

Niederfrequente magnetische Störfelder: Beispiele, Messung, Maßnahmen

Dr. Stefan Hiebel, Sekels GmbH, Magnetische Abschirmungen,
Dr. Denis Filistovich, Sekels GmbH, Messtechnik,
Michael Kühn, AUDI AG, Entwicklung EMV,
Dr. Thomas Weber, TÜV Nord CERT GmbH, EMV Services

1. Typische Abschirmprobleme

Bei magnetischen Abschirmungen geht es entweder darum, empfindliche Geräte oder auch Personen vor niederfrequenten Magnetfeldern zu schützen (Abschirmung der Störquelle), 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 Störquelle 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“.

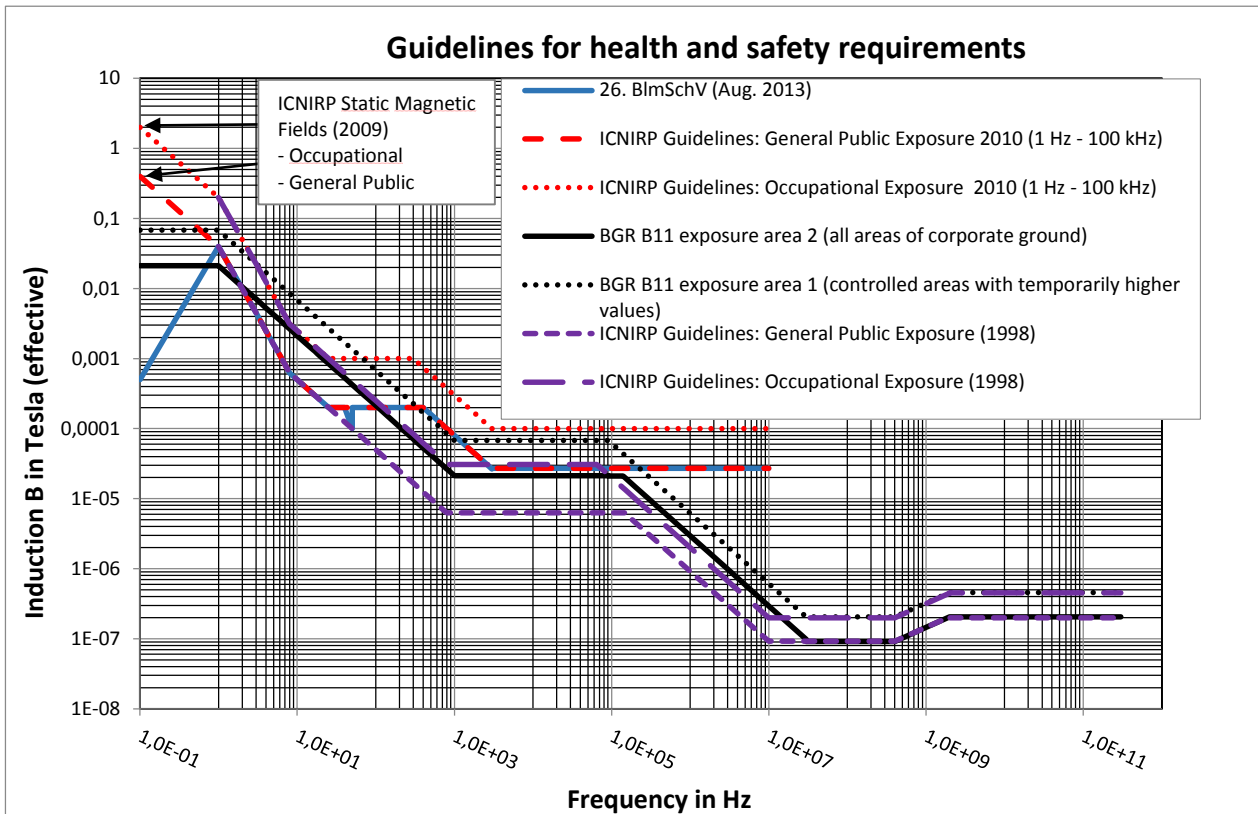


Bild 1: Richtlinien für die zulässige Magnetfeldexposition von Personen (hier betrachtet: der Frequenzbereich von 0 bis ca. 300 kHz)

