



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
Weicheisen	12
VACOFLUX® 50	12
VITROVAC® 6025 X	12
Materialauswahl	13
Lieferformen	14
Abschirmfolien	16
Geblichte Abschirmungen und Blechpakete	17
HOMIE (Homogeneous Fields in Experiments)	19
Materialbearbeitung und Fertigungsmöglichkeiten	21
Wärmebehandlung	22
Technische Magnetfelder und Grenzwerte	23
Messsysteme und Dienstleistungen	25
MFA-110 Mess- und Analysesystem für Magnetfelder	27
Qualitätssicherung	29
Begriffe und Definitionen	31
Wir über uns	32

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 faradayscher Käfig), ist für statische oder niederfrequente elektromagnetische Felder ein höherer Aufwand notwendig. Sind die Frequenzen hinreichend 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 2/3 Hz (Bahntechnik), Netzfrequenzen (50/60 Hz) bis in den kHz-Bereich (Induktionsanlagen). 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 Krafteinwirkungen auf ferromagnetische Gegenstände.

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

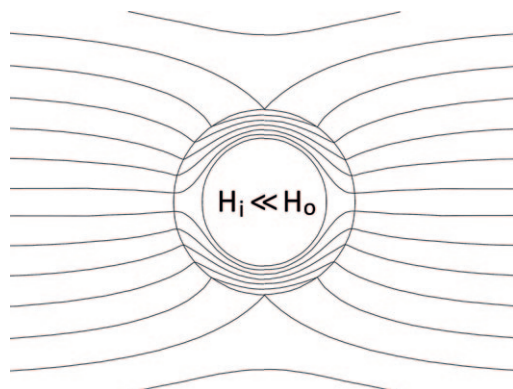


Abb. 1: Prinzip der Flussumleitung (schematisch).

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 Abschirmlösung 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. Genaugenommen 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.

Schirmfaktoren von Zylindern

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

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

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

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

S_q : Schirmfaktor im Querschnitt
 μ_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:

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

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:

$$N \approx 0.38(L/D)^{-1.3}$$

Schirmfaktoren von Kugeln, Quadern und Würfeln

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

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

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.

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

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 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 Abb. 2 für geschlossene und offene Zylinder im Längs- und Querschnitt 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 von 10 mm (links oben) und 1 mm (links unten) in einem MUMETALL®-Kasten angenommen. Auch noch in einiger Entfernung von den Spalten im Inneren 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.

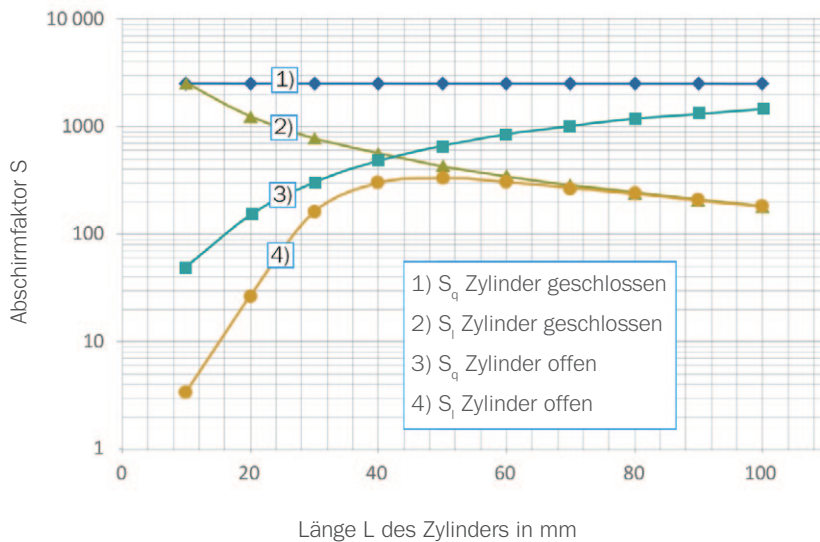


Abb. 2: Magnetostatische Abschirmfaktoren von dünnwandigen Zylindern ($D=10$ mm, $d=1$ mm), gerechnet mit den aufgeführten Näherungsformeln für $\mu_r = 25.000$ im Quer- (S_q) bzw. Längsfeld (S_l).

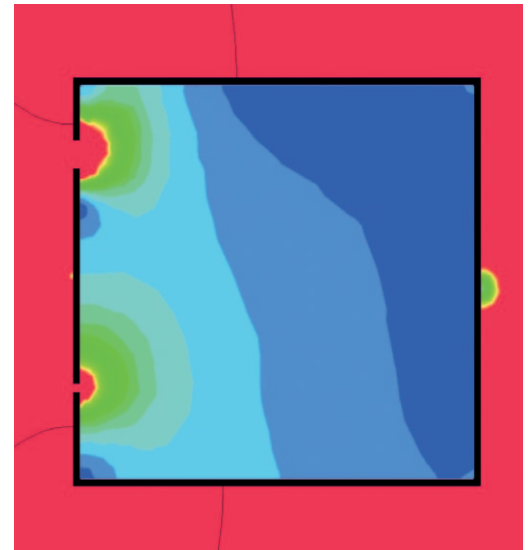


Abb. 3: Auswirkung von Spalten in einem MUMETALL®-Abschirmkasten auf die Feldstärke im Inneren. Die äußere Störquelle sitzt im nicht abgebildeten Bereich links. Rot = hohe Feldstärke, blau = niedrige Feldstärke.

Mehrfachabschirmungen

Zur Verbesserung des Schirmfaktors bei minimiertem Materialeinsatz können Mehrfachabschirmungen verwendet werden. Die Schirmfaktoren der verschiedenen Einzelschalen wirken bei genügend großem Abstand zwischen den Schalen näherungsweise multiplikativ. Optimierungsmöglichkeiten bestehen bei Mehrfachabschirmungen aber nicht nur im Abstand der Materiallagen, sondern auch in der Auswahl und Anordnung verschiedener Legierungen und ihrer Materialstärken. Ein besonderes Augenmerk muss bei Mehrfachabschirmungen auf die Stabilität der Gesamtkonstruktion gelegt werden: Spalte, die beispielsweise durch eine unpräzise Fertigung, Verzug oder Planungsfehler entstehen können, bewirken eine merkliche Redu-

zierung der Schirmwirkung. Außerdem müssen die Abstände zwischen den Lagen präzise eingestellt und gehalten werden. Typische Anwendungen für Mehrfachabschirmungen finden sich im Bereich wissenschaftlicher Messgeräte, aber auch im Rüstungsbereich und in der Abschirmung sehr starker Felder im Bereich magnetfelderzeugender Fertigungseinrichtungen.

Flächenabschirmungen

Die Geometrie ist von großer Bedeutung für die Schirmwirkung einer Abschirmung. Die mittels FEM simulierten Abschirmszenarien 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)

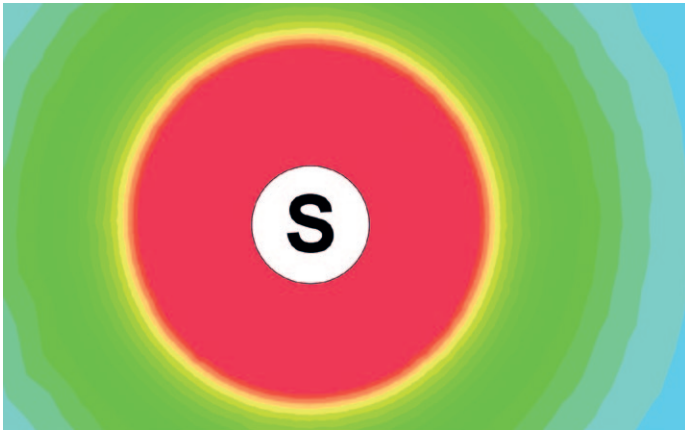
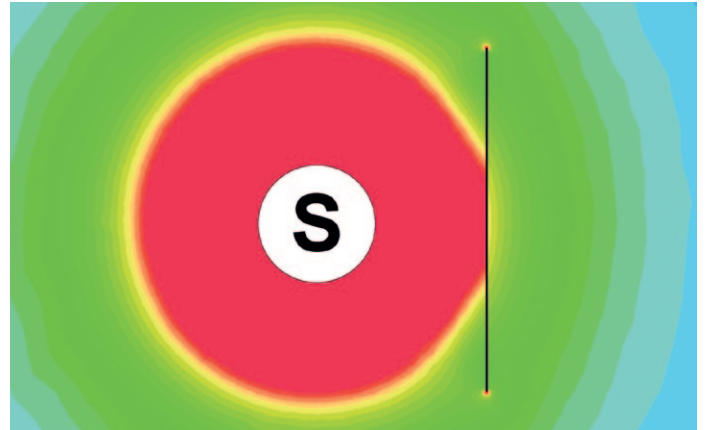


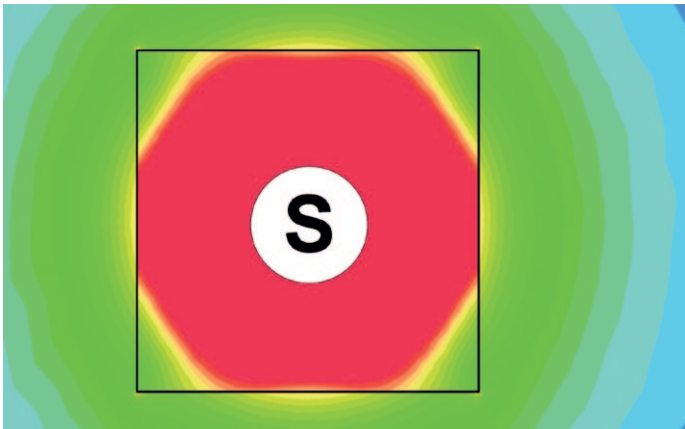
Bild (A) zeigt die Feldstärkeverteilung um eine ungeschirmte niederfrequente magnetische Störquelle (S).

