

# VDM Report Nr. 27

Weichmagnetische Werkstoffe  
auf Ni-Fe-Basis

# **VDM Report Nr. 27**

## **Weichmagnetische Werkstoffe auf Ni-Fe-Basis**

Eine Darstellung der physikalischen Grundlagen,  
der Werkstoffe und ausgewählter Anwendungen

**Dr. Heike Hattendorf**  
**VDM Metals GmbH**  
Plettenberger Str. 2  
58791 Werdohl

# Inhalt

<b>Einführung</b>	2
<b>Grundlagen</b>	
Magnetische Größen	3
Austauschintegral	5
Anisotropiekonstanten	6
<b>Das Ni-Fe-Legierungssystem</b>	8
<b>Einstellung der verschiedenen Eigenschaften</b>	
Hohe Permeabilitäten bei Legierungen mit hohem Nickelgehalt	9
Temperaturabhängigkeit der Permeabilität	11
Beeinflussung der Form der Hystereseschleife	12
- Hystereseschleife	14
- Flache Schleife	16
- Rechteckige Schleife	16
Gitterfehler	17
Texturen bei Legierungen mit mittlerem Nickelgehalt	18
Glühbehandlung im magnetischen Längsfeld	20
<b>Die einzelnen Ni-Fe-Legierungen</b>	
Ni-Fe-Legierungen mit hohem Nickelgehalt	22
Ni-Fe-Legierungen mit mittlerem Nickelgehalt	25
<b>Legierungsherstellung, Verarbeitung und Schlussglühung</b>	28
<b>Anwendungen</b>	
Fehlerstromschutzschalter	30
Relais für Fehlerstromschutzschalter	31
Messwandler	32
Impulsübertrager	33
Speicherdrosseln	34
Verzerrungsarme Übertrager für Modems	35
Abschirmungen	36
<b>Zusammenfassung</b>	37
<b>Liste der verwendeten Größen und Einheiten</b>	38
<b>Literatur</b>	41
<b>Werkstofftabellen</b>	42

# Einführung

Weichmagnetische Werkstoffe spielen in der Elektrotechnik seit über 100 Jahren eine wichtige Rolle: Aus ihnen sind z. B. die Polstücke von Elektromotoren, die Bleche von Transformatoren Abschirmungen, oder Joch und Anker von Relais . Dabei ist neben dem ursprünglichen Reineisen eine Vielzahl an weichmagnetischen Werkstoffen entwickelt worden, die jeweils eine Verbesserung bestimmter magnetischer Eigenschaften mit sich brachte. Dazu gehören

- die Fe-Si-Legierungen
- die Fe-Ni-Legierungen
- die Fe-Co-Legierungen
- die amorphen Legierungen
- die nanokristallinen Legierungen und
- die Ferrite

Dieser Report beschreibt die Eigenschaften und Anwendungsgebiete der Nickel-Eisen-Legierungen. Zuerst erfolgt eine kurze Einführung in die Grundlagen des Magnetismus.

# Grundlagen

## Magnetische Größen

Mit Hilfe einer stromdurchflossenen Spule lässt sich ein magnetisches Feld erzeugen. Bringt man in das Innere der Spule einen weichmagnetischen Werkstoff, so ist das magnetische Feld im Inneren dieses Werkstoffes um ein Vielfaches stärker als das Feld in dieser Spule ohne diesen Werkstoff [1], [2]. Ein weichmagnetischer Werkstoff wirkt also wie eine Art Verstärker für das magnetische Feld. Der Begriff „magnetisches Feld“ erfordert allerdings eine nähere Erläuterung.

Die magnetische Feldstärke  $H$  beschreibt das erzeugende Feld, das z. B. bei einer stromdurchflossenen Spule nur von Strom und Spulengeometrie abhängig ist. Zur Beschreibung des Verstärkungseffektes wird eine weitere Feldgröße eingeführt: die magnetische Flussdichte  $B$ . Das erzeugende Feld  $H$  ist im weichmagnetischen Werkstoff und in der Luft gleich. Die magnetische Flussdichte  $B$  ist im weichmagnetischen Werkstoff entsprechend der Verstärkung größer als in Luft. Der Quotient  $B/H$  gibt die absolute Permeabilität an. Häufiger benutzt wird die relative Permeabilität

$$\begin{aligned}\mu &= B/\mu_0 H & \mu_0 &= \text{magnetische Feldkonstante} \\ & & &= 1,257 \cdot 10^{-4} \text{ Tcm/A.} \\ & & &= 1,257 \cdot 10^{-6} \text{ Tm/A.}\end{aligned}$$

$H$  wird in Ampere/Meter (A/m),  $B$  in Tesla (T) gemessen. Für ein Feld im Vakuum ist  $\mu = 1$ . Auch für Luft ist  $\mu \approx 1$ . Die Differenz zwischen der magnetischen Flussdichte  $B$  im weichmagnetischen Werkstoff und der magnetischen Flussdichte im Vakuum  $B_0$  bezeichnet man als magnetische Polarisation  $J$ :

$$J = B - B_0 = \mu\mu_0 H - \mu_0 H$$

Weichmagnetische Werkstoffe sind durch hohe Permeabilitäten  $\mu$  gekennzeichnet. D.h. man kann  $B_0$  in der Regel vernachlässigen.

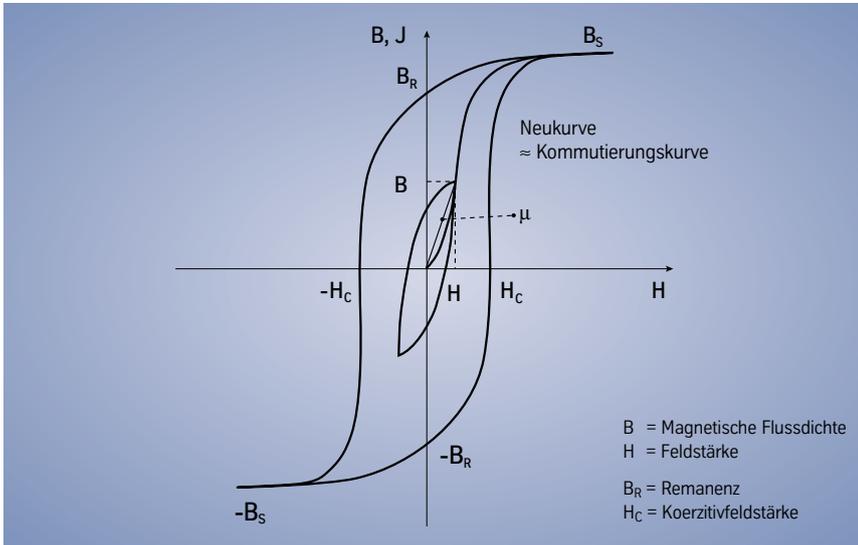


Bild 2: Schema einer Hystereseschleife.

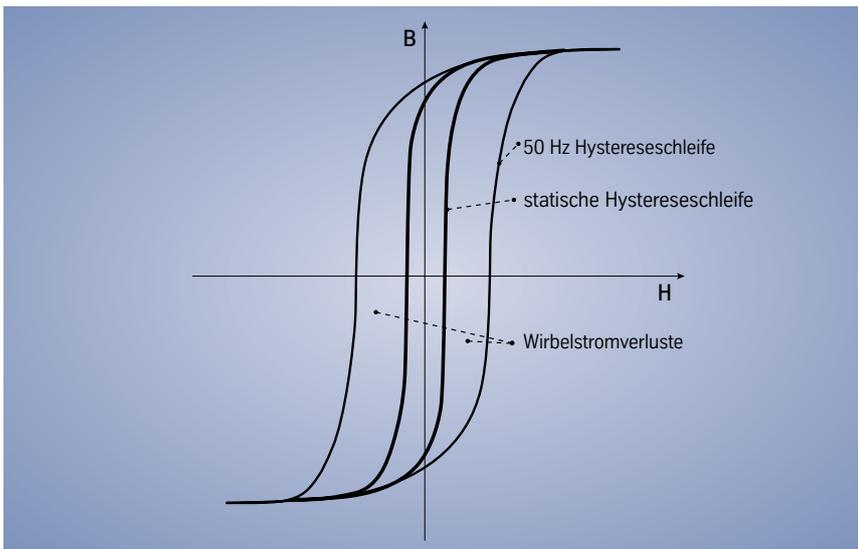


Bild 3: Hystereseschleifen bei verschiedenen Frequenzen (schematisch).

Der Zusammenhang zwischen B und H ist nicht eindeutig; es bildet sich eine „Hystereseschleife“ (Bild 2). Bei hohen Feldstärken H geht B (bzw. J) in die Sättigung; man erhält die Sättigungsflussdichte B<sub>s</sub> (bzw. die Sättigungspolarisation J<sub>s</sub>). Beim Zurücknehmen auf die Feldstärke H = 0 verbleibt im Material die Remanenz B<sub>R</sub>. Der Nullwert der magnetische Flussdichte wird erst durch Anlegen einer negativen Feldstärke, der Koerzitivfeldstärke -H<sub>c</sub> erreicht. Bei weiterer Steigerung von H in die negative Richtung wird -B<sub>s</sub> erreicht. Geht man von da auf H = 0 zurück, so wird B = -B<sub>R</sub>. Bei einer Steigerung der Feldstärke in positiver Richtung wird bei H<sub>c</sub> B = 0 erreicht und schließlich wieder die Sättigungsinduktion B<sub>s</sub>. Die Kurve, die bei der ersten Magnetisierung durchlaufen wird, wird nicht mehr erreicht, sie heißt

deshalb Neukurve. Magnetisiert man die Probe mit einem festen Spitzenwert der Feldstärke H mehrmals vollständig um, misst dann den Spitzenwert der magnetischen Feldstärke B, und wiederholt dies für verschiedenen Feldstärken H, so liegen die so gemessenen (H, B) Paare auf der Kommutierungskurve, die praktisch mit der Neukurve identisch ist.

Steuert man z. B. bei Wechsellagerung bis zum Spitzenwert  $\hat{H}$  aus, so ergibt sich mit dem Spitzenwert der magnetischen Flussdichte  $\hat{B}$  die Amplitudenpermeabilität  $\mu_a$  zu [3]:

$$\mu_a = \frac{\hat{B}}{\mu_0 \hat{H}}$$

Spezielle sehr oft zur Beschreibung des Materials benutzte Permeabilitäten sind die Anfangspermeabilität (Amplitudenpermeabilität)  $\mu_i$  für  $H \rightarrow 0$  oder die Permeabilität  $\mu_4$  bei  $H = 4 \text{ mA/cm}$  und die Maximalpermeabilität  $\mu_{\max}$ .

Die weichmagnetischen Werkstoffe werden in magnetischen Wechselfeldern mit unterschiedlichen Frequenzen eingesetzt. Mit zunehmender Frequenz verbreitert sich die Hystereseschleife, H<sub>c</sub> nimmt zu und die Permeabilitäten nehmen ab. Man muss also unterscheiden, ob die oben genannten Größen statisch - also sehr langsam bei nahezu „0 Hz“ - oder wie sehr oft bei 50 Hz oder bei noch bei höheren Frequenzen gemessen worden sind (Bild 3).

Beim Ummagnetisieren tritt ein Verlust auf - der Ummagnetisierungsverlust. Dieser ist proportional der Schleifenfläche der Hystereseschleife. Die von der Magnetisierungskurve umfahrende Fläche ergibt den Ummagnetisierungsverlust pro Volumen für einen vollständigen Umlauf [1].

$$\oint B \, dH = \frac{\text{Ummagnetisierungsverlust}}{\text{Volumen}}$$

Der Ummagnetisierungsverlust lässt sich in verschiedene Verlustarten trennen. Der Hystereseverlust ist der Verlust der statischen Hystereseschleife. Der normale und anomale Wirbelstromverlust und der Nachwirkungsverlust sind die Verlustarten, die die Verbreiterung der Hystereseschleife bei Frequenzen größer als Null verursachen [4].

Weichmagnetische Werkstoffe lassen sich besonders leicht ummagnetisieren, d.h. die Permeabilitäten sind hoch und die Koerzitivfeldstärke ist klein und der Ummagnetisierungsverlust ist gering.

Die weichmagnetischen Werkstoffe sind „ferromagnetische“ Stoffe. Der bekannteste Vertreter ist das Eisen, das auch dieser Stoffklasse den Namen gegeben hat. Andere ferromagnetische Stoffe sind Co, Ni, Cr, Mn und seltene Erden. Die Atome von ferromagnetischen Stoffen haben ein „magnetisches Moment“, das heißt, dass sie wie die Magnetnadel eines Kompasses auf ein äußeres Magnetfeld reagieren. Das magnetische Moment ist die Summe der einzelnen „magnetischen Momente“ der Elektronenspins (Drehung der Elektronen um sich selbst) und der Bahnmomente der um den Kern kreisenden Elektronen. Das magnetische Moment speziell der ferromagnetischen Elemente rührt von dem Elektronenspin von Elektronen aus nicht abgeschlossenen inneren Elektronenschalen der Atome her.

Ein magnetisches Moment der Atome reicht aber noch nicht, um einen ferromagnetischen Stoff zu erhalten. Bei einem Ferromagneten führen die Wechselwirkungsenergien zwischen den Elektronen der inneren Schalen zu einer parallelen Ausrichtung der magnetischen Momente der einzelnen Atome, ohne dass ein äußeres Magnetfeld anliegt (Bild 4).

Das führt zu einer spontanen Magnetisierung. Versucht man ein magnetisches Moment aus seiner parallelen Lage zu drehen, so erfordert dies Energie, die sogenannte Austauschenergie  $w_A$  zwischen zwei magnetischen Momenten [1], [2]:

$$w_A = I_A S^2 \varphi^2 \quad (\text{für kleine } \varphi)$$

$I_A$  ist das Austauschintegral,  $S$  die Spinquantenzahl (proportional dem magnetischem Moment des Atoms),  $\varphi$  der Winkel zwischen zwei benachbarten magnetischen Momenten. Dem Bestreben der magnetischen Momente, sich parallel auszurichten, wirkt die Wärmebewegung der Atome entgegen, die die magnetischen Momente um die idealen Parallelen schwanken lässt. Oberhalb der Curietemperatur  $T_c$  ist die Wärmebewegung so stark, dass der Ferromagnetismus zusammenbricht. Die Richtungen der atomaren magnetischen Momente sind dann statistisch verteilt. Sie richten sich aber bei einem äußeren Magnetfeld im Mittel etwas in Richtung dieses Feldes aus (Paramagnetismus).

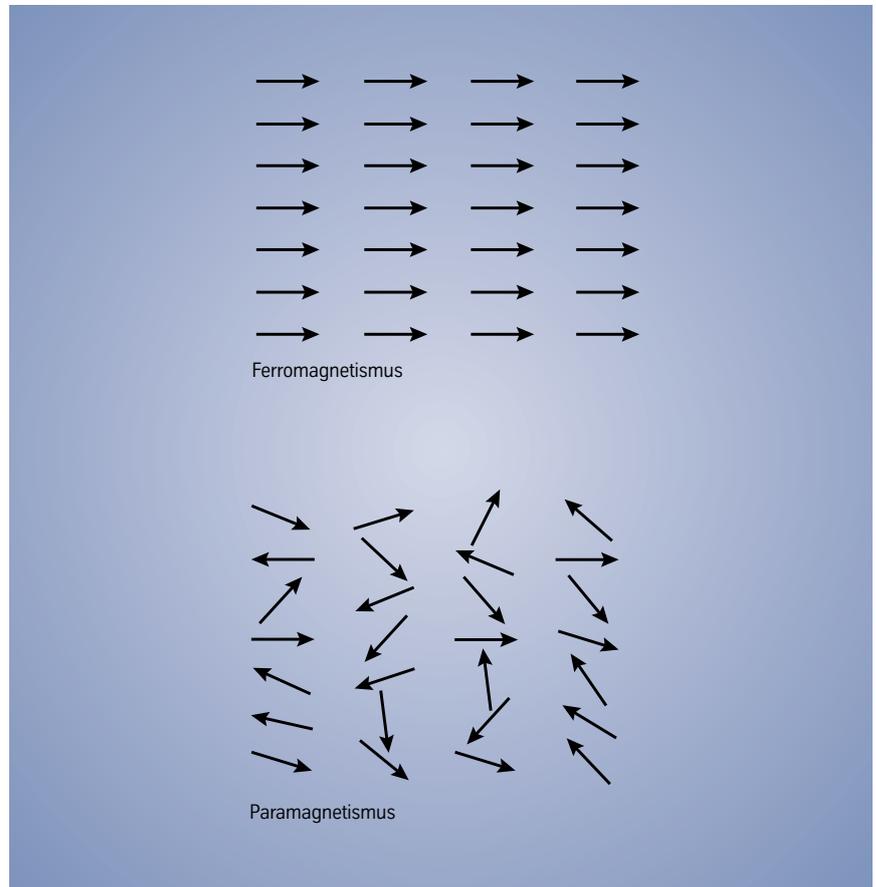


Bild 4: Ausrichtung der magnetischen Momente der Atome beim Ferro- und Paramagnetismus.

# Grundlagen

## Anisotropiekonstanten

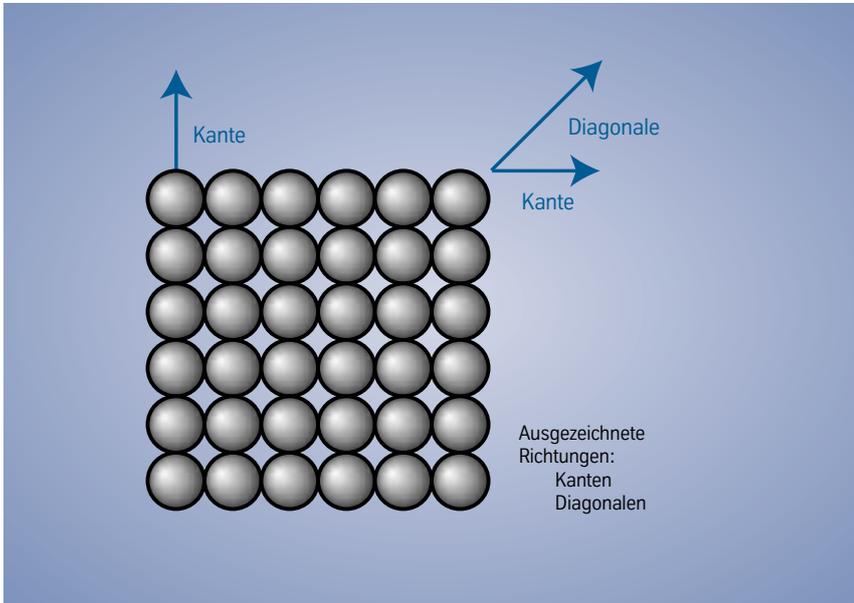


Bild 5: Zweidimensionales einfach kubisches Gitter.

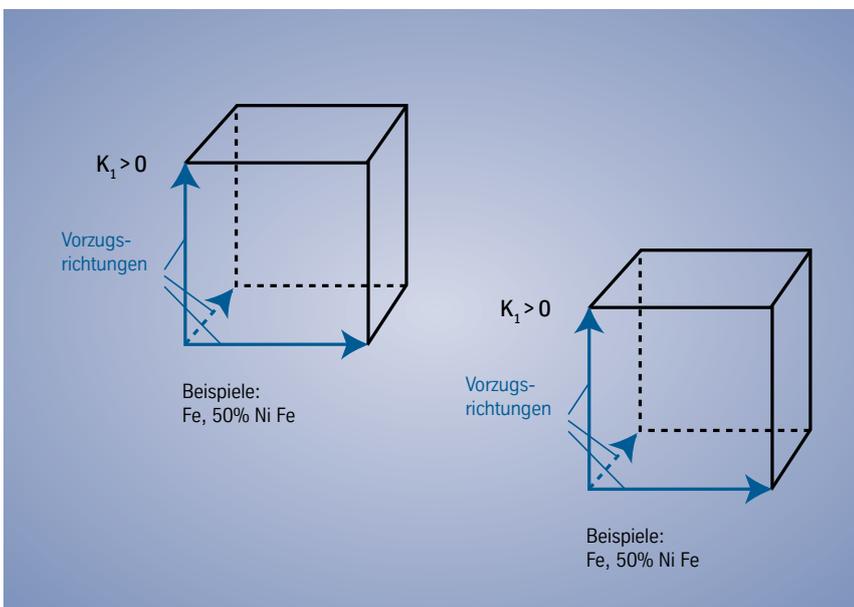


Bild 6: Lage der Vorzugsrichtungen bei  $K_1 > 0$  und  $K_1 < 0$ .

In Stoffen wie den Metallen sind die Atome nicht durcheinander, sondern regelmäßig auf einem Gitter (Kristallgitter) angeordnet. Bild 5 zeigt einen einfachen zweidimensionalen Fall. Erweitert man dieses Beispiel auf die dritte Dimension, so hat man ein kubisches (würfelförmiges) Gitter. In einem solchen Gitter sind eine ganze Reihe von Metallen angeordnet. Z. B. sind das Eisen und die Fe-Si-Legierungen in einer speziellen Art, dem „kubisch raumzentrierten“ Gitter, oder die Nickel-Eisen-Legierungen in einer anderen speziellen Art, dem „kubisch flächenzentrierten“ Git-

ter, angeordnet. Andere kristalline magnetische Materialien wie die Ferrite haben weitaus kompliziertere Strukturen. Für alle aber gilt, was im folgenden der Einfachheit halber an einem einfachen kubischen Gitter erklärt wird.

In einem kubischen Gitter sind gewisse Richtungen, z. B. die Kanten oder die Diagonalen, durch ihre Symmetrie ausgezeichnet (Bild 5 bzw. Bild 6). Die magnetischen Momente sind nun nicht in eine beliebige Richtung des Gitters ausgerichtet, sondern in bestimmte Vorzugsrichtungen wie die Kanten oder die Diagonalen. Beim Fe und beim Ni-Fe mit mittleren Nickelgehalten sind es die Würfelkanten, beim reinen Nickel die Raumdiagonalen (Bild 6).

Dies sind die Richtungen der leichten Magnetisierbarkeit. Eine Auslenkung der magnetischen Momente aus diesen Richtungen erfordert Energie. Benutzt man zum Beispiel das Material in einem 50 Hz Übertrager, so ist das 100 Mal in der Sekunde der Fall. Die hierfür erforderliche Energie wird die Kristallanisotropieenergie  $E_k$  genannt.

Sie lässt sich wie folgt beschreiben [1], [2]:

$$E_k/V = K_1 (\alpha_1^2 \alpha_2^2 + \alpha_2^2 \alpha_3^2 + \alpha_1^2 \alpha_3^2) + K_2 \alpha_1^2 \alpha_2^2 \alpha_3^2$$

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  ist der jeweilige Kosinus des Winkels zwischen der Magnetisierungsrichtung und den Würfelkanten.  $V$  ist die Volumeneinheit.  $K_1, K_2$  sind Proportionalitätskonstanten. Man nennt sie die Kristallanisotropiekonstanten.  $K_1$  ist deutlich größer als  $K_2$ . In den meisten Fällen genügt  $K_1$  zur Beschreibung der experimentellen Befunde. Je kleiner der Betrag von  $K_1$  ist, desto geringer ist die Energie, die man zum Auslenken der magnetischen Momente aus einer Vorzugsrichtung benötigt. Sind die Würfelkanten die Vorzugsrichtungen, so ist  $K_1 > 0$ , sind es die Raumdiagonalen, so ist  $K_1 < 0$ . Wenn z. B. die Würfelkanten Vorzugsrichtungen sind, gibt es 3 Vorzugsrichtungen.

