

Weichmagnetische Werkstoffe und Halbzeuge



Weichmagnetische Werkstoffe und Halbzeuge

Aus dem Inhalt:

	Seite
1. Vorwort	1
2. Unsere Werkstoffe und ihre Anwendungen	1
2.1 NiFe-Legierungen mit 72-83 % Ni	1
2.2 NiFe-Legierungen mit 54-68 % Ni	2
2.3 NiFe-Legierungen mit 45-50 % Ni	3
2.4 NiFe-Legierungen mit 35-40 % Ni	4
2.5 NiFe-Legierungen mit ca. 30 % Ni	4
2.6 SiFe-Legierungen mit 3 % Si	5
2.7 Magnet-Reineisen	5
2.8 CoFe-Legierungen mit 17-50 % Co	5
2.9 Amorphe und nanokristalline Legierungen	7
3. Lieferformen	9
3.1 Übersicht	9
3.2 Halbzeuge	10
3.2.1 Bänder und Streifen	11
3.2.2 Weitere Lieferformen	12
4. Lieferzustände	13
5. Wärmebehandlungen	15
5.1 Kristalline Legierungen	15
5.1.1 Vorglühlung (Weichglühlung)	15
5.1.2 Schlussglühlung	15
5.2 Amorphe Werkstoffe	15
6. Eigenschaften	17
6.1 Statische Eigenschaften von Massivmaterial	17
6.2 Dynamische Eigenschaften von Bändern	19
6.3 Physikalische und technologische Eigenschaften unserer Halbzeuge	22
6.4 Temperaturabhängigkeit der magnetischen Eigenschaften	22
6.5 Eigenschaften spezieller weichmagnetischer Werkstoffe	24
6.5.1 THERMOFLUX	24
7. Gewährleistung magnetischer Eigenschaften	25
7.1 Magnetqualitäten für Halbzeuge	25
7.2 Magnetqualitäten für Halbzeuge (Beispiele)	26

1. Vorwort

Die große Bedeutung der weichmagnetischen Werkstoffe in der Elektrotechnik und Elektronik hat in den letzten Jahren und Jahrzehnten zur Entwicklung zahlreicher Sonderwerkstoffe geführt.

Unter Anwendung der modernen Methoden und Erkenntnisse der Technologie, der Metallkunde und der Physik stellen wir heute im Rahmen unseres Gesamtprogrammes eine Vielzahl von hochwertigen weichmagnetischen Legierungen her.

Die vorliegende Firmenschrift befasst sich schwerpunktmäßig mit unserer Lieferform „Halbzeug“ und soll vornehmlich der Elektroindustrie einen umfassenden Überblick über Eigenschaften und Anwendungen unserer weichmagnetischen Werkstoffe geben.

Es ist unser Wunsch, dass diese Firmenschrift die Zusammenarbeit mit unserem Kunden- und Freundeskreis vertieft und sich als nützlicher Helfer bei Entwicklungsarbeiten und Planungsaufgaben erweisen möge.

2. Unsere Werkstoffe und ihre Anwendungen

Weichmagnetische Spezialwerkstoffe zählen als wesentliche Bestandteile vieler Geräte zu den unentbehrlichen Hilfsmitteln der modernen Elektrotechnik und Elektronik. Die große Vielfalt der Anwendungsgebiete, die stetig steigenden Anforderungen an die Güte der Bauteile, Geräte und Anlagen und die immer weiter gehende Spezialisierung erfordern eine sorgfältige Auswahl der zur Verfügung stehenden Werkstoffe, wenn optimale Lösungen erzielt werden sollen.

Um diese Auswahl zu erleichtern, werden im Folgenden unsere weichmagnetischen Werkstoffe zunächst nach Gruppen geordnet und durch Hinweise auf die Hauptanwendungsgebiete kurz beschrieben.

Die Entwicklung auf dem Gebiet der weichmagnetischen Werkstoffe hat in den letzten Jahren beträchtliche Fortschritte erzielt. So enthält auch diese Auflage wieder einige neue Legierungen mit bemerkenswerten Eigenschaften.

Neu aufgenommen wurden die amorphen und nanokristallinen Metalle, die eine Erweiterung und Ergänzung der Palette der weichmagnetischen Legierungen darstellen. Sie haben aufgrund ihrer Struktur und ihrer Zusammensetzung sehr günstige und z.T. neuartige Eigenschaften und Eigenschaftskombinationen.

2.1 NiFe-Legierungen mit 72-83 % Ni

Die Legierungen dieser Gruppe sind die magnetisch weichsten Werkstoffe, die heute zur Verfügung stehen. Sie zeichnen sich durch hohe Anfangs- und Maximalpermeabilität, geringe Koerzitivfeldstärke bei allerdings relativ niedriger Sättigungspolarisation (0,7 – 0,8 T) aus. Darüber hinaus kann man die Form der Hystereseschleife – allerdings nur bei Bandkernen – in sehr weiten Grenzen variieren. Es ist möglich, Ringbandkerne mit Rechteckschleife (Z), runder Schleife (R) und flacher Schleife (F) herzustellen (s. Bild 1).

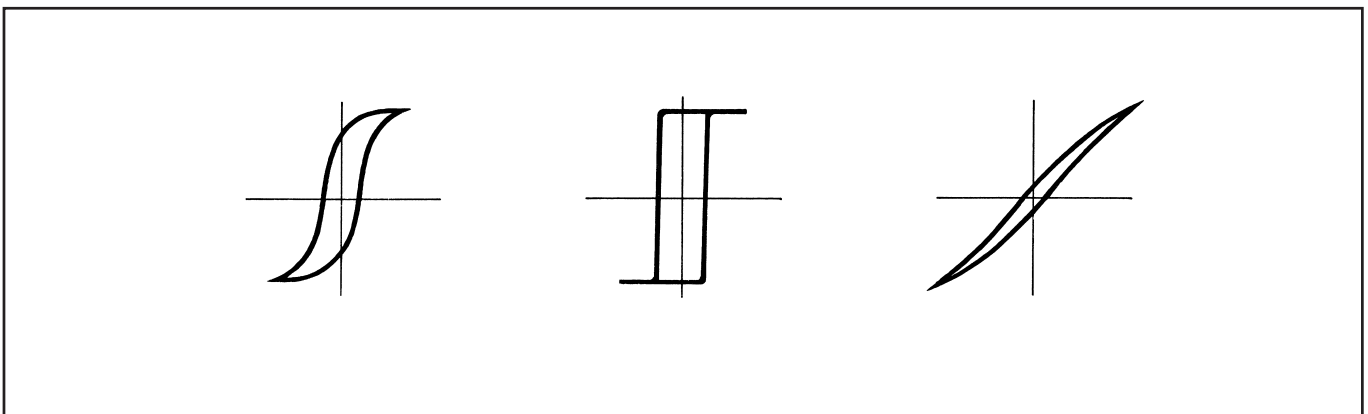


Bild 1: Beispiele möglicher Hystereseschleifenformen bei NiFe-Legierungen

Legierungen	Erläuterungen	Anwendungen
Werkstoffe mit runder (R) Schleifenform		
MUMETALL VACOPERM 100 ULTRAPERM 10 ULTRAPERM 200 ULTRAPERM 250	Die verschiedenen Legierungen dieser Gruppe unterscheiden sich hauptsächlich in der erreichbaren Anfangs- und Maximalpermeabilität sowie in der Koerzitivfeldstärke. Höchste Permeabilität und niedrigste Koerzitivfeldstärke hat ULTRAPERM 250. Die Sättigungspolarisation liegt zwischen 0,74 und 0,8 Tesla.	Summenstromwandler und Relaissteile für FI-Schalter mit hoher Ansprechempfindlichkeit, Übertrager, Messwandler, Drosseln, magnetische Abschirmungen, Statorbleche für Schrittschaltmotoren in Quarzuhren
VACOPERM BS	VACOPERM BS ist eine Spezialqualität, die sich innerhalb dieser Legierungsgruppe durch eine höhere Sättigungsinduktion (0,97 T) auszeichnet.	Summenstromwandler für pulsstromsensitive FI-Schalter mit mittlerer Ansprechempfindlichkeit
ULTRAPERM 91R	Hochpermeabler Werkstoff mit runder Schleife und relativ niedriger Remanenz über einen weiten Temperaturbereich. Sättigungspolarisation ca. 0,66 T.	Summenstromwandler für pulsstromsensitive FI-Schalter mit mittlerer Ansprechempfindlichkeit.
NiFe-Speziallegierungen für tiefe Temperaturen		
CRYOPERM 10	Diese Speziallegierung ist für den Einsatz bei tiefen Temperaturen, z.B. bei flüssigem Helium oder Stickstoff entwickelt worden. In diesem Temperaturbereich durchlaufen die Permeabilitätswerte ein Maximum.	Abschirmungen für Tieftemperaturanwendungen.
Werkstoffe mit höherer Härte		
RECOVAC BS	Ein hochpermeabler Werkstoff, der durch besondere Zusätze eine wesentlich höhere Härte und Verschleißfestigkeit aufweist. RECOVAC BS hat eine relativ hohe Sättigungspolarisation (ca. 0,8 T).	Magnetköpfe für Tonbandgeräte und Magnetspeicher mit hoher Lebensdauer, Magnetkopfabschirmung, Relaissteile.

2.2 NiFe-Legierungen mit 54-68 % Ni

Diese Legierungsgruppe enthält Werkstoffe, die ausschließlich als Ringbandkerne eingesetzt werden. Die Sättigungspolarisation liegt zwischen 1,2 und 1,5 T. Je nach Anforderungen können hier mittels einer magnetfeldinduzierten Vorzugsrichtung (Magnetfeldtemperatur) entweder hohe Anfangs- und Maximalpermeabilitäten oder aber auch verschiedene Formen von flachen Hystereseschleifen eingestellt werden.

Legierungen	Erläuterungen	Anwendungen
Werkstoffe mit runder (R) Schleifenform		
PERMAX M	Werkstoff vereint hohe Anfangs- und Maximalpermeabilität mit hoher Sättigungspolarisation (1,5 T)	Summenstromwandler für FI-Schalter mit mittlerer Ansprechempfindlichkeit, Messwandler
Werkstoffe mit flacher (F) Schleifenform		
PERMAX F	Werkstoff mit besonders flacher Hystereseschleife, relativ großem nutzbaren Induktionshub und hoher Impulspermeabilität.	Impulsübertrager, Thyristorschuttdrosseln, Wandlerkerne

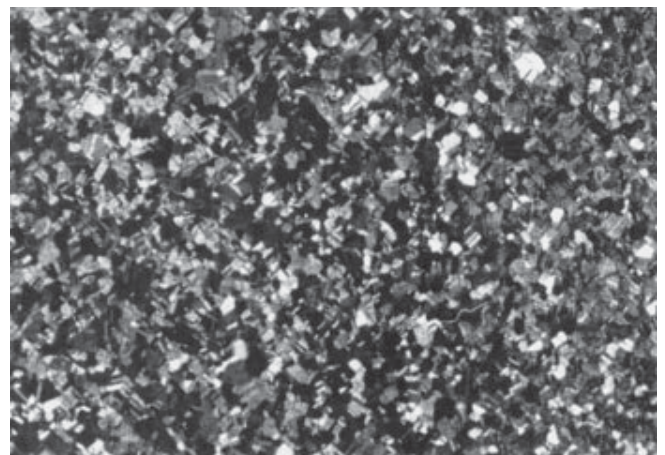
2.3 NiFe-Legierungen mit 45-50 % Ni

Bei Legierungen mit 45-50 % Ni kann durch Wahl bestimmter Walzschriffe und Zwischenglühungen die Gefügestruktur (Bild 2) und damit die Form der Hystereseschleifen in weiten Bereichen verändert werden. Durch Wärmebehandlung im Magnetfeld werden Vorzugsrichtungen eingestellt, welche flache Hystereseschleifen in Ringbandkernen ermöglichen. Bei praktisch gleicher Zusammensetzung erhält man so Werkstoffe mit den unterschiedlichsten magnetischen Eigenschaften.

