

Theorie und Praxis bei der Ermittlung von Schirmfaktoren magnetischer Abschirmungen

Dietrich Sekels, Dr. Stefan Hiebel, Dr. Denis Filistovich

Magnetische Abschirmung und Schirmfaktor

Der Begriff „Abschirmung“ wird bei elektrischen und magnetischen Feldern verwendet. Dabei können sowohl der Störer (die Störquelle) als auch die gestörte Einheit (die Störsenke) abgeschirmt werden.

Ein Schwerpunkt der meisten Betrachtungen von Abschirmungen liegt bei elektromagnetischen Wechselfeldern. Hierbei ist der Fokus auf Frequenzen von einigen kHz bis zum GHz-Bereich gerichtet. Als Abschirmungen finden sich hier z. B. dünne metallische Beschichtungen, Folien oder auch Geflechte. Bei der Materialauswahl ist dabei die elektrische Leitfähigkeit entscheidend. So ist es nicht verwunderlich, dass sich Kupfer oder Aluminium in vielen derartigen Anwendungen finden.

Die magnetischen Abschirmungen, deren Schirmwirkung hauptsächlich durch die magnetische Leitfähigkeit von weichmagnetischen Legierungen (z. B. MUMETALL[®]) erzielt wird, werden in einem Frequenzbereich von DC bis zu einigen 100 Hz eingesetzt. Nach wie vor werden die meisten magnetischen Störungen vor allem durch 50-Hz- bzw. 16 2/3-Hz-Wechselfelder mit Feldstärken bis etwa 10 µT hervorgerufen. Andererseits haben Gleichfeldquellen in verschiedenen Bereichen der Technik an Bedeutung gewonnen. Als Beispiel sei hier die Magnetresonanztomografie zur medizinischen Bildgebung genannt. Dabei werden am Betriebsort hochempfindlicher Geräte Störfeldstärken bis zu einigen mT erzeugt, die es abzuschirmen gilt. Zum Vergleich: Die durchschnittliche Feldstärke des Erdmagnetfelds in Deutschland liegt bei rund 50 µT.

Als (skalaren) Abschirmfaktor S bezeichnet man das Verhältnis der Beträge des Außenfelds B_a zum verbleibenden Restfeld B_i im Innern einer magnetischen Abschirmung:

$$S = \frac{B_a}{B_i} \quad (1)$$

Der Abschirmfaktor ist also ein Maß für die Wirksamkeit einer Schirmmaßnahme. Umgekehrt kann aus dem erforderlichen Schirmfaktor eine erforderliche Schirmung berechnet und konstruiert werden - zumindest theoretisch.

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. Und 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 betrachtet werden. Bei den meisten realen Abschirmungen mit angepassten Geometrien, Öffnungen etc. ist also eine analytische Lösung nicht zu finden.

Der heute gebräuchlichste Weg der Berechnung über die Finite Elemente Methode (FEM) führt sehr schnell zu dreidimensionalen Problemen, die im Vergleich zu zweidimensionalen Berechnungen einen deutlich erhöhten Rechenaufwand und hohe Investitionskosten in Software erfordern. Außerdem können die Ergebnisse stark von der Definition bestimmter, teils programm-spezifischer Randbedingungen abhängen, deren richtige Wahl nicht immer eindeutig aus der konkreten Problemstellung ersichtlich ist. Doch auch nach erfolgreicher FEM-Simulation kann nicht immer davon ausgegangen werden, dass das gefundene Ergebnis der Realität entspricht.

Kann man sich auf eine FEM-Simulation des magnetischen Abschirmfaktors verlassen?

Im Großen und Ganzen ja, im Detail nein. Leider sind die Details oftmals die kritischsten Stellen. Wie wir im Folgenden zeigen werden, weisen reale Abschirmungen in ihrer Wirksamkeit gerade hier starke Abweichungen vom Simulationsergebnis auf.

Diese Abweichungen werden z. B. durch die unzureichende Berücksichtigung mechanischer Toleranzen der Abschirmung oder räumlicher Schwankungen der magnetischen Materialeigen-

schaften nach der magnetischen Schlussglühung hervorgerufen. Dies gilt insbesondere bei sehr großen Abschirmungen. Auch verschiedene mechanische Bearbeitungsverfahren können zu Unterschieden in der Wirksamkeit der Abschirmung führen.

