

# Magnetische Abschirmungen

Grundlagen  
Lieferprogramm  
Messtechnik

# Inhalt

Magnetische Abschirmungen	3
Auslegung von Abschirmungen	4
Weichmagnetische Legierungen	10
MUMETALL®	11
CRYOPERM® 10	11
PERMENORM® 5000 H2	11
Reineisen	12
VACOFLUX® 50	12
VITROVAC® 6025 X	12
Lieferformen	13
Materialbearbeitung und Fertigungsmöglichkeiten	15
Wärmebehandlung	16
Messsysteme und Dienstleistungen	17
Qualitätssicherung	19
Begriffe und Definitionen	21
Wir über uns	22

# Magnetische Abschirmungen

Diese Broschüre befasst sich mit der Abschirmung magnetischer Gleichfelder und niederfrequenter Felder. Für diese Schirmaufgaben werden vor allem weichmagnetische Werkstoffe eingesetzt.

Elektromagnetische Felder können elektrische Geräte, Magnetsysteme und auch Lebewesen beeinflussen. Abschirmungen werden verwendet, um diese Wechselwirkung zu verringern oder zu unterbinden. Bei einer Abschirmmaßnahme wird entweder der Ausgangspunkt des Feldes (Störquelle) oder die gestörte Einheit (Störsenke) mit geeigneten Materialien ummantelt.

Während sich elektromagnetische Felder mit Frequenzen oberhalb von ca. 1 kHz durch dünne Metallfolien oder -netze aus Materialien mit hoher elektrischer Leitfähigkeit sehr gut abschirmen lassen (Prinzip Faraday'scher Käfig), ist für statische oder niederfrequente elektromagnetische Felder ein höherer Aufwand notwendig. Sind die Frequenzen hinrei-

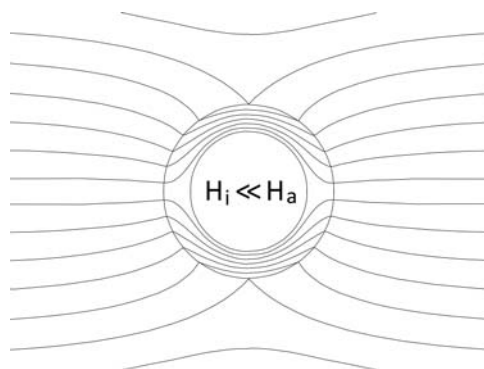


Abbildung 1: Prinzip der Flussumleitung (schematisch).

chend klein, müssen elektrisches und magnetisches Feld unabhängig voneinander betrachtet und abgeschirmt werden.

Da im Gegensatz zum elektrischen Feld keine isolierten magnetischen Ladungen (Monopole) existieren, sind magnetische Feldlinien immer in sich geschlossen; sie besitzen keinen Anfang und kein Ende. Daher existieren keine magnetischen Isolatoren (das Prinzip der Supraleitung ist hiervon ausgenommen).

Die Abschirmung niederfrequenter Magnetfelder beruht auf dem Prinzip der „Feldumleitung“ mittels magnetisch leitfähiger Materialien. Der magnetische Fluss wird von dem zu schützenden Bereich ferngehalten, denn er folgt dem energetisch günstigeren Weg in der magnetischen Abschirmung. So erfolgt eine Feldverarmung im abgeschirmten Bereich.

Typische Anwendungen für magnetische Schirmungen reichen von Gleichfeldern (Erdmagnetfeld, industrielle Gleichstromleitungen, Kernspintomographie, ...) über  $16 \frac{2}{3}$  Hz (Bahntechnik), Netzfrequenzen (50/60 Hz) bis in den Bereich von 91 kHz (z. B. zur Einhaltung der Arbeitsschutzgrenzwerte nach BGR B11). Für höhere Frequenzen werden (zusätzliche) Abschirmungen bestehend aus Materialien mit hoher elektrischer Leitfähigkeit eingesetzt.

Die zu schirmenden Feldstärken reichen über mehrere Größenordnungen vom nT- bis in den mT-Bereich. Gefordert werden praktisch feldfreie Räume für wissenschaftliche Experimente, sehr niedrige Grenzfeldstärken für empfindliche Sensoren oder Elektronik bis zu moderaten Feldstärken zur Vermeidung von Kräfteinwirkungen auf ferromagnetische Gegenstände.

Einen Sonderfall stellt das „System Mensch“ dar. Die berufsgenossenschaftlichen Regeln für Sicherheit und Gesundheit bei der Arbeit legen in der BGR B11 Grenzwerte für verschiedene Expositionsbereiche fest. Auch wenn diese Grenzwerte schon deutlich höher sind als vom Bundes-Immissionsgesetz für die Allgemeinheit empfohlen, können diese oft nur durch aufwändige Abschirmmaßnahmen eingehalten werden.

# Auslegung von Abschirmungen

Einfache Abschirmungen können durch standardisierte oder standardnahe Produkte realisiert werden.

Für erste Experimente eignen sich insbesondere Folien aus den Materialien VITROVAC® 6025 X und MUMETALL®. In der Regel wird jedoch der Fertigung einer Abschirmung eine Planungs- und Konstruktionsphase vorausgehen.

Unterschiedliche Probleme erfordern unterschiedliche Lösungen – dies gilt auch für magnetische Abschirmungen.

Zu den entscheidenden Kriterien für die geeignete Abschirmung zählen unter anderem:

- Magnetische Feldstärken und Feldverläufe
- Frequenzen der Magnetfelder
- Räumliche Einschränkungen
- Umgebungsbedingungen wie Temperatur, Feuchtigkeit etc.
- Optischer Eindruck
- Kosten

# Die theoretischen Ansätze zur Berechnung von Schirmfaktoren

Die wissenschaftlichen Betrachtungen, die eine geschlossene Beschreibung dieser Thematik ermöglichen, liegen teilweise mehr als 100 Jahre zurück.

Trotzdem ist die Lektüre der „alten Meister“ nicht nur aus historischen Gründen interessant. Einfache Abschirmprobleme werden auch heute noch mit den damals entwickelten Formeln berechnet. Genau genommen ist in der neueren wissenschaftlichen Literatur wenig neues Analytisches hinzugekommen.

Bei der theoretischen Betrachtung von niederfrequenten magnetischen Störfeldern können allerdings nur einfache geometrische Modelle analytisch behandelt werden. Für die meisten realen Abschirmungen mit angepassten Geometrien, Öffnungen etc. ist eine analytische Lösung nicht zu finden.

Die Abschirmwirkung eines Gehäuses hängt von der Permeabilität des Werkstoffes, von der Form und Größe des Gehäuses sowie von der Wanddicke ab. Nur für wenige Formen ergibt die analytische Berechnung eine Lösung. Diese Ergebnisse können aber zur Abschätzung der Schirmwirkung anderer Gehäuse herangezogen werden.

Als (skalaren) Abschirmfaktor  $S$  bezeichnet man das Verhältnis der Beträge des ungeschirmten Feldes  $H_o$  zum verbleibenden Restfeld  $H_i$  im Inneren einer magnetischen Abschirmung:

$$S = \frac{H_o}{H_i}$$

## Schirmfaktoren von Zylindern

Die im folgenden angegebenen Formeln gelten unter der Voraussetzung, dass die Abschirmung dünnwandig aufgebaut ist. Die statische Abschirmwirkung einer langen zylinderförmigen Abschirmröhre im Querfeld kann dann wie folgt abgeschätzt werden:

$$S_q = \mu_r \cdot \frac{d}{D} + 1$$

$S_q$ : Schirmfaktor im Querfeld  
 $\mu_r$ : relative Materialpermeabilität  
 $d$ : Wanddicke  
 $D$ : Zylinderdurchmesser

Diese einfache Formel vernachlässigt Effekte, die durch Deckel an den Zylinderenden auftreten.