Legierungen	Erläuterungen	Anwendungen
Werkstoffe mit runder (R) Schleifenform		
PERMENORM 5000 H2 PERMENORM 5000 V5 PERMENORM 5000 S4	Legierungen mit relativ hoher Sättigungspolarisation (1,5-1,6 T) bei mittleren Werten für Anfangs- und Maximalpermeabilität. PERMENORM 5000 H2 wird mit grobkörnigem, 5000 V5 dagegen mit einem feinkörnig isotropen Gefüge geliefert. 5000 V5 und 5000 S4 werden nur in größeren Dicken (>0,35 mm) und als Massivmaterial geliefert. Das pulvermetallurgisch hergestellte 5000 S4 ist ein Werkstoff höchster Reinheit mit den niedrigsten Koerzitivfeldstärken innerhalb dieser Legierungsgruppe.	Summenstromwandler und Relaisanteile für FI-Schalter, Messwandler, Übertrager, Speicherdrosseln, Abschirmungen, Rotor- und Statorbleche, Spulenkern für Schrittschaltmotoren in Quarzuhren, Flussleitbleche und Polstücke in Magnetventilen
RECOVAC 50	Mit dieser Legierung wird nach der Wärmebehandlung eine hohe Verschleißfestigkeit erreicht.	Drucker, Magnetventile, Relaisanteile



Grobkörniges Gefüge von PERMENORM 5000 H2



Feinkörniges Gefüge von PERMENORM 5000 V5

Bild 2: Verschiedene Gefügestrukturen bei 45-50 % NiFe-Legierungen

2.4 NiFe-Legierungen mit 35-40 % Ni

Die Legierungen dieser Gruppe zeichnen sich aufgrund ihrer Zusammensetzung durch einen hohen spez. elektrischen Widerstand aus. Die Permeabilitätswerte sind relativ niedrig. Die Sättigungspolarisation liegt zwischen 1,3-1,5 T.

Legierungen	Erläuterungen	Anwendungen
Werkstoffe mit runder (R) Schleifenform		
PERMENORM 3601 K5	36 % NiFe mit feinkörnig isotroper Gefügestruktur. Aufgrund des hohen spez. elektrischen Widerstandes gute Wechselstromeigenschaften in Verbindung mit geringen Ummagnetisierungsverlusten. PERMENORM 3601 K5 ist eine Weiterentwicklung der früheren Legierungen PERMENORM 3601 K2 und PERMENORM 3601 K3.	Übertrager, Impulstransformatoren, Drosseln, Relais- und Systemteile, Polschuhe bei nicht zu hohen Anforderungen an die Sättigung, Abschirmungen
MEGAPERM 40 L	40 % NiFe mit hoher Sättigung und hohem spez. elektrischen Widerstand. Das Material wird ebenfalls mit feinkörnig isotropem Gefüge geliefert. Bei Ringbandkernen ist eine Variante mit flacher Hystereseschleife herstellbar.	Relais- und Systemteile, Sensoren, Übertrager, Thyristorschutzdrosseln, Abschirmungen
CHRONOPERM 36	NiFeCr-Legierung (Sättigungspolarisation um 0,75 T)	Statoren in Quarzuhrenwerken

2.5 NiFe-Legierungen mit ca. 30 % Ni

NiFe-Legierungen mit ca. 30 % Ni sind weichmagnetische Werkstoffe, deren Curietemperaturen nur wenig oberhalb der Raumtemperatur liegen. Innerhalb dieses Temperaturbereiches erhält man eine starke Abhängigkeit der Sättigungspolarisation von der Umgebungstemperatur (Bild 3).

Wir liefern unter der Bezeichnung THERMOFLUX Werkstoffe mit Curietemperaturen zwischen 30° und 120°C, die durch geringe Variation der Zusammensetzung sehr genau eingestellt werden können. Als Standardlegierung empfehlen wir den in Tab. 1 angegebenen Werkstoff.

Tab. 1: THERMOFLUX – Standardlegierung

Werkstoff	Curie-Temperatur °C	Arbeitsfeldstärke A/cm	Induktion bei 20°C T
THERMOFLUX 55/100-G	55	80-100	0,22

Anwendungen

THERMOFLUX wird hauptsächlich als magnetischer Nebenschluss zur Temperaturkompensation in Dauermagnetsystemen eingesetzt wie z.B.:

- Elektrizitätszähler
- Elektronische Waagen
- Tachometer
- Messinstrumente

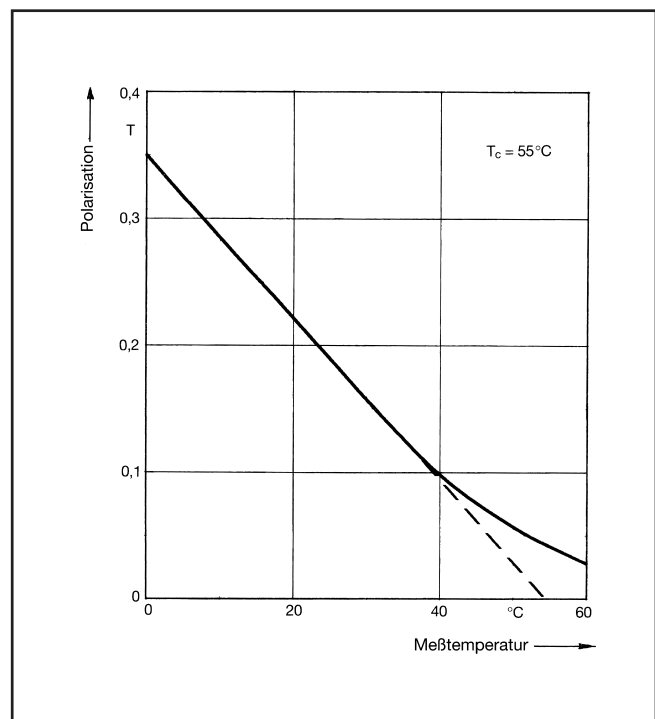


Bild 3: Polarisation-Temperaturkurven von THERMOFLUX 55/100-G.

2.6 SiFe-Legierungen mit 3 % Si

Aus der großen Gruppe der SiFe-Werkstoffe liefert die VAC texturarmes 3 % SiFe, das zur Gruppe der Elektrobleche zählt.

Die Sättigung dieses Werkstoffes liegt nur wenig unter der des Eisens (RFe), der spez. elektrische Widerstand ist jedoch viermal so hoch (geringere Ummagnetisierungsverluste).

Legierungen	Erläuterungen	Anwendungen
Werkstoffe mit runder (R) Schleifenform		
TRAFOPERM N3	Für Band- und Massivmaterial, Banddicke >0,1 bis 1,8 mm	Relaisteile, Messsysteme, Nadeldrucker, Polschuhe, Flussleitstücke

2.7 Magnet-Reineisen

Unter der Bezeichnung VACOFER wird eine ausschließlich auf dem Sinterweg (pulvermetallurgisch) hergestellte Eisensorte gefertigt. Die hohe Reinheit des Materials führt zu sehr niedrigen Koerzitivfeldstärken. Es wird dort eingesetzt, wo hohe Induktionswerte mit geringer Feldstärke erzielt werden sollen und wo in magnetischen Kreisen mit Luftspalt nach Abschalten des Feldes eine geringe Restinduktion gefordert wird.

Besondere Vorteile bietet VACOFER wegen seiner Reinheit und Porenfreiheit im Hochvakuum. Nachteile sind die schlechtere Korrosionsbeständigkeit und der geringe spez. elektrische Widerstand, der eine Anwendung bei höheren Frequenzen ausschließt.

Legierungen	Erläuterungen	Anwendungen
Werkstoffe mit runder (R) Schleifenform		
VACOFER S1	Ein Werkstoff mit höchster Reinheit (99,98 %) und niedrigster Koerzitivfeldstärke. Außerdem wird Porenfreiheit gewährleistet.	Polschuhe, Joche, Ankerkörper, Relaisteile, Flussleitbleche

2.8 CoFe-Legierungen mit 17-50 % Co

Kobalteisen-Legierungen haben mit 2,35 T die höchste Sättigungspolarisation und übertreffen damit alle bekannten weichmagnetischen Werkstoffe.

Je nach Zusammensetzung und Herstellungsverfahren kann man verschiedene Eigenschaften und Magnetisierungskurven erzeugen.

Für detaillierte Informationen zu unseren weichmagnetischen CoFe-Legierungen sei auf unser Firmenblatt PHT-004 verwiesen.

Legierungen	Erläuterungen	Anwendungen
Werkstoffe mit runder (R) Schleifenform		
VACOFLUX 48	Werkstoff mit kleiner Koerzitivfeldstärke ($H_c \leq 0,4$ A/cm) und besonders geringen Verlusten.	Spezialtransformatoren mit niedrigeren Verlusten als VACOFLUX 50 bei sehr hohen Aussteuerungen, Hochleistungsmotoren.
VACOFLUX 50	Werkstoff mit einer Koerzitivfeldstärke von $H_c \leq 0,8$ A/cm (bis Banddicke 2 mm).	Polschuhe mit höchster Flussdichte, Elektromagnete mit höchster Zugkraft, magnetische Linsen, Nadeldrucker, Relais, Motoren und Generatoren mit hohem Drehmoment und hoher Kraft.
VACODUR 50	Eine Weiterentwicklung des VACOFLUX 50 mit deutlich verbesserten mechanischen Eigenschaften.	Generatoren und Motoren mit hohen Drehzahlen. Die Anwendungen sind vergleichbar mit VACOFLUX 50 und erfüllen spezielle Forderungen hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften.
VACOFLUX 17	Legierung mit niedrigem Co-Gehalt und hoher Sättigung.	Geräte und Aktuatoren der Kfz-Industrie, Drehteile, Fließpressteile usw.

Magnetische Eigenschaften nach der magnetischen Schlussglühung*)

	Statisch gemessene Werte für 0,35 mm dicke Bänder		Statisch gemessene Werte für Massivmaterialien		J_s (T)	Curie- Temperatur (°C)	λ_s
	H_c (A/cm)	μ_{max}	H_c (A/cm)	μ_{max}			
VACOFLUX 48	≤ 0,4	15000	–	–	2,35	950	$70 \cdot 10^{-6}$
VACOFLUX 50	≤ 0,8	13000	≤ 2,4	4500	2,35	950	$70 \cdot 10^{-6}$
VACODUR 50 mit optimalen magn. Eigenschaften	≤ 1,6	10000	–	–	2,3	950	$70 \cdot 10^{-6}$
VACODUR 50 mit optimalen mech. Eigenschaften	≤ 2,0	7000	–	–	2,3	950	$70 \cdot 10^{-6}$
VACOFLUX 17	≤ 2,0	3500	≤ 2,0	2500	2,22	920	$25 \cdot 10^{-6}$

H_c = Koerzitivfeldstärke, μ_{max} = Maximalpermeabilität, J_s = Sättigungspolarisation, λ_s = Sättigungsmagnetostriktion

*) Typische Werte

Statische Messwerte für 0,35 mm dicke, gestapelte Ringproben*)

	B bei 3 A/cm (T)	B bei 8 A/cm (T)	B bei 16 A/cm (T)	B bei 40 A/cm (T)	B bei 80 A/cm (T)	B bei 160 A/cm (T)
VACOFLUX 48	2,05	2,15	2,25	2,27	2,3	–
VACOFLUX 50	1,9	2,1	2,2	2,25	2,27	2,3
VACODUR 50 mit optimalen magn. Eigenschaften	1,80	2,05	2,15	2,20	2,28	–
VACODUR 50 mit optimalen mech. Eigenschaften	1,70	2,00	2,1	2,18	2,25	–
VACOFLUX 17	1,2	1,5	1,6	1,75	1,9	2,05

B = Induktion

*) Typische Werte

2.9 Amorphe und nanokristalline Legierungen

Die technisch interessanten weichmagnetischen amorphen Legierungen VITROVAC und die nanokristallinen Legierungen VITROPERM bestehen aus Übergangsmetallen (T) wie Fe, Co, Ni, und Metalloiden (M) wie B, C, Si. Die Zusammensetzung entspricht etwa der allgemeinen Formel



Besondere Bedeutung haben bisher Co-reiche und Fe-reiche Legierungen, vor allem mit F- und Z-Schleife erlangt (s. Bild 4).

Die Struktur der amorphen Legierungen ist durch die Abwesenheit periodischer kristalliner Atomanordnungen gekennzeichnet. Sie ist weitgehend ungeordnet wie die Atomverteilung in Schmelzen. Wegen ihrer besonderen atomaren Struktur sind amorphe Metalle weichmagnetisch, aber gleichzeitig mechanisch hart. Dies widerspricht einer alten Faustregel bei kristallinen Metallen, nämlich, dass ein magnetisch weicher Werkstoff auch mechanisch weich und entsprechend ein magnetisch harter Werkstoff (Dauermagnet) auch mechanisch hart ist. In der Tat zeichnen sich amorphe Metalle in ihren mechanischen Eigenschaften durch eine hohe Härte (HV ca. 900) und eine hohe Zugfestigkeit (ca. 1500-2000 N/mm²) aus; letztere ist eine Zehnerpotenz höher als bei kristallinen Weichmagneten.

Die Bedingungen, unter denen die amorphe Schmelzstruktur bei der Erstarrung erhalten bleibt, sind zunächst einmal ähnlich wie bei gewöhnlichen silikatischen Gläsern. In beiden Stoffgruppen begünstigen Atome der Elemente Silizium, Bor und andere „Metalloide“ stark die Glasbildung (diese Zusätze vermindern die Beweglichkeit der Atome in der Schmelze). Während aber bei silikatischen Gläsern für die glasige Erstarrung Abkühlgeschwindigkeiten von 10 K/s ausreichen, sind bei den amorphen Metallen ca. 10⁶ K/s notwendig.