In bestimmten Fällen gibt es nur eine einzige Vorzugsrichtung. Dann spricht man von einer uniaxialen Anisotropieenergie  $E_u$ . Die obige Formel vereinfacht sich zu der leichter verständlichen Formel [1]:

$$E_u/V = K_u \sin^2 \varphi$$

$K_U$  ist die uniaxiale Anisotropiekonstante,  $\varphi$  der Winkel zwischen Vorzugsrichtung und Magnetisierungsrichtung. Solche Anisotropien können z. B. durch Magnetfelder beim Glühen induziert werden oder, wie im Folgenden beschrieben, durch Spannungen im Material entstehen.

Wird ein Ferromagnet magnetisiert, so treten kleine Längenänderungen auf. Dieses Phänomen bezeichnet man als Magnetostriktion [1]. Es verursacht z. B. das Trafobrummen. Man misst die Magnetostriktion bei Anliegen der Sättigungspolarisation (Bild 7) als relative Längenänderung in Feldrichtung. Sie ist für verschiedene Richtungen im Gitter unterschiedlich.

Bei kubischen Gittern kommt man im Allgemeinen mit zwei Konstanten aus:  $\lambda_{100}$  in Würfelkantenrichtung und  $\lambda_{111}$  in Raumdiagonalenrichtung. Beide können sehr unterschiedlich sein. So dann wird oft die mittlere Magnetostruktionskonstante  $\lambda_s$  für polykristallines Material mit statistischer Verteilung der Richtungen der Körner verwendet. Die Magnetostriktion kann negativ sein wie beim reinen Nickel, d. h. es ergibt sich beim Magnetisieren eine Verkürzung, oder positiv wie bei Ni-Fe-Legierungen mit mittlerem Nickelgehalt.

In einem Material mit positiver Magnetostriktion wird die Zugspannungsrichtung zur Vorzugsrichtung, bei negativer Magnetostriktion wird sie zu einer Richtung schwerer Magnetisierbarkeit. Zu Vorzugsrichtungen werden dann die Richtungen senkrecht zur Zugspannungsrichtung.

Es ergibt sich eine weitere Anisotropieenergie, die Spannungsanisotropieenergie  $E_\sigma$ :

$$E_\sigma/V = 3/2 \lambda_s \sigma \sin^2 \varphi \quad K_U = 3/2 \lambda_s \sigma$$

(für ein isotropes polykristallines Material)

$\sigma$  ist die Zugspannung und  $\varphi$  der Auslenkungswinkel aus der Vorzugsrichtung. Ebenso wie äußere Spannungen wirken sich innere Spannungen aus, die in jedem Material auch bei sorgfältigster Behandlung vorhanden sind. Die eventuell auftretenden Spannungsanisotropieenergien werden aber um so kleiner, je kleiner die Magnetostruktionskonstanten sind.

Weichmagnetische Werkstoffe sind gekennzeichnet durch geringe Ummagnetisierungsverluste, hohe Permeabilitäten und kleine Koerzitivfeldstärken. Um sie zu erreichen, ist es erforderlich,

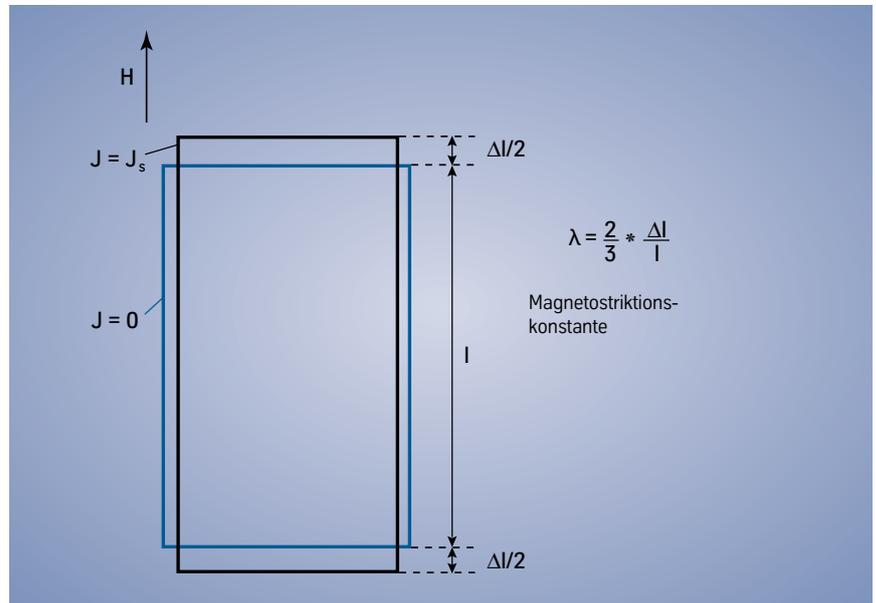


Bild 7: Längenänderung beim Anlegen eines Magnetfeldes an eine ferromagnetische Probe.

alle Anisotropieenergien, die ja das Ummagnetisieren erschweren, so gering wie möglich zu halten. Das heißt, die Kristallanisotropiekonstante  $K_1$  und die Magnetostruktionskonstanten  $\lambda$  sollten möglichst klein sein und innere Spannungen sollte man durch sorgfältige Behandlung minimieren. Für den Zusammenhang von  $\mu$  bzw.  $H_c$  mit der Anisotropiekonstanten  $K$  gelten in vielen Fällen folgende Proportionalitäten [1]:

$$H_c \approx K / J_s, \quad \mu \approx J_s^2 / \mu_0 K$$

Dabei ist  $K$  eine oder auch eine Summe der oben erwähnten Anisotropiekonstanten. Die Permeabilitäten verhalten sich umgekehrt proportional zu den Koerzitivfeldstärken.

# Das Ni-Fe-Legierungssystem

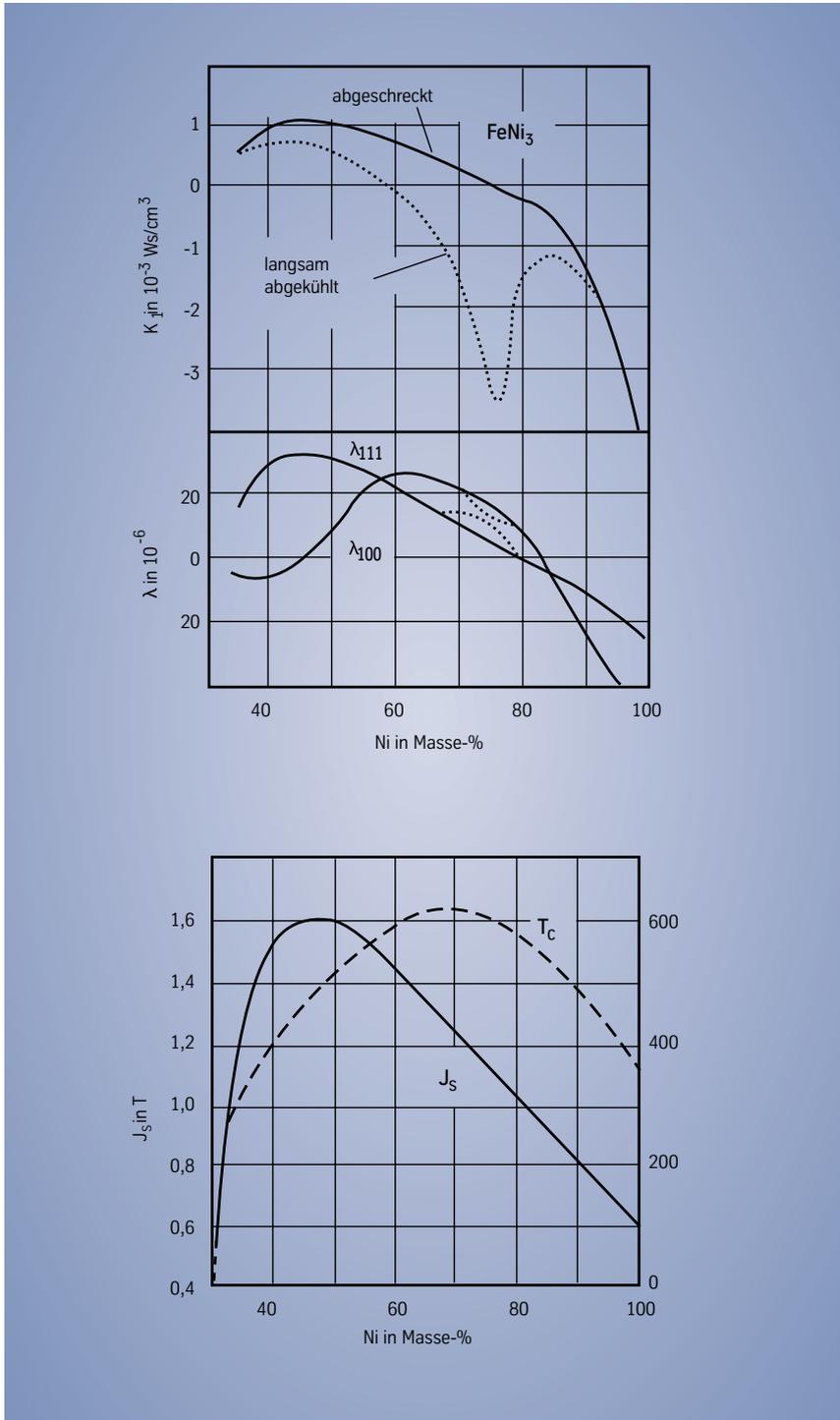


Bild 8: Abhängigkeit der Kristallanisotropiekonstante  $K_1$ , der Magnetostruktionskonstanten  $\lambda_{100}$ ,  $\lambda_{111}$  der Sättigungspolarisation  $J_s$  und der Curietemperatur  $T_c$  vom Nickelgehalt (nach [5] bis [9]).

Um gute weichmagnetische Eigenschaften zu erhalten, müssen die Anisotropieenergien gering sein [1], [2], (siehe Kapitel Anisotropiekonstanten). Das ist der Fall, wenn die Kristallanisotropiekonstante  $K_1$  und die Magnetostruktionskonstanten  $\lambda_{100}$  und  $\lambda_{111}$  sehr klein oder nahe Null sind. Bild 8 zeigt den Verlauf dieser Konstanten in Abhängigkeit vom Nickelgehalt im Ni-Fe System.

Bei ca. 75 % Ni hat  $K_1$  einen Nulldurchgang, zwischen 80 % Ni und 82 % Ni haben die beiden Magnetostruktionskonstanten  $\lambda_{100}$  und  $\lambda_{111}$  einen Nulldurchgang. Die Anisotropieenergien lassen sich demnach in diesem Bereich sehr klein machen.

Hier liegt die Gruppe der Ni-Fe-Legierungen mit hohem Nickelgehalt. Ihre gemeinsamen Kennzeichen sind hohe Permeabilitäten, kleine Koerzitivfeldstärken, ein geringer Ummagnetisungsverlust und eine Sättigungspolarisation kleiner 1 T.

Weitere Ni-Fe-Legierungen liegen im Bereich von ca. 50 % Ni. Dort ist bei den Ni-Fe-Legierungen die Sättigungspolarisation maximal. Die Permeabilitäten sind geringer als bei den Legierungen mit 75 % bis 80 % Nickel, da immer  $K_1 > 0$  ist. Permeabilitätsverbesserungen werden hier in einigen Fällen durch eine spezielle Behandlung der Legierung erreicht.

# Einstellung der verschiedenen Eigenschaften

## Hohe Permeabilitäten bei Legierungen mit hohem Nickelgehalt

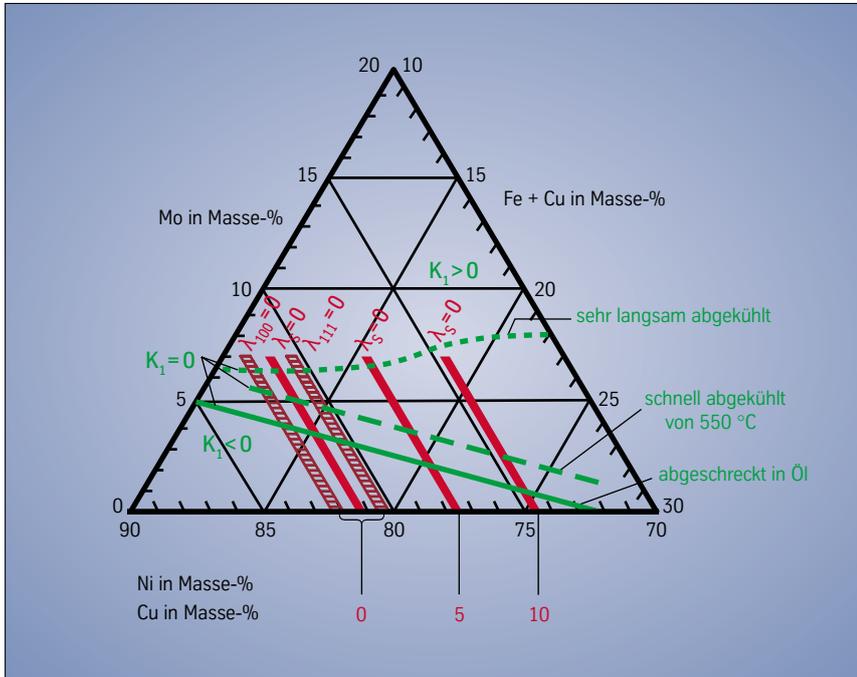


Bild 9: Das Mehrstoffsystem Ni, Mo, Fe + Cu (nach [10] bis [12]).

	Zusammensetzung	Banddicke in mm	50 Hz Permeabilitäten	
			$\mu_4$	$\mu_{max}$
<b>Magnifer® 7904</b>	80 % Ni, 5 % Mo, Fe Rest	0,065	200-300 000	320-420 000
<b>Magnifer® 7754</b>	77 % Ni, 5 % Cu, 4 % Mo, Fe Rest	0,065	200-300 000	320-420 000
<b>Magnifer® 75</b>	76 % Ni, 5 % Cu, 2 % Cr, Fe Rest	0,065	150-200 000	240-320 000

Tabelle 1: Legierungen mit  $\lambda_{111} \approx 0$  und  $K_1 \approx 0$ .

In Bild 8 erkennt man, dass im Zweistoffsystem Nickel-Eisen  $K_1$  und  $\lambda_{100}$  oder  $\lambda_{111}$  nie gleichzeitig Null werden. Dies kann durch eine geeignete Zulegierung von Cu, Mo oder Cr erreicht werden. Leider gelingt es nicht, alle Magnetostruktionskonstanten zusammen zum Verschwinden zu bringen. Es hat sich aber gezeigt, dass man die höchsten Permeabilitäten für  $\lambda_{111} \approx 0$  oder  $\lambda_s \approx 0$  erreicht.

Bild 9 zeigt das Mehrstoffsystem Ni, Mo, Fe + Cu ([10] bis [12]). Die Linien  $K_1 = 0$  für verschiedene Abkühlbedingungen sind eingetragen.  $K_1 = 0$  variiert stark mit der Wärmebehandlung. Die Linien  $K_1 = 0$  verschieben sich zu höheren Molybdängehalten bei langsamerer Abkühlung. Den gleichen Effekt erreicht man mit einer Anlassbehandlung bei Temperaturen um die 500 °C nach einer schnellen Abkühlung. Man hat also die Möglichkeit, durch eine gezielte Wärmebehandlung  $K_1$  nachträglich zu beeinflussen und zu Null zu machen.

Die Linien für  $K_1 = 0$  verschieben sich mit zunehmendem Molybdängehalt zu höheren Nickelgehalten. Eisen lässt sich durch Kupfer ersetzen, ohne dass die Linien für  $K_1 = 0$  wesentlich verschoben werden. Bei den Magnetostruktionskonstanten ist es umgekehrt. Die Nulldurchgänge variieren in Abhängigkeit von der Wärmebehandlung um weniger als 0,5 % Ni. Die Linien für  $\lambda_{100}$ ,  $\lambda_s$  und  $\lambda_{111} = 0$  bleiben beim selben Nickelgehalt, wenn man Molybdän zulegiert. Ersetzt man Eisen durch Kupfer, so verschieben sich die Nulldurchgänge zu niedrigeren Nickelgehalten, d. h. es bestehen mannigfaltige Möglichkeiten,  $K_1$  und eine der drei Magnetostruktionskonstanten zu Null zu machen. Dabei liegen die technisch bedeutsamen Legierungen in der Nähe der gut realisierbaren Linie „schnelle Abkühlung von 550 °C“. Tabelle 1 zeigt einige Beispiele.  $K_1$  hängt stark von der Wärmebehandlung ab (Bild 8). Das hat Konsequenzen:

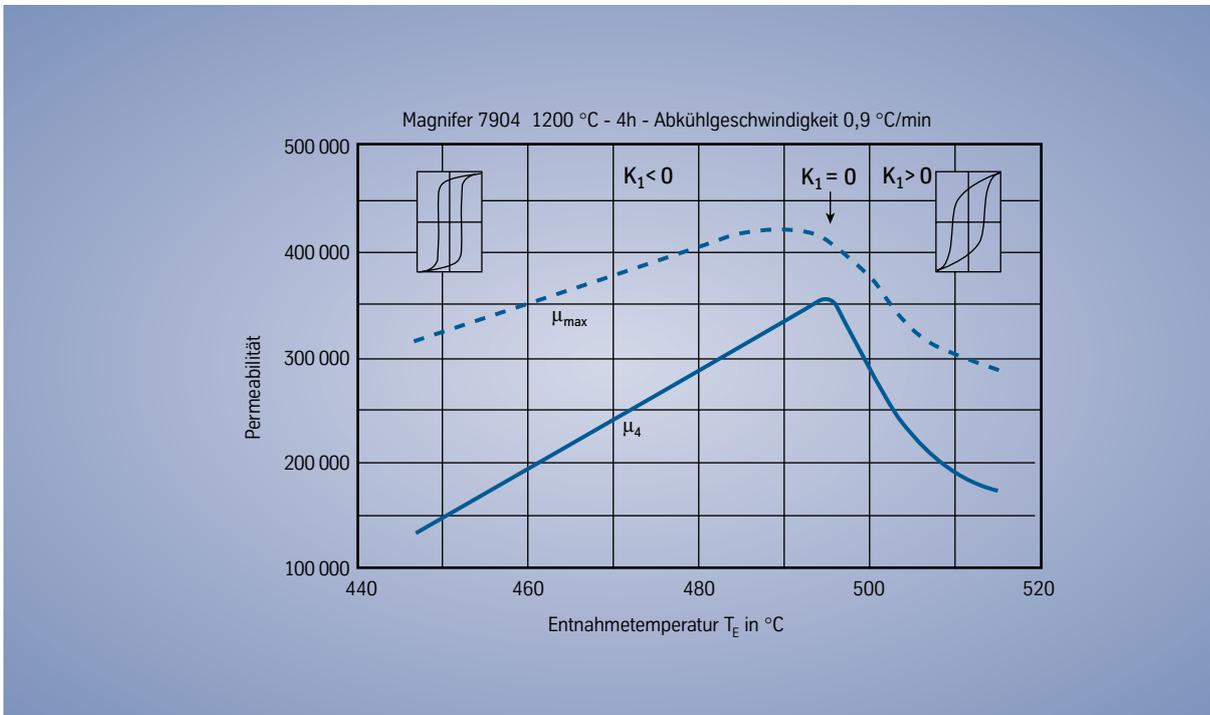


Bild 10: Abhängigkeit von  $\mu_4$  und  $\mu_{max}$  von der Entnahmetemperatur  $T_E$ .

Bild 10 zeigt die Permeabilitäten von Ringbandkernen aus einer Legierung mit 80 % Ni, 5 % Mo, Rest Fe. Die Ringbandkerne wurden bei 1200 °C gegläht, mit 0,9 °C/min im Ofen abgekühlt, bei der Temperatur  $T_E$  (Entnahmetemperatur) aus dem Ofen genommen und dann schnell an Luft abgekühlt. Die Permeabilität  $\mu_4$  bei 4 mA/cm und die Maximalpermeabilität  $\mu_{max}$  hängen stark von  $T_E$  ab. Bei Verfehlung der optimalen Entnahmetemperatur um nur wenige Grad erhält man schon einen deutlichen Abfall der Permeabilität. An die Temperaturgenauigkeit der Glühöfen werden also hohe Anforderungen gestellt, wenn man höchste Permeabilitäten nicht nur im Labor erreichen möchte.

Weiter ist anzumerken, dass das Maximum unsymmetrisch ist. Bei Temperaturen oberhalb der optimalen Entnahmetemperatur fällt die Permeabilität steil ab. Im Maximum ist  $K_1 = 0$ . Kühlt man im Ofen schneller ab oder ist die Entnahmetemperatur  $T_E$  höher, ist nach Bild 8  $K_1 > 0$ ; kühlt man langsamer ab oder ist  $T_E$  geringer, ist  $K_1 < 0$ .

# Einstellung der verschiedenen Eigenschaften

## Temperaturabhängigkeit der Permeabilität

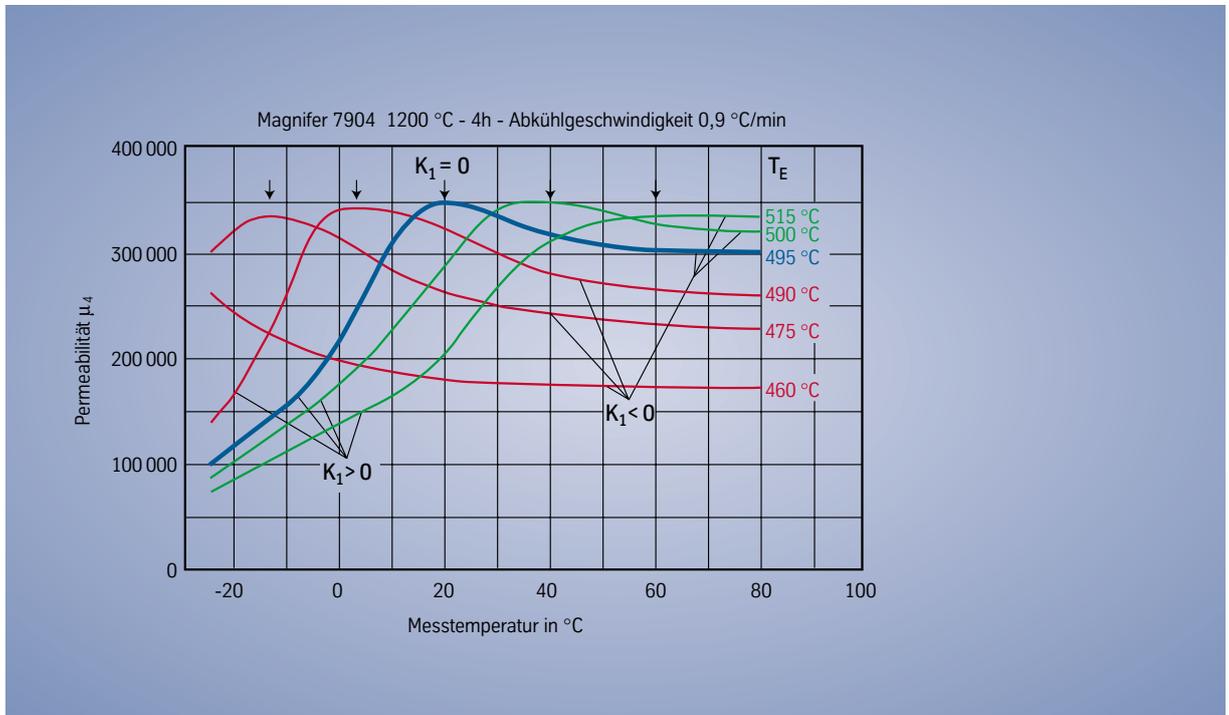


Bild 11:  $\mu_4$  in Abhängigkeit von der Messtemperatur und der Entnahmetemperatur  $T_E$ .

