

Flussleitfähigkeit versus Stromverdrängung: Magnetische Schirmung im niederfrequenten Bereich

Dr. Stefan Hiebel, Sekels GmbH, Ober-Mörlen, Deutschland, shiebel@sekels.de

Dr. Denis Filistovich, Sekels GmbH, Ober-Mörlen, Deutschland, dfilistovich@sekels.de

1. Typische Abschirmprobleme

Bei magnetischen Abschirmungen geht es entweder darum, empfindliche Geräte oder auch Personen vor niederfrequenten Magnetfeldern zu schützen (Abschirmung der Störsenke), oder die durch technische Geräte entstehenden Magnetfelder an ihrer Ausbreitung nach außen zu hindern (Abschirmung der Störquelle). „Niederfrequent“ bezeichnet in diesem Zusammenhang typischerweise den Frequenzbereich von 0 bis zu einigen kHz.

Zumeist ist eine Abschirmung der Störsenke vorzuziehen, da die dort auftretenden Störfelder bereits durch den Abstand zur Störquelle reduziert sind. Zudem sind senkennahe Abschirmungen oft kleiner ausführbar und mit sinkender Größe einer magnetischen Abschirmung steigt ihre Wirksamkeit und ihre Empfindlichkeit gegen magnetische Sättigung des Abschirmmaterials sinkt.

Häufig anzutreffende Situationen, die magnetische Abschirmmaßnahmen erfordern, sind z. B. wissenschaftliche Versuchsaufbauten, medizintechnische Geräte, empfindliche elektronische Komponenten in Maschinen, Fahr- und Flugzeugen, aber auch der Aufenthaltsbereich von Personen in der näheren Umgebung technischer Anlagen, insbesondere dort, wo große elektrische Ströme fließen.

2. Bestehende Grenzwerte

Zur Bewertung der zulässigen Magnetfeldamplituden, denen Personen ausgesetzt werden dürfen, existieren verschiedene Richtlinien (Bild 1). Eine Gemeinsamkeit ist die unterschiedliche Gewichtung verschiedener Frequenzbereiche. Zudem sind häufig die zulässigen Belastungen während beruflicher Tätigkeit höher als für die „Allgemeinheit“.

Im technischen Bereich ergeben sich die zulässigen Grenzwerte selbstverständlich aus den sehr unterschiedlichen technischen Anforderungen der zu schützenden Geräte.