Maßgebend ist die 26. BImSchV in der aktuellen Fassung vom 21. August 2013. Diese gilt für ortsfeste Hochfrequenzanlagen (9 kHz-300 GHz), Niederfrequenzanlagen (zur Umspannung und Fortleitung von Elektrizität mit einer Nennspannung von 1000 V) sowie Gleichstromanlagen mit einer Spannung von 2000 V und mehr. Interessanterweise gilt gemäß der Norm im Bereich von 25-400 Hz ein Grenzwert von 200 μT , bei genau 50 Hz jedoch ein Wert von 100 μT . Wobei diese Norm Werte für die „Allgemeinheit“ bzw. den öffentlichen Raum festlegt und als Verordnung in Deutschland rechtgültig ist. Die ICNIRP-Guideline gilt als eine Grundlage der 26. BImSchV, nennt aber durchgängig ohne Ausnahme einen Wert von 200 μT im Bereich von 25-400 Hz. Für Betriebsgelände bzw. den Arbeitnehmerschutz gilt zudem die BGV B11 der Berufsgenossenschaft BG E-TEM (Energie Textil Elektro Medienerzeugnisse), ursprünglich von 2001, damals noch BGFE. Betrachtet man den Expositionsbereich 2 so gilt hier ein Grenzwert für 50 Hz von 424 μT . Diese Vorschrift ist in Deutschland für Betriebsgelände bzw. Arbeitgeber bindend. Besondere Regelungen gelten für Personen mit Herzschrittmachern oder anderen aktiven oder passiven Körperhilfen.

Insgesamt ergibt sich also ein geregeltes, aber doch im Detail zu betrachtendes Vorschriftenwerk, das selbstverständlich auch die Frequenzbereiche außerhalb der eigentlichen Netzfrequenz erfasst.

Zugleich findet zu dem Thema schon seit Jahren eine lebhaft Diskussion statt, welche Grenzwerte zu Grunde gelegt werden sollten (s. hierzu z. B. emf-Portal.de, ein Projekt

des Instituts für Arbeits- und Sozialmedizin der RWTH Aachen). Dadurch ergibt sich neben der messtechnischen und lösungsorientierten Fragestellung auch eine politisch-gesellschaftliche Dimension.

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

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 Al oder Cu bei magnetischen Gleichfeldern bis ca. 50 Hz wirkungslos sind.

3.1 Bestimmung der elektromagnetischen Schirmdämpfung

In diesem Kapitel werden die Beschreibung eines analytischen Modells für die Berechnung der elektromagnetischen Schirmdämpfung im Fernfeld sowie die notwendige Modifikation für den Nahfeldbereich für mehrschichtige Materialien behandelt und durch Messungen validiert.

3.1.1 Berechnung mittels analytischer Modelle

In [1] ist ein Modell für die Berechnung der Schirmdämpfung eines Parallelplattenschirms angegeben (siehe Bild 2). Der Parallelplattenschirm besteht aus zwei unendlich ausgedehnten Platten, auf welche eine ebene Welle (TEM-Mode) trifft. Die Schirmdämpfung wird mit einer Kettenmatrixmethode im geometrischen Zentrum, also in der Mitte zwischen den Platten, berechnet. Eine einzelne Matrix ist als Vierpol zu verstehen, welcher die Durchlass- und Reflektionsfaktoren für jeden Materialübergang und jedes Material beinhaltet. Die Kettenmatrizen können für mehrschichtige Materialien beliebig erweitert werden, beispielsweise für heterogene Schirmstrukturen.

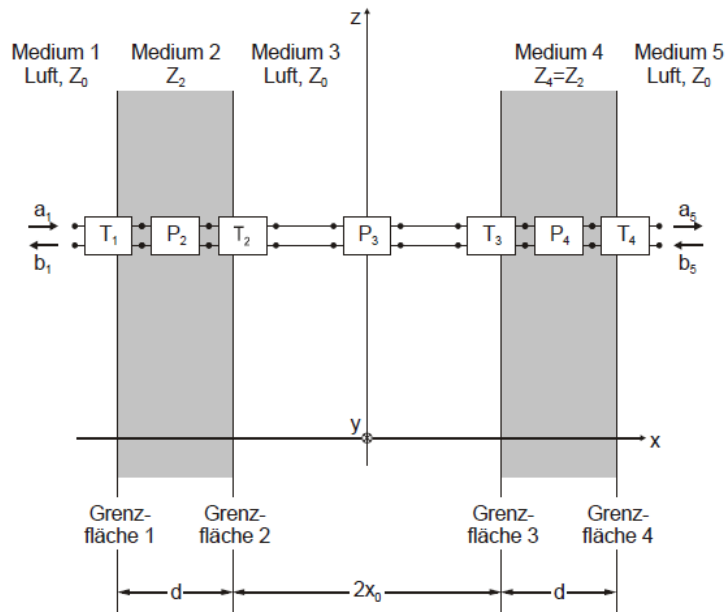


Bild 2: Erweitertes Impedanzkonzept von Schelkunoff (Kettenmatrixmethode) nach [1]

