstellung der chemischen Homogenität bezüglich der Zusammensetzung
- Nanokomposite mit Glasphasen zur Isolierung der Korngrenzen
- Einlagerungskomponenten zur Verbesserung der mechanischen und thermischen Eigenschaften
- Neue Werkstoffe für die Leistungsübertragung und Entstörung im Temperatur-Bereich bis 250°C und darüber.

Vor der industriellen Umsetzung stehen auch neue Technologien, wie die

- Tandemsinterung zur Realisierung kurzer Aufheizzeiten, beispielsweise in der Kombination Elektro- und Gasbeheizung
- das Cofiring von Ni-Zn-Ferriten mit Unedelmetallpasten zur Herstellung induktiver Verdrahtungsträger für Hybridschaltungen
- die Weiterentwicklung von Multilayerverfahren zur Herstellung von Chipinduktivitäten und integrierten Transformatoren
- die Nutzung der Dünnschichttechnologien zur Herstellung integrierter Induktivitäten für Chipkarten und die Mikrosystemtechnik, zur Fertigung integrierter passiver Schaltungsträger (R-, C-, L-Integration) sowie für hybridintegrierte RF- Identifikationssysteme

- weichmagnetische Kompositwerkstoffe mit hoher Sättigungspolarisation als Energiespeicherwerkstoffe, hoher Permeabilität für Übertragerwerkstoffe und für sehr hohe Anwendungsfrequenzen als Absorbermaterialien
- amorphe und nanokristalline Werkstoffe mit sehr hoher Permeabilität bzw. hoher Sättigungspolarisation für Anwendungen in der Kommunikationstechnik und in der Übertragung hoher Leistungen in Verbindung mit der Verfügbarkeit der Leistungselektronik.

Bei weichmagnetischen Werkstoffen wird der Entwicklungstrend zur evolutionären Eigenschaftsverbesserung anhalten. Innovative Entwicklungen sind zu erwarten durch:

- die Anwendung der physikalischen Technologien zur Oberflächenbehandlung (Laserritzen, Laserwärmebehandlung, Beschichtung) bei Elektroblechen hinsichtlich der Senkung der Kernverluste
- Gefüge-Eigenschaftsoptimierungen, insbesondere über das Korngrenzenengineering
- die Verfügbarkeit nanokristalliner Werkstoffe
- planare Magnetstrukturen auf ferrimagnetischen und isolierenden Substraten
- Werkstoffe mit extremem Magnetowiderstand
- innere Oxidation nanokristalliner weichmagnetischer Werkstoffe
- neue Magnetwerkstoffe und Supraleiter für die Leistungselektronik
- Übertragerwerkstoffe für die Leistungsübertragung im Frequenzbereich bis 10 MHz
- multifunktionale Werkstoffe, Multilayer-Ferrit-Induktivitäten
- Alunit-Co-Komposite für die Nanoskalierung.

Die Fortschritte der Werkstoffwissenschaft bei der Nutzung neuer physikalischer Wirkprinzipien führen über neue leistungsfähigere Materialien zu völlig neuen bzw. verbesserten Ansätzen für den Geräte- und Anlagenbau in der Elektrotechnik und Elektronik. Im Folgenden sollen dazu einige ausgewählte Entwicklungsgebiete vorgestellt und erkannte Anwendungen beschrieben werden. Die neuen Werkstoffe tangieren sowohl ausgewählte Eigenschaften als auch Herstellungsverfahren. Sie betreffen u.a.:

- weichmagnetische Verbundwerkstoffe mit organischer und anorganisch-nichtmetallischer Bindung
- amorphe und nanokristalline metallische weichmagnetische Werkstoffe
- keramische Supraleiterwerkstoffe mit hoher Sprungtemperatur
- oxidische und metallische Werkstoffe mit hohem Magnetowiderstand.

Die strategische Bedeutung dieser neuen Werkstoffe wird in folgenden Anwendungen gesehen:

- Abschirmung elektromagnetischer Felder, Absorption elektromagnetischer Wellen bis in den GHz-Bereich, Kurzschluss magnetischer Streufelder, Speicherdrosseln, Linearübertrager
- Hochleistungsantriebe mit verbessertem Wirkungsgrad, verlustarme und -freie Energieübertragungssysteme, Sensorik
- Induktive Bauelemente für die Leistungselektronik
- Magnetoresistive Feldmesstechnik in der Sensorik, Dichtspeichertechnik, Spintransistoren.

Im Folgenden wird ein Überblick zum Stand der Werkstoffentwicklungen zu Kompositwerkstoffen und zu amorphen und nanokristallinen Werkstoffen sowie zu deren wichtigsten Anwendungen gegeben werden.