Die notwendigen Abkühlraten setzen eine entsprechende Fertigungstechnologie voraus. Amorphe Legierungen werden daher von uns ausschließlich in Form dünner Metallfolien (typ. Banddicke ca. 20 µm) oder vorzugsweise daraus gefertigter Ringbandkerne angeboten. Als Halbzeugqualität, die ohne weitere Wärmebehandlung eingesetzt werden kann, ist die Legierung VITROVAC 6025 X zu nennen. Varianten hiervon, z.B. für flexible Antennen im kHz-Bereich oder für elektro-magnetische Diebstahlsicherungen, sind ebenfalls erhältlich.

Alle weiteren genannten amorphen Legierungen werden überwiegend als Vormaterial für Ringbandkerne eingesetzt. Dem entsprechend gelten die unten genannten magnetischen Eigenschaften, insbesondere spezielle Formen der Hystereseschleifen, für Ringbandkerne nach Wärmebehandlung. Hintergrund hierfür sind bei der Wärmebehandlung ablaufende Relaxierungs- und Stabilisierungsprozesse, die zu einer Versprödung des Bandes führen. Für besondere Halbzeuganwendungen bitten wir um Anfrage. Weitere Informationen über „amorphe“ Ringbandkerne finden Sie in unseren entsprechenden Schriften.

Die Legierungen VC 6025, VC 6030 und VC 6150 sind mittlerweile auch als vorbehandeltes Halbzeug mit F-Schleife verfügbar. Die neuen F-Halbzeug-Qualitäten können ohne weitere thermische Behandlung direkt zu Ringbandkernen, Sensoren oder anderen denkbaren Anwendungsformen weiter verarbeitet werden. Die momentan lieferbaren Qualitäten decken Permeabilitäten von etwa $\mu \approx 2000$ (VC 6150 F), $\mu \approx 3000$ (VC 6030 F) und $\mu \approx 5000$ (VC 6025 F) ab. Qualitäten mit noch höheren Permeabilitäten ($\mu \approx 10000$ und mehr) sind durch ein neu entwickeltes Wärmebehandlungsverfahren prinzipiell möglich und können bei Bedarf im Labormaßstab bemustert werden.

Nanokristalline Legierungen VITROPERM ähneln in Zusammensetzung und Herstellung den amorphen Fe-Basis-Legierungen. Ihre besonderen weichmagnetischen Eigenschaften stellen sich nach einer Kristallisationsglühung ein. Die sich dabei ausbildende Struktur besteht aus Kristallkörnern mit Durchmessern im Bereich von ca. 10-15 nm, die von einer amorphen Restphase umgeben sind. Nanokristalline Bänder sind extrem spröde, so dass die notwendige Wärmebehandlung nur am Endprodukt – in der Regel ist dies ein Ringbandkern – durchgeführt werden kann.

Wegen der sehr kleinen Kristallkörner verhalten sich nanokristalline Legierungen magnetisch weitestgehend „amorph“, sie bieten jedoch zusätzliche Spielräume bzgl. des Legierungsdesigns. Ringbandkerne aus den nanokristallinen (Fe-Basis) Legierungen VITROPERM erreichen daher bezüglich Permeabilität, Koerzitivfeldstärke und Ummagnetisierungsverlusten die Spitzenwerte der amorphen Co-Basis-Legierungen oder dünnbandiger kristalliner 80 %-NiFe-Legierungen, übertreffen diese jedoch mit höheren Sättigungsinduktionen sowie einer besseren Temperaturstabilität.

Eine nähere Beschreibung der Eigenschaften von Ringbandkernen aus VITROPERM finden Sie in unseren Ringbandkernschriften.

Legierungen	Erläuterungen	Anwendungen
VITROVAC 6025	Magnetostruktionsfreie Co-Basislegierung mit sehr hoher Permeabilität und äußerst geringen Ummagnetisierungsverlusten bis zu hohen Frequenzen. Sie kann als Ringbandkern mit verschiedenen Formen der Hystereseschleife hergestellt werden, insbesondere mit Z- und F-Schleife. Sättigungspolarisation je nach Variante zwischen 0,53 und 0,59 T.	Mittelfrequenzübertrager und Transduktordrosseln für Schaltnetzteile, Impulsübertrager, Funkentstördrosseln, Diebstahlsicherungen, Magnetfeldsensoren, Magnetköpfe
VITROVAC 6025 X	Variante von VITROVAC 6025. Das Material kann ohne Wärmebehandlung eingesetzt werden.	Magnetische Abschirmungen, insbesondere Kabelabschirmungen, Magnetköpfe
VITROVAC 6080/6070	Modifiziertes VITROVAC 6025 mit einer Sättigungspolarisation von 0,60 bzw. 0,62 T. F-Schleifen mit hohen Permeabilitäten (60000 bzw. 45000) und einem ausgezeichneten Linearitätsverhalten.	Signalübertrager mit hoher Gleichstromstabilität
VITROVAC 6030	Weitere Co-Basislegierung mit höherer Sättigung (0,8 T). Auch diese Legierung ist magnetostruktionsfrei und hervorragend weichmagnetisch bei sehr niedrigen Ummagnetisierungsverlusten im Bereich von 50 bis 500 kHz. F- und Z-Schleifen können besonders ausgeprägt eingestellt werden.	Übertrager für Schaltnetzteile, magnetische Schalter in der Leistungsimpulstechnik (z.B. für Laser)
VITROVAC 6150	Co-Basislegierung mit weiter erhöhter Sättigung (1,0 T), sonst aber ähnlichen Eigenschaften wie VITROVAC 6030.	wie VITROVAC 6030
VITROPERM 800	Magnetostruktionsarme nanokristalline Legierungen mit hoher Permeabilität und äußerst geringen Ummagnetisierungsverlusten. Sättigungsinduktion 1,2 T. Lieferform: Ringbandkerne, VITROPERM 800 auch als Halbzeug.	Pulsstromsensitive FI-Schalter, Leistungsübertrager, Signalübertrager, Impulsübertrager, Funkentstördrosseln

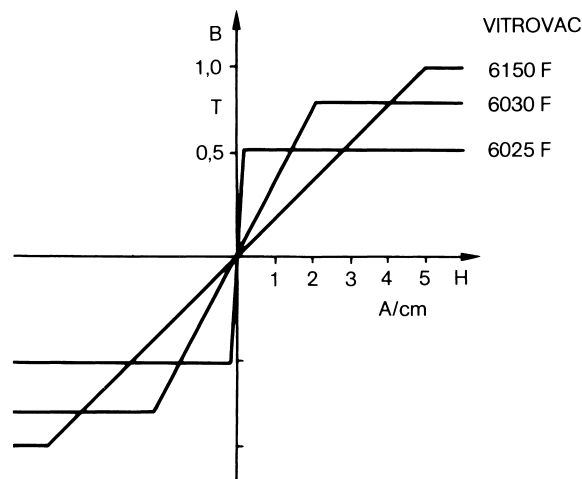


Bild 4: Typische Hystereseschleifen von VITROVAC 6025 F, 6030 F und 6150 F (halbschematisch)

3. Lieferformen

3.1 Übersicht

Weichmagnetische Werkstoffe werden heute in vielfältigen Formen und Abmessungen angeboten.

Fertigteile werden normalerweise im schlussgeglühten Zustand geliefert. Soweit Halbzeuge bezogen werden, empfehlen wir den Bezug von walzhartem oder vorgeglühtem (biegefähig, tiefzieh-

fähig) Material. Die daraus gefertigten Teile können bei uns schlussgeglüht werden.

Ist dies aus technischen oder logistischen Gründen nicht möglich, sollten unsere Hinweise zur Wärmebehandlung von weichmagnetischen Werkstoffen in Abschnitt 4 beachtet werden.

Tab. 2 gibt einen Gesamtüberblick über die Zuordnung unserer Werkstoffe zu den verschiedenen Lieferformen.

Tabelle 2: Zuordnung von Werkstoffen und Lieferformen

	Lieferformen							
	Halbzeuge		Fertigteile					
	Bänder	Massiv-Profilmaterial, Stäbe, Drähte	Bandkerne	Schnittbandkerne	Kernbleche, Stanzteile	Blechpakete, EK-Kerne	Abschirmungen, Abschirmfolie	Form- und Massivteile
MUMETALL	●	●	●	●	●	●	●	●
VACOPERM 100	●	●	●	●	●	●	●	●
ULTRAPERM 10	●	-	●	-	-	-	-	-
ULTRAPERM 200	●	-	●	-	-	-	-	-
ULTRAPERM 250	●	-	●	-	-	-	-	-
VACOPERM BS	●	○	●	-	-	-	-	●
ULTRAPERM 91 R	●	-	●	-	○	-	-	-
CRYOPERM 10	●	-	-	-	-	-	●	-
RECOVAC BS	●	-	-	-	●	-	-	●
PERMAX M	○	-	●	-	-	-	-	-
PERMAX F	-	-	●	-	-	-	-	-
PERMENORM 5000 H2	●	●	●	●	●	●	●	●
PERMENORM 5000 V5	●	●	-	-	-	-	●	●
PERMENORM 5000 S4	●	●	-	-	-	-	○	●
PERMENORM 3601 K5	●	●	-	-	-	-	●	●
MEGAPERM 40 L	●	●	●	-	●	●	●	●
RECOVAC 50	●	-	-	-	-	-	-	-
CHRONOPERM 36	●	-	-	-	-	-	-	-
THERMOFLUX	●	●	-	-	●	-	-	●
TRAFOPERM N3	●	●	●	●	●	●	●	●
VACOFER S1	●	●	-	-	-	-	-	●
VACOFLEX 48	●	-	●	○	●	●	-	-
VACOFLEX 50	●	●	●	-	●	●	○	●
VACODUR 50	●	-	-	-	●	●	-	-
VACOFLEX 17	●	●	-	-	●	●	-	●
VITROVAC 6025	●	-	●	○	○	○	○	-
VITROVAC 6080/6070	●	-	●	-	-	-	-	-
VITROVAC 6030	●	-	●	○	-	-	-	-
VITROVAC 6150	●	-	●	-	-	-	-	-
VITROPERM 800	●	-	●	-	-	-	-	-

○ = in Sonderfällen lieferbar

3.2 Halbzeuge

Halbzeuge sind in den unterschiedlichsten Formen und Abmessungen (Bild 5) lieferbar. Unser Lieferprogramm umfasst:

- Bänder und Streifen
- Brammen
- Platten
- Vierkantprofile
- Flachprofile
- Rundstäbe/Stangen
- Draht und Flachdraht

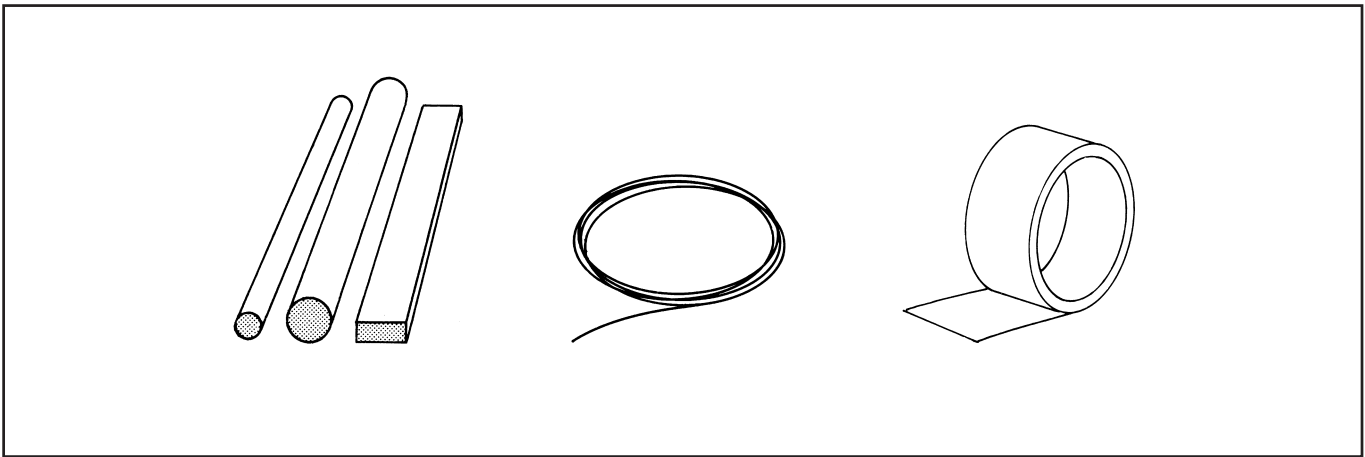


Bild 5 Unterschiedliche Formen von Halbzeugen

3.2.1 Bänder und Streifen

Tab. 3 gibt einen Überblick über maximale Fabrikationsbreiten von Bändern und Streifen bei verschiedenen Banddicken.