Für Felder längs der Achse ist die Schirmwirkung zusätzlich vom Verhältnis Länge  $L$  zu Durchmesser  $D$  des Rohres abhängig. Näherungsweise gilt:

$$S_l = \frac{4 \cdot N \cdot (S_q - 1)}{1 + \frac{D}{2L}} + 1$$

$S_l$ : Schirmfaktor im Längsfeld  
 $L$ : Länge des Zylinderrohres  
 $N$ : Entmagnetisierungsfaktor.

Für beidseitig geschlossene Zylinder gilt im Bereich  $L/D = 1$  bis 10 die Näherung:

$$N \approx 0.38 \cdot (L/D)^{-1,3}$$

## Schirmfaktoren von Kugeln, Quadern und Würfeln

Für eine geschlossene Kugel mit Durchmesser  $D$  und Wanddicke  $d$  gilt:

$$S = \frac{4}{3} \cdot \mu_r \cdot \frac{d}{D} + 1$$

Die Schirmwirkung von Würfeln mit Kantenlänge  $a$  ist nicht über den gesamten Innenraum konstant. Im Zentrum ist  $S$  kleiner als in der Nähe der Wände. Ein mittlerer Abschirmfaktor kann mit der folgenden Formel abgeschätzt werden.

$$S = \frac{4}{5} \cdot \mu_r \cdot \frac{d}{a} + 1$$

$a$ : Kantenlänge

Für quaderförmige Gehäuse kann, solange der Unterschied in den drei Kantenlängen nicht zu groß ist, die Formel für Kugeln verwendet werden. Als „Durchmesser“ ist dann die Raumdiagonale des Quaders zu wählen.

## Einfluss von Öffnungen

In vielen Fällen müssen aus technischen Gründen Öffnungen in Abschirmungen vorgesehen werden. Um den Einfluss dieser Öffnungen auf den Schirmfaktor abzuschätzen, können Untersuchungen an offenen zylindrischen Abschirmrohren

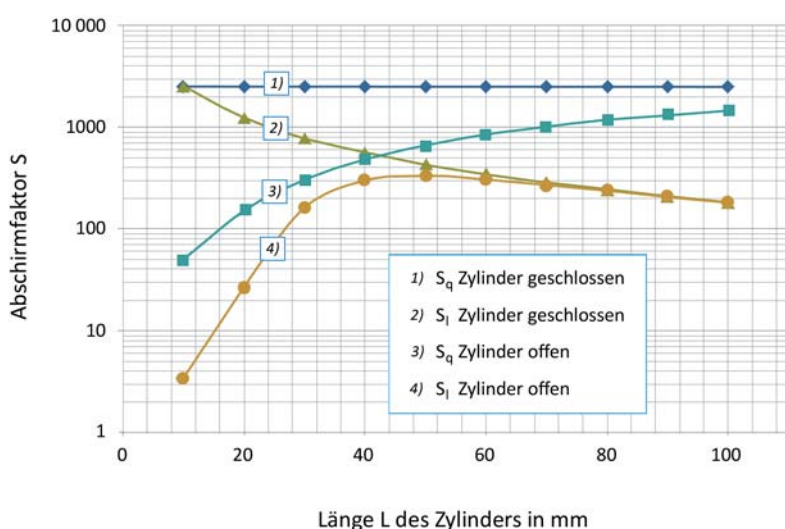


Abbildung 2: Magnetostatische Abschirmfaktoren von dünnwandigen Zylindern ( $D = 10 \text{ mm}$ ,  $d = 1 \text{ mm}$ ), gerechnet mit den aufgeführten Näherungsformeln für  $\mu_r = 25.000$  im Quer- ( $S_q$ ) bzw. Längsfeld ( $S_l$ ).

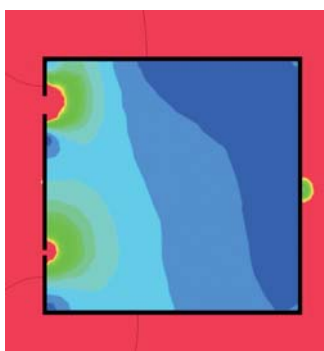


Abbildung 3: Auswirkung von Spalten in einem MUMETALL®-Abschirmkasten auf die Feldstärke im Inneren. Die äußere Störquelle sitzt im nicht abgebildeten Bereich links. Rot = hohe Feldstärke, blau = niedrige Feldstärke.

herangezogen werden. Das Außenfeld kann auf zwei Wegen in den Innenraum eindringen: zum einen durch den Mantel, zum anderen durch die Öffnungen. Das Öffnungsfeld fällt exponentiell mit dem Abstand von der Öffnungsebene ab.

Diese Zusammenhänge sind in Abbildung 2 für geschlossene und offene Zylinder im Längs- und Quersfeld dargestellt.

Einen qualitativen Eindruck der Auswirkungen von Spalten in Abschirmungen vermittelt Abbildung 3. Hohe Feldstärken sind rot dargestellt, schwächere Felder werden (absteigend) durch die Farben Gelb, Grün und Blau angezeigt. Für die zugrunde liegenden Simulationen nach der Finite-Elemente-Methode (FEM) wurden zwei Spalte mit den Breiten 10 mm (links oben) und 1 mm (links unten) in einem MUMETALL®-Kasten angenommen. Auch noch in einiger Entfernung von den Spalten im Innern der Abschirmung ist das Restmagnetfeld merklich höher als bei einer geschlossenen Abschirmung.

Der Einfluss von Öffnungen auf die Abschirmwirkung kann durch Gitter oder besser Kamine reduziert werden.

## Mehrfachabschirmungen

Zur Verbesserung des Schirmfaktors bei minimiertem Materialeinsatz können Mehrfachabschirmungen verwendet werden. Die Schirmfaktoren der verschiedenen Einzelschalen wirken bei genügend großem Abstand näherungsweise multiplikativ.

# Flächenabschirmungen

Die Geometrie ist von großer Bedeutung für die Schirmwirkung einer Abschirmung. Die mittels FEM simulierten Abschirm-szenarien in den folgenden Bildern zeigen dies deutlich. Die Farbe Rot deutet wieder auf ein starkes Magnetfeld hin; die Farben Gelb, Grün und Blau zeigen in dieser Reihenfolge Abschwächungen des Magnetfelds an.