Für viele Anwendungen ist es wichtig, dass sich die Permeabilitäten bzw. die magnetischen Flussdichten zwischen -25 °C und 80 °C nur wenig ändern. Bild 11 zeigt die Temperaturabhängigkeit der Permeabilität  $\mu_4$  zwischen -25 °C und 80 °C.

Die bei 495 °C entnommenen Proben zeigen eine schwache Temperaturabhängigkeit bei höheren Messtemperaturen und einen starken Abfall bei tiefen Messtemperaturen. Im Maximum dieser Kurve ist  $K_1 = 0$ , im Bereich des starken Abfalls ist  $K_1 > 0$ , im Bereich des schwachen Abfalls ist wiederum  $K_1 < 0$ . Bei niedrigeren Entnahmetemperaturen verschiebt sich der Nulldurchgang von  $K_1$  zu tieferen Messtemperaturen, so dass der flache Bereich der Messkurve einen immer größeren Temperaturbereich einnimmt. Die Temperaturabhängigkeit wird geringer, allerdings sinkt auch das Permeabilitätsniveau. Für den jeweiligen Anwendungsfall muss man dann einen Kompromiss zwischen geringer Temperaturabhängigkeit und hoher Permeabilität finden.

# Einstellung der verschiedenen Eigenschaften

## Beeinflussung der Form der Hystereseschleife

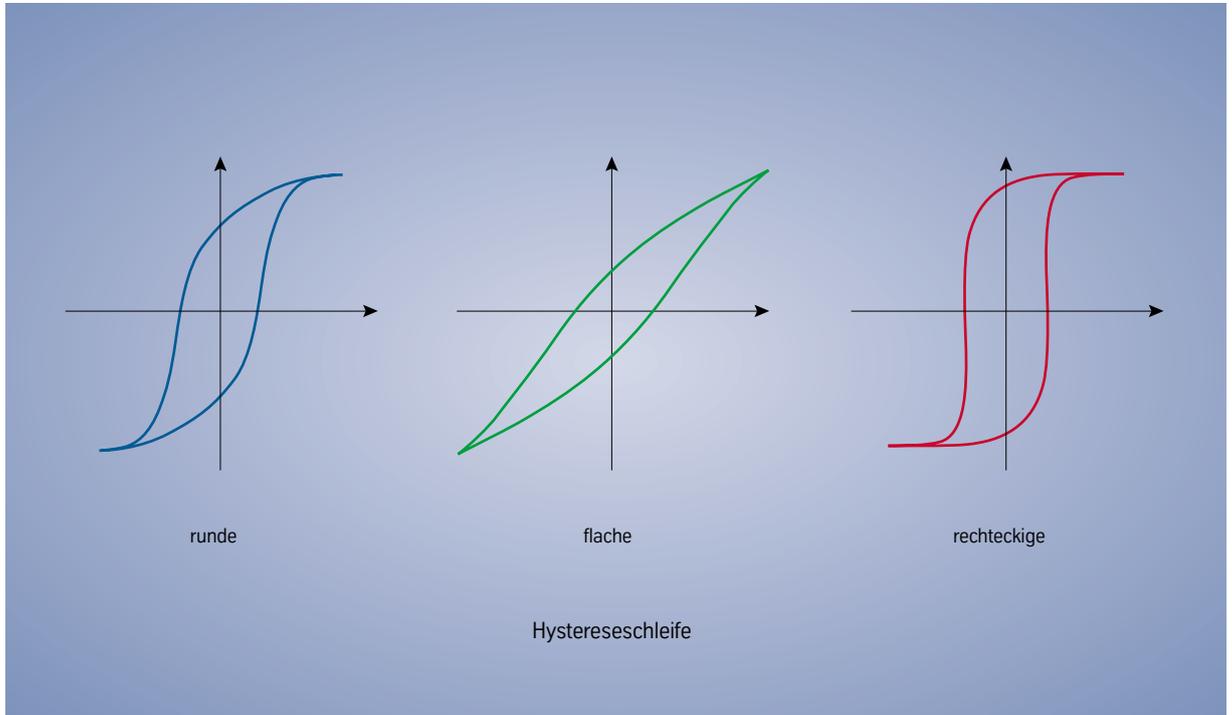


Bild 12: Die verschiedenen Formen der Hystereseschleife.

Die Hystereseschleife kann ganz unterschiedliche Formen (Bild 12) haben. Diese werden über das Verhältnis  $B_r/B_s$  oder in der Praxis richtiger durch das Verhältnis  $B_r/B_M$  beschrieben, wobei  $B_M$  eine jeweils definierte magnetische Flussdichte  $\approx B_s$  ist (Tabelle 2).

Schleifenform:	$B_r/B_M$
rund	ca. 0,6 - 0,7
flach	< 0,5
rechteckig	ca. 0,9

Tabelle 2: Beschreibung der Hystereseschleife durch  $B_r/B_M$ .

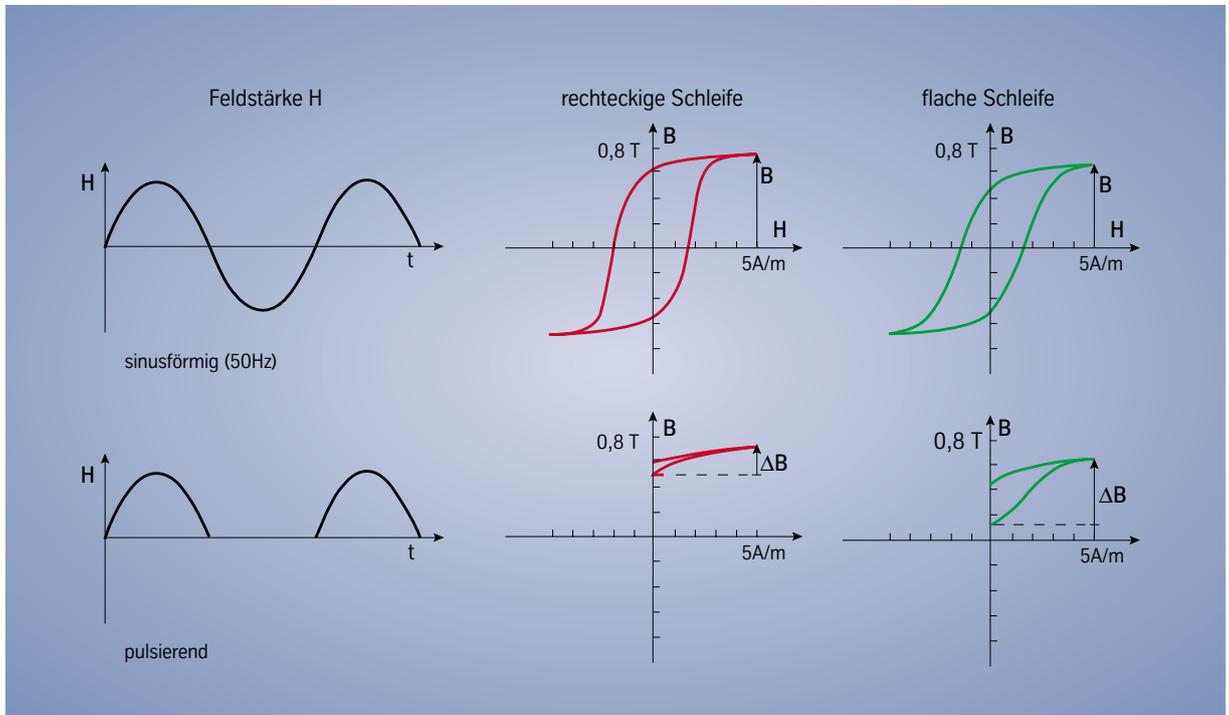


Bild 13: Flussdichteänderung bei sinusförmigem Strom und pulsierendem Gleichstrom bei flacher und rechteckiger Hystereseschleife.

Für pulsstromempfindliche Fehlerstromschutzschalter wird ein Werkstoff mit flacher Schleife benötigt [11], [13], damit auch pulsierende Gleichströme eine ausreichende Flussdichteänderung im Kern hervorrufen. Bild 13 zeigt dies für einen Ringbandkern mit rechteckiger bzw. flacher Hystereseschleife. Bei pulsierendem Gleichstrom wird die Hystereseschleife nicht vollständig durchlaufen, sondern nur bis zum oberen Remanenzpunkt. In der Strompause fällt die Flussdichte auf den statischen Remanenzpunkt ab, von dem aus der nächste Impuls startet. Der statische Remanenzpunkt liegt bei einem Kern mit rechteckiger Hystereseschleife sehr hoch. Deshalb ist bei Erregung mit pulsierendem Gleich-

strom bei dem Kern mit rechteckiger Hystereseschleife nur eine kleine Flussdichteänderung bzw. ein kleiner Flussdichtehub  $\Delta B$  im Vergleich zur Flussdichteänderung bei sinusförmiger Feldstärke erreichbar. In einem Kern mit flacher Schleife ist die Flussdichteänderung bei gleicher Größe der sinusförmigen Feldstärke etwas kleiner, dafür ist der Flussdichtehub bei pulsierendem Gleichstrom größer geworden, da der statische Remanenzpunkt tiefer liegt.

Die Form der Hystereseschleife lässt sich durch eine Wärmebehandlung beeinflussen und in einem weiten Bereich variieren.

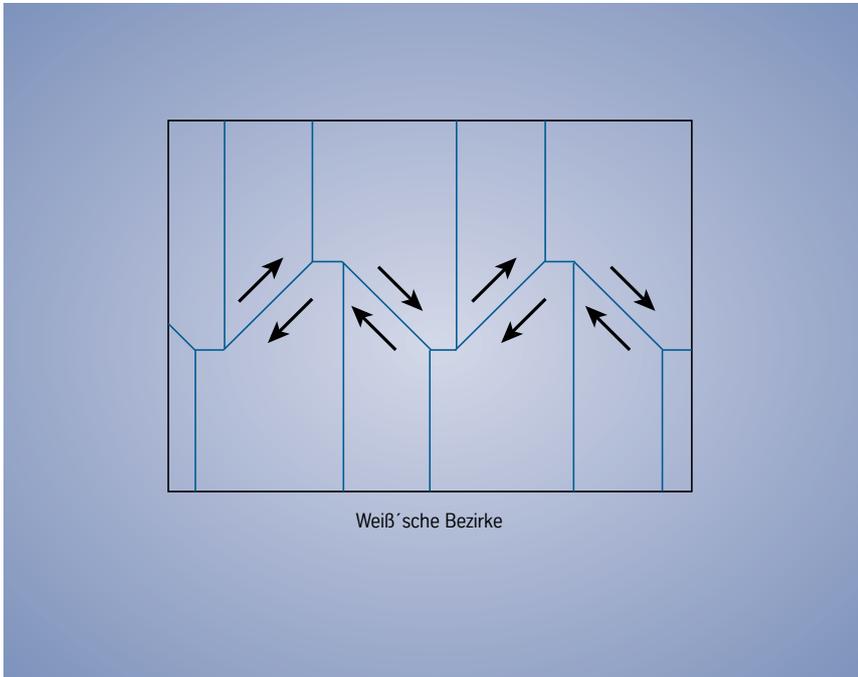


Bild 14: Aufteilung einer ferromagnetischen Probe in Weiß'sche Bezirke (nach [1], [2]).

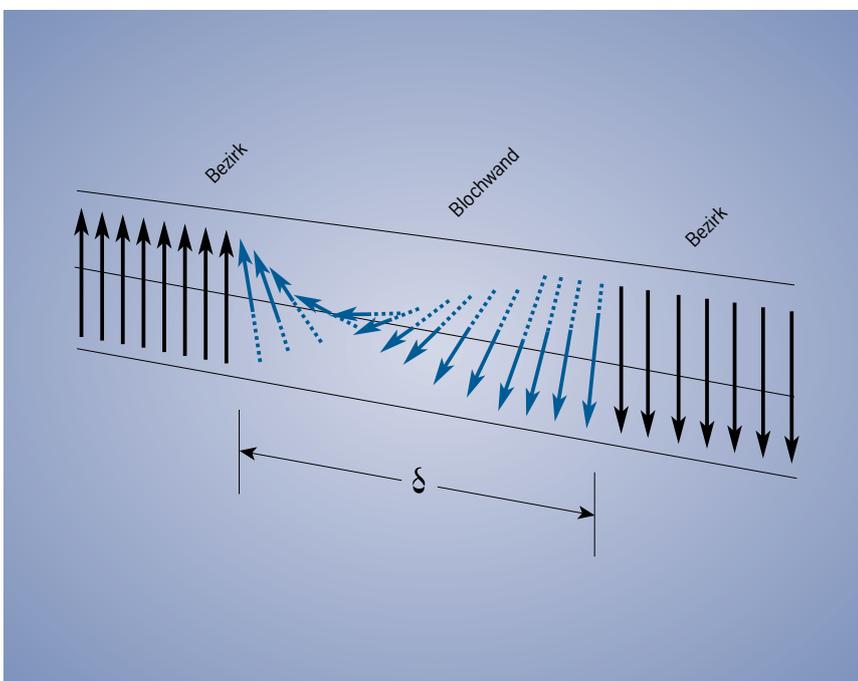


Bild 15: Drehung der Magnetisierungsrichtung in einer Blochwand (nach [1], [2]).

### Hystereseschleife

Im Kapitel „Austauschintegral“ wurde erwähnt, dass in einem ferromagnetischen Material alle magnetischen Momente parallel sind. Das ist zwar richtig, aber die Wirklichkeit ist etwas komplizierter. Die atomaren magnetischen Momente sind nicht über das ganze Material, sondern in einzelnen Bereichen - den Weiß'schen Bezirken - parallel ausgerichtet (Bild 14) [1], [2].

Die einzelnen Weiß'schen Bezirke haben verschiedene Magnetisierungsrichtungen. Sie sind durch Blochwände voneinander getrennt (Bild 15). Die Blochwände sind ein Übergangsbereich, in dem sich die Magnetisierungsrichtung von der des einen Weiß'schen Bezirks in die des anderen dreht. In einer entmagnetisierten Probe sind die Weiß'schen Bezirke so angeordnet, dass sich ihre Magnetisierung untereinander kompensiert (Bild 16 oben).

An eine entmagnetisierte Probe wird ein magnetisches Feld angelegt. Dann wachsen die günstig liegenden Weiß'schen Bezirke auf Kosten der anderen, d. h. die Blochwände müssen sich bewegen (Bild 16). Die Probe zeigt eine von Null verschiedene magnetische Polarisation  $J$  bzw. magnetische Flussdichte  $B$ . Nun enthalten reale Materialien Gitterfehler wie Versetzungen, Korngrenzen und Verunreinigungen, an denen die Blochwände hängen bleiben. Bei sehr kleinen Feldstärken reicht es, wenn sich die Blochwände zwischen ihren Haltepunkten nur ein wenig ausbeulen. Die Magnetisierung ist noch reversibel; beim Zurückgehen der magnetischen Feldstärke  $H$  auf Null verschwindet die magnetische Polarisation (Bild 17). Man spricht von reversiblen Blochwandbewegungen.

Bei größeren Feldstärken reißen sich die Blochwände nach und nach von ihren Haltepunkten los und laufen zu einer neuen Gleichgewichtsposition. Dieses Losreißen kann man beobachten; es sind die „Barkhausensprünge“, die man z. B. als Knacken im Lautsprecher hören kann. Man befindet sich jetzt im steilen Teil der Hystereseschleife. Der Abrissprozess ist nicht mehr reversibel. Geht  $H$  auf Null zurück, so bleibt ein endliches  $J$ . Die Blochwandbewegungen sind jetzt irreversibel.

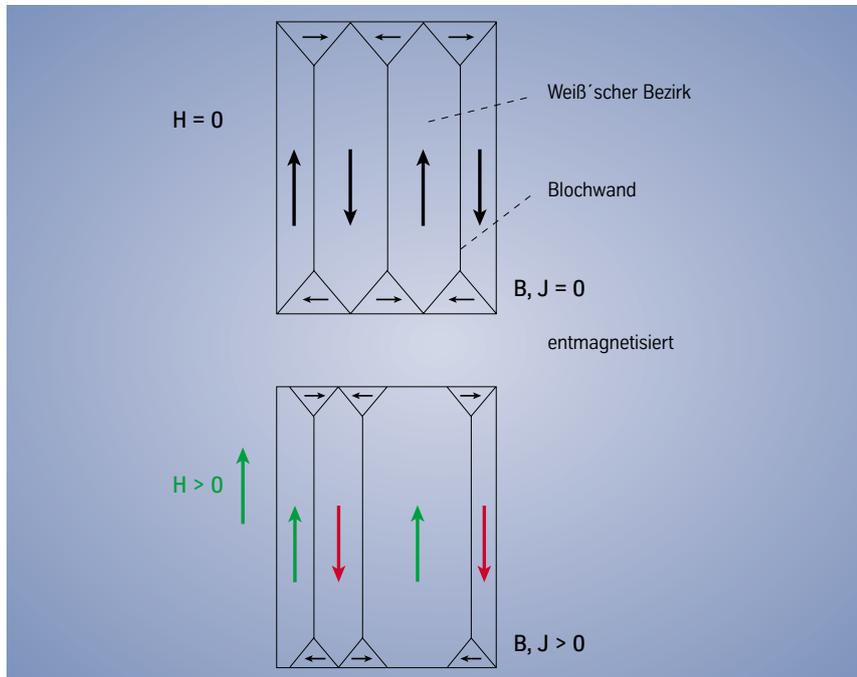


Bild 16: Magnetisierung einer entmagnetisierten ferromagnetischen Probe.

Bei noch höheren Feldstärken wird auch die Magnetisierungsrichtung in den einzelnen Weiß'schen Bezirken aus der Vorzugsrichtung gedreht (Drehprozesse, Bild 17). Die Magnetisierungskurve wird wieder flacher und mündet nach Abschluss aller Drehprozesse in die Sättigungspolarisation  $J_s$  ein. Nimmt man jetzt die Feldstärke auf Null zurück, so dreht sich die Magnetisierungsrichtung in die nächstgelegene Vorzugsrichtung zurück und es bilden sich in der Regel spontan die ersten Blochwände. Im Material bleibt die remanente Polarisation  $J_R$ . Bei einer entgegengesetzt gerichteten Feldstärke bilden sich weitere Blochwände und erst bei einer ausreichend großen Feldstärke  $-H_c$ , der Koerzitivfeldstärke, ist die Gesamtpolarisation wieder Null. Bei weiterer Steigerung von  $H$  in die negative Richtung laufen dieselben Vorgänge in der anderen Richtung ab, usw..

Abhängig von Zahl und Art der Gitterfehler ist ein unterschiedlich großes  $H$  zum Ausbeulen, Abreißen und Bewegen der Blochwände nötig. Mit zunehmender Zahl der Haltepunkte sinkt die Permeabilität und steigt die Koerzitivfeldstärke. Deshalb müssen Blochwandhindernisse vermieden werden.

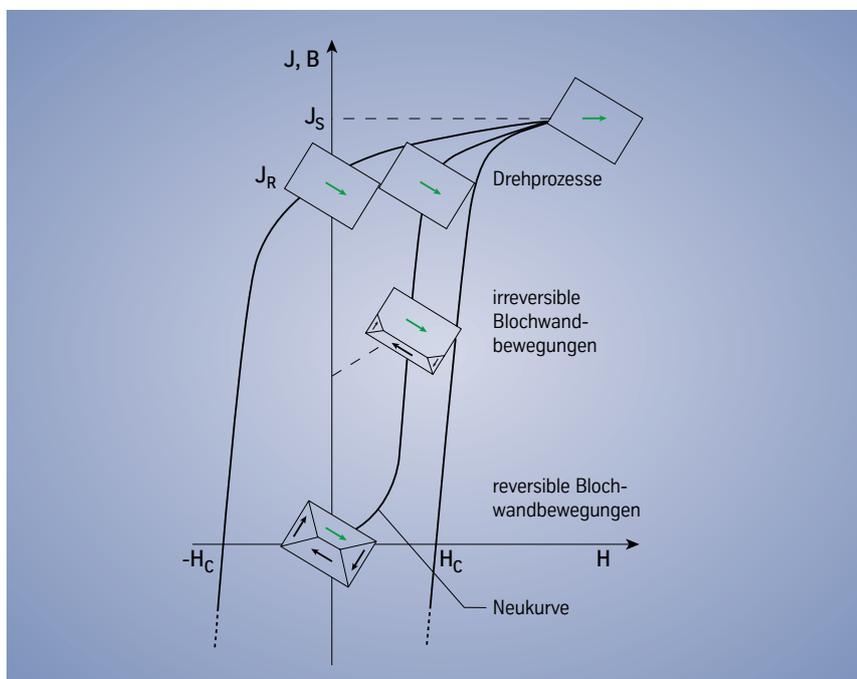


Bild 17: Die verschiedenen Arten der Blochwandbewegung beim Durchlaufen der Hystereseschleife.

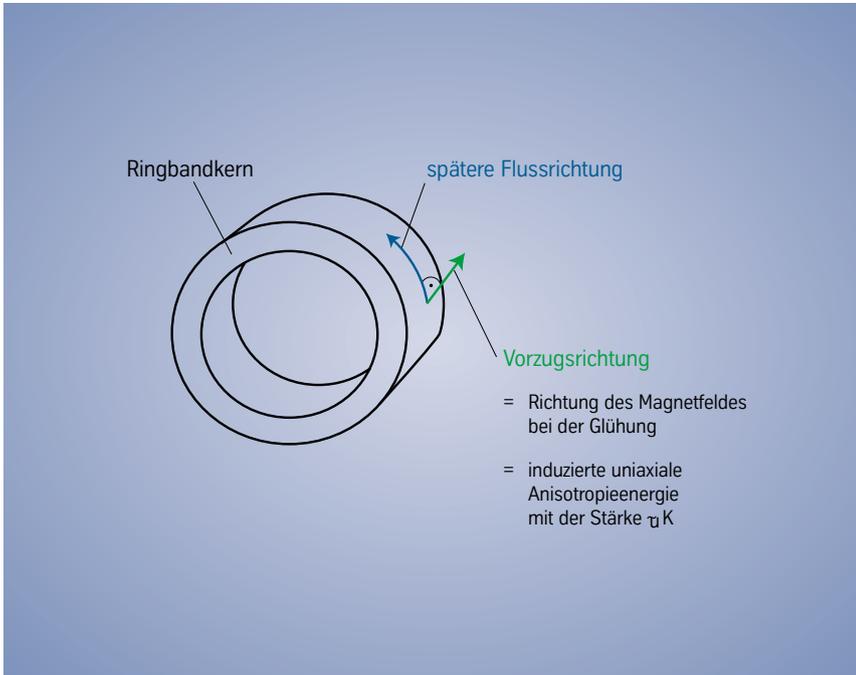
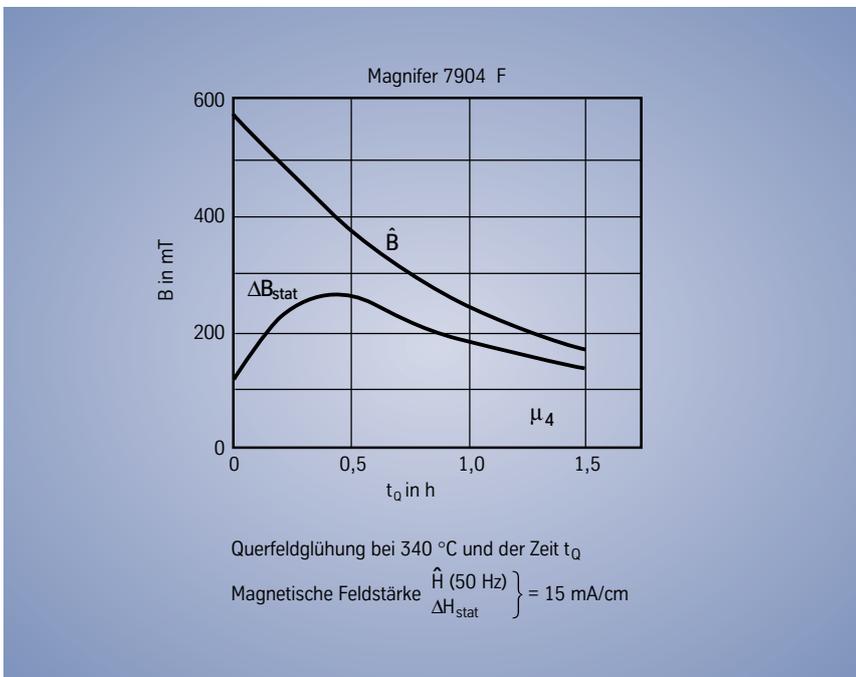


Bild 18: Wärmebehandlung im Magnetfeld quer zur späteren Flussrichtung: Querfeldbehandlung.