Dickentoleranzen:

- Bänder und Streifen aus kristallinen Legierungen siehe EN 10140
- Bänder aus VITROVAC: $\pm 0,003$ mm

Tabelle 3: Maximale Fabrikationsbreiten, d.h. Naturkanten (besäumt „-10 mm“ pro Seite) für Bänder und Streifen

	Banddicke in mm						
	1,5–2,0	0,5–1,0	0,35	0,2	0,1	0,05	0,025
	Bandbreite in mm						
MUMETALL	275	275	275	275	260	260	260
VACOPERM 100	275	275	265	265	265	265	265
ULTRAPERM 10/200	-	-	-	-	265	265	-
ULTRAPERM 250	-	-	-	-	-	265	-
VACOPERM BS	275	275	265	265	265	-	-
ULTRAPERM 91 R	-	-	-	-	265	265	-
CRYOPERM 10	275	275	265	265	265	-	-
RECOVAC BS	-	270	270	210	210	210	210
PERMAX M	-	-	-	270	260	-	-
PERMENORM 5000 H2	295	295	270	270	260	260	260
PERMENORM 5000 V5	295	295	270	270	270	260	-
PERMENORM 5000 S4	220	220	220	220	220	220	-
RECOVAC 50	300	270	270	270	260	260	-
PERMENORM 3601 K5	300	270	270	270	260	260	260
MEGAPERM 40 L	285	260	260	260	260	260	-
CHRONOPERM 36	270	270	270	270	260	260	250
THERMOFLUX 55/100 G	300	300	270	270	260	-	-
TRAFOPERM N3	300	300	270	270	270	-	-
VACOFER S1	240	240	240	240	-	-	-
VACOFLEX 48	235	235	235	210	200	200	200
VACOFLEX 50	235	235	235	210	200	200	200
VACODUR 50	235	235	235	210	200	200	-
VACOFLEX 17	300	270	270	260	250	250	250

3.2.2 Weitere Lieferformen

VAC liefert weitere Halbzeuge aus den in Tabelle 2 genannten Legierungen, und zwar in unterschiedlichen Formen und Abmessungsbereichen (Tabelle 4).

Die Maßtoleranzen der Halbzeuge sind in den in Tabelle 5 angeführten DIN-Normen angegeben.

Tabelle 4: Formen und Abmessungen weiterer Halbzeuge aus kristallinen Legierungen

Form	Warm verformt ¹⁾	Kalt verformt ³⁾	Gesinterte Presslinge ¹⁾
Brammen	Breite 50 bis 300 mm Dicke >40 bis 200 mm		Rechteckquerschnitte bis 260 mm x 240 mm ²⁾
Platten	Breite 50 bis 300 mm Dicke 10 bis 40 mm		
Vierkant	15 mm x 15 mm bis 180 mm x 180 mm	0,5 mm x 0,5 mm bis 15 mm x 15 mm	
Flachdraht/-profil	Breite 15 mm bis 75 mm Dicke 4,5 mm bis 41 mm	Breite 1,0 mm bis 40 mm Dicke 0,2 mm bis 9 mm	
Rundstäbe, Stangen	Ø 12,5 bis Ø 215 mm Nach Oberflächenbearbeitung Ø 12,5 bis Ø 200 mm	Ø 2,0 bis Ø 55,0 mm	bis Ø 200 mm ⁴⁾
Draht	Ø 5,0 bis Ø 27,0 mm ⁵⁾	Ø 0,2 bis Ø 5,0 mm	

¹⁾ Jeweilige Abmessung und Länge auf Anfrage.

²⁾ Bei VACOFER max. 225 mm x 85 mm.

³⁾ VACOFLUX 50 außer Querschnitte >30 mm².

⁴⁾ Halbzeuge aus TRAFOPERM N3 auf Anfrage.

⁵⁾ VACOFLUX 50 max. Ø 7,0 mm.

Tabelle 5: DIN-Normen für Maßtoleranzen von Halbzeugen

Normblatt	Titel
EN 10278	Blanker Flachstahl; Maße, zulässige Abweichungen, . . .
EN 10218	Stahldraht kalt gezogen; Maße, zulässige Abweichungen, . . .
EN 10278	Blanker Vierkantstahl; Maße, zulässige Abweichungen, . . .
EN 10278	Blanker Rundstahl; Maße, zulässige Abweichungen, . . .
EN 10140	Kalt gewalztes Band aus Stahl, Maße, . . .
DIN 59746	Bänder und Bandstreifen aus Nickel und Nickelknetlegierungen, kalt gewalzt, Maße, zulässige Abweichungen
DIN 59781	Runddrähte aus Nickel und Nickelknetlegierungen; gezogen; Maße, zulässige Abweichungen
IEC 404-8-6	Magnetische Werkstoffe, Abschnitt „Maßtoleranzen für Bänder, Stangen und Drähte“

4. Lieferzustände

Für die Weiterverarbeitung von kristallinen weichmagnetischen Halbzeugen werden verschiedene Lieferzustände angeboten.

- warm verformt:
für Brammen, Platten, Profile, Rundstäbe
- kalt verformt:
für Bänder, Stäbe, Drähte, Streifen (siehe 3.2.1; 3.2.2)
- weich biegsam bzw. biegefähig vorgeglüht:
für Bänder, Stäbe, Drähte, Streifen (siehe 3.2.1; 3.2.2)
- weich tiefziehbar bzw. tiefziehfähig vorgeglüht:
für Bänder, Streifen (siehe 3.2.1)
- halbhart:
bei Bändern können für einige Legierungen auf Wunsch auch bestimmte Härtebereiche zwischen den Lieferzuständen „kalt verformt“ und „weich biegsam“ eingestellt werden, die z.B. für die Herstellung von Stanzbiegeteilen erforderlich sind.

Der Lieferzustand „schlussgeglüht“ ist bei kristallinen Halbzeugen normalerweise nicht üblich (Ausnahme: THERMOFLUX und MUMETALL), da bei der Weiterverarbeitung mechanische Beanspruchungen und plastische Formänderungen zu starken magnetischen Schädigungen führen (siehe hierzu auch den Abschnitt Wärmebehandlung).

In Tabelle 6 sind für die oben beschriebenen Lieferzustände (soweit lieferbar) die entsprechenden Härtebereiche angegeben.

Tabelle 6: Lieferzustände und Härtebereiche von kristallinen weichmagnetischen Halbzeugen (für kalt gewalzte Bänder bzw. Streifen)

Legierungen	Vickershärte (HV) nach DIN 50133		
	kalt verformt	weich bzw. tiefziehbar	halbhart
MUMETALL VACOPERM 100 ULTRAPERM 10, 200, 250 VACOPERM BS ULTRAPERM 91 R CRYOPERM 10 RECOVAC BS	270 – 400	120 – 180	180 – 230
	300 – 350	120 – 160	–
PERMENORM 5000 H2 PERMENORM 5000 V5 PERMENORM 5000 S4 RECOVAC 50 RECOVAC 98	220 – 300 220 – 280	120 – 160	180 – 220
	220 – 280 350 – 400	– 160 – 200	– –
PERMAX F; M; LGF; PERMENORM 3601 K5 MEGAPERM 40 L CHRONOPERM 36	220 – 280 220 – 280 220 – 280 220 – 280	110 – 150 110 – 150 110 – 150	– 180 – 220
THERMOFLUX (alle Qualitäten)	210 – 250	90 – 150	–
TRAFOPERM N3 VACOFER S1	250 – 330 60 – 120	150 – 210 –	– –
VACOFLUX 48 VACOFLUX 50 VACODUR 50 VACOFLUX 17	280 – 550 280 – 550 280 – 550 220 – 280	– – – 120 – 180*	– – – –

* nur weich bzw. tiefziehbar lieferbar

Bei warmverformten Produkten (Stange, Knüppel, Bramme) ist der Härtebereich ähnlich dem Lieferzustand „weich bzw. tiefziehbar“.

Bei Draht, Stäbe (kalt gezogen) Härtewerte auf Anfrage.

5. Wärmebehandlungen

5.1 Kristalline Legierungen

5.1.1 Vorglühlung (Weichglühlung)

Sind bei kalt gewalztem oder kalt gezogenem Material vor der Schlussglühlung noch Arbeitsgänge wie z.B. Biegen oder Tiefziehen erforderlich, dann ist zur Erhöhung der Verformbarkeit eine Vorglühlung zu empfehlen. Bei sehr starker Verformung sind oft zwischen den einzelnen Schritten weitere Glühungen erforderlich.

Zum Erzielen hinreichender Verformbarkeit genügt in nahezu allen Fällen eine Vorglühlung oberhalb der Rekristallisation bei etwa 700–800°C, Glühdauer 2–5 Stunden. Für die Vorglühlung empfehlen wir Wasserstoff als Glühatmosphäre. Alternativ hierzu können solche Vorglühungen auch in trockenem Stickstoff oder in Vakuum durchgeführt werden.

5.1.2 Schlussglühlung

Zur Einstellung der optimalen magnetischen Eigenschaften ist eine Schlussglühlung erforderlich, bei der Zeit, Temperatur und in vielen Fällen auch die Abkühlbedingungen genau einzuhalten sind. Bild 6 zeigt am Beispiel von MUMETALL die Wirkung einer solchen Schlussglühlung auf die magnetischen Eigenschaften.

Als Schutzgas wird vorzugsweise Wasserstoff verwendet, der nicht nur eine Verzunderung des Materials verhindert, sondern auch in chemische Wechselwirkung mit dem Material tritt und z.B. Verunreinigungen entfernt. Dazu ist natürlich Voraussetzung, dass das Schutzgas selbst keine schädigenden Verunreinigungen enthält, vor allem soll der Gehalt an Wasserdampf und Sauerstoff gering sein (Taupunkt <–50°C).

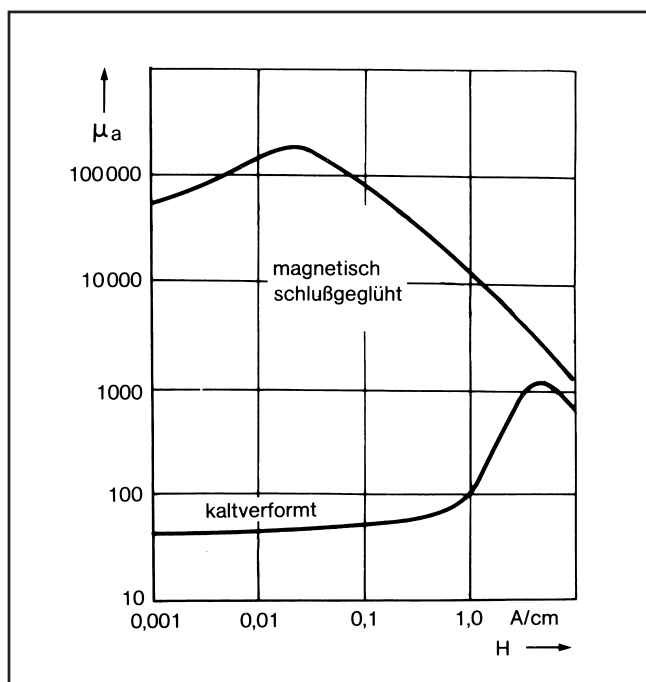


Bild 6: Wirkung der Schlussglühlung bei MUMETALL

Glühungen mit Ammoniak-Spaltgas (25 % Stickstoff, 75 % Wasserstoff) oder Stickstoff sind in manchen Fällen möglich. Im Vergleich zu Glühungen unter Wasserstoff muss aber meist mit einem niedrigeren magnetischen Qualitätsniveau gerechnet werden.

Tabelle 7 enthält Angaben über die bei uns üblichen Schlussglühbehandlungen.

5.2 Amorphe Werkstoffe

Die von den kristallinen Werkstoffen her bekannten Zwischen- und Weichglühungen entfallen bei amorphen Metallen vollkommen, da sie aus der flüssigen Schmelze in einem einzigen Verfahrensschritt direkt auf Endmaß (Dicke ca. 0,020 mm, Breite z.B. 1 bis 50 mm) gegossen werden.

Aufgrund ihrer homogenen und isotropen Struktur haben die dünnen amorphen Metallbänder bereits nach dem Gießen gute weichmagnetische Eigenschaften. Dies gilt insbesondere für die magnetostruktionsfreien Co-Basis-Legierungen, wo bereits im Herstellzustand Koerzitivfeldstärken von 10 mA/cm und darunter, Anfangspermeabilitäten von etwa 5000 und darüber keine Seltenheit sind.

Zur gezielten Optimierung der magnetischen Eigenschaften ist jedoch ähnlich wie bei den kristallinen Werkstoffen eine abschließende Wärmebehandlung meist unerlässlich.