Bild (A)

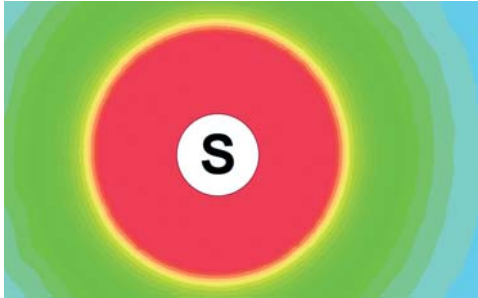
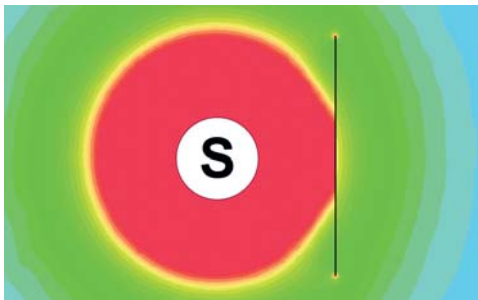


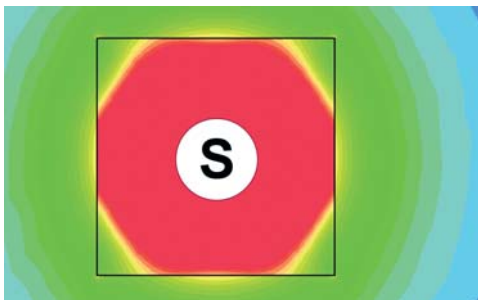
Bild (A) zeigt die Feldstärkeverteilung um eine ungeschirmte niederfrequente magnetische Störquelle (S).

Bild (B)



In Bild (B) wurde in einem Abstand von 2,5 m von der Quelle eine 5 m breite und 1 mm dicke Abschirmplatte mit einer relativen Permeabilität von  $\mu_r = 500$  hinzugefügt. Der Feldverlauf wird dadurch nur geringfügig verändert.

Bild (C)



Ein geschlossener Kasten um die Störquelle aus dem gleichen Material wie in Bild (B) bewirkt ebenfalls nur geringfügige Veränderungen.

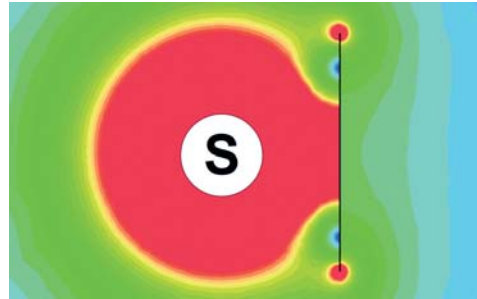
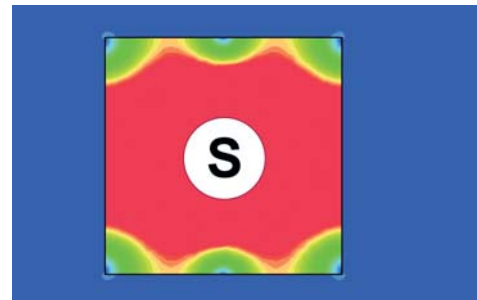


Bild (D)

In Bild (D) wurde die Platte mit  $\mu_r = 500$  durch eine mit  $\mu_r = 50.000$  ersetzt. Die Schirmwirkung in dem Bereich, der direkt an die Abschirmplatte angrenzt, ist merklich höher. In einigen Metern Entfernung von der Platte ist jedoch das Feld wie auch in den Bildern (B) und (C) kaum reduziert. Außerdem verursacht die Platte in Bild (D) deutlich erkennbare Streufelder an ihren Rändern.

Bild (E)



Erst eine geschlossene Abschirmung aus hochpermeablem Material ( $\mu_r = 50.000$ ) wie in Bild (E) bewirkt eine signifikante Reduzierung der Feldstärke außerhalb der Abschirmung.

Es ist zu beachten, dass auch in den Bereichen mit gleicher Farbdarstellung die magnetische Feldstärke abfällt. Dies jedoch durch die Skalierung hier nicht erkennbar.

Abbildung 4 (Bilder A, B, C, D, E): Auswirkung von verschiedenen Abschirmungstypen auf ein magnetisches Störfeld, simuliert mittels FEM.

Die Schirmwirkung von offenen Abschirmplatten ist also trügerisch. Nahe der Platte kann eine gute Schirmwirkung festgestellt werden. In größerer Entfernung von der Platte ist die Feldstärke dagegen nahezu identisch mit der einer ungeschirmten

Quelle. Die Schirmung von Räumen mit einer Platte zwischen Störer und Messgeräten oder Personen ist also nur unmittelbar in der Nähe der Schirmung wirksam. Dagegen muss an den Plattenrändern sogar mit einem erhöhten Streufeld gerechnet werden.

Die Schirmwirkung in einiger Entfernung von Abschirmplatten ist weitgehend unabhängig vom verwendeten Material, ob nun hochpermeables MUMETALL® verwendet wird oder Abschirmmaterialien mit geringerer Permeabilität. Für die Schirmwirkung einer offenen Abschirmung spielt die Permeabilität nur eine untergeordnete Rolle, da die Geometrie in diesem Fall die Schirmwirkung dominiert (analog zu Abbildung 2).

Der (stark geometrieabhängige) Schirmfaktor in der Nähe von Abschirmplatten liegt bei Raumabschirmungen üblicherweise im Bereich von 2 – 3 (entsprechend etwa 6 – 10 dB); mit einer geschlossenen Abschirmung aus MUMETALL® einfacher Bauart können dagegen Schirmfaktoren über 10 (20 dB) erreicht werden. Durch einen höheren Material- und Konstruktionsaufwand können Schirmwirkungen von bis zu 70.000 (ca. 96 dB) erzielt werden. Solche Großaufbauten setzen jedoch die Verwendung zahlreicher ineinander geschachtelter MUMETALL®-Abschirmungen voraus.

Es empfiehlt sich in jedem Fall eine Beratung, um je nach Problemstellung die optimale und kostengünstigste Lösung zu finden.

## Frequenzeinfluss

Bei elektrisch und magnetisch geschlossenen Abschirmungen verbessert sich die Abschirmwirkung mit steigender Frequenz. Verantwortlich hierfür sind im Material induzierte Wirbelströme, durch die ein magnetisches Gegenfeld erzeugt wird. Durch den Skineneffekt werden die induzierten Ströme an die Oberfläche gedrängt und die Stromdichte wird im Materialinneren geringer. Bei der sogenannten Eindringtiefe ist die Stromdichte auf  $e^{-1}$  des Wertes nahe der Oberfläche abgefallen.

Die Eindringtiefe des elektromagnetischen Wechselfeldes berechnet sich zu:

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\mu_r \cdot \mu_0 \cdot \pi \cdot f}}$$

$\delta$ : Eindringtiefe

$\rho$ : Spezifischer elektrischer Widerstand

$\mu_0$ : Permeabilitätskonstante

$f$ : Frequenz

Wirksam wird dieser Effekt, wenn die Eindringtiefe kleiner oder gleich der halben Wanddicke ist. Für MUMETALL® in 1mm Wandstärke und einer Anfangspermeabilität von 25.000 beginnt dies bei ca. 20 Hz.

# Berechnung mittels FEM (Finite-Elemente-Methode)

2D-FEM-Programme ermöglichen nicht nur sehr schnell erste Abschätzungen, sondern führen auch in Verbindung mit analytisch/empirischen Rechenprogrammen zu praxistauglichen Lösungsansätzen. Bei komplexeren Problemstellungen können 3D-Programme eingesetzt werden, die allerdings einen deutlich erhöhten Rechenaufwand und hohe Investitionskosten in Software erfordern. Außerdem können die Ergebnisse stark von der Definition bestimmter, teils programmspezifischer Randbedingungen abhängen, deren richtige Wahl nicht immer eindeutig aus der konkreten Problemstellung ersichtlich ist. Daher kann auch nach erfolgreicher FEM-Simulation nicht immer davon ausgegangen werden, dass das gefundene Ergebnis der Realität entspricht.