2. Weichmagnetische Verbundwerkstoffe mit organischer und anorganisch-nichtmetallischer Bindung

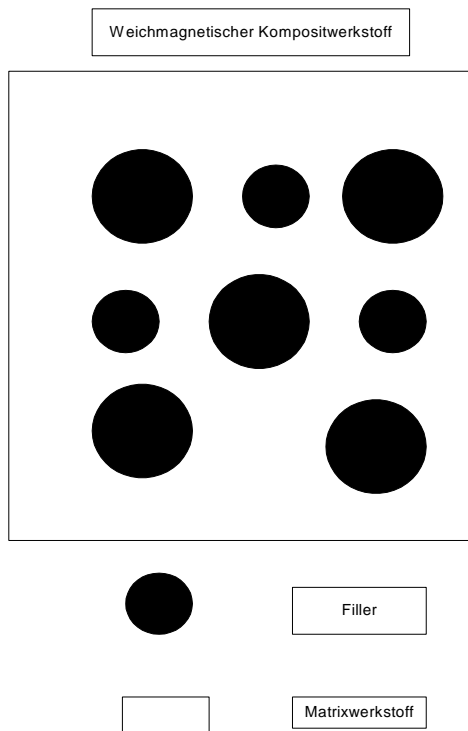


Bild 1: Aufbauschema eines weichmagnetischen Kompositwerkstoffes

Für technische Anwendungen von Bedeutung sind weichmagnetische Pulververbundwerkstoffe mit polymerer oder anorganisch- nichtmetallischer Bindung nach Bild 1. Charakteristisch für den Aufbau dieser Werkstoffe ist eine unmagnetische Matrix, die mit kugelförmigen weichmagnetischen Teilchen gefüllt ist. Die effektive Permeabilität dieser Kompositwerkstoffe ist durch die wirksame Scherung stark reduziert. Sie werden deshalb auch häufig als Werkstoffe mit verteiltem Luftspalt bezeichnet. Für die wirksame Scherung ist das Verhältnis der Werkstoffbestandteile magnetischer Filler/Bindematrix entscheidend. Die Scherung führt zu einer Schrägstellung der Hystereseschleife bei gleichbleibender Koerzitivfeldstärke (siehe Bild 2).

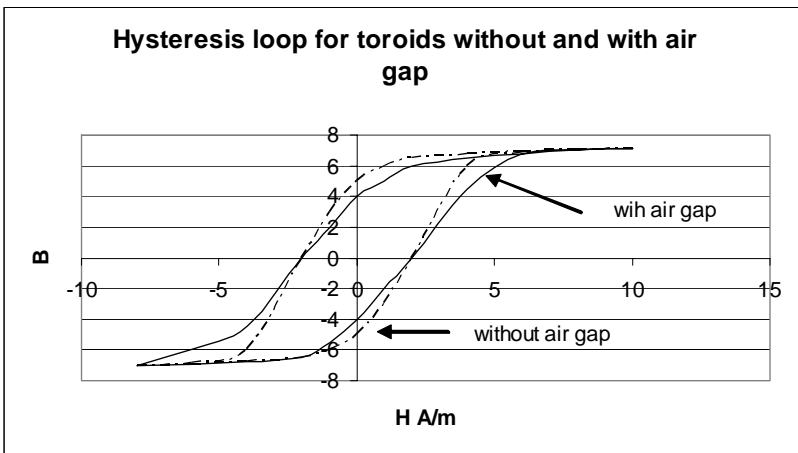


Bild 2: Scherung der Hystereseschleife nach EPCOS Ferrite and Accessories 2001

Allgemein berechnet sich die effektive Permeabilität eines weichmagnetischen Kernes nach der folgenden Gleichung

$$\mu_e = \frac{L}{\mu_0 N} \sum \frac{1}{A}$$

mit

A dem effektiven Querschnitt

l der magnetischen Weglänge

L der Induktivität

N der Windungszahl

μ_0 der Vakuumpermeabilität

Für den Fall der Scherung des Magnetwerkstoffes mit einem Luftspalt der Breite s und der effektiven magnetischen Weglänge l_e ergibt sich die gescher-

te Permeabilität zu

$$\mu_e = \frac{\mu_i}{1 + \frac{s}{l_e} \mu_i}$$

Werkstoffseitig unterscheidet man bei den weichmagnetischen Kompositen in Abhängigkeit von den Fillerkomponenten folgende Grundtypen:

- Carbonyleisenwerkstoffe
- Reineisenwerkstoffe
- Molybdän-Permalloy-Werkstoffe (MPP)
- Sendust- Werkstoffe (Eisen-Aluminium-Silicium-Basis)
- gebundene amorphe Co-Basis-Legierungen
- gebundene nanokristalline Fe-Basis-Legierungen
- gebundene weichmagnetische Ferrite.

Die Auswahl der Bindertypen erfolgt unter Beachtung der Klassifikationstemperaturen für die Anwendung der Composite, der magnetischen Spezifikation für die jeweilige Applikation und der Kostenstruktur. Übliche Binderwerkstoffe sind

- | | |
|-----------------------------|-----------------------------------|
| • Polymere | Klassifikationstemperatur < 250°C |
| • Wassergläser | Klassifikationstemperatur < 350°C |
| • Silikatgläser und Keramik | Klassifikationstemperatur < 450°C |

Weichmagnetische metallische Bindephasen sind metallurgisch vorstellbar. Erste erfolgreiche Ansätze besitzt das mechanische Auflegieren von Metallschichten durch Mahlen für die Sinter- oder Schweißverdichtung. Dabei aufgebaute Spannungen müssen durch einen thermischen Nachbehandlungsprozess ausgeheilt werden.

Für eine reine Kugelpackung der weichmagnetischen Einlagerungskomponenten ergibt sich eine theoretische Grenze von ca. 80% für den Filleranteil der Verbunde bei Kalandrier- und Spritzgießprozessen. Durch Trockenpressen sind bei reduziertem Binderanteil auch höhere Filleranteile möglich. Die Herstellung der Kernformen erfolgt auf pulvermetallurgischem Wege. Die Technologie beinhaltet folgende Hauptschritte:

- Presspulveraufbereitung unter Zugabe der Binder, der Presshilfsmittel
- Formgebung durch Pressen, Spritzgießen, Extrusion und Kalandrieren
- Härtung im Temperaturbereich zwischen 250 und 450°C.

Interessante Ansätze sind auch über die Anwendung von Dünnschichttechnologien erkennbar, die die Herstellung von metallischen Multilayersystemen ermöglichen. Die Dünnschichttechnologie wird neuen Konzepten für mikrosystemtechnische Multifunktionssensoren zugrundegelegt.

Übliche Bauformen für die weichmagnetischen Kompositwerkstoffe sind:

- Ringkerne
- EE-Kerne
- Schalenkerne
- Zylinder- und Gewindekerne
- Folien und Platten für Abschirm- und Streufeldkompensationslösungen.