Ringbandkerne

Idealerweise wird das Material zunächst oberhalb der Curie-temperatur (um 400°C) einer Entspannungstemperatur unterworfen. Wichtig hierbei ist, dass die Kristallisationstemperatur nicht überschritten wird, um kristalline Ausscheidungen und die damit verbundene Verschlechterung der Magnetwerte zu vermeiden. Anschließend findet unterhalb der Curietemperatur im Bereich von ca. 200–350°C eine Glühlung in einem Magnetfeld statt. Hierbei kann je nach Orientierung des angelegten Feldes eine F- oder Z-Schleife eingestellt und auf das von der Anwendung benötigte Permeabilitätsniveau maßgeschneidert werden. Mit solch einer optimierten Wärmebehandlung werden die besten und reproduzierbarsten Magnetwerte erreicht (z.B. bei VC 6025 Anfangspermeabilitäten weit über 100000). Sie muss jedoch in der Endform (typischerweise an Ringbandkernen) durchgeführt werden, da der Werkstoff bei erhöhten Anlasstemperaturen versprödet bzw. ein nachträgliches Umformen die Magnetwerte beeinträchtigen kann.

Wärmebehandeltes Halbzeug

Es besteht allerdings auch die Möglichkeit die Wärmebehandlung bei gemäßigten Anlasstemperaturen oder relativ kurzen Anlasszeiten so zu führen, dass das angelassene Band noch weitgehend duktil ist. Wie bei der optimierten Wärmebehandlung für Ringbandkerne kann hierbei durch Anlegen eines Magnetfeldes eine Z- oder F-Schleife eingestellt werden. Das so vorbehandelte Halbzeug bildet einen guten Kompromiss zwischen guten und reproduzierbaren weichmagnetischen Eigenschaften einerseits und mechanischer Weiterverarbeitbarkeit des Bandes andererseits. Es kann ohne weitere Wärmebehandlung weiter verarbeitet und eingesetzt werden und ist mittlerweile auch mit F-Schleife verfügbar.

5.3 Nanokristalline Werkstoffe

Bei nanokristallinen Werkstoffen (VITROPERM) ist eine Wärmebehandlung des amorphen Ausgangsmaterials unerlässlich. Zur Einstellung der nanokristallinen Struktur und der hiermit verbundenen weichmagnetischen Eigenschaften muss zunächst eine Anlassbehandlung bei Temperaturen von typischerweise 540 °C bis 600 °C erfolgen. Es muss hierbei darauf geachtet werden, dass die obere Grenztemperatur von etwa 600 °C nicht überschritten wird, da es sonst zur Ausscheidung von hartmagnetischen Phasen kommt, welche die weichmagnetischen Eigenschaften stark beeinträchtigen. Nach Umwandlung in den nanokristallinen Zustand ergibt sich typischerweise eine runde Hystereseschleife mit einer Anfangspermeabilität im Bereich 50000 – 100000, abhängig von der genauen Zusammensetzung.

Anschließend kann wie bei amorphen Metallen durch eine Wärmebehandlung im Magnetfeld eine F- oder Z-Schleife eingestellt werden. Durch Wahl der Anlassstemperatur im Quersfeld lässt sich hierbei z.B. bei einer F-Schleife die Permeabilität in einem weiten Bereich von etwa $\mu = 20000$ bis über $\mu = 100000$ gezielt einstellen.

Im Gegensatz zu den amorphen Metallen sind nanokristalline Bänder nicht als vorbehandeltes Halbzeug verfügbar, da die Umwandlung in den nanokristallinen Zustand untrennbar mit einer deutlichen Versprödung des Materials einhergeht, was eine mechanische Weiterverarbeitung praktisch unmöglich macht. Die Wärmebehandlung kann somit nur in der Endform, d.h. typischerweise am Ringbandkern durchgeführt werden.

Tabelle 7: Angaben zur magnetischen Schlussglühung

Legierung	Zeit h	Temperatur °C	Abkühlung im Ofen, dann an Luft °C
MUMETALL	2 – 5	1000 – 1100	bis 200
VACOPERM 100			
ULTRAPERM 10/200/250	2 – 5	1150	bis 480 (1 h)**
ULTRAPERM 91 R			
CRYOPERM 10	2 – 5	1100 – 1150	bis 460 – 480 (4 h)***
VACOPERM BS	2 – 5	1150	bis 510 (1 h)
RECOVAC BS	2	1000	bis 620 (2 h)
PERMENORM 5000 H2	5	1150	
PERMENORM 5000 V5	2 – 5	1150	bis 200
PERMENORM 5000 S4	2 – 5	1150	
RECOVAC 50	2 – 5	1150	bis 650 (4 h), dann Abkühlung in H ₂
PERMENORM 3601 K5	2 – 5	1000 – 1100	bis 200
MEGAPERM 40L	2 – 5	1000 – 1100	
CHRONOPERM 36	2 – 5	1150	bis 200
THERMOFLUX 55/100 G	2 – 5	650 – 700	bis 200
TRAFOPERM N3	3 – 6	1200	bis 100
VACOFER S1	3 – 5	850*	bis 100
VACOFLUX 48	10	880	bis 200
VACOFLUX 50	3 – 10	800 – 820	bis 200
VACODUR 50 ¹⁾	2 – 5	820	bis 200
VACODUR 50 ²⁾	2 – 5	750	bis 200
VACOFLUX 17	10	850	bis 200

*) Einbringen bei Temperaturen <500°C.

**) für optimale magnetische Eigenschaften ist eine möglichst lange Glühzeit zu wählen

***) Anlassbehandlung 4h 460 – 480°C

1) mit optimalen magnetischen Eigenschaften

2) mit optimalen mechanischen Eigenschaften

6. Eigenschaften

Im vorliegenden Abschnitt werden die wichtigsten Eigenschaften unserer weichmagnetischen Werkstoffe, die als Halbzeuge geliefert werden, angegeben. Bei diesen Angaben handelt es sich um Durchschnittswerte, die aus einer größeren Anzahl von Messungen ermittelt wurden. Für die Einhaltung bestimmter Mindest- oder Höchstwerte sind die in Abschnitt 7 angegebenen „Magnetqualitäten“ maßgebend.

Die statischen Eigenschaften sind insbesondere dann von Interesse, wenn weichmagnetische Werkstoffe in Verbindung mit Gleichfeldern verwendet werden. Für derartige Anwendungen werden im allgemeinen Teile größerer Dicke (Form- und Massivteile) verwendet, wobei normalerweise besondere Anforderungen an statische Permeabilität und Koerzitivfeldstärke gestellt werden. Halbzeuge in dünneren Abmessungen (Bänder) werden überwiegend bei Wechselfeldern, vor allem bei Netzfrequenz, eingesetzt. Deshalb werden für diese Anwendungen die Daten und Kennlinien für 50 Hz angegeben.

Abschließend dann in einer Übersichtstabelle Angaben über einige wichtige physikalische und technologische Eigenschaften unserer Halbzeuge.

6.1 Statische Eigenschaften von Massivmaterial (Banddicke >0,3 mm)

In Tabelle 8 und Abb. 7 sind in einer Übersicht die statischen Eigenschaften unserer Legierungen, die als Halbzeug (Banddicke >0,3 mm) geliefert werden, angegeben. Die Werte wurden an Stanzringen in Banddicke 1 mm nach optimaler Wärmebehandlung ermittelt. Je nach Lieferform und Banddicke können gewisse Abweichungen von diesen Werten sowohl nach oben als auch nach unten hin auftreten.

Tabelle 8: Statische Eigenschaften von Massivmaterial. Messung an Stanzringen, Banddicke: 1 mm.

Werkstoff	Permeabilität μ_4	Permeabilität μ_{max}	Koerzitivfeldstärke (A/cm)	Sättigungspolarisation (T)
MUMETALL	60000	250000	0,015	0,80
VACOPERM 100	200000	350000	0,01	0,74
PERMENORM 5000 H2	7000	120000	0,05	1,55
PERMENORM 5000 V5	9000	135000	0,04	1,55
PERMENORM 5000 S4	15000	150000	0,025	1,60
RECOVAC 50	3500	30000	0,15	1,35
MEGAPERM 40L	6000	80000	0,06	1,48
CHRONOPERM 36	6000	50000	0,05	0,75
PERMENORM 3601 K5	4000	50000	0,1	1,30
TRAFOPERM N3	1000	30000	0,2	2,03
VACOFER S1	2000	40000	0,06	2,15
VACOFLUX 50	1000	9000	1,4	2,35
VACOFLUX 17	600	4000	1,5	2,22

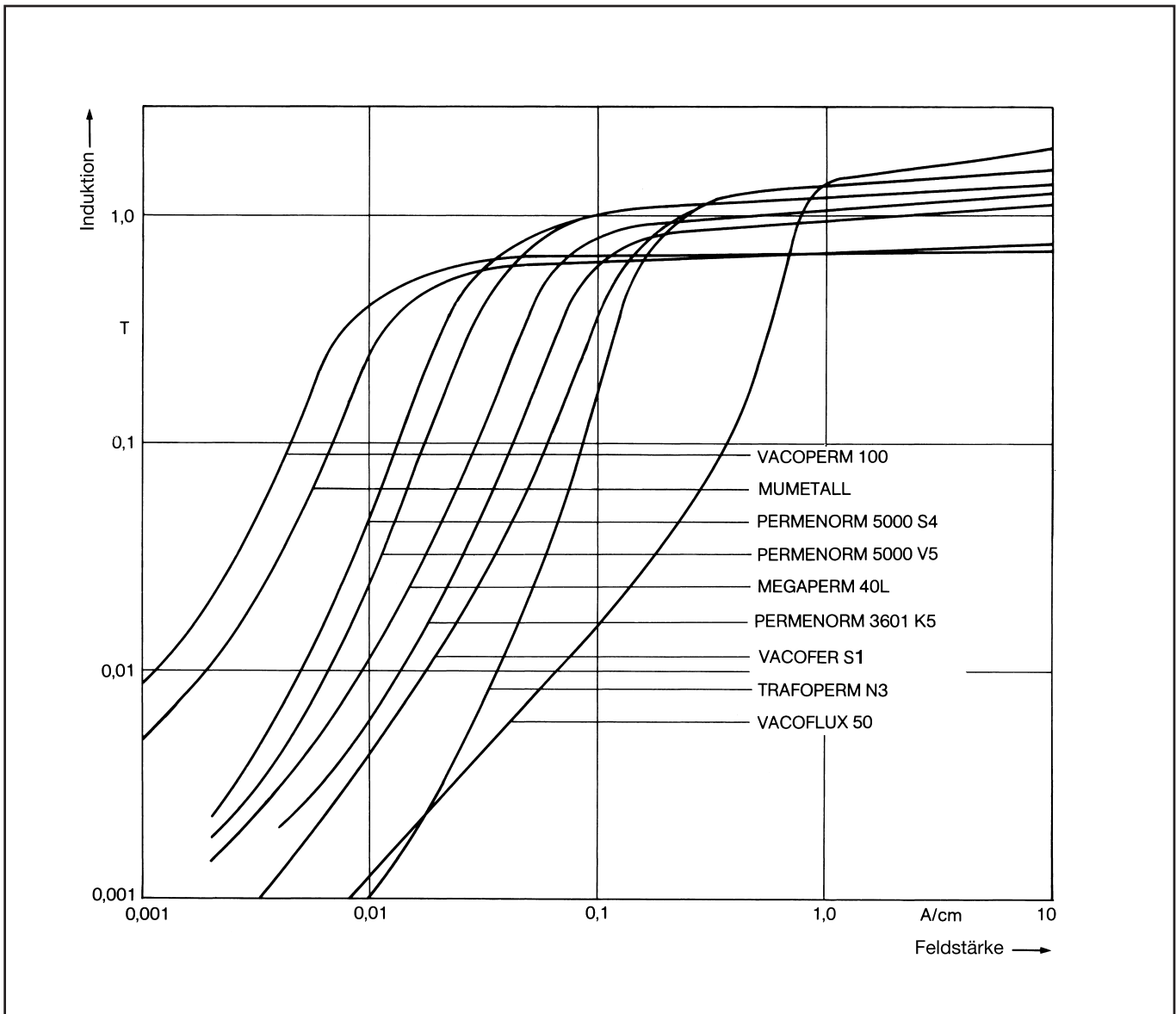


Abb. 7: Statische Induktions-Feldstärkekurven von Massivmaterial. Messungen an Stanzringen, Banddicke 1 mm

6.2 Dynamische (50 Hz) Eigenschaften von Bändern (Banddicke $\leq 0,3$ mm)

In den weitaus meisten Fällen werden Bänder (Banddicke $\leq 0,3$ mm) aus weichmagnetischen Werkstoffen in Wechselfeldern, vor allem bei Netzfrequenzen, eingesetzt.