Leider sind kleine Details oftmals die kritischen Stellen. Reale Abschirmungen weisen in ihrer Wirksamkeit gerade hier oft starke Abweichungen vom Simulationsergebnis auf.

Diese Abweichungen werden z. B. durch die unzureichende Berücksichtigung mechanischer Toleranzen der Abschirmung oder räumlicher Schwankungen der magnetischen Materialeigenschaften nach der magnetischen Schlussglühung hervorgerufen.

Dies gilt insbesondere bei sehr großen Abschirmungen. Auch verschiedene mechanische Bearbeitungsverfahren können zu Unterschieden in der Wirksamkeit einer Abschirmung führen.

Abbildung 5 zeigt den Vergleich des experimentell bestimmten und des mittels FEM berechneten axialen Feldverlaufs für einen MUMETALL®-Zylinder, der an beiden Seiten jeweils durch einen Deckel mit Stülprand verschlossen ist. Während bei Vergleichsmessungen ohne Deckel die FEM-Ergebnisse nahezu identisch mit den Messwerten sind (hier nicht dargestellt), erkennt man deutlich, dass der Einfluss der Deckelöffnung (bei  $x = 150$  mm) in der Messung wesentlich stärker ist als es die Simulation erwarten lässt. So ist die gemessene Restfeldamplitude  $B_x$  in der Nähe der Öffnung etwa doppelt so groß wie in der Simulation.

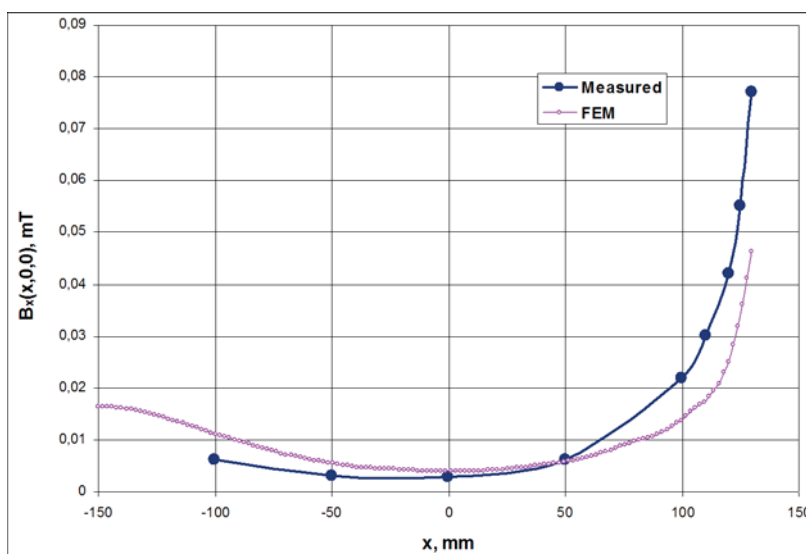


Abbildung 5: Gemessener und simulierter axialer Magnetfeldverlauf  $B_x(x)$  entlang der Symmetrieachse eines Kreiszylinders aus MUMETALL® mit zwei Deckeln mit Stülprand. In dem rechten Deckel befindet sich eine kreisförmige Öffnung. Der Zylinder befindet sich koaxial ausgerichtet im Zentrum ( $x = 0$ ) eines felderzeugenden Helmholtz-Spulensystems.

# Weichmagnetische Legierungen

Häufig assoziiert man magnetische Abschirmungen mit MUMETALL® (auch Mumetal, Mu-Metall,  $\mu$ -Metal, . . . genannt), einer 80 %igen NiFe-Legierung mit sehr hoher Permeabilität. Oftmals stellt MUMETALL®, in entsprechender Dimensionierung und mit der zwingend erforderlichen magnetischen Glühbehandlung, eine sehr gute Wahl dar. Dennoch gibt es für einige Probleme bessere Lösungen.

Die Wirksamkeit von Abschirmmaterialien wird oft anhand der maximalen Permeabilität der verwendeten weichmagnetischen Werkstoffe beurteilt. Zusätzlich sind jedoch weitere Parameter von Bedeutung, die im Hinblick auf eine effiziente und kostengünstige Abschirmung beachtet werden sollten.

So spielt z. B. die magnetische Feldstärke eine große Rolle: Das verwendete Material darf nicht durch ein zu starkes Magnetfeld in die Sättigung getrieben werden, da es in diesem Fall über keine weitere Schirmwirkung verfügt. Auch die Frequenz des Magnetfeldes ist von Bedeutung. Je höher sie ist, desto weniger wird die Schirmwirkung durch magnetische Flussleitung (Abbildung 1) erzielt und desto wichtiger ist die elektrische Leitfähigkeit des Schirmmaterials. Andere Aspekte sind Größe, Gewicht, Korrosionsbeständigkeit, Verarbeitbarkeit und viele weitere.

Neben MUMETALL® verfügen wir über eine große Auswahl an unterschiedlichen Abschirmmaterialien, wie das amorphe VITROVAC®, PERMENORM®, SiFe Elektroblech, Reineisen und CRYOPERM® für Tieftemperaturanwendungen.

Wir sind vertraut mit materialspezifischen Bearbeitungsmethoden, von der Anfertigung einfacher Zuschnitte über die magnetische Schlussglühung bis hin zu ausgefeilten Kompositsystemen.

Die folgende Tabelle fasst die wichtigsten Kennzahlen unserer magnetischen Abschirmmaterialien zusammen. Bitte beachten Sie, dass die Eigenschaften von Größe, Dicke, Form und den Parametern der thermischen Behandlung abhängen. Die folgenden Abschnitte geben einige Hinweise auf die Verwendungsmöglichkeiten unserer weichmagnetischen Legierungen.

Legierung	Zusammensetzung	$\mu_4$ (statisch)	$H_c$ [A/m]	$B_s$ [T]	$T_c$ [°C]	Dichte [g/cm <sup>3</sup> ]
MUMETALL®	80 % NiFe	30.000	3	0,8	400	8,7
CRYOPERM® 10	80 % NiFe	*	*	*	430	8,7
PERMENORM® 5000 H2	50 % NiFe	4.000	10	1,55	440	8,25
Reineisen	99,9 % Fe	500**	80	2,15	770	7,86
Siliziumeisen	97 % Fe	1.000**	20	2,03	745	7,65
VACOFLUX® 50	50 % CoFe	1.000**	200	2,35	950	8,12
VITROVAC® 6025 X	80 % Co	20.000	1	0,55	225	7,86

$\mu_4 = \mu_r$  bei 0,4 A/m; \* bei 4,2 K oder 77 K ähnliche Eigenschaften wie MUMETALL® bei Raumtemperatur  
 \*\*  $\mu_4 = \mu_r$  bei 4 A/m

## MUMETALL®

Für Anwendungen, die eine mittlere magnetische Sättigungsinduktion, eine geringe Koerzitivfeldstärke und eine hohe Permeabilität erfordern, eignet sich die Nickel-Eisen-Legierung MUMETALL® besonders gut. Durch den hohen Nickelanteil ist die mechanische Bearbeitung von MUMETALL® nicht unproblematisch. Die magnetischen Eigenschaften machen das Material dennoch zu einem der gängigsten Abschirmmaterialien. Auch hat der hohe Nickelanteil zur Folge, dass in der Regel auf eine Oberflächenbehandlung zum Schutz vor Korrosion verzichtet werden kann.