Die unterschiedlichen weichmagnetischen Komposite sind durch folgende Eigenschaften zu charakterisieren:

- Weichmagnetische Polymerferrite mit Anfangspermeabilitäten von 6 bis 35 und Flussdichten bis 0,5T, Anwendungsfrequenzen bis 2,5 GHz
- Carbonyleisen mit Anfangspermeabilitäten von 5 bis 60, Flussdichte 1,2-1,6 T, Anwendungsfrequenzen bis 800 MHz
- Reineisen mit Anfangspermeabilitäten von 60 bis 150, Flussdichte 1,6 T, Anwendungsfrequenzen bis 150 kHz
- Ni-Fe (High Flux) mit Anfangspermeabilitäten bis 200, Flussdichte 1,5 T, Anwendungsfrequenzen bis 50 kHz
- Molybdän-Permalloy mit Anfangspermeabilitäten von 70 bis 600, Flussdichte 0,7-1,0 T, Anwendungsfrequenzen bis 300 kHz
- Sendust mit Anfangspermeabilitäten bis 120, Flussdichte 1,2 T, hohe Härte und sehr gute Verschleißfestigkeit in Reibpaarungen, Anwendungsfrequenzen bis 250 kHz
- amorphe und nanokristalline Komposite mit Anfangspermeabilitäten bis 600, Sättigungsflussdichten von 0,6-1,5 T und oberen Anwendungsfrequenzen bis 300 kHz
- Kobalt50 / Eisen50 mit einer Sättigungsflussdichte von 2,4 T

(Siehe auch Bilder 3-6)

Das System Kobalt- Eisen ist momentan nur im Frequenzbereich unterhalb 10 kHz in der Anwendung. Oberflächenisolierte feine Teilchen im Korndurchmesserbereich $< 5 \mu\text{m}$ versprechen interessante Weiterentwicklungen. Von Bedeutung werden auch Auflegierungsverfahren zu Trägern auf Basis Co50/Fe50 sein. Kobalt- Aluminiten mit definierter Nanoporenstruktur im Aluminiumoxidträger, die mit Kobalt gefüllt werden, versprechen neue Lösungen zur Messung von Längen mit einer Ortsauflösung im Nanometerbereich.



Bild 3: Anfangspermeabilität unterschiedlicher Kompositwerkstoffe

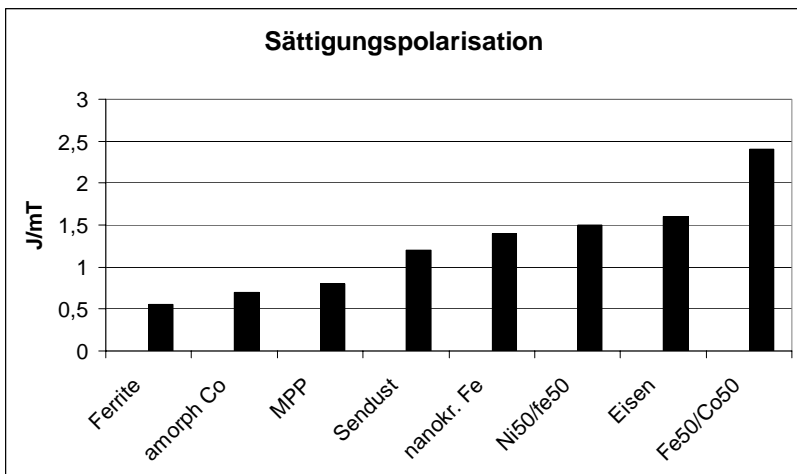


Bild 4: Sättigungspolarisation weichmagnetischer Werkstoffe

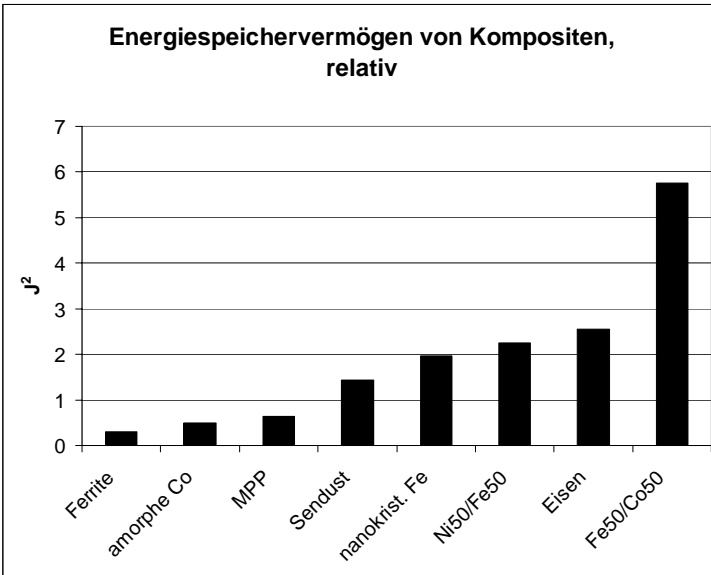


Bild 5 : Quadrat der Sättigungspolarisation für unterschiedliche Kompositwerkstoffe für die Anwendung in Speicherdrosseln

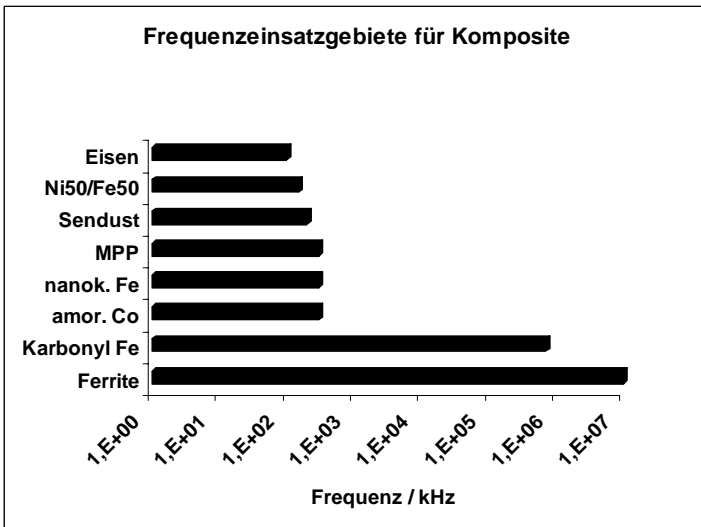


Bild 6: Frequenzeinsatzbereiche für weichmagnetische Kompositwerkstoffe

Eine umfassende Charakterisierung der kommerziellen weichmagnetischen Ferrit-Polymer-Werkstoffeigenschaften beinhaltet die Tabelle 1.