Bild (B)



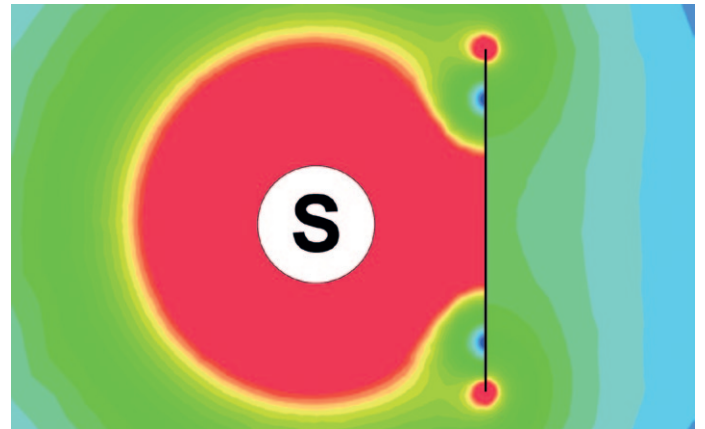
In Bild (B) wurde in einem Abstand von 2,5 m von der Quelle eine 5 m breite und 1 mm dicke Abschirmplatte mit einer relativen Permeabilität von $\mu_r = 500$ hinzugefügt. Der Feldverlauf wird dadurch nur geringfügig verändert.

Bild (C)



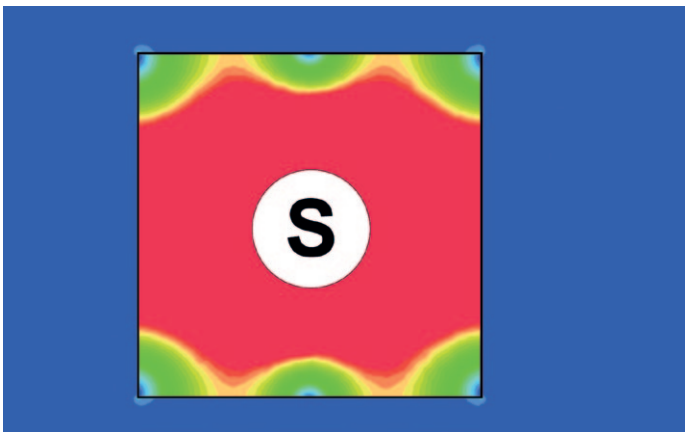
Ein geschlossener Kasten um die Störquelle aus dem gleichen Material wie in Bild (B) bewirkt ebenfalls nur geringfügige Veränderungen.

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 ist jedoch durch die Skalierung hier nicht erkennbar.

Abb. 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 deutlich 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

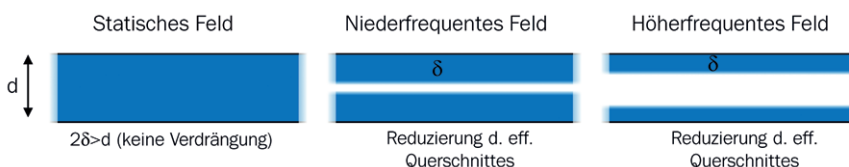


Abb. 5: Verdrängung des H-Felds aus dem Zentrum des Materialquerschnitts

Skinneffekt 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 Feldverdrängung (siehe Abbildung 5) hat zur Folge, dass mit steigender Frequenz ein zunehmend geringer Anteil des Materialquerschnitts für die Flussleitung zur Verfügung steht. Das hat nicht nur eine geringere effektive Sättigungsmagnetisierung zur Folge, sondern auch eine Verringerung der resultierenden Permeabilität. Dieser Effekt muss bei der Auslegung einer Abschirmung berücksichtigt werden.

Die Eindringtiefe des elektromagnetischen Wechselfeldes berechnet sich zu:

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

δ : Eindringtiefe

ρ : Spezifischer elektrischer Widerstand

μ_0 : Permeabilitätskonstante

f : Frequenz

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

Die technischen Frequenzen 16 2/3 Hz und 50/60 Hz liegen im Übergangsbereich von magnetischen und elektrischen Wirkmechanismen. Oft ist eine rein elektrische Schirmung bei diesen niedrigen Frequenzen nicht ausreichend. Bei magnetischen (auch elektrisch leitfähigen) Schirmungen überlagern sich beide Effekte. Die Feldverdrängung durch Wirbelströme setzt bei dicken Wandstärken schon relativ früh ein und reduziert den für eine Flussumleitung zur Verfügung stehenden Querschnitt im Blech. Dem wirkt eine (mit der Frequenz) zunehmende Wirbelstromabschirmung entgegen, sodass bei hinreichend geschlossener Geometrie der Gesamtabschirmfaktor schon bei niedrigen Frequenzen höher ist im Vergleich zum statischen Abschirmfaktor.

Diese Wechselwirkungen hängen sehr stark von der Geometrie und dem eingesetzten Material ab. Das generelle Verhalten ist in Abb. 6 an einem (einfachen) langen Zylinder aus MUMETALL® mit einer relativen Permeabilität von 25.000, einer Wanddicke von 0,5 mm, und einem Durchmesser von 100 mm im Querfeld dargestellt.

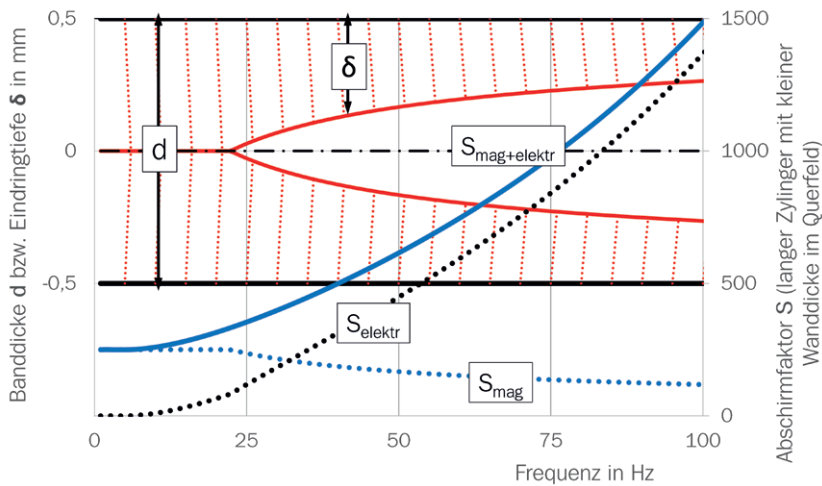
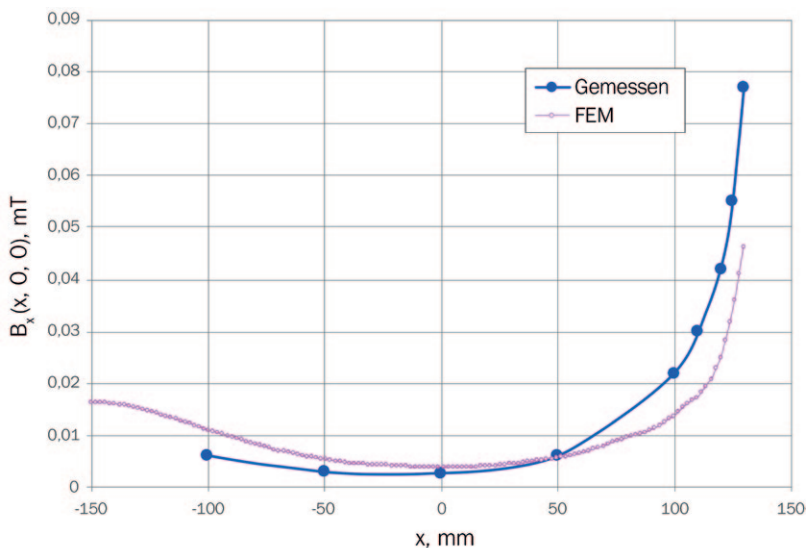


Abb. 6: Eindringtiefe in Mumetal mit $\mu_r = 25.000$ und Blechdicke 1 mm als Funktion der Frequenz. Nach rechts ist der Abschirmfaktor eines langen Zylinders aus diesem Blech mit Durchmesser 100 mm im Querfeld aufgetragen. Der Abschirmfaktor setzt sich aus „magnetischen“ und „elektrischen“ Anteilen zusammen.

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 7 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.

Abb. 7: Gemessener und simulierter axialer Magnetfeldverlauf $B_x(x)$ entlang der Symmetrieachse eines Kreiszyinders 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-Spulen-systems.

Weichmagnetische Legierungen

Häufig assoziiert man magnetische Abschirmungen mit MUMETALL[®], 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.

MUMETALL[®]? μ -Metall? Mu-Metall? Wie heißt es denn?

MUMETALL[®] ist der Handelsname der VACUUMSCHMELZE GmbH & Co KG, es gibt jedoch auch Produkte anderer Hersteller mit ähnlich klingenden Namen.

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, Weicheisen 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	μ_4 (statisch)	$H_{c, stat}$ [A/m]	B_s [T]	T_c [°C]	Dichte [g/cm ³]
MUMETALL®	80 % NiFe	30 000	3	0,8	400	8,7
CRYOPERM® 10	80 % NiFe	*	*	*	430	8,7
PERMENORM® 5000 H2	50 % NiFe	4000	10	1,55	440	8,25
Weicheisen	99,9 % Fe	500**	80	2,15	770	7,86
Silizium-Eisen	97 % Fe	1000**	20	2,03	745	7,65
VACOFLUX® 50	50 % CoFe	1000**	200	2,35	950	8,12
VITROVAC® 6025 X	80 % Co	20 000	1	0,55	225	7,7

$\mu_4 = \mu_r$ 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.

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 8). Deshalb ist CRYOPERM® das geeignete Material, um magnetische Abschirmungen für Supraleiter (insbesondere SQUID-Sensoren) zu realisieren.

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

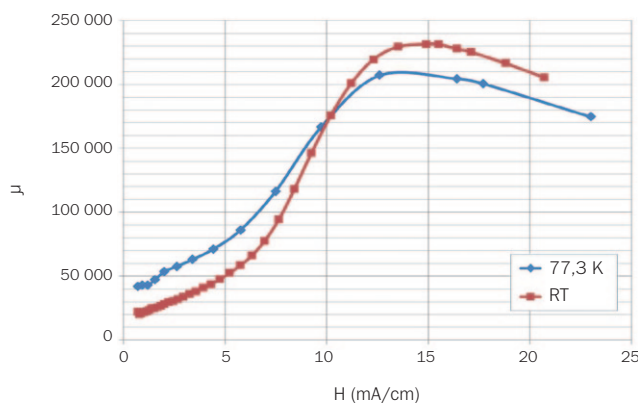


Abb. 8: $\mu(H)$ -Kennlinien von CRYOPERM® 10

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.

Weicheisen

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 Weicheisen zuverlässige und reproduzierbare magnetische Materialeigenschaften erreicht werden.