Zu den häufigsten Anwendungen von MUMETALL® zählen Abschirmungen für mittlere Feldstärken, Mehrlagenabschirmungen, Aktoren und Blechpakete. Neben Fertigteilen kann MUMETALL® über die SEKELS GmbH als Tafeln, Bandmaterial, magnetisch schlussgeglühte Folien oder Rundstäbe bezogen werden.

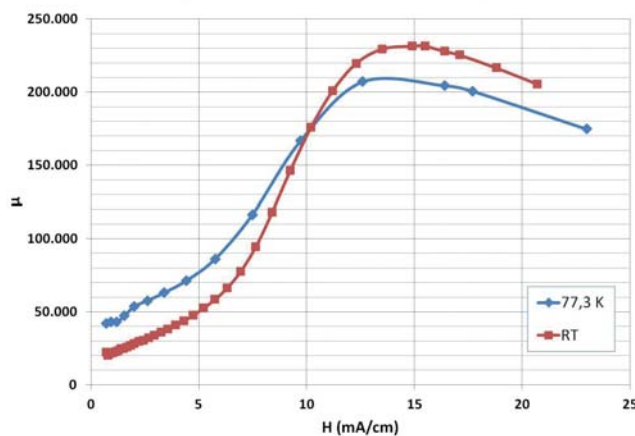


Abbildung 6:  $\mu(H)$ -Kennlinien von CRYOPERM 10

## CRYOPERM® 10

Mit einer ähnlichen Zusammensetzung wie MUMETALL®, aber behandelt durch eine spezielle Anlassglühung, ist CRYOPERM® ein optimiertes Abschirmmaterial für Temperaturen im Bereich von flüssigem Stickstoff (ca. 77 K) oder flüssigem Helium (ca. 4,2 K). Die magnetischen Eigenschaften von CRYOPERM® bei niedrigen Temperaturen sind vergleichbar mit denen von MUMETALL® bei Raumtemperatur (siehe Abbildung 6). Deshalb ist CRYOPERM® das geeignete Material, um magnetische Abschirmungen für Supraleiter (insbesondere SQUID-Sensoren) zu realisieren.

CRYOPERM® 10 wird als Band in Dicken von 0,5 - 2,0 mm und Breiten von ca. 270 - 280 mm hergestellt.

## PERMENORM® 5000 H2

Im Vergleich zu MUMETALL® verfügt PERMENORM® aufgrund seines höheren Eisenanteils über eine höhere Sättigungsmagnetisierung und eignet sich deshalb vor allem für Anwendungen, bei denen stärkere Magnetfelder eine Rolle spielen. Auch bei PERMENORM® 5000 H2 kann meist auf eine Oberflächenveredelung zum Schutz vor Korrosion verzichtet werden.

Der höhere Eisenanteil hat jedoch auch Nachteile: Die dynamischen Eigenschaften (bei höheren Magnetfeldfrequenzen) sind schlechter als bei MUMETALL®, die Koerzitivfeldstärke und damit die Ummagnetisierungsverluste sind größer.

Neben Aktoren und Jochen findet PERMENORM® 5000 H2 oftmals Anwendung im Bereich magnetischer Abschirmungen für mittlere und höhere Feldstärken.

PERMENORM® 5000 H2 kann von der SEKELS GmbH in Form von Tafeln, Bandmaterial, Rundstäben und Fertigteilen bezogen werden.

### Reineisen

Für Anwendungen, die eine hohe Sättigungsmagnetisierung voraussetzen, aber definierte magnetische Eigenschaften benötigen, ist es nicht empfehlenswert einen konventionellen Eisenwerkstoff oder Stahl zu verwenden. Nur durch einen sorgfältigen Bearbeitungs- und Glühprozess können bei Reineisen zuverlässige und reproduzierbare magnetische Materialeigenschaften erreicht werden.

Reineisen wird vor allem im Bereich der Magnetsysteme eingesetzt, z. B. in Polschuhen, Jochen, als Ankerkörper und in Form von Flussleitblechen. Abschirmungen aus Reineisen ermöglichen es auch starke Magnetfelder zu beherrschen. Die hohe Curie-Temperatur erlaubt Anwendungen, die mit MUMETALL® oder PERMENORM® 5000 H2 nicht realisierbar wären, jedoch sind die Koerzitivfeldstärke und die dynamischen Verluste deutlich höher als bei letzteren.

Reineisen kann bei der SEKELS GmbH als Fertigteile und in Form von Tafeln und Rundstäben bezogen werden. Gerne bieten wir auch geeignete Oberflächenbeschichtungen als Korrosionsschutz an.

### VACOFLEX® 50

Die Kobalt-Eisen-Legierung VACOFLEX® 50 ist die geeignete Legierung, wenn auch unter dem Einfluss sehr starker Magnetfelder Sättigungseffekte vermieden werden müssen. VACOFLEX® 50 verfügt über die höchste Sättigungsmagnetisierung und die höchste Curie-Temperatur aller weichmagnetischen Materialien im Sortiment der SEKELS GmbH.

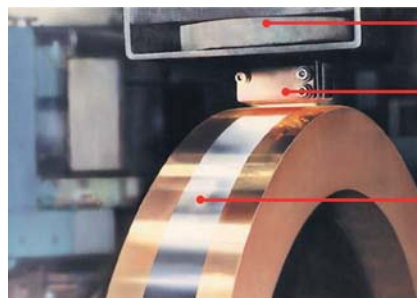
Die Hauptanwendungsgebiete von VACOFLEX® 50 liegen in den Bereichen magnetische Polschuhe, Linsensysteme, Relais, Motoren und Generatoren.

VACOFLEX® 50 kann neben Fertigteilen in den Lieferformen Band und Rundstab bezogen werden.

### VITROVAC® 6025 X

Die amorphe Legierung VITROVAC® 6025 X der VACUUMSCHMELZE GmbH & Co. KG ist herstellbedingt (s. Rascherstarrungsverfahren Abbildung 7) nur als dünne Folie mit Dicken im Bereich von ca. 20 - 25 µm erhältlich. Sie verbindet exzellente weichmagnetische Eigenschaften mit einer ungewöhnlichen mechanischen Härte und Flexibilität. Somit können auch sehr enge Biegeradien mit einer nur sehr geringen Beeinträchtigung der Permeabilität in diesem Bereich realisiert werden. Die geringe Banddicke und die vergleichsweise sehr niedrige elektrischen Leitfähigkeit ermöglichen die wirksame Abschirmung auch höherfrequenter Felder.

Abbildung 7: Rascherstarrungsverfahren zur Herstellung dünner amorpher metallischer Folien



- Schmelze  
1500 °C
- Keramikdüse  
Abkühlrate:  
1.000.000 K/s
- Amorphes Band:  
~ 20 µm  
~ 100 km/h

# Lieferformen

Die SEKELS GmbH unterhält ein umfangreiches Lager weichmagnetischer Halbzeuge in den nachfolgend aufgeführten Lieferformen.



## Magnetische Abschirmfolien

Weichmagnetische Folien aus MUMETALL® oder VITROVAC® 6025 X eignen sich in vielen Fällen für erste Trendversuche um einen Anhaltspunkt für die konstruktive Lösung zu finden, die zumeist aus fertigen Abschirmgehäusen (Ronden, Becher und dgl.) geeigneter Wandstärke besteht.