Bevorzugte Applikation			Injection molded parts	films		
Material			Ferrite P C	Ferrite Polymer Composite		
Bezeichnung			C302	C350	C351	
	Symbol	Unit				
initial permeability, 1MHz	μ_i		17±20%	9±20%	9±20%	
Flux density H=25kA/m, 10kHz	$B_s(25^\circ\text{C})$	mT	330	255	255	
Remanent induction H=25kA/m, 10kHz	$B_r(25^\circ\text{C})$	mT	15	9	9	
Coercivity H=25kA/m, 10kHz	$H_c(25^\circ\text{C})$	A/M	770	600	600	
Relative loss factor f= 1MHz f= 100 MHz f= 1GHz	$\tan\delta/\mu_i$		< 0,0004 < 0,03	< 0,005 < 0,400	< 0,005 < 0,400	
Hysteresis material constant	η_B	$10^{-3}/\text{mT}$	< 0,25	< 2	< 2	
Temperature coefficient	α	1/K	< 0,0002	< $5 \cdot 10^{-5}$	< $5 \cdot 10^{-5}$	
Density	Y	Kg/m ³	3500	2930	2930	
Resistivity f= 1 kHz f= 10 kHz f= 10 MHz	ρ	O		500	500	
			21 13	100	100	
Relative Permittivity f= 1 kHz f= 10 kHz f= 10 MHz	ϵ_p			700	700	
			280 100	21	21	
Max. oper. Temp.	T_{\max}	°C	180	120	120	

Dielectric strength	E_D	KV/mm		1	0,8
Tensile strength	σ_Z	N/mm ²		1,5	2,5
Compressibility	κ	N/mm ²		70	70

Tab. 1: Ferrite Polymer Composite nach EPCOS- Datenbuch 2001

Anwendungsschwerpunkte für Kompositwerkstoffe:

- Drosseln für die Entstörung hochfrequenter elektromagnetischer Störspannungen bzw. -ströme sowie Großsignalanwendungen
- Speicherdrosseln (das Energiespeichervermögen E ist dem Quadrat der magnetischen Flussdichte B proportional, das heißt normiert bei Polymerferrit $E=1$ und für Co50-Fe50 $E=23!$ Siehe auch Bild 5) besonders für Anwendungen in Schaltnetzteilen
- Sendust für verschleißfeste Magnetköpfe, Drosseln
- Polymerfolien für Abschirmzwecke
- Carbonylisenwerkstoffe für Gewinde- und Zylinderkerne zur Abstimmung von Oszillatorschaltungen
- Kurzschluss von Streufeldern in gescherten Bauformen von Ferriten

3. Höchstpermeable amorphe und nanokristalline Werkstoffe

Diesen Werkstoffen ist in den Modellansätzen gemeinsam, dass hohe Permeabilitäten zu verbinden sind mit

- einer hohen Sättigungspolarisation
- sehr geringen Beiträgen zur Freien Energie, d.h.
 $K_1 \rightarrow 0, \quad \lambda \rightarrow 0$ und
- dichten Werkstoffen definierter Korngröße und Korngrenzen bezüglich Zusammensetzung und Struktur.

Bild 7 beinhaltet die wichtigsten hochpermeablen Werkstoffsysteme im Vergleich bezüglich der Permeabilität und Sättigungsinduktion, das allerdings keine Information zu möglichen Anwendungsfrequenzen beinhaltet.

In Bild 8 ist der Zusammenhang zwischen Korngröße und Koerzitivfeldstärke für den Phasenübergang amorph-nanokristallin-mikrokristallin dargestellt. Im Bereich der Korngröße von < 30 nm bricht die Koerzitivfeldstärke drastisch zu sehr kleinen Werten zusammen.