Weicheisen wird vor allem im Bereich der Magnet-systeme eingesetzt, z. B. in Polschuhen, Jochen, als Ankerkörper und in Form von Flussleitblechen. Abschirmungen aus Weicheisen 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.

Weicheisen 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.

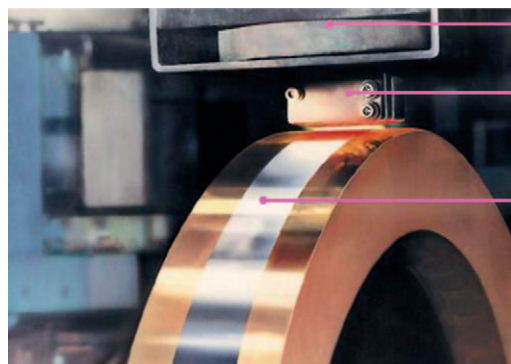
VACOFLUX® 50

Die Kobalt-Eisen-Legierung VACOFLUX® 50 ist die geeignete Legierung, wenn auch unter dem Einfluss sehr starker Magnetfelder Sättigungseffekte vermieden werden müssen. VACOFLUX® 50 verfügt über die höchste Sättigungsmagnetisierung und die höchste Curie-Temperatur aller weichmagnetische Materialien.

Die Hauptanwendungsgebiete von VACOFLUX® 50 liegen in den Bereichen magnetischer Polschuhe, Linsensysteme, Relais, Motoren und Generatoren. VACOFLUX® 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 herstellbeding (siehe Rascherstarrungsverfahren Abb. 9) 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 elektrische Leitfähigkeit ermöglichen die wirksame Abschirmung auch höherfrequenter Felder.



Schmelze 1500 °C

Keramikdüse
Abkühlrate: 1.000.000 K/s

Amorphes Band:
~ 20 µm
~ 100 km/h

Abb. 9: Rascherstarrungsverfahren zur Herstellung dünner amorpher metallischer Folien

Materialauswahl

In Anbetracht der Vielzahl der auf dem Markt verfügbaren Abschirmmaterialien ist die Auswahl einer geeigneten Legierung oft nicht einfach. Wie aus den vorangegangenen Seiten ersichtlich hängt sie eng mit Form, Materialstärke, Einsatzfrequenz und -feldstärke zusammen.

Je geschlossener eine Abschirmung, desto sinnvoller ist der Einsatz hochpermeabler Legierungen.

Die Einflüsse von Form und Geschlossenheit einer Abschirmung zu beschreiben ist kaum allgemeingültig möglich. Als grober Anhaltspunkt kann jedoch dienen, dass je geschlossener eine Abschirmung ist, desto sinnvoller der Einsatz hochpermeabler Legierungen ist. Oder anders ausgedrückt: Eine Abschirmung, bei der Felder durch viele Öffnungen eindringen können, kann auch durch „gutes“ Material nicht mehr gerettet werden.

Starke Felder erfordern die Verwendung von Legierungen mit hoher Sättigungsmagnetisierung, wohingegen höherfrequente Felder eher durch hochpermeable Legierungen (oder besser noch mehrlagige oder geblechte Abschirmungen (vergl. S. 17) abgeschirmt werden sollten.

Dabei kann eine hohe Sättigungsmagnetisierung in gewissem Rahmen durch eine höhere Materialdicke ersetzt werden. Zumindest dann, wenn der zusätzliche Platz und das erhöhte Gewicht toleriert werden können.

Die unten abgebildete Tabelle soll einen ersten Hinweis auf die Eignung verschiedener Legierungen für ein spezielles Abschirmproblem geben. Sie ist nicht als „der Weisheit letzter Schluss“ zu verstehen und wir empfehlen dringend, in unklaren Fällen Kontakt mit uns aufzunehmen.

Für die Tabelle müssen Sie lediglich die Frequenz abschätzen, die auf die Abschirmung einwirkt. Aber Vorsicht: es können sich mehrere Frequenzen überlagern! Außerdem sollten Sie eine grobe Vorstellung der wirksamen Feldstärken haben. Niedrige Feldstärken liegen z. B. im nT- und µT-Bereich vor, wohingegen im mT-Bereich von mittleren oder starken Feldern auszugehen ist.

Für Messungen zur groben Abschätzung der Feldstärke im niederfrequenten Bereich kann eine Hallsonde verwendet werden, für exaktere Messungen raten wir jedoch zur Nutzung unseres MFA-110 (siehe auch S. 27).

Legierung	Frequenz			Feldstärke		
	Schirmung (DC)	Schirmung (<500 Hz)	Schirmung (>500 Hz)	Schirmung (niedrige Feldstärken)	Schirmung (mittlere Feldstärken)	Schirmung (hohe Feldstärken)
MUMETALL®	+	+	-	++	+	-
CRYOPERM® 10	+	+	-	++	+	-
PERMENORM® 5000 H2	+	-	--	+	++	+
Weicheisen	+	-	--	+	++	+
Silizium-Eisen	+	+	-	+	+	+
VACOFLEX® 50	-	-	--	-	+	++
VITROVAC® 6025 X	+	+	++	+	--	--
VITROLAM® 477 P8	+	+	++	+	-	--

*Faustregel (Qualitativ):
Aufsummieren der verschiedenen „+“ and „-“ für Feldstärke und Frequenz gibt einen Hinweis darauf, welche Legierung passen könnte!*

Lieferformen

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

Abschirmplatten, Tafeln und Zuschnitte

Wir bevorraten Tafeln aus MUMETALL® oder PERMENORM® 5000 H2 in den Abmessungen ca. 600–750 mm x ca. 2500 mm in typischen Materialdicken von 0,35 bis 3 mm. Weicheisen vertreiben wir in den Materialstärken 0,5 mm bis 5 mm bei Abmessungen von 1000 x 2000 mm. Kornorientierte und nichtorientierte Silizium-Eisen-Legierungen (z. B. M250 und NO20) bieten wir von 0,1 bis 1 mm Stärke und Abmessungen von 1000 x 2000 mm an. Sie können komplett bezogen oder nach Ihren Vorgaben zugeschnitten werden. Bitte beachten Sie, dass die Tafeln, Zuschnitte und insbesondere daraus gefertigte Teile einer magnetischen Schlusswärmebehandlung unterzogen werden müssen, die wir Ihnen gerne anbieten (siehe auch S. 22).

Stangen mit rundem und viereckigem Querschnitt, Quader, Brammen

Für Dreh- und Fräsprozesse werden Massivmaterialien eingesetzt, die im Bereich der Weichmagnetik üblicherweise als Rundmaterial vertrieben werden. Wir halten MUMETALL® in Materialdurchmessern von 1 mm bis 150 mm, PERMENORM® 5000 H2 von 2 mm bis 250 mm, VACOFLUX® 50 von 13,5 bis 171,5 mm und Weicheisen von bis zu 180 mm regelmäßig auf Lager. Auf Wunsch können wir Rundmaterialien durch Schmiedeprozesse auch in einen rechteckigen Querschnitt umformen. Bei einzelnen Legierungen und in Sonderfällen bieten wir auch Material in Brammen-Form an.

Bandmaterial

Während sich Platten und Tafeln besonders für die Herstellung von größeren Abschirmungen und Schweißteilen eignen, wird Bandmaterial häufig für Serienteile verwendet, die durch Laser-, Tiefzieh-, Stanz- und Stanzbiege-Verfahren in einem automatisierten Fertigungsprozess weiterverarbeitet werden. Die Vorteile von Bändern liegen klar auf der Hand: Über Coils können große Materialmengen mit wenig Aufwand bewegt werden, die Lagerung ist platzsparend und die Fertigungsmaschine kann das Bandmaterial kontinuierlich und ohne zusätzliche Handgriffe durch das Bedienpersonal einziehen. SEKELS bietet Bänder verschiedener weichmagnetischer Legierungen in Stärken von 0,05 bis 1 mm an. Die Bandbreite liegt dabei im Bereich von (je nach Legierung) bis zu 640 mm. Wir schneiden jedoch auch kundenspezifisch Bänder auf die für Ihren Prozess optimalen Breiten zu.

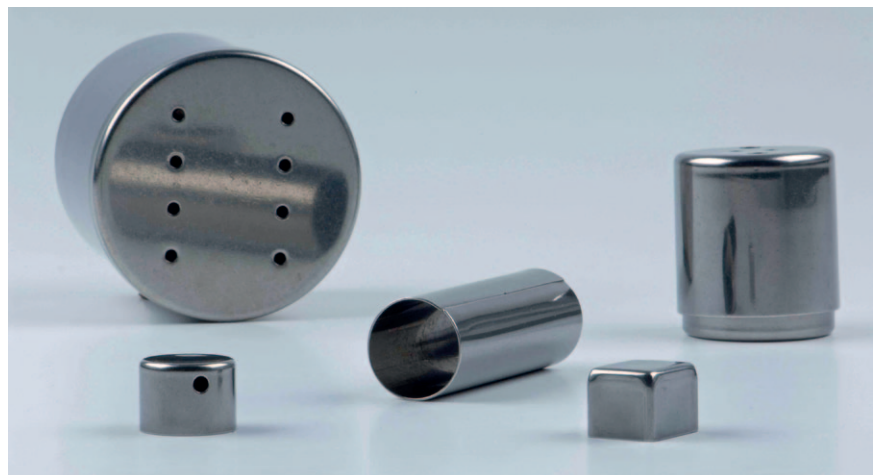
Bänder, die für Blechpakete eingesetzt werden, sind oft mit einer Isolationsbeschichtung aus Backlack oder Magnesiumoxid versehen.

Abschirmbecher

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

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 elektromedizinischen Untersuchungen und bei der Datenübertragung auftreten. Im Gegensatz zu herkömmlichen Abschirmgeflechten aus Kupfer setzt die Schirmwirkung der magnetischen Abschirmschläuche 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 Abschirmschläuche aus MUMETALL® einen sicheren Schutz gegen niederfrequente elektromagnetische Ein- und Ausbreitungen. Wichtig: Um mit Abschirmschläuchen eine Schirmwirkung zu erzielen, müssen immer Hin- und Rückleiter zusammen im gleichen Schlauch verlegt werden.