Bild 19:  $\hat{B}$ ,  $\Delta B_{stat}$  in Abhängigkeit von der Behandlungszeit  $t_Q$  im Querfeld.

### Flache Schleife

Eine flache Schleife erhält man, wenn beim Ummagnetisieren die Drehprozesse, die den flacheren Teil der Hystereseschleife bestimmen, sehr früh einsetzen (Bild 17). Dies ist der Fall, wenn eine Vorzugsrichtung senkrecht zur späteren Flussrichtung vorhanden ist, so dass die meisten Weiß'schen Bezirke senkrecht zur späteren Magnetisierungsrichtung magnetisiert sind (Bild 18).

In hochlegierten Nickellegierungen erreicht man das, indem man zuerst dafür sorgt, dass  $K_1 \approx 0$  ist, d. h. keine Vorzugsrichtung vorhanden ist. Dann wird in einem Magnetfeld senkrecht zur späteren Flussrichtung (Bild 18) eine 1 bis 1,5 stündige Wärmebehandlung bei Temperaturen zwischen 300 °C und 350 °C durchgeführt: die Querfeldbehandlung. Unter diesen Bedingungen bildet sich eine uniaxiale Anisotropie mit einer entsprechend großen uniaxialen Anisotropiekonstanten  $K_u$  quer zur späteren Flussrichtung.

Bild 19 zeigt, wie sich bei einer Feldstärke mit dem Spitzenwert  $\hat{H} = 15$  mA/cm die magnetische Flussdichte  $B$  mit der Querfeldbehandlungszeit verändert. Bei sinusförmiger Feldstärke sinkt sie kontinuierlich; bei pulsierendem Gleichstrom (Index „stat“) ergibt sich ein Maximum. Bei längeren Zeiten  $t_Q$  sinkt auch  $\Delta B_{stat}$  wieder, da die Hystereseschleife zu flach wird und man sehr niedrige Permeabilitäten erhält.

Auch bei Legierungen mit mittleren Nickelgehalten, bei denen ja immer  $K_1 > 0$  ist, kann man mittels einer Glühbehandlung im Magnetfeld eine uniaxiale Anisotropie erzeugen. Unterzieht man sie z. B. einer Querfeldbehandlung, so lassen sich sehr flache Schleifen mit einem höheren Flussdichtehub erzeugen, als bei den hochnickelhaltigen Legierungen [11].

### Rechteckige Schleife

Eine rechteckige Schleife erhält man, wenn das Ummagnetisieren (Bild 17) möglichst nur durch Blochwandbewegungen erfolgt und fast keine Drehprozesse nötig sind. Dies ist der Fall, wenn eine Vorzugsrichtung parallel zur späteren Flussrichtung vorhanden ist. Einen solchen Fall werden wir bei den Legierungen mit mittlerem Nickelgehalt behandeln.

# Einstellung der verschiedenen Eigenschaften Gitterfehler

Abhängig von Zahl und Art der Gitterfehler ist ein unterschiedlich großes  $H$  zum Ausbeulen, Abreißen und Bewegen der Blochwände nötig. Mit zunehmender Zahl der Haltepunkte sinkt die Permeabilität. Deshalb müssen diese vermieden werden. Bei den klassischen, kristallinen Materialien erhält man um so höhere Permeabilitäten, je geringer die Menge der Verunreinigungen (nichtmagnetische Einschlüsse, Schlacketeilchen, Oxide), je größer die Korngröße und je geringer die Zahl der Versetzungen ist. Es muss deshalb z.B. jegliche Verformung vermieden werden.

Die Struktur einer Blochwand lässt sich aus dem Zusammenwirken der Anisotropieenergie mit der Austauschenergie verstehen. Z. B. dreht sich in einer  $180^\circ$  Blochwand der Magnetisierungsvektor auf der Strecke  $\delta$  in die neue Richtung (Bild 15). Die magnetischen Momente zweier benachbarter Atome bilden den Winkel  $\varphi$  miteinander. Damit haben sie eine erhöhte Austauschenergie  $w_A$ , die ja mit  $\varphi$  steigt. Je kleiner  $\varphi$  ist, desto geringer ist  $w_A$ , desto dicker wird aber auch die Blochwand. Da die magnetischen Momente in der Wand nicht in einer Vorzugsrichtung liegen, also die Kristallanisotropieenergie  $E_K$  nicht Null ist, vergrößert sich  $E_K$  mit zunehmender Blochwanddicke und wirkt so in die entgegengesetzte Richtung. Die optimale Blochwanddicke  $\delta$  ist erreicht, wenn die Gesamtwandenergie minimal ist [1]. Es gilt dann der folgende Zusammenhang:

$$\delta = \sqrt{\frac{kT_c}{aK_1}}$$

- a Gitterkonstante
- k Boltzmann'sche Konstante
- $K_1$  Kristallanisotropiekonstante
- $T_c$  Curietemperatur

Je kleiner  $K_1$  ist, desto breiter und verschwommener ist die Blochwand. Dies ist wichtig im Zusammenhang mit den Einschlüssen. Es ist nicht jeder Einschluss gleich wichtig, sondern als Haltepunkte wirken vor allen Dingen diejenigen, die einen Durchmesser in der Größe der Blochwanddicke  $\delta$  haben. Sehr viel kleinere und sehr viel größere werden „übersehen“ [2], [11].

Weichmagnetische Werkstoffe sind nicht nur magnetisch weich, sondern oft auch mechanisch. So hat z. B. die 80 % Ni Mo Fe-Legierung im schlussgeglühten Zustand nur eine Härte von 110 - 130 HV5 (Tabelle 12). Bei verschleißanfälligen

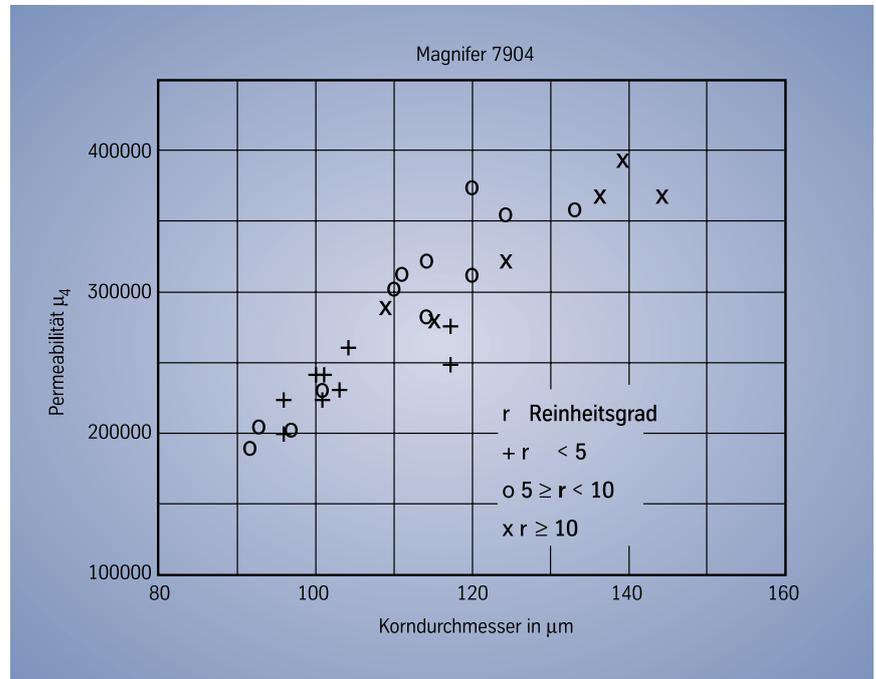


Bild 20:  $\mu_4$  in Abhängigkeit vom Reinheitsgrad und dem Korndurchmesser.

ligen Teilen, wie Tonköpfen, wäre aber eine größere Härte bei guten weichmagnetischen Eigenschaften wünschenswert. Dies wird durch Zulegierung von Nb, Ti, Al usw. erreicht. Durch eine geeignete Anlassbehandlung bilden sich feine Ausscheidungen, die dann allerdings die Permeabilität verschlechtern. Die Verschlechterung der Permeabilitäten lässt sich bei den hochnickelhaltigen Legierungen mit  $K_1 \approx 0$  dadurch in Grenzen halten, dass die Ausscheidungen einen Durchmesser deutlich unterhalb der Blochwanddicke haben [11].

Bei der Legierung 80 % Ni, 4 % Mo, Fe wird die Permeabilität zu einem wesentlichen Teil von der Korngröße nach der Schlussglühung bestimmt. Bild 20 zeigt  $\mu_4$  in Abhängigkeit von der Korngröße für Chargen mit verschiedenen Reinheitsgraden  $r$  (Kehrwert des Volumenanteils der Einschlüsse in % nach JIS). Die Punkte liegen unabhängig vom Reinheitsgrad auf einer Geraden.

Der Reinheitsgrad dieser Chargen ist schon so gut, dass die wenigen Einschlüsse (die im  $\mu m$  Bereich sind hier die Wichtigen) direkt als Haltepunkte für die Blochwände eine untergeordnete Rolle gegenüber den Korngrenzen spielen. Indirekt ist der Reinheitsgrad aber schon von Bedeutung. Die größten Korngrößen finden sich nur bei den Chargen mit höchstem Reinheitsgrad.

# Einstellung der verschiedenen Eigenschaften

## Texturen bei Legierungen mit mittlerem Nickelgehalt

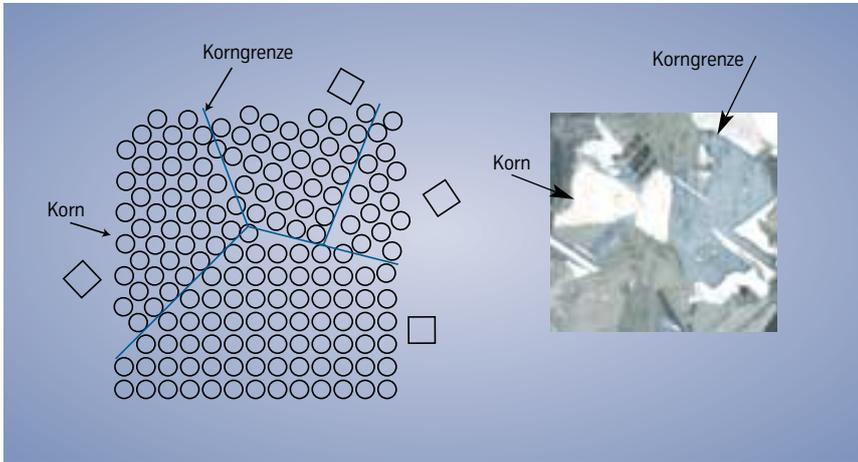


Bild 21: Korn und Korngrenzen bei kristallinen Materialien.

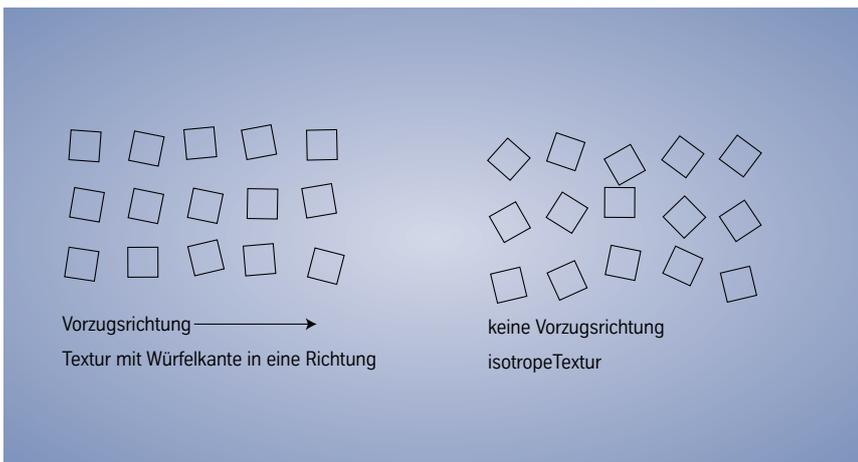


Bild 22: Zur Erklärung des Begriffs Textur (schematisch, zweidimensional).

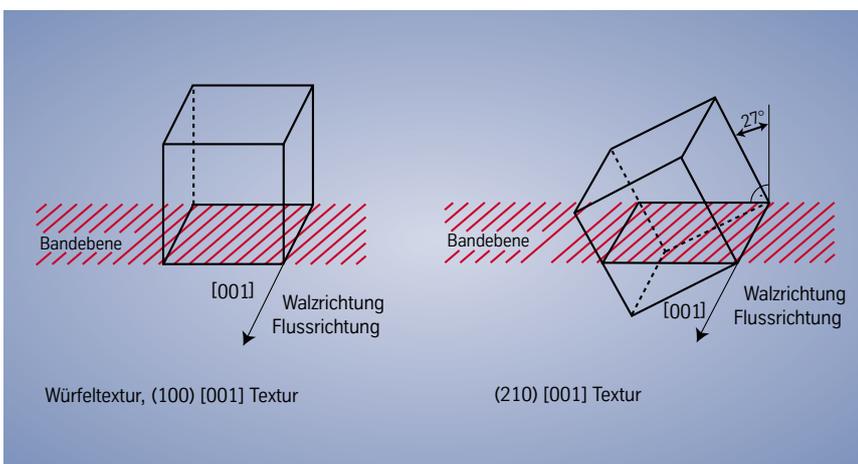


Bild 23: Texturen bei Ni-Fe-Legierungen.

Bei den Legierungen mit mittlerem Nickelgehalt ist die Sättigungsflussdichte maximal. Die Kristallanisotropiekonstante  $K_1$  ist allerdings immer größer als Null, d. h. die Würfelfanten sind die Vorzugsrichtungen. Die Permeabilitäten sind deshalb generell geringer, als bei den Legierungen mit hohen Nickelgehalten.

In diesen Materialien lässt sich die Permeabilität durch eine Textur steigern [11]. Normalerweise reicht das Kristallgitter nicht durch das ganze Material, sondern nur über einen bestimmten Bereich - das Korn. Im nächsten Korn ist es dann um einen beliebigen Winkel verdreht [14] (Bild 21).

Bei einer isotropen Textur sind die Würfelfantenrichtungen der Gitter in jedem Korn statistisch verteilt (Bild 22 links). Bei der zweiten Textur in Bild 22 sind alle Körner ungefähr in eine Richtung orientiert, die in diesem Beispiel die Würfelfantenrichtung ist [15]. Dies kann man durch eine bestimmte Walz- und Glühbehandlung erreichen.

Liegt nun eine Würfelfantenrichtung, die ja eine magnetische Vorzugsrichtung ist, ungefähr in Flussrichtung, so erfolgt nach Kapitel „Rechteckige Schleife“ die Ummagnetisierung bis zu hohen Flussdichten durch Blochwandbewegungen. Man erhält eine rechteckige Schleife mit hohen Permeabilitäten. Bei einer isotropen Textur setzen, da nur wenige Körner in Vorzugsrichtung orientiert sind, die Drehprozesse früher ein. Das heißt, es entsteht eine flachere Schleife (siehe Kapitel „Flache Schleife“), die, da die Drehprozesse energetisch ungünstiger sind, in der Regel niedrigere Permeabilitäten hat.

Bei den Nickel-Eisen-Legierungen lassen sich verschiedene Arten von Texturen erzeugen (Bild 23): Bei der Würfeltextur [15] liegt eine Würfelfante in der Bandebene und eine Würfelfante zeigt in die Walzrichtung, die auch die spätere Flussrichtung ist. Bei der (210) [001] Textur ist der Würfel um ca.  $27^\circ$  um die Walzrichtung gedreht, die Würfelfante in Walz- bzw. Flussrichtung bleibt erhalten.

Formt man Material mit einer bestimmten Ausgangskorngröße vor der Umformung nur um ca. 30 - 60 % um, so ist das Material nach einer Rekristallisationsglühung im Bereich von 900 °C bis 1050 °C feinkörnig und näherungsweise isotrop; die entstehende Korngröße hängt von der Glühtemperatur ab. Bei höheren Umformgraden bildet sich ein wachsender Anteil der Würfeltexur, die, je nach Korngröße vor der Endumformung, im Bereich zwischen ca. 90 % und 97 % vorherrscht (Bild 24). Sie wird mit steigendem Umformgrad immer ausgeprägter.

Glüht man das Material bei Temperaturen zwischen 1100 °C und 1200 °C, so findet in diesem Bereich, nach Bildung der Würfeltexur, eine zweite Rekristallisation [17], [18] - die Sekundärrekristallisation - statt, die die Würfeltexur zerstört. In einem bestimmten Bereich (Bild 25) entsteht dabei eine (210) [001] Textur. Sie zeigt eine Korngröße im Bereich von Millimetern. Bei zu hohen Umformgraden bilden sich zentimetergroße Körner mit anderen, magnetisch ungünstigen Richtungen (Grobkorn). Die Kornstruktur der verschiedenen Texturen ist sehr charakteristisch (Bild 25). Der Übergangsbereich zwischen den einzelnen Texturen variiert mit den Verunreinigungen und der Legierungszusammensetzung.

Die höchsten Permeabilitäten lassen sich mit der (210) [001] Textur erreichen. Das Grobkorn hat geringere Permeabilitäten, da die Körner nicht in Vorzugsrichtung orientiert sind. Bei der feinkörnigen, isotropen Struktur ist die Permeabilität auch kleiner, da die Korngröße deutlich geringer ist. Die Würfeltexur erzeugt eine sehr ausgeprägte Rechteckschleife. Die Permeabilitäten sind allerdings gering, da die Korngröße sehr klein ist. Tabelle 3 fasst die Wirkung der Textur auf eine 48 % Nickel-Eisen-Legierung zusammen.

	Struktur	$\mu_4$	$\mu_{max}$
RG	isotrope Struktur	9 900	82 000
TG	sekundärrekristallisiert (210) [001] Textur	16 000	95 000
T	Würfeltexur $B_R/B_M > 0,95$	<1 000	40 000

Tabelle 3: Auswirkung von Texturen auf Magnifer® 50 (48 % Ni Rest Fe; Banddicke: 0,20 mm für RG und TG und 0,10 mm für T).

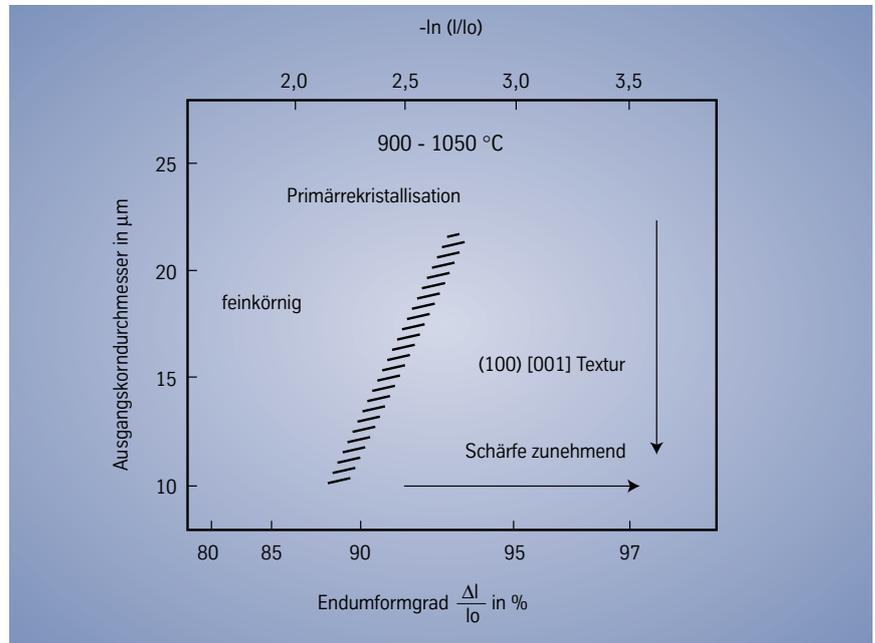


Bild 24: Primärrekristallisation bei Legierungen mit mittlerem Nickelgehalt bei Temperaturen von 900 °C – 1050 °C (nach [16]).

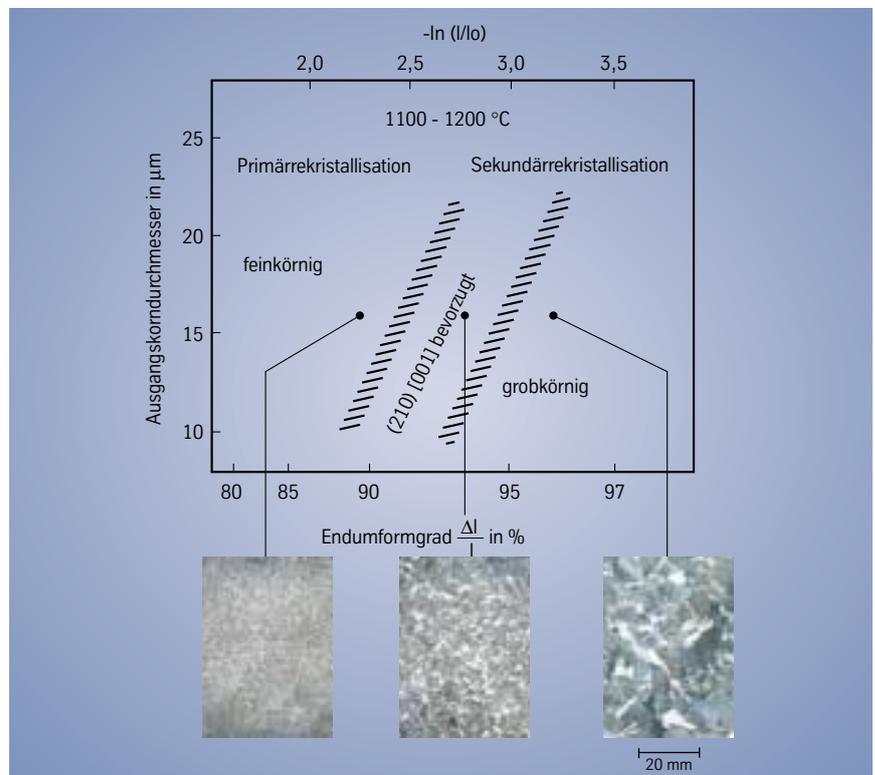


Bild 25: Sekundärrekristallisation bei Legierungen mit mittlerem Nickelgehalt bei Temperaturen von 1100 °C – 1200 °C (nach [16]).