Für die Bestimmung der Schirmdämpfung von mehrschichtigen Materialproben (z. B. beschichtetes Polyamid 6 mit Kupfer beidseitig) muss das Modell angepasst werden:

- Schirmdämpfung hinter dem Schirm
- Lösung für den Nahfeldbereich

Aufgrund der einfachen Struktur der aneinander geschalteten Vierpole ist es relativ einfach, die Schirmgröße hinter dem Schirm zu bestimmen. Die Parameter a_1 und a_5 bezeichnen die hinlaufenden Wellen und b_1 und b_5 die rücklaufenden Wellen. Für das folgende Beispiel ($n = 2$ Schichten Kupferfolie und $m = 1$ Schicht Polyamid) in Abbildung 3 nimmt die Gleichung folgende Form an:

$$\begin{bmatrix} a_1 \\ b_1 \end{bmatrix} = [T_1] \cdot [P_2] \cdot [T_2] \cdot [P_3] \cdot [T_3] \cdot [P_4] \cdot [T_4] \cdot \begin{bmatrix} a_5 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha & \beta \\ \gamma & \delta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_5 \\ 0 \end{bmatrix}$$

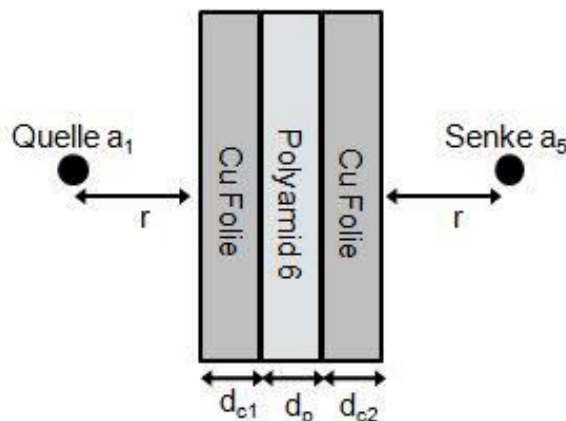


Bild 3: Beispiel für die Kettenmatrixmethode (Nahfeldlösung) an einem mehrschichtigen Material

Aufgrund der nicht auftretenden Reflektionen hinter dem Schirm ist der Parameter $b_5 = 0$.

Die Schirmdämpfung (Verhältnis Eingangs- zu Ausgangsgröße) hinter dem Schirm berechnet sich dann zu:

$$a = \frac{a_1}{a_5}$$

Die Lösung für den Nahfeldbereich kann nach genauer Betrachtung der Transmissionsmatrix $[T_1]$ bzw. der Durchlass ($d_{11,1}$)- und Reflektionsfaktoren ($r_{11,1}$) implementiert werden. Es kann durch Substitution des Freiraumwellenwiderstands (Z_0) mit der Impedanz eines kapazitiven (Z_C) oder hier: induktiven Feldes (Z_L) die Nahfeldlösung erreicht werden:

$$[T_i] = \frac{1}{d_{p,i}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & r_{p,i} \\ r_{p,i} & 1 \end{bmatrix} \quad \text{und} \quad [P_i] = \begin{bmatrix} e^{k_w \cdot d_i} & 0 \\ 0 & e^{-k_w \cdot d_i} \end{bmatrix}$$

$$\text{mit:} \quad d_{p,i} = \frac{2Z_{L,C}}{Z_{L,C} + Z_M} \quad \text{und} \quad r_{p,i} = \frac{Z_{L,C} - Z_M}{Z_{L,C} + Z_M}$$

$$\text{sowie} \quad Z_C = \frac{Z_0 \cdot \lambda}{2\pi \cdot r}, \quad Z_L = \frac{2\pi \cdot Z_0 \cdot r}{\lambda},$$

$$Z_0 = \mu_0 c = 377 \, \Omega \quad \text{und} \quad Z_M = \sqrt{\frac{i\omega\mu}{\sigma + i\omega\varepsilon}}$$

Dies wird im Folgenden als Kettenmatrixmethode-Nahfeldlösung bezeichnet.