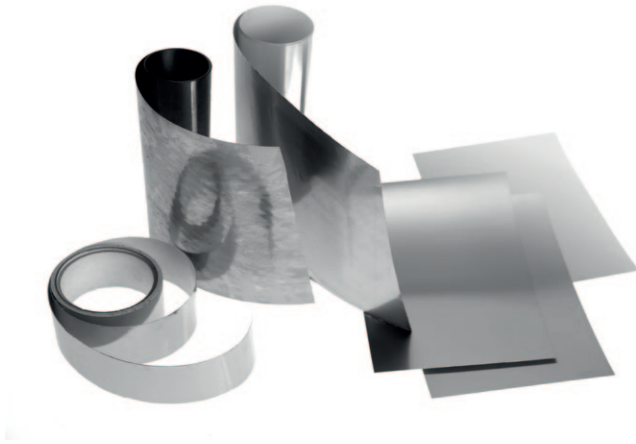
Produkt	Dicke/ Durchmesser	Breite	Länge	Legierung
	[mm]	[mm]	[mm]	Zus. Information
Tafeln/Zuschnitte	0,35 – 3	< 750*	< 3000*	MUMETALL® PERMENORM® 5000 H2 Weicheisen
Folien (kristallin)	0,05 – 0,15	< 640*	Nach Wunsch	MUMETALL® Klebeschicht möglich
Folien (amorph)	ca. 0,02	2,5 – 50	Nach Wunsch	VITROVAC® 6025 X Klebeschicht möglich
Stangen	1 – 215	–	< 4000*	MUMETALL® VACOFLUX® 50 PERMENORM® 5000 H2 Weicheisen
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

* Verfügbare Abmessungen auf Anfrage

** Durchmesser/Breite

Abschirmfolien

Abschirmfolien aus MUMETALL[®], VITROVAC[®] 6025X oder VITROLAM[®] können für improvisierte Abschirmungen verwendet werden. Aber auch wenn Feldstärken sehr gering sind oder Abmessungen und Gewicht extremen Einschränkungen unterliegen.



Vorsicht!

Abschirmfolien sind teils scharfkantig und können evtl. splintern! Wir empfehlen dringend, Handschuhe und Augenschutz zu verwenden!

Ihre Folie schirmt nicht wie erhofft?

Wickeln sie mehrere Lagen und schließen Sie alle Löcher! Das kann helfen!

Folien aus MUMETALL[®]

Durch die gute mechanische Biegsamkeit und die sehr hohe Permeabilität ist MUMETALL[®] ideal als Folienabschirmung geeignet. Die Folien sind in unterschiedlichen Materialstärken (meist 0,05 mm oder 0,1 mm) verfügbar und wahlweise auch mit einer Klebeschicht versehen. Sie können eingesetzt werden um beispielsweise Abschirmgebilde zu „basteln“, Luftspalte und Stoßstellen in größeren Abschirmungen zu überbrücken oder Gegenstände zu umwickeln. Wichtig ist hier, dass ein hinreichend großer Überlapp an Stoßstellen geschaffen wird. Ein scharfes Falzen der Folie ist zwar möglich, redu-

ziert die Abschirmwirkung jedoch drastisch! Folien aus MUMETALL[®] haben in aller Regel bereits vor der Auslieferung eine magnetische Schlussglühung erhalten.

Folien aus VITROVAC[®] 6025X

Im Gegensatz zum kristallinen MUMETALL[®] kann die amorphe Legierung VITROVAC[®] produktionsbedingt ausschließlich in einer Bandstärke von ca. 20 µm hergestellt werden. Die Folie ist sehr spröde und kann nicht geknickt werden, erlaubt aber deutlich geringere Biegeradien. Sie hat außerdem eine sehr hohe Permeabilität und, gerade wenn sie mehrfach aufgewickelt wird, gute Eigenschaften im Bereich der Mittel- und Hochfrequenzschirmung. Zuschnitte aus VITROVAC[®]-Folie finden beispielsweise Anwendung auf Leiterplatten, gewickelte „Röllchen“ im Bereich schneller Aktoren. Auch VITROVAC[®] kann mit oder ohne Klebeschicht geliefert werden.

Folien aus VITROLAM[®]

Nanokristalline Folien bieten im Vergleich zu amorphen Folien eine höhere Sättigungsmagnetisierung und damit die Möglichkeit, mehr Feld auf engstem Raum zu führen. Dafür muss jedoch die sehr spröde Legierung „gebändigt“ werden. Dies geschieht, indem eine oder mehrere Lagen VITROPERM[®] in Kunststoffolie eingebracht werden. Dadurch wird die nanokristalline Folie gut gekapselt und kann direkt aufgeklebt werden.

Geblechte Abschirmungen und Blechpakete

Die „Blechung“ als wirksame Maßnahme zur Reduzierung der Wirbelstromverluste findet in vielen Bereichen der Elektrotechnik Anwendung, z. B. als Rotor- und Stator-Pakete in Elektromotoren, oder als geblechte Transformatorkerne. Aber auch bei Abschirmungen gegen höherfrequente Felder ist die Blechung eine Option.

Abschirmungen für Magnetfelder höherer Frequenzen

Magnetische Felder mit Frequenzen im kHz- und MHz-Bereich können durch massive metallische Materialien kaum noch sinnvoll geschirmt werden. Die Gründe dafür sind die durch die Feldverdrängung (siehe auch Abb. 5) auftretende Verringerung des effektiv nutzbaren Materialquerschnittes, der Permeabilitätsabfall und die auftretenden Verluste durch Ummagnetisierung (Hysterese) und Wirbelströme. Die entstehende Verlustleistung ist näherungsweise proportional zur Frequenz (Hystereseverluste) bzw. zum Quadrat der Frequenz (Wirbelstromverluste):

$$\begin{aligned} P_H &\sim f \\ P_W &\sim f^2 \end{aligned}$$

Dies macht deutlich, dass die thermische Belastung der Abschirmung mit der Frequenz stark ansteigt.

Verlustmechanismen in Blechpaketen

Die Hystereseverluste können durch Materialien mit niedriger Koerzitivfeldstärke (z. B. Nickel-Eisen-Werkstoffe wie MUMETALL®) verringert werden. Gegen die Wirbelstromverluste helfen Legierungen mit hohem spezifischem Widerstand (wie z. B. Silizium-Eisen, Kobalt-Eisen, bei sehr hohen Frequenzen Ferrite und mit Abstrichen Pulverwerkstoffe)

oder die Ausführung mit dünnen Blechen. Typische Blechstärken liegen im Bereich zwischen 0,05 und 1,0 mm. Natürlich ist die geeignete Wahl der Blechrichtung von großer Bedeutung. Die Wirbelströme breiten sich in einer Ebene aus; diese Ebene muss unterbrochen werden.

Blechpakete als Abschirmungen

Für die konkrete Ausführung von geblechten Abschirmungen sind auch praktische Aspekte relevant, wie beispielsweise die Ausführung der Isolation zwischen den Blechen, die den Füllfaktor des Blechpaketes möglichst wenig reduzieren soll und dennoch den auftretenden elektrischen Spannungen zwischen den Blechlagen widerstehen muss. Außerdem spielt der Aspekt der mechanischen Stabilität eine große Rolle. Blechpakete können beispielsweise durch eine (oder Kombinationen) der folgenden Befestigungen aufgebaut werden:

- Schweißen
- Stanzpaketieren
- Kleben
- Backlack
- „Exoskelett“

Unsachgemäße Fixierung kann dazu führen, dass die Abschirmung beispielsweise durch Bandlagenkurzschlüsse nicht wie vorgesehen funktioniert, dass personengefährdende Spannungen auftreten oder dass die Abschirmung unter den mitunter hohen Kräften des magnetischen Feldes beschädigt oder zerstört wird.

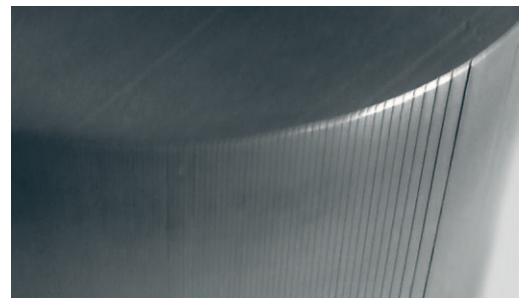
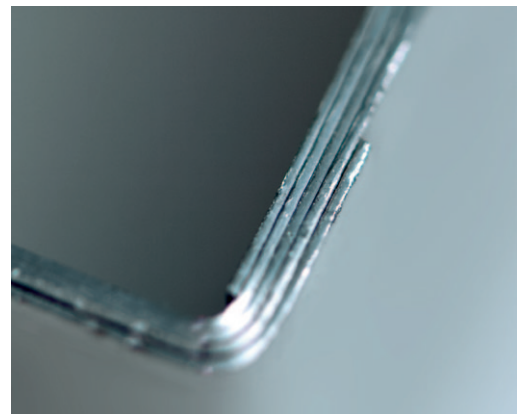
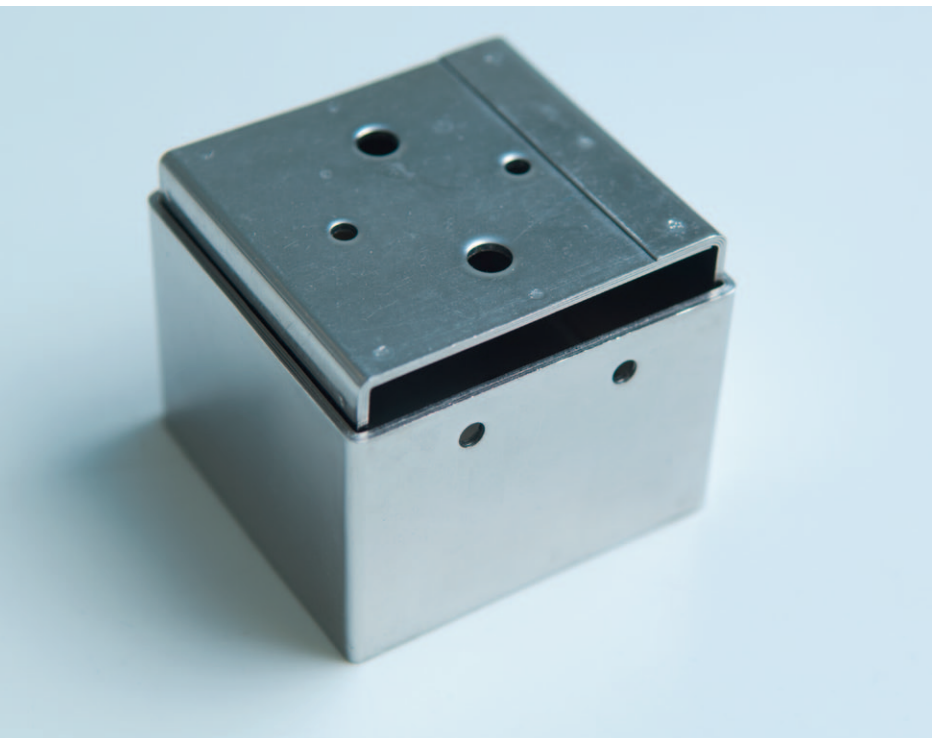
Praxisbeispiele geblechter Abschirmungen