Messaufbau zur Bestimmung des magnetischen Schirmfaktors

Hauptbestandteil des hierzu benötigten Messaufbaus sind Spulen zur Erzeugung niederfrequenter magnetischer Wechselfelder, z. B. nach dem Helmholtz-Prinzip, wie in Abb. 1 dargestellt.

Hierbei werden zwei kurze Rundspulen, die gleichsinnig vom selben Strom durchflossen werden, koaxial zueinander aufgestellt. Der Abstand der Spulen zueinander entspricht dem gemeinsamen Spulenzradius. Durch die Überlagerung der beiden Spulenfelder stellt sich im Bereich des Symmetriezentrums des Aufbaus ein räumlich annähernd homogenes Magnetfeld ein. Dieses kann in seiner Frequenz und Amplitude variiert werden.

In das Feld wird nun die magnetische Abschirmung eingebracht. Mit entsprechenden Magnetfeldsensoren wird jetzt das Restfeld innerhalb der Abschirmung gemessen. Diese Messung muss für jede Raumrichtung durchgeführt werden, wenn man den Restfeldvektor erfassen möchte.

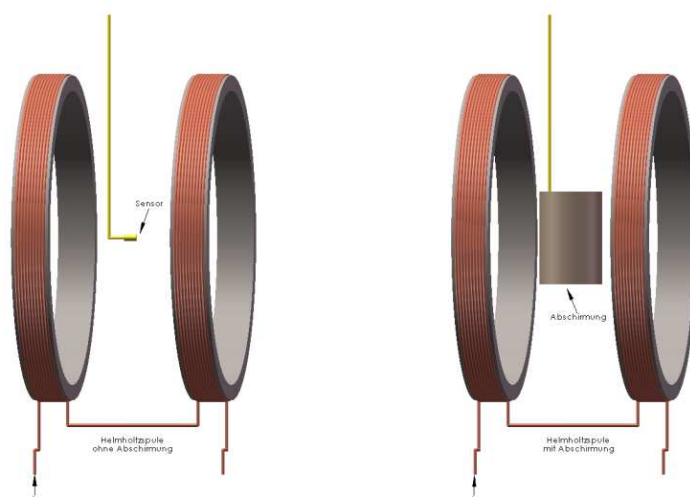


Abb. 1: Schematische Darstellung des Helmholtz-Spulensystems ohne (linke Seite) und mit (rechte Seite) einer zu prüfenden magnetischen Abschirmung.

Damit kann der Feldbetrag B_i

$$B_i = \sqrt{B_{x,i}^2 + B_{y,i}^2 + B_{z,i}^2} \quad (2)$$

berechnet werden. Dieser wird für die Bestimmung des Schirmfaktors S gemäß Gl. (1) benötigt.

Der Schirmfaktor S sowie den Betrag bzw. die einzelnen Komponenten von B_i sollte man dabei oft an verschiedenen Orten innerhalb der Abschirmung bestimmen. Dabei wird B_a wegen der annähernden räumlichen Homogenität des Helmholtz-Feldes im Zentrum zwischen den beiden Spulen zumeist als räumlich konstant und ausschließlich in Richtung der Spulenachse gerichtet betrachtet. In diesem Zusammenhang bleibt unberücksichtigt, dass durch das Hinzufügen der magnetischen Abschirmung eine Magnetfeldverzerrung im Außenbereich der Abschirmung auftritt. So gilt auch die Definition des Schirmfaktors gemäß Gl. (1) unabhängig von der Tatsache, dass das äußere Magnetfeld durch die Anwesenheit der Abschirmung verzerrt wird. Um die dadurch auftretenden Messungenauigkeiten zu minimieren, werden möglichst große Spulenordnungen verwendet. Der Magnetfeldbereich geeigneter räumlicher Homogenität sollte dabei möglichst weit über die Abmessungen der Abschirmung hinausreichen.