Abschirmfolien aus MUMETALL® führen wir mit und ohne Klebeschicht in Banddicken von 0,15/0,1 /0,05 mm in verschiedenen Bandbreiten als Meterware. Wir liefern ab 1 m und schicken Ihnen auf Anfrage gerne unsere Preisliste zu. Oder Sie nutzen unseren Online Shop für den Bezug von Mustermengen.

Magnetisch schlussgeglühte Abschirmfolien aus der amorphen Legierung VITROVAC® 6025 X zeigen eine ungewöhnliche Kombination von mechanischer Härte und Flexibilität mit einer gegenüber MUMETALL®-Folie gleicher Dicke deutlich höheren Permeabilität. Ein weiteres wesentliches Merkmal von VITROVAC® 6025 X ist die weitgehende Unempfindlichkeit gegen elastische Verformung. Hauptanwendungen sind flexible geschirmte Kabel mit kleinen Durchmessern sowie schnelle und flexible Problemlösungen bei niedrigen Feldstärken. Abschirmfolien aus VITROVAC® 6025 X werden in Standardbreiten bis 50 mm bei herstellbedingter Dicke von ca. 0,02 mm geliefert.



## Abschirmschläuche

Schläuche aus der hochpermeablen Legierung MUMETALL® bieten sich an, um stöempfindliche Kabel abzuschirmen oder um elektrische Leitungen an einer Ausbreitung zu hindern. Derartige Probleme können z. B. bei der Verkabelung in Flugzeugen oder Schiffen, bei elektro-medizinischen Untersuchungen und bei der Datenübertragung auftreten. Im Gegensatz zu herkömmlichen Abschirmgeflechten aus Kupfer setzt die Schirm-

wirkung der magnetischen Abschirm-schläuche bereits im Gleichfeld ein, nimmt jedoch mit steigender Frequenz ab. Die aus profilierten Bändern gewickelten flexiblen Schläuche (ähnlich VDE 0605) gibt es in Standard-Nennweiten von 6 bis 32 mm. Als Zubehör sind Schlauchverschraubungen lieferbar, mit denen sich die Schläuche an Gehäuse anschließen lassen. Mit Schirmfaktoren um  $S = 200$  bieten Abschirm-schläuche aus MUMETALL® einen sicheren Schutz gegen niederfrequente elektromagnetische Ein- und Ausstrahlungen. Um mit Abschirmschläuchen eine Schirmwirkung zu erzielen, müssen immer Hin- und Rückleiter zusammen im gleichen Schlauch verlegt werden.



## Abschirmbecher

Abschirmbecher werden in der Regel durch Tiefziehen oder als Schweißteil hergestellt. Anschließend erfolgt eine magnetisch Schlussglühung. Dadurch lässt sich eine optimale Schirmwirkung erzielen. Bitte sprechen Sie uns bzgl. verfügbarer oder kundenspezifischer Abmessungen an.

## Abschirmplatten, Tafeln und Zuschnitte

Wir bevorraten Tafeln aus MUMETALL® oder PERMENORM® 5000 H2 in den Abmessungen 600 - 750 mm x ca. 2500 mm in typischen Materialdicken von 0,35 bis 3 mm. Sie können komplett bezogen oder nach Ihren Vorgaben zugeschnitten werden. Bitte beachten Sie, dass die Tafeln, Zuschnitte und insbesondere daraus gefertigte Teile einer magnetischen Schlusswärmehandlung unterzogen werden müssen, die wir Ihnen gerne anbieten.

Produkt	Dicke/Durchmesser [mm]	Breite [mm]	Länge [mm]	Legierung Zus. Information
Tafeln/Zuschnitte	0,35 - 3	< 750*	< 3.000*	MUMETALL® PERMENORM® 5000 H2 Reineisen
Folien (kristallin)	0,05 - 0,15	< 640*	Nach Wunsch	MUMETALL® Klebeschicht möglich
Folien (amorph)	ca. 0,02	2,5 - 50	Nach Wunsch	VITROVAC® 6025 X Klebeschicht möglich
Stangen	1 - 215	-	< 4.000*	MUMETALL® VACOFLEX® 50 PERMENORM® 5000 H2 Reineisen
Schläuche	6 - 25*	-	Nach Wunsch	MUMETALL®
Becher (rund)	35 - 60*	-	35,5 - 62	MUMETALL® Runder Querschnitt
Becher (eckig)	-	22,4 - 103,2**	19 - 105	MUMETALL® Quadratischer Querschnitt

\* kleinere Abmessungen auf Anfrage      \*\* Durchmesser/Breite

# Materialbearbeitung und Fertigungsmöglichkeiten

Die Bearbeitung der beschriebenen Legierungen setzt die genaue Kenntnis ihrer spezifischen Eigenschaften voraus. Neben den üblichen Metallumformungs- und Verbindungsprozessen verfügen wir über umfangreiche Erfahrung mit verschiedenen Verbundsystemen und Klebetechniken.

Die dünnen, sehr harten und relativ spröden amorphen Folien aus VITROVAC® 6025 X sind nicht plastisch verformbar, können jedoch mit einer Schere zugeschnitten und auch mit sehr engen Biege- radien ohne weitere thermische Nachbe- handlung aufgeklebt werden. Die nickel- haltigen Legierungen und Reineisen „schmier“ bei der zerspanenden Bear- beitung, können aber bei Beachtung der korrekten Prozessparameter gedreht, gefräst, gebohrt (auch mit Gewinde), tiefgezogen, gelasert und geschweißt werden. Diesbezüglich kritischer ist die spröde und grobkörnige Legierung VACOFLUX® 50.



Die Herstellung von komplexeren Abschir- mungen erfordert vor allem Metallzu- schnitt, Umformung und Verbindungs- techniken.

Dabei sind die spezifischen Eigenschaften der unterschiedlichen Materialien zu berücksichtigen, aber auch die mögliche Beeinflussung der Abschirmwirkung durch die Bearbeitung. Schon durch die falsche Wahl der Schweißelektrode kann z. B. eine magnetische Schwachstelle erzeugt werden.

Neben den gängigen Zerspanungsverfahren verfügen wir über Laseranlagen für Zuschnitte, verschiedene Schweiß- verfahren, Stanz- und Stanzbiegetechniken und können Abschirmungen durch Tiefzie- hen herstellen. Optimierte Klebverfah- ren werden zur Herstellung von Verbundsys- temen eingesetzt. Durch Sägen, Erodieren, Fräsen und Abschleifen realisieren wir die Formgebung.

Wir verfügen über eine langjährige Erfahrung bei der Formgebung der Ab- schirmwerkstoffe sowohl für komplexe Abschirmungen oder Systeme.

# Wärmebehandlung

Die mechanische Bearbeitung von weichmagnetischen Materialien verschlechtert deren magnetische Eigenschaften. Zwingend erforderlich ist daher eine magnetische Schlussglühung nach der mechanischen Bearbeitung.

Nach der Formgebung ist eine magnetische Schlussglühung unerlässlich. Auch unbearbeitete Halbzeuge müssen dieser Behandlung unterzogen werden. Zum einen werden dadurch die bei der Bearbeitung eingebrachten mechanischen Verspannungen reduziert, zum anderen die magnetischen Parameter wie Kristallanisotropie und Magnetostriktion optimiert. Die Temperaturen liegen je nach Legierung zwischen 800°C und 1150°C. Diese Wärmebehandlung findet i. d. R. unter Wasserstoff statt.