Aufgrund ihres teils beachtlichen Gewichts werden geblechte Abschirmungen meistens (aber nicht ausschließlich) stationär eingesetzt. Beispiele für den Einsatz geblechter Abschirmungen sind:

- Teilchenbeschleuniger, beispielsweise zur Abschirmung von Undulatorfeldern
- Induktive Erwärmungsanlagen (z. B. von Drähten, Bändern oder zur Rotor-Aufschraubung)
- Anlagen zur Aufmagnetisierung durch hohe Strompulse
- Militärische Großgeräte
- Medizinische Geräte

Unsere Kompetenzen im Bereich geblechte Systeme und Blechpakete:

- Berechnung und Auslegung der magnetischen Kreise
- Beratung zur Wahl geeigneter Materialien
- Lieferung von Band- und Tafelwerkstoffen, i. d. R. ab Lager
- Herstellung von Einzelblechen oder von fertigen Blechpaketen



HOMIE (Homogeneous Fields in Experiments)

Viele wissenschaftliche Experimente benötigen räumlich sehr homogene Magnetfelder oder definierte Feldgradienten. Solche Versuchsaufbauten werden z. B. zur Charakterisierung hochpräziser magnetischer Sensoren oder in anderen Bereichen der Atom- und Kernphysik, der Neuro- oder Nanowissenschaften verwendet.

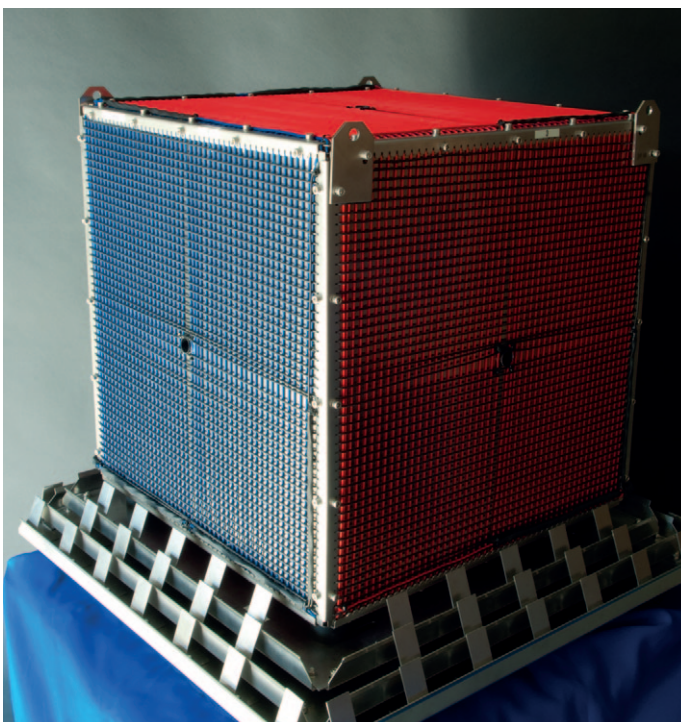
Oftmals werden quasistatische Magnetfeldvektoren mit Beträgen im Bereich unterhalb von mT benötigt, die mit hoher räumlicher Homogenität in zwei oder drei Raumrichtungen frei einstellbar sind. Um in diesem Feldbereich wohldefinierte Magnetfelder erzeugen zu können, müssen sowohl das Erdfeld als auch Laborfelder wirksam abgeschirmt werden.

Basierend auf den Erfahrungen mit magnetischen Abschirmungen und der Auslegung magnetischer Systeme haben wir einen geschirmten Aufbau entwickelt, der sehr homogene dreidimensionale Magnetfelder erzeugt, auf Wunsch auch mit definiertem Feldgradient. Der HOMIE ist sehr kompakt aufgebaut und hat seine Praxistauglichkeit im Forschungsumfeld schon unter Beweis gestellt.

Niederfrequente und magnetische Gleichfelder lassen sich nur durch Flussumleitung abschirmen, bevorzugt durch geschlossene Gehäuse aus mehreren Lagen aus einem hochpermeablen Abschirmwerkstoff, z. B. MUMETALL®. Definierte Magnetfelder innerhalb des abgeschirmten Volumens können entweder durch Dauermagnete oder durch elektrische Ströme erzeugt werden.

HOMIE basiert auf elektrischen Strömen, um Felder ohne mechanische Veränderungen einstellen zu können. Da die Abschirmmaterialien auch mit den im Innenraum erzeugten Feldern wechselwirken, wird ein Konzept benötigt, bei dem die Abschirmung die Feldhomogenität unterstützt und sie nicht, wie z. B. bei den „auf dem Papier“ optimierten Luftspulensystemen verzerrt. Viele konventionelle Aufbauten für ähnliche Zwecke verwenden Helmholtz-Spulen, deren theoretische Feldhomogenität jedoch auf die zweite Ordnung beschränkt ist und außerdem durch Abschirmmaterialien in ihrer Umgebung beeinträchtigt wird.

Das HOMIE-System basiert auf einem völlig anderen Ansatz, der das Abschirmmaterial sogar nutzt, um die Feldhomogenität zu verbessern. Prinzipiell (begrenzt durch den betriebenen konstruktiven Aufwand) kann sein gesamter Innenraum mit einem absolut homogenen Magnetfeld ausgefüllt sein. Es bietet daher einen besonders großen für Experimente nutzbaren Volumenanteil und ist im Gegensatz z. B. zu Solenoidsystemen von außen leicht zugänglich. Beeinträchtigungen der Feldhomogenität durch auf Kundenwunsch eingeplante Durchführungen können durch ein speziell angepasstes Stromumleitungsverfahren minimiert werden. Außerdem kann der gesamte Innenraum frei von elektrisch leitfähigen Materialien gehalten werden, was wichtig ist, wenn höherfrequente Experimente unter kontrollierten quasistatischen Magnetfeldern durchgeführt werden sollen.





Vorteile des HOMIE-Systems:

- Dreidimensionale Magnetfelder im Bereich $< \text{mT}$
- Erzeugung definierter Feldgradienten
- Schirmfaktor ca. 10.000 (entsprechend 80 dB) gegen externe Felder
- Feldhomogenität besser als bei Helmholtz-Systemen
- Homogenitätsbereich größer als bei aktiver Kompensation
- Leicht zugänglicher Innenraum
- Kundenspezifische Anpassungen möglich (1D/2D/3D-Felderzeugung, variable Größe, ...)
- Auf Wunsch: Entmagnetisierung der Abschirmmaterialien
- Bereits in mehreren Forschungslaboren im Einsatz

Der HOMIE-Aufbau

Die gezeigte HOMIE Abschirmung besteht aus fünf Lagen MUMETALL® (die äußeren Lagen sind nicht abgebildet), einem magnetisch äußerst hochpermeablen Material mit niedriger Koerzitivfeldstärke, das für Abschirmanwendungen höchster Anforderungen verwendet wird. Dies minimiert äußere Streufelder und Effekte remanenter Magnetisierung auf ein Minimum.

Das homogene Magnetfeld wird durch ein System stromdurchflossener Drähte erzeugt, das an den inneren Lagen der Abschirmung angebracht ist. So wirkt die Abschirmung gleichzeitig zur Unterdrückung äußerer Felder und zur Feldhomogenisierung.

Die Steuereinheit wird separat aufgestellt und besteht aus Stromversorgungen und einer PC-gestützten Ansteuerung. Sie ist auf stabile Stromflüsse und ein absolutes Minimum zeitlicher Fluktuationen hin optimiert.

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 Biegeradien ohne weitere thermische Nachbehandlung aufgeklebt werden. Die nickelhaltigen Legierungen und Weicheisen „schmier“ bei der zerspanenden Bearbeitung, 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 VACOFLEX® 50.

Die Herstellung von komplexeren Abschirmungen erfordert vor allem Metallzuschnitt, Umformung und Verbindungstechniken.

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.

Wir bieten unter anderem folgende Dienstleistungen an:

- Drehen
- Fräsen
- Laserschneiden
- Schweißen (konventionell und Laser)
- Erodieren
- Tiefziehen
- Stanzen/Stanzenbiegen
- Beschichten (Folien, Klebstoffe, Isolationen)
- Paketieren/Blechkpakete kleben

Neben den gängigen Zerspanungsverfahren verfügen wir über Laseranlagen für Zuschnitte, verschiedene Schweißverfahren, Stanz- und Stanzbiegetechniken und können Abschirmungen durch Tiefziehen herstellen. Optimierte Klebverfahren werden zur Herstellung von Verbundsystemen eingesetzt. Durch Sägen, Erodieren, Fräsen und Abschleifen realisieren wir die Formgebung.

Wir verfügen über eine langjährige Erfahrung bei der Formgebung der Abschirmwerkstoffe auch für komplexe Abschirmungen oder Systeme.



Wärmebehandlung

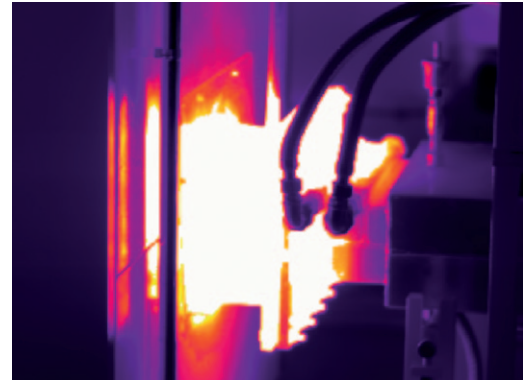
Die mechanische Bearbeitung von weichmagnetischen Materialien verschlechtert deren magnetische Eigenschaften. Zwingend erforderlich ist daher eine magnetische Schlussglühung nach der mechanischen Bearbeitung.