Bei den Messungen, die wir im Folgenden beschreiben, werden Helmholtz-Spulen (Abb. 2) mit Durchmessern von 1000 mm und 2000 mm verwendet. Über einen geeigneten Verstärker werden diese Spulen mit der gewünschten Frequenz und Stromamplitude angesteuert. Durch diesen Aufbau erreicht man dann ein im obigen Sinne homogenes, in Richtung der Spulenachse ausgerichtetes Magnetfeld B_a .

Zwischen den Spulen richtet man nun den Prüfling aus. Mit einem Magnetfeldsensor wird dann das innere Feld B_i im Prüfling gemessen bzw. aus Messungen in mehreren senkrechten Raumrichtungen mithilfe von Gl. (2) berechnet. Aus diesen Werten kann nach Gl. (1) der Schirmfaktor S am entsprechenden Ort innerhalb der Abschirmung berechnet werden.

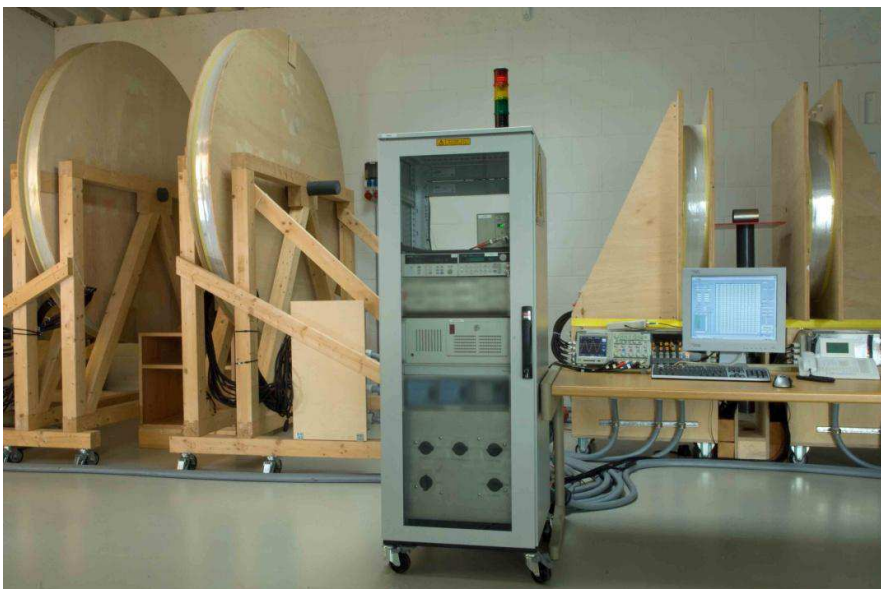


Abb. 2: Helmholtz-Spulensysteme zur experimentellen Bestimmung des Schirmfaktors und zur Messung von Störbeeinflussungen

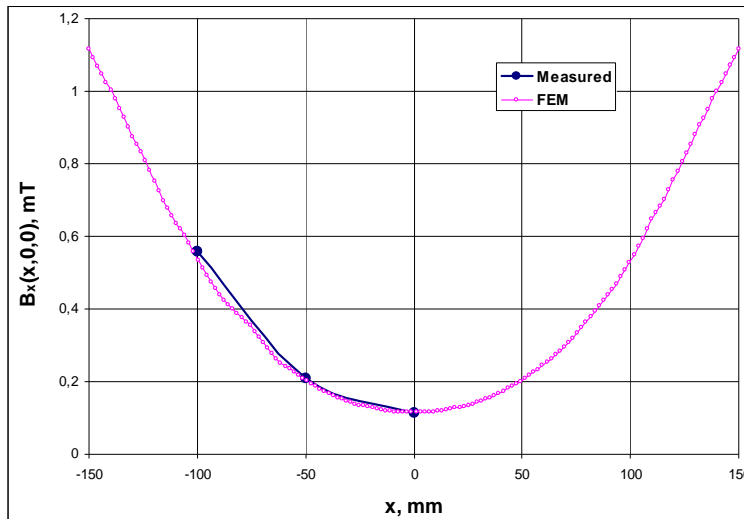


Abb. 3: Gemessener und simulierter axialer Magnetfeldverlauf $B_x(x)$ entlang der Symmetrieachse eines offenen Kreiszyinders aus MUMETALL[®], der sich koaxial ausgerichtet im Zentrum ($x = 0$) eines felderzeugenden Helmholtz-Spulensystems befindet. Die Verbindungslinien zwischen den Messpunkten dienen der Orientierung.