Auch bereits „weichgeglühte“ Halbzeuge benötigen eine magnetische Schlussglühung!

Der Abbau von inneren mechanischen Spannungen kann zu einem „Verziehen“ insbesondere bei größeren Formteilen oder Gehäusen führen. Dies ist bei der konstruktiven Auslegung und Festlegung der Toleranzen zu beachten. Eine Nacharbeit ist bedingt möglich, beeinflusst jedoch die Abschirmwirkung negativ.

Einen Eindruck von der Wichtigkeit der Schlussglühung für die magnetischen Eigenschaften lässt sich in Abbildung 8 am Beispiel eines VACOFLUX® 50-Bauteils

erkennen. Aufgetragen sind jeweils die Hysteresekurven mit bzw. ohne Schlussglühung. Die Flussdichte ohne Schlussglühung ist selbst bei 10.000 A/m noch um mehr als einen Faktor 2 niedriger als die Sättigungsflussdichte. Die Unterschiede bei der Koerzitivfeldstärke sind ebenfalls signifikant. Dies wirkt sich z. B. auf die Hystereseverluste und die Restmagnetisierung aus.

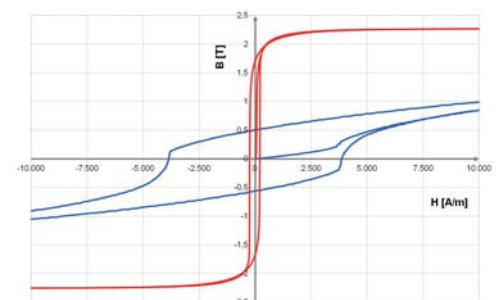


Abbildung 8: Einfluss der Wärmebehandlung bei VACOFLUX® 50-Massivteilen (blau: ungeglüht, rot: magnetisch schlussgeglüht).

# Messsysteme und Dienstleistungen

Neben theoretischen Berechnungsmöglichkeiten können wir Abschirmungen auch experimentell beurteilen. Die SEKELS GmbH verfügt über ein gut ausgestattetes Labor zur Materialcharakterisierung.

Die Auslegung von magnetischen Abschirmungen und Magnetsystemen alleine durch Simulationstools und Berechnungen führt oftmals zu unangenehmen Überraschungen. Bereits geringfügige Veränderungen einer einfachen Geometrie (z. B. durch Öffnungen, Luftspalte, Überlap-

pungen, Bohrungen, Verschweißungen etc.) können die Flussleitungseigenschaften massiv verändern.

Mit unserem Messlabor können wir Sie bei der Optimierung Ihrer Abschirmung unterstützen.

## Kompetenzen und Messdienstleistungen

- Magnetische und mechanische Qualitätskontrolle gefertigter Abschirmungen
- Schirmfaktormessung als Auftragsdienstleistung
- Orts- und frequenz aufgelöste Schirmfaktormessungen in Abschirmungen (bis zu 40 Kanäle)
- Vor-Ort-Messungen bei „größeren“ Abschirmproblemen
- Problemangepasste Sensorauswahl (Hall-Elemente, Search-Coils, Fluxgate etc.)
- Optimierungsanalysen bereits bestehender Abschirmsysteme
- Entmagnetisierungen (elektromagnetisch oder thermisch)
- Störbeeinflussungsmessungen von elektronischen Geräten unter aufgeprägten Magnetfeldern
- Materialcharakterisierung durch Hysteresemessung
- Messung der Koerzitivfeldstärke
- Bestimmung der Ummagnetisierungsverluste



Zur Aufprägung externer Magnetfelder verfügt die SEKELS GmbH über zwei Helmholtz-Spulenpaare mit Durchmessern von 1 m und 2 m. Die damit erzielbaren Feldeigenschaften entnehmen Sie bitte der untenstehenden Tabelle.

Abbildung 9: Helmholtz-Messplatz für die Messung von Abschirmfaktoren

Spulensystem	1000 mm	2000 mm
Frequenzbereich	DC und 0,1 - 2000 Hz	DC und 0,1 - 2000 Hz
Amplitudenbereich	7,74 mT (DC) - 0,08 mT (2000 Hz)	3,34 mT (DC) - 0,05 mT (2000 Hz)

Neben schnellen Routinemessungen mit wenigen Messpunkten können Wiederholungsuntersuchungen auch mit hoher räumlicher Auflösung durchgeführt werden, die zudem mehrere Frequenzen und Feldamplituden abdecken können. Dies ist z. B. notwendig, um sich ein

genaues Bild der (Rest)feldverteilung gerade an kritischen Stellen zu machen.

Abbildung 10 zeigt die Feldverteilung in einer zylindrischen Abschirmung aus MUMETALL® mit einem Loch im rechten Seitendeckel.

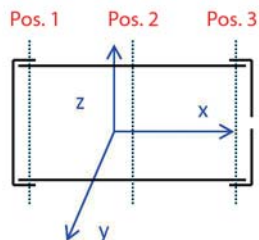
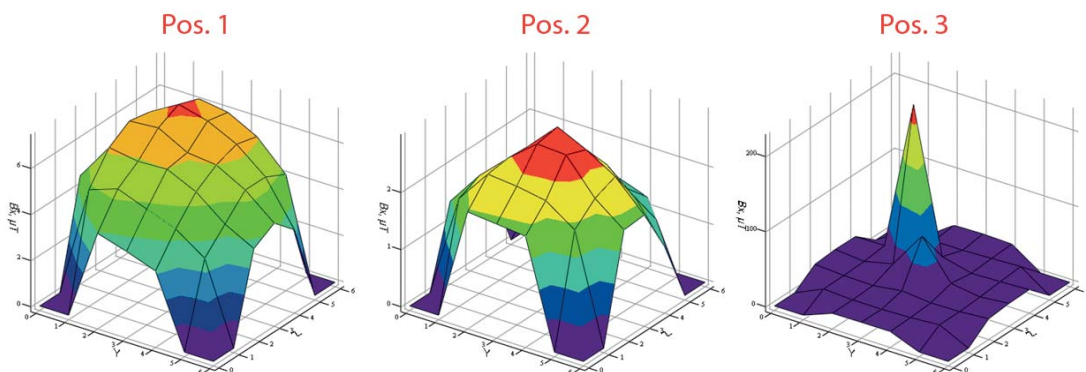


Abbildung 10: Räumliche Feldverteilung in einem Abschirmzylinder mit Öffnung im Deckel. Die Feldstärken können sowohl nach Betrag als auch nach Richtung dargestellt werden. Die senkrechte Achse ist jeweils unterschiedlich skaliert.



# Qualitätssicherung

Die Wirksamkeit von Abschirmmaßnahmen wird spätestens in der Anwendung festgestellt. Um hier keine unangenehmen Überraschungen zu erleben, bieten wir die Messung des Schirmfaktors als Ausgangsprüfung an.

Unsere Messeinrichtungen ermöglichen in vielen Fällen eine praxisnahe Ausgangsprüfung. Dies kann z. B. die Messung des Abschirmfaktors an einer oder mehreren Stellen in der Schirmung sein. Die externen Störfelder werden dabei mit Hilfe unserer Helmholtzspulen (Abbildung 9) erzeugt.

Eine Alternative dazu ist die Restfeldmessung vor Ort, wenn z. B. die Betriebsbedingungen im Labor nicht nachgebildet werden können.