Jedes weichmagnetische Halbzeug, auch bereits „weichgeglühtes“ Material benötigt eine magnetische Schlussglühung!

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.

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.

Der Einfluss der Wärmebehandlung auf die magnetischen Eigenschaften ist umso deutlicher je mehr das Material bearbeitet oder kaltverformt wurde. Sie reduziert nicht nur die mechanischen Verspannungen sondern greift auch stark in die magnetischen Grundgrößen wie Kristallanisotropie und Magnetostriktion ein. Die Unterschiede vorher/nachher sind besonders bei hochpermeablen Legierungen



wie MUMETALL® oder PERMENORM® oder mechanisch harten Legierungen wie VACOFLUX® besonders ausgeprägt (siehe Abb. 10 und 11).

Wir bieten:

- Maßgeschneiderte Wärmebehandlungen für alle gängigen weichmagnetischen Werkstoffe
- Hochwertige Einzelstückglühungen bis hin zu günstigen Serienglühungen
- Auf Wunsch messtechnische Überprüfung und Dokumentation der Glühergebnisse
- Entspannungsglühungen und andere Wärmebehandlungen auch für unmagnetische Werkstoffe

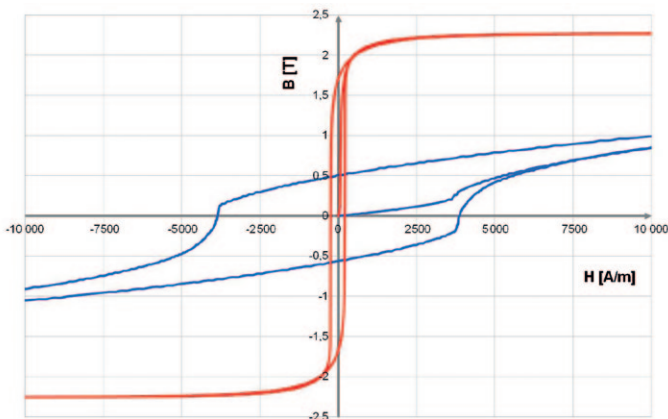


Abb. 10: Einfluss der Wärmebehandlung bei VACOFLUX® 50-Massivteilen (blau: ungeglüht, rot: magnetisch schlussgeglüht).

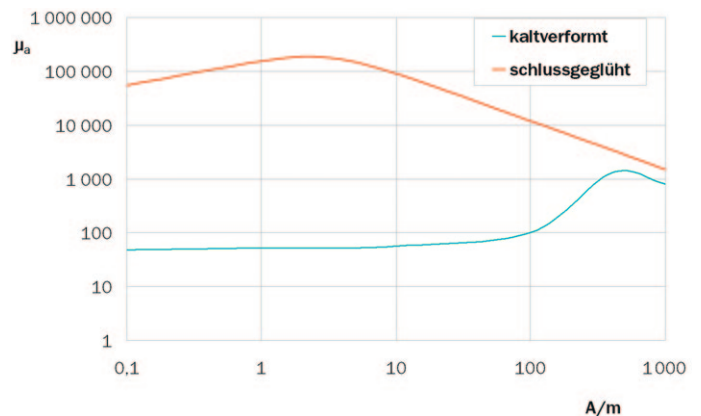


Abb. 11: Einfluss der Wärmebehandlung auf die Anfangspermeabilität von MUMETALL®

Technische Magnetfelder und Grenzwerte

Unsere Umwelt ist einer Vielzahl von elektromagnetischen Feldern ausgesetzt, die außer der gewollten Wirkung weder Geräte, Umwelt noch Menschen stören oder gefährden sollen.

Vorschriften und Empfehlungen

Für Betriebsmittel ist dies im Gesetz über die elektromagnetische Verträglichkeit geregelt, sowie in einer Vielzahl von anwendungs- oder gerätespezifischen Normen. Der Schutz von Menschen vor gesundheitsgefährdender Strahlung ist im Bundesimmissionsschutzgesetz für den Betrieb von Hochfrequenz-, Niederfrequenz- und Gleichstromanlagen (Verordnung über elektromagnetische Felder – 26. BImSchV) geregelt. Darüber hinaus gilt in Betrieben die Unfallverhütungsvorschrift BGV B11 Elektromagnetische Felder zur Verhütung von Gefahren für Leben und Gesundheit bei der Arbeit.

In beiden Regelwerken sind frequenzabhängige Grenzwerte festgeschrieben, denen Menschen permanent oder zeitweise ausgesetzt sein dürfen, ohne dass es zu einer Beeinträchtigung der Gesundheit kommen sollte. Die Festlegung dieser Grenzwerte folgt z. B. den Empfehlungen von nationalen (in Deutschland die deutsche Strahlenschutzkommission (SSK)) und internationalen Einrichtungen (Internationale Kommission zum Schutz von nichtionisierenden Strahlen (ICNIRP) und den wissenschaftlichen Gremien der Weltgesundheitsorganisation (WHO), hier insbesondere die International Agency for Research on Cancer (IARC)).

Die ICNIRP Guidelines (2009) lassen für Kopf und Rumpf von „Beschäftigten“ eine maximalen Flussdichte von 2 T zu, unter kontrollierten Bedingungen bis zu 8 T. Zum Vergleich: die Flussdichte in Kernspin-Tomographen liegt bei ca. 1–2 T (bis zu 10 T bei wissenschaftlichen Geräten). Direkt auf der Polfläche eines starken Industrie-Dauermagneten werden ca. 0,7 T erreicht (stark abnehmend mit dem Abstand).

Für implantierte medizinische Geräte gilt eine Empfehlung von 0,5 mT (also dem ca. 10-fachen des Erdmagnetfeldes). Der gleiche Grenzwert wird in den ICNIRP Guidelines zum Schutz vor „fliegenden“ metallischen Gegenständen empfohlen. Ansonsten geht die ICNIRP davon aus, dass statische Magnetfelder bis zu 400 mT für die Allgemeinbevölkerung unkritisch sind.

Die 26. BImSchV legt für Gleichfelder 0,5 mT fest und richtet sich somit generell nach der Empfehlung für Implantat-Träger, bzw. Sicherheit vor fliegenden Gegenständen.

Die BGV B11 lässt je nach Expositionsbereich und Aufenthaltsdauer zwischen 21,22 mT und 127,3 mT zu, vorausgesetzt die Mitarbeiter sind vor fliegenden Gegenständen geschützt.

16 2/3 Hz, 50 Hz

16 2/3 Hz werden im Bahnbereich eingesetzt. Der internationale und deutsche Grenzwert für einen dauerhaften Aufenthalt der Allgemeinbevölkerung beträgt 300 μ T (0,3 mT), die BGV B11 lässt in für alle Beschäftigten zugänglichen Bereichen 1,27 mT zu. Bei einer Leitungsspannung von 15 kV und einer E-Lok mit einer Leistung von 9 MW (das ist der obere Bereich) wird eine Magnetfeldstärke von 0,3 mT im Abstand von 0,4 m zum stromführenden Leiter unterschritten.

Gleichfelder

Magnetische Gleichfelder werden im Allgemeinen als verhältnismäßig unkritisch angesehen. Unbestritten ist der „wohltuende“ Einfluss des (statischen) Erdmagnetfeldes, welches uns wirksam vor schädigenden „Partikeln“ aus dem Weltraum schützt. Die Stärke des Erdmagnetfeldes in Mitteleuropa beträgt ca. 50 μ T (Betrag), bzw. ca. 40 A/m.

Ferromagnetische Gegenstände werden in Richtung größerer Magnetfeldstärken beschleunigt. Die Kraft beträgt:

$$\vec{F} = \frac{(\mu_r - 1)}{\mu_0} \cdot V \cdot \vec{B} \cdot J_B$$

V ist das Volumen des Körpers, \vec{B} ist das Magnetfeld, J_B ist die Jakobi-Matrix des Magnetfeldes.

Magnetfeld um einen stromdurchflossenen Leiter:

$$B = \mu_0 \frac{I}{2\pi r}$$

Für 50 Hz – Anlagen empfiehlt die ICNIRP einen Grenzwert von 200 μT . Die 26. BImSchV lässt dagegen nur die Hälfte dieses Wertes zu, also 100 μT . Bei einem 230 V-Gerät von ca. 2,5 kW Leistung wird dieser Wert im Abstand von ca. 2 cm zu einem einzelnen stromführenden Kabel erreicht. Bei gleicher Leistung beträgt die Feldstärke im Abstand von 10 cm ca. 22 μT , im Abstand von 50 cm ca. 4,3 μT . Unter Hochspannungsleitungen findet man in Bodennähe Werte zwischen ca. 2 und 20 μT . Beschäftigte dürfen nach BGV BV 11 in allen zugänglichen Bereichen bei 50 Hz 0,424 mT ausgesetzt sein. Durch die starke Abstandsabhängigkeit reicht meist eine Absperrung in unmittelbarer Nähe felderzeugender Einheiten. Wenn dies nicht möglich ist, sind geeignete Abschirmmaßnahmen zu ergreifen.

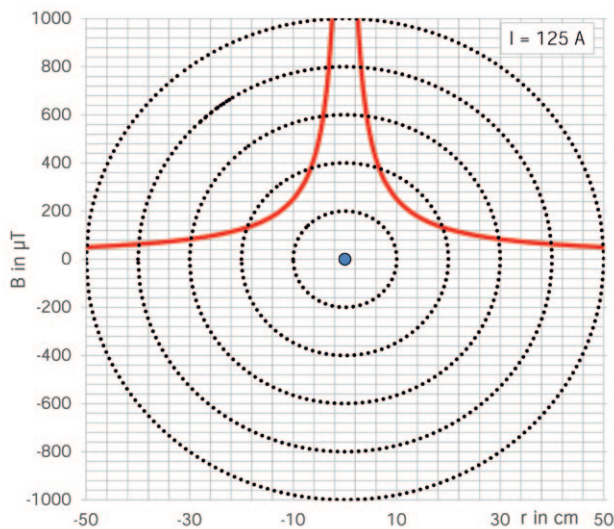


Abb. 12: Magnetische Induktion um einen stromdurchflossenen Leiter mit $I = 125 \text{ A}$ im Abstand r .

Höhere Frequenzen

Hier sind ICNIRP und die 26. BImSchV wieder konform. Der zulässige Grenzwert ist frequenzabhängig und reduziert sich für die Allgemeinbevölkerung (Beschäftigte) bei 1 kHz auf 80 (300) μT , und ab 3 kHz bis 10 MHz auf 27(100) μT (effektiv). Für gepulste elektromagnetische Felder gibt es zusätzliche Grenzen für die Spitzenwerte.