Um eine hohe örtliche Auflösung zu erreichen, die zudem mehrere Frequenzen und Feldamplituden abdeckt, sowie um stochastische Messfehler zu reduzieren, ist eine hohe Anzahl von Messungen notwendig. Die benötigte Messzeit kann so mehrere Stunden betragen. Für diese zeitaufwändigen Messungen bietet sich eine Automatisierung an. Die entsprechenden Messvorrichtungen wurden von uns entwickelt und realisiert.

Die Abb. 3 zeigt den auf diese Weise gemessenen Verlauf des axialen Magnetfelds $B_{x,i}$ auf der Symmetrieachse eines beidseitig offenen, koaxial mit den felderzeugenden Helmholtzspulen ausgerichteten Kreiszyinders aus MUMETALL[®]. Das von außen angelegte niederfrequente Störfeld beträgt dabei 1 mT. Der aus einem Blechstreifen geschweißte Zylinder hat eine Höhe von 300 mm, einen Durchmesser von 200 mm und eine Wandstärke von 1 mm. Er befindet sich bei der Messung im Zentrum des Helmholtz-Spulensystems.

Der Wert von 0,113 mT im Zentrum des Zylinders entspricht einem magnetischen Abschirmfaktor S gemäß Gl. (1) von etwa 8,8 an dieser Stelle. Die sehr viel kleineren Querkomponenten $B_{y,i}$ und $B_{z,i}$ in Gl. (2) werden dabei vernachlässigt.

Ebenfalls in Abb. 3 dargestellt ist das dementsprechende Simulationsergebnis aus einer zweidimensionalen FEM-Berechnung¹. Die der Berechnung zugrunde liegende Magnetisierungskurve $B(H) = \mu_r(H) \cdot \mu_0 \cdot H$ des Zylindermantels wurde durch die Messung der Neukurve an einer Materialprobe bestimmt. Diese stammt aus derselben Materialcharge wie das Zylindermaterial und hat denselben Prozess der magnetischen Schlussglühung durchlaufen.

¹ D. Meeker, femm 4.0, Aladdin Enterprises © 1998-2006

Der numerisch berechnete Feldverlauf zeigt beim offenen Zylinder eine gute Übereinstimmung mit dem Messergebnis und liefert einen magnetischen Abschirmfaktor im Zylinderzentrum von 8,7. Im Rahmen der Messgenauigkeit stimmt dieser Wert somit gut mit dem experimentell bestimmten Wert überein.

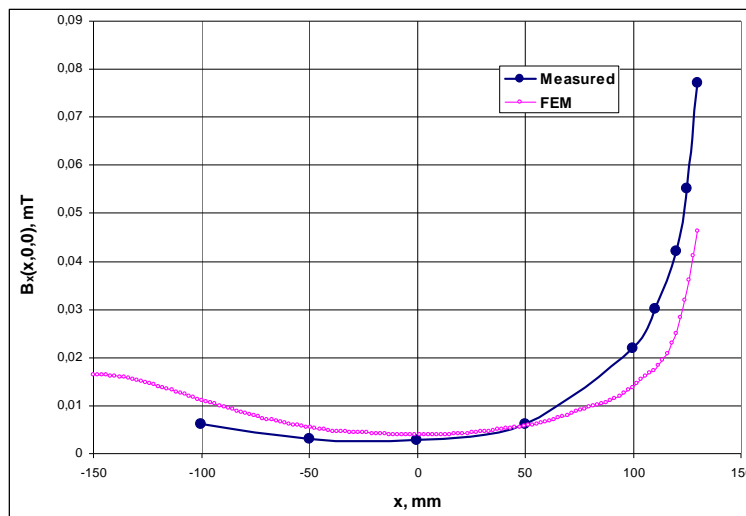


Abb. 4: Gemessener und simulierter axialer Magnetfeldverlauf $B_x(x)$ entlang der Symmetrieachse eines Kreiszyinders aus MUMETALL® mit zwei Deckel mit Stülprand, der sich koaxial ausgerichtet im Zentrum ($x = 0$) eines felderzeugenden Helmholtz-Spulensystems befindet. Die Verbindungslinien zwischen den Messpunkten dienen der Orientierung.