3.1.2 Messung an Materialproben

Die Messung der Schirmdämpfung wurde an einem eigens angefertigtem Materialmuster durchgeführt, welches aus einem Polyamid 6 (Dicke: 2 mm) besteht und mit Kupferfolie (Dicke: ~30 μm) beidseitig beklebt wurde. Der Messaufbau ist in Bild 4 dargestellt und bereits in [2] für die Messung der Schirmdämpfung von Karbonfaserverstärktem Kunststoff (CFK) verwendet worden.

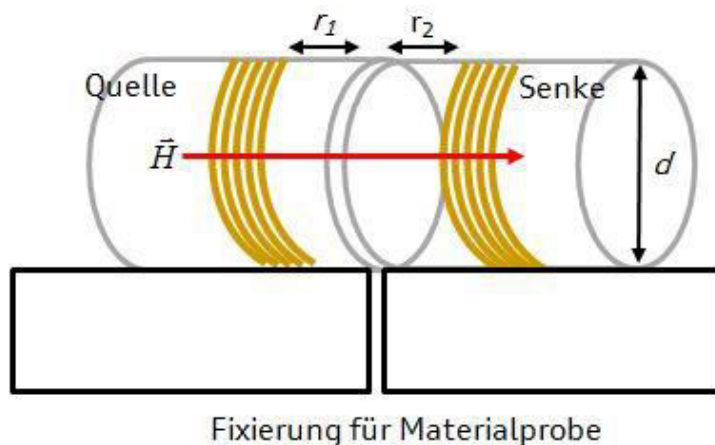


Bild 4: Messaufbau für die Bestimmung der magnetischen Schirmdämpfung von Materialproben

Es wurden zwei Spulen (Quelle, Senke) mit $N = 5$ Wicklungen, $r = 0,0375$ m Spulenradius und $d = 0,085$ m Abstand von Spule zu Spule auf ein Kunststoffrohr gewickelt, welche durch die Materialprobe separiert werden können. Die Schirmdämpfung a ergibt sich dann aus dem Verhältnis der induzierten Spannungen in der Senke ohne ($U_{\text{ind,max}}$) und mit Materialprobe ($U_{\text{ind,sample}}$): $a = 20 \log(U_{\text{ind,max}}/U_{\text{ind,sample}})$.

Die Materialprobe wurde mit ausreichender Fläche (Fläche $a \cdot b$ mit: $a = b = 0,4$ m) gewählt, damit das magnetische Streufeld (Feld außerhalb der Materialprobe) die Messung nicht verfälscht. Der Frequenzbereich, in dem die Messungen durchgeführt wurden, ist: $500 \text{ Hz} < f < 300 \text{ kHz}$.

Das Messergebnis bzw. der Vergleich mit der Kettenmatrixmethode-Nahfeldlösung ist in Bild 5 angegeben.

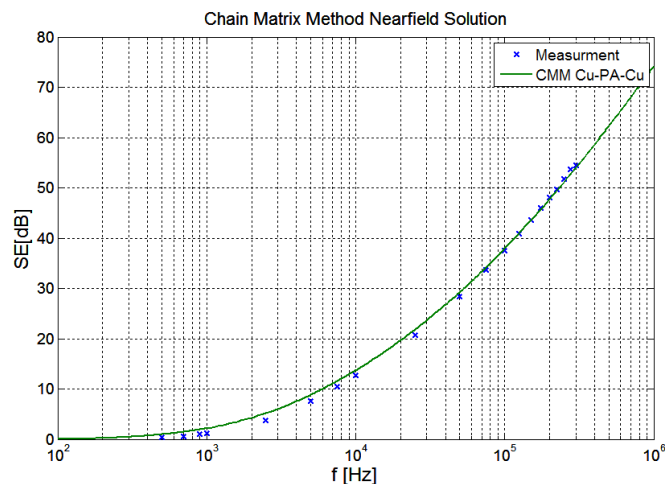


Bild 5: Messergebnis Schirmdämpfung und Vergleich mit Kettenmatrixmethode-Nahfeldlösung

Die Grafik zeigt eine gute Übereinstimmung zwischen Messung und Kettenmatrixmethode-Nahfeldlösung. Die größte Abweichung beträgt ca. 1,5 dB bei 2,5 kHz. Dieser Ansatz ist also zielführend für die Bestimmung der elektromagnetischen Schirmdämpfung im Nahfeld von geschichteten Materialien. Das Modell kann aufgrund des einfachen Aufbaus (Kettenmatrixmethode, Verschaltung von Vierpolen) problemlos erweitert werden.