Die Vorgaben/Empfehlungen sind durchaus unterschiedlich und spiegeln die Unsicherheiten bei der Langzeitbewertung wieder. Bei einer reinen Betrachtung des magnetischen Feldes sind die Feldstärken durch Haushaltsgeräte wegen der Abstandsabhängigkeit oft größer als unter einer Hochspannungsleitung. Bei Motoren und Transformatoren erhöht sich die Feldstärke durch die Windungszahlen. Das gilt z. B. auch für die Heizwicklung in Föns. Große Spitzenwerte entstehen z. B. beim Anfahren von elektrisch angetriebenen Schienenfahrzeugen und im Industrie- oder Forschungsbereich bei Anwendungen mit sehr hohen Strömen (siehe auch S. 27 MFA-110).

Messung von Magnetfeldern

Der Betrag des Magnetfeldes an einer bestimmten Stelle kann schon mit einfachen Messgeräten ermittelt werden, die meist mit Hall-Elementen als Magnetfeldsensoren aufgebaut sind. Komplizierter ist die normen- oder regelkonforme Ermittlung in einem Frequenzbereich mit gewichteten Frequenzanteilen. Hierfür gibt es spezielle Messgeräte, die diese Vorgaben auf der Hard- oder Softwareseite umsetzen.

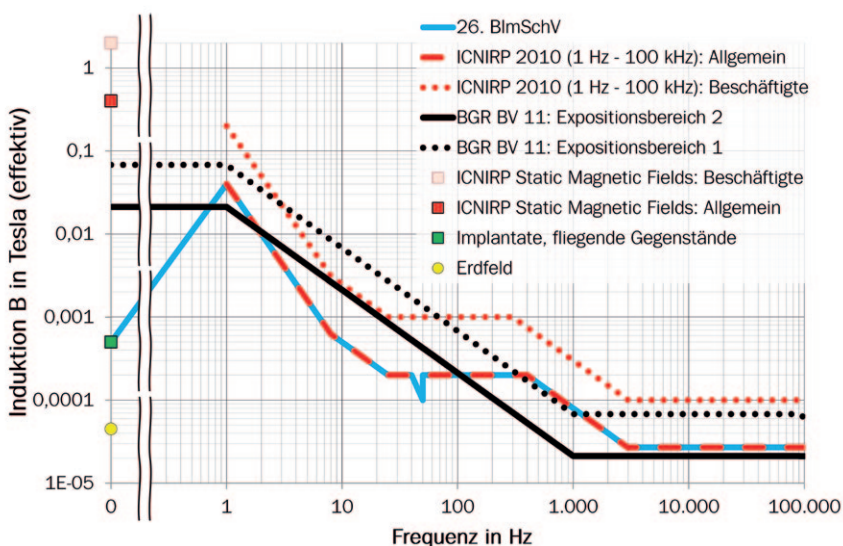


Abb. 13: (Empfohlene) Grenzwerte der magnetischen Induktion.

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, Überlappungen, 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
- Messungen der magnetischen Feldbelastung von Geräten, Anlagen oder Umgebungen (nach BGV B11, 26. BImSchV, etc.)
- Messungen der magnetischen Störaussendungen im niederfrequenten Bereich
- Problemangepasste Sensorauswahl (Hall-Elemente, Search-Coils, Fluxgates 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



Abb. 14: Helmholtz-Messplatz für die Messung von Abschirmfaktoren

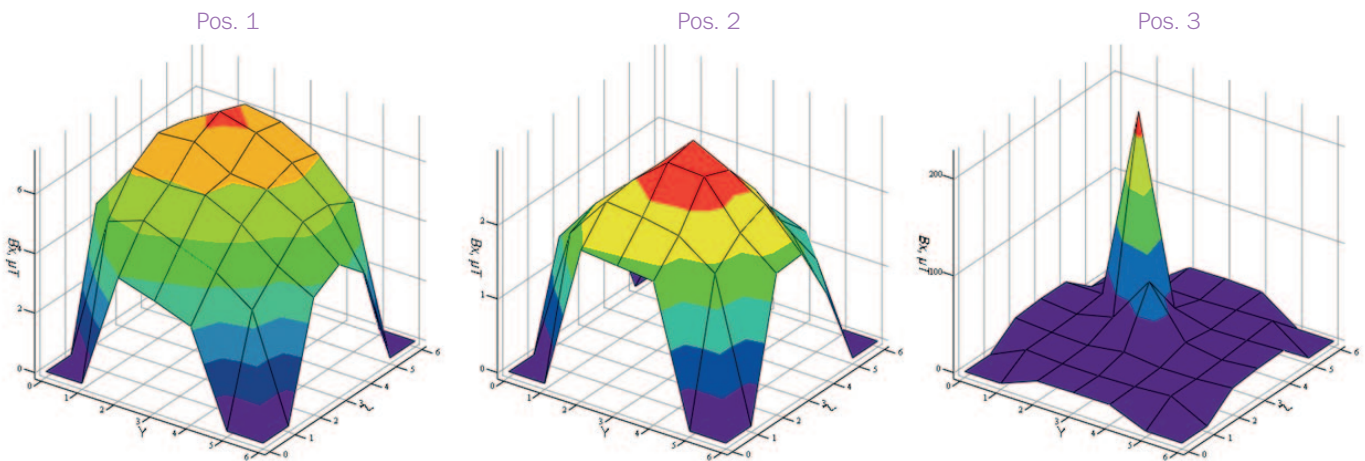
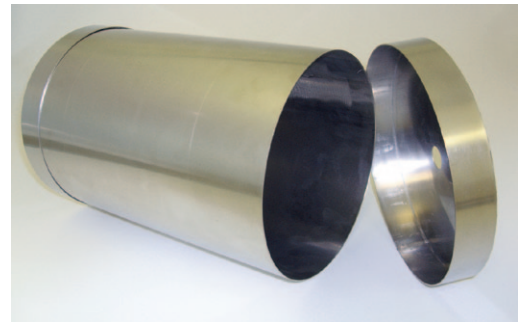
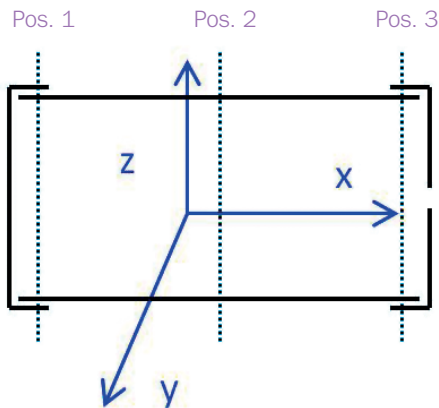
Zur Aufprägung externer Magnetfelder verfügt die SEKELS GmbH über eine Auswahl verschiedener Spulen. Dazu gehören Helmholtz-Spulenpaare mit Durchmessern von 1 m und 2 m für Messungen an größeren Abschirmgeometrien mit höchster Genauigkeit sowie Solenoidspulen für sehr starke Magnetfelder. Die damit erzielbaren Feldeigenschaften entnehmen Sie bitte der untenstehenden Tabelle.

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

Spulensystem	1000 mm	2000 mm	300 mm Hochfeldspule
Frequenzbereich	DC und 0,1 – 2000 Hz	DC und 0,1 – 2000 Hz	DC
Amplitudenbereich	7,74 mT (DC) – 0,08 mT (2000 Hz)	3,34 mT (DC) – 0,05 mT (2000 Hz)	Nennwert: 40 mT (kurzfristig: 77 mT)

Abb. 15: 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.



MFA-110 Mess- und Analysesystem für Magnetfelder

- Komplettsystem mit Standard-Messsonde, Data Acquisition Box, Software und PC (optional)
- Lückenlose Aufzeichnung der Feldstärken im Frequenzbereich 1 Hz bis 400 kHz entsprechend den wichtigsten nationalen und internationalen Standards (z. B. ICNIRP, BGV B11)
- Datenerfassung mit hoher Auflösung und Speicherung der Rohdaten
- M-STREAM Software für eine transparente Datenanalyse
- Offenes System, eigene Grenzwerte können vom Benutzer eingegeben werden
- Ein Messgerät für alle Standards und Normen

Niederfrequente Magnetfelder

Magnetische Felder entstehen durch bewegte elektrische Ladungen, z. B. Elektronen in elektrischen Leitern, oder durch subatomare Bewegungen in ferromagnetischen Materialien. Obwohl niederfrequente Magnetfelder im Vergleich zu höherfrequenten oder gepulsten Magnetfeldern als weniger gefährlich eingestuft werden, sind größere Feldstärken potentiell gefährdend, sowohl für „das System Mensch“ als auch für technische Systeme. Beispiele für das Auftreten von magnetischen Feldern sind

Haushaltsgeräte (Fön, Induktionsherde), industrielle Anlagen (Schweißgeräte, induktive Erwärmanlagen, Gleichfeldleitungen in der chemischen Industrie), Energieversorgung und öffentlicher Verkehr (Überlandleitungen, Erdkabel, Oberleitungen), medizinische Geräte (Kernspin-Tomographen) oder wissenschaftliche Geräte (Spektroskope, Beschleuniger etc.).