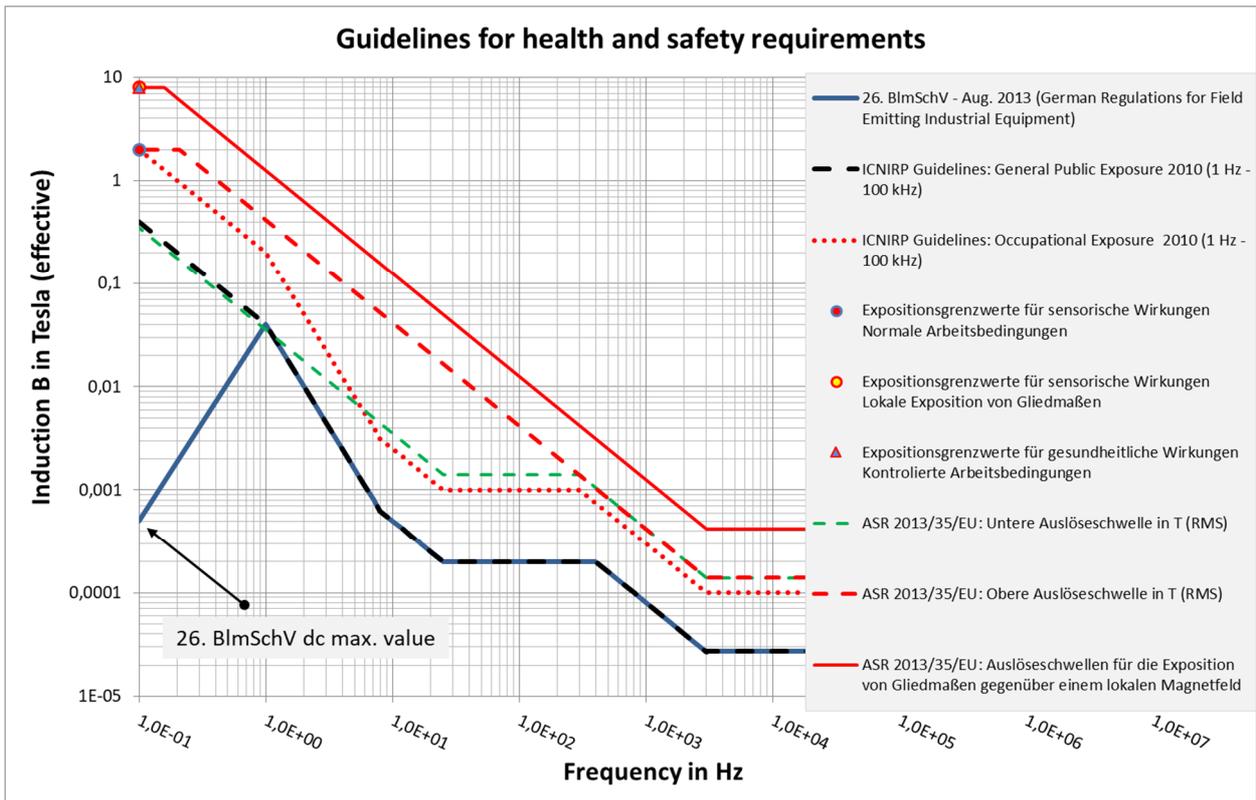


Bild 1: Richtlinien für die zulässige Magnetfeldexposition von Personen (wird weiter aktualisiert)

3. Qualifizierung von Abschirmmaterialien

Bei der Bewertung von Abschirmmaterialien ist grundsätzlich zu unterscheiden zwischen weichmagnetischen Werkstoffen, die niederfrequente Magnetfelder nach dem Prinzip der Flussumleitung „abschirmen“ und elektrisch leitfähigen Abschirmmaterialien, die in Wechselfeldern durch die induktive Erzeugung von Wirbelströmen elektromagnetische Felder aufbauen, die nach Lenzscher Regel ihrer Ursache entgegen gerichtet sind. Weichmagnetische Werkstoffe sind meist auch elektrisch leitfähig, so dass bei diesen Materialien in niederfrequenten Wechselfeldern beide Abschirmmechanismen gleichzeitig wirken. Dagegen sind die besten elektrischen Leiter unmagnetisch, so dass Abschirmungen z. B. aus Kupfer oder Aluminium bei magnetischen Gleichfeldern bis ca. 50 Hz wirkungslos sind.

Die weichmagnetischen Eigenschaften eines Materials lassen sich anhand von in Jochsystemen eingespannten Probestücken oder durch Primär- und Sekundärwicklung ringförmiger Materialproben als Transformatorenkerne bestimmen. Entscheidend für die Abschirmwirkung gegen niederfrequente Magnetfelder sind der frequenzabhängige Verlauf der magnetischen Permeabilität μ_r als Funktion der magnetischen Erregung H sowie die Sättigungspolarisation J_s des Materials. Für Abschirmzwecke weniger wichtig ist die Koerzitivfeldstärke H_c des Materials.

Allerdings hängt die Wirksamkeit einer magnetischen Abschirmung zusätzlich stark von der Geometrie des Problems ab, so dass die Angabe einer Abschirmeigenschaft als reine Materialgröße im Gegensatz zu Leitfähigkeitsschirmen nicht sinnvoll ist. Zur Vorhersage

der Abschirmwirkung können die Ergebnisse weichmagnetischer Messungen dagegen z. B. als Eingabeparameter in Simulationsprogrammen verwendet werden.