Nachfolgend werden in Tabelle 9 sowie in Abb. 8 und 9 die dynamischen Eigenschaften bei 50 Hz angegeben. Auch diese Werte sind Mittelwerte, die an Ringbandkernen mit den für diese Legierungen typischen Banddicken ermittelt wurden.

Tabelle 9: Dynamische Eigenschaften (50 Hz) von Bändern. Messung an Ringbandkernen, Banddicke: s. Tab.

Werkstoff	Banddicke mm	Permeabilität		Verluste ¹⁾ (W/kg)	Sättigungspolarisation (T)
		μ_4	$\mu_{\max.}$		
MUMETALL	0,2	60000	150000	$p_{0,5} = 0,025$	0,80
VACOPERM BS		30000	150000	$p_{0,5} = 0,03$	0,97
VACOPERM 100	0,1	100000	250000	$p_{0,5} = 0,015$	0,74
ULTRAPERM 10	0,1	150000	300000	$p_{0,5} = 0,01$	0,74
ULTRAPERM 200	0,05 – 0,1	250000	350000	$p_{0,5} = 0,005$	0,74
ULTRAPERM 250	0,05	270000	400000	$p_{0,5} = 0,005$	0,74
ULTRAPERM 91R	0,1	150000	250000	$p_{0,5} = 0,015$	0,66
CRYOPERM 10	0,1 ²⁾	65000 ²⁾	160000 ²⁾	–	0,90 ²⁾
RECOVAC BS	0,1	25000	50000	$p_{0,3} = 0,01$	0,80
PERMAX M	0,2	50000	110000	$p_{1,0} = 0,1$	1,50
PERMENORM 5000 H2	0,2	12000	90000	$p_{1,0} = 0,25$	1,55
MEGAPERM 40 L	0,2	9000	75000	$p_{1,0} = 0,2$	1,48
PERMENORM 3601 K5	0,2	4000	50000	$p_{1,0} = 0,3$	1,30
TRAFOPERM N3	0,3	700	13000	$p_{1,0} = 1,0$	2,03
VACOFLEX 48	0,35	1200	20000	$p_{2,0} = 60^5)$	2,35
VACOFLEX 50	0,35	1000	12000	$p_{2,0} = 64^5)$	2,35
VACODUR 50 ³⁾	0,35	–	–	$p_{2,0} = 92^5)$	2,3
VACODUR 50 ⁴⁾	0,35	–	–	$p_{2,0} = 75^5)$	2,3
VACOFLEX 17	0,35	600	4000	$p_{2,0} = 90^5)$	2,22

¹⁾ $p_{0,5}$ = spezifische Ummagnetisierungsverluste bei 0,5 T usw.

²⁾ Magnetische Eigenschaften bei 77,3 K bzw. 4,2 K

³⁾ mit optimalen mech. Eigenschaften

⁴⁾ mit optimalen magnet. Eigenschaften

⁵⁾ Verluste bei 400 Hz

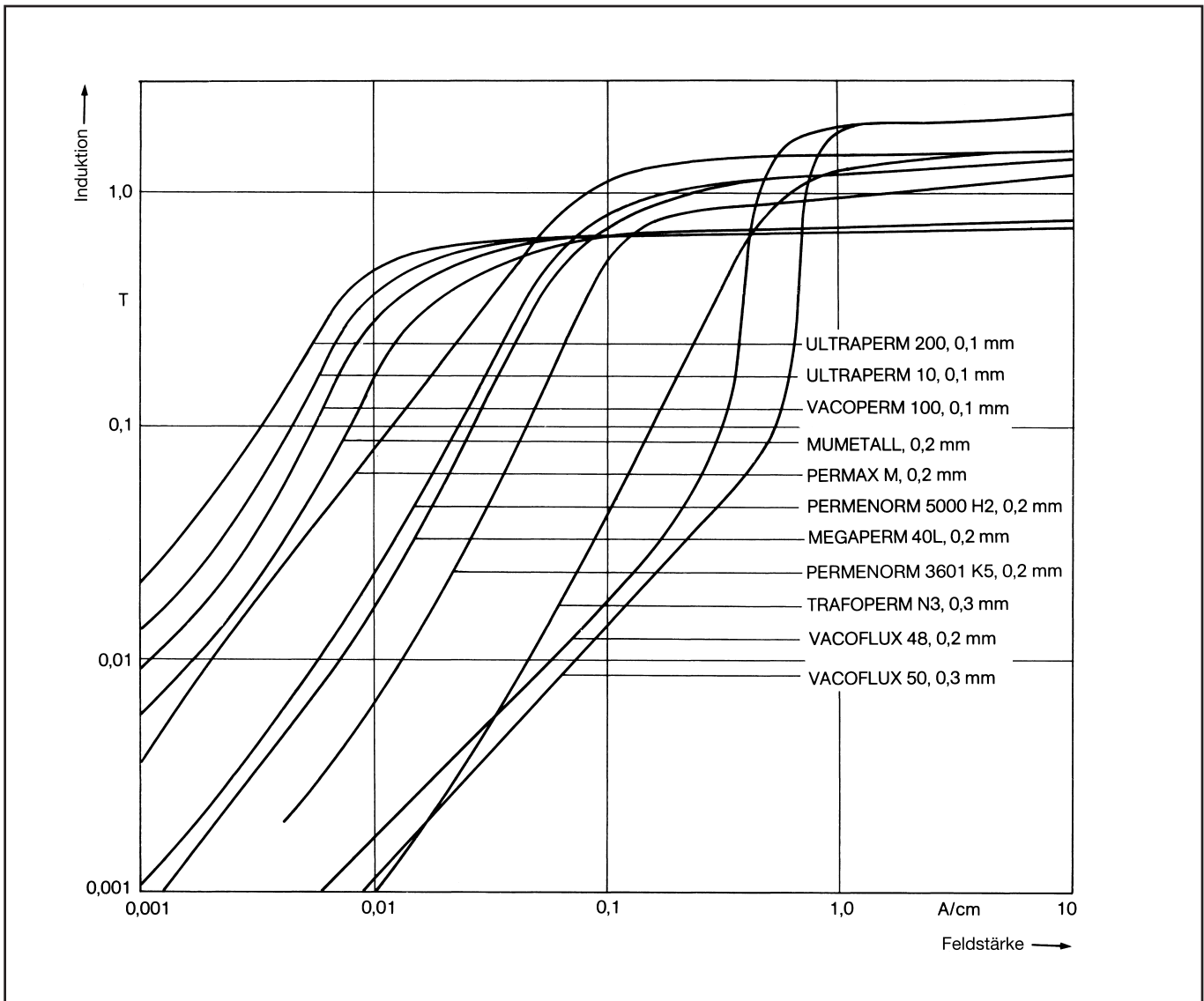


Abb. 8: Dynamische (50 Hz) Induktions-Feldstärkekurven von Bändern, Banddicke: $\leq 0,3$ mm. Messungen an Ringbandkernen

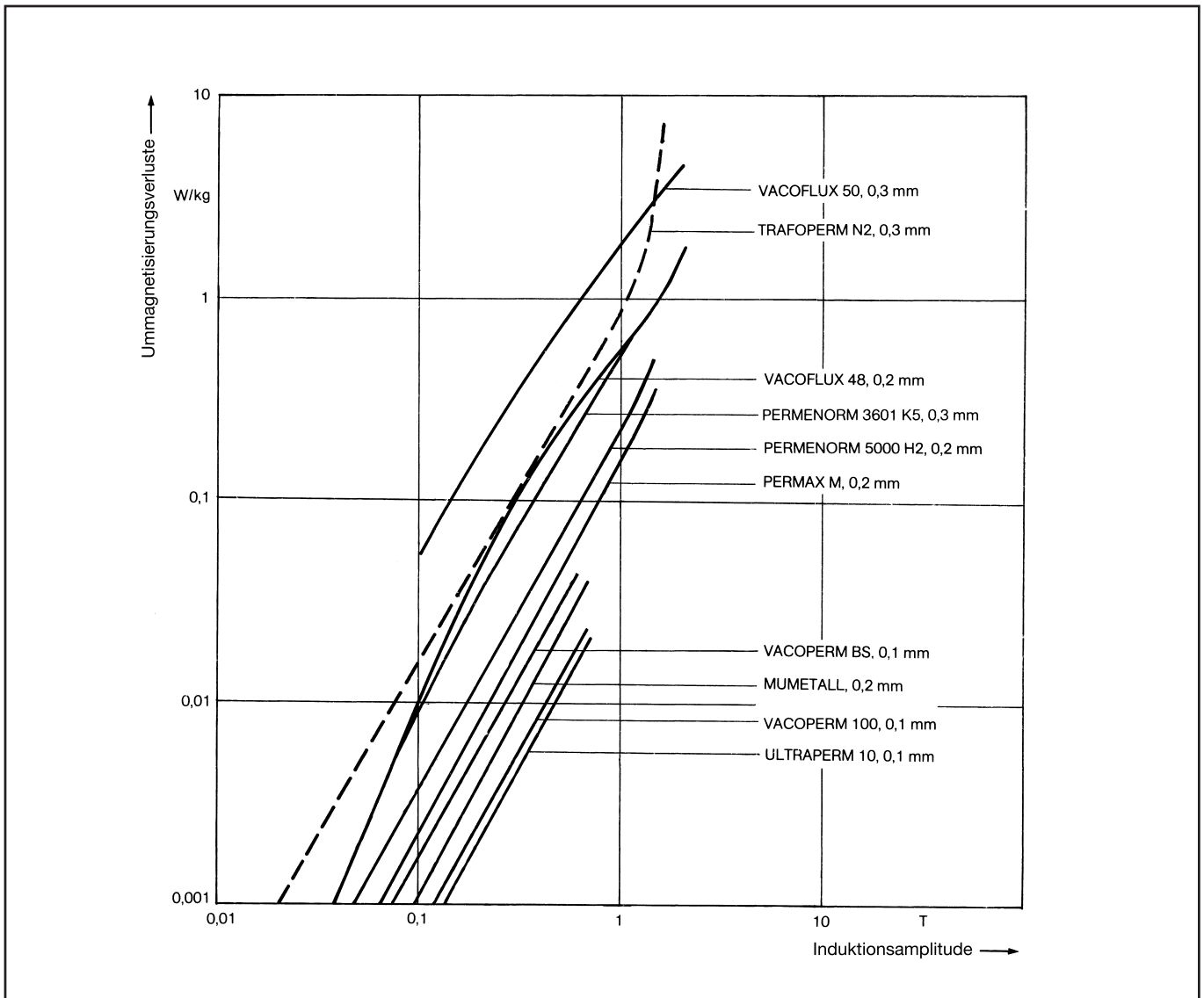


Abb. 9: Ummagnetisierungsverluste (f = 50 Hz) verschiedener weichmagnetischer Werkstoffe

6.3 Physikalische und technologische Eigenschaften unserer Halbzeuge

Tabelle 9 enthält einige wichtige physikalische und technologische Eigenschaften unserer weichmagnetischen Werkstoffe. Die möglichen Härtewerte sind in Abschnitt 4 (Lieferzustand) angegeben.

6.4 Temperaturabhängigkeit der magnetischen Eigenschaften

Der Curiepunkt eines magnetischen Werkstoffes wird im Wesentlichen durch die Legierungszusammensetzung bestimmt. Die Temperaturabhängigkeit der Sättigungspolarisation folgt bei fast allen Werkstoffen der gleichen Funktion. Abbildung 10 zeigt den Verlauf der Sättigungspolarisation in Abhängigkeit von der Temperatur für die wichtigsten weichmagnetischen Legierungen. Die Curietemperaturen T_c sind in Tabelle 9 angegeben.