Die zulässige Belastung der Öffentlichkeit und von Arbeitnehmern durch niederfrequente Magnetfelder ist in nationalen und internationalen Richtlinien oder Vorschriften festgelegt. Für Deutschland gilt allgemein die 26. BlmschV (Verordnung zur Durch-

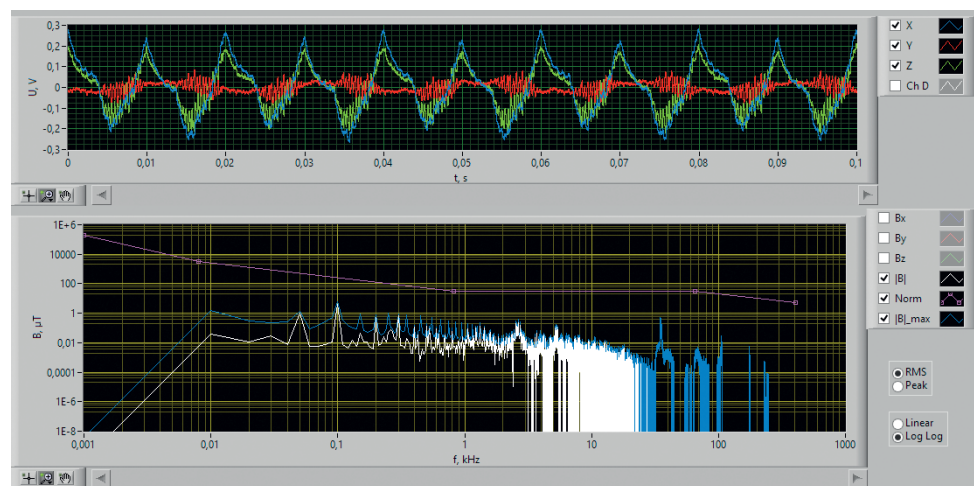


Abb. 16: Beispiel einer Darstellung der Feldstärke über die Frequenz und der Spannung über die Zeit



führung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes), sowie die BGV B11 (Berufsgenossenschaftliche Vorschriften für Sicherheit und Gesundheit bei der Arbeit). Internationale Richtlinien sind die ICNIRP-Veröffentlichungen (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection). Es liegt in der Verantwortung der Hersteller von Geräten oder Betreiber von Anlagen, die darin genannten Grenzwerte einzuhalten.

Mess- und Software-Konzept

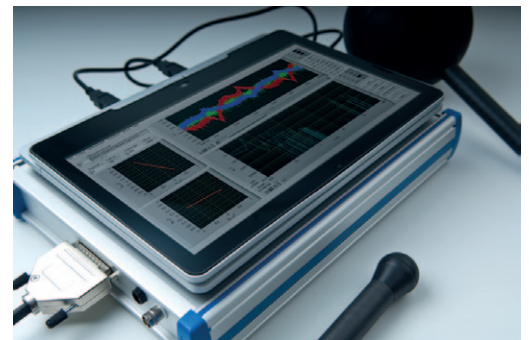
Der MFA-110 kann magnetische Felder in einem weiten Frequenz- und Amplitudenbereich lückenlos erfassen. Die Feldsignale werden in den 3 Raumrichtungen, z. B. mit einer Standard 100 cm² Messsonde

oder individuellen Messsonden erfasst. Die Messsignale werden in der Data Acquisition Box verstärkt und auf der Festplatte des angeschlossenen Computers für die weitere Verarbeitung gespeichert. Die Frequenzauflösung hängt von der gewählten Abtastrate und der Erfassungszeit ab und ermöglicht die sicherere Detektion auch von schmalbandigen Störfeldern. Ein Buffer-Monitoring stellt sicher, dass die Prozessorleistung des PCs ausreichend ist.

Die M-STREAM Software analysiert und verarbeitet die Rohdaten mittels diskreter Fourier-Transformation zur Darstellung der frequenzabhängigen Amplitudenwerte. Ein Vergleich mit verschiedenen nationalen und internationalen Standards und Richtlinien ist implementiert. Weitere, auch kundenspezifische Vorgaben oder Grenzwerte können einfach hinterlegt werden.

Die Rohdaten und die ausgewerteten Daten liegen im TDMS-Format vor und können in ASCII oder MS EXCEL zur eigenen Weiterbearbeitung exportiert werden.

Die SEKELS GmbH bietet auch die Durchführung von Messungen mit dem MFA-110 bei Ihnen vor Ort an!



Spezifikation MFA-110 (mit 100 cm² Messsonde)

Hardware		Leistungsdaten	
Messsonde	Standard 100 cm ²	Frequenzbereich	1 Hz bis 400 kHz
Data Acquisition Box	<ul style="list-style-type: none"> • 280 x 220 x 50 mm³ (Breite x Länge x Höhe) • Alu, 2,6 kg ohne PC • 2 x USB, D-Sub (Sensor), BNC (EXT) • Klettverbindung mit PC 	B-Felder	<ul style="list-style-type: none"> • 6 µT ... 1.5 T bei 1 Hz • 70 nT ... 20 mT bei 100 Hz • 50 nT ... 15 mT bei > 1 kHz (Bereich ist abhängig von der Sonde)
Optional: HP EliteBook Revolve 810 G1 Tablet	Siehe Herstellerangaben	Software	M-STREAM , kompatibel mit Windows 7, 8 (64 bit), basierend auf LabVIEW®
Implementierte Standards	<ul style="list-style-type: none"> • BGV B11 Exp. 1 • BGV B11 Exp. 2 	<ul style="list-style-type: none"> • ICNIRP 1998 Pub. • ICNIRP 1998 Occ. 	<ul style="list-style-type: none"> • ICNIRP 2010 Pub. • ICNIRP 2010 Occ. • 26. BImSchV

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 oder Hochfeld-Solenoidspulen (Abbildung 14) 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 nach der Wärmebehandlung, gerade bei größeren Abschirmungen. 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 (Korrosionsbeständigkeit, 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.

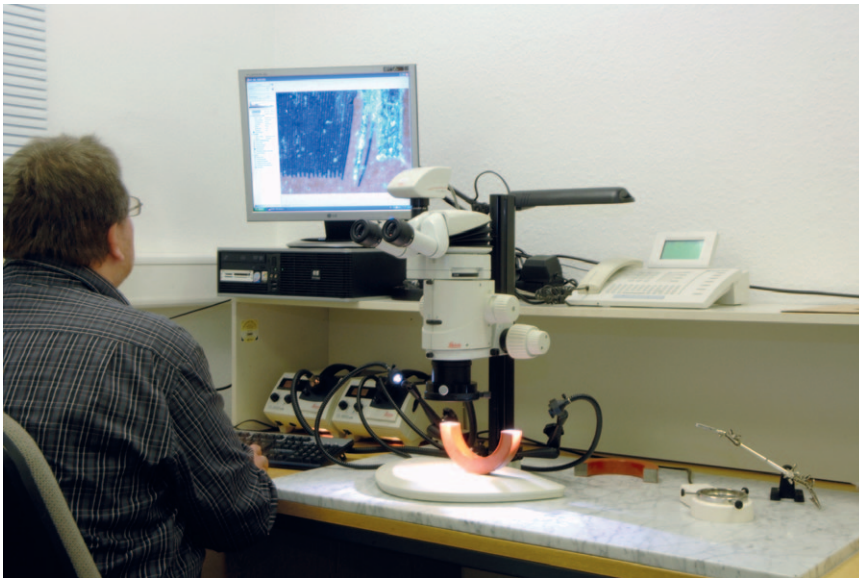


Abb. 17: Lichtmikroskop für qualitätssichernde Untersuchungen



Abb. 18: Messschrank für Temperaturwechsel- und Feuchteprüfungen.

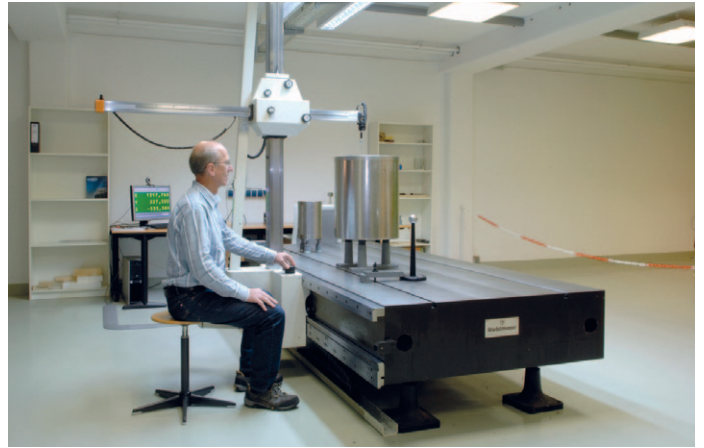


Abb. 19: 3D-Messtisch zur mechanischen Vermessung

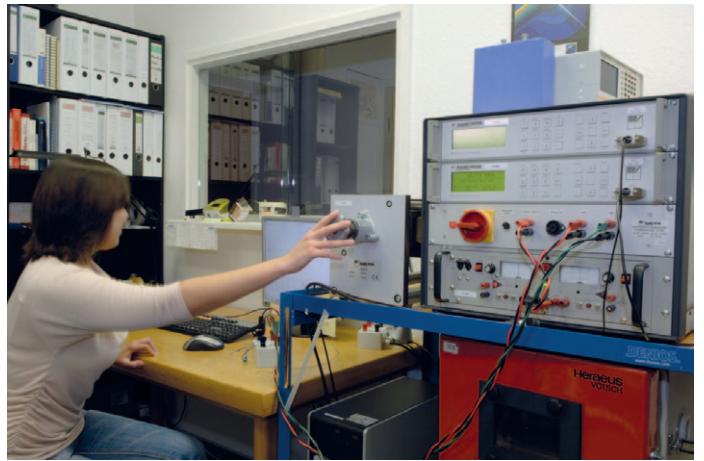


Abb. 20: Messplatz für Hysteresemessungen (statisch/dynamisch), auch bei verschiedenen Temperaturen.

Begriffe und Definitionen

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

Formelzeichen	Einheit	Beschreibung
B	T (= Vs/m ²)	Magnetische Flussdichte (Induktion) in Tesla (1 T = 10 000 Gauß = 1000 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 = 4π/1000 Oerstedt)
μ_r		Relative magnetische Permeabilität
μ_0	Vs/Am	Magnetische Feldkonstante = $4\pi \cdot 10^{-7}$
S, S_r, S_l		Abschirmfaktor (allgemein, quer, längs) (= H_a/H_i oder B_a/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)
λ_s	ppm	Sättigungsmagnetostriktion (relative Volumenänderung)
ρ	Ωm	Spezifischer elektrischer Widerstand
f	Hz	Frequenz
δ	m	Eindringtiefe des elektromagnetischen Wechselfeldes
d	m	Blechstärke
D	m	Durchmesser
L	m	Länge eines Zylinders
a	m	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 600 Kunden weltweit.

Als Fachhändler für die 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 Weicheisen
- Halbzeug aus MUMETALL®, PERMENORM®, CRYOPERM®, VACOFLUX®, TRAFOPERM® und Weicheisen
- 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

Platz für Ihre Notizen

A large grid of graph paper, consisting of 20 columns and 30 rows of small squares, intended for taking notes.

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.



SEKELS GmbH

Dieselstrasse 6

61239 Ober-Moerlen

Germany

Telefon +49 6002 9379-0

Telefax +49 6002 9379-79

mail@sekels.de

Besuchen Sie uns im Internet

www.sekels.de