4. Quantitative Bewertung von Abschirmmaßnahmen

Da die analytische Berechnung magnetischer Abschirmfaktoren nur für sehr einfache Geometrien möglich ist, bleiben bei realen Problemen oft nur experimentelle oder numerische Methoden, um die Wirksamkeit einer Abschirmmaßnahme vorherzusagen bzw. die Auslegung von Abschirmsystemen zu optimieren.

4.1 Abschirmmessungen in definierten Störfeldern

Die Messung niederfrequenter magnetischer Abschirmfaktoren lokaler Abschirmungen erfolgt zumeist wie in Bild 2 dargestellt in einem Helmholtz-Spulenpaar. Das Verhältnis aus den Feldamplituden ohne (B_{out}) und mit der Abschirmung (B_{in}) an demselben Ort bestimmt den Schirmfaktor $S = 10^{a/20}$ (a : Schirmdämpfung in dB).

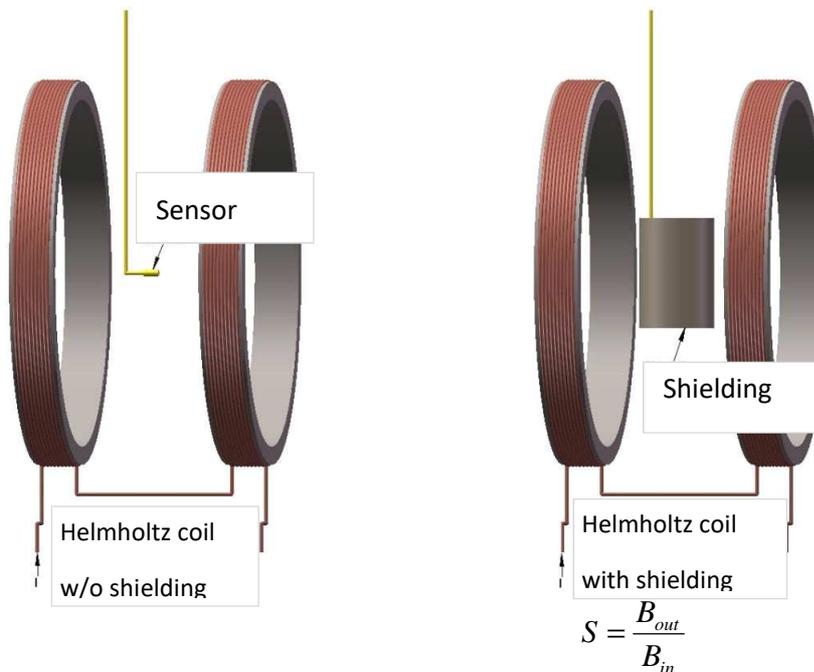


Bild 2: Prinzip einer Schirmfaktormessung

4.2 Vergleich mit der Finite-Elemente-Methode (FEM)

Da bei magnetischen Abschirmproblemen die Berücksichtigung wichtiger Parameter wie z. B. weichmagnetischer Eigenschaften oder Fertigungstoleranzen in FEM-Simulationsprogrammen oft nur ansatzweise möglich ist, können schon bei einfachen Geometrien Diskrepanzen zu realen Messergebnissen auftreten. Bild 3 zeigt dies für den Fall eines rotationssymmetrischen Zylinders aus 1 mm-MUMETALL[®] mit einem Durchmesser von 200 mm und einer Länge von 300 mm. Ohne die abnehmbaren Deckel besteht eine sehr gute Übereinstimmung zwischen FEM-Berechnung und Messung

(links). Allein durch Hinzufügen der beiden Deckel entsteht jedoch eine deutliche Abweichung der Simulationsrechnung von den Messergebnissen (rechts).