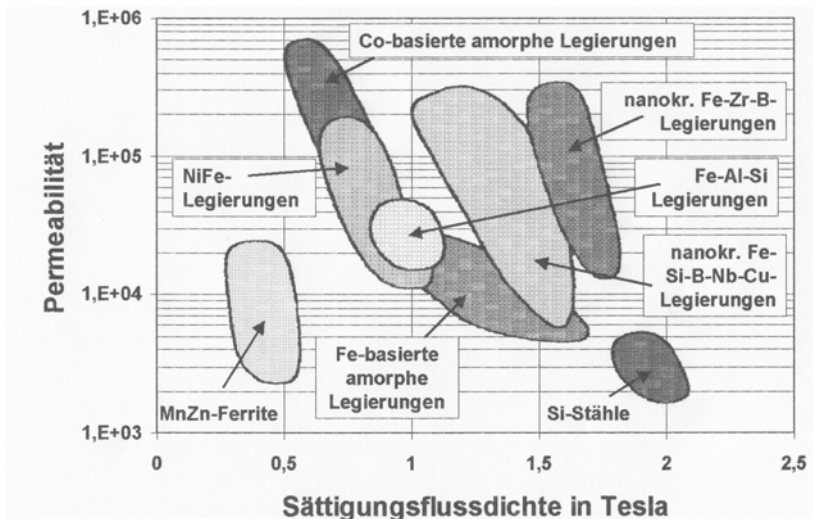


Bild 7: Permeabilitäts-Sättigungsinduktions-Diagramm weichm. Werkstoffe

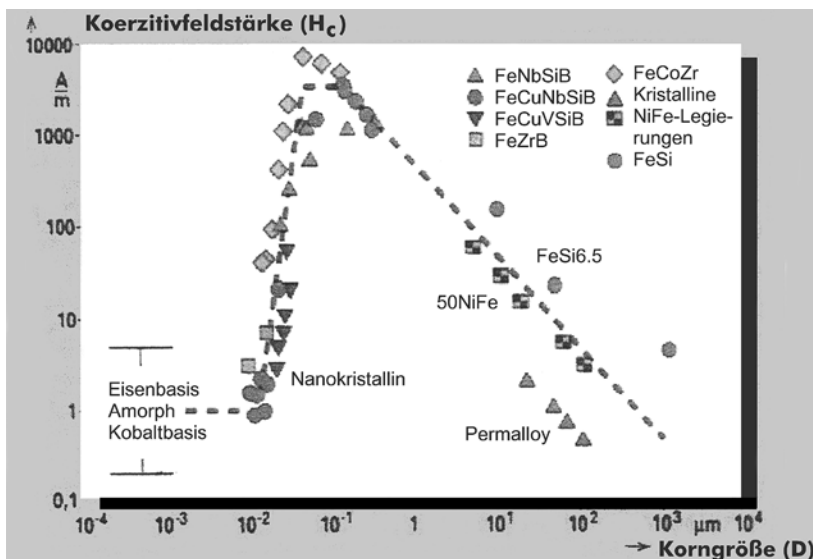


Bild 8: Übergang vom amorphen in den nanokristallinen Zustand, Änderung der Koerzitivfeldstärke in Abhängigkeit von der Korngröße

Werkstoffsysteme mit sehr geringer Kristallanisotropieenergie und Magnetostriktion beinhaltet die Tabelle 2.

Werkstoff	Struktur	erreichte Permeabilität
Fe _{76..81} (Si, B, C) _{19..24}	amorph	300000
Fe ₄₀ Ni ₄₀ (Si, B, C) ₂₀	amorph	250000
(CoFe) ₇₀ (MoSiB) ₃₀	amorph	600000
Fe _{76..73} Cu ₁ Nb ₃ (Si, B) _{20..23}	nanokristallin	100000
Fe ₁₉ Ni ₈₁	kristallin	400000
Fe _{84,9} Si _{9,5} Al _{5,6}	kristallin	30000
MnZn-Ferrit	kristallin	20000

Tab. 2: Werkstoffe mit sehr kleiner Kristallanisotropieenergie und Magnetostriktion

Koerzitivkraftmodelle sind in der Literatur vielfältig diskutiert worden. Bei weichmagnetischen Werkstoffen geht der Magnetisierungsprozess in der Regel von Blochwandverschiebungen oder Keimwachstum aus. Für diesen Umagnetisierungsvorgang können signifikante Eigenschaften der Koerzitivfeldstärke, wie deren Temperaturabhängigkeit und Abhängigkeit von der Mikrostruktur hinreichend erklärt werden. Aus energetischen Betrachtungen lässt sich die Beziehung für die Koerzitivfeldstärke H_c

$$H_c \approx \frac{E_k + E_f + E_{\sigma} + E_f + a}{J_s} \cdot f(\text{Gefüge})$$

ableiten, die für qualitative Eigenschaftsabschätzungen in vielen Fällen ausreichend ist. Sättigungsflussdichte und Magnetostriktion und auch die uniaxiale induzierte Anisotropieenergie sind über die chemische Zusammensetzung steuerbar. Die Tabelle 3 beinhaltet Werkstoffzusammensetzungen mit definierter chemischer Zusammensetzung.

Werkstoffe mit sehr kleiner Koerzitivfeldstärke erfordern in Übereinstimmung mit den Modellen für eine hohe Anfangspermeabilität

$$\mu_i - 1 \propto \frac{J_s^2}{K_1 + E_{\sigma} + E_u + \dots}$$

- hohe Sättigungspolarisationen
- verschwindende Freie Energie
- dichte grobkörnige Mikrostrukturen
- oder dichte Festkörper mit amorpher oder nanokristalliner Struktur.

Für Anwendungen bei höheren Frequenzen sind zu ergänzen

- Korngrenzen- oder Bandisolation
- kleine elektrische Leitfähigkeit
- geringe Kernverluste

Zusammensetzung	Sättigungsflussdichte	Magnetostriktion
At%	T	10^{-6}
Vitrovac 7 Fe(SiB) ₁₅₋₂₅ + Co,Ni,Cr	1,4-1,6	25-40
Vitrovac 6 Co(Fe,Mn) ₅ (Si,B) ₂₀₋₃₀ ⁺ Mo, Ni, Nb	0,4-1,2	0.01-1,0
Vitroperm FeCu ₁ Nb ₃ (Si,B) ₂₀₋₂₄	1,1-1,3	0,1-1,0

Tab. 3: Beispiele für amorph/nanokristalline Werkstoffe mit definierter Sättigungsflussdichte und Magnetostriktion (Vacuumschmelze GmbH & Co. KG)

Für Filteranwendungen sind zusätzliche Anforderungen an die Werkstoffe:

- kleinste Desakkommodation der Anfangspermeabilität $D < 10^{-6}$
- sehr kleine Temperaturkoeffizienten der Anfangspermeabilität $\alpha_F < 10^{-6}/K$
- geringe Hysteresebeiwerte $\eta_B < 0,5 \cdot 10^{-6}/mT$ (Begrenzung der Oberwellenanteile, heute aktuell für die Auslegung von x-DSL Schnittstellen)

Nachstehend werden einige Graphiken nach einer Zusammenstellung von J. Petzold (Vortragsmanuskript zur Weiterbildungsveranstaltung „Magnetwerkstoffe für technische Anwendungen“, Haus der Technik Essen, 2002) zu den Eigenschaften Sättigungspolarisation und Sättigungsmagnetostriktion (Bild 9), Temperatur- und Konzentrationsabhängigkeit der induzierten Anisotropieenergie für $(Fe_{1-x}Co_x)Si_{10}B_{13}$ ($Fe_{1-x}Ni_x$) B_{20} (Bild 10) abgebildet.