Wichtig ist die Überprüfung der mechanischen Toleranzen gerade bei größeren Abschirmungen nach der Wärmebehandlung. Hierfür steht im Hause SEKELS ein Messtisch mit direkter CAD-Anbindung für 3D-Messungen zur Verfügung.

Ebenso werden begleitende qualitätssichernde Maßnahmen routinemäßig eingesetzt, wie z. B. Materialproben bei der Glühung von Abschirmgehäusen zur Sicherstellung der erforderlichen Materialeigenschaften (Koerzitivfeldstärke, Permeabilität).

Der Ausgangszustand der Materialien z. B. für Umformungsprozesse wird durch eine Härteprüfung festgestellt. Bei Bedarf kann auch die Zugfestigkeit ermittelt werden.

Für Fehleranalysen liefern lichtmikroskopische Untersuchungen wertvolle Hinweise.



Abbildung 11: Lichtmikroskop für qualitätssichernde Untersuchungen



Abbildung 12: 3D-Messtisch zur mechanischen Vermessung

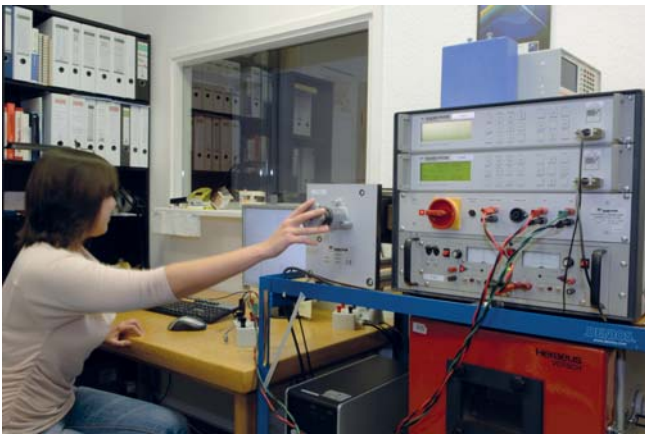


Abbildung 13: Messplatz für Hysteresemessungen (statisch/dynamisch), auch bei verschiedenen Temperaturen.



Abbildung 14: Messschrank für Temperaturwechsel- und Feuchteprüfungen.

# Begriffe und Definitionen

Nachfolgend finden Sie eine Zusammenfassung der verwendeten Formelzeichen mit einer kurzen Beschreibung.

Formelzeichen	Einheit	Beschreibung
$B$	T (= Vs/m <sup>2</sup> )	Magnetische Flussdichte (Induktion) in Tesla (1 T = 10.000 Gauß = 1.000 mT = 1.000.000 µT = 1.000.000.000 nT) B = $\mu_r \mu_0 H$ in einem magnetischen Material bzw. B = $\mu_0 H$ an Luft
$H$	A/m	Magnetische Feldstärke (1 A/m = 4 $\pi$ /1000 Oerstedt)
$\mu_r$		Relative magnetische Permeabilität
$\mu_0$	Vs/Am	Magnetische Feldkonstante = 4 $\pi$ *10 <sup>-7</sup>
$S, S_q, S_l$		Abschirmfaktor (allgemein, quer, längs) (= $H_d/H_i$ bzw. $B_d/B_i$ )
$H_a$	A/m	Betrag der magnetischen Feldstärke außerhalb der Schirmung
$H_i$	A/m	Betrag der magnetischen Feldstärke innerhalb der Schirmung
$B_a$	T	Betrag der magnetischen Flussdichte außerhalb der Schirmung
$B_i$	T	Betrag der magnetischen Flussdichte innerhalb der Schirmung
$N$		Entmagnetisierungsfaktor, berücksichtigt das geometrieabhängige Gegenfeld durch das Streufeld in einem magnetischen Körper durch seine Magnetisierung
$B_s$	T	Sättigungsinduktion eines magnetischen Materials (alle magnetischen Momente sind parallel zum angelegten Feld ausgerichtet)
$H_c$	A/m	Koerzitivfeldstärke, entspricht dem notwendigen Gegenfeld nach der Aufmagnetisierung, um die Flussdichte im Material wieder auf den Wert Null zurück zu setzen
$T_c$	°C	Curie-Temperatur (Verschwinden der spontanen Magnetisierung durch Wärmebewegung)
$\lambda_s$	ppm	Sättigungsmagnetostriktion (relative Volumenänderung)
$\rho$	Ωm	Spezifischer elektrischer Widerstand
$f$	Hz	Frequenz
$\delta$	mm	Eindringtiefe des elektromagnetischen Wechselfeldes
$d$	mm	Blechstärke
$D$	mm	Durchmesser
$L$	mm	Länge eines Zylinders
$a$	mm	Kantenlänge eines Würfels

# Wir über uns

Die SEKELS GmbH entwickelt, fertigt und handelt technische Produkte im Umfeld des Magnetismus.

Mit ca. 25 Mitarbeitern (darunter mehr als die Hälfte Physiker und Ingenieure) bedient SEKELS derzeit über 500 Kunden weltweit.

Als Fachhändler der Produktlinien der VACUUMSCHMELZE GmbH & Co. KG bietet SEKELS seinen Kunden sowohl eine umfangreiche Lagerhaltung als auch eine ausführliche technische Beratung.

SEKELS entwickelt, konstruiert und fertigt kundenspezifische Lösungen von Kernblechen und Blechpaketen, magnetischen Abschirmungen und Abschirmsystemen, induktiven Bauelementen und Magnetsystemen - vom Prototyp bis zur Serienlieferung.



## Wir bieten:

- | Magnetische Abschirmungen aus MUMETALL®, PERMENORM®, CRYOPERM®, VACOFLUX®, TRAFOPERM® und Reineisen
- | Halbzeug aus MUMETALL®, PERMENORM®, CRYOPERM®, VACOFLUX®, TRAFOPERM® und Reineisen
- | Kompetente Beratung im Vorfeld
- | Auslegung und Berechnung von magnetischen Abschirmungen, FEM-Simulationen, Messungen
- | Umfangreiche Lagerhaltung von Halbzeugen, Kernen und Bauelementen
- | Amorphe und nanokristalline Ringbandkerne (VITROPERM®, VITROVAC®)
- | Drosseln, Stromsensoren, Leistungs- und Impulsübertrager
- | Kernbleche und Blechpakete
- | VACODYM®-, VACOMAX®-Dauermagnete
- | Werkstoffbearbeitung, Bauelement- und Systemfertigung
- | Magnetische Wärmebehandlungen
- | Werkstoffuntersuchungen, Grundlagenentwicklungen, Systementwicklungen
- | Mess- und Entwicklungsdienstleistungen



SEKELS GmbH  
Dieselstrasse 6  
61239 Ober-Moerlen  
Germany

Tel.: +49 (0) 6002 9379-0  
Fax: +49 (0) 6002 9379-79  
mail@sekels.de  
www.sekels.de

*Diese Informationen wurden mit größter Sorgfalt zusammengestellt und werden ohne Übernahme von Garantien oder Gewährleistungen zur Verfügung gestellt. Herausgeber ist die SEKELS GmbH. Alle Rechte vorbehalten.*

*Nachdruck, Vervielfältigung und Veröffentlichung nicht gestattet. Jede Speicherung und Wieder- bzw. Weitergabe der Inhalte, auch auszugsweise, ist nur mit schriftlicher Genehmigung durch SEKELS GmbH, 61239 Ober-Moerlen, erlaubt.*