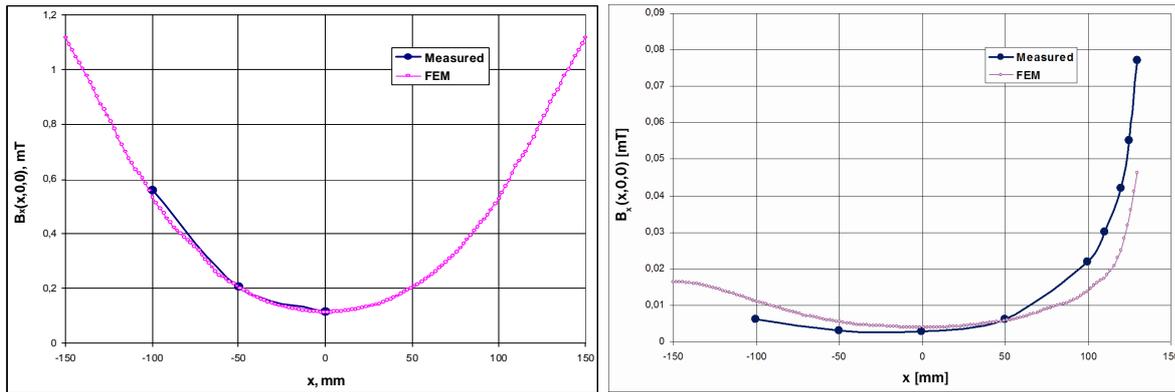


Bild 3: Vergleich einer FEM-Berechnung des magnetischen Abschirmfaktors mit der ortsabhängigen Messung an einem um die x-Achse rotationssymmetrischen Zylinder ohne (links) und mit Deckeln (rechts; Deckelöffnung \varnothing 20 mm bei $x = 150$ mm)

4.3 Störfeldmessungen vor Ort

Um gezielte Abschirmmaßnahmen gegen niederfrequente Wechselfelder ergreifen zu können, ist es wichtig, die einzelnen Frequenzkomponenten zur Bestimmung der Feldrichtung voneinander getrennt und zeitlich lückenlos zu analysieren. Die aufgezeichneten Messdaten sollten frei von der gemäß Bild 1 nach Frequenzbeiträgen gewichteten Gesamtbewertung der Störumgebung betrachtet werden können. Abbildung 4 zeigt ein Messsystem, das diese Anforderungen erfüllt.



Bild 4: Messsystem für Störfeldmessungen mittels 3D-Searchcoils

5. Anwendungsbeispiele

Die Auswahl des für ein bestimmtes Problem geeignetsten Abschirmmaterials unterliegt nicht nur technischen, sondern zumeist auch wirtschaftlichen Rahmenbedingungen, bedingt durch Rohstoffkosten, Materialverfügbarkeit, Gewicht, Verarbeitungsmöglichkeiten etc. Daher werden hier Untersuchungen vorgestellt, wie verschiedene Werkstoffe in bestimmten Frequenzbereichen auch in Kombination als Abschirmmaterialien wirken.

5.1 Mehrfachabschirmungen

Bezogen auf eine optimale Schirmwirkung ist es in der Regel günstiger, mehrere dünnwandige Abschirmungen anstelle weniger, dickerer Lagen zu verwenden. Umgekehrt lässt sich so der Materialeinsatz bei gegebener Schirmwirkung minimieren, allerdings zumeist auf Kosten eines höheren Bearbeitungsaufwands. Dies wird durch Messungen an Demonstrationsobjekten veranschaulicht.

5.2 Die Eindringtiefe elektromagnetischer Felder

Bei der Materialauswahl von Abschirmmaterialien im Frequenzbereich bis zu einigen kHz ist die Eindringtiefe

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

des elektromagnetischen Felds eine wichtige Größe. Sie hängt von Feldfrequenz f , dem spezifischen elektrischen Widerstand ρ und der magnetischen Permeabilität $\mu = \mu_r \mu_0$ des Werkstoffs ab. An dieser Formel kann man erkennen, dass relativ schlecht elektrisch leitfähige weichmagnetische Werkstoffe in Verbindung mit ihrer um Größenordnungen höheren relativen magnetischen Permeabilität μ_r im Vergleich z. B. zu Kupfer- und Aluminiumlegierungen auch im kHz-Frequenzbereich noch deutlich bessere Abschirmeigenschaften haben. Dass in diesem Frequenzbereich trotzdem oft Leitfähigkeitsabschirmungen oder Kombinationen mit weichmagnetischen Materialien zum Einsatz kommen, hat vor allem wirtschaftliche Gründe.