Diese Ergebnisse sind außerdem in Übereinstimmung mit der analytischen Abschätzung². Hier wird der Schirmfaktor im Wesentlichen durch die Geometrie des Zylinders bestimmt. Man erhält je nach effektiver magnetischer Permeabilität des Materials einen Wert knapp unterhalb von 10.

Im Fall des offenen Kreiszyinders bestätigt demnach das Experiment die Vorhersage der FEM-Berechnung. Auch die analytische Abschätzung gibt keinen Anlass, an diesem Ergebnis zu zweifeln.

Betrachten wir nun die Verhältnisse, wenn der Zylinder an beiden Seiten jeweils durch einen Deckel mit Stülprand verschlossen wird. Zur Durchführung der Messkabel besitzt einer der Stülpdeckel im Zentrum eine Öffnung mit einem Durchmesser von 20 mm. Dies wurde in der Simulation ebenfalls berücksichtigt. Diese Konstruktion ist eine typische Realisierung einer magnetischen Abschirmung.

Außerdem wurden in der Simulation die durch Fertigungstoleranzen bedingten axialen und radialen Abstände zwischen Mantel und Deckeln des Zylinders berücksichtigt. Sie wurden mit 0,05 mm bzw. 0,1 mm so gewählt, dass das Restfeld im Zentrum mit den Messungen überein-

² Magnetische Abschirmungen, Firmenschrift FS-M 9 der VACUUMSCHMELZE GmbH Hanau, Ausgabe 1988

stimmt. Bei einem Wert von etwa $3 \mu\text{T}$ ergibt sich ein, auf das Zentrum bezogener Schirmfaktor gemäß Gl. (1) von etwa 330.

Die Abb. 4 zeigt den Vergleich des experimentell bestimmten und des mittels FEM berechneten axialen Feldverlaufs für diesen Fall. Man erkennt hier deutlich, dass der Einfluss der Deckelöffnung bei $x = 150 \text{ mm}$ in der Messung wesentlich stärker ist als es die Simulation erwarten ließ: So ist die gemessene Restfeldamplitude B_x in der Nähe der Öffnung etwa doppelt so groß wie in der Simulation.

Hier möchten wir daran erinnern, dass beim offenen Zylinder der Vergleich zwischen Messung und Simulation eine weitgehende Übereinstimmung ergab. Somit kann angenommen werden, dass eine solche Betrachtung keine grundsätzlichen Fehler beinhaltet.

Die hier beschriebenen Ergebnisse führten bei uns zu einer erhöhten Sensibilität bei der Bewertung von analytischen und numerischen Beschreibungen von magnetischen Abschirmungen. So kann man davon ausgehen, dass das reale Verhalten nur bei einfachster Geometrie durch FEM-Simulationen ausreichend genau wiedergegeben wird. Auch der Einsatz der bekannten analytischen Ansätze ist nur für einfache Geometrie möglich.

Zur sicheren Beurteilung der Wirksamkeit von realen Abschirmgehäusen sind daher direkte Messungen unerlässlich. Diese können sowohl in situ wie ex situ in entsprechenden Messspulen durchgeführt werden. Dabei bieten spezielle Messaufbauten zusätzliche Möglichkeiten der Analyse und der Optimierung von Abschirmungen.

Die SEKELS GmbH entwickelt, fertigt und handelt technische Produkte im Umfeld des Magnetismus. Mit ca. 20 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.

Alle Teile, Bauelemente und Systeme werden in Deutschland oder Osteuropa auf Basis der von SEKELS erstellten technischen Unterlagen gefertigt. SEKELS ist DIN EN ISO 9001:2008 zertifiziert.

*SEKELS GmbH
Dieselstrasse 6
61239 Ober-Mörlen*

*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.