# Einstellung der verschiedenen Eigenschaften

## Glühbehandlung im magnetischen Längsfeld

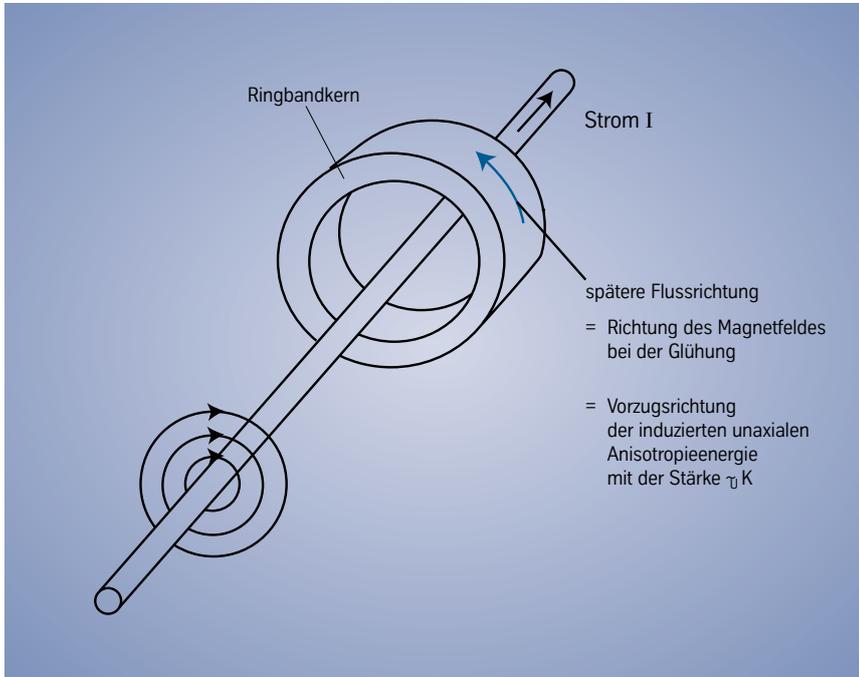


Bild 26: Wärmebehandlung im Magnetfeld parallel zur späteren Flussrichtung (Längsfeldbehandlung).

Im Folgenden soll auf die Magnetfeldbehandlung in einem Feld parallel zur späteren Flussrichtung (Bild 26) eingegangen werden [11], [19, 20] : die Längsfeldbehandlung. Für eine solche Behandlung werden die Ringbandkerne auf einen isolierten elektrischen Leiter aufgefädelt, durch den während der Wärmebehandlung ein Strom geeigneter Größe geleitet wird.

Voraussetzung ist, dass die durch die Magnetfeldbehandlung induzierte uniaxiale Anisotropiekonstante  $K_U$  größer werden kann als die Kristallanisotropiekonstante  $K_1$ .

Bild 27 zeigt die uniaxiale Anisotropiekonstante  $K_U$  im Vergleich zur Kristallanisotropiekonstanten  $K_1$ . Sie erreicht für Glühungen bei 450 °C bei ca. 65 % Ni ihren Maximalwert, da dort die Differenz zwischen Curie- und Anlasteratur am größten ist. Ab ca. 55 % Ni kann  $K_1$  so klein gemacht werden, dass  $K_1 \approx K_U$  möglich ist.

Während der Magnetfeldbehandlung verändert sich einmal  $K_1$ , zum anderen entsteht eine uniaxiale Anisotropie. Die Größe von  $K_1$  und  $K_U$  hängt von Glüh Temperatur und Glühzeit ab.  $K_1$  wird um so kleiner, je tiefer die Glüh Temperatur ist und je länger die Glühung dauert, da ihr Wert sich in Richtung der Linie „langsame Abkühlung“ bewegt (Bild 27).  $K_U$  dagegen wird um so größer, je tiefer die Glüh Temperaturen liegen.

Bei tiefen Temperaturen (ca. 420 °C) ist dann bei einer Legierung mit 55 % Ni  $K_i < K_u$  [11], [19, 20]. Die Vorzugsrichtung in Flussrichtung überwiegt. Man erhält rechteckige Hystereseschleifen, da Drehprozesse erst sehr spät einsetzen (Bild 28).  $\mu_i$  ist niedrig.

p

Bei etwas höheren Temperaturen wird ein Zustand  $K_i \approx K_u$  eingestellt. Die Hystereseschleife wird flacher und man erhält sehr hohe Permeabilitäten. Bei noch höheren Temperaturen erhält man trotz Längsfeldbehandlung eine sehr flache Schleife. Die Permeabilitäten fallen ab und  $\Delta B$  für pulsierenden Gleichstrom steigt deutlich an. Dort ist  $K_u \ll K_i$ , [13].

Glüht man die Legierungen mit 53 % bis 65 % Nickel nicht im Magnetfeld, so erhält man sehr niedrige Permeabilitäten. Das Material ist unterhalb des Curiepunktes von ca. 530 °C bei 55 % Ni in seinen Weiß'schen Bezirken bis zur Sättigung magnetisiert. Es ist so bei der Abkühlung einer Magnetfeldbehandlung ausgesetzt, die in jedem Weiß'schen Bezirk eine andere Richtung hat. Diese Materialien sind also nur mit einer Magnetfeldbehandlung zu verwenden. Die Aussagen über den Einfluss der Textur sind auch hier nicht ungünstig geworden. Höchste Permeabilitäten erhält man nur, wenn zusätzlich die optimale (210) [001] Textur vorherrscht.

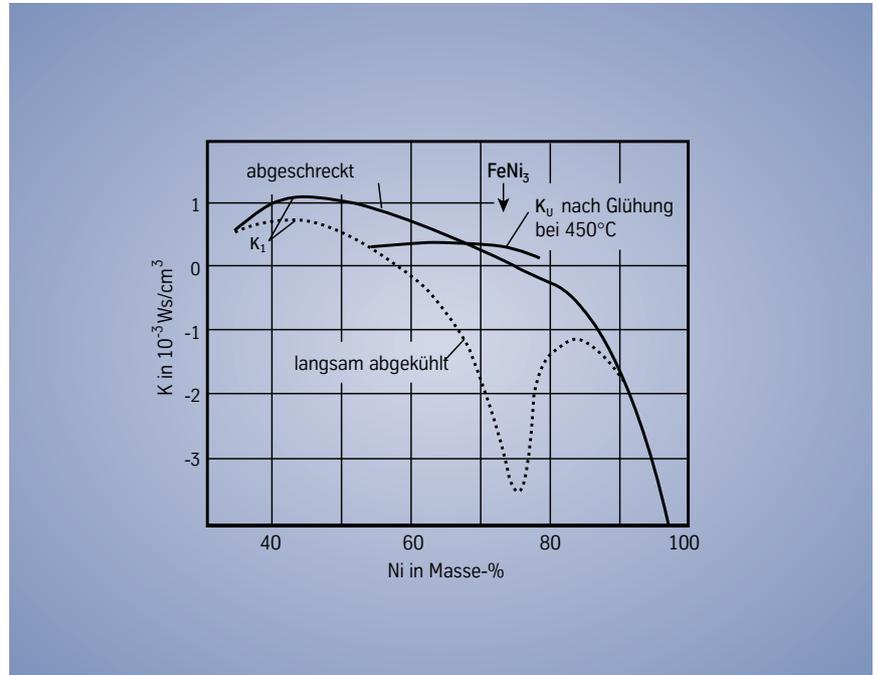


Bild 27:  $K_u$  in Abhängigkeit vom Nickelgehalt (nach [6] bis [9], [23]).

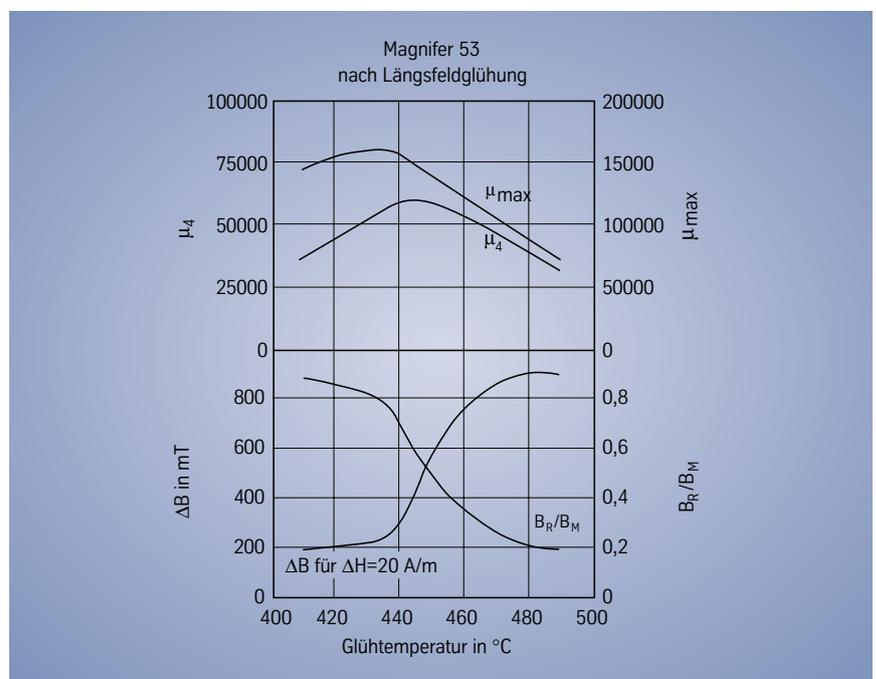


Bild 28:  $\mu_4$ ,  $\mu_{\max}$ ,  $B_R/B_M$  und  $\Delta B$  in Abhängigkeit von der Glühetemperatur bei der Längsfeldbehandlung.

# Die einzelnen Ni-Fe-Legierungen

## Ni-Fe-Legierungen mit hohem Nickelgehalt



In dieser Legierungsgruppe sind die Nickel-Eisen-Legierungen mit den höchsten Anfangs- und Maximalpermeabilitäten zu finden. Die Sättigungsflussdichte  $B_s$  beträgt 0,7 bis 0,8 T.

Die weichmagnetische Nickel-Eisen-Legierung Magnifer 7904 mit ca. 80 % Nickel und ca. 5 % Molybdän ist die Ni-Fe-Legierung mit den höchsten technisch erreichbaren Permeabilitätswerten von  $\mu_r \geq 240\,000$  bei einer Banddicke von 0,065 mm sowie sehr kleinen statischen Koerzitivfeldstärken von  $H_c \leq 1$  A/m (Tabelle 4, Bild 31). Bei der Legierung Magnifer 75 mit 75 % Ni, 2 % Cr und 5 % Cu können nach optimaler Schlussglühung Anfangspermeabilitäten von  $\mu_r = 150\,000$  bei einer Banddicke von 0,065 mm erreicht werden (Tabelle 5, Bild 31). Sie zeigt eine bessere Duktilität im harten Zustand als die Legierung mit 80 % Ni und 5 % Mo (Tabelle 10). Hauptanwendungsgebiete sind Ringbandkerne für Summenstromwandler für Fi-Schalter (Fehlerstromschutzschalter), Messwandler, Kernbleche für NF-Übertrager, elektronische Di-Schalter (Differenzstromschalter), verzerrungsarme Übertrager für Modems, sowie Stanzteile für Relais, Schrittschaltmotoren, Sensoren und Abschirmungen (Bilder 29, 30, 33, 34, 37 und 38).



Bild 29: Gestanzte Kernbleche aus Magnifer<sup>®</sup> 7904 für verzerrungsarme Übertrager für Modems.

Werkstoff	Charakteristische Eigenschaften	Magnetische Eigenschaften	Anwendungen
<b>Magnifer<sup>®</sup> 7904<sup>1)</sup></b> 80 % Ni, 5 % Mo, Fe Rest		$B_s = 0,74$ T	
<b>Magnifer<sup>®</sup> 7904 MP 240<sup>1)</sup></b>	Höchste Permeabilität	$\mu_r > 240\,0002)$	Ringbandkerne für Summenstromwandler für Fi-Schalter, Messwandler, Kernbleche für NF-Übertrager, elektronische Di-Schalter, verzerrungsarme Übertrager für Modems, Stanzteile für Relais, Schrittschaltmotoren, Sensortechnik, Abschirmungen
<b>Magnifer<sup>®</sup> 7904 MP H1</b>		$H_c < 1$ A/m Massivmaterial	
<b>Magnifer<sup>®</sup> 7904 F 25<sup>1)</sup></b>	F-Schleife	$\Delta B_{stat} > 200$ mT bei $\Delta H_{stat} = 15$ mA/cm <sup>2)</sup>	Ringbandkerne für pulsstromsensitive Fi-Schalter
<b>Magnifer<sup>®</sup> 8105</b>	Negative Magnetostriktion	$\mu_r > 100\,000$ (DC) $B_s = 0,7$ T	Stanzteile und Abschirmgehäuse für Magnetsköpfe
<sup>1)</sup> weitere Qualitätsstufen im Datenblatt und in den Werkstofftabellen			
<sup>2)</sup> Messungen mit 50Hz an Ringbandkernen mit 0,065 mm Banddicke			

Tabelle 4: Legierungen mit ca. 80 % Nickel. Weitere Daten sind in den Datenblättern Magnifer<sup>®</sup> 7904, Magnifer<sup>®</sup> 8105 und in den Werkstofftabellen zu finden.

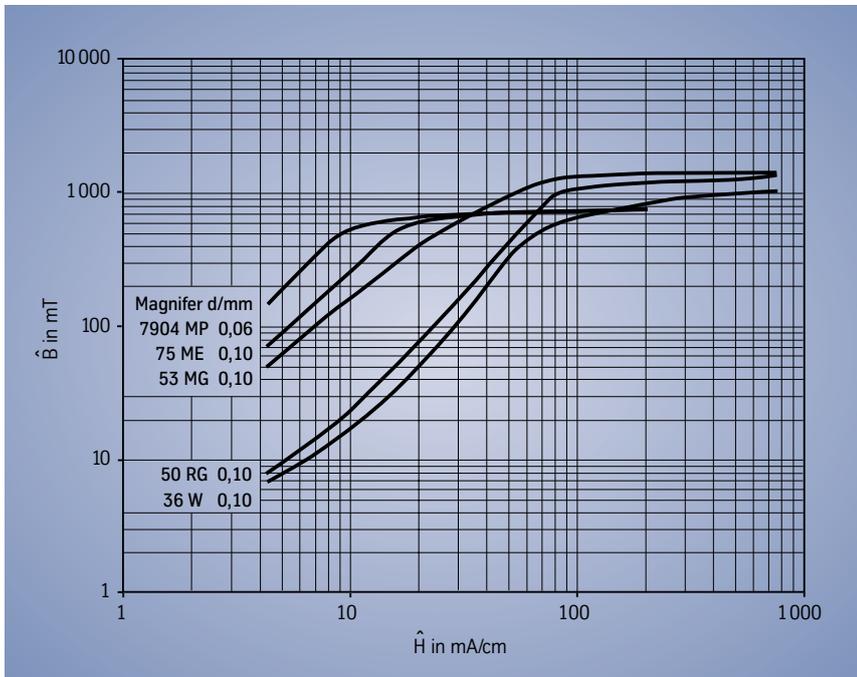


Bild 31: Flussdichte-Feldstärke-Kurven für Nickel-Eisen-Legierungen.



Bild 30: Ringbandkerne aus Magnifer®-Legierungen.

Durch eine Glühbehandlung im magnetischen Querfeld lässt sich bei beiden Legierungen eine flache Hystereseschleife (F-Versionen) mit sehr hohem unipolarem Flussdichtehub erzeugen (Tabellen 4 und 5, Bild 32). Der Index „stat“ steht für die Erregung mit einweggleichgerichtetem Strom, der Index „dyn“ für die Erregung mit zweiweggleichgerichtetem Strom. Anwendungsgebiet ist die Herstellung von Summenstromwandlern für pulsstromsensitive Fi-Schalter.

Bei allen diesen Varianten lässt sich durch eine Glühbehandlung eine Qualität mit verbessertem Temperaturkoeffizienten zwischen  $-25\text{ °C}$  und  $80\text{ °C}$  („TK-Werkstoff“) einstellen.

Erhöht man den Nickelgehalt der 80 %igen Nickellegierung um ca. 1 %, so erhält man eine Nickel-Eisen-Legierung mit einer negativen Sättigungsmagnetostraktion - Magnifer 8105. Durch die negative Sättigungsmagnetostraktion ist diese Legierung unempfindlicher gegen mechanische Belastung, z. B. beim Eingießen in Kunststoffharze. Sie findet daher hauptsächlich Anwendung als Abschirmgehäuse und Polstücke für Magnetköpfe in Audiogeräten (Tabelle 4).

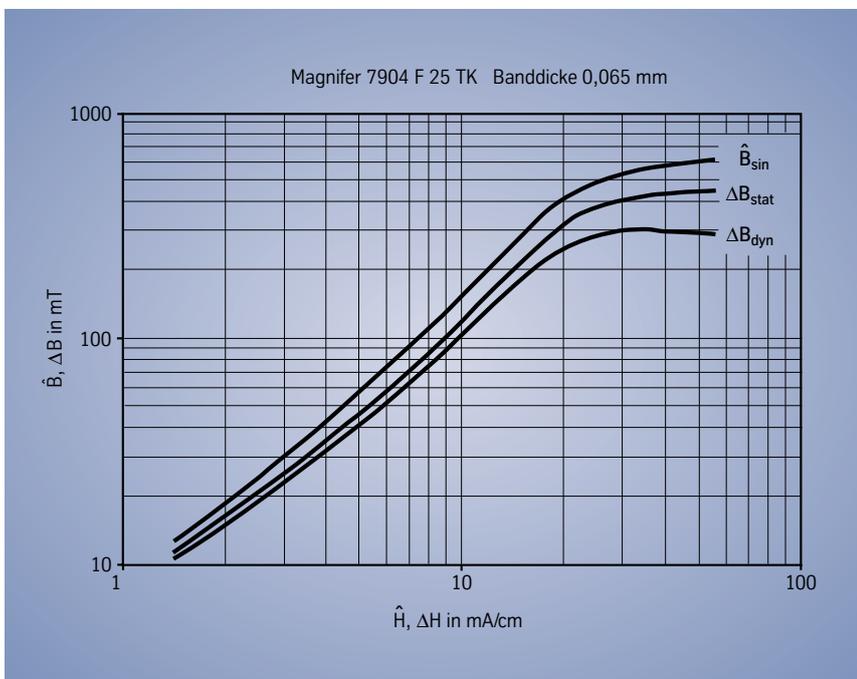


Bild 32: Flussdichte-Feldstärke-Kurven für Magnifer® 7904 F25 TK (80 % Ni, 5 % Mo, Rest Fe).



Bild 33: Summenstromwandler aus Magnifer®-Legierungen für Fehlerstromschutzschalter.

Bei Magnifer 77 Ti Nb werden durch Zulegieren von Niob und Titan die üblichen sehr weichen und damit nicht sehr verschleißfesten Nickel-Eisen-Legierungen in ihren mechanischen Eigenschaften verbessert. Neben relativ hohen Anfangspermeabilitäten von  $\mu_4 \geq 40\,000$  und einer Koerzitivfeldstärke von  $H_c \leq 2\text{ A/m}$  erreicht man eine hohe Härte und Verschleißfestigkeit bei gutem Korrosionsverhalten in einem Wechselklima gemäß DIN VDE 664. Dies wird durch die Ausscheidung von feinen, Titan und Niob enthaltenden Einschlüssen erreicht, die dann die höhere mechanische Härte bewirken. Die wichtigsten Anwendungsgebiete für diese Legierung sind Magnetanker und Magnetschenkel für Auslöserelais in Fi-Schaltern (Bild 37) sowie Magnetköpfe in Audio- und Videogeräten.



Bild 34: Abschirmungen aus Magnifer®-Legierungen.

Werkstoff	Charakteristische Eigenschaften	Magnetische Eigenschaften	Anwendungen
<b>Magnifer® 75<sup>1)</sup></b> 76 % Ni, 2 % Cr, 5 % Cu, Fe Rest		$B_s = 0,8\text{ T}$	
<b>Magnifer® 75 ME 8<sup>1)</sup></b>	hohe Permeabilität höhere Duktilität	$\mu_4 > 150\,000$ (50Hz) (0,065 mm Bd.) $\mu_4 > 80\,000$ (50Hz) (0,20 mm Bd.)	Ringbandkerne für Messwandler, Kernbleche für NF-Übertrager, Abschirmungen
<b>Magnifer® 75 MH 2</b>		$H_c < 2\text{ A/m}$ Massivmaterial	
<b>Magnifer® 75 F</b>	F-Schleife	$\Delta B_{\text{stat}} \geq 200\text{ mT}$ bei $\Delta H_{\text{stat}} = 20\text{ mA/cm}$	Ringbandkerne
<b>Magnifer® 77 TiNb So</b> 77 % Ni, 5 % Cu, 1 % Ti 2 % Nb, Fe Rest	Ausscheidungs härtend: HV = 150 - 200 schlussgeglüht, ausgehärtet gutes Korrosions- verhalten	$\mu_4 > 40\,000$ (DC) $H_c \leq 2\text{ A/m}$ $B_s = 0,7\text{ T}$	Stanzteile für Relais, Magnetköpfe

<sup>1)</sup> weitere Qualitätsstufen im Datenblatt bzw. in den Werkstofftabellen

# Die einzelnen Ni-Fe-Legierungen

## Ni-Fe-Legierungen mit mittlerem Nickelgehalt

Die Legierung Magnifer 53 mit ca. 55 % Ni hat eine Sättigungspolarisation von 1,5 T. Sie ist nur als Ringbandkern verwendbar (siehe Kapitel „Glühbehandlung im magnetischen Längsfeld“) und wird in mehreren Varianten gefertigt (Tabelle 6).

Bei der Variante Magnifer 53 MG 60 erreicht man durch eine Längsfeldbehandlung eine hohe Permeabilität von  $\mu_4 \geq 60\,000$  (Bild 31). Sie wird für Messwandlerkerne und Summenstromwandler für Fehlerstromschutzschalter eingesetzt (Bilder 30 und 33).

Bei der Variante Magnifer 53 F erhält man einen Werkstoff mit flacher Hystereseschleife und damit hohem unipolarem Flussdichtehub. Sie findet als Summenstromwandler für pulsstromsensitive Fi-Schalter Verwendung (Bilder 33 und 35).

Bei der Variante Magnifer 54 F erzeugt man durch eine Querfeldbehandlung eine besonders flache Hystereseschleife und damit eine hohe Impulspermeabilität. Hauptanwendungsgebiete sind Magnetkerne für Impulsübertrager und Thyristorschutzdrosseln (Bild 36).

Die Legierung Magnifer 50 mit 48 % Ni hat die höchste im Nickel-Eisen-Legierungssystem erreichbare Sättigungspolarisation von 1,55 T. Sie wird in mehreren Varianten gefertigt (Tabelle 7), die sich durch ihr Gefüge unterscheiden. Die verschiedenen Gefüge werden durch die verschiedenen Walz- und Glühverfahren eingestellt (siehe Kapitel „Texturen bei Legierungen mit mittlerem Nickelgehalt“).