Bild 5 zeigt die Frequenzabhängigkeit magnetischer und elektrischer Abschirmungseffekte an einem einfachen Zylindermodell mit Länge \gg Durchmesser \gg Wandstärke. Dabei wurden rechnerisch die Feldverdrängung sowie die Wirbelstromdämpfung berücksichtigt. Auch diese Zusammenhänge werden anhand von Beispielmessungen demonstriert.

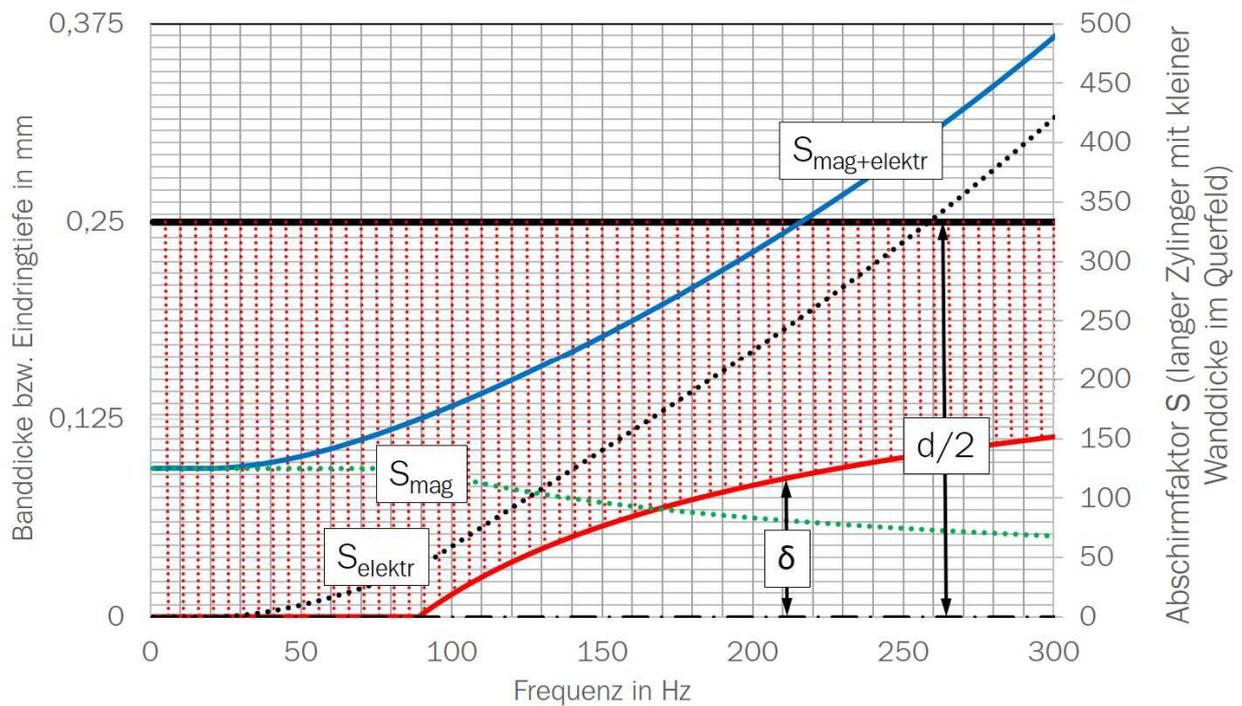


Bild 5: Frequenzabhängigkeit magnetischer und elektrischer Abschirmungseffekte an einem einfachen Zylindermodell mit $d = 0,5$ mm Wandstärke

Literaturangaben

- [1] Hiebel, S., „Magnetische Abschirmungen“; Wengerter, R., Sekels GmbH, Produktschrift 2013
- [2] Hiebel, S., Filistovich, D., Kühn, M., Weber, Th., „Niederfrequente magnetische Felder: Beispiele, Messungen und Maßnahmen“; Sekels, Audi AG, TÜV Nord CERT GmbH, EMC Düsseldorf 2014