3.2 Messung weichmagnetischer Eigenschaften

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 den in Kap. 3.1 beschriebenen 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 6 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).

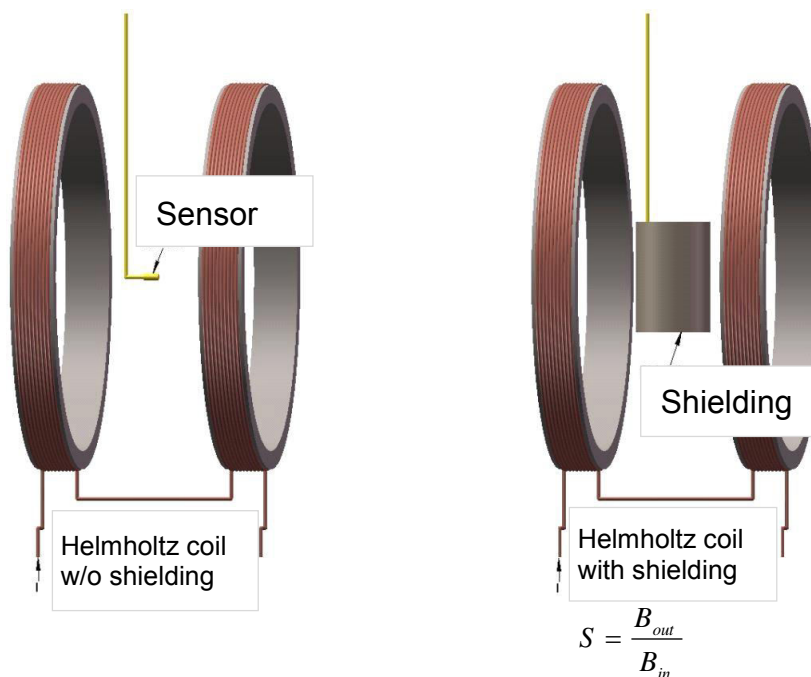


Bild 6: Prinzip einer Schirmfaktormessung

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 7 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).

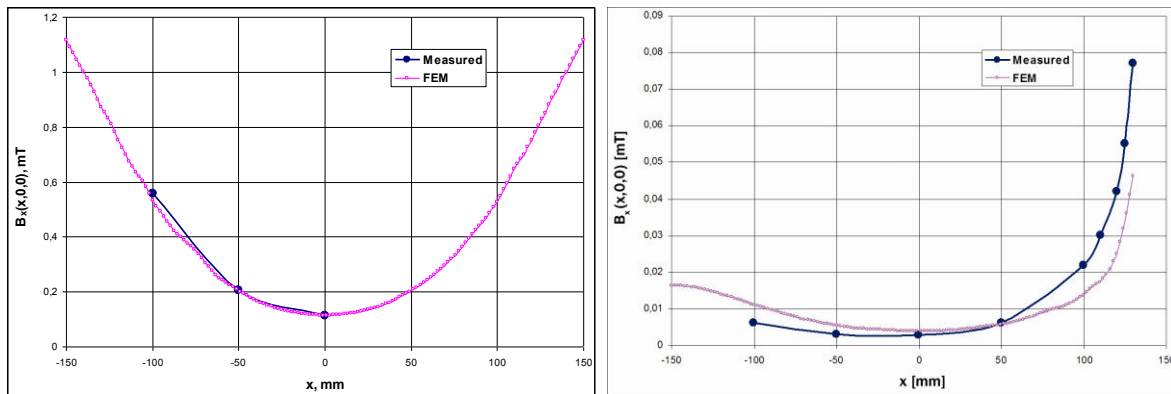


Bild 7: Vergleich einer FEM-Berechnung des magnetischen Abschirmfaktors mit der ortsabhängigen Messung an einem um die x -Achse rotationssymmetrischen Zylinder ohne (links) und mit Deckeln (rechts; Deckelöffnung \varnothing 20 mm bei $x = 150$ mm)

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 8 zeigt ein Messsystem, das diese Anforderungen erfüllt.



Bild 8: Messsystem für Störfeldmessungen mittels 3D-Searchcoils

Literaturverzeichnis

[1] Wolfesperger, H. A. (Hrsg.), *Elektromagnetische Schirmung*, 2. Auflage, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2008

[2] Kühn, M., John, W., Weigel, R., *Bestimmung der Schirmdämpfung von isotropen und anisotropen Materialien auf Basis von Messungen und analytischen Modellen*, 5. GMM Fachtagung Automotive meets Electronics, Dortmund, 2014