Bei der Variante RG bildet sich nach der Schlussglühung ein isotropes, relativ feinkörniges Gefüge mit Anfangspermeabilitäten von  $\mu_4 \geq 8\,000$

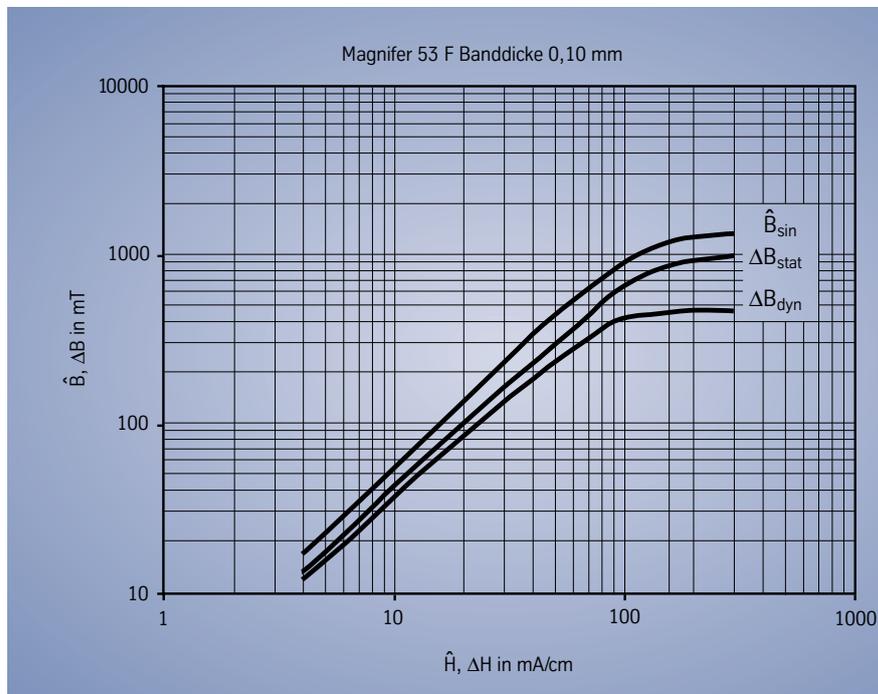


Bild 35: Flussdichte-Feldstärke-Kurven für Magnifer® 53 F (55 % Ni, Rest Fe).

und Koerzitivfeldstärken von  $H_c \leq 5$  A/m. Typische Anwendungsgebiete sind Rotorbleche, Statorbleche, Ringbandkerne für NF-Übertrager, Speicherdrosseln sowie Wandlerkerne für Fehlerstromschutzschalter und Abschirmungen (Tabelle 7, Bilder 30, 33, 34).

Bei der Variante TG erhält man nach der Schlussglühung ein anisotropes Gefüge mit größeren Körnern und (210)[001] Textur. Dadurch erreicht man in Bandrichtung sehr gute Permeabilitäten.  $\mu_4$  liegt im Bereich von  $\geq 14\,000$  (Tabelle 7). Bei Bedarf können Sondervarianten (RG S), die zwischen den Varianten RG und TG liegen, unter Berücksichtigung der nachfolgenden Weiterverarbeitungsbedingungen, gefertigt werden.

Werkstoff	Charakteristische Eigenschaften	Magnetische Eigenschaften	Anwendungen
Magnifer® 53 <sup>1)</sup> 55 % Ni, Fe Rest	nur Ringbandkerne mit Magnetfeldbehandlung	$B_s = 1,5$ T	
Magnifer® 53 MG 60 <sup>1)</sup>	höchste Permeabilität	$\mu_4 > 60\,000$ (50Hz) (0,10 mm Bd.)	Messwandler, Summenstromwandler für Fi-Schalter
Magnifer® 53 F	F-Schleife	$\Delta B_{stat} \geq 200$ mT bei $\Delta H_{stat} = 50$ mA/cm	Summenstromwandler für pulsstromsensitive Fi-Schalter
Magnifer® 54 F	Hohe Impulspermeabilität	$\mu_p > 4\,000$ bei $t_p = 50$ $\mu$ s	Impulsübertrager, Thyristorschutzdrosseln

<sup>1)</sup> weitere Qualitätsstufen im Datenblatt bzw. in den Werkstofftabellen

Tabelle 6: Legierungen mit 55 % Nickel. Weitere Daten sind im Datenblatt Magnifer® 53 und in den Werkstofftabellen zu finden.



Bild 36: Drossel, Übertrager und Stromwandler aus Magnifer®-Legierungen.



Bild 37: Relaissteile aus Magnifer®-Legierungen.

Werkstoff	Charakteristische Eigenschaften	Magnetische Eigenschaften	Anwendungen
<b>Magnifer® 50</b> 48 % Ni, Fe Rest		$B_s = 1,55 \text{ T}$	
<b>Magnifer® 50 RG<sup>1)</sup></b>	Rotor Grade, feinkörniges, isotropes Gefüge	$\mu_4 > 8\,000$ (50Hz) (0,20 mm Bd.) $H_c < 5 \text{ A/m}$	Ringbandkerne, Kernbleche für NF-Übertrager, Speicherdrosseln, Summenstromwandler für Fi-Schalter
<b>Magnifer® 50 RG S</b>	Sondervariante zwischen 50 RG und 50 TG	Gegenüber 50 RG verbesserte Eigenschaften	Rotorbleche, Statorbleche, Abschirmungen
<b>Magnifer® 50 TG<sup>1)</sup></b>	Transformer Grade, anisotropes Gefüge	$\mu_4 \geq 10\,000$ ( $\geq 14\,000$ ) (50Hz, 0,20 mm Bd.)	Kernbleche, Ringbandkerne für NF-Übertrager, Messwandler, Summenstromwandler
<b>Magnifer® 50 T</b>	Würfeltextrur, rechteckige Hystereseschleife	Remanenzverhältnis $B_r/B_H > 0,95$ (0,10 mm Banddicke)	Ringbandkerne für Drosseln, Speicherkern, Impulsübertrager
<b>Magnifer® 50 MH<sup>1)</sup></b>	Massivmaterial	$H_c < 8 \text{ A/m}$ ( $< 5 \text{ A/m}$ ) $\mu_4 > 100\,000$ (DC) $H_c < 2 \text{ A/m}$ $H_{max} < 160\,000$ (DC) korrosionsbeständig im Wechselklimatetest: feucht warm / kalt trocken	Stanzteile für Relais, Klein- und Großuhren, Schrittmotoren, induktive Drehsensoren und Magnetventile
<b>Magnifer® 50 B So 1</b>			

<sup>1)</sup> weitere Qualitätsstufen im Datenblatt bzw. in den Werkstofftabellen

Tabelle 7: Legierungen mit 48 % Nickel. Weitere Daten sind im Datenblatt Magnifer® 50 und in den Werkstofftabellen zu finden.

Werkstoff	Charakteristische Eigenschaften	Magnetische Eigenschaften	Anwendungen
<b>Magnifer® 4008</b> 48 % Ni, 8 % Cr Fe Rest	Hoher elektrischer Widerstand von $0,96 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$	$B_s = 0,8 \text{ T}$ $H_c < 5 \text{ A/m}$ $\mu_{max} > 100\,000$ (DC)	Stanzteile für Relais, Klein- und Großuhrenindustrie, Schrittmotoren, Abschirmungen

Tabelle 8: Legierungen mit 40 % Nickel.

Bei der Variante T erzeugt man bei der Schlussglühung eine ausgeprägte Würfeltextur, die zu einer nahezu rechteckigen Hystereseschleife führt. Das Verhältnis von Remanenz zur Sättigungsflussdichte ist dann höher als 0,95 (Tabelle 7).

Die Variante MH wird als Massivmaterial gefertigt. Sie wird in der Klein- und Großhrehenindustrie, für Magnetanker und Magnetjoche in Auslöserelais sowie für Schrittmotoren in Fotokameras als auch für induktive Drehsensoren im Automobilssektor (ABS) und in Magnetventilen eingesetzt (Bild 37). Die Variante B So1 ist durch eine spezielle Desoxidation korrosionsbeständiger in einem Wechselklimatetest feucht warm/kalt trocken [21, 22].

Ein weiteres Material für die Anwendung als Massivmaterial für Stanzteile für Relais, Klein- und Großhrehenindustrie und Schrittmotoren ist die Legierung Magnifer 4008 mit ca. 40 % Nickel und ca. 8 % Cr (Tabelle 8, Bild 37). Sie hat eine Sättigungsflussdichte von 0,8 T, die vergleichbar derjenigen von Legierungen mit hohem Nickelgehalt ist, allerdings mit etwas verringerten magnetischen Eigenschaften. Dafür ist diese Legierung deutlich kostengünstiger als die Legierungen mit hohem Nickelgehalt.

Die Legierung Magnifer 36 mit 36 % Nickel hat eine Sättigungspolarisation von 1,3 T und einen hohen spezifischen Widerstand von  $\rho = 0,75 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$ . Es gibt sie in zwei Varianten (Tabelle 9).

Die erste Variante hat einen sehr geringen Permeabilitätsanstieg in dem Feldstärkebereich von  $\hat{H} = 4 \text{ mA/cm}$  bis  $\hat{H} = 80 \text{ mA/cm}$ . Typische Anwendungsgebiete sind Kernbleche für NF-Übertrager, Drosseln und Transformatoren.

Bei der zweiten Variante werden höhere Permeabilitäten und geringere Koerzitivfeldstärken erreicht (Bild 31). Hauptanwendungsgebiete sind Massivteile für Relais, Polschuhe, sowie Bänder und Bleche für Abschirmungen, z. B. Tachometerabschirmungen. Ebenso können Wandlerkerne hergestellt werden.

Werkstoff	Charakteristische Eigenschaften	Magnetische Eigenschaften	Anwendungen
<b>Magnifer® 36</b> 36 % Ni, Fe Rest	Hoher elektrischer Widerstand von $0,75 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$	$B_s = 1,3 \text{ T}$	
<b>Magnifer® 36 K<sup>1)</sup></b>	Geringer Permeabilitätsanstieg	$\mu_{16} = 2\,300 \pm 200$ (50Hz) geringer Permeabilitätsanstieg zwischen $\hat{H} = 4$ bis $80 \text{ mA/cm}$	Kernbleche, Ringbandkerne für NF-Übertrager, Drosseln, Transformatoren
<b>Magnifer® 36 W<sup>1)</sup></b>	Höhere Permeabilität	$\mu_i \geq 5\,000$ (50Hz) (0,35 mm Bd.) $H_c < 15 \text{ A/m}$	Kernbleche, Ringbandkerne für NF-Übertrager, Massivteile für Relais, Polschuhe, Abschirmungen

<sup>1)</sup> weitere Qualitätsstufen im Datenblatt bzw. in den Werkstofftabellen

Tabelle 9: Legierungen mit 36 % Nickel. Weitere Daten sind im Datenblatt Magnifer® 36 und in den Werkstofftabellen zu finden.

# Legierungsherstellung, Verarbeitung und Schlussglühung

Werkstoff (Fe Rest)	Zugfestigkeit $R_m$ in N/mm <sup>2</sup>	Streckgrenze $R_{p0,2}$ Eigenschaften	Bruchdehnung $A_5$ in %	Härte HV5
<b>Magnifer® 36</b> 36 % Ni	630	600	5	200
<b>Magnifer® 50</b> 48 % Ni	750	700	4	200
<b>Magnifer® 75</b> 76 % Ni, 5 % Cu, 2 % Cr	860	800	5	270
<b>Magnifer® 7904</b> 80 % Ni, 5 % Mo	1 000	900	4	350

Tabelle 10: Mechanische Eigenschaften (Richtwerte) von Ni-Fe-Legierungen  
Zustand: hartgewalzt, Verformung  $\geq 50$  %.

Die Legierungen werden an Luft oder auch im Vakuum erschmolzen. Die Gießblöcke werden zu ca. 4 mm dickem Band warmgewalzt, danach gebeizt und ggf. geschliffen. Das Warmband wird dann kaltgewalzt. Je nach Endbanddicke und Endumformungsgrad müssen Zwischenglühungen eingeschoben werden. Es können Folien bis zu einer Dicke von 20  $\mu\text{m}$  hergestellt werden.

Aus dem Band lassen sich dann mittels der üblichen Bearbeitungsverfahren wie Drehen, Bohren, Fräsen, Biegen, Stanzen, Tiefziehen die benötigten Teile wie Ringbandkerne, Relaissteile, Kernbleche oder Abschirmungen herstellen. Die Tabellen 10 bis 12 zeigen die mechanischen Eigenschaften der Ni-Fe-Legierungen.

Werkstoff (Fe Rest)	Zugfestigkeit $R_m$ in N/mm <sup>2</sup>	Streckgrenze $R_{p0,2}$ Eigenschaften	Bruchdehnung $A_5$ in %	Härte HV5
<b>Magnifer® 36</b> 36 % Ni	440	290	30	130-150
<b>Magnifer® 50</b> 48 % Ni	530	280	40	120-130
<b>Magnifer® 75</b> 76 % Ni, 5 % Cu, 2 % Cr	600	290	40	140-160
<b>Magnifer® 7904</b> 80 % Ni, 5 % Mo	750	310	40	140-160

Tabelle 11: Mechanische Eigenschaften (Richtwerte) von Ni-Fe-Legierungen.  
Zustand: tiefziehbar, biegsam gegläht.

Nach Abschluss der Bearbeitung müssen die Ni-Fe-Legierungen einer Rekristallisations- (Schluss-)glühung unterzogen werden. Diese erfolgt je nach Anwendung bei Temperaturen von ca. 750 - 1300 °C in Spaltammoniak oder reinem Wasserstoff mit einem Taupunkt kleiner -40 °C, besser kleiner -60 °C. Danach können noch Magnetfeld- und/oder Anlassbehandlungen folgen. Nach der Schlussglühung dürfen die Teile nicht mehr plastisch verformt werden, da jede Verformung zu einer beträchtlichen Einbuße an magnetischen Eigenschaften führt.

Werkstoff (Fe Rest)	Zugfestigkeit $R_m$ in N/mm <sup>2</sup>	Streckgrenze $R_{p0,2}$ Eigenschaften	Bruchdehnung $A_5$ in %	Härte HV5
<b>Magnifer® 36</b> 36 % Ni		200	40	90-110
<b>Magnifer® 50</b> 48 % Ni	530	220	40	100-120
<b>Magnifer® 75</b> 76 % Ni, 5 % Cu, 2 % Cr	580	220	40	110-130
<b>Magnifer® 7904</b> 80 % Ni, 5 % Mo	580	250	40	110-130

Tabelle 12: Mechanische Eigenschaften (Richtwerte) von Ni-Fe-Legierungen  
Zustand: schlussgeglüht.

Es ist bei allen Herstellungs- und Verarbeitungsschritten auf eine Minimierung von Gitterfehlern zu achten.

Die Zahl der Versetzungen und Korngrenzen kann man durch höchstmögliche Glühtemperatur (Korngröße steigt), vorsichtige Abkühlung und Handhabung des schlussgeglühten Materials, z. B. durch Einlegen in Schutztröge (Vermeidung von Verformungen und inneren Spannungen) verringern.

Nichtmagnetische Einschlüsse wie Schlacketeilchen und Oxide müssen unbedingt vermieden werden, d. h. der Gehalt an Elementen wie O, C, S, Al, Mg ... sollte so gering wie möglich sein. Durch entsprechende Desoxidation, Spülen der Schmelze mit Argon und Entgasung unter Vakuum lässt sich sehr reines Material herstellen. Die Verunreinigungen, insbesondere durch S und C, werden bei der Schlussglühung unter reinem Wasserstoff noch verringert.

# Anwendungen

## Fehlerstromschutzschalter

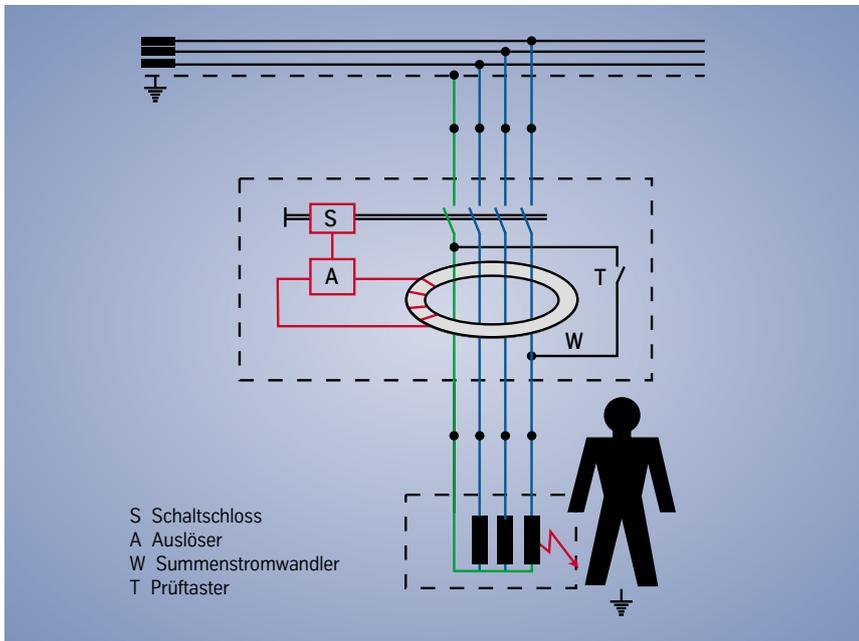


Bild 39: Aufbau eines Fehlerstromschutzschalters (nach [24]):

Ein Fehlerstromschutzschalter dient dem Schutz von Personen und Geräten in elektrischen Anlagen. Er besteht aus einem Summenstromwandler zur Registrierung der Fehlerströme, einem Auslöserelais und einem Schaltschloss (Bild 39) [24].

Durch den Summenstromwandler werden alle stromführenden Leitungen der Anlage geführt. Dann ist im normalen fehlerfreien Betrieb die Summe der zu- und abfließenden Ströme gleich Null. Fließt jedoch wegen eines Isolationsfehlers ein Teil des Stromes über die Erde ab, so fehlt dieser Strom im Summenstromwandler und der Wandler wird entsprechend dem Fehlerstrom magnetisiert. In der Sekundärwindung wird eine Spannung induziert. Im Sekundärkreis ist das Auslöserelais angeschlossen, das beim Auslösen das Schaltschloss betätigt.

Da ein solcher Summenstromwandler nicht nur auf sinusförmige Ströme, sondern auch auf Pulsströme reagieren soll, wird für ihn ein Kern mit flacher Hystereseschleife benötigt (siehe Kapitel „Flache Schleife“). Zusätzlich wird noch eine geringe Temperaturabhängigkeit zwischen  $-25\text{ °C}$  und  $80\text{ °C}$  gefordert. Die zum Auslösen des Auslöserelais nötige Leistung wird direkt vom Fehlerstrom zur Verfügung gestellt und vom Summenstromwandler übertragen. Mit Hilfe eines Kondensators wird deshalb der induktive Scheinwiderstand von Auslöserelais und Summenstromwandler kompensiert.

Je nach Empfindlichkeit des Fehlerstromschutzschalters kommen für den Kern des Summenstromwandlers unterschiedliche Materialien in Betracht. So wird für die Fehlerstromschutzschalter mit  $300\text{ mA}$  bzw.  $500\text{ mA}$  Nennfehlerstrom Magnifer 53 bzw. Magnifer 50 (je nach Auslegung des Auslösekreises) eingesetzt. Für Nennfehlerströme von  $30\text{ mA}$  und  $10\text{ mA}$  wird das hochpermeable Magnifer 7904 eingesetzt.

Ein Relais ist eine elektromechanische Schalteinheit mit der Aufgabe, einen geringen Auslösestrom in eine mechanische Bewegung umzusetzen. Für viele Anwendungsfälle wird Reineisen oder Fe mit 3 % Si eingesetzt, da es preisgünstiger ist. In Fällen wie den netzspannungsunabhängigen Fi-Schaltern ist aber ein Relais mit einer sehr geringen elektrischen Auslöseleistung (z. B. ca. 0,1 bis 0,2 mW) erforderlich. Dafür werden Nickel-Eisen-Legierungen eingesetzt.

In der Regel wird ein gepoltes Relais verwendet [4, 25, 26]. Es besteht aus einem weichmagnetischen Kreis aus Anker und Joch. Dieser wird durch einen Dauermagneten so vormagnetisiert, dass der Anker auf dem Joch gehalten wird. Ein Spulenstrom  $I_a$ , der den magnetischen Fluss des Dauermagneten schwächt, bewirkt dann den Abfall des Ankers und somit das Auslösen des Relais. Die eingebrachte elektrische Leistung wird durch die Energiespeicherung der Feder um ein Vielfaches vergrößert (Bild 40).

Bei angezogenem Klappanker befindet sich das Relais in Zustand 1 in Bild 41. Durch den Spulenstrom  $I_a$  wird die magnetische Feldstärke bis  $H_U$  verringert (Zustand 2), der Klappanker fällt ab (Zustand 3), der Strom wird unterbrochen und damit auch der Fehlerstrom (Zustand 4). Damit sich das Relais öffnet, muss die magnetische Haltekraft  $F_M$  geringer sein als die Haltekraft der Feder  $F_F$  [26].

$$F_M = B^2 A_{Fe} / 2\mu_0 \quad \begin{array}{l} A_{Fe} \text{ Querschnittsfläche} \\ \mu_0 \text{ magnetische Feldkonstante} \end{array}$$

Zugleich muss  $F_M - F_F$  im stromlosen Zustand groß genug sein, um den Auslöser unempfindlich gegen Erschütterungen und Fremdfelder zu machen. D. h. die magnetische Flussdichte  $B$  und die Differenz  $\Delta B$  zum stromführenden Zustand muss möglichst groß sein. Gleichzeitig ist eine niedrige Auslöseempfindlichkeit gefordert, die einen kleinen Auslösestrom  $I_a \sim H_p - H_U$  bedeutet. D. h. mit einem möglichst kleinem  $H_p - H_U$  muss ein großes  $\Delta B$  erzeugt werden (Bild 41). Der magnetische Kreis muss also eine möglichst große effektive Permeabilität  $\mu^*$  haben.

$$B = \mu_0 \mu^* H \quad 1/\mu^* = 1/\mu + d/l_{Fe}$$

$d$  Gesamtluftspalt,

$l_{Fe}$  Länge des magnetischen Kreises

$\mu$  Permeabilität des Materials

Das bedeutet sehr kleine Luftspalte im Bereich von ca. 1  $\mu\text{m}$  und hohe Permeabilitäten für das Material von Anker und Joch. Der Dauermagnet

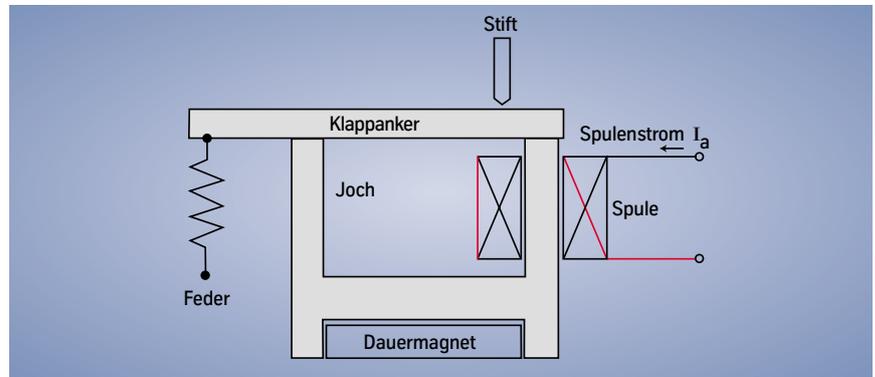


Bild 40: Schematischer Aufbau eines polarisierten Relais.

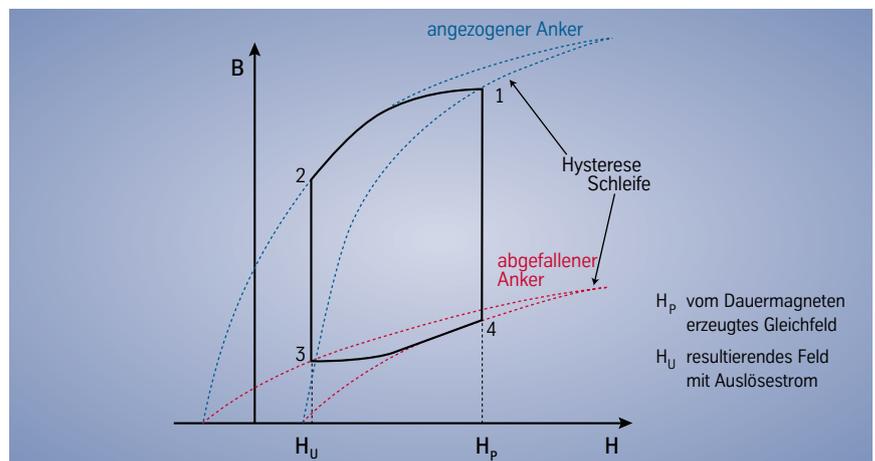


Bild 41: B(H) Verlauf des weichmagnetischen Kreises eines Relais.