Die Sättigungspolarisation und die Curietemperatur verringern sich etwa proportional zu dem Gehalt an Glasbildnern. Die Kristallisationstemperatur erhöht sich bei den technisch interessanten Werkstoffen von ca. 400 °C auf 500°C bei der Erhöhung des Glasbildneranteils von 15 auf 25 Atom %. Insbesondere die letztere Eigenschafts-Steuerung ist für die Stabilisierung des amorphen Zustandes von Bedeutung.

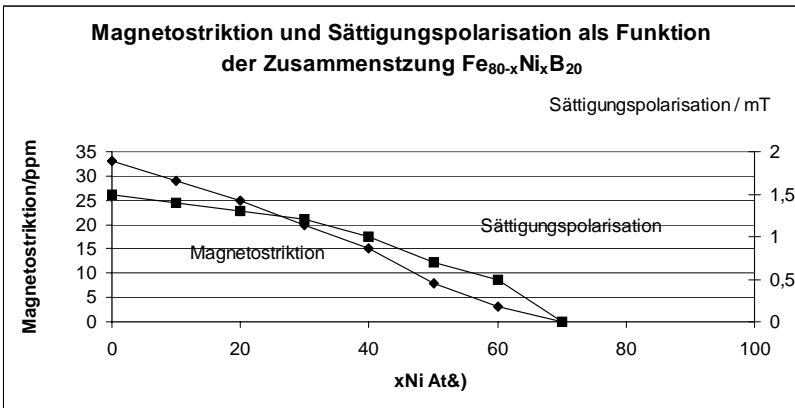
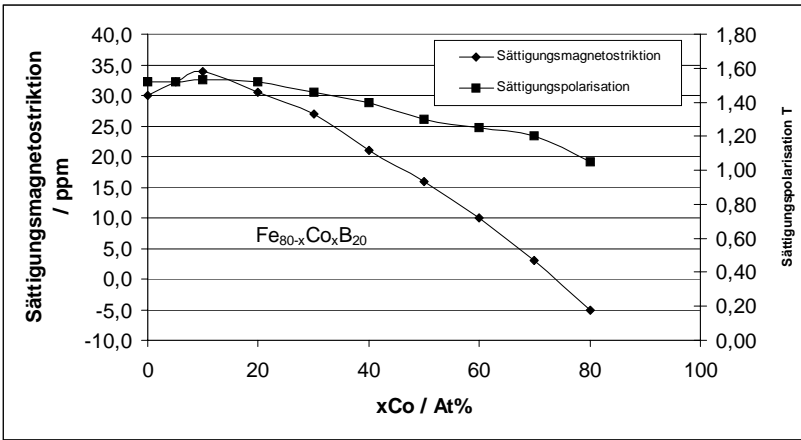


Bild 9 : Abhängigkeit der Sättigungspolarisation und Sättigungsmagnetostraktion von der Zusammensetzung.

Das Bild 9 zeigt, dass über die chemische Zusammensetzung Werkstoffe mit der Magnetostraktion $\lambda_s = 0$ bei gleichzeitig hoher Sättigungspolarisation eingestellt werden können.

Die induzierte Anisotropieenergie ist ebenfalls stark konzentrations- und temperaturabhängig. Entscheidend für die Amplitude der induzierten Anisotropieenergie ist der Gehalt an den ferromagnetischen Metallen wie Eisen, Kobalt und Nickel (siehe Bild 10).

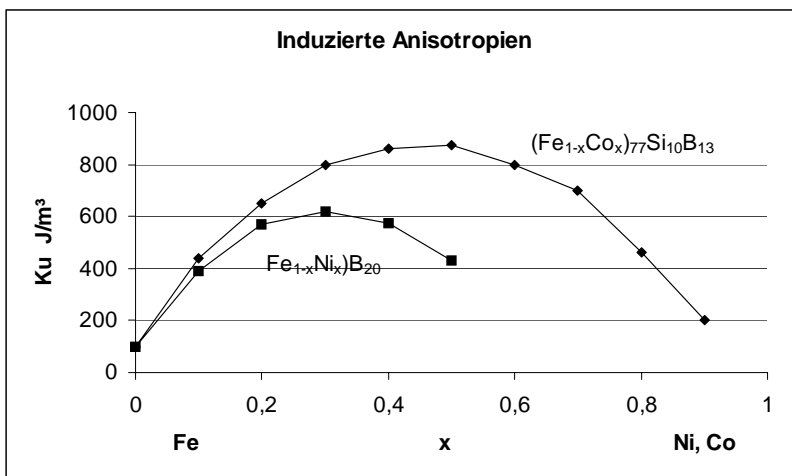
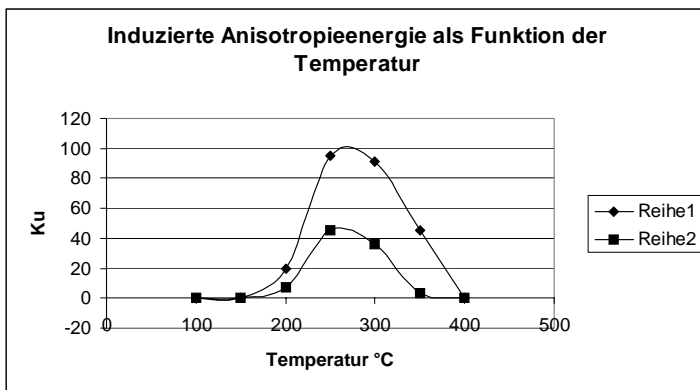


Bild 10 : Temperatur- und Konzentrationsabhängigkeit der induzierten Anisotropieenergie für Legierungen des Typs $(Fe_{1-x}Co_x)Si_{10}B_{13}$ $(Fe_{1-x}Ni_x)B_{20}$