Tabelle 9: Physikalische und technologische Eigenschaften kristalliner Werkstoffe

Werkstoff	Dichte g/cm ³	spez. el. Widerstand Ω mm ² /m	Wärmeleitfähigkeit W/Km	Curie-temperatur °C	E-Modul ¹⁾ kN/mm ²	Tiefung ²⁾ (DIN 50 101) mm	Ausdehnungskoeffizient (20-100°C) in 10 ⁻⁶ /K
MUMETALL	8,7	0,55	17 – 19	400	200	> 8	13,5
VACOPERM 100	8,7	0,60	17 – 19	360	170	> 8	13,5
ULTRAPERM 10	8,7	0,60	17 – 19	360	170	> 8	13,5
ULTRAPERM 200	8,7	0,60	17 – 19	360	170	–	13,5
ULTRAPERM 250	8,7	0,60	17 – 19	360	170	–	13,5
ULTRAPERM 91R	8,7	0,60	17 – 19	370	170	> 8	13,5
CRYOPERM 10 ³⁾	8,7	0,35 ³⁾	17 – 19	430	–	–	13,5
VACOPERM BS	8,7	0,60	17 – 19	500	170	> 8	13,5
RECOVAC BS	8,7	0,48	17 – 19	440	195	> 8	12,0
PERMENORM 5000 H2	8,25	0,45	13 – 14	440	140	> 8	10,0
PERMENORM 5000 V5	8,25	0,45	13 – 14	440	140	> 8	10,0
PERMENORM 5000 S4	8,25	0,40	13 – 14	500	160	> 8	10,0
RECOVAC 50	8,15	0,65	–	400	150	–	8,0
PERMENORM 3601 K5	8,15	0,75	13 – 14	250	135	> 8	4,0
MEGAPERM 40 L	8,20	0,60	13 – 14	310	100	> 8	4,0
CHRONOPERM 36	8,20	0,93	–	180	170	–	6,3
THERMOFLUX 55/100 G	8,15						
TRAFOPERM N3	7,65	0,40	31	750	180	nicht tiefziehfähig	12,0
VACOFER S1	7,87	0,10	72	770	200	9 – 11	13,0
VACOFLUX 48	8,12	0,44	30	950	200	nicht tiefziehfähig	9,5
VACOFLUX 50	8,12	0,44	30	950	210	nicht tiefziehfähig	9,5
VACODUR 50	8,12	0,42	–	950	250	nicht tiefziehfähig	10,2
VACOFLUX 17	7,94	0,39	–	920	200	6 – 8	10,8

¹⁾ Magnetisch schlussgeglüht

²⁾ Lieferzustand: weich tiefziehfähig

³⁾ Magnetische Eigenschaften bei 77,3 K bzw. 4,2 K

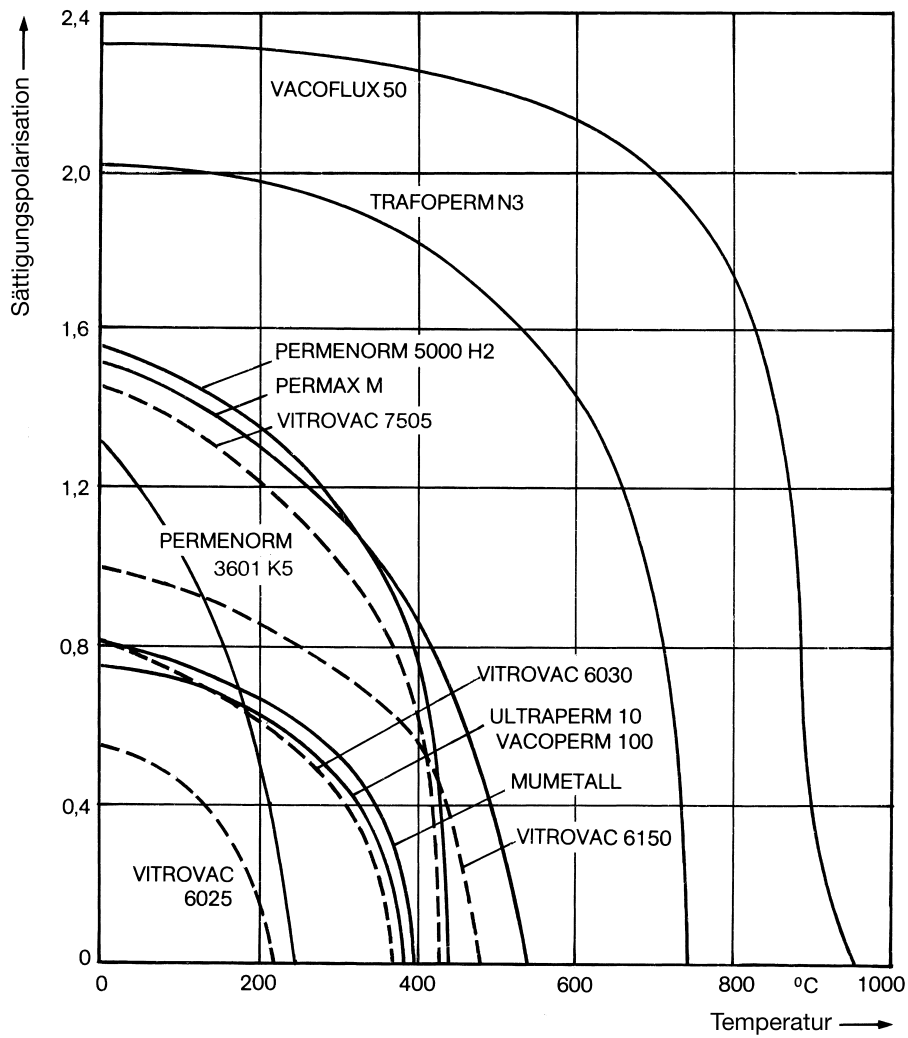


Abb. 10: Polarisations-Temperaturkurven verschiedener weichmagnetischer Legierungen.

Wegen der generellen Temperaturabhängigkeit der magnetischen Werkstoffeigenschaften sind entsprechende Angaben für bestimmte Anwendungsfälle erforderlich.

In Abbildung 11 wird am Beispiel von PERMENORM 5000 V5, PERMENORM 5000 S4 und VACOPERM 100 die relative Abhängigkeit der H_c -Werte von der Umgebungstemperatur im Temperaturbereich -30°C bis 100°C angegeben.

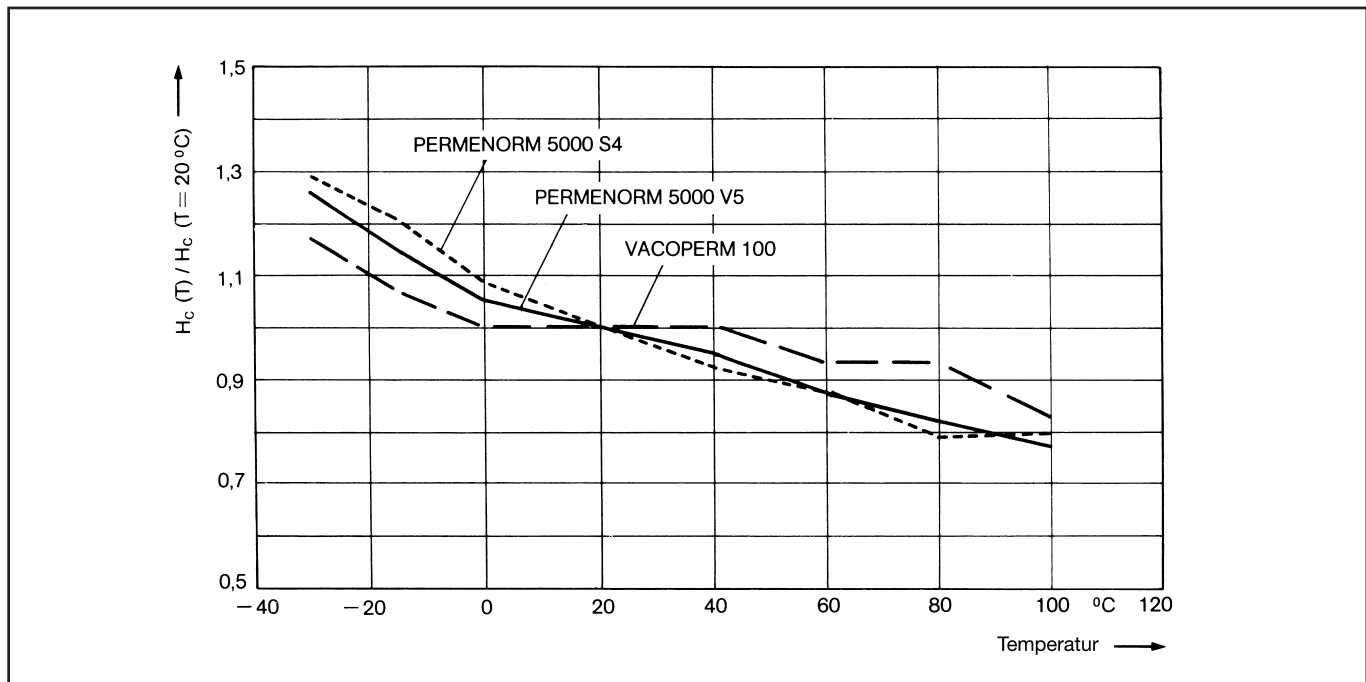


Abb. 11: Relative Temperaturabhängigkeit der Koerzitivfeldstärke H_c (normiert auf 20°C) von PERMENORM 5000 V5, PERMENORM 5000 S4 und VACOPERM 100

6.5 Eigenschaften spezieller weichmagnetischer Werkstoffe

6.5.1 THERMOFLUX

Zur Temperaturkompensation von Dauermagnetsystemen (z.B. Elektrizitätszähler, Tachometer, elektronische Waagen usw.) werden weichmagnetische Werkstoffe benötigt, deren Curietemperaturen nur wenig oberhalb der Raumtemperatur liegen, so dass sich innerhalb dieses Temperaturbereiches eine besonders starke Abhängigkeit der Induktion von der Umgebungstemperatur ergibt.

VAC liefert für diesen Anwendungsfall den Werkstoff THERMOFLUX, eine etwa 30 %-NiFe-Legierung, bei der durch geringe Variation der Zusammensetzung die Curietemperatur zwischen etwa $+30^\circ\text{C}$ und $+120^\circ\text{C}$ eingestellt werden kann. Die verschiedenen Varianten von THERMOFLUX werden durch zwei Zahlen und einen Buchstaben gekennzeichnet, z.B. 55/100 G. Die erste Zahl gibt die Curietemperatur in $^\circ\text{C}$ an, die zweite Zahl ist die Messfeldstärke in Oe ($100 \text{ Oe} = 80 \text{ A/cm}$). Der Buchstabe G bedeutet, dass innerhalb eines definierten Temperaturbereichs die Induktion-Temperaturkurve geradlinig verläuft. Für andere Anwendungen, z.B. temperaturempfindliche Schalter und Relais, kann eine Legierungsvariante in S-Qualität (z.B. 55/100 S) geliefert werden. Der Buchstabe S bedeutet, dass eine in der Nähe der Curietemperatur steil abfallende Induktion-Temperaturkurve eingestellt wird.

Obwohl bei THERMOFLUX, wie eingangs erwähnt, die Curietemperatur in bestimmten Grenzen variiert werden kann, empfehlen wir zur Temperaturkompensation von Dauermagnetsystemen unsere in der Praxis bewährte Standardlegierung:

THERMOFLUX 55/100 G.

Bei gegebener Zusammensetzung und Wärmebehandlung hängen sowohl die Curietemperatur als auch der Kurvenverlauf in gewissem Umfang noch von der Arbeitsfeldstärke ab.

Abb. 13 zeigt als Beispiel die Feldstärkeabhängigkeit der Induktions-Temperaturkurven von THERMOFLUX 55/100 G.

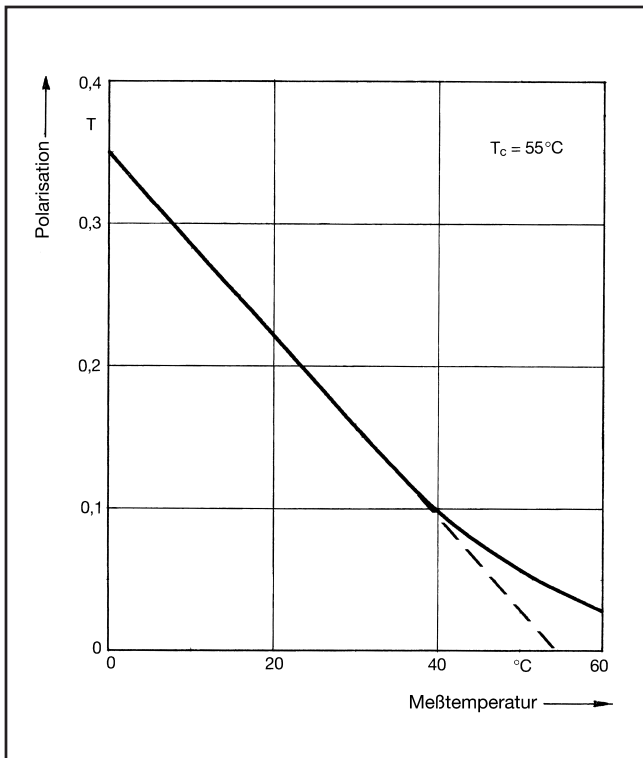


Abb. 12: Polarisations-Temperaturkurven von THERMOFLUX 55/100 G

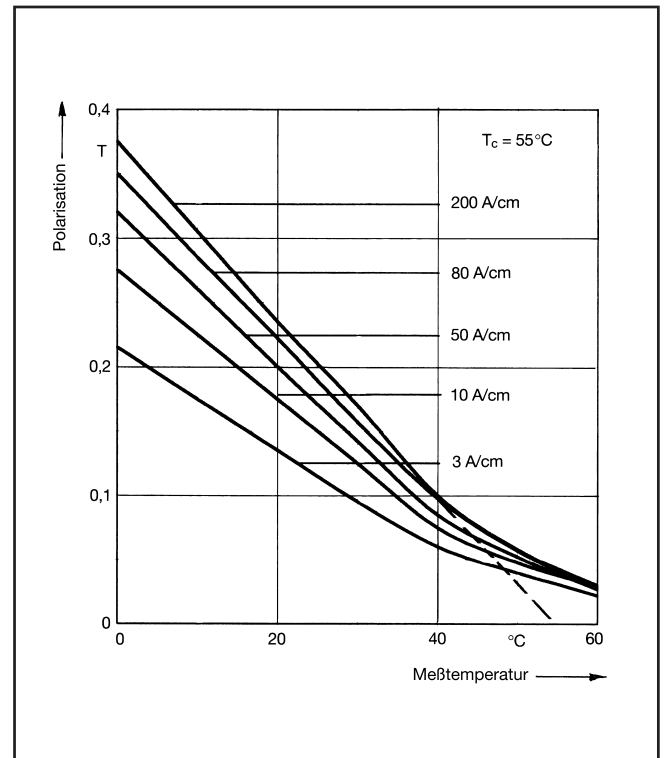


Abb. 13: Feldstärkeabhängigkeit der Polarisations-Temperaturkurven von THERMOFLUX 55/100 G ($f = 50 \text{ Hz}$)

7. Gewährleistung magnetischer Eigenschaften

Für die verschiedenen Legierungen und Lieferformen haben wir eine Reihe von Magnetqualitäten eingeführt, die wichtige magnetische Kenngrößen erfassen und den verschiedenen Anwendungsgebieten zugeordnet sind. Innerhalb der einzelnen Legierungsgruppen werden verschiedene Qualitätsniveaus angeboten.