(geringe Permeabilität) wird deshalb von einem Nebenschluss überbrückt, so dass der Auslösefluss nicht über ihn fließen muss. Zugleich wird dadurch auch die Gefahr des Ab- und Ummagnetisierens des Dauermagneten vermieden.

Für Anker und Joch ist ein Material mit hoher Permeabilität und kleiner Koerzitivfeldstärke bei gleichzeitig hoher Sättigungsflussdichte erforderlich. Das Material muss seine Eigenschaften stabil über einen langen Zeitraum halten. Zusätzlich muss das Material mechanisch genügend hart sein, damit die Polflächen beim Schalten nicht verformt werden. Des Weiteren müssen die verwendeten Werkstoffe ein ausreichend gutes Korrosionsverhalten in einem Wechselklima nach DIN VDE 0664 zeigen. Die folgende Tabelle 13 fasst die eingesetzten Werkstoffe zusammen.

Werkstoff	$B_s$ in T	$H_c$ in A/m	$\mu_{max}$ (DC, 1mm)
Magnifer® 50 MH oder B So 1	1,5	< 5	100 000
Magnifer® 7904	0,74	< 1	350 000
Magnifer® 77 TiNb So	0,7	< 2	250 000

Tabelle 13: Werkstoffe für Relais.

# Anwendungen

## Messwandler

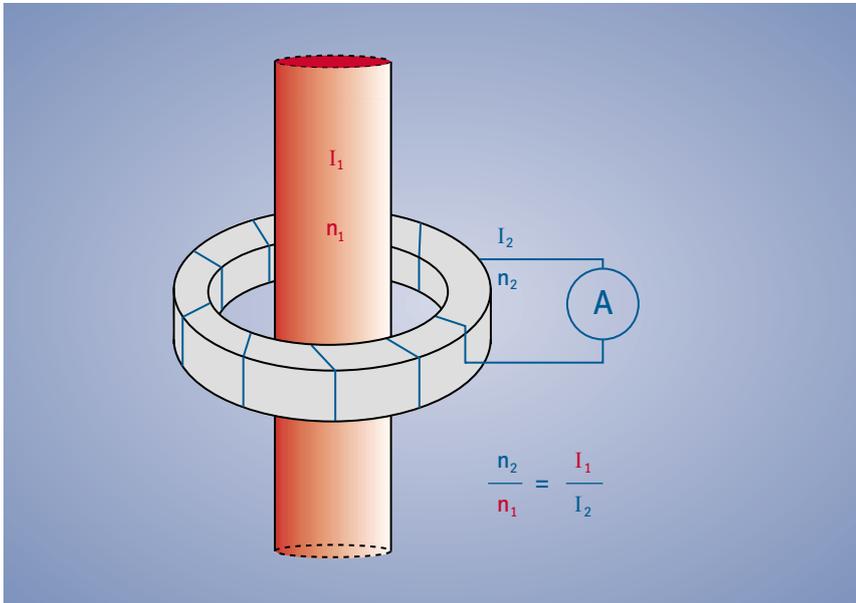


Bild 42: Prinzipieller Aufbau eines Messwandlers.

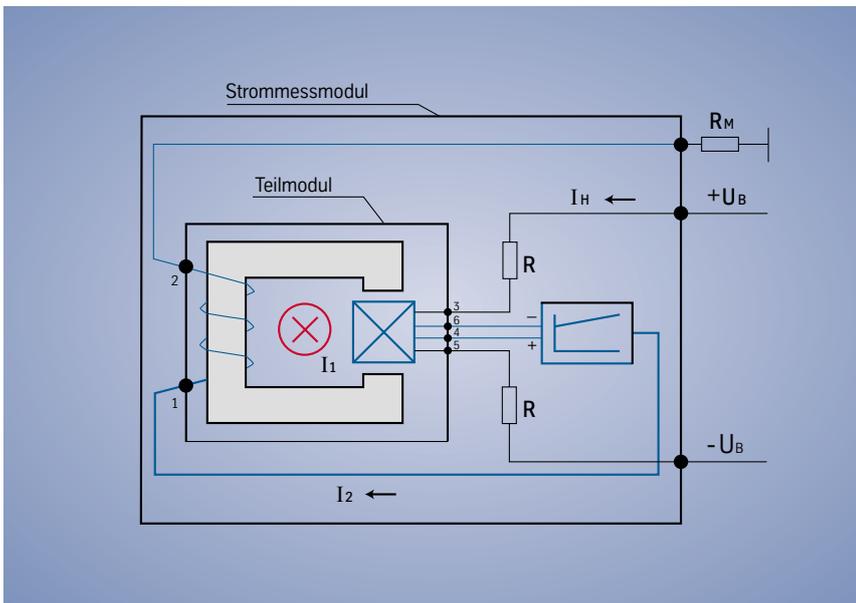


Bild 43: Strommessmodul mit Hallsonde und Kompensationswicklung.



Bild 44: Strommessmodul

Messwandler braucht man, um Ströme oder Spannungen in Energieverteilungsnetzen auf von Niederspannungsmessgeräten messbare Werte zu übersetzen [27]. Das Verhältnis der Ströme ist dabei für den idealen Wandler dem Verhältnis der Windungszahlen umgekehrt proportional.

$$n_2/n_1 = I_1/I_2 \quad (\text{siehe Bild 42})$$

In der Realität hat man die Streuung, die Verluste und die anliegende Last zu berücksichtigen, so dass das Verhältnis kleiner ist. Bei der Übersetzung der zu messenden Werte muss die benötigte Genauigkeit gewährleistet sein.

Für das verwendete Magnetmaterial heißt das, dass die Abhängigkeit der Permeabilität von der Flussdichte zur Erzielung eines linearen Übertragungsverhaltens und damit großer Genauigkeit möglichst konstant sein sollte. Hohe Permeabilität und große Sättigungsflussdichte ermöglichen eine kleine Bauform. Die Streuung vermindert man durch die Verwendung von Ringbandkernen.

Für diesen Anwendungsfall haben die Werkstoffe Magnifer 75 und Magnifer 53 die größte Bedeutung erlangt. In vielen Fällen wird Magnifer 75 auch in Kombination mit Fe 3 % Si eingesetzt. Die Ni-Fe Kerne liefern dann die hohe Permeabilität bei niedriger Aussteuerung, die Kerne aus Fe 3 % Si die hohe Aussteuerbarkeit.

Mit Messwandlern wie in Bild 42 skizziert lassen sich nur Wechselströme messen. In modernen Stromrichterschaltungen, wie sie z. B. in der Antriebstechnik und der Elektrowärme eingesetzt werden, treten Mischströme auf, die sowohl Gleich- als auch Wechselanteile beinhalten. Zur Messung solcher Ströme werden Strommessmodule eingesetzt (Bild 44) [28, 29]. Bei deren Aufbau wird ein Hallfeldsensor verwendet (Bild 43). In einer von einem Magnetfeld durchsetzten Hallsonde wird eine Spannung erzeugt, die proportional diesem Magnetfeld ist. Mit der Hallspannung wird ein elektronischer Verstärker angesteuert, der in eine zusätzliche Wicklung auf dem Kern einen Strom einspeist. Dieser kompensiert das von dem zu messenden Strom erzeugte Magnetfeld zu Null. Dann ist  $I_2 = n_1 I_1/n_2$  erfüllt. Da die Flussdichte auf Null kompensiert wird, arbeitet der Kern in der Nähe der Koerzitivfeldstärke, die einen Offset verursacht. Aus diesem Grunde eignen sich für diese Anwendung besonders hochpermeable Bandkerne aus den hochnickelhaltigen Ni-Fe-Legierungen.

Zur Ansteuerung von Thyristoren werden in der Leistungselektronik Impulsübertrager (Bild 45) eingesetzt. Sie transformieren die Steuerspannungsimpulse auf das benötigte Maß und stellen zusätzlich eine Potentialtrennung zwischen dem Steuer- und dem Leistungsteil sicher [28, 29]. Normalerweise müssen unipolare Rechteckspannungsimpulse übertragen werden. Der Magnetkern wird dann aus dem Remanenzpunkt um einen bestimmten magnetischen Flussdichtehub  $\Delta B$  angesteuert. Es gilt [27]:

$$-n_2 A_{Fe} B(t) = \int U dt$$

$n_2$  Sekundärwindungszahl  
 $U$  Sekundärspannung  
 $A_{Fe}$  Querschnittsfläche  
 $t$  Zeit

Ein großer magnetischer Flussdichtehub ermöglicht bei vorgegebener Spannungszeitfläche kleine Kernquerschnitte bzw. geringe Windungszahlen. Das ermöglicht eine kleine Bauform. Zusätzlich wird dadurch eine sehr geringe Kopplungskapazität und eine kleine Streuinduktivität erreicht. Das ist die Voraussetzung für einen steilen Anstieg des Zündstromes. Die Hauptinduktivität  $L_H$  des Übertragers errechnet sich zu:

$$L_H = n_2^2 \mu_0 \mu_p A_{Fe} / l_{Fe}$$

$\mu_p$  Impulsspermeabilität  
 $l_{Fe}$  Länge des magnetischen Kreises

Die für die geforderte Spannungszeitfläche des Übertragers benötigte Windungszahl  $n_2$  muss so groß sein, dass die Hauptinduktivität auf einen Mindestwert eingestellt werden kann. Dafür ist eine hohe Impulsspermeabilität vorteilhaft.

Für Impulsübertrager benötigt man also einen Werkstoff mit einem großen nutzbaren magnetischen Flussdichtehub und einer hohen Impulsspermeabilität wie Magnifer 54 F mit sehr flacher Schleife.



Bild 45: Leiterplatte mit Impulsübertragern aus Magnifer®-Legierungen.

# Anwendungen

## Speicherdrosseln

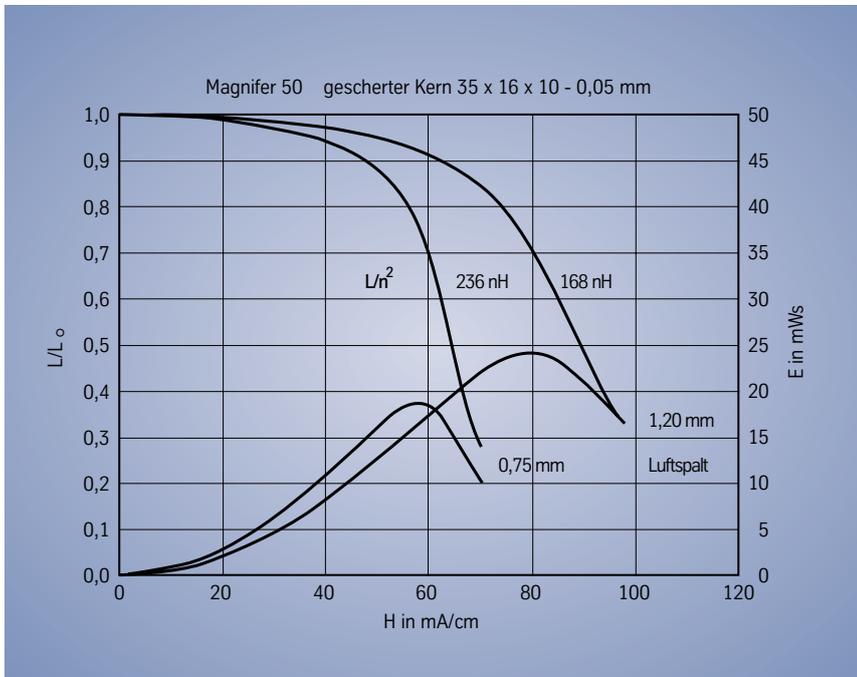


Bild 46: Die Induktivität  $L$  eines gescherter Kernes (35 x 16 x 10 - 0,05 mm) aus Magnifer<sup>®</sup> 50 und die in ihm gespeicherte Energie  $E$ . Zur besseren Vergleichbarkeit ist  $L$  auf die Induktivität  $L_0$  bei  $I = 0$  normiert.

Speicherdrosseln werden in getakteten Stromversorgungen zur Glättung des Ausgangsgleichstromes eingesetzt. Sie werden von einem Gleichstrom  $I$ , dem ein Wechselstrom überlagert ist, durchflossen. Hierbei soll die Induktivität  $L$  der Drossel bis zum Nennstrom möglichst konstant verlaufen [28, 31].

$$L = n_2 \mu_0 \mu_\Delta A_{Fe} / l_{Fe}$$

- $\mu_\Delta$  Differentielle Permeabilität bei  $H = n I / l_{Fe}$
- $l_{Fe}$  Länge des magnetischen Kreises
- $n$  Windungszahl

Diese Forderung kann nur mit gescherter Kernen erfüllt werden. Die im Kern gespeicherte Energie  $E$  beträgt:

$$E = \frac{1}{2} I^2 L$$

Bild 46 zeigt, wie die im Kern gespeicherte Energie  $E$  und die Induktivität von der Gleichfeldstärke abhängen.

Die speicherbare Energie nimmt mit der Größe des Luftspaltes zu. Dies kann jedoch nur soweit genutzt werden, wie der Abfall der Induktivität durch den Gleichstrom innerhalb der erlaubten Grenzen liegt. Bei vorgegebenem maximal zulässigem Induktivitätsabfall wächst die Speicherenergie mit der Größe des Luftspaltes.

Der Werkstoff für das Kernmaterial muss eine hohe Sättigungsflussdichte bei gleichzeitig geringem Ummagnetisierungsverlust aufweisen. Es wird dafür Magnifer 50 eingesetzt.

# Anwendungen

## Verzerrungsarme Übertrager für Modems

Mit Hilfe eines Modems können zwei Computer über das normale analoge Telefonnetz kommunizieren. Leider ist der Frequenzbereich dieses Netzes beschränkt, so dass höhere Übertragungsraten als 2 400 Baud nur mit besonderen Kodierungstechniken erreicht werden können. Dafür ist es erforderlich, besonders verzerrungsarme Übertrager herzustellen. Verzerrungsarm heißt in diesem Fall, dass ein übertragenes Sinussignal nur einen sehr geringen Anteil an Oberwellen enthalten darf. Als „Gesamte harmonische Verzerrung“ THD (Total Harmonic Distortion) wird der Logarithmus des Verhältnisses der Leistungen  $P$  der Oberwellen zu der der Grundwelle bezeichnet:

$$\text{THD} = 10 \log (P_{\text{Oberwellen}} / P_{\text{Grundwellen}})$$

Für diese Übertrager werden die hochnickelhaltigen Legierungen eingesetzt. Die Verzerrungen lassen sich durch Maßnahmen wie kleine Banddicken und geringe Flussdichten verringern. Bild 47 zeigt eine typische Kurve der „Gesamten harmonischen Verzerrung“ als Funktion der Frequenz für Magnifer 7904.

Für Modems mit Baudraten von 56 kBaud sind z. B. bei 200 Hz THD Werte von kleiner  $-80$  dB erforderlich.

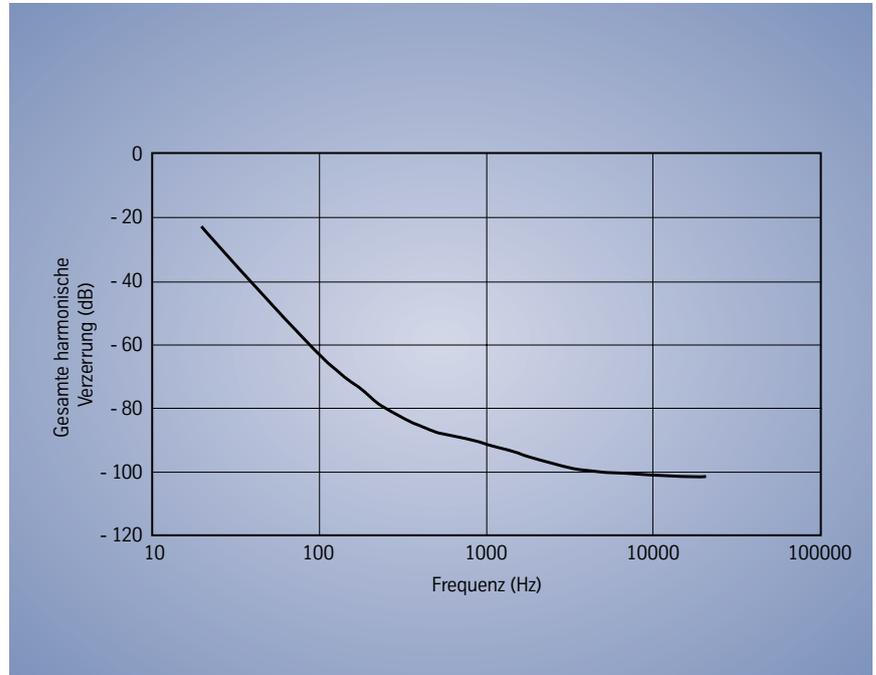


Bild 47: Typische Kurve der „Gesamten harmonischen Verzerrung“ als Funktion der Frequenz für Magnifer® 7904 gemessen an einem Übertrager-Kernblechpaket ED-8 aus der Banddicke 0,20 mm.

# Anwendungen Abschirmungen

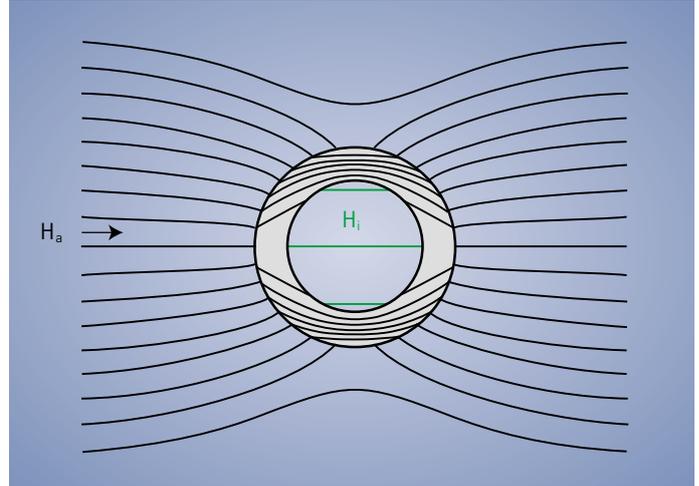
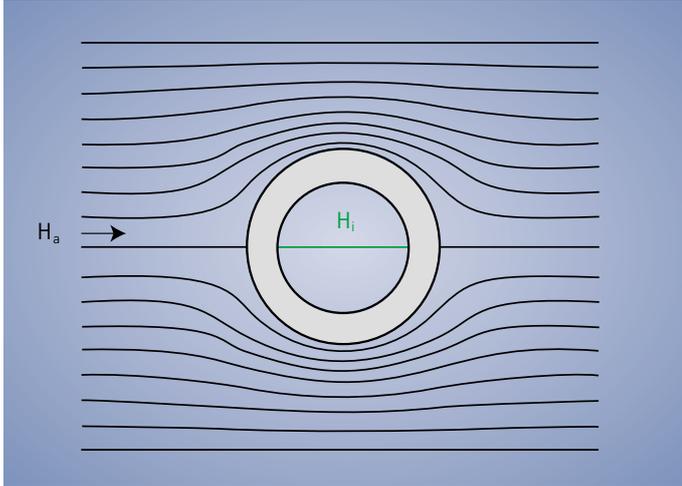


Bild 48: Feldlinienverlauf bei einer zylindrischen Abschirmung für den Fall hoher Frequenzen.

Bild 49: Feldlinienverlauf bei einer zylindrischen Abschirmung für den Fall eines Gleichfeldes.

Werkstoff	Zusammensetzung	S
Magnifer 36	36 % Ni, Rest Fe	60
Magnifer 50	48 % Ni, Rest Fe	150
Magnifer 7904	80 % Ni, 5 % Mo, Rest Fe	1 000

Tabelle 14: Abschirmfaktor S einiger weichmagnetischer Werkstoffe gemessen an Zylindern (Länge 300 mm, Durchmesser: 80 mm) der Wanddicke 0,35 mm im Querfeld bei 200 A/m.

Geräte, die Störungen erzeugen, sowie störungsempfindliche Geräte in Fremdfeldern müssen abgeschirmt werden.

Die Schirmwirkung wird durch den Abschirmfaktor S beschrieben [32].

$$S = |H_a / H_i| \quad \begin{matrix} H_i & \text{Feld im Inneren der Abschirmung} \\ H_a & \text{Störfeld vor Einbringen} \\ & \text{der Abschirmung} \end{matrix}$$

(In [32] wird der Kehrwert Q bzw.  $a_s = -\ln |Q|$  verwendet.)

Die Wirkungsweise einer magnetischen Abschirmung soll am Beispiel eines (idealerweise unendlich langen) Rundzylinders mit dem Radius R und der Wanddicke d verdeutlicht werden (Bilder 48 und 49). Das Störfeld  $H_a$  laufe senkrecht zur Zylinderachse (Querfeld). Es werden zwei Grenzfälle beschrieben:

a) Frequenz  $f \rightarrow \infty$  (oder  $d \gg \delta$ )

S ergibt sich näherungsweise zu:

$$S = \frac{1}{2\sqrt{2}} \cdot \frac{R}{\mu\delta} \cdot \exp\left(\frac{d}{\delta}\right) \quad \delta = \sqrt{\frac{2}{2\pi f \mu_0 \kappa}}$$

$\kappa$  spezifische elektrische Leitfähigkeit

$\delta$  ist die Eindringtiefe des Feldes in die Abschirmung. Bild 48 zeigt den Feldlinienverlauf. Bei hohen Frequenzen beruht die Schirmwirkung auf

den vom Störfeld induzierten Wirbelströmen, die das Störfeld aus der Abschirmung verdrängen. In diesem Fall ist eine gute elektrische Leitfähigkeit der Abschirmung wichtig, weshalb für die Abschirmung von Feldern hoher Frequenz häufig Kupfer oder Aluminium eingesetzt wird.

b) Frequenz  $f \approx 0$  (oder  $d \ll \delta$ ), und  $\mu \gg 1$

S ergibt sich dann näherungsweise zu:

$$S = 1 + \frac{1}{2} \mu d/R$$

Der Feldlinienverlauf ist in Bild 49 skizziert. Die Schirmwirkung beruht darauf, dass der magnetische Fluss den Weg über das hochpermeable und damit magnetisch leitende Material nimmt. Die Feldlinien münden wegen  $\mu \gg 1$  außen nahezu senkrecht in den Abschirmzylinder. Im Abschirmzylinder laufen sie dann nahezu parallel zur Oberfläche des Zylinders. Im Innern ist  $H_i$  homogen und parallel zum Störfeld  $H_a$  ohne Anwesenheit der Abschirmung.

Die Schirmwirkung steigt mit der Permeabilität. Für diesen Fall werden hochpermeable Werkstoffe, insbesondere auch Nickel-Eisen-Werkstoffe eingesetzt.

Für Magnifer 36, Magnifer 50 und Magnifer 7904 sind Abschirmfaktoren an Zylindern mit der Wanddicke 0,35 mm in Tabelle 14 zusammengestellt.

Abschirmungen aus Nickel-Eisen-Legierungen werden z. B. für Tonköpfe, Mikrophone, Sensoren, Elektronenstrahlröhren, Übertrager eingesetzt. Darüber hinaus werden z. T. komplette Untersuchungsräume in Krankenhäusern, in denen hochempfindliche Messungen durchgeführt werden, mit Nickel-Eisen-Legierungen ausgekleidet.

Es gibt 2 Hauptgruppen von weichmagnetischen Nickel-Eisen-Legierungen:

Die eine Gruppe beinhaltet die Legierungen mit mittlerem Nickelgehalt, deren wichtigste Vertreter die mit 48 % Nickel, Rest Eisen - Magnifer 50 - und die mit ca. 55 % Nickel, Rest Eisen - Magnifer 53 - sind.