Experimentell ist die Einstellung der Schleifenform einfach realisierbar. Bei Ringkern-geometrien erzeugt man das Magnetfeld über einen Strom durch einen Leiter, der durch den Ringkern geführt wird. Magnetisierungsrichtung und Magnetfeldrichtung während der Temperung stimmen überein, so dass der Magnetisierungsprozess durch wenige 180°-Wände erfolgt und damit die rechteckige Hystereseschleife beobachtet wird. Zur Einstellung der F-Schleife genügt ein magnetisches Querfeld ausreichender Größe während der Tem-

perung. Bild 11 zeigt die Entstehung der Z- und F-Schleife durch eine Magnetfeldtemperung:

- Z-Schleife Vorzugsrichtung eingeprägt über K_u parallel zum Magnetfeld
- F-Schleife Vorzugsrichtung eingeprägt über K_u senkrecht zum Magnetfeld

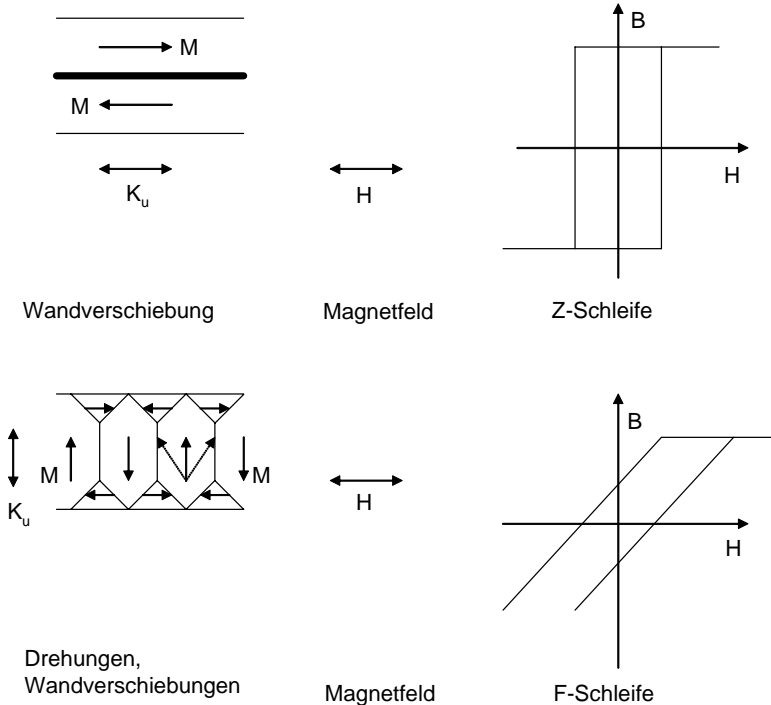


Bild 11: Einfluss der Magnetfeldtemperung auf die Form der Hystereseschleife in Abhängigkeit von der Feldrichtung H beim Tempern

Auch bei den amorphen und nanokristallinen Werkstoffen für die Hochfrequenz-leistungsübertragung findet man die bekannte Frequenzabhängigkeit der Hysterese-, Wirbelstrom- und Restverluste für weichmagnetische Werkstoffe bestätigt.

Erreichter Entwicklungsstand :

- hochpermeabel: Permeabilitäten bis 600.000 sind realisierbar. Für die Anwendung relevant ist jedoch die Frequenzabhängigkeit der Anfangsper-

meabilität, die derzeit bei 20 bis 30 kHz begrenzt ist,

- Leistungsmaterial: Anfangspermeabilitäten von 3000 bis 20000, Kernverluste bei 30kHz von ca. 1W/kg (Bild 12).

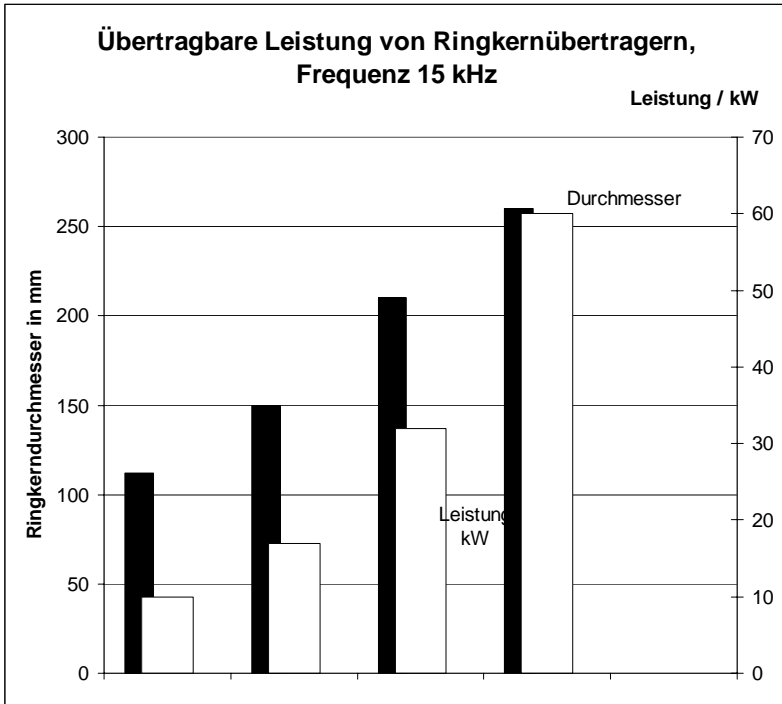


Bild 12: Ringkerndurchmesser und übertragbare Leistung für Ringkernübertrager auf Basis nanokristalliner Werkstoffe

Potenzial für die Weiterentwicklung

Für den Fall, dass die Widerstandserhöhung für die Bindephease reproduzierbar unter Fertigungsbedingungen erreichbar ist, werden hochpermeable Werkstoffe mit einer Anfangspermeabilität von $> 1.000.000$ und einer Frequenzstabilität bis 1 MHz sehr bald möglich.