Für ausschließlich kundengebundene Vereinbarungen können neben den Magnetqualitäten Prüfrichtlinien (PRs) erstellt werden, in denen das Prüfverfahren und die in Betracht kommenden Messpunkte spezifiziert sind.

Auf Anforderungen können von entsprechend autorisierten Stellen Bescheinigungen (Zertifikate) nach DIN 50 049 mit den Ergebnissen der Materialprüfungen ausgestellt werden.

7.1 Magnetqualitäten für Halbzeuge (Bänder, Banddicke $\leq 0,3 \text{ mm}$)

Bei der Prüfung von Bändern werden normalerweise die für unsere Ringbandkerne üblichen Magnetqualitäten zugrunde gelegt. Das Qualitätsniveau wird dabei durch die Chargenvorprüfung an Ringbandkernen ermittelt. Je nach Vereinbarung können die Messwerte auch an dem zu liefernden Produkt direkt gemessen werden.

In jedem Fall sollten jedoch die Einzelheiten bezüglich Messobjekt, Prüfverfahren und die in Betracht kommenden Messpunkte mit den entsprechenden Grenzwerten vereinbart werden.

In Tab. 10 wird eine Auswahl der typischen Magnetqualitäten für Bandlieferungen aus den verschiedenen weichmagnetischen Werkstoffen angegeben. Neben diesen allgemeinen Magnetqualitäten können für spezielle Anwendungen auch Sondervereinbarungen getroffen werden.

Tabelle 10: Magnetqualitäten für Halbzeug (Beispiele) Bänder, Banddicke $\leq 0,3$ mm.
(gemessen an Ringbandkernen nach üblicher Wärmebehandlung)

Werkstoff	Magnet- qualität	Banddicke mm	Messfrequenz	Permea- bilität ¹⁾ μ	Feldstärke H_{eff} (A/cm)	Mindest- Induktion \hat{B} (T)
MUMETALL	A-006	0,2 0,3	50 Hz 50 Hz	$\mu_4 \geq 40000$ $\mu_4 \geq 40000$	0,019 0,023	0,3 0,3
VACOPERM 100	B-020	0,1	50 Hz	$\mu_4 \geq 80000$	0,009	0,3
ULTRAPERM 10	U-020	0,05 – 0,1	50 Hz	$\mu_4 \geq 150000$	0,006	0,3
ULTRAPERM 200	U-022	0,05 – 0,1	50 Hz	$\mu_4 \geq 200000$	0,005	0,26
ULTRAPERM 250	U-025	0,05	50 Hz	$\mu_4 \geq 250000$	0,004	0,26
PERMAX M	P-003	0,1 0,2	50 Hz 50 Hz	$\mu_4 \geq 50000$ $\mu_4 \geq 40000$	0,018 0,028	0,3 0,3
PERMENORM 5000 H2	H2-006	0,05 – 0,1 0,2	50 Hz 50 Hz	$\mu_4 \geq 6000$ $\mu_4 \geq 6000$	0,055 0,080	0,6 0,6
MEGAPERM 40 L	MP-003	0,05 – 0,2	50 Hz	$\mu_4 \geq 5000$	–	–
PERMENORM 3601 K5	K2-004	0,1 – 0,3	50 Hz	$\mu_{16} \geq 2900$	–	–
VACOFLEX 50	V-050	0,05 – 2,0	Gleichfeld	–	H = 3 A/cm H = 8 A/cm	1,7 2,0
VACOFLEX 48	V-055	0,1 – 2,0	Gleichfeld Gleichfeld	–	H = 3 A/cm H = 8 A/cm	1,8 2,1
RECOVAC BS	RC-003	0,1 – 4,0	50 Hz	$\mu_4 \geq 20000$	–	–
THERMOFLUX ²⁾	T-001	0,05 – 0,3	50 Hz	–	H = 80 A/cm	Soll-Curie- punkt $\pm 5^\circ\text{C}$

¹⁾ Indizes = H (mA/cm)

²⁾ THERMOFLUX, Banddicke: $>0,3$ mm s. Tab. 11 (Massivmaterial)

7.2 Magnetqualitäten für Halbzeuge (Beispiele): Bänder, Banddicke $>0,3$ mm, Profilmaterial, Stäbe, Drähte

Bei Lieferungen von Halbzeugen aus Massivmaterial wird die Einhaltung der magnetischen Qualität nach vorschriftsmäßiger Wärmebehandlung normalerweise durch eine Messung der statischen Koerzitivfeldstärke an entsprechenden Streifen oder Stababschnitten überprüft. Auf Wunsch können auch Ringproben angefertigt werden, an denen Permeabilitäts- oder Induktionswerte überprüft werden können. Die Messwerte können dabei wie unter 7.1 entweder bei der Chargenvorprüfung oder an dem zu liefernden Band direkt gemessen werden.

Auch hier empfehlen wir eine genaue Festlegung bezüglich Messobjekt, Prüfverfahren und Messpunkte.

In Tabelle 11 sind die z.Z. gültigen Magnetqualitäten für Lieferungen von Massivmaterial angegeben.

Tabelle 11: Magnetqualitäten für Halbzeuge (Beispiele): Bänder, Banddicke $\geq 0,3$ mm, Profilmaterial, Stäbe, Drähte

Werkstoff	Werkstoff-Sorte nach DIN 17405 (1979)	Qualitätsstufe	Magnetqualität	Sorte nach DIN-IEC 404-8-6	Magnetische Prüfwerte	Mindestwerte für die Induktion ¹⁾ in T für Feldstärke in A/cm							
						Koerzitivfeldstärke A/cm	0,2	0,5	1,0	2,0	3,0	5,0	10
MUMETALL	R Ni 5	○	A-090	E 11-60	$H_c \leq 0,04$	0,5	0,65	0,7	-	-	0,73	-	0,74
	-	●	A-091	-	$H_c \leq 0,03$								
VACOPERM 100	R Ni 2	○	B-090	-	$H_c \leq 0,025$	0,5	0,65	0,7	-	-	0,73	-	0,74
	-	●	B-091	E 11-100	$H_c \leq 0,015$								
VACOPERM BS RECOVAC BS		○	BS-090		$H_c \leq 0,025$ $H_c \leq 0,025$	0,5		0,7					0,97 0,74
PERMENORM 5000 H2	R Ni 12	○	H3-090	-	$H_c \leq 0,12^2)$	0,5	0,9	1,1	-	1,25	1,35	-	1,45
	-	●	H3-091	E 31-6	$H_c \leq 0,08^2)$								
PERMENORM 5000 V5 PERMENORM 5000 S4 RECOVAC 50	R Ni 8 R Ni 8	○ ○	V5-090 S4-090	E 31-10 -	$H_c \leq 0,06$ $H_c \leq 0,045$ $H_c \leq 0,15$	1,35 T bei 10 A/cm				$\mu_{max} > 25.000$			
PERMENORM 3601 K5 MEGAPERM 40 L CHRONOPERM 36	R Ni 24	○	K5-090	E 41-03	$H_c \leq 0,24$ $H_c \leq 0,06$ $H_c \leq 0,04$	0,2	0,45	0,7	-	0,9	1,0	-	1,18 1,38 T bei 10 A/cm 0,7-0,85 T bei 10 A/cm
THERMOFLUX 55/100 G	-	○	T-001	-	Soll-Curiepunkt $55 \pm 5^\circ\text{C}$								
TRAFOPERM N3	R Si 24	○	N3-090	C 1-24	$H_c \leq 0,24$	-	-	1,2	-	1,3	1,35	-	1,5
	R Si 12	●	N3-091	C 1-12	$H_c \leq 0,12^3)$								
VACOFER S1	R Fe 12	●	S-092	A-12	$H_c \leq 0,12$	-	-	1,15	1,25	1,3	1,4	1,45	1,6
VACOFLUX 48 Band ⁴⁾	-	○	V-050 V-090	F 11-60	$H_c \leq 0,4$					1,8	2,0	2,2	2,25
VACOFLUX 50 Band ⁴⁾	-	○		F 11	$H_c \leq 0,8$					1,7	1,9	2,1	2,2
VACOFLUX 50 Massiv	-	○		F 11	$H_c \leq 2,4$								1,95
VACODUR 50 Band ⁵⁾				F 1	$H_c \leq 1,6$								
VACODUR 50 Band ⁶⁾				F 1	$H_c \leq 2,0$								
VACOFLUX 17					F 1	$H_c \leq 2,0$	Induktion 2,0 T bei Feldstärke 160 A/cm						

¹⁾ Werte nach DIN 17405 und DIN-IEC 404-8-6 (außer VACOFLUX)

²⁾ Für geschliffene und geläppte Kleinteile $H_c \leq 0,14$ bzw. $0,10$ A/cm

³⁾ Für Teile mit Dicken unter 2 mm und ungünstige Formen
 $H_c \leq 0,15$ A/cm

⁴⁾ Auch ASTM A801 Alloy Type 1 mit max. 0,4 % Ni, früher MIL-A-47182 gestrichen Okt. 1981

⁵⁾ mit optimalen magnetischen Eigenschaften

⁶⁾ mit optimalen mechanischen Eigenschaften

Anmerkung

Neben diesen allgemeinen Magnetqualitäten können für spezielle Anwendungen Sondervereinbarungen getroffen werden.

○ Normalqualität

● Sonderqualität

Produktübersicht

Halbzeug und Teile

Metallisches Halbzeug

Weichmagnetische Legierungen
Magnetisch halbharte Legierungen
Verformbare Dauermagnete
Bimetalle
Federlegierungen
Einschmelzlegierungen

Teile

Stanz-/Biegeteile
Blechpakete
Magnetische Abschirmungen

Supraleiter

Kerne und Bauelemente

Magnetkerne

Bandkerne aus kristallinen, amorphen und nanokristallinen Legierungen

Induktive Bauelemente

für ISDN, xDSL und Schaltnetzteile,
zur Stromerfassung und
zur Ansteuerung von Leistungshalbleitern

Selten-Erd-Dauermagnete

Magnete auf Basis Sm-Co und Nd-Fe-B

Kunststoffgebundene Magnete

Magnetsysteme

VACUUMSCHMELZE GMBH & CO. KG



Der Fortschritt beginnt beim Werkstoff

Grüner Weg 37
D-63450 Hanau

☎ (**49) 61 81 / 38-0

☎ (**49) 61 81 / 38-20 65

Internet: <http://www.vacuumschmelze.com>

E-Mail: Info@vacuumschmelze.com

102002

Herausgegeben von VACUUMSCHMELZE GMBH & CO. KG, Hanau
© VACUUMSCHMELZE GMBH & CO. KG 2002.
Alle Rechte vorbehalten.

Gewähr für die Freiheit von Rechten Dritter leisten wir nur für die Produkte selbst, nicht für Anwendungen, Verfahren und für die mit den Erzeugnissen realisierten Schaltungen. Mit den Angaben werden die Produkte spezifiziert, nicht Eigenschaften zugesichert. Liefermöglichkeiten und technische Änderungen vorbehalten.

Gedruckt auf chlorfrei hergestelltem Papier.