Die zweite Gruppe sind die Legierungen mit hohem Nickelgehalt, deren wichtigste Vertreter die mit 80 % Nickel, ca. 5 % Molybdän und Rest Eisen - Magnifer 7904 - und die mit 76 % Nickel, 2 % Chrom, 5 % Kupfer und Rest Eisen - Magnifer 75 - sind.

Sie werden eingesetzt:

- für Ringbandkerne in Summenstromwandler für Fi-Schalter, in Messwandlern
- für Kernbleche in NF-Übertragern, in elektronischen Di-Schaltern, in Übertragern für Modems
- für Stanz-Biegeteile in Relais, in Schrittmotoren, in Magnetventilen, in induktiven Drehsensoren, für Rotorbleche, Statorbleche, in Magnetköpfen
- für Abschirmungen, in Speicherdrosseln, Impulsübertrager und Thyristorschutzdrosseln.

# Liste der verwendeten Größen und Einheiten

Größe		Einheit	Bemerkung
Konzentration		%	Angaben in % sind – wenn nicht anders gekennzeichnet – Masse-%
a	Gitterkonstante	m Meter	
A	Querschnittsfläche	m <sup>2</sup>	
A <sub>s</sub>	Bruchdehnung	%	
B	Magnetische Flussdichte	T Tesla mT	1 T = Vs/m <sup>2</sup> 1mT = 0,001 T
B <sub>s</sub>	Sättigungsflussdichte	T	
B <sub>M</sub>	Magnetische Flussdichte $\approx B_s$	T	
B <sub>0</sub>	Magnetische Flussdichte im Vakuum	T	
B <sub>R</sub>	Remanenz	T	
$\hat{B}$	Spitzenwert der magnetischen Flussdichte	T	
$\hat{B}_{\text{sin}}$	Spitzenwert der magnetischen Flussdichte bei sinusförmiger Feldstärke	T	
$\Delta B$	Magnetische Flussdichteänderung bzw. magnetischer Flussdichtehub bei pulsierender magnetischer Feldstärke	T	
$\Delta B_{\text{stat}}$	Magnetischer Flussdichtehub bei einweggleichgerichteter sinusförmiger magnetischer Feldstärke	T	
$\Delta B_{\text{dyn}}$	Magnetischer Flussdichtehub bei zweiweggleichgerichteter sinusförmiger magnetischer Feldstärke	T	
d	Luftspalt oder Wanddicke	m	
E	Energie	J Joule	
E <sub>k</sub>	Kristallanisotropieenergie	J	
E <sub>u</sub>	Uniaxiale Anisotropieenergie	J	
E <sub>o</sub>	Spannungsanisotropieenergie	J	
F	Kraft	N Newton	
f	Frequenz	Hz Hertz	1 Hz = 1/s
H	Magnetische Feldstärke $H = n_1 I_1 / l_{\text{Fe}}$	A/m, mA/cm	1 A/m 10 mA/cm
$\hat{H}$	Spitzenwert der magnetische Feldstärke	A/m	
$\hat{H}_{\text{sin}}$	Spitzenwert einer sinusförmigen magnetischen Feldstärke	A/m	
$\Delta H_{\text{stat}}$	Einweggleichgerichtete sinusförmige magnetische Feldstärke	A/m	
$\Delta H_{\text{dyn}}$	Zweiweggleichgerichtete sinusförmige magnetische Feldstärke	A/m	
HV5	Vickershärte bei 49 N Prüfkraft		
H <sub>c</sub>	Koerzitivfeldstärke	A/m	
H <sub>i</sub>	Feld im Inneren der Abschirmung	A/m	
H <sub>a</sub>	Störfeld vor Einbringen der Abschirmung	A/m	
I	Elektrischer Strom	A Ampere	
I <sub>1</sub>	Primärstrom	A Ampere	
I <sub>2</sub>	Sekundärstrom	A Ampere	
I <sub>A</sub>	Austauschintegral	J	
J	Magnetische Polarisierung (Induktion)	T Tesla	1 T = Vs/m <sup>2</sup>

Größe		Einheit	Bemerkung
$J_s$	Sättigungspolarisation	T Tesla	1 T = Vs/m <sup>2</sup>
k	Boltzmann'sche Konstante	J/°C	1,38054 10 <sup>-23</sup> J/°C
K	Anisotropiekonstante, einzeln oder Summe	J/m <sup>3</sup> Ws/cm <sup>3</sup>	1 J/m <sup>3</sup> = 10 <sup>6</sup> Ws/cm <sup>3</sup>
$K_1, K_2$	Kristallanisotropiekonstanten	J/m <sup>3</sup> Ws/cm <sup>3</sup>	1 J/m <sup>3</sup> = 10 <sup>6</sup> Ws/cm <sup>3</sup>
$K_U$	Uniaxiale Anisotropiekonstanten	J/m <sup>3</sup>	
l	Länge	m Meter cm Zentimeter mm Millimeter µm Mikrometer	1 cm 0,01m 1 mm 10 <sup>-3</sup> m 1 µm 10 <sup>-6</sup> m
$\Delta l$	Längenänderung	m	
$l_0$	Ausgangslänge	m	
$l_{Fe}$	Eisenweglänge	m	
L	Induktivität $L = n^2 \mu_0 \mu A_{Fe} / l_{Fe}$	H Henry	1 H = 1 Tm <sup>2</sup> /A = 1 Vs/A
n	Windungszahl	-	
$n_1$	Primärwindungszahl	-	
$n_2$	Sekundärwindungszahl	-	
P	Leistung	W Watt	1W = 1 VA = 1 J/s
Q	Kehrwert des Abschirmfaktors S	-	
r	Reinheitsgrad (Kehrwert des Volumenanteils der Einschlüsse)	in %	nach JIS
R	Radius	m	
$R_m$	Zugfestigkeit	N/m <sup>2</sup> MPa Megapascal	1 MPa = 10 <sup>6</sup> N/m <sup>2</sup>
$R_{p0,2\%}$	0,2 % Dehngrenze	MPa Megapascal	
S	Spinquantenzahl	-	
S	Abschirmfaktor $S =  H_a / H_i $	-	
t	Zeit	h Stunde s Sekunde	h = 3600 s
$t_p$	Impulsdauer	s Sekunde µs	1 µs = 0,001s
T	Temperatur	°C Celsius	
$T_c$	Curietemperatur	°C Celsius	
$T_E$	Entnahmetemperatur	°C Celsius	
$T_M$	Messtemperatur	°C Celsius	
THD	Gesamte harmonische Verzerrung (Total Harmonic Distortion) $THD = 10 \log ( P_{\text{Oberwellen}} / P_{\text{Grundwelle}} )$	-	
U	Elektrische Spannung	V Volt	
V	Volumeneinheit	m <sup>3</sup> Meter <sup>3</sup>	
$w_A$	Austauschenergie	J	
$\alpha_i$	jeweilige Kosinus des Winkels zwischen der Magnetisierungsrichtung und den Würfelkanten	-	
$\delta$	Blochwanddicke oder Eindringtiefe	m, µm	
$\kappa$	Spezifische Leitfähigkeit	1/Ωm	
$\lambda$	Magnetostruktionskonstante	-	

Größe		Einheit	Bemerkung
$\lambda_{100}$	Magnetostruktionskonstante in Würfelkantenrichtung	-	
$\lambda_{111}$	Magnetostruktionskonstante in Raumdiagonalenrichtung	-	
$\lambda_s$	Mittlere Magnetostruktionskonstante	-	
$\mu$	Relative Permeabilität	-	
$\mu_0$	magnetische Feldkonstante	Tm/A	$1,257 \cdot 10^{-6}$ Tm/A
$\mu_a$	Amplitudenpermeabilität = $B/\mu_0 H$	-	
$\mu_i$	Anfangspermeabilität = Amplitudenpermeabilität für $\hat{H} \rightarrow 0$	-	
$\mu_4$	Amplitudenpermeabilität bei 4 mA/cm	-	
$\mu^*$	effektive Permeabilität des magnetischen Kreises (mit Luftspalten)	-	$1/\mu^* = 1/\mu + d/l_{Fe}$
$\mu_{max}$	Maximalpermeabilität	-	
$\mu_p$	Impulspermeabilität = $\Delta B/\mu_0 \Delta H$ für einen H-Impuls der Zeit $t_p$ , Impulsabstand $\gg t_p$	-	
$\mu_\Delta$	Differentielle Permeabilität = $dB/\mu_0 dH$	-	
$\varphi$	Winkel zwischen zwei benachbarten magnetischen Momenten, bzw. Winkel zwischen Vorzugsrichtung und Magnetisierungsrichtung	-	
$\rho$	Spezifischer elektrischer Widerstand	$\Omega \text{ mm}^2/\text{m}$	
$\sigma$	Zugspannung	$\text{N}/\text{m}^2$	

- 1) S. Chikazumi, Physics of Magnetism. Krieger-Verlag, Malabar Florida.
- 2) E. Kneller, Ferromagnetismus, Springer Verlag, Berlin/Göttingen/Heidelberg (1962).
- 3) IEC 404-6 oder DIN IEC 68(CO) 39 (1984), Verfahren zur Messung der magnetischen Eigenschaften von isotropen weichmagnetischen Nickel-Eisen-Legierungen der Typen E1, E3, E4
- 4) C. Heck, Magnetische Werkstoffe und ihre Anwendung, Hütig Verlag, (1967)
- 5) F. Hegg, Arch. Sci. phys. nat. 29 (1910), S. 592 ff; 30 (1910), Seite 15 ff.
- 6) K.E. Volk, Nickel- und Nickel-Legierungen, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York (1970) S. 55 ff.
- 7) R.M. Bozorth, J.G. Walker, Phys. Rev. 89 (1953), S. 624 ff
- 8) I.M. Puzei, Fizika Metallov. i. Metallovedenie 11 (1961), S. 686 ff
- 9) R.C. Hall, J. Appl. Phys. 30 (1959), S. 816 ff.
- 10) I.M. Puzei, B.V. Molotilov, Izvestije Akademie Nauk SSR., Ser. Fiz. 22 (1958), S. 1244 ff.
- 11) F. Pfeifer, C. Radeloff, JMMM 19 (1980), S. 190 ff.
- 12) F. Pfeifer, Z. Metallkunde 57 (1966), S. 295 ff.
- 13) F. Pfeifer, H. Wegerle in Berichte der Arbeitsgemeinschaft, Magnetismus Bd. 1, Verlag Stahleisen Düsseldorf (1983), S. 120 ff.
- 14) G.E.R. Schulze, Metallphysik, Akademie Verlag Berlin (1974).
- 15) G. Gottstein, Rekristallisation metallischer Werkstoffe, Deutsche Gesellschaft für Metallkunde (1984).
- 16) B. Erpenbeck, Diplomarbeit, FH - Dortmund (1990)
- 17) G.W. Rathenau, J.F.H. Custers, Philips Res. Rep 4 (1949), S. 241 ff
- 18) E. Adler, H.G. Baer, Berichte der AG Magnetismus (1959) (AG Magnetismus, Düsseldorf 1960), S. 190 ff.
- 19) F. Pfeifer, Z. Metallkunde 57 (1966), S. 240 ff.
- 20) H. Hattendorf, B. Erpenbeck, Relation between texture and magnetic annealing of a 55 % Ni-Fe alloy, JMMM 112 (1992), S. 29ff.
- 21) B. Gehrman, H. Hattendorf, A. Kolb-Telieps, W. Kramer, W. Möttgen, Corrosion behaviour of soft magnetic iron-nickel alloys, Materials and Corrosion 48 (1997), S. 535ff.
- 22) H. Hattendorf, A 48 % Ni-Fe alloy of low coercivity and improved corrosion resistance in a cyclic damp heat test, JMMM 231 (2001), S. L29 ff.
- 23) E.T. Ferguson, J. Appl. Phys. 29 (1958), S. 252 ff.
- 24) G. Morgenthaler, L. Schreyer, R. Solleder, Fehlerstrom-Schutzschalter für eine zukunftssichere Schutztechnik, etz - Elektronische Zeitung 113 (1992), S. 10 – 17.
- 25) A. Heitbrink, Dissertation, Universität Duisburg, (1993).
- 26) H. Sauer, Relaiseteil-Lexikon, Hütig Verlag, Heidelberg (1985).
- 27) K. Küpfmüller, Einführung in die theoretische Elektrotechnik, Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York, (1984).
- 28) W. Kramer, Weichmagnetische Nickel-Eisen-Werkstoffe in induktiven Bauelementen für die Leistungselektronik, Seminar „Weichmagnetische Werkstoffe“ der TAW 1996.
- 29) Datenblatt Strommessmodul, ThyssenKrupp VDM.
- 30) Datenblatt Impulsübertrager, ThyssenKrupp VDM.
- 31) Datenblatt Speicherdrosseln, ThyssenKrupp VDM.
- 32) H. Kaden, Wirbelströme und Schirmung in der Nachrichtentechnik, Springer-Verlag, Berlin Göttingen Heidelberg, (1959).

# Werkstofftabellen

## Weichmagnetische Werkstoffe

VDM Legierung		Magnifer 36 <sup>1)</sup>					Magnifer 50 <sup>1)</sup>				
<b>Spezifikation</b>											
<b>D</b>	Werkstoff-Nr.	1.3910 1.3911					1.3922 1.3926 1.3927				
	Kurzzeichen	Ni 36 RNi 24					Ni 48 RNi 12 RNi 8 E 31 (F3)				
	DIN	17445 17405/17445					17745 17405 17405 DIN IEC 740-2 (41301)				
<b>USA</b>	ASTM	A 753					A 753				
<b>Chemische Zusammensetzung (Gewicht - %)</b>											
	Nickel	35,0 – 37,0					47,0 – 48,5				
	Chrom	–					–				
	Eisen	Rest					Rest				
	Kohlenstoff	max. 0,05					max. 0,05				
	Mangan	max. 1,0					max. 0,3 – 0,5				
	Silizium	max. 0,3					max. 0,3				
	Aluminium	max. 0,02					max. 0,02				
	andere Elemente	Mg max. 0,01					Mg max. 0,01				
<b>Mechanische Werte (N/mm<sup>2</sup>, %)</b>											
		R <sub>p0,2</sub>	R <sub>m</sub>	A <sub>50</sub>	HV	R <sub>p0,2</sub>	R <sub>m</sub>	A <sub>50</sub>	HV		
	50% kaltgeformt	600	630	5	200	700	750	4	200		
	tiefziehbar	290	≥ 440	30	140	280	530	30	125		
<b>Magnetische Eigenschaften<sup>2)</sup></b>											
		Qualitäts- Stufe	Permeabilität (min.)		Koerz. Feldst.	Qualitäts- Stufe	Permeabilität (min.)		Koerz. Feldst.		
			μ <sub>is</sub>	μ <sub>max</sub>			μ <sub>s</sub>	μ <sub>max</sub>			
		MD 1	2000±200	–	–	MF 6	6000	70000	≤ 8		
		MD 1a	2300±200	–	–	MF 8	8000	70000	≤ 8		
		MD 3	2900	20000	≤ 16	MF 10	10000	80000	≤ 5		
		MD 5	μ <sub>s</sub> 5000	25000	≤ 12	MH 12	–	–	≤ 12		
						MH 8	–	–	≤ 8		
						MG 6	6000	70000	–		
						MG 10	10000	80000	–		
						Banddicke ~ 0,2 mm					
						MT Banddicke 0,1 mm mit Würfelftextur					
	Sättigungsinduktion (T)	1,3					1,55				
	Curie Temperatur (°C)	250					470				
	Sättig. Magnetostriktion (10 <sup>-6</sup> )	+ 20					+ 25				
<b>Physikalische Werte bei Raumtemperatur</b>											
	Dichte (g/cm <sup>3</sup> )	8,1					8,25				
	Spez. Wärme (J/kgK)	515					500				
	Wärmeleitfähigkeit (W/mK)	12,5					15				
	Elektrischer Widerstand (μΩ cm)	75					45				
	Elektrizitätsmodul (kN/mm <sup>2</sup> )	140					164				
	Ausdehnungsbeiwert von 20°C bis (10 <sup>-6</sup> /K)	100	200	300	400	500	100	200	300	400	500
		1,2	2,2	5,5	8,2	10,0	9,8	9,2	8,8	8,7	9,1
<b>Verarbeitung</b>											
	Schmelztemperatur (°C)	1450					1440				
	max. Arbeitstemperatur (°C)	–					–				
	Umformbarkeit	gut					gut				
	Schweißbarkeit	gut					gut				
<b>Materialeigenschaften</b>											
		Hoher elektr. Widerstand, gute Permeabilität mit geringen Verlusten bei hohen Frequenzen.					Niedrige Koerzitivfeldstärke, gute Permeabilität mit geringen Verlusten. Hohe Sättigungsinduktion.				
<b>Typische Anwendungen</b>											
	<sup>1)</sup> Weitere W.-Nr. nach DIN siehe besonderes Werkstoffblatt <sup>2)</sup> AC-Werte nach optimaler Wärmebehandlung. DC-Werte auf Anfrage.	Übertrager, Wandler, Fehlerstromschutzschalter, Relais -und Abschirmteile.					Übertrager, Wandler, Fehlerstromschutzschalter, Relais -und Abschirmteile, Speicherkerne, Impulsformer, magn. Schalter, Ringbandkerne, Schrittmotoren.				

VDM Legierung		Magnifer 53 <sup>1)</sup>					Magnifer 75 <sup>1)</sup>				
<b>Spezifikation</b>											
D	Werkstoff-Nr.	2.4420					2.4501 (2.4591) (2.4592) 2.4595 2.4596				
	Kurzzeichen	NiFe 44					NiFe16CuCr (E3) (E4) RNi 2 RNi 5 E 11				
	DIN	17745					17745 (41301) (41301) 17405 17405 DINIEC740-2 (E DIN40006)				
USA	ASTM	-					-				
<b>Chemische Zusammensetzung (Gewicht - %)</b>											
Nickel		54,0 – 56,0					Rest				
Chrom		-					1,5 – 2,5				
Eisen		Rest					15,0 – 17,0				
Kohlenstoff		max. 0,05					max. 0,05				
Mangan		max. 0,5					max. 1,0				
Silizium		max. 0,3					max. 0,3				
Aluminium		max. 0,005					-				
andere Elemente		-					Cu 4,0 – 6,0				
<b>Mechanische Werte (N/mm<sup>2</sup>, %)</b>											
		R <sub>p,0.2</sub>	R <sub>m</sub>	A <sub>50</sub>	HV	R <sub>p,0.2</sub>	R <sub>m</sub>	A <sub>50</sub>	HV		
50% kaltgeformt		-	-	-	-	800	860	5	270		
tieftziehbar		-	-	-	-	290	600	40	150		
<b>Magnetische Eigenschaften<sup>2)</sup></b>											
		Qualitäts- Stufe	Permeabilität (min.)		Koerz. Feldst.	Qualitäts- Stufe	Permeabilität (min.)		Koerz. Feldst.		
		MG 40	40000	100000	2	ME 4	40000	115000	-		
		MG 60	60000	130000	1,2	ME 6	60000	140000	-		
						ME 8	80000	175000	-		
						MH 2	-	-	≤ 2		
Sättigungsinduktion (T)		Banddicke 0,1 mm					Banddicke ~ 0,2 mm				
		1,5					0,8				
Curie Temperatur (°C)		530					400				
Sättig. Magnetostriktion (10 <sup>-6</sup> )		+ 25					+ 1				
<b>Physikalische Werte bei Raumtemperatur</b>											
Dichte (g/cm <sup>3</sup> )		8,3					8,6				
Spez. Wärme (J/kgK)		500					460				
Wärmeleitfähigkeit (W/mK)		16,5					17				
Elektrischer Widerstand (μΩ cm)		45					55				
Elektrizitätsmodul (kN/mm <sup>2</sup> )		-					-				
Ausdehnungsbeiwert von 20°C bis (10 <sup>-6</sup> /K)		100	200	300	400	500	100				
		10,6	10,6	10,7	10,7	10,8	12,5				
<b>Verarbeitung</b>											
Schmelztemperatur (°C)		1445					~ 1450				
max. Arbeitstemperatur (°C)		-					-				
Umformbarkeit		gut					gut				
Schweißbarkeit							gut				
<b>Materialeigenschaften</b>											
		Hohe Permeabilität mit hoher Sättigungsinduktion.					Hohe Permeabilität sowie kleine Koerzitivfeldstärke.				
<b>Typische Anwendungen</b>											
<sup>1)</sup> Weitere W.-Nr. nach DIN siehe besonderes Werkstoffblatt		Wandler, Übertrager, Fehlerstromschutzschalter, Ringbandkerne für spezielle Anwendungen.					Wandler, Übertrager, Fehlerstromschutzschalter, Relais- und Abschirmteile, Ringbandkerne.				
<sup>2)</sup> AC-Werte nach optimaler Wärmebehandlung. DC-Werte auf Anfrage.											





## Rechtliche Hinweise

### 1. Allgemeines

Die VDM Metals GmbH bemüht sich, nach bestem Vermögen dafür Sorge zu tragen, dass die in dieser Broschüre enthaltenen Informationen und Daten zutreffend sind.

### 2. Haftungsausschluss:

Eine Haftung oder Garantie für die Aktualität, Richtigkeit und Vollständigkeit der zur Verfügung gestellten Informationen ist ausgeschlossen. Sämtliche Angaben über die Eigenschaften oder den Einsatz der in dieser Broschüre erwähnten Werkstoffe und Produkte dienen lediglich der Produktbeschreibung und Information. Garantien bezüglich bestimmter Eigenschaften von Produkten oder Werkstoffen und deren Eignung für spezifische Anwendungen bedürfen der schriftlichen Vereinbarung. Die VDM Metals GmbH behält sich das Recht vor, Änderungen oder Ergänzungen der in der Broschüre enthaltenen Inhalte vorzunehmen ohne Sie darüber in Kenntnis zu setzen.

### 3. Urheberrecht

Sämtliche in dieser Broschüre enthaltenen Abbildungen sind das ausschließliche Eigentum von VDM Metals GmbH und sind durch deutsches und internationales Urheberrecht geschützt. Sie dürfen ohne eine schriftliche Genehmigung von der VDM Metals GmbH weder reproduziert noch

liche Genehmigung von der VDM Metals GmbH weder reproduziert noch vervielfältigt, übertragen oder verändert werden. Die Verwendung einer Abbildung im Rahmen eines anderen Fotokonzepts oder für sonstige Illustrationszwecke (digitale, künstlerische oder sonstige Wiedergabe) stellt eine Verletzung deutschen und internationalen Urheberrechts dar.

Für Inhalte, die nicht Eigentum von VDM Metals GmbH sind, gelten die urheberrechtlichen Bedingungen der jeweiligen Rechtsinhaber.

### 4. Marken- und Kennzeichenrecht

Alle innerhalb der Broschüre genannten und ggf. durch Dritte geschützten Marken- und Warenzeichen unterliegen uneingeschränkt den Bestimmungen des jeweils gültigen Kennzeichenrechts und den Besitzrechten der jeweiligen eingetragenen Eigentümer. Allein aufgrund der bloßen Nennung ist nicht der Schluss zu ziehen, dass Kennzeichen nicht durch Rechte Dritter geschützt sind. Die in dieser Broschüre insbesondere zu den Produkten oder den Legierungen enthaltenen Angaben dienen lediglich der Information und sind nicht für Konstruktionszwecke oder sonstige technische Zwecke gedacht. Die bereitgestellten Informationen sind mit großer Sorgfalt erstellt worden. Für Fehler oder Auslassungen kann jedoch keine Haftung übernommen werden.

## VDM Metals GmbH

Plettenberger Str. 2 • 58791 Werdohl

Phone: +49 (0) 2392-55-0 • Fax: +49 (0) 2392-55-2217

[www.vdm-metals.com](http://www.vdm-metals.com)