Applikation

Hauptrichtungen der Anwendung für derzeit industriell verfügbare Werkstoffe sind:

- Transduktordrosseln (Transduktorregler) in Schaltnetzteilen
- Leistungsübertrager bis 500kW Verluste (siehe nach Bild 13)
- Stromkompensierte Funkentstördrosseln (Bild 14)
- Kerne für Impulsübertrager
- Signalübertrager
- Abschirmungen
- Filterdrosseln
- Präzisionsstromwandler für Stromzähler
- Fehlerstromschutzschalter
- Schnittstellenübertrager und stromkompensierte Drosseln für die digitale Übertragungstechnik
- Induktivitäten für die x-DSL-Schnittstellen

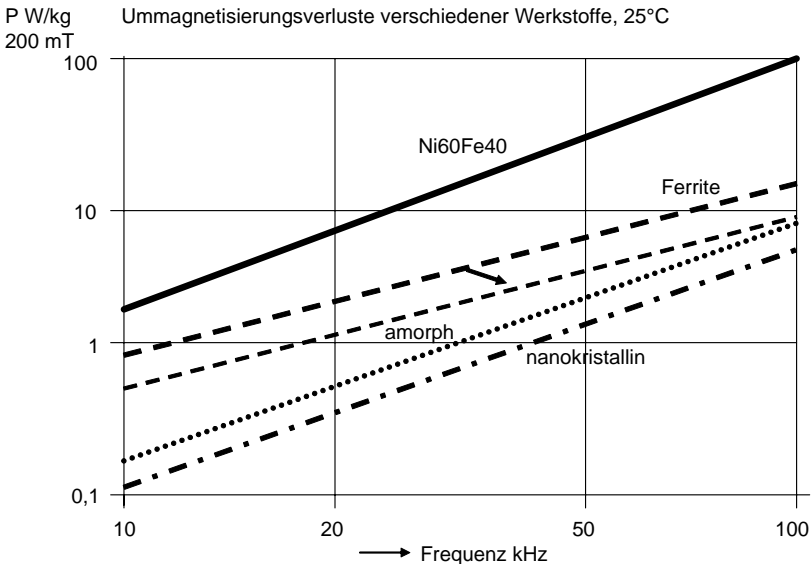


Bild 13: Ummagnetisierungsverluste weichmagnetischer Werkstoffe

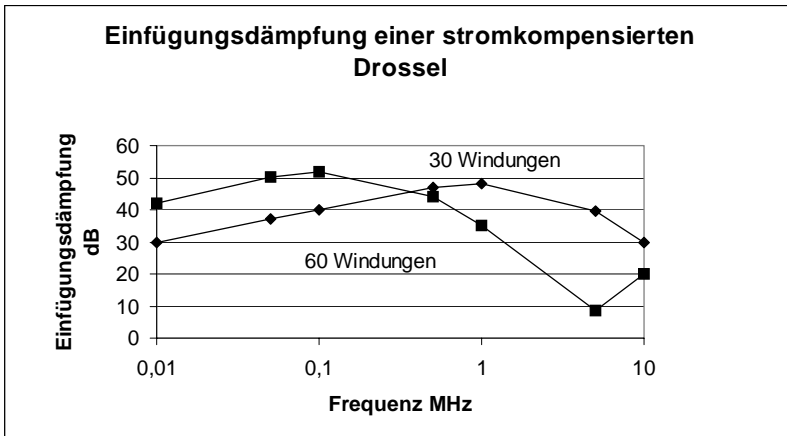


Bild 14: Einfügungsdämpfung einer stromkompensierten Drossel auf Basis nanokristalliner Werkstoffe nach Dokumentation der Vakuumschmelze

Literatur:

- F.E. Luborsky „Amorphous Metallic Alloys“, Butterworth (1983)
- K. Moorjani, J.M.D. Coey „Magnetic Glasses“ Elsevier (1984)
- S. Steeb, H. Warlimont, „Proc. On the fifth Int. Conf. On rapidly quenched Metals“, Würzburg 1984, North-Holland (1984)
- K.H.J. Buschow e. a. „Encyclopedia of Materials: Science and Technology“, Elsevier, (2001)
- G. Herzer, „Nanocrystalline soft magnetic Alloys“, Handbook of magnetic Materials, Vol. 10, 415–462, ed. By K.H. J. Bushow, Elsevier (1997)
- L. Michalowsky, „Magnettechnik, Grundlagen und Anwendung“, Fachbuch-Verlag Leipzig-Köln, (1993)
- G. Herzer, IEEE Trans. Magn. MAG-25 3327 (1987)
- G. Herzer, IEEE Trans. Magn. MAG-26 1397 (1990)
- J. J. Petzold, Vakuumschmelze GmbH & Co. KG, Hanau CT, Vortrag in der Reihe „Magnetwerkstoffe für technische Anwendungen“, „Amorphe und nanokristalline Werkstoffe“, 21./22.02.02 im Haus der Technik Essen
- R. Boll, „Weichmagnetische Werkstoffe“, Siemens Aktiengesellschaft (1990)
- Datenbuch der Vakuumschmelze GmbH & Co. KG, (2000)
- Vitroperm 500F, VITROVAC 6025Z, Technische Informationsschrift PK-004, Vakuumschmelze GmbH & Co. KG, (1995)
- Vitroperm 500F, VITROVAC 6030F, „Ringbandkerne in Leistungsübertragern“, Technische Informationsschrift PK-003, Vakuumschmelze GmbH & Co. KG, (1998)

- Firmenbroschüre Samco Shanghai Zhi-Gao Amorphous Metals CO., Ltd (2002),
Werkstoffe und Anwendungen
- M. Ferch, R. Klinger, H.-J. Pöss, „Vitroperm ermöglicht kompakte EMV-Filter“ in
EMC Journal 2/98
- Z. C. Lu et al. „Investigation on the magnetostriction of nanocrystalline Fe-(Cu-Nb)-
Si-B alloys”, Journal of Magnetism and Magnetic materials 140-144 (1995),
421–422, proceedings of the international conference on magnetism, Warsaw, Po-
land, 22